

Beurteilung der geomechanischen Stabilität und Integrität von Endlagerbergwerken im Salzgebirge auf der Grundlage geologischer und ingenieurgeologischer Untersuchungen

STEFAN HEUSERMANN

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 30655 Hannover, Stilleweg 2,
Email: heusermann@bgr.de

Abstract

Any safety assessment of a permanent repository for radioactive waste has to include an analysis of the geomechanical stability of the repository and integrity of the geological barrier. Such an analysis is based on geological and engineering geological studies of the site, on laboratory and in-situ experiments, and on numerical calculations. Central part of the safety analysis is the geomechanical modelling of the host rock. The model should simulate as closely as possible the conditions at the site and the behaviour of the rock (e.g., geology, repository geometry, initial rock stress, and constitutive models).

On the basis of the geomechanical model numerical calculations are carried out using the finite-element method and an appropriate discretization of the repository and the host rock. The assessment of the repository stability and the barrier integrity is based on calculated stress and deformation and on the behaviour of the host rock measured and observed in situ. An example of the geomechanical analysis of the stability and integrity of the Bartensleben mine, a former salt mine, is presented. This mine is actually used as a repository for low level radioactive waste. The example includes all necessary steps of geological, engineering geological, and geotechnical investigations.

Zusammenfassung

Die erforderlichen Sicherheitsnachweise für Endlager für radioaktive Abfälle umfassen insbesondere die geomechanische Beurteilung der Standsicherheit der Anlage und der Integrität der geologischen Barriere. Dazu sind geologische und ingenieurgeologische Standortuntersuchungen, Laborversuche, In-situ-Untersuchungen und numerische Berechnungen erforderlich. Kernstück des Sicherheitsnachweises ist die Erstellung eines geomechanischen Modells, das möglichst realitätsnah die Situation am Endlagerstandort und das Gebirgsverhalten (z.B. geologische Struktur, Hohlraumgeometrie, primäre Gebirgsspannungen, Materialmodelle) beschreibt.

Auf der Grundlage des geomechanischen Modells ist ein Finite-Elemente-Modell zu erstellen, das eine zweckmäßige Diskretisierung des betrachteten Gebirgsbereiches und die Wahl geeigneter Randbedingungen und Lasteinwirkungen umfasst. Mit diesem Modell werden die durch das Endlager im Gebirge verursachten Spannungs- und Verformungszustände berechnet und zusammen mit den Ergebnissen aus In-situ-Messungen, aus örtlichen Beobachtungen und aus Laborversuchen zur Beurteilung der Stabilität und Integrität des Endlagers herangezogen.

Die prinzipielle Methodik eines Integritätsnachweises wird exemplarisch für das ehemalige Salzbergwerk Bartensleben erläutert, das als Endlager für schwach radioaktive Abfälle genutzt wird. Dazu werden die erforderlichen geologischen Grundlagen und das daraus abgeleitete geomechanische Modell sowie die in Modellberechnungen ermittelten Spannungs- und Verformungszustände im Gebirge dargestellt. Stabilität und Integrität der Salzbarriere werden anhand dieser Ergebnisse und verschiedener geomechanischer Kriterien bewertet.

Keywords: Waste disposal, salt mine, rock salt, geomechanics, safety assessment, geotechnical stability, barrier integrity, engineering geology, finite-element method, numerical model, stress, strain, deformation, constitutive model, creep, dilatancy

EINLEITUNG

Für die dauerhafte Endlagerung gefährlicher radioaktiver Abfälle in geologischen Medien, z.B. im Salzgebirge, ist die Eignung des Gebirges in standortspezifischen Sicherheitsnachweisen zu untersuchen und zu belegen. Derartige Nachweise betreffen das Gesamtsystem eines Endlagers vom Abfall und seiner Verpackung als technischer Barriere über das Untertagebauwerk als geotechnischer Barriere bis zum Gebirgskörper als geologischer Barriere und umfassen folgende Einzelnachweise (Langer, 1997):

- Geotechnischer Sicherheitsnachweis,
- Sicherheitsnachweis für die Betriebsphase,
- Langzeitsicherheitsnachweis für die Nachbetriebsphase.

Aus geomechanischer Sicht sind dazu im Zuge der Endlagerplanung für den Bergwerksentwurf und für die Hohlraumdimensionierung Standsicherheitsuntersuchungen durchzuführen, um die Stabilität der untertägigen Anlage nachzuweisen. Insbesondere zum Langzeitsicherheitsnachweis gehört die quantitative Bewertung der Integrität des Gebirges, d.h. seiner Barrierewirksamkeit, um den dauerhaften Einschluß der Abfälle und die langfristige Rückhaltefähigkeit schädlicher Stoffe zu belegen. Die geologische Barriere besteht aus der Wirtsgesteinsformation im Nahfeld und den geologischen Formationen im Fernfeld. Das Wirtsgestein muß sicherstellen, daß der Zufluß von Lösungen und der Austritt kontaminierter Fluide in die Biosphäre entweder nicht möglich ist oder in akzeptablen Grenzen verläuft. Die Wirksamkeit der geologischen Barriere ist in Szenarien zu bewerten, die eine Reduktion der Barriere, z.B. durch Subrosion, bewirken oder Wegsamkeiten, z.B. durch Abbaueinwirkung oder Wärmeeintrag verursachte Risse, erzeugen (Abb. 1).

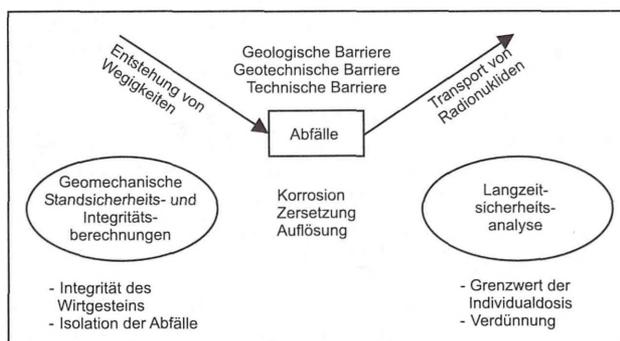


Abb. 1: - Bewertung der Wirksamkeit geologischer Barrieren (Langer, 1999)

Fig. 1: - Assessment of the efficiency of geological barriers (Langer, 1999)

KONZEPT GEOMECHANISCHER SICHERHEITSNACHWEISE

Grundgedanke geomechanischer Sicherheitsnachweise ist es, die konkrete Situation eines Untertagebauwerks auf mögliche Gefährdungen hin zu analysieren und nachzuweisen, daß der tatsächliche Zustand des Bauwerks sich in ausreichend sicherem Abstand zu einem kritischen Zustand befindet. Die tatsächliche gegenwärtige Beanspruchung und deren weitere Entwicklung ist möglichst zutreffend zu erfassen und zu prognostizieren. Da für den geomechanischen Sicherheitsnachweis unterirdischer Bauwerke keine allgemein verbindlichen und abdeckenden Beanspruchungsszenarien und daraus ableitbare globale Sicherheitskriterien festzulegen sind, müssen im Zuge eines speziellen Nachweiskonzeptes die jeweils vorliegende standortspezifische Problemstellung und die daraus für die Sicherheit des Bauwerks resultierenden Einwirkungen identifiziert werden.

Die Notwendigkeit eines speziellen Konzeptes für geomechanische Nachweise im Untertagebau ergibt sich insbesondere aus folgenden, das Gebirge betreffenden Aspekten (Wallner, 1993):

- Das Gebirge übernimmt gleichzeitig belastende und tragende Funktion. Seine Eigenschaften bestimmen dabei sowohl die Einwirkungen als auch die Reaktionen. Wegen dieser Kopplung ist es schwierig, eindeutige Versagenszustände zu formulieren.
- Das Gebirge muß in seinem geologischen Aufbau und in seinen zwangsläufig deutlich streuenden Materialeigenschaften standortbezogen erkundet werden. Auch nach intensiver Erkundung verbleibt eine nicht zu quantifizierende Unsicherheit in den geologischen und geotechnischen Gebirgsdaten.

Geomechanische Nachweise für die Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit untertägiger Hohlräume des Tunnel- und Kavernenbaus sowie im Bergbau und in der Endlagerung sind aus diesen Gründen bisher nicht in Normen, sondern lediglich in Form von Richtlinien oder Empfehlungen geregelt. Derartige Nachweise beruhen i. allg. auf der Beobachtungsmethode. Dabei wird der Entwurf eines untertägigen Bauwerks so ausgelegt, daß über Standsicherheitsberechnungen hinaus auch geeignete baubegleitende Messungen und Beobachtungen zur Kontrolle herangezogen werden und im Rahmen einer ganzheitlichen Bewertung sowohl die Ergebnisse theoretischer als auch experimenteller und visueller Untersuchungen berücksichtigt werden.

Geomechanische Nachweise für das Langzeitverhalten von Untertagebauwerken, also insbesondere auch bei Endlagern in duktilem Salzgebirge, erfordern jedoch

Aussagen für Zeiträume, die durch Messungen und Beobachtungen nicht mehr abgedeckt werden können. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, geomechanische Prognosemodelle zu verwenden, die die langfristig zu erwartenden physikalischen Prozesse im Gebirge zutreffend beschreiben.

Für die Gesamtbeurteilung geomechanischer Stabilitätsfragen sind folgende Untersuchungen und Bewertungen gleichgewichtige Bestandteile (Wallner, 1993):

- Geologische und ingenieurgeologische Erkundung,
- geotechnische Laboruntersuchungen,
- In-situ-Messungen,
- Erfahrungen vor Ort sowie aus vergleichbaren geologischen Medien und Bergwerken,
- numerische Berechnungen anhand geomechanischer Modelle.

