

Tiefbohrtechnik

Kavernenspeicher

Von Dipl.-Ing. Peter Niquet

Mit 8 Bildern



VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie
Leipzig

Herausgegeben von der VVB Erdöl-Erdgas, Gommern
Leitung und Organisation: Abteilung Bildung
Nur für die Qualifizierung im Bereich des Ministeriums
für Geologie bestimmt

Gutachter:

Dr.-Ing. Martin Eichhorn

Dr.-Ing. Frank Heinze

1. Auflage

© VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1978

VLN 152-915/46/78

LSV 3183

Printed in the German Democratic Republic

Druck: VEB Druckerei "Thomas Müntzer", Bad Langensalza

Redaktionsschluß: 30. 3. 1977

Bestell-Nr. 541 418 6

Inhaltsverzeichnis

0.	Einleitung	7
1.	Speicherung im Untergrund	8
2.	Bedeutung der Untergrundspeicher für die DDR	11
2.1.	Untergrundspeicher für Gas	11
2.2.	Untergrundspeicher für Äthylen	11
2.3.	Untergrundspeicher für Rohöl	12
2.4.	Untergrundspeicher für Treibstoffe	12
2.5.	Untergrundspeicher für die Deponie von Schadstoffen	13
3.	Vor- und Nachteile der Untergrundspeicherung	13
4.	Anforderungen an die Bohrung zur Herstellung einer Kaverne	14
4.1.	Bohrlochkonstruktion von Kavernenbohrungen	17
4.2.	Belastung der Solstränge	19
4.3.	Anforderungen an die Zementation	21
4.4.	Dichtheitsprüfung vor Aufnahme der Solarbeiten	22
4.4.1.	Abdrücken mit flüssigen Medien	22
4.4.2.	Abdrücken mit gasförmigen Medien	23
4.4.3.	Berechnung des Gestängestranges zum Packereinsatz	25
4.4.4.	Berechnung des Schutzdruckes zum Packereinsatz	27
4.4.5.	Maßnahmen bei negativem Ausgang der Dichtheitsprüfung	28
4.5.	Einbauteufe der letzten zementierten Rohrtour	30
5.	Errichtung der Kaverne	32
5.1.	Eigenschaften des Steinsalzes	32
5.2.	Einhaltung der Schweben	33
5.3.	Anforderungen an die Kaverne	34
5.4.	Gas- und Flüssigkeitskavernen	34
6.	Soltechnik	36

6.1.	Prinzip des Aussolens	36
6.2.	Begriffsbestimmungen	38
6.3.	Planung des Solprozesses	38
6.3.1.	Breitsolphase	39
6.3.2.	Solverfahren: Scheibensolung	40
6.3.2.1.	Scheibensolung von unten nach oben	40
6.3.2.2.	Scheibensolung von oben nach unten	43
6.3.2.3.	Scheibensolung kombiniert	43
6.3.2.4.	Indirektes und direktes Scheibensolen	44
6.3.3.	Solverfahren der angenäherten Rohrstände	45
6.3.4.	Aussolen des Himmels	46
7.	Sperrmedium (Blanket)	47
7.1.	Flüssige Sperrmedien	47
7.2.	Nachweis des Kontaktes flüssiges Sperrmedium - Sole	48
7.3.	Gasförmige Sperrmedien	50
7.3.1.	Berechnung des Kopfdruckes	50
7.3.2.	Kontrolle des Sperrmedium-Sole-Kontaktes	51
7.4.	Technologische Probleme beim Solen mit dem Sperrmedium Luft	52
7.5.	Korrosion beim Solen mit dem Sperrmedium Luft	53
8.	Hohlraumvermessung	54
9.	Berechnung des Solprozesses	55
9.1.	Gesetzmäßigkeiten beim Lösungsprozeß	55
9.2.	Formeln zur Berechnung der Kavernen	59
9.3.	EDV-Programm "Kavernensolung"	62
10.	Oberwachung des Solprozesses	63
10.1.	Meßgrößen	63
10.2.	Ermittlung des täglichen Hohlraumzuwachses	65
10.3.	Messung der Drücke am Sondenkopf	66
10.4.	Sedimentation des Rückstandes, Verstopfung des Solstranges	66
10.5.	Dauer der Solarbeiten	67
11.	Wasser-Sole-Haushalt	70
11.1.	Wasserbereitstellung	70

11.2.	Soleabstoß	71
12.	Arbeiten nach Beendigung des Solens	72
12.1.	Abfahren der Kaverne	72
12.2.	Abdrücken der Kaverne	73
12.3.	Bilanzmethode	74
12.4.	Niveaumethode	74
12.4.1.	Niveaumethode bei Isolierung der Kaverne	74
12.4.2.	Niveaumethode bei offener Kaverne	75
12.4.2.1.	Niveaumethode bei offener Kaverne mit flüssigem Abdrückmedium	75
12.4.2.2.	Niveaumethode bei offener Kaverne mit gasförmigem Abdrückmedium	76
13.	Uminstallation zum Speicherbetrieb	78
13.1.	Kavernen für Flüssigprodukte	78
13.2.	Kavernen zur Gasspeicherung	79
13.3.	Kavernen zur Äthylenspeicherung	81
14.	Inbetriebnahme von Gaskavernen	81
14.1.	Erstbefüllung von Gaskavernen	81
14.2.	Abdeckmedium	82
14.3.	Hydratbildung	84
14.4.	Gaskavernen - Zichen der Solesteigleitung	87
15.	Speicherbetrieb von Kavernen	89
15.1.	Gaskavernen	89
15.2.	Flüssigkeitskavernen	90
15.2.1.	Solebetrieb mit Vollsole/Solestapelbecken	90
15.2.2.	Solebetrieb mit nicht voll ausgesalzener Sole	93
15.2.3.	Süßwassertrieb	95
15.2.4.	Pumpenförderung/Trockene Auslagerung	96
15.2.5.	Speicherbetrieb mittels Gas	97
16.	Spezielle Probleme der Äthylenspeicherung	99
16.1.	Stoffwerte des Äthylens	99
16.2.	Degasierung der Sole	100
16.3.	Bakterizide Behandlung der Sole	101

17.	Korrosionsschutz beim Speicherbetrieb	102
17.1.	Katodenschutz für die Produktionsrohrtour	102
17.2.	Korrosionsschutz der Soleabstoßleitung	103
	Literaturverzeichnis	104

O. Einleitung

Die Notwendigkeit der Anlage von Unterspeichern (UGS) zur Vorratshaltung von energetischen und chemischen Grundstoffen nimmt weltweit mit der wirtschaftlichen Entwicklung zu. Auch die DDR als hoch industrialisiertes Land steht vor der Aufgabe, Speicherkapazitäten zur kontinuierlichen und störungsfreien Produktion und Versorgung zu schaffen. Auf Grund der günstigen geologischen Verhältnisse - kompakte Salzlager und Salzstöcke des Zechsteins befinden sich unter einem Großteil des Territoriums der DDR - bietet sich die Speicherung in künstlich zu schaffenden Hohlräumen in diesen Salzformationen an.

Bei der Planung, Errichtung und beim Betrieb dieser Kavernenspeicher tritt eine Vielzahl von Problemen auf, die aus technologischer Sicht in der vorliegenden Fachbroschüre behandelt werden. Die technische und technologische Entwicklung der Verfahren und Ausrüstungen auf dem Gebiet der Kavernenspeicherung unterliegt, gestützt auf Erfahrungen im eigenen Lande und im internationalen Maßstab, einer ständigen Verbesserung und Vervollkommnung, deren Zielfunktion darin besteht, die Speicher mit geringerem Aufwand, schneller und billiger bei Einhaltung der Bergbausicherheit herzustellen und zu betreiben.

Die für die DDR noch relativ junge "Wissenschaft der Unterspeicherung" erfordert neben ingenieurtechnischem Personal die Ausbildung und Qualifizierung von Arbeitern, Facharbeitern, Schichtführern und Meistern aus dem Bereich des Industriezweiges Erdöl-Erdgas.

Allen Interessierten, vor allem aber den Kollegen der Bohr-, Sol- und Uminstallationsbrigaden wird mit dieser Fachbroschüre die Möglichkeit gegeben, sich auf dem Fachgebiet "Kavernenspeicher" grundlegend zu informieren und sich für ihre praktische Tätigkeit die theoretischen Grundlagen und Zusammenhänge zu erarbeiten.

Die angeführten Berechnungsbeispiele sollen den ingenieurtechnischen Personal als Hilfe bei seinen produktionsvorbereitenden Arbeiten dienen.

1. Speicherung im Untergrund

In allen hochentwickelten Industrieländern gewinnt die Speicherung von Energiestoffen unter Tage zunehmend an Bedeutung.

Die herkömmlichen Lagermöglichkeiten über Tage:

- Tanklager für flüssige Kohlenwasserstoffe
- Gasometer für gasförmige Produkte
- Kugeldruckgasbehälter für verflüssigte Kohlenwasserstoffe
- Leitungsatmung von Gaspipelinenetzen
- Gefriergruben u. a.

sind neben der Materialintensität sowie den hohen Errichtungs- und Wartungskosten sehr stör anfällig, umweltfeindlich und in ihrer Kapazität begrenzt.

Die Reservehaltung der Energieträger Öl und Gas ergibt sich aus der Notwendigkeit der Saison- und Spitzenbedarfsdeckung, der Überbrückung von Betriebsstörungen und aus der bestehenden gesetzlichen Pflicht einiger westlicher Länder, eine Notreserve anzulegen. Diese Aufgaben erfordern neue Wege für die Lagerhaltung dieser Produkte.

Während bis 1955 vor allem in den USA mit der breiten Anwendung von Erdgas als Energieträger der Saison- und Spitzenausgleich zur Schaffung von Untergrundspeichern führte und dort einen hohen Stand erreichte, begannen dann auch in Europa in vielen Ländern gleichzeitig die ersten Versuche.

Die ersten Gasspeicher waren Porenspeicher, die in erschöpften Kohlenwasserstofflagerstätten bzw. als Aquiferspeicher (ehemals wassergefüllte Porenspeicher) angelegt wurden. Zuerst wurden also die natürlichen Gegebenheiten des Vorhandenseins eines speicherfähigen Gesteins, das seitlich, im Liegenden und Hangenden durch undurchlässiges Gebirge begrenzt wird, für die Anlage eines Speichers ausgenutzt.

Die vom Volumen her günstigste Speicherungsform von Gasen besteht in der flüssigen Phase. Gase nehmen im flüssigen Aggregatzustand den kleinsten Raum ein. Unter atmosphärischem Druck werden z. B. Methan bei $-161,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ und n-Butan bei $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ flüssig. Beim Erreichen der kritischen Temperatur und Überschreiten des Dampfdruckes verringert sich das ursprüngliche im Normalzustand eingenommene Volumen bei Methan auf das 0,0017fache bei n-Butan auf das 0,0046fache und bei Propan auf das 0,0035fache im flüssigen Zustand. Die generelle Speicherung von Gasen im flüssigen Aggregatzustand ist jedoch wegen der erforderlichen Kälteenergie oft unwirtschaftlich. Liegen Gasgemische wie z. B. Erdgas vor, ist eine Verflüssigung wegen des fehlenden einheitlichen Verdampfungspunktes der einzelnen Komponenten sowie der bei der Wiederverdampfung auftretenden Entmischung in der Praxis für Speichierzwecke nicht durchführbar. Aus diesem Grunde wird Gas für Energiezwecke, wie Stadtgas und Erdgas, zumeist nur in gasförmigem Zustand gespeichert. Die Speicherung verflüssigter Gase (mit einer Komponente) in der chemischen Industrie erfolgt in Kugeltanks, die inzwischen auch keine ausreichende Lagerkapazität mehr darstellen.

Bei Aquiferspeichern, die gegenüber Kavernenspeichern eine wesentlich größere Kapazität besitzen können, tritt das Problem des Kissengases auf. In diesen künstlich geschaffenen Gaslagerstätten verbleiben als nicht wiedergewinnbare Gasmenge auf Grund des Rückhaltevermögens der Poren (in Abhängigkeit von der Permeabilität und Porosität des Speichergesteins) bis zu 60% der eingespeisten Gasmenge.

Gasspeicher in erschöpften Kohlenwasserstofflagerstätten haben einen Vorteil, wenn sie keiner Erstbefüllung bedürfen; das gesamte eingespeiste Gas kann wieder abgefördert werden. Jedoch treten auch hierbei technologische Schwierigkeiten auf, wenn das eingespeiste Gas sich von seiner chemischen Zusammensetzung her, in seinem Heizwert usw. vom Gas der ursprünglichen Kohlenwasserstofflagerstätte unterscheidet. Das ausgespeiste Mischgas unterliegt je nach den gefahrenen Speicherregimen zeitlichen Qualitätsschwankungen, die nicht von allen Endverbrauchern akzeptiert werden können.

Trotz der aufgezeigten Mängel zeugt die weltweite Verbreitung der Porenspeicher von ihrer Wirtschaftlichkeit. In den USA gab es bereits 1964 über 250 Porenspeicher, davon 32 Aquiferspeicher, mit einer Kapazität von $112 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ (N).

Das Verfahren der künstlichen Herstellung eines Hohlraumes in einem löslichen Gestein wurde bereits in den dreißiger Jahren in Deutschland zum Patent angemeldet, die praktische Durchführung hier aber erstmals 1963 beim Butanspeicher in Heide (BRD) verwirklicht.

Erst in jüngerer Zeit sind Kavernenspeicher für die Lagerung von Rohöl und Erdölprodukten sowie für die Gasspeicherung geplant, gebaut und in Betrieb genommen worden. Der erste Stadtgaskavernenspeicher der BRD wurde 1967 in Kiel (geometrisches Volumen $32\,000 \text{ m}^3$) errichtet und 1971 in Betrieb genommen.

Bereits 1971 sagt die Statistik aus, daß es in Europa 50 Speicherkavernen für Öl und Gas mit einem durchschnittlichen Volumen von $260\,000 \text{ m}^3$ und in den USA 600 Kavernen mit einem durchschnittlichen Volumen von $50\,000 \text{ m}^3$ gibt.

Die Kavernenspeicher werden für die Lagerung von

- Flüssigkeiten (Rohöl, Diesel- und Vergaserkraftstoff, Gasolin, Flüssiggase)
- Gasen (Erdgas, Stadtgas, Kohlendioxid, Preßluft)
- Grundstoffen der chemischen Industrie (Äthylen, Propylen) und
- Schadstoffen (Giftstoffe der chemischen Industrie, radioaktive Abfallprodukte)

errichtet und betrieben bzw. in Zukunft erforderlich sein.

In der DDR befinden sich folgende Untergrundspeicher in Betrieb bzw. im Bau:

- Speicher für Importerdgas aus der UdSSR
- Flüssiggasspeicher
- Stadtgas-Aquiferspeicher
- Stadtgasspeicher in ehemaligen Kohlenwasserstofflagerstätten
- Stadtgasspeicher im ehemaligen Kalischacht
- Kavernenspeicher für Äthylen und
- Versuchskavernen für VK und Heizöl

2. Bedeutung der Untergrundspeicher für die DDR

2.1. Untergrundspeicher für Gas

Für die wirtschaftliche Weiterentwicklung der chemischen Industrie sowie zur Sicherung des ständig steigenden Energiebedarfes ist es in der DDR unumgänglich, Speichermöglichkeiten für verschiedene Produkte zu schaffen.

Vor allem ist der Verbrauch der Industrie und der Haushalte an Gas von den jahreszeitlichen Temperaturschwankungen abhängig.

Die Aufgabe der Untergrundspeicher für Stadtgas besteht darin, eine kontinuierliche Produktion der Großkraftwerke zu sichern, den unterschiedlichen Gasverbrauch durch Ein- und Ausspeisen von Gas auszugleichen und Havariesituationen zu überbrücken. Für Importerdgas ist die hochgradige Auslastung der Leitungskapazität der etwa 6000 km langen Erdgasfernleitung ein wesentliches Kriterium für die Wirtschaftlichkeit. Das wird erreicht durch Ausgleich der Bedarfsschwankungen über Untergrundspeicher. Diese dienen ferner der Aufrechterhaltung der Gasversorgung bei Havarien an der Ferngasleitung oder im Förderfeld bzw. bei Nichtabnahme des Erdgases durch die Großverbraucher. Jahreszeitliche Bedarfsschwankungen über Spitzenförderung der Erdgaslagerstätten im Winter und Mehrstofffahrweise bei Großverbrauchern wie Kraftwerken, d. h. im Sommer Gas- und im Winter Kohle- oder Ölheizung, abzufangen wird angestrebt, ist jedoch technologisch aufwendig und auch wegen der höheren Kosten nicht ökonomisch.

2.2. Untergrundspeicher für Äthylen

Äthylen als Zwischenprodukt der Erdölverarbeitung bietet umfangreiche Möglichkeiten der Weiterverarbeitung in der chemischen Industrie. Das Komplexprogramm der sozialistischen ökonomischen Integration sieht vor, daß die Äthylenerzeugung und -verarbeitung durch Vereinigung der Kräfte interessierter Länder realisiert wird. So kam es zum Gemeinschaftsvorhaben DDR als Erzeuger und CSSR als Verbraucher. Erzeuger und Verbraucher sind durch eine Äthylenleitung verbunden. Die Aufgabe

eines Kavernenspeichers für Äthylen besteht darin, die kontinuierliche Produktion des Äthylenerzeugers unabhängig vom Verbraucher und umgekehrt zu garantieren. Der Speicher wirkt als Puffer zwischen Erzeuger und Verbraucher bei technologisch bedingten Stillständen und sichert damit die hohe Effektivität bei der Produktion dieser Großanlagen.

2.3. Untergrundspeicher für Rohöl

Notreserven an Rohöl, wie in der Einleitung bereits erwähnt, müssen sich die westlichen Industriestaaten wegen der Krisenanfälligkeit des Ölgeschäftes anlegen. In der BRD wurde 1965 das Bevorratungsgesetz beschlossen, wonach die mineralölverarbeitende Industrie Ölreserven für 65 Tage auf Vorrat zu halten hat. Seit dem 1. Januar 1975 wurde die Pflicht der Reservehaltung auf eine Menge für 90 Tage ausgedehnt, was bedeutet, daß etwa 40 Mio t Rohöl in einem Hohlraum von 50 Mio m³ einzulagern sind.

In der DDR wird gegenwärtig eine Bevorratung im Rahmen der technologischen Notwendigkeit praktiziert, da unser hauptsächlichster Erdöl- und Erdgaslieferant, die UdSSR, alle Sicherheiten einer kontinuierlichen und laufend steigenden Erdölversorgung bietet. Bisher erfolgte die Erdölbevorratung in den oberirdischen Umschlags- und Reservetanklagern bei den Verarbeitungswerken. Mit der ständig steigenden Rohölverarbeitungskapazität wird die dann notwendig werdende Lagerkapazität auch durch Kavernen geschaffen.

2.4. Untergrundspeicher für Treibstoffe

Wirtschaftliche und strategische Gesichtspunkte führen dazu, nicht nur Rohöl, sondern auch Verarbeitungsprodukte (Treibstoffe) in UGS zu lagern. Diese Produkte stellen allerdings höhere Anforderungen an den Kavernenspeicher bezüglich Tiefe (Temperatur), Reinheit, Lagerzeit und andere, die Qualität beeinflussenden Größen, so daß auf diesem Gebiet noch Forschungsarbeiten notwendig sind, die im Rahmen von Versuchs-

einlagerungen von Diesel- und Vergaserkraftstoff ihren Anfang nehmen.

2.5. Untergrundspeicher für die Deponie von Schadstoffen

Die infolge des stürmischen industriellen Wachstums, speziell der chemischen Industrie, immer stärker werdende Gefahr der Überbelastung des Oberflächen- und Grundwassers durch hochgiftige chemische und radioaktive Abfallprodukte verlangt im Rahmen des Umweltschutzes neue Methoden zur Beseitigung dieser Schadstoffe. Hierzu bietet sich in der Perspektive die durch das undurchlässige Salzgestein absolut isolierte Deponie in ausgesolten Hohlräumen unter Tage an.

Diese Verfahrensweise steht wegen der hohen Errichtungskosten noch am Anfang ihrer Entwicklung, jedoch wird sie in einigen Jahrzehnten eine der wichtigsten Alternativen darstellen.

3. Vor- und Nachteile der Untergrundspeicherung

Bevor spezielle technologische Fragen im Zusammenhang mit dem Bau von Kavernenspeichern behandelt werden, soll ein zusammenfassender Überblick über die Vor- und Nachteile von UGS gegeben werden.

Vorteile der UGS sind:

- die breite Anwendung von Gas als Energieträger und Rohstoff wäre in allen Ländern nicht möglich, da eine Speicherung in herkömmlichen Behältern in dem notwendigen Umfang nicht realisierbar ist
- bei Flüssigkeitsspeichern sind die Einsparungen an Material, Arbeitskräften und Kosten sehr hoch
- UGS sind im Vergleich zu obertägigen Anlagen sehr umweltfreundlich, die zu bebauende Fläche ist um vieles kleiner, die 33 Kavernen auf dem Salzstock Etzel (BRD) erfordern bei einem Speichervolumen von 10 Mio t (12 Mio m^3 Hohlraum) nur $0,2 \text{ km}^2$ obertägige Betriebsfläche; bei einer Tankanlage gleicher Kapazität wäre eine Fläche von etwa 3 km^2 notwendig.

- die Betriebskosten sind durch geringen Wartungsaufwand niedriger
- die sicherheitstechnischen Voraussetzungen (Brand-, Explosionsgefahr) sind wesentlich günstiger
- es bestehen Vorteile in strategischer Hinsicht

An Nachteilen, die diese Speicherung gezwungenermaßen mit sich bringt, sind zu nennen:

- Abhängigkeit von den territorialen und geologischen Verhältnissen. In den seltensten Fällen können diese Speicher in unmittelbarer Nähe der Bedarfsträger oder Erzeuger errichtet werden, und damit wird ein mehr oder weniger aufwendiger Bau von Rohrleitungen erforderlich sein.
- hohes Risiko bei der Errichtung, umfangreiche geologische, bohrtechnische, bergbaugutachterliche und testtechnische Arbeiten sind erforderlich. Damit stehen im Zusammenhang
- lange Errichtungsdauer
- bei einer Havarie des UGS, die zur Aufgabe des Speichers führt (Undichtheit), ist der Schaden um ein Vielfaches größer als bei Havarien dezentralisierter herkömmlicher Speicheranlagen

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 km^2 14 Bohrungen geteuft werden, was bei einem angenommenen Kavernenvolumen von $500\,000 \text{ m}^3$ einen Gesamthohlraum von 7 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 Mio m^3 auf einer Fläche von 1 km^2 .

Eine weitere Forderung, die an die Kavernenbohrung gestellt werden muß, ist die Kaliberhaltigkeit 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 m³ h⁻¹.

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 m³ h⁻¹.

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 abgedichtet, 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.

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

σ_v Vergleichspannung

σ_z axiale Spannung

σ_t tangentielle Spannung

ν 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⁻¹. 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 Solararbeiten

Vor Aufnahme der Solararbeiten 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 Rohrschuhbereich 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⁻¹ Verlust

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

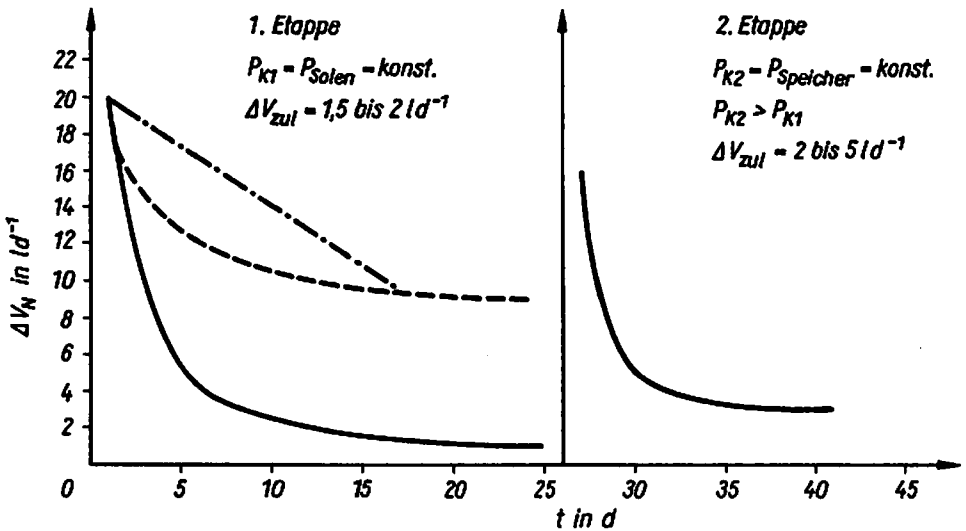


Bild 1. Abdrücken der Produktionsrohrtour nach der Volumenmethode

- 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 $A_R = 602$ cm², Prüfdruckhöhe $p = 88$ kp cm⁻², Dichte der Salzsole $d_S = 1,2$ g cm⁻³, 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

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

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

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 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 = a) 800 m, b) 900 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 kalibrierhaltiges 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.

5. Errichtung der Kaverne

5.1. Eigenschaften des Steinsalzes

Steinsalz in ausreichender Mächtigkeit und Festigkeit ist die Voraussetzung für das Anlegen einer Kaverne. Das Salz im Gebirgsverband ist sowohl für flüssige als auch für gasförmige Stoffe undurchlässig, also ideal für Speichierzwecke.

Die Löslichkeit von Steinsalz (NaCl) ist nur in geringem Maße von der Temperatur des Lösungsmittels (Wasser) abhängig, bei 0°C werden in 100 Gewichtsteilen H_2O 35,5 Teile NaCl und bei 100°C 39,6 Teile NaCl gelöst. Die Löslichkeit von zwischengelagerten Schichten (KCl - Kaliumchlorid, MgCl_2 - Magnesiumchlorid, Anhydrit) ist gegenüber Steinsalz verschieden, so daß beim Aussolen dieser Schichten Auskesselungen oder Verengungen in der Kaverne auftreten.

Salzgestein, das in reiner Form ansteht, ist ideal für den Aussolprozeß, jedoch ist der Solbetrieb auch noch bei über 30% Verunreinigungen im Salz durchführbar. Diese Verunreinigungen werden beim Aussolen im Kavernensumpf abgelagert oder bei sehr feiner Verteilung mit der Sole ausgetragen. Dann empfiehlt es sich, die Sole vor dem Weitertransport durch ein Absetzbecken zu leiten. Je größer der Anteil an nichtlöslichen Stoffen ist (Kernanalyse), um so größer muß der Kavernensumpf eingeplant werden.

Steinsalz ist unter gebirgsmechanischen Verhältnissen ein plastisches, also fließfähiges Gestein. Bei Druckentlastung tritt eine Volumenverringerung der Kaverne ein, sie konvergiert. Die Verformung ist zeit-, temperatur- und druckabhängig.

Die einachsige Druckfestigkeit von Steinsalz beträgt bis 400 kp cm^{-2} . Diese Angabe (Kernuntersuchung) ist für die Festlegung der Schweben erforderlich.

Die Dichte des Steinsalzes schwankt je nach Verunreinigungsgrad zwischen $2,15$ bis $2,25 \text{ g cm}^{-3}$.

Die maximal zu erhaltende Soledichte ist abhängig von der Temperatur, bei 20°C beträgt sie $d_s = 1,205 \text{ g cm}^{-3}$ bei einem Salzgehalt von $323,8 \text{ g l}^{-1}$. Von Dünnssole wird bei $d_s = 1,172 \text{ g cm}^{-3} = 271,1 \text{ g l}^{-1}$ oder 25 Masse-% NaCl und von Voll-

sole bei $d_s = 1,2 \text{ g cm}^{-3} = 316,7 \text{ g l}^{-1}$ oder 26,4 Masse-% gesprochen.

Steinsalz besitzt eine relativ hohe Wärmeleitfähigkeit von etwa $3 \text{ bis } 7 \text{ W m}^{-1} \text{ grad}^{-1}$, deren Kenntnis in Zusammenhang mit der Gebirgstemperatur für den Speicherbetrieb (Erwärmung des Speichergutes in Abhängigkeit von der Kavernengröße und Lagerzeit) von Bedeutung ist.

Mit zunehmender Temperatur, z. B. von $20 \text{ }^\circ\text{C}$ auf $100 \text{ }^\circ\text{C}$, steigen die Viskosität = Plastizität η_{pl} um das 10fache, die Elastizität E bzw. der Verformungsmodul um das 3- bis 4fache und auch die Fließgrenze τ_0 um das 3- bis 4fache.

5.2. Einhaltung der Schweben

Unter Schweben versteht man das unverritzte Salzgebirge unter- und oberhalb der Kaverne, die für die dauerhafte Standsicherheit der Kaverne notwendig sind. Die Mindestschwebenmächtigkeit wird, wie auch die seitlichen Sicherheitspfeiler zu benachbarten Kavernen, für die Kavernen in der DDR im Institut für Bergbausicherheit Leipzig an Hand der Festigkeitswerte des Salzes berechnet. Sie sind bei der Anlage der Kavernen aus Gründen der Bergbausicherheit unbedingt einzuhalten.

Die Mächtigkeit der Schweben ist eine Funktion des Kavernendurchmessers D , der Teufe H , der Dichte des Deckgebirges d_G , des minimalen Innendruckes p_0 , der Druckfestigkeit und der Dichte des Steinsalzes d_s . Der gewählte Sicherheitskoeffizient hängt ab von der geplanten Standzeit der Kaverne und den Betriebsdrücken. Er beträgt z. B. für die Hangendschwebe für geringe Standzeiten (Wochen bis Monate) = 2, für lange Standzeiten (Jahrzehnte) = 3; für die Schwebe im Liegenden der Kaverne, wozu auch das mit den unlöslichen Bestandteilen des Salzes aufgefüllte Volumen des Kavernensumpfes zu zählen ist, wird kein zusätzlicher Sicherheitskoeffizient berücksichtigt. Formelmäßig wird das Verhältnis Schwebenhöhe h : Durchmesser der Kaverne D berechnet. Die Schwebenhöhe h ist um so größer, je geringer der Restdruck in der Kaverne p_0 und je größer der Durchmesser ist. Um vertretbare Schwebemächtigkeiten zu er-

halten, wird man die Form und den Restdruck beim Speicherbetrieb (20 bis 30 kp cm^{-2}) unter gebirgsmechanischen Aspekten festlegen müssen.

5.3. : Anforderungen an die Kaverne

Die Erkundungs- bzw. Kavernenbohrung bringt die Entscheidung, ob eine Kaverne auf dem Salzstock oder Salzkissen angelegt werden kann. Es müssen dafür folgende ober- und untertägige Voraussetzungen erfüllt sein:

- solfähiges, standfestes Salzgestein mit ausreichender Festigkeit, Mächtigkeit und Ausdehnung
- Möglichkeit zur kontinuierlichen Gewinnung großer Frischwassermengen über den gesamten Solzeitraum und ebensolche zur schadlosen Beseitigung der anfallenden Sole
- günstige Lage des Speichers zum Verbraucher oder Erzeuger,
- eine dem Betriebsdruck und der -temperatur angemessene Teufenlage der Salzlagerstätte

Diese Kriterien gelten sowohl für die Planung von Flüssigkeits- als auch für Gaskavernen.

5.4. Gas- und Flüssigkeitskavernen

Flüssige und gasförmige Kohlenwasserstoffe haben unterschiedliche Viskositäten, Dichten und Kompressibilitäten. Wegen der geringen Viskosität und der hohen Drücke des Gases sind an die Dichtheit der Kavernen eines Gasspeichers höhere Anforderungen zu stellen.

Flüssigkeitskavernen werden beim Speicherbetrieb üblicherweise durch Verdrängung des Speichergutes durch Sole oder Wasser entleert. Kavernendruck und der wirksame Gebirgsdruck bleiben annähernd konstant.

Die Entnahme aus Gaskavernen erfolgt in der Regel durch Expansion des Gases. Der dem Gebirgsdruck entgegenwirkende Innendruck in der Kaverne ändert sich laufend mit jeder Einspeisung oder Entnahme. Diese Druckschwankungen gehen mit einer Tempe-

raturänderung einher, die sich beide negativ auf die Standsicherheit der Kaverne auswirken.

Die günstigste Form, die gebirgsmechanisch diesen veränderten Bedingungen am besten Rechnung trägt, ist eine Kugel. Die Spannungsverteilung an kugelförmigen Kavernen ist optimal, die Konvergenz am geringsten.

Konvergenz (Hohlraumschrumpfung) ist die Folge der plastischen Verformung des Salzes, sie nimmt mit steigender Temperatur und zunehmender Teufe (Druckbelastung) zu.

Das Konvergieren von Kavernen ist ein sehr langsam verlaufender Vorgang, bei dem Auswirkungen auf die Oberfläche so gering sind, daß auch in ungünstigen Fällen keine Gefährdung von Bauwerken zu befürchten ist.

Für die Berechnung der Standsicherheit von Kavernen sind drei Verfahren bekannt:

1. Festigkeitsversuche an Prüfkörpern aus Salz im Labor
2. Berechnung der Spannungsumlagerungszonen um die Kaverne
3. Berechnung nach Ähnlichkeitskriterien, d. h. Vergleich mit Kavernen gleicher Größe und ähnlicher Betriebsbedingungen, die über längere Zeiträume sicher betrieben werden.

Die für Gasspeicher geeignete Kugelform läßt sich soltechnisch jedoch sehr schwierig realisieren.

Für Flüssigkeitskavernen eignet sich eine Tropfen-, Birnen- oder Zylinderform. Vom soltechnischen Standpunkt lassen sich schlanke, hohe Kavernen mit einer großen Salzoberfläche, an der sich der Lösungsprozeß vollzieht, schneller und mit geringerem Gesamtbedarf an Wasser herstellen.

Bezüglich der Teufenlage von Kavernen bestehen ebenfalls Grenzen. Je tiefer die Kaverne angelegt wird, um so mehr Gas kann gespeichert werden und um so höher wird das Verhältnis von Aktivgas zu Kissengas. Unter Kissengas ist die zur Aufrechterhaltung des Rest- oder Mindestdruckes in der Kaverne verbleibende Gasmenge zu verstehen.

Es ist wirtschaftlich nicht optimal, Kavernen möglichst tief anzulegen und dann mit einem hohen Betriebsdruck zu betreiben. Mit zunehmender Teufe steigen die Investitionen und Kosten für die Errichtung und den Betrieb der Kaverne (Ausrü-

stung, Energie). Die Konvergenz steigt mit zunehmender Teufe, so daß im Laufe der Zeit mit einem größeren Verlust an nutzbarem Hohlraum gerechnet werden muß.

Die Aufteilung eines Speichervolumens einer tiefgelegenen Kaverne mit einem Betriebsdruck von 150 kp cm^{-2} , einem Nutzvolumen von $600\,000 \text{ m}^3$ und einer Speicherkapazität von 90 Mio m^3 (N) Gas auf drei kleinere und höher gelegene Kavernen zu je $300\,000 \text{ m}^3$ Nutzvolumen und 100 kp cm^{-2} und ebenfalls 90 Mio m^3 (N) Speicherkapazität ist letztlich wirtschaftlicher, da technologisch besser beherrschbar und mit einem wesentlich geringeren technisch-geologischen Risiko behaftet.

