

Zur Frage des Standsicherheitsnachweises von Hohlräumen in Salzgesteinen

Horst Albrecht, Dieter Meister, Gerd-Henrich Stork und Manfred Wallner

*Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
Silleweg 2, D-3000 Hannover 51,
Federal Republic of Germany*

ZUSAMMENFASSUNG

Bedingt durch den Vorstoß des Bergbaus in größere Tiefen und sein Bestreben nach verlustarmem Abbau sowie infolge einer intensiveren Nutzung von Salzlagerstätten für Speicher- und Deponiezwecke, steigen die Anforderungen an den Standsicherheitsnachweis für Untertagebauwerke in Salzgesteinen. In der vorliegenden Arbeit wird ein aus geologischen Untersuchungen und aus aufeinander abgestimmten experimentellen und rechnerischen Untersuchungen bestehendes geotechnisches Konzept für die Beurteilung der Standsicherheit von Hohlräumen in Salz erläutert. Beurteilungsgrundlage sind die ingenieurgeologische Aufnahme und geotechnische Kennwerte, die im Labor (z.B. Kurz- und Langzeitversuche bei unterschiedlichen Temperaturen) sowie in situ (Ultraschall-, Dilatometeruntersuchungen, Konvergenz- und Extensometermessungen) gewonnen werden. Diese Kennwerte und die ingenieurgeologische Kartierung sind die Basis für numerische Berechnungen. Das Konzept für die Standsicherheitsanalyse wird anhand einiger Beispiele erläutert.

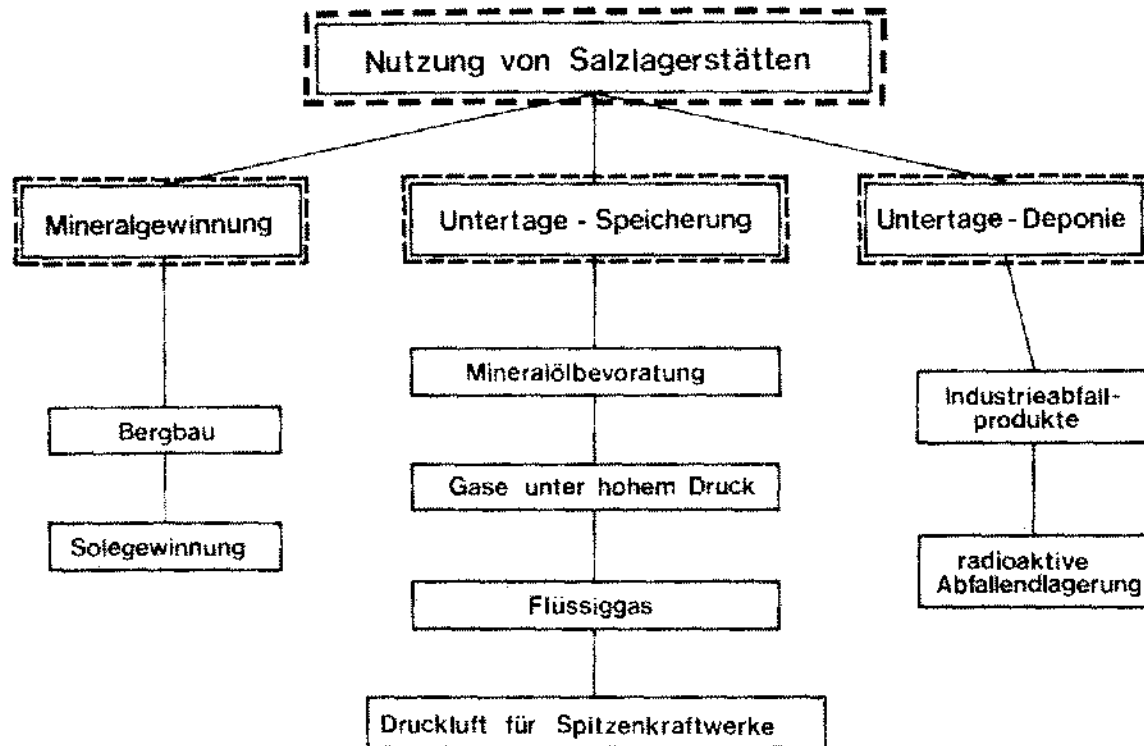
Summary. Due to the advance of mining operations towards greater depth, the effort of minimizing extraction losses and the intensified use of salt deposits for storage and waste-disposal purposes, the proof of structural stability of underground openings in evaporite rocks has to satisfy high requirements. An engineering geological concept for the evaluation of the structural stability is presented in this paper. This concept is composed of interdependent geological investigations, geotechnical measurements and calculations which have to be adapted to each other. The evaluation of stability is based on the results of the engineering geological investigation and on geomechanical values derived from laboratory measurements (short- and long-term tests at different temperatures) as well as from in-situ measurements (ultrasonic-, dilatometer-, convergency- and extensometer measurements). These results are input data for modern numerical calculations. The concept for the analysis of structural stability is illustrated by some examples.

EINLEITUNG

Die zunehmende Nutzung von Salzlagerstätten (Fig. 1) für Speicher- und Deponiezwecke und eine Reihe von Katastrophen im Steinsalz- und Kalibergbau stellen an die Stabilität der untertägigen Hohlräume erhöhte Anforderungen. Gebirgsschläge katastrophalen Ausmaßes infolge falscher Pfeilerdimensionierung und fehlerhafter Abbauführung, Laugen- und Wassereintritte, die Bemessung

des maximalen Speicherdruckes von Druckluftkavernen, die Berücksichtigung des thermischen Problems bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle, um nur einige Probleme zu nennen, verdeutlichen die Notwendigkeit eines praxisnahen Standsicherheitsnachweises.

Ein untertägiger Hohlraum kann als standsicher angesehen werden, wenn der Nachweis erbracht wird, daß 1) während und nach der Erstellung des Bauwerkes keine unzulässigen Verformungen weder im Hohlraum selbst



Figur 1. Nutzung von Salzlagerstätten.

noch an der Tagesoberfläche auftreten, die die Funktionsfähigkeit des Bauwerkes bzw. die Sicherheit übertage beeinträchtigen, 2) das Gebirgstragvermögen örtlich nicht so erschöpft wird, daß sich schlagartige oder allmähliche Verbrüche von Hohlräumen ereignen, 3) keine Laugen- und Wassereinbrüche zu befürchten sind und 4) plötzliche Gasausbrüche vermieden werden.

PROBLEMSTELLUNG

Durch die Herstellung eines unterirdischen Hohlraumes bzw. Hohlraumsystems wird der natürliche Gleichgewichtszustand des Gebirges gestört. Das unterirdische Bauwerk ist als stabil anzusehen, wenn der neu sich einstellende Spannungszustand nicht zu Bruch- oder Fließerscheinungen führt, die die Funktionsfähigkeit des Bauwerkes beeinträchtigen bzw. sicherheitsrelevante Auswirkungen auf das Deckgebirge und die Tagesoberfläche hervorrufen.

Die Standsicherheit wird von natürlichen und technisch bedingten Faktoren beeinflusst (Fig. 2), die in enger wechselseitiger Beziehung zueinander stehen. Die Kenntnis der jeweiligen Zusammenhänge ist Voraussetzung für die Erstellung eines vernünftigen Konzeptes zur Standsicherheitsanalyse. Auf einige der Einflußfaktoren soll deshalb kurz hingewiesen werden:

Natürliche Einflußfaktoren sind durch die geologischen Verhältnisse und die festigkeitsmechanischen und rheologischen Kennwerte des Gebirges vorgegeben.

Salzlagerstätten größerer Mächtigkeit sind im Hinblick auf die Lösung praktischer Probleme des Untertagebaus im allgemeinen genügend homogen und isotrop. Dennoch können auch in Salzlagerstätten physikalische Eigenschaften wie die wichtigen rheologischen Kenngrößen Elastizität, Viskosität, Plastizität und Fließgrenze in verschiedenen Raumrichtungen unterschiedlich ausgeprägt sein. Dies gilt insbesondere in Bereichen, in denen der Schichtenaufbau durch die Einlagerung kompetenter Gesteine wie Anhydrit, Dolomit, Salzton und insbesondere des zu Spröbruch und Gebirgsschlag neigenden Carnallits gestört ist. Aufgrund der Änderung der Materialeigenschaften an den Schichtgrenzen stellen diese Diskontinuitätsflächen dar, die im Zusammenhang mit den Lagerungsverhältnissen eine deutliche Anisotropisierung des Gebirges bewirken können.

Als Beispiele für extreme unterschiedliche Lagerungsverhältnisse in Salzlagerstätten mögen hier die mehr oder minder flache Lagerung an Werra und Fulda und die mit intensiver Fließfaltung verbundene steile Lagerung in den Diapiren NW-Deutschlands genannt sein. Zusätzliche Inhomogenitäten stellen hier die teilweise innerhalb der hochteilbeweglichen Salzmasse liegenden Schollen und Blöcke des Hauptanhydrits dar, die die komplizierte Faltung des Salzes nicht bruchlos mitvollziehen konnten.

Infolge der Fließfähigkeit des Salzes werden Spannungsspitzen durch Verformungen abgebaut. Nennenswerte tektonische Restspannungen sind deshalb im allgemeinen

nicht zu erwarten. Dennoch sollte geprüft werden, ob aufgrund der geologischen Geschichte der Lagerstätte mit solchen Restspannungen gerechnet werden muß.

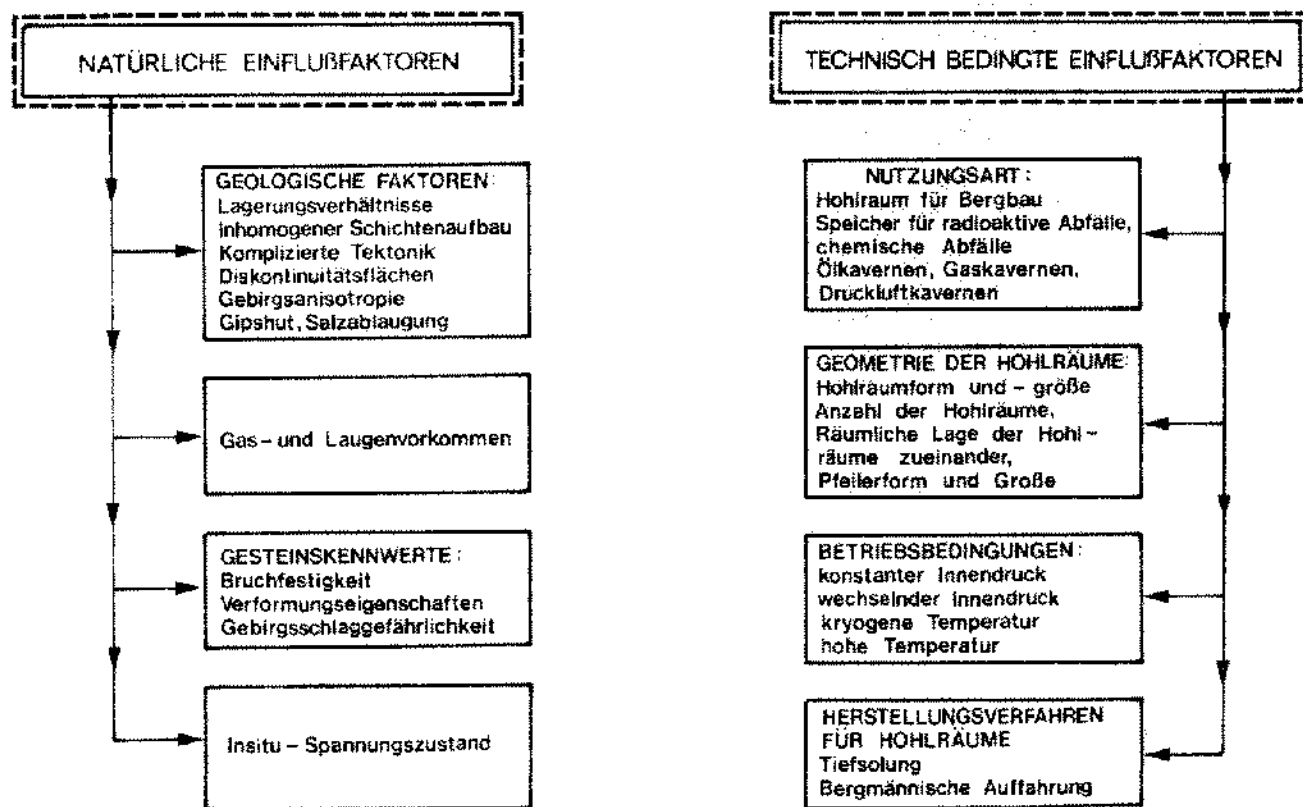
Natürliche Einflußfaktoren von besonderer Bedeutung für die Sicherheit von Untertagebauwerken sind Gas- und Laugenvorkommen. Die bisher durch Gas- und Laugenausbrüche im Kalibergbau verursachten volkswirtschaftlichen Schäden sind erheblich. Die Einbeziehung dieser Problematik in alle standsicherheitsrelevanten Überlegungen und das Vorsehen von Bekämpfungsmethoden stellt daher eine unabdingbare Forderung dar.

Technisch bedingte Einflußfaktoren stehen mit der Nutzung des unterirdischen Bauwerkes, den Betriebsbedingungen und dem Herstellungsverfahren in Zusammenhang. Ganz wesentliche Parameter sind hier natürlich Form, Größe und Anzahl der Einzelhöhlräume sowie ihre räumliche Lage zueinander. Dabei ist jedoch zu beachten, daß auch diese Einflußgrößen nicht immer frei gewählt werden können. Ein Grubengebäude zur Rohstoffgewinnung wird beispielsweise durch die räumliche Lage des oder der abzubauenen Flöze und deren Mächtigkeit weitgehend festgelegt. Da der Abbau den Flözen nachgehen muß, kann der Bergbau ungünstige geometrische Anordnungen des Grubengebäudes praktisch nur durch Inkaufnahme erhöhter Abbauverluste vermeiden. Der Bemessung der tragenden Elemente wie Pfeiler und Schweben kommt deshalb ent-

scheidende Bedeutung zu. Auf die unterschiedliche Anordnung der Baufelder und daher andersgelagerten Probleme einer Standsicherheitsuntersuchung in flacher und steiler Lagerung muß hier nicht näher hingewiesen werden.

Höhlräume zur Speicherung von Energieträgern oder zur Endlagerung umweltgefährdender Abfallstoffe sind nicht a priori an bestimmte Gebirgsbereiche gebunden. Kavernenform und -größe können unter Berücksichtigung des Nutzungszweckes und der Gebirgsverhältnisse so gewählt werden, daß sicherheitsrelevante Spannungsanhäufungen nicht zu befürchten sind. Allerdings liegen beispielsweise bei der Erstellung einer Speicherkaverne im Tiefsolverfahren normalerweise weit weniger geologische Informationen vor als im Untertagebergbau, wo die Grubenaufschlüsse einen weitgehenden Einblick in die Lagerungsverhältnisse erlauben. Daher können unerwartete Einlagerungen nicht solfähiger oder besonders leicht löslicher Gesteine zu Abweichungen von der optimalen Kavernenform führen und ungünstige Spannungsverhältnisse an der Kavernenleibung zur Folge haben. Zwar beeinträchtigen kleinere Nachbrüche nicht die Funktion einer Einzelkaverne, aber bei der Bemessung von Pfeilern und Schweben größerer Kavernenfelder müssen derartige, geologisch bedingte Unregelmäßigkeiten der Kavernenform von vornherein berücksichtigt werden.

Beim Entleeren von Vorratskavernen für Rohöl und



Figur 2. Einflussfaktoren auf die Standsicherheit.

Raffinerieprodukte wird das Salzgebirge angelöst, wenn die Verdrängung des Lagergutes mit Frischwasser erfolgt. Die Lösungseffekte bei mehrmaligem Umschlag der Speicherflüssigkeit sind deshalb in die Planungen miteinzubeziehen.

Eine weitere wichtige Rolle bei der Stabilitätsbetrachtung von Speicherkavernen spielt der Innendruck, der der Hohlraumkonvergenz entgegen wirkt. Bei der Speicherung von Gasen unter hohem Innendruck ist jedoch darauf zu achten, daß der Frac-Druck des Gebirges nicht überschritten wird. Kurzzeitige Innendruckschwankungen, wie sie insbesondere bei Druckluftspeichern für Luftspeicher-Gasturbinen-Kraftwerke auftreten, können zu Spannungsumlagerungen an der Kavernenwandung führen, deren Auswirkungen auf das Gebirge bei der Bemessung der Betriebsbedingungen (Entlastungsgeschwindigkeit, minimaler Innendruck) zu beachten sind. Starke Temperaturänderungen beeinflussen direkt die Materialeigenschaften des Salzes und damit die Standsicherheit des Untertagebauwerkes. Abkühlung infolge der Lagerung von LNG bei kryogenen Temperaturen führt zur Versprödung des Salzgesteins. Bei der Endlagerung hochaktiver Abfälle wird dem Gebirge radioaktive Zerfallswärme zugeführt und damit seine Fließfähigkeit beträchtlich erhöht. Darüber hinaus können durch erhebliche Temperaturwechsel ausgelöste Thermospannungen auch die Integrität des Unverritzten beeinträchtigen.

Als letztes sei als wesentlicher Einflußfaktor das Herstellungsverfahren erwähnt. Während das Tiefsolen eine äußerst gebirgsschonende Methode ist, haben untertägige Sprengarbeiten eine Lockerung des Gesteinsverbandes zur Folge.

KONZEPT DES STANDSICHERHEITSNACHWEISES

Die aufgezeigten vielfältigen Einflüsse auf die Standsicherheit verdeutlichen die Problematik eines Stabilitätsnachweises. Der im allgemeinen Ingenieurbau übliche Sicherheitsbegriff sowie der dazugehörige Standsicherheitsnachweis ist auf Untertagebauwerke deshalb nicht ohne weiteres übertragbar.

Beim Hohlraumbau untertage müssen unter dem Standsicherheitsnachweis ingenieurmäßige Untersuchungen verstanden werden, die das untertägige Bauwerk im Hinblick auf die geforderte Funktion beurteilen. Ziel der ingenieur-geologisch-geotechnischen Untersuchungen ist die Ausarbeitung von Unterlagen für eine sichere und wirtschaftliche Bauwerkserstellung einschließlich etwa erforderlicher Sicherungsmaßnahmen. Ein auf der Grundlage der ingenieur-geologisch-geotechnischen Untersuchungen geführter Standsicherheitsnachweis muß Berechnungen, Messungen während der Bauzeit und des Betriebes, Messung an praxisbezogenen Großmodellen, Betriebserfahrung, Dimensionierung und Bauverfahren als aufeinander abgestimmte und

sich ergänzende Teile eines umfassenden Gesamtkonzeptes enthalten (Fig. 3).

Ein endgültiger Aufschluß des Gebirges und damit das zweifelsfreie Erkennen der standsicherheitsrelevanten Gebirgsparameter liegt im allgemeinen erst im Verlauf der Projektbearbeitung und häufig sogar erst bei der Erstellung der Untertageanlage vor. Um bautechnische und finanzielle Risiken so klein wie möglich zu halten, ist daher das methodische Vorgehen zum Nachweis der Standsicherheit von großer Bedeutung (Fig. 4).

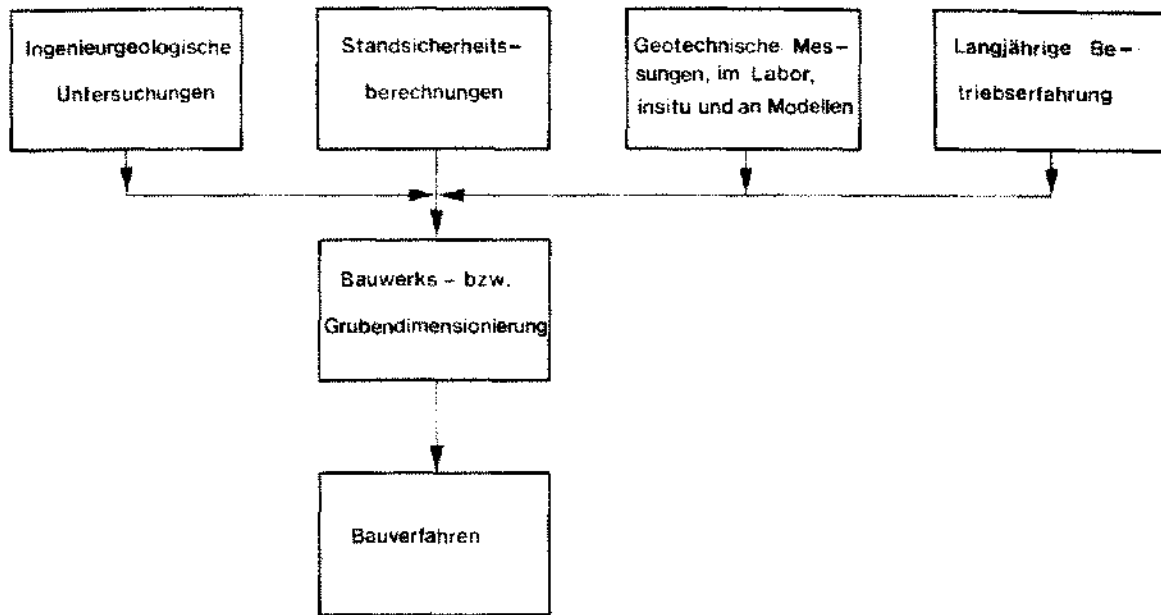
Im Rahmen des Vorentwurfes ist durch geeignete Untersuchungen festzustellen, ob das geplante Bauwerk unter Beachtung technischer und wirtschaftlicher Belange durchführbar ist. Die geotechnische Beurteilung des Gebirges als Vorstadium der Standsicherheitsuntersuchung muß bereits zu einem frühen Zeitpunkt in die Planung des Bauwerkes mit einbezogen werden. Vorberechnungen auf der Grundlage aus Erfahrung eingeschätzter geotechnischer Kennwerte können zu einem besseren Verständnis der Tragfunktion des Gebirges führen. Dabei lassen sich auch standsicherheitsrelevante Parameter erkennen, so daß gezielte geotechnische Untersuchungen geplant werden können.

Für den endgültigen Entwurf sind eingehende geologische und geotechnische Untersuchungen erforderlich. Bei schwierigen Bauprojekten kann es zweckmäßig und notwendig sein, Probeschächte oder -strecken aufzufahren. Mit Hilfe eines detaillierten Meßprogrammes und darauf abgestimmter Berechnungen können genauere Angaben für den Entwurf, die Dimensionierung und die Ausschreibung gefunden werden.

