

Untersuchungen im gesteinsmechanischen Labor

Tragwerksplanung und Sicherheitsbeurteilung
für Untertagebauwerke

Von Uwe Düsterloh und Karl-Heinz Lux

Die Bewertung von Standsicherheit, Langzeitsicherheit und Integrität untertägiger Grubenbaue des Berg- und Kavernenbaus wie auch des Deponie- und Endlagerbaus im Salinargebirge basiert auf der Gegenüberstellung vorhandener bzw. berechneter Beanspruchungen mit den vom Konstruktionsmaterial „Gebirge“ ertragbaren Beanspruchungen. Gegenüber künstlichen Baustoffen wie beispielsweise Stahl oder Beton ist das Baumaterial „Salinargebirge“ im Rahmen geologischer Gebirgsbildungsprozesse entstanden. Abhängig von der Gebirgsformation und innerhalb einer Gebirgsformation von der Entnahmelokation ist das den Untergrund aufbauende Gebirge daher gekennzeichnet durch eine gegenüber künstlichen Baustoffen vergleichsweise große Streubreite in den mechanisch-hydraulischen Kennwerten. Aufgabe der gesteinsmechanischen Laborversuche ist es, das für die Tragwerksplanung und die damit verbundene Beurteilung der Standsicherheit und Integrität hydrogeologischer Schutzschichten er-

forderliche mechanisch-hydraulische Materialverhalten für einzelne Homogenbereiche zu charakterisieren und Parameter und Kriterien für die Beurteilung der Gebirgstragfähigkeit abzuleiten.

Gesteinsmechanische Laborversuche – mehr als nur eine Qualitätskontrolle

Die Bedeutung gesteinsmechanischer Laboruntersuchungen kann sehr anschaulich durch einen Vergleich mit dem konstruktiven Ingenieurbau aufgezeigt werden. Dimensionierungsaufgaben im konstruktiven Ingenieurbau sind gekennzeichnet durch die Verwendung von Baustoffen, d.h. künstlichen Materialien mit reproduzierbaren, homogenen mechanischen Eigenschaften. Diese Baustoffe wie z.B. Beton oder Stahl werden auf der Basis detailliert vorgegebener Produktionsprozesse hergestellt und besitzen daher ein durch Normung festgelegtes Festigkeits- und Verformungsverhalten (Mindestanforderungen oder Bandbreite). Demgegenüber ist der Baustoff

Salinargebirge in geologischen Zeiträumen den natürlichen Bildungsbedingungen und den geotektonischen Überprägungsbedingungen unterliegend entstanden. Die Materialeigenschaften der Salinargesteine variieren daher abhängig von ihrer natürlichen Zusammensetzung und ihrer Genese faziesabhängig und auch innerhalb einer Fazies über eine vergleichsweise große Bandbreite. Diese qualitätsgesicherte Bandbreite der Materialeigenschaften ist regelmäßig standortbezogen auf der Grundlage von laborativen Untersuchungen abzuleiten, die allerdings lediglich „Nadelstiche“ in der Lagerstätte bzw. in dem relevanten Gebirgsbereich eines Untertagebauwerkes bedeuten.

Ein zweiter wesentlicher Unterschied zum konstruktiven Ingenieurbau resultiert aus dem komplexen Materialverhalten der Salinargesteine. Während die Kombination der im konstruktiven Ingenieurbau eingesetzten Baustoffe und vorliegenden Belastungsbedingungen vornehmlich eine zeitunabhängige Tragwerksbemessung erlaubt, zeigen die chloridischen Salinargesteine unter in situ-Beanspruchungen ein ausgeprägt nicht-lineares, sowohl zeit-, spannungs- und temperaturabhängiges wie auch rate-sensitives Materialverhalten. Als Folge dieses sehr komplexen Materialverhaltens müssen einerseits die grundsätzlichen Materialeigenschaften zur qualitativen und quantitativen Charakterisierung des Spannungs-/ Verformungsverhaltens in Abhängigkeit von

- Spannungsniveau,
- Spannungsgeometrie (Kompression/Extension),
- Spannungsrate/Verzerrungsrate,
- Temperatur und
- Zeit

laborativ bestimmt werden. Zum anderen sind auch die abhängig von der jeweiligen Beanspruchungsart und den Milieubedingungen ertragbaren Beanspruchungen festzulegen, um Krite- ▶

rien und Grenzwerte zur Bewertung berechneter Beanspruchungen formulieren zu können.

Schließlich ist die Kombination der für die untertägigen Tragwerke eher ungünstigen Randbedingungen *komplexes Materialverhalten, große Streubreite und geringe Aufschlußrate* vor dem Hintergrund der jeweiligen Bemessungsaufgabe zu bewerten. Während im konstruktiven Ingenieurbau das Tragsystem regelmäßig in seiner endgültigen geometrischen Konfiguration erstellt wird und jeweils definierte Lasten vorliegen, ist das Tragsystem im Salinalgestein gekennzeichnet durch ein infolge der vorhandenen Gebirgsspannungen vorbelastetes Gebirge als Konstruktionselement, wobei diese primären Gebirgsspannungen eher weniger genau bekannt sind. Weiterhin erfolgt in vielen Fällen eine kontinuierliche Veränderung der Tragwerksgeometrie infolge Auffahrung, Gewinnung, Nutzung und Versatz von Grubenbauen. U.a. aus dieser dynamischen Änderung des Tragsystems werden im Verlauf der Standzeit Spannungsumlagerungen im Gebirge induziert. Spannungsumlagerungen im Gebirge resultieren weiterhin aus dem viskosen Materialverhalten und aus kontumnahen Entfestigungen des Salinalgebirges. Eine den in situ-Verhältnissen entsprechende Berechnung der zeitlich-räumlichen Spannungsumlagerungen kann hinreichend realitätsnah nur auf der Grundlage lokationsbezogener Stoffparameter erfolgen.

Für den Bereich des Deponie- und Endlagerbaus im Salinar wird die Bedeutung gesteinsmechanischer Untersuchungen durch zwei weitere Gesichtspunkte noch verstärkt. Im Gegensatz zum konstruktiven Ingenieurbau mit Überwachungs- und Nachbesserungs-(Reparatur-)möglichkeiten sind die Nachweiszeiträume im Deponie- und Endlagerbau nicht auf technische Zeiträume von wenigen 100 Jahren beschränkt, sondern der sicherheitliche Nachweis ist von vornherein insbesondere für die abdichtenden Tragwerksteile – und hierzu gehören insbesondere geologische und geotechnische Barrieren – auf die zeitliche Größenordnung von mehreren tausend Jahren auszuweiten. Für darüber hinausgehende Zeiträume sind Berechnungen zum Anlagenverhalten vorzusehen. Ertüchtigungsmaßnahmen bei Fehleinschätzungen und nicht planmäßigem Tragwerksverhalten sind nach Stilllegung der Abfallbeseitigungsanlagen nicht vorgesehen. Allerdings wird die dauerhafte nachsorgefreie Sicherheit der Anlage gegen Schadstofffreisetzung erwartet. Hinzu kommt, daß sich die Anforderungen an die gesteinsmechanischen Untersuchungen nicht mehr nur auf die mechanischen Eigenschaften beschränken, sondern mit Blick auf den Nachweis der Untertagedeponie- bzw. Endlagerintegrität gegenüber dem Zutritt/Austritt von Lösungen und Gasen (Barrierintegrität, Verschlusssysteme/Umläufigkeit) zusätzlich die mechanisch-hydraulischen Wechselwirkungen charakterisiert werden müssen. Zu ermitteln ist beispielsweise die beanspruchungsbedingte Gebirgsauflockerung (Dilatanz), die Ursache ist für die Ausbildung von Sekundärpermeabilitäten im kontumnahen Gebirge.

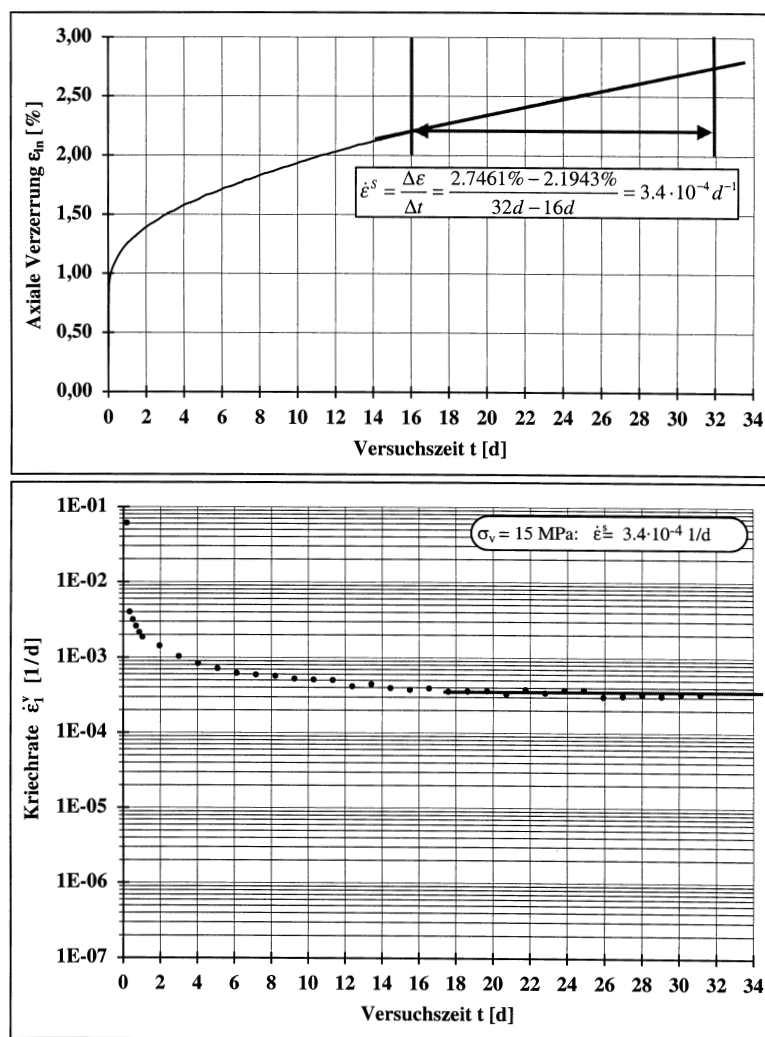


Bild 1: Exemplarische Kriechkurve

Prüfmaschinenbau – Voraussetzung für die Erarbeitung von lokations- und bauwerksbezogenen Entwurfs- und Nachweiskonzepten

Die vorstehend skizzierten besonderen Randbedingungen für gesteinsmechanische Untersuchungen im salinaren Untertagebau sind ursächlich dafür, daß abgesehen von einigen grundsätzlichen Empfehlungen der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT) keine Normen für die Durchführung und Auswertung der Laborversuche existieren. Es ist Aufgabe des planenden Ingenieurs, die Laboruntersuchungen der jeweiligen speziellen Situation der Entwurfsaufgabe und des gewählten Nachweiskonzeptes entsprechend anzupassen. Dabei beschränkt sich die Auslegung der Versuchsprogramme nicht nur auf die Festlegung der Versuchstechnik und die Anzahl der erforderlichen Untersuchungen, sondern beinhaltet in zunehmendem Maße auch konstruktive Änderungen und Erweiterungen der Untersuchungsapparaturen selbst. Hauptaufgabe gesteinsmechanischer Untersuchungen im

salinaren Untertagebau ist somit nicht die Qualitätskontrolle definierter, durch Normung vorgegebener Materialeigenschaften. Vielmehr sind die standortbezogen vorliegenden Eigenschaften und daraus die für die Tragwerksplanung benötigten Parameter im Rahmen einer Erkundung der standortbezogenen Verhältnisse laborativ in hinreichendem Maße verlässlich zu ermitteln. Sie sind daher ein wesentliches Element des Entwurfs- und Nachweiskonzeptes, ohne das weder eine den in-situ Verhältnissen entsprechende Prognose des Tragwerksverhaltens möglich ist noch eine Aussage für die Zuverlässigkeit der durch Auffahrung, Mineralgewinnung, Grubenbaunutzung und Versatz induzierten Spannungs- und Verformungszustände unter dem Gesichtspunkt des Standsicherheitsnachweises getroffen werden kann. Bedingt durch das zeitabhängige Materialverhalten von Salinalgesteinen kann die Methodik gesteinsmechanischer Untersuchungen durch eine grobe Zweiteilung in Langzeitversuche (Kriechversuche) und Kurzzeitversuche (Festigkeitsversuche) untergliedert werden. ▶

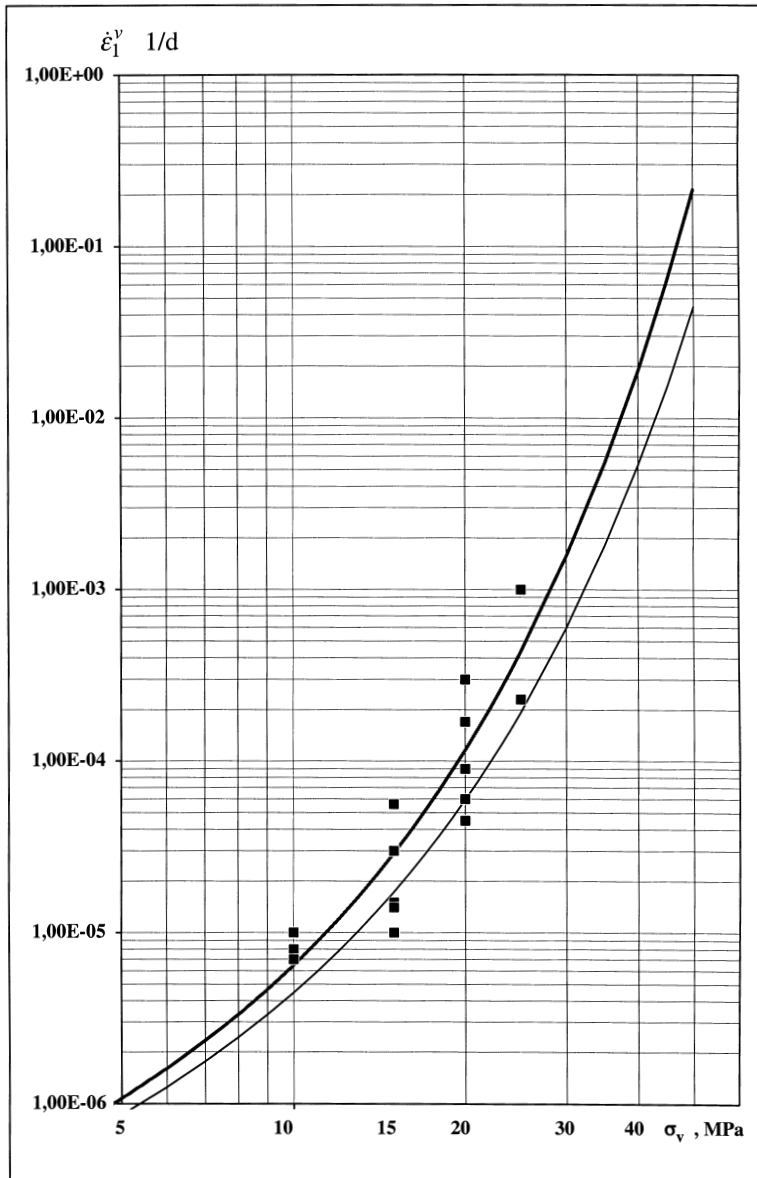


Bild 2: Stationäre Kriechraten in Abhängigkeit von der Beanspruchung

Versuchszeiten von wenigstens 1 bis 2 Monaten für die Ermittlung des Kriechvermögens viskoser Gesteine

Hinsichtlich der Charakterisierung der viskosen Eigenschaften werden im Rahmen von ein- und triaxialen Kriechversuchen somit faziesbezogen die von der Beanspruchungshöhe und der Temperatur abhängigen transienten und stationären Kriecheigenschaften bestimmt. Dazu werden aus Bohrkernmaterial zylindrische Prüfkörper mit planparallelen Endflächen und glatter Mantelfläche hergestellt, mit einer konstanten axialen und lateralen Spannung beansprucht und die axiale Verzerrung meßtechnisch erfaßt. Zur Gewährleistung konstanter Spannungen ist die infolge der Stauchung der Prüfkörper resultierende Querschnittsvergrößerung der Prüfkörper durch eine entsprechende Erhöhung der Axialspannung zu

kompensieren. Gemäß der in **Bild 1** gezeigten Versuchskurve kann nach einer Versuchszeit von ca. 1 bis 2 Monaten eine je Zeitinkrement etwa linear zunehmende Verformung beobachtet werden, deren Ableitung als stationäre Kriechrate bezeichnet wird.

Die unmittelbar nach Lastaufgabe zu beobachtende überlinear zunehmende Axialstauchung kennzeichnet die transiente Kriechphase. Sie ist charakterisiert durch die absolute Größe der Kriechdeformation, die Zeitdauer bis zum Übergang in die stationäre Kriechphase und die von der Zeit abhängige überlineare Zunahme der Verformung. Sowohl die transiente wie auch die stationäre Kriechrate sind abhängig vom Spannungsniveau, von der Temperatur und von der Salzgesteinsfazies und können für eine lokationsbezogene Fazies über eine Bandbreite von bis zu etwa einer Größenordnung variieren. Zur meßtech-

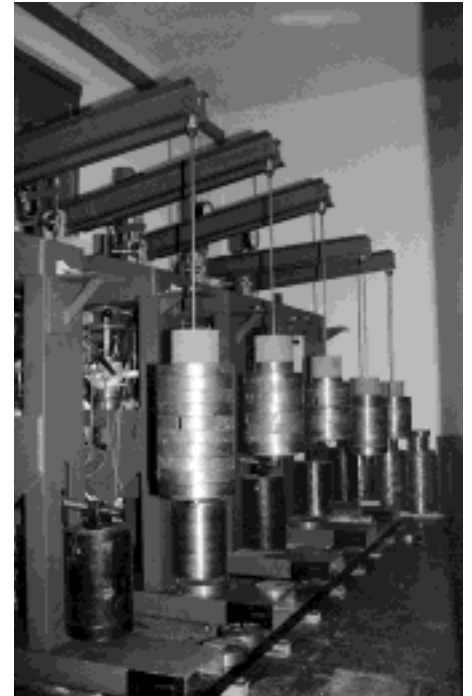


Bild 3: Prüfstand für Kriechversuche (triaxial)

nischen Ermittlung der Spannungsabhängigkeit der Kriechrate werden Kriechversuche bei variierten Deviatorspannungen durchgeführt. **Bild 2** zeigt exemplarisch die meßtechnisch bei verschiedenen Deviatorspannungen ermittelten Kriechraten einer Salzgesteinsfazies einer Lokation. Zusätzlich eingetragen sind aus den Meßwerten abgeleitete Ausgleichsfunktionen für die stationären Kriechraten. Die Ausgleichsfunktionen beschreiben die stationäre Kriechrate als Funktion der Spannung mit dem Stoffmodell *LUBBY2*. ▶



Bild 4: Prüfstand für Kriechversuche (einaxial)

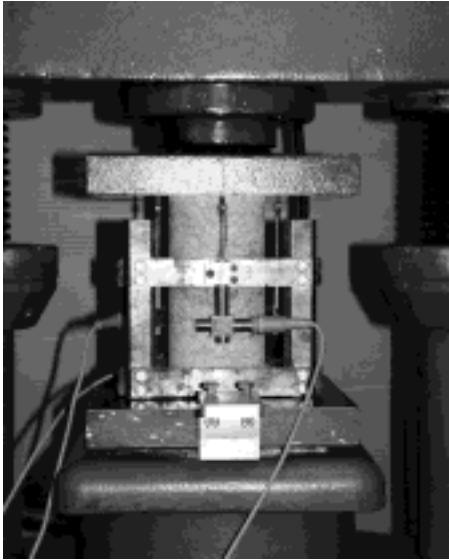


Bild 5: Prüfstand für Festigkeitsversuche (einaxial)



Bild 6: Prüfstände für triaxiale Festigkeits- und Kriechversuche

Parallelisierung von Langzeitversuchen durch Mehrfachinstallation von Prüfständen

Angesichts der aufgezeigten Streubreite der Kriechraten einzelner Versuche in Kombination mit der erforderlichen Versuchszeit von wenigstens etwa 30 Tagen für die Festlegung der Kriechcharakteristik ist es Aufgabe der Versuchstechnik, in vertretbaren Zeiträumen eine hinreichend repräsentative Anzahl an Kriechversuchen durchzuführen. Voraussetzung hierfür ist die Parallelisierung der Versuche. Für triaxiale Kriechversuche erfolgt die Parallelisierung durch eine mehrfache Installation von Prüfanlagen (**Bild 3**).

Bei einaxialer Belastung wird die erforderliche Parallelisierung zur Steigerung der Versuchszahl je Zeitbereich dadurch realisiert, daß entsprechend **Bild 4** zusätzlich zur Mehrfachinstallation von Prüfständen mehrere Prüfkörper zeitparallel in einem Belastungsrahmen untersucht werden.

Triaxiale Kompressions- und Extensionsversuche zur Charakterisierung der Bruchfestigkeit

Zur Charakterisierung der vom jeweiligen Salinargestein ertragbaren Beanspruchungen (Spannungen/Verformungen) werden ein- und triaxiale Kurzzeitversuche durchgeführt. Ein Hauptziel der Kurzzeitversuche ist es, die Bruchfestigkeit für grundsätzlich beliebige Beanspruchungsbedingungen abzuleiten. Zur Festlegung der Bruchfestigkeit unter einaxialer Beanspruchung werden zylindrische Prüfkörper mit planparallelen Endflächen zwischen die kopf- und fußseitigen Druckplatten eines Belastungsrahmens (**Bild 5**) eingebaut und mit einer konstanten Verzerrungsrate in der Größenordnung von $\epsilon = 10^{-6} \text{ sec}^{-1}$ bis 10^{-5} sec^{-1} bis zum Erreichen der Maximalbeanspruchung, u.U. auch darüber hinaus, in den Restfestigkeitsbereich hinein belastet.

Die Ermittlung der triaxialen Bruchfestigkeit erfolgt vorwiegend an zylindrischen Prüfkörpern in Autoklaven (**Bild 6**), selten auch durch dreiaxiale Versuche an würfelförmigen Prüfkörpern.

Bei Einsatz von Autoklaven werden die zylindrischen Prüfkörper mit einer Gummiummantelung zum Schutz gegen eindringendes Druckmedium versehen. Nach dem Einbau der Prüfkörper in die Triaxialzelle erfolgt zunächst eine ca. 24stündige Rekompaktions- und Temperierphase unter einer isotropen Beanspruchung im Niveau der in situ Spannung der Entnahmelokation. Ziel der Rekompaktions- und Temperierphase ist es, mögliche Schädigungen, die die Prüfkörper im Zuge der Bohrkerngewinnung und der Prüfkörperherstel-

lung erfahren haben, zu verheilen.

Durch die Temperierung wird sichergestellt, daß die Festigkeit unter den in situ anstehenden Temperaturen bestimmt wird. Im Anschluß an die Rekompaktionsphase erfolgt der eigentliche Triaxialversuch, in dem ausgehend vom Niveau der vorgegebenen Mantelspannung die Axialspannung bei konstantem Manteldruck und einer gleichbleibenden Stauchungsrate in der Größenordnung von $\epsilon = 10^{-6} \text{ sec}^{-1}$ bis 10^{-5} sec^{-1} bis zum Bruch bzw. bis zum Erreichen einer vorgegebenen maximalen Stauchung gesteigert wird. **Bild 7** zeigt beispielhaft die Arbeitskennlinie eines triaxialen Kompressionsversuches. Triaxialversuche werden regelmäßig bis in den Nachbruchbe-

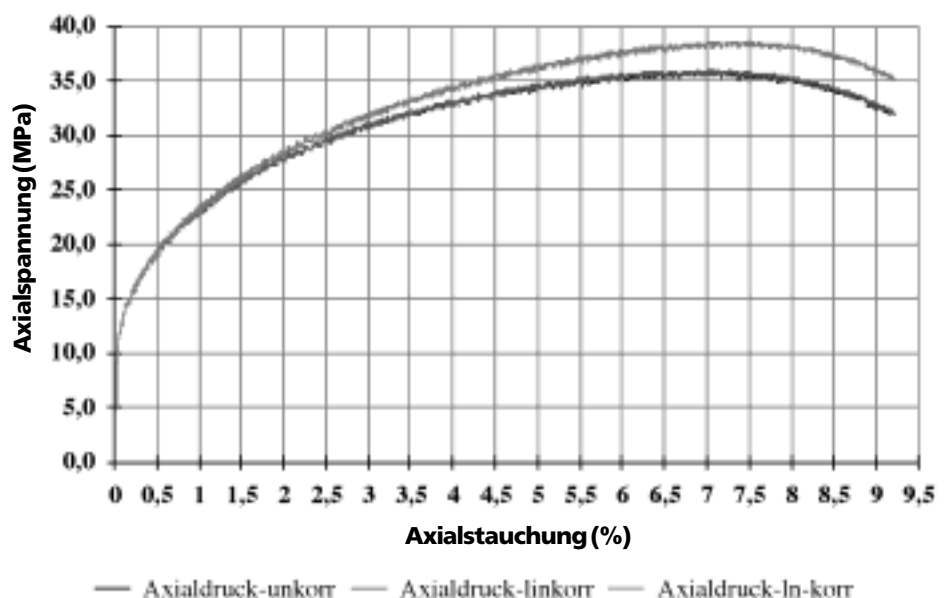


Bild 7: Arbeitskennlinie für Steinsalz und Bruchfestigkeit bei TC-Beanspruchung (Triaxial Compression)

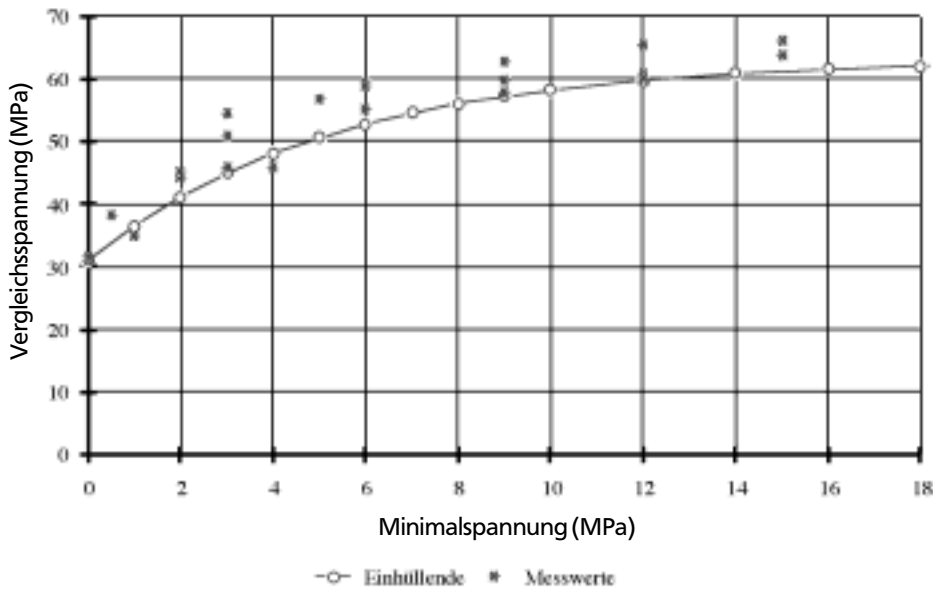


Bild 8: Bruchfestigkeit bei TC-Beanspruchung in Abhängigkeit von der Minimalspannung

reich hinein gefahren.

Zur Ableitung der Bruchfestigkeit für grundsätzlich beliebige Kompressionsbeanspruchungen werden Triaxialversuche unter variierten Manteldrücken durchgeführt. **Bild 8** zeigt exemplarisch die im Rahmen triaxialer Kompressionsversuche ermittelten Bruchfestigkeiten der einzelnen Prüfkörper sowie eine untere Grenzkurve, die die gemessenen Bruchfestigkeiten nachweisbezogen konservativ generalisiert und auf deren Grundlage eine Bewertung von Kompressionsbeanspruchungszuständen in einem Tragwerk erfolgen kann.

Neben Kompressionsbeanspruchungen treten insbesondere in Kontumähe untertägiger Grubenbaue Extensionsbeanspruchungen auf. Zur standsicherheitlichen Bewertung von Extensionsbeanspruchungen werden triaxiale Extensionsversuche durchgeführt. Im Vergleich zu Kompressionsversuchen sind sie dadurch charakterisiert, daß bei konstanter, versuchstechnisch vorgegebener Axialspannung die Mantelspannung bis zum Bruch des Prüfkörpers erhöht wird. Eine typische Arbeitskennlinie eines Extensionsversuches zeigt **Bild 9**.

Die laborativ ermittelten Kompressions- und Extensionsbruchfestigkeiten können schließlich in eine räumliche Bruchfunktion entsprechend **Bild 10** umgerechnet werden.

Die im Hauptspannungsraum nach Bild 10 aufgetragene Bruchfunktion ermöglicht eine Bewertung beliebiger dreidimensionaler Beanspruchungszustände dadurch, daß alle Spannungszustände, die innerhalb der Mantelfläche des Bruchkörpers lokalisiert sind, bruchfrei vom Material ertragen werden, während Beanspruchungszustände außerhalb der Mantelfläche des Bruchkörpers die Kurzzeitbruchfestigkeit des Materials überschreiten. Zur Bewertung der in der Realität vorliegenden Langzeitbeanspruchungs-

zustände erfolgt hiervon ausgehend eine standzeitbezogene Modifikation der Kurzzeitbruchfestigkeit.

Verzerrungsgeregelte Kompressionsversuche zur Ermittlung der Bruchstauchung

Neben den Grenzwerten für das Kriterium „Bruchfestigkeit unter Druck / Schubbeanspruchung“ können aus den Kurzzeitversuchen auch Grenzwerte für das Kriterium „zulässige Verformungen“ abgeleitet werden. Dazu werden die bei

Erreichen der Bruchfestigkeit im Versuch realisierten Bruchverzerrungen ausgewertet. **Bild 11** zeigt eine entsprechende Auftragung der Bruchverzerrungen über der Minimalspannung. Danach können mit zunehmender Minimalspannung zunehmende Verzerrungen bruchlos vom Material ertragen werden. Während unter einaxialen Beanspruchungen die Bruchverzerrung im gezeigten Beispiel $\epsilon_c \approx 2 - 3\%$ beträgt, erfolgt bei Minimalspannungen von $\min \sigma = 12 - 15$ MPa der Bruch erst bei einer Verzerrung von $\epsilon_c \approx 20 - 25\%$. Die eingetragene Grenzkurve zeigt eine konservative Interpretation der Meßwerte mit Blick auf die Formulierung eines Kriteriums.

Bei der Ableitung der aufnehmbaren/zulässigen Deformationen ist zu berücksichtigen, daß die im Rahmen von Kurzzeitversuchen ermittelten Bruchverzerrungen lediglich eine sehr konservative Einschätzung der aufnehmbaren Verzerrungen ermöglichen, da die bruchlos ertragbaren Verzerrungen von Salzgesteinen auch wesentlich durch die Verzerrungsrate geprägt sind. In Fällen, in denen die aus Kurzzeitversuchen abgeleitete Bruchverzerrung einen Nachweis der Standsicherheit nicht ermöglicht, und in Fällen, in denen eine aus wirtschaftlicher Sicht optimale Planung erfolgen soll, können Versuche mit unterschiedlichen Deformationsraten durchgeführt werden. Ziel dieser Versuche ist es, faziesabhängig nachzuweisen, daß unter den in situ gemessenen sehr viel geringeren Verformungsraten die bruchlos ertragbaren Verzerrungen deutlich größer sind als die in Kurzzeitversuchen ermittelten Bruchverzerrungen. **Bild 12** zeigt beispielhaft den Zusammenhang zwischen der Verzerrungsrate und der Bruchverzerrung für zwei unterschiedliche Steinsalzfazies. ▶

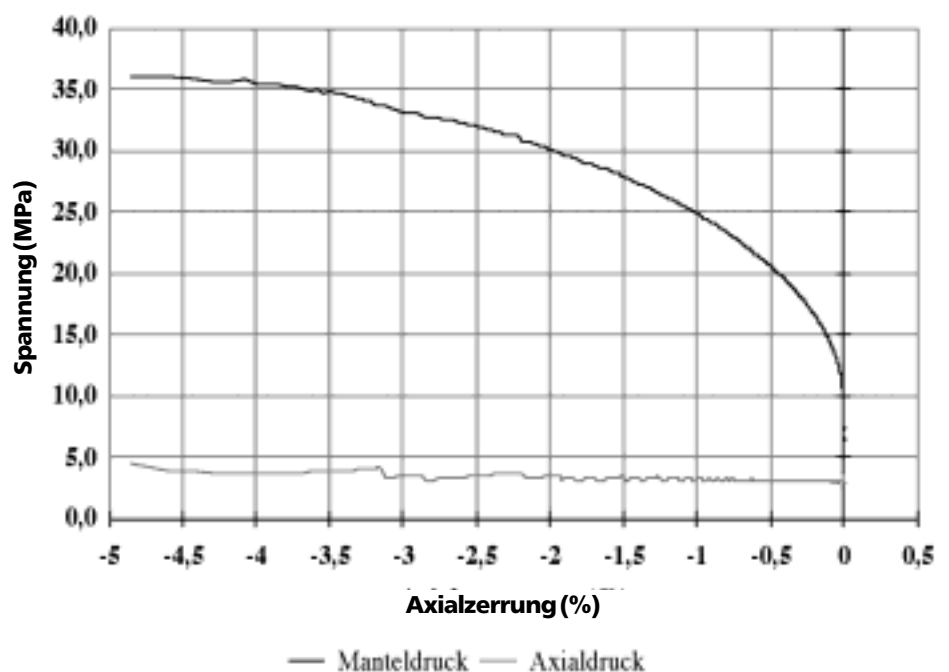


Bild 9: Arbeitskennlinie für Steinsalz und Bruchfestigkeit bei TE-Beanspruchung (Triaxial Extension)

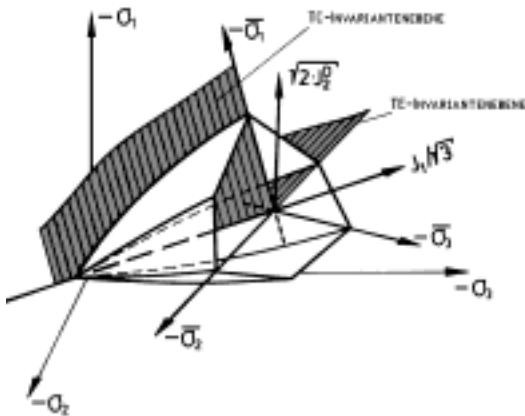


Bild 10: Bruchfestigkeit von Steinsalz im Hauptspannungsraum

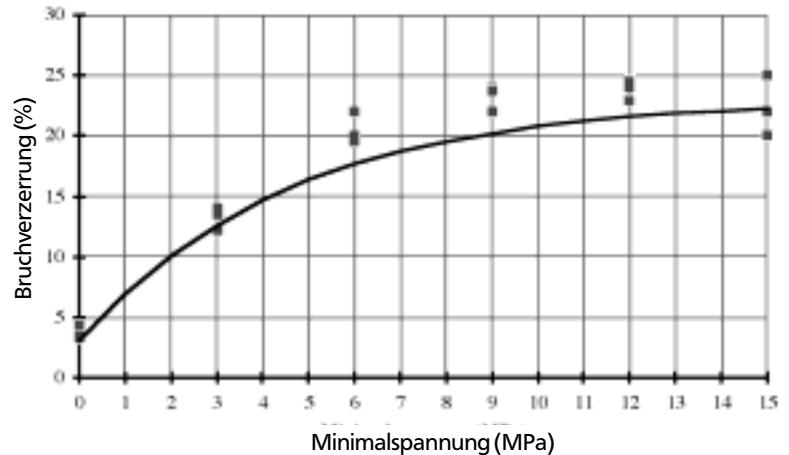


Bild 11: Bruchverzerrungen in Abhängigkeit von der Minimalspannung

Einaxiale Spaltzugversuche zur Ableitung der Zugfestigkeit

Bei der numerischen Simulation des Tragverhaltens von Grubenbauen mit großen Spannweiten, von Feldesteilen mit Mehrsohlenbau und hohen Durchbauungsgraden oder im Bereich von Schichtgrenzen zwischen unterschiedlich kriechfähigen Salinargesteinen können rechnerisch Zugspannungen ausgewiesen werden. Für die standsicherheitliche Bewertung dieser Zugspannungen kann es erforderlich sein, die Zugfestigkeit des anstehenden Materials laborativ belegen zu müssen. Da direkte Zugversuche an Gesteinsproben nur schwierig zu realisieren sind, werden z.B. sogenannte Spaltzugversuche entsprechend **Bild 13** durchgeführt, bei denen zylindrische Prüfkörper mit einem h:d-Verhältnis von 1:1 diametral belastet werden.

Die diametrale Belastung führt auf der Grundlage der Elastizitätstheorie zu einer Zugspannung im Prüfkörperquerschnitt, die aus der aufgetragten Streifenlast und den Prüfkörperabmessungen berechnet werden kann. **Bild 14** zeigt exemplarisch die Ergebnisse ausgewählter Spaltzugversuche an verschiedenen Steinsalzfazies. Danach ist die Zugfestigkeit dieser Salzgesteine vergleichsweise gering und stark streuend, aber auch faziesabhängig relativ unterschiedlich.

Die Zukunft im gesteinsmechanischen Labor

Neben den vorstehend skizzierten klassischen Versuchen zur Festlegung der Kriech- und Bruchcharakteristik sind gesteinsmechanische Untersuchungen an Salinargesteinen derzeit gekennzeichnet durch die Notwendigkeit, zusätzlich zu der Bruchfestigkeit und zum Kriechverhalten neben der Entfestigungscharakteristik zur erweiterten Charakterisierung sprödbrechartig versagender Salinargesteine die sog. Dilatanzfestigkeit, die infolge Materialschädigung induzierte Kriechrate und die vom Beanspruchungs- und Schädigungszustand abhängige Sekundär-Permeabilität zu be-

stimmen. Ursächlich hierfür ist die aus Fragestellungen zum Nachweis der Barrierenintegrität und der Dichtigkeit geotechnischer Abschlußbauwerke im Rahmen des Deponie- und Endlagerbaus in die Salzmechanik übernommene Continuum Damage Mechanik (CDM), die in zunehmendem Maße auch im Rahmen von Tragwerksplanungen für den Berg- und Kavernenbau Anwendung findet. Neue Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der Tragwerke bzw. von speziellen Tragwerksteilen wie Streckendamm- oder Schachtverschlusssbauwerken – wie z.B. Dichtheit unter Einwirkung von Flüssigkeiten und Gasen – stellen auch neue Anforderungen an laborative Untersuchungen. Die für die entsprechenden Sicherheitsnachweise notwendigen rechnerischen Ermittlungen von Gefügauflockerungszonen im

Salinargebirge, den sog. Dilatanzzonen, und die rechnerische Ermittlung von Abschalungen und der damit einhergehenden Veränderung der primären Gebirgspermeabilitäten in die sogenannten (erhöhten) Sekundärpermeabilitäten verlangen die Ermittlung weiterer Eigenschaften und Kennwerte. Zu nennen sind hier

- die Dilatanzfestigkeit (Gebirgsfestigkeit), bestimmt über die online-Messung akustischer Wellenausbreitungen,
- die Dilatanz (Volumendehnung) sowie
- die Permeabilitätsveränderung in Abhängigkeit von Minimalspannung und Dilatanz.

Hinzu kommt in jüngster Zeit auch noch die Frage nach einer Quantifizierung der Verheilungsfähigkeit. ▶

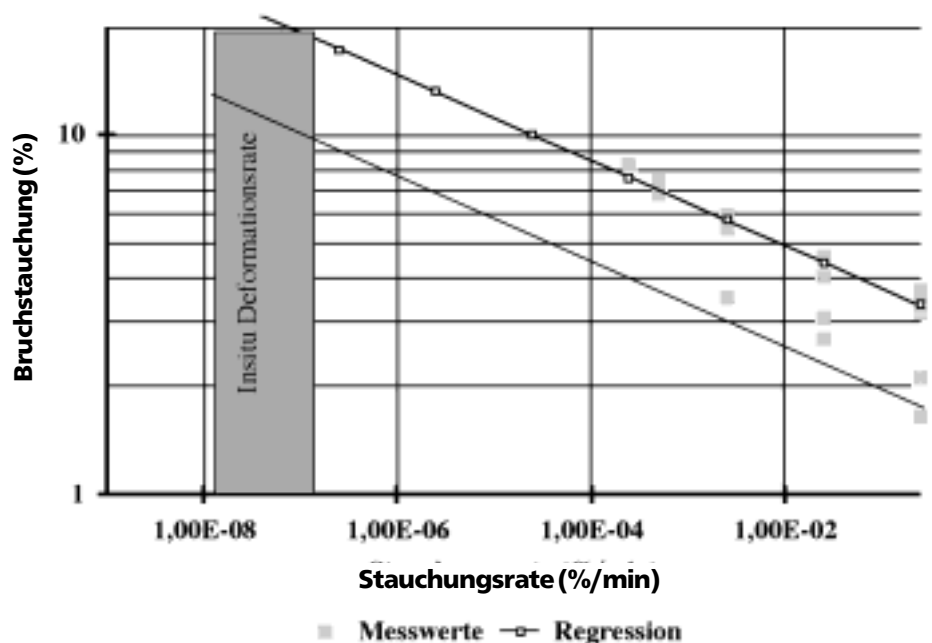


Bild 12: Bruchverzerrungen in Abhängigkeit von der Verzerrungsrate bei UC-Beanspruchung (Uniaxial Compression) (unterschiedliche Fazies)

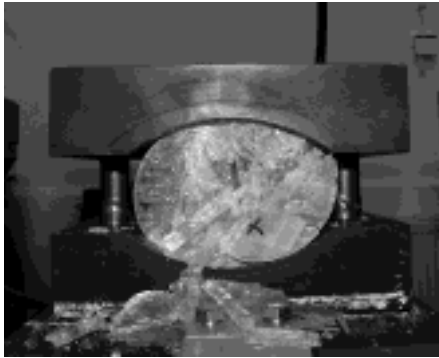


Bild 13: Spaltzugversuch am Steinsalzprüfkörper

Laborative Untersuchungen zur Quantifizierung der Gefügeschädigung – Grundlage für eine wirtschaftliche und sicherheitliche Optimierung von Untertagebauwerken

Wesentliches Merkmal eines Stoffmodells auf Basis der CDM ist die quantitative Beschreibung der vor einem Materialversagen einsetzenden Gefügeschädigung mit ihren Konsequenzen für Kriechdeformationen, Festigkeit und Permeabilität. Durch die Erfassung der bei Überschreitung der Dilatanz- bzw. Dauerfestigkeit einsetzenden Gefügeschädigung kann die zeitabhängige Tragfähigkeit bei Beanspruchungen zwischen der Dauerfestigkeit und der Bruchfestigkeit quantifiziert werden. Gegenüber Tragwerksplanungen nach klassischen Konzepten eröffnet sich hierdurch die Möglichkeit, den Zeitpunkt eines potentiellen Materialversagens zu prognostizieren bzw. bisher nicht belegbare Tragreserven zu aktivieren. Laborative Voraussetzung für die Anwendung der CDM im Rahmen der Bemessung untertägiger Tragstrukturen im Salinar ist die meßtechnische Bestimmung der Volumendilatanz in Abhängigkeit von der Beanspruchung und daraus abgeleitet die Festlegung der Dilatanzfestigkeit. **Bild 15**

zeigt beispielhaft die sich bei Überschreitung der Dauerfestigkeit im Salinargestein ausbildenden Mikrofissuren und Porenräume.

Diese Gefügedefekte führen sowohl zu einer Minderung der Tragfähigkeit wie auch zu einer Volumenvergrößerung des Prüfkörpers. Die versuchsbegleitende Messung dieser Volumenvergrößerung kann durch die in **Bild 16** gezeigte Meßanordnung realisiert werden.

Das während des Versuchs in der Triaxialzelle verdrängte Ölvolumen wird über einen doppelt wirkenden Meßzylinder geführt, so daß die Volumenmessung in eine Wegmessung transformiert wird. Mit der gezeigten Meßanordnung können Volumina von $\Delta V = 0,026 \text{ ml}$ exakt bestimmt werden (zum Vergleich: 1 Schnapsglas = 2 ml). Die Bestimmung der Dilatanzfestigkeit erfolgt entsprechend **Bild 17** als diejenige Deviatorspannung, die bei $\text{min}_{\epsilon_{\text{vol}}}$ im Versuch realisiert wurde. Um auch bei Versuchen mit einer weniger deutlichen Ausbildung von $\text{min}_{\epsilon_{\text{vol}}}$ die Dilatanzfestigkeit festlegen zu können, werden zusätzlich zur Volumenmessung versuchsbegleitende Ultraschallmessungen durchgeführt. Durch die kontinuierliche Aufzeichnung der Ultraschallwellenlaufzeiten können beginnende Gefügeschädigungen, d.h. Mikrofissuren, sehr exakt detektiert werden, da Materialschädigungen in Form von Mikrorissen zu einer signifikanten Reduktion der Schallwellenlaufzeiten führen.

Quantifizierung mechanisch-hydraulischer Wechselwirkungen durch online-Messung der Gaspermeabilität

Zur Bewertung der Integrität geologischer Barrieren bei Endlagern und Untertagedeponien, der Durchlässigkeit bzw. Dichtigkeit geotechnischer Abschlußbauwerke (Umläufigkeiten) und zum Nachweis der Dichtheit von Speicherkavernen ist die Permeabilität von Gesteinen oder Abdichtungsmaterialien in Abhängigkeit von der Bean-



Bild 15: Aufgelockertes und entfestigtes Mineralkorngefüge eines Steinsalzprüfkörpers unter TC-Beanspruchung

spruchung bzw. Schädigung zu bestimmen. Zur Quantifizierung dieser Abhängigkeit ist es Aufgabe der Labortechnik, zusätzlich zur Messung der Spannungen und Verformungen, der Temperatur, der Volumendilatanz und der Ultraschallwellenlaufzeiten den Gas- bzw. Salzlösungsfluß durch einen Prüfkörper versuchsbegleitend zu bestimmen. Die geringe Permeabilität ungestörter Salzgesteine unter triaxialer Gebirgsbeanspruchung von $K \leq 10^{-20} \text{ m}^2$ kann mit standardisierten Durchflußmessungen nicht erfaßt werden. Die meßtechnische Ermittlung des Gasflusses je Zeiteinheit als Grundlage für die daraus abzuleitende Permeabilität erfolgt daher alternativ über eine temperaturkompensierte Druckmessung. **Bild 18** zeigt die konstruktive Ausführung eines Meßsystems für die versuchsbegleitende Messung der Permeabilität von Salzgesteinen in Triaxialversuchen.

Durch die zeitparallele meßtechnische Erfassung der Dilatanz bzw. Schädigung und der Gesteinspermeabilität können einerseits Grenzwerte für die Formulierung von Kriterien zum Nachweis der Barrierenintegrität abgeleitet werden. Andererseits ermöglicht die Permeabilitätsmessung eine Bestimmung der Parameter für eine mechanisch-hydraulisch gekoppelte Berechnung, die zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit von geotechnischen Barrieren wie Streckendammbauwerken oder Schachtverschlußbauwerken notwendig wird. Ohne im Rahmen des Beitrages auf die komplexen Stoffmodelle und Wechselwirkungen eingehen zu können, kann die mechanisch-hydraulische Wechselwirkung vor dem gedanklichen Hintergrund charakterisiert werden, daß sowohl das mechanische Tragverhalten des Salinargesteins wie auch die hydraulischen Eigenschaften durch die Volumendilatanz bestimmt sind. Je größer die Volumendilatanz, desto größer ist die Schädigung bzw. um so kleiner ist die Resttragfähigkeit des Materials. In analoger Weise gilt: Je größer die Volu-

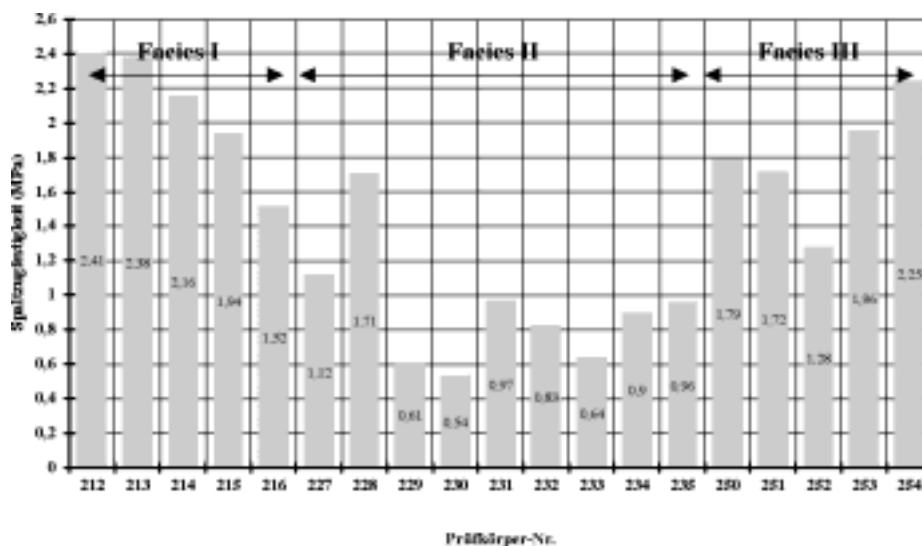


Bild 14: Spaltzugfestigkeit für Steinsalz verschiedener Fazies

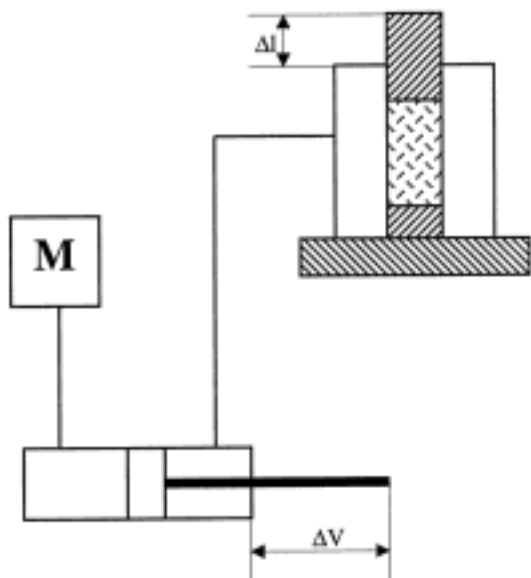


Bild 16: Schematische Darstellung zur Dilatanzmessung

mendilatanz, desto größer ist die Permeabilität des Salzgesteins.

Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten ist darüber hinaus die Untersuchung der Verheilungseigenschaften von Salzgestein. Ein primär geschädigtes, d.h. dilatant verformtes Salzgestein kann dann als geheilt eingestuft werden, wenn sowohl die Volumendilatanz durch entsprechende kontraktante Verformungen kompensiert ist wie auch die Permeabilität nach der Verheilung wieder der Anfangspermeabilität entspricht. Die vorstehend skizzierten Verheilungseffekte sind insbesondere

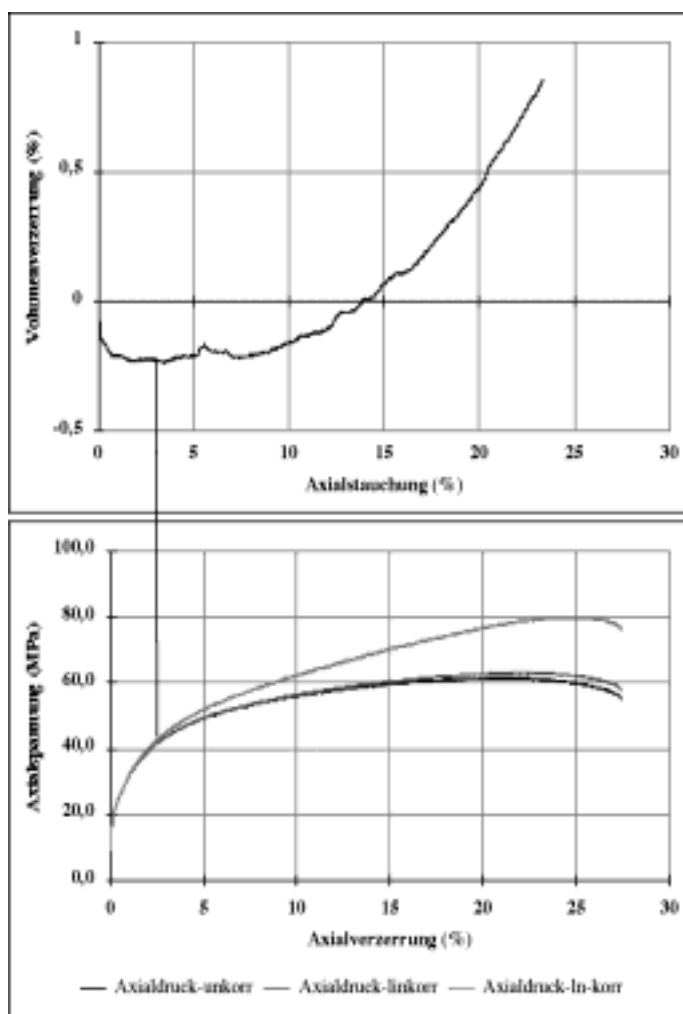


Bild 17: Ermittlung der Dilatanzfestigkeit



Bild 18: Meßsystem zur Ermittlung von Gasflüssen in Triaxialversuchen

dann von Bedeutung, wenn danach gefragt wird, wann eine infolge von Auflockerungsprozessen umläufige Konturzone um Damm- und Verschlussbauwerke infolge eines auflaufenden Gebirgsdruckes wieder vollständig verheilt ist. Im Bereich des Speicherkavernenbaus ist die Verheilung beispielsweise dann von Interesse, wenn danach gefragt wird, über welchen Zeitraum und unter welchen Innendrücken eine Verheilung der bei abgesenkten Innendrücken induzierten Gefügeschädigung erfolgt, so daß zyklische Belastungen im Lauf der Betriebszeit zu keinen progressiv akkumulierten Entfestigungszonen führen.

Sonderprüfmaschinenbau und Technikumsversuche für die Stoffmodellforschung

Neben den vorstehend skizzierten Untersuchungen zur Ermittlung von Stoffparametern zur Charakterisierung des Kriech- und Festigkeitsverhaltens von Salzgesteinen und zur Ableitung von Kriterien bzw. Grenzwerten für die Bewertung rechnerisch ermittelter Zustandsgrößen liefern gesteinsmechanische Untersuchungen an Salzgesteinen einen wesentlichen Beitrag zur Stoffmodellforschung bzw. zur Validierung von Stoff-

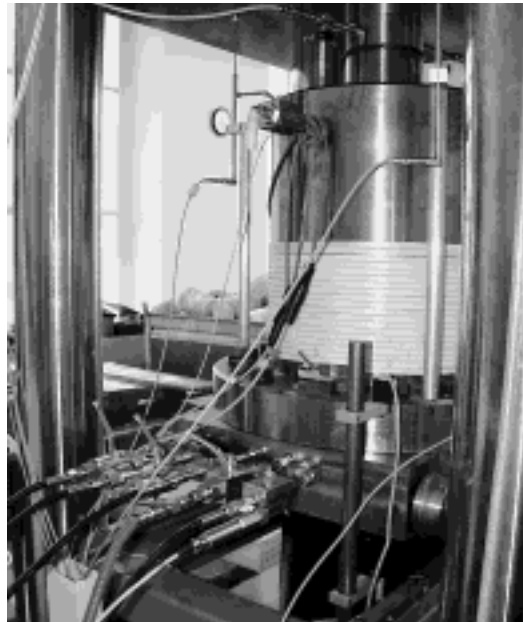
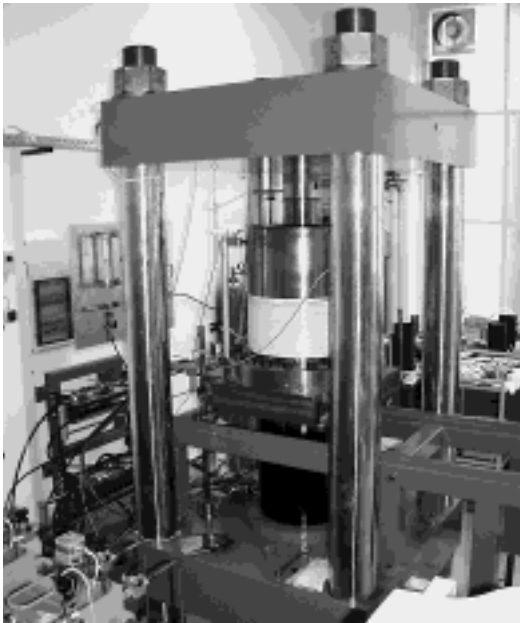


Bild 19: Modellprüfstand für triaxiale TC- und TE-Versuche an axialgelochten Großbohrkernen

modellen. Zur Erforschung neuer Stoffmodelle werden Versuche an axial gelochten Steinsalzgroßbohrkernen eingesetzt. Die Versuche haben den Charakter von Modellversuchen unter dem Gesichtspunkt, daß die in einem Untertagebergwerk zu erwartenden mechanischen Phänomene grundsätzlich auch im geometrisch vereinfachten Modell ablaufen, hier aber unter nunmehr bekannten Randbedingungen. Von entscheidender Bedeutung bei dieser Versuchstechnik ist, daß eindeutig erfäßbare geometrische, kräftemäßige und stoffliche Randbedingungen (z.B. Hohlzylindergeometrie, Axialdruck, Manteldruck, Temperatur, Innendruck, Gasdruck, Spannungsverformungsverhalten des Salzgesteins) vorgegeben werden können und sich während des Versuchs im Modellprüfkörper von außen unbeeinflusste und material-spezifische Spannungsumlagerungen einstellen können. Vor diesem Hintergrund kann ein Stoffmodell u.a. erst dann als validiert bezeichnet werden, wenn die numerischen Analysen z.B. derartiger Modellversuche die meßtechnisch ermittelten Zustandsgrößen bestätigen. **Bild 19** zeigt einen Prüfstand zur laborativen Untersuchung von Modelltragwerken und gibt einen Eindruck von der Komplexität und Dimension derartiger Prüfanlagen.

Die unabhängige Regelung von Axialdruck, Manteldruck und Innendruck, die meßtechnische Erfassung von Temperatur, Axialstauchung, Volumendilatanz des Prüfkörpers und des Gesteins in Nähe der Innenbohrung, die Durchströmung mit Gas oder Lauge zur Permeabilitätsermittlung sowie die versuchsbegleitende Durchschallung unterstreichen eindrucksvoll die eingangs dokumentierte Aussage, daß laborative Untersuchungen für den salinaren Berg- und Kavernenbau in zunehmendem Maße konstruktive Änderungen und nachhaltigen Erweiterungen der eingesetzten Versuchsausrüstungen erfordern.

Wesentliches Element jeden Entwurfs- und Nachweiskonzeptes im Untertagebau sind gesteinsmechanische Untersuchungen

Im Ergebnis vorstehender Ausführungen zur Methodik gesteinsmechanischer Untersuchungen an Salinargesteinen bleibt festzuhalten, daß gesteinsmechanische Untersuchungen im salinaren Untertagebau (Bergbau, Kavernenbau, Untertagedeponiebau und Endlagerbau) nicht wie sonst im konstruktiven Ingenieurbau der Qualitätskontrolle der eingesetzten Materialien dienen. Sie haben hier vielmehr die Aufgabe, das mechanische Verhalten des natürlichen Baustoffes „Salzgestein“ standortbezogen in seiner Streubreite zu ermitteln und die Grundlage für eine Homogenbereichskartierung und -charakterisierung zu schaffen. Ohne Kenntnis der standortbezogenen Materialeigenschaften ist eine den Kriterien der Sicherheit und Wirtschaftlichkeit genügende Tragwerksbemessung nicht möglich. Vor diesem Hintergrund sind der jeweiligen Aufgabenstellung angemessene gesteinsmechanische Untersuchungen im salinaren Untertagebau ein wesentliches Element eines Entwurfs- und Nachweiskonzeptes, ohne das weder eine die in-situ Verhältnisse angemessen erfassende Prognose des Tragverhaltens möglich ist noch eine Aussage über die Zulässigkeit der durch Auffahrung, Nutzung und Versatz bzw. Stilllegung/Verschluß von Grubenbauen induzierten Spannungs- und Verformungszustände getroffen werden kann. Angesichts vielfältiger Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der geotechnischen Anlagen und damit an Tragwerksplanung und Nachweisführungen ist die Ermittlung von Deformations- und Festigkeitseigenschaften oft nicht mehr ausreichend. Zunehmend sind laborativ zu ermitteln die Dilatanzfestigkeit, Porositäts-/Permeabilitätsänderungen und Entfestigungseigenschaften.

Ausblick – Endlagerung in alternativen Wirtsgesteinen

Für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland ist für die nächsten Jahre eine Standort-suche geplant, in die neben Salinargesteinen weitere geringpermeable Gesteine bzw. Gebirgsformationen einbezogen werden sollen. Aus Erfahrung erscheinen hierzu auch Tongesteine im Grundsatz geeignet. U.a. Voraussetzung ist hierbei neben einer hinreichend geringen Materialpermeabilität das Fehlen eines hydraulisch wirksamen Trennflächengefüges. Laborative Untersuchungen an Tongesteinen zeigen, daß im Grundsatz ähnliche, in der quantitativen Ausformung allerdings anders akzentuierte Gesteinseigenschaften vorliegen. Hinzu kommt ein deutlich höherer Porenwasser-gehalt mit Einfluß auf Verformbarkeit und Festigkeit sowie ein tongesteinsfaziesabhängiges Quellvermögen. Es ist beabsichtigt, – und erste Untersuchungen haben bereits begonnen – die an der Professur für Deponietechnik und Geomechanik vorhandene Prüfmaschinenausrüstung in den nächsten Jahren auch für Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet einzusetzen und entsprechend weiterzuentwickeln. Ziel ist es auch hier, über gesteinsmechanische Untersuchungen und die daraus folgenden Materialeigenschaften ein Entwurfs- und Nachweisinstrumentarium für die Tragwerksplanung in Tongesteinen zu entwickeln.

Anm. d. Red.: Ausführliche Literaturangaben sind auf Wunsch bei den Verfassern erhältlich.

Dr.-Ing. Uwe Düsterloh
Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Lux
Institut für Aufbereitung und Deponietechnik
Erzstraße 20
38678 Clausthal-Zellerfeld
Tel.: 05323/72-2443 (Düsterloh)
05323/72-2224 (Lux)
Fax: 05323/72-2341