6. Soltechnik

6.1. Prinzip des Aussoles

Die Herstellung von Kavernen erfolgt durch gezieltes Aussole von Salzablagerungen mittels Süßwasser an den Kontaktflächen Wasser/Salzgestein. Die dabei anfallende aufkonzentrierte Sole unterschiedlicher Konzentration wird nach über Tage gefördert. Die zu erzielende Konzentration der Sole hängt ab von der Durchsatzmenge und damit der Verweilzeit in der Kaverne und der Kavernengröße. Im Anfangsstadium, wo bei geringem Kavernenvolumen nur eine kleine Kontaktfläche Salz/Wasser vorhanden ist, kann trotz geringer Durchsatzmenge ($20 \text{ bis } 60 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$) nur eine geringe Aufsatzung ($100 \text{ bis } 150 \text{ g l}^{-1}$) erzielt werden. Zum Aussole eines Hohlraumes von 1 m^3 werden anfänglich $25 \text{ bis } 30 \text{ m}^3$ Frischwasser benötigt, der durchschnittliche Wasserbedarf beträgt rund 10 m^3 für 1 m^3 Hohlraum (für Planungszwecke), bei voll ausgesalzener Sole sinkt dieser Wert auf $7 \text{ bis } 8 \text{ m}^3$ Wasser für 1 m^3 Hohlraum.

Der Aussolevorgang kann nach verschiedenen Verfahren erfolgen. Je nachdem, ob das Wasser in die innere oder zentrale Rohrtour eingepumpt wird und der Solerücklauf über den Ringraum zwischen innerem und äußerem Solstrang erfolgt (direktes Solen oder Gegenrichtung) oder umgekehrt, das Wasser über den Ringraum in die Kaverne und die Sole über den Steigraum

des inneren Solstranges nach über Tage gelangt, wird vom direkten oder indirekten (Normalrichtung) Solverfahren gesprochen. Beide Verfahren werden beim Solen einer Kaverne auch kombiniert und mit unterschiedlicher Technologie angewandt.

Die Begrenzung des Solvorganges nach oben wird bei allen Solverfahren durch den Einsatz eines Sperrmediums gewährleistet, so daß eine bestimmte Hohlraumform gezielt hergestellt werden kann und ein Hinterspülen des Rohrschuhs der Produktionsrohrtour auf jeden Fall ausgeschlossen wird.

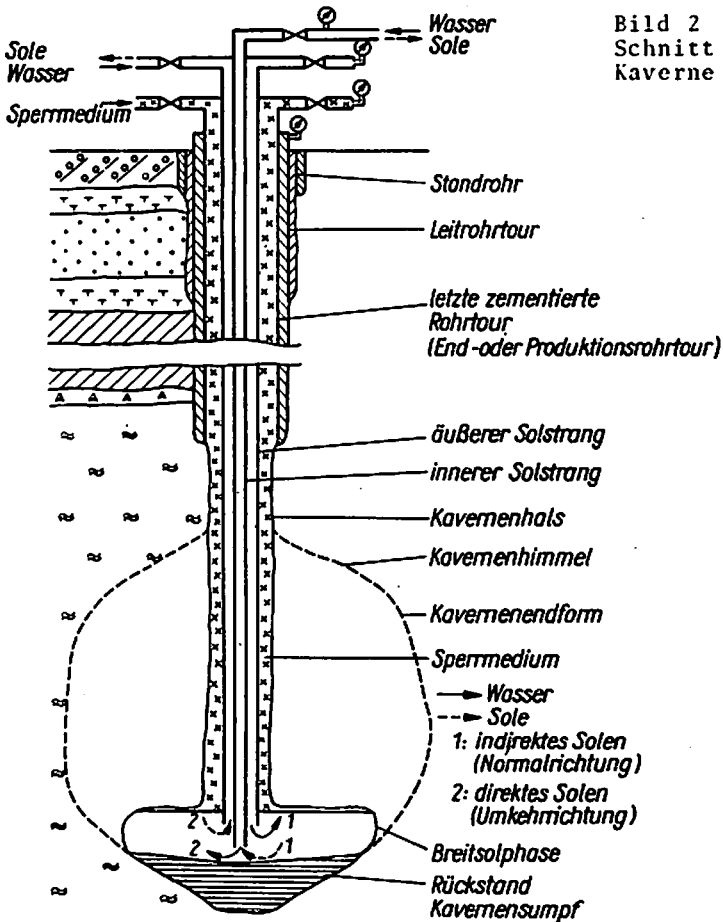


Bild 2
Schnitt durch eine
Kaverne

Das Sperrmedium muß sich dem Salz gegenüber neutral verhalten und muß leichter als Wasser bzw. Sole sein. Es befindet sich im Ringraum zwischen dem äußeren Solstrang und der zementierten Produktionsrohrtour. Als Sperrmedium kommen Gase (Luft, Stickstoff, Erdgas) oder Flüssigkeiten (Diesel, Öl, Gasolin, Propan, Benzin) zum Einsatz.

6.2. Begriffsbestimmung

Anhand von Bild 2 wird zum besseren Verständnis ein Überblick über die beim Solen wiederkehrenden Bezeichnungen gegeben. Der Kavernenhals ist der Bereich von der Oberkante der Kaverne bis zum Rohrschuh der Produktionsrohrtour, der nicht ausgesolt werden darf. Sein Kaliber entspricht dem Bohrwerkzeugdurchmesser.

Unter dem geometrischen Volumen ist der gesamte soltechnisch hergestellte Hohlraum zu verstehen, einschließlich des im Kavernensumpf abgelagerten Rückstandes. Das freie oder Nettovolumen ist die Differenz von geometrischen und Rückstandsvolumen. Das Nutzvolumen einer Kaverne ist das mit Speichergut gefüllte Volumen.

$$V_{\text{geometrisch}} = V_{\text{frei}} + V_{\text{Rückstand}}$$

Die Kavernenherstellung erfolgt je nach Solverfahren in mehreren Etappen. Die erste ist die Breitsolphase, in der der unterste Hohlraum, der den insgesamt anfallenden Rückstand aufnehmen soll, gesolt wird. Es schließen sich eine oder mehrere Hochsolphasen an. In der letzten Solphase, der Endsolphase, wird durch entsprechende Manipulationen mit dem Sperrmedium der obere Abschluß der Kaverne, der Himmel, gestaltet.

6.3. Planung des Solprozesses

Variable Größen, mit denen der Solprozeß beeinflußt und gesteuert werden kann, sind:

- Einbauteufen der Solstränge
- Stand des Sperrmediums und
- Durchsatzmenge des Wassers

6.3.1. Breitsolphase

In der ersten Soletappe, der Breitsolphase, wird der unterste, gering mächtige, aber dem Enddurchmesser der Kaverne fast entsprechende Hohlraum gesolt.

Die Wasserdurchsatzmenge in der Breitsolphase ist gering, um ein höheres Aufsalzen der Sole zu erreichen. Gespült wird während der Anfahrphase in direkter Richtung. Damit wird erreicht, daß der tiefgelegene, 2 bis 3 m über der Bohrlochsohle postierte Rohrschuh des inneren Solstranges freigespült wird und ein Hohlraum geschaffen wird, der zur Aufnahme des Rückstandes dient. Die Dauer der Anfahrphase mit der direkten Solrichtung beträgt 2 bis 5 Wochen.

Bei Solunterbrechung und plötzlicher Änderung des Solregimes sowie bei Umkehr der Solrichtung zum Sperrmediumnachweis (Ö1) kann es zum Zusammenrutschen des "V-förmig" abgelagerten Rückstandes (Flankenwinkel 30 bis 35 °) und zur Verstopfung des eventuell bereits im Rückstand befindlichen inneren Solstrangs kommen.

In der Regel beträgt das Volumen der Breitsolphase 10 bis 15% vom geplanten Gesamtvolumen.

Bei $V_{\text{geometr.}} = 100\ 000\ \text{m}^3$ müssen also in der Breitsolphase 10 000 bis 15 000 m^3 gesolt werden. Bei Volumen dieser Größenordnung wird es nicht zu umgehen sein, die Breitsolphase selbst in zwei Etappen zu solen, weil die Höhe des Rückstandes (bei 10% verunreinigtem Salz sind es 1000 bis 1500 m^3) we weit über den Rohrschuh des zentralen Solstranges reichen würde. Der Solprozeß wird also unterbrochen und die zentrale Rohrtour um einige Meter angehoben. Der Rohrschuh des äußeren Solstranges und der Stand des Sperrmediums werden dabei nicht verändert.

Der Abstand zwischen dem Rohrschuh beider Solstränge soll 10 bis 15 m nicht unterschreiten.

Ist das geplante Volumen der Breitsolphase nach der Dokumentation erreicht, wird die Form der Kaverne geophysikalisch vermessen. Dazu muß der innere Solstrang, weil ein gleichzeitiges Anheben und Ausbauen beider Solstränge nicht möglich ist, vollständig ausgebaut und der äußere um einige Meter bis über die derzeitige Kavernenoberkante angehoben werden. Zuvor wird das Sperrmedium aus der Kaverne abgelassen, die Kaverne wird entspannt.

Nach Auswertung der Hohlraumform der Kaverne kann die nächste Soletappe beginnen, indem die Solstränge und das Sperrmedium auf eine neue Teufe eingestellt werden.

Während die Breitsolphase bei allen Solverfahren prinzipiell übereinstimmt, erfolgt der weitere Solprozeß nach verschiedenen Technologien.

6.3.2. Solverfahren: Scheibensolung

6.3.2.1. Scheibensolung von unten nach oben

Das scheibenweise Solen der Kaverne erfolgt in der gleichen Art wie das Aussolen der Breitsolphase. Die Solstränge werden jeweils um eine zuvor festgelegte Höhe (etwa 20 bis 40 m) gezogen und auf diese Weise von unten nach oben Scheibe um Scheibe ausgesolt, wobei der Abstand der beiden Rohrschuhe konstant bleibt.

Das Sperrmedium befindet sich am oder kurz über dem Rohrschuh des äußeren Solstranges. Es ist sowohl die direkte als auch die indirekte Solrichtung möglich.

Als Orientierungswert für die Soldauer einer Scheibe nimmt man einen mittleren Durchmesserzuwachs je Tag von 0,2 m an. Zum Solen eines Durchmessers von 10 m werden dann 50 Tage benötigt, unter der Voraussetzung, daß voll ausgesalzene Sole gefördert wird. Ist der projektierte Durchmesser erreicht, werden die beiden Solstränge wieder um die nächste Scheibenhöhe emporgezogen.

Die Kavernenwandung ist bei gleicher Soldauer jeder Scheibe wegen der unterschiedlichen Lösungsgeschwindigkeit und der schwankenden Durchsatzmenge und Temperatur nicht gleichför-

mig ausgebildet. Es bestehen deshalb berechtigte Bedenken, daß vorspringende Absätze in der Kavernenwandung während der Entleerungsphase beim Erstbefüllen der Kaverne mit Gas abbrechen und Schäden am Entleerungsstrang verursachen bzw. beim Speicherbetrieb das eingebrachte Abdeckmedium durchschlagen. Ein offensichtlicher Nachteil dieses Solverfahrens besteht in der diskontinuierlichen Arbeitsweise. In periodischen Abständen müssen die Solstränge angehoben werden. Über die gesamte Soldauer wird also eine Anlage zum Ziehen der Solstränge gebunden. Kennt man aus der Kernanalyse und der geophysikalischen Vermessung das genaue Salzprofil und seine Eigenschaften, wie Dichte, Anteil und Verteilung unlöslicher Bestandteile und anderer Salze, sowie unterschiedliche Lösungsgeschwindigkeit über der Kavernenteufe, so ist selbst bei stark inhomogenem Salzprofil die Realisierung der geplanten Kavernenform soltechnisch möglich.

Über das Ausmaß der Lösungsgeschwindigkeit von Kalisalzen, insbesondere des Carnallits, das im Kaliflöz Staßfurt anzutreffen ist, liegen nur wenige soltechnische Erfahrungen vor. Die Lösungsgeschwindigkeit des Carnallits hängt von den strömungsdynamischen Verhältnissen in der Kaverne sowie vom $MgCl_2$ -Gehalt der Sole ab. Die Lösung des $MgCl_2$ aus dem Doppelsalz Carnallit erfolgt bis zur völligen $MgCl_2$ -Sättigung, d. h., auch bei Stillstand des Solbetriebes wird aus dem Carnallitgestein das Carnallitmineral selektiv herausgelöst, und es kommt zur Taschen- und Fingerbildung.

Der selektive Lösungsfortschritt von Carnallitgestein gegenüber Steinsalz wird mit dem 3- bis 4fachen eingeschätzt. In einem stark vereinfachten Beispiel (Bild 3) wurden Gesteinszonen gleicher Lösungsgeschwindigkeit ausgewählt, die in einer Scheibe gesolt werden. Bei der angenommenen Lösungsgeschwindigkeitsverteilung über der Teufe wird in fünf Abschnitten gesolt, bei denen Salz gleicher Löslichkeit ansteht.

Die geplante zylinderförmige, nach oben verjüngte Kaverne wird durch verschieden lange Solzeit der Scheiben je nach der zu erwartenden Lösegeschwindigkeit realisiert.

Höhe	Scheibe	Lösungs- geschwin- digkeit	Salz + An- teile an Unlöslichem	geplanter Kavernen- durchmesser	Solzeit
m	-	md ⁻¹	%	m	d
10	I	0,25	NaCl + 10	16	16 : 0,25 = 64
35	II	0,20	NaCl + 15	20	20 : 0,20 = 100
15	III	0,40	NaCl + Kali	20	20 : 0,40 = 50
30	IV	0,25	NaCl + 10	16	16 : 0,25 = 64
10	V	0,15	NaCl + 20	12	12 : 0,15 = 80
100	I-V				358

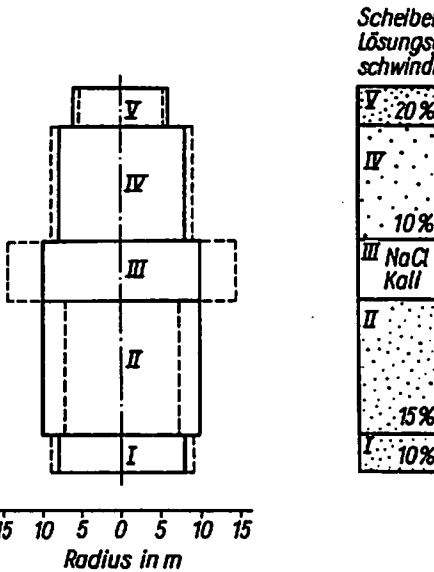


Bild 3
Solverfahren:
Scheibensolen

— Kavernenform
bei Wahl der
Solzeit gemäß
Salzlöslich-
keit

- - - - Kavernenform
bei konstan-
ter Solzeit
von 72 Tagen
je Scheibe

So schematisch vereinfacht, wie im Bild 3 dargestellt, ist die Planung des Solprozesses in der Praxis nicht. Allein zur vollständigen Erfassung der prozentualen Salzanteile und ihrer Lösungsgeschwindigkeit sind komplexe geophysikalische Messungen erforderlich, die mittels EDV (Solsimulator) ausgewertet werden.

Welche Auswirkungen bezüglich der Formgestaltung der Kaverne das scheibenweise Solen ohne Kenntnis der unterschiedlichen Lösungsgeschwindigkeiten des Salzes hat, ist ebenfalls aus Bild 3 zu erkennen. Die gesamte Solzeit beträgt 358 Tage, teilt man diese Zeit in 5 gleich lange Solintervalle von

72 Tagen, ergibt sich eine andere, ungünstigere Kavernenform (---Linie). In der Tat ist in der Praxis die ungleichförmige Ausbildung der Kavernenwandung ein entscheidender Nachteil des Scheibensolens, der sich havariegefährdend beim weiteren Solbetrieb auswirkt. Abbrechende Schollen aus den Seitenwänden können den Solstrang mechanisch zerstören und abschlagen. Abhilfe kann durch den Einsatz von elastischen Kunststoffrohren unterhalb des Sperrmediums geschaffen werden, die wiederum den Nachteil geringer Außendruckfestigkeit aufweisen und bei Verstopfungen sofort einbeulen.

6.3.2.2. Scheibensolung von oben nach unten

Das Verfahren des Scheibensolens ist auch von oben nach unten möglich. Voraussetzung dafür ist jedoch absolut reines Salz, weil Ablagerungen von unlöslichen Bestandteilen, die sich am Boden sedimentieren, dann die Lösung des Salzes verhindern würden.

Der Bedarf an Sperrmedium ist sehr hoch, da der obere geschaffene Hohlraum vollständig damit auszufüllen ist.

6.3.2.3. Scheibensolung kombiniert

Die kombinierte Anwendung des scheibenweisen Solverfahrens ist wie folgt denkbar:

- Breitsolphase → direkt oder indirekt
- scheibenweises Hochsolen → direkt oder indirekt
- letzte Scheibe und Himmel → von oben nach unten gesolt

Mit dieser Methode läßt sich ein gebirgsmechanisch günstiger oberer Abschluß der Kaverne herstellen, indem kontinuierlich mehr Sperrmedium hinzugegeben wird, als der Volumenzuwachs durch den Solprozeß am Kavernenhimmel beträgt.

Die Folge ist, daß der Spiegel Sperrmedium - Sole langsam von oben nach unten abgesenkt und dadurch die gewünschte Formbildung realisiert wird.

6.3.2.4. Indirektes und direktes Scheibensolen

Mit der bereits erwähnten direkten oder indirekten Fahrweise lassen sich im Prinzip dieselben Kavernenkonfigurationen erzielen.

