

**Bericht
für
das Vorhaben**

**„Überprüfung und Bewertung des
Instrumentariums für eine sicherheitliche
Bewertung von Endlagern für HAW“**

ISIBEL

**AP 4: Nachweis der Integrität der geologischen
Barriere**

September 2007

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Vorbemerkung	3
2. Einwirkungen auf die Salzbarriere	3
3. Nachweis der Integrität	4
4. Kriterien zur Bewertung der Integrität	4
5. Beispiele zur Anwendung der Methodik	7
5.1. Integrität der geologischen Barriere im Südfeld Bartensleben	7
5.2. Integrität der geologischen Barriere im südlichen Zentralbereich Bartensleben	12
6. Weiterentwicklung des Nachweisverfahrens	17
7. Referenzen	17

1. Vorbemerkung

Zur Bewertung des Isolationsvermögens der geologischen Barriere eines Endlagers für radioaktive Abfälle in Salzformationen wird der Begriff „Integrität“ verwendet. Damit wird die Fähigkeit und Wirksamkeit der Barriere verstanden, das Eindringen von Fluiden aus dem Deck- und Nebengebirge in das Endlagerbergwerk sowie ggf. das Austreten kontaminierter Fluide und Gase aus dem Endlager in die Biosphäre dauerhaft zu verhindern.

Im unverritzten Zustand ist das Salzgebirge mit Ausnahme möglicher isolierter Lösungseinschlüsse trocken und dicht. Dichtheit bedeutet hierbei eine mit derzeitigen Messmethoden nicht nachweisbare, äußerst geringe Durchlässigkeit. Zur Bewertung der Barriereigenschaften und des langfristigen Barriereverhaltens unter der Einwirkung bergbaulicher Maßnahmen und der Wärmefreisetzung im Einlagerungsbereich sind daher die Prozesse zu untersuchen, die durch mechanische Einwirkungen zur Entstehung von Porenvolumen, z. B. durch Mikrorissbildung, zu Wegsamkeiten und schließlich zum Eindringen von Lösungen in den Einlagerungsbereich führen können. Die derzeit gewählte und allgemein akzeptierte Vorgehensweise bei dem Nachweis der Barrierenintegrität sieht daher vor, dass die Bewertung der hydraulischen Barriereigenschaften ausschließlich auf der Grundlage mechanischer Zustandsgrößen, nämlich in Modellberechnungen ermittelter Spannungen, erfolgt.

2. Einwirkungen auf die Salzbarriere

Ein Zutritt von Fluiden in den Einlagerungsbereich eines Endlagers ist nur möglich, wenn im Sinne einer konservativen Annahme an der äußeren Begrenzung der Salzbarriere Lösungen anstehen. Die äußere Begrenzung ist dabei der Übergang vom Salzgebirge zum primär als durchlässig angenommenen Deck- oder Nebengebirge. Eine weitere äußere Begrenzung kann aber auch ggf. der Kontakt zwischen Salzgebirge und Anhydritschollen sein, wenn diese Schollen durch ihre räumliche Anordnung und ihre primär vorhandene Klüftigkeit eine hydraulische Verbindung zum Deck- oder Nebengebirge aufweisen.

Die an der äußeren Begrenzung der Barriere ggf. anstehenden Lösungen können über Schwächezonen der Barriere (aufgelockerte, dilatante und damit mikrorissbehaftete Bereiche) in die Barriere eindringen und dort in Abhängigkeit vom Spannungszustand eine hydromechanische Wirkung entfalten, die zu einer Aufweitung der aufgelockerten Bereiche oder zu einer Fortpflanzung einzelner Makrorisse ggf. bis in den Einlagerungsbereich führt.

Üblicherweise gilt für den äußeren Saumbereich der Barriere die Annahme einer primären Unversehrtheit; d. h., die ggf. auftretenden Schwächezonen sind sekundär durch bergmännische Eingriffe oder durch thermische Einwirkung aus der Einlagerung entstanden.

3. Nachweis der Integrität

Für den Nachweis der Integrität der Salzbarriere werden primär die Ergebnisse mechanischer bzw. thermomechanischer Modellberechnungen, z. B. unter Verwendung der Finite-Elemente-Methode, herangezogen. Aufgrund der Notwendigkeit, Aussagen über sehr große Zeiträume zu treffen, sind dabei geomechanische Prognosemodelle zu verwenden, die die langfristig zu erwartenden physikalischen Prozesse im Gebirge zutreffend beschreiben. Über die rein numerischen Betrachtungen hinaus sind im Zuge einer gesamtheitlichen Betrachtung auch geologische und ingenieurgeologische Erkundungen, gesteinsphysikalische Laboruntersuchungen, geotechnische In-situ-Messungen, Beobachtungen vor Ort oder bergmännische Erfahrungen aus vergleichbaren geologischen Medien und Bergwerken einzubeziehen. In Abhängigkeit von der Problemstellung sind i. A. großräumige dreidimensionale Prognosemodelle zu verwenden.

4. Kriterien zur Bewertung der Integrität

Die Funktionstauglichkeit 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 (HEUSERMANN, 2001):

- Dilatanzkriterium: Die Integrität ist gewährleistet, wenn keine Schädigung des Gebirges auftritt. In umfangreichen gesteinsphysikalischen Laboruntersuchungen an Steinsalz ist nachgewiesen, dass Spannungszustände unterhalb der Dilatanzgrenze auch langfristig nicht mit Auflockerungen verbunden sind, so dass für Spannungen in diesem Bereich die Dichtheit 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 nicht unter den Wert des in der entsprechenden Teufe anzunehmenden hydrostatischen Drucks fällt. Dieser Druck ergibt sich aus einer

hypothetischen, bis zur Geländeoberfläche reichenden Flüssigkeitssäule. Üblicherweise wird von einer Lösung mit einer Dichte von $1,2 \text{ kg/dm}^3$ ausgegangen.

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

- Fall A: Ist durch Spannungsentlastungen infolge Bergbautätigkeit oder Wärmeeinwirkung 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, rissfreien Barriere. Ein Eindringen in diese Salzsichten oder eine Permeation der Barriere kann langfristig ausgeschlossen 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 auf. In dem Fall, dass im Saumbereich der Barriere Dilatanz auftritt, ist das Eindringen von Fluiden in den Saumbereich möglich. Aufgrund der günstigen Spannungsbedingungen (kleinste Hauptdruckspannung ist größer als der Fluiddruck) ist jedoch nicht von einer Ausweitung dieses geschädigten Bereichs durch hydromechanische Wirkung auszugehen.
- Fall C: Wenn beide Kriterien rechnerisch nicht erfüllt sind, d. h. eine Lösung mit hohem hydrostatischen Druck an einem dilatanten, aufgelockerten Salzbereich ansteht, könnte dies zu einem langsam fortschreitenden Aufweiten der Mikrorisse, damit auch zur Verbindung der Risse innerhalb des Rissgefüges und schließlich zu einem tieferen Eindringen der Lösungen in die Salzbarriere führen.

Über die tatsächlich ablaufenden Prozesse gibt es derzeit keine abschließenden wissenschaftlichen Erkenntnisse. Die praktische Anwendung dieser beiden zunächst als gleichgewichtig angenommenen Kriterien zeigt, dass im Regelfall (primär unversehrter äußerer Saumbereich der Salzbarriere) erst bei Nichterfüllung des Dilatanzkriteriums im Saumbereich Bedingungen entstehen, die das Eindringen von Lösungen aus dem Deck- oder Nebengebirge ermöglichen. Nach Abb. 1 entstehen grundsätzlich dilatante Bereiche im Nahbereich bergmännisch aufgefahrener Hohlräume. Diese Bereiche können sich mit der Zeit ausbreiten und ggf. den äußeren Saumbereich der Barriere erreichen. Auch die durch Wärmeeintrag aus Einlagerung hervorgerufene thermomechanische Einwirkung kann dilatante Bereiche, ggf. auch unmittelbar im Saumbereich der Barriere, bewirken.

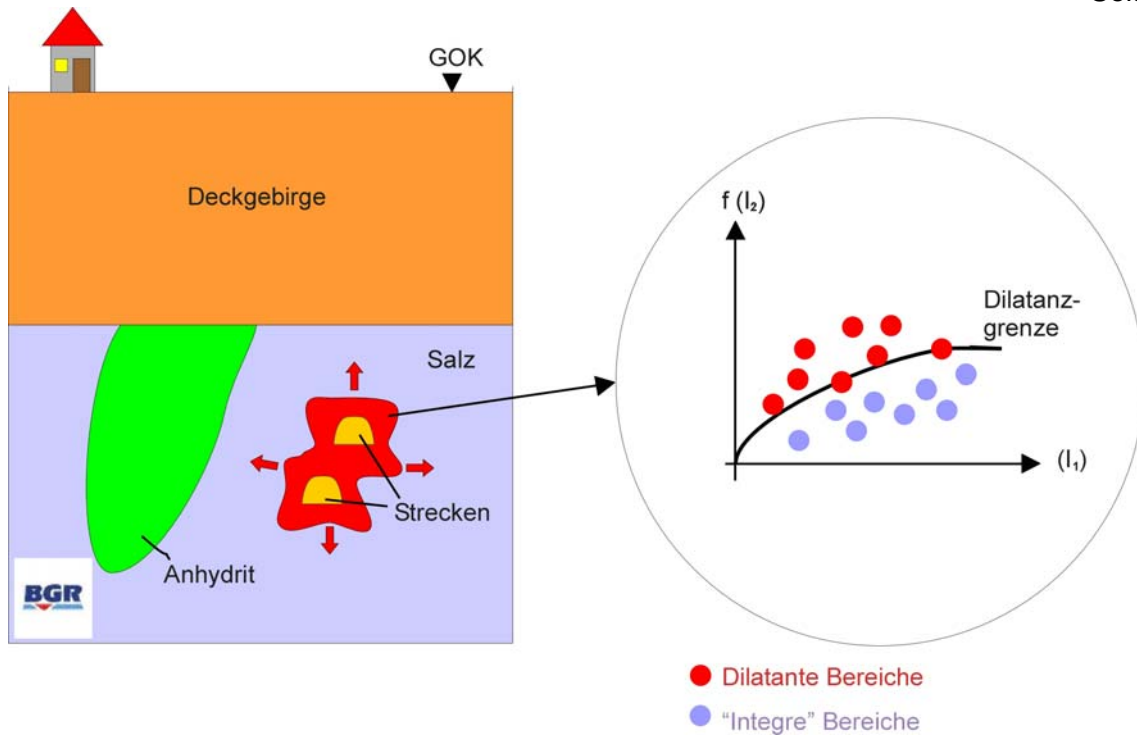


Abb. 1: Dilatante Bereiche in der Barriere infolge bergmännischer Eingriffe (HEUSERMANN ET AL., 2007)

Abb. 2 zeigt exemplarisch für den Saumbereich am Deckgebirge und den Kontaktbereich zwischen Barriere und Anhydritschollen die durch Fluiddruck hervorgerufenen mechanischen Einwirkungen.

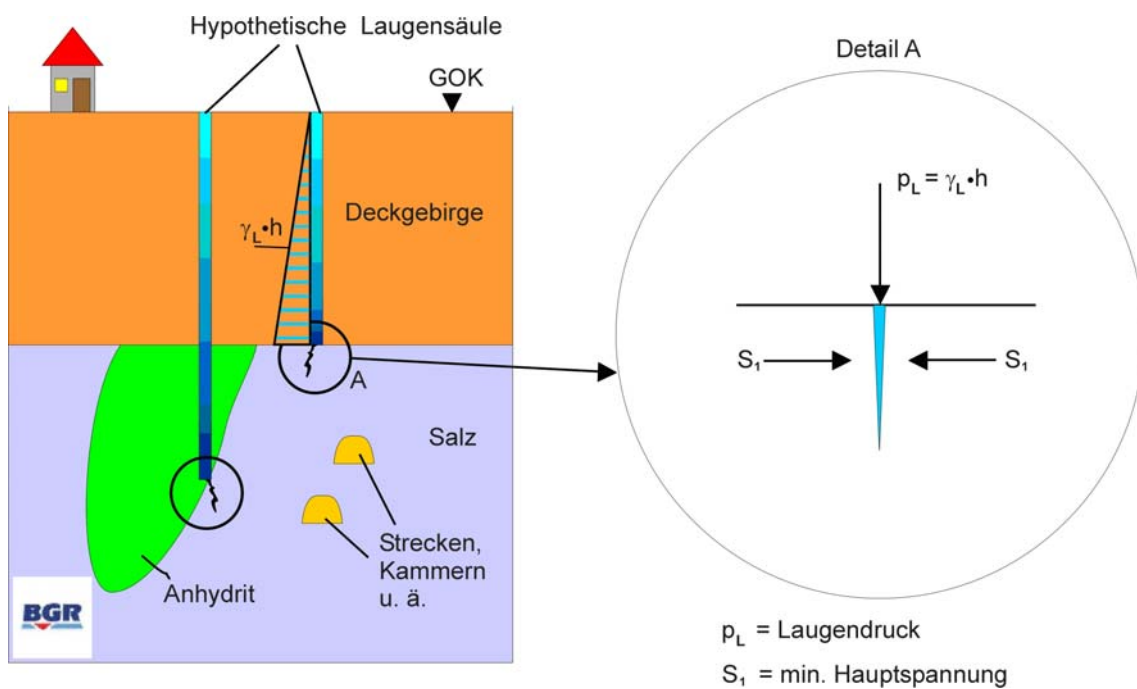


Abb. 2: Einwirkung von Laugendruck auf die geologische Barriere (HEUSERMANN ET AL., 2007)

5. Beispiele zur Anwendung der Methodik

Die praktische Anwendung des methodischen Vorgehens bei der Beurteilung der geomechanischen Integrität geologischer Barrieren wird an zwei aktuellen Beispielen aus dem Endlager für radioaktive Abfälle (ERA) Morsleben demonstriert. Das erste Beispiel zeigt charakteristische Ergebnisse aus Modellberechnungen zum Südfeld Bartensleben, das zur Einlagerung von Abfällen genutzt wurde. Das zweite Beispiel bezieht sich auf den südlichen Teil des Zentralbereichs Bartensleben, der durch einen vergleichsweise hohen Durchbaugrad gekennzeichnet ist. In beiden Fällen erfolgt eine Bewertung der Barrierenintegrität auf der Grundlage der erzielten Berechnungsergebnisse unter Verwendung der genannten Kriterien.

Die in den Beispielen dargestellte geologische und bergbauliche Situation wird aufgrund der langgestreckten Abbaukammern und der annähernd in Normalenrichtung streichenden geologischen Schichten vereinfachend in zweidimensionalen Modellen abgebildet. Im Hinblick auf die Beurteilung der Barrierenintegrität ist diese Vorgehensweise zulässig, da die zweidimensionalen Modelle im Vergleich zu dreidimensionalen Modellen i. a. zu ungünstigeren Spannungs- und Verformungszuständen führen und damit konservativ abdeckend sind.

Das Verhalten der kriechfähigen Salzsichten wird durch Stoffgesetze beschrieben, die neben den elastischen Formänderungen auch stationäres Kriechen erfassen. Eine Berücksichtigung der Auflockerung infolge Dilatanz erfolgt mittels viskoplastischer Formänderungen (HEUSERMANN ET AL., 2007). Anhydrit und Deckgebirge werden als ausschließlich elastisch reagierende Schichten angenommen.

5.1. Integrität der geologischen Barriere im Südfeld Bartensleben

Für die geomechanische Modellierung des Südfeldes werden die folgenden kriechfähigen Schichten unterschieden (Abb. 3): Leine-Aller-Folge (z3-z4), Anhydritmittelsalz (z3AM), Orange- und Bank-/Bändersalz (z3OS-BK/BD), Liniensalz (z3LS), Steinsalzsichten z3(Ost) der Leine-Folge im östlichen Randbereich, Hartsalz (z2SF), Hauptsalz (z2HS), unterschieden in z2HS(West), z2HS(Ost) und z2HS(Basis), Steinsalzsichten z2(West) der Staßfurt-Folge im westlichen Randbereich zum Deckgebirge hin. Als Homogenbereiche mit rein elastischen Materialeigenschaften werden folgende Schichten berücksichtigt: Quartär (q), Keuper-Jura (k-j), Hutgestein (cr), Hauptanhydrit (z3HA), Werra-Anhydrit (z1WA).

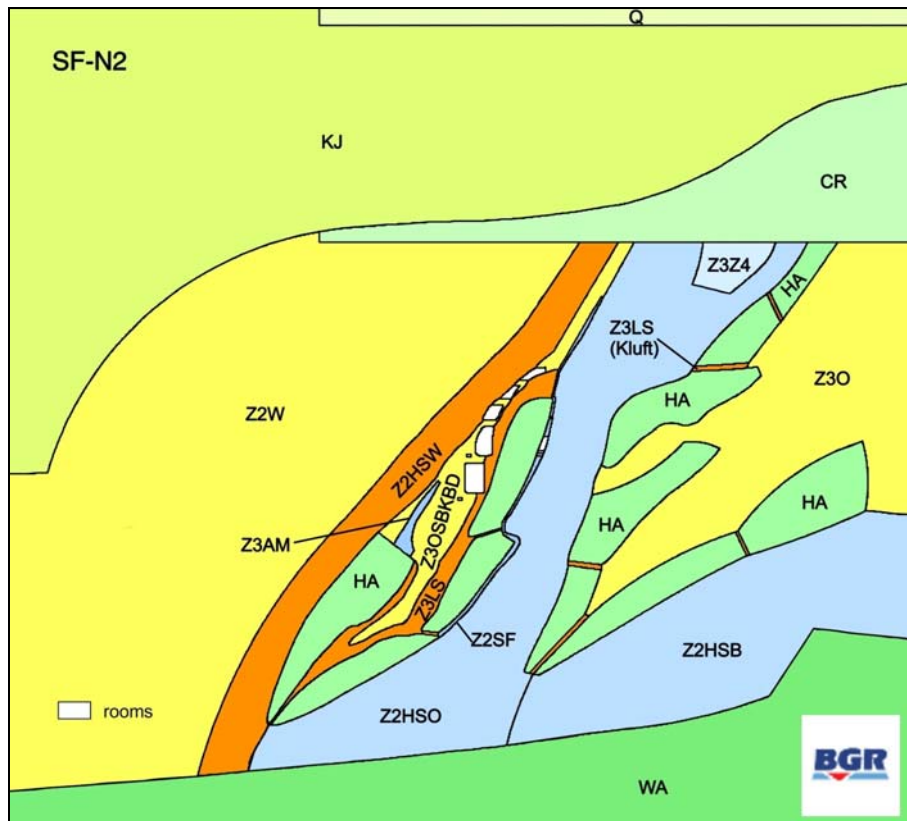


Abb. 3: Geomechanisches Modell für das Südfeld Bartensleben (HEUSERMANN ET AL., 2007)

Die Diskretisierung des Finite-Elemente-Modells ist Abbildung 4 zu entnehmen. Das Modell enthält 14707 isoparametrische 8-Knoten-Elemente und 44242 Knoten. Unter Berücksichtigung der Randbedingungen ergeben sich damit 88329 Freiheitsgrade. Die Knoten des linken und rechten Modellrandes sind vertikal verschieblich gelagert und in horizontaler Richtung elastisch gebettet. Die seitliche Bettung wird durch jeweils 50 m breite, an beiden seitlichen Modellrändern angeordnete isoparametrische 8-Knoten-Elemente simuliert, bei deren Auslegung von einem 650 m breiten elastischen Gebirge ausgegangen wird. Die Knoten des unteren Modellrandes sind horizontal verschieblich gelagert und in vertikaler Richtung fixiert.

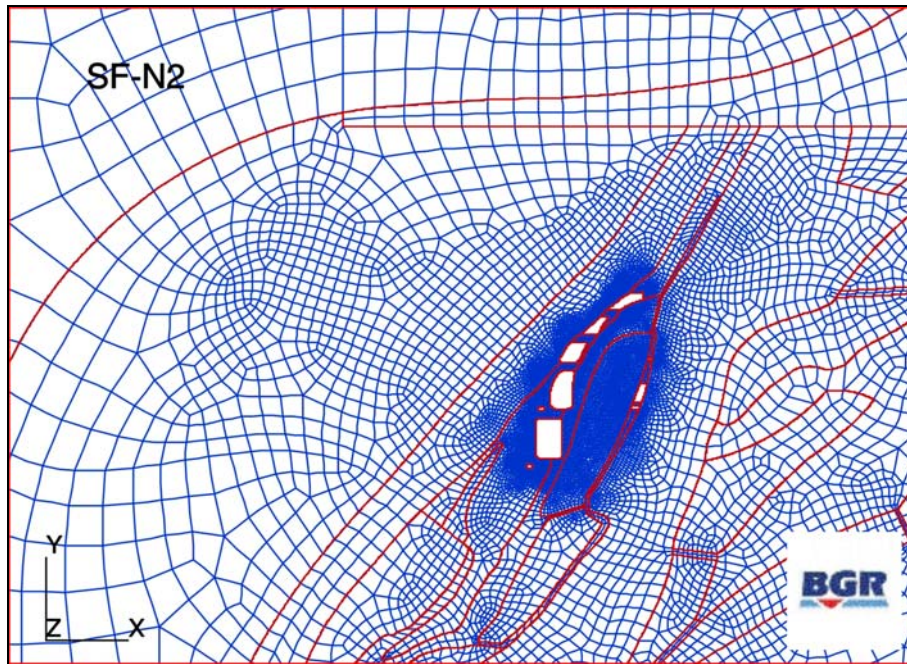


Abb. 4: Finite-Elemente-Modell für das Südfeld Bartensleben (HEUSERMANN ET AL., 2007)

Die in Abbildung 5 dargestellte Verteilung der Effektivspannungen zeigt, dass die höchsten Spannungsbeträge an der östlichen Flanke der Hauptanhydritschollen auftreten. Erwartungsgemäß werden die größten Beanspruchungen im Steinsalz in den Schweben zwischen den Steinsalzabbauen ermittelt. Die durch Auffahrung und durch Kriechen des Salzgebirges verursachten Spannungsumlagerungen erstrecken sich nach einer Standzeit von 100 Jahren weit in das Gebirge bis hin zum Salzspiegel.

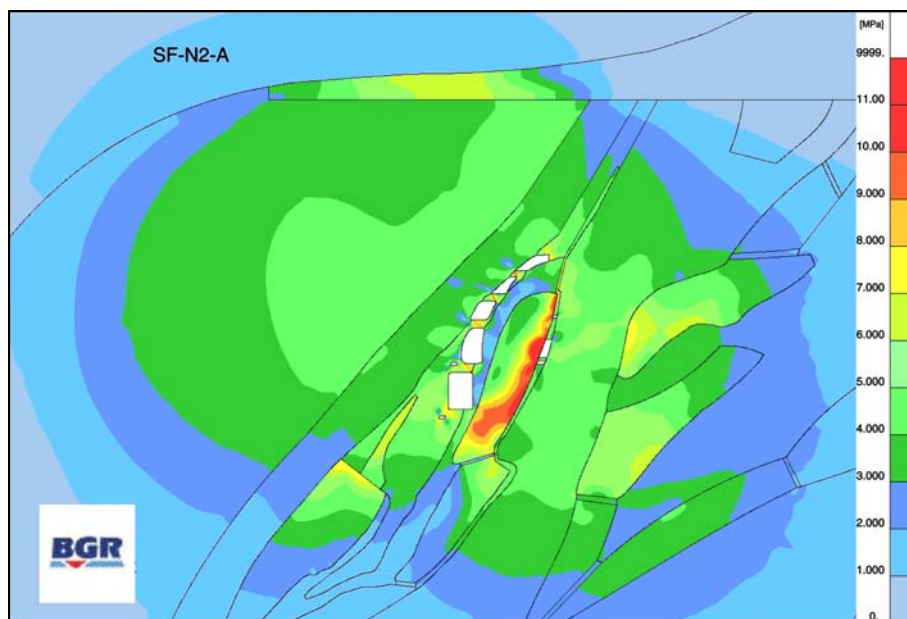


Abb. 5: Südfeld Bartensleben - Berechnete deviatorische Spannungen 100 Jahre nach Auffahrung (HEUSERMANN ET AL., 2007)

Die für 100 Jahre berechneten dilatanten Bereiche im Salzgebirge sind in Abbildung 6 dargestellt. Infolge der Abbautätigkeit treten insbesondere in den Firsten, Sohlen und Stößen der Abbaue dilatante Bereiche auf. Sie reichen stellenweise bis ca. 9 m in das angrenzende Salzgebirge. Einer erheblichen Beanspruchung unterliegen vor allem die Schweben, für die durchgängige dilatante Bereiche ermittelt werden.

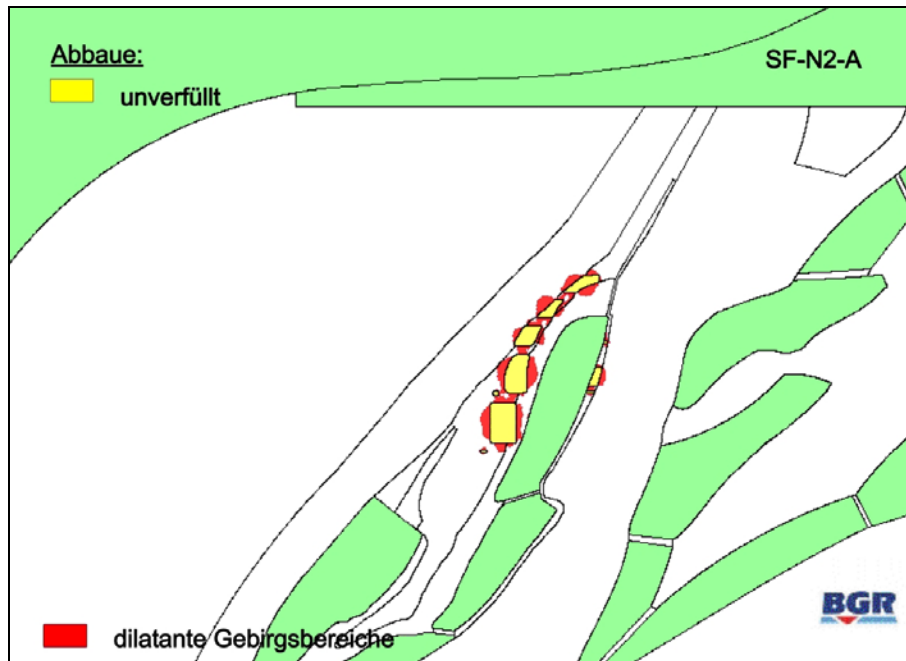


Abb. 6: Südfeld Bartensleben - Berechnete dilatante Gebirgsbereiche 100 Jahre nach Auffahrung (HEUSERMANN ET AL., 2007)

Abbildung 7 zeigt die für eine Standzeit von 100 Jahren berechnete Differenz zwischen dem in der jeweiligen Tiefe theoretisch maximal möglichen Laugendruck und der kleinsten Hauptdruckspannung im Salzgebirge. Gelb, orange oder rot eingefärbt sind die hypothetisch laugendruckgefährdeten Bereiche, d. h. dort treten Spannungszustände auf, die bei einem in diesem Bereich wirksamen Laugendruck das Entstehen und Fortpflanzen hydromechanisch verursachter Risse nicht verhindern würden. Nach Westen breiten sich diese Bereiche am weitesten aus, erreichen aber nicht das Deck- oder Nebengebirge. In östlicher Richtung reicht der hypothetisch laugendruckgefährdete Bereich über die direkt an die Abbaue angrenzenden Anhydritschollen bis zu den folgenden Hauptanhydritschichten.

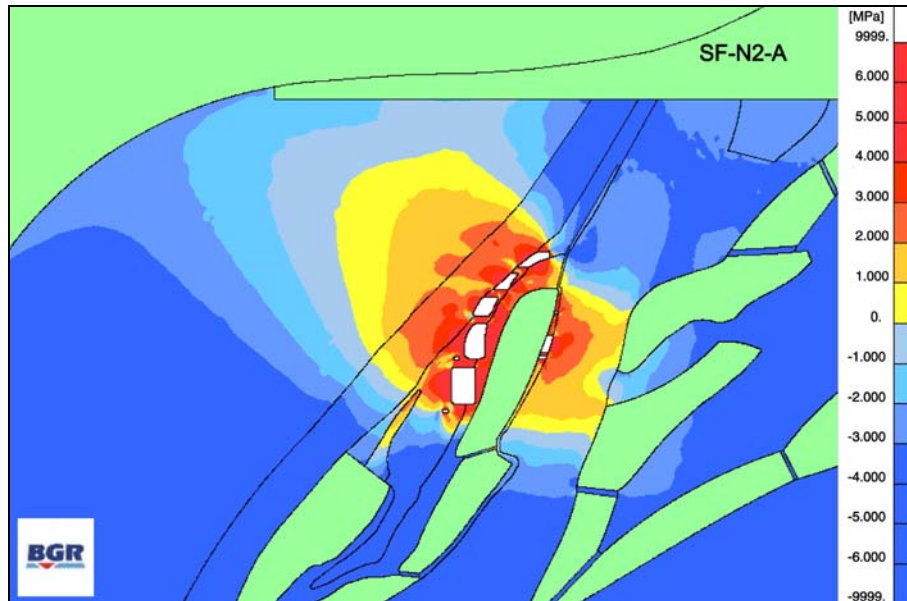


Abb. 7: Südfeld Bartensleben - Berechnete Differenz zwischen hypothetischem Laugendruck und minimaler Gebirgsspannung 100 Jahre nach Auffahrung (HEUSERMANN ET AL., 2007)

Mit den Ergebnissen der geomechanischen Modellberechnungen lässt sich die Integrität der Salzbarriere im Südfeld Bartensleben folgendermaßen bewerten (Heusermann et al., 2007):

- In den Stößen bzw. Firsten der Abbaue werden aufgrund hoher Beanspruchung dilatante Auflockerungszonen berechnet. Sie reichen aber nur bis ca. 9 m in das Salzgebirge hinein. Weite Bereiche der Salzbarriere, insbesondere auch die gesamte äußere Kontur der Salzformation, weisen keine Dilatanz auf.
- Aufgrund weitreichender, durch Bergbautätigkeit und durch Kriechen des Salzgebirges verursachter Spannungsumlagerungen ergeben sich in der Umgebung der Hohlräume vergleichsweise große Gebirgsbereiche, für die das Laugendruckkriterium nicht erfüllt ist. Am Salzspiegel und im gesamten Konturbereich der Salzstruktur verbleibt jedoch ein Bereich mit günstigen Spannungszuständen, die ein Entstehen und Fortpflanzen hydromechanisch verursachter Risse verhindern.
- Ein Zutritt von Lösungen aus dem Deckgebirge über den Salzspiegel bzw. die Kontur der Salzstruktur in die Abbaue kann aus geomechanischer Sicht ausgeschlossen werden, da für weite Bereiche des Salzgebirges, insbesondere auch im Kontaktbereich zum Deck- und Nebengebirge, beide Integritätskriterien erfüllt werden. Ein theoretisch möglicher Lösungszutritt in die Abbaue über den als klüftig und damit durchlässig anzunehmenden Hauptanhydrit und über die aufgelockerten und fluiddruckgefährdeten Bereiche zwischen Anhydrit und Abbauen kann ebenfalls ausgeschlossen werden, da die Anhydritschollen

keine direkte hydraulische Verbindung zum Deckgebirge haben, sondern in der Salzformation eingebettet sind.

5.2. Integrität der geologischen Barriere im südlichen Zentralbereich Bartensleben

Für die geomechanische Modellierung des südlichen Zentralbereichs Bartensleben werden die folgenden kriechfähigen Schichten unterschieden (Abb. 8): Anhydritmittel- und Schwadensalz (z3AM-SS), Bank-/Bändersalz (z3BK/BD), Orange- und Bank-/Bändersalz (z3OS-BK/BD), Orangesalz (z3OS), Liniensalz (z3LS), Carnallit (z2SF), Hauptsalz, unterschieden in einen westlichen Teil (z2HS,West) und einen östlichen Teil (z2HS, Ost). Als Homogenbereiche mit rein elastischen Materialeigenschaften wurden folgende Schichten berücksichtigt: Quartär (q), Jura-Kreide (j-kr), Keuper (k), Hutgestein (cr), Hauptanhydrit (z3HA), Deckanhydrit, Grauer Salzton, Leine-Karbonat (DGL).

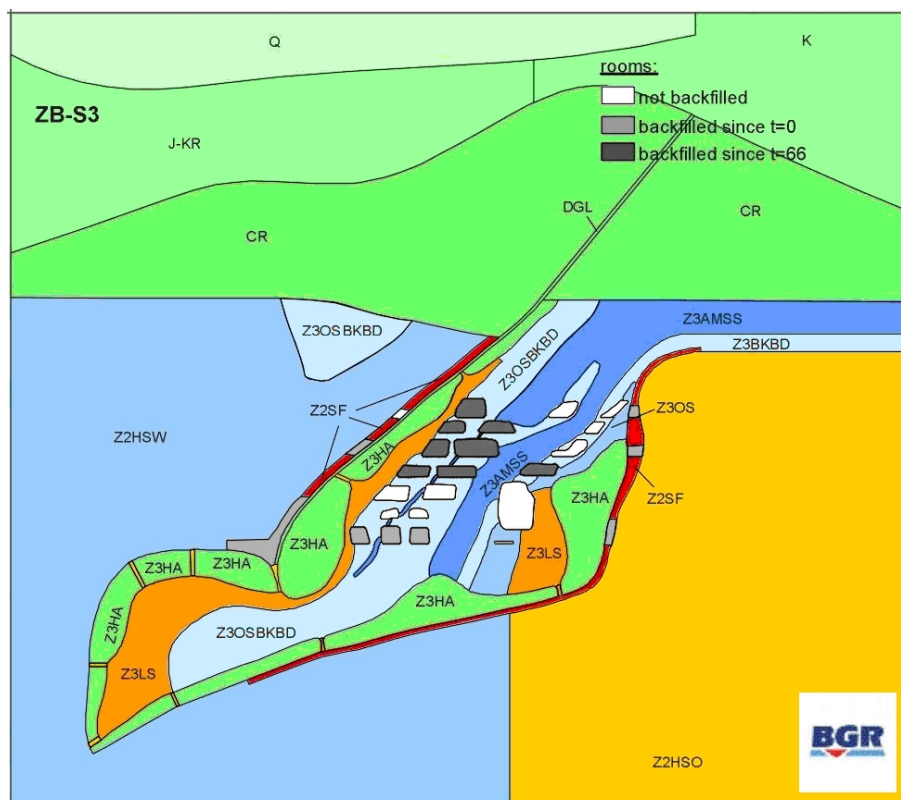


Abb. 8: Geomechanisches Modell für den südlichen Zentralbereich Bartensleben (HEUSERMANN & FAHLAND, 2005)

Die Diskretisierung des Finite-Elemente-Modells ist Abbildung 9 zu entnehmen. Das Modell umfasst 30675 Knoten und 10178 isoparametrische 8-Knoten-Elemente. Die Knoten des linken und rechten Modellrandes sind vertikal verschieblich gelagert und in horizontaler

Richtung elastisch gebettet. Die seitliche Bettung wird durch jeweils 50 m breite, an beiden seitlichen Modellrändern angeordnete isoparametrische 8-Knoten-Elemente simuliert, bei deren Auslegung von einem 650 m breiten elastischen Gebirge ausgegangen wird. Die Knoten des unteren Modellrandes sind horizontal verschieblich gelagert und in vertikaler Richtung fixiert.

In den Berechnungsmodellen wurde der mittlere Auffahrzeitpunkt der Abbaue für das Jahr 1942 festgelegt. Damit ergibt sich rechnerisch eine heutige Standzeit von 65 Jahren. Einige Kali- und Steinsalzabbaue sind bereits seit mehreren Jahrzehnten wieder verfüllt. Im Berechnungsmodell wurde diese Verfüllung berücksichtigt.

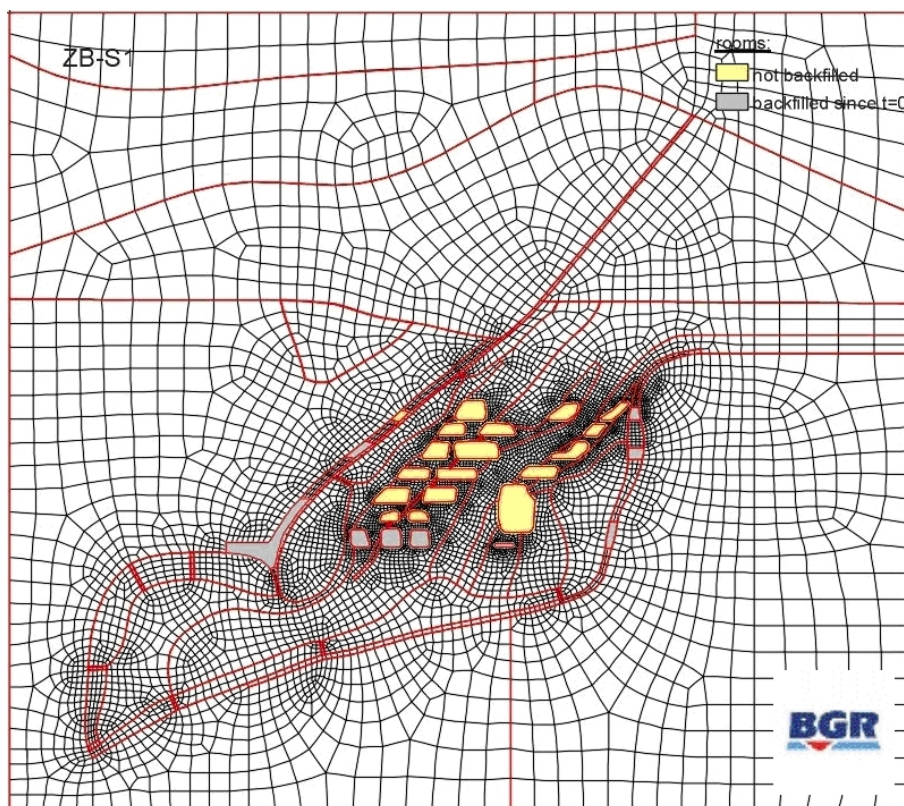


Abb. 9: Finite-Elemente-Modell für den südlichen Zentralbereich Bartensleben (HEUSERMANN & FAHLAND, 2005)

Die in Abbildung 10 dargestellte Verteilung der Effektivspannungen zum Zeitpunkt 65 Jahre nach Auffahrung zeigt, dass höhere Spannungsbeträge in den Schweben der Abbaureihen und an Schichtgrenzen auftreten. Die höchsten Spannungsbeträge ergeben sich in den westlich an den Zentralbereich angrenzenden Hauptanhydritschollen infolge allmählicher Spannungsumlagerungen der Gesamtstruktur, verbunden mit einer Reduktion der Deviatorspannungen im Salzgebirge und mit Spannungsakkumulationen im steifen Anhydrit. Die wesentlichen Spannungsumlagerungen sind bis zum heutigen Zeitpunkt bereits

eingetreten und es sind zukünftig nur noch geringe Änderungen zu erwarten. Daher kann die derzeitige Spannungsverteilung als annähernd stationär beurteilt werden.

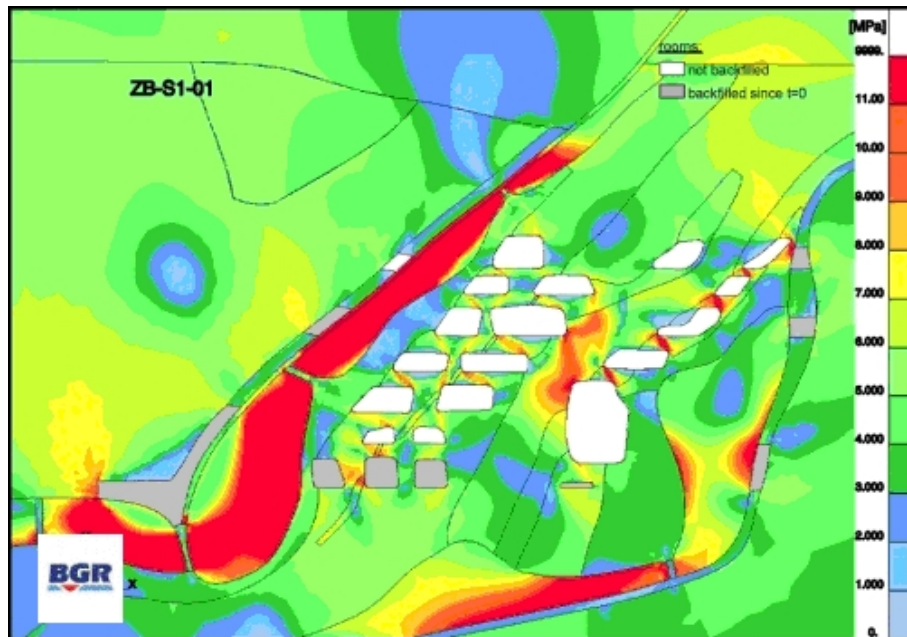


Abb. 10: Südlicher Zentralbereich Bartensleben - Berechnete deviatorische Spannungen 65 Jahre nach Auffahrung (HEUSERMANN & FAHLAND, 2005)

Die für 65 Jahre nach Auffahrung berechneten dilatanten Bereiche im Salzgebirge sind in Abbildung 11 dargestellt. Die durch die Bergbautätigkeit bedingte Beanspruchung führt im Nahbereich der Abbaue zu dilatanten Auflockerungszonen. Sie reichen stellenweise bis an die westlich angrenzenden Hauptanhydritschollen. Die Schweben zwischen den Abbaue sind nahezu durchgängig dilatant. An der oberen Hauptanhydritscholle und im Bereich der zwei Abbaue des Kalilagers C treten ebenfalls dilatante Zonen auf.

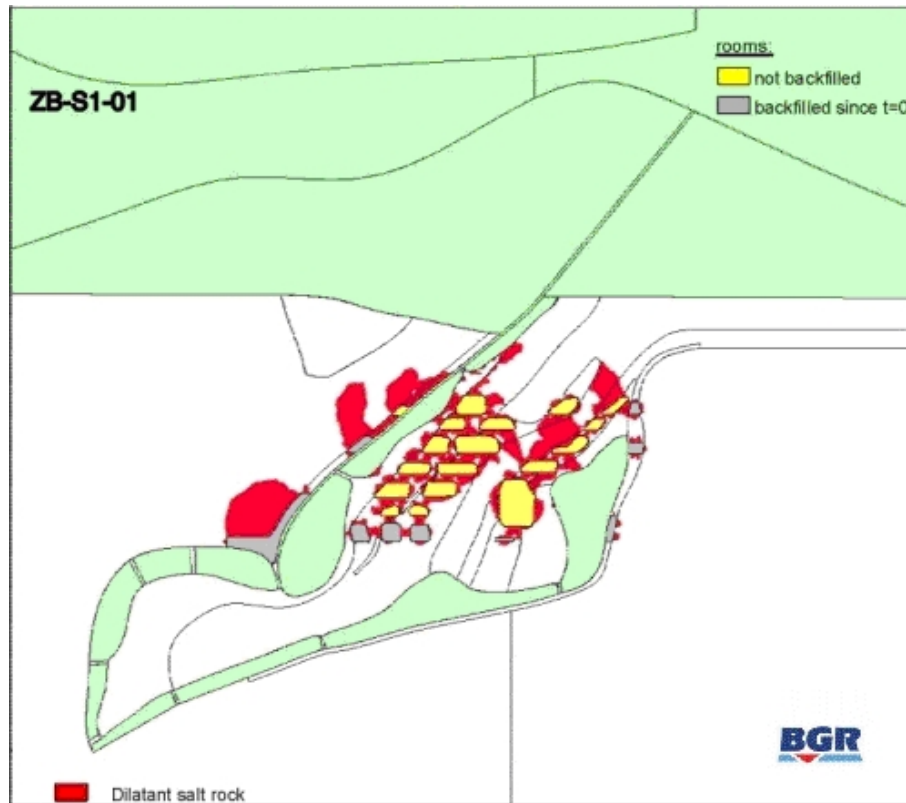


Abb. 11: Südlicher Zentralbereich Bartensleben - Berechnete dilatante Gebirgsbereiche 65 Jahre nach Auffahrung (HEUSERMANN & FAHLAND, 2005)

Abbildung 12 zeigt die für eine Standzeit der Abbaue von 65 Jahren berechnete Differenz zwischen dem in der jeweiligen Teufe theoretisch möglichen Laugendruck und der minimalen Gebirgsspannung. Bedingt durch die Hohlräume ist eine deutliche Abnahme der minimalen Spannung zu verzeichnen, insbesondere im Bereich der Abbaue und in der Salzbarriere zwischen den oberen Hauptanhydritschollen und dem Salzspiegel. Im Nahbereich der Abbaue liegt sie signifikant unterhalb des hypothetisch wirksamen Laugendrucks. Mit zunehmendem Abstand von den Abbauen wird die Differenz zwischen Laugendruck und minimaler Spannung geringer. Gelb, orange oder rot eingefärbt sind die hypothetisch laugendruckgefährdeten Bereiche, die sich weit in das Salzgebirge erstrecken und bis an die Hauptanhydritschollen und den Salzspiegel heranreichen.

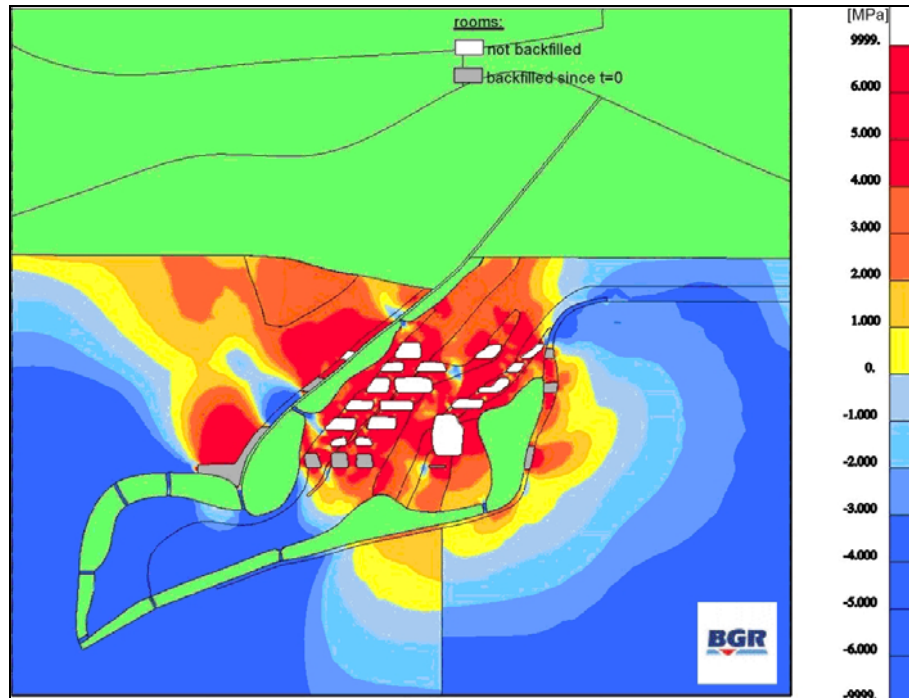


Abb. 12: Südlicher Zentralbereich Bartensleben - Berechnete Differenz zwischen hypothetischem Laugendruck und minimaler Gebirgsspannung 65 Jahre nach Auffahrung (HEUSERMANN & FAHLAND, 2005)

Aus den Ergebnissen der Modellberechnungen lässt sich folgende Bewertung der Integrität der Salzbarriere über den Abbauen des südlichen Zentralbereichs ableiten (HEUSERMANN & FAHLAND, 2005):

- In den Stößen, Sohlen und Firsten bzw. Schweben der Abbaue werden aufgrund hoher Beanspruchung dilatante Auflockerungszonen berechnet, die stellenweise bis an die benachbarte Hauptanhydritscholle, aber auch bis an die oberste Hauptanhydritscholle reichen. Weite Bereiche der Salzbarriere mit einer Mächtigkeit von ca. 40 m, insbesondere zwischen dem Salzspiegel und dem Abbausystem, weisen zum gegenwärtigen Zeitpunkt keine Dilatanz auf.
- Aufgrund weitreichender, durch den hohen Durchbauungsgrad und durch das Kriechen des Salzgebirges verursachter Spannungsumlagerungen ergeben sich sehr große Gebirgsbereiche, für die das Laugendruckkriterium nicht erfüllt ist und die sich bis zum Salzspiegel erstrecken.
- Die Ergebnisse der Modellberechnungen lassen in Verbindung mit den beiden Integritätskriterien (hinreichende Bedingung: Eines der beiden genannten Kriterien muss erfüllt sein) zunächst die Schlussfolgerung zu, dass die Salzbarriere aus geomechanischer Sicht intakt ist, da für den gesamten Salzspiegel keine Dilatanz

berechnet wird und damit keine Voraussetzungen für das Eindringen von Lösungen aus dem Deckgebirge in die Salzformation vorliegen. Da jedoch die westlich an den Abbaubereich angrenzenden Anhydritschollen bis zum Salzspiegel und in das Deckgebirge reichen, ist ein Lösungszutritt vom Deckgebirge über den klüftigen und damit als durchlässig anzunehmenden Anhydrit sowie über die durch die Berechnungen ausgewiesenen dilatanten und fluiddruckgefährdeten Salzsichten in die Abbaue des Zentralbereichs nicht auszuschließen.

6. Weiterentwicklung des Nachweisverfahrens

Das derzeit verwendete und allgemein akzeptierte Verfahren zum Nachweis der geomechanischen Integrität geologischer Barrieren beruht auf der Berechnung und Bewertung von Spannungszuständen als Indikator für die Beurteilung der hydraulischen Eigenschaften der Salzbarriere (z. B. hinsichtlich der Barrierendurchlässigkeit). Neuere Entwicklungen im Bereich gesteinsphysikalischer Laboruntersuchungen und von entsprechenden Materialmodellen (z. B. zur Dilatanz von Steinsalz und daraus abgeleiteter Kennwerte wie Porosität und Permeabilität) sowie im Bereich numerischer Methoden (z. B. Entwicklung eines hydromechanischen Rissmodells und Implementierung in einem Finite-Elemente-Programm zur Simulation der Entstehung und Aufweitung einzelner fluidgefüllter Risse) sollen zukünftig zu einer Verbesserung der Prognosemodelle, zu einer Konkretisierung der derzeit bestehenden Integritätskriterien und zu einer Präzisierung der Berechnung der hydromechanischen Eigenschaften und des langfristigen thermo-hydro-mechanischen Verhaltens der Salzbarriere führen.

7. Referenzen

Heusermann, S. (2001): Beurteilung der geomechanischen Stabilität und Integrität von Endlagerbergwerken im Salzgebirge auf der Grundlage geologischer und ingenieurgeologischer Untersuchungen. Geologische Beiträge Hannover, 2, 159-174.

Heusermann, S. & Fahland, S. (2005): Long-term geomechanical stability and integrity of the salt barrier in the central part of the Bartensleben salt mine. Proc. Post-Mining 2005, Nov. 16-18, 2005, 12 p., Nancy, France.

Heusermann, S., Nipp, H.-K., Eickemeier, R., Fahland, S. & Preuss, J. (2007): Geomechanical integrity of waste disposal areas in the Morsleben repository. Int. Conf. on

Radioactive Waste Disposal in Geological Formations (REPOSAFE), Nov. 6-9, 2007,
Braunschweig.