

Dr.habil. Ralf E. Krupp
Flachsfeld 5
31303 Burgdorf

Telefon: 05136 / 7846 — e-mail: ralf.krupp@cretaceous.de

Kurzgutachten zu der Langzeitsicherheit von Solungskavernen im Salzstock Etzel

Auftraggeber:

BI Lebensqualität Horsten-Etzel-Marx e.v.



Burgdorf, den 17.April, 2012

Dr. Ralf E. Krupp
(Dipl. Geologe, Geochemiker)

Veranlassung und Auftrag

Im Salzstock Etzel bei Wilhelmshaven sind bereits eine Vielzahl von Kavernen zur Speicherung von Erdöl und Erdgas hergestellt worden, und es bestehen Planungen die Anzahl der Kavernen noch einmal deutlich zu erhöhen. Am Bau und Betrieb der Kavernen sind eine Vielzahl von Eigentümern und Mietern aus der Energiewirtschaft, teils über eigene Tochtergesellschaften und teils über Zusammenschlüsse und Partnerschaften beteiligt. Eigentumsverhältnisse und Verantwortlichkeiten sind im Detail kaum durchschaubar und dürften im Schadensfall zu erheblichen Problemen hinsichtlich der Haftungsfrage führen.

Andererseits ist bisher ungeklärt, wie eine Kaverne am Ende ihrer Speichertauglichkeit langzeitsicher stillgelegt werden kann, und in welchem Maß es über den Kavernen zu Bodensenkungen und Grundwasserversalzungen kommen kann. Für die privaten Grundstückseigentümer, Anlieger, und für die ganze Region, sind dies jedoch entscheidende Fragen, die auch weit in die Zukunft Bedeutung haben werden.

Die BI Lebensqualität Horsten-Etzel-Marx e.v. hat im März 2012 den Verfasser mit der Erstellung eines Kurzgutachtens zu den genannten Problemkreisen beauftragt.

Einführung

Salzstock Etzel

Der Salzstock Etzel ist einer von vielen Salzstöcken und Salzkissen in der norddeutschen Tiefebene, die aus Zechsteinsalzen und untergeordnet auch Röt-Salzen durch den Aufstieg des plastischen Salzes infolge von Dichte-Inversionen entstanden sind (Diapirismus).

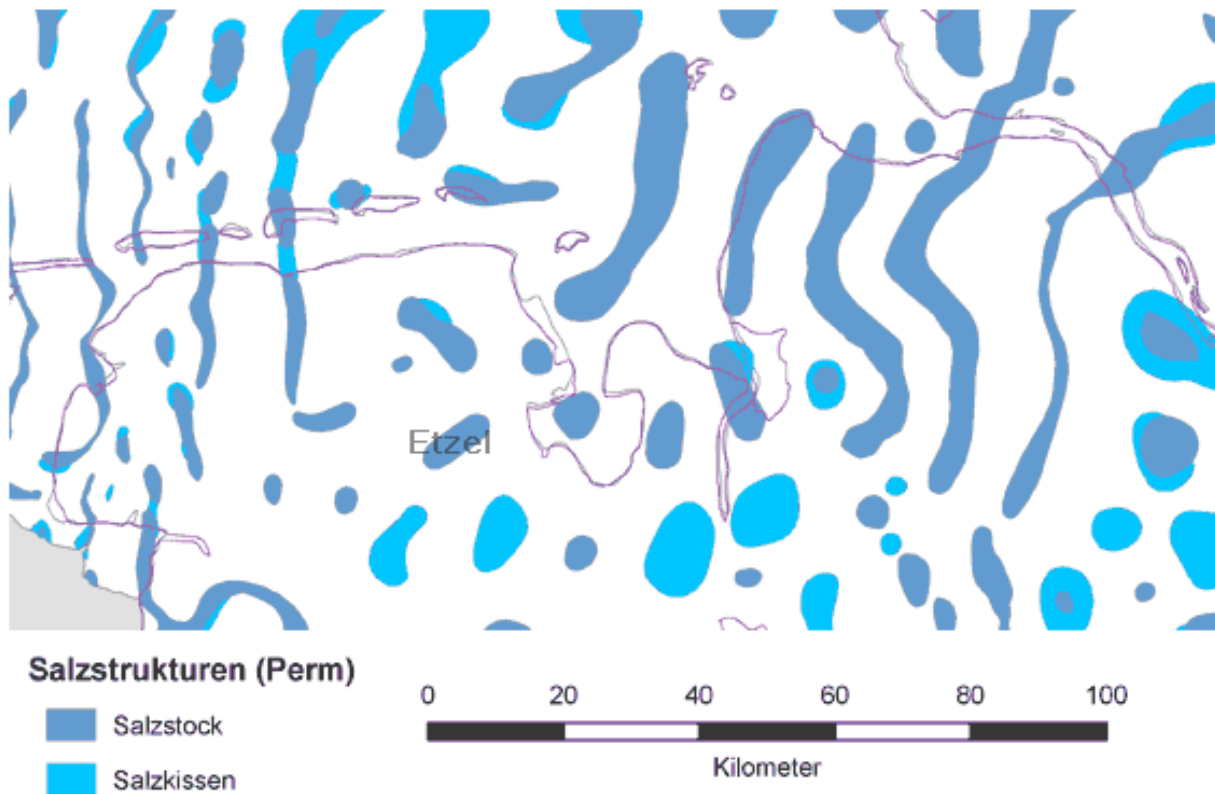


Abbildung 1 – Salzstöcke in der norddeutschen Tiefebene und Lage des Salzstocks von Etzel, östlich des Jadebusens. Kartenausschnitt, nach BGR (2012).

Der Salzstock von Etzel hat einen ovalen Umriss, mit einer Länge von ca. 9 km und einer Breite von ca. 3 km. Die Salz-Oberkante liegt bei ca. 400 m Tiefe im Zentrum und ca. 800 m Tiefe im Randbereich. Eine perspektivische Modell-Ansicht ist in Abbildung 2 reproduziert.

Der Salzstock wird überlagert von

30 – 100 m Quartär

250 – 300 m Tertiär

250 – 300 m Ober-Kreide

40 – 60 m Unter-Kreide

20 – 25 m Zechstein-Gipshut

(Staudtmeister und Rokahr, 1994)

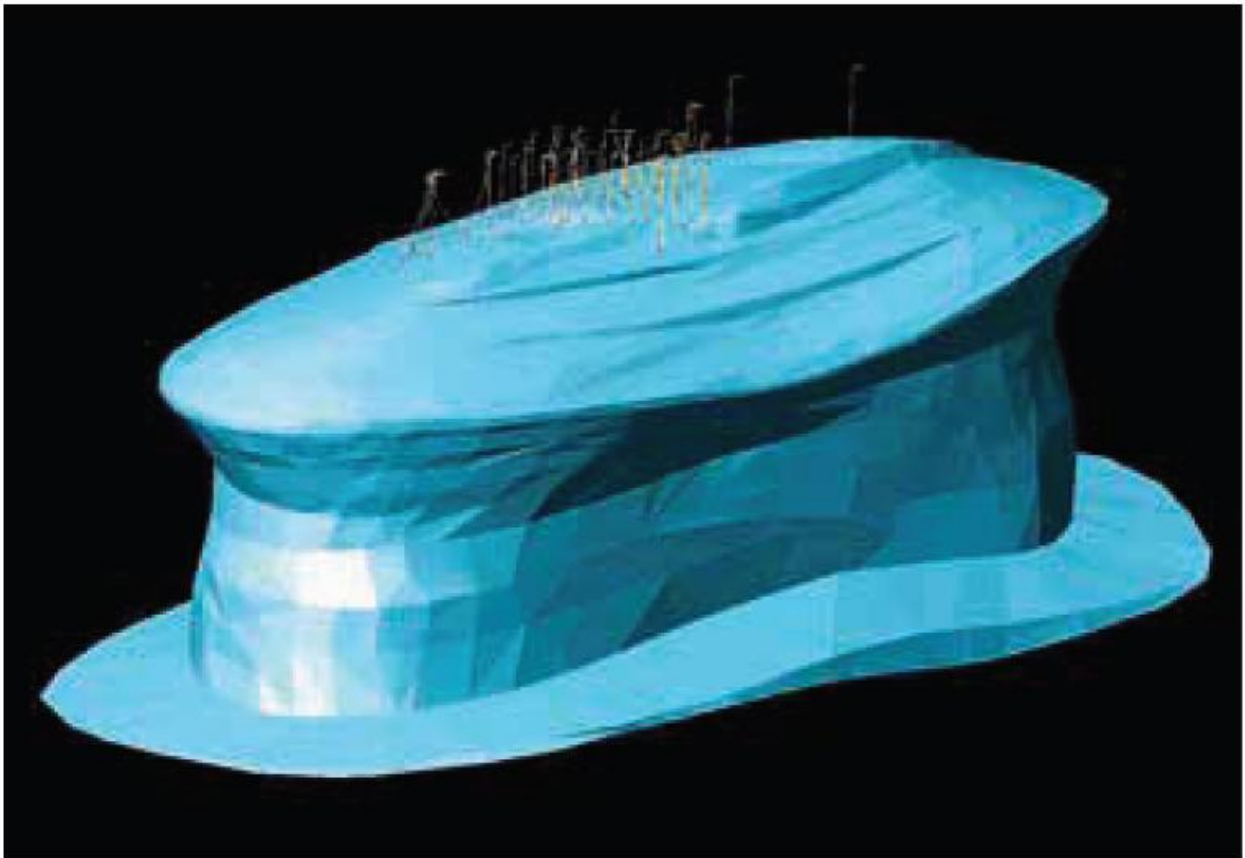


Abbildung 2 – Blick auf das Salzstock-Modell des Salzstocks von Etzel von Süden, mit Bohrungen. Quelle: IVG (2011 a).

Kavernen

Die Kavernen im Salzstock Etzel sind rund 300 bis 500 Meter hoch und bis zu 60 Meter im Durchmesser. Sie befinden sich im Tiefenbereich zwischen 900 bis 1700 Metern.

Die zwischen 1974 und 1978 als strategische Öl- und Gasspeicher angelegten ersten 33 Kavernen sind auf ein Gebiet von 230 ha (2,3 km²) verteilt und in einem hexagonalen Netz mit einer Maschenweite von 250 m angeordnet. Das echometrisch vermessene, „geometrische“ Gesamtvolumen wird mit 13,6 Mio. m³ angegeben (Staudtmeister und Rokahr, 1994). Ende 2010 bestanden 45 Kavernen für Öl (22) und Erdgas (23), und bis zum Jahr 2022 sollen im Salzstock Etzel weitere 85 bereits genehmigte Gas-Kavernen hergestellt werden. Im Oktober 2011 waren 144 Kavernen genehmigt, davon 99 im Detail. (IVG Caverns GmbH, 2011 a, b; Regierungsvertretung Oldenburg (2011)). Siehe Abbildungen 3 und 4.

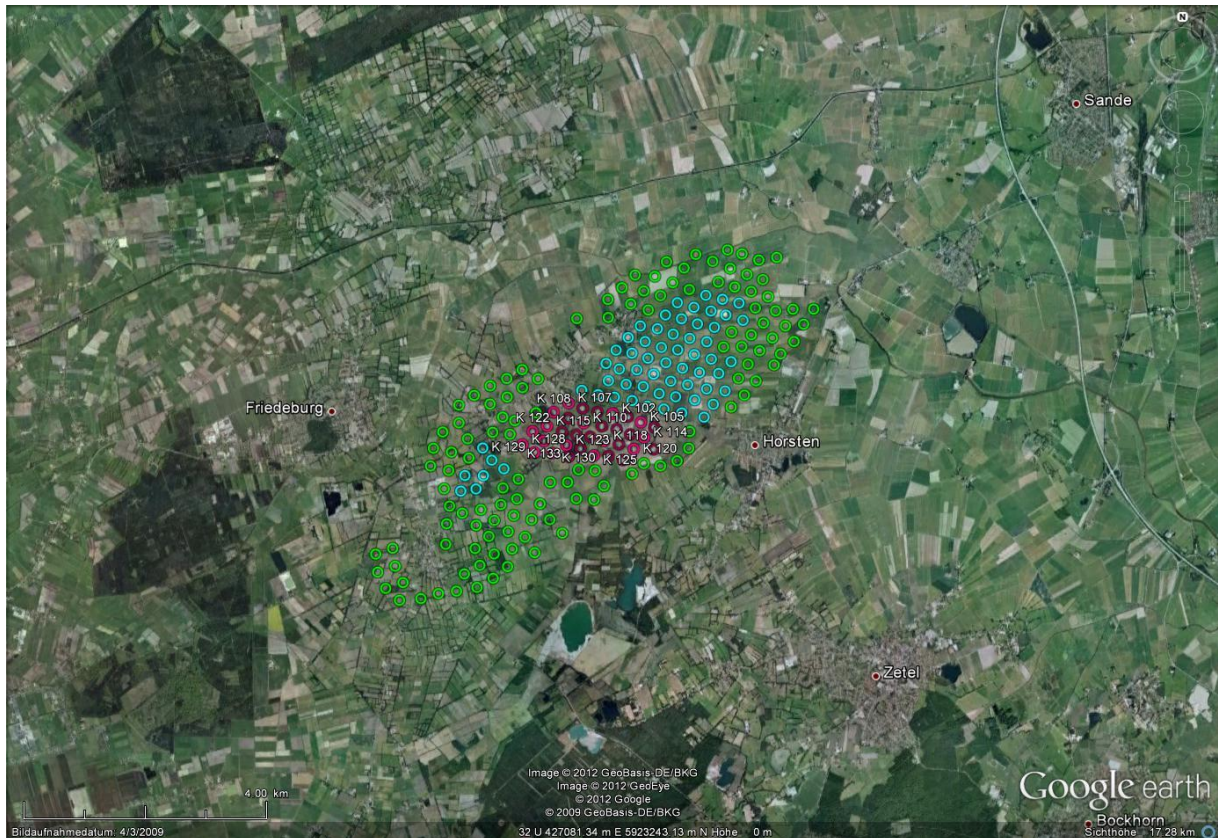


Abbildung 3 – Ältere Kavernen, die zwischen 1974 und 1978 angelegt wurden (rot), im Bau befindliche und genehmigte Kavernen (blau) und zukünftig geplante Kavernen (grün) innerhalb des Salzstocks von Etzel. Die Kavernen-Lokationen zeichnen die Ausdehnung des Salzstocks gut nach.

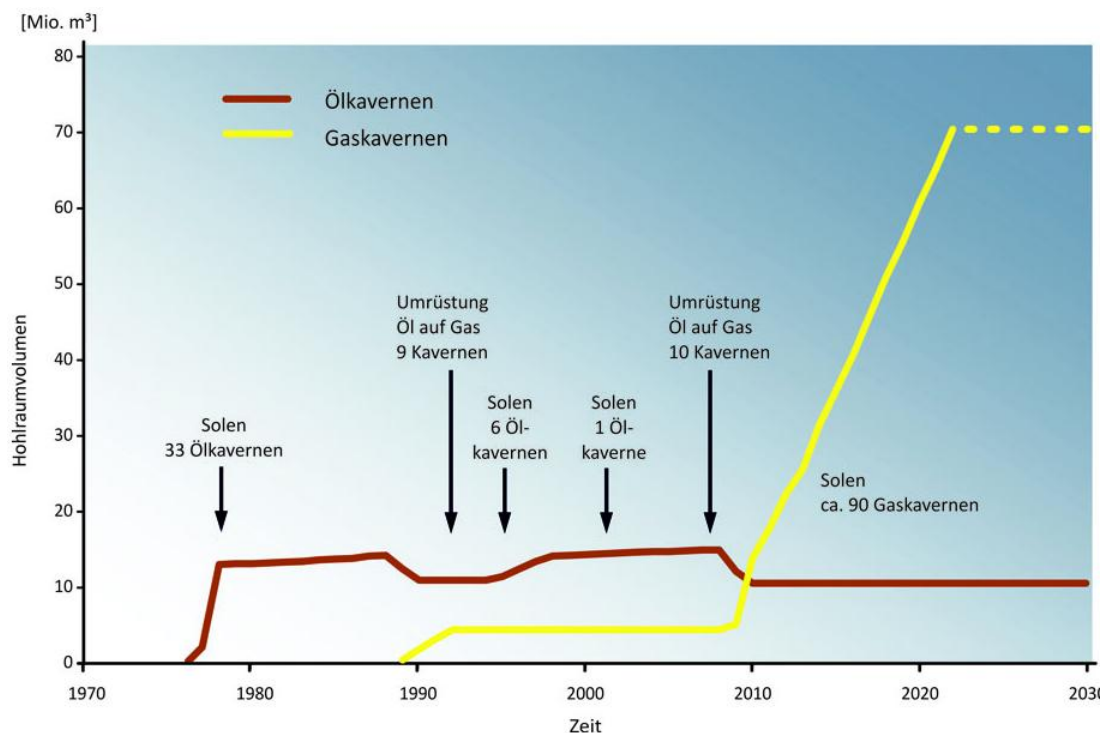


Abbildung 4 – Entwicklung der Kavernenspeicher-Anlage Etzel. Quelle: KBB (2011)

Grundlagen

Druckverhältnisse in Kavernen

Der von außen auf eine Kaverne einwirkende Druck entspricht dem Gebirgsdruck oder lithostatischen Druck in der jeweiligen Tiefe. Der lithostatische Druck P_{litho} in einem Betrachtungspunkt errechnet sich in guter Näherung aus der mittleren Gesteinsdichte ρ_{Gestein} , der Erdbeschleunigung g und der Tiefe z zu

$$P_{\text{litho}}(z) = \rho_{\text{Gestein}} \cdot g \cdot z$$

Der lithostatische Druck nimmt somit näherungsweise linear mit der Tiefe zu.

Der Innendruck der Kaverne hängt von der Füllung (Gas, Sole) und deren Masse und Zustandsgrößen (Dichte, Gasdruck, Temperatur) sowie dem zusätzlich aufgebrachten Kopfdruck am Bohrlochkopf (oder am Verschlussbauwerk) ab. Der Innendruck der Kaverne darf an keiner Stelle den dort herrschenden Außendruck überschreiten, weil es sonst zur hydraulischen Rissbildung kommt. Die Zugfestigkeit von Gesteinen ist gering und kann hier in diesem Zusammenhang vernachlässigt werden.

