

#### 4. Anforderungen an die Bohrung zur Herstellung einer Kaverne

Bei der Planung der Bohrungen für Speicherkavernen sind eine Reihe von Besonderheiten zu beachten, die bei Such- und Erkundungsbohrungen auf Erdöl und Erdgas weniger stark ins Gewicht fallen.

Die Kavernenbohrung muß mit besonderer Sorgfalt abgeteuft, zementiert und komplettiert werden, da das Mißlingen der Bohrung zu einer Einschränkung der Verwendbarkeit der Kaverne führt. Muß z. B. wegen mangelnder Dichtheit der großkalibrigen Produktionsrohrtour eine zusätzliche Rohrtour eingebaut werden, verringert sich demzufolge auch der Durchmesser der Solstränge und Förderrohrtour und damit auch die mögliche Spülrate beim Solen und Fördermenge beim Speicherbetrieb.

Es erweist sich als vorteilhaft, auf dem Salzstock oder Salzkissen zuerst eine oder unter Umständen mehrere Erkundungsbohrungen abzuteufen mit dem Ziel, Feststellung des Salzstockprofils, Durchführung von Kern- und Meßarbeiten, Ausweis einer ungestörten, homogenen Steinsalzmächtigkeit, die sich zum Aussohlen einer Kaverne eignet, Gewinnung von bohrtechnischen Kenntnissen des ausgewählten Salzstockes und Durchführung von Festigkeitsuntersuchungen am Salzkern zur Aussage der bergbaulichen Standsicherheit. Da oft aus terminlichen Gründen kein geologischer Vorlauf in der Erkundung des Salzstockes möglich ist, muß die Kavernenbohrung die Erkundungsaufgaben mit übernehmen. Die geforderte Vollkernstrecke im Salzbereich steht bei der großdimensionierten Kavernenbohrung im Gegensatz zu dem Bemühen, die Bohrung seiger mit einer maximal zulässigen Neigung von  $< 2^{\circ}$  niederzubringen. Diese vorgeschriebene Vertikalität wird erreicht durch Stabilisierung des Schwerstangenstranges bzw. durch Ausnutzung des Pendeleffektes beim Bohren. Die Meißelbelastung wird so gering gewählt, daß der Schwerstangenstrang nicht ausknickt. Die mit dieser geringen Meißelbelastung (6 bis 10 Mp im Deckgebirge, 4 bis 7 Mp im Salz) erreichbare niedrige mechanische Bohrgeschwindigkeit sowie die zur Neigungsüberwachung im Abstand von 50 bis 100 m durchzuführenden Bohrlochabweichungsmessungen verzögern den Abteufprozeß erheblich. Aus der letzten zementierten Rohrtour heraus wird zumeist im abgesetzten Bohrlochdurchmesser gekernt, um nach dem Eignungsnachweis dann auf den maximal möglichen Durchmesser zu erweitern.

Die Forderung nach Vertikalität der Kavernenbohrung ergibt sich aus folgenden Überlegungen:

- Biegebeanspruchung der frei in der Kaverne hängenden Solstränge
- je größer die Neigung und Gesamtabweichung, desto größer ist der erforderliche Sicherheitspfeiler zu benachbarten geplanten oder vorhandenen Kavernen
- Realisierung einer bestimmten Kavernenform (Konzentrizität der Kaverne zur Bohrung)

- bei vorhandener Neigung treten Schwierigkeiten beim Ausbau des Solstranges auf, indem die Muffen am Rohrschuh der letzten zementierten Rohrtour anschlagen, festhaken und freigedreht werden müssen, somit den Rohrschuh mechanisch erschüttern und den Zement hinter den Rohren schädigen (Rohrabrisse möglich)
- die echometrische Vermessung der exzentrisch gesolten Kaverne ist fehlerbehaftet.

Zur Vermeidung obengenannter Nachteile muß auf dem vertikalen Niederbringen von Kavernenbohrungen bestanden werden, selbst wenn einfallende Schichten und Wechsellagerungen dasselbe zeit- und arbeitsaufwendig gestalten. Eine optimale flächenhafte Ausnutzung erzielt man beispielsweise bei einer Anordnung der Kavernen im Sechseck. Bei einem gegenseitigen Abstand von 250 m können theoretisch auf einer Fläche von  $1 \text{ km}^2$  14 Bohrungen geteuft werden, was bei einem angenommenen Kavernenvolumen von  $500\,000 \text{ m}^3$  einen Gesamthohlraum von  $7 \text{ Mio m}^3$  bedeutet. In der Praxis ist eine derart optimale flächenhafte Ausnutzung wegen der ober- und untertägigen Bedingungen - hierbei spielt wiederum die Frage der Vertikalität der Bohrung eine Rolle - nicht möglich. Real wäre die Anlage von insgesamt 3 bis  $4 \text{ Mio m}^3$  auf einer Fläche von  $1 \text{ km}^2$ .

