

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 Endrohrtouren (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 Kontrollorddurchmesser 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 Bohrabchnitt der technischen Rohrtour, Rohrdurchmesser und Meißeldurchmesser der vorangehenden technischen Rohrtouren der Leit- oder Ankerrohtour 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.