Ist die Kaverne inklusive Bohrung vollständig bis zur Erdoberfläche mit Sole gefüllt und zur Atmosphäre hin offen, ist der Kopfdruck null (der Atmosphärendruck wird gewöhnlich nicht hinzu gerechnet) und der hydrostatische Druck der Wasser- bzw. Sole-Säule nimmt mit der Tiefe z zu

$$P_{\text{hydro}}(z) = \rho_{\text{Sole}} \cdot g \cdot z$$

Wird zusätzlich ein Kopfdruck aufgepresst, ist der Druck in der Kavernenfüllung

$$P_{\text{Sole}}(z) = P_{\text{hydro}}(z) + P_{\text{Kopf}}$$

Der Druckgradient (Änderung des Drucks mit den Raumkoordinaten, hier eigentlich nur mit der Tiefe z ; $\partial P / \partial z$) ist bei inkompressiblen Fluiden (Sole) unabhängig vom Kopfdruck und nur eine Frage der Dichte des Fluids.

Ist die Kaverne nicht bis zur Erdoberfläche mit Sole gefüllt, und der Sole-Pegel befindet sich in der Tiefe s unterhalb Bohrlochkopf, so ist der von der Sole auf die Kavernen-Innenwand ausgeübte hydrostatische Druck

$$P_{\text{hydro}}(z) = \rho_{\text{Sole}} \cdot g \cdot (z - s)$$

Ist die Kaverne inklusive Bohrung vollständig bis zum Bohrlochkopf mit Erdgas (Methan) gefüllt, so wirkt der Gasdruck auf die Kavernen-Innenwand. Bei den vertikalen Ausmaßen der Gassäule in Kaverne und Bohrung und den hohen Kopfdrücken bis ca. 200 bar können die Dichte des Gases $\rho_{\text{Gas}}(P, T, z)$ (bis ca. 143 kg/m³), seine Kompressibilität und der von der Gas-Masse bewirkte hydrostatische Druck nicht unberücksichtigt bleiben. Da der Gasdruck

vom Betriebszustand der Kaverne und von adiabatischen Temperatureffekten abhängig ist, ist die mathematische Beschreibung des Drucks der Gasfüllung auf die Kavernen-Innenwand komplex. Da in dieser Studie aber ausschließlich die Nachbetriebsphase mit Solefüllung von Interesse ist, braucht die Druckverteilung während der Betriebsphase (Gasfüllung) hier nicht weiter erörtert zu werden.

Konvergenz von Kavernen im Steinsalz

Salzgesteine reagieren unter Einspannung und anhaltender Druckbelastung plastisch, indem das Salzgefüge durch mikroskopische Kriechvorgänge deformiert wird und teilweise rekristallisiert. Sobald eine Kaverne im Salzgestein geschaffen wird, beginnt das Salz des Nebengesteins aufgrund des Druckunterschieds zwischen dem von außen wirkenden Gebirgsdruck und dem von innen wirkenden Gegendruck (Gasdruck, hydrostatischer Druck, mechanisch aufgeprägter Kopfdruk) in den Kavernenhohlraum hinein zu kriechen, solange bis der Hohlraum wieder verschwunden ist (offenes System) oder – zumindest theoretisch – bis der Innendruck infolge Volumenverkleinerung soweit angestiegen ist, bis die Konvergenz zum Stillstand kommt (geschlossenes System). Die Schrumpfung des Kavernenvolumens bezeichnet man als Konvergenz. Die Volumenkonvergenz wird normalerweise als Prozentsatz des Ausgangsvolumens angegeben. Davon zu unterscheiden ist die Konvergenzrate, die die Geschwindigkeit der Konvergenz angibt.

Da Sole mit einer Dichte zwischen 1.000 kg/m^3 und 1.200 kg/m^3 , und erst recht komprimiertes Erdgas, mit ihren Dichten weit unter den Dichten von Gesteinen (Steinsalz z.B. 2.200 kg/m^3) liegen, und die zulässigen Kopfdrucke begrenzt sind (s.u.), kann vor allem im unteren Teil der Kaverne der Außendruck fast doppelt so hoch wie der Innendruck werden. Kavernen konvergieren daher unten schneller als oben, und der von Fluiden bewirkte Innendruck ist nicht ausreichend um die Konvergenz aufzuhalten.

Eine vollständige Konvergenz der Kaverne kann daher nur verhindert werden, indem der Kavernenhohlraum mit einem Festkörper verfüllt wird. Diese Tatsache ist auch in Fachkreisen, insbesondere dem Interessenverband der Solungs-Industrie, dem Solution Mining Research Institute (SMRI), bekannt:

„When a cavern is created in a salt formation, stress differences develop and the salt surrounding the cavern begins to flow or creep into the opening. This salt creep will continue until the cavern volume vanishes. (...) Salt creep into a cavern will continue indefinitely unless the stresses that were removed (when the cavern was created) are replaced. This could only happen if a material with the same physical properties and temperature is placed into the cavern and the salt surrounding the cavern is allowed to creep around the material placed in the cavern so as to remove all void space.“ (SMRI, 200?; 2003)

Die bereits unmittelbar bei Kavernen-Herstellung einsetzende Konvergenz verringert zunehmend das nutzbare (geometrische) Volumen der Kaverne:

„Der maximale Betriebsdruck erzeugt einen Gegendruck gegen die stetig wirkende Konvergenz. Bei Druckentlastung, also Gasausspeicherung, kann der Gebirgsdruck sich so auswirken, dass sich das Kavernenvolumen verringert, in Abhängigkeit von der Zahl der

Umschläge bzw. der Entnahmen, der Druckbedingungen, der Kavernentiefe und der Zeitfaktoren. Sollte das Kavernenvolumen hierdurch so reduziert werden, dass dies zum Nachteil wird, lassen sich die Kavernen jederzeit nachsolen. (IVG Caverns GmbH, 2011 a).

In der Praxis werden, je nach Betriebsweise und Kavernentiefe, Konvergenzraten bis zu 71 % pro Jahr gemessen (TNO, 2003).

Wegen der mechanischen Beanspruchung des Salzgebirges durch die Druckwechsel, durch Temperatur-Wechsel und durch die Verformungen, sind die Standzeit einer Kaverne und die Möglichkeiten nachzusolen jedoch begrenzt. Die Nutzungsdauer eines Kavernenspeichers wird mit ca. 30 Jahren und länger angegeben (IVG Caverns GmbH, 2011 a).

Bodensenkungen

Aufgrund des Prinzips der Massenerhaltung muss das in den Kavernenhohlraum hinein kriechende Salz an anderer Stelle abwandern. Diese Massenumlagerung wirkt sich letztendlich an der Geländeoberfläche oberhalb der Kaverne in Form eines Senkungstrichters aus. Erfahrungsgemäß (z.B. Volumenbilanzen über konvergierenden Kali- und Salzbergwerken) tritt dabei keine nennenswerte Auflockerung der Gesteine auf, sodass das Volumen des Senkungstrichters dem durch Konvergenz verminderten Kavernenvolumen entspricht. Genauer gesagt entspricht das Senkungsvolumen dem zuvor durch Solung und ggf. mehrfacher Nachsolung entfernten Salzvolumen.

Bei der Berechnung der Oberflächensenkungen wären daher auch alle Nachsolungen zu berücksichtigen. Es müsste genau bilanziert werden, wie viel Salz durch Kavernenherstellung und Betrieb insgesamt aufgelöst worden ist. Die Volumenbilanz der anfallenden (ins Meer eingeleiteten) Sole ist hierfür nicht zu gebrauchen, weil nicht angenommen werden kann, dass die Salzsolen gesättigt sind. Die bilanzierte Salzfracht wäre die entscheidende Größe.

Stilllegung, Verschluss und Verwahrung von Kavernen in der Nachbetriebsphase

Die Kontroverse

Unterschiedliche Auffassungen bestehen bezüglich der

- Machbarkeit eines dauerhaften druckdichten Kavernenverschlusses,
- Grundwassergefährdung, als Folge der Sole-Auspressung im Versagensfall,
- Ausmaße der Konvergenz und damit zusammenhängend, der Bodensenkungen.

Nach den Vorstellungen von Kavernenherstellern und Betreibern soll ein dauerhaft druckdichter Kavernenverschluss machbar sein, durch den eine Solefüllung zeitlich unbegrenzt in der Kaverne eingesperrt bleiben könnte. Bei Erreichen eines fiktiven Gleichgewichtsdrucks soll die Konvergenz zum Stillstand gebracht werden können, d.h. die Kavernen würden dann nicht vollständig konvergieren und die Bodensenkungen würden entsprechend geringer ausfallen.

Die Machbarkeit eines solchen dauerhaft dichten Kavernenverschlusses wird von anderen Experten kritisch gesehen, denn die im Kavernentiefsten wirkenden Gebirgsdrücke werden durch die inkompressible Solefüllung in den Dachbereich der Kaverne bzw. in den Bereich des Kavernen-Verschlusses (im Kavernenhals bzw. in der Kavernenbohrung) übertragen und können dort zu hydraulischen Rissbildungen („Fracking“) führen, wodurch die Kaverne undicht wird und die Sole ausgepresst werden kann. Durch die ausgepresste Salzsole würde auch das Grundwasser gefährdet. Jeder Kubikmeter gesättigte Sole kann bis zu 1000 Kubikmeter Süßwasser versalzen, indem der Chlorid-Grenzwert der Trinkwasserverordnung überschritten wird. Nach dem Versagen des Kavernenverschlusses würden Konvergenz und Bodensenkungen weiter ablaufen, bis zum vollständigen Verschwinden des Kavernenhohlraums.

Das Ausmaß der Bodensenkungen ist also unmittelbar mit der Frage der Machbarkeit eines dauerhaft dichten Kavernenverschlusses verbunden.

Bérest und Brouard (2003) (Siehe auch Brouard et al., 2001 mit zahlreichen weiteren Referenzen) beschreiben das Problem sehr prägnant: *„Salt rock is heavier than brine and, in the final state, brine pressure at the cavern top will exceed the geostatic pressure by an amount that is larger when the cavern is taller. If the cavern is tall enough, the rock tensile strength will be exceeded, and fracturing becomes likely“*.

Die Zugfestigkeit (tensile strength) von Gesteinen ist generell sehr niedrig und nicht ausreichend die hier auftretenden Druckdifferenzen zu ertragen. Es kommt daher zur Rissbildung.

Die Abbildung 5 soll den Ausgangszustand und die sich durch den wirkenden Gebirgsdruck und die Konvergenz verändernden Druckverhältnisse verdeutlichen.

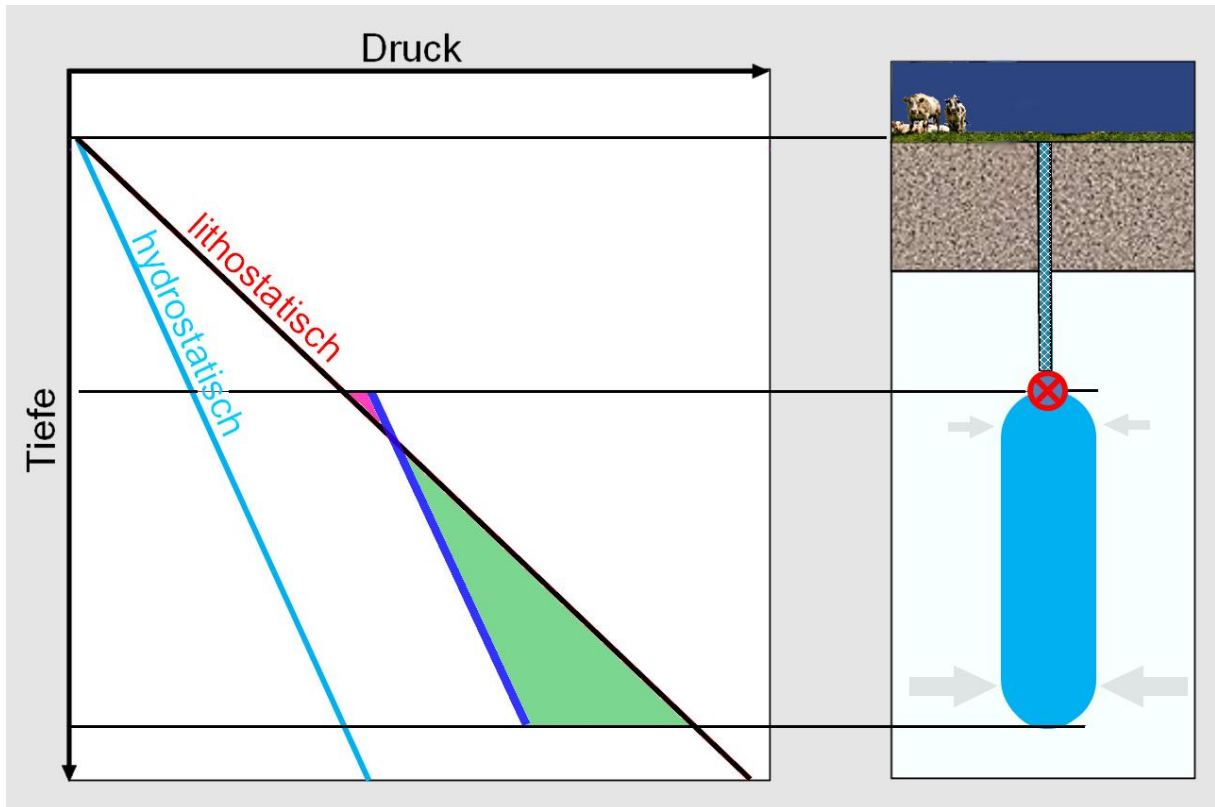


Abbildung 5 – Druckverhältnisse in konvergierenden Kavernen. Erläuterungen im Text.

Das Diagramm in Abbildung 5 zeigt schematisch den unterschiedlich steilen Anstieg des hydrostatischen und des lithostatischen Drucks mit der Tiefe (hellblaue und schwarze Geraden) im Moment der vollständigen Solefüllung und ohne Kopfdruck (Ausgangszustand).

Nach einem druckdichten Verschluss des Kavernenhalses steigt infolge der Konvergenz der Innendruck (dunkelblaue Gerade) immer weiter an und wird im Verschluss-Bereich irgendwann größer als der herrschende lithostatische Außendruck (roter Zwickel). Ab diesem Moment kann eine hydraulische Rissbildung im Kavernendach auftreten und die Sole kann durch die fortschreitende Konvergenz ausgepresst werden. Im grünen Bereich ist hingegen der Außendruck größer als der Innendruck und die Kaverne konvergiert in diesem Abschnitt weiter bis alle Sole ausgepresst und der Kavernenhohlraum vollständig verschwunden ist. Aus den dargestellten Druckverhältnissen ist auch ohne weiteres ersichtlich, dass und weshalb es gerade im Bereich des Kavernendaches und nicht in tieferen Abschnitten zur Rissbildung kommt.

Der Etzel K 102 Test

An der Ölspeicher-Kaverne K 102 in Etzel wurden 1989 in-situ Tests durchgeführt, unter anderem auch ein Druckaufbautest (Staudtmeister und Rokahr, 1994; Rokahr et al., 2000). Die Ergebnisse dieses Tests werden von den Autoren dahingehend interpretiert, dass eine Imprägnation des Salzgesteins mit Sole stattgefunden habe. Dies wiederum wird als Hinweis

gesehen, dass es nicht zu einer Makro-Rissbildung gekommen sei und dass es bei festen Kavernenverschlüssen regelmäßig zu solchen Imprägnationen komme (und nicht zu Makro-Rissen). Die Druckaufbauphase ist im Diagramm, Abbildung 6 dargestellt, unter Verwendung der Messungen von Staudtmeister und Rokahr (1994), auf die in der Literatur immer wieder Bezug genommen wird.

Staudtmeister und Rokahr (1994) schreiben selbst: „The dosing pumps were switched off on 26.03.1992 at 08:00 hours and the cavern was sealed. The functionality of cavern K102 was seen to be potentially at risk because further pumping could have caused brine penetration of the cover rock giving rise to an uncontrollable situation. When the pumps were switched off, the brine head pressure was 84.6 bar (corresponding to $G = 0.222$ bar/m). Approx. 1654 m^3 of brine was pumped into the cavern during the fourth pressure build up step.”

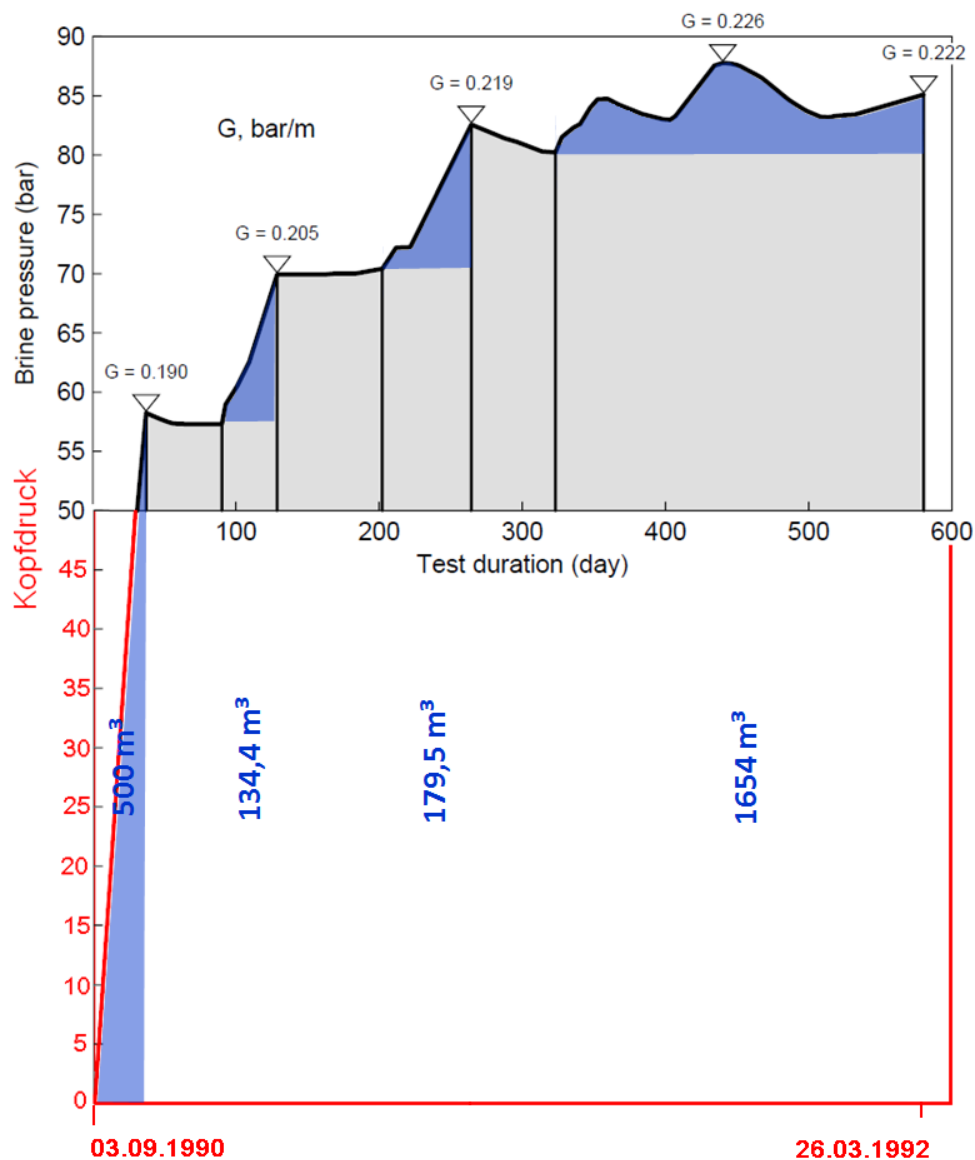


Abbildung 6 – Verlauf des Kopfdrucks an der Kaverne K 102 während des Druckaufbautests. (Farbige Elemente wurden zum besseren Verständnis vom Verfasser ergänzt.) Nach den Originaldaten und Abbildung 7.1 von Staudtmeister und Rokahr (1994).
Blaue Abschnitte: Druckaufbauphasen 1 bis 4.
Blaue Volumenangaben: Jeweils injizierte Sole-Volumina.

Tatsächlich kann aus Abbildung 6 jedoch entnommen werden, dass trotz des in Phase 4 injizierten, relativ großen Sole-Volumens, der Sole-Kopfdruck nicht weiter angestiegen ist, sondern bei Werten um 85 bar verharrete. Dies kann nur durch Leckage aus der Kaverne erklärt werden, wobei die Überwindung der von außen auf die Kaverne K 102 wirkenden Druckkräfte ab einem Sole-Kopfdruck von ca. 85 bar erfolgt. Bei Kopfdrücken unter ca. 85 bar wird die Leckage-Stelle (z.B. ein Riss) durch den von außen wirkenden Gebirgsdruck zusammengepresst und „verschlossen“.

Grundsätzlich wurde dies auch von Staudtmeister und Rokahr (1994) so interpretiert: „*The observation that the internal pressure during the fourth pressure build up phase could not be increased despite pumping for several months can be unequivocally interpreted as demonstrating that the halite in the vicinity of the test cavern during the fourth pressure build up phase was no longer tight. There are two possible explanations for this: either macrofractures developed which reach deep into the salt formation, or the permeability of the halite was increased in the wall zone of the cavern.*“

Es ist also unbestritten, dass eine Leckage stattgefunden hat.

Das Kavernendach liegt in einer Tiefe von ca. 850 m, also etwa 150 m unter dem Salzspiegel. Der Rohrschuh befindet sich bei 827,7 m Tiefe, also ca. 127,7 m unter dem Salzspiegel. Das Steinsalz hat eine mittlere Dichte von 2206 kg/m³, für das über dem Steinsalz liegende Deckgebirge wurde von Staudtmeister und Rokahr (1994) eine Dichte von 2500 kg/m³ angenommen, die jedoch in den Berechnungen variiert worden ist und durch unterschiedliche „G-Werte“ (lithostatische Druckgradienten) ausgedrückt wird. Die Sole hatte eine Dichte von 1195 kg/m³.

In 850 m Tiefe setzt sich der Gebirgsdruck demnach aus dem Anteil des Deckgebirges und dem Anteil des Steinsalzes zusammen:

$$P_{\text{litho}}(850\text{m}) = 2500 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 700 \text{ m} + 2206 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 150 \text{ m}$$

$$P_{\text{litho}}(850\text{m}) = 17.167.500 \text{ Pa} + 3.325.590 \text{ Pa} = 20.493.090 \text{ Pa} \approx 20,5 \text{ MPa} = 205 \text{ bar}$$

In 850 m Tiefe setzt sich der Soledruck zusammen aus dem hydrostatischen Druck der Sole und dem zusätzlichen Kopfdruck (85 bar = 8,5 MPa):

$$P_{\text{Sole}}(850\text{m}) = 1195 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 850 \text{ m} + 8,5 \cdot 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$P_{\text{Sole}}(850\text{m}) = 9.964.507 \text{ Pa} + 8.500.000 \text{ Pa} = 18.464.507 \text{ Pa} \approx 18,5 \text{ MPa} = 185 \text{ bar}$$

Rechnerisch wäre in 850 m Tiefe der Soledruck in dem Test also noch um 20 bar (ca. 10 %) unter dem lithostatischen Druck, der hier dem Frac-Druck entspricht, geblieben. Dass es dennoch bereits zu einer Rissbildung kam, kann mehrere Ursachen haben:

- Die Deckgebirgsdichte könnte geringer als der „Faustwert“ 2500 kg/m³ sein.
- Der Riss könnte weiter oben, z.B. am Rohrschuh (827,7 m), oder noch höher im Fall einer mangelhaften Zementierung, entstanden sein.
- Der Spannungszustand im Nebengebirge der Kaverne ist nicht isotrop, so dass statt des lithostatischen Drucks die minimale Hauptspannung (σ_3) im Druckgleichgewicht anzusetzen ist.

Indem Staudtmeister und Rokahr (1994) ihren Berechnungen letztlich einen lithostatischen Gradienten von $G=0,220$ bar/m zugrunde gelegt haben, haben sie implizit die verwendete Deckgebirgsdichte herabgesetzt, von 2500 kg/m^3 auf 2205 kg/m^3 , also die erste der 3 genannten Ursachen angenommen. Staudtmeister und Rokahr (1994) haben aber auch noch andere, auch kleinere Gradienten als $G=0,220$ bar/m betrachtet, die allerdings Deckgebirgsdichten unter jener von Steinsalz implizieren. Derart geringe Dichten sind aber für das Deckgebirge nicht anzunehmen, schon deshalb nicht, weil sonst ein Aufstieg des Salzes und die Bildung des Salzstocks von Etzel unmöglich gewesen wären.

Mithilfe von numerischen Rechenmodellen untersuchten Staudtmeister und Rokahr (1994) die Spannungsverteilungen im Kavernen-Umfeld unter verschiedenen Annahmen. Von Interesse sind hier besonders die Abbildungen 7.12 und 7.16 aus Staudtmeister und Rokahr (1994), die nachfolgend in Abbildung 7 a und 7 b reproduziert wurden.

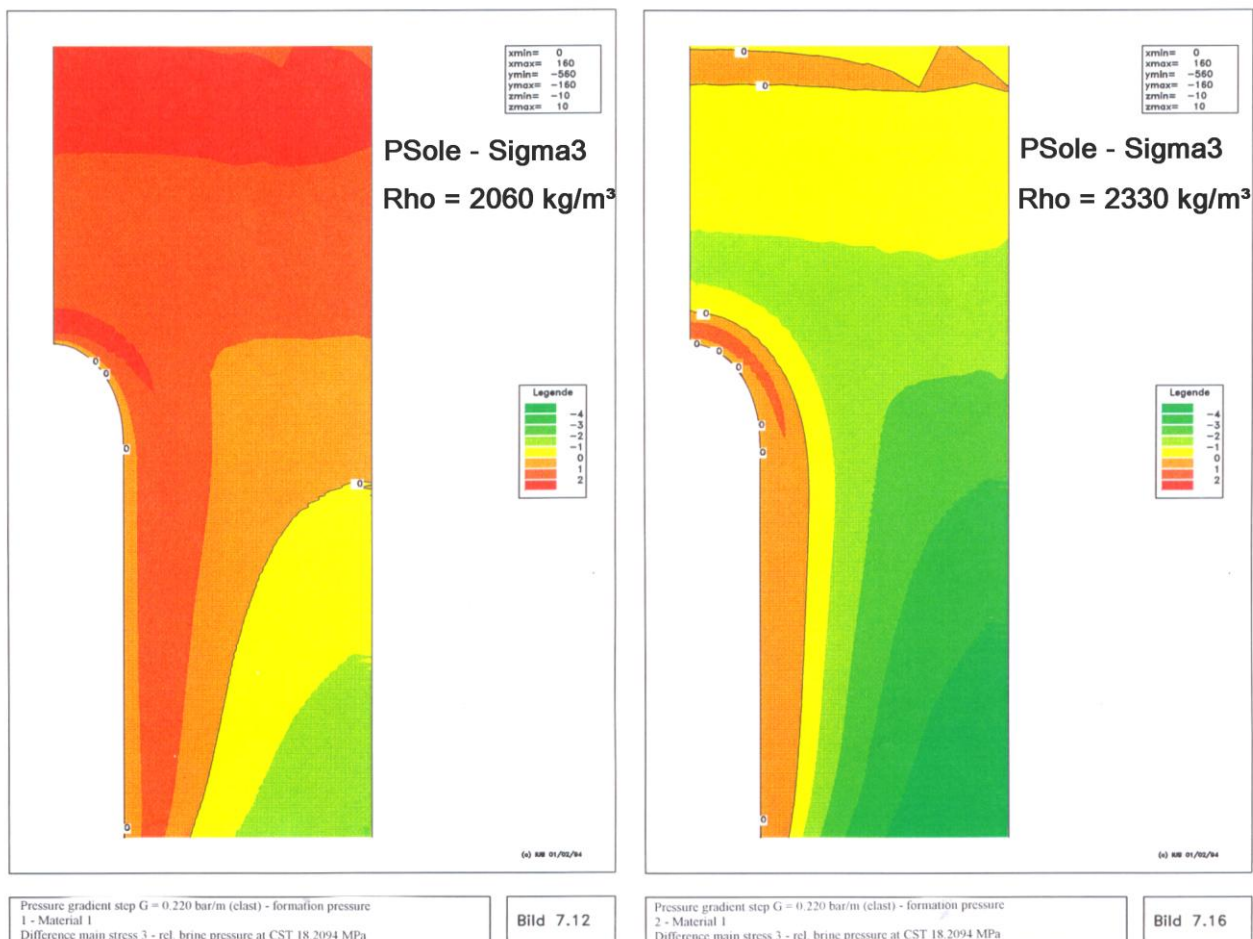


Abbildung 7 – Berechnete Werte des „Minimale Hauptspannungs-Kriteriums“ ($P_{\text{Fluid}} - \sigma_3$) für zwei unterschiedlich hohe Deckgebirgsdichten ρ . Nach Staudtmeister und Rokahr (1994). Für die aus den Messungen empirisch ermittelte Deckgebirgsdichte von 2205 kg/m^3 wurden leider keine numerischen Berechnungen durchgeführt bzw. mitgeteilt.

Kontroverse Interpretationen des Etzel K102 Tests

Nach allgemein üblicher Interpretation des „Minimale Hauptspannungs-Kriteriums“ ($P_{\text{Fluid}} - \sigma_3$) würde man schlussfolgern, dass in den orange und rot dargestellten Bereichen in Abbildung 7 die minimale Hauptspannung σ_3 geringer als der Fluiddruck ist und somit eine hydraulische Rissbildung zu erwarten ist, die zur Leckage der Kaverne führt. Staudtmeister und Rokahr (1994) vertreten jedoch die Hypothese, dass es in diesen Bereichen zu einer Sole-Imprägnation des Salzgesteins kommen würde.

Auch Schmidt, Rols und Staudtmeister (2006) vertreten die Auffassung, dass ein Überdruck wie im Fall des K102-Kavernentests *„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.“* Und die Autoren verallgemeinern diese Hypothese auch auf endverwahrte, konvergierende Salzkavernen. (Vergleiche Abbildung 8).

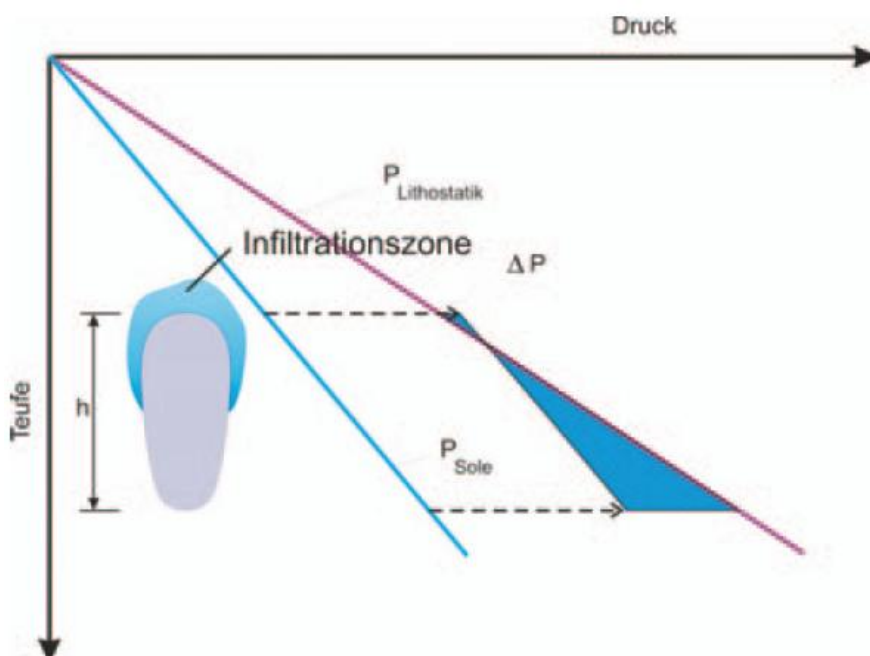


Abbildung 8 – Prinzipieller Druckverlauf einer endverschlossenen Kaverne und postulierte Bildung einer Infiltrationszone. (Schmidt et al, 2006)

Lindert (2012) führt einen als Korngrenzenöffnung (Dilatanz) mit einhergehender „Perkulation“ (auch Perkolation) bezeichneten Vorgang an um die Solespeicherung in der Infiltrations-Aureole zu erklären. Aufgrund der Strömungswiderstände im intergranularen Raum wird offenbar mit der Einstellung eines hypothetischen Druckgleichgewichts gerechnet, welches irgendwann die Leckageströme zum Stillstand bringen soll.

Ein solcher Vorgang ist allerdings mit der Auflösung des Salzgefüges und dem Zerfall des Kornverbandes verbunden und hat zur Folge, dass das betroffene Salzgestein auseinanderfallen und zum Kavernenboden sinken würde. Dies hätte dann massive Instabilitäten zur Folge, die zum Kollaps der Kaverne führen könnten. Mittlerweile existieren auch tatsächlich experimentelle Untersuchungen zur Mikrorissbildung und Dilatanz in Prüfkörpern aus unter relevanten Druckversuchen beanspruchtem Steinsalz (Schoenherr et

al., 2012), die auch entsprechende Infiltrationen aufweisen. Insofern zeigt die Forschung hier einen weiteren potentiellen Problemkreis für die Stabilität von Salzkavernen auf.

Auch der Ansatz des Darcy'schen Gesetzes ist hier kritisch zu hinterfragen. Das Darcy-Gesetz wird auf die Fluid-Durchströmung eines durchlässigen (permeablen) Festkörpers in einem Druck-Gefälle angewendet. Das Gesetz stellt eine Beziehung her zwischen der Filtergeschwindigkeit durch einen durchströmten Querschnitt v_f ($m^3/m^2 \cdot s$), dem Durchlässigkeits-Beiwert k_f (m/s) und dem Druckgradienten $\text{grad } P$ ($\text{grad } P = \nabla P = (\partial P/\partial x, \partial P/\partial y, \partial P/\partial z)$) entlang der Filterstrecke, wobei $\text{grad } P$ oft als Höhendifferenz der Fluidspiegel in Meter (m) ausgedrückt wird:

$$v_f = -k_f \cdot \text{grad } h \text{ (Darcy-Gesetz)}$$

In hydrogeologischen Problemstellungen ist k_f immer eine für den durchströmten Festkörper charakteristische Stoff-Konstante.

Im Fall des permeablen Kavernendaches wird k_f allerdings zu einer druckabhängigen Variablen, während v_f durch die Konvergenzrate der Kaverne bestimmt wird. Praktisch gesprochen bedeutet dies, dass sich die Permeabilität k_f jeweils so einstellt, dass das konvergenzbedingt verdrängte Solevolumen entweichen kann. Dies ist so, weil hier die Volumen-Konvergenz die treibende Kraft des Leakageprozesses ist, und das Produkt aus Druckgefälle in der Kavernenwand und Permeabilität sich entsprechend einstellt.

Für einen solchen Infiltrationsmechanismus, der sich nach Einstellung eines hypothetischen Druckgleichgewichts tot läuft, liegen bislang auch keinerlei stichhaltige Beweise vor, und Vieles spricht dagegen. Im Gegensatz dazu ist der gezielte Einsatz der hydraulischen Rissbildung seit Jahrzehnten Stand der Technik und zig-tausendfach praxiserprobt.

Letztendlich ist die Frage der geometrischen Ausgestaltung der Leakagepfade aber gar nicht entscheidend: Entscheidend ist vielmehr das volumetrische Aufnahmevermögen einer solchen hypothetischen Infiltrations-Aureole. Denn um ein Entweichen der Sole in die suprasalinaren Deckschichten und damit in das Grundwasser zu verhindern, müsste diese Infiltrations-Aureole das gesamte Solevolumen der Kaverne dauerhaft aufnehmen können. Nimmt man z.B. als denkbare Obergrenze eine Sekundär-Porosität des Steinsalzes von 0,1 Volumen-Prozent an, so müsste die Aureole das 1000-fache Kavernenvolumen haben. Das in Frage kommende Salzvolumen reicht also bei weitem nicht aus um den Kaverneninhalt aufzunehmen. Höhere Porositäten erscheinen völlig unplausibel, so dass einem solchen Mechanismus, falls er überhaupt existieren sollte, für die Langzeitsicherheit von Kavernen keine Relevanz zukommen kann.

