

Tiefbohrtechnik

Bohrlochkonstruktion

Von Dr.-Ing. Rudolf Schwarzmeier
und Ing. Horst Voigt

Mit 5 Bildern und einer Tabelle



VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie
Leipzig

Herausgegeben von der VVB Erdöl-Erdgas, Gommern
Leitung und Organisation: Abt. Bildung

Nur für die Qualifizierung im Bereich des Ministeriums
für Geologie bestimmt

Gutachter: Dipl.-Ing. Kurt Krause
 Ing. Karl-Heinz Schuldt
 Ing. Hans-Jürgen Geisler

1. Auflage

© VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1977

VLN 152-915/42/77

LSV 3183

Printed in the German Democratic Republic

Gesamtherstellung VEB Druckerei "Thomas Müntzer",

Bad Langensalza

Redaktionsschluß: 20. 10. 1976

Bestell-Nr. 541 310 8

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung und Definition	5
2.	Aufgabe und Bedeutung der Bohrloch- konstruktionen	7
3.	Beschreibung einer Bohrlochkonstruktion	10
3.1.	Bezeichnung, Darstellung, Klassifizierung	10
3.2.	Elemente der Bohrlochkonstruktionen	12
3.3.	Konstruktions- und Qualitätsparameter	15
4.	Rohrtouren	20
4.1.	Allgemeine Aufgaben und Gliederung	20
4.2.	Standrohrtour	21
4.3.	Leitrohrtour	22
4.4.	Technische Rohrtouren	23
4.5.	Technische Rohrtouren	23
5.	Bohrlochkopf	25
6.	Liner	27
7.	Varianten des Verrohrungsschemas	30
8.	Auswahl und Projektierung der Bohrloch- konstruktionen	36
9.	Festigkeit der Bohrlochkonstruktionen	43
10.	Vereinfachung und Erleichterung der Bohrlochkonstruktionen	47
11.	Einige Besonderheiten von Bohrlochkonstruk- tionen bei Gasbohrungen und übertiefen Bohrungen	49
	Literatur- und Quellenverzeichnis	54

1. Einleitung und Definition

In der vorliegenden Fachbroschüre wird die Problematik der Bohrlochkonstruktionen von Tiefbohrungen auf Erdöl und Erdgas behandelt. Es werden Aufgabe, Bedeutung und die Funktion der einzelnen Elemente von Bohrlochkonstruktionen beschrieben und jene geologischen, bohr-, test- und fördertechnischen Faktoren genannt, die bei der Auswahl einer Bohrlochkonstruktion zu berücksichtigen sind. Die Broschüre enthält eine Zusammenstellung möglicher Konstruktionsvarianten und behandelt praktische Probleme der Auswahl von Bohrlochkonstruktionen für Gasbohrungen und Übertiefe Bohrungen.

Unter dem Begriff der Bohrlochkonstruktion versteht man den Aufbau (Konstruktion) einer fertiggestellten Tiefbohrung. Eine Tiefbohrung besteht in diesem Sinne aus Rohrtouren, aus dem Zementsteinmantel der Rohrtouren und dem Bohrlochkopf, in dem die Rohrtouren mechanisch verankert (aufgehängt) sind.

Wie die Konstruktion allgemein (beispielsweise einer Maschine), so ist auch die Bohrlochkonstruktion die Gesamtheit aller Abmessungen und Eigenschaften der verrohrten und zementierten Tiefbohrung.

Als Abmessungen treten Teufenmaße (Beispiel: Rohrschuhteufe) und Diametralmaße (Beispiel: Futterrohrdurchmesser, Rohrwanddicke, Zementmanteldicke) und als Eigenschaften beispielsweise die mechanische Festigkeit, die Dichtheit und Korrosionsfestigkeit auf.

Während die Abmessungen von Bohrlochkonstruktionen relativ einfach beschrieben und erfaßt werden können, sind die Eigenschaften und somit die Auswirkungen der Bohrlochkonstruktionen sehr vielseitig und weitreichend.

So berücksichtigen die Bohrlochkonstruktionen die Sicherheit der Bohrarbeiten (beispielsweise gegen gefährliche Eruptionen von Erdöl und Erdgas), die Bergbausicherheit (Lagerstätten-schutz), die mögliche Förderrate des Erdöls oder Erdgases im Falle des Fündigwerdens der Bohrung (ein großer Enddurchmesser

gestattet höhere Förderraten), die Bohrgeschwindigkeit (diese hängt vom Durchmesser des Bohrloches ab), die Auswahl der Bohranlage (schwere Bohrlochkonstruktionen erfordern leistungsstärkere Bohranlagen mit höherer Tragfähigkeit), die Auswahl des Bohrstranges u. v. a. Sie bestimmt letztlich die gesamte materialtechnische und ausrüstungstechnische Basis eines Bohrbetriebes.

Die Bohrlochkonstruktion ist entscheidend für die Sicherheit, den Erfolg und somit die Wirtschaftlichkeit der Bohr-, Test- und Förderarbeiten.

Wenn die Bohrlochkonstruktion so vielseitige und weitreichende geologische, technische und ökonomische Auswirkungen hat, so gibt es andererseits sehr viele geologische, technische und ökonomische Aspekte und Faktoren, die bei der Auswahl einer Bohrlochkonstruktion im Rahmen der Projektierung einer Tiefbohrung berücksichtigt werden müssen.

Die Vielzahl der Aspekte und Einflußfaktoren zwingt in der Praxis der Tiefbohrtechnik den Techniker und Geologen zu Kompromißlösungen. So ist beispielsweise eine sehr sichere Bohrlochkonstruktion auch sehr teuer oder eine sehr "schnelle" Bohrlochkonstruktion sehr riskant.

Mit zunehmender Zahl von Bohrungen in einem Bohrgebiet und der damit verbundenen genaueren Kenntnis der geologischen Verhältnisse und technischen Möglichkeiten vollzieht sich die Entwicklung einer Bohrlochkonstruktion. Die Bohrlochkonstruktion wird vollkommener, einfacher, leichter und wirtschaftlicher. So ist es die Regel, daß Erstbohrungen in einem Gebiet (Suchbohrungen) oder auf einer fündigen Struktur (Erkundungsbohrungen) eine schwerere Bohrlochkonstruktion haben als Folgebohrungen beim Aufschluß der Lagerstätte (Produktionsbohrungen). Auch Bohrungen mit einer großen Endteufe sind allgemein durch eine schwere Bohrlochkonstruktion, d. h. durch eine größere Anzahl eingebauter Futterrohtouren mit großen Einbauteufen gekennzeichnet.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Aufgaben und die Bedeutung von Bohrlochkonstruktionen für das sichere und wirtschaftliche Abteufen von Tiefbohrungen und für den Auf-

schluß und den Abbau von Lagerstätten beschrieben. Es werden die möglichen Verrohrungsvarianten und spezielle Probleme der Projektierung im Detail erörtert. Besondere Aufmerksamkeit wird dabei den Gasbohrungen und den übertiefen Bohrungen gewidmet, da solche Bohrungen zum Bohrprogramm des Industriezweiges Erdöl-Erdgas der DDR gehören.

2. Aufgaben und Bedeutung der Bohrlochkonstruktion

Ausgehend von der im Abschnitt 1. gegebenen Begriffserklärung ergeben sich für eine Bohrlochkonstruktion verschiedene geologische, technische und ökonomische Aufgaben.

Versteht man unter dem Begriff der Bohrlochkonstruktion den Zustand der fertiggestellten Tiefbohrung (Abmessungen und Eigenschaften), so muß man als wesentlichste Aufgabe (Hauptaufgabe) die Sicherung der Aufgabenstellung der Bohrung selbst sehen. So muß beispielsweise die Bohrlochkonstruktion einer Produktionsbohrung eine hohe Produktivität der Sonde sichern, die Bohrlochkonstruktion einer Suchbohrung dagegen den geologischen Aufschluß.

Aus dieser Hauptaufgabe leiten sich spezielle Aufgaben ab, die sich allgemein wie folgt formulieren und eingruppiieren lassen:

- a) Geologische Aufgaben: Sicherung des geologischen Aufschlusses in der geforderten Qualität (Erreichen der projektierten Teufe bzw. des Zielhorizontes, Durchführbarkeit bohrlochgeophysikalischer Meßarbeiten und notwendiger Testarbeiten, Kerngewinn und Kerndurchmesser)
- b) Bohrtechnische Aufgaben: Gewährleistung einer komplikationsfreien und wirtschaftlichen Durchführung der Bohrarbeiten (niedrige Bohrkosten bei geringem Materialeinsatz, kurze Bohrzeiten durch Verwendung leistungsfähiger Bohrwerkzeuge, qualitativer Kernwerkzeuge, Bohrstränge und Bohrausrüstungen allgemein)
- c) Fördertechnische Aufgaben (für Produktionsbohrungen): Gewährleistung des wirtschaftlichen Abbaues einer Erdöl- oder Erdgaslagerstätte (Aufschluß der produktiven Spei-

cherhorizonte ohne Schädigung und Blockierung, Installation der erforderlichen untertägigen Förderausrüstung, Reparierbarkeit der Sonde, Schichtentrennung im Speicherbereich zur Vermeidung von beispielsweise Wasserzuflüssen, hohe Förderraten)

- d) Aufgaben der Bergbausicherheit: Gewährleistung der Schichtentrennung über den Zeitraum der Bohr-, Test- und Förderfähigkeit sowie beim Verfüllen des Bohrloches
- e) Aufgaben der technischen, allgemeinen und öffentlichen Sicherheit sowie des Umweltschutzes: Vermeidung offener Eruptionen oder Griffonbildungen, Kontrollierbarkeit des Zustandes der Bohrungen beispielsweise durch Überwachung des Ringraumdruckes u. a.

Die angeführten Aufgaben der Bohrlochkonstruktion stehen zueinander in Wechselbeziehungen. Das gilt für die Aufgaben innerhalb einer Gruppe wie auch für Aufgaben aus verschiedenen Gruppen. So können beispielsweise niedrigere Bohrkosten nur dann erreicht werden, wenn auch leistungsfähige Bohrwerkzeuge eingesetzt werden können. Die Leistungsfähigkeit der Bohrwerkzeuge hängt vom Durchmesser, also von der Bohrlochkonstruktion ab. Ist die Bohrlochkonstruktion so gewählt, daß schlecht bohrbare Horizonte von größerer Mächtigkeit mit einem ungeeigneten Meißeldurchmesser abgeteuft werden müssen (z. B. Rollenmeißel kleiner 7"), so erfüllt die Bohrlochkonstruktion nicht die Aufgabe bezüglich der geringen Bohrzeit, weil zu langsam gebohrt wird, oder die Aufgabe bezüglich des geringen Materialeinsatzes, weil unter Umständen aufgrund der geringen Meißelstandlängen zu viele Meißel verbraucht werden. Die Komplexität der Aufgaben der Bohrlochkonstruktion wird am deutlichsten dadurch erkennbar, daß die Erfüllung der bohrtechnischen Aufgaben die Voraussetzung für die Erfüllung der geologischen oder fördertechnischen Aufgaben darstellt. Treten beim Bohren ernsthafte Komplikationen auf, weil infolge einer falschen Bohrlochkonstruktion beispielsweise druckstarke Laugezuflüsse nicht unter Kontrolle gebracht werden können, so daß diese Komplikationen zur Aufgabe der Bohrung führen, dann sind auch geologische Aufgaben nicht mehr zu erfüllen.

Aus der Vielgestaltigkeit und Komplexität der Aufgaben der Bohrlochkonstruktion erwächst ihre große Bedeutung für den Erfolg der Bohrarbeiten und letztlich der geologischen Suche und Erkundung.

Viele der genannten Aufgaben können in der Praxis nur über Kompromisse gelöst werden. Zugunsten der geologischen Aussage oder der Sicherheit muß insbesondere bei Suchbohrungen die bohrtechnische Leistung zweitrangige Bedeutung einnehmen. Kurze Bohrzeiten nutzen nichts, wenn dadurch die Sicherheit und der geologische Erfolg (Beispiel: Aussage zur Fündigkeit) in Frage gestellt sind. Bei Produktionsbohrungen kommen der Bohrleistung und der Wirtschaftlichkeit der Bohrarbeiten insbesondere dann eine größere Bedeutung zu, wenn in kurzer Zeit eine Lagerstätte durch eine größere Anzahl von Bohrungen erschlossen werden soll.

Aus diesem Beispiel ist zu erkennen, daß es in der Vielzahl der Aufgaben, die eine Bohrlochkonstruktion hat, eine gewisse Rangfolge gibt. Die Priorität der einzelnen Aufgaben muß gewahrt bleiben, wenn im Rahmen der Projektierung von Tiefbohrungen eine Bohrlochkonstruktion (Optimalvariante) festgelegt wird.

In der Praxis der Tiefbohrstätigkeit wird nicht selten, was das Verrohrungsschema, speziell die Durchmesserreihe von Futterrohren und Bohrwerkzeugen anbetrifft, die Kompromißlösung soweit getrieben, daß sich Optimalreihen für Bohrungen mit unterschiedlichsten Aufgaben herausbilden. So können beispielsweise mit der Futterrohrdurchmesserreihe 20" (18 5/8, 18 3/4) x 13 3/8" (13 5/4) x 9 5/8" x 7" x 5" in der DDR sehr tiefe Suchbohrungen aber auch Gas-Produktionsbohrungen erfolgreich abgeteuft werden. Solche Optimalreihen verringern den ohnehin sehr hohen materialtechnischen Aufwand eines Bohrbetriebes und vereinfachen die Organisation der Bohrarbeiten. Es entstehen optimale Sortimente von Bohrwerkzeugen, Bohrsträngen, Bohr- und Futterrohrstrangzubehör (Stabilisatoren, Zementiermuffen, Zentralisatoren, Linerhänger u. a.), Fangwerkzeuge, Bohrlochsicherungen, Kolonnenköpfe u. a. Ausrüstungen. Nicht zuletzt leitet sich aus dieser Verflechtung heraus für die Bohrlochkonstruktion eine große ökonomische Bedeutung ab. Die

Bohrlochkonstruktion ist ausschlaggebend für das geologische, technische und wirtschaftliche Ergebnis der Bohrung.

3. Beschreibung einer Bohrlochkonstruktion

3.1. Bezeichnung, Darstellung, Klassifizierung

Die Bezeichnung einer Bohrlochkonstruktion erfolgt im allgemeinen durch das dieser Konstruktion zugrundeliegende Verrohrungsschema - einer Aufzählung der Durchmesser (Größen) der Futterrohrtouren in der Reihenfolge ihres Einbaues.

Beispiel: 18 5/8" - 13 3/8" - 9 5/8" - 7" - 5"

Das angeführte Beispiel des Verrohrungsschemas sagt aus, daß eine 18 5/8"-Rohrtour (bestehend aus Futterrohren der Nenngröße 18 5/8") als Leit- oder Ankerrohrtour, die 13 3/8"-Rohrtour als erste technische Rohrtour, die 9 5/8"-Rohrtour als zweite technische Rohrtour und die 5"-Rohrtour als End- oder Produktionsrohrtour auftreten.