Kernstück für numerische Sicherheitsberechnungen ist nach Abb. 2 die Erstellung eines geomechanischen Modells, das möglichst realitätsnah, aber mit den notwendigen Vereinfachungen die tatsächlichen Gegebenheiten des Standortes beschreibt, also die Geologie, die daraus resultierenden idealisierten Homogenbereiche (klassifiziert und eingeteilt aufgrund bestimmter Materialeigenschaften), die Hohlrumsituation, den Gebirgsspannungszustand und das Materialverhalten der verschiedenen geologischen Schichten sowie ggf. auch die Abbauhistorie oder verschiedene Bauzustände. Dazu ist eine entsprechende umfassende Standorterkundung erforderlich, die z.B. die Untersuchung der geologischen Struktur, der Primärspannungen, der Verformungseigenschaften des Gebirges in situ, aber auch des ggf. zeitabhängigen Verformungs- und Bruchverhaltens des Gesteins im Labor umfaßt.

Das geomechanische Modell bildet die Grundlage für das numerische Berechnungsmodell, i. allg. das Finite-Elemente-Modell, das die zweckmäßige und problemorientierte zwei- oder dreidimensionale Diskretisierung des betrachteten Gebirgsbereichs, die Wahl geeigneter mechanischer, thermischer und geometrischer Rand- und Anfangsbedingungen, die Berücksichtigung der erforderlichen Stoffgesetze sowie verschiedene mechanische und ggf. thermische Lasteinwirkungen umschließt. Mit dem Finite-Elemente-Modell werden schließlich die durch das Untertagebauwerk im Gebirge verursachten Spannungs- und Verformungszustände berechnet.

Um sicherzustellen, daß derartige Finite-Elemente-Berechnungen zutreffende Ergebnisse liefern, ist eine Überprüfung der verwendeten Programme und Modelle in verschiedenen Phasen notwendig (Abb. 2):

- Nachweis der Richtigkeit der Rechnerprogramme und ihrer numerischen Algorithmen (Verifizierung), z.B. durch Vergleich mit analytischen Lösungen,
- Nachweis der Gültigkeit der verwendeten Berechnungsmodelle (Validierung), z.B. durch Vergleich mit Ergebnissen aus charakteristischen Labor- oder In-situ-Versuchen,
- Nachweis der Übertragbarkeit validierter Berechnungsmodelle auf andere Standorte (standortspezifische Bestätigung), z.B. durch Vergleich mit Ergebnissen aus In-situ-Messungen.

Ziel der standortspezifischen Bestätigung ist der Nachweis, daß die zeitliche und räumliche Modellidealisation, die gewählten Rand- und Anfangsbedingungen sowie alle übrigen Berechnungsannahmen so gewählt sind, daß das Berechnungsmodell trotz der notwendigen Vereinfachungen ausreichend zutreffende Ergebnisse liefert. Dabei werden sich zwangsläufig Abweichungen zwischen den Ergebnissen aus Modellberechnungen und den häufig nur lokal vorhandenen Meßergebnissen eines realen Standortes einstellen. Die Modellvereinfachungen müssen deshalb gewährleisten, daß das gesamte Trag- und Verformungsverhalten der untersuchten Struktur ausreichend präzise bzw. konservativ beschrieben wird. Die Aussagegenauigkeit von Modellberechnungen wird darüber hinaus durch die natürliche Streubreite der gewählten Modellparameter, insbesondere der Materialkennwerte, beeinflusst. Daher sind bei Standsicherheitsuntersuchungen häufig auch Parameterstudien und Sensitivitätsanalysen erforderlich.

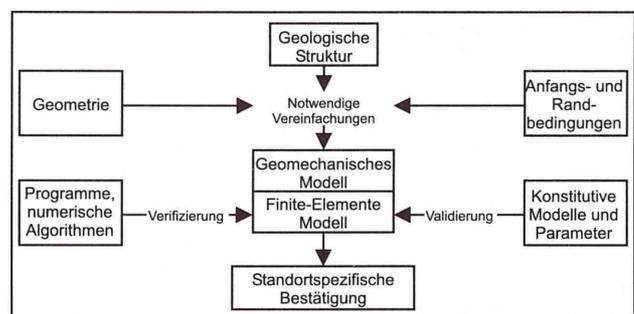


Abb. 2: - Wesentliche Schritte bei der geomechanischen Modellbildung (Langer & Heusermann, 2001)

Fig. 2: - Essential steps of geomechanical modelling (Langer & Heusermann, 2001)

STABILITÄTS- UND INTEGRITÄTS-KRITERIEN

Die in geomechanischen Modellberechnungen ermittelten Ergebnisse (u.a. Spannungen, Verformungen, Temperaturen) bilden zusammen mit den Ergebnissen aus geologischer und ingenieurgeologischer Erkundung, aus bergmännischer Beobachtung und Erfahrung sowie aus Labor- und In-situ-Untersuchungen die Grundlage für die Beurteilung der Stabilität und Integrität des Untertagebauwerks und der geologischen Struktur. Sie weisen aber nicht unmittelbar eine mögliche Beeinträchtigung oder einen Verlust der Tragfähigkeit oder der Integrität des Gebirges aus, so daß über die Berechnungen und begleitenden Untersuchungen hinaus zweckmäßige Bewertungskriterien formuliert werden müssen.

Aufgrund unterschiedlicher Anforderungen ist es sinnvoll, geomechanische Bewertungskriterien für die Betriebs- und die Nachbetriebsphase getrennt aufzustellen. In der Betriebsphase eines Untertagebauwerks sind im Hinblick auf die Betriebssicherheit Fragen der Stabilität von Hohlräumen und Hohlraumssystemen vorrangig. Für die Nachbetriebsphase von Endlagern ist insbesondere die langfristige Funktionsfähigkeit der geologischen Barriere von Bedeutung.

Kriterien bei der Beurteilung der Stabilität einzelner Hohlräume (z.B. Strecken, Abbaue, Kammern, Schächte) und ganzer Hohlraumssysteme (z.B. Abbaufelder, Feldesteile) einschließlich ihrer Trag- und Stützelemente (Pfeiler, Schweben) können Bezugsgrößen wie beispielsweise Zugfestigkeit, Bruchfestigkeit, Dilatanzgrenze, zulässige Effektivverzerrungen und Verzerrungsraten, zulässige Hohlraumkonvergenzen und Konvergenzraten sowie großräumige Verformungszustände und Oberflächenabsenkungen sein. Grundlage für die Beurteilung sind berechnete und gemessene Zustandsgrößen wie Spannungen, Verzerrungen, Verschiebungen oder Hohlraumkonvergenzen. Theoretische und experimentelle Untersuchungen als Grundlage für die Formulierung derartiger quantitativer Standsicherheitskriterien, beispielsweise für Endlagerbergwerke im Salzgebirge, sind Gegenstand aktueller geowissenschaftlicher Forschung und beziehen auch moderne Theorien wie z.B. die Schädigungstheorie ein (Hunsche & Schulze, 2000).

Die langfristige Funktionsfähigkeit und Integrität von Salzgebirge als geologischer Barriere kann folgendermaßen beurteilt werden. Im unverritzten Zustand ist Steinsalz mit Ausnahme möglicher isolierter Lösungseinschlüsse trocken und dicht. Zur Bewertung der Barriereigenschaften der Salzsichten unter Einwirkung von Untertagebauwerken werden deshalb die Prozesse untersucht, die mechanisch zur Entstehung von Po-

renvolumen, zu Wegsamkeiten und damit zum Eindringen von Lösungen in die Abbaue führen könnten. Diese konzeptionelle Vorgehensweise führt dazu, daß die Bewertung der hydraulischen Barriereigenschaften auf der Grundlage mechanischer Zustandsgrößen, nämlich berechneter Spannungen, erfolgt.

Ein Zutritt von Lösungen in das Endlager als Untertagebauwerk kann nur erfolgen, wenn an der äußeren Begrenzung der Salzbarriere überhaupt Lösungen anstehen. Dies wird konservativ unterstellt. Die Funktionsstauglichkeit der Salzbarriere gilt als rechnerisch nachgewiesen, wenn eine Bildung von Wegsamkeiten aus geomechanischer Sicht ausgeschlossen werden kann. Dazu können nach dem derzeitigen wissenschaftlichen Kenntnisstand für die Bereiche mit kriechfähigem Salzgestein zwei Kriterien herangezogen werden:

- Dilatanzkriterium: Die Integrität ist gewährleistet, wenn keine Schädigung des Gebirges auftritt. Es ist nachgewiesen, daß Spannungszustände unterhalb der Dilatanzgrenze auch langfristig nicht mit Auflockerungen verbunden sind, so daß für Spannungen in diesem Bereich die Dichtigkeit des Salzgesteins gewährleistet ist. Erst Spannungszustände oberhalb der Dilatanzgrenze führen zu einer Auflockerung des Mikrogefüges, wodurch bei Andauern des Zustandes allmählich ein Netzwerk von Mikrorissen entsteht.
- Laugendruckkriterium: Die Integrität ist gewährleistet, wenn die kleinste Hauptdruckspannung im Gebirge nicht unter den Wert des angenommenen hydrostatischen Drucks in der entsprechenden Teufe fällt. Der hydrostatische Druck ergibt sich aus einer fiktiven, bis zur Geländeoberfläche reichenden Flüssigkeitssäule, für die näherungsweise eine Dichte von $1,1 \text{ kg/dm}^3$ angenommen wird.