Direkt gesolt wird grundsätzlich zu Beginn der Solarbeiten, der Anfahrphase, um ein Einsedimentieren des Solstranges zu verhindern. Besonders bei großem Anteil unlöslicher Bestandteile in den Salzsichten (über 10 bis 15%) ist dies von Bedeutung. Das direkte Solen dauert gegenüber dem indirekten Verfahren unter gleichen Bedingungen etwa 15 bis 20% länger. Das hat seine Ursache im Vermischungsprozeß des von unten nach oben aufsteigenden Süßwassers mit der auf Grund der Schwerkraft nach unten sinkenden spezifisch schwereren Sole.

Beim indirekten Solverfahren fließt das aus dem Ringraum zwischen den Solsträngen austretende Süßwasser an der Kavernenwandung abwärts und löst dabei das Salz auf. Die Strömung ist also nicht der natürlichen Fließrichtung entgegengesetzt. Mit dieser Solrichtung lassen sich höhere Konzentrationen erreichen.

Durch die kürzere Soldauer beim indirekten Solen sinken die Energie- und zeitabhängigen Kosten beim Solen, so daß diese Fahrweise ökonomischer ist.

Technologisch besser zu beherrschen - auch in Anbetracht der Kontrolle des Sperrmediumspiegels - ist das direkte Solverfahren. Eine Kombination beider Solrichtungen ist die aus den USA bekannte "Rückspülmethode".

Bei diesem Verfahren wird im Wechsel direkt und indirekt gespült. Es wird damit erreicht, daß die während des direkten Spülens im Kavernensumpf angesammelten unlöslichen Bestandteile beim anschließenden Umstellen auf die indirekte Fahrweise nach über Tage ausgespült werden. Das Verfahren ist bei niedrigen Gehalten von unlöslichen Bestandteilen im Salz anwendbar.

Selbstverständlich sind bei dieser Methode Vorrichtungen zur Reinigung der Sole, bevor diese in obertägigen Leitungssystemen abtransportiert wird, vorzusehen.

6.3.3. Solverfahren der angenäherten Rohrstände

Das Solverfahren der angenäherten Rohrstände, das in der sowjetischen Literatur publiziert wird und in der Sowjetunion und in der DDR bereits praktiziert worden ist, arbeitet nach einem anderen Prinzip.

Im Gegensatz zum Scheibensolen wird das Sperrmedium nicht in Rohrschuhnähe des äußeren Solstranges, sondern gleich an der geplanten Kavernenfirste eingestellt.

Im Anschluß an die Breitsolphase wird also die gesamte restliche Kavernenhöhe in einer Phase, der sogenannten Hochsolphase, gesolt.

Das aus dem Ringraum zwischen den Solsträngen, die einen minimalen Abstand von etwa 20 m aufweisen, austretende Süßwasser steigt auf Grund der Dichtedifferenz zur Sole nach oben, vermischt sich dabei an der langen aktiven Solfläche mit der abwärts fließenden Sole und löst das Salz über die ganze Kavernenhöhe. An der großen Fläche geht der Lösungsprozeß langsam und stetig vor sich. Plötzliche Durchmesserdifferenzen und Vorsprünge in der Kavernenwandung, wie sie beim Scheibensolen auftreten können, sind bei diesem Solverfahren nicht ausgeprägt. Ein wesentlicher Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, daß die Rohrstände über einen sehr langen Zeitraum nicht verändert werden müssen. Das periodische Höherziehen wie beim Scheibensolen entfällt.

Der Solprozeß wird nur für die zwischenzeitlichen Hohlraumvermessungen unterbrochen. Zum Ausbau des inneren Solstranges und zum teilweisen Ziehen des äußeren bis über den Kavernenhimmel ist der Einsatz einer transportablen Anlage (Typ T 50 oder A 50) vorgesehen, die nach Beendigung der Hohlraumvermessung und Wiedereinbau der Solstränge auf andere Objekte umgesetzt werden kann. Sind auf einem Kavernenfeld von benachbarten Kavernen bereits gewisse Erfahrungen vorhanden, kann man die Anzahl der Hohlraumvermessungen auf ein Minimum reduzieren.

Die Hohlraumentwicklung ist in den verschiedenen Phasen

- a) Anfahrphase
- b) Breitsolphase
- c) Hochsolphase mit Zwischentappen und
- d) Endsolphase im Bild 4 dargestellt.

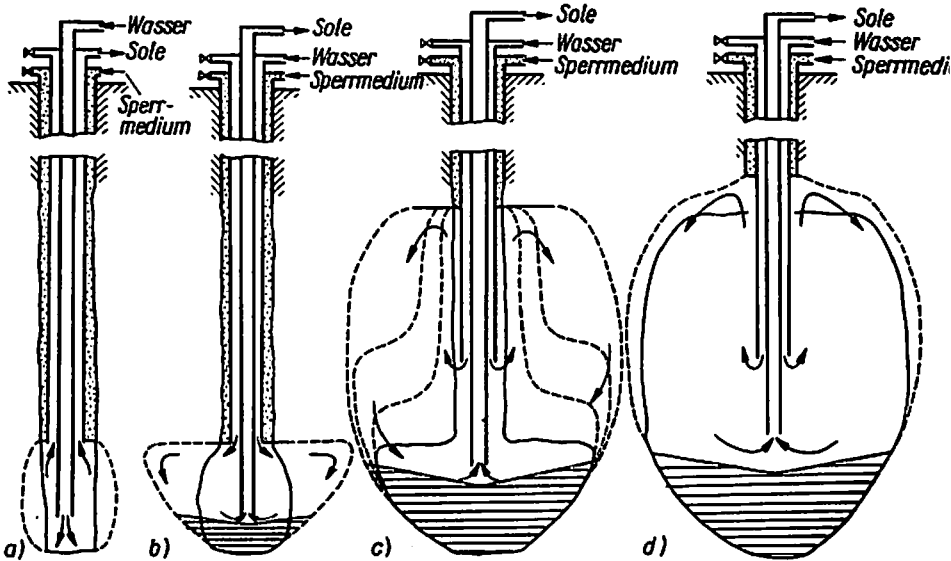


Bild 4. Solverfahren der angenäherten Rohrstände

6.3.4. Aussolen des Himmels

Wie bereits mehrfach erwähnt, ist der Ausbildung des Kavernenhimmels besondere Beachtung zu schenken.

Unter gebirgsmechanischen Aspekten ist für die Standsicherheit der Kavernen ein halbkugelartiger oberer Abschluß wünschenswert. Eine Erweiterung und ein flacher Abschluß müssen verhindert werden.

Die Form des Himmels wird in der letzten Phase, der sogenannten Endsolphase, mit Hilfe eines kontinuierlich veränderten Sperrmediumstandes gebildet.

Der Himmel kann sowohl von oben nach unten durch Zugabe von volumenmäßig mehr Sperrmedium als der Volumenzuwachs durch

das Aussolen ausmacht, als auch in umgekehrter Richtung, von unten nach oben, durch kontinuierliche Wegnahme des Sperrmediums gebildet werden. Das Schwierige bei diesem Prozeß ist die Überwachung des Sperrmediumstandes. Es besteht leicht die Gefahr, daß zuviel Sperrmedium aus der Kaverne gelassen wird und der Spiegel über den Bereich der zementierten Produktionsrohrtour angehoben wird. Ein Kubikmeter Sperrmedium bewirkt im kaliberhaltigen Kavernenhals bereits eine Veränderung des Solespiegels um 10 m (bei einem Durchmesser von 346 mm).

Insbesondere bei gasförmigen Sperrmedien, bei denen der Spiegel nicht genau eingehalten werden kann, soll man sicherheits halber den Himmel von oben nach unten.

7. Sperrmedium (Blanket)

Die Aufgaben des Sperrmediums wurden bereits im Abschnitt 6.1. behandelt.

Die verschiedenen Sperrmedien, ob flüssig oder gasförmig, verlangen sehr unterschiedliche Technologien für ihren Einsatz und ihre Kontrolle während des Solprozesses.

Die Wahl des Sperrmediums hängt ab vom geplanten Speicherprodukt sowie von wirtschaftlichen und technischen Faktoren, wie Beschaffbarkeit, Größe der Kaverne und Soldauer, sicherheitstechnischen u. a. Aspekten.

7.1. Flüssige Sperrmedien

Als flüssiges Sperrmedium finden niedrig viskose Öle, Gasolin, Diesel, VK und Flüssiggase - Propan und Butan - Anwendung. Die obertägige Ausrüstung für das Sperrmedium Öl beschränkt sich auf Vorratsbehälter, Dosierpumpe und Entspannungsleitung. Mit dem Solestrom ausgetragene Ölmengen werden in einem Ölabscheider abgetrennt, um zu verhindern, daß Öl unkontrolliert in den Soleabstoß gelangt und Umweltschäden verursacht. Flüssiggase erfordern eine Reihe sicherheitstechnischer Maßnahmen, wie Propan- oder Butanabscheider mit Abfackelmöglich-

keit, Explosionsschutz im Sondenbereich und Einsatz funkenfreien Werkzeugs.

Die Drücke am Sondenkopf sind gegenüber den gasförmigen Sperrmedien wegen des höheren spezifischen Gewichts geringer. Bei einer Öldichte $d_{\text{Öl}} = 0,8 \text{ g cm}^{-3}$, einer Sperrmediumteufe $H_{\text{Sp.}} = 500 \text{ m}$ und einer Solvedichte $d_{\text{Sole}} = 1,2 \text{ g cm}^{-3}$ beträgt der statische Druck für das Einstellen des Sperrmediumkontaktes bei 500 m nur 20 kp cm^{-2} .

$$P_{\text{stat}} = 0,1 H (d_{\text{Sole}} - d_{\text{Öl}})$$

$$P_{\text{stat}} = 0,1 \cdot 500 (1,2 - 0,8) = 20 \text{ kp cm}^{-2}$$

Zum statischen Druck kommen noch die hydraulischen Druckverluste beim Aufsteigen der Sole im Ring- bzw. Steigraum hinzu, so daß sich ein Kopfdruck von 25 bis 30 kp cm^{-2} (je nach Wasserdurchsatz) einstellt.

Vorteilhaft sind flüssige Sperrmedien noch bezüglich der Dichtheit der Gewindeverbindungen der Solstränge und Verflanschung des Solkopfes.

Wenn allerdings an die Reinheit der Kaverne sehr hohe Anforderungen gestellt werden, muß auf ein flüssiges Sperrmedium - soweit es nicht das Speichergut selbst ist - verzichtet werden, da immer Rückstände des Sperrmediums an der Kaverne wandung haften bleiben, die dann, wenn auch geringfügig, das Speichergut verunreinigen würden.

7.2. Nachweis des Kontaktes flüssiges Sperrmedium - Sole

Zur übersichtlichen Überwachung und groben Einstellung des Sperrmediumstandes eignet sich bereits die Beobachtung und Einhaltung des Kopfdruckes.

Am einfachsten gestaltet sich der Sperrmediumnachweis beim direkten Scheibensolen, wobei der Sperrmediumspiegel sich in Rohrschuhnähe des äußeren Solstranges befindet. Durch Zugabe von Sperrmedium wird der Spiegel unter den Rohrschuh abgesenkt und das Sperrmedium mit der Sole ausgetragen. Das Sperrmedium-Sole-Gemisch wird über eine gesonderte Leitung, die sogenannte Entspannungsleitung, in einen Trennbehälter geleitet.

Beim indirekten Scheibensolen erfordert der Nachweis des Sperrmediums eine kurzfristige Umstellung auf die direkte Fahrweise. Wird dabei Sperrmedium mitgefördert, befindet sich der Spiegel bereits unterhalb des Rohrschuhs. Tritt anfänglich nur reine Sole aus, muß bis zum Austrag Sperrmedium zudosiert werden. Anschließend wird wieder auf die indirekte Fahrweise umgestellt.

Beim Solverfahren der angenäherten Rohrstände ist der Nachweis des Sperrmediumkontaktes problematisch. Die Kontrolle durch Austrag des Sperrmediums mit der Sole ist nicht möglich, da sich ja das Sperrmedium weit oberhalb des Rohrschuhs befindet (Hochsolphase).

Der Nachweis mittels geophysikalischer Meßsonde, die in den zentralen Solstrang eingefahren wird, ist mit Unsicherheiten behaftet. Da durch zwei Solstränge gemessen werden muß, werden die Impulse stark gedämpft und somit die Interpretation erschwert. Deshalb entschließt man sich zu einer technologisch aufwendigen, jedoch einfachen und wirksamen Maßnahme.

Es wird bis zum gewünschten Sperrmediumspiegel, in der Regel an der geplanten Kavernenfirste, eine zusätzliche Rohrtour geringen Durchmessers in den Ringraum äußerer Solstrang/Produktionsrohrtour eingebaut und an den Muffen des Solstranges befestigt. Diese Kontrollrohrtour (Schnüffelrohrtour) ermöglicht es jederzeit, den Sperrmediumspiegel zu überwachen. Erschwerend wirkt sich die am Solstrang befestigte Kontrollrohrtour nur beim Aus- und Einbau des Solstranges (bei Hohlraumvermessungen) aus.

Die Möglichkeit der Einmessung des Sperrmediumspiegels mittels radioaktiver Kugeln, die schwerer als das Sperrmedium und leichter als die Sole sein müssen und infolgedessen am Kontakt in einem Rohr, das am äußeren Solstrang außen angebracht ist, schwimmen, bedarf noch der praktischen Anwendung. Die radioaktive Strahlung muß sicher durch beide Solstränge über längere Zeiträume meßbar sein.

Von Nachteil bei allen Verfahren zur Sperrmediumkontakt-Überwachung mittels Meßsonde ist die diskontinuierliche Möglichkeit der Kontakteinmessung.

Anfahrts- und Meßkosten sowie terminliche Abhängigkeiten gestatten zumeist nur 2 bis 3 Meßeinsätze im Monat. In der Zwischenzeit besteht nur die Möglichkeit, den Sperrmediumspiegel über die Kopfdrucküberwachung zu kontrollieren, was bei einer zwischenzeitlichen Änderung der Wassermenge wegen der sich dann verändernden hydraulischen Druckverluste mit Fehlern behaftet ist.

7.3. Gasförmige Sperrmedien

Unter besonderen Umständen, die die Anwendung der technologisch einfacher zu beherrschenden flüssigen Sperrmedien nicht zulassen, wird auf ein gasförmiges Sperrmedium zurückgegriffen. Es sind Luft, Stickstoff und Erdgas als Sperrmedium bekannt.

Erdgas wird im allgemeinen dann verwendet, wenn es mit genügend hohem Druck in Kavernennähe zur Verfügung steht. Gasförmige Sperrmedien werden dann angewendet, wenn an die Reinheit der Kaverne sehr hohe Anforderungen gestellt werden und das Speichergut (z. B. Äthylen) auf keinen Fall auch nur geringfügig durch Sperrmediumreste verunreinigt werden darf. Die technologischen Besonderheiten beim Solen mit einem gasförmigen Sperrmedium werden in den folgenden Abschnitten behandelt.

7.3.1. Berechnung des Kopfdruckes

Der Druck am Solkopf ist bei gleicher Teufenlage des Sperrmediumkontaktes wesentlich höher als bei flüssigen Sperrmedien, da der Gegendruck infolge des Gewichts der statischen Flüssigkeitssäule fehlt.

Der Kopfdruck beim Solen mit dem Sperrmedium Luft z. B. wird nach folgenden Formeln bestimmt:

Statischer Druck der Solesäule - Gewicht der Luft + hydraulische Druckverluste im Solstrang
(abgewandelte barometrische Höhenformel)

$$P_{\text{Kopf}} = \frac{P_{\text{Fließ}}}{\sigma_s} + P_{\text{hydr.}} \quad (3)$$

$$S = 0,03415 \frac{H}{z_m} \frac{\gamma}{T_m} \quad (4)$$

$$P_{\text{Fließ}} = P_{\text{stat.}} = d_{\text{So}} H \cdot 0,1 \quad \&5)$$

Beispiel:

H = Teufe des Spiegels = 500 m

$d_{\text{So}} = 1,2 \text{ g cm}^{-3}$

$T_{\text{mittel}} = 293 \text{ K}$

$z_{\text{mittel}} = \text{Kompressibilitätsfaktor für ideale Gase} \approx 1$

$\gamma = \text{relatives spezifisches Gewicht zu Luft} = 1$

$s = 0,0584, \quad e^s = 1,06, \quad P_{\text{Fließ}} = 60 \text{ kp cm}^{-2}$

$P_{\text{hydr.}} = 5 \text{ bis } 10 \text{ kp cm}^{-2} \quad (\text{abhängig von } Q, H, D)$

$P_{\text{Kopf}} = \frac{60}{1,06} + (5 - 10) = \frac{60 \text{ bis } 65 \text{ kp cm}^{-2}}{\text{=====}}$

Bei gleichen Teufenverhältnissen betrug der Kopfdruck mit einem flüssigen Sperrmedium nur etwa 25 bis 30 kp cm^{-2} (s. Abschnitt 7.1.).

7.3.2. Kontrolle des Sperrmedium-Sole-Kontaktes

Eine Kontrolle des Sperrmediumspiegels bei gasförmigen Sperrmedien allein durch den Kopfdruck ist nicht möglich, da sich dieser auf Grund der Kompressibilität des Mediums bei Änderung der Temperatur, Soledichte und Wassermenge wesentlich schneller ändert als bei flüssigen Sperrmedien.

Der Nachweis durch Austrag über den Rohrschuh des äußeren Solstranges, wie beim flüssigen Sperrmedium beschrieben, ist ebenfalls nicht möglich. Im Gegenteil, es muß unbedingt verhindert werden, daß Luft oder Gas in den Solestrom kommt, da es zum Gasdurchschlag und zum plötzlichen Anstehen des hohen Gasdruckes in der Soleleitung kommt, was mit einer hohen Beanspruchung des Solkopfes und einer allgemeinen Gefährdung verbunden ist.