Um die Bohrlochkonstruktion eindeutiger zu beschreiben, muß die obige Bezeichnung des Verrohrungsschemas durch folgende Angaben ergänzt werden:

- durch die Einbauteufe (oder Rohrschuhteufe) jeder Rohrtour
- durch den Durchmesser und die Teufe des Bohrloches, in das die Rohrtouren eingebaut werden (Bohrlochteufe und Rohrschuhteufe brauchen nicht übereinzustimmen)
- durch das Zementationsintervall jeder Rohrtour (Zementkopfteufe)
- durch das Verrohrungsintervall für den Fall, daß eine Rohrtour als Liner auftritt (Rohrschuhteufe und Teufe des Linerkopfes)

Mit diesen Angaben ist eine Bohrlochkonstruktion hinreichend dargestellt. Diese Angaben reichen aus, um eine Skizze anzufertigen (Bild 1). Aus einer solchen Skizze ist der allgemeine Aufbau des verrohrten und zementierten Bohrloches erkennbar. Für den konkreten Fall einer Tiefbohrung erscheinen auf dieser Skizze die Zahlenangaben für die Rohrschuhteufe RS, Ze-

mentkopfteufe ZK, Linerkopfteufe LK, Bohrlochteufe BL in Meter und der Rohrtourdurchmesser und Bohrlochdurchmesser in Millimeter oder Zoll. Bei den genannten Angaben handelt es sich ausschließlich um Abmessungen, nicht um die Eigen-

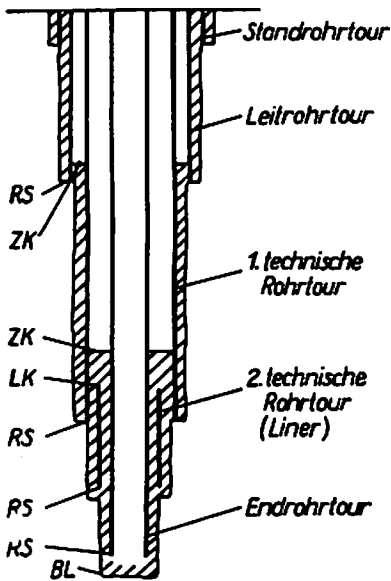


Bild 1
 Skizze einer Bohrlochkonstruktion
 RS Rohrschuhteufe
 BL Bohrlochteufe
 ZK Zementkopfteufe
 LK Linerkopf

schaften der Konstruktion, wie Festigkeit und Dichtheit. Zur Kennzeichnung der Eigenschaften der Bohrlochkonstruktion reicht die Angabe des Rohrtourdurchmessers nicht aus. Es sind Angaben über die Wanddicke, Materialgüte und Verbindungsart der Futterrohre und deren Komplettierung mit Zusatzausrüstungen (Zementiermuffen, Zentralisatoren, Kratzer) u. a. Angaben erforderlich.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß die übliche Art der Bezeichnung einer Bohrlochkonstruktion unter Angabe des Verrohrungsschemas und die übliche Form der zeichnerischen Darstellung (Skizze Bild 1) die Bohrlochkonstruktion einer Tiefbohrung nur in ihren Hauptabmessungen nicht aber mit ihren gesamten Eigenschaften erfassen kann.

Eine Klassifizierung der Bohrlochkonstruktionen wird allgemein nach der Anzahl der technischen Rohrtouren vorgenommen. So unterscheidet man beispielsweise nach N. I. SCHATZOW /1/ folgende Konstruktionstypen:

- Einkolonnenkonstruktion (die Bohrung hat keine technische Rohrtour - s. Bild 4a)
- Zweikolonnenkonstruktion (die Bohrung hat eine technische Rohrtour - s. Bild 4b)
- Mehrkolonnenkonstruktion (die Bohrung hat zwei oder mehrere technische Rohrtouren - s. Bild 4c bis f).

Allgemein üblich sind die Begriffe der einfachen, leichten und der schweren oder komplizierten Bohrlochkonstruktion. Unter einer einfachen Konstruktion versteht man eine Bohrlochkonstruktion ohne oder mit nur einer technischen Rohrtour. Im Falle mehrerer technischer Rohrtouren, die zudem noch in Sektionen, als kombinierte Rohrtouren oder Liner eingebaut werden, spricht man von einer komplizierten Bohrlochkonstruktion. Unter einer leichten Bohrlochkonstruktion versteht man solche, die aufgrund der geringen Rohrtourdurchmesser und Rohrwanddicken ein geringes Gewicht (Gesamtgewicht aller Rohrtouren) haben.

Eine Bohrlochkonstruktion, die einfach und leicht ist, ist im Hinblick auf den Rohrverbrauch am wirtschaftlichsten. Auf die Vereinfachung und Erleichterung einer Bohrlochkonstruktion wird im Kapitel 10. näher eingegangen.

3.2. Elemente der Bohrlochkonstruktion

Im vorliegenden Abschnitt sollen die Bestandteile (Elemente) der Bohrlochkonstruktion und deren typischen Merkmale betrachtet werden.

Futterrohrtouren

Die konzentrisch zueinander in das offene Bohrloch eingelassenen Futterrohrtouren (auch Futterrohrstränge oder Futterrohrkolonnen genannt) sind die wichtigsten Bestandteile der fertiggestellten Tiefbohrung (Sonde). Sie bilden deren Gerüst. Sie

geben der Bohrung die notwendige mechanische Festigkeit gegen die beim Bohren, Testen und beim Fördern auftretenden hohen Belastungen.

Die Anzahl der Rohrtouren schwankt je nach den anzutreffenden geologischen und den vorhandenen technisch-technologischen Bedingungen zwischen zwei und sechs. Jede der Rohrtouren hat spezifische Aufgaben (s. Kapitel 4.).

Die Dimensionen der Rohrtouren (Durchmesser) entsprechen dem Nenndurchmesser der verwendeten Futterrohre. Werden Futterrohre unterschiedlichen Durchmessers für eine Rohrtour verwendet, so spricht man von einer kombinierten Rohrtour. Wird die Rohrtour nicht durchgehend eingebaut, so spricht man unabhängig davon, ob sie aus Futterrohren eines oder mehrerer Durchmesser besteht, von einer sektionierten Rohrtour. Eine Rohrtour kann also durchgehend oder in zwei oder in mehreren Sektionen eingebaut werden.

Wird eine Rohrtour nur zur Überdeckung eines Bohrlochabschnittes eingebaut und reicht nicht bis übertage, so nennt man diese Rohrtour eine "verlorene Rohrtour" oder einen Liner (s. Kapitel 6.).

Die kombinierte Rohrtour hat den Vorteil, daß aufgrund ihres kleinen Gesamtgewichtes Futterrohre mit einer geringeren Zugfestigkeit verwendet werden können. Der Nachteil einer Durchmesserkombination liegt darin, daß im unteren Teil der Rohrtour mit dem kleineren Durchmesser immer eine Verengung eintritt, die zu einem Durchmesserverlust der Endrohrtour führt.

Nicht selten wird die kombinierte Rohrtour nach einem Liner eingebaut (s. Bild 4e), der bereits eine Durchmessererringerung verursacht hat, so daß der oben genannte Nachteil nicht gegeben ist.

Die verschiedenen Arten von Rohrtouren, deren Aufgabe und Bedeutung für die Bohrung und die besonderen Merkmale dieser Rohrtouren werden gesondert in den Kapiteln 4. und 6. geschildert.

Die einzelnen Bestandteile der Rohrtouren selbst (Futterrohre in ihrer Konstruktion, Rohrschuhe, Linerhänger, Zementiermuffen u. a.) sind in den betreffenden Fachbroschüren /3, 4/ näher beschrieben.

Eine Rohrtour wird zementiert, d. h., es wird in den Ringraum zwischen Futterrohräußenwand und Bohrlochwand eine Zementschlämme eingebracht, die zu einem festen Zementsteinmantel aushärtet.

Die Ausbildung des Zementsteinmantels hat großen Einfluß auf die Qualität der Bohrlochkonstruktion. Der Zementstein muß sich gleichmäßig dick, ringförmig um das Futterrohr legen, am Futterrohr und an der Bohrlochwand gut haften, eine gewisse Druckfestigkeit aufweisen und resistent gegen aggressive Einflüsse der Schichtmedien sein.

Ein gut ausgebildeter Zementstein erhöht die mechanische Festigkeit der Bohrlochkonstruktion und, was seine wesentlichste Aufgabe ist, er dichtet die Ringräume ab, so daß kein Schichtmedium aus einem Horizont in einen anderen, durkschwächeren Horizont abwandern kann. Man spricht davon, daß der Zementstein und somit die Bohrlochkonstruktion die Aufgabe der Schichten-trennung erfüllt.

Bedingt durch die übliche Zementationstechnologie, erstreckt sich der Zementmantel immer vom Rohrschuh bzw. im Fall, daß die Rohrtour eine Schiebemuffe hat, die sich öffnen und schließen kann, von dieser Schiebemuffe aus nach oben bis zum Zementkopf. Der Zementkopf liegt im Regelfall immer in den Rohren (mindestens 50 bis 100 m) der vorherigen Rohrtour. Damit ist die durchgehende (von übertage bis Endteufe) Schichtentrennung gesichert. Die spezifischen Aufgaben des Zementsteines der einzelnen Rohrtouren und deren Zementkopfteufen sind im Kapitel 4. angeführt. Nähere Angaben über die Festigkeit und Dichtheit, die der Zementstein der Bohrung (Sonde) verleiht, enthält Kapitel 9.

Bohrlochkopf

Der Bohrlochkopf einer fertiggestellten Tiefbohrung (Sonde) ist Bestandteil der Bohrlochkonstruktion, da in ihm die Rohrtouren übertage mechanisch befestigt sind und er die unzementierten Ringräume der Rohrtouren dicht verschließt. Der Bohrlochkopf dient der übertägigen Verankerung der Rohrtouren. Alle der Ankerrohrtour folgenden Rohrtouren sind im Bohrlochkopf verankert, und der Bohrlochkopf wiederum ist auf der Anker-

rohrtour (über einen Landeflansch) befestigt, die über ihre gesamte Länge im Gebirge voll einzementiert ist.

Nähere Angaben über den Aufbau und die Aufgaben des Bohrlochkopfes sind in der betreffenden Fachbroschüre /5/ enthalten.

3.3. Konstruktions- und Qualitätsparameter

Im vorliegenden Abschnitt sollen die üblichen Konstruktionsparameter (Verrohrungsschema, Radialsple, Austrittslänge, Radialspleverhältnis) und gebräuchliche Qualitätsparameter einer Bohrlochkonstruktion erläutert werden. Unter einem Verrohrungsschema versteht man die der Bohrlochkonstruktion zugrundeliegende Futterrohr-Durchmesserkombination. Die möglichen Varianten einer solchen Kombination sind im Kapitel 7. umfassend dargestellt.

Unter einem Radialsple versteht man den seitlichen Abstand konzentrisch eingebauter Futterrohre zueinander und zur Bohrlochwand. Die Größe des Radialsples ist bestimmend für die Einbaumöglichkeiten. Je größer das Radialsple ist, um so leichter und tiefer kann eine Rohrtour eingebaut werden. Hohe Radialsple haben jedoch den Nachteil des intensiven Durchmesserverlustes der Bohrlochkonstruktion über die Teufe.

Um die Besonderheiten der Radialsple (Bild 2), ihre Vor- und Nachteile richtig erfassen zu können, müssen diese wie folgt untergliedert werden

- Radialsple zwischen der Außenwand der Rohrmuffe (Verbindung) und der Bohrlochwand (entspricht dem Schneiddurchmesser des Bohrmeißels) - r_1
 $r_1 = 0,5 (D_m - D_M)$
- Radialsple zwischen der Außenwand des Rohres und der Bohrlochwand - r_2
 $r_2 = 0,5 (D_m - D)$

Mit Ausnahme der stumpfgeschweißten Rohrtouren ist r_2 immer größer als r_1 .

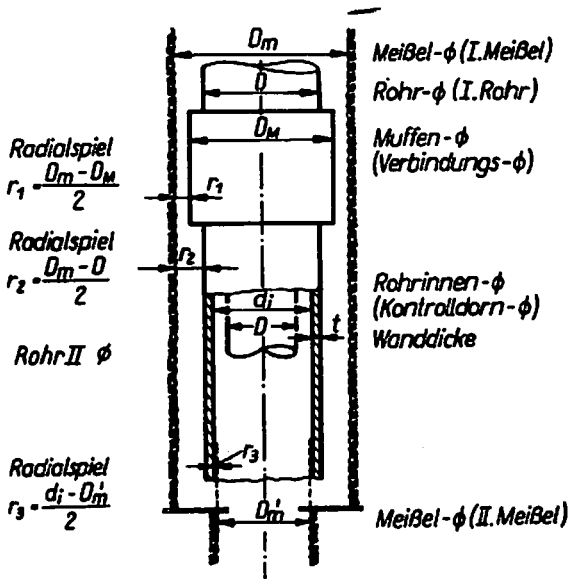


Bild 2
Darstellung der Radial-
spiele /4/

- Radialspiel zwischen der Innenwand des Rohres und dem Bohrmeißel, der durch die Rohrtour eingefahren wird - r_3
 $r_3 = 0,5 (d_i - D_m')$

Das Radialspiel r_1 ist für die Einbaumöglichkeit der betreffenden Rohrtour das entscheidende Spiel. Es läßt sich theoretisch (nach obiger Formel) aber auch für den praktischen Fall errechnen, wenn der Bohrlochdurchmesser durch Auskesselungen größer oder durch Verengungen kleiner ist als D_m . Um den letzteren, für den Erfolg des Rohreinbaues kritischen Fall auszuschließen, wird das Bohrloch vor dem Einbau der Futterrohre sorgfältig nachgeräumt.

Einen wesentlichen Einfluß auf die Einbaumöglichkeit hat die Biegeelastizität des Futterrohrstranges. Sie verringert sich mit der dritten Potenz des Rohrdurchmessers. Großkalibrige Rohrstränge sind also wesentlich steifer, unflexibler als kleinkalibrige Stränge und können nur bei weitaus größeren Radialspielen eingebaut werden. Das gilt umso mehr für krumme Bohrlöcher.

Nach /1/ kann eine Unterteilung der Rohrtouren in flexible bis 9 5/8" Durchmesser) und steife Rohrtouren (10 3/4" und größer) vorgenommen werden.

Von weiterem Einfluß auf das mögliche Radialspiel zwischen Bohrlochwand und Rohrtour sind folgende Faktoren:

- die Form der Außenwand der Rohrverbindung (ein seichter Übergang vom Rohr zur Verbindung wie das beispielsweise bei einer Omegaverbindung der Fall ist) erfordert geringere Radialspiele als ein plötzlicher Übergang einer Standardmuffenverbindung
- die Qualität der Bohrspülung (eine gute Bohrspülung verhindert ein Quellen der Bohrlochwand, setzt keine dicke Kruste ab und verhindert Nachfall)
- die Technologie des Rohreinbaues (Einfahrtgeschwindigkeit, Einbauverfahren, Spülintervalle, Rohreinbauzeit u. a.)

Die Größe des Radialspiels r_1 hängt also von einer Vielzahl konkreter Faktoren ab, die in ihrer Gesamtwirkung erst erkannt werden, wenn im betreffenden Gebiet mehrere Rohrtouren eingebaut bzw. Bohrungen niedergebracht worden sind. Es gibt aber auch allgemeine Angaben über die erforderlichen Mindestwerte des Radialspiels zwischen Rohrverbindung und Bohrlochwand (Tabelle 1).

Tabelle 1. Mindestradialspiele zwischen Rohrmuffe und Bohrlochwand (nach /1/)

Rohrgröße in Zoll	4 1/2	5 1/2	6 5/8	7	8 5/8	11 3/4	13 3/4	16 3/4
	5	5 3/4	7 5/8		9 5/8	12 3/4	13 3/8	
Radialspiel r_1 in mm	15	20	25		30	35	45	50

Das Radialspiel zwischen der Innenwand der Rohrtour und dem Bohrmeißel, der durch die Rohrtour eingefahren wird, kann zum Zwecke der Vermeidung eines Durchmesserverlustes der Bohrung minimal gehalten werden. Wichtig hierbei ist, daß

der Schneiddurchmesser des Bohrwerkzeuges bei maximaler Plustoleranz (bis zu 1 mm) gleich oder kleiner als der Kontrolldorndurchmesser jener Rohre der Rohrtour ist, die die größte Wanddicke haben. Im kritischen Falle muß auf die Verwendung dickwandiger Futterrohre in der Rohrtour verzichtet werden (zu Kosten höherer Materialgüten).

Zahlenwerte über die in der Praxis üblichen Radialspiele r_1 und r_3 können aus der Skizze des Bildes 3 auf der Seite 33 entnommen werden. Diese maßstabsgerechte Skizze gibt anschaulich Übersicht zu den Radialspielen bei verschiedenen Varianten des Verrohrungsschemas.

Unter einer Austrittslänge versteht man jene Bohrstrecke als Teufenintervall, die aus einer eingebauten, zementierten Rohrtour herausgebohrt wird. Die Austrittslänge hängt in hohem Maße von den geologischen Verhältnissen ab und kann wenige Meter aber auch 2000 und mehr Meter betragen.

Spricht man von der Austrittslänge einer Rohrtour L_A , so versteht man darunter die Teufendifferenz zwischen dem Rohrschuh dieser Rohrtour und dem Rohrschuh, aus dem diese Rohrtour heraus in ein offenes Bohrloch eingebaut wird.

Da die Austrittslänge der Rohrtour vom Radialspiel zwischen Rohrtour und Bohrlochwand abhängt (sie hängt auch von der Form der Rohrverbindung, von der Neigung und Krümmung des Bohrloches sowie von anderen Faktoren ab), ist das Verhältnis von Radialspiel r_2 zur Austrittslänge L_A ein Maß für den Verrohrungserfolg einer Tiefbohrung.

Dieses Verhältnis ($r_2 : L_A$) nennt man das Radialspielverhältnis.

Um die Qualität einer Bohrlochkonstruktion bezüglich ihrer Effektivität und des Materialeinsatzes (Futterrohre, Zement, Bohrspülung, Bohrwerkzeuge u. a.) einschätzen zu können, bedient man sich folgender Qualitätsparameter

- spezifisches Bohrlochvolumen v_0 in m^3 je m
- spezifischer Zementverbrauch q_2 in kg je m
- spezifischer Futterrohrverbrauch q_0 in kp je m

Das spezifische Bohrlochvolumen ist das Verhältnis des Gesamtvolumens V des Bohrloches im unverrohrten, nicht ausgekesselten Zustand in m^3 zur Endteufe T der Bohrung in m .

$$v_0 = \frac{V}{T} \text{ in } m^3 m^{-1}$$

Dieser Qualitätsparameter ist ein Maß für die Größe des durchschnittlichen Durchmessers einer Tiefbohrung. Je komplizierter die Konstruktion ist, um so größer ist v_0 . Der spezifische Futterrohrverbrauch ist das Verhältnis des Gesamtgewichtes G aller in das Bohrloch eingebauten Rohrtouren (Gewicht in Luft, d. h. ohne Auftrieb) in kp zur Endteufe der Bohrung in m .

$$q_0 = \frac{G}{T} \text{ in } kp m^{-1}$$

Dieser Parameter ist ein Maß für den Verbrauch an Futterrohren. Je komplizierter die Bohrlochkonstruktion ist (im Falle komplizierter oder unbekannter geologischer Verhältnisse und großer Teufen) und je größer der gewählte Enddurchmesser, um so größer ist q_0 . Auf diese Weise schwankt der spezifische Futterrohrverbrauch in den Grenzen von 30 bis 150 $kp m^{-1}$.

Der spezifische Zementverbrauch ist das Verhältnis der verbrauchten Zementmenge (Trockenmenge) bei nicht ausgekesseltem Bohrloch zur Endteufe der Bohrung. Er hängt im wesentlichen vom Bohrlochdurchmesser, vom Radialspiel r_2 und von den Zementkopfteufen der Rohrtouren ab.

Die aufgezählten Parameter können Qualität und Effektivität einer Bohrlochkonstruktion immer nur unter Berücksichtigung anderer, konkreter Bedingungen kennzeichnen. Allgemein gilt, daß mit der Reduzierung der Größen v_0 , q_0 und q_2 eine Bohrlochkonstruktion besser und effektiver wird. So ist man in jedem Bohrgebiet bestrebt, mit zunehmenden Erfahrungen über eine Reduzierung von v_0 , q_0 und q_2 einen ökonomischen Effekt zu erzielen.

In der Praxis sind diesem ökonomischen Effekt häufig deutlich erkennbare Grenzen gesetzt. So stößt beispielsweise eine Reduzierung des spezifischen Zementverbrauches auf eine hohes

Risiko bezüglich der Bergbausicherheit. Eine Verringerung von v_0 auf Werte, die einem Bohrlochdurchmesser von weniger als 190 bis 150 mm entsprechen, führt zu einer Verringerung der Bohrleistungen in einer Tiefbohrung, die so groß ist, daß der ökonomische Effekt der Einsparung an Futterrohren völlig zu-nichte gemacht wird.

Daß die aufgezählten Qualitätsparameter allein keine umfassende Einschätzung der Qualität einer Bohrlochkonstruktion zulassen, soll noch daran verdeutlicht werden, daß neben dem Gewicht der Futterrohre auch deren Konstruktion (Verbindung) und Güte (Stahlgüte, Korrosionsbeständigkeit) ein entscheidendes Qualitätsmerkmal darstellen.

4. Rohrtouren

4.1. Allgemeine Aufgaben und Gliederung

Das bestimmende Element einer Bohrlochkonstruktion ist die Rohrtour. Die Futterrohre bilden das Gerüst der fertiggestellten Tiefbohrung. Sie geben der Bohrung (Sonde) die notwendige mechanische Festigkeit und Dichtheit, indem sie die hohen Belastungen, die beim Bohren, Testen und Fördern auftreten, sicher aufnehmen. Der sie umschließende Zementmantel übernimmt lediglich eine Stützfunktion (s. auch Abschnitt 9. - Festigkeit der Bohrlochkonstruktion).

Durch spezifische Aufgaben gekennzeichnet, untergliedert man die in einer Bohrung vorkommenden Rohrtouren unabhängig vom absoluten Wert des Durchmessers und der Einbautiefe in Standrohre (Standrohrtouren), Leitrohrtour (oder Ankerrohrtour), technische Rohrtouren (auch als Zwischenrohrtouren bezeichnet) und Endrohrtour (bei Produktionsbohrungen als Produktionsrohrtour bezeichnet).

Der vor Aufnahme der Erdöl- oder Erdgasförderung in die fertiggestellte Bohrung einzubauende Steigrohrstrang (oder Tubingstrang) zählt nicht zur Bohrlochkonstruktion. Er dient lediglich der Ausrüstung der Sonde. Auch das Hilfsstandrohr zählt nicht zur Bohrlochkonstruktion. Es ist nur zur Aufnahme der Bohrarbeiten (Herstellung des Spülungsumlaufes) notwendig.

In jeder Tiefbohrung trifft man, unabhängig von der projektierten Endteufe und der Größe des Verrohrungsschemas, eine Standrohrtour und eine Leitrohrtour an. Die Anzahl der technischen Rohrtouren kann zwischen null und vier differieren. Hierbei spielen die geologischen Verhältnisse und die projektierte Endteufe eine ausschlaggebende Rolle. Eine Endrohrtour wird in Such- und Erkundungsbohrungen nur dann eingebaut (häufig auch nicht bis zur Sohle des Bohrloches), wenn im Falle einer zu vermutenden Fündigkeit Testarbeiten durchgeführt werden müssen. Produktionsbohrungen haben dagegen immer eine Produktionsrohrtour. Die Belastungen, denen die verschiedenen Rohrtouren in einer Tiefbohrung beim Verteufen, beim Testen und beim Fördern ausgesetzt sind und die Festigkeitsmerkmale dieser Rohrtouren sind in der Fachbroschüre "Futterrohre" /4/ detailliert beschrieben.

4.2. Standrohrtour

Standrohrtouren oder das Standrohr (im Falle, daß auf Grund der geringen Einbauteufe nur ein einziges Rohr zum Einsatz kommt) werden bei großem Durchmesser (40" bis 28") in Teufen mitunter bis 100 m eingebaut. Sie verhindern Auswaschungen und Nachfall des Lockergebirges und schützen das Fundament der Bohranlage, speziell des Bohrturmes, vor Unterspülungen.

Standrohre werden über ihre gesamte Länge einzementiert, dabei wird die Zementschlämme nicht selten direkt in den Ringraum einzirkuliert. Die Länge der Standrohrtour kann auch nach technischen Gesichtspunkten bestimmt werden. Sie muß mindestens so lang sein, daß beim Ausbau des Bohrstranges der Spülungsspiegel nicht unter den Rohrschuh absinken kann. Damit soll verhindert werden, daß die Bohrlochwand zerstört wird. Im Regelfall wird das Bohrloch jedoch beim Gestängeausbau immer mit Bohrspülung aufgefüllt.

Das ist auch deshalb wichtig, weil die großkalibrigen Standrohrtouren eine sehr geringe Außendruckfestigkeit haben und leicht einbeulen können.

Treten bei komplizierten geologischen Verhältnissen, etwa im Caprockgebirge eines Salzstockes, unvorhergesehen Komplikationen auf (z. B. Spülungsverluste), die nicht wirkungsvoll bekämpft werden können, so muß mitunter noch eine Standrohrtour eingebaut werden.

Standrohr Touren sind in der Regel aus geschweißten Rohren (längs- und spiralförmig) zusammengesetzt. Der aus dem Kellerboden herausragende Teil der Standrohrtour wird nach erfolgtem Einbau und Zementation der Leitrohrtour entfernt (abgebrannt). Der einzementierte Teil verbleibt im Bohrloch und hat dort keine weiteren Aufgaben.

4.3. Leitrohrtour

Leitrohr Touren haben einen Durchmesser von 20" bis 8 5/8" und werden, aus nahtlos gewalzten Futterrohren zusammengesetzt, in sehr unterschiedliche Teufen (100 bis 1000 m) eingebaut. Auch sie werden über ihre gesamte Länge zementiert. Mit der Leitrohrtour wird in der Regel das unverfestigte Deckgebirge verrohrt (Ton, Kreide, Mergel, Sande u. a.), in dem nicht selten auch bohrtechnische Komplikationen entstehen können (z. B. Spülungsverluste). Die Einbauteufe wird deshalb von der Festigkeit des Gebirges und der Stabilität der Bohrlochwand bestimmt. Die Leitrohrtour überhimmelt gewisse Aufgaben zur Stabilisierung der Bohrlochrichtung. Hieraus leitet sich auch ihre Bezeichnung ab. In vertikalen Bohrungen muß sie ohne Abweichung von der Senkrechten sein.

Das ist eine wichtige Voraussetzung für den komplikationslosen Ablauf der Bohrarbeiten (kein Neigungsaufbau, keine Schlüssellochbildungen, ruhiger Lauf der Bohrgarnitur).

Leitrohr Touren haben auf Grund ihres relativ großen Durchmessers keine hohe Außendruck- und Innendruckfestigkeit. Die zulässige Lehrteufe ist begrenzt, Aus ihr heraus werden in der Regel auch keine Spülungsverlusthorizonte oder druckstarke Zuflußhorizonte angebohrt.

Wird auf der Leitrohrtour der Landflansch für den Bohrlochkopf und die Bohrlochsicherung montiert - in diesem Falle rechnet man mit dem Antreffen druckstarker Horizonte - so nennt man

diese Rohrtour auch Ankerrohrtour. Sie nimmt dann das Gewicht aller im Bohrlochkopf abgelandeten Rohrlasten einschließlich des Eigengewichtes des Bohrlochkopfes und der Bohrlochsicherung auf. Wenn der Preventer geschlossen ist und das Bohrloch unter Druck steht, so nimmt die Ankerrohrtour die dabei entstehenden Zugkräfte auf.

Da im Falle eines anstehenden Innendruckes in der Ankerrohrtour auch die Bohrlochwand unterhalb des Rohrschuhes dieser Rohrtour belastet wird, muß zur Vermeidung des Aufreißens der Bohrlochwand die Ankerrohrtour so lang sein, daß fraggefährdete Horizonte von ihr überdeckt werden.

4.4. Technische Rohrtouren

Technische Rohrtouren müssen eingebaut werden, wenn die geologischen Verhältnisse bezüglich der auftretenden Drücke und der Stabilität der Bohrlochwand technisch-technologisch nicht beherrscht werden können.

Es gibt heute in der Tiefbohrtechnik keine anderen Mittel zum erfolgreichen Durchteufen von wechselgelagerten druckstarken und druckschwachen Horizonten als den Einbau von Rohrtouren. Die Anzahl solcher technischen Rohrtouren bestimmt die Kompliziertheit der Bohrlochkonstruktion.

Je geringer die technischen und technologischen Möglichkeiten und je komplizierter die geologischen Verhältnisse bezüglich der Stabilität der Bohrlochwand und der Schichtdrücke sind, um so größer ist die Anzahl der erforderlichen technischen Rohrtouren und um so schwerer wird die Bohrlochkonstruktion.

Entsprechend der Vielseitigkeit der Aufgaben, die eine technische Rohrtour haben kann (Abdecken von Nachfallhorizonten, Verlusthorizonten, Zuflußhorizonten, fraggefährdeten Horizonten, Verschleißschutz u. a.), und der sehr unterschiedlichen Einbauteufen werden die technischen Rohrtouren als durchgehende Rohrtouren, kombinierte Rohrtouren, Liner, in einer oder mehreren Sektionen eingebaut und durchgehend bis übertage, teilweise oder in Stufen zementiert.

Es müssen sehr außendruckfeste, zugfeste und innendruckfeste Futterrohre verwendet werden. Die technischen Rohrtouren sind die schwergewichtigsten und verlangen nicht selten die volle Nutzung der Tragfähigkeit der Bohranlage. Das Nichterreichen der geplanten Einbautiefe oder die Beschädigung einer technischen Rohrtour können zur Aufgabe der Bohrung führen. Beim Herausbohren aus den technischen Rohrtouren werden die Futterrohre mechanischen Beanspruchungen durch den Bohrstrang und den Bohrmeißel ausgesetzt (Abrieb der Innenwand). Um ein Lokern der unteren Rohre (über dem Rohrschuh) zu vermeiden, werden diese beim Einbau miteinander verschweißt.

4.5. Endrohrtour

Nach dem Erreichen der Endteufe wird die Endrohrtour eingebaut. Handelt es sich um eine Produktionsbohrung, aus der Erdöl oder Erdgas gefördert werden soll, so nennt man diese Rohrtour auch Produktionsrohrtour. Nachdem die Produktionsrohrtour eingebaut und zementiert ist, ist die Bohrung fertiggestellt und kann getestet bzw. in Produktion genommen werden.

Der Innendurchmesser und die Qualität der Endrohrtour (mechanische Festigkeit, Dichtheit, Korrosionsfestigkeit) bestimmen den Wert der fertiggestellten Bohrung für die Nachfolgearbeiten (Test, Inproduktionsnahme, Förderung).

Endrohrtouren von Tiefbohrungen haben einen Durchmesser von 4 1/2", 5", 5 1/2", 5 3/4", 6 5/8" 7" und 7 5/8" (selten 8 5/8" und 9 5/8") und werden allgemein bis unter den tiefsten aufgeschlossenen, für den Test oder die Förderung vorgesehenen Speicherhorizont eingebaut. Nur in speziellen Fällen des Aufschlusses standfester Speicherhorizonte kann ein Einbau bis zur Oberkante dieses Horizontes erfolgen. Der Allgemeinfall des Speicheraufschlusses sieht jedoch die Überdeckung des Speichers und die Perforation der Endrohrtour im Speicherbereich vor (seltener erfolgt die Ausstattung der Endrohrtour mit vorperforierten Rohren oder Filterrohren). Zementiert wird eine Endrohrtour mindestens bis in den Rohrschuh der letzten technischen Rohrtour. Die Zementation erfolgt dabei

über den Rohrschuh oder über eine Zementiermuffe, die unmittelbar über dem Speicherhorizont steht. Letzteres erfolgt im o. g. Fall des Filterrohreinbaues oder wenn keine Fremdwasserzuflüsse vermutet werden.

Um die unbedingt notwendige Schichtentrennung zwischen Speicherhorizonten mit unterschiedlichem Inhalt (Erdöl, Erdgas, Wasser) und unterschiedlichen Drücken besser zu erreichen, werden zusätzlich zur Zementation des Ringraumes Futterrohr-Außenpacker gesetzt.

An den Zementsteinmantel einer Produktionsrohrtour werden höhere Anforderungen gestellt als an den Zementsteinmantel einer technischen Rohrtour. Der Zementsteinmantel einer Produktionsrohrtour muß neben der Verankerung der Rohrtour eine sehr gute Schichttrennung über einen kurzen Teufenbereich sichern. Das erfordert eine gute Haftung des Zementes an der Bohrlochwand und der Rohraußenwand, die auch durch Perforationsarbeiten nicht zerstört werden darf. Die Haftung des Zementsteines an einer Produktionsrohrtour ist aber sehr problematisch, da in der Rohrtour technologisch bedingte starke Druckschwankungen auftreten (beim Abdrücken, Testen, Inproduktionsetzen, Fördern, Totpumpen u. a.).

Um seitens der Bohrlochkonstruktion den hohen Anforderungen, die an den Zementstein gestellt sind, gerecht zu werden, ist ein ausreichend großes Ringraumspiel notwendig. Dadurch kann eine gute Verdrängung der Bohrspülung durch die aufsteigende Zementschlämme erreicht werden, es können in ausreichender Menge und Qualität Zentralisatoren eingesetzt werden, die den Rohrstrang im Bohrloch zentrieren, und die Zementschlämme kann ohne großen Fließwiderstand gepumpt werden. Letzteres ist wichtig, um die Speicherhorizonte vor großen Druckbeanspruchungen zu schützen, die zu einer Blockierung der Zuflußwege und somit zur Reduzierung der Förderleistung der späteren Sonde führen.

Endrohrtouren werden als durchgehende Rohrtouren mit konstantem aber auch mit kombiniertem Durchmesser eingebaut. Der kombinierte Durchmesser wird dann angewendet, wenn die letzte technische Rohrtour als Liner vorhanden ist. Damit wird der Durchmessererwerb, den ein Liner sichert, genutzt (s. Bild 4e).

Produktionsrohr Touren werden aber auch als Liner eingebaut, wenn die letzte technische Rohrtour nach Erreichen der Endteufe in einem solchen Zustand bleibt (mit ausreichender Festigkeit und Dichtheit, ohne Verschleiß durch die Einwirkungen von Bohrstrang, Bohrspülung und Bohrwerkzeug), der es möglich macht, sie als Produktionsrohrtour zu nutzen.

Die Variante stellt ebenfalls eine Möglichkeit zur Nutzung der Vorzüge eines Liners mit dem Ziel der Bohrlochvergrößerung und folglich der Erhöhung der Produktivität der Förder-sonde dar. In dieser Variante (s. Bild 4 f) ist der untere, im Durchmesser kleinere Abschnitt der Produktionsrohrtour kürzer als in der oben beschriebenen Variante des Einbaues einer kombinierten Endrohrtour, und es besteht die Möglichkeit, im Falle der Zerstörung der Produktionsrohrtour im oberen Teil (z. B. infolge Korrosion), eine zweite Sektion als Reserve nachzusetzen.

5. Bohrlochkopf

Als Bestandteil der Bohrlochkonstruktion versteht man unter dem Bohrlochkopf den oberen Abschluß der Rohrtouren. Er wird auch als Kolonnenkopf bezeichnet.

Der Bohrlochkopf hat als Teil der Bohrlochkonstruktion folgende Aufgaben:

- mechanische Verankerung der Rohrtouren (außer Liner) an ihrem oberen Ende
- Abdichtung der Ringräume zwischen den verankerten Rohrtouren
- Kontrolle und Steuerung des Druckes, der sich in den genannten Ringräumen aufbauen kann

Die Montage des Bohrlochkopfes erfolgt stufenweise mit dem Einbau der verschiedenen Rohrtouren. Sie beginnt nach dem Einbau und der Zementation der Ankerrohrtour oder der ersten technischen Rohrtour. Auf diese Rohrtour wird im Bohrkeller der Landeflansch montiert.

Jede weitere Rohrtour, die im Kolonnenkopf abgefangen wird, hängt (in Keilen oder eingeschweißt) abgedichtet in einem Flansch. Die Flansche sind untereinander durch Hochdruck-

bolzen zu einem kompakten System vereinigt. Der Druck in den Ringräumen kann über Manometer kontrolliert werden. Es gibt verschiedene konstruktive Ausführungen solcher Systeme. Sie sind detailliert in /5/ beschrieben.

Der Bohrlochkopf nimmt die Absetzlasten der einzelnen Rohrtouren auf, die in ihrer Summe nicht selten mehrere hundert Mp betragen. Während des Abteufens dient der Bohrlochkopf als Montageplattform für die Bohrlochsicherung (Preventersystem), beim Fördern als Montageplattform für den Tubinghänger und das Eruptionskreuz.

6. Liner

Liner sind Rohrtouren, die nicht bis Übertage anstehen. Sie reichen im allgemeinen 50 bis 200 m in die vorangehende Rohrtour hinein, überdecken im wesentlichen also nur den offenen Bohrlochbereich. Auch als verlorene Rohrtouren bezeichnet, sind sie mitunter nur wenige hundert Meter lang. Liner werden am Bohrstrang eingebaut und über den Bohrstrang zementiert. Nach der Zementation wird der Bohrstrang vom Liner getrennt und ausgebaut. Liner werden über ihre gesamte Länge zementiert. Sie sind entweder über einen Linerhänger mit Keilen in der vorhergehenden Rohrtour oder nur im eigenen Zementmantel verankert. Die letztere Variante ist häufiger anzutreffen, da sie einfacher zu realisieren ist. Das gilt besonders bei kurzen Linern. Die kurzen Liner können noch vor dem Abbinden des Zementes auf der Bohrlochsohle abgestellt und entschraubt werden. Damit verringert sich die Gefahr des Einzementierens des Gestängestranges. Dieser kann unmittelbar nach dem Einbringen der Zementschlämme gelöst und ausgebaut werden. Linerhänger verwendet man bei schweren Linern. Soll der Ringraum zwischen Liner und vorhergehender Rohrtour sicher abgedichtet werden, dann wird der Linerhänger mit einem Gummipacker kombiniert. Das Setzen (Liner) der Keile des Linerhängers und der Gummimanschetten des Packers erfolgt hydraulisch oder mechanisch von Übertage aus mittels des Gestängestranges.

Im Vergleich zu durchgehenden Rohrtouren haben Liner Vorteile, die sich aus der Einsparung an Futterrohren und aus der Erweiterung des Bohrlochdurchmessers im oberen Bereich ergeben. Diese Vorteile führen zur Erleichterung und Vereinfachung der Bohrlochkonstruktion (s. Kapitel 10.), zur Kostensenkung und Beschleunigung der Bohrarbeiten. Beschleunigt wird einmal der Verrohrungsprozeß, weil weniger Futterrohre eingebaut werden und die Montage des Kolonnenkopfes und der Bohrlochsicherung entfällt, zum anderen kann aber auch der Bohrprozeß beschleunigt werden, weil ein im Durchmesser kombinierter Gestängestrag eine höhere mechanische und hydraulische Leistung zur Bohrlochsohle bringen kann. Letzteres ist bei Einsatz leistungschwächerer Bohranlagen (Hebewerk und Spülpumpen) der Vorteil. Bei leistungsstarken Bohranlagen liegt der Vorteil darin, daß der Bohrstrang auch aus minderwertigerem Gestänge (Materialgüte, Wanddicke) zusammengestellt werden kann.

Unter bestimmten geologisch-technischen Bedingungen können die Vorteile, die ein Liner im Vergleich zur durchgehenden Rohrtour bietet, sehr groß sein. Der Liner hat aber auch Nachteile. Folgendes Beispiel soll dies verdeutlichen. Zu diesem Zweck sei angenommen, daß als Idealfall ein Bohrloch ausschließlich mit Liner verrohrt ist. Hierbei wäre der Aufwand an Futterrohren und Verrohrungsarbeiten minimal. Läßt sich eine solche Variante in der Praxis der Tiefbohrstätigkeit realisieren? Im Regelfall nicht! Der Grund liegt hierfür einmal in der ungenügenden Innendruckfestigkeit der Leitrohrtour oder ersten technischen Rohrtour für Drücke, die von der Produktionsrohrtour oder der zweiten technischen Rohrtour aufzunehmen sind. Auch ließe sich die Druckfestigkeit des Bohrlochkopfes und der Preventer nicht realisieren.

Die Innendruckfestigkeit eines Rohres P_{ik} nimmt bei gleicher Wanddicke t und gleicher Materialgüte (diese wird durch die zulässige Spannung R gekennzeichnet) mit zunehmendem Außendurchmesser D ab. Das geht aus der nachstehend angeführten Formel hervor.

$$P_{ik} = \frac{200 t R}{D}$$

P_{ik} Innendruckfestigkeit in kp cm^{-2}

t Rohrwanddicke in mm

D Rohraußendurchmesser in mm

R zulässige Spannung in kp cm^{-2}

Aus der angeführten Formel geht weiter hervor, daß ein Futterrohr beispielsweise bei einem doppelt so großen Durchmesser auch eine doppelt so große Wanddicke haben muß, wenn es bei gleicher Materialgüte nicht an Innendruckfestigkeit verlieren soll. Ein Futterrohr mit doppeltem Durchmesser und doppelter Wanddicke wiegt aber nicht nur das Doppelte, sondern das Vierfache. Hieraus erkennt man bereits, daß das Prinzip des Linereinsatzes bezüglich der Materialökonomie seine Grenzen hat.

Es gibt aber auch technische Grenzen. So kann ein Liner beispielsweise niemals die vorhergehende Rohrtour gegen die mechanischen und chemischen Einflüsse des Bohrstranges und der Bohrspülung schützen. Zur Sicherung der Festigkeit und Dichtigkeit einer Bohrlochkonstruktion kann das aber sehr wichtig sein. Nicht selten ist der Abrieb der Innenwand der vorhergehenden Rohrtour sehr groß, weil in ihr sehr lange gebohrt wurde (mit häufigem Aus- und Einbau des Bohrstranges).

Dieser Abrieb verringert die Innendruckfestigkeit der Bohrlochkonstruktion, die ohnehin bereits dadurch geschwächt ist, daß ein größerer Rohrdurchmesser vorhanden ist. Die bei mehreren nacheinander folgenden Linern (zwei oder drei) auftretende, teleskopartige Bohrlocherweiterung in Richtung von Sohle zum Bohrlochkopf schafft, wie oben erwähnt, zwar günstige Voraussetzungen zur Gestaltung des Bohrstranges (minimales Gewicht, minimale Druckverluste), hat aber auch eine Reihe technologischer Nachteile.

Die stufenweise Erweiterung des Ringraumquerschnitts zwischen Bohrgestänge und Bohrlochwand führt zu einer Verringerung der Aufstiegsgeschwindigkeit des Bohrkleins und somit zur Verschlechterung der Bohrlochsäuberung. Gleicht man diese Verringerung der Aufstiegsgeschwindigkeit im oberen Bereich des

Bohrloches, das die größte Ringraumquerschnittfläche hat, durch eine höhere Liefermenge an Bohrspülung aus, so baut man die hydraulischen Vorteile des kombinierten Bohrstranges wieder ab.

Die angeführten Beispiele bezüglich der Materialökonomie, der Innendruckfestigkeit und der Bohrlochhydraulik zeigen deutlich die Grenzen der Einsatzmöglichkeiten der Liner. Die Liner sind also nicht immer ein vollwertiger Ersatz für eine bis übertage durchgehende Rohrtour, und nur unter ganz bestimmten Bedingungen sind Liner nicht nur vollwertiger Ersatz, sondern besser als durchgehende Rohrtouren.

Letzteres gilt beispielsweise für Liner, die unter den geologischen Bedingungen der DDR in Rotliegend-Bohrungen als letzte technische Rohrtour eingebaut werden. Ein solcher Liner überdeckt den druckstarken Bereich des Zechsteins, ist nicht sehr lang, und es werden keine großen Bohrstrecken aus ihm herausgebohrt.

7. Varianten des Verrohrungsschemas

Das umfangreiche Größen(Durchmesser)sortiment der Futterrohre von 4 1/2" bis 24 1/2" in seiner Abstufung von 1/2" bis 2" und das noch feiner abgestufte Sortiment an Bohrwerkzeugen gestatten eine Vielzahl von Rohrtour-Bohrlochdurchmesserkombinationen.

Jede Rohrtour-Bohrlochdurchmesserkombination ist in erster Linie durch die Radialspiele der Rohre zueinander und der Rohre zur Bohrlochwand gekennzeichnet. Je größer die Radialspiele sind, um so leichter lassen sich die Futterrohre einbauen. Hohe Radialspiele haben aber den Nachteil, daß das Verrohrungsschema nur eine sehr geringe Anzahl von technischen Rohrtouren zuläßt oder daß der Durchmesser der Endrohrtour sehr klein ausfällt.

Eine Beschreibung der Radialspiele ist in Kapitel 2. erfolgt. Kennzeichnend für die Rohrtour-Bohrlochdurchmesserkombinationen sind aber nicht nur die Radialspiele oder die Radialspielverhältnisse (Verhältnis von Radialspiel zu freier Austrittslänge), sondern auch die äußere Form der Futterrohrverbindung. Haben

die Futterrohre einen fließenden Übergang vom Rohraußendurchmesser zum Verbinderaußendurchmesser, wie das beispielsweise bei Extreme-Line-Rohren und Omega-Rohren der Fall ist, so können solche Futterrohre bei gleichem Radialspiel von Verbindung zu Bohrlochwand (r_1 , s. Bild 2) leichter eingebaut werden als Rohre mit einer Standardmuffenverbindung. Es können kleinere Werte des Radialspielverhältnisses erreicht werden.

Diese Tatsache war u. a. dafür ausschlaggebend, daß im Industriezweig Erdöl-Erdgas in der ersten Hälfte der sechziger Jahre 8 5/8" Extrem-Line-Rohre und 6 5/8" Omega-Rohre in den Futterrohrbestand aufgenommen worden sind. Zu dieser Zeit wurden die ersten Übertiefen Bohrungen mit Endteufen von 5000 bis 5500 m projektiert, wobei das damals noch übliche Verrohrungsschema 16 3/4" - 12 3/4" - 8 5/8" - 5 3/4", mit dem erfolgreich Zechsteinbohrungen mit Endteufen von 2000 bis 3000 m realisiert werden konnten, bereits für diese Teufen und die zu erwartenden geologischen Verhältnisse deutliche Grenzen aufwies.

So konnte man die 12 3/4"-Rohrtour als erste technische Rohrtour aus der 16 3/4"-Leitrohrtour im 394-mm- ϕ -Bohrloch auf Grund des relativ geringen Radialspiels nicht mehr bis auf die für die 5000 bis 5500-m-Bohrungen notwendige Einbauteufe von 1800 bis 2400 m (zur Oberdeckung der druckschwachen Horizontale des Mesozoikums) bringen. Deshalb erfolgte der Übergang auf 11 3/4"-Rohre.

Mit dem Übergang von 12 3/4"- auf 11 3/4"-Rohre kam es aber zwangsläufig zu einer Verringerung des Radialspiels zur zweiten technischen Rohrtour (8 5/8"). Jetzt mußten 8 5/8"-Futterrohre mit Standardmuffenverbindungen, deren Außendurchmesser 244,5 mm beträgt, in ein 269-mm- ϕ -Bohrloch eingebaut werden und nicht mehr wie zuvor in ein 295-mm- ϕ -Bohrloch (s. hierzu Bild 3, Variante 2). Das Radialspiel r_1 verringerte sich also von $0,5 \cdot (295 - 244,5) = 25,25$ mm auf $0,5 \cdot (269 - 244,5) = 12,25$ mm.

