

8. Hohlraumvermessung

Nach der Breitsolphase und dann in periodischen Abständen (alle 50 000 bis 100 000 m³ Hohlraumzuwachs) wird zur Kontrolle der Hohlraumform die Kaverne vermessen. Wichtig vor allem ist die Endvermessung nach Solende sowie die Darstellung des Hohlraumzuwachses über der Teufe.

Die Vermessung erfolgt echometrisch durch eine Ultraschallsonde, die an einem Kabel in die Kaverne eingefahren wird. Gemessen wird in einzelnen Meßebenen mit Abständen von 1, 2, 5 bis 10 m je nach gewünschter Genauigkeit über die gesamte Kavernenhöhe.

Die Sonde arbeitet nach dem Prinzip der Laufzeitmessung eines von der Sonde gerichtet ausgestrahlten Impulses und seiner

Reflexion von der Kavernenwand. Die Frequenz liegt bei 1000 kHz für kurze Entfernungen im Meterbereich, 500 bis 600 kHz für den Normalfall und 200 kHz für Entfernungen über 100 m.

Unter der Voraussetzung einer homogenen Flüssigkeit in der Kaverne (gleiche chemische Zusammensetzung, Dichte und Temperatur) wird die halbe Laufzeit zwischen dem Beginn des ausgesandten Impulses und dem Maximum des Echos als direkte geradlinige zeitliche Entfernung zwischen Sonde und Kavernenwand definiert. Multipliziert man diese Zeit mit der Wellengeschwindigkeit des Ultraschalls in der Sole, erhält man die wahre geradlinige Entfernung in Längeneinheiten. Aus der Laufzeit in den verschiedenen Meßebenen wird die Kavernenform und ihr Volumen bestimmt. Es wird sich eine Differenz zum dokumentierten Kavernenvolumen ergeben, die ihre Ursache in der Meßungengenauigkeit der Sonde (5 bis 10%) haben kann. Der Fehler wird geringer, wenn Vergleichsmöglichkeiten mit anderen Kavernen gleichen Salzes gegeben sind. Mit Echosonden, die nicht nur in einer Ebene messen, sondern mit schwenkbarem Sendeteil ausgestattet sind, lassen sich Unregelmäßigkeiten in der Kavernenwandung, evtl. auch Taschen und Vorsprünge, ausweisen. Die Sonde mißt in Abständen von 5 bis 10 m bei Drehungen von 7 bis 15° und bei Kippung um je 3 bis 6° bis zum möglichen Gesamtwinkel von 90°. Die Richtungsorientierung der Echosonde wird durch ein eingebautes magnetisches Kompaßsystem erreicht. Mehrfachreflexionen bedürfen der fachgerechten Interpretation; der Peilfehler der beschriebenen Sonde beträgt auf 50 m \pm 40 cm.

9. Berechnung des Solprozesses

9.1. Gesetzmäßigkeiten beim Lösungsprozeß

Die Gesetzmäßigkeiten beim Lösungsprozeß von Steinsalz in Wasser, die eine Funktion der aktiven Lösungsfläche, der vorhandenen Konzentration des Lösungsmittels, der Verweilzeit und der Menge Wasser je Zeiteinheit sind, wurden formelmäßig empirisch aus Versuchsreihen erfaßt.

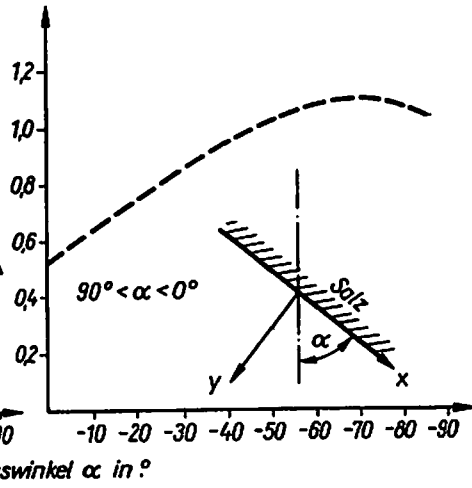
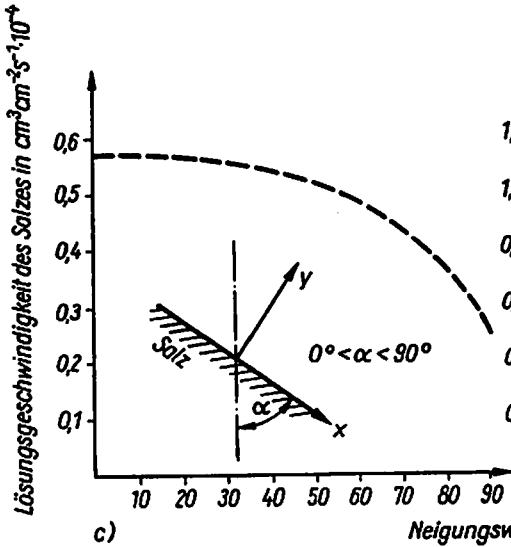
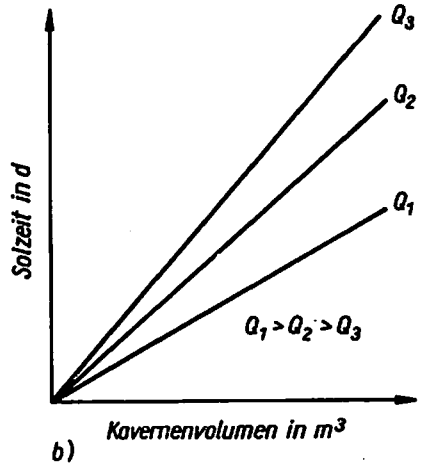
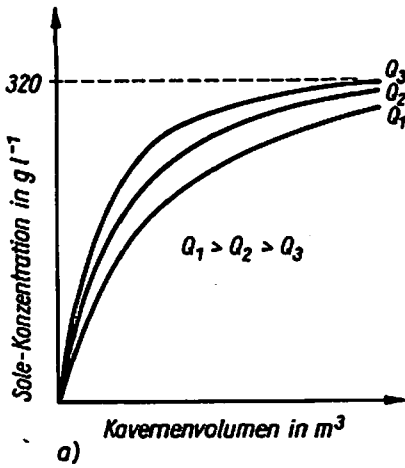


Bild 5. Abhängigkeiten beim Solen

- Solekonzentration in Abhängigkeit vom Kavernenvolumen und der Spülrate
- Soldauer in Abhängigkeit des Kavernenvolumens und der Spülrate
- Lösegeschwindigkeit des Salzes in Abhängigkeit vom Winkel der Lösungsfläche für $\alpha = 0 - 90^\circ$ und $\alpha = 90^\circ - 0$ (Prinzipskizze)

So steigt gemäß Bild 5 die Solekonzentration mit größer werdender Oberfläche bzw. mit dem Volumen der Kaverne an; sie sinkt, wenn der Volumenstrom des Wassers zunimmt, das Wasser also schneller durch die Kaverne strömt und die Zeit zum Aufkonzentrieren nicht ausreicht. Eine höhere Konzentration ist bei konstanter Wassermenge nur bei Vergrößerung der Lösungsfläche möglich. Ist diese groß genug, strebt die Konzentration den Maximalwert an.

Aus Bild 5b) ist ebenfalls erkennbar, daß mit steigender Wassermenge die Solekonzentration sinkt, die Solzeit für ein bestimmtes Volumen sich jedoch verringert.

Zur Optimierung des Solprozesses ist die richtige Erfassung dieser Abhängigkeiten erforderlich.

Einen nicht unerheblichen Einfluß auf die zu erzielende Konzentration hat die Form der Kaverne. Die Lösungsgeschwindigkeit ω ist abhängig von dem Winkel der Lösungsfläche.

Waagerechte Flächen an der Kavernenfirste haben je nach verwendetem Sperrmedium eine etwa doppelt so hohe Lösungsgeschwindigkeit wie die senkrechten Flächen. Das bedeutet, daß, wenn die Kaverne am senkrechten Stoß in der Zeiteinheit um 1 m zunimmt, der Zuwachs an der Firste etwa 2 m beträgt. Diese Tendenz wird beim Verfahren der angenäherten Rohrstände während der Hochsolphase ausgenutzt.

Waagerechte Flächen im Liegenden solen sich am schlechtesten, weil zum einen die aufkonzentrierte Sole nicht abläuft, sondern sich darauf schichtet und zum anderen sedimentierte Rückstände eine Solung zumeist verhindern.

Der Lösungsvorgang an der wenige Zentimeter betragenden Grenzschicht Salz zu Wasser beruht auf Diffusion und Konvektion.

Die je Zeiteinheit von der festen in die flüssige Phase übergehende Masse hängt ab vom Stoffübergangskoeffizient (Diffusionskoeffizient) und der Dichtedifferenz (Konzentrationsgradient). Nachdem durch diese molekularen Vorgänge die Salzteilchen den stationären Flüssigkeitsfilm passiert haben, erfolgt der weitere Abtransport durch die Kombination von molekularer Diffusion und Konvektion.

Die Konvektion ist um so stärker, je größer der Dichteunterschied und das Temperaturgefälle sind. Von Einfluß dabei sind Unebenheiten der Salzoberfläche, die Rauigkeit der Wandung und der Neigungswinkel (Bild 5c)). Das schnellere Solen an überhängenden waagerechten Flächen läßt sich mit dem Abreißen des salzgesättigten Films auf Grund der Schwerkraft (Tropfenbildung) sowie das langsame Solen liegender Flächen mit einer ständigen Verstärkung des aufkonzentrierten Salzfilms erklären.

Bei senkrechten Kavernenwänden tritt kaum noch eine Konvektion, sondern nur noch die schwerkraftunabhängige Diffusion auf, die zum Herauslösen leichter löslicher Salze (Kalischichten) und damit zur Fingerbildung führt. Streichen die Kalischichten nach oben, ist - wie bei überhängendem Salz - eine starke Erweiterung des Fingers nach oben zu beobachten. Streichen dagegen die leichter löslichen Salzpartien nach unten, kommt es auch zur Taschen- oder Fingerbildung, jedoch bewirkt der eintretende Konzentrationsstau, der eine Konvektion und damit den weiteren Abtransport von Salz aus der gebildeten Tasche verhindert und nur noch Diffusionsvorgänge zuläßt, keine wesentliche Vergrößerung der Taschen.

Im praktischen Solprozeß sind Taschen- und Fingerbildung wegen der Punktförmigkeit der echometrischen Vermessung schwer zu erfassen.

Zur unkontrollierten Ausbildung von Fingern und Taschen kann es besonders in Salzstöcken kommen, wenn durch den Aussolprozeß Kalischichten angefahren werden, die im Profil der Kavernenbohrung selbst nicht erbohrt worden sind. Neben diesen Salzschichten mit unterschiedlichen Lösegeschwindigkeiten können auch Unterschiede in der Kristallstruktur des Salzes (veränderte Wandrauigkeit) die Ursache für ein exzentrisches Solen sein.

Die in Fingern und Taschen verbleibenden Reste von gasförmigem, oder flüssigem Sperrmedium können in Kavernen, die zur Lagerung hochreiner Produkte angelegt werden (z. B. Äthylen), ein erheblicher Störfaktor sein, der bei der Erstbefüllung beachtet werden muß.

Treten starke Finger- und Taschenbildung in der Kaverne auf, speziell bei aufwärts streichenden Schichten, stellen diese eine Gefährdung der Bergbausicherheit für diese oder eine benachbarte Kaverne dar.

Bei nachgewiesener Fingerbildung im Anfangsstadium des Solprozesses (zu Beginn der Hochsolphase) im Bereich des Kavernenhimmels besteht die Möglichkeit, das Sperrmedium so tief zu drücken, daß eine weitere Aussolung des Fingers verhindert wird.

In Salzkissen und Salzlagerstätten mit normaler Schichtenfolge sind die Kalisalzschichten teufenmäßig bekannt. Die Auswahl der Kavernenlage kann dementsprechend in ungestörten Steinsalzschichten erfolgen, so daß dem Problem Fingerbildung von vornherein aus dem Weg gegangen wird.

9.2. Formeln zur Berechnung der Kavernen

Die Berechnung der Kavernen erfolgt etappenweise, wobei, ausgehend von einem Zylinder, sich die Berechnungen für einen gewählten Radiuszuwachs jeweils wiederholen.

Es werden die Volumina (Gl. (6)), die Flächen (Gl. (7)), an denen sich der Lösungsprozeß vollzieht, und die Winkel, unter denen die Flächen stehen, berechnet. Anschließend bestimmt man die Lösegeschwindigkeit ω (Gl. (8)). Die Lösegeschwindigkeit ω mit der maximal erreichbaren Konzentration $C_{\text{gesättigt}}$ ins Verhältnis gesetzt, ergibt den Koeffizienten der Lösegeschwindigkeit k (Gl. (9)). Lösegeschwindigkeit und ihr Koeffizient sind für jeden Lösungswinkel verschieden.

Mit den bisher berechneten Werten läßt sich die Konzentration der Sole am Ende der gewählten Etappe, wenn der Radius erreicht ist, bestimmen (Gl. (10)).

Aus der Konzentration der Sole am Anfang und am Ende der Etappe erhält man die mittlere Konzentration über die Berechnungsetappe, die wiederum zur Bestimmung der ausgetragenen Salzmenge (Gl. (11)), des Soleaustrages je Stunde (Gl. (12)), der stündlich ausgetragenen Salzmenge (Gl. (13)) und schließlich der Soldauer für diese Etappe (Gl. (14)) erforderlich ist.

Formeln:

a) Volumen: Zylinder $V = \pi r^2 h$ in m^3 (6a)

Kegel $V = \frac{\pi r^2 h}{3}$ in m^3 (6b)

Kegelstumpf $V = \frac{\pi}{3} h (R^2 + Rr + r^2)$ (6c)

b) Flächen: Senkrechter Zylinder $S = 2 \pi r h$ (7a)

geneigter Kegelstumpf $S = 2 \pi r_m h$ (7b)

waagerechte Kreisfläche $S = \pi (R^2 - r^2)$ (7c)

c) Die Winkel der geneigten Flächen sind graphisch oder über die Winkelfunktionen zu bestimmen. Beträgt der Winkel der geneigten Fläche im unteren Teil der Kaverne < 30 bis 35° (Rutschwinkel), sinken die unlöslichen Teile nicht mehr in den Kavernensumpf und verhindern ein weiteres Solen an dieser Fläche.

d) Lösegeschwindigkeit ω in $kg\ m^{-2}\ h$
für geneigte und senkrechte Flächen:

$$\omega_1 = \left(1 + \frac{t}{22,4}\right) [3,25 (0,0174 \alpha)^{0,5} + 1,8] \quad (8a)$$

für waagerechte Flächen:

$$\omega_2 = \left(1 + \frac{t}{22,4}\right) (8,75 \sin \alpha + 5,87) \quad (8b)$$

t Temperatur der Sole in $^\circ C$

e) Koeffizient der Lösegeschwindigkeit k in $m\ h^{-1}$
für geneigte und senkrechte Flächen:

$$k_1 = \frac{\omega_1}{C_{ges}} \quad (9a)$$

für waagerechte Flächen:

$$k_2 = \frac{\omega_2}{C_{ges}} \quad (9b)$$

C_{ges} Konzentration der gesättigten Sole $320\ g\ l^{-1}\ NaCl$

f) Konzentration C in $t\ m^{-3}$

f₁) für indirektes Solen (Hochsolphase)

$$C = C_{\text{ges}} \left(1 - e^{-\frac{1}{Q} \sum K_i S_i} \right) + \frac{C_{\text{ges}} \sum K_j S_j + Q C_0}{\sum K_j S_j + Q} \cdot e^{-\frac{1}{Q} \sum K_i S_i} \quad (10a)$$

$\sum K_j S_j$ Koeffizient der Lösegeschwindigkeit und Flächen oberhalb des Rohschuhs des äußeren Solstranges

$\sum K_i S_i$ Koeffizient der Lösegeschwindigkeit und Flächen unterhalb desselben

Q Wasserdurchsatz in $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$

f₂) für direktes Solen (vereinfachte Formel)

$$C = \frac{C_{\text{ges}} \sum K_i S_i + Q C_0}{Q + \sum K_i S_i} \quad (10b)$$

mittlere Konzentration über die Etappe C_m in t m^{-3}

$$C_m = \frac{C_1 + C_2}{2}$$

C_1 Anfangskonzentration

C_2 Endkonzentration

f₃) für indirektes Solen (Breisolphase)

$$C = C_{\text{ges}} \left(1 - e^{-\frac{1}{Q} K S} \right) + C_0 e^{-\frac{1}{Q} K S} \quad (10c)$$

C_0 Konzentration des eingepumpten Mediums in t m^{-3}

S Seitenfläche in m^2

g) ausgetragene Salzmenge G in t

$$G = V d_{\text{Salz}} - V C_1 \quad (11)$$

d_{Salz} Dichte des Salzes in t m^{-3}

$V C_1$ in der Kaverne verbleibende, in Lösung gegangene Salzmenge

h) Soledurchsatz je Stunde Q_{Sole} in $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$

$$Q_{\text{Sole}} = Q (1 - 0,0013 C_m) \quad (12)$$

Q Wassermenge in $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$

i) ausgetragene Salzmenge je Stunde q in $t h^{-1}$

$$q = C_m Q_{\text{Sole}} \quad (13)$$

j). Aussoldauer der Etappe T in h

$$T = \frac{G}{q} \quad (14)$$

9.3. EDV-Programm "Kavernensolung"

Es liegt ein EDV-Programm zur Berechnung von Kavernen vor, dessen Grundlage die Berechnungsmethodik für das sowjetische Aussolverfahren der angenäherten Rohrstände ist. Das Programm gestattet die schnelle und sichere Projektierung des Aussolprozesses und die kurzfristige Überarbeitung bestehender Projekte bei Änderungen verschiedener Parameter (z. B. Schüttungsmenge, Rohrstände, Sperrmediumspegel u. a.).

Es besteht ferner die Möglichkeit, mehrere Varianten der Formgestaltung einer Kaverne durchzurechnen, um zu einer günstigen Form oder zu minimaler Aussolzeit zu gelangen. Wesentlicher Vorteil des Programmes ist die Kurzfristigkeit, mit der die Entscheidungsvorlagen beim praktischen Solbetrieb vorgelegt werden können.

Die Kaverne wird etappenweise berechnet, 1. Breitsolphase, 2. Hochsolphase, 3. Endsolphase (Ausbildung des Himmels). Die praktische Arbeit mit dem Programm ist denkbar einfach; es müssen folgende Daten bekannt sein oder festgelegt werden:

- a) prozentualer Anteil von unlöslichen Bestandteilen im Salz in %
- b) Bohrlochteufe (Sohle der Kaverne) in m
- c) Dichte des eingepumpten Mediums in $g\ cm^{-3}$
- d) Konzentration des eingepumpten Mediums in $kg\ m^3$

Für die drei Etappen Breit-, Hoch- und Endsolphase müssen folgende Festlegungen getroffen werden:

- e) Rohrstände des äußeren und inneren Solstranges in m
- f) Stand des Sperrmediums (Höhe der Kaverne) in m
- g) Durchflußrate in $m^3\ h^{-1}$.

Als kritische Größen, bei deren Erreichen der Rechner die jeweilige Solphase beendet, können wahlweise festgelegt werden:

- h) bei der Breitsolphase: Nettovolumen oder Radius der Kaverne (z. B. 10 m) oder die Solzeit
- bei der Hoch- und Endsolphase: Nettovolumen

Die Genauigkeit der Berechnung kann durch die beliebige Wahl des Radiuszuwachses (ΔR_0 1,5 m) beeinflusst werden. Dem Ausdruck des Rechners sind die für die zeichnerische Darstellung benötigten Eckpunkte der Kaverne (Radien, Höhen in m) und folgende Berechnungsgrößen für jede Etappe zu entnehmen:

- a) Nettovolumen V_n in m^3
- b) Volumenzuwachs jeder Etappe V_i in m^3
- c) Volumen des Rückstandes V_r in m^3
- d) mittlere Konzentration der Sole in der Berechnungsetappe C in $kg\ m^{-3}$
- e) ausgetragene Salzmenge G in t
- f) Zeitdauer der Etappe t_i in d
- g) Zeitdauer summarisch T in d
- h) Nachzupumpende Menge Sperrmedium zur Himmelsabdeckung in $l\ d^{-1}$

Zur Kontrolle des Solprozesses wird der Abstand zwischen dem Rückstand und dem Rohrschuh des inneren Solstranges H_2 in m gesondert ausgewiesen.

Das EDV-Programm wurde um eine Berechnungsetappe erweitert und gestattet zur Himmelsbildung die Berechnung einer 4. Etappe, wobei die Form der Kaverne jeder Soletappe ausgedruckt wird.