Besonders leicht kann es zum Gasdurchschlag kommen, wenn bei direktem Solverfahren in der Anfangsphase zuviel Sperrmedium eingepumpt wird. Das Volumen des Sperrmediums ist noch gering, und beim Einpumpen von 1 m^3 Sperrmedium ist bereits eine relativ große Höhendifferenz im Solespiegel zu bemerken. Man

ist deshalb bestrebt, den Sperrmediumkontakt einige Meter über dem Rohrschuh des äußeren Solstranges zu halten.

Der Nachweis des Kontaktes bei gasförmigen Sperrmedien erfolgt mittels Neutron-Gamma- oder Gamma-Gamma-Sonde. Der Ausschlag der gezogenen Meßkurve am Kontakt ist wegen der grundsätzlich verschiedenen Dichte von Sole und Sperrmedium sehr deutlich.

Der Sperrmediumspiegel wird bei laufendem Solbetrieb eingemessen; die Messung sofort ausgewertet und anschließend bei Bedarf die Kontaktteufe durch Zugabe oder Wegnahme von Sperrmedium korrigiert. Die neue Teufe wird anschließend durch eine erneute Messung überprüft. Die Drücke am Sondenkopf werden genau registriert, da bis zur nächsten Messung (im Abstand von 1 bis 2 Wochen) das Konstanthalten des Kopfdruckes die einzige Möglichkeit zur Beibehaltung des Kontaktes an der gewünschten Teufe bedeutet.

7.4. Technologische Probleme beim Solen mit dem Sperrmedium Luft

Als geeignetes gasförmiges Sperrmedium bietet sich Luft an, sie ist überall verfügbar, ungiftig und nicht brennbar. Kostenaufwendig wird dieses Sperrmedium durch die Bindung eines oder mehrerer leistungsfähiger Kompressoren über die gesamte Solzeit. Je nach Teufenlage der Kaverne ist ein unterschiedlicher Kopfdruck erforderlich, Bis etwa 650 m Teufe reicht z. B. der fahrbare sowjetische Kompressor UKP 80 mit 80 kp cm^{-2} Betriebsdruck und einer Leistung von $8 \text{ m}^3 (\text{N}) \text{ min}^{-1} = 480 \text{ m}^3 (\text{N}) \text{ h}^{-1}$ aus. Liegt die Kaverne tiefer, muß ein Kompressor mit höherem Betriebsdruck eingesetzt oder die Technologie der Luftzugabe verändert werden.

Normalerweise wird die Luft direkt dem Ringraum Produktionsrohrtour/äußerer Solstrang zugegeben. Es besteht jedoch auch die Möglichkeit, die Luft über eine Mischdüse fein verteilt dem in die Kaverne gerichteten Frischwasserstrom zuzugeben. Das Luftpolster wird dann nicht vom Solkopf in die Kaverne gedrückt, sondern von unten her aufgebaut. Tritt das Luft-Wasser-Gemisch aus dem Rohrschuh des Solstranges,

steigen die Luftbläschen nach oben, entlösen sich und bilden somit das Sperrmedium. Bei dieser Methode kommt man mit wesentlich geringerem Luftdruck aus ($p_{\text{Luft}} = \text{Einspeisedruck des Wassers}$), jedoch dauert der Aufbau des Luftvolumens entsprechend lange.

Der tägliche Luftbedarf, der sich zusammensetzt aus

- dem Volumenzuwachs der Kaverne
- der an der Kontaktfläche Luft/Sole in Lösung gehenden Luft
- und der mit dem Solestrom wieder ausgetragenen Luftmenge

hängt ab von der Wassermenge und den Druck- und Temperaturbedingungen in der Kaverne und belüftet sich auf durchschnittlich 1200 bis 1500 $\text{m}^3 \text{ (N) d}^{-1}$.

Nachteilig wirken sich bei diesem Verfahren die aus dem Zweiphasenstrom resultierenden hydraulischen Schläge in den Solsträngen und im Solkopf und die schwierige Konstanthaltung des Luft-Sole-Spiegels aus.

Die Solstränge werden zur Gewährleistung der technischen Gasdichtheit mit einem Dichtmittel in den Gewindeverbindungen versehen.

7.5. Korrosion beim Solen mit dem Sperrmedium Luft

Gegenüber allen anderen Sperrmedien besteht beim Solen mit Luft eine erhöhte Korrosionsgefahr im Bereich des Sperrmediums. Während ein Korrodieren der Solstränge unproblematisch ist, da diese ausgewechselt werden können, besteht die Gefahr der bleibenden Schädigung der fest installierten Produktionsrohrtour. Diese zu schützen gibt es z. Z. noch keine praktikablen Möglichkeiten. Man könnte die Rohre vor dem Einbau innen mit einem Korrosionsschutzanstrich oder einer Kunststoffauskleidung versehen, jedoch werden diese bei Rohrzieharbeiten beschädigt und bieten dann eine Angriffsfläche für Lochfraß (Lokalelementbildung).

Das Einbringen eines Schutzanstriches nach Beendigung des Solens für den Speicherbetrieb setzt die vollständige Entfernung der bestehenden Rostschicht durch Säuerung oder Abbeizen voraus, was in seiner Wirksamkeit noch nicht erwiesen

ist. Effektiv erweist sich ein Korrosionszuschlag bei der Wanddickenfestlegung der Produktionsrohrtour, der mit 1 bis 2 mm je Jahr Solzeit veranschlagt werden muß. Dieser berücksichtigt flächenhafte Korrosion, nicht aber lokalen Lochfraß.

Die gefährliche Sauerstoffkorrosion könnte man ausschließen, wenn als Sperrmedium hochreiner Stickstoff verwendet wird. Es muß allerdings garantiert sein, daß der Stickstoff absolut frei von Sauerstoff ist, da Sauerstoff in geringen Konzentrationen weitaus korrosiver ist (Lochfraß), als wenn er im Überschuß vorliegt (flächenhafte Korrosion). Hemmend auf den Korrosionsprozeß wirkt die Bildung von Oxidhydrat bei Sauerstoffüberschuß.

Während des Speicherbetriebes kann die Korrosion der zementierten Produktionsrohrtour durch Katodenschutz vermindert werden. Wird in Gaskavernen eine teilzementierte Schutzrohrtour eingebaut, schützt man die Produktionsrohrtour durch Einbringen einer korrosionshemmenden Ringraumschutzflüssigkeit. Die Anwendung der gasförmigen Sperrmedien, insbesondere der Luft, bringt also eine Fülle technologischer Probleme mit sich, die es geraten erscheinen lassen, nur in Sonderfällen (Reinheit der Kaverne), bei kleinen und hochgelegenen Kavernen (Drücke, Solzeit) darauf zurückzugreifen.

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.

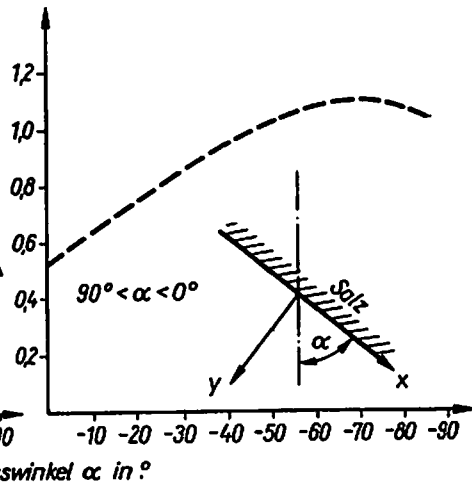
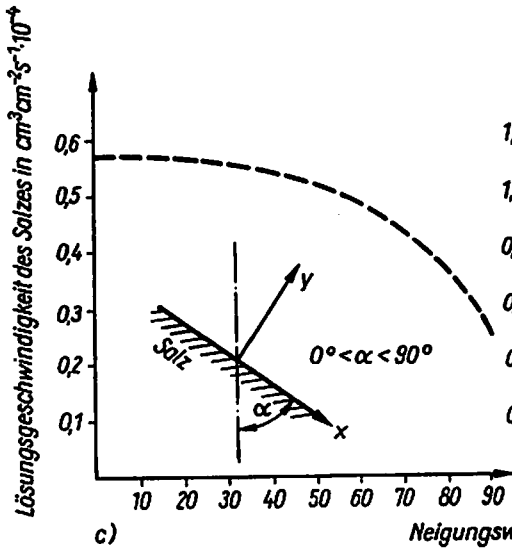
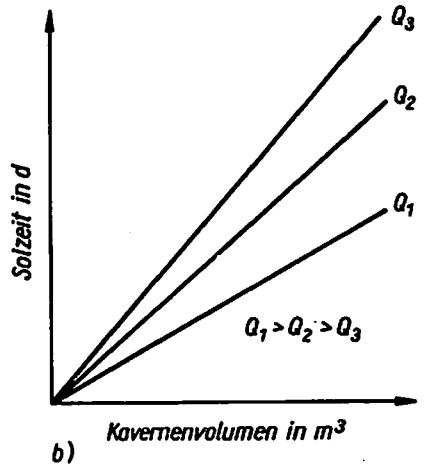
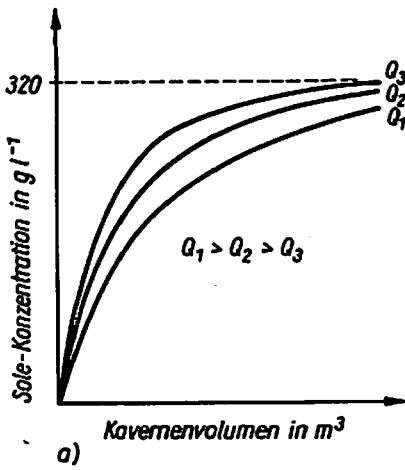


Bild 5. Abhängigkeiten beim Solen

- 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 $\alpha = 90^\circ - 0$ (Prinzipische Skizze)

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 sollen 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.

10. Überwachung des Solprozesses

10.1. Meßgrößen

Der Solprozeß und die Hohlrumentwicklung werden über Tage durch die genaue Messung und Dokumentation der stündlichen Wasserdurchsatzmenge, des Soleaustlags, der Solekonzentration,

der Sperrmediumzugabe und der Drücke an den Ringräumen und dem Steigraum des Solkopfes. (Wasser, Sole, Sperrmedium) überwacht.

- Wassermenge

Die Messung erfolgt über Zähluhr bzw. Durchflußmengenmesser in $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ und in $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$.

- Solemenge

Zur Ermittlung der ausgetragenen Salzmenge wird die Solemenge in $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ und in $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ gemessen. Ist z. B. beim Solen mit einem gasförmigen Sperrmedium die Durchflußmengenmessung wegen des Zweiphasenstroms (Gasentlösung aus der Sole) nicht möglich, wird zur Berechnung der Solemenge die Wassermenge herangezogen.

Die Solemenge ist um 2 bis 4% geringer als die eingepumpte Wassermenge, da der entstandene Hohlraum mit Sole gefüllt bleibt.

- Solekonzentration

Die Konzentration der Sole wird aus der Soledichte nach Tabellen bestimmt. Die Soledichte wird mit einem Aräometer im zeitlichen Abstand von 1 bis 2 Stunden und eine Mischprobe aus jeder genommenen Probe im Labor gemessen. Dabei ist zu beachten, daß die Sole immer bei der gleichen Temperatur gemessen wird (ständige Erwärmung auf 20°C), um temperaturbedingte Dichteschwankungen auszuschließen. Die geforderte Genauigkeit beträgt $0,003 \text{ kg dm}^{-3}$.

- zugegebene Sperrmediummenge

Zur Konstanthaltung des Sperrmediumspiegels muß stets so viel Sperrmedium zudosiert werden, wie der seitliche Volumenzuwachs der Kaverne ausmacht. Diese Menge im voraus zu bestimmen ist schwierig. In der Praxis erhält man Anhaltswerte, nach denen man sich in etwa richten kann und die durch Einmessung des Spiegels kontrolliert werden.

10.2. Ermittlung des täglichen Hohlraumzuwachses

Aus der täglichen Gesamtsole- bzw. Wassermenge und der durchschnittlichen Solekonzentration (Salzlast) wird die ausgetragene Salzmenge C berechnet:

$$G = Q_{\text{Sole}} C_{\text{mittel}} \quad \text{bzw.} \quad (15)$$

$$G = 0,96 - 0,98 Q_{\text{Wasser}} C_{\text{mittel}} \quad (16)$$

Das freie Volumen wird daraus berechnet:

$$V_{\text{frei}} = \frac{G}{d_{\text{Salz}} - (0,7 \text{ bis } 0,8) C_{\text{mittel}}} \quad (17)$$

$d_{\text{Salz}} = 2,15 \text{ bis } 2,25 \text{ g cm}^{-3}$, aus den Salzkernen der Bohrung bestimmt

$(0,7 \text{ bis } 0,8) \cdot C_{\text{mittel}} = \text{Volumen, das mit Sole gefüllt bleibt und nicht durch die Solemengenmessung über Tage erfaßt wird}$

Gesamtvolumen:

Für die Bestimmung des Gesamtvolumens muß der unlösliche Rückstand mit erfaßt werden.

$$V_{\text{ges}} = 1,00 \text{ bis } 1,20 V_{\text{frei}} \quad (18)$$

Die Beziehungen Gl. (15) bis Gl. (18) werden zu einer Formel zusammengefaßt:

$$V_{\text{ges}} = \frac{Q_{\text{Sole}} C_{\text{mittel}} \cdot (1,00 \text{ bis } 1,20)}{d_{\text{Salz}} - (0,7 \text{ bis } 0,8) C_{\text{mittel}}} \quad (19)$$

die alle Werte, die zur Berechnung des Volumens notwendig sind, enthält.

Die Summe der täglich gesolten Volumina ergibt dann bei Solende den Gesamthohlraum der Kaverne, der durch die echometrische Vermessung zu bestätigen ist.

10.3. Messung der Drücke am Sondenkopf

Die Funktion des Sperrmediumkopfdruckes als Mittel zur Überwachung des Solespiegels wurde bereits erwähnt. Veränderungen des Kopfdruckes bei konstantem Wasserdurchsatz deuten immer auf eine Verschiebung des Solespiegels hin, der dann durch Zugabe oder Wegnahme von Sperrmedium wieder eingestellt wird. Der Kopfdruck der Sole und des Wassers wird ebenfalls in kurzen Abständen kontrolliert und im Sondenbuch dokumentiert. Bei konstanter Wassermenge stellen sich auch konstante Drücke ein, die mit Feinmeßmanometer bis auf $0,1 \text{ kp cm}^{-2}$ gemessen werden. Plötzliche Druckveränderungen haben immer eine technologische Ursache und sind ein Anzeichen für defekte Solstränge, Rohrbrisse oder eine drohende Verstopfungsfahr.

10.4. Sedimentation des Rückstandes, Verstopfung des Solstranges

Die Verstopfung der Solgarnitur ist eine häufige Komplikation, die zumeist beim Solbeginn auftreten kann. Obwohl in der ersten Etappe der Breitsolphase direkt gesolt wird, kommt es nur zum geringen Austrag der unlöslichen Bestandteile, da die Aufstiegeschwindigkeit der Sole geringer als die Sinkgeschwindigkeit des Rückstandes ist.

Aufstiegeschwindigkeit bei $Q_{\text{Wasser}} = 100 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$:

Kavernendurchmesser in m	Aufstiegeschwindigkeit in cm s^{-1}
0,2	88,5
1,0	3,5
2,0	0,9
4,0	0,2
6,0	0,1

Das anfängliche Volumen der Kavernenbohrung von der Bohrlochsohle bis zum 2 bis 4 m darüber postierten Rohrschuh des inneren Solstranges beträgt nur $0,2$ bis $0,4 \text{ m}^3$, das sich bei 10

bis 15% verunreinigtem Salz innerhalb kurzer Zeit (8 bis 12 d) mit unlöslichem Rückstand füllt.

Die Sedimentation hängt ab von der Korngröße des Unlöslichen. Je nach Feinheit rechnet man mit einem Auflockerungsfaktor von $K_A = 1,2$ bis $2,0$. Das bedeutet, daß nach Aussolung von 10 m^3 Salz mit einem 12%igen Anteil von unlöslichen Bestandteilen bereits

$$V_{\text{Rest}} = 0,12 \cdot 10 \cdot 1,5 = 1,8 \text{ m}^3$$

Rückstand anfällt, der sich zu etwa 90% an der Kavernensohle sedimentiert und zu etwa 10% ausgetragen wird.

Mit zunehmendem Kavernenvolumen und steigender Höhe des Rückstandes verringert sich der Auflockerungsfaktor, d. h., der Schlamm verdichtet sich.

Ober die Form des abgelagerten Rückstandes, ob kegelig oder mit gleichmäßigen Flankenwinkeln, bestehen unterschiedliche Auffassungen, wobei die Solrichtung (direkt oder indirekt) eine Rolle spielt.

Der Flanken- oder Schüttwinkel wird mit 30 bis 35° angenommen. Obersteigt die Höhe des Rückstandes den Rohrschuh des zentralen Solstranges, wird bei ununterbrochenem und konstantem Wasserdurchsatz der Kopfdruck des Wassers langsam ansteigen und zunehmend Schlamm ausgetragen werden. Dieses Alarmsignal muß man beachten und den Solstrang höherziehen.

Bei plötzlicher Änderung des Solregimes oder bei Stillstand besteht die Gefahr, daß der labile Schüttkegel zusammenfällt und den Rohrschuh des zentralen Solstranges zuschüttet. Der Kopfdruck steigt wasserseitig und fällt solesseitig plötzlich ab, der Solprozeß wird unterbrochen. Wird der Solstrang nach sofortiger Umkehr der Spülrichtung von indirekt auf direkt nicht frei, muß mit einem Fracaggregat und maximalem Druck versucht werden, Umlauf zu spülen. Wird der Solstrang auch bei nachfolgenden Zugversuchen nicht frei, ist er im unteren Teil zu torpedieren und abzuwerfen.

Um diese Art Havarie zu vermeiden, ist speziell in der Anfangsphase des Solens erhöhte Aufmerksamkeit und gewissenhafte Beobachtung der Meßgrößen erforderlich.

Bei planmäßiger Unterbrechung des Solprozesses soll die Wassermenge stetig über einen längeren Zeitraum (1 bis 2 Tage) vermindert werden.

10.5. Dauer der Solararbeiten

Die gesamte Solzeit bis zum Erreichen des geplanten Hohlraumes ist eine Funktion der Wassermenge und der Solekonzentration.

Um hohe Konzentrationen zu erzielen, sind große aktive Lösungsflächen - also hohe Kavernen - oder aber eine geringe Schüttungsmenge notwendig. Zum effektiven Solen gibt es ein Optimum, bei dem mit hoher Schüttungsmenge auch eine ausreichend hohe Konzentration erzielt werden kann. Insbesondere nach der Breitsolphase ist dieses Problem jedoch von untergeordneter Bedeutung, da die maximale Schüttungsmenge dann von anderen Faktoren begrenzt wird.

Die Wasserbereitstellung, die Pumpenausrüstung und die Möglichkeiten der Solebeseitigung begrenzen die Höhe der Wasserdurchsatzmenge. Von nicht zu unterschätzendem Einfluß ist der quadratisch mit der Wassermenge steigende hydraulische Druckverlust in den übertägigen Leitungen und dem Solstrang.

Zusammenfassend ist zum Wasserdurchsatz in Abhängigkeit der technischen Voraussetzungen zu sagen:

- maximale Wassermenge Q_W ist abhängig von der zulässigen Strömungsgeschwindigkeit in der Solgarnitur = 5 m s^{-1} . Wird dieser Wert überschritten, kann es zum Vibrieren der Rohre und zum Durchspülen der Gewinde kommen.
- maximale Wassermenge ist abhängig von den zulässigen Drücken der Pumpen, der Leitungen und der Bohrung (Rohrschuhbereich der Produktionsrohrtour)
- maximale Wassermenge ist abhängig von der Wasserbereitstellung und dem Soleabstoß

In der Regel wird ein Solbetrieb mit maximalem Wasserdurchsatz nicht praktiziert, weil es ökonomisch unzweckmäßig ist. Unter Beachtung des Fertigstellungstermins für die Kaverne

wird das Optimum der Spülrate durch die Kosten der Wasserzuführung, die zeitabhängigen Kosten für den laufenden Solbetrieb (Abschreibung, Löhne) und durch die Kosten für den Soleabstoß bestimmt.

Neben der reinen Solzeit gibt man die technologische Solzeit an, die mögliche Stillstände, Ausfallzeiten, Rohrzieharbeiten und Hohlraumvermessungen berücksichtigt.

Für Kavernen der Größenordnung 50 000 bis 200 000 m³, die mit 8 5/8" x 5 3/4" Solsträngen ausgerüstet sind, beträgt der übliche Wasserdurchsatz je nach Teufenlage der Kaverne und der übertägigen Ausrüstung 50 bis 120 m³ h⁻¹, für Großkavernen liegt er bei 80 bis 150 m³ h⁻¹.

Für zwei Kavernen mit 280 000 und 500 000 m³ Nutzvolumen werden die mit verschiedenen Spülraten erreichbaren Solzeiten wie folgt angegeben:

Daten der Kavernen:

Solstränge 9 5/8" und 7"

direktes Solverfahren in zwei Scheiben von unten nach oben
1150 bis 1350 m und 650 bis 1150 m

Gesamthöhe: 500 m

Form: rotationssymmetrischer Zylinder

10% Anhydrit im Steinsalz

Q _w in m ³ h ⁻¹	280 000 m ³		500 000 m ³	
	technische Solzeit in Monaten	Q _w ges. in Mio m ³	technische Solzeit in Monaten	Q _w ges. in Mio m ³
100	41	2,65	67	4,4
200	22	2,8	35	4,6
300	16	3,0	24	4,82
400	12	3,2	19	5,0
500	10	3,34	16	5,3
600	9	3,5	14	5,46

Die optimale Spülrate liegt bei 200 bis 350 m³ h⁻¹.

Für eine 250 000-m³-Kaverne mit 8 5/8 x 5 3/4"-Solsträngen sind beim Verfahren der angenäherten Rohrstände folgende Solzeiten in Abhängigkeit der Wassermenge zu erreichen:

Q_w in m ³ h ⁻¹	reine Solzeit in Monaten	technische Solzeit in Monaten
150	18,2	21,5
120	21,4	25,8
100	24,5	29,4
80	29,1	35,0
50	48,1	56,0
40	57,5	69,0

11. Wasser-Sole-Haushalt

Bei der Anlage von Salzkavernenspeichern im Binnenland sind umfangreiche Recherchen vor Aufnahme der Solarbeiten zu führen, die die Bereitstellung von Süßwasser sowie die schadlose Beseitigung der in gleicher Menge anfallenden Salzsole zum Inhalt haben. In Küstennähe vereinfacht sich das Problem insofern, als zum Solen Meerwasser verwendet werden kann (zumindest Ostseewasser mit seinem geringen Mineralisationsgrad) und der Soleabstoß wiederum ins Meer erfolgen kann.

11.1. Wasserbereitstellung

Die langfristige und kontinuierliche Bereitstellung von Süßwasser ist bei den entsprechenden Organen der Wasserwirtschaft anzumelden und zu planen. Für den mit steigender Industrialisierung immer angespannter werdenden Wasserhaushalt bedeutet ein Kavernenbauvorhaben in der Größenordnung zwischen 100 000 m³ bis über 1 Mio m³ Hohlraum - was einem durchschnittlichen Wasserbedarf von 1 bis 10 Mio m³ entspricht - eine große Belastung. Zumeist ist für die Aussohlung der Kavernen Brauchwasserqualität ausreichend, jedoch muß das Wasser von groben Verunreinigungen und Schlamm über eine Siebkette bzw. ein Siebband (0,2 bis 0,4 mm Ma-

schenweite) gereinigt werden. Feinschlamm setzt sich zusammen mit dem Unlöslichen im Salz an der Kavernensohle ab. Die Wasserbereitstellung für den Solprozeß sollte sich nicht nur auf eine einzige Möglichkeit beschränken, sondern daneben einen zweiten Kreislauf (Fluß oder Tiefbrunnen) in Reserve haben; unter Umständen ist ein künstliches Reservoir anzulegen. Besteht in Kavernennähe keine Möglichkeit, Oberflächenwasser oder Grundwasser zu nutzen, muß die Versorgung mit Wasser aus dem tieferen Untergrund in Betracht gezogen werden.

Das verteuert infolge der hohen Kosten für das Niederbringen und Testen einer oder mehrerer Wasserbohrungen das Vorhaben erheblich. Da die aus dem Jura oder Mittleren Buntsandstein geförderten Schichtwässer bereits mineralisiert sind, verzögert sich der zeitliche Hohlraumzuwachs gegenüber der Verwendung von Süßwasser, ebenso steigt der Gesamtwasserbedarf. Daraus ergibt sich die Grenze der wirtschaftlichen Verwendung von Schichtwasser.

11.2. Soleabstoß

Weit größere Probleme als die Wasserbereitstellung bringt die schadlose Beseitigung der anfallenden Sole mit sich.

Die Salzbelastung der Oberflächenwässer, speziell der Flüsse in den europäischen Industriegebieten, ist bereits so hoch, daß aus Gründen des Umweltschutzes eine weitere Verunreinigung durch Einleitung von Sole kaum zumutbar ist. Die Genehmigung der Einleitung von Sole in Oberflächenwässer ist zumeist mit einer zeitlichen und mengenmäßigen Begrenzung beauftragt, die sogar bei Niedrigwasserführung eine Soleeinleitung verbietet. Für Großvorhaben im Kavernenbau, wo über Jahre oder Jahrzehnte hinaus große Solemengen anfallen, sollten Überlegungen zur Nutzung dieser Sole angestellt werden.

Gestatten es die geologischen Verhältnisse, die Kavernen in der Nähe von Kali- und Sodafabriken zu errichten, kann die anfallende Sole in diesen Werken genutzt werden. Anderen-

falls ist in Standortnähe der Kavernen eine derartige Industrie aufzubauen, was allerdings erhebliche Mehrinvestitionen erfordert.

Eine praktikable Lösung des Soleproblems ist die Versenkung in aufnahmefähige Schluckhorizonte. Dazu eignen sich poröse und permeable Sand- und Schluffsteinschichten des Jura und Buntsandsteins, die zu diesem Zweck in Kavernennähe (5 bis 10 km) durch eine oder mehrere Bohrungen aufgeschlossen werden. In einem Belastungstest ist der Nachweis für die Aufnahmefähigkeit dieser Horizonte zu erbringen, wobei die Garantie zu geben ist, daß a) keine Verbindung zu Süßwasserleitern besteht und b) die Gesamtmenge an Sole je h und über den gesamten Solzeitraum aufgenommen wird. Vor der Verpressung ist die Sole in Absatzbecken und Filtern von den mitgerissenen schlammartigen Bestandteilen zu trennen, da diese allmählich zum Blockieren der Horizonte führen würden.

Das Verpumpen der Sole in das Meer wird weltweit angewandt, wenn damit auch umfangreicher Pipelinebau (Entfernungen bis 50 km stellen noch eine ökonomisch vertretbare Lösung dar) verbunden ist.

12. Arbeiten nach Beendigung des Solens

12.1. Abfahren der Kaverne

Ist laut Dokumentation das geplante Hohlraumvolumen erreicht, wird der Solprozeß eingestellt. Das planmäßige Abfahren der Kaverne erfolgt, auch bei den zwischenzeitlichen Hohlraumvermessungen, nicht plötzlich, sondern allmählich. Bei Förderung nur teilgesättigter Sole wird die Wassermenge bereits in den letzten Soltagen herabgesetzt, um ein höheres Aufkonzentrieren der Sole zu bewirken. Anschließend wird das Sperrmedium abgelassen, und die Sole steigt in der Kaverne bis über Tage.

Wäre die Sole nicht voll ausgesalzen, käme es im Bereich des Kavernenhalses und des Rohrschuhs der Produktionsrohrtour zu Nachsolerscheinungen, die auf jeden Fall ausgeschlossen werden müssen.

Ist die Kaverne in indirekter Fahrweise gesolt worden, kehrt man in den letzten Tagen vor Solende die Richtung um, so daß garantiert kein Frischwasser in den Kavernenhals gelangen kann. Im Anschluß daran werden die beiden Solstränge ausgebaut und die Hohlraumendvermessung sowie eine Kalibermessung im Kavernenhals durchgeführt.

12.2. Abdrücken der Kaverne

Beim Abdrücken der offenen Kaverne wirken wesentlich mehr und intensivere Störgrößen als bei der Dichtheitsprüfung der Kavernenbohrung. Die negativen Einflüsse auf das Meßergebnis haben sich durch das riesige Volumen gegenüber dem zulässigen Volumenverlust bei der Dichtheitsprüfung vervielfacht.

Die Konvergenz der Kaverne wirkt etwaigen Leckverlusten entgegen. Temperatureinflüsse - Erwärmung der Sole in der Kaverne auf die Gebirgstemperatur - führen ebenfalls zu einem Ausdehnen des Volumens, wohingegen Nachsoleffekte, temperatur- und konzentrationsabhängig, eine Volumenvergrößerung bewirken. Der gleiche Effekt zeigt sich beim Abdrücken mit einem gasförmigen Prüfmedium durch die physikalische Lösung des Gases in der Sole am Kontakt. Der am Sondenkopf abzulesende Druckabfall bzw. das erforderliche Nachpumpen von Gas würde eine Leckstelle vortäuschen.

Beim Abdrücken der gesamten Kaverne müssen zwangsläufig andere Dichtheitskriterien gefunden werden als beim Abdrücken der Kavernenbohrung.

Geht man davon aus, daß das Salzgebirge absolut dicht ist und damit automatisch auch die Kaverne, können Undichtheiten nur an der Rohrtour und am zementierten Ringraum auftreten. Die Wahrscheinlichkeit ist jedoch gering, daß ein zuvor als dicht ausgewiesenes System während des Solens undicht wird.

Es erhebt sich die Frage, inwieweit angesichts der vielen Störfaktoren beim Abdrücken der Kaverne sowie des technologischen Aufwandes eine Dichtheitsprüfung nach Solende überhaupt noch zweckmäßig ist.

12.3. Bilanzmethode

Die Bilanzmethode beruht auf der volumetrischen Messung eines bis an die Kavernenoberkante eingepumpten Prüfmediums (gasförmig oder flüssig), der Druckbeaufschlagung über einen gewissen Zeitraum und der Volumenbestimmung nach der Wiederausspeisung. Aus dem Vergleich des eingebrachten und wieder ausgespeisten Volumens kann unter Berücksichtigung des Meßfehlers und anderer Störfaktoren (p- und t-Bedingungen, Benetzungsverluste) auf die Dichtheit der Kaverne geschlossen werden. Diese Methode ist relativ aufwendig und mit großen Fehlern behaftet.

12.4. Niveaumethode

12.4.1. Niveaumethode bei Isolierung der Kaverne

Zur Ausschaltung der unter Abschnitt 12.2. genannten Störfaktoren kann man die Kaverne durch Setzen eines Stopfens und einer Zementbrücke im Kavernenhals isolieren. An einer kaliberhaltigen Stelle im Kavernenhals wird ein Stopfen (Quellstopfen mit Kies verkeilt, Gummistopfen) gesetzt, der verhindert, daß der Zement in die Kaverne fließt.

Ist Öl oder Diesel als Sperrmedium verwendet worden, muß zur einwandfreien Bindung des Zementes am Gebirge der Kavernenhals unterschritten und damit der Ölfilm entfernt werden.

Nach der Zementerhärtung und dem Abtasten des Zementkopfes kann die Dichtheitsprüfung durch Druckbeaufschlagung mit Speichergut oder Sole über die gesamte Rohrtour und bei gasförmigen Speicher- und Prüfmedien durch Druckbeaufschlagung des abgepackten Raumes unterhalb des Rohrschuhs gemäß Abschnitt 4.4.2. durchgeführt werden. Stopfen und Zementbrücke müssen nach erfolgreicher Dichtheitskontrolle aufgebohrt werden.

12.4.2. Niveaumethode bei offener Kaverne

Das zuvor beschriebene Abdruckverfahren stellt an die Kaverne bestimmte Voraussetzungen, wie einen ausreichend langen und kaliberhaltigen Kavernenhals und die Unbedenklichkeit des Bohrens in der Produktionsrohrtour, welche nicht immer gegeben sind. Eine Oberprüfung einer Kaverne mit kurzem Kavernenhals (50 m) muß ohne Isolierung unter dem Rohrschuh der Produktionsrohrtour erfolgen.

12.4.2.1. Niveaumethode bei offener Kaverne mit flüssigem Abdruckmedium

Zur Überprüfung einer Kaverne mit einem flüssigen Prüfmedium, das dem verwendeten Sperrmedium entspricht (Öl, Diesel), sind folgende Arbeitsgänge notwendig:

- Kalibermessung im Kavernenhals
- Einbringen des Prüfmediums bis an die Unterkante des Kavernenhalses
- Einpumpen von radioaktiven Kugeln, die am Kontakt zur Sole schwimmen
- Druckbeaufschlagung des Solesteigraumes bis zum festgelegten Prüfdruck
- Einmessen des Sole-Prüfmedium-Kontaktes mittels Gammasonde über einen Lubrikator (Genauigkeit ± 5 cm)
- tägliche Kontrolle des Druckverhaltens

Es werden der Kopfdruck, die Druckdifferenz auflaufend, die erforderliche Sole-Nachpumpmenge bzw. -Ablasmenge zur Erreichung der Druckkonstanz täglich registriert und graphisch aufgetragen (s. Bild 6).

Bei einem dichten System ist über 10 bis 14 Tage ein Druckabfall, anschließend eine Konstanz und eine Druckerhöhung infolge der Temperatur- und Konvergenzerscheinungen in der Kaverne zu beobachten. Zum Abschluß der Dichtheitsprüfung erfolgt eine erneute Spiegeleinmessung. Die Konstanz des Spiegels ist das Kriterium für die Dichtheit der Kaverne.

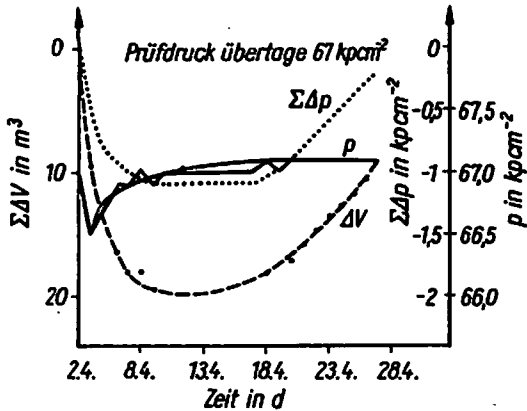


Bild 6
Prinzipische Kurvenverläufe beim Abdrücken einer dichten Kaverne mit Sohle

Die Ergebnisse der Dichtheitsprüfung nach der Niveaumethode bei offener Kaverne bedürfen der fachgerechten Interpretation, da die Besonderheiten der Kaverne (Volumen, Teufe, Stillstandszeit u. a.) das Abdrückergebnis beeinflussen. Aus diesem Grund können auch keine allgemein gültigen präzisen Dichtheitskriterien bei der Methode formuliert werden.