Eine weitere Forderung, die an die Kavernenbohrung gestellt werden muß, ist die Kalibrierhaltigkeit des Bohrloches im Bereich des geplanten Rohrschuhs der Produktionsrohrtour. Auskesselungen, die aus dem Einsatz nicht voll ausgesalzener Spülung oder durch Havariebehebungsarbeiten (Süßwasserwanne zur Lösung eines festgewordenen Bohrstranges) resultieren, erschweren oder verhindern gar eine einwandfreie Zementation des Rohrschuhbereiches.

Die Bedeutung, die der qualitätsgerechten Zementsäule der Produktionsrohrtour beigemessen wird, läßt sich aus der Tatsache ableiten, daß die Produktionsrohrtour oftmals erst bei Erreichen der Endteufe eingebaut und zementiert wird. Damit wird die mechanische Beanspruchung durch Bohrarbeiten in der Rohrtour vermieden.

#### 4.1. Bohrlochkonstruktion von Kavernenbohrungen

Kavernenbohrungen werden im Rotaryverfahren mit mittelschweren Bohranlagen abgeteuft und mit den in der Erdölindustrie üblichen und verfügbaren Ausrüstungen versehen.

Je nach Kavernengröße, dem Wasser-Sole-Haushalt und in Abhängigkeit von den geologischen Verhältnissen sind folgende Bohrlochkonstruktionen üblich:

Für Kavernen mit einem geometrischen Volumen über  $300\,000\text{ m}^3$ , die mit Spülraten von  $300\text{ bis }500\text{ m}^3\text{ h}^{-1}$  ausgesolt werden, ist eine schwere Konstruktion erforderlich.

Rohrtour	Dimension in Zoll	Bohrlochdurchmesser in mm	Teufenlage in m
Standrohr	28 ... 30	900	20 ... 70
Leitrohrtour	18 5/8	600	100 ... 500
Produktions- rohrtour	13 3/8	445	600 ... 1000 (bis Kavernen- oberkante)
äußerer Solstrang 9 5/8" bis 10 3/4"			
innerer Solstrang 7"			

Bei bohrtechnisch unkomplizierten geologischen Verhältnissen und geringer Teufenlage des Salzes vereinfacht sich diese Bohrlochkonstruktion:

Rohrtour	Dimension in Zoll	Bohrlochdurchmesser in mm	Teufenlage in m
Standrohr	28	900	20 ... 40
Produktions- rohrtour	18 5/8	660	300 ... 500
äußerer Solstrang 11 3/4" bis 10 3/4"			
innerer Solstrang 7" bis 8 5/8"			

Diese Solinstallation gestattet einen maximalen Wasser-Sole-Durchsatz beim Solen (Speicherfeld Manosque/Frankreich).

Für komplizierte geologische Verhältnisse, bei denen zur Abdeckung nicht standfester oder spülungsverlustgefährdeter Schichten eine zusätzliche technische Rohrtour eingebracht werden muß, sowie bei sehr tief geplanten Kavernen kommt folgende Bohrlochkonstruktion zur Anwendung:

Rohrtour	Dimension in Zoll	Bohrlochdurchmesser in mm	Teufenlage in m
Standrohr	28 ... 30	900	20 ... 70
Leitrohrtour	18 5/8	660	100 ... 300
technische Rohrtour	13 3/8	445	600 ... 1500
Produktions- rohrtour	9 5/8	311	1200 ... 2200
äußerer Solstrang 7"			
innerer Solstrang 4 1/2"			

Die mögliche Spülrate bei dieser Solstrangkombination ist entsprechend gering und liegt bei 50 bis 100 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>.

Die in der DDR und Sowjetunion in der Regel angewendete Bohrlochkonstruktion sieht den Einsatz der in GOST-Norm hergestellten Futterrohrdimension vor und gestattet Spülraten von 80 bis 120 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>.

Rohrtour	Dimension in Zoll	Bohrlochdurchmesser in mm	Teufenlage in m
Standrohr	18 3/4 ... 21	660 ... 720	30 ... 50
Leitrohrtour	14 3/4	445 ... 490	200 ... 400
Produktions- rohrtour	11 3/4	346	600 ... 1200
äußerer Solstrang 8 5/8"			
innerer Solstrang 5 3/4"			

Die Produktionsrohrtour wird für Gas-Kavernenspeicher verschweißt, bei Speichern für Flüssigprodukte oft auch nur verschraubt eingebaut.

Die Solstränge werden, da sie während des sich über mehrere Jahre erstreckenden Solprozesses öfter ausgebaut und auch gewechselt werden müssen, verschraubt eingebaut. Wird ein gasförmiges Sperrmedium eingesetzt, müssen die Gewindeverbindungen durch Schmier- und Dichtmittel technisch gasdicht gestaltet werden.

Die Solstränge werden entweder mit Keilen im Kolonnenkopf abgefangen und die Ringräume mit Gummidichtelementen abdichtet, oder das Abfangen erfolgt mit Absetzflanschen mit entsprechenden Dichtringen zur Ringraumabdichtung.

#### 4.2. Belastung der Solstränge

Im allgemeinen wird bei der Berechnung und Auswahl der Solstränge nur die durch das Eigengewicht bewirkte Zugbelastung am obersten Rohr berücksichtigt und die aus der Futterrohrberechnung für Erdölbohrungen üblichen Belastungsfälle Innendruck und Außendruck negiert.

Insbesondere jedoch beim Solbetrieb mit einem gasförmigen Sperrmedium tritt beim äußeren Solstrang eine Außendruckbelastung (Ringraum Produktionsrohrtour/äußerer Solstrang) am obersten Rohr auf, die zusammen mit der ebenfalls am obersten Rohr wirkenden maximalen Zugbelastung eine nicht zu übersehende biaxiale Belastung darstellt.

An Hand eines Beispiels soll die Berechnungsmethodik nach der Hypothese der größten Gestaltsänderungsarbeit dargestellt werden.

$$\sigma_v^2 = \sigma_z^2 + \sigma_t^2 - 2 \nu \sigma_z \sigma_t \quad (1)$$

$\sigma_v$  Vergleichspannung

$\sigma_z$  axiale Spannung

$\sigma_t$  tangentielle Spannung

$\nu$  Poissonsche Zahl = 0,5

Ausgangsdaten:

Solstrang (verschraubt eingebaut) 8 5/8", 8 mm K, GOST 632-64

Länge: 750 m, Gewicht G: 43,2 kg m<sup>-1</sup>. 750 m = 32,4 Mp  
 ○○○○○○

kritischer Außendruck  $p_{e \text{ zul}} = 115 \text{ kp cm}^{-2}$

Zuglast im Rohr:  $F_{\text{zul}} = 200 \text{ Mp}$

gasförmiges Sperrmedium, Kopfdruck  $p_K = 80 \text{ kp cm}^{-2}$

Sicherheiten bei einachsiger Belastung:

Abstreifen

$$S_A = \frac{F_{\text{zul}}}{G} = \frac{200}{32,4} = 6,17$$

Außendruck

$$S_e = \frac{p_{e \text{ zul}}}{p_K} = \frac{115}{80} = 1,43$$

Bei Überprüfung des obersten Rohres auf biaxiale Belastung von Zug- und Außendruckbelastung nach der Hypothese der größten Gestaltsänderungsarbeit ergibt sich folgende Sicherheit:

$$z = \sqrt{y^2 + x^2 - xy} \quad \text{in \%} \quad (2)$$

$$y = \frac{\text{wirksamer Außendruck}}{\text{kritischer Außendruck}} \quad \text{in \%}$$

$$x = \frac{\text{wirksames Gewicht}}{\text{zulässige Zugbelastung}} \quad \text{in \%}$$

$z$  = prozentualer Anteil von der Streckgrenze bei gleichzeitiger Zug- und Außendruckbelastung in %

$$y = \frac{80 \cdot 100}{115} = 69,6\% \quad x = \frac{32,4 \cdot 100}{200} = 16,2\%$$

$$z = \sqrt{69,6^2 + 16,2^2 + 69,6 \cdot 16,2} = \sqrt{6227,6} = 78,91\%$$

Sicherheit

$$s = \frac{100}{z} = \frac{100}{78,91} = 1,26 > 1,25$$

Die ausgewiesene Sicherheit gegen biaxiale Belastung entspricht der für diese Belastung geforderten Sicherheit, so daß Rohre dieser Qualität gerade noch einsetzbar wären. Rohre gleicher Wanddicke und minderer Qualität (D) könnten als Solstrang bereits nicht mehr eingesetzt werden.

Bei verschweißtem Einbau des berechneten Solstranges würde bei Berücksichtigung der durch das Verschweißen verringerten Belastbarkeit des Rohrmaterials die ausgewählte Qualität 8 5/8", 8 mm K ebenfalls nicht mehr ausreichen. Das vorliegende Beispiel sollte beweisen, daß auch die Auswahl und Berechnung von Solsträngen mit entsprechender Sorgfalt erfolgen muß.

#### 4.3. Anforderungen an die Zementation

Für Gaskavernen gelten dieselben hohen Anforderungen an die letzte zementierte Rohrtour hinsichtlich der Sicherheit gegen Gasaustritte hinter den Rohren wie auf Erdgassonden.

Zur Herstellung einer technisch gasdichten Zementation bestehen folgende Forderungen:

- einwandfreier Zustand der Rohroberfläche
- einwandfreier Zustand der Bohrlochwand
- optimale Bestückung der Verrohrung mit Untertageausrüstungen (Kratzer, Zentralisatoren)
- Einsatz eines nicht schrumpfenden Zementes (Quellzement)

Die Anwendung eines solchen Spezialzementes in UGS-Bohrungen, der aus Tiefbohrzement und anorganischen und organischen Zusätzen besteht, soll folgende Wirkungen zeigen:

- Erhöhung der Haftung des Zementes an Rohr und Gestein
- Verbesserung der Dichtheit
- Verminderung der Schrumpfung
- Verbesserung des Wasserrückhaltevermögens

Die Rezepturen mit den Anteilen der einzelnen Komponenten sind abhängig von der Teufenlage und dem Antreffen salzhaltiger Partien im Profil. Die Zementagetechnologie ist wegen der Vielkomponentenvermischung aufwendig und kompliziert.

Erfolgreich erwies sich auch der Einsatz von Zementschlämme hoher Dichte auf Salzwasserbasis im Salinar.



#### 4.4. Dichtheitsprüfung vor Aufnahme der Solarbeiten

Vor Aufnahme der Solarbeiten muß die Dichtheit der Produktionsrohrtour und des Zementmantels durch Abdrücken nachgewiesen werden.

Liegen zeitlich zwischen dem Einbau der Produktionsrohrtour und dem geplanten Solbeginn nur wenige Monate, ist die Durchführung der Dichtheitsprüfung bereits im Anschluß an die Zementerhärtung zu empfehlen, da zu diesem Zeitpunkt die montierte Bohranlage und die vorhandene bohrtechnische Ausrüstung noch verfügbar sind. Zum anderen gestattet die frühzeitige Vorlage des Prüfergebnisses die rechtzeitige Einleitung von evtl. erforderlichen Sekundärmaßnahmen.

Die Dichtheitsprüfung wird je nach Speichergut und Soltechnologie mit Sole, Luft oder dem Speichergut selbst durchgeführt.

##### 4.4.1. Abdrücken mit flüssigen Medien

Ein Abdrücken mit flüssigen Prüfmedien erfolgt bei Flüssigkeitskavernen, bei denen auch ein flüssiges Sperrmedium beim Solen eingesetzt wird. Vielfach wird die Dichtheitsprüfung mit dem Speichergut gefordert, jedoch ist in den meisten Fällen auch der Dichtheitsnachweis mit voll ausgesalzener Sole, die sich ohnehin bei längeren Stillstandszeiten in der Kavernenbohrung befindet, ausreichend. Wäre nämlich ein größeres Leck vorhanden, ist vom sicherheitstechnischen Standpunkt das Abdrücken mit Sole dem mit Öl, Diesel oder VK vorzuziehen, da keine Grundwasserverschmutzung zu befürchten ist.

Der Prüfdruck ist wegen des hydrostatischen Druckes der Flüssigkeitssäule gegenüber Gas geringer. Auch werden nicht nur der zementierte Ringraum und der Rohrschubbereich mit Druck beaufschlagt und die restliche Rohrtour durch Packer isoliert, sondern die gesamte Rohrtour abgedrückt. Das vereinfacht den Abdrückvorgang erheblich. Eine Zementschädigung tritt bei den geringen Drücken nicht ein.

Die Dichtheitsprüfung erfolgt in zwei Etappen mit dem beim Solen erwarteten Kopfdruck und mit dem beim Speicherbetrieb auftretenden Druck. In beiden Fällen wird die Flüssigkeitsmenge,

die täglich nachgepumpt werden muß, um den Prüfdruck wiederherzustellen, gemessen und graphisch aufgetragen.

Der zulässige Druckabfall bei dieser "Volumenmethode" bzw. die zur Aufrechterhaltung des Prüfdruckes zulässige tägliche Nachpumpmenge sind nicht allgemeingültig festgelegt.

Folgende Beispiele sind bekannt:

- DDR: 72 h Prüfdauer, 300 l Verlust (Kaverne!)
- USA: 24 h Prüfdauer, 10% zulässiger Druckabfall
- Frankreich: 25 bis 35 d Prüfdauer, 2 bis 5 l d<sup>-1</sup> Verlust

Aus der Grafik kann man je nach Verlauf der Kurve die Dichtigkeit der Bohrung einschätzen (Bild 1).

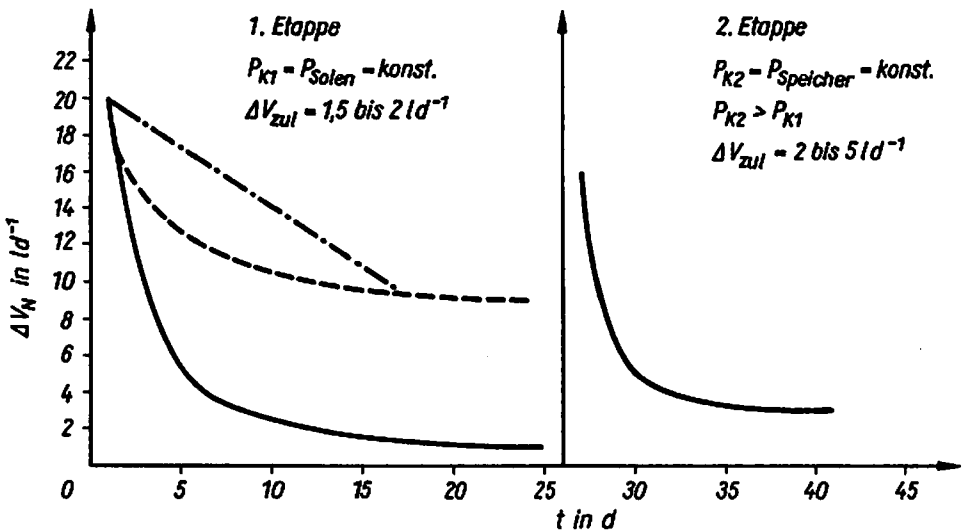


Bild 1. Abdrücken der Produktionsrohrtour nach der Volumenmethode

- dichtetes System
- - - - - undichtetes System
- · - · - undichtetes System

#### 4.4.2. Abdrücken mit gasförmigen Medien

Bei Gaskavernen oder bei Anwendung eines gasförmigen Sperrmediums muß zur Prüfung auch ein gasförmiges Prüfmedium, zumeist Luft, verwendet werden.

Um jedoch den Zementmantel der Rohrtour nicht über die gesamte Länge zu belasten und die Bindung Rohr/Zement zu gefährden, wird nur der Rohrschuhbereich über einen Rohrpacker druckbeaufschlagt. Die Höhe des Prüfdruckes muß dem späteren Betriebsdruck im Rohrschuhbereich entsprechen.

Zur Dichtheitsprüfung sind folgende technologische Arbeiten durchzuführen:

1. Kalibrieren der Rohrtour zum Nachweis der Befahrbarkeit mit dem Packer
2. Einbau des Futterrohrpackers am Gestängestrang, wobei die Schraubverbindungen mit einem Dichtungsmittel versehen werden
3. Unmittelbar über dem Packer wird ein Schwerstangenstrang eingesetzt, der das Gegengewicht zum Prüfdruck aufbringt. Der Schwerstangenstrang kann reduziert werden, wenn an seiner Stelle ein Schutzdruck auf den Packer im Ringraum Gestänge/Produktionsrohrtour aufgebracht wird. Voraussetzung dazu ist ein Bohrlochabschluß (s. Abschnitt 4.4.3.)
4. Setzen des Packers und Abfangen des Gestänges im Drehtisch
5. Einbau eines Liftgestänges (Tubings) in das Gestänge, mit dem der Packer eingebaut wurde, Ablanden im Liftkopf
6. Leerliften des Gestängestranges und des Raumes unterhalb der Packers, indem mittels Kompressor in den Ringraum Gestänge/Tubingstrang Luft eingedrückt wird. Die Sole wird dabei über den Steigraum der Tubings abgefördert
7. Nach dem Leerliften der Bohrung wird der Tubingstrang ausgebaut und mit der Meßwinde der Solespiegel unterhalb des Rohrschuhs der Produktionsrohrtour eingemessen. Dieser Spiegel muß über einen bestimmten Zeitraum (z. B. 16 Stunden) konstant bleiben.
8. Zur Druckprobe wird der Kompressor an den Steigraum des Gestänges angeschlagen und der gesamte Raum mit dem Prüfdruck beaufschlagt.
9. Nach einem Temperatúrausgleich (16 Stunden) erfolgt über Differenzdruckmanometer die 72stündige Druckabfallmessung.
10. Anschließend wird die Luft gedrosselt vom Gestänge abgelassen und der Solespiegel nochmals eingemessen. Ist die-

ser konstant und traten keine Druckabfälle auf, war die Dichtheitsprüfung erfolgreich. Danach erfolgen die Füllung des Gestänges mit Sole, der Ausbau und die Montage des Solkopfes.

Während dieser Dichtheitsprüfung müssen selbstverständlich alle Obertageleitungen und Flanschanschlüsse absolut dicht sein; die Kontrolle erfolgt mittels Lecksuchgerät und eingebrachtem Fridona-Gas.

#### 4.4.3. Berechnung des Gestängestranges zum Packereinsatz

Der zur Belastung des Packers erforderliche Gestänge- und Schwerstangenstrang, der das Gegengewicht zum aufwärtswirkenden Prüfdruck darstellt, soll an Hand eines Beispiels berechnet werden, bei dem die während des Bohrprozesses eingesetzte Bohrgarnitur, bestehend aus 9 5/8"-API-, 8"-GOST-Schwerstangen und 6"-XH-Gestänge, zum Einsatz kommt.

Ausgangsdaten:

11 3/4"-Rohrtour, Durchmesser der Rohre  $D_R = 299$  mm,  $d_R = 277$  mm, Querschnittsfläche  $A_R = 602$  cm<sup>2</sup>, Prüfdruckhöhe  $p = 88$  kp cm<sup>-2</sup>, Dichte der Salzsole  $d_S = 1,2$  g cm<sup>-3</sup>, Teufe Packersitz = 480 m

1. Kraft, die den Packer hochdrückt

$$F = p A = 88 \cdot 602 \approx 53\,000 \text{ kp} \approx \underline{\underline{53 \text{ Mp}}}$$

2. Erforderliche Belastung zur Garantie der Packerdichtheit und zur Vermeidung des Hochschiebens

Annahme: Differenz 8 Mp

$$F = 53 + 8 \text{ Mp} = \underline{\underline{61 \text{ Mp}}}$$

3. Berechnung der auf den Packer wirkenden Belastung

Die auf den Packer wirkende Kraft setzt sich zusammen aus dem Gewicht des Gestänges und der Schwerstangen sowie aus dem Gewicht der im Ringraum befindlichen Flüssigkeit.

3.1. 9 5/8"-API-Schwerstangen

$$\text{Länge } l = 54 \text{ m, Metergewicht } q_m = 318 \text{ kp m}^{-1},$$

Außendurchmesser  $D_{s1} = 244,5 \text{ mm}$ , Querschnittsfläche

$$A_{s1} = 0,0472 \text{ m}^2$$

Ringraumfläche

$$A_1 = A_R - A_{s1} = 0,0602 - 0,0472 = 0,013 \text{ m}^2$$

Last je m Ringraum

$$q_{RR} = A_1 d_s = 0,013 \cdot 1200 = 15,6 \text{ kg m}^{-1}$$

Metergewicht gesamt

$$q_1 = q_{RR} + q_m = 15,6 + 318 = 333,6 \text{ kg m}^{-1}$$

Last durch 9 5/8"-Schwerstangen

$$F_1 = q_1 l = 333,6 \cdot 54 = 18 \text{ Mp}$$

### 3.2. 8"-GOST-Schwerstangen

Länge  $l = 72 \text{ m}$ , Metergewicht  $q_m = 192 \text{ kg m}^{-1}$

Außendurchmesser  $D_{s2} = 203 \text{ mm}$ ,

Querschnittsfläche  $A_{s2} = 0,0324 \text{ m}^2$

Ringraumfläche

$$A_2 = 0,0602 - 0,0324 = 0,0278 \text{ m}^2$$

Last je m Ringraum

$$q_{RR} = A_2 d_s = 0,0278 \cdot 1200 = 33,3 \text{ kg m}^{-1}$$

Metergewicht gesamt

$$q_2 = q_{RR} + q_m = 33,3 + 192 = 225,3 \text{ kg m}^{-1}$$

Last durch 8"-Schwerstangen

$$F_2 = q_2 l = 225,3 \cdot 72 = 16,2 \text{ Mp}$$

### 3.3. 6"-XH-Gestänge

Länge  $l = 354 \text{ m}$ , Metergewicht  $q_m = 40,2 \text{ kg m}^{-1}$

Außendurchmesser  $D_G = 152 \text{ mm}$ ,

Querschnittsfläche  $A_G = 0,0182 \text{ m}^2$

Ringraumfläche

$$A_3 = 0,0602 - 0,0182 = 0,042 \text{ m}^2$$

Last je m Ringraum

$$q_{RR} = A_3 d_s = 0,042 \cdot 1200 = 50,4 \text{ kg m}^{-1}$$

Metergewicht gesamt

$$q_3 = q_{RR} + q_m = 50,4 + 40,2 = 90,6 \text{ kg m}^{-1}$$

Last durch 6"-Gestänge

$$F_3 = q_3 \cdot l = 90,6 \cdot 354 \text{ m} = \underline{\underline{32,1 \text{ Mp}}}$$

### 3.4. Gesamtbelastung durch Gestängegarnitur

Die aus den drei Teillasten bestehende Gesamtbelastung des Packers beträgt  $F_{\text{ges}} = F_1 + F_2 + F_3 = 18 + 16,2 + 32,1$   
 $= \underline{\underline{66,3 \text{ Mp}}}$

Die oberhalb des Packers wirkende Last von 66,3 Mp übersteigt die berechnete aufwärtswirkende Kraft, so daß die zugrunde gelegte Garnitur als ausreichend für die Durchführung der Prüfarbeit anzusehen ist.

Für den Fall, daß keine Schwerstangen zum Zeitpunkt der Dichtheitsprüfung auf der Bohrung verfügbar sind und daß eine Bohrlochsicherung montiert ist, erfolgt die Belastung des Packers durch Aufbringen eines Schutzdruckes im Ringraum Gestänge/Produktionsrohrtour.

Dabei ist zu beachten, daß der Schutzdruck nicht oder nur unwesentlich größer als der Betriebsdruck der späteren Kaverne gewählt wird, um Schädigungen des Zementsteines zu vermeiden.

#### 4.4.4. Berechnung des Schutzdruckes zum Packereinsatz

Für die unter Abschnitt 4.4.3. angenommene Bohrung wird der erforderliche Schutzdruck berechnet, wenn ein 6"-XH-Gestängestrang zum Einsatz gelangt.

Ausgangsdaten: s. Abschnitt 4.4.3.

1. hochdrückende Kraft  $F_{\uparrow} = 53 \text{ Mp}$
2. erforderliche niederdrückende Kraft  $F_{\downarrow} = 61 \text{ Mp}$
3. Berechnung der durch das Gestänge wirkenden Kraft gemäß Abschnitt 4.4.3., Punkt 3.3.

6"-XH-Gestänge, Länge  $l = 480 \text{ m}$

Ringraumfläche  $A = 0,042 \text{ m}^2$

Last je m Ringraum  $q_{\text{RR}} = 50,4 \text{ kg m}^{-1}$

Metergewicht gesamt  $q = 90,6 \text{ kg m}^{-1}$

Last durch 6"-Gestänge  $F = q \cdot l = 90,6 \cdot 480 = \underline{\underline{43,5 \text{ Mp}}}$

#### 4. Differenz zur erforderlichen Kraft

$$\Delta F = F_{\downarrow} - F = 61 - 43,5 = 17,5 \text{ Mp}$$

=====

#### 5. Schutzdruck $p = \frac{\Delta F}{A} = \frac{17\ 500}{420} = 41,7 \text{ kp cm}^{-2}$

=====

Der im Ringraum aufzubringende Schutzdruck beträgt  $41,7 \text{ kp cm}^{-2}$ ; die Rohrtour wird im Rohrschuhbereich oberhalb des Packers mit einem Druckgradienten von  $2,06 \text{ kp cm}^{-2} \cdot 10 \text{ m}$  belastet.

Möglichkeiten, den Schutzdruck zu senken, bestehen in der Senkung des Prüfdruckes und im Einbau eines Schwerstangenstranges oberhalb des Packers.

#### 4.4.5. Maßnahmen bei negativem Ausgang der Dichtheitsprüfung

Bei negativem Abdrückergebnis wird mit verschiedenen Verfahren die Leckstelle geortet, um in Abhängigkeit von der Lage des Lecks und seiner Größe Reparaturen durchzuführen. Da Undichtheiten bei einer verschweißten Produktionsrohrtour nicht zu erwarten sind, vermutet man die Leckstelle zumeist im Rohrschuhbereich.

Bei größeren Verlustraten (mehrere  $\text{m}^3 \text{ d}^{-1}$ ) kann die Leckstelle durch zwei Temperaturmessungen lokalisiert werden. Dazu wird kalte Sole in die Bohrung einzirkuliert und nach 3 bis 5 Tagen Stillstand eine Temperaturmessung über die gesamte Rohrtourlänge durchgeführt. Die in das Gebirge abwandernde Sole kühlt die Umgebung ab, was durch Abweichung der Meßkurve von der zuvor gezogenen ersten Temperaturkurve ausgewiesen wird. Bei Flüssigkeitsverlusten von der Größenordnung ab  $100 \text{ l d}^{-1}$  kann durch Setzen eines Packers oberhalb des Rohrschuhs und getrennte Druckbeaufschlagung des Raumes ober- und unterhalb des Packers die Leckstelle gefunden werden. Die Voraussetzung dafür ist der genaue und dichte Packersitz.

Geringe Leckverluste lassen sich durch ein radioaktiv markiertes Medium (Gas- bzw. Flüssigkeit), das in den Bereich der vermuteten Leckstelle über einen Gestänge- oder Tubingstrang einzirkuliert wird, lokalisieren, indem bei geschlossenem Bohr-

lochkopf durch Druckerhöhung verpreßt wird. Anschließend wird der Bereich mit einer Gamma-Sonde vermessen.

Je nach Größe des Leckverlustes kommen verschiedene Abdicht- und Stopfmittel zum Einsatz, die folgende Eigenschaften haben müssen:

- dünnflüssig, gut verpumpbar
- lange Abbindezeit
- nicht löslich mit dem späteren Speichergut
- temperaturstabil

Harze, Kunststoffe und auch Zement mit Abbindeverzögerern erfüllen diese Bedingungen.

Die Abdichttechnologie besteht im allgemeinen im Einzirkulieren eines Spülungspuffers (hochviskos, zur Vermeidung einer größeren Vermischungszone) und des Dichtmittels, teilweisem Ausbau des Gestänge- oder Tubingstranges und Nachpumpen der entsprechenden Menge Sole bei geschlossenem Bohrlochkopf, wobei das Dichtmittel in das Leck verpreßt wird.

Nach dem Einbringen des Dichtmittels und ausreichender Erhärtungszeit muß die Dichtheitskontrolle wiederholt werden.

Führten diese Sekundärmaßnahmen nicht zum Erfolg, ist zu entscheiden, ob eine zusätzliche Rohrtour zur Abdeckung des Verlusthorizontes eingebaut und zementiert werden soll. Dabei darf nicht nur der mögliche Abdichterfolg gesehen werden, sondern es müssen die technologischen Folgen für die späteren Solarbeiten und den Speicherbetrieb über diese etwa 2 bis 3" kleinere Produktionsrohrtour abgewogen werden. Das ist in erster Linie ein ökonomisches Problem. Die geringen Spülraten beim Solen verlängern die Soldauer erheblich, die Ein- und Ausspeiseleistung beim Speicherbetrieb über den geringeren Querschnitt erfüllt nicht die an den Speicher gestellten Forderungen, so daß die Aufgabe dieser Bohrung und das Abteufen einer Ersatzbohrung mitunter eine echte Alternative darstellen.