Ein derartig geringes Radialspiel schien für Austrittslängen bis 1500 m nicht ausreichend, zumal die zweite technische Rohrtour die Aufgabe hatte, den druckstarken Zechsteinbereich

zu überdecken. Da ein Einsatz von Futterrohren mit geringerem Durchmesser (etwa 7 5/8") ausgeschlossen war, weil dann der Einbau der 5 3/4"-Endrohrtour nicht gesichert schien, wählte man 8 5/8"-Rohre mit Extreme-Line-Verbindungen (Außendurchmesser - 231,7 mm). Somit erhöhte sich das Radialspiel auf $0,5 \cdot (269 - 231,7 \text{ mm}) = 18,6 \text{ mm}$ bei seichtem Übergang vom Rohr zur Verbindung. Da Extreme-Line-Futterrohre teurer sind als Rohre mit Standardmuffen, letztere aber ein ausreichendes Radialspiel im verrohrten Bereich des Bohrloches haben (8 5/8" in 11 3/4"), wurde die 8 5/8"-Rohrtour nur im unteren, unverrohrten Bohrlochbereich aus Extreme-Line-Rohren zusammengestellt.

Bleiben wir noch beim angeführten Beispiel der Anpassung des Verrohrungsschemas 16 3/4" - 12 3/4" - 8 5/8" - 5 3/4" an die Mitte der sechziger Jahre aufgekommene Veränderung der geologischen Aufgabenstellung. Die größeren Bohrteufen und die ungenügenden bohrtechnischen Erfahrungen in den tieferen Formationen (Präzechstein) verlangten nach einer dritten technischen Rohrtour. Das bis dahin praktizierte Verrohrungsschema besaß aber nur zwei technische Rohrtouren (12 3/4" bzw. 11 3/4" und 8 5/8").

Einen Ausweg bot lediglich die Variante 3 (im Bild 3 mit einer 6 5/8"-Rohrtour als dritte technische Rohrtour und einer 4 1/2"-Endverrohrung. Um dabei ausreichende Radialspiele zu erhalten, mußten für beide Rohrtouren Spezialverbindungen vorgesehen werden.

Später, als die Bohrteufen noch weiter zunahmen (bis 7000 m) mußte ein gänzlich neues Verrohrungsschema herangezogen werden. Es ist im Bild 3 als Variante 4 dargestellt und beinhaltet drei technische Rohrtouren (13 3/8", 9 5/8" und 7").

Eine Zusammenstellung der wichtigsten, international üblichen Verrohrungsschemata ist im Bild 4 angegeben.

Die schraffierten Bereiche der Kästchen im Bild 3 entsprechen den Rohrwanddicken. Links oben am Kästchen ist der Innendurchmesser (Kontrolldorndurchmesser) des Rohres, rechts oben am Kästchen der Außendurchmesser der Verbindung in Millimeterangaben. Innerhalb des Kästchens ist die Nenngröße des Rohres

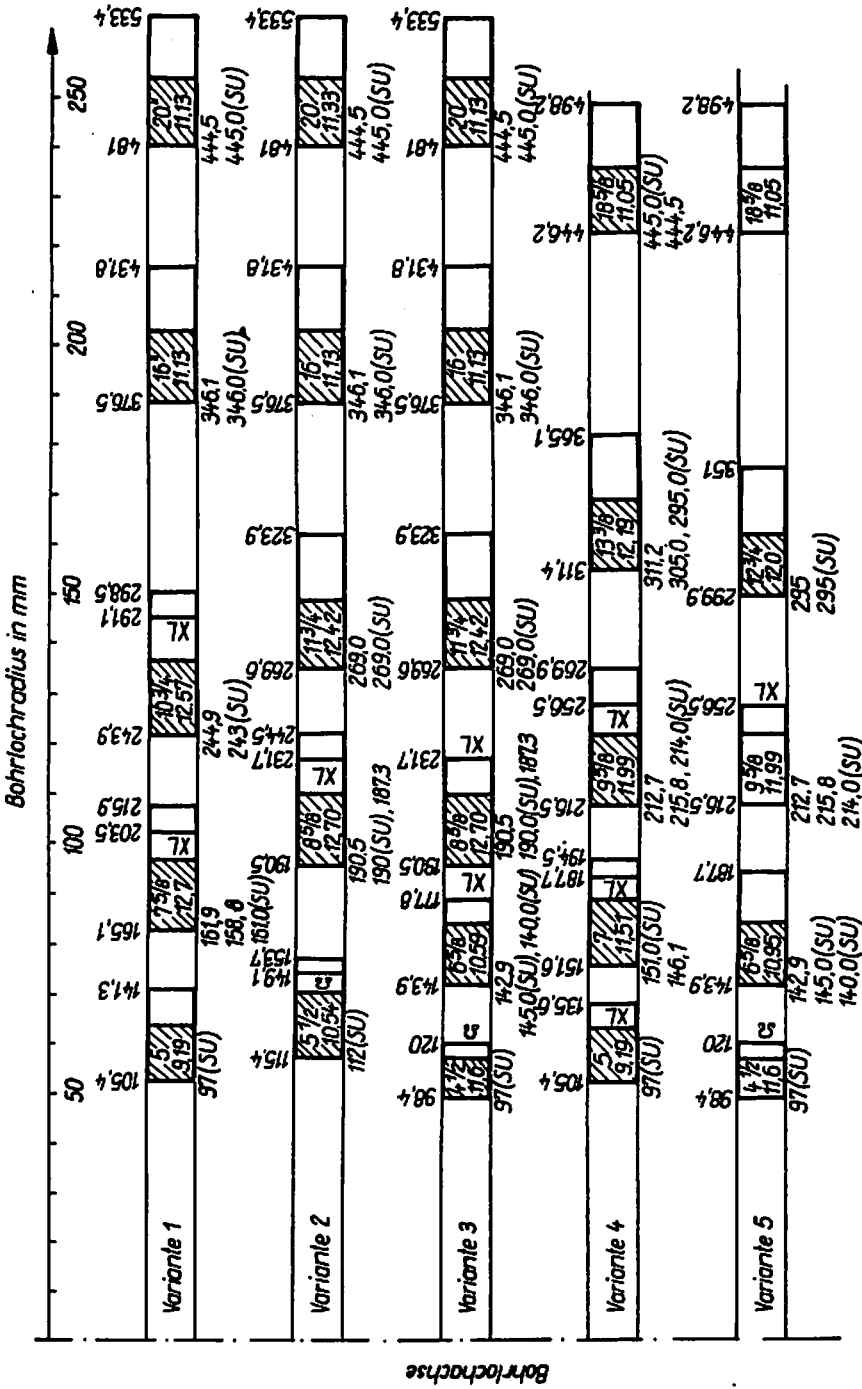


Bild 3. Maßstabgerechte Darstellung üblicher Varianten des Verrohrungsschemas für Tiefbohrungen

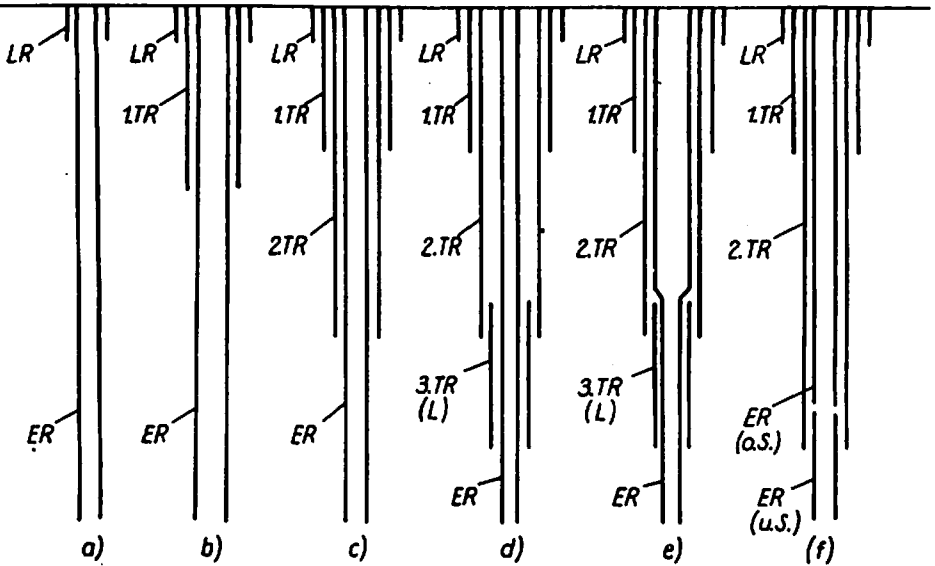


Bild 4. Varianten der Bohrlochkonstruktion (Verrohrungsschemata)

LR Leitrohrtour

1. TR erste technische Rohrtour

2. TR zweite technische Rohrtour

3. TR dritte technische Rohrtour

ER Endrohrtour

o. S. obere Sektion

u. S. untere Sektion

L Liner

in Zoll und die maximale Wanddicke in Millimeter eingetragen. Der nichtschraffierte Bereich des Kästchens stellt die Verdickung an der Verbindung dar. Spezialverbindungen mit geringem Durchmesser sind gesondert angeführt (XL Extreme-Line, Ω Omega).

Die Abstände zwischen den einzelnen Kästchen der jeweiligen Variante stellen das Radialspiel der Rohre zueinander dar. Der Schneiddurchmesser der Bohrwerkzeuge, mit denen aus der Rohrtour herausgebohrt werden kann, ist in der Skizze als Zahl unter dem Kästchen links angegeben. Es handelt sich hierbei um Standardnennendurchmesser von Rollenmeißeln (Angabe in Millimeter).

Die Differenz zwischen den angeführten Werten des Kontroll-dorndurchmessers und dem Schneidmaß des betreffenden Kästchens stellt das Radialspiel r_3 (s. Bild 2) zwischen Rohrtourinnenwand und Bohrwerkzeug dar.

Die Differenz vom Schneiddurchmesser zum Verbindungsdurchmesser des benachbarten linken Kästchens ergibt das Radialspiel r_1 (s. Bild 2) zwischen Rohrverbindung (Muffe) und Bohrlochwand (nicht ausgekesselt und nicht verengt). Bei fast allen Kästchen sind mehrere Schneiddurchmesser angeführt, da das Durchmessersortiment der Rollenmeißel umfangreicher ist, als das der Futterrohre. Die Durchmesserwerte des sowjetischen Meißels sind mit (SU) gekennzeichnet.

Die im Bild 3 gezeigten fünf Varianten erfassen noch nicht alle Kombinationsmöglichkeiten. Eine wesentliche Erweiterung der Möglichkeiten tritt in Sonderfällen auf, beispielsweise beim Einbau muffenloser, verschweißter Futterrohre. Typische Besonderheiten bei Gasbohrungen und übertiefen Bohrungen sind in Kapitel 11. angeführt. Die Vor- oder Nachteile der auf Bild 3 gezeigten Varianten des Verrohrungsschemas erkennt man erst dann, wenn die geforderten Einbauteufen bekannt sind. Muß die erste technische Rohrtour sehr tief eingebaut werden und die zweite und dritte Rohrtour mit normaler Austrittslänge, dann ist die Variante 4 sehr geeignet, weil die erste technische Rohrtour (13 3/8") ein sehr großes Radialspiel hat. Dieses Radialspiel kann, wenn erforderlich, noch vergrößert werden, wenn anstelle der 18 5/8"-Leitrohrtour eine 20"-Leitrohrtour (wie in den Varianten 1 bis 3) gewählt wird. Wird in dieser Variante die Austrittslänge der dritten technischen Rohrtour gering sein (Beispiel: ein kurzer Liner), so kann man zugunsten der Radialspielerweiterung der Endrohrtour anstelle der 7"-Rohre 7 5/8"-Rohre (geschweißt) einbauen. Die Radialspielerweiterung der Endrohrtour (5" in 7 5/8" anstelle 5" in 7") ist besonders bei Produktionsbohrungen vorteilhaft, weil dadurch günstigere Bedingungen für eine gute Zementsteinqualität gegeben sind.

Aus den angeführten Beispielen ist ersichtlich, daß es für die im Bild 3 dargestellten Varianten wiederum Variationsmöglichkeiten gibt und daß bei jeder Bohrung die konkreten geo-

logischen Bedingungen aber auch die Zielstellung der Bohrung letztlich ausschlaggebend für die Wahl der Verrohrungsvariante sind.

8. Auswahl und Projektierung der Bohrlochkonstruktionen

Bei der Auswahl einer Bohrlochkonstruktion im Rahmen der Projektierung einer Tiefbohrung sind geologische und bohrtechnische Bedingungen zu berücksichtigen. Handelt es sich um Produktionsbohrungen oder Erkundungsbohrungen, die auf Zufluß von Erdöl oder Erdgas getestet und dann ebenfalls in Produktion genommen werden sollen, so müssen bei der Auswahl der Bohrlochkonstruktion auch test- und fördertechnische Gesichtspunkte beachtet werden.

Allgemein gilt, daß bei der Projektierung einer Tiefbohrung, speziell bei der Auswahl der Bohrlochkonstruktion folgende Faktoren zu berücksichtigen sind

- Aufgabe und Bestimmung der Bohrung (Strukturbohrung, Suchbohrung, Erkundungsbohrung, Produktionsbohrung, Flutungsbohrung, Schluckbohrung, Ersatzbohrung, Richtbohrung u. a.)
- Geologische Verhältnisse im zu erbohrenden Profil, speziell die Druckverhältnisse (Zuflußhorizonte, Verlusthorizonte), die Stabilität der Bohrlochwand (Nachfallhorizonte, Auskesselungsbereiche, quellende Horizonte), die Eigenschaften des Gebirges (Bohrbarkeit, Fracfestigkeit, Abrasivität, Plastizität, Permeabilität) sowie die Teufe und Mächtigkeit der Formationen
- Endteufe der Bohrung (Projektteufe)
- technische Charakteristik der vorhandenen Bohranlage (z. B. Tragfähigkeit, Pumpenleistung) und des Sortimentes der verfügbaren Bohrausrüstung (z. B. Bohrstrang, Bohrwerkzeuge und vor allem Futterrohre)
- erforderlicher Enddurchmesser der Bohrung (in verrohrtem oder unverrohrtem Zustand), bestimmt durch:
 - a) die zu erwartende Förderleistung der in Produktion überführten Bohrung

- b) das im Falle der Aufnahme der Förderung anzuwendende Förderverfahren (z. B. Eruptivförderung) einschließlich der Förderausrüstung (z. B. Packer)
 - c) die Technologie und Technik des Aufschlusses produktiver Horizonte (z. B. Gestängetest, Perforationstechnik)
 - d) andere, dem Ziel der Tiefbohrung entsprechende Forderungen (z. B. Mindestkerndurchmesser, Meßsondendurchmesser)
- technische, öffentliche und bergbauliche Sicherheit
 - gesammelte Erfahrungen beim Abteufen eventuell benachbarter Bohrungen
 - Wirtschaftlichkeit der Bohrarbeiten, Test- und Förderarbeiten

Werden, wie in der DDR, über einen längeren Zeitraum Bohrprogramme realisiert, die dadurch gekennzeichnet sind, daß mit einer gegebenen Technik (Bohranlagen) unter fast gleichen geologischen Bedingungen gebohrt wird, so entstehen Standardbohrlochkonstruktionen, und die Projektierungsarbeiten für eine konkrete Bohrung reduzieren sich lediglich auf die Festlegung der Einbauteufen und Zementationsintervalle der einzelnen Rohrtouren.

Die Einheitlichkeit der Standardbohrlochkonstruktionen bezieht sich auf das Vorrohrungsschema (Kombination von Meißeldurchmesser und Futterrohrgröße und -ausführung) und die grobgeologischen Verhältnisse. Was die Rohreinbauteufe oder Zementkopfteufe anbelangt, so gibt es niemals zwei Bohrungen, deren Konstruktion bis in diese Details dieselbe wäre (wie beispielsweise die Konstruktion einer Maschine). Folglich darf der Begriff der Standardbohrlochkonstruktion nicht falsch, d. h. wörtlich verstanden werden. Es handelt sich vielmehr um eine geologische und technische Standardsituation, die bei der Projektierung angetroffen wird.

Methodisch wird eine Bohrlochkonstruktion von "unten nach oben" projektiert. Als erster Schritt erfolgt die Auswahl des Enddurchmessers des verrohrten (seltener des unverrohrten) Bohrloches. Danach wird der Meißeldurchmesser für das Bohrloch bestimmt, in das die Endrohrtour eingebaut werden soll. Der Meißeldurchmesser errechnet sich aus der Summe des Rohr-

außendurchmessers und des doppelten Wertes des erforderlichen Radialspieles r_2 (s. Bild 2).

Das Radialspiel r_2 wird unter Beachtung der Teufendifferenz zum Rohrschuh der technischen Rohrtour (Austrittslänge) und den zu erwartenden Komplikationen beim Rohreinbau und bei der Zementation festgelegt. Allgemein gilt für Endrohr Touren (4 1/2", 5", 5 1/2", 7"), die sich auf Grund ihres relativ geringen Außendurchmessers und der dadurch gegebenen hohen Flexibilität des Stranges (die Biegeelastizität eines Bohrstranges erhöht sich umgekehrt proportional zum Durchmesser in der 3. Potenz) selbst unter ungünstigen Bedingungen leicht einbauen lassen, ein Radialspiel zwischen 0,5 bis 1" als ausreichend.

Der Durchmesser der letzten technischen Rohrtour muß mindestens so groß sein, daß unter Berücksichtigung der größten Rohrwanddicke der Kontrolldorndurchmesser größer ist als das Schneidmaß des Rollenmeißels. Allgemein entspricht das einem Radialspiel r_3 (s. Bild 2) von 2 bis 6 mm.

In entsprechender Reihenfolge werden Meißeldurchmesser für den Bohrabschnitt der technischen Rohrtour, Rohrdurchmesser und Meißeldurchmesser der vorangehenden technischen Rohrtouren der Leit- oder Ankerrohrtour und des Standrohres und Hilfsstandrohres ermittelt. Die Einbauteufen und Zementkopfteufen sind zunächst nach geologischen, test- und fördertechnischen Gesichtspunkten im geologischen Projekt der Tiefbohrung vorgegeben. Im bohrtechnischen Projekt wird auf der Grundlage dieser Vorgabe und nach der genannten Methodik die gesamte Bohrlochkonstruktion entwickelt. Dabei erfolgt eine Festigkeitsberechnung der einzelnen Rohrtouren (Berechnung auf Außendruck, Innendruck, Zuglast und Abstreifen der Gewindeverbindung) und eine grobtechnologische Planung der Rohrbau- und Zementationsarbeiten.

Während der Bohrzeit einer Bohrung wird operativ auf der Basis der konkreten Bohrergergebnisse (z. B. Zustand und Verhalten der offenen Bohrlochstrecke) ein Rohreinbau- und Zementationsprogramm erstellt, in dem bis ins organisatorische Detail alle Arbeiten, beginnend bei der Vorbereitung des Bohrloches bis zur Qualitätskontrolle der zementierten Rohrtour, geplant werden.

In einem solchen Rohreinbau- und Zementationsprogramm werden nicht selten Details der Bohrlochkonstruktion präzisiert (z. B. Zementkopfteufe).

Ist der Enddurchmesser der verrohrten Bohrung im Hinblick auf den Durchgang von Maßsonden, Testgeräten oder Perforatoren einfach zu wählen, so gibt es bei der Festlegung des erforderlichen Enddurchmessers bezüglich der Förderung von Erdöl oder Erdgas größere Probleme. Für die Ölförderung (eruptiv und Airlift) reicht beispielsweise eine 4 1/2"-Produktionsrohrtour aus, um aus 2000 m Teufe 250 bis 300 t Öl am Tag zu fördern. Bei einer Pumpenförderung ist die Förderrate auf maximal 80 t je Tag begrenzt /1/. Allgemein werden, wie auch bei Gasbohrungen, größere Enddurchmesser (5", 5 3/4", 6 5/8", 7") geplant, da Reparaturarbeiten und Hilfsarbeiten (z. B. Paraffinentfernung) an der Sonde besser ausgeführt werden können. Das gilt insbesondere, wenn eine große Korrosionsgefahr (z. B. durch Schwefelwasserstoff) besteht und die untertägige Förderausrüstung (Steigrohre, Pumpen, Packer) einem großen Verschleiß unterliegen. In Extremfällen (Förderraten über 2000 t je Tag) werden sogar 9 5/8"-Produktionsrohr Touren eingebaut. Aus Gasbohrungen können, um hier einige Richtwerte anzugeben /6/, bei 300 kp cm⁻² Speicherdruck über einen 2 7/8"-Steigrohrstrang (5"-Produktionsrohrtour) etwa 400 000 m³ (N) je Tag und über einen 3 1/2"-Steigrohrstrang (7"-Produktionsrohrtour) 1 Million m³ (N) je Tag gefördert werden. Was die Einbauteufe, Zementkopfteufe und den Meißeldurchmesser für die Produktionsrohrtour anbelangt, sind folgende Gesichtspunkte zu berücksichtigen:

- Ist die Standfestigkeit des Speicherhorizontes gegeben und es besteht keine Gefahr des Wasserzuflusses aus darüber- oder darunterliegenden Schichten, so kann der Rohrschuh oberhalb des Speicherhorizontes abgesetzt werden.
- Ist die o. g. Situation vor Aufschluß des Speichers bekannt, kann der Rohreinbau vor dem Anbohren des Speichers erfolgen. In diesem Falle muß die Produktionsrohrtour im Durchmesser so groß bemessen sein, daß aus ihr heraus mit dem vorhandenen Gestänge sowie Bohr- und Kernwerkzeugen gebohrt werden kann.

- Der Meißeldurchmesser muß im Bereich der Produktionsrohrtour ausreichend groß sein, damit die Produktionsrohrtour im und oberhalb des Speicherhorizontes durch Einsatz von Zentralisatoren u. a. UZ-Ausrüstungen sowie Anwendung geeigneter Zementationsverfahren fest und dicht zementiert werden kann.
- Der Zementkopf wird allgemein mindestens bis in die letzte technische Rohrtour, nicht selten aber bis übertage gelegt. Große Zementhöhen haben den Nachteil, daß der produktive Speicherhorizont während der Zementation hohen Belastungen und Blockierungsgefahren ausgesetzt ist. Der Vorteil des Schutzes vor Überbelastungen und Undichtheiten ist umstritten /6/.

Die Anzahl der technischen Rohrtouren und deren Einbauteufe hängt von den geologischen Verhältnissen, der geplanten Endteufe und dem technischen und technologischen Stand der Bohrarbeiten ab. Da im Vergleich zu früheren Zeiten (vor 30 bis 50 Jahren) die Technik und Technologie der Bohrarbeiten sich wesentlich vervollkommen haben, insbesondere bezüglich

- der Qualität der Bohrspülungen
- der Festigkeit der Bohr- und Futterrohrstränge
- der Erhöhung der Bohrgeschwindigkeit

können heute mit einer einzigen Rohrtour mehrere Formationen mit unterschiedlichen Eigenschaften über eine Teufe von mehr als 2000 m erfolgreich verrohrt werden. Eine Ausnahme bilden Formationen mit unterschiedlichen Schichtdruckgradienten bei unterschiedlichen Verlust- oder Fracgradienten.

Unter dem Schichtgradienten ist hierbei einmal der teufenbezogene, absolute Druck des in das Bohrloch eindringenden Schichtmediums (Erdöl, Erdgas, Schichtwasser, Lauge) zu verstehen, bei plastischem und instabilem Gebirge (Salze, Tone) aber auch der teufenbezogene, absolute Druck (in kp cm^{-2} je 10 m) des aus der Bohrlochwand "schiebenden, drückenden" Gesteins.

Ein tiefergelegener Schichtenkomplex A mit einem höheren Schichtdruckgradienten (z. B. Zechsteinsalze, Gradient $1,9 \text{ kp cm}^{-2}$ je 10 m) kann mit einem darüberliegenden Komplex B (z. B. Sandstein des Mesozoikums), der einen geringen Schichtdruckgradienten

ten hat und zusätzlich dadurch gekennzeichnet ist, daß sein Verlust- oder Fracgradient kleiner ist als der Zuflußgradient des Komplexes A (Beispiel $1,5 \text{ kp cm}^{-2}$ je 10 m), nicht gemeinsam hinter eine technische Rohrtour gebracht werden. In diesem Fall muß der Komplex A verrohrt werden, bevor der Komplex B mit einer schwereren Bohrspülung angebohrt wird.

Eine Ausnahme ist dann möglich, wenn es gelingt, durch Verdämmungsarbeiten die Verluste im Schichtkomplex A zu verhindern, so daß der Verlustgradient größer wird als der Schichtdruckgradient des Komplexes B. Kommt es zum Frac, so ist auch diese Ausnahme nicht real. In Grenzfällen, d. h. bei sehr geringen Differenzen zwischen Schichtdruck- und Verlust(Frac)gradient, kommt es auf die Intensität der Zuflüsse und Verluste an. Sind die Fließwege im Gebirge groß (z. B. große Klüfte, hohe Permeabilität der Poren), so können bereits geringe Druckdifferenzen, die nicht durch das statische Gewicht der Spülungssäule gegeben sein müssen, zu unkontrollierten starken Zuflüssen oder Verlusten führen. Nicht selten sind diese extremen Verhältnisse ausschlaggebend für den Einbau einer zusätzlichen technischen Rohrtour, obwohl noch keine längere Strecke aus der vorhergehenden Rohrtour gebohrt worden ist. In diesem Falle und besonders dann, wenn ergänzend zu dem oben angeführten Beispiel der Schichtkomplexfolge A - B noch ein Schichtkomplex C mit geringen Schichtendruckgradienten folgt, ist der Einbau eines kurzen Liners üblich.

Was die Zementkopfhöhe und Ringraumspiele der technischen Rohrtouren anbelangt, so ist hierbei in erster Linie der schnelle und komplikationsfreie Verlauf der Rohreinbau- und Zementationsarbeiten zu sehen. Der Komplikationsgrad und der Zeitaufwand erhöhen sich bei zunehmender Zementkopfhöhe (hierbei erhöht sich auch der Zementverbrauch), bei komplizierten Zuflußverlusten, (Frac)verhältnissen und bei anormaler Bohrlochgeometrie (Neigung, Krümmung, Schlüssellochbildungen, Auskesselungen, Einengungen).

Zum Zwecke des Schutzes der Futterrohre vor Oberbelastungen und zur Gewährleistung einer hohen Bergbausicherheit wird der Zement hinter einer technischen Rohrtour allgemein bis mindestens in die vorhergehende Rohrtour, nicht selten bis nach Übertage ein-

gebracht. Liner werden zweckmäßigerweise immer über ihre gesamte Länge zementiert. Bei übertiefen Bohrungen oder Erstbohrungen mit relativ unbekanntem geologischem Profil wird bei der Auswahl der Bohrlochkonstruktion die Möglichkeit des Einbaues einer Reserverohrtour (Liner) berücksichtigt. Stellt sich beim Bohren heraus, daß die geologischen Verhältnisse beherrschbar sind, so verzichtet man auf den Einbau des Liners.

Fehlen sichere geologische Informationen, wird die Bohrlochkonstruktion nicht selten als schwere Konstruktion mit zwei, drei technischen Rohrtouren geplant (Maximalvariante). Stellen sich beim Bohren günstige Verhältnisse ein, verzichtet man auf den Einbau der letzten technischen Rohrtour. Bei der Auswahl der Bohrlochkonstruktion sind auch die technischen Parameter der Bohranlage zu berücksichtigen. So stellen sehr oft die technischen Rohrtouren die höchsten Anforderungen an die Tragfähigkeit der tragenden Teile der Bohranlage. Zur Vermeidung von Maximalbelastungen kann der "schwimmende Einbau" der Rohrtouren oder der Einbau in zwei oder mehreren Sektionen erforderlich werden. Beim Einbau der Rohrtouren in Sektionen ist mit Nachteilen für die Dichtheit der Bohrlochkonstruktion zu rechnen. Die in diesem Abschnitt angeführten Beispiele und Probleme zeigen deutlich den komplizierten Charakter geologischer, technischer und ökonomischer Faktoren, die bei der Auswahl und Projektierung einer Bohrlochkonstruktion zu berücksichtigen sind.

Da sich viele geologische und auch bohrtechnische Situationen während der Bohrarbeiten einstellen, die bei der Auswahl im Rahmen der Projektierung noch nicht bekannt oder nur annähernd voraussehbar sind, kommt es beim Abteufen der Bohrung nicht selten zu einer Präzisierung oder sogar zur Veränderung der Bohrlochkonstruktion. Präzisiert werden beispielsweise die Rohrschuhteufen und Zementkopfteufen.

9. Festigkeit der Bohrlochkonstruktionen

Eine wesentliche Eigenschaft der Bohrlochkonstruktionen ist deren mechanische Festigkeit. Das Bohrloch muß zur Sicherung seiner Funktion eine hohe Festigkeit gegen Außendruck- und Innendruckbelastungen haben. Als Stützelemente zur Aufnahme solcher Belastungen dienen nicht nur die Futterrohre, sondern unter bestimmten Bedingungen auch der Zementsteinmantel.

Bei der herkömmlichen Projektierung einer Tiefbohrung wird davon ausgegangen, daß alle auftretenden Belastungen allein von den Futterrohrturen aufzunehmen sind. Die Rohrtouren müssen in ihrer Außendruck- und Innendruckfestigkeit so stark ausgelegt sein, daß jeweils die letzte Rohrtour, in der gebohrt wird (beim Abteufen der Bohrung) oder in der getestet und gefördert wird, (Endrohrtour) in der Lage ist, die auftretenden Belastungen allein aufzunehmen ohne zu zerreißen oder einzubeulen. In den dabei üblichen Festigkeitsberechnungen geht man von extremen Belastungsannahmen aus und wählt die Futterrohre nach Wanddicke, Materialgüte und Verbindungsfestigkeit so aus, daß die geforderten Mindestsicherheitswerte gegen Außendruck, Innendruck, Abstreifen der Verbindungen oder Zugbelastung im glatten Rohr nicht unterschritten werden.

Ohne auf diese Festigkeitsberechnungen näher einzugehen (das geschieht in der Fachbroschüre /4/), sollen in diesem Abschnitt einige Aspekte der Festigkeit der Bohrlochkonstruktion in ihrer Gesamtheit dargelegt werden.

Die auf das Bohrloch einwirkenden mechanischen Belastungen können wie folgt beschrieben werden:

Außendruck

Der mit der Tiefe zunehmende Gebirgsdruck äußert sich als Außendruck erst dann, wenn er auf den Zementmantel der Rohrtour oder auf die Futterrohraußenwand direkt wirksam wird. Das geschieht bei plastischer Verformung des Gebirges (die Plastizität des Gebirges nimmt mit der Teufenlage zu) oder über den flüssigen und gasförmigen Schichtinhalt (Schichtwasser, Lauge, Erdöl, Erdgas). Der Außendruck nimmt mit der Teufe zu. Die Intensität der Zunahme wird durch den Außendruckgradienten gekennzeichnet.

Der Außendruckgradient schwankt zwischen $1,05$ und $2,3 \text{ kp cm}^{-2}$ je 10 m . Die untere Grenze entspricht dem Druckgradienten einer statischen Wassersäule bei geringer Mineralisierung (Salzgehalt). Die obere Grenze entspricht dem Druckgradienten einer statischen Säule plastischen Gebirges (Salz oder Ton).