12.4.2.2. Niveaumethode bei offener Kaverne mit gasförmigem Abdrückmedium

Nach Installation der zum Betreiben notwendigen Solesteigleitung wird der Ringraum Solesteigleitung/Produktionsrohrtour solange mit Druckluft beaufschlagt, bis der Kontakt Luft - Sole sich unterhalb des Rohrschuhs der Produktionsrohrtour befindet und dort mittels NG-Messung nachgewiesen wird. Während des Prüfzeitraumes werden die Druckschwankungen am Sondenkopf mittels Feinmeß- und Differenzdruckmanometer schreibend registriert sowie der Anstieg oder Abfall des Sole-Luft-Spiegels im Ringraum mit der NG-Sonde aufgezeichnet. Mit der Messung zweier Zustandsgrößen - Druck und Volumen - werden bei Kenntnis der Temperatur die während des Prüfzeitraumes wirkenden Einflüsse auf die Luftmenge eliminiert. Mit der Veränderung einer Zustandsgröße (Volumen) geht eine dem allgemeinen Gesetz der Zustandsänderungen für Gase folgende Veränderung der zweiten Größe (Druck) einher.

Tabelle zu Bild 6

Tag (1974)	Druck in kp m ⁻²	Δp in kp cm ⁻²	$\Sigma \Delta p$ in kp cm ⁻²	ΔV in m ³	$\Sigma \Delta V$ in m ³
2.4.	67,0	-	-	-	-
3.4.	66,5	-0,5	-0,5	-9,4	-9,4
4.4.	66,7	-0,3	-0,8	-4,3	-13,7
5.4.	66,9	-0,1	-0,9	-2,7	-16,4
6.4.	66,9	-0,1	-1,0	-1,7	-18,1
7.4.	67,0	-	-1,0	-	-18,1
8.4.	66,9	-0,1	-1,1	-1,4	-19,5
9.4.	67,0	0	-1,1	0	-19,5
10.4.	67,0	0	-1,1	0	-19,5
11.4.	67,0	0	-1,1	0	-19,5
12.4.	67,0	0	-1,1	0	-19,5
13.4.	67,0	0	-1,1	0	-19,5
14.4.	67,0	0	-1,1	0	-19,5
15.4.	67,0	0	-1,1	0	-19,5
16.4.	67,0	0	-1,1	0	-19,5
17.4.	67,0	0	-1,1	0	-19,5
18.4.	67,1	+0,1	-1,0	+1,4	-18,1
19.4.	67,0	0	-1,0	0	-18,1
20.4.	67,1	+0,1	-0,9	+1,0	-17,1
21.4.	67,1	+0,1	-0,8	+1,3	-15,8
22.4.	67,1	+0,1	-0,7	+1,1	-14,7
23.4.	67,1	+0,1	-0,6	+1,2	-13,5
24.4.	67,1	+0,1	-0,5	+0,9	-12,6
25.4.	67,1	+0,1	-0,4	+0,9	-11,7
26.4.	67,1	+0,1	-0,3	+1,2	-10,5
27.4.	67,1	+0,1	-0,2	+1,0	- 9,5

Δp - Druckabfall
 + Druckanstieg
 ΔV - Nachpumpmenge
 + Ablassmenge

} zur Konstanthaltung des Druckes

Die Masse der eingebrachten Luft bleibt dabei konstant und verändert sich nur bei Undichtheiten der Rohrtour oder des zementierten Ringraumes und durch Inlösungen in die Sole.

Letzteres ist rechnerisch bestimmbar und von unbedeutendem Einfluß.

Aus dem Vergleich der Anfangs- und Endwerte der p- und V-Messung ist die Größe der Leckverluste zu bestimmen.

Die Dichtheitsprüfung erfolgt nach einer Beruhigungs- und Temperatenausgleichszeit (zweimaliges Einmessen des Kontaktes) sowie nach der Dichtheitskontrolle der obertägigen Aus-

rüstung mit dem Lecksuchgerät (Einbringen von Fridonagas) über einen Zeitraum von mehreren Tagen.

Der Prüfdruck muß dem späteren Betriebsdruck entsprechen bzw. kann unter Beachtung des zulässigen Druckgradienten vom Salz am Rohrschuh, der zementierten Produktionsrohrtour höher gewählt werden.

Bezüglich der Festlegung eines zulässigen Volumenverlustes gilt das im Abschnitt 12.4.2.1. Gesagte.

Bei erwiesener Undichtheit der Kaverne folgen Arbeiten zur Lokalisierung des Lecks und anschließend komplizierte Behubarbeiten zur Abdichtung, die im Prinzip den im Abschnitt 4.4.5. beschriebenen gleichen, wobei die Kaverne zuvor durch eine Zementbrücke oder einen Packer zu isolieren ist.

13. Uminstallation zum Speicherbetrieb

13.1. Kavernen für Flüssigprodukte

Für den Speicherbetrieb werden Flüssigkeitskavernen nicht mit einer Schutzrohrtour versehen, da die auftretenden Druckschwankungen gering sind und für die Dichtheit des Zementmantels keine Gefährdung darstellen.

Die Installation zum Speicherbetrieb beschränkt sich hierbei auf das Einbringen und Abfangen im Kolonnenkopf eines Förderstranges, der bis zu 2 bis 4 m über den Kavernensumpf reicht. Die Ein- und Ausspeisung des Speicherproduktes erfolgt im Ringraum Produktionsrohrtour/Förderstrang, die Soleein- und -ausspeisung über den Steigraum des Förderstranges

Für die mitunter vom Betreiber geforderten hohen Ausspeiseraten wird als Produktionsrohrtour eine 11 3/4" bis 13 3/4"- und als Soleförderstrang eine 6 5/8" bis 8 5/8"-Rohrtour benötigt, damit die zulässige Aufstiegs geschwindigkeit bzw. die hydraulischen Druckverluste eingehalten werden.

13.2. Kavernen zur Gasspeicherung

Beim Betrieb von Gaskavernenspeichern treten Druckschwankungen bei der Einspeisung und Abförderung im Bereich von 10 bis 150 kp cm^{-2} (je nach Teufenlage) auf, die voll auf die zementierte Produktionsrohrtour wirken. Eine Anzahl von Gaskavernen wird gefahren, ohne daß die Produktionsrohrtour vor diesen Druckbeanspruchungen geschützt wird. Für eine lange Funktionsfähigkeit der Gaskavernen (man geht allgemein von einer Lebensdauer bis zu 30 Jahren aus) ist es jedoch von Vorteil, wenn die Produktionsrohrtour durch eine weitere, die Schutzrohrtour, isoliert wird.

Zwar bedeutet die Installation einer Schutzrohrtour eine Verringerung des Förderquerschnittes, die jedoch bezüglich der Realisierung einer hohen Förderrate beim Ausspeisen (Abdecken des Spitzenbedarfs über kurze Zeiträume) keinen großen Nachteil mit sich bringt.

Der wirksame Korrosionsschutz der Produktionsrohrtour durch Einbringen einer Ringraumschutzflüssigkeit und die Möglichkeit des Auswechslens der Schutzrohrtour sind weitere Vorteile, die das komplizierte - bereits beschriebene - Verfahren des Einbaus mit Teilzementation gerechtfertigt erscheinen lassen. Die Prüfung auf Dichtheit des zementierten Teilringraumes erfolgt wiederum durch Abpackerung, Leerliften, Druckbeaufschlagung mit Luft und Messung des Druckabfalls in der gleichen Technologie wie beim Überprüfen des Ringraumes der zementierten Produktionsrohrtour mit Luft.

Ober die Notwendigkeit des Einbaus einer Schutzrohrtour und deren Absetztechnologie (Packer oder Teilzementation) muß bereits bei der Festlegung der Bohrlochkonstruktion der Kavernenbohrung Klarheit bestehen, da für die Teilzementation die erforderliche Bohrlochstrecke eingeplant werden muß. Steht nach Beendigung der Solararbeiten diese Strecke nicht mehr zur Verfügung (Kaverne zu hoch gesolt oder Auskesselungen im Kavernenhals durch Nichteinhalten der Soltechnologie), muß die Schutzrohrtour mittels Packer im Pohrschuhbereich der Produktionsrohrtour abgesetzt werden. Die Folge wäre, daß der Speicher nicht mit dem geplanten Betriebsdruck gefahren wer-

den kann, was wiederum eine Verminderung der Speicherkapazität bedeutet.

Das soll zahlenmäßig an einem Beispiel erläutert werden:

geplant sind:

- Rohrschuh-Produktionsrohrtour 700 m, zementiert von 700 bis 0 m
- Rohrschuh-Schutzrohrtour 800 m, zementiert von 800 bis 700 m
- zulässiger Druckgradient des Salzes am Rohrschuh der Produktionsrohrtour: $1,8 \text{ kp cm}^{-2} \cdot 10 \text{ m}$, daraus ergibt sich ein maximaler Druck am Rohrschuh beim Speicherbetrieb von

$$P_{Rs.} = 800 \cdot 1,8 \cdot 0,1 = 144 \text{ kp cm}^{-2}$$

Bei einem Nutzvolumen von $150\,000 \text{ m}^3$ ergibt das eine Speicherkapazität ohne Berücksichtigung des Realgasfaktors von $150\,000 \text{ m}^3 \cdot 144 \text{ kp cm}^{-2} = 21,6 \text{ Mio m}^3 \text{ (N)}$.

Können nun aus technologischen Gründen der Einbau und die Zementation der Schutzrohrtour von 700 bis 800 m nicht realisiert werden, muß diese im Rohrschuhbereich der Produktionsrohrtour mittels Packer installiert werden. Dann ergeben sich folgende Verhältnisse:

- maximaler Druck am Rohrschuh

$$P_{Rs.} = 700 \cdot 1,8 \cdot 0,1 = 126 \text{ kp cm}^{-2}$$

- Speicherkapazität

$$150\,000 \text{ m}^3 \cdot 126 \text{ kp cm}^{-2} = 18,9 \text{ Mio m}^3 \text{ (N)}$$

Es ist also ein effektiver Verlust an Speichervolumen von $2,7 \text{ Mio m}^3 \text{ (N)}$ oder 12,5% zu verzeichnen.

Will man diesen ausgleichen, kann das a) durch Erhöhung des Betriebsdruckes (begrenzt durch den zulässigen Druckgradienten des Salzes) oder b) durch Vergrößerung des Kavernenvolumens auf $171\,000 \text{ m}^3$, soweit es die gebirgsmechanischen Verhältnisse zulassen, erfolgen. Das wiederum hat eine Verlängerung der Solzeit und Terminverschiebung der Nachfolgearbeiten zur Folge. Die o. g. Fakten unterstreichen die Notwen-

digkeit einer verantwortungsvollen Planung des komplexen Bohr-, Sol- und Uminstallationsprozesses, da technologische Fehler in der ersten Etappe große Auswirkungen auf die folgenden Etappen haben.

Nach abgeschlossener Dichtheitsprüfung der Schutzrohrtour erfolgt der Einbau eines Entleerungsstranges bis zu 2 bis 4 m über dem Kavernensumpf.

13.3. Kavernen zur Äthylenspeicherung

Zum Betreiben einer Äthylenkaverne sind drei Stränge erforderlich (z. B. 8 5/8", 6 5/8", 2,5"), die teleskopartig frei ineinander gehängt sind und im Sondenkopf, gegeneinander abgedichtet, abgefangen werden.

Die Einspeisung und Ausspeisung des Äthylens erfolgt im äußersten Ringraum (Produktionsrohrtour - 8 5/8"), der nächst folgende wird mit Dünnssole gefüllt (8 5/8" - 6 5/8") und dient der Isolierung sowie der Druckkontrolle. Der dritte Ringraum (6 5/8" - 2,5") dient der Ein- bzw. Ausspeisung der Treibsole beim Speicherbetrieb, während der Steigraum 2,5" für die Süßwasserzudosierung bei eventuellen Auskristallisationen im Soleförderringraum vorgesehen ist.

Die Installation ließe sich vereinfachen, wenn auf den dünnssolegefüllten Sicherheitsringraum 8 5/8" - 6 5/8" verzichtet und das Überfahren des Rohrschuhs der 8 5/8"-Rohrtour bei der Äthyleneinspeisung durch andere geeignete Maßnahmen verhindert wird (Einbau von Äthylendetektoren in den Solestrom, genaue Kenntnis der Kavernenkennlinie).

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 (CO_2 , H_2S , 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-

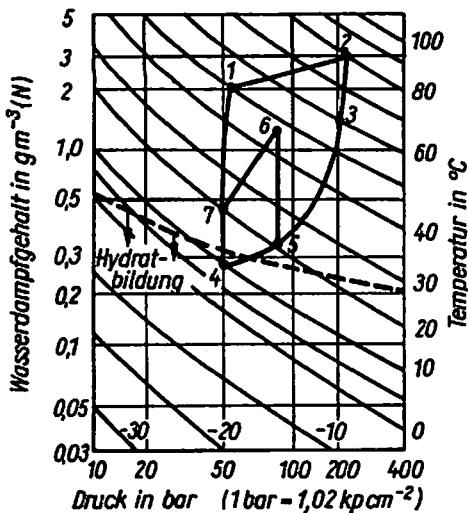


Bild 7
Wasserdampfgehalt des Gases in Abhängigkeit von Druck und Temperatur (Prinzipische) /20/
1 → 2 Gaseinspeisung
2 → 3 Stillstand
3 → 4 Gasentnahme
4 → 1 Stillstand
5 → 6 Stillstand
6 → 7 Gasentnahme nach Erwärmung

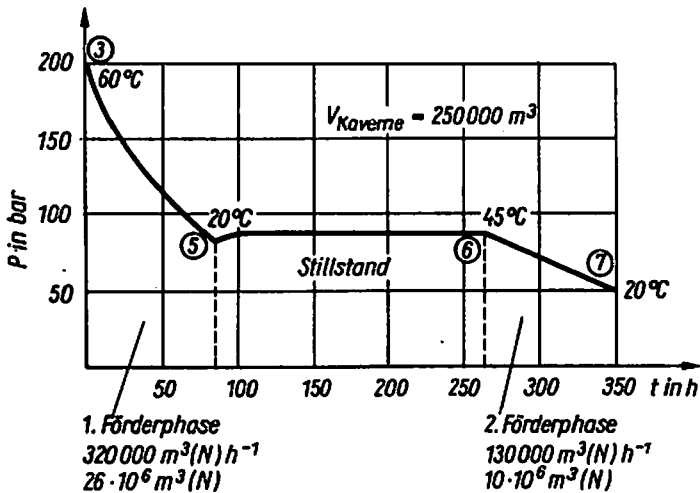


Bild 8
Druckverlauf in der Gaskaverne in zwei Förderphasen /20/

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⁻².
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 m besteht demnach während des Einspeisens ein statischer Druck von 40 bis 60 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 m³ 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 m^3 , 595 m^3 und 1222 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- 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 m s^{-1} und Druckstößen auf den Sondenkopf von 50 bis 100 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 m³. 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 m³ h⁻¹ etwa 35 000 bis 40 000 m³ (N) h⁻¹ 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.

16. Spezielle Probleme der Äthylenspeicherung

16.1. Stoffwerte des Äthylens

Äthylen ist ein Kohlenwasserstoff mit einer Zweifachbindung, (chemische Formel: C_2H_4) und ist unter Normalbedingungen ein Gas. Die relative Dichte bezogen auf Luft beträgt 0,97, es ist also leichter als diese. Die absolute Dichte beträgt $d_{\lambda} = 287,58 \text{ kg m}^{-3}$.

Kritischer Druck:	51,7 kp cm^{-2}
Kritische Temperatur:	9,8 °C
Siedepunkt:	104,0 °C
Zündtemperatur:	425,0 °C
Explosionsgrenzen:	2,7 bis 34 Vol.-%
Explosionsklasse:	EK 2 (TGL 14-275)
Zündgruppe:	G 2 (TGL 14-275)
Zündwilligkeitsgruppe	IV (TGL 19491/6)

Unter Kavernenbedingungen ist Äthylen eine überkritische, kompressible Flüssigkeit.

Als Ausgangsprodukt für die chemische Industrie bestehen an das Äthylen hohe Reinheitsanforderungen (99,9 Vol.-%).

Zulässige Fremdbestandteile:

Propylen	50 Vol.-ppm
CO ₂	10 Vol.-ppm
CO	10 Vol.-ppm
O ₂	5 Vol.-ppm
NH ₃	10 Vol.-ppm
H ₂	10 Vol.-ppm
CH ₄ , C ₂ H ₆	1000 Vol.-ppm
H ₂ O	2000 Gew.-ppm
S	1 Gew.-ppm

Diese Qualitätsparameter müssen sowohl bei der Herstellung als auch bei der Lagerung eingehalten werden. Daraus ergeben sich an die Herstellung und Vorbereitung der Kaverne zum Speicherbetrieb einige besondere Voraussetzungen; so muß die Kaverne zur Äthylenspeicherung unter Verwendung eines Sperrmediums gesolt werden, das keine Verunreinigungen der Kavernenwandung hervorruft (Methan, Propan, Äthylen, Luft, Stickstoff). An die Wasserqualität werden ebenfalls hohe Anforderungen gestellt. Am besten würde sich Trinkwasserqualität eignen, womit sekundäre Verunreinigungen ausgeschlossen wären.

Die sich in der Kaverne befindende Sole muß vor und dann auch während des Speicherbetriebes, sofern ein gasförmiges Sperrmedium angewandt worden war, degasiert und bei Bedarf bakterizid behandelt und vor der Erstbefüllung mit Äthylen gespült werden.

16.2. Degasierung der Sole

Sofern bei den Solarbeiten ein gasförmiges Sperrmedium zum Einsatz kam, ist zum Solende die Kaverne mit voll gasgesättigter Sole gefüllt. Bei der Befüllung der Kaverne mit Äthylen würde sich das entlösende Gas mit dem Äthylen vermischen;

die Reinheitsforderungen wären von vornherein nicht erfüllbar. Aus diesem Grund muß die Sole der Kaverne entgast werden. Ein Degasierungseffekt wird erreicht, wenn der Solespiegel in der Kavernensonde abgesenkt wird. Anschließend wird die Sole in einem geschlossenen Kreislauf solange über eine Degasierungsanlage gefahren, bis die zulässigen Grenzwerte erreicht worden sind. Restmengen an fremden gasförmigen Bestandteilen in der Sole werden bei der Erstbefüllung = Spülen der Kaverne mit Äthylen aus der Sole entfernt. Die ausgespeiste Äthylenmenge entspricht dann nicht mehr den bestehenden Qualitätsanforderungen und muß abgefackelt oder zum Spülen einer benachbarten Äthylenkaverne verwendet werden. Die Degasierungsanlage arbeitet nach dem Prinzip eines Separators; der Unterdruck wird mit einer Vakuumpumpe erzeugt.

Auch beim späteren Speicherbetrieb muß die in die Kaverne einzupumpende Sole zuvor über eine Degasierungsanlage gefahren werden, da sie im Solestapelbecken wieder Kontakt mit der Luft hatte und O_2 und N_2 sich in ihr physikalisch lösen konnten. Beim Einspeisen von Äthylen wird die aus der Kaverne austretende Sole vor dem Lagern im Solestapelbecken ebenfalls durch die Degasierungsanlage geschickt, um sie von gelöstem Äthylen zu befreien.

16.3. Bakterizide Behandlung der Sole

Die Sicherung der Äthylenqualität erfordert absolut sterile Kavernen. Aus der Tatsache heraus, daß es Bakterien gibt, die sich mit Äthylen als einziger Energiequelle entwickeln können, ergibt sich die Notwendigkeit einer Behandlung der Sole und Treibsole mit bakterientötenden Chemikalien.

Die in der Kaverne befindliche Sole und der Kavernensumpf enthalten ein Keimgemisch von desulfurizierenden, kohlenwasserstoffoxydierenden und methanbildenden Bakterien, von denen die Desulfurizierer durch ihre H_2S -Bildung unter anaeroben (unter Sauerstoffabschluß) Bedingungen und Anwesenheit von Äthylen die Hauptgefährdung darstellen.

Als bakterientötende Mittel kommen Gemische organischer Metallverbindungen unterschiedlicher Konzentration, die in einem bestimmten Verhältnis mit Wasser verdünnt und der Sole zugegeben werden, zum Einsatz.

An das Bakterizid werden folgende Anforderungen gestellt:

- hohe bakterientötende Wirkung bei geringer Konzentration
- Langzeitwirkung
- gute Vermischbarkeit mit der Sole, keine Ausfällungen
- gute Verträglichkeit mit dem Speichermedium
- geringe Kosten
- unkomplizierte, sicherheitstechnisch einfache Handhabung

Labor- und Feldversuche haben Ergebnisse gebracht, die sich wie folgt zusammenfassen lassen: Die Empfindlichkeit der Bakterien steigt mit erhöhtem Salzgehalt der Sole. Das erklärt, warum eine bakterizide Behandlung erst im letzten Solstadium bzw. nach Solende und erfolgter Aufkonzentration sinnvoll ist. Die bakteriostatische (d. h. weitere Entwicklung der Bakterien hemmende) Wirkung tritt je nach Bakterizidtyp schon bei niedrigen Konzentrationen und die bakterizide Wirksamkeit (bakterientötende) in Abhängigkeit von der Einwirkdauer bei entsprechend höherer Konzentration ein. Sicherheitstechnisch sind beim Umgang mit Bakteriziden wegen der Gefährdung der Schleimhäute, der Augen und der Haut Gummihandschuhe, Schutzbrille und Kopfbedeckung zu tragen, für Belüftung und Entlüftung zu sorgen sowie die Nahrungsaufnahme in deren Nähe zu unterlassen.

17. Korrosionsschutz beim Speicherbetrieb

17.1. Katodenschutz für die Produktionsrohrtour

Die zementierte Produktionsrohrtour von Kavernen ist der neuralgische Punkt aller Installationen des Speichers, da sie bei Beschädigung nicht ausgewechselt werden kann. Sie ist wie alle unterirdisch verlegten Stahlrohrleitungen vollkommen ungeschützt der elektrochemischen Korrosion ausgesetzt.

Eine Möglichkeit, örtliche Elementbildung und geologische Potentialunterschiede zu verhindern, ist die Anwendung des Schutzstromverfahrens. Stahl korrodiert nicht, wenn er zum umgebenden Medium ein Potential von $< - 0,85$ V besitzt. Dieses negative Potential erhält man durch die Verbindung der Rohrleitungen mit dem Minuspol eines Gleichstromgenerators (Gleichrichters), wobei der Pluspol an eine in ausreichender Entfernung in die Erde versenkte Opferanode angeschlossen ist. Schwierigkeiten bestehen bei der Bestimmung des Erdpotentials an der Rohraußenseite über die gesamte Teufe. Die notwendige Stromstärke kann theoretisch errechnet oder experimentell ermittelt werden. Sie ist vom petrographischen Bau des Untergrundes und der Intensität von Fremdströmen abhängig und bewegt sich größenordnungsmäßig zwischen 15 und 40 A. Die Wirksamkeit des Katodenschutzes sinkt mit zunehmender Teufe und verliert bei etwa 1500 m ihre praktische Bedeutung.

17.2. Korrosionsschutz der Soleabstoßleitung

Sole ist gegenüber Stahl ein aggressives Medium, deshalb sind bei langlebigen Installationen im Kavernenfeld die Soleleitungen innen zu schützen. Das kann durch eine Zementauskleidung oder durch Bitumenanstrich erfolgen. An den geschweißten Naht- und Verbindungsstellen einen ausreichenden Schutz zu gewähren, ist schwierig. Einfacher und wirksamer ist der Korrosionsschutz durch Zugabe von Inhibitoren. Kontinuierliche Zudosierung von Phosphatverbindungen bewirkt eine Ablagerung an der Rohrwand. Messungen am Kavernenfeld Manosque haben nachgewiesen, daß der Wanddickenverlust durch Korrosion nur $60 \mu\text{m a}^{-1}$ beträgt. Die Außenkorrosion der Leitungen wird durch Wanddickenschläge, die lt. TGL zu bestimmen sind, berücksichtigt. Außerdem sind alle erdverlegten Leitungen in das Katodenschutzsystem einzubeziehen.

Literaturverzeichnis

- /1/ AUFRICHT u. a.: Salt characteristics as they affect storage of hydrocarbons. Journal of Petroleum Technology, 8/61, Übersetzung UGS Mittenwalde
- /2/ Gas stored in salt-dome caverns. Oil and Gas Journal 7/71, S. 67-70, Übersetzung UGS Mittenwalde
- /3/ RISCHMOLLER: Salzkavernen zur Speicherung von Rohöl in der BRD. Erdöl-Erdgas-Zeitschrift 7/72, S. 240-248
- /4/ MEISTER, KÖHR: Spezifische Planungsprobleme bei der Herstellung von Salzkavernenspeichern. Erdöl-Erdgas-Zeitschrift 7/72, S. 248-257
- /5/ DREYER: Gebirgsmechanische Probleme bei der Tiefspeicherung von Rohöl. Erdöl-Erdgas-Zeitschrift 7/72, S. 258-267
- /6/ Untergrundspeicherung von Gas, Tagung vom 11. 10. 65, Haus der Technik Essen: DIEKMANN: Speicherung in Aquiferen, KÖHNE: Herstellung und Betrieb von Kavernenspeichern
- /7/ Berechnung der Vergrößerung des Kavernenvolumens beim Nachsolen während des Betriebes mit ungesättigter Sole oder Süßwasser, VNIIPROMGAZ Allunionsinstitut für Gasanwendung in der Volkswirtschaft, für untertägige Erdöl-, Erdölprodukten- und Flüssiggasspeicherung, unveröffentlicht
- /8/ DREYER: Geomechanische Untersuchungen an Kavernen im Steinsalz und Schlußfolgerungen für die unterirdische Gasspeicherung. Bergakademie, 21. Jg. 7/69, S. 404 bis 412
- /9/ KAZEMI u. a.: Mechanism of flow and controlled dissolution of salt insolution mining. Soc. of Petroleum Engineers, J. 4 Nr. 4 Dez. 64, Übersetzung UGS Mittenwalde
- /10/ LANGER: Ingenieurgeologische Probleme bei der Speicherung von Öl und Gas, Geol. Jb. 90, 1972, S. 315-358

- /11/ RÖHR: Über die beim Ausspülen eines UGS in einem Salzstock wirksamen Einflußgrößen im Hinblick auf die Gewinnung von Planungs- und Überwachungsunterlagen. Erdöl und Kohle, 22 /1969, S. 734-741
- /12/ KÖHNE: Untergrund-Flüssiggasspeicher in Salulagerstätten. Erdöl und Kohle, März 1965, S. 169-173
- /13/ RÖDDIGER: Eigenschaften und Eignung des Rotliegendhaselgebirges zur Anlage unterirdischer Speicherkavernen und deren volumetrische Vermessung. Erdöl und Kohle, Januar 1965, S. 6-10
- /14/ BRÖNING: Wirtschaftliche Gesichtspunkte bei der Errichtung von unterirdischen Gasspeichern. Erdöl und Kohle, Mai 1967, S. 370-373
- /15/ RÖHL: Unterirdische Großraumlagerung von gasförmigen und flüssigen Kohlenwasserstoffen. Erdöl und Kohle, Mai 1971, S. 8-14
- /16/ HAUDAN: Die Bedeutung der Vertikalität des Bohrloches beim Steinsalz-kavernenbau. Erdöl-Erdgas-Zeitschrift Januar 1974, S. 26-29
- /17/ FEDOROV: Formbildung von Kavernen bei gasförmigen Sperrmedien. Gazovaja promyšlennost 1967, S. 8-14
- /18/ WOCKENFUSS: Planung und Bau von Kavernen im Salz. Erdöl-Erdgas-Zeitschrift 3/1973, S. 92-98
- /19/ DE GRISOGONO: Cement Job for Cavern Storage of High Pressure. Erdöl-Erdgas-Zeitschrift 4/1973, S. 132-136
- /20/ HADDENHORST u. a.: Hochdruckerdgas-Speicherung in Salz-kavernen. I. Teil Erdöl-Erdgas-Zeitschrift 5/1974, S. 154-161
- /21/ dito II. Teil Erdöl-Erdgas-Zeitschrift 6/1974, S. 197 bis 204
- /22/ LECHLER: Kavernenspeicher-Lesum - Erfahrungen beim Bau und Betrieb. Erdöl-Erdgas-Zeitschrift 3/1974, S. 80 bis 87
- /23/ DE GRISOGONO: Einige Gesichtspunkte zur Auswahl des Futterrohrstranges für Bohrungen zum Aussolen von Salz-kavernen. Nafta, Zagreb 24 (1973) 10. 0-Nr. 410/74 UGS Mittenwalde

- /24/ KÖHNE: Speicherung von Gasen und Flüssigkeiten in unterirdischen Hohlräumen. Chemie-Ing.-Techn. 17/1967, S. 1036-1040
- /25/ JESSEN: Techniques for Developing Pre-determined Shaped Cavities in Solution Mining. Erdöl und Kohle, September 1966, S. 634-638
- /26/ Kavernenprojekt Etzel, Erdöl-Erdgas-Zeitschrift Oktober 1974, S. 384-386
- /27/ HOFRICHTER: Speicherkavernen in Salzstöcken Nordwestdeutschlands - Geologische Probleme, Bemerkungen zur selektiven Auslösung von Kalisalzen. Erzmetall Bd. 27 5/1974, S. 219-226
- /28/ HIEBLINGER: Wirtschaftliche Aspekte beim Bau und Betrieb von Kavernen. Erdöl-Erdgas-Zeitschrift April 1975, S. 118-127
- /29/ WIERCZEYKO: Echo-Log - Ein geophysikalisches Meßverfahren zur Bestimmung von Form von Aussolungshohlräumen im Salzgebirge. Geophysical Prospecting. Volume XX, No 4, 1972
- /30/ GOFMAN-SACHAROV, P. M.: Proektirovanie i sooruzenie podzemnych rezervuarov nefte-gazochranilisc. Izdatelstvo 'Budivelnik', Kiev, 1973
- /31/ IVANZOV, O. M.: Chranenie szizzennykh uglevodorodnykh gazov. Izdatelstvo 'Nedra', Moskva, 1973
- /32/ DUDKO, P. M.: Podzemnoe vyscelacivanie solej. Izdatelstvo 'Nedra', Moskva, 1972
- /33/ KOLOSOV, A. V., und VOROLOV, A. G.: Akusticeskaja tehnologija sooruzenija podzemnych emkостей neftechranilisc vyscelacivaniem v soljanykh otlozenijach. VNII OENG, Moskva, 1973
- /34/ MAZUROV, V. A.: Kompleksnoe proektirovanie v otlozenijach kamennoj soli podzemnych emkостей alja chranenija nefte- i gazoproduktov. VNII OENG, Moskva, 1971

Im gleichen Verlag sind erschienen:

Elektrochemische Bodenvergütung

Bergbau - Bauwesen

Von Prof. Dr. der. techn. Wiss. G. N. Shinkin,

Prof. Dr. rer.nat. F. Reuter und Dr.-Ing. J. Waldmann

Hochschullehrbuch

132 Seiten mit 22 Bildern

Format 14,7 x 21,5 cm · Broschur 9,80 M

Bestell-Nr.: 540 996 9

In diesem Hochschullehrbuch wird erstmalig ein umfassender Überblick über die derzeitigen modernen Verfahren der elektrochemischen Bodenvergütung zur Verbesserung bindiger Lockergesteine, über den technologischen Ablauf und die ökonomische Anwendung der Verfahren im Bergbau, im Bauwesen sowie im Verkehrs- und Wasserbau gegeben.

Das Buch ist für Studierende und Praktiker der einschlägigen Fachrichtungen gleichermaßen geeignet, da einmal die theoretischen Zusammenhänge zwischen der Art, zwischen der Zusammensetzung in mineralogisch-chemischer Hinsicht sowie nach der Struktur der Lockergesteinsarten und den chemisch-physikalischen Wirkprinzipien des Vergütungsverfahrens behandelt werden. Zum anderen sind für den Praktiker die notwendigen Arbeitsschritte eindeutig aufgeführt, so daß das Buch als Leitfaden für Projektierung und Bauausführung gut zu verwenden ist.

In methodisch und sprachlich einwandfreier Form werden nach einer Einführung folgende Schwerpunkte behandelt:

Obersicht über die Untergrundverhältnisse der DDR unter dem Aspekt einer elektrochemischen Untergrundvergütung - Grundlagen der elektrochemischen Verfestigung bindiger Lockergesteine - Technologie der Verfahren sowie Auswertungen von Labor- und Feldversuchen und von praktischen Verfahren.

Zahlreiche Tabellen und Bilder erleichtern das Verstehen des Stoffes und ermöglichen es, notwendige Zusammenhänge folgerichtig und mühelos zu erfassen.

Hydrotechnik
im Bergbau und Bauwesen

Von einem Autorenkollektiv

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus Strzodka

Hochschullehrbuch

2., durchgesehene Auflage

392 Seiten mit 154 Bildern und 55 Tabellen

Format 16,5 x 23 cm · Leinen 32,- M, Auslandspreis 36,- M

Bestell-Nr.: 541 024 9

In diesem Hochschullehr- und Fachbuch wird erstmalig in der deutschsprachigen Literatur eine zusammenfassende Darlegung der Entwässerungstechnik und Entwässerungsverfahren gegeben, die für eine sorgfältige wissenschaftlich-technische Vorbereitung vorhandener Tagebaue und Tagebauneuaufschlüsse sowie für die Herstellung von Baugruben in vielen Bereichen des Bauwesens notwendig sind.

Es werden im einzelnen die Aufgaben der Hydrotechnik - Entwässerungsverfahren - Bohrverfahren und Bohrausrüstungen - Wasserhebung und Wasserableitung - Dimensionierung von Entwässerungsanlagen und der Wasserschutz ausführlich behandelt. Dabei werden bedeutende technische Weiterentwicklungen durch die Gegenüberstellung früherer Entwässerungsverfahren und -mittel mit modernen Methoden und neuester Technik verdeutlicht. Ausführlich sind auch die Wechselwirkungen und Auswirkungen der Tagebauentwässerung und Tagebauwasserhaltung auf die Landeskultur sowie auf die Land- und Forstwirtschaft dargestellt. Die sich aus der Entwässerungstechnik ergebenden aktuellen Probleme des Umweltschutzes, wie Wasseraufbereitung, Abwasserreinigung und Schlammbehandlung, beschließen das Werk.

Der umfangreiche Stoff wird unter Berücksichtigung neuester wissenschaftlicher und praktischer Erkenntnisse von einem Autorenkollektiv aus erfahrenen Hochschullehrern und Praktikern methodisch gut dargelegt. Seine Aneignung wird durch instruktives Bildmaterial und übersichtliche Tabellen unterstützt.

Das Buch ist für Studenten des Bergbaus, der Geowissenschaften, des Bauwesens und der Wasserwirtschaft sowie als Nachschlagewerk für den Fachingenieur gut geeignet.

Bestellungen nehmen alle Buchhandlungen und der
Verlag, 7031 Leipzig, Postschließfach 16, entgegen.