Die für den endgültigen Entwurf durchzuführende Standsicherheitsberechnung auf der Grundlage der in den Voruntersuchungen ermittelten und mit gewisser Sicherheit anzugebenden geotechnischen Kennwerte hat zunächst nur prognostischen Charakter. Zur rechnerischen und geotechnischen Aussage über die Standsicherheit gehört daher i.a. die Ausarbeitung eines entsprechenden Meßprogramms zur Kontrolle der Berechnungsergebnisse unmittelbar dazu. Aufgrund des schrittweise verbesserten Kenntnisstandes lassen sich gezielt die Ansatzpunkte für die Messungen festlegen.

Trotz allem wird man vor geologischen Überraschungen nicht sicher sein, so daß erst durch das geotechnische Meßprogramm während der Bauzeit und des Betriebes der Untertageanlage der praktische Nachweis der Standsicherheit erbracht wird. Zur Bewertung der Messungen ist eine begleitende Auswertung der geologischen Spezialaufnahme und der Vergleich mit Spannungs-Verformungsberechnungen insofern von großer Bedeutung, als die auf eine komplexe Gebirgsstruktur bezogenen Meßwerte richtig interpretiert werden müssen.

Die fortlaufende, den einzelnen Planungs-, Bau- und Betriebsphasen angepaßte Vervollständigung und Überprüfung des Kenntnisstandes zur geotechnischen Sicherheit



Figur 3. Konzept des Standsicherheitsnachweises.

	Aufgaben	Problemstellung	Lösungsmöglichkeiten
Planung Hauptentwurf	Beurteilung der Ausführbarkeit	Standortwahl Eignung des Gebirges Sicherheitstechn. relevant. Parameter Mangelnder Kenntnissstand	Geologische Karten, Archivunterlagen vorhandene Bohrungen, Erfahrungen mit anderen Bauwerken Schätzung auf der Grundlage von Erfahrungen u. Rechnungen Vorschläge für gezielte geophysikalische u. geomechanische Untersuchungen
	Ermittlung der zur Durchführung des Projektes erforderlichen Daten	Geologische Situation Ermittlung von Homogenbereichen Mechanisches Stoffverhalten Hydrogeologische Situation Mangelnder Kenntnissstand	Stratigraphische, petrographische, tektonische Aufnahme von Bohrungen, Stollen, Schächten, Geophys. Messungen Ingenieurgeologische Analyse der Erkundungsergebnisse Ingenieurgeologische Messungen im Labor und in-situ Bohrungen, Geophysik Ausarbeitung von Meßprogrammen für das Baustadium unter Berücksichtigung von Proberechnungen
Bau	Überprüfung und Korrektur der Planungsgrundlagen u. Überwachung der Hohlraum-schaffung	Kontrolle der Verformungen und Spannungen Geologische Überraschungen Gebirgsklassifizierung	Geomech. u. geophys. Messungen im Labor, am Bauwerk und in seiner Umgebung. Vergleich mit Berechnungsergebnissen Ingenieurgeologische Analyse, ggf. Modifizierung d. Projektes Ingenieurgeol. Spezialkartierung, Auswertung d. Messungen
Betrieb	Kontrolle und Gewährleistung der Langzeit-Standsicherheit	Kontrolle der Verformungen Erkennen von Störfällen Beseitigung von Störfällen	Installation langfristig zuverlässiger Meß- u. Überwachungssysteme Regelmäßige Auswertung entsprechend konzipierter Messungen Ingenieurgeol. Analyse aller vorhandenen Daten sowie zusätzlicher Untersuchungen, Vorschläge für Sicherungsmaßnahmen bzw. abgeänderte Betriebsbedingungen

Figur 4. Methodische Abfolge beim Standsicherheitsnachweis.

ist wesentlicher Bestandteil des beschriebenen Konzeptes. Dieses Konzept bedingt, daß ingenieurgeologische Untersuchungen, theoretische Berechnungen, geotechnische Messungen und Betriebserfahrungen nicht isoliert betrachtet werden können, sondern funktional zusammengehören.

DIE PRAKTISCHE STANDSICHERHEITSANALYSE

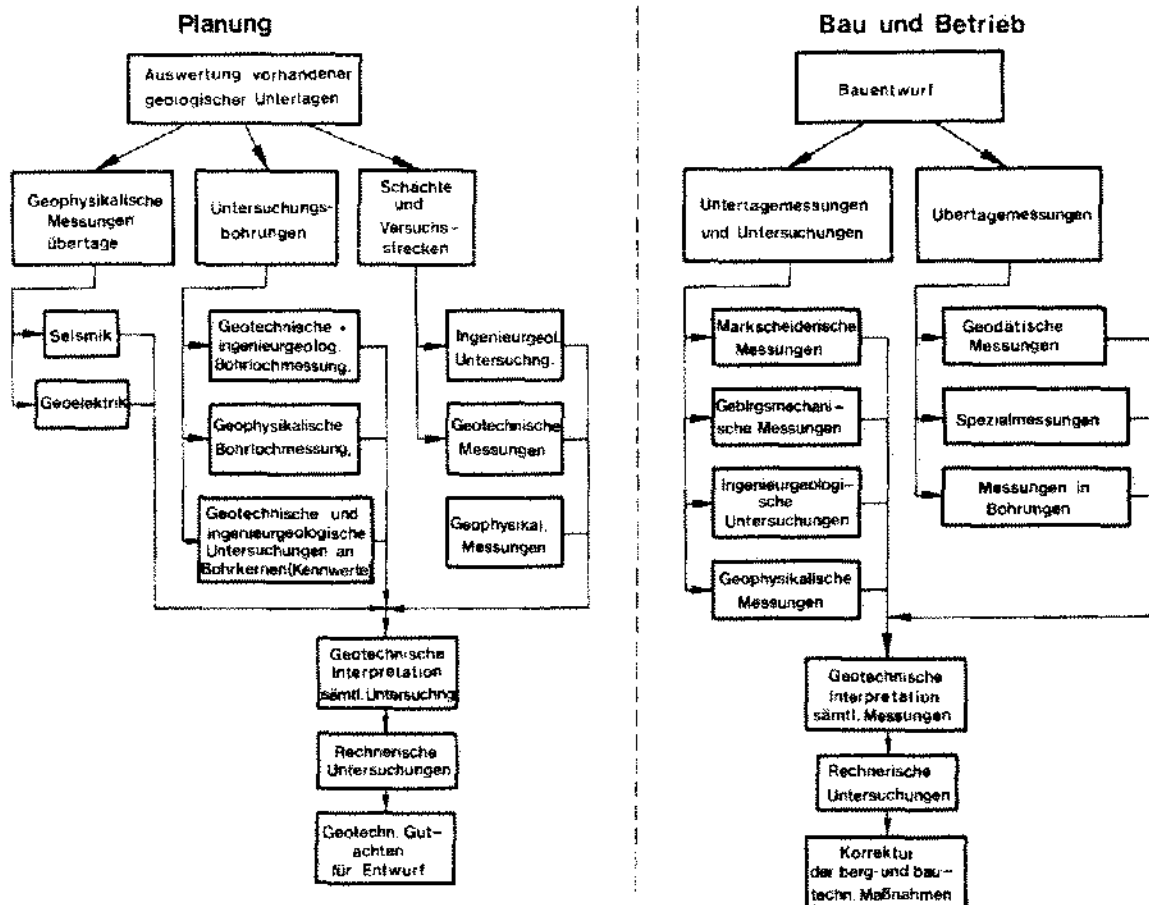
Ingenieurgeologische Untersuchungen. Ziel der ingenieurgeologischen Untersuchungen ist die Ermittlung der aus den geologischen Gegebenheiten resultierenden Einflüsse des Gebirges auf die Standsicherheit und Wirtschaftlichkeit der geplanten Hohlräume. Dabei werden vom Vorwurf bis zum Bau zunehmend detaillierte Kenntnisse der geologischen und geotechnischen Parameter benötigt (Fig. 4 u. 5). Dies soll am Beispiel der Planung eines Kavernenprojektes erläutert werden.

Zu Beginn des Planungsstadiums dienen die ingenieurgeologischen Untersuchungen zur Beurteilung der generellen Ausführbarkeit des Projektes. Je nach Art und Größe der zu schaffenden Hohlräume ist der Nachweis eines genü-

gend mächtigen und ausgedehnten Salzgebirges in günstiger Teufenlage erforderlich.

Dabei ist zu beachten, daß aufgrund der nachzuweisenden Standsicherheit und Dichtigkeit der geplanten Hohlräume ein ausreichender Abstand von allen Grenzflächen des Salzkörpers, von anderen Hohlräumen und von mechanisch wirksamen Inhomogenitätsflächen (z.B. Anhydritbänke) eingehalten werden muß. Das ist bei den Zechstein-Salzstöcken Nordwestdeutschlands nur im mächtigen Staßfurt-Steinsalz in idealer Weise möglich [4]. Es kann davon ausgegangen werden, daß in größeren Salzstrukturen entsprechend große Gebiete mit für die Anlage von Kavernen geeignetem Staßfurt-Steinsalz vorhanden sind, während bei kleinen Salzstöcken mit komplizierter Innentektonik gerechnet werden muß. Zusammenfassend läßt sich also feststellen, daß die Beurteilung der generellen Ausführbarkeit eines Kavernenprojektes aufgrund vorhandener Kenntnisse, Erfahrungen und Karten erfolgen kann.

Im Verlauf der zunehmend detaillierten Planung geht es bei der Ermittlung der für die Durchführung des Projektes erforderlichen Daten im wesentlichen darum, die für die Anlage von Kavernen geeigneten Bereiche des Salzstockes



Figur 5. Standsicherheitsanalyse.

aufzufinden. Das ist in einem unverritzten Salzstock nur durch Aufschlußbohrungen möglich. Deren Ansatzpunkte lassen sich bei einem durch seismische Untersuchungen hinreichend aufgeschlossenen Salzstock unter Berücksichtigung der Erfahrungen aus der Salztektonik bestimmen.

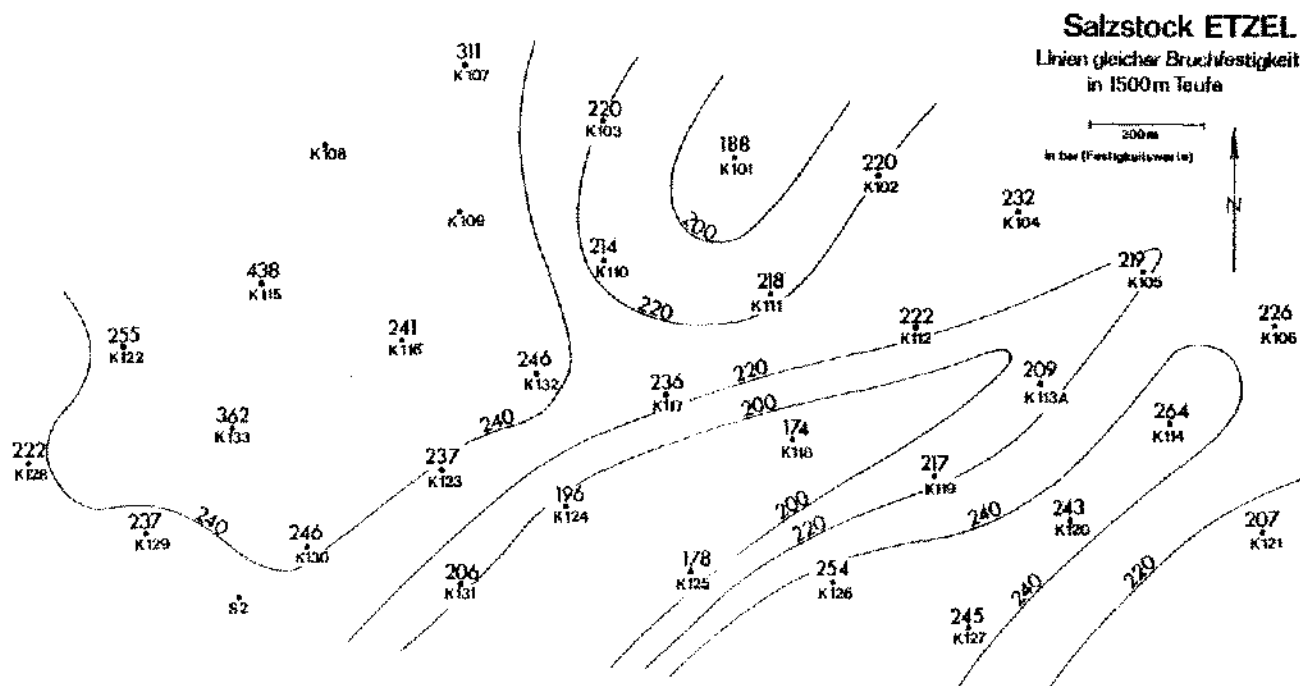
Der Aufschlußwert der Bohrungen läßt sich durch ein möglichst vollständiges Bohrlochmeßprogramm erhöhen. Die erforderliche geologische Deutung der durchbohrten Schichtenfolge ist aber erst in Verbindung mit einer ausreichenden Anzahl von Bohrkernen möglich. Dabei liefern orientiert entnommene Kerne zuverlässige Informationen über die Raumstellung der Schichten und verringern dadurch das geologische Risiko bei Folgebohrungen. Eine sorgfältige stratigraphische, petrographische und tektonische Analyse der weiteren Bohrungen durch einen erfahren Salzgeologen macht in Verbindung mit den Ergebnissen der Bohrlochmessungen eine räumliche Darstellung der geologischen Situation innerhalb des Salzstockes durch Querprofile und Horizontalschnitte in verschiedenen Teufen möglich. Daraus werden Homogenbereiche und Inhomogenitäten wie Ton- oder Anhydritlagen und Kaliflöze erkennbar, so daß Entscheidungen über Größe, Form und Lage der Kavernen getroffen werden können.

Der Übergang zwischen Planungs- und Baustadium kann bei einem größeren Projekt fließend sein. Die zuerst abgeteuten Bohrungen können schon gesolt werden, während im Zuge der planmäßigen Feldeserweiterung neue Bohrungen niedergebracht werden, deren Ergebnisse zu einem fortlaufend verbesserten Kenntnisstand beitragen. Bei solch

schrifftweisem Vorgehen läßt sich das Risiko "Geologische Überraschungen" zwar wesentlich verringern, aber nicht völlig ausschließen. Infolge der Durchmesserergrößerung einer Kaverne während des Solbetriebes—Baustadium—können z.B. an der Kaverne wand kaliführende Schichten angesolt werden, die in der Bohrung nicht angetroffen wurden. Wird ein solcher Fall rechtzeitig erkannt, z.B. durch die übliche chemische Analyse der ausfließenden Sole oder durch echometrische Messungen in der Kaverne, dann kann das Solprogramm häufig so abgewandelt werden, daß die aus der leichten Löslichkeit der Kalisalze resultierenden Abweichungen von der geplanten Kaverneform in Grenzen gehalten werden, die die Standsicherheit nicht beeinträchtigen.

Das Aufsuchen von Homogenbereichen ist zweifellos eine der wichtigsten ingenieurgeologischen Aufgaben. Am Beispiel des Salzstockes Etzel konnte nachgewiesen werden, daß z.B. das petrographisch einheitliche Staßfurt-Steinsalz, das in der Teufe von 1500 m den gesamten östlichen und südöstlichen Teil des Kavernenfeldes einnimmt, bezüglich der einaxialen Druckfestigkeit Unterschiede zeigt (Fig. 6). Die Linien gleicher Bruchfestigkeit stimmen weitgehend mit den aus geologischen Untersuchungen ermittelten Streichlinien überein, die Festigkeit scheint also horizontabhängig zu sein.

Trotzdem kann der Bereich des Staßfurt-Steinsalzes wegen der relativ geringen Festigkeitsunterschiede aus bautechnischer Sicht als Quasi-Homogenbereich betrachtet werden. Das muß aber nicht immer so sein. Die übliche Folgerung von nachgewiesener stratigraphischer und petro-



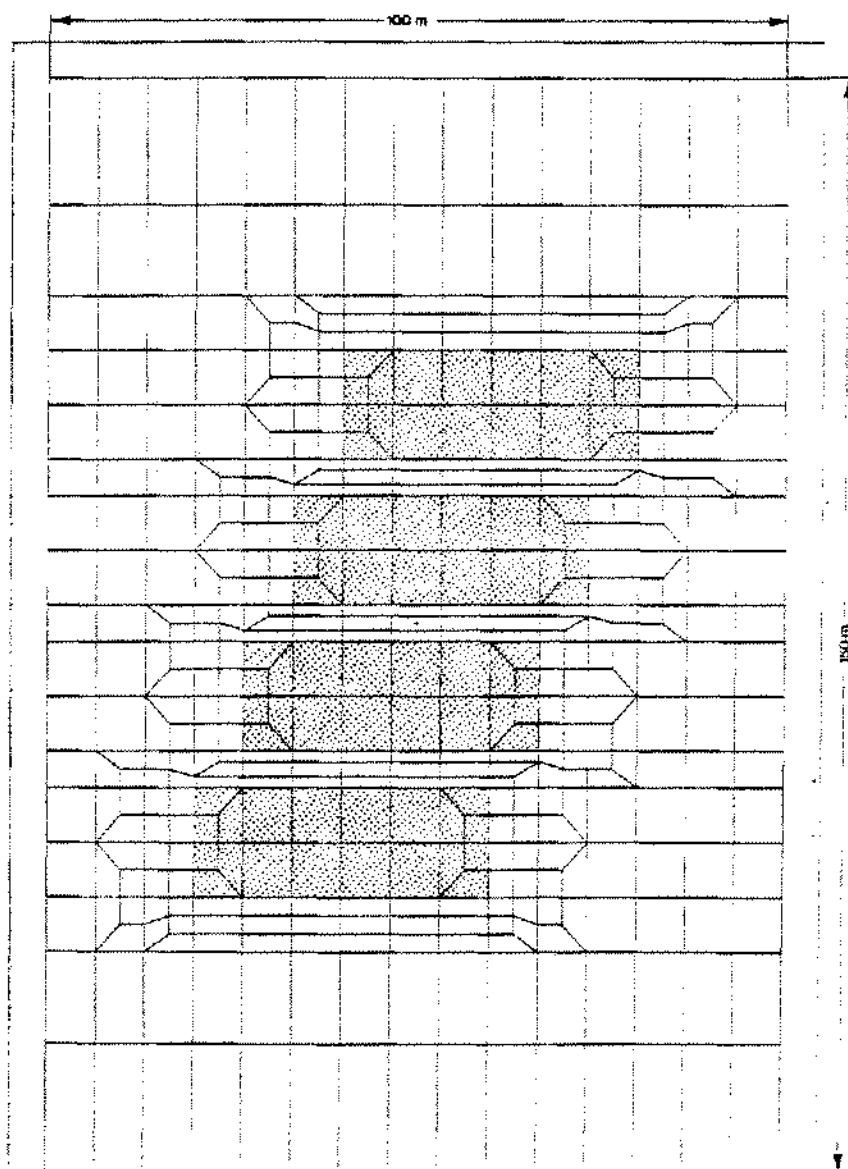
graphischer Einheitlichkeit auf Einheitlichkeit im Festigkeitsverhalten bedarf daher der Untermuerung durch entsprechende Messungen.

Rechnerische Untersuchungen. Wie bereits im Abschnitt über das Konzept der Standsicherheit erläutert, muß im Rahmen einer Standsicherheitsanalyse nachgewiesen werden, daß die durch den Hohlraumausbruch hervorgerufene Spannungsumlagerung einen mit Sicherheit stabilen Gleichgewichtszustand annimmt und sich keine unzulässigen Konvergenzen und Schäden während der Nutzungszeit der untertägigen Anlagen einstellen. Eine notwendige Voraussetzung für die Beurteilung der Standsicherheit von Kavernen, Abbauen, Strecken und Schächten ist daher die Berechnung der Spannungs- und Verformungsverteilung im umgebenden Salzgebirge.

Für diese Berechnungen ist das zeit- und temperaturabhängige rheologische Verhalten der Salzgesteine von besonderer Bedeutung [5].

Für die Bestimmung der Spannungen und Verformungen ist im allgemeinen eine dreidimensionale Berechnung erforderlich. Durch geometrische Vereinfachungen läßt sich die Problemstellung jedoch auch häufig auf eine rotationssymmetrische oder ebene Berechnung zurückführen.

Ein für die Lösung geomechanischer Problemstellungen besonders geeignetes Rechenverfahren stellt die Finite Element Methode dar (Fig. 7). Dieses computergerechte numerische Rechenverfahren ermöglicht es, die für die Standsicherheit wichtigen Einflußfaktoren (Fig. 2), wie die Geologie, die rheologischen Eigenschaften des Salzgesteines, die Betriebsbedingungen, die Hohlraumgeometrie



