

Gesellschaft für Anlagenund Reaktorsicherheit (GRS) mbH

Barriereverhalten von Anhydrit

Phase 2 - BARIANO

Abschlussbericht





Gesellschaft für Anlagenund Reaktorsicherheit (GRS) mbH

Barriereverhalten von Anhydrit

Phase 2 - BARIANO

Untersuchungen bei großräumigen Spannungsumlagerungen

Abschlussbericht

Klaus Wieczorek Jürgen Miehe

Juni 2005

Anmerkung:

Die diesem Bericht zugrundeliegenden Arbeiten wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) unter dem Förderkennzeichen 02 E 9592 gefördert.

Die Arbeiten wurden von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt allein bei den Autoren.

GRS - 209 ISBN 3-931995-76-3

Deskriptoren:

Aktiver Abfall, Bergbau, Deutschland, Endlagerung, F+E, Geosphäre, Permeabilität, Rißbildung, Salz, Seismik, Spannung

Vorwort

Anhydritschichten sind Bestandteile des Salinars und unterliegen in der Betriebs- und Nachbetriebsphase eines Endlagers gebirgsmechanischen Beanspruchungen. Während im Steinsalz durch Konvergenz erhöhte Gebirgsspannungen abgebaut werden, kommt es in steiferen und festeren Anhydritschichten zu Belastungserhöhungen durch Spannungsumlagerungen, die zu Auflockerungen oder Rissbildungen, verbunden mit dem Auftreten mikroseismischer Ereignisse, führen können. Vorhandene Klüfte oder neugebildete Risse können zu Fließpfaden für Laugen werden, die Einfluss auf die Langzeitsicherheit des Endlagers nehmen.

Da im Salzbergwerk Bernburg der European Salt Company (ESCO) Steinsalz gewonnen wird und Anhydrit in Form von Klippenstrukturen aufgeschlossen ist, bestehen günstige geologische und bergbauliche Voraussetzungen, den Anhydrit unter dem Einfluss großräumiger Gebirgsspannungsänderungen zu untersuchen. Im Hinblick auf den Bau eines Endlagers für radioaktive Abfälle im Steinsalz stellt der in Bernburg praktizierte Kammer-Pfeiler-Bau eine erheblich stärkere Belastung dar, als für ein Endlager mit relativ kleinen Hohlräumen zu erwarten ist. Der Versuchsort in Bernburg war absichtlich gewählt worden, um die maximale Auswirkung der Spannungsumlagerungen untersuchen zu können.

Schwerpunkte waren die quantitative Beschreibung der induzierten Seismizität, der Einfluss des Spannungsfeldes auf die Permeabilität sowie der Modellierung der mechanischen und hydraulischen Vorgänge.

Das Vorhaben wurde als Gemeinschaftsprojekt mit dem Institut für Gebirgsmechanik, Leipzig, in Fortsetzung der ersten Projektphase (Förderkennzeichen 02 E 9168 9) durchgeführt. Die Arbeiten der GRS umfassten In-situ-Untersuchungen zur großräumigen, langfristigen Überwachung der induzierten Seismizität mit Schallemissionsmessungen in einem geklüfteten Anhydritbereich sowie Permeabilitätsmessungen in unterschiedlich aufgelockerten Gebirgsbereichen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Zielsetzung	5
3	Versuchsort	7
4	Seismische Messungen	9
4.1	Seismisches Messsystem	9
4.2	Datenaufbereitung und Auswertung	10
4.2.1	Festlegung der Ersteinsätze der P- und S-Wellen	10
4.2.2	Automatische Ortung	12
4.2.3	Cluster-Analyse	13
4.2.4	Bestimmung der Herdparameter	14
4.3	Ergebnisse der seismischen Messungen	14
4.3.1	Ereignislokationen und -häufigkeit	14
4.3.2	Ereigniscluster	17
4.3.3	Herdmechanismus	20
5	Permeabilitätsbestimmung mittels Packertests	23
5.1	Lage und Erstellung der Permeabilitätsmessbohrung	23
5.2	Inspektion der Bohrung mit einer Bohrlochkamera	23
5.3	Aufbau des Messystems	
5.4	Testdurchführung und Auswertung	
5.5	Ergebnisse der Permeabilitätstests	29
6	Interpretation der Ergebnisse	33
7	Zusammenfassung und Schlussfolgerung	35
8	Literatur	

1 Einleitung

Der Arbeitskreis "Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd)" hat bei seiner Ableitung von Kriterien zur Auswahl von Endlagerstandorten darauf hingewiesen, dass die Forderung günstiger gebirgsmechanischer Voraussetzungen unabhängig vom potenziellen Wirtsgestein u.a. darin besteht, ein standsicheres Grubengebäude mit Infrastrukturgrubenbauten und den eigentlichen Endlagerhohlräumen auszulegen, ohne dass eine nachhaltige Beeinträchtigung der mechanischen Integrität, z.B. Rissbildung, auftritt. In diesem Zusammenhang sollten durch "anthropogene Einwirkungen" keine mechanischen, thermischen und hydraulischen Prozesse sowohl in der Betriebszeit als auch in der Nachbetriebsphase erzeugt werden, die sich nachteilig auf die Barriereintegrität auswirken könnten /AKE 02/. Um die Barrierewirkung der Wirtsgesteine unter dem Einfluss sich ändernder Gebirgsspannungen beurteilen zu können, ist es notwendig, standort- und wirtsgesteinsunabhängige Untersuchungsmethoden und –kriterien zur Verfügung zu haben.

Bei der bergmännischen Erstellung der für die Endlagerung notwendigen Hohlräume treten Spannungsumlagerungen im Gebirge auf, die zu Auflockerungen oder Rissbildungen, verbunden mit dem Auftreten mikroseismischer Ereignisse, führen können. Als ein mögliches Verfahren zur Beurteilung der Barriereintegrität des Wirtsgesteins bieten sich Schallemissionsmessungen an, die Aussagen über die Lokation von Störzonen erlauben.