Als Belastung für die Konstruktionselemente Zementsteinmantel und Futterrohr wirkt der Außendruck nur in der Höhe, um die er den Druck innerhalb der Rohrtour übersteigt. Die wirksame Außendruckbelastung errechnet sich also aus der Differenz von Außen- und Innendruck.

Die genannten Konstruktionselemente, die in der Gesamtheit die wirksame Außendruckbelastung aufzunehmen haben, können in folgender Reihenfolge auftreten (von außen nach innen): Zementmantel - Futterrohrwand; Zementmantel - Futterrohrwand - Zementmantel - Futterrohrwand; Zementmantel - Futterrohrwand - Futterrohrwand. Für den Fall eines gut ausgebildeten Zementmantels kann dieser, wenn er das Futterrohr umschließt, eine stützende Funktion ausüben und die Rohrtour bis zu einem gewissen Grade vor der Außendruckbelastung schützen.

Die Entlastung der Futterrohrwand tritt bei der Reduzierung des Innendruckes auf, weil auf Grund der größeren Elastizität des Rohrmaterials im Vergleich zum Zementstein die radiale elastische Verformung des Rohres (das Rohr wird gleichsam im Durchmesser kleiner) immer größer ist als die des Zementsteinmantels, der das Rohr umschließt. Der Zementstein ist jedoch nur in der Lage Belastungen aufzunehmen, die über dem hydrostatischen Druck liegen, weil anzunehmen ist, daß infolge der möglichen Zerstörung zumindest das Schichtwasser immer an die Rohraußenwand gelangt. Hierauf gründet sich ein Berechnungsverfahren von G. M. SARKISSOW /7/.

Die Kombination Futterrohrwand - Zementmantel - Futterrohrwand ist außendruckfester als die Außendruckfestigkeit der inneren Rohrwand P_{ak2} allein. Voraussetzung für diese Annahme ist ebenfalls wieder ein gut ausgebildeter Zementsteinmantel. Experimentelle Untersuchungen haben ergeben /8/, daß die "kombinierte" Außendruckfestigkeit P_{ak} größer ist als die Außendruckfestigkeit jedes der beiden Rohre (P_{ak1} und P_{ak2}) im einzelnen, teils

sogar größer als die Summe beider Werte. Es gibt entsprechende Formeln zur Ermittlung von P_{ak} , die jedoch auf Grund ihrer Kompliziertheit hier nicht angeführt werden sollen, sondern sich auf das fehlende konkrete Beispiel beschränken. Eine 6 5/8"-Rohrtour ist in einer 9 5/8"-Rohrtour einzementiert. Die Außendruckfestigkeit der 6 5/8"-Rohrtour mit einer Wanddicke von 8 mm und einer Stahlgüte D beträgt $P_{ak1} = 202 \text{ kp cm}^{-2}$, die Außendruckfestigkeit der 9 5/8"-Rohrtour mit einer Wanddicke von 12,0 mm und einer Stahlgüte K beträgt $P_{ak2} = 320 \text{ kp cm}^{-2}$ (diese Werte sind einschlägigen Tabellen zu entnehmen).

Nach den o. g. Formeln erreicht die 6 5/8"-Rohrtour eine Außendruckfestigkeit von 590 kp cm^{-2} und die 9 5/8"-Rohrtour eine Außendruckfestigkeit von 705 kp cm^{-2} . Das gesamte System ist also bis zu einem Außendruck von 690 kp cm^{-2} fest und nicht nur bis 202 kp cm^{-2} . Die zulässige Belastung $P_a \text{ zul}$ liegt um den notwendigen Sicherheitsbetrag, der sich aus dem Mindestsicherheitskoeffizienten ($k_a = 1,3$) errechnet, darunter. Es wird errechnet $P_a \text{ zul} = P_{ak} : k_a = 590 : 1,3 = 453 \text{ kp cm}^{-2}$.

Die erwähnte dritte Kombinationsmöglichkeit der Konstruktionselemente Zementmantel - Futterrohrwand - Futterrohrwand ist von einer Außendruckfestigkeit gekennzeichnet, die nicht größer sein kann als die Außendruckfestigkeit der Kombination Zementmantel - Futterrohrwand. Sind also zwei Rohrtouren ineinander eingebaut, so ist deren gemeinsame "kombinierte" Außendruckfestigkeit nicht größer als die Außendruckfestigkeit der äußeren Rohrtour allein genommen. Beult die äußere Rohrtour ein, so wird die innere in ihrem Querschnitt nicht gleichmäßig über ihren gesamten Kreisumfang belastet, sondern punktförmig. Sie beult dann ebenfalls ein.

Ist der Außendruck eine statische Größe, so kann die wirksame Außendruckbelastung doch eine dynamische Belastung sein, denn die Innendruckreduzierung (Gegendruck) kann stoßweise, sehr schlagartig eintreten. Das geschieht beispielsweise bei Eruptionen oder Testarbeiten. Solche Belastungen sind rechnerisch schwierig zu erfassen, sie sollten deshalb in der Praxis durch entsprechende Technologien möglichst vermieden werden.

Innendruck

Der Innendruck in einer Bohrung wird ebenfalls wie der Außendruck mit zunehmender Teufe größer. Die Innendruckbelastungen sind im Gegensatz zur Außendruckbelastung im oberen Bereich der Bohrung am größten, weil dort der Gegendruck von außen am geringsten ist. Am Bohrlochkopf ist er gleich Null. Hier tritt die größte Innendruckbelastung auf. Was die "kombinierte" Innendruckfestigkeit mehrerer Rohrtouren anbelangt, die untereinander durch einen Zementmantel gestützt sind, so gilt ähnliches wie beim Außendruck /8/. Sind die Rohre untereinander nicht zementiert, dann führt das Aufreißen des inneren Rohres bei geschlossenem Ringraum nur unter bestimmten Bedingungen zum Druckaufbau und zur Zerstörung der äußeren Rohrtour.

Zugbelastung

Zugbelastungen treten als Folge des Eigengewichts der Rohrtouren auf, aber auch als Folge der Temperatur- und Druckveränderungen im Bohrloch. Die Zugbelastungen können durch gezielt festgelegte Zementationsintervalle auf ein Minimum reduziert werden, da der Zementstein und mit ihm das Gebirge zur Verankerung der Rohrtouren beitragen. Die Rohrtouren müssen aber dennoch häufig eine sehr hohe Zugfestigkeit aufweisen. Das ist erforderlich, um ihren Einbau durchführen zu können. Es handelt sich also dann um eine technologisch bedingte Zugfestigkeit. Die Zugbelastung kann zur Schwächung der Druckfestigkeit der Bohrlochkonstruktion führen. Das trifft besonders für die Außendruckfestigkeit zu, weil ein Rohr, das unter Zuglast steht, in jedem Falle an Außendruckfestigkeit verliert. Wenn auch in der Praxis jede Rohrtour zumindest im unteren Bereich (wo die Außendruckbelastungen am größten sind) zementiert ist, so muß dennoch diese Tatsache bei der Auswahl der Futterrohre (Festigkeitsberechnung) berücksichtigt werden, weil ungeachtet der erwähnten Verankerung der Rohrtouren im Zementstein davon ausgegangen werden muß, daß die durch das Eigengewicht beim Rohreinbau hervorgerufenen Zugspannungen nicht abgebaut werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß eine Tiefbohrung im Werdegang (beim Abteufen) und nach ihrer Fertigstellung

(als Sonde) verschiedenartigen, hohen und schwierig zu ermittelnden Belastungen ausgesetzt ist und eine solche Konstruktion aufweisen muß, die diesen Belastungen sicher standhält.

10. Vereinfachung und Erleichterung der Bohrlochkonstruktionen

Mit steigender Zahl von Bohrungen innerhalb eines Bohrgebietes werden immer umfangreicher Informationen über alle jene Faktoren gesammelt, die eine Bohrlochkonstruktion bestimmen. So erkennt man beispielsweise, daß es möglich ist, die Rohreinbauteufe einer technischen Rohrtour geringer zu halten. Diese Entwicklung der Bohrtätigkeit führt dazu, daß sich die Bohrlochkonstruktion vervollkommen kann. Eine solche Vervollkommnung findet beim Übergang von der Suche (Suchbohrung) zur Erkundung (Erkundungsbohrung) und zur Produktion (Produktionsbohrung) auch schon deshalb statt, weil sich die Zielstellung für die Bohrungen dabei verändert.

Die Vervollkommnung der Bohrlochkonstruktion vollzieht sich in der Regel als eine Vereinfachung und Erleichterung.

Unter einer Vereinfachung versteht man den Wegfall einer technischen Rohrtour oder den Ersatz einer Rohrtour durch einen Liner. Das Verrohrungsschema wird dabei einfacher. Unter einer Erleichterung versteht man eine Reduzierung des Durchmessers der Rohrtouren und deren Wanddicke.

Beide Richtungen der Vervollkommnung der Bohrlochkonstruktion, die Vereinfachung und die Erleichterung, äußern sich in einer Verringerung des Verbrauches an Futterrohren, d. h. es verringert sich der spezifische Futterrohrverbrauch, ein wesentlicher Kostenfaktor in der Tiefbohrtechnik.

Die Durchmesserverringerung, die sich auch auf die Bohrmeißel bezieht, führt in den meisten Fällen auch zu einer Erhöhung der Abteufgeschwindigkeit. Nur kleine Durchmesser (unter 7 1/2") bilden hier in der Regel eine Ausnahme, da mit derart kleinen Rollenmeißeln nicht mehr jene Standzeiten und Bohrfortschritte erreicht werden können, wie mit Bohrmeißeln mittleren Durchmesser (7 1/2" bis 12 1/2"). Uneingeschränkt

vorteilhaft ist eine Durchmesser verringering des Bohrloches jedoch in Bezug auf den Verbrauch von Spülmngsmaterialien. Hier trifft das zu, was für den Meißelverbrauch und die Bohrleistung nur bedingt zutrifft. Je kleiner der Bohrlochdurchmesser, um so geringer ist der Verbrauch an Spülmngsmaterialien. Das ist sehr vorteilhaft, da die Kosten für die Bohrspülmng bei einer Tiefbohrung in ihrer Höhe den Kosten für Futterrohre und Bohrwerkzeuge nicht nachstehen.

Der in den fünfziger Jahren verstärkt aufgetretene Trend zur Verringerung des Bohrlochdurchmessers (Abteufen sogenannter Slimhole-Bohrungen) fand seine Schranken in der Wirtschaftlichkeit. Die zunehmenden Bohrtiefen gestatteten keinen wirtschaftlichen Einsatz von kleinkalibrigen Bohrwerkzeugen und Bohrsträngen in großen Teufen. Auch die Forderung nach einer hohen Produktivität der tiefen Erdöl- und Erdgassonden setzte der Durchmesser verringering deutlich Grenzen.

Eine Durchmesserreduzierung als Maßnahme zur Erleichterung der Bohrlochkonstruktion hat also nur eine begrenzte Effektivität. Häufig geht man auch auf eine Kostenersparnis durch Einbau billigerer Futterrohre (geringere Wanddicke, geringere Materialgüte) über. Die genauere Kenntnis der auftretenden Belastungen im Bohrloch, die etwaige Reduzierung der Einbautiefe oder der Rohreinbau in Sektionen bieten diesbezüglich ausreichende Möglichkeiten.

Um die Möglichkeiten der Vereinfachung und Erleichterung der Bohrlochkonstruktion effektiv nutzen und somit große technische und ökonomische Reserven erschließen zu können, ist eine genaue Analyse eventuell auftretender Komplikationen beim Bohren aber auch an den eingebauten Futterrohrtouren erforderlich. Es müssen intensiv Erfahrungen über die im Bohrloch auftretenden Belastungen und den Zustand der Futterrohre gesammelt werden. Außerdem sind gezielt technologische Reserven zu nutzen, die es gestatten, komplikationslos und mit großer Geschwindigkeit zu bohren. Dazu gehören eine hochqualitative Bohrspülmng und leistungsstarke Bohrwerkzeuge, Bohrstränge und Bohranlagen.

11. Einige Besonderheiten von Bohrlochkonstruktionen bei Gasbohrungen und übertiefen Bohrungen

Am Beispiel der Besonderheiten der Bohrlochkonstruktion bei Gasbohrungen, d. h. bei Such-, Erkundungs- und Produktionsbohrungen auf Erdgas und übertiefen Bohrungen, sollen im letzten Abschnitt dieser Fachbroschüre praktische Probleme bezüglich der Bohrlochkonstruktion im Zusammenhang dargestellt werden. Solche Bohrungen eignen sich hierfür aus zwei Gründen sehr gut. Einmal stellen sie extreme Anforderungen an die Bohrlochkonstruktion und zum anderen gehören solche Bohrungen zum Bohrprogramm im Industriezweig Erdöl-Erdgas der DDR.

Um eine Gaslagerstätte wirtschaftlich und sicher aufschließen und abbauen zu können, müssen die abgeteuften Bohrungen (Sonden) besonders fest und dicht sein. Bereits beim Bohren und während der Verrohrungs- und Zementationsarbeiten besteht ein hohes Risiko des Gaszutritts. Hieraus leiten sich Besonderheiten für die Bohrlochkonstruktion ab, die ihren Ursprung im besonderen Verhalten des Erdgases haben (hohe Beweglichkeit und Kompressibilität, hohe Speicherdrücke und Fließgeschwindigkeit, hohe Energieverluste und Produktionstemperaturen) /6/.

Treten beim Bohren größere Mengen Erdgas in das Bohrloch ein, so daß dieses zur Vermeidung einer offenen Eruption geschlossen werden muß (die Preventer werden geschlossen), kommt es infolge der fehlenden Möglichkeit der Druckentspannung zu einer Druckinversion. Die aufsteigenden Gasblasen können sich nicht frei vergrößern und entspannen. Sie behalten ihren Druck. Es kommt zu einem enormen Druckanstieg über das gesamte Bohrloch. Die Folge davon kann ein Aufreißen des Gebirges, der Verlust der im Bohrloch verbliebenen restlichen Bohrspülung und somit ein weiteres Zufließen von Erdgas in das Bohrloch sein. Das Erdgas tritt dann in unkontrollierbaren Mengen in obere Schichten ein und kann, wenn es nach übertage austritt, zu gefährlichen Griffons (Kraterbildungen) führen, in denen die gesamte Bohranlage versinkt. Um ein solches gefährliches Aufreißen des Bohrloches zu vermeiden, muß eine sehr innendruckfeste technische Rohrtour so tief eingebaut werden, daß die frac-

gefährdeten Horizonte sicher abgedeckt sind. Da im Falle geringer Zementkopfhöhen bei hohen Innendrücken auch große zusätzliche Zugkräfte in einer solchen Rohrtour entstehen, wird diese nicht selten bis übertage zementiert.

Der Bohrlochkopf der Gasbohrung muß sehr innendruckfest sein. Die hohe Innendruckfestigkeit erfordert längere Ankerrohrtouren. Die von der zementierten Ankerrohrtour aufzunehmende axiale Last ist als Summe der Absetzlasten aller im Bohrlochkopf abgefangenen Rohrtouren (bei Produktionsbohrungen einschließlich Tubingstrang) zu ermitteln. Der Durchmesser der Produktionsrohrtour und des Tubingstranges wird nach fördertechnischen Gesichtspunkten zur Sicherung hoher Förderraten bei geringen Fließverlusten möglichst groß gewählt (Beispiel: Förderrate über $700\ 000\ \text{m}^3$ (N) je Tag; Speicherteufe 3500 m; Speicherdruck $360\ \text{kp cm}^{-2}$; optimaler Tubingstrang $\varnothing 4\ 1/2''$, Endrohrdurchmesser 7").

Bezüglich der Produktionsrohrtour gibt es bei Gasbohrungen eine Reihe von besonderen Anforderungen.

Die hohen Produktionsdrücke und Produktionstemperaturen einer fördernden Gassonde verursachen einen komplizierten Spannungszustand in den Futterrohren. Besonders kritisch werden solche Belastungen nicht im Rohrkörper (dieser wird bei entsprechender Wanddicke und Materialgüte immer ausreichend fest sein), sondern in den Gewindeverbindungen, da diese nicht nur fest, sondern auch sehr dicht sein müssen. Die Dichtheit der Gewindeverbindungen ist allein mittels spezieller Dichtmittel, die auf das Gewinde vor dem Verschrauben aufgetragen werden, oft nicht zu gewährleisten. Es müssen Futterrohre mit Spezialverbindungen, die einen metallischen Stoß- und Dichtsitz haben, verwendet werden (Beispiel: Typ, BDS - s. /4/).

Läßt sich bei entsprechendem Materialeinsatz und sorgfältiger Kontrolle (Abdrücken der Futterrohre und Rohrtourabschnitte) die Dichtheit der Futterrohrtour erreichen, so ist beim Abdichten des Ringraumes die Erfolgchance wesentlich geringer. Der Ringraum der Produktionsrohrtour, speziell unmittelbar über dem produktiven Gashorizont, muß aber sehr dicht sein, damit das Erdgas nicht nach oben, hinter den Rohren, abwandern kann.

Die Dichtheit des Ringraumes kann nur mittels spezieller Futterhaußenpacker oder durch einen am Bohrstrang und an der von lockerer Tonkruste befreiten Bohrlochwand gut haftenden, undurchlässigen Zementsteinmantel erreicht werden. Zu diesem Zweck muß die Produktionsrohrtour gut zentriert sein und ein ausreichendes Ringraumspiel haben.

Das ausreichende Ringraumspiel ist einmal für das erfolgreiche Zentrieren (Einbaumöglichkeit funktionsfähiger Zentralisation) zum anderen aber für das erfolgreiche Verdrängen der Bohrspülung durch den aufsteigenden Zementschlammstrom erforderlich. Ungünstige Verhältnisse liegen diesbezüglich bei einer Kombination von 5"- (Produktionsrohrtour) und 7"- (letzte technische Rohrtour) Rohrtouren vor. Nicht selten werden deshalb in Gasbohrungen Kombinationen mit großem Ringraumspiel gewählt. Als Beispiel hierfür seien folgende typische Verrohrungsschemata aus einigen bekannten Gasfeldern und das einer sehr tiefen Gasbohrung (über 6000 m) angeführt:

Schebelinka (UdSSR): 16 3/4" x 11 3/4" x 6 5/8"; Groningen (Holland): 16" x 10 3/4" x 7"; Bohrung Panhandle (USA, Texas) 20" x 13 3/8" x 10 3/4" x 7 5/8" x 4 1/2".

Ein in der Praxis noch umstrittenes Problem ist die Festlegung der Zementhöhe für die Produktionsrohrtour. Lange Zeit war man der Meinung, daß die Höhe des Zementmantels lediglich nach geologischen Gesichtspunkten festzulegen sei. Später wurde es immer notwendiger, auch technologische und technische Gesichtspunkte zu berücksichtigen. Die dabei auftretenden widersprüchlichen Ansichten haben ihren Grund nicht zuletzt darin, daß dem Zementmantel im Ringraum unterschiedliche Aufgaben zugeordnet werden. Unbestritten sind zwei große Aufgaben. Einmal soll der Zementmantel den Ringraum dicht verschließen, indem er diesen bei guter Haftung an der Rohrtour und am Gebirge vollständig ausfüllt, dabei selbst jedoch undurchlässig ist, zum anderen soll er aber auch dazu beitragen, die Rohrtour selbst, d. h. deren Gewindeverbindungen, vor Überbelastungen und somit vor Undichtheiten zu schützen.

Zu geringe Zementkopfhöhen erfordern sehr hohe Absetzlasten der Rohrtouren in den Keilen des Kolonnenkopfes, um den durch hohe Produktionstemperaturen auftretenden Dehnungs- und Aus-

knickvorgängen ausreichend entgegenzuwirken. Sehr hohe Absetzlasten aber führen zu Überbelastungen der Gewindeverbindungen. Bei geringen Zementkopfhöhen entsteht also eine Zwangssituation. Man muß zur Vermeidung von Knickbelastungen im unteren Teil des nichtzementierten Bereiches hohe Zugüberlastungen im oberen Teil der Rohrtour in Kauf nehmen.

Auch sehr große Zementkopfhöhen, d. h. nichtzementierte Strecken von höchstens 50 bis 200 m, wie sie nicht selten bei technischen Rohrtouren vorkommen, erschweren den Vorgang des Absetzens. Die günstigsten Verhältnisse für das Absetzen der Rohrtouren herrschen vor, wenn die Zementkopfteufe 500 bis 1000 m beträgt.

Über die Zementmantelhöhe und ihren Einfluß auf die Dichtheit des Ringraumes in Gasbohrungen gibt es unterschiedliche Auffassungen. Einige Autoren führen Gasdurchbrüche auf zu große Zementmantelhöhen zurück, andere erklären geringe Zementmantelhöhen als Ursache für Gasdurchbrüche.

Häufig wird die Entscheidung über die Höhe des Zementmantels bereits durch die Fracgradienten des Gebirges aber auch aus technologischer Sicht gefällt. Es gibt aber Anpassungsmöglichkeiten (Erleichterung der Zementschlämme, Verbesserung der rheologischen Eigenschaften der Zementschlämme, Stufenzementation u. a.), so daß die Frage nach der Höhe des Zementmantels auch in diesen Fällen aktuell bleibt.

Die angeführten Besonderheiten der Bohrlochkonstruktion von Gasbohrungen lassen erkennen, daß auch die Entwicklung der Bohrlochkonstruktion über den Zeitraum des Aufschlusses der gesamten Lagerstätte in ihrer üblichen Tendenz der Vereinfachung und Erleichterung besonderen Gesetzen unterliegt.

Der übliche Entwicklungstrend:

- Reduzierung der Einbauteufen, Reduzierung der Zementkopfhöhen, Übergang auf kleinere Durchmesser, Verwendung billiger Futterrohre u. a. - schlägt bei Gasbohrungen sehr häufig in das Gegenteil um.

Die Sicherheit der Bohrlochkonstruktion gegen Gasdurchbrüche ist bedeutungsvoller und ist letztlich wirtschaftlich ausschlaggebender als etwaige Einsparungen an Verrohrungs- und

Zementationskosten. Probleme, die sich bezüglich der Bohrlochkonstruktion in Übertiefen Bohrungen (mit Endteufen über 6000 m) stellen, ergeben sich aus der Notwendigkeit der Beherrschung großer Austrittslängen und der Planung von zwei bis vier technischen Rohrtouren. Bild 5 zeigt die Bohrlochkonstruktionen (vereinfacht) für einige sehr tiefe Bohrungen. Auf diesem Bild erkennt man die typischen Verrohrungsschemata mit den großen Einbauteufen und Austrittslängen der einzelnen Rohrtouren.

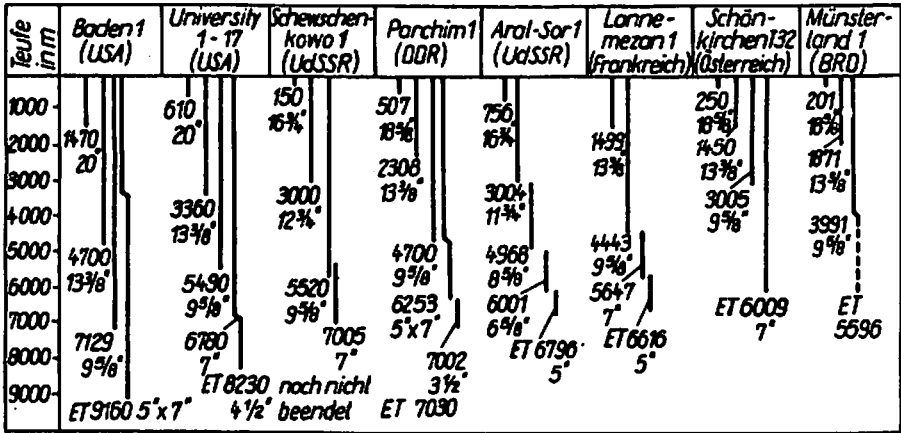


Bild 5. Skizzen von Bohrlochkonstruktionen abgeteufter Übertiefer Bohrungen

Rekordeinbauteufen wurden für folgende Rohrtouren in der zur Zeit tiefsten Bohrung der Welt - Baden 1 (USA) mit der Endteufe von 9160 m - erreicht (s. Bild 5).

20"-Rohrtour im 26"-Bohrloch - 1466 m (in einer Sektion)

13 3/8"-Rohrtour im 17 1/2"-Bohrloch - 4699 m (in einer Sektion)

9 5/8"-Rohrtour im 11 7/8"-Bohrloch - 7129 m (in zwei Sektionen)

Der Einbau der 9 5/8"-Rohrtour in zwei Sektionen (die 2. Sektion wurde erst später nachgesetzt) erfolgte deshalb, weil der obere Bereich der 9 5/8"-Rohrtour nicht einem übermäßig hohen Ver-

schleiß der Rohrrinnenwand ausgesetzt werden sollte, denn es war geplant, die vorgesehene Endteufe aus der 9 5/8"-Rohrtour heraus zu erreichen.

Die geplante Endteufe mit einem Bohrlochdurchmesser von mindestens 7 1/2 bis 8 1/2" zu erreichen, wird bei übertiefen Bohrungen allgemein angestrebt. Bei diesem Durchmesser zeigen die Bohrwerkzeuge maximale Bohrleistungen, und die Bohrung kann schnell und komplikationsfrei beendet werden.

Literatur- und Quellenverzeichnis

- /1/ SCHATZOW, N. I.: Bohren auf Erdöl und Erdgas. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1964
- /2/ SCHATZOW, N. I.: Schichtentrennung in Tiefbohrungen. Moskau: Verlag Gostoptechisdat 1961
- /3/ MATZDORF, U., und G. RULOFF: Zementation von Bohrlöchern. Fachbroschürenreihe Tiefbohrtechnik, VVB Erdöl-Erdgas. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1976
- /4/ SCHWARZMEIER, R., und K. BALZER: Futterrohre. Fachbroschürenreihe Tiefbohrtechnik, VVB Erdöl-Erdgas. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1976
- /5/ NOACK, J., und M. MICHALZIK: Ausrüstungen zum Abfangen von Rohrtouren. Fachbroschürenreihe Tiefbohrtechnik, VVB Erdöl-Erdgas. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie
- /6/ SCHULZE, K., J. ENGELHARDT und R. SCHWARZMEIER: Probleme der Gasdichtheit in Tiefbohrungen. Sonderdruck FIEE Gommern, Reihe D 11/74
- /7/ SARKISSOV, G. M.: Berechnung von Futterrohr Touren. Moskau: Verlag Gostoptechisdat 1961
- /8/ Methodik zur Festigkeitsberechnung des Systems Bohrzementstein - Rohr. Herausgeber: Erdölministerium Moskau 1973

Im gleichen Verlag sind erschienen:

Technik und Umweltschutz

Luft - Wasser - Boden - Lärm

Publikation Nr. 11

Ausbreitungsrechnung und Meßverfahren zur Luftüberwachung

Herausgegeben von der Kommission für Umweltschutz
beim Präsidium der Kammer der Technik

199 Seiten mit 58 Bildern und 21 Tabellen

Format 14,7 x 21,5 cm · Broschur (zelloph.) 8,80 M

Auslandspreis 12,- M

Bestell-Nr.: 541 072 4

Die vorliegende Broschüre enthält interessante theoretische und praxisbezogene Beiträge zu den Themenkomplexen Analysenmeßtechnik, Meßdatenerfassung und -verarbeitung sowie Ausbreitungsrechnung.

In den einzelnen Arbeiten werden wichtige neue Erkenntnisse und Ergebnisse über die Einsatzmöglichkeiten moderner Verfahren zur Messung und Berechnung von Spurenstoffkonzentrationen in der Atmosphäre sowie zuverlässige Methoden der Erfassung, Verarbeitung und Darstellung von Meßwerten zusammengefaßt.

In konzentrierter Darstellung berichten anerkannte Fachleute aus den Bereichen der Forschung und Praxis über die gegenwärtigen Einsatzmöglichkeiten moderner Spurenanalysenverfahren zur Immissionskontrolle, über die Staubmessung und Analyse von Nitrosaminen sowie die Bestimmung von Stickstoffdioxidemissionen bei der Erdgasverbrennung. Auf dem Gebiet der Ausbreitungsrechnung wird ein neues Modell vorgestellt, mit dessen Hilfe die meteorologischen Ausbreitungsbedingungen umfassend berücksichtigt werden können. Ein weiterer wichtiger Themenkomplex befaßt sich ausführlich mit rechnerischen Verfahren zur Bestimmung der SO₂-Ausbreitung aus Hochschornsteinen, mit der Anwendung der maschinellen Rechentechnik bei der Verarbeitung von Daten aus Immissionsmessungen und Emissionskatastern sowie mit einem Verfahren zur automatisch-kartographischen Darstellung von Immissionsfeldern.

Diese Broschüre wendet sich an Umweltschutzbeauftragte und Ingenieure der Industriezweige Energie, Chemie, Hüttenwesen, Bergbau, an medizinische Einrichtungen, Bezirkshygieneinspektionen und Institutionen der Arbeitshygiene, an die Land- und Forstwirtschaft, Räte der Bezirke, Kreise, Städte und Gemeinden.

Technik und Umweltschutz
Luft - Wasser - Boden - Lärm

Publikation Nr. 10

Verminderung der Luftverunreinigung und medizinische Aspekte

Herausgegeben von der Kommission für Umweltschutz
beim Präsidium der Kammer der Technik

172 Seiten mit 35 Bildern und 11 Tabellen

Format 14,7 x 21,5 cm · Broschur (zelloph.) 6,50 M

Auslandspreis 10,- M

Bestell-Nr.: 541 071 6

Namhafte Wissenschaftler und anerkannte Experten aus zahlreichen Großbetrieben berichten an Hand konkreter Beispiele für industrielle Schwerpunktbereiche über die neuesten Erkenntnisse und Möglichkeiten zur weiteren Verbesserung der lufthygienischen Situation.

In einigen wissenschaftlich-technischen Beiträgen werden interessante Erkenntnisse über die Anwendung umweltfreundlicher Technologien, z. B. beim Übergang von der Carbochemie zur Petrochemie, vermittelt. Weiterhin können verallgemeinerungswürdige Methoden der Betriebsanalyse zur Aufstellung eines Sanierungs- und Aussonderungsprogramms vorgestellt werden. Durch die Entwicklung von Aktivitäten, wobei Neuererwesen und Leitungstätigkeit eine wesentliche Rolle spielen, wurden beachtliche technische Lösungen zur Eindämmung von Staub beim Umschlag und Transport von festen Brennstoffen erreicht. Weiterhin wird über Rationalisierungsmaßnahmen und Entwicklungstendenzen im Entstaubungsanlagenbau informiert.

International anerkannte Mediziner und Ernährungswissenschaftler berichten abschließend über die Beziehungen zwischen dem Wirkungsmechanismus industrieller Immissionsstoffe, der Qualität der Nahrungsgüter und möglichen Krankheitserscheinungen.

Die vorliegende Broschüre wendet sich an die Industriezweige Energie, Chemie, Hüttenwesen, Bergbau, den Entstaubungsanlagenbau, medizinische Einrichtungen, Bezirkshygieneinspektionen und Institutionen der Arbeitshygiene sowie an Räte der Bezirke, Kreise, Städte und Gemeinden.

Bestellungen nehmen alle Buchhandlungen
und der Verlag, 7031 Leipzig, Postschließfach 16,
entgegen.

VEB DEUTSCHER VERLAG FÜR GRUNDSTOFFINDUSTRIE · LEIPZIG