Der Grund, weshalb es bei dem Druckaufbautest zu keinen stärkeren Leckagen gekommen ist, liegt simpel in der Tatsache, dass das eingepresste Solevolumen von insgesamt 2467,9 m³ vergleichsweise sehr gering war und die Injektion danach beendet wurde. Bei der vollständigen Konvergenz der Kaverne wird aber die Solefüllung (K 102: 233.315 m³) praktisch quantitativ ausgepresst werden, weil die Konvergenz im Kavernentiefsten immer einen ausreichenden großen Überdruck bewirkt.

Die Ergebnisse des Tests an der Etzel Kaverne K102 und ihre korrekte Interpretation sind von grundlegender Bedeutung für die Nicht-Machbarkeit eines langzeitsicheren Kavernenverschlusses. Sie beweisen, dass die Kaverne bei Erreichen oder bei Überschreitung des lithostatischen Drucks durch den Kavernen-Innendruck undicht wird, sei es durch einen Makroriss oder durch Permeation des durchlässig gewordenen Salzgebirges. Die resultierende Leckage ist eine zwangsläufige Folge der oben erörterten Druckverhältnisse und der Konvergenz. Somit ist ein langzeitsicherer Kavernenverschluss nicht möglich, jedenfalls nicht bei vertikal ausgedehnten Kavernengeometrien. Ohne einen entsprechenden Nachweis ist es aber auch nicht zulässig, eine stillgelegte und verschlossene Kaverne aus der Bergaufsicht zu entlassen, mit entsprechenden Konsequenzen für die Haftungsfrage.

Eine weitere Konsequenz ergibt sich für die Berechnung der Oberflächen-Senkungen, die nun von einer vollständig ablaufenden Konvergenz ausgehen müssen.

Geländesenkungen

Geometrischer Berechnungsansatz

Das Kavernenfeld von Etzel ist in etwa einem hexagonalen Muster folgend angelegt und weiterhin geplant (Abbildungen 2 und 9), wobei die Zentraldistanz zwischen unmittelbar benachbarten Kavernen im Mittel bei etwa 250 m liegt. Jeder Feld-Kaverne kann bei dieser Anordnung mit der Zentraldistanz (Identitätsperiode) d eine Teilfläche A des Kavernenfeldes zugeordnet werden, die sich nach der folgenden Formel errechnet:

$$A_{\text{Teilfläche}} = d^2 \cdot \sin(60^\circ)$$

Das konvergenzfähige Volumen einer Feldkaverne entspricht dem Volumen des ausgesolten Steinsalzes mit der Dichte 2203 kg/m^3 (s.o.). Da keine exakten Zahlen über das ausgesolte Salz verfügbar sind, können nur Minimalwerte für die finale Oberflächenabsenkung berechnet werden, die auf den geometrischen Volumenangaben beruhen.

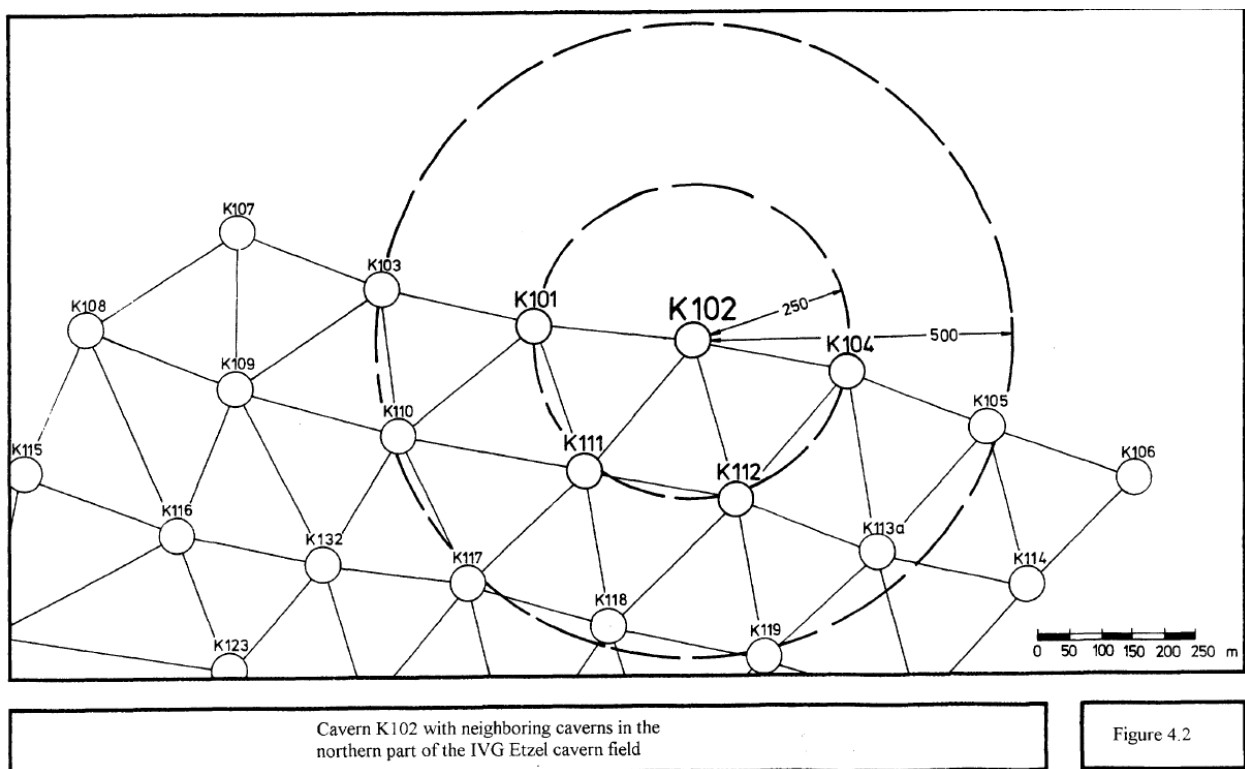


Abbildung 9 – Annähernd hexagonales Grundmuster der Feld-Kavernen von Etzel. Aus Staudtmeister und Rokahr (1994).

Die Oberflächenabsenkung **S** über einer Feldkaverne wird demnach errechnet, indem das konvergenzfähige Kavernenvolumen **V** durch die zurechenbare Teilfläche geteilt wird:

$$S_{\text{Teilfläche}} = V_{\text{Kaverne}} / A_{\text{Teilfläche}}$$

Für das zwischen 1974 und 1978 angelegte Kavernenfeld liegen auch summarische Angaben vor. Demnach haben die 33 Kavernen ein geometrisches Gesamtvolumen von 13,6 Mio. m³ das sich auf eine Fläche von ca. 2.300.000 m² (280 ha) verteilt (Staudtmeister und Rokahr, 1994).

Der über das Kavernenfeld gemittelte Senkungsbetrag errechnet sich daher auf mindestens

$$13.600.000 \text{ m}^3 / 2.300.000 \text{ m}^2 = 5,91 \text{ m}$$

Der tatsächliche Senkungsbetrag, basierend auf dem insgesamt ausgesolten Salzvolumen, dürfte aber noch deutlich höher liegen, zumal mehrfache Nachsolungen üblich, und bei Ölkavernen betriebsbedingte Salzauflösungen bei Verwendung von Seewasser bei der Ausspeicherung des Öls unvermeidlich, sind.

Der zu erwartende Absenkungsbetrag liegt somit um ein Mehrfaches über dem vom Kavernenbetreiber angegebenen maximalen Senkungsbetrag von 2,3 m (z.B. Schmeding, 2012).

Numerische Prognosemodelle

Gebirgsmechanische Prognosemodelle gehen von markscheiderisch vermessenen Geländesenkungen aus, die ungenau sind und stark von der Definition der Null-Linie abhängen, und setzen diese in Relation zu den echometrisch abgeleiteten, ebenfalls ungenauen Konvergenzraten, aber anscheinend nur selten zu den ausgesolten Salzvolumina.

Durch Anwendung von Stoffgesetzen und Anpassung von Parametern wird versucht, die Entwicklung des Senkungsvolumens mit der des Konvergenz-Volumens in Einklang zu bringen und so eine Basis für Extrapolationen in die Zukunft zu schaffen. Auf diesen Extrapolationen sowie auf den zugrunde gelegten Randbedingungen basieren dann die prognostizierten Absenkungsbeträge.

Eine entscheidende Randbedingung ist dabei die Art der Kavernenverwahrung als Schlussrandbedingung (Eikemeier et al., 2012). Wenn ein dichter Kavernenverschluss als Randbedingung vorgegeben wird, in der Praxis aber nicht hergestellt werden kann, ist eine solche Prognoserechnung nicht realistisch.

Schlussfolgerungen

1. Es ist allgemein anerkannt, dass solegefüllte Kavernen im Steinsalz ohne Gegenmaßnahmen so lange konvergieren, bis der Kavernenhohlraum wieder verschwunden ist.
2. Die vollständige Kavernen-Konvergenz kann nur durch eine Füllung des Hohlraums mit einem Feststoff verhindert werden.
3. Ein langzeitsicherer druckdichter Verschluss von solegefüllten, vertikal ausgedehnten Kavernen ist aufgrund von zu hohen, hydraulisch aus dem Kavernentiefsten auf den Kavernenverschluss, Kavernenschuh, bzw. das Kavernendach übertragenen Drücken unmöglich.
4. Im Fall eines druckdicht hergestellten Kavernenverschlusses werden die hydraulisch übertragenen Drücke zu einer Undichtigkeit in Form von Makro-Rissen, möglicherweise auch in Form von erhöhten Permeabilitäten des Salzgebirges, führen.
5. Die von einigen Verfassern aufgestellte Hypothese, dass die verdrängte Sole eine Imprägnationszone im salinaren Nebengebirge und der hangenden Salzscheibe über der Kaverne bilden würde, die somit eine weitere Ausbreitung der Sole verhindere, ist aufgrund volumetrischer Überlegungen abzulehnen. Das hierzu erforderliche Salzvolumen müsste unter Annahme realistischer Werte für die sekundäre Porosität mehr als tausendfach über dem verdrängten Solevolumen liegen.
6. Der von einigen Verfassern vorgeschlagene Mechanismus der Korngrenzenöffnung und Perkolation zur Bildung einer hypothetischen Imprägnationszone ist ebenfalls in Frage zu stellen, weil er mit der Auflösung des Kornverbandes und somit einer nachhaltigen Entfestigung des Kavernendaches verbunden wäre, die zu kaum übersehbaren Kavernenschäden geführt haben würde.
7. Der von einigen Verfassern vorgeschlagene Aufbau eines hypothetischen Druckgleichgewichtes infolge von Strömungswiderständen gemäß dem Darcy-Gesetz verkennt, dass der Durchlässigkeitsbeiwert im Fall der Kavernen-Leckage nicht mehr als Konstante angesehen werden kann, und dass die Volumenkonvergenz als treibende Kraft die Auspressrate von Sole bestimmt.
8. Über die hydraulisch aufgerissenen Leckagestellen wird die Solefüllung durch fortschreitende Konvergenz in das grundwasserführende Deckgebirge ausgepresst und kann dort zu einer massiven Versalzung des Süßwassers führen. Jeder Kubikmeter gesättigte Sole kann bis zu 1000 Kubikmeter Süßwasser versalzen, indem der Chlorid-Grenzwert der Trinkwasserverordnung überschritten wird.
9. Durch die bis zum vollständigen Verschluss des Kavernenhohlraums ablaufende Konvergenz wird an der Oberfläche eine Bodenabsenkung eintreten, deren Volumen dem durch Solung aufgelösten Steinsalzvolumen entspricht. Ein Vergleich mit gemessenen geometrischen Hohlraumvolumina wird hingegen zu einer Unterschätzung des Senkungsvolumens führen.
10. Das Ausmaß der Bodenabsenkung kann durch einen druckdicht hergestellten, aber nicht beständigen Kavernenverschluss nicht verringert werden.
11. Für das erste, zwischen 1974 und 1978 hergestellte Kavernenfeld im Salzstock Etzel errechnen sich auf Grundlage des geometrischen Hohlraumvolumens nach vollständig erfolgter Konvergenz mittlere Bodensenkungen von 5,91 Meter. Bei Ansatz des (unbekannten) aufgelösten Steinsalzvolumens würde der Senkungsbetrag vermutlich deutlich größer ausfallen.

Quellen

Bérest P, Brouard B (2003) Safety of Salt Caverns Used for Underground Storage. Blow Out; Mechanical Instability; Seepage; Cavern Abandonment. Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP, Vol. 58 (2003), No. 3, pp. 361-384

http://ogst.ifpenergiesnouvelles.fr/articles/ogst/pdf/2003/03/berest_58n3.pdf

BGR (2012) Endlagerstandorte.

http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Endlagerung/Endlagerstandorte/endlagerstandorte_node.html

Brouard B, Bérest P, Durup J (2001) In-Situ Salt Permeability Testing. SMRI Fall 2001 Meeting 7 - 10 October 2001 Albuquerque, New Mexico, USA

<http://brouard-consulting.com/sites/default/files/smri-albuquerque.pdf>

Eickemeier R, Heusermann S, Nipp H (2012) Kavernenfeld Etzel. Senkungsprognose Endausbau Grundlagen, Randbedingungen & Ergebnisse. Wittmund, 14.03.2012. Vorläufige Arbeitsunterlage zur Ergebniswerkstatt Kulturlandschaft Etzel, Stand 14.03.2012, ohne Anspruch auf Vollständigkeit und Übertragbarkeit. BGR, Hannover.

<http://www.kulturlandschaft-etzel.de/wp-content/uploads/2012/01/Pr%C3%A4sentation-Senkungsprognose-BGR144-2060-Internetseite.pdf>

IVG Caverns GmbH (2011 a) Kavernenspeicher Etzel - Versorgungssicherheit für Erdgas und Erdöl.

Text: DEEP./KBB, EKB, E.ON, IVG, JadeBay, OMV, Statoil, VNG. Juni 2011

http://www.ivg.de/fileadmin/internet/daten/pdf/2011/broschuere_salzstock_etzel_40s_Ir_110627_final.pdf

IVG Caverns GmbH (2011 b) Kavernen-Informationszentrum Etzel. Flyer.

<http://www.ivg.de/investment/caverns/kavernen-informationszentrum-etzel/>

JS Gruppe (2008) Salzstock Etzel - Versorgungssicherheit für Erdgas und Erdöl. Herausgeber, Redaktion und Anzeigen: JS Gruppe GmbH · Juni 2008

KBB (2011) Kavernenspeicher Etzel: einer der größten für große Versorgungssicherheit. KBB Underground Technologies GmbH, Hannover.

<http://www.kbbnet.de/referenzen/projekte/etzel/>

LBEG (2011) Erdöl und Erdgas in der Bundesrepublik Deutschland 2010. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Referat Energiewirtschaft Erdöl und Erdgas, Bergbauberechtigungen. Hannover 2011

http://www.lbeg.niedersachsen.de/download/58703/Erdoel_und_Erdgas_in_der_Bundesrepublik_Deutschland_2010.pdf

Lindert A (2012) Stand der Kavernenverwahrung. Wittmund, 14.03.2012. Vorläufige Arbeitsunterlage zur Ergebniswerkstatt Kulturlandschaft Etzel, Stand 14.03.2012, ohne

Anspruch auf Vollständigkeit und Übertragbarkeit. IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig.

<http://www.kulturlandschaft-etzel.de/wp-content/uploads/2012/03/120306-Prsentation-Stand-der-Kavernenverwahrung-IfG-Rev03-Internet.pdf>

Regierungsvertretung Oldenburg (2011) Leitbildentwicklung für Kulturlandschaft Etzel startet Regierungsvertretung Oldenburg und IVG Caverns veranstalten moderierten Prozess zur vertraglichen Kavernenentwicklung - Presseinformation - Wittmund, Oktober 2011.

<http://www.kulturlandschaft-etzel.de/wp-content/uploads/2011/11/111010-Auftakt-PM.pdf>

Rokahr R, Hauck R, Staudtmeister K, Zander-Schiebenhöfer D (2000) The results of the pressure build-up test in the brine filled cavern Etzel K102. Proc. SMRI Fall Meeting, San Antonio, 89-103.

Schmedding H (2012) Rahmenbetriebsplan Etzel. Leitbildentwicklung Ergebniswerkstatt. Die Leitbildentwicklung und das Integrierte Leitbild Wittmund, 14.03.2012. Vorläufige Arbeitsunterlage zur Ergebniswerkstatt Kulturlandschaft Etzel, Stand 14.03.2012, ohne Anspruch auf Vollständigkeit und Übertragbarkeit. IVG Caverns GmbH.

http://www.kulturlandschaft-etzel.de/wp-content/uploads/2012/03/120314-RBP-Etzel-Ergebniswerkstatt-CAH-rev02_1.pdf

Schmidt U, Rolfs O, Staudtmeister K (2006) Endverwahrung von Speicherkavernen im Salzgebirge. Erdöl Erdgas Kohle 122. Jg. 2006, Heft 11.

Schoenherr J, Urai J, Littke R, Kukla P, Newall M, Al-Abry N, Larroque J (2012) HC bearing Halite in the South Oman Salt Basin (SOSB).

<http://www.ged.rwth-aachen.de/Ww/people/alumni/johannes/EGU/Talk.html>

SMRI (200?) A Status Report on the Solution Mining Research Institute Cavern Sealing and Abandonment Program. By Joe Ratigan, SMRI Research Coordinator, 13pp. – Ohne Datumsangabe.

<http://www.solutionmining.org/docs/CavernSealingStatus.pdf>

SMRI (2003) Summary Report - The Solution Mining Research Institute - Cavern Sealing and Abandonment Program 1996 through 2002. By Joe L. Ratigan, Februar 2003

<http://www.solutionmining.org/docs/SummaryReport.pdf>

Staudtmeister K, Rokahr R (1994) Pressure Build-Up Test in the Etzel K 102 Cavern. SMRI Research Project Report No. 98-5-SMRI

TNO (2003) High convergence rates during deep salt solution mining. Netherlands Institute of Applied Geoscience TNO – National Geological Survey

Welt online (2009) Deutschlands unterirdische Schatzkammern. Von Gabriele Sümer, Welt online (19.05.2009)

<http://www.welt.de/dossiers/erdgas2009/article3761257/Deutschlands-unterirdische-Schatzkammern.html>