Im Salinar sind Anhydritschichten mit einem deutlich vom Steinsalz abweichenden mechanischen Verhalten ein natürlicher Bestandteil des Salzgesteins. Im Gegensatz zum Steinsalz, das in der Lage ist, auftretende Gebirgsspannungen durch Kriechen und Relaxationsprozesse abzubauen, führen Belastungsumlagerungen im steiferen Anhydrit zu einer Erhöhung der Spannungen. Auf Grund einer damit verbundenen potenziellen Ausbildung von Rissen in Verbindung mit der daraus resultierenden mikroseismischen Aktivität kann hier das Verfahren der Schallemissionsmessung zur Überwachung eingesetzt werden.

Das in diesem Bericht beschriebene F+E-Vorhaben "Untersuchung des Barriereverhaltens von Anhydrit bei großräumigen Spannungsumlagerungen – Phase 2 (BARIA-NO)" (FKZ 02 E 9592) ist eine Fortsetzung der vorangegangenen Vorhaben ANTON /FLA 95/, BARITON /FLA 00/ und BARIAN /WIE 03a/ /KAM 02/, die ebenfalls als

1

Gemeinschaftsprojekte zwischen der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), Braunschweig, und dem Institut für Gebirgsmechanik (IfG), Leipzig, durchgeführt wurden.

Das erste Vorhaben ANTON befasste sich vorwiegend mit der Ermittlung der gesteinsmechanischen Eigenschaften des Hauptanhydrits und des Grauen Salztons sowie der auftretenden Hohlraumkonvergenzen und der Spannungsumlagerungen bei der Freilegung. Aufbauend auf diesen Untersuchungen lag der Schwerpunkt im Vorhaben BARITON auf der Bestimmung des gesteinsmechanischen Verhaltens der Klüfte im Anhydrit. Neben der Ermittlung der mechanischen Eigenschaften wurden Methoden und Kriterien entwickelt, die es erlauben, mechanisch-hydraulische gekoppelte Vorgänge zu beurteilen. In diesem Zusammenhang erfolgte der Einsatz von seismischen Überwachungsmethoden und von Permeabilitätsmessungen. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass das Barriereverhalten des Anhydrits von den mechanischen und hydraulischen Eigenschaften der Klüfte bestimmt wird. Im Vorhaben BARIAN wurden an einem von GRS und IfG gemeinsam genutzten Messort im Steinsalzbergwerk Bernburg der European Salt Company (ESCO) von der GRS ein Messarray zur Erfassung seismischer Ereignisse, hervorgerufen durch bergbauliche Aktivitäten, aufgebaut und getestet sowie erste Ergebnisse zur Ortung und zur Ereignishäufigkeit vorgestellt. Aus betrieblichen Gründen (Einrichtung einer neuen Förderstrecke) stand das Messarray über längere Zeit nicht im vollen Umfang zur Verfügung; darüber hinaus erfolgte der Abbau gegenüber der ursprünglichen Planung verzögert. Daher war das im Vorhabenszeitraum gewonnene Datenmaterial für weitergehende Aussagen nicht ausreichend /WIE 03a/. Die Messungen, die bis dahin vorlagen, ließen einen ersten Schluss auf eine Konzentration von Ereignissen im Anhydritbereich zu.

In dem diesem Abschlussbericht zu Grunde liegenden F+E-Vorhaben BARIANO erfolgte zum einen eine Fortführung der Aufzeichnung der induzierten Schallemissionen sowie eine differenzierte Auswertung der seit Mitte 2001 gewonnenen seismischen Messdaten. In diesem Zusammenhang wurde die automatisierte Ortungsroutine durch die Fa. Engineering Seismology Group Canada Inc. (ESG) weiterentwickelt. Weiterführend wurden die seismischen Messungen hinsichtlich der relevanten Herdparameter ausgewertet. Die seismischen Messungen wurden durch Permeabilitätstests in einer Bohrung ergänzt. Die Festlegung der Lokation der Bohrung wie auch deren Teufe erfolgte aufbauend auf den Ergebnissen der seismischen Untersuchungen. Zur Beurteilung der Struktur der Bohrlochwand und zur Auswahl der zu testenden Messintervalle wurde zuvor die Bohrung mit einer Bohrlochkamera des IfG befahren. Die Messungen wurden als Flüssigkeitsinjektionstests mit Steinsalzlauge durchgeführt.

2 Zielsetzung

Gesamtziel des Vorhabens war die Untersuchung der Auswirkungen großräumiger Spannungsumlagerungen auf die Barriereintegrität des Anhydrits. Um dabei maximale Effekte beobachten zu können, wurde als Versuchsort ein im Kammer-Pfeiler-Bau produzierendes Bergwerk ausgewählt, da die hier auftretenden Belastungen als maximal betrachtet werden können.

Die eingesetzten Untersuchungsmethoden waren mikroseismische Messungen und ergänzende Permeabilitätstests. Damit waren spezifische Vorhabensziele:

- Die Untersuchung der bei großräumigen, bergbaulich bedingten Gebirgsspannungsänderungen im Anhydrit induzierten Schallemissionen und ihrer Relevanz für eine Materialschädigung, insbesondere im Hinblick auf das hydraulische Verhalten.
- Die Weiterentwicklung zerstörungsfreier mikroakustischer Messmethoden zur Bewertung der Materialschädigung in einem räumlich und zeitlich veränderlichen Spannungsfeld.

Die Ergebnisse finden Eingang in eine standortunabhängige Modellentwicklung für die Bewertung der Integrität der geologischen Barriere im Rahmen des geotechnischen Sicherheitsnachweises.

3 Versuchsort

Beim Steinsalzbergwerk Bernburg, 35 km südlich von Magdeburg in Sachsen-Anhalt, handelt es sich um einen produzierenden Betrieb, in dem Leine-Steinsalz im Kammer-Pfeiler-Bau abgebaut wird. Das Bergwerk wird von der European Salt Company (ESCO) betrieben. Der Versuchsort befindet sich nordwestlich eines Abbaufeldes in einer Tiefe von ca. 350 bis 400 m unter NN bzw. in 427 bis 477 m unter Geländeniveau. Die Abmessungen der Abbaukammern haben eine Länge von ca. 220 m, eine Breite von 20 m und eine Höhe von 35 m. Die Kammern sind durch 28 m breite Pfeiler voneinander getrennt. Ein Aufriss des Versuchsorts ist in Abbildung 3-1 dargestellt.



Abb. 3-1Lage des Versuchsorts mit den Stationen des seismischen Arrays im
Salzbergwerk Bernburg, Nord-Ost-Projektion mit Fördersohle

Der Abbau wurde in zwei Phasen vorgenommen, wobei zunächst eine vier Meter hohe Hangendstrecke in der vorgesehenen Abbaubreite aufgefahren und anschließend zeitlich versetzt das Salz im Liegenden durch Bohren und Schießen gewonnen wurde. Der Abbau erfolgte von Süd nach Nord. Die Kammer 2113 (dritte von Norden in Abbildung 3-1) war 1999 und die Kammer 2112 (zweite von Norden) im März 2001 fertiggestellt. Die nördlichste Kammer 2111 wurde im Jahr 2002 aufgefahren. Der sich unterhalb des Leine-Steinsalzes befindliche Anhydrit, schematisch in Abbildung 3-2 dargestellt, hat im Bereich des Messorts eine mittlere Mächtigkeit von ca. 35 m und befindet sich in einer Tiefe von ca. 415 m unter NN.



Abb. 3-2Lage des Versuchsorts mit den Stationen des seismischen Arrays
(Dreiecke) im Salzbergwerk Bernburg, schematische Ost-Tiefen-
Projektion mit der Grenze zwischen Steinsalz und Anhydrit

Der Anhydrit, der im Vergleich zum Steinsalz eine hohe Steifigkeit besitzt, kann Spannungskonzentrationen nicht durch Kriechen abbauen und ist daher potentiell geklüftet. Vorhandene Klüfte können mit Sekundärmineralien wie Carnallit oder Halit geschlossen bzw. gefüllt sein. Spannungsumlagerungen können sowohl zum Öffnen wie auch Schließen vorhandener Kluft-/Rissbereiche sowie zu neuer Rissbildung führen.

Zur Beobachtung derartiger durch die Abbautätigkeit hervorgerufener Prozesse im Anhydrit nordwestlich des Abbaufeldes wurde ein mikroseismisches Messarray, bestehend aus 16 Dreikomponenten-Beschleunigungsaufnehmern, zur Überwachung eines Bereiches von 160 x 160 x100 m installiert und die Auswirkungen des von Süden fortschreitenden Abbaus über einen Zeitraum von 4 Jahren registriert. Die Lage der seismischen Sensoren ist in den Abbildung 3-1 und 3-2 angegeben. Vier der Sensoren befinden sich direkt im Anhydrit und die restlichen Messaufnehmer im darüberliegenden Steinsalz.

4 Seismische Messungen

Die Registrierung seismischer Ereignisse ist eine zuverlässige Methode zur Erkennung von Kluft- und Rissformationen sowie des Öffnens von Klüften/Rissen. Eine Änderung in der Häufigkeit von seismischen Ereignissen weist auf eine Schädigung der Formation, z.B. durch Riss- oder Kluftbildung, hin. Die Ortung der Ereignisse sowie die Ermittlung der Herdparameter ermöglichen eine Aussage über die Lage, die Größe und die Entstehungsmechanismen der Risse/Klüfte.

4.1 Seismisches Messsystem

Das mikroseismische Erfassungs- und Auswertesystem wurde von der Fa. Engineering Seismology Group Canada Inc. (ESG) erworben. Es erlaubt eine automatische Ereignisidentifikation, die Ortung und Herdparameterermittlung sowie die bildliche Darstellung und Archivierung der registrierten Signale.

Tabelle 4-1 Sensorkoordinaten des seismischen Messarrays im Salzbergwerk Bernburg

#	Hochwert (Nord) (+ 5741000)	Rechtswert (Ost) (+ 4476000)	Tiefe (m)
1	294.0	535.1	380
2	289.5	597.1	378.4
3	242.0	637.8	381.8
4	181.7	631.3	381.5
5	140.3	575.0	375.0
6	143.9	524.4	375.4
7	194.9	480.1	373.0
8	254.9	486.2	373.7
9	248.4	561.9	405.2
10	215.0	588.0	405.0
11	188.4	558.3	405.0
12	219.1	529.2	405.9
13	263.2	516.6	431.2
14	259.0	609.0	432.1
15	170.0	601.0	430.0
16	176.5	508.7	431.0

Die 16 Dreikomponenten-Beschleunigungsaufnehmer des Messarrays (siehe Abbildung 3-1) weisen eine von der Frequenz unabhängige Amplitude im Frequenzbereich von 10 Hz bis 5 kHz mit einer Genauigkeit von ±3 dB auf, wobei die Empfindlichkeit bei 3 V/g liegt. Die Sensorkoordinaten sind in Tabelle 4-1 aufgeführt.

Die von den Sensoren aufgenommenen Signale wurden über Kupferkabel zum zentralen ESG Hyperion Microseismic System (HMS) übertragen und mit 20 kHz bei einer Auflösung von 16 Bit digitalisiert. Das System besteht aus programmierbaren Verstärkern, Anti-Aliasing-Filtern, Triggerung, AD-Wandlern, Stromversorgung, Watchdog und ferngesteuertem Computer sowie der zugehörigen Software. Eine weitere Beschreibung wird in /WIE 03a/ gegeben.

4.2 Datenaufbereitung und Auswertung

Nach einer ersten Beobachtungsphase im Jahr 2000, die aufgrund von bergbaubedingten Aktivitäten unterbrochen werden musste /WIE 03/, erfolgte die eigentliche Messphase, beginnend im Juli 2001 bis Mai 2004. Das seismische System registrierte durchschnittlich etwa 10 000 Ereignisse pro Monat, von denen knapp 30 % automatisch geortet wurden. Eine visuelle Inspektion der Daten zeigt allerdings, dass ein durch den Grubenbetrieb verursachter hoher Noise-Level für die hohe Anzahl der Triggerungen verantwortlich war und viele Fehler bei der automatischen Festlegung der Ersteinsätze, die für die Ortung entscheidend sind, verursachte (siehe unten). Da insbesondere während der Betriebszeiten der Hauptanteil der Triggerungen nicht durch echte seismische Ereignisse bedingt war, wurden nur die Registrierungen von schichtfreien Tagen, im Wesentlichen an Wochenenden, zur weiteren Auswertung herangezogen.

4.2.1 Festlegung der Ersteinsätze der P- und S-Wellen

Zur automatischen Festlegung der P-Wellen-Einsätze wurde zunächst der sogenannte STA/LTA-Ansatz (Short-Term Average versus Long-Term Average) verwendet. Dabei werden die Signalcharakteristiken in zwei zeitlich-verschiebbaren Fenstern verglichen. Das erste Fenster (LTA) gibt den auf Grund des niederfrequenten Signalverhaltens geschätzten Wert eines aus der Beschleunigung abgeleiteten Parameters an, während das zweite (STA) den aktuell registrierten Wert dieses Parameters beinhaltet. Wenn der Quotient aus STA und LTA eine vordefinierte Schwelle überschreitet, wird dies als Signaleinsatz gewertet. Als Parameter verwendet HMS das zweite zentrale Moment (die Signal-Amplitudendispersion), das gegenüber der sonst verwendeten absoluten

Amplitude oder dem Amplitudenquadrat den Vorteil hat, eine bekannte Wahrscheinlichkeitsverteilung zu besitzen und niederfrequente Trends in den Signalen zu berücksichtigen /PRE 92/.

Eine Überprüfung der automatischen Ersteinsatzfestlegungen zeigte, dass trotzdem ein großer Teil der Einsätze falsch erkannt wurde, was zu erheblichen Ortungsfehlern führte. Daraufhin wurden die Registrierungen bis September 2002 mit manueller Einsatzfestlegung komplett nachausgewertet. In Zusammenarbeit mit ESG wurde parallel die automatische Ersteinsatzfestlegung weiterentwickelt. Verschiedene Filtermethoden der Signale führten zu keiner Verbesserung. Erfolgreich war die Einführung zusätzlicher Signalprüfungen zum STA/LTA-Verfahren:

- Wenn mehr als fünf mögliche Einsätze innerhalb einer Registrierung festgestellt werden, wird das Signal als Multisource-Ereignis verworfen.
- Es wird überprüft, ob es sich beim Signal um eine Nadelfunktion (elektrische Einstreuung) handelt; falls ja, wird es verworfen.
- Es wird überprüft, ob vor dem potenziellen Ersteinsatz ein Sprung in der Signalenergie stattgefunden hat, was nicht auf ein seismisches Ereignis zurückführbar ist. Auch in diesem Fall wird das Signal verworfen.
- Für alle Paare von Sensoren wird geprüft, ob die Zeitdifferenz zwischen den beiden P-Einsätzen nicht kürzer ist als die Zeit, die die P-Welle für den direkten Weg zwischen den beiden Sensoren benötigt. Nur die Sensorpaare, die diesem Kriterium entsprechen, werden akzeptiert, die übrigen werden mit obiger Restriktion erneut ausgewertet.

Die Festlegung der S-Wellen-Einsätze basiert bei HMS auf der Auswertung eines Funktionals, das als Produkt aus Polarisationskoeffizient, normalisiertem Auslöschungswinkel und Energiequotient aus den rotierten transversalen Komponenten und der Summe der radialen und transversalen Komponenten definiert ist und beim Einsatz der S-Welle sein Maximum 1 annimmt /CIC 93/. In Folge der falschen P-Festlegung bei der standardmäßigen automatischen Auswertung war die Festlegung der S-Wellen-Einsätze ebenfalls häufig falsch. Die S-Wellen-Einsätze werden bei der automatischen Ortung allerdings nicht verwendet. Sie sind jedoch für die Bestimmung der Herdparameter von Bedeutung. Daher wurden auch bei der automatischen Festlegung der S-Einsätze Verbesserungen vorgenommen, insbesondere eine Konsistenzprüfung zwischen P- und S-Einsatz jedes Signals. Die zwischen Juli 2001 und September 2002 an arbeitsfreien Tagen registrierten Ereignisse wurden mit dem erweiterten System erneut automatisch ausgewertet, was zu etwa 1500 georteten Ereignissen führte. Die Ortungsergebnisse wurden mit den Ergebnissen der manuell ausgewerteten Registrierungen verglichen. Die Zeitdifferenzen bei den P- und S-Einsatzfestlegungen lagen im Schnitt bei ±0.5 ms, und entsprechend stimmten die Ortungsergebnisse und auch die Ortungsfehler (ca. 4 m) gut überein. Die automatische Auswertung erkannte etwa 20 % weniger Ereignisse als die manuelle, aber weniger als 2 % der automatisch festgelegten Ereignisse sind keine echten seismischen Ereignisse. Das bedeutet, dass das automatische Verfahren eher ein tatsächliches Ereignis verwerfen wird, als falsche Ortungsergebnisse zu produzieren.

Auf Grund der guten Ergebnisse des erweiterten automatischen Verfahrens wurden die seit Oktober 2002 an arbeitsfreien Tagen registrierten Ereignisse mittels dieser Methode ausgewertet.

4.2.2 Automatische Ortung

Zur Ereignisortung wurden die P-Wellen-Einsätze nach der Geiger-Methode /GIB 94/ ausgewertet. Dazu ist die Kenntnis der seismischen Geschwindigkeiten, insbesondere der P-Wellen-Geschwindigkeit, erforderlich. Die seismischen Geschwindigkeiten wurden in der vorigen Projektphase durch Hammerschlagseismik an definierten Punkten bestimmt /WIE 93a/. Es wurden eine P-Wellen-Geschwindigkeit von 4781 ± 145 m/s und eine S-Wellen-Geschwindigkeit von 2734 ± 49 m/s ermittelt.

Die Ankunftszeiten der P- und S-Wellen, die vom Signalstart gemessen wurden, sind in Abbildung 4-1 als Funktion des Quelle/Signal-Abstandes dargestellt. Die negativen Werte für beide Koordinaten erklären sich aus dem verwendeten mathematischen Modell. Die Ortungsgenauigkeit der künstlichen Ereignisse lag zum größten Teil bei 5 m bei den horizontalen Koordinaten und unter 8 m bei der Tiefe.



Abb. 4-1Kalibration der seismischen Geschwindigkeiten der P- und S-Wellen alsFunktion des Quelle/Sensor-Abstandes /WIE 03a/

4.2.3 Cluster-Analyse

Da die Ortungsergebnisse der mikroseismischen Messungen deutliche Konzentrationen in bandartigen Strukturen zeigten (siehe Abschnitt 4.3), wurde für die manuell ausgewerteten Ereignisse in Zusammenarbeit mit ESG eine Cluster-Analyse durchgeführt. Dabei sind zwei Ansätze möglich.

Beim ersten (subjektiven) Verfahren wird für jedes Ereignis durch Auswertung der Koordinaten festgelegt, zu welchem Cluster es gehört. Anschließend werden die räumliche Kreuzkorrelationsmatrix berechnet und aus ihren Eigenvektoren und Eigenwerten ein Ellipsoid bestimmt, welches das Cluster approximiert. Dieses Verfahren funktioniert, wenn die einzelnen Cluster sich nicht überlappen.

Im Gegensatz dazu ist das zweite Verfahren objektiv, weil die Cluster durch Stichproben aus einer Mischung dreidimensionaler Gaussverteilungen identifiziert werden. Die Cluster-Parameter werden nach dem EM Algorithmus (Maximum Expectation) /XUJ 96/ bestimmt. Dieses Verfahren wurde auf die Daten angewendet.

Neben der räumlichen Untersuchung wurde das zeitliche Auftreten der Ereignisse innerhalb der Cluster und die Entwicklung der relativen Häufigkeit in den verschiedenen Clustern durch Betrachtung der Kreuzkorrelationsfunktionen vergleichend betrachtet.

4.2.4 Bestimmung der Herdparameter

Die Untersuchung des Ereignismechanismus wurde von ESG mittels einer selbstentwickelten vollautomatischen Inversionsmethode des seismischen Momenttensors /TRI 00/ /TRI 02/ an den zwischen Juli 2001 und September 2002 registrierten Ereignissen durchgeführt. Ein besonderes Problem war dabei das geringe Signal/Noise-Verhältnis, das die Bestimmung der für den Momenttensor bedeutsamen Einsatzpolarität erschwert. Daher wurde eine objektive Methode zur Festlegung der Ersteinsatzpolarität gesucht.

Die jeweils drei Komponenten der Registrierungen wurden zunächst mit Hilfe der aus der Ortung bekannten Ereignislokation ins Strahlkoordinatensystem rotiert, wobei nur Registrierungen mit weniger als 2 ms Residuum (Ortungsgenauigkeit besser als etwa 10 m) berücksichtigt wurden. Dann wurde der Ersteinsatz (p-Welleneinsatz) an Hand des erweiterten STA/LTA-Ansatzes bestimmt. Die S-Welleneinsätze wurden mittels des in Abschnitt 4.2.1 beschriebenen Ansatzes bestimmt.

Auf Grund der Unsicherheiten bei der Bestimmung der Einsatzpolarität sollten die Ergebnisse der Herdparameter-Bestimmung nicht überbewertet werden. Trotzdem sind qualitative Schlüsse möglich.

4.3 Ergebnisse der seismischen Messungen

4.3.1 Ereignislokationen und -häufigkeit

Zwischen Juli 2001 und Mai 2004 wurden an arbeitsfreien Tagen mit Hilfe der erweiterten automatischen Ersteinsatzfestlegung (siehe Abschnitt 4.2.1) insgesamt über 1700 Ereignisse geortet, deren Momentenmagnitude durchweg unter 0, in der Regel zwischen -3 und -1 lag. Abbildung 4-2 zeigt die Ortungsergebnisse in Nord-Ost- und Ost-Tiefen-Projektion.



Abb. 4-2Nord-Ost- (oben) und Ost-Tiefen-Projektion (unten) der Lokationen der
zwischen Juli 2001 und Mai 2004 automatisch georteten Ereignisse

Der Ost-Tiefen-Projektion ist zu entnehmen, dass der weitaus größte Teil der Ereignisse aus dem Anhydrit unterhalb 415 m Tiefe stammt. Eine Konzentration von Ereignissen im Übergangsbereich zwischen Anhydrit und Steinsalz ist nicht erkennbar. Der Rest der Ereignisse wurde im Steinsalz im Wesentlichen im Bereich der Hohlräume geortet, vermutlich als Folge der Ausbildung von hohlraumnahen Auflockerungszonen. Einige wenige Ereignislokationen liegen im Hangenden des Grubengebäudes. Hierbei handelt es sich höchstwahrscheinlich überwiegend um Fehlortungen des automatischen Verfahrens, wie die im folgenden Abschnitt dargestellten Ergebnisse der manuellen Auswertung zeigen.

Die Nord-Ost-Projektion der Ereignislokationen deutet eine Konzentration von Ereignissen in bandartigen Strukturen, die von Südwest nach Nordost streichen, an. Zur näheren Untersuchung dieses Phänomens wurde an den manuell ausgewerteten Registrierungen von Juli 2001 bis September 2002 eine Cluster-Analyse durchgeführt (siehe Abschnitt 4.3.2).

Die Häufigkeitsverteilung der georteten Ereignisse ist in Abbildung 4-3 dargestellt. Man erkennt eine deutliche Abnahme der Ereignishäufigkeit nach Ende 2002, als die Abbauarbeiten südöstlich des seismischen Arrays beendet waren. Anfang 2002 ist ein deutlicher Anstieg der ohnehin hohen Häufigkeit insbesondere im Steinsalz zu beobachten /WIE 05/. Dies ist auf den Abbaubeginn in der dem Array nächstgelegenen Kammer 2111 (siehe Abbildung 3-1) zurückzuführen.



Abb. 4-3Ereignishäufigkeit der zwischen Juli 2001 und Mai 2004 automatisch
georteten Ereignisse

Im Januar 2002 sowie im Januar und Februar 2003 bzw. 2004 sind keine Daten vorhanden, weil in diesen Monaten auch an den Wochenenden gearbeitet wurde und daher keine auswertbaren georteten Ereignisse zur Verfügung stehen.

Neben den erwähnten Änderungen der Ereignishäufigkeit sind auch jahreszeitliche Schwankungen sichtbar, die auf die intensivere Abbautätigkeit im Herbst und Winter gegenüber Frühling und Sommer zurückzuführen sind.

4.3.2 Ereigniscluster

Zur Untersuchung der Häufung von Ereignissen entlang bandartiger Strukturen wurde an Hand der manuell ausgewerteten Registrierungen von Juli 2001 bis September 2002 eine Cluster-Analyse nach dem EM-Algorithmus durchgeführt. Abbildung 4-4 zeigt die georteten Ereignislokationen zusammen mit den ermittelten Clustern.

Zunächst ist auffällig, dass bei der Ereignisortung nach manueller Ersteinsatzfestlegung keine Ereignisse im Hangenden des Grubengebäudes auftreten. Daher ist die Annahme gerechtfertigt, dass es sich bei den nach der automatischen Ersteinsatzfestlegung georteten Ereignissen in diesem Bereich um Fehlortungen handelt.

Das südlichste Cluster in Abbildung 4-4 (links) ist oberhalb der anderen im Steinsalz gelegen (Abbildung 4-4 rechts). Es handelt sich dabei offenbar um Ereignisse in der Auflockerungszone der Abbaue. Die übrigen Cluster liegen innerhalb des Anhydrits und nicht etwa im Übergangsbereich zwischen Anhydrit und Steinsalz. Während die Lage der durch den EM-Algorithmus ermittelten Ellipsoide bei den meisten Clustern die Anordnung der Ereignislokationen widerspiegelt, erforden zwei Cluster eine Diskussion:

- Das westlichste Cluster (Abbildung 4-4 links) scheint anders zu streichen als das berechnete Ellipsoid. Dies ergibt sich daraus, dass eine große Zahl von Ereignissen im Zentrum des Clusters die Lage des Ellipsoids bestimmt.
- Das schmale, unter dem Zentrum des Arrays unter 45° streichende Ellipsoid (das dritte von links in Abbildung 4-4) repräsentiert tatsächlich zwei Cluster unterschiedlicher Ausrichtung. Der nördliche Teil scheint eine Verlängerung des westlich gelegenen Clusters zu sein. Hier war die objektive EM-Methode nicht in der Lage, zwischen den beiden Clustern zu unterscheiden.



Abb. 4-4Ereignishäufung zwischen Juli 2001 und September 2002 in Nord-Ost-
(oben) und Ost-Tiefen-Projektion (unten). Blau: Cluster nach dem EM-
Algorithmus. Roter Ring: Schwerpunkt des aktivsten Clusters

In Abbildung 4-5 und Tabelle 4-2 sind die Daten der wichtigsten ermittelten Cluster zusammengefasst. Das bei weitem aktivste Cluster (I) umfasst etwa 60 % der georteten Ereignisse und ist in Abbildung 4-4 mit einem Kreis markiert.



Abb. 4-5Clustereinteilung nach dem EM-Algorithmus, Nord-Ost-Projektion
(römische Ziffern: Clusterindex, Dreiecke: seismische Sensoren)

Cluster	Anzahl von Ereignissen	Lage des Zentrums		Eigenwerte			Orientierung		
		Nord (m)	Ost (m)	Tiefe (m)	1	2	3	Streichen (°)	Einfallen (°)
I	1058	1193	6600	440	36.4	13.7	7.5	245	87
П	130	1230	6679	460	53.7	23.7	9.6	21	34
ш	148	1211	6508	440	16.0	11.4	5.1	59	88
IV	180	1215	6558	436	67.9	14.4	9.0	207	45
V	96	1213	6581	435	19.5	10.7	5.8	235	0
VI	92	1235	6447	457	71.8	20.2	12.8	259	52

Tabelle 4-2	Parameter der Ereigniscluster	
-------------	-------------------------------	--

Die zeitliche Verteilung der Ereignisse innerhalb der einzelnen Cluster zeigt einen schwachen Trend zu Ereignisgruppierung, was auf eine externe Quelle (nämlich die bergbaubedingten Spannungsumlagerungen) der Ereignistriggerung hindeutet.

Die Kreuzkorrelationskoeffizienten der seismischen Aktivität für die verschiedenen Clusterpaare zeigten ihr Maximum überwiegend bei einer zeitlichen Verschiebung von Null, woraus zu schließen ist, dass die Ereignishäufigkeiten in den verschiedenen Clustern unabhängig voneinander sind und durch die gleiche Quelle getriggert werden.

4.3.3 Herdmechanismus

Die Ermittlung der seismischen Momenttensoren mittels des von ESG enwickelten automatischen Verfahrens wurde an den zwischen Juli 2001 und September 2002 georteten Registrierungen durchgeführt. Abbildung 4-6 zeigt die Ergebnisse für die volle Inversion des seismischen Tensors aus P- und S-Einsätzen in einer von Hudson et al. /HUD 89/ vorgeschlagenen Darstellung. Dabei ist auf der horizontalen Achse die Scherkomponente und auf der vertikalen Achse die volumetrische Komponente aufgetragen.



Abb. 4-6Herdmechanismen der Ereignisse der verschiedenen Cluster gemäß
voller Tensorinversion (römische Ziffern: Clusterindex)

Man erkennt eine große Anzahl von Ereignissen mit hoher volumetrischer Komponente. Generell sind die Ergebnisse weit über den Abbildungsbereich gestreut und legen nahe, dass eine große Zahl von zufälligen, fehlerhaften Lösungen ermittelt wurde. Da die automatische Ermittlung der S-Wellen-Einsätze die größte Fehlerquelle darstellt, wurde der Inversionsalgorithmus in einem zweiten Durchgang ausschließlich auf die p-Wellen-Einsätze angewandt. Das Ergebnis zeigt Abbildung 4-7.



Abb. 4-7Herdmechanismen der Ereignisse der verschiedenen Cluster gemäßP-Wellen-Lösung (römische Ziffern: Clusterindex)

Die Verteilung der Momenttensoren streut erheblich weniger. Der Hauptmechanismus scheint schubartig zu sein, mit volumetrischen Anteilen bis zu 30 %, zu etwa gleichen Teilen zwischen Explosion und Implosion aufgeteilt. Es gibt wenige reine Scherereignisse.

Aus den Ergebnissen lässt sich schließen, dass es im Anhydrit nicht zur Akkumulation von hohen Scherspannungen kommt, sondern dass die Spannungen durch Rissbildung entlang vorhandener Schwächezonen abgebaut werden.

5 Permeabilitätsbestimmung mittels Packertests

Zur Beurteilung der mikroseismischen Ergebnisse im Hinblick auf die Barrierewirksamkeit des Anhydrits war die Ermittlung der hydraulischen Eigenschaften in ausgewählten Bereichen des Anhydrits geplant. Dazu sind Permeabilitätsmessungen durch Packertests geeignet. Diese Messungen wurden als Laugeninjektionstests in einem Bohrloch, das ins Zentrum des aktivsten seismischen Clusters reicht, durchgeführt.

5.1 Lage und Erstellung der Permeabilitätsmessbohrung

Zur Untersuchung der hydraulischen Integrität des Anhydrits ist für Permeabilitätstests der Bereich der mikroseismischen Cluster interessant, insbesondere das in Abbildung 4-4 mit einem Kreis markierte Zentrum des aktivsten Clusters. Da aus betrieblichen Gründen die Erstellung einer Messbohrung nur von der oberen Sohle im Niveau von 370 m aus möglich war und eine Rückholung der Packersonde aus der erforderlichen Bohrlochtiefe von ca. 50 m fraglich erschien, wurde entschieden, sich auf eine Bohrung zu beschränken. Diese wurde mit starker Neigung (79°) mit einem Durchmesser von 56 mm und einer Länge von 59.1 m als Vollbohrung ins Zentrum des aktivsten Clusters gestoßen.

5.2 Inspektion der Bohrung mit einer Bohrlochkamera

Da während der Erstellung der Bohrung Lauge im unteren Bereich festgestellt wurde, und um nähere Informationen über die Struktur der aufgeschlossenen Gebirgsbereiche zu erhalten, wurde die Bohrung vor den Permeabilitätsmessungen zunächst mit einer vom Institut für Gebirgsmechanik (IfG) zur Verfügung gestellten Bohrlochkamera befahren. Hierbei zeigten sich im Übergangsbereich zwischen dem Steinsalz und dem Anhydrit (etwa 39 m Bohrlochtiefe) keine Veränderungen. In einer Bohrlochtiefe von ca. 49.5 m und 55.8 m vom Bohransatzpunkt, d.h. ca. 10 m bzw. 16.3 m unterhalb der Schichtgrenze Steinsalz/Anhydrit, wurden hingegen zwei mit Carnallit gefüllte Klüfte festgestellt, die genau in dem seismisch aktiven Bereich lagen. Während der Anhydrit oberhalb der Klüfte ungestört war, tropfte Lauge aus den Klüften heraus in die Bohrung und sammelte sich im Bohrlochtiefsten.



 Abb. 5-1 Inspektion der Permeabilitätsmessbohrung mit der Bohrlochkamera. Links oben: Intakter Anhydrit bei 47.45 m Tiefe. Rechts oben: Laugeführende, mit Carnallit gefüllte Kluft bei 49.55 m Tiefe. Links unten: Zweite laugeführende Kluft in 55.8 m Tiefe. Rechts unten: Laugenspiegel im Bohrlochtiefsten.

In Abbildung 5-1 sind Aufnahmen von der Befahrung mit der Bohrlochkamera aus dem Bereich des intakten Anhydrits bei einer Tiefe von 47.45 m, der laugeführenden, mit Carnallit gefüllten Klüfte bei 49.55 m bzw. bei 55.8 m Tiefe und vom Laugenspiegel in etwa 56 m Tiefe dargestellt.

5.3 Aufbau des Messsystems

Für die Durchführung der Permeabilitätsmessungen stand ein Messsystem zur Verfügung, das bereits im Rahmen von Untersuchungen zur Auflockerungszone im Steinsalz entwickelt und mit Erfolg eingesetzt wurde /WIE 98/ /WIE 03b/.

Das Messsystem besteht aus einem Vierfach-Packersystem mit 0.5 m langen, ölgefüllten Packerelementen sowie der Injektions- und der Datenerfassungeinheit (siehe Abbildung 5-2). Der Packersetzdruck wurde mittels einer Handpumpe aufgebracht. Zwischen den Dichtelementen der Packersonde befand sich in der Mitte das 0.8 m lange Messintervall. Ober- und unterhalb des Messintervalls ist je ein Beobachtungsintervall mit einer Länge von 0.3 m angeordnet, die bei Bedarf auch zu Testzwecken genutzt werden können.



 Abb. 5-2
 Schematische Darstellung der Packersonde mit Datenerfassung und Injektionssystem

Da die Injektionstests mit Lauge vorgenommen wurden, war die Injektionseinheit zur Druckaufgabe mit einer Pumpe ausgerüstet. Der prinzipielle Aufbau der Druckinjektionseinheit ist in Abbildung 5-3 wiedergegeben. Das Wasser dient zur Spülung der Injektionspumpe und der Leitungen, die sich außerhalb des Bohrlochs befinden. Die vorgegebenen Fließraten und die sich einstellenden Drücke werden mittels Massenflussmesser bzw. elektrischen Druckaufnehmern registriert und mit einer PC-gesteuerten Datenerfassungseinheit aufgenommen und gespeichert.



Abb. 5-3 Prinzipieller Aufbau des Injektionssystems zur Permeabilitätsbestimmung mittels Flüssigkeitsinjektionstests

Abbildung 5-4 zeigt die fertig aufgebaute Messwerterfassungseinheit mit der zugehörigen Injektionsvorrichtung sowie den Kontrollinstrumenten und der Pumpe. Die für die Tests benötigte Lauge wurde aus einem Kunststoffkanister (oben im Bild) der Injektionseinheit zugeführt. Der Einbau der Sonde mit den zugehörigen Packersetz- und Injektionsleitungen in die Bohrung ist in Abbildung 5-5 zu erkennen. Die vier Manometer rechts im Bild dienten der Kontrolle der Packersetzdrücke.



Abb. 5-4 Messapparatur mit Datenerfassungs- und Injektionseinheit



Abb. 5-5 Ablassen der Packersonde in die Bohrung

5.4 Testdurchführung und Auswertung

Als wichtigste Bereiche zur Permeabilitätsbestimmung wurden der Kluftbereich und der darüber liegende visuell intakte Anhydrit identifiziert. Da wegen der großen Bohrlochtiefe nicht erwartet wurde, dass die Sonde nach der ersten Ankopplung noch einmal versetzt werden könnte, wurde entschieden, die beiden 30 cm langen Kontrollintervalle als Injektionsintervalle einzusetzen und die Sonde so anzukoppeln, dass die Intervallmitte des unteren Intervalls in 49.55 m (obere Kluft) und die des oberen Intervalls in 47.45 m Tiefe (intakter Anhydrit) lagen. Diese Bohrlochbereiche sind in Abbildung 5-1 oben gezeigt.

Zunächst war vorgesehen, die Injektionstests mit Gas (Stickstoff) vorzunehmen. Beim Einfahren in das Bohrloch im Juni 2004 setzte sich die Sonde noch innerhalb der Steinsalzschicht in einer Tiefe von ca. 20 m fest und konnte vorerst nicht wieder gezogen werden. Um die Sonde zu lösen wurde Wasser in die Bohrung eingebracht. Nach einem Zeitraum von drei Wochen konnte die Sonde weiter bis auf die geplante Tiefe abgelassen werden. Wegen des eingebrachten Wassers und der im unteren Bereich des Anhydrits auftretenden Lauge erschien es sinnvoll, die Injektionstests nicht mit Gas, sondern mit Salzlösung (IP9-Lauge) vorzunehmen.

Im August 2004 wurden die Packer auf etwa 7 MPa gespannt und die Injektionstests durchgeführt. Dabei wurde Lauge mit Fließraten zwischen 0.2 und 0.6 l/h in die Testintervalle bis zu einem Überdruck von 3.2 MPa gepumpt. Anschließend wurden die Testintervalle eingeschlossen und der nachfolgende Druckabfall registriert. Die zwei zu untersuchenden Bereiche wurden nacheinander getestet. Aufgrund des schnellen Druckabfalls im Bereich der Kluft konnte im unteren Testintervall ein zweiter Injektionstest vorgenommen werden.

Wie bereits vorher angenommen worden war, ließ sich die Packersonde nach Durchführung der Tests nicht lösen und musste daher im Bohrloch verbleiben.

Aus den zeitlichen Verläufen der Drücke erfolgt die Ermittlung der Permeabilitäten der Formation im Bereich der Testintervalle unter Einsatz des kommerziellen, für Untersuchungen von Erdöl-Erdgasfeldern entwickelten Auswerteprogramms "Weltest 200" /SCH 97/. Dieses berechnet die analytische Lösung der Diffusionsgleichung (diese Option wurde benutzt) oder erlaubt die ein- oder zweidimensionale Modellierung der

28

Druckverteilung. Iterativ wird dann die Abweichung zwischen gemessenen und berechneten Druckverläufen minimiert.

Die Parameter, durch die der berechnete Druckverlauf bestimmt wird, sind neben den Materialeigenschaften des Fluids die Gebirgspermeabilität, die Porosität, der so genannte Wellbore-Storage-Koeffizient, und der Skinfaktor.

Der Skinfaktor beschreibt eine Zone erhöhter oder verringerter Permeabilität nahe der Bohrlochwand, die zum Beispiel durch den Bohrvorgang erzeugt worden sein kann.

Die berechneten Druckkurven sind ausgesprochen unempfindlich gegenüber Änderungen der Porosität. Daher wurde die Porosität konstant auf 0.2 % gesetzt. Dies ist ein sinnvoller Wert für das ungestörte Gebirge, während die Porosität im Kluftbereich höher sein wird, aber selbst eine Erhöhung der Porosität um den Faktor zehn hat bei der Kurvenanpassung keinen Einfluss auf den optimalen Permeabilitätswert.

Wellbore Storage ist während der Injektionsphase bedeutsam und steuert den Maximaldruck, der während der Injektion erreicht wird. Die Kurvenform, insbesondere während der Einschlussphase, wird durch die Permeabilität bestimmt. Die Permeabilität wurde jeweils unter Annahme eindimensionalen radialen Flusses optimiert.

5.5 Ergebnisse der Permeabilitätstests

Die Untersuchungen zeigten, dass die Permeabilität des intakten Anhydrits erwartungsgemäß deutlich unterschiedlich zu der im Bereich der Kluft ausfiel.

Der Verlauf der Injektionsrate und des Laugendrucks im unteren Testintervall im Kluftbereich während der beiden aufeinanderfolgenden Injektionstests ist zusammen mit der angepassten Druckkurve in Abbildung 5-6 dargestellt. Die beiden Tests können von Weltest in einem Durchgang modelliert werden. Da bei der ersten Injektionsphase die Möglichkeit besteht, dass Testintervall und Gebirge nicht völlig wassergesättigt sind, wurde die zweite Testphase zur Optimierung benutzt. Tatsächlich scheint zunächst ein Gaspolster im Testintervall vorhanden zu sein, denn im Gegensatz zur zweiten Testphase wird bei der ersten der Druck erheblich überschätzt. Auch der zu Anfang der ersten Injektionsphase sehr langsame Druