

# Endverwahrung von Speicherkavernen im Salzgebirge

Abandonment of Storage Caverns in Rock Salt

Von U. SCHMIDT, O. ROLFS und K. STAUDTMEISTER\*

## Abstract

Based on the description of the rock mechanical mechanisms relevant for the post operational phase of a storage cavern in rock salt mass a concept is presented for the cavern abandonment. By means of an example the pragmatical procedure for the technical realisation and the prognosis of the long term behaviour is shown. This presents the possibility for releasing the cavern operator from his responsibilities.

## Kurzfassung

Auf der Grundlage der Beschreibung der gebirgsmechanisch relevanten Mechanismen während der Nachbetriebsphase wird ein Konzept für die Außerbetriebnahme einer Speicherkaverne im Steinsalzgebirge vorgestellt. Anhand eines Beispiels wird eine pragmatische Vorgehensweise für die technische Umsetzung und die Prognose des Langzeitverhaltens aufgezeigt. Damit wird die Möglichkeit eröffnet, den Kavernenbetreiber nach Durchführung der Abschlussarbeiten aus der Bergverantwortung zu entlassen.

## Einführung

Bei untertägigen Bauten, speziell im duktilen Salzgebirge, sind bei der Außerbetriebnahme bzw. Endverwahrung andere Aspekte als bei obertägigen Anlagen zu berücksichtigen, da hier das den Hohlraum umgebende Gebirge den Baustoff darstellt. Bei obertägigen Bauten wird der Baustoff künstlich erstellt und die Eigenschaften sind bei der Herstellung steuerbar. Im Gegensatz hierzu können an das Gebirge keine Qualitätsanforderungen gestellt werden, sondern die Eigenschaften sind zu erkunden und innerhalb eines Dimensionierungskonzeptes zutreffend zu beschreiben. Speicherkavernen, die aufgrund wirtschaft-



Abb. 1 Kavernenplatz nach der Rekultivierung

licher Bedingungen oder aus anderen Gründen aus dem Betrieb genommen werden, sollten in der Nachbetriebsphase mit einem Medium befüllt werden, das kein Gefährdungspotenzial darstellt. Aufgrund der Teufenlage der meisten Speicherkavernen besteht aus gebirgsmechanischen Gründen die Notwendigkeit, einen Versatz einzubringen, der zur langfristigen Stabilisierung des Hohlraums führt. Hier bieten sich neben rolligen Schüttgütern vor allem Frischwasser oder Sole (gesättigt, untersättigt) an.

Ziel der Endverwahrung ist es, dem Kavernenbetreiber die Möglichkeit zu geben, durch geeignete Maßnahmen aus der Bergverantwortung für die endverwahrte Kaverne entlassen zu werden. Das angewendete Konzept muss zu einem Endzustand führen, der dauerhaft stabile Verhältnisse gewährleistet.

Nach § 51 des Bundesberggesetzes [1] gilt die Betriebsplanpflicht auch für die Einstellung des Betriebes. In diesem Fall ist ein Abschlussbetriebsplan nach § 53 Bundesberggesetz zu erstellen. Die in dem Abschlussbetriebsplan vorgesehenen Maßnahmen müssen sicherstellen, dass bei Beendigung der bergbaulichen Tätigkeit alle zum Schutz der Allgemeinheit gegen schädliche Auswirkungen notwendigen Maßnahmen getroffen werden und die von dem einstellenden Betrieb in Anspruch genommene Oberfläche ordnungsgemäß rekultiviert wird (Abb. 1). Damit hat die Durchführung eines Abschlussbetriebsplanes, mit dem die Endver-

wahrung beantragt wird, bedeutende rechtliche Konsequenzen, denn am Ende wird der Betreiber aus der Bergverantwortung entlassen.

Bei der technischen Ausführung von Bohrloch- bzw. Kavernenverschlüssen ist die »Richtlinie über das Verfüllen über das Verfüllen auflässiger Bohrungen« von 1998 des ehemaligen Ober-

bergamtes in Clausthal-Zellerfeld [2] zu beachten. Danach ist die Verfüllung so vorzunehmen, dass nach aller Erfahrung ein flüssigkeits- und gasdichter Abschluss erreicht wird und nachteilige Veränderungen des Grundwassers vermieden werden. In der Richtlinie sind spezielle Anforderungen an die Ausführung angegeben.

## Theoretischer Ablauf

Als Folge des viskosen Materialverhaltens von Steinsalz kommt es auch nach Verschluss der Kavernen zu Verformungen bzw. zu einer Volumenkonvergenz. Dies führt gerade im Bereich des Kavernendaches zu einem Druckanstieg in der Kaverne bis in die Größenordnung des primären Gebirgsspannungszustandes. In Abbildung 2 ist der Innendruckverlauf prinzipiell dargestellt.

Neben den Konvergenzerscheinungen haben auch die thermischen Randbedingungen einen wesentlichen Einfluss. Nach Einbringen einer evtl. relativ kühlen Sole kommt es durch das wärmere umgebende Gebirge zu einer Erwärmung der Sole und damit verbunden zu einer thermischen Ausdehnung bzw. zu einem Druckanstieg in der Kaverne. Hierbei stellt sich die Frage, ob dieser Druckanstieg

- zu einem Aufreißen der Kaverne in Form von Macro-Fracs führen kann, so dass Sole aus der Kaverne austreten kann und die Integrität der Kaverne gefährdet ist,
- zu einem Verlust an Stabilität führt durch

\* Uwe Schmidt, Olaf Rolfs, StorConsult Hannover (E-Mail: info@StorConsult.de); Kurt Staudtmeister, Institut für Unterirdisches Bauen IUB Hannover (E-Mail: staudtmeister@mbox.iub.uni-hannover.de). Vortrag, gehalten anlässlich der DGMK/ÖGEW-Frühjahrstagung 2006 am 20.–21. April 2006 in Celle.

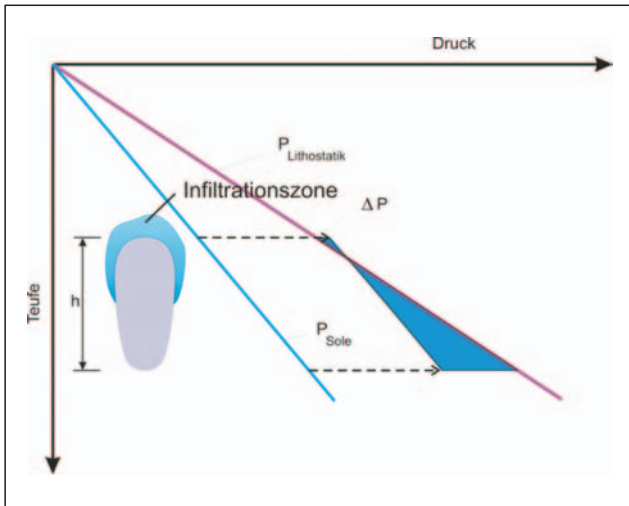


Abb. 2 Prinzipieller Druckverlauf einer endverschlossenen Kaverne

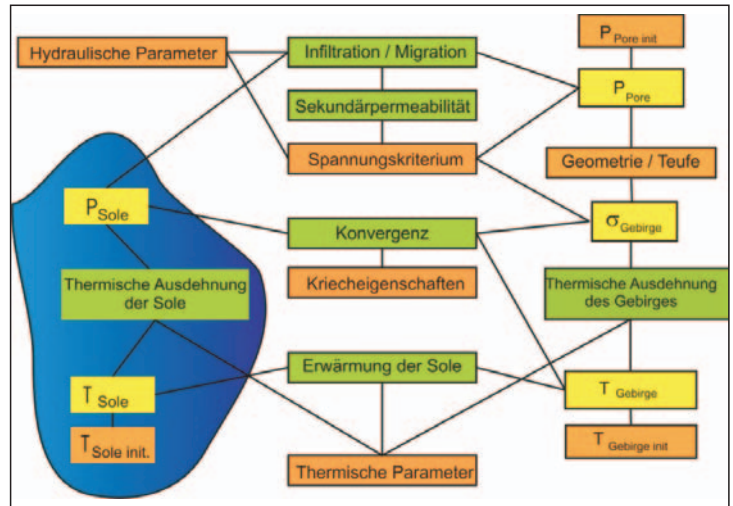


Abb. 3 Zustandsgrößen und Parameter für den Kavernenverschluss

den Kontakt von Sole mit dem ursprünglich trockenen Gebirge oder – zu einer Infiltration von Sole in das umgebende Gebirge führt, die ihre Ursache nicht in einem Aufreißen des Gebirges sondern vielmehr in der Entstehung einer sogenannten Sekundärpermeabilität, hervorgerufen durch den sich in der Sole und dem Gebirge aufbauenden Druck, hat.

Der Druckaufbaustest an der Kaverne K102 des Kavernenfeldes Etzel hat gezeigt, dass zahlreiche hydraulische und mechanische Mechanismen für die theoretische Behandlung einer Abschlusskonfiguration zu berücksichtigen sind [3] und [4]. Wie bereits erwähnt, führt das Kriechen in einem abgeschlossenen Kavernensystem zu einem Druckaufbau, der durch die thermische Expansion der Sole verstärkt wird, wenn zum Zeitpunkt des Verschließens die Soletemperatur unter der Gebirgstemperatur liegt. Abbildung 2 zeigt schematisch den Druckanstieg für einen Zeitpunkt in der Nachbetriebsphase. Ein weiterer zu berücksichtigender Mechanismus ist die Ausbildung einer erhöhten Sekundärpermeabilität, die zur Formation einer in Abbildung 2 angedeuteten Infiltrationszone führt.

Die Ergebnisse des Druckaufbaustests stehen in Einklang mit den Ergebnissen von zahlreichen Forschungsvorhaben zu diesem Thema. Übereinstimmende Aussage der verschiedenen Untersuchungsergebnisse ist, dass, vorausgesetzt der Druckaufbau in der Kaverne vollzieht sich in niedrigen Raten, nicht mit einem Aufreißen des Gebirges zu rechnen ist. Vielmehr bildet sich bei Erreichen des lithostatischen Druckes im Kavernendachbereich eine begrenzte Zone im Konturbereich der Kaverne mit einer erhöhten Permeabilität, der sog. Sekundärpermeabilität, aus. Diese sich entwickelnde Sekundärpermeabilität sorgt dafür, dass Sole aus einer als unter Betriebsbedingungen als technisch dicht anzusehenden Kaverne ins Gebirge migriert und gleichzeitig den Druckaufbau in der Kaverne vermindert. Wesentliche Faktoren, die den Druckaufbau

in einer solegefüllten und verschlossenen Kaverne beeinflussen, sind (Abb. 3):

- Gebirgskonvergenz, als Funktion von
  - Kriecheigenschaften des umgebenden Gebirges,
  - Geometrie der Kaverne,
  - Teufenlage der Kaverne,
  - Betriebsparametern (Unterschied Kaverneninnendruck / Gebirgsdruck zu Beginn der Nachbetriebsphase).
- Thermische Ausdehnung der Sole, als Funktion von
  - Temperaturunterschied Sole / umgebendes Gebirge,
  - thermischen Parametern.
- Infiltration von Sole in das Gebirge, als Funktion von
  - hydraulischen Parametern,
  - Bedingungen zur Ausbildung der Sekundärpermeabilität.