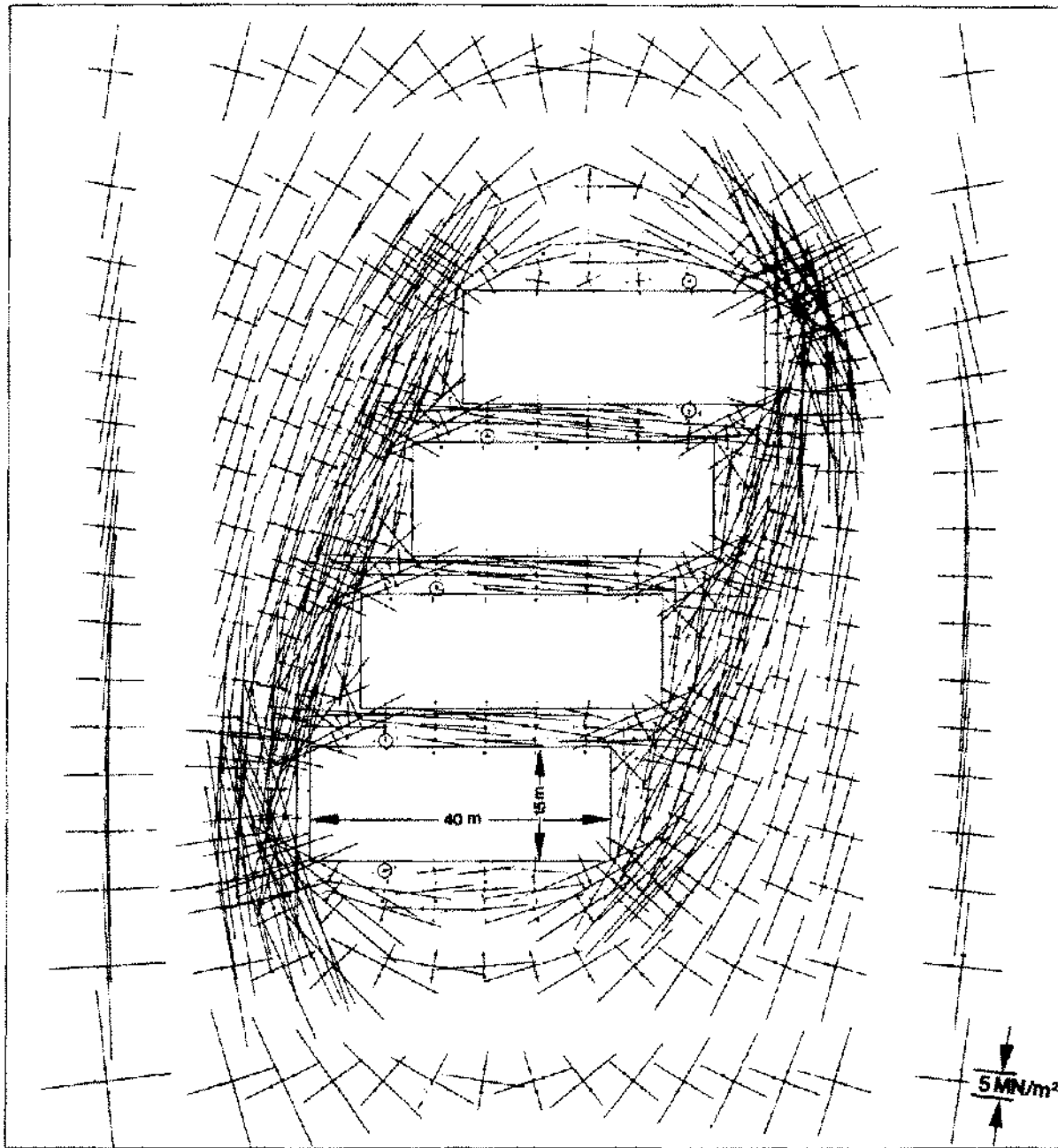
Figur 7. Finite Element Netz für Abbaue in steiler Lagerung.

und das Bauverfahren in wirklichkeitsnahen Ansätzen zu berücksichtigen.

Die Anwendungsmöglichkeiten der Finite Element Methode sind in Fig. 8 anhand der für mehrere Abbaukammern in steiler Lagerung ermittelten Spannungsverteilung veranschaulicht. Aus der Verteilung der Spannungskonzentrationen und der plastischen Zonen lassen sich bereits wichtige Schlüsse z.B. bezüglich der Tragfunktion der Schweben und der Standsicherheit des gesamten Abbaufeldes ziehen.

Bei der praktischen Beurteilung der Stabilität des untertägigen Gesamtbauwerkes muß allerdings berücksichtigt werden, daß die einzelnen Einflußfaktoren nur sehr unsicher ermittelt werden können. Stabilitätsuntersuchungen werden daher zweckmäßigerweise in Form einer Parameterstudie durchgeführt, wo die einzelnen Einflüsse von Fall zu Fall bezüglich ihrer Auswirkungen analysiert und bewertet werden können.

Art und Umfang der in der Berechnung zu berücksichtigenden Parametervariation ist auf den jeweiligen



Figur 8. Spannungsbild.

Schwierigkeitsgrad der Baumaßnahme abzustimmen. Die zahlenmäßige Angabe einer Sicherheit gegenüber dem Versagen des untertägigen Bauwerkes erweist sich dabei insofern als problematisch, als auch der Versagensfall selbst i. a. schwierig zu definieren ist.

Deshalb kommt einer Bestätigung der Berechnung durch Messungen am Hohlraum große Bedeutung als praktischer Standsicherheitsnachweis zu. Die Messungen wiederum erfahren durch die Berechnung eine besonders wertvolle Ergänzung bzw. Vervollständigung, als aufgrund von Berechnungen häufig eine genauere Auswertung und Interpretation der Messungen erst möglich wird und eine Extrapolation der Einzelmessung auf größere Gebirgsbereiche vorgenommen werden kann.

GEOTECHNISCHE UNTERSUCHUNGEN

Neben den ingenieurgeologischen und rechnerischen Untersuchungen sind die geotechnischen Messungen wesentlicher Bestandteil des praktischen Standsicherheitsnachweises. Auf den Komplex der praxisbezogenen Großmodelle kann im Rahmen dieser Arbeit nicht eingegangen werden. Bestimmend für die Anwendung der zur Verfügung stehenden geotechnischen Untersuchungsverfahren ist das jeweilige Stadium des Baugeschehens.

Geotechnische Untersuchungen für die Projektplanung. In der Planungsphase stellen Bohrungen die beste Möglichkeit dar, um dem planenden Ingenieur aus geotechnischer und ingenieurgeologischer Sicht Entscheidungshilfen zur Lösung seiner berg- und bautechnischen Probleme zur Verfügung zu stellen. Beim Aufstellen des Entwurfes für ein untertägiges Bauwerk im Salzgebirge sind eine Reihe von geotechnischen Kennwerten, ingenieurgeologischen Befunden und geologischen Daten erforderlich. Erst auf dieser Grundlage sind abschätzende Untersuchungen über das Tragverhalten des Baumaterials Salzgebirge möglich und sinnvoll.

Für die Datensammlung müssen Untersuchungen an Bohrkernen und Messungen in Bohrungen selbst herangezogen werden. Grundsätzlich lassen sich an Gesteinskernen folgende geotechnische Eigenschaften ermitteln: 1) Verformungsverhalten von Salzgestein, insbesondere das Kriechverhalten in Abhängigkeit der Belastungsgrößen und der Temperatur, 2) Festigkeitseigenschaften von Salzgestein wie Scher-, Druck- und Zugfestigkeit, 3) Gebirgsschlaggefahrlichkeit, insbesondere von Carnallit und Anhydritgestein, 4) Gas- und Flüssigkeitsdurchlässigkeit, und 5) Physikalische Eigenschaften wie z. B. Wärmeleitfähigkeit, Schallwellengeschwindigkeit etc.

Welche dieser Untersuchungen zur Anwendung kommt, sollte im Hinblick auf die jeweils konkrete Fragestellung sorgfältig überlegt werden.

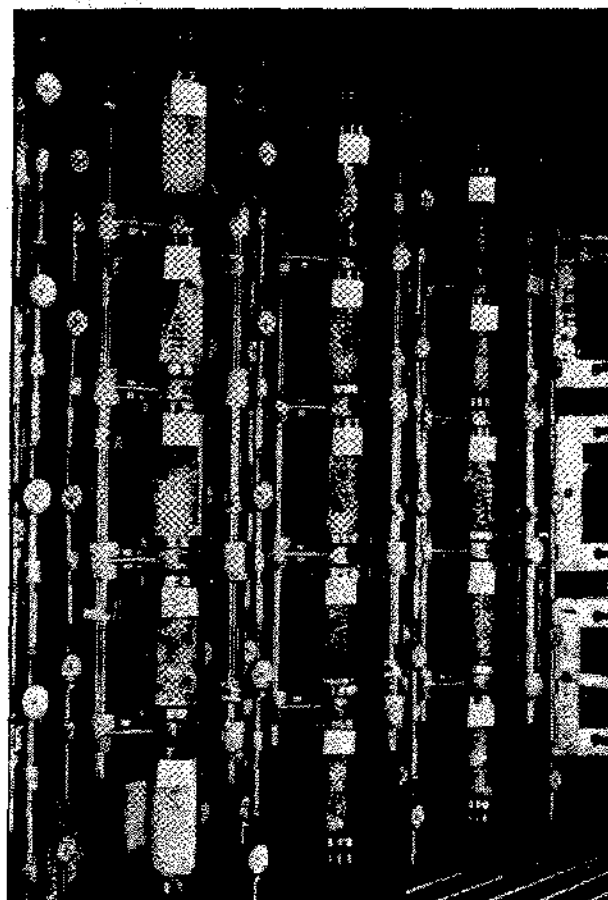
Im allgemeinen ist das Ermitteln von geotechnischen Meßwerten weniger problematisch als das Interpretieren der gewöhnlich breitstreuenden Werte. Diese Aufgabe gehört

zu den wichtigsten und schwierigsten im Bereich der Geotechnik.

Es kann nicht Zweck dieser Arbeit sein, auf jeden einzelnen Laborversuch an Gesteinskernen im einzelnen einzugehen. An zwei Beispielen soll erläutert werden, welchen Beitrag geotechnische Laboruntersuchungen zur Erstellung von Planungsunterlagen leisten können:

Beispiel Verformungseigenschaften von Salzgestein.

Im Rahmen von geotechnischen Forschungsarbeiten für eine zukünftige Entsorgungsanlage wurden bei der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) in Zusammenarbeit mit der Firma Freundl Kriechprüfstände entwickelt, bei denen insbesondere dem Problem des Probendurchsatzes und der Temperaturbeeinflussung Rechnung getragen wurde. Jeder Prüfstand erlaubt die gleichzeitige Prüfung von maximal 5 zylindrischen Salzkernen mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Länge von 250 mm (Fig. 9). In den Ständen mit Wärmekammern können die Prüfkörper einer Prüftemperatur bis maximal 350°C ausgesetzt werden. Um das Kriechverhalten auch bei triaxialen Lastzuständen zu untersuchen, wurde eine entsprechende hydraulische Zelle entwickelt, die zur Zeit gete-