#### 4.5. Einbauteufe der letzten zementierten Rohrtour

Mit dem Einbau der letzten zementierten Rohrtour, der Produktionsrohrtour, sind die Prämissen für die Kavernen im wesentlichen gesetzt.

Der kritische Punkt bezüglich des Betriebsdruckes beim Speicherbetrieb ist der Rohrschuh der Produktionsrohrtour. Entsprechend dem zulässigen Druckgradienten des Salzes, für Dauerbelastung beträgt er  $1,7$  bis  $1,85 \text{ kp cm}^{-2} \cdot 10 \text{ m}$ , kann der Betriebsdruck des Speichers mit zunehmender Rohrschuhteufe höher gewählt werden.

Beispiel:

- zulässiger Druckgradient DG des Salzes  $1,70 \text{ kp cm}^{-2} \cdot 10 \text{ m}$

- Soledichte  $d_s = 1,20 \text{ g cm}^{-3}$

- Rohrschuhteufe Produktionsrohrtour  $H = \text{a) } 800 \text{ m, b) } 900 \text{ m}$

1. zulässiger Druck beim Speicherbetrieb am Sondenkopf:

a)  $p_{Sp.} = 0,1 \cdot H \cdot DG$  - Druck durch Gewicht des Gases

$$p_{Sp.} = 0,1 \cdot 800 \cdot 1,7 - 10 = 126 \text{ kp cm}^{-2}$$

$$b) p_{Sp.} = 0,1 \cdot 900 \cdot 1,7 - 11 = 142 \text{ kp cm}^{-2}$$

2. zulässiger Druck beim Solen:

a)  $p_{So.} = 0,1 \cdot H (DG - d_s)$

$$p_{So.} = 0,1 \cdot 800 (1,7 - 1,2) = 40 \text{ kp cm}^{-2}$$

$$b) p_{So.} = 0,1 \cdot 900 (1,7 - 1,2) = 45 \text{ kp cm}^{-2}$$

Die Teufe der Produktionsrohrtour begrenzt nicht nur den zulässigen Betriebsdruck des Speichers, sondern auch die maximal mögliche Spülrate beim Solen. Die Summe aus statischen und hydraulischen Druckverlusten darf den im Beispiel unter 2. errechneten zulässigen Kopfdruck beim Solen nicht übersteigen.

Werden die errechneten Grenzbelastungen dauerhaft überschritten, kann das zur hydraulischen Rißbildung im Salzgestein im Bereich des Rohrschuhs der Produktionsrohrtour und damit zur Undichtheit des Speichers führen. Kurzzeitig, z. B. bei Dicht-

heitsprüfungen, kann man das Salz bis zum maximalen Druckgradienten, der geringfügig unter dem Fracgradienten liegt, belasten.

Der Rohrschuh der Produktionsrohrtour begrenzt die Kaverne nach oben. Wird auf eine spätere Packerinstallation der Schutzrohrtour orientiert bzw. wird nach Solende keine Schutzrohrtour eingebracht (Flüssigkeitskavernen), kann die Kaverne bis etwa 10 m unter Rohrschuh gesolt werden. Die 10 m kaliberhaltiges Bohrloch unterhalb des Rohrschuhs dienen als Reserve und als Sicherheit dafür, daß beim Solprozeß der Rohrschuh nicht hinterspült wird.

Für den späteren Einbau einer teilzementierten Schutzrohrtour müssen bis 120 m Kavernenhals eingeplant werden, die für

- das Setzen des Stopfens zur Isolierung der Kaverne (10 m)
- die Zementbrücke zur Isolierung der Kaverne (20 m)
- die Zementhöhe hinter der Schutzrohrtour und (80 m)
- als Reserve für den Zementkopf der Schutzrohrtour (10 m)

benötigt werden. 120 m  
=====

Dabei ist zu beachten, daß der Zementkopf bei der Schutzrohrtour garantiert unterhalb des Rohrschuhs der Produktionsrohrtour steht, damit bei eventuellen Gasmigrationen über die relativ geringe Höhe des Zementsteins hinter der Schutzrohrtour eine Kontrollmöglichkeit im Ringraum Schutzrohrtour - Produktionsrohrtour besteht.

Für eine spätere Austauschmöglichkeit der Schutzrohrtour kann man oberhalb des Zementkopfes eine Schraubverbindung vorsehen. Dort wird der obere, nichtzementierte Teil der Schutzrohrtour abgeschraubt, ausgebaut und anschließend mit einer neuen Rohrtour gesund verbunden. Der Ringraum Produktionsrohrtour - Schutzrohrtour wird mit einer Schutzflüssigkeit aufgefüllt, die als Puffer bei Druckschwankungen und als Korrosionsschutz dient.