Das Kriterium für den Übergang zu einer Sekundärpermeabilität wurde aus den Ergebnissen des Etzel-Druckaufbaustests abgeleitet und durch Laborversuche innerhalb eines vom Solution Mining Research Instituts geförderten Forschungsvorhabens validiert [5]. Wie der Abbildung 4 zu entnehmen ist, wird bei Erreichen einer bestimmten Span-

nung  $\sigma_{\text{teff-ini}}$  der Bereich der Primärpermeabilität, der hier exemplarisch mit  $k_{\text{ini}} = 10^{-21} \text{ m}^2$  angenommen wurde, verlassen.  $\sigma_{\text{teff}}$  ist die effektive Tangentialspannung und ergibt sich aus der Differenz des Porendrucks und der kleinsten Normalspannung senkrecht zum Porendruckgradienten. Der zur Spannung  $\sigma_{\text{teff-ini}}$  gehörige Porendruck liegt in der Größe der betragsmäßig kleinsten Tangentialspannung bzw. etwas darunter.

Der Betrag der Primärpermeabilität ist von der lokationsspezifischen geologischen Situation und der Struktur des anstehenden Salzgesteins abhängig und kann sich deutlich unterscheiden.

Für die Entwicklung der Permeabilität im Übergangsbereich zur Sekundärpermeabilität können verschiedene Ansätze herangezogen werden. In Abbildung 4 dargestellt ist das IUB-Kriterium, das in dem Übergangsbereich eine in halblogarithmischer Auftragung lineare, d. h. exponentielle Entwicklung beschreibt. Alternativ wurden von LMS (Laboratoire de Mécanique des Solides) und Stormont Permeabilitätsveränderungsfunktionen vorgeschlagen, die in der Anwendung auf den Endverschluss von Kavernen verglichen mit dem IUB-Kriterium sehr ähnliche Berechnungsergebnisse liefern [6].

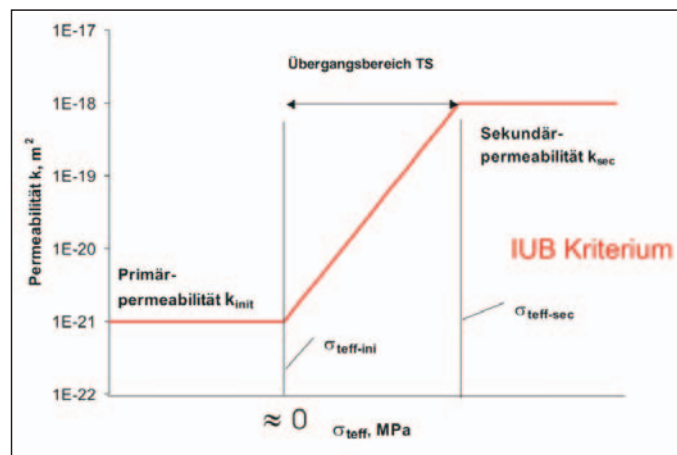


Abb. 4 Schematischer Verlauf der Änderung der Permeabilität, IUB Kriterium

Nach Durchlaufen des Übergangsbereiches TS wird eine Sekundärpermeabilität erreicht, die etwa drei Größenordnungen über der primären Permeabilität liegt. Bei der lokationsspezifischen Anwendung ist nachzuweisen, dass die effektive Tangentialspannung in einer Größenordnung bleibt, bei der keine Ausbildung eines Makrorisses zu erwarten ist.

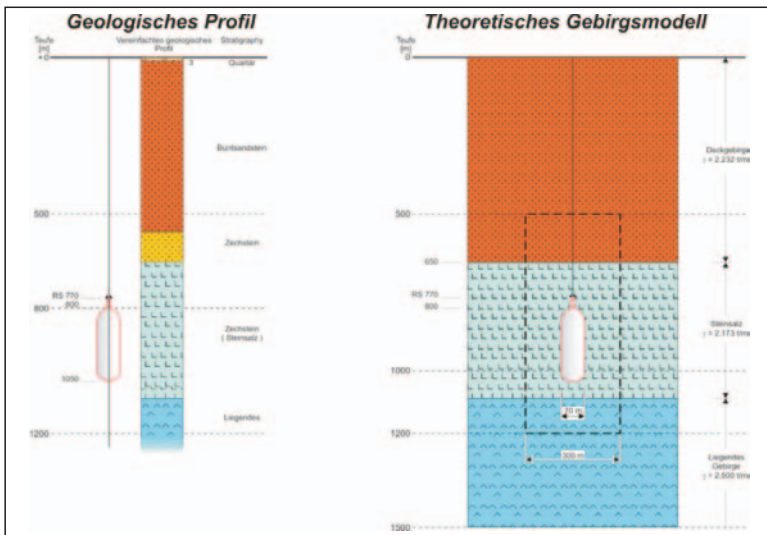


Abb. 5 Beispielkaverne

**B**asisdaten

Anhand eines konkreten Beispiels soll gezeigt werden, wie der Endverschluss einer Kaverne durchgeführt werden kann. Die hier betrachtete Kaverne liegt in einem Teufenbereich von 800 bis 1.050 m. Das geologische Modell sowie das für die theoretischen Berechnungen verwendete Gebirgsmodell sind in Abbildung 5 dargestellt. Zur Durchführung der Verschlussmaßnahmen sind die geometrischen Parameter der Kaverne als auch die Stoffparameter des umgebenden Gebirges von Bedeutung. Die exakte Kavernenform wird durch eine echometrische Vermessung ermittelt. Die Stoffparameterbestimmung aus Laborversuchen ist oftmals nicht möglich, weil aufgrund des langen Zeitraums, der zwischen Inbetriebnahme und der Außerbetriebnahme liegt, kein Bohrkernmaterial mehr zur Verfügung steht bzw. keine geeigneten Daten aus Kriechversuchen vorliegen. Um dennoch die notwendigen FEM-Berechnungen durchführen zu können, können die Parameter aus den Ergebnissen eines Ausflussmengen-tests ermittelt werden. In Abbildung 6 ist schematisch der Druckverlauf für einen derartigen Versuch dargestellt, der zwei- oder dreistufig erfolgen sollte, um die Spannungsabhängigkeit des Materialverhaltens beschreiben zu können. Beispielhaft wird vorgeschlagen, für einen Zeitraum von jeweils ca. sechs Monaten die Ausflussmengen zu messen, die sich bei einem Innendruck ergeben, der in der Nähe des maximalen Betriebsdruckes bzw. etwas darunter liegt. Hierbei liegt die deviatorische Gebirgsbeanspruchung in der Größenordnung, die auch nach dem Einbau einer Verschlusskonstruktion vorliegt. Zur genauen Ermittlung des Konvergenzanteils aus der Gebirgsverformung ist eine vorlaufende Temperatur- und Dichtemessung der Sole erforderlich. Aussagen zur Primärpermeabilität des Salzgebirges können aus durchgeführten Laborversuchen entnommen werden oder sind aus einem durchzuführenden

ebenfalls eingehende Fernfeldporendruck kann der Literatur (z. B. [7]) entnommen werden. Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse kann der Einfluss des Fernfelddruckes auf den sich einstellenden Gleichgewichtsdruck abgeschätzt werden.

**B**eispiel für die Vorgehensweise beim Endverschluss einer Gaskaverne

Bevor die Kaverne endverschlossen wird, muss die Temperaturdifferenz zwischen Sole und primärer Gebirgstemperatur so begrenzt werden, dass durch die thermische Ausdehnung der Sole während der Nachbetriebsphase die Ausbildung eines Makrorisses ausgeschlossen werden kann. Beim ersten Schritt der Endverwahrung wird der Gasdruck in der Kaverne auf einen Druck abgesenkt, der der statischen Sole säule entspricht, da der Druckaufbau in der Kaverne nach Einbringung des Verschlusses von diesem Druck ausgehen wird. Erfolgt die Befüllung mit entsprechend der Gebirgstemperatur vorgewärmtem Wasser, so braucht der Temperatureausgleich mit dem Gebirge nicht abgewartet zu werden, da kaum noch ein Temperaturunterschied besteht. Dennoch ist es notwendig, vor Einbringung des Verschlusses eine gewisse Zeit verstreichen zu lassen, um die Nachsolleffekte aus der evtl. untersättigten Sole in der Kaverne abzuwarten, da in dieser Zeit noch Wasser nachgefüllt werden muss. Untersuchungen und Berechnungen haben gezeigt, dass unter bestimmten Voraussetzungen auch bei Vorliegen einer Temperaturdifferenz zwischen der Sole

