

# Möglichkeiten zur Beurteilung der Standsicherheit von Salzkavernen

R.B. Rokahr, K.H. Lux und H. Wagner

*Technische Universität Hannover,  
Callinstrasse 32, 3000 Hannover, BRD.*

## ZUSAMMENFASSUNG

Die zunehmenden Verwendungsmöglichkeiten unterirdischer Hohlräume im Salzgestein führen zu vielfältigen Beanspruchungsbedingungen für den allein als tragendes Element heranzuziehenden Naturwerkstoff "Salzgestein". Neben geologischen Erkundungen sind daher umfangreiche theoretische Untersuchungen, Laborversuche und Messungen in situ erforderlich. Obwohl in den vergangenen Jahren in mehreren Veröffentlichungen die Spannungs- und Verschiebungszustände in der Umgebung von Salzkavernen mit unterschiedlichen Ansätzen in der geometrischen und physikalischen Idealisierung untersucht wurden und die Bedeutung gebirgsmechanischer Berechnungen als Grundlage für Aussagen zur Standsicherheit derartiger Hohlräume erkannt wurde, fehlt bislang ein Konzept, das die Dimensionierung von Salzkavernen unter Einbeziehung ihrer Langzeitstandsicherheit bei Berücksichtigung wesentlicher und charakteristischer Stoffeigenschaften ermöglicht. In der vorliegenden Arbeit wird deshalb ein Konzept vorgeschlagen, das in Form einer kombinierten Standsicherheitsanalyse theoretische Vorausberechnungen auf der Grundlage von Laboruntersuchungen mit Messungen in situ nach der Kavernenherstellung verbindet. Dabei verlangt der theoretische Nachweis der Standsicherheit die Einhaltung bestimmter Kriterien und Forderungen. Die vorgeschlagenen Grenzwerte sollten durch entsprechende Untersuchungen bestätigt oder gegebenenfalls modifiziert werden. Neben einer Weiterentwicklung der mathematisch-mechanischen Modelle und der programmtechnischen Grundlagen sind daher in Zukunft verstärkt Laboruntersuchungen und Messungen in situ durchzuführen.

## EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

Die guten Erfahrungen bei der Herstellung und beim Betrieb unterirdischer Tiefspeicher für Erdöl und Erdgas im Salzgestein haben dazu geführt, daß sich in den letzten Jahren die Verwendungsmöglichkeiten derartiger Hohlräume wesentlich erweitert haben. So wird z.B. neben der Deponierung von hochgiftigen und radioaktiven Industrieabfallprodukten die Speicherung von Kohlenwasserstoffen unter hohem Druck sowie die Einlagerung verschiedener, im Naturzustand gasförmiger Kohlenwasserstoffe bei tiefen Temperaturen erwogen.

Wie die praktischen Erfahrungen aus dem Salzbergbau zeigen, ist im Salzgestein die Erstellung großer, unausgekleideter Hohlräume mit Standzeiten von mehreren Jahrzehnten möglich. Allerdings reichen allein auf empirischer Grundlage erarbeitete Grundsätze für die Auslegung von Grubenbauen nicht zur Beurteilung des Tragverhaltens gesolter Hohlräume über relevante Zeiträume aus, da sie entsprechend ihrer jeweiligen Nutzung über den Gebirgsdruck hinaus vielfältigen Beanspruchungsbedingungen unterliegen. Hinzu kommt, daß die gesolten Kavernen i.a. nicht begehrbar sind und eine direkte Beobachtung somit nicht möglich ist. Die zur Zeit zur Verfügung stehenden

Meßeinrichtungen erlauben noch keine quantitative Aussage über das Konvergenzverhalten. Mit Hilfe von Ausflußratenmessungen lassen sich allerdings zumindest qualitative Rückschlüsse auf das Verformungsverhalten in Abhängigkeit von der Zeit ziehen.

Da auf Grund fehlender systematischer Meßergebnisse und der mit einer Übertragung vorhandener Meßergebnisse auf andere Verhältnisse verbundenen Problematik vorab eine Aussage über das tatsächliche Verhalten des die Kaverne umgebenden Gebirges nicht möglich ist, erfordert der Nachweis der Standsicherheit einer Kaverne sowohl eine theoretische Vorausberechnung als auch eine meßtechnische Überwachung. Grundlage für die erforderlichen theoretischen Untersuchungen muß ein Simulationsmodell sein, das eine der komplexen Problematik adäquate Analyse des Kurz- und Langzeitverhaltens erlaubt. Mit Hilfe moderner Großrechenanlagen ist die Erarbeitung von Simulationsmodellen möglich, mit denen mehr als bisher sowohl geometrische als auch physikalische Bedingungen berücksichtigt werden können.

Ziel dieser Arbeit ist es nun, ein Konzept vorzustellen, mit dessen Hilfe die Standsicherheit von Kavernen einschließlich der Konvergenz quantitativ abgeschätzt werden kann.

### BISHERIGER NACHWEIS DER STANDSICHERHEIT

Zur Zeit erfolgt der Nachweis der Standsicherheit von gesolten Kavernen in der Bundesrepublik nach zwei unterschiedlichen Verfahren. Aufbauend auf modellmechanischen Laborversuchen an Salzgesteinsproben und auf Messungen in Salzbergwerken werden einerseits von Dreyer [1] empirische Formeln vorgeschlagen, die eine Abschätzung der Sicherheit gegen das Versagen des oberhalb des Kavernenfirstes anstehenden Gebirges erlauben und damit eine Bemessung der erforderlichen Salzschwebe ermöglichen. Im Gegensatz hierzu wird andererseits der Spannungszustand des Gebirges in der Umgebung einer Kaverne mit Hilfe kontinuumsmechanischer Berechnungen ermittelt. Da die Lösung der das Problem beschreibenden Differentialgleichungen analytisch erfolgt [2], können nur relativ einfache geometrische Formen wie ein unendlich langer zylindrischer oder ein kugelförmiger Hohlraum untersucht werden. Der so berechnete Spannungszustand führt in Verbindung mit einer Fließbedingung zu plastischen Zonen, deren Ausdehnung als Maßstab für die Beanspruchung des den Hohlraum umgebenden Gebirges angenommen wird und daher bestimmte Grenzen einzuhalten hat. Nach Langer [3] sollte z.B. bei einer Kaverne in geschichtetem Salzgestein der Radius der plastischen Zone innerhalb der verbleibenden Salzschweben liegen.

Dem Anwendungsbereich dieser Verfahren sind jedoch bei Beachtung der ihnen zugrunde liegenden Annahmen

und Voraussetzungen enge Grenzen gesetzt. Weitaus größere Möglichkeiten bieten dagegen numerische Simulationsmodelle in Verbindung mit einer Großrechenanlage, die auf der einen Seite unabhängig von Modellgesetzen sind und auf der anderen Seite nicht so engen Idealisierungen geometrischer und physikalischer Art unterliegen und darüber hinaus die Möglichkeit zu Parameterstudien bieten—sowohl bei der Erarbeitung von Stoffgesetzen und bei der Bestimmung ihrer Parameter als auch bei der Untersuchung von Großkavernen.

Ogleich in den vergangenen Jahren in mehreren Veröffentlichungen [3, 4, 5, 6, 11] auf spezielle Probleme des Stoffverhaltens von Salzgestein und des Tragverhaltens von Salzkavernen eingegangen wurde, fehlt bislang noch ein Konzept, nach dem die Dimensionierung unterirdischer Hohlräume vorgenommen werden kann und das Aussagen über die Standsicherheit ermöglicht.

### KONZEPT DER "KOMBINIERTEN STANDSICHERHEITSANALYSE"

Die im Hoch- und Ingenieurbau angewandte Sicherheitstheorie, die definierte Lasten und genormte Werkstoffeigenschaften mit Sicherheitsfaktoren versieht und so bei einem vorgegebenen statischen System zu eindeutigen Aussagen über die im System enthaltene Sicherheit führt, ist zumindest auf unausgekleidete unterirdische Hohlräume nicht ohne weiteres übertragbar. Denn einerseits hängen die auftretenden Beanspruchungsbedingungen von vielen, z. T. nur abschätzbaren Faktoren wie z.B. dem im Gebirge vorhandenen Primärspannungszustand, dem Bauverfahren oder wechselnden Betriebsbedingungen ab und andererseits sind die mit der Hohlraumherstellung und -verwendung verbundenen Beanspruchungen wegen einer nicht vorhandenen Auskleidung von Naturwerkstoffen aufzunehmen, die in ihren Materialeigenschaften weitgehend unbeeinflussbar sind und stark ortsveränderlich sein können. Da darüber hinaus eine direkte bautechnische Unterstützung der Tragwirkung des Gebirges z.B. durch eine Spritzbetonschale oder eine Ankerung weder von vornherein noch bei Bedarf erfolgen kann, müssen von der theoretischen Seite her sorgfältige Untersuchungen vorgenommen werden, die den Nachweis erbringen, daß das den Hohlraum umgebende Gebirge kurz- und langfristig in der Lage ist, die ihm übertragenen Beanspruchungen sicher aufzunehmen.

Angesichts der erforderlichen vielfältigen theoretischen Annahmen und Voraussetzungen reicht es jedoch nicht aus, nur solche Kriterien heranzuziehen, die auf einer Begrenzung der Materialbeanspruchung beruhen. Vielmehr müssen Messungen in situ hinzukommen, die einerseits Rückschlüsse auf das Konvergenzverhalten und darüber hinaus auf die Wirklichkeitsnähe des theoretischen Simulationsmodells erlauben und andererseits in Verbindung mit theoretischen Untersuchungen Aussagen über das künftige

Verhalten ermöglichen. Damit umfaßt die Standsicherheitsanalyse in einer kombinierten Form sowohl einen Teil mit theoretischen und labortechnischen Untersuchungen, die zu einem rechnerischen Nachweis der Standsicherheit führen, als auch einen Teil mit nachträglichen Messungen in situ, die einen Vergleich zwischen der theoretischen Voraussage und dem tatsächlichen Verhalten erlauben.

Für die kombinierte Standsicherheitsanalyse werden unter Berücksichtigung der vorhandenen rechen- und meßtechnischen Möglichkeiten folgende Kriterien und Forderungen vorgeschlagen:

1. An keiner Stelle in der Umgebung der Kaverne dürfen Zugspannungen auftreten, da die Zugfestigkeit von Salzgestein nur gering ist.
2. Die aufgrund von Triaxialversuchen ermittelten Bruchspannungen dürfen nicht überschritten werden. Näherungsweise kann für niedrige Spannungszustände von der Bruchbedingung nach Mohr-Coulomb ausgegangen werden, während für höhere Spannungszustände die Bruchbedingung nach v. Mises anzusetzen ist.
3. Die plastischen Zonen dürfen nur in der Umgebung des Hohlraums auftreten, da im Rahmen der physikalischen Idealisierung ein isotropes Kontinuum vorausgesetzt wird. Mit zunehmender Entfernung von der Symmetrieachse bzw. der Kavernenbohrung wächst die Wahrscheinlichkeit, daß diese Annahme infolge von Gesteinsinhomogenitäten und Diskontinuitätsflächen nicht zutrifft. Die erforderlichen Parameter für die Stoffgesetze lassen sich aus triaxialen Untersuchungen an Bohrkernen ermitteln. Der Sicherheitskoeffizient sollte zwischen 2,0 und 3,0 betragen.
4. Zur Vermeidung von Kriechbrüchen dürfen die effektiven Verzerrungen während der Betriebsdauer der Kaverne einen im Labor durch triaxiale indirekte Zugversuche zu bestimmenden Grenzwert nicht überschreiten. Auf Grund vorhandener Untersuchungsergebnisse kann dieser Grenzwert in grober Abschätzung zu  $\max \epsilon \leq 3\%$  angenommen werden.
5. Die Volumenkonvergenz darf im Betriebszeitraum einen noch näher zu bestimmenden Grenzwert nicht überschreiten, da den theoretischen Untersuchungen die Annahme geometrisch linearer Beziehungen zugrunde liegt. Vorerst wird eine zuverlässige Volumenänderung von  $\max. \Delta V = 5\%$  vorgeschlagen.
6. Die rechnerischen Voraussagen sind durch Messungen in situ zu bestätigen. Bei größeren Abweichungen ist ein erneuter Standsicherheitsnachweis unter Berücksichtigung der Meßergebnisse zu führen.

Diese Kriterien sind in Fig. 1 in tabellarischer Form zusammengestellt.

Während von der mathematisch-mechanischen und der labortechnischen Seite her die Grundlagen für einen Stand-

ANFANGSSPANNUNGSZUSTAND ( $t = 0$ ) $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z = 0$
BRUCHBEDINGUNG $c' \cdot \cos \varphi' - \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \cdot \sin \varphi' < R$
PLASTISCHE ZONEN $R_{pl} < 2D$ bzw. $< 2H$
EFFEKTIVE DEHNUNGEN $\epsilon_{eff}(t=t_r) \leq 3\%$
KLEINE VERFORMUNGEN VOLUMENDIFFERENZ $\Delta V(t=t_r) \leq 5\%$
MESSUNGEN IN SITU

Figur 1. Kriterien der "Kombinierten Standsicherheitsanalyse".

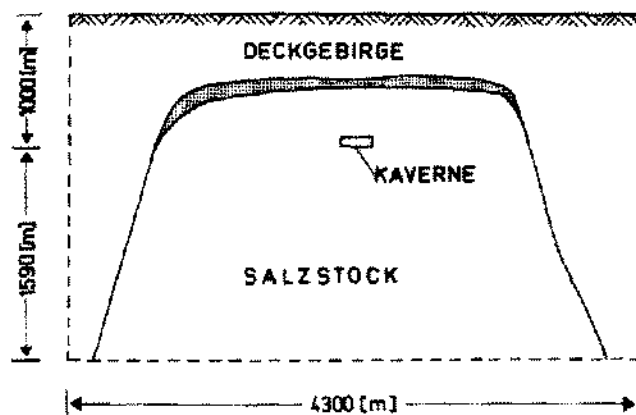
sicherheitsnachweis in der vorgeschlagenen Form vorhanden sind, bedarf es auf dem Gebiet der in situ Messungen zur Langzeitüberwachung noch weiterer grundlegender Arbeiten, die einerseits die Entwicklung von Meßgeräten mit ausreichender Genauigkeit für direkte Konvergenzmessungen zum Ziel haben und andererseits Möglichkeiten schaffen, über die Auswertung von Ausflußratenmessungen [7] auf indirektem Wege pauschale Aussagen über das Konvergenzverhalten der Kaverne zu erhalten. Hierzu gehören zusätzlich sowohl die Bestimmung des zeitlichen Temperaturverlaufs in der Kaverne und im umgebenden Gebirge als auch die Beobachtung des Bohrlochkopfdruckes in Abhängigkeit von der Zeit. Denn die gemessenen Ausflußmengen sind nicht nur auf die Volumenverkleinerung der Kaverne infolge Konvergenz des Salzgebirges zurückzuführen, sondern werden ebenfalls von der Volumenzunahme infolge Wiedererwärmung und von der Volumenverminderung aus der Kompressibilität des Speichermediums beeinflusst.

An Hand eines praktischen Beispiels aus dem Kavernenbau soll im folgenden gezeigt werden, wie die Untersuchung der Standsicherheit einer Kaverne von der theoretischen Seite her als erster Teil der "kombinierten Standsicherheitsanalyse" erfolgen kann.

### KAVERNE IN EINEM SALZSTOCK

Für die Speicherung von Erdöl in Salzkavernen bestehen grundsätzlich zwei Möglichkeiten: einerseits können mit einer Herstellungszeit von mehreren Jahren neue Kavernenfelder angelegt werden oder es können kurzfristig ursprünglich bei der Solegewinnung entstandene Kavernen für die Erdölspeicherung herangezogen werden. Auch in diesem zweiten Fall ist es erforderlich, die Standsicherheit unter den gegebenen Verhältnissen einer solegefüllten Kaverne und vor allem für den Fall einer ölgefüllten Kaverne zu untersuchen, wobei ungünstig von einem Absinken des Kaverneninnendruckes bei bestimmten Betriebsbedingungen um etwa ein Drittel auszugehen ist. Im folgenden Beispiel soll eine sehr flache Kaverne mit einem Verhältnis von Höhe zu Durchmesser  $H/D = 0.20$  untersucht werden. Die geologische Situation und die Lage der Kaverne sind in Fig. 2 dargestellt. Danach befindet sich die Kaverne in der Mitte eines Salzstockes, wobei das Kavernendach in einer Tiefe von etwa 1000 m liegt. Der Durchmesser der Kaverne beträgt  $D = 240$  m bei einer Kavernenhöhe von  $H = 48$  m. Hieraus ergibt sich ein Volumen von etwa  $V = 2 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>.

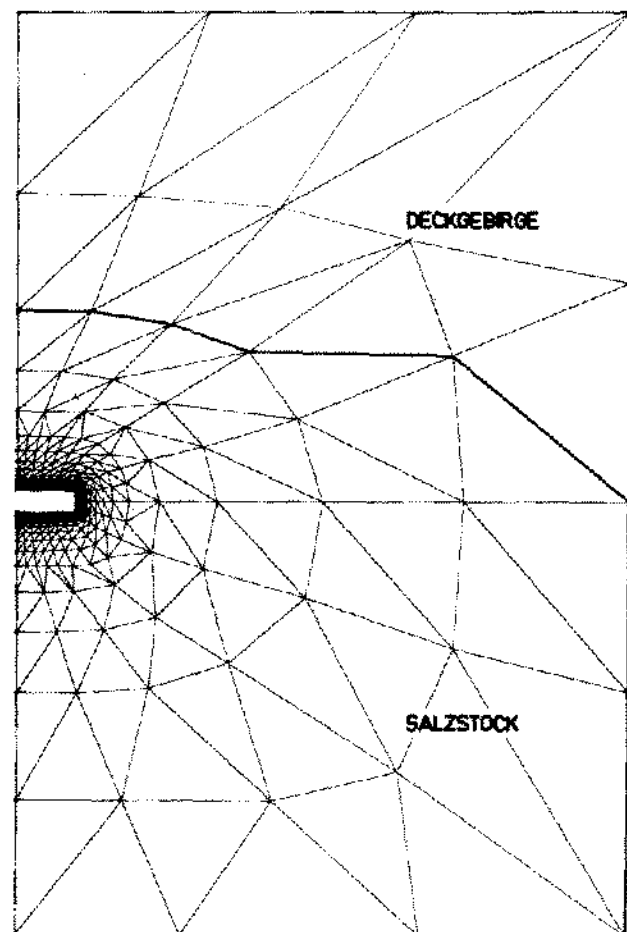
**Theoretisches Simulationsmodell.** Damit die Standsicherheit eines Tragsystems überhaupt in Zahlen auszudrücken ist, muß die Wirklichkeit hinsichtlich ihrer geometrischen und physikalischen Verhältnisse notwendigerweise durch idealisierte Modelle simuliert werden. Grundsätzlich stellt die Berechnung einer Salzkaverne ein dreidimensionales Problem dar. Um den Rechenaufwand insbesondere wegen der erforderlichen zeitlichen und der physikalisch nichtlinearen Iterationsrechnungen auf ein vertretbares Maß zu beschränken, sollte im allgemeinen durch geometrische Vereinfachungen je nach Problemstellung eine Reduzierung auf ein zweidimensionales rotationssymmetrisches oder ebenes Kontinuum erfolgen. Allerdings sind in jedem Fall sowohl die Verschiebungs- als auch die



Figur 2. Generelle geologische Situation.

Spannungsrandbedingungen mit ausreichender Genauigkeit zu erfüllen.

Für das vorliegende Beispiel wird zur geometrischen Idealisierung davon ausgegangen, daß die Kaverne näherungsweise eine rotationssymmetrische Form aufweist. Dann kann den Untersuchungen ein rotationssymmetrisches Kontinuum zugrunde gelegt werden. Fig. 3 zeigt das gewählte Modell mit der vorgenommenen Diskretisierung in finite Dreieckselemente. Die Größe des Modells erstreckt sich oberhalb der Kaverne bis zur Geländeoberfläche, unterhalb bis zu einer Tiefe von 1900 m und in horizontaler Richtung bis zu einer Entfernung von 1700 m von der Kavernenachse. Bei diesen Abmessungen kann auf Grund früherer Untersuchungen davon ausgegangen werden, daß die Randbedingungen keinen Einfluß auf die Spannungen und Verschiebungen in der Umgebung der Kaverne haben. Aufgrund des im Element vorhandenen konstanten Spannungs- und Verzerrungszustandes muß in Bereichen größerer Spannungsgradienten, d.h. im Kavernenrandbereich eine sehr feine Diskretisierung vorge-



Figur 3. Diskretisiertes geometrisches Modell.

nommen werden, während für die übrigen Bereiche eine gröbere Diskretisierung ausreicht. Der Einfluß des Elementnetzes auf die Ergebnisse sollte allerdings durch eine zweite Rechnung mit einem anderen Elementnetz überprüft werden.

Im Rahmen der physikalischen Idealisierung wird das tatsächliche Materialverhalten der anstehenden Gesteine durch theoretische Stoffgesetze angenähert, die die charakteristischen Materialeigenschaften beschreiben. Salzgestein zeigt ein ausgeprägt nichtlineares, zeitabhängiges Stoffverhalten, das durch phänomenologische und empirische Stoffgesetze näherungsweise erfaßt werden kann. In Anlehnung an [8] wird ein physikalisches Simulationsmodell gewählt, bei dem zeitunabhängiges und zeitabhängiges Stoffverhalten unabhängig voneinander untersucht werden. Der zeitunabhängige Teil bildet dabei den Ausgangszustand für den zeitabhängigen Teil, wobei für die zeitunabhängige Untersuchung von einem elastisch-plastischen Stoffgesetz ausgegangen wird, während für die zeitabhängigen Berechnungen ein empirisches Stoffgesetz nach [9] herangezogen wird.

Da bislang nur wenige Untersuchungen vorliegen, wird als elastisch-plastisches Stoffgesetz das Stoffgesetz nach Drucker/Prager verwendet, das ein idealelastisch-idealplastisches Materialverhalten beschreibt. Für den idealelastischen Bereich wird das Hookesche Stoffgesetz zugrunde gelegt, während als Fließgrenze die Bedingung Gl.(1) und als Stoffgesetz für den ideal-plastischen Bereich das aus Gl.(1) entwickelte assoziierte Fließgesetz angesetzt werden:

$$F(DP) = \alpha \cdot I_1 + \bar{I}_2^{1/2} - k = 0 \quad (1)$$

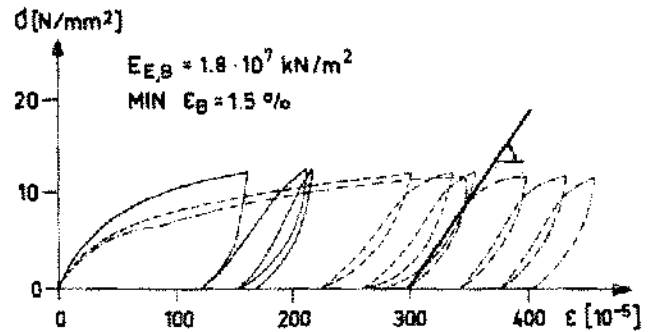
In Gl.(1) stellen  $I_1$  die erste Invariante des Spannungstensors und  $\bar{I}_2$  die zweite Invariante des Spannungstensors dar. Die Parameter  $\alpha$  und  $k$  sind Materialparameter, die ungünstig zu

$$\alpha = \tan \phi / \sqrt{9 + 12 \cdot \tan^2 \phi} \quad (2)$$

$$k = 3 \cdot c / \sqrt{9 + 12 \cdot \tan^2 \phi} \quad (3)$$

angenommen werden. Im Hauptspannungsraum beschreibt die Fließgrenzfläche nach Gl.(1) dann einen Kreiskegel, der innerhalb der Mohr-Coulombschen Pyramide liegt. Die Materialparameter  $\phi$  und  $c$  als Winkel der inneren Reibung und Kohäsion können dem Mohrschen Bruchdiagramm entnommen werden. Damit sind für den zeitunabhängigen Berechnungsteil folgende Materialparameter erforderlich, die in Laborversuchen zu bestimmen sind: Elastizitätsmodul  $E$ , Querkontraktionszahl  $\nu$ , Winkel der inneren Reibung  $\phi$  und Kohäsion  $c$ .

Fig. 4 zeigt die Ergebnisse einaxialer Druckversuche an Steinsalzproben. Aufgetragen sind die Spannungs-Deh-



Figur 4. Spannungs-Dehnungs-Linien von Steinsalz.

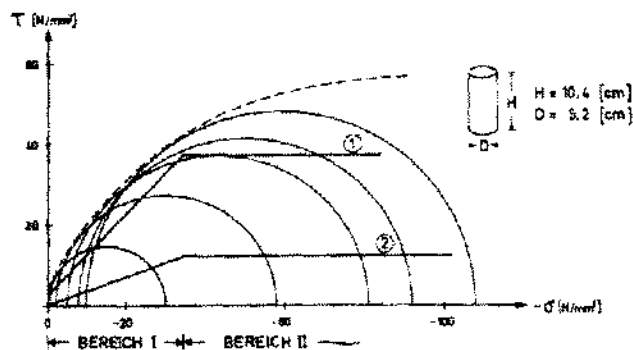
nungs-Linien von drei Versuchen, wobei eine maximale Auflastspannung von etwa einem Drittel der Bruchspannung mit einer Belastungsgeschwindigkeit von  $\dot{\sigma} = 0,1 \text{ N/(mm}^2 \cdot \text{sec)}$  aufgebracht wurde. Nach Erreichen der maximalen Spannung erfolgte eine vollständige Entlastung mit anschließender Wiederbelastung. Dieser Zyklus wurde noch mehrmals wiederholt. Es ist deutlich zu sehen, daß bei mehrmaligem Belastungswechsel eine Verfestigung des Materials eintritt. Hieraus darf allerdings nicht der Schluß gezogen werden, daß auch in jedem Fall in situ langfristig eine Verfestigung eintritt, die zu einer Abnahme und schließlich zu einem völligen Stillstand der Konvergenz führt.

Zur Ermittlung des Elastizitätsmoduls wird der dritte Lastzyklus herangezogen. Dabei ist jedoch zu bemerken, daß der Begriff "Elastizitätsmodul" nicht im klassischen Sinne zu verstehen ist, sondern lediglich als Verhältnis zwischen Spannungsänderung und Dehnungsänderung bei definierten Versuchsbedingungen.

Die in situ vorhandene Unregelmäßigkeit der gebirgsmechanischen Eigenschaften des Salzgesteins zeigt sich auch in den Laborergebnissen, so daß nur mit Mittelwerten gerechnet werden kann, die mit entsprechenden Sicherheitsfaktoren versehen werden müssen. Im vorliegenden Fall ergibt sich aus den Versuchen ein rechnerischer E-Modul von  $E = 1,0 \cdot 10^7 \text{ kN/m}^2$ .

Auf Grund der bei höheren Spannungszuständen vorhandenen ausgeprägten Fließeigenschaften wird in Anlehnung an [10] von einer rechnerischen Querkontraktionszahl von  $\nu = 0,45$  ausgegangen.

Das Bruchverhalten des Salzgesteins kann mit Hilfe von triaxialen Druckversuchen bestimmt werden, die zu der Mohrschen Hüllkurve führen. In Fig. 5 sind Bruchspannungskreise für verschiedene Seitendrücke angegeben. Es zeigt sich, daß bei höheren Seitendrücken keine Zunahme der aufnehmbaren Vertikalspannung mehr erfolgt, so daß die anfänglich ansteigende Hüllkurve allmählich in eine horizontale Gerade übergeht. Für praktische Berechnungen wird diese Hüllkurve im Bereich niedriger



Figur 5. Bruch- und Fließgrenzkurven für Steinsalz.

Spannungen durch eine Gerade mit einem bestimmten Neigungswinkel ersetzt, während für den Bereich höherer Spannungen eine Gerade mit einem Neigungswinkel von Null angenommen wird. Damit beschreibt die Kurve 1 die Bruchfestigkeit des Materials.

Eine Fließgrenze im Sinne einer Grenze zwischen elastischem und elastisch-plastischem Verhalten ist i.a. nicht allein auf Grund von Materialuntersuchungen festzustellen. Prinzipiell bestehen zwei Möglichkeiten zu einer Definition: entweder wird eine technische Fließgrenze bei Erreichen einer bestimmten bleibenden Dehnung festgelegt oder ein bestimmter Teil der Bruchfestigkeit wird als Fließgrenze angenommen. In [12] wird diese Grenze als Dauerstandfestigkeit bezeichnet. Gegenüber der Bruchfestigkeit ergibt sich eine Reduktion um den Faktor 2 . . . 3. Aus der Fließgrenzkurve können dann die Materialparameter  $\phi$  und  $c$  entnommen werden, die sich aus der Kurve 2 für den Bereich 1 zu  $\phi = 20^\circ$  und  $c = 0,0 \text{ N/mm}^2$  und für den Bereich 2 zu  $\phi = 0^\circ$  und  $c = 12,5 \text{ N/mm}^2$  ergeben.

Zur Untersuchung des zeitabhängigen Verhaltens wird das empirische Kriechgesetz nach [9] entsprechend Gl.(4) angenommen, das neben einer zeitlichen Verfestigung auch den Einfluß der Temperatur erfaßt:

$$\dot{\epsilon} = B \cdot \bar{I}_2 \cdot T^{b_1} \cdot t^{b_2} \cdot D_0 \cdot \sigma \quad (4)$$

In Gl.(4) bedeuten

$b_1, b_2, b_3, B$	= Materialparameter
$\bar{I}_2$	= zweite Invariante der Deviatorspannungen,
$T$	= Temperatur [°K],
$t$	= Zeit [h]
$D_0$	= elastische Nachgiebigkeitsmatrix mit $\nu = 0,5$ ,
$\sigma$	= Spannungsvektor [psi],
$\dot{\epsilon}$	= Vektor der Verzerrungs- geschwindigkeiten

Die Kennwerte  $b_1, b_2, b_3$  und  $B$  können experimentell durch triaxiale Kriechversuche bestimmt werden. Allerdings sind diese Kennwerte davon abhängig, welche Dehnungen zum

Zeitpunkt des Kriechbeginns vorliegen. Unterschiedliche Definitionen des Kriechbeginns führen bei gleichen Kriechkurven zu voneinander abweichenden Kriechkennwerten, die dann unterschiedliche Aussagen zum Langzeitkriechverhalten zur Folge haben.

Im folgenden werden die in [9] angegebenen Kennwerte angenommen, die sich zu

$$b_1 = 0,975; b_2 = 9,65; b_3 = -0,90; B = 15,6 \cdot 10^{-38}$$

ergeben. Als Gebirgstemperatur werden  $50^\circ\text{C}$  bzw.  $323^\circ\text{K}$  entsprechend der vorhandenen Kavernentiefe angesetzt.

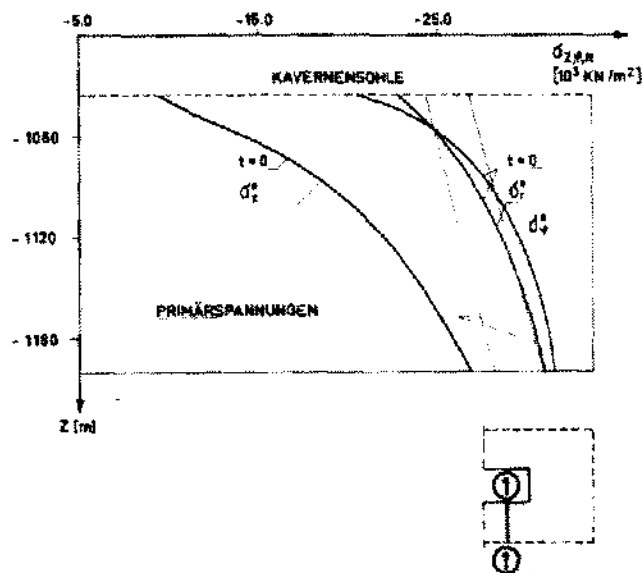
Mit dem Kriechgesetz nach Gl.(4) wird das Primärkriechen beschrieben, das durch eine abnehmende Kriechgeschwindigkeit gekennzeichnet ist. Der Übergang zum Sekundärkriechen mit konstanter Kriechgeschwindigkeit kann durch eine Veränderung des Potenzparameters  $b_3 \rightarrow 0$  erfaßt werden. Allerdings gibt es zur Zeit noch keine Untersuchungen, die eine Grundlage für entsprechende Berechnungen bieten könnten.

**Berechnungs- und Belastungsannahmen.** Neben den geometrischen und physikalischen Idealisierungen zum Aufbau eines theoretischen Simulationsmodells werden folgende weitere Annahmen getroffen:

1. Der im Salzgebirge vorhandene Primärspannungszustand entspricht in vertikaler Richtung dem geostatischen Überlagerungsdruck. In horizontaler Richtung wird von  $K_0$ -fachen Primärspannungen ausgegangen, wobei ein Wert von  $K_0 = 1,1$  angenommen wird, der gegenüber einem Wert von  $K_0 = 1,0$  zu einem ungünstigeren Spannungszustand im Gebirge führt und damit evtl. vorhandene tektonische Restspannungen abdeckt. Eine Reduzierung dieser auf der sicheren Seite liegenden Annahme sollte nur auf der Grundlage entsprechender Messungen in situ vorgenommen werden.
2. Das Salzgestein sowie das den Salzstock umgebende Gebirge sind homogen und isotrop.
3. Die Kaverne wird in den endgültigen Abmessungen zeitunabhängig hergestellt.
4. Die Kaverne ist mit Öl gefüllt. Die Ölsäule steht bis zum Bohrlochkopf mit einem Kopfdruck von  $p_K = 0,0 \text{ N/mm}^2$ .

**Ergebnisse und Standsicherheitsnachweis.** Mit den in den vorherigen Abschnitten zusammengestellten Annahmen und Voraussetzungen wurden die Spannungs- und Verschiebungsfelder in der Umgebung der Kaverne für den Lastfall "Öleinlagerung" berechnet.

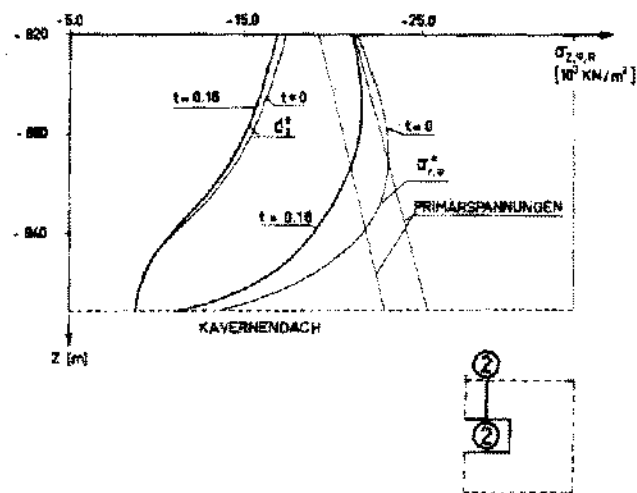
Fig. 6 zeigt zunächst die Spannungsverteilung im Vertikalschnitt  $r = 90 \text{ m}$  im Bereich der Kavernensole, die mit dem Hookeschen Stoffgesetz ermittelt wurde. Während die Tangential- und Radialspannungen qualitativ und quantitativ sehr ähnlich sind und nur im unmittelbaren Kavernensohlbereich von den primären Spannungen abweichen,



Figur 6. Spannungsverlauf bei  $r = 90$  m, Schnitt 1-1.

ergeben sich für die Vertikalspannungen weitaus größere Veränderungen, die auf den in der Kaverne vorhandenen Innendruck und den großen Kavernendurchmesser zurückzuführen sind und die erst nach etwa 150 m unterhalb der Sohle in den ungestörten Zustand übergehen. An Hand dieser Spannungsverteilung läßt sich bereits erkennen, daß auf Grund der relativ großen Differenz zwischen vertikalen und horizontalen Spannungen erhebliche plastische und viskose Verformungen und damit verbunden auch erhebliche Spannungsumlagerungen zu erwarten sind. Dieser nach Hooke ermittelte Spannungszustand wird von einigen Autoren [2, 3, 4, 9] auch als Ausgangsspannungszustand zur Untersuchung des Langzeitverhaltens herangezogen.

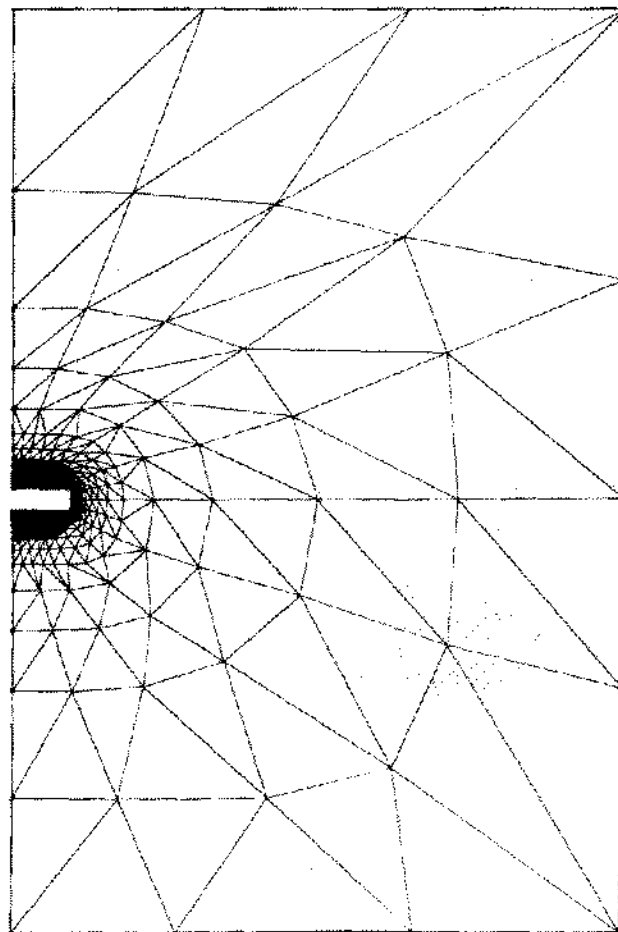
Die Spannungsverteilung im Kavernendachbereich in einer Entfernung von  $r = 30$  m von der Achse ist in Fig. 7



Figur 7. Spannungsverlauf bei  $r = 30$  m, Schnitt 2-2.

dargestellt und zwar für die Zeitpunkte  $t = 0$  [h] und  $t = 0,16$  [h]. Bereits nach  $t = 0,16$  [h] sind weitgehend die mit dem Kriechen verbundenen Spannungsumlagerungen erfolgt, so daß sich für Zeiten  $t = 0,16$  [h] die aufgetragene Spannungsverteilung nicht mehr wesentlich ändert. Dabei erfolgen die Spannungsumlagerungen so, daß die Spannungsdifferenzen verkleinert werden. Bemerkenswert ist allerdings, daß sich die größten Spannungsdifferenzen nicht unmittelbar am Kavernendach, sondern etwa 40 m oberhalb einstellen.

Die sich nach dem Stoffgesetz von Drucker/Prager ergebenden plastischen Zonen, die Gebirgsbereiche kennzeichnen, in denen größere Spannungsumlagerungen und damit verbunden plastische Verformungen auftreten, zeigt Fig. 8. Während die plastischen Zonen sich sowohl oberhalb als auch unterhalb der Kaverne bis zu einer Entfernung von 60 m vom Kavernenrand erstrecken, sind in der vertikalen Kavernenwand wesentlich geringere plastische Zonen vorhanden. Insgesamt beschränken sich die plastischen Zonen auf Bereiche, die als vertretbar anzusehen sind.



Figur 8. Plastische Zonen.

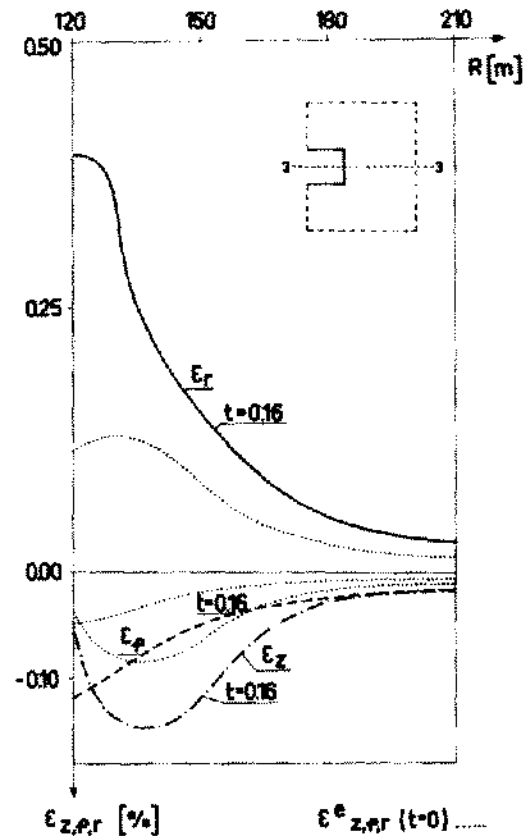
Einen Überblick über die qualitativen Verformungen der Kaverne in einer stark überhöhten Darstellung gibt Fig. 9. Danach ergeben sich im Kavernendach und in der Kavernensohle Vertikalverschiebungen, die auf eine weitgehend gleichmäßige Absenkung des Daches bzw. Hebung der Sohle hinweisen. Entsprechend treten in diesen Bereichen nur geringe horizontale Verschiebungen auf. Die sich im Bereich der Kavernenwand einstellenden radialen Verschiebungen sind wesentlich geringer als die vergleichbaren vertikalen Dach- und Sohlverschiebungen.

Betrachtet man jedoch die zugehörigen Dehnungen, so zeigt sich, daß sich im Gegensatz zu den Verschiebungen im Wandbereich größere Radialdehnungen ergeben als Vertikaldehnungen in Dach und Sohle. In Fig. 10 sind die Dehnungen in einem horizontalen Schnitt durch die Kavernenwand dargestellt. Bemerkenswert ist, daß trotz allseitiger Druckspannungen positive, d.h. Zug-Dehnungen in radialer Richtung auftreten, die mit der Zeit erheblich anwachsen und wesentlich größere Werte annehmen als die negativen Vertikal- und Tangentialdehnungen. Ähnliche Verhältnisse liegen auch im Kavernendach- und Kavernensohlbereich vor.

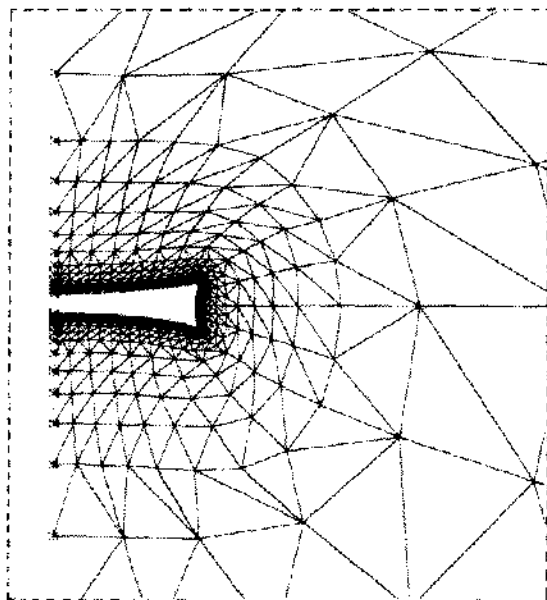
Fig. 11 zeigt in einer prinzipiellen Skizze die generellen Zusammenhänge. Vor Kavernenherstellung befindet sich ein Gebirgsselement, das in der Nähe des zukünftigen Hohlraumrandes liegt, unter allseitigen Druckspannungen. Das Herstellen des Hohlraumes und die damit verbundenen Spannungsumlagerungen führen zu einer Abnahme der Spannungen, die senkrecht zum Hohlraum am größten ist. Trotz des auch jetzt noch vorhandenen allseitigen Druckzustandes erfährt das Gebirgsselement in senkrechter Richtung zur Kavernenwand hin infolge der unterschied-

lichen Druckspannungen eine positive Dehnung, die auf der in dieser Richtung freien Verformungsmöglichkeit beruht.

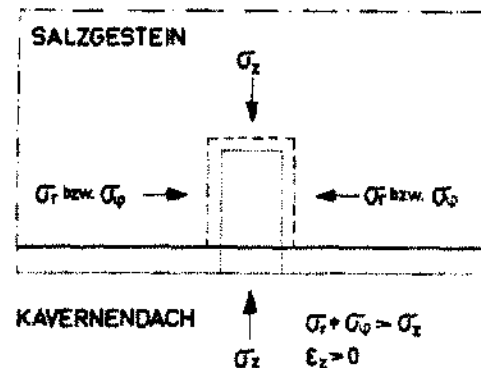
Dieses Verformungsverhalten kann im Laborversuch durch einen sog. "indirekten Zugversuch" simuliert werden [8]. Dabei ergeben sich, abhängig von Hauptspannungsdifferenz und Temperatur, Kriechbrüche senkrecht zur Achse des Prüfkörpers, die bei wesentlich geringeren



Figur 10. Kriechdehnungen im Kavernenwandbereich im Schnitt 3-3.



Figur 9. Qualitative Verschiebungen im Kavernenbereich.

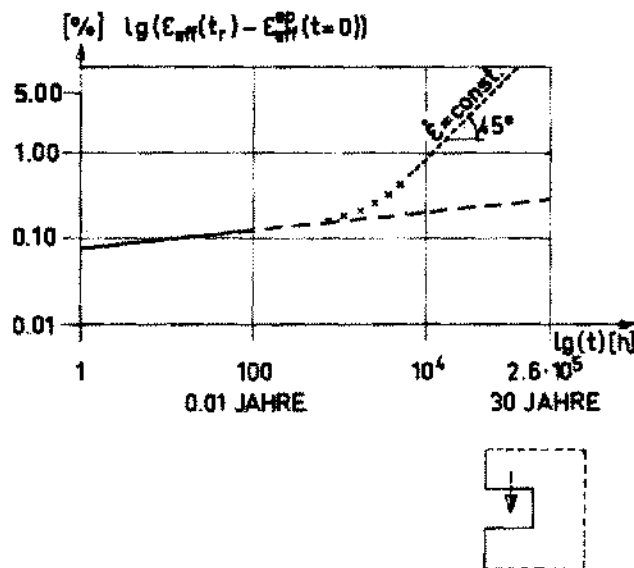


Figur 11. Spannungs- und Verformungszustand am Kavernenrand.



Dehnungen auftreten als in triaxialen Druckversuchen. Die in Bergwerken oft beobachteten Abschalungen können auf diese Weise erklärt werden. Damit wird auch deutlich, daß zum Auftreten von Brüchen bzw. Rissen nicht unbedingt Zugspannungen erforderlich sind, d.h. der Nachweis nicht auftretender Zugspannungen reicht als Standsicherheitsnachweis nicht aus. Vielmehr muß zusätzlich auch nachgewiesen werden, daß innerhalb relevanter Zeiträume die vorausgerechneten Kriechdehnungen die aus Laborversuchen zu bestimmenden Kriechbruchdehnungen einschließlich eines Sicherheitsfaktors nicht erreichen.

Das Ergebnis einer solchen Rechnung zeigt Fig. 12. Aufgetragen ist in einem doppeltlogarithmischen Diagramm der Verlauf der effektiven Kriechdehnungen im Schnitt  $r = 80$  m für den Bereich 30 m oberhalb des Kavernendaches. Den Ausgangsspannungszustand für die Kriechuntersuchung mit dem Stoffgesetz nach Gl. (4) bildet der mit dem Stoffgesetz nach Gl. (1 . . . 3) ermittelte Spannungszustand. Entsprechend dem Kriechgesetz ergibt sich der zeitliche Verlauf der Kriechdehnungen im doppeltlogarithmischen Maßstab zu einer Geraden, deren Neigung vom Zeitexponenten bestimmt wird. Da sich nach einer gewissen Zeit der Spannungszustand nicht mehr wesentlich ändert, kann eine Extrapolation vorgenommen werden. Fig. 12 zeigt z.B., daß nach etwa 30 Jahren die effektiven Gesamtdehnungen für den betrachteten Bereich unter  $\epsilon_{eff} = 1.0\%$  liegen. Die Voraussetzung hierfür ist jedoch, daß die im Stoffgesetz angenommene Zeitverfestigung für den gesamten Zeitraum zutrifft. Ein Übergang zum "steady-state"-Kriechen, das im Diagramm eine Gerade mit einer Neigung von  $45^\circ$  ergibt, würde bei einem frühen Zeitpunkt seines Eintretens zu einer erheblichen Zunahme



Figur 12. Effektive Kriechdehnungen im Kavernendachbereich.

der Kriechdehnungen führen. Da mit Laboruntersuchungen, die in der Regel einen begrenzten, relativ kurzen Zeitraum erfassen, nur Abschätzungen über das Kriechverhalten vorgenommen werden können, ist durch langfristige Messungen in situ eine Überprüfung der ermittelten Konvergenz vorzunehmen.

Auf der Grundlage der durchgeführten Berechnungen kann nun eine Beurteilung der Standsicherheit entsprechend den in Fig. 1 aufgestellten Kriterien und Forderungen erfolgen:

1. Zugspannungen treten nicht auf.
2. Die Mohr-Coulombsche Bruchbedingung (Kurve 1 nach Fig. 5) wird nicht verletzt.
3. Die plastischen Zonen erstrecken sich über einen Bereich, der noch als zulässig angesehen werden kann.
4. Die maximal im betrachteten Zeitraum auftretenden effektiven Gesamtdehnungen sind kleiner als 3%.
5. Die gesamten Volumenänderungen sind geringer als 5%.

Damit sind für das vorliegende Beispiel die von der theoretischen Seite her geforderten Nachweise erbracht. Bei einem Überschreiten einer dieser Bedingungen sind entweder nähere Untersuchungen erforderlich oder es sind Änderungen in der Kavernendimensionierung oder im Betriebsplan vorzunehmen. Dieser theoretische Nachweis stellt eine notwendige Voraussetzung für einen Standsicherheitsnachweis dar, ist allein ohne die in Fig. 1 im letzten Kriterium geforderten Messungen in situ jedoch nicht hinreichend.

## LITERATUR

1. Dreyer, W. 1968. Modellmechanische Untersuchungen zur Abschätzung der Standsicherheit von kavernenartigen Hohlräumen im Salzgebirge. 10. Ländertreffen des IBG.
2. Serata, S. 1960. Principles of Structural Stability of Underground Salt Cavities. J. of Geoph. Research W.
3. Langer, M. und E. Hofrichter. 1969. Standsicherheit und Konvergenz von Salzkavernen. Proc. Intern. Symp. on large Permanent Underground Openings, Oslo.
4. Anderson, C.A. 1975. Cavity Stability: Finite Element Analysis for Steady and Transient Creep. United States Energy Research and Development Administration, LA-5769.
5. Fossum, A.F., Callahan, G.D. and Hansen, F.D. 1977. Storage Room Structural Analysis for Radioactive Waste Isolation in Rock. Rock Store 2.
6. Krenk, S. 1977. Spherical and Cylindrical Cavities in Rock Salt. The Technical University of Denmark, Report No. 126, Okt. 1977.
7. Röhr, H.U. 1969. Über die beim Ausspülen eines Untergrundspeichers in einem Salzstock wirksamen Einflußgrößen

- im Hinblick auf die Gewinnung von Planungs- und Überwachungsunterlagen. Erdöl und Kohle-Erdgas-Petrochemie 22.
8. Nair, K. and Decra, D.U. 1969. Creep Behavior of Salt in Triaxial Extension Tests. Symposium on Salt.
  9. Thoms, L.R., Char, C.V. and Bergeron, W.J. 1972. Finite Element Analysis of Rock-Salt Pillar Models, Rock Mechanics.
  10. Lomenick, T.F. and Bradshaw, R.C. 1969. Deformation of Rock Salt in Openings Mined for the Disposal of Radioactive Wastes, Rock Mechanics.
  11. Nair, K., Chang, C.J., Singh, R.D. and Abdullah, A.M. 1974. Time-Dependent Analysis to Predict Closure in Salt Cavities. 4th Int. Symp. on Salt, Northern Ohio Geological Society.
  12. Knoll, P. 1973. Beitrag zum Einfluß der Zeit auf die Verformung und den Bruch von Salzgestein. Freiburger Forschungshefte, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie.