

## 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  $10 \text{ m}$ . 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  $P_{ak_2}$  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 ( $P_{ak_1}$  und  $P_{ak_2}$ ) 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  $590 \text{ kp cm}^{-2}$  und die 9 5/8"-Rohrtour eine Außendruckfestigkeit von  $705 \text{ kp cm}^{-2}$ . Das gesamte System ist also bis zu einem Außendruck von  $690 \text{ kp cm}^{-2}$  fest und nicht nur bis  $202 \text{ kp cm}^{-2}$ . 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.