

## 14. Inbetriebnahme von Gaskavernen

### 14.1. Erstbefüllung von Gaskavernen

Die Entleerung der mit Sole gefüllten Kaverne ist identisch mit der Erstbefüllung mit Speichergut.

Bis einige Meter über den Rückstand wird eine Solesteigleitung (Tubinge) eingebaut, über die die Sole ausgespeist

wird. Die Gaseinspeisung erfolgt in den Ringraum Produktionsrohrtour/Solesteigleitung.

Ein kritischer Betriebszustand tritt ein, wenn der Solespiegel so weit sinkt, daß das eingespeiste Gas in den Entleerungsstrang gelangt (Gasdurchschlag). Um das zu verhindern, werden während der Gaseinspeisung Spiegeleinmessungen durchgeführt, deren zeitlicher Abstand mit zunehmender Annäherung des Spiegels an den Rohrschuh des Entleerungsstranges verkürzt werden muß. Die volumetrische Erfassung der ausgespeisten Sole und der Vergleich mit der Kavernenkennlinie "Hohlraumzuwachs über Teufe", die nach der Kavernenendvermessung aufgestellt worden ist, sind weitere Maßnahmen zur Überwachung der Erstbefüllung. Da sich das Gas am Kontakt mit der Sole unter Kavernendruck physikalisch in der Sole löst, entsteht eine Schicht gasgelöster Sole mit einer Mächtigkeit von 1 bis 2 m. Wird derartige Sole ausgespeist, entlöst sich bei der Druckreduzierung das Gas in der Solesteigleitung und signalisiert so die Annäherung des Spiegels an den Rohrschuh. Die Gaseinspeisung muß dann beendet werden, da sich durch die Strömungsverhältnisse eine kegelige Zone um den Rohrschuh bildet, die einen Gasdurchschlag noch begünstigt.

Eine weitere Möglichkeit, den Gasdurchschlag und bereits eine Gaslösung in der Sole zu verhindern, besteht darin, daß die Sole mit einer Flüssigkeit beschichtet wird, die mit ihr nicht reagiert, z. B. Diesel. Beim Austrag der ersten Spuren dieser Flüssigkeit gelangen diese an einen Geber, der in den Solerücklauf eingebaut ist und eine Unterbrechung des Gaseinspeisens auslöst.

#### 14.2. Abdeckmedium

Mit dem Ziel, das Gas von der im Kavernensumpf befindlichen Flüssigkeit zu isolieren, wird im Anschluß an die Entleerung der Kaverne über die noch installierte Solesteigleitung ein Abdeckmedium eingebracht.

Diese Technologie wird angewandt, wenn trockenes Gas benötigt wird und eine Trocknungsanlage eingespart bzw. mit nur gerin-

ger Kapazität errichtet werden soll. Die Forderung nach trockenem Gas besteht insbesondere dann, wenn die Druck- und Temperaturbedingungen der Kaverne und/oder der obertägigen Anlage bei hoher Gasfeuchtigkeit die Bildung von Hydraten begünstigen. Das Abdeckmedium, mit dem die Restsole beschichtet wird, muß folgende Eigenschaften aufweisen:

- hohe Viskosität zur Verhinderung der Konvektion von Wasser an der Oberfläche
- gute Verpumpbarkeit beim Einbringen
- niedrigen Dampfdruck zur schnellen Versteifung
- niedrige Kosten
- keine Qualitätsbeeinflussung bei Gaskontakt

Für diese Zwecke eignen sich schwere Kohlenwasserstoffe oder polymerisierbare Kunststoffe.

Eine voll funktionsfähige Abdeckschicht, die eine Wasserdampfung im Kavernensumpf vollkommen verhindert, macht die Errichtung von Gastrocknungsanlagen zur Wiederherstellung der eingespeisten Gasqualität gegenstandslos.

Wird eine Wassersperrschicht nicht eingebracht, diffundiert Wasserdampf bei der allmählichen Angleichung der Temperatur des eingespeisten Gases an die Gebirgstemperatur in der Kaverne in das Gas. Während einer Gasentnahme sinken Druck und Temperatur des Gases in der Kaverne. Bei Unterschreiten des Taupunktes kommt es bei dem entsprechenden Druck im Förderstrang oder in den obertägigen Leitungen zum Ausfall von freiem Wasser. Die Taupunkttemperatur liegt um so niedriger, je geringer das Gas mit Wasserdampf gesättigt ist, so daß sich auch eine nicht vollständige Abdeckung der Soleschicht bereits positiv beim Förderregime auswirkt.

Das in der DDR eingesetzte Abdeckmedium besteht aus einem wasserundurchlässigen, zähflüssigen, schwimmfähigen Plast, der durch mehrfaches Umpumpen in einer obertägigen Mischstation mit mehreren Komponenten vermischt und damit verpumpbar gemacht wird. Das Anmischen in einem geschlossenen Kreislauf erfordert wegen der Explosionsgefahr besondere Sicherheitsbestimmungen.

Die eingebrachte Kunststoffschicht wird nach einigen Wochen in der Kaverne fest. Damit gewährleistet ist, daß eine möglichst vollständige Flüssigkeitsabdeckung erreicht wird, entleert man die Kaverne nicht bis zum ungleichmäßig ausgebildeten Kavernensumpf, sondern beläßt sicherheitshalber 2 bis 3 m Sole über dem Kavernensumpf.

Die Mächtigkeit der Abdeckschicht beträgt 1 bis 2 cm. Bei Verwendung eines flüssigen Sperrmediums beim Solen sammeln sich die an der Kavernenwand haften gebliebenen Sperrmediumreste ebenfalls auf dem Abdeckmedium, so daß effektiv diese Schicht noch etwas mächtiger werden kann.

Einen Nachteil hat ein Abdeckmedium insofern, als bei Nachfall aus der Kavernenwand (Abbrechen von Anhydritbänken) während des Speicherbetriebes die geschlossene Abdeckmediumschicht durchschlagen wird und Sole aus dem Kavernensumpf auf diese Schicht gelangen kann. Die Wirksamkeit des Abdeckmediums ist damit zumindest teilweise zunichte gemacht.

Ein Abdeckmedium, das bei der in der Kaverne herrschenden Temperatur fest ist und bei einer Temperaturerhöhung während des Gaseinspeisens wieder plastisch und fließfähig wird, wäre in der Lage, entstandene Leckstellen wieder zu schließen. Eine Reparaturmöglichkeit ist bei gasgefüllter Kaverne unter Betriebsdruck nicht gegeben, so daß dem Auftreten von Hydraten nur mit einer Veränderung des Förderregimes begegnet werden kann.

In vollkommen trockenen gasgefüllten Kavernen kann es zur Austrocknung des Salzes und damit zum Auftreten von Salzstaub kommen. Der bei der Gasausspeisung mitgerissene Salzstaub setzt sich in den obertägigen Leitungen ab und führt zu Komplikationen.

### 14.3. Hydratbildung

Hydrate treten in Erdgassonden und Kavernen bei bestimmten Druck- und Temperaturbedingungen und bei Anwesenheit von freiem Wasser auf und erschweren auf Grund ihrer physikali-

schen Eigenschaften den Speicherbetrieb erheblich bzw. legen diesen vollständig lahm.

Hydrate treten als feste, weiße, körnige Substanz auf, wenn Wasser mit Gasen ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{N}_2$ , Methan, Propan, Äthylen) vermischt wird, wie es bei der Förderung in Rohrleitungen über Tage und auch im untertägigen Förderstrang der Fall ist. An Verengungen im Stömungsquerschnitt, an Verzweigungen und Abgängen in den Leitungen (Sicherheitsventil, Kavernenkopf) erfolgt die Durchwirbelung des sich an der Wandung niederschlagenden Wassers mit dem Gasstrom besonders intensiv, mit dem Ergebnis, daß die sich bildenden Hydrate die Leitungen verstopfen.

Gegenmaßnahmen sind:

- ungestörter Leitungsverlauf bis zur Gastrocknungsanlage
- kontinuierliche Methanoleinspeisung zur Zerstörung des Wassergerüstes des Hydrates
- Änderung der Druck- und Temperaturbedingungen durch Aufheizung des Gases
- Isolierung der Leitungen und
- Änderung des Förderregimes

Zu letzterem ein Beispiel, wo in Diagrammform der Wasserdampfgehalt des Gases in Abhängigkeit von Druck und Temperatur dargestellt ist (Bild 7). Die gestrichelte Linie stellt für Erdgas mit einer relativen Dichte von 0,6 die Grenzkurve dar, unterhalb derer bei Vorhandensein von freiem Wasser Hydratbildung möglich ist. Eingezeichnet mit den Eckpunkten 1 bis 4 ist ein Einspeise- und Entnahmezyklus, wie er für eine Kaverne ( $250\ 000\ \text{m}^3$  Volumen, Gebirgstemperatur  $60\ ^\circ\text{C}$ , Fördermenge  $300\ 000\ \text{m}^3\ (\text{N})\ \text{h}^{-1}$ ) typisch ist.

Während der Einspeisung erhöht sich die Temperatur des Gases infolge der Verdichtungsarbeit über die Kavernentemperatur (1 : 52 bar,  $50\ ^\circ\text{C}$ , 2 : 210 bar,  $80\ ^\circ\text{C}$ ). Während der Speicherruhe erfolgt der Temperaturengleich bei geringer isochorer ( $V = \text{konstant}$ ) Entspannung.

In der Förderphase sinken Druck und Temperatur soweit, daß die Hydratgrenzkurve unterschritten wird (3  $\rightarrow$  4). Das Restgas erwärmt sich anschließend wieder auf die Gebirgstempera-

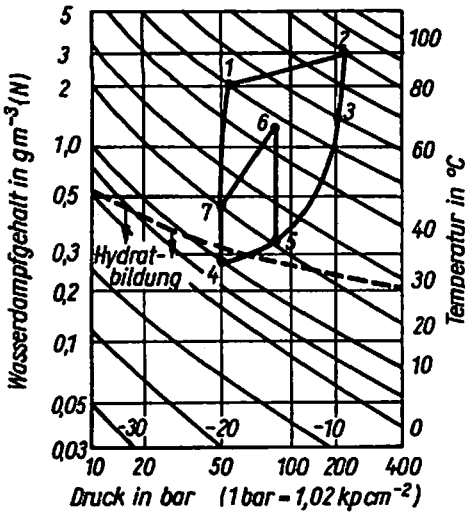


Bild 7  
Wasserdampfgehalt des Gases in Abhängigkeit von Druck und Temperatur (Prinzipische Skizze) /20/  
1 → 2 Gaseinspeisung  
2 → 3 Stillstand  
3 → 4 Gasentnahme  
4 → 1 Stillstand  
5 → 6 Stillstand  
6 → 7 Gasentnahme nach Erwärmung

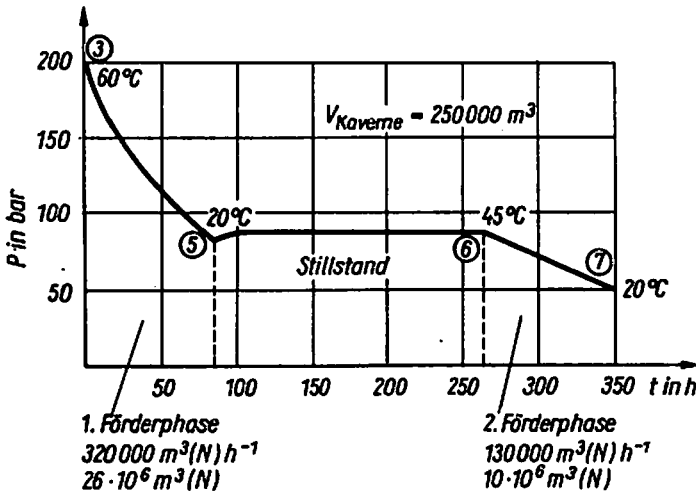


Bild 8  
Druckverlauf in der Gas-kaverne in zwei Förderphasen /20/

tur, wenn nicht zuvor wiederum mit der Einspeisung begonnen wird (4 → 1). Besteht die Möglichkeit, daß das Gas in der Kaverne Wasserdampf aufnehmen kann (bei nicht abgedecktem Sumpf), ist während der Entspannung (Förderperiode) mit dem Auftreten von Hydraten zu rechnen. Dieser Vorgang vollzieht sich kaum in der Kaverne, da hier keine intensive Durchwirbelung auftreten kann, sondern frühestens im Steigrohr oder im obertägigen Leitungssystem.

Von der Fahrweise des Kavernenspeichers her kann diese Hydratbildung weitestgehend ausgeschlossen werden, wenn bei Annähe-

rung der Hydratgrenzlinie (z. B. bei 20 °C) die Förderung unterbrochen wird, das Gas sich in der Kaverne erwärmt (5 → 6) und anschließend bis auf die mit ursprünglich einem Förderzyklus geförderte Menge abgefördert wird (6 → 7). Bei gleicher Gesamtfördermenge ist mit der diskontinuierlichen Fahrweise die Hydratgrenzkurve nicht unterschritten worden.

Dieses Förderregime ist nur möglich, wenn mehrere Gaskavernen zur Verfügung stehen und mit der Förderunterbrechung der einen Kaverne der Gasbedarf aus den anderen abgedeckt werden kann. Der zeitliche Ablauf dieser Förderung in zwei Etappen ist aus Bild 8 zu entnehmen. Die Erwärmungsphase (5 → 6) dauert etwa acht Tage.

Die fast unerschöpfliche Wärmeenergie des Gebirges für die Gaserwärmung ausnutzend, kann bei Kenntnis der Betriebsparameter eines Kavernenspeichers ein optimales Regime erzielt werden.

#### 14.4. Gaskavernen - Ziehen der Solesteigleitung

Die Speicherfahrweise von Gaskavernen sieht die kurzfristige Entnahme großer Gasmengen vor. Die Abförderung in das Gasleitungsnetz erfolgt bis zum Erreichen des Leitungsdruckes durch Expansion. Soll die Kaverne unter den Leitungsdruck abgefördert werden, muß das Gas mittels Kompressoren aus der Kaverne gesaugt werden. Entsprechend verläuft der Befüllvorgang; ist  $P_{\text{Kaverne}} < P_{\text{Leitung}}$ , strömt das Gas in die Kaverne, erst bei Gleichheit beider Drücke müssen zur weiteren Einspeisung die Kompressoren zugeschaltet werden.

Die zu leistende Arbeit der Kompressoren ist um so größer, je geringer der freie Förderquerschnitt der Produktionsrohrtour der Kaverne ist.

Kavernen, die eine gering dimensionierte Produktionsrohrtour aufweisen und außerdem noch mit einer Schutzrohrtour ausgerüstet sind, haben einen dementsprechend geringen freien Querschnitt. Die Druckverluste steigen, wenn die Solesteigleitung, mit der während der Erstbefüllung die Sole ausgespeist wurde, nicht gezogen worden ist.

Die Kompressoren müssen in diesem Fall weit eher beim Einspeisen oder Abfordern zugeschaltet werden, weil größere Druckverluste zu überwinden sind. Um diesen energetischen Mehraufwand zu vermeiden sowie der Gefahr des Abreißen durch nachfallendes Gebirge während des Speicherbetriebes zu begegnen, wird die den freien Förderquerschnitt verringernde Solesteigleitung nach der Entleerung bzw. nach Einbringen des Abdeckmediums ausgebaut.

Es besteht auch die Möglichkeit, die Solesteigleitung in die Kaverne abzuwerfen, jedoch gefährdet man dabei die installierte Schutzrohrtour und erschwert bzw. verhindert ein späteres Befahren der Kaverne mit Meßsonden (Hohlraumkontrolle).

Der Ausbau der Solesteigleitung aus der unter Gasdruck stehenden Kaverne wirft einige technologische Probleme auf, die in folgendem kurz angeschnitten werden:

1. Zum gefahrlosen Ausbau erfolgt eine Druckentlastung der Kaverne auf 10 bis 20 kp cm<sup>-2</sup>.
2. Als Sicherheitsmaßnahme kann beim Havariefall (Zerstören der Solesteigleitung durch herabfallendes Gebirge) der unterhalb des Rohrschuhes der Schutzrohrtour befindliche Teil der Solesteigleitung abgesichert werden. Das Absichern erfolgt in einer Schermuffe durch Einpumpen eines Stopfens.
3. Zum Ausbau der Solesteigleitung ist eine Abdichtung in Rohrschuhnähe (bzw. über der Schermuffe) im Landenippel mittels Dichtstopfen erforderlich. Die Setzarbeiten dieses Stopfens werden mittels Wire-Line-Technik durchgeführt.
4. Zur Ringraumabdichtung (Ringraum Solesteigleitung/Schutzrohrtour) wird über dem Zentralschieber eine spezielle Sondenkopfausrüstung installiert. Sie besteht entweder aus einem Backenpreventer oder Universalpreventer oder Tubingstripper.
5. Als Hebezeug für den Ausbau der Solesteigleitung wird eine Anlage mit Winde und Gerüst (z. B. Bakinez) aufgebaut.
6. Die Solesteigleitung wird durch das Lösen des Landekonus angehoben und langsam durch die Preventer ausgebaut.



Wenn das Gewicht des Steigrohrstranges nicht mehr zur Überwindung der Schubkraft ausreicht (100 bis 200 m), muß mit einer sogenannten Gegenfahrtechnologie mit Bremsselector ein mögliches Herausschleudern des Stranges auf Grund des wirkenden Kavernendruckes verhindert werden.

7. Die letzte Stange mit dem Landenippel und dem eingebrachten Dichtstopfen ist mit besonderer Sorgfalt auszubauen.
8. Ein eventueller Einbau des Steigrohrstranges im Rahmen einer Havariebeseitigung (z. B. Abschlagen eines Teils der Solesteigleitung während der Entleerungsphase) erfolgt analog der Ausbautechnologie in zwei Etappen (1. Gegenfahrtechnologie, 2. normaler Einbau).
9. Nach beendetem Ausbau der Solesteigleitung wird der Zentralschieber geschlossen und die montierte Ringraumabdichtung (Punkt 4.) entfernt.

Ein Nachteil, den ein Ausbau der Solesteigleitung nach sich zieht, tritt bei einem Fluten der Kaverne zutage.

Die Sole muß gegen den Gasdruck eingepumpt werden, und das Gas kann nur periodisch abgefördert werden.

## 15. Speicherbetrieb von Kavernen

### 15.1. Gaskavernen

Wie bereits erläutert, wird zum Betreiben eines Gasspeichers in die - während der Phase der Erstfüllung - entleerte Kaverne Gas eingespeist und durch Expansion wieder ausgespeist. Es gibt zwei Grenzbedingungen:

- a) der maximal mögliche Betriebsdruck wird begrenzt durch den zulässigen Druckgradienten des Salzes und der Rohrschuh-teufe der Produktionsrohrtour und
- b) der Mindestrestdruck in der Kaverne zur Gewährleistung der Standsicherheit der Kaverne darf nicht unterschritten werden.

Die thermodynamischen Vorgänge bei der Gaseinspeisung und Expansion sowie ihre bewußte Ausnutzung beim Speicherbetrieb

sind im Abschnitt 14.3. angedeutet worden und sollen nicht weiter ausgeführt werden.

## 15.2. Flüssigkeitskavernen

Der wesentlichste Unterschied zum Gasspeicher ist die Notwendigkeit eines Treibmediums zur Förderung des Speichergutes aus der Kaverne. Damit im Zusammenhang steht eine Vielzahl von ober- und untertägigen Problemen, die eine frühzeitige Entscheidung über die Art des Speicherbetriebes - bereits zum Zeitpunkt der Projektierung der Kavernenbohrung - geraten sein lassen.

### 15.2.1. Soletrieb mit Vollsole/Solestapelbecken

Zur Förderung des flüssigen Speichergutes aus der Kaverne wird über eine bis fast zum Kavernensumpf reichende Solesteigleitung voll ausgesalzene Sole eingepumpt. Das Speichergut wird über den Ringraum Solesteigleitung/Produktionsrohrtour aus der Kaverne gefördert. Die Befüllung der Kaverne erfolgt in umgekehrter Richtung, indem über den Ringraum das Speichergut eingebracht und über den Steigraum der Solesteigleitung die Sole gefördert wird.

Die Pumpenausrüstung für den Speicherbetrieb ist so ausgelegt, daß maximale Mengen bei geringem Druck (die statische Druckdifferenz der beiden flüssigen Medien - Speichergut und Sole - beträgt nur  $0,4$  bis  $0,6 \text{ kp cm}^{-2} \cdot 10 \text{ m}$ ; bei Teufe  $1000 \text{ m}$  besteht demnach während des Einspeisens ein statischer Druck von  $40$  bis  $60 \text{ kp cm}^{-2}$ ) bewältigt werden können.

Beim Ausspeisen, wobei das spezifisch leichtere Speichergut durch die Sole verdrängt wird, brauchen nur die Reibungsverluste überwunden zu werden.

Um den gesamten Speicherinhalt einer Kaverne der Größenordnung  $20\,000 \text{ m}^3$  bis  $500\,000 \text{ m}^3$  Nutzvolumen ausspeisen zu können, ist eine ebenso große Menge an Treibsole erforderlich. Diese Treibsolemenge in Speichernähe in Obertagesolestapelbecken zu lagern, ist zumeist ein kompliziertes Problem, bei dem

geologische, technologische und ökonomische Belange eine Rolle spielen.

Die eleganteste Lösung zum Einsatz von Treibsole ist die Verwendung der beim Aussolen von benachbarten Kavernen anfallenden Sole. Dafür ist Voraussetzung, daß sich über die gesamte Lebensdauer des Speichers stets mehrere Kavernen im Aussolprozeß befinden, von denen eine ausreichende Menge Vollsole bezogen wird. Diese Bedingung wäre nur bei einem Großspeicher mit einer Vielzahl von Kavernen gegeben.

### Solestapelbecken

Für Kavernenspeicher geringer oder mittlerer Kapazität wird die zum Ausspeisen benötigte Treibsole in übertägigen Stapelbecken gelagert. In den seltensten Fällen lassen sich natürliche Seen oder Teiche zu Solestapelbecken umfunktionieren; zumeist müssen sie künstlich angelegt werden.

Die künstlich angelegten Solestapelbecken mit einem Volumen, das dem Nutzvolumen plus dem während der Speicherlebensdauer zu erwartenden Nachsolvolumen zu entsprechen hat, müssen gegenüber dem Untergrund durch geeignete Dichtmittel (Beton, Folie, Lehm- oder Tonschicht je nach wasserwirtschaftlicher Forderung) isoliert sein. Mechanische Beschädigungen der Abdeckung, speziell bei Verwendung von Polyäthylenfolie, durch Pflanzenwuchs und Ungezieferfraß sind durch geeignete Maßnahmen zu verhindern. Zur ständigen Dichtheitsüberwachung beim Speicherbetrieb werden in entsprechender Entfernung Kontrollbohrungen bis zu den grundwasserführenden Schichten niedergebracht, um daraus in bestimmten Abständen Wasserproben nach eventuellen Salzanteilen zu untersuchen.

Die Errichtung mehrerer Becken anstelle eines einzigen ist zumeist ökonomischer und auch sicherheitstechnisch zu empfehlen, da kleine Becken leichter zu reparieren sind und bei Ausfall eines Beckens der Speicherbetrieb nicht unterbrochen zu werden braucht.

In Gebieten mit einem Niederschlagsüberschuß gegenüber der Verdunstung (dazu gehören auch unsere Breiten) muß zur Gewährleistung einer vollen Salzkonzentration der Sole das auf der Sole schwimmende Niederschlagswasser abgesaugt werden,

bei stärkerer Verdunstung muß zur Vermeidung von Salzauskristallisation Wasser zugegeben werden.

Der Solerücklauf muß zur Vermeidung von Durchwirbelungen der Wasserschicht in Bodennähe des Beckens gelegt werden. Dabei ist zu beachten, daß Bodensedimente, die sich im Leitungssystem absetzen können, nicht mitgerissen werden.

Bei Solebetrieb mit voll ausgesalzener Sole besteht nur insofern die Möglichkeit der Nachsolung, als sich durch Druck- und Temperaturanstieg das Salzaufnahmevermögen der Sole geringfügig verbessert. Diese Feststellung kann durch ein Beispiel belegt werden: Bei Einspeisung voll aufkonzentrierter Sole mit einer Temperatur von 20 °C ( $d_s = 1,20 \text{ g cm}^{-3}$ ,  $C_1 = 316,7 \text{ g NaCl l}^{-1}$ ) erwärmt sich diese in der Kaverne auf die Gebirgstemperatur von 50 °C. Das Salzlösevermögen dieser erwärmten Sole beträgt  $332,7 \text{ g l}^{-1}$ , die Differenz  $C_m = 16 \text{ g l}^{-1}$  wird durch Salzlösung an der Kavernenwandung aufgenommen. Bei einem Kavernenvolumen von 30 000 m<sup>3</sup> ergibt sich nach Formel (19) für einen Speicherzyklus folgender Volumenzuwachs:

$$V = \frac{Q_{\text{Sole}} C_m \cdot 1,1}{d_s - (0,7 \text{ bis } 0,8) C_m} = \frac{30\,000 \cdot 0,016 \cdot 1,1}{2,25 - (0,75 \cdot 0,016)} = 236 \text{ m}^3$$

Dieser Volumenzuwachs, verteilt auf die gesamte Kavernenoberfläche, beträgt nur 0,8% vom Gesamtvolumen. Erst bei 10 bis 15 Speicherzyklen ist dieser echometrisch nachweisbar. Überschlagsmäßig kann beim Speicherbetrieb mit Vollsolebetrieb mit einem Volumenzuwachs von 1% je Umschlag gerechnet werden.