Nach diesen strengen Kriterien hinsichtlich der Beibehaltung der mechanischen Integrität als Indikator der hydraulischen Barriereigenschaften ist die Funktionsstauglichkeit der Salzbarriere bereits rechnerisch nachgewiesen, wenn eines der beiden Kriterien erfüllt ist. Dieser Vorgehensweise liegt folgende Modellvorstellung zugrunde:

- Fall A: Ist durch Spannungsentlastungen infolge Hohlraumeinwirkung die kleinste Hauptdruckspannung in der Salzbarriere kleiner als der entsprechende hydrostatische Teufendruck (das Laugendruckkriterium ist nicht erfüllt), aber in der Salzbarriere werden noch keine dilatanten Zonen berechnet (das Dilatanzkriterium ist erfüllt), so steht die Lösung vor einer ungeschädigten und damit rißfreien Barriere. Ein Eindringen in diese Salzsichten oder eine Permeation der Barriere kann langfristig ausgeschlos-

sen werden. Die Integrität ist dauerhaft gewährleistet.

- Fall B: Die Bedingung, daß das Dilatanzkriterium rechnerisch nicht eingehalten wird, das Laugendruckkriterium aber erfüllt ist, tritt nur bei hohen Spannungen, also in größerer Teufe auf.
- Fall C: Wenn beide Kriterien nicht erfüllt sind, d. h. eine Lösung mit hohem hydrostatischen Druck an einem dilatanten Salzbereich ansteht, könnte dies zu einem langsam fortschreitenden Aufweiten der Mikrorisse, damit auch zur Verbindung der Risse innerhalb des Reißgefüges und schließlich zu einem tieferen Eindringen der Lösungen in die Salzbarriere führen.

ANWENDUNGSBEISPIEL ENDLAGERBERGWERK

Die prinzipielle Vorgehensweise eines geomechanischen Integritätsnachweises wird anhand des ehemaligen Salzbergwerks Bartensleben, das für die Endlagerung schwach radioaktiver Abfälle genutzt wird, exemplarisch erläutert. Dazu werden die erforderlichen Grundlagen wie geologische Profile, Homogenbereiche, Reißwerk mit Hohlraumangaben, Stoffgesetze und ihre Parameter dargestellt. Mit dem daraus abgeleiteten geomechanischen Modell werden die erforderlichen Zustandsgrößen wie Spannungen und Verzerrungen berechnet. Stabilität und Integrität der Salzbarriere im Bereich des Endlagerbergwerks werden schließlich mittels der oben genannten Kriterien beurteilt.

GEOLOGIE

Ziel der geologischen Erkundung des im Zechstein-Salinar angelegten Bergwerks war die Erstellung eines detaillierten geologisch-tektonischen Lagerstättenmodells der Salzstruktur als Grundlage für Sicherheitsanalysen. Dazu war insbesondere

- die stratigraphische Abfolge der Salzschiechten,
- der tektonische Bau der Salzstruktur und der Lagerungsverhältnisse des Kaliflözes Staßfurt und des Hauptanhydrits als potentielle Migrationspfade,
- die Lage der Zechsteinbasis und des Salzspiegels, d.h. die Mächtigkeit der Salzschiechten als geologischer Barriere

zu ermitteln (Behlau & Mingerzahn, 2001).

In den noch zugänglichen Aufschlüssen des Bergwerks wurden Neukartierungen durchgeführt, ca. 32 km Strecken im Maßstab 1:100, ca. 13 km Strecken und Kammern im Maßstab 1:500 bzw. 1:1000 sowie Detailkartierungen bis zum Maßstab 1:10. Ferner wurden ca. 50 Altbohrungen, verschiedene geotechnische Bohrungen und 11 neue Erkundungsbohrungen ausgewertet. Zur Vorfelderkundung gegen den Salzspiegel und die Basis des Salinars sowie zur Erkundung von Internstrukturen wurden elektromagnetische Reflexionsmessungen in Strecken und Bohrungen durchgeführt.

Das Lagerstättenmodell wurde als geologisch-tektonisches Kartenwerk im Maßstab 1:1000 bearbeitet. Für das hier betrachtete Grubenfeld Bartensleben wurden die vier Hauptsohlen dargestellt. Für die räumliche Darstellung der Lagerungsverhältnisse im Salinar wurden insgesamt 21 geologisch-tektonische Querprofile mit einem mittleren Abstand von 250 m erstellt.

Abb. 3 zeigt als Beispiel den für die geomechanische Modellierung verwendeten Ausschnitt eines entlang der Ostquerschläge der Schachanlage Bartensleben verlaufenden Profils. Dieser Ausschnitt stellt die geologischen Verhältnisse im Zentralbereich des Bergwerks dar und reicht im westlichen Teil vom Östlichen Schachtsattel I und II, getrennt durch die Südmulde II, zur Hauptmulde und im östlichen Teil zum Ostsattel.

Zur stratigraphischen Einordnung der Salinarschichten wurde die von Bornemann (1991) aufgestellte Gliederung herangezogen. Im Grubenfeld sind Schichten von der Werra- bis zur Aller-Folge aufgeschlossen. Im betrachteten Profil (Abb. 3) werden die Sättel aus Salinar der Staßfurt-Folge z2, bestehend aus Hauptsalz (z2HS), Hangendsalz mit kieseritischen Übergangsschichten (z2HG-UE), Kaliflöz Staßfurt (z2SF), gebildet. Die Hauptmulde umfaßt Einheiten der Leine-Folge z3 mit Anhydritmittelsalz (z3AM), Schwadensalz (z3SS), Bank-/Bändersalz (z3BK/BD), Orangesalz (z3OS), Liniensalz (z3LS) und Hauptanhydrit (z3HA).

Die Salzstruktur zeigt westlich der Hauptmulde einen überkippten Bau und östlich der Hauptmulde einen aufrechten Faltenbau. Der Hauptanhydrit reagiert aufgrund seiner Sprödigkeit bruchhaft auf die Faltung der übrigen salinaren Gesteine und weist eine Zerblockung in einzelne Schollen auf. Diese Schollen reichen im betrachteten Profil (Abb. 3) bis an den Salzspiegel. Die Durchtrennungszonen des Hauptanhydrits sind z.T. durch die Grubenkartierung und durch Bohrungen nachgewiesen. Sie sind mit Sekundärmineralien (Steinsalz, Carnallit, Sylvin) oder Flözmaterial besetzt.

Der Salzspiegel liegt nach Abb. 3 in einer mittleren Tiefe von ca. 270 m (-140 m NN) und weist westlich des überkippten Hauptanhydrits auf einer Breite von ca. 230 m eine Eintiefung von maximal ca. 40 m auf. Über dem Salzspiegel folgt das Hutgestein (cr), das über der Hauptmulde sehr große Mächtigkeiten von bis zu 220 m erreicht. Das übrige Deckgebirge besteht aus Schichtenfolgen des mittleren Keuper (km), bereichsweise Jura (j), Oberkreide (kro) und Quartär (q). Für die geomechanische Modellierung wurde konservativ jedoch nur ein Teil des Deckgebirges in seiner Tragwirkung berücksichtigt.

Homogenbereiche

Im Zuge der geomechanischen Modellierung ist die geologische Struktur zu Homogenbereichen zusammenzufassen. Diese Vereinfachung ist erforderlich, um den Aufwand bei der Modellierung einzelner Schichten auf ein vertretbares Maß zu reduzieren und bei der Diskretisierung des geomechanischen Modells in finite Elemente deren Zahl und damit den numerischen Aufwand zu beschränken. Zur Festlegung von Homogenbereichen sind folgende Schritte durchzuführen:

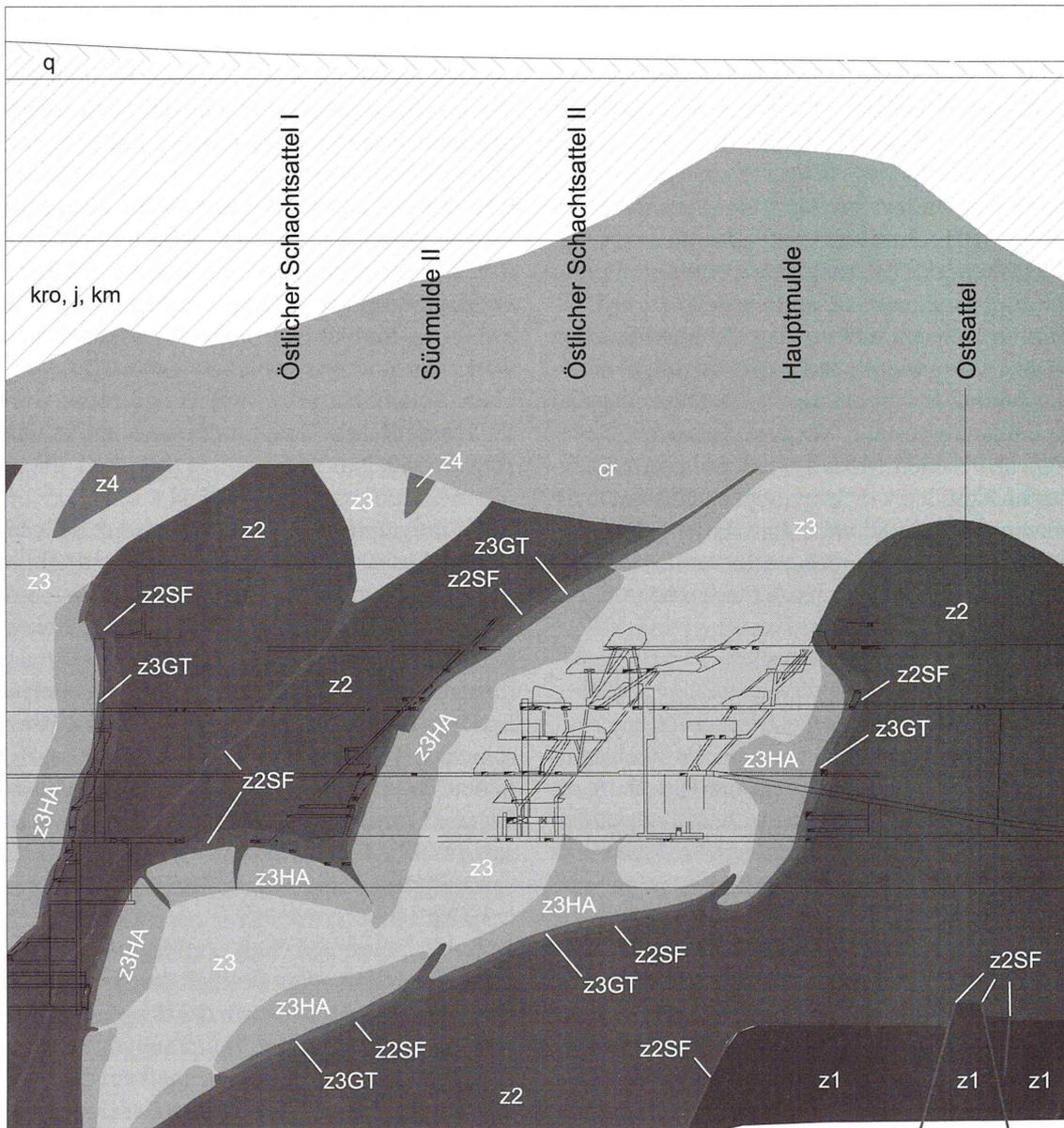


Abb. 3: - Geologisches Profil durch den Zentralbereich der Schachanlage Bartensleben (Behlau & Mingerzahn, 2001).

Fig. 3: - Geological cross section of the central part of the Bartensleben mine (Behlau & Mingerzahn, 2001).

- Orangesalz (z3OS),
- Liniensalz (z3LS),
- Kaliflöz Staßfurt (z2SF),
- Hauptsalz (z2HS).

Als Homogenbereiche mit ausschließlich elastischen Materialeigenschaften wurden folgende Schichten unterschieden (Abb. 4):

- Hutgestein (cr),
- Hauptanhydrit (z3HA).

HOHLRÄUME

Die Auffahrung von Abbauen im Zentralbereich der Schachanlage Bartensleben begann ca. 1913 im Kalilager C an der westlichen Flanke des Hauptanhydrit. Es folgte 1914 der Abbau im Kalilager D östlich von der Hauptmulde. Der Kaliabbau wurde 1927 eingestellt. In den Jahren 1918 bis 1920 entstanden die ersten Steinsalzabbau in der Hauptmulde. Der Steinsalzabbau erfolgte bis in die sechziger Jahre.

Das gewählte geologische Profil (Abb. 3) verläuft durch den Zentralbereich in der Nähe der Ostquerschläge. Neben den Abbauen der Kalilager C und D werden Steinsalzabbau der 2., 3. und 4. Abbaureihe geschnitten. Das Profil liegt damit in einem Bereich des Grubenfeldes mit dem größten Durchbaungsgrad.

Für die geomechanische Modellierung wurden Abbau ausgewählt, die entweder direkt in dem betrachteten Profil oder in relativer Nähe zu diesem Profil liegen. Lage und Geometrie der Abbau wurden auf der Grundlage des bergmännischen Reißwerks und spezieller Scanneraufnahmen des Bergwerkbetreibers, der Deutschen Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), festgelegt.

Die ausgewählten Abbau sind in Abb. 5 dargestellt. Abbau ohne Verfüllung sind hellgrau gekennzeichnet. Abbau, die im Anschluß an die Kaligewinnung wieder verfüllt wurden, sind dunkelgrau dargestellt.

GEBIRGSSPANNUNGSZUSTAND

Als primärer Gebirgsspannungszustand wird ein mit der Teufe linear zunehmender isotroper lithostatischer Gebirgsdruck angenommen. Dabei wird sowohl für das

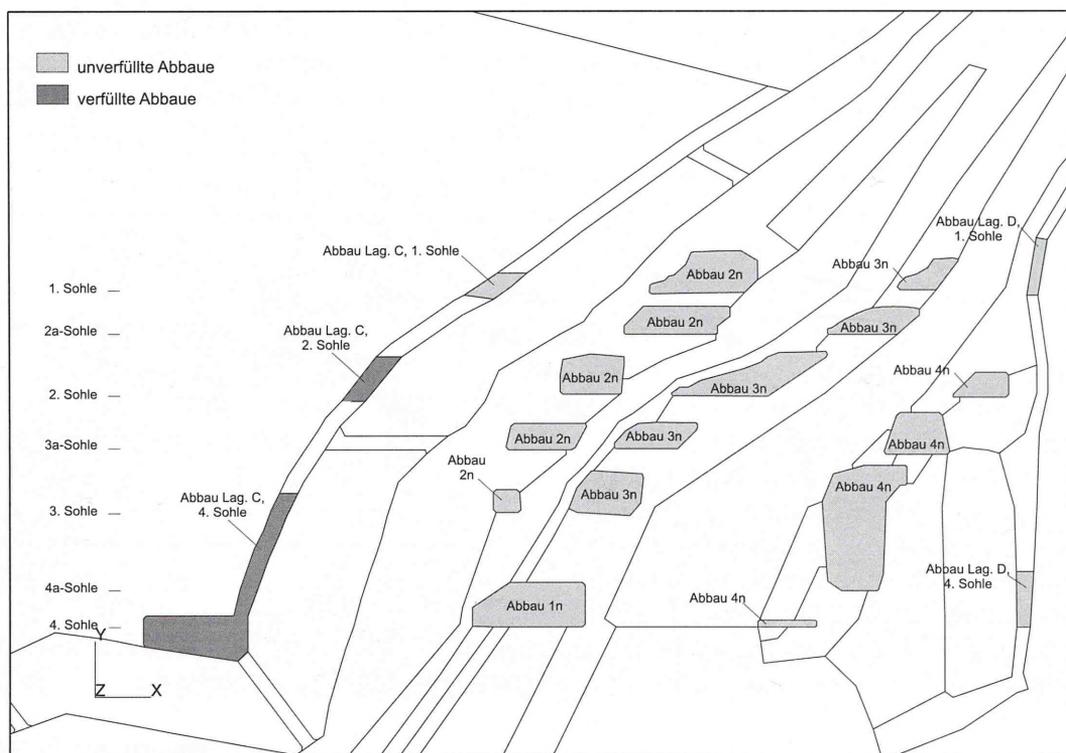


Abb. 5: - Hohlraumkonfiguration im Zentralbereich der Schachanlage Bartensleben.

Fig. 5: - Configuration of mining rooms in the central part of the Bartensleben mine.

Salzgebirge wie auch für das Deckgebirge eine Dichte von 2,2 kg/dm³ gewählt.

Die Beträge der im geomechanischen Modell rechnerisch ermittelten Spannungen, Verzerrungen und Verschiebungen sind ganz erheblich vom gewählten Primärspannungszustand abhängig. Es ist daher erforderlich, Größe und ggf. Richtung der Primärspannungen, insbesondere im Salzgebirge, durch geeignete In-situ-Meßverfahren zu ermitteln (Heusermann, 1995).

MATERIALVERHALTEN UND -KENNWERTE

Das Verformungsverhalten der nicht kriechfähigen Gebirgsbereiche (Hauptanhydrit, Hutgestein) wurde durch das Hookesche Gesetz beschrieben. Die elastischen Materialkonstanten sind zum Teil in Laborversuchen ermittelt, zum Teil aus Erfahrungswerten abgeschätzt. Für das Hutgestein wurde ein Elastizitätsmodul von 10000 MPa und eine Querdehnungszahl von 0,27 gewählt. Für den Hauptanhydrit wurde der für den Nachbruchbereich experimentell ermittelte Elastizitätsmodul von 30000 MPa verwendet, um die durch die Klüftigkeit des Gebirges reduzierte Verbandssteifigkeit zu berücksichtigen.

Das Verformungsverhalten der duktilen Salzschichten wurde durch ein Stoffgesetz modelliert, das neben den elastischen Formänderungen auch stationäres Kriechen erfaßt. Zusätzlich erfolgte eine Berücksichtigung der durch Dilatanz verursachten Auflockerung mittels viskoplastischer Formänderungen.

Die effektive stationäre Kriechrate von Steinsalz ergibt sich nach Hunsche & Schulze (1994) aus

$$\dot{\epsilon}_{\text{eff}}^{\text{cr}} = A_{\text{cr}} \cdot e^{-\frac{Q}{RT}} \cdot \left(\frac{\sigma_{\text{eff}}}{\sigma^*} \right)^n$$

mit R = universelle Gaskonstante (8,3143·10⁻³ kJ/mol·K), T = Temperatur (K), σ_{eff} = Effektivspannung (MPa), σ* = Normierungsspannung (1,0 MPa) und den Materialkonstanten A_{cr} = Strukturfaktor (1/d), n = Spannungsexponent (-), Q = Aktivierungsenergie (54,0 kJ/mol). Die hier behandelten Salzgesteine unterscheiden sich im wesentlichen nur durch den Strukturfaktor A_{cr}, so daß ihre Kriechfähigkeit durch einen Faktor A*, bezogen auf den Referenzwert A₀ = 0,18 1/d, angegeben werden kann:

$$A_{\text{cr}} = A^* \cdot A_0$$

Die für die einzelnen Homogenbereiche mit duktilem Verformungsverhalten experimentell ermittelten Werte für A* sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Homogenbereich	Symbol	A*
Anhydritmittel- und Schwadensalz	z3AM/SS	1/32
Bank-/Bändersalz	z3BK/BD	1/8
Orangesalz	z3OS	1/2
Linienalz	z3LS	1/2
Kaliflöz Staßfurt	z2SF	10
Hauptsalz	z2HS	1/16

Tab. 1: - Relative Kriechfähigkeit A*

Tab. 1: - Relative creep capability A*

Für die dilatante Formänderung der duktilen Salzschichten wurde ein viskoplastisches Materialmodell verwendet. Viskoplastisches Fließen setzt oberhalb einer Fließgrenze F ein, die durch ein modifiziertes Drucker-Prager-Fließkriterium beschrieben wird:

$$F = \alpha \cdot J_1 + \sqrt{J_2^D} - k$$

mit J₁ = 1. Invariante des Spannungstensors (MPa), J₂^D = 2. Invariante des Spannungsdeviators (MPa²), α = fiktiver Reibungswinkel (-), k = fiktive Kohäsion (MPa).

Die Fließgrenze, die hier mit der Ortskurve für Zugspannungen identisch ist, nähert nach Abb. 6 die für Steinsalz experimentell ermittelte Dilatanzgrenze (Cristescu & Hunsche, 1998) im Bereich relevanter Spannungszustände mit ausreichender Genauigkeit an. Die Parameter α und k ergeben sich zu α = 0,2887 und k = 0.

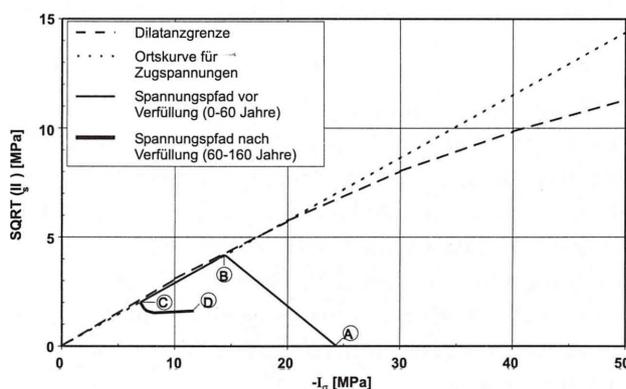


Abb. 6: - Dilatanzgrenze und angenäherte viskoplastische Fließgrenze für Steinsalz.

Fig. 6: - Dilatancy boundary and approached viscoplastic yield boundary for rock salt.

Finite-Elemente-Modell

Die Erstellung des Finite-Elemente-Modells erfolgte mit dem Programmsystem INCA.

Der Zentralbereich Bartensleben weist, insbesondere aufgrund der vorliegenden Hohlraumkonfiguration, eine deutlich ausgeprägte dreidimensionale Tragwirkung auf, die nur mit entsprechenden räumlichen Berechnungsmodellen zu erfassen ist. Da bei der Diskretisierung der Berechnungsmodelle ein sehr hoher Detaillierungsgrad erforderlich ist, ist die Durchführung derartiger räumlicher Berechnungen aufgrund beschränkter Rechnerkapazität aber nur sehr begrenzt möglich. Daher wurde der Zentralbereich vereinfachend in einem zweidimensionalen Modell abgebildet. Dies ist im Hinblick auf die aus den Berechnungen abzuleitende Beurteilung der Barrierenintegrität zulässig, da das zweidimensionale Modell i. a. zu ungünstigeren Spannungs- und Verformungszuständen führt und damit konservativ abdeckend ist. Ferner ermöglicht die ausgeprägte NNW-SSE-Richtung der geologischen Struktur eine geometrische Idealisierung als zweidimensionales Modell.

Aus der Festlegung der Lage und der Kontur übereinanderliegender Abbaue resultiert die geometrische Konfiguration der Schweben zwischen diesen Abbaue. Die Kontur der Sohle und der Firste jedes Abbaus wurde im Grundriss ermittelt. Die Überlappung der Sohlkontur eines Abbaus mit der Firstkontur des darunterliegenden Abbaus ergibt eine gemeinsame Schnittfläche, aus der eine repräsentative mittlere Schwebenbreite bestimmt wurde. Ggf. wurde dann die Breite der Abbaue in den Berechnungsmodellen so angepaßt, daß sich daraus diese mittlere Schwebenbreite ergibt.

Im Kalilager C wurden drei Abbaue berücksichtigt, von denen die Abbaue auf der 2. und 4. Sohle bereits seit mehreren Jahrzehnten wieder verfüllt sind. Daher wurde für diese beiden Abbaue eine vollständige Verfüllung mit Versatz im Modell berücksichtigt. Dabei galt vereinfachend die Annahme, daß der Versatz unmittelbar nach Auffahrung der Abbaue in einem Schritt eingebracht wurde und zu diesem Zeitpunkt spannungslos war.

Im Berechnungsmodell wurde neben der Salzstruktur nicht das gesamte Deckgebirge, sondern vereinfachend nur der vom Salzspiegel bis zu einer Teufe von ca. 130 m (0 m NN)reichende Teil abgebildet. Der darüber liegende, bis zur Geländeoberfläche reichende Teil wurde in seiner Tragwirkung vernachlässigt, in seiner Lastwirkung jedoch durch entsprechende Ersatzlasten berücksichtigt, die sich aus einer angenommenen mitt-

leren Deckgebirgsdichte von $2,2 \text{ kg/dm}^3$ ergeben.

Das Finite-Elemente-Modell erstreckt sich bis in eine Teufe von 705 m (-575 m NN). Die Diskretisierung des Finite-Elemente-Modells ist in Abb. 7 in einem Ausschnitt dargestellt. Das Modell umfaßt 29140 Knoten und 9745 isoparametrische 8-Knoten-Elemente mit 49525 Freiheitsgraden. Nach Ausbruch der Hohlräume verbleiben 8252 Elemente mit 25558 Knoten und 50940 Freiheitsgraden.

Im Berechnungsmodell wurde der mittlere Auffahrtzeitpunkt der Abbaue für das Jahr 1936 festgelegt. Daraus resultiert eine heutige Standzeit von ca. 65 Jahren. Insgesamt wurde ein Berechnungszeitraum von 100 Jahren betrachtet, um eine Prognose der zukünftigen Beanspruchungszustände zu ermöglichen. Das Ende der Modellberechnung entspricht somit dem Jahr 2036.

Berechnungsergebnisse

Die gebirgsmechanischen Berechnungen wurden mit dem Finite-Elemente-Programmsystem ANSALT I (Nipp, 1991) durchgeführt. Auswertung und Darstellung der Ergebnisse erfolgten mit dem Programmsystem INCA. Aus den Berechnungen wurden folgende Ergebnisse ermittelt:

- Verformte Modellstruktur,
- Verschiebungsvektoren,
- Effektivverzerrungen,

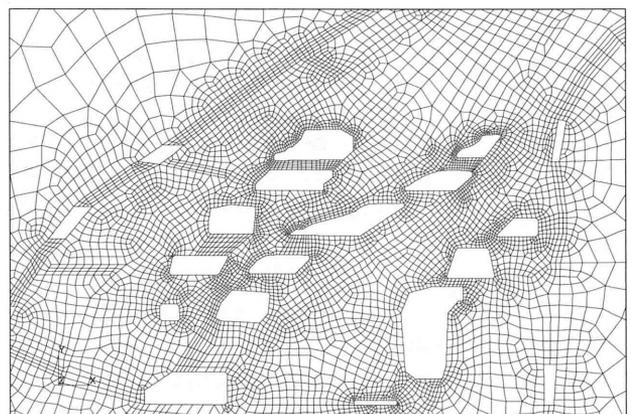


Abb. 7: - Finite-Elemente-Modell (Ausschnitt) für den Zentralbereich der Schachanlage Bartensleben.

Fig. 7: - Finite-element model (part) of the central part of the Bartensleben mine.

- Hauptspannungen S_1 und S_2 ,
- Effektivspannungen,
- Auflockerungsbereiche im Salzgebirge, in denen bis zum betrachteten Zeitpunkt die Dilatanzgrenze mindestens einmal erreicht oder überschritten wurde,
- Differenz zwischen dem hydrostatischen Druck einer fiktiven, bis zur Geländeoberfläche reichenden Laugensäule und der kleinsten Hauptspannung S_1 ; Bereiche, in denen der Laugendruck die Hauptspannung S_1 überschreitet, sind nachfolgend als hypothetisch laugendruckgefährdete Bereiche benannt.

Abb. 8 zeigt als Beispiel in überhöhter Darstellung die verformte Struktur des Berechnungsmodells nach einer Berechnungszeit von 100 Jahren. An den westlichen Stößen und in den Firsten der Abbaureihen 2 und 3 treten erheblich größere Verformungen als an den östlichen Stößen und in den Sohlen auf. Ferner wird deutlich, daß insbesondere die mittlere Abbaureihe 3 aufgrund der ungünstigen Konfiguration der Abbaue vergleichsweise große Gebirgsverschiebungen verursacht. Aufgrund der schräg versetzten Anordnung der Abbaue und der dadurch bedingten unsymmetrischen Schwebenform weisen die meisten Schweben ein charakteristisches Verformungsbild auf, das durch eine signifikante vertikale Scherbewegung gekennzeichnet ist.

Die aus der Schwebenverformung resultierende kombinierte Scher- und Biegebeanspruchung wird deutlich anhand des berechneten Spannungs- und Verzerrungszustands. Abb. 9 zeigt die für den Zentralbereich zum Zeitpunkt 100 Jahre berechneten Effektivverzerrungen. Insbesondere im Bereich der Schweben treten vergleichsweise hohe Verzerrungsbeträge auf. Die Zonen größter Effektivverzerrung sind in nahezu allen Schweben dadurch charakterisiert, daß sie am westlichen oberen Schwebenrand beginnen und als sogenanntes Scherband diagonal durch die Schweben zum östlichen unteren Schwebenrand verlaufen. Aufgrund des stationären Kriechens des Salzgebirges werden die Verzerrungen mit der Zeit kontinuierlich zunehmen.

In Abb. 10 sind die für 100 Jahre ermittelten Effektivspannungen dargestellt. Im Salzgebirge treten höhere Spannungsbeträge in den Schweben der mittleren Abbaureihe 3 und an Schichtgrenzen auf. Ferner sind sehr hohe Spannungsbeträge im westlich an den Zentralbereich angrenzenden Hauptanhydrit zu verzeichnen, die insbesondere durch die Kriechverformungen des Salzgebirges im Zentralbereich und die damit verbundene Spannungskonzentration im steifen, nicht kriechfähigen Anhydrit bedingt sind. Die Berechnungen zei-

gen, daß die großräumigen Spannungsumlagerungen bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt bereits eingetreten sind und zukünftig nur noch geringe Änderungen zu erwarten sind. Daher kann der derzeitige Spannungszustand als weitgehend stationär angesehen werden.

Die für 100 Jahre berechneten dilatanten Bereiche im Salzgebirge sind in Abb. 11 dargestellt. Die durch Abbaueinwirkung und zeitabhängige Spannungsumlagerungen bedingte Gebirgsbeanspruchung führt in den Firsten, Sohlen und Stößen zu dilatanten Auflockerungszonen, die stellenweise bis an direkt benachbarte Anhydritschollen, aber lokal auch mit größerer Erstreckung von den oberen Sohlen der mittleren Abbaureihe 3 bis zur westlich angrenzenden obersten Anhydritscholle reichen. Die Schweben zwischen den Abbauen sind rechnerisch nahezu durchgängig dilatant. Der Salzspiegel über dem Zentralbereich weist keine dilatante Auflockerung auf. Die berechneten Dilatanzonen verändern sich mit der Zeit nur noch sehr geringfügig.

Abb. 12 zeigt die für eine Standzeit von 100 Jahren berechnete Differenz zwischen dem in der jeweiligen Tiefe theoretisch möglichen Laugendruck und der kleinsten Hauptdruckspannung S_1 im Salzgebirge. Bedingt durch den Hohlraumausbruch tritt rechnerisch eine deutliche Abnahme der kleinsten Hauptdruckspannung insbesondere im Bereich der Abbaue und in der Salzbarriere zwischen den oberen Anhydritschollen und dem Salzspiegel auf. Die hypothetisch laugendruckgefährdeten Bereiche erstrecken sich weiträumig bis an die angrenzenden Anhydritschollen sowie oberhalb der westlichen Anhydritschollen bis an den Salzspiegel. Oberhalb des Zentralbereichs ergibt sich ein kleiner hypothetisch laugendruckgefährdeter Bereich, der bis an den Salzspiegel heranreicht.

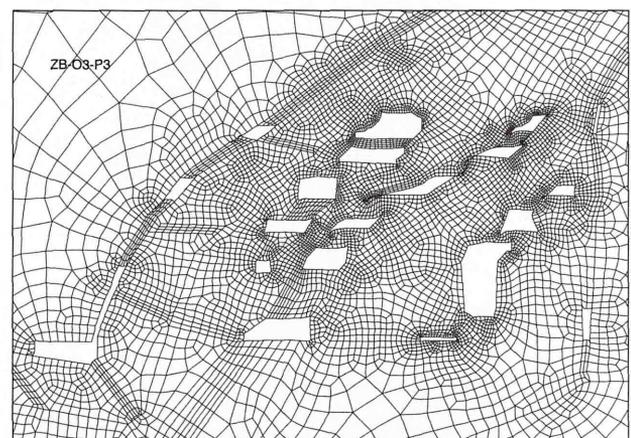


Abb. 8: - Verformte Struktur des Berechnungsmodells nach 100 Jahren (überhöhte Darstellung).

Fig. 8: - Deformed structure of the numerical model after a time elapse of 100 years (not to scale).

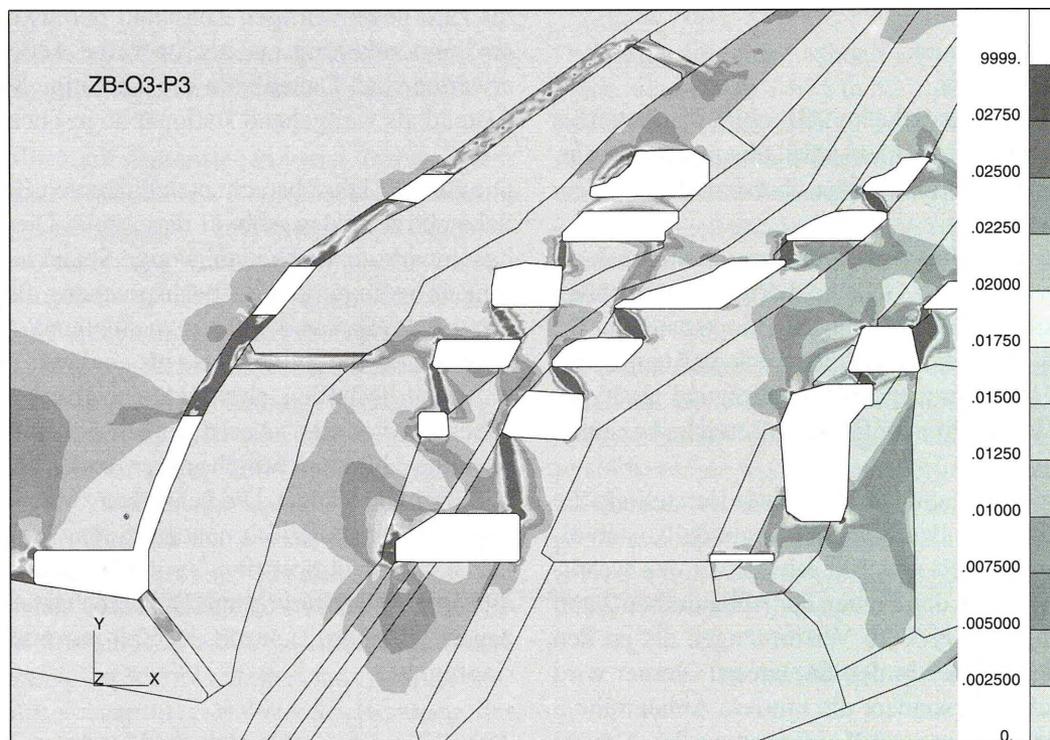


Abb. 9: - Berechnete Effektivverzerrungen im Zentralbereich der Schachtanlage Bartensleben.

Fig. 9: - Calculated effective strains in the central part of the Bartensleben mine.

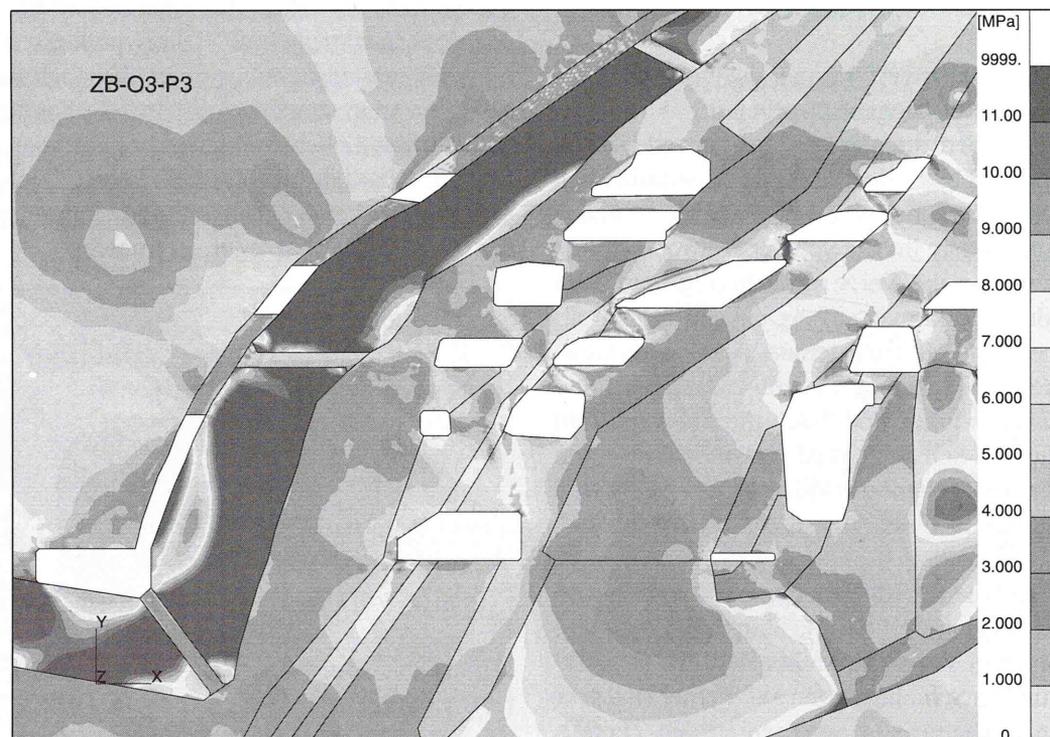


Abb. 10: - Berechnete Effektivspannungen im Zentralbereich der Schachtanlage Bartensleben.

Fig. 10: - Calculated effective stresses in the central part of the Bartensleben mine.

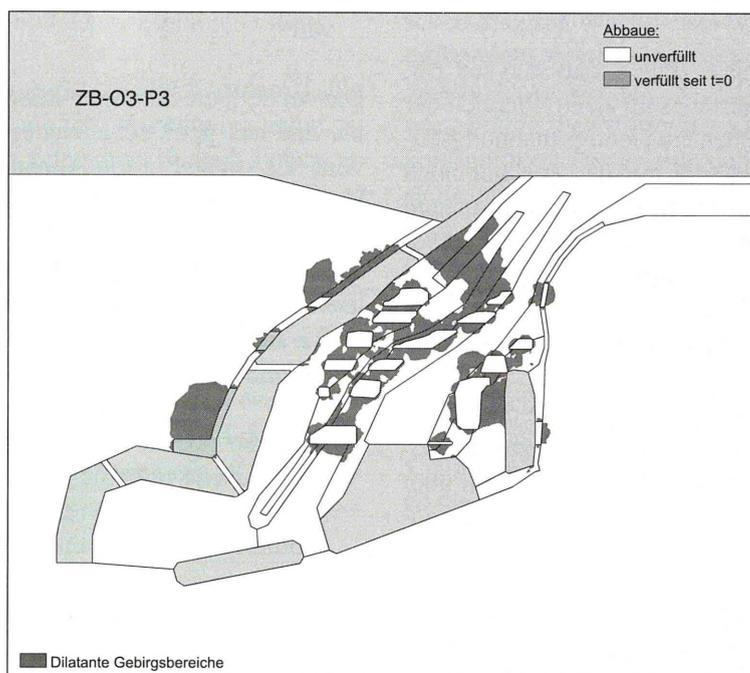


Abb. 11: - Dilatante Zonen im Salzgebirge des Zentralbereichs Bartensleben.

Fig. 11: - Dilatant zones in the salt rock of the central part of the Bartensleben mine.

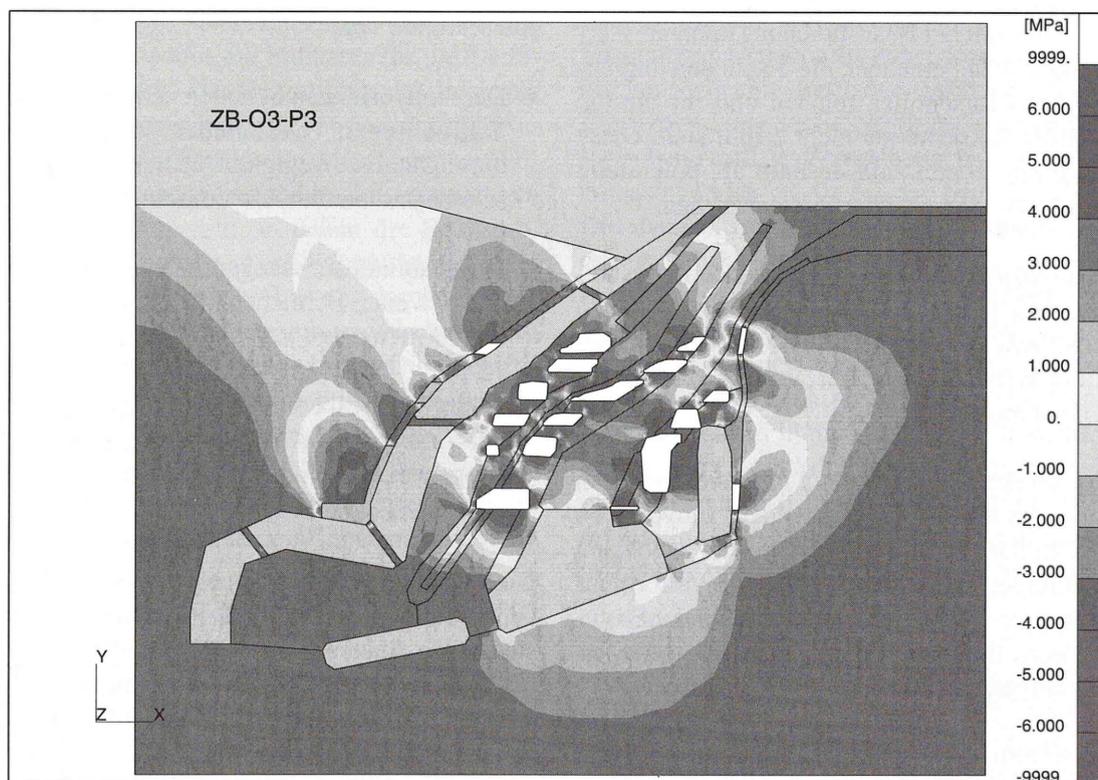


Abb. 12: - Hypothetisch laugendruckgefährdete Bereiche im Salzgebirge.

Fig. 12: - Salt rock zones, for which an assumed hydrostatic brine pressure exceeds the minimum principal stress.

Beurteilung der Integrität der Salzbarriere

Die Berechnungsergebnisse zeigen, daß sich seit Beendigung des Bergbaubetriebes im Zentralbereich der Schachanlage Bartensleben ein Gebirgsspannungszustand eingestellt hat, der sich mit der Zeit nur noch wenig ändert. Der gegenwärtige Spannungszustand und die daraus resultierenden Verformungsraten sowie die berechneten dilatanten oder hypothetisch laugendruckgefährdeten Gebirgsbereiche lassen sich daher auf mehrere Jahrzehnte extrapolieren.

Aus den Ergebnissen der geomechanischen Modellberechnungen können folgende Aussagen zur Integrität und Funktionstauglichkeit der Salzschichten über den Abbauen des Zentralbereichs im betrachteten geologischen Profil (Abb. 3) abgeleitet werden:

- Für die unmittelbar unterhalb des Salzspiegels anstehenden Steinsalzschieben wird keine Dilatanz berechnet, so daß dort keine Schädigung der Salzbarriere und damit auch keine Voraussetzung für eine Permeation zu erwarten ist. Die Integrität dieser Schichten ist durch die Abbaueinwirkung geomechanisch nicht beeinträchtigt.
- In den Stößen und Firten bzw. Schweben der Abbaue auf den oberen Sohlen werden aufgrund hoher geomechanischer Beanspruchung dilatante Auflockerungszonen berechnet, die bis zu den angrenzenden Anhydritschollen reichen und für die die beiden Integritätskriterien nicht erfüllt sind. Diese Auflockerungszonen sind deshalb als potentielle Schwachstellen der Salzbarriere anzusehen.

Über die im dilatanten Bereich ablaufenden physikalischen Prozesse gibt es derzeit keine abschliessenden wissenschaftlichen Erkenntnisse. Dennoch ist eine Bewertung der Barrierenintegrität aufgrund folgender Vorstellungen möglich:

- Im Bereich der Abbaue kommt es insbesondere in der Nähe des westlich angrenzenden Anhydrits zu Mikrorißbildungen infolge Dilatanz und zu lokalen Rissen infolge Akkumulation dilatanter Verformungen. Von einem homogen verteilten Dilatanzvolumen, wie es die Modellberechnung ausweist, ist nicht auszugehen.
- Die Ausbreitung der Auflockerungszonen ist ein zeitabhängiger Prozess, der bei geringer Überschreitung der Dilatanzgrenze sehr langsam abläuft und erst bei deutlicher Überschreitung schneller vor sich geht. Das in den Berechnungen verwendete Materialmodell berücksichtigt diese zeitliche Komponente nicht, sondern überführt die betroffenen Zonen

spontan in dilatantes Verhalten; es ist daher konservativ.

Die Modellberechnungen lassen die Schlußfolgerung zu, daß aus geomechanischer Sicht Lösungszutritte vom Salzspiegel in die Abbaue direkt über die Salzbarriere nicht zu erwarten sind. Lediglich über die oberen, bis zum Salzspiegel reichenden Anhydritschollen ist ein Zutritt theoretisch möglich, da diese Schollen aufgrund ihrer Klüftigkeit als bereichsweise durchlässig anzusehen sind. Dann sind die folgenden Zutrittspfade denkbar:

- Über die oberste Scholle des Hauptanhydrits und anschließend über die unterhalb dieser Scholle berechneten Auflockerungsbereiche im Salzgestein könnten Lösungen in die mittlere Abbaureihe 3 eindringen.
- Wenn eine hydraulische Verbindung zwischen der obersten und der darunterliegenden Anhydritscholle vorhanden ist, wäre sowohl eine hydraulische Verbindung zur Abbaureihe 2 als auch zu den westlich des Anhydrits angrenzenden Abbauen des Kalilagers C denkbar.

Es gibt allerdings keine Hinweise auf eine solche Lösungsführung im Anhydrit. Hierzu liegen folgende In-situ-Befunde vor:

- Der Anhydrit ist in Schollen zerlegt, die durch Carnallit-Lagen voneinander getrennt sind. Eine durchgängige Wegigkeit über mehrere Anhydritschollen ist somit nicht unmittelbar gegeben.
- Permeabilitätsmessungen belegen, daß der Anhydrit in weiten Bereichen dicht und nur stellenweise erhöht permeabel ist.
- In den Gebirgsbereichen der Hauptmulde, in denen der Anhydrit angefahren wurde, treten keine Lösungen aus. Stellenweise angetroffene Lösungen sind versiegt.

Die nachhaltige Ertüchtigung der durch die Modellberechnungen ausgewiesenen potentiellen Schwachstellen der Salzbarriere über den Abbauen des Zentralbereichs ist durch eine wirksame Verfüllung der Abbaue möglich. Ergebnisse von Modellberechnungen unter Annahme einer vollständigen Verfüllung der Abbaue im Zentralbereich belegen, daß die Dauer bis zur Wirksamkeit dieser Verfüllmaßnahmen wesentlich von der Steifigkeit des Verfüllmaterials und dem Verfüllungsgrad der Abbaue abhängt. Werden die Abbaue mit einem Material höherer Steifigkeit versetzt, so tritt rechtlich bereits nach wenigen Jahren eine

signifikante Stützwirkung auf, die zu einer raschen Reduzierung der dilatanten Gebirgsbereiche führt.

Abb. 6 zeigt dazu exemplarisch in der Invariantenebene den in Modellberechnungen ermittelten Spannungspfad eines zunächst im dilatanten Bereich liegenden Gebirgspunktes. Ausgehend vom primären isotropen Spannungszustand (Punkt A) vor Auffahrung der Abbaue erreicht der betrachtete Spannungspunkt mit Auffahrung sofort die Dilatanzgrenze (Punkt B), verläuft dann mit der Zeit im Zuge kriechbedingter Spannungumlagerungen auf der Dilatanzgrenze in Richtung kleinerer Spannungen (Punkt C). Mit Beginn der Verfüllung der Abbaue tritt eine allmählich größer werdende Stützwirkung ein, die im Salzgebirge zu einem immer günstigeren Spannungszustand weit unterhalb der Dilatanzgrenze führt (Punkt D).

SCHLUSSBETRACHTUNG

Im Zuge der notwendigen Sicherheitsnachweise für Endlager für radioaktive Abfälle im Salzgebirge ist insbesondere die Stabilität und Integrität der Salzbarriere aus geomechanischer Sicht zu beurteilen.

Infolge geomechanischer Beanspruchung des Salzgebirges kann eine Auflockerung auftreten und sich ein durchlässiger Bereich ausbilden. Die geomechanische Beanspruchung ist somit ein Indikator für die Dichtigkeit der Salzbarriere. Die Beurteilung der Integrität stützt sich daher neben geologischen Standortuntersuchungen, Laborversuchen, In-situ-Messungen und örtlichen Beobachtungen insbesondere auf geomechanische Modellberechnungen, in denen die Beanspruchung und eine eventuelle Schädigung des Gebirges durch die frühere Bergbautätigkeit und durch die Konvergenz der Abbaue in der Betriebs- und Nachbetriebsphase des Endlagers untersucht werden. Die Integrität der Salzbarriere ist nicht beeinträchtigt, wenn die Modellberechnungen eine ausreichend mächtige Zone mit mechanisch intaktem Salzgestein zwischen potentiell laugeführenden Schichten (z.B. Deckgebirge, Nebengebirge, Hauptanhydrit) und den Abbauen ausweisen.

Für die Bewertung der Integrität der Salzbarriere werden die Kriterien

- Dilatanzkriterium
- Laugendruckkriterium

angewendet. Die Integrität ist rechnerisch nachgewiesen, wenn eines der beiden Kriterien erfüllt ist. Dabei wird konservativ unterstellt, daß am primär nicht vorgeschädigten Salzspiegel eine bis zur Geländeoberfläche reichende Lösung ansteht.

Die prinzipielle Vorgehensweise eines geomechanischen Integritätsnachweises wird am Beispiel des Zentralbereichs des Endlagerbergwerks Bartensleben erläutert. Dazu werden die erforderlichen Grundlagen wie geologische Profile, Homogenbereiche, Hohlraumkonfiguration, Materialmodelle und -parameter dargestellt und daraus ein geomechanisches Modell abgeleitet. Dieses Modell ist Grundlage für die Erstellung des Finite-Elemente-Modells, mit dem schließlich die Berechnungen zur Ermittlung geomechanischer Zustandsgrößen durchgeführt werden.

Die Modellberechnungen ergeben für den Zentralbereich Bartensleben, daß aus geomechanischer Sicht die Salzbarriere über den Abbauen des Zentralbereichs intakt ist. So wird für die unmittelbar unterhalb des Salzspiegels anstehenden Steinsalzsichten keine Dilatanz ermittelt, so daß dort eine Schädigung und damit die Voraussetzung für eine Permeation nicht zu erwarten ist. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt und auch während der nächsten Jahrzehnte sind geomechanisch bedingte Lösungszutritte in die Abbaue nur über die oberen, bis zum Salzspiegel reichenden Anhydritschollen sowie über die dilatanten und hypothetisch laugendruckgefährdeten Gebirgsbereiche zwischen den Anhydritschollen und den angrenzenden Abbauen möglich.

Aufgrund der Meßergebnisse, der örtlichen Beobachtungen und der berechneten annähernd stationären Spannungen ist davon auszugehen, daß aus geomechanischer Sicht eine drastische Veränderung der jetzigen Barrierewirkung des Salzgebirges im betrachteten geologischen Profil des Zentralbereichs Bartensleben nicht zu besorgen ist.

Die nachhaltige Ertüchtigung der durch die geomechanischen Modellberechnungen ausgewiesenen potentiellen Schwachstellen der Salzbarriere im Zentralbereich Bartensleben ist durch eine Verfüllung der Abbaue möglich. Dadurch wird eine Erhöhung der Druckspannungen im Gebirge bzw. eine Reduzierung dilatanter Zonen in der Salzbarriere bewirkt. Modellberechnungen mit Simulation einer derartigen Verfüllung belegen, daß dieser Vorgang Zeit in Anspruch nimmt und insbesondere von der Steifigkeit des Versatzes und dem Verfüllungsgrad der Abbaue abhängt.

DANKSAGUNG

Der Autor dankt Herrn Dipl.-Geol. G.-H. Stork und Herrn Dr.-Ing. H.-K. Nipp für die kritische Durchsicht des Manuskripts und Frau cand. geol. P. Feuker für die Anfertigung der Abbildungen.

LITERATUR

- Behlau, J. and Mingerzahn, G.** (2001) Geological and tectonic investigations in the former Morsleben salt mine (Germany) as a basis for the safety assessment of a radioactive waste repository. *Engineering Geology*, Amsterdam (in press).
- Bornemann, O.** (1991) Zur Geologie des Salzstocks Gorleben nach den Bohrerergebnissen. *BfS-Schriften*, 4/91, 67 S., Braunschweig.
- Cristescu, N. and Hunsche, U.** (1998) *Time effects in rock mechanics*. John Wiley & Sons, Chichester.
- Heusermann, S.** (1995) Analysis of initial rock stress measurements in salt. In: **Pande, G.N. and Pietruszczak, S.** (eds.), *Numerical Models in Geomechanics - NUMOG V*, 669-674, Balkema, Rotterdam.
- Hunsche, U. and Schulze, O.** (1994) Das Kriechverhalten von Steinsalz. *Kali und Steinsalz*, 11(8/9), 238-255, Essen.
- Hunsche, U. and Schulze, O.** (2000) *Damage evolution and failure in rock salt*. 3rd Euroconference on Rock Physics and Rock Mechanics – Thermo-Hydro-Mechanical Coupling in Fractured Rock., 14.-18. Nov., 4 p., Bad Honnef.
- Langer, M.** (1997) Die Rolle des Wirtsgesteins in Sicherheitsnachweisen für Untertagedeponien und Endlager. Vortrag Kolloquium TÜV ENERGIE CONSULT: Radioaktiver Abfall – Seine Behandlung als länderübergreifende Aufgabe. In: **Langer, M.** (Hrsg.), *Salzmechanik XVI*, 33 S., BGR, Hannover.
- Langer, M.** (1999) Principles of geomechanical safety assessment for radioactive waste disposal in salt structures. *Engineering Geology*, 52, 257-269, Amsterdam.
- Langer, M. and Heusermann, S.** (2001) Geomechanical stability and integrity of waste disposal mines in salt structures. *Engineering Geology*, Amsterdam (in press).
- Nipp, H.-K.** (1991) *Testbericht und Freigabemittlung für das Programmsystem ANSALT I (Release 1991-I)*. Bericht, Archiv-Nr. 108586, BGR, Hannover.
- Wallner, M.** (1993) Die Entwicklung konzeptioneller Grundlagen für geotechnische Sicherheitsnachweise. In: **Langer, M.** (Hrsg.), *Salzmechanik XIII*, 20 S., BGR, Hannover.