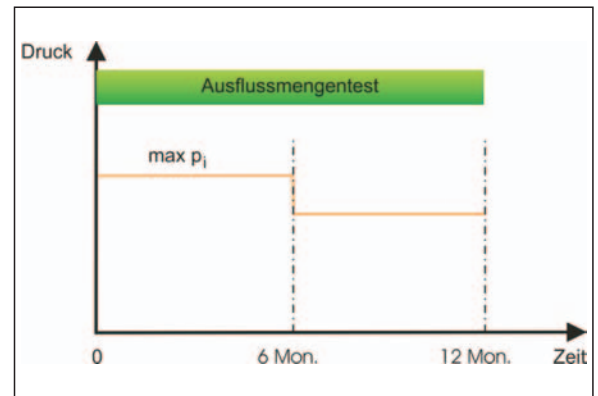


Abb. 6 In-situ-Test zur Ermittlung der Stoffparameter

In-situ-Versuch abzuleiten. Der in die Berechnungen

und dem Gebirge der Verschluss ohne große zeitliche Verzögerung eingebaut werden kann, da der aus der Erwärmung der Sole entstehende Überdruck einerseits langsam erfolgt und andererseits durch die Veränderung der Permeabilität wiederum abgebaut wird.

Nach Abschluss der Flutungsarbeiten und Einbau des Kavernenverschlusses wird sich aufgrund des beschriebenen Dichteunterschiedes zwischen Sole und Gebirge der dargestellte Druckanstieg einstellen, analog zur Druckaufbauphase des In-situ-Nachweises der Gleichgewichtsspannung (Abb. 7). Dieser Druckanstieg erfolgt bis zu einem Gleichgewichtsdruck, ab dem Sole in das Gebirge aufgrund der sich einstellenden Sekundärpermeabilität im Nahbereich der Kaverne eindringt.

Dieser Gleichgewichtsdruck wird durch numerische Berechnungen abgeschätzt. Falls erforderlich, kann auch in situ der Nachweis erbracht werden, dass nach einer aufgetragenen Druckerhöhung, bevor der Verschluss eingebaut wird, der prognostizierte Gleichgewichtsdruck sich durch eine kontinuierliche Druckabsenkung tendenziell einstellt (Abb. 7). Wurde der beschriebene Druckverlauf durch einen In-situ-Versuch bestätigt, kann nun der Verschluss der Kaverne eingebaut werden, da der Nachweis erbracht wurde, dass das verwendete Berechnungsmodell in Verbindung mit den lokationsspezifischen Parametern das Systemverhalten zutreffend beschreiben kann.

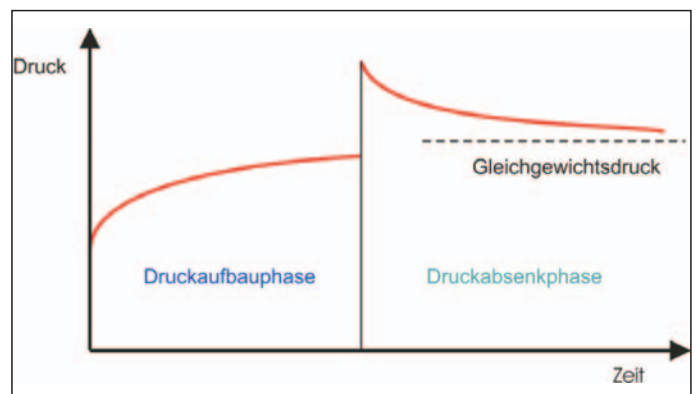


Abb. 7 In-situ-Nachweis des Gleichgewichtsdruckes



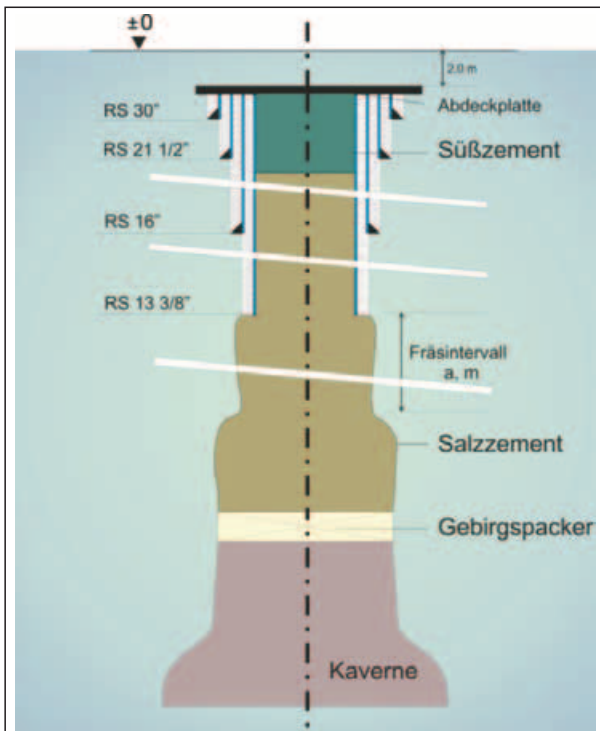


Abb. 8 Ausführungsvorschlag für eine Verschlusskonstruktion

### Ausführungsvorschlag

Die Verschlusskonstruktion ist gemäß den Richtlinien so auszuführen, dass sie dauerhaft standsicher und dicht das Bohrloch sichert. Aus diesem Grund besteht jede Verschlusskonstruktion aus mindestens zwei Teilen: einem statischen Tragelement sowie einem Dichtelement. Die hier vorgeschlagene Konstruktion stellt eine Variante aus vielen verschiedenen Möglichkeiten dar.

Zunächst wird die Kaverne mit Frischwasser oder Sole geflutet. Um die Differenztemperatur zwischen Sole und Gebirge auf einen zuvor festgelegten Wert einzustellen, besteht die Möglichkeit, allerdings unter erheblichem Einsatz von Energie, vorher eine Erwärmung durchzuführen.

Nach Abschluss der Flutung wird der Kavernekopf demontiert und die inneren Teile wie der Gasförderstrang, das Untertagesicherheitsabsperrventil sowie andere Teile aus der Bohrung ausgebaut. Danach werden der Rohrschuh inkl. Packer und ein Teil der sich oberhalb des Rohrschuhs befindenden Rohrtouren einschließlich der Zementation weggefräst. Mit dem Entfernen der Rohrtouren wird sichergestellt, dass eine kraftschlüssige Verbindung zwischen Gebirge

und eingebrachtem Zement hergestellt werden kann. Die Länge des Fräsintervalls sollte so festgelegt werden, dass eine ausreichend abdichtende Zone zu den sich darüber befindlichen Rohrtouren befindet. Damit wird sicher gestellt, dass eine Korrosion dieser Rohrtouren ausgeschlossen werden kann. Diese Barriere befindet sich außerhalb des Bereiches mit erhöhter Sekundärpermeabilität. Die Länge der Barriere, in Abbildung 8 mit a bezeichnet, ergibt sich aus einer Berechnung unter Berücksichtigung lokationspezifischer Parameter und der Eingabe eines zuvor festgelegten Zeitraums. Wesentliche lokationsabhängige Parameter sind z. B. die Teufenlage und die Höhe der Kaverne.

Auf einem innerhalb des unverrohrten Kavernenhalses gesetzten Gebirgspacker wird das Widerlager, eine Zementbrücke, die für die weitere Zementation als statisches Tragelement dient, eingebaut. Als Zement sollte ein langsam abbindender Zement, der beim Abbindevorgang eine nur geringe Hydratationswärme entwickelt, verwendet werden. Diese Zemente entwickeln Abbinde Temperaturen, die unterhalb der Gebirgstemperatur liegen und somit keine zusätzliche Wärme in das Gebirge abführen. Damit wird vermieden, dass durch den Abkühlungsvorgang nach dem Abbindeprozess Schwindrisse entstehen.

Die Zementation erfolgt in einzelnen Abschnitten. Bis zum Salzspiegel wird die Zementation unter Verwendung von Sole als Zuschlagwasser ausgeführt und darüber wird Süßwasser verwendet. Der Verschlussaufbau ist in Abbildung 8 dargestellt.

Durchgeführte Zementationsversuche im Gesteinslabor haben bestätigt, dass in Steinsalz eingebrachter Salzzement mit dem Steinsalz eine dauerhafte kraftschlüssige Verbindung eingeht.

Nach der Rückzementation der Bohrung werden die Rohrenden bis 2 m unter der Ackersohle abgetrennt und ein Deckel auf diese Enden aufgeschweißt. Der Abriss der

obertägigen Anlagen und die Rekultivierung bilden den Abschluss der Arbeiten.

Sollte über diese Maßnahmen hinaus die Forderung nach einem Nachweis der Langzeitstabilität erhoben werden, so kann oberhalb des ehemaligen Kavernenkopfes in Höhe der Gasnarbe ein Messpunkt eingesetzt werden, der an ein überwachtes Höhen-nivellementnetz angeschlossen wird. Vorgeschlagen wird ein Überwachungszeitraum zwischen 10 bis 20 Jahren, damit bei den zu erwartenden geringen Bodensenkungen ein genügend langer Beobachtungszeitraum vorliegt. Darüber hinaus sind keine weiteren Überwachungsmaßnahmen notwendig. Sollten innerhalb des Beobachtungszeitraums keine Senkungen mehr messbar sein, so können die Messungen eingestellt werden.

### Literatur

- [1] Bundesrat: Bundesberggesetz (BBergG) vom 13. August 1980, zuletzt geändert am 21. Juni 2005. Bundesgesetzblatt Teil 1.
- [2] Oberbergamt Clausthal-Zellerfeld: Richtlinie des Oberbergamtes in Clausthal-Zellerfeld über das Verfüllen auflässiger Bohrungen. Vom 29. Juli 1998.
- [3] Schmidt, U., Crotagino, F.: Abschlussmaßnahmen für Salzkavernen – Stand der derzeitigen Entwicklung, 50. Berg- und Hüttenmännischer Tag, Freiberg, 1999.
- [4] Rokahr, R. B.; Staudtmeister, K.; Zander-Schiebenhöfer, D.: High Pressure Cavern Analysis. SMRI Spring Technical Meeting, Houston, 2003.
- [5] Rokahr, R. B.; Hauck, R.; Staudtmeister, K.; Zander-Schiebenhöfer, D.; Crotagino, F.; Rolfs, O.: High-pressure cavern analysis. SMRI Research Project No. 2002-2-SMRI.
- [6] Ratigan, J. L.: Cavern Sealing and Abandonment Program 1996 through 2002, Summary Report. Solution Mining Research Institute (SMRI), 2003.
- [7] Beauheim, R. L.; Roberts, A. M.: Hydrology and Hydraulic Properties of a Bedded Evaporite Formation. Sandia Nat. Lab., Carlsbad, USA, manuscript accepted for publication for Journal of Hydrology, 2001.
- [8] Rokahr, R. B.; Hauck, R.; Staudtmeister, K.; Zander-Schiebenhöfer, D.: The Results of the Pressure Build-Up Test in the Brine Filled Cavern Etsel K102. SMRI Fall Technical Meeting, San Antonio, 2000.
- [9] Rokahr, R. B., Staudtmeister, K.: Einfluss des Kriechens auf das Tragverhalten von Salzkavernen. Felsbau 21 (2003), Heft Nr. 5.