Bei Abkühlung der Sole während des Abförderns in der Solesteigleitung (Einspeisung von Speichergut) besteht die Möglichkeit der Auskristallisation von Salz in der Leitung. Als Gegenmaßnahme kann ein periodisches Einpumpen von Süßwasser zur Salzauflösung oder auch die zusätzliche Installation eines Steigrohrstranges zur kontinuierlichen Zudosierung von Süßwasser vorgesehen werden.

### 15.2.2. Solebetrieb mit nicht voll ausgesalzener Sole

Beim Einsatz nicht gesättigter Sole zum Betreiben von Kavernenspeichern ist zu beachten, daß sich die Sole innerhalb der Kaverne je nach Verweilzeit auf die volle Konzentration aufsalzt. Die Folge ist, daß das Volumen der Kaverne mit jedem Ausspeisezyklus vergrößert wird. Bei vollständiger Ausspeisung des Speichergutes aus der Kaverne vollzieht sich die Nachsolung über die gesamte Kavernenhöhe. Wird jedoch das Speichergut nur teilweise ausgespeist, tritt die Nachsolung nur im unteren Kavernenteil auf. Zur kontrollierten Hohlraumnachsolung ist es deshalb erforderlich, nur vollständige Entleerungen zuzulassen.

Durch den ständigen Volumenzuwachs der Kaverne beim Speicherbetrieb wird die einzubringende Solemenge zur Förderung des Speichergutes immer größer. Bei einer Betriebsdauer des Kavernenspeichers von 30 bis 50 Jahren vervielfacht sich das Volumen der Treibsole. Bei der Planung und Anlage der Solestapelbecken ist diese Entwicklung zu berücksichtigen.

#### Berechnung der Nachsolung

Für die Berechnung des Nachsolvolumens sind verschiedene Formeln bekannt. Für eine  $30\ 000\text{-m}^3$ -Kaverne soll an drei Beispielen das Nachsolvolumen berechnet werden:

Ausgangsdaten:

$$\text{Volumen} = 30\ 000\ \text{m}^3$$

$$\text{Salzdichte } d_s = 2,25\ \text{g cm}^{-3}$$

Konzentration und Dichte der eingepumpten Sole:

$$C_1 = 276,3\ \text{g l}^{-1}, \quad d_1 = 1,175\ \text{g cm}^{-3}$$

Konzentration und Dichte der ausgespeisten Sole:

$$C_2 = 316,7\ \text{g l}^{-1}, \quad d_2 = 1,200\ \text{g cm}^{-3}$$

Differenz des Salzgehaltes:

$$C_m = C_2 - C_1 = 60,4\ \text{g l}^{-1}$$

a) Berechnung nach Formel (19)

$$V_N = \frac{V C_m \cdot 1,1}{d_S - (0,7 \text{ bis } 0,8 C_m)} = \frac{30\,000 \cdot 0,0604 \cdot 1,1}{2,25 - (0,75 \cdot 0,0604)} = 904 \text{ m}^3$$

b) Berechnung nach folgender Formel (20):

$$V_N = \frac{V d_1}{d_S} = \left( \frac{M_2 - M_1}{1 - M_2} \right) \quad (20)$$

$M_1$  = Massekonzentration der Eintrittssole

$$M_1 = \frac{C_1}{d_1} = \frac{0,2763}{1,175} = 0,236$$

$M_2$  = Massekonzentration der Austrittssole

$$M_2 = \frac{C_2}{d_2} = \frac{0,3167}{1,200} = 0,264$$

$$V_N = \frac{30\,000 \cdot 1,175}{2,25} \left( \frac{0,264 - 0,236}{1 - 0,264} \right) = \frac{595 \text{ m}^3}{\text{=====}}$$

c) Berechnung nach der empirischen Formel (21):

$$V_N = V \frac{C_2 - (0,8 \text{ bis } 0,9) C_1}{d_S - (C_2 - 0,27 C_1)} \quad (21)$$

$$V_N = 30\,000 \frac{0,3167 - 0,85 \cdot 0,2763}{2,25 - (0,3167 - 0,27 \cdot 0,2763)} = \frac{1222 \text{ m}^3}{\text{=====}}$$

Mit den gleichen Ausgangsdaten ergeben sich bei den drei Berechnungen a), b) und c) drei recht erheblich voneinander abweichende Ergebnisse:  $904 \text{ m}^3$ ,  $595 \text{ m}^3$  und  $1222 \text{ m}^3$ , wobei nach der einfachen Berechnung des Nachsolvolumens nach a) eine realistisch erscheinende Größenordnung erreicht wird.

Bei Nachsolvolumina dieser Größenordnung macht sich eine Kavernenvermessung zur Kontrolle der Hohlräumentwicklung bereits nach wenigen Speicherzyklen erforderlich, da eine

unkontrollierte Hohlraumvergrößerung die Standfestigkeit und damit die Bergbausicherheit gefährden kann.

Unschwer ist zu erkennen, daß das Nachsolvolumen um so größer ist, je geringer die Konzentration der eingepumpten Sole und je höher die der austretenden Sole ist. Letztere hängt von der Verweilzeit der Sole in der Kaverne ab. Eine 30 000- $\text{m}^3$ -Kaverne benötigt zur Aufkonzentration von  $d_s = 1,175$  auf  $1,20 \text{ g cm}^{-3}$  etwa 2 bis 3 Wochen.

### 15.2.3. Süßwasserbetrieb

Die beim Soletrieb mit nicht voll ausgesalzener Sole festgestellte stetige Volumenvergrößerung hat beim Speicherbetrieb mit Süßwasser ihr Maximum.

Bei fünfmaligem Speicherzyklus und vollständiger Aufkonzentration verdoppelt sich das Kavernenvolumen. Süßwassertrieb kann also nur bei solchen Speichern angewendet werden, die der Reservehaltung dienen und nur höchst selten entleert werden müssen. Ebenfalls anwendbar ist der Süßwassertrieb im Havariefall. Die beim Umschlag des Speichergutes mit Süßwasser und auch mit Halbsole einhergehende Volumen- und Durchmesserzunahme infolge Nachsolung ist am Kavernentiefsten besonders intensiv. Ist ein häufiges Befüllen und Entleeren der Kaverne abzusehen, ist es von Vorteil, wenn die Kavernen nach Solende am Fuß eine geringere Ausdehnung als im Topbereich besitzen. Nach längerem Speicherbetrieb stellt sich dann eine annähernd zylindrische Form ein, ehe dann im weiteren Betrieb der untere Durchmesser den oberen übersteigt. Mit der Berücksichtigung der Nachsolung beim Speicherbetrieb bereits bei der Planung der Kavernenform kann also die Betriebsdauer der Kaverne gezielt verlängert werden, da der zulässige Durchmesser (Grenzwert für die Standsicherheit) im unteren Bereich erst nach etlichen Umschlägen später erreicht wird. Anschaulich wird der Einfluß der ursprünglichen Kavernenform auf die Hohlraumentwicklung nach mehreren Speicherzyklen in /28/ erläutert.

Bei einem Speicher mit Süßwassertrieb wird die obertägige Anlage zur Solestapelung eingespart. Bei einer Wiederbefül-

lung der Kaverne mit Speichergut muß stets die Beseitigung der anfallenden Sole gewährleisten sein.

#### 15.2.4. Pumpenförderung/Trockene Auslagerung

Im Vergleich zu den beschriebenen "nassen" Umschlagsverfahren hat das "trockene" Auslagern des Speichergutes einige Vorteile. Die Problematik der Solestapelung und des Nachsolens wird umgangen, wenn zur Förderung des Speichergutes aus der Kaverne elektrisch betriebene Kreiselpumpen eingesetzt werden können. Diese Tauchkreiselpumpen zeichnen sich durch einen geringen Durchmesser, eine hohe Förderrate bei hohen Drücken und durch geringe Störanfälligkeit aus. Es sind Tauchkreiselpumpen bis 500 kW Leistungsaufnahme mit  $200 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  Ölförderung bei einer Förderhöhe von 750 m bekannt. Zur effektiven Hohlraumausnutzung wurde von der üblichen Anordnung Motor unten - Pumpe oben abgegangen und das System umgekehrt, so daß auf diese Weise bis 1 m über den Kavernensumpf entleert werden kann.

Zur Füllstandskontrolle des Speichergutes - die Kenntnis des Füllungsstandes ist wichtig zur Vermeidung eines Trockenlaufs der Pumpe - wird über eine Meßleitung Gas eingepreßt. Der aufzubringende Einpreßdruck ist ein Maß für den Pegelstand in der Kaverne. Die Genauigkeit der Pegelbestimmung beträgt  $\pm 0,5 \text{ m}$ .

Bei der trockenen Auslagerung treten Fragen der Bergbausicherheit in den Vordergrund. So ist die Standsicherheit der praktisch leeren Kaverne nach der Speichergutauslagerung, wenn der hydrostatische Gegendruck in der Kaverne fehlt, gefährdet. Es wird während dieser Zeit eine erhöhte Konvergenz auftreten. Diesem Problem kann durch günstige Kavernenform und durch Aufbringen eines Schutzdruckes ( $10 \text{ bis } 20 \text{ kp cm}^{-2}$ ) durch Einpressen eines gasförmigen Mediums begegnet werden.

Gelangt Luft in die entleerte Kaverne, kann es zur Bildung eines explosiblen Gemisches kommen, das theoretisch durch Funkenbildung (z. B. Abschlagen von Rohrsträngen in der Kaverne) gezündet werden kann. Zwar rechnet man bei einer Explosion im Kavernenhohlraum nur mit geringem Druckanstieg



/22/, jedoch wird die Möglichkeit einer Detonation innerhalb der Verrohrung mit Geschwindigkeiten bis  $200 \text{ m s}^{-1}$  und Druckstößen auf den Sondenkopf von 50 bis  $100 \text{ kp cm}^{-2}$  nicht ausgeschlossen. Erfolgt die Detonation bei erhöhtem Anfangsdruck, ist sogar mit höheren Belastungen zu rechnen. Praktische Daten für einen derartigen Havariefall liegen nicht vor; die Frage der Reibungsverluste und die Möglichkeit des Erstikens der Flamme in der Produktionsrohrtour sind noch offen. Simulierende Versuche /22/ auf übertägigen Versuchsstrecken lassen für die Praxis noch keine sicheren Aussagen zu.

Für die Entstehung von Explosionen bzw. Detonationen im Kavernenhohlraum müssen viele ungünstige Faktoren gleichzeitig wirken. Eine Zündung kann nur während der Befüllungsphase mit Öl, wenn aus dem Ringraum die Luft ausströmt und das Mischungsverhältnis Kohlenwasserstoff/Luft über der Explosionsgrenze liegt, erfolgen. Während der Ölauslagerung strömt Luft in den Ringraum ein und kann dort nicht mit Kohlenwasserstoffen vermischt werden.

Für Kavernen, die zur Lagerung einer Ölnotreserve dienen und demzufolge nur selten umgeschlagen werden, sind besondere Sicherheitsvorkehrungen zur Vermeidung o. g. Havarien nicht gerechtfertigt. Bei Kavernenspeichern, die zum Ausgleich des saisonabhängigen Ölbedarfs der Verbraucher betrieben werden und wiederholt befüllt und entleert werden müssen, wäre der Bau einer Anlage zur Füllung der Kaverne mit einem nicht-brennbaren Gas einzuplanen.

#### 15.2.5. Speicherbetrieb mittels Gas

Das Prinzip dieses Verfahrens besteht in der Verdrängung einer Flüssigkeit durch ein komprimiertes Gas aus einer Gaslagerstätte, einem UGS oder einer Gaspipeline, wobei je nach vorhandenem Gasdruck mit und ohne Nachverdichtung gearbeitet werden muß. Speziell für Großkavernenspeicher für Flüssigprodukte erscheint das Verfahren effektiv, da die hohen Bau- und Betriebskosten für die dem Speichervolumen entsprechenden Solestapelbecken entfallen. Allerdings sind

infolge der Lösungsvorgänge an der Kontaktfläche Öl - Gas qualitätsbeeinflussende Wechselwirkungen zu erwarten.

Das Gastriebverfahren ist erst ab einer bestimmten Speichergröße und bei besonderen wasserwirtschaftlichen Gegebenheiten effektiv, wenn z. B. die Kosten für die Solestapelung die Kosten für eine eventuelle Aufbereitung des Gases und des Speichergutes und die Mehrkosten für die Installation der Bohrungen übersteigen oder aus Gründen des Umweltschutzes keine übertägige Solestapelung zugelassen wird.

Aus der Praxis ist noch kein Flüssigkeitsspeicher mit Gasbetrieb bekannt; die größte Anlage zur Solestapelung liegt bei 600 000 m<sup>3</sup>. Die Vorteile des Gastriebverfahrens sind:

- Einsparung der Investitionen für Solestapelung
- geringe Inanspruchnahme von Nutzfläche
- keine wasserwirtschaftlichen Probleme
- keine Kosten für Solebehandlung
- keine Hohlraumvergrößerung durch Nachsolung
- Nutzung der Ölkaverne nach Entleerung als Gasspeicher

Nachteile:

- Verfügbarkeit von Gas mit entsprechendem Druck
- Löslichkeit des Treibmediums im Speichergut und gegenseitige qualitative und quantitative Beeinflussung
- Kosten für Anlagen zur Qualitätsgarantie und Druckerzeugung
- höhere Anforderungen an die Kavernenbohrung (entsprechend Gasspeicher)
- Notwendigkeit der Installation einer Schutzrohrtour, Forderung nach langem Kavernenhals, größere Salzmächtigkeit

Die zum Entleeren der Kaverne benötigte stündliche Gasmenge ist eine Funktion der Kavernenteufe und der gewünschten Ölfördermenge, die durch den installierten Förderstrang und die Druckverluste (Fracen des Rohrschuhbereiches) begrenzt wird. Für die Ausspeisung von Öl aus einer Kaverne (Teufe 700 bis 750 m) braucht man zur Realisierung eines Ölförderstromes von 450 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> etwa 35 000 bis 40 000 m<sup>3</sup> (N) h<sup>-1</sup> Gas.

Die chemische Wechselwirkung zwischen Öl und Gas ist gegenüber der physikalischen weniger bedeutend. Denkbar ist bei Vorhandensein von organischem Schwefel im Öl bzw. im Gas die Bildung von Schwefelwasserstoff.

Das Treibmedium Gas nimmt an der Kontaktfläche zum Öl die leichtsiedenden Komponenten des Öles auf (Diffusion und freie Konvektion) und erhöht dadurch seinen Heizwert. Dieser Vorgang steigert sich mit zunehmender Kavernentemperatur und zunehmendem Gasdruck, ist also in tiefgelegenen Kavernen besonders intensiv.

Die Beeinflussung des Öles durch das Treibmedium Gas besteht ebenfalls in der Diffusion von Gas in das Öl, wobei die Tendenz erkennbar ist, daß besonders Methan vom Öl aufgenommen wird. Die Menge hängt ab von der Bewegung beider Medien (Strömung beim Umschlagen und infolge des Temperatenausgleichs).

Das mit einem gasförmigen Treibmedium aus der Kaverne geförderte Öl muß vor seinem Weitertransport und der Verarbeitung vom aufgenommenen Gas durch Entspannen auf 1 at in einer oder mehreren Separationsstufen getrennt werden. Der Masseverlust an Öl ist gegenüber der Speichermenge vernachlässigbar klein.