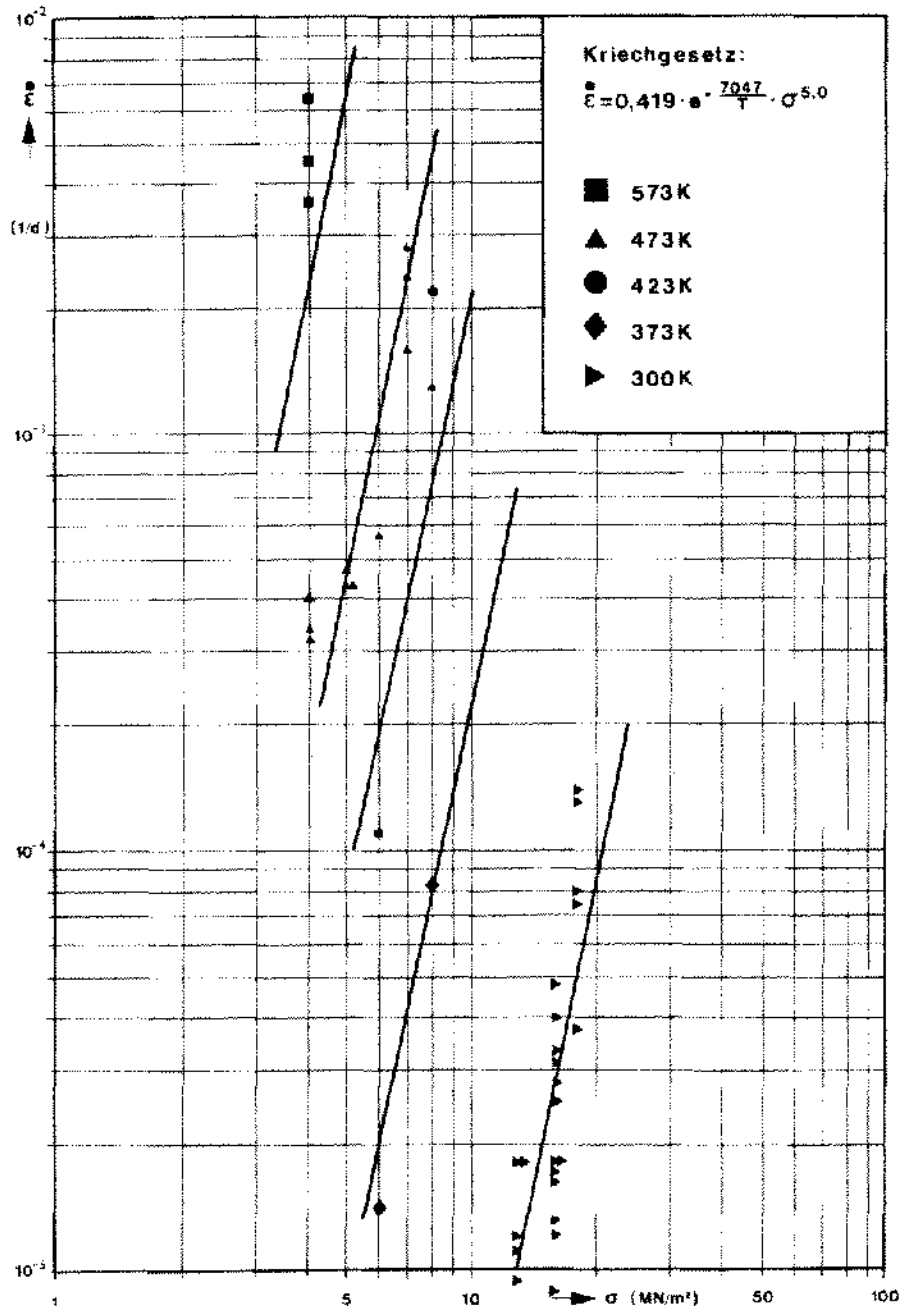


Figur 9. Kriechprüfstand.

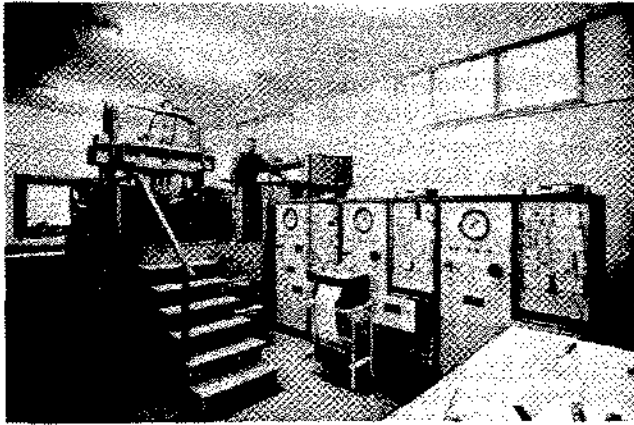
stet wird. Die Fig. 10 zeigt als Versuchsergebnis den Einfluß unterschiedlicher Prüfkraft und Versuchstemperaturen auf die Kriechgeschwindigkeit von Steinsalz. Auf der Grundlage dieser Meßergebnisse läßt sich für das untersuchte Salzmaterial ein empirisch verifiziertes Stoffgesetz aufstellen, das Eingang in die numerischen Berechnungen zum Nachweis der Standsicherheit findet.

Beispiel Festigkeitseigenschaften. Im Rahmen des Standsicherheitsnachweises wird die Grenztragfähigkeit des Gebirges anhand der Mohr-Coulomb'schen Bruchbe-

dingung ermittelt. Eine wesentliche Aufgabe der experimentellen Geotechnik besteht daher im Bestimmen der Grenzzustände von Gesteinen, die durch Mohr-Coulomb'sche Grenzkurven beschrieben werden. Der BGR stehen für diese Untersuchungen drei Prüfmaschinen zur Verfügung, die nach dem sogenannten Karman-Prinzip arbeiten bzw. echt triaxiale Prüfeinrichtungen sind (Fig. 11). Ergebnisse triaxialer Festigkeitsmessungen an Älterem Steinsalz zeigt die Fig. 12. Der Verlauf der Grenzkurve wird durch eine nichtlineare Funktion dargestellt. Kohäsions-



Figur 10. Ergebnisse von Kriechversuchen.



Figur 11. Triaxialprüfeinrichtung.

und Reibungswinkelwerte der Salzgesteine sind daher abhängig von dem jeweiligen Spannungszustand. Wie aus Fig. 12 hervorgeht, muß auch bei Steinsalz zwischen dem Spitzenwert der Scherfestigkeit und der Restscherfestigkeit unterschieden werden. Ein Standsicherheitsnachweis muß daher dieser Tatsache Rechnung tragen.

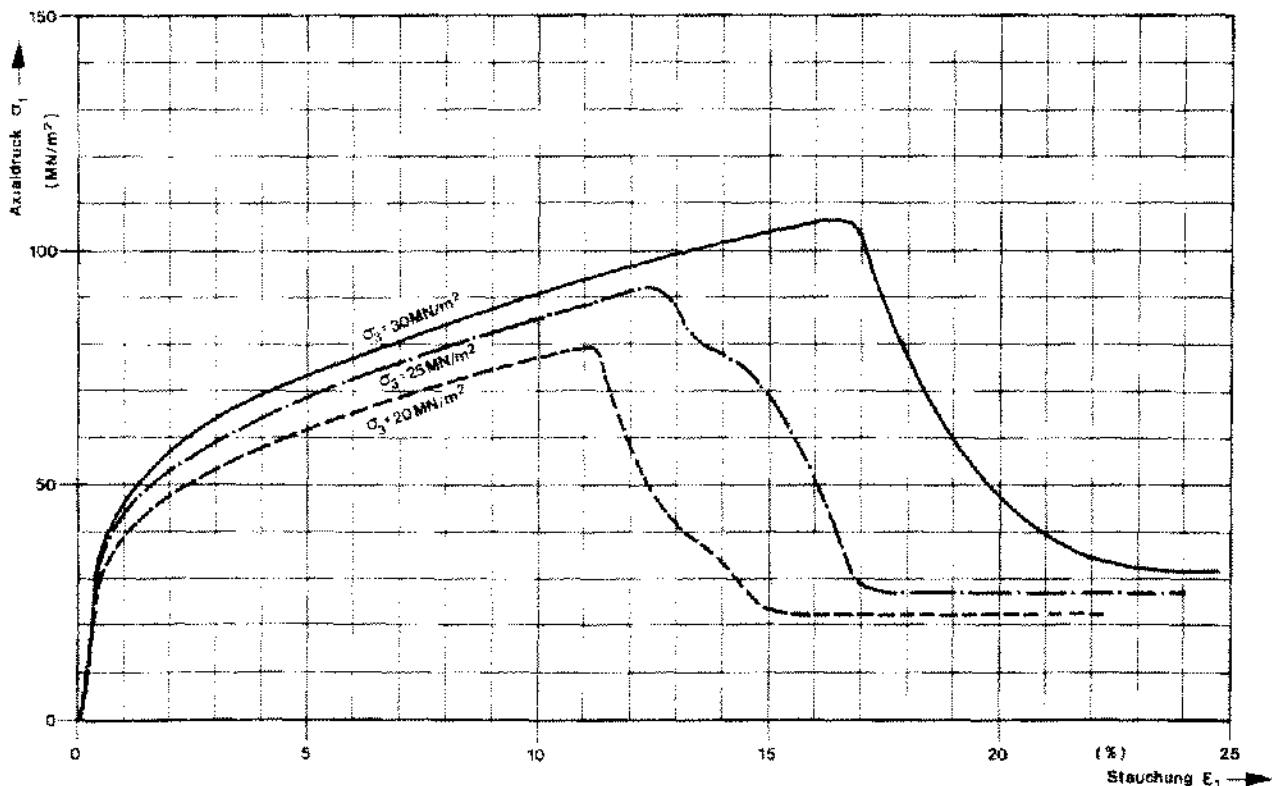
Neben Bohrkernuntersuchungen stellen Bohrlochmessungen eine ausgezeichnete Methode dar, um geotechnische Informationen über das anstehende Gestein zu erhalten. Aus geotechnischer Sicht sind folgende Untersuchungen erforderlich: 1) Verformbarkeit des Gebirges, 2) Primär-

spannungszustand des Gebirges, 3) Zuflußmengen im Deckgebirge, 4) Schallwellengeschwindigkeitsverteilung (Akustik-Log), 5) Gebirgstemperaturen und 6) Geophysikalische Messungen.

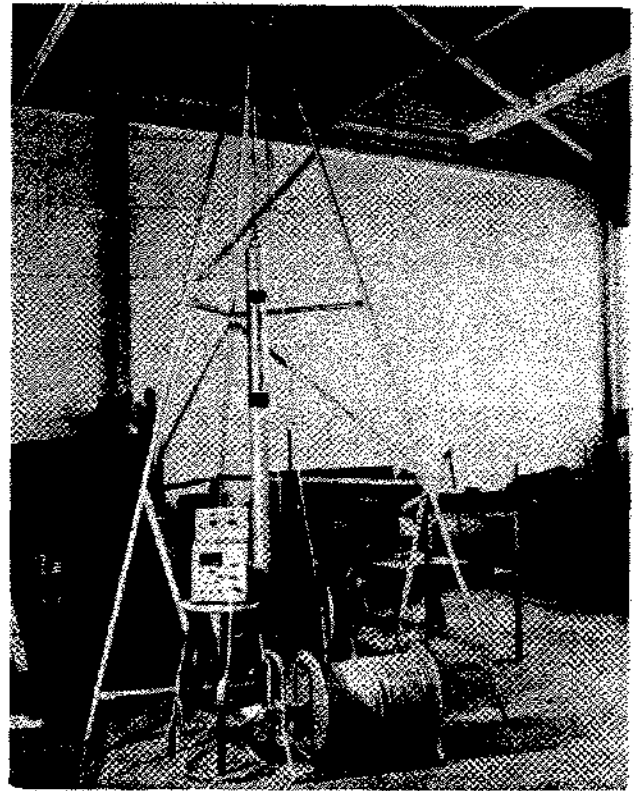
Von den vorgestellten Untersuchungen soll auf zwei näher eingegangen werden, die aus berg- und bautechnischer Sicht besonders wichtig sind.

Beispiel Ermittlung der Gebirgsverformbarkeit. Die Aufgabe besteht darin, in einem Bohrloch von übertage in großer Tiefe Verformungskennlinien des Gebirges aufzunehmen. Dabei wird auf die Wandung des Bohrloches kurz- bzw. langfristig ein Prüfdruck aufgebracht und gleichzeitig die Aufweitung des Bohrloches gemessen. Diese Aufgabe gilt heute für Bohrungen mit einer Tiefe von mehr als 25 m als technisch noch nicht befriedigend gelöst. In Zusammenarbeit mit der Fa. Stitz hat die BGR ein Dilatometer für Messungen in Teufen bis zu 200 m entwickelt, dessen Erprobung vor kurzem in Angriff genommen worden ist (Fig. 13). Als Ergebnis der Dilatometersondierungen erhält man Druckverformungskennlinien (Fig. 14), aus denen der Gebirgsverformungsmodul ermittelt werden kann.

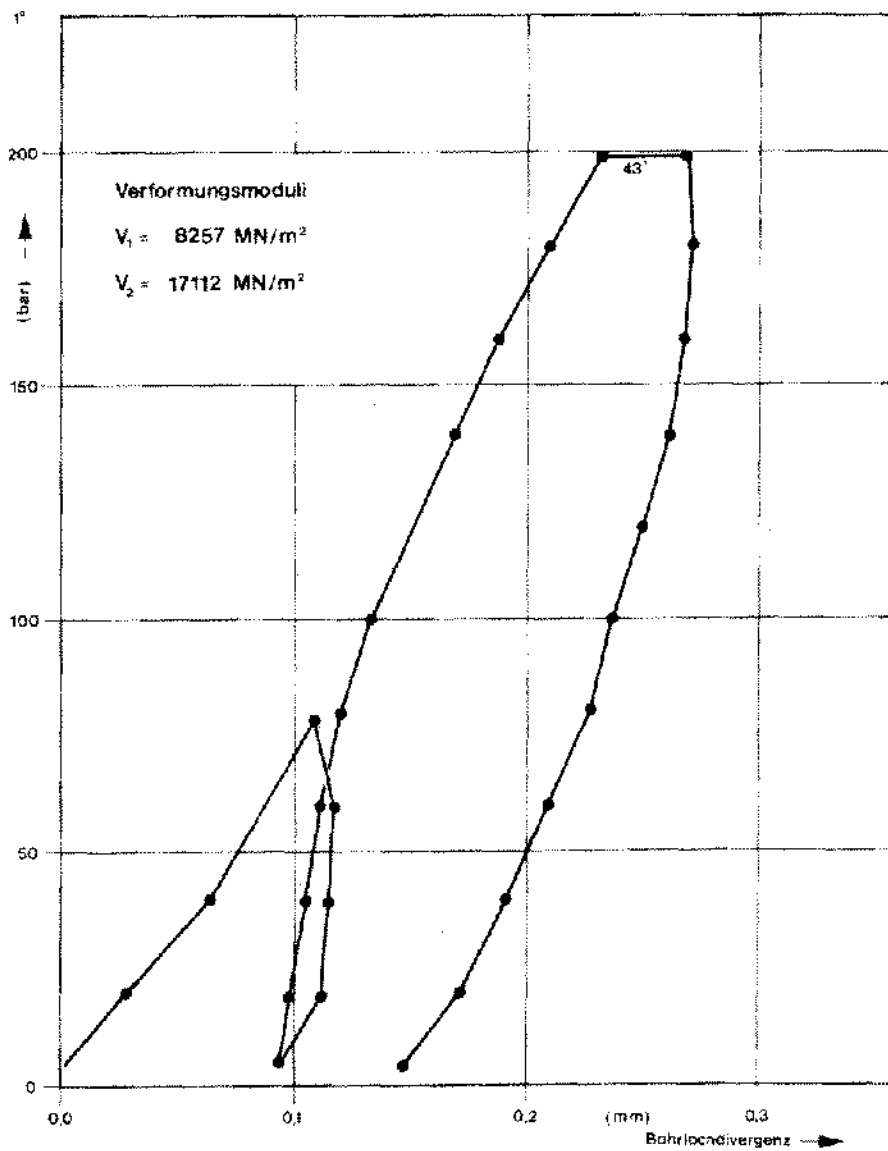
Der Einsatz derartiger Verformungs sonden ermöglicht eine schnelle und wirtschaftliche Bestimmung des Verformungsmoduls des Gebirges. Außerdem lassen sich damit bei entsprechender Versuchsdurchführung erste Anhaltspunkte für das Kriechverhalten des anstehenden Salzgesteins gewinnen. Bei der gegenwärtig zu beobachtenden



Figur 12. Ergebnisse triaxialer Festigkeitsuntersuchungen von Steinsalz.



Figur 13. Bohrlochdilatometer.



Figur 14. Dilatometermessungen im Älteren Steinsalz.

Zunahme von Projekten im Untertagebau wäre eine intensivere Weiterentwicklung einer Sonde für Teufen größer als 200 m aus der Sicht der Praxis begrüßenswert.

Beispiel Messung des Primärspannungszustandes des Gebirges. Jeder Standsicherheitsnachweis muß den tatsächlichen Beanspruchungsfall im Gebirge möglichst wirklichkeitsnah erfassen. Hierzu gehört die Kenntnis des originär im Gebirge vorhandenen Spannungszustandes, wie bereits in Abschnitt über die Problemstellung erwähnt.

Die herkömmlichen Gebirgsspannungsmeßverfahren wie Überbohrverfahren und Schüttsägeverfahren sind für Messungen in tiefen Bohrungen völlig ungeeignet. Eine in den USA entwickelte Bohrlochsonde [6] arbeitet nach dem hydraulic-fracturing-Verfahren und erlaubt Messungen bis zu einer Teufe von ca. 1000 m. Wie die Arbeiten von HAIMSON [1] zeigen, lassen sich mit diesem Verfahren Größe und Richtung der drei Hauptspannungen im Gebirge ermitteln.

Die bisherigen Erfahrungen mit dieser Methode basieren auf Untersuchungen in Gesteinen mit ausgesprochenen Sprödebrücheigenschaften. Über die Anwendung dieses Verfahrens in Salzgesteinen liegen u. W. noch keine Untersuchungen vor. Daher sind in Zukunft entsprechende Forschungsarbeiten notwendig.

GEOTECHNISCHE UNTERSUCHUNGEN IN BERGMÄNNISCH AUFGEFAHRENEN HOHLRÄUMEN

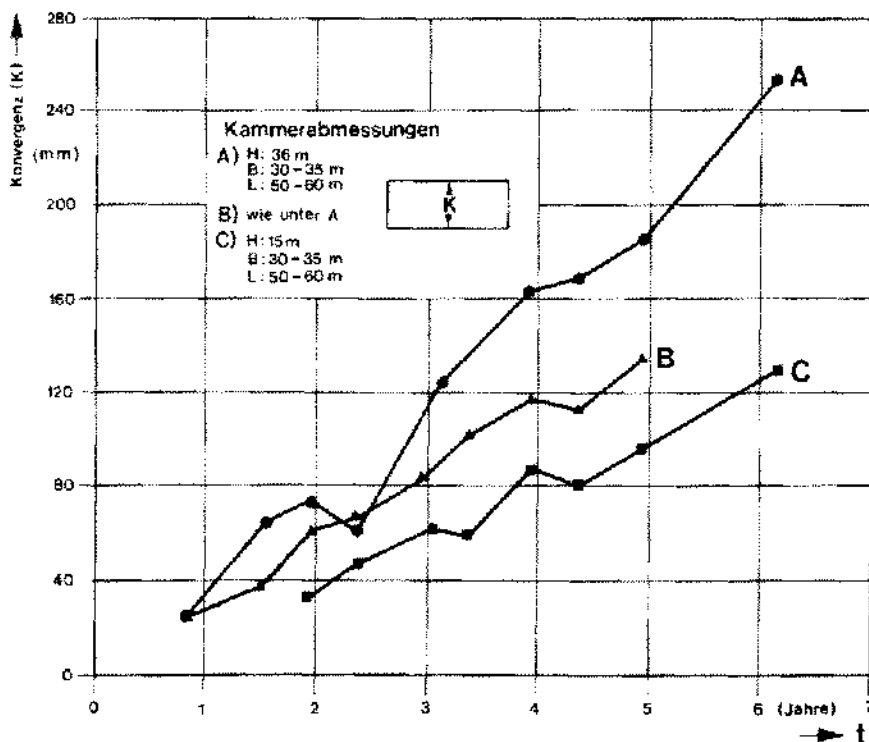
Ein praxisnaher Standsicherheitsnachweis ist ohne in situ-Messungen am Hohlraum selbst nicht denkbar. Um-

fangreiche Erfahrungen, die Standfestigkeit von Hohlräumen im Salzgebirge durch Messungen zu überwachen, stehen beim Bergbau zur Verfügung. Folgender Katalog von Meßverfahren läßt sich zusammenstellen: 1) Polygonmessungen, 2) Nivellements, 3) Schachtlotungen, 4) Konvergenzmessungen, 5) Extensometermessungen, 6) U-Schallwellengeschwindigkeitsmessungen, 7) Spannungsmessungen und 8) Kennwertermittlungen.

Die Auswahl der einzelnen möglichen Untersuchungsverfahren sollte gründlich beraten werden. Nicht jede Messung ist zur Lösung der jeweils gestellten Aufgabe sinnvoll. Die erwartete Aussagekraft einer bestimmten Messung sollte gemeinsam mit dem Bauherrn, dem planenden Ingenieur, der Baufirma, dem Geotechniker und Geologen erörtert werden.

Auf die geodätischen Messungen braucht an dieser Stelle nicht weiter eingegangen zu werden. Neben ihnen stellen Konvergenz- und Extensometermessungen die wichtigsten Verformungsmeßverfahren dar. Mittels Konvergenzmessungen wird die zeitabhängige Einengung eines Hohlräumtes erfaßt. In Fig. 15 ist als Beispiel für Konvergenzvorgänge in einer 36 m hohen Abbaukammer die über 5 Jahre gemessene Kammerkonvergenz dargestellt. Für die Einschätzung der Standfestigkeit von Hohlräumen sind derartige Meßkurven von hervorragender Bedeutung.

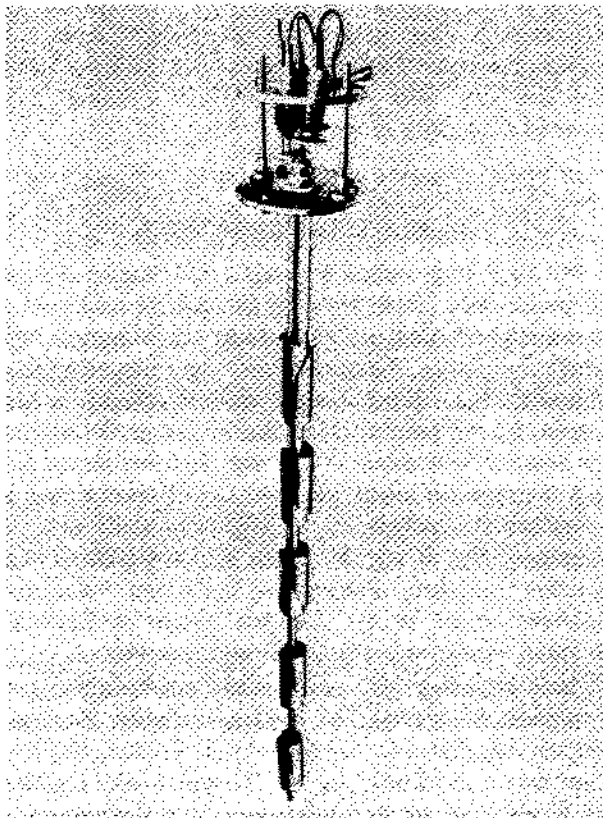
Zur Durchführung von Konvergenzmessungen stehen heute verschiedene Verfahren zur Verfügung. Das Meßband- und das Spanndrahtverfahren zählen zu den Standardverfahren. Beide sind zwar hinreichend genau, aber zum Teil sehr arbeits- und zeitaufwendig. Aus betrieblichen



Figur 15. Konvergenzen grosser Abbaukammern.

Erwägungen erscheint es daher häufig sinnvoller, mit modernen elektrooptischen Distanzmessern zu arbeiten. Ein besonderer Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, daß der Zielpunkt als Reflektor benutzt wird. Zu Beginn der Messungen wird der Zielpunkt vermarkt, und braucht dann nachfolgend nicht mehr vom Messenden aufgesucht zu werden. Mit diesen Distanzmessern lassen sich heute schon Genauigkeiten im Millimeterbereich erzielen.

In vielen Fällen ist für die Beurteilung der Standsicherheit die Kenntnis des räumlichen Verschiebungsfeldes um einen Hohlraum erforderlich. Hierfür können Extensometermessungen bei sinnvoller Anordnung der Meßbohrungen wertvolle Beiträge liefern. Mit diesen Geräten lassen sich in einem Bohrloch in beliebigen Teufen die Verschiebungen in Richtung der Bohrlochachse messen. In Fig. 16 ist ein 5-fach Extensometer der Fa. Stitz, System BGR, mit induktiven Wegaufnehmern veranschaulicht.



Figur 16. Fünffachextensometer.

Ein großer Vorteil des Extensometers besteht aufgrund seines ortsfesten Einbaus und konstanter Umweltbedingungen in folgenden Punkten.

1. das Meßgerät hält ständig Meßdaten zur Abfrage bereit.
2. der Arbeitsaufwand für die manuelle Meßdatenübernahme ist sehr gering.
3. das Meßverfahren bietet hervorragende Voraussetzungen

für die Automatisierung der Meßdatenerfassung, so daß die Meßdaten quasi im On-Line-Verfahren für die Standsicherheitsüberwachung zur Verfügung gestellt werden können.

Sowohl für Konvergenzmessungen als auch für Extensometermessungen gilt der Grundsatz, möglichst frühzeitig nach der Schaffung des Hohlraumes die Messungen zu beginnen. Hierdurch wird gewährleistet, daß auch die Anfangsverformungen nach Öffnen des Hohlraumes mit erfaßt werden.

Neben den vorgenannten Verformungsmessungen stellen Ultraschallbohrlochmessungen im Salzgebirge eine sinnvolle Unterstützung bei der Standsicherheitsbeurteilung von Bauwerken dar. Durch die Quasi-Homogenität des Salzgebirges ist für die Anwendung dieses Verfahrens eine günstige Voraussetzung gegeben. Bei diesen Messungen handelt es sich um die Sondierung von Ultraschallwellengeschwindigkeiten und Schallschwächungskoeffizienten zwischen zwei parallelen Bohrlochern am Rande eines Hohlraumes (Fig. 17). Mit diesem Verfahren können akustische Gebirgsparameter großer Gebirgsbereiche je nach Anordnung und Teufe der Meßbohrungen ermittelt werden. Der Meßaufwand in zeitlicher Hinsicht ist relative gering. Durch mehrfache Wiederholung der Messungen und durch Vergleich der Ergebnisse mit Konvergenz- und Extensometermessungen lassen sich im Zusammenhang mit den



Figur 17. Ultraschallmessungen *in situ*.

rechnerischen Untersuchungen zuverlässige Aussagen über die Standsicherheit eines Hohlraumes treffen.

GEOTECHNISCHE MESSUNGEN VON ÜBERTAGE

Setzungserscheinungen an der Tagesoberfläche sind aus dem Kalibergbau in der flachen Lagerung hinreichend be-

kannt. Aber auch über gesolten Kavernen im norddeutschen Raum sind Setzungen bekannt geworden, die ein aufmerksames Verfolgen der Beeinträchtigung der Tagesoberfläche durch untertägige Hohlräume nahelegen. Insbesondere bei untertägigen Anlagen, an die erhöhte Sicherheitsansprüche gestellt werden, erscheint eine Überwachung nicht nur am Bauwerk selbst, sondern auch an der Tagesoberfläche erforderlich zu sein, zumal wenn es sich um besiedeltes Gelände handelt. Zusammenfassend lassen sich folgende Überwachungsverfahren nennen: 1) Nivellements, 2) Polygonmessungen, 3) Neigungsmessungen und 4) Extensometermessungen.

Während bei den beiden erstgenannten Verfahren von vermarkten Festpunkten ausgegangen wird, sind für die Auswertung der beiden letzten Verfahren entsprechende Bohrungen erforderlich. Sowohl Neigungs- als auch Extensometermessungen können mit außerordentlicher Genauigkeit durchgeführt werden. Sie gelten daher als empfindliche Indikatoren für Geländebewegungen. Da sämtliche über-tägige Messungen bereits vor Aufnahme der Untertagebauarbeiten anlaufen können, wird damit die Auswirkung des gesamten Verformungsvorganges an der Tagesoberfläche erfaßt. Mögliche katastrophale Entwicklungen können auf diese Art und Weise frühzeitig erkannt und geeignete Gegenmaßnahmen getroffen werden. Da es gegebenenfalls auch darum geht, die Sicherheit technischer und sonstiger Anlagen übertage zu gewährleisten, kommt diesen Messungen eine besondere Bedeutung zu.

GEOTECHNISCHE MESSUNGEN IN GESOLTEN KAVERNEN

Ein Gebiet besonderer und zugleich auch akuter Problematik für den Geotechniker stellen gesolte Kavernen dar. Sie sind nur durch eine Bohrung mit der Erdoberfläche verbunden und erreichen oft Teufen von einigen Hundert Metern. Sie stehen häufig unter wechselndem Gasdruck oder sind mit Flüssigkeiten gefüllt. Mit erhöhten Temperaturen ist ebenfalls zu rechnen. Angesichts dieser schwierigen betrieblichen und geologischen Gegebenheiten sind Meßverfahren zur Überwachung der Standsicherheit an Kavernen zu entwickeln. Erste erfolgreiche Schritte auf diesem Wege sind bereits zu verzeichnen, aber generell gesehen stehen wir hier erst am Anfang einer technisch äußerst interessanten Entwicklung.

Als generell gelöstes Problem kann heute die Hohlraumvolumenvermessung mittels echometrischer Verfahren angesehen werden [3]. Hier ist insbesondere auf die von der Prakla entwickelte Ultraschallsonde hinzuweisen [7]. Da aber die Wellenlängen bei diesem Verfahren im Zentimeterbereich liegen, scheidet dieses für genaue Konvergenzmessungen in der Kaverne aus. Möglicherweise ist hier eine Lösung auf dem Gebiet der Lasertechnik zu finden.

Aus den USA sind im Zusammenhang mit der Überwachung von Gasspeichern auch mikroseismische und

mikroakustische Verfahren bekannt geworden [2]. Die Aufnehmer, wie Seismometer und Körperschallmikrophone, werden im allgemeinen in Flachbohrungen über den Speichern angeordnet. Aber auch eine Anordnung im Speicher selbst wäre denkbar. Mit diesem Verfahren wird der Mikrogeräuschpegel in der Umgebung von Hohlräumen überwacht. Aus Veränderungen des Pegels können Rückschlüsse auf die Stabilität des Hohlraumes gezogen werden. Hardy konnte mit diesem Verfahren aufgrund umfangreicher Untersuchungen wertvolle Anhaltspunkte für die Optimierung des Gasdruckes eines untertägigen Gasspeichers gewinnen.

Standsicherheitsuntersuchungen gesolter Kavernen beschränken sich heute im wesentlichen auf rechnerische Untersuchungen und auf markscheiderische Überwachung vermarkter Punkte an der Tagesoberfläche. Durch Messungen in den Kavernen selbst und im Deckgebirge ist eine erhebliche Verbesserung und Erweiterung der Grunddaten für die Standsicherheitsuntersuchungen zu erwarten. Der Wissensstand über tatsächliche Bewegungsvorgänge an gesolten Kavernen dürfte sich heute noch auf dem Nullniveau bewegen. Hier Abhilfe zu schaffen, scheint daher dringend notwendig zu sein.

SCHLUSSBEMERKUNGEN

Mit dem vorgestellten Konzept eines Standsicherheitsnachweises von Hohlräumen im Salzgebirge sollte auf die Notwendigkeit sinnvoll aufeinander abgestimmter Einzeluntersuchungen, bestehend aus ingenieurgeologischen Untersuchungen, Berechnungen und geotechnischen Messungen, hingewiesen werden. Eine einseitige Orientierung des Standsicherheitsnachweises wird dem komplexen Baustoff Salzgebirge nicht gerecht. Bie spielsweise werden wahrscheinlich technische Berechnungsmodelle nicht die Leistungsfähigkeit von Modellen im konstruktiven Ingenieurbau erreichen. Andererseits kann ein untertägiger Hohlraum nicht in der gleichen Weise meßtechnisch überprüft werden wie z.B. ein Brückenbauwerk.

Auch zukünftig wird ein Standsicherheitsnachweis mit bestimmten Schwierigkeiten zu kämpfen haben. Zu nennen sind die Annahmen für das Berechnungsmodell, eine möglichst praxisnahe Definition des Versagensfalles untertägiger Hohlräume, die starke Streuung der ingenieurgeologischen und geotechnischen Kenndaten, die Übertragbarkeit von Labordaten auf in situ-Verhältnisse etc. Hier werden weitere Forschungs- und Untersuchungsarbeiten dringend benötigt.

Ein Standsicherheitsnachweis im geschilderten Sinne ist nicht nur ein geologisch-technisches Problem, sondern auch ein wirtschaftliches. Die Kosten für Bohrungen, Labor- und in situ-Untersuchungen sind zum Teil erheblich und müssen deshalb gemessen an den Gesamtkosten in einem vertretbaren Rahmen gehalten werden. Dennoch muß man sich

vor Augen halten, daß Schäden infolge mangelnder oder ungenügender Untersuchungen notwendige Untersuchungskosten um ein Vielfaches überstiegen haben, wie das z.B. bei Gebirgsschlägen mehrfach der Fall gewesen ist. Auf das Problem der Sicherheit für Personen unter- und übertage sei dabei besonders hingewiesen.

SCHRIFTTUM

1. Haimson, B.C. 1976. Preexcavation deep-hole stress measurements for design of underground chambers—case histories. Proceedings of the Rapid Excavation and Tunneling Conference, Las Vegas, Nevada 14.–17.6. 1976: 699–714.
2. Hardy, H.R., Jr. 1975. Feasibility of utilizing microseismic techniques for the evaluation of underground gas storage reservoir stability. Project 12-43 of the Pipeline Research Committee American Gas Association at the Pennsylvania State University.
3. ——— and Scovazzo, V.A. 1977. Review of techniques for evaluating the geometry and dimensions of solution mined cavities. Field Measurements in Rock Mechanics, International Symposium, 4.–6.4. 1977. Zürich: 1: 33–45.
4. Hofrichter, E. 1974. Geologische Bearbeitung von Kavernenspeicher-Projekten in Salzstöcken Nordwestdeutschlands. Erdöl und Kohle 27: 190–194.
5. Langer, M. 1978. Grundzüge einer theoretischen Salzmechanik. Proc. 3. Nat. Tagung über Felsmechanik, Aachen 1978, 67–88.
6. Roegiers, J.C., Fairhurst, C. and Rosene, R.B. 1973. The DSP—A new instrument for estimation of the in-situ stress state at depth. Preprint of the VI. Conference on Drilling and Rock Mechanics of the Society of Petroleum Engineers of AIME, Austin, Tex. 22.–23.1. 1973, Paper Nr. SPE 4246.
7. Wierczyko, E. 1972. Echo-Log—Ein geophysikalisches Meßverfahren zur Bestimmung von Form von Aussolungshohlräumen im Salzgebirge. Geophysical Prospecting 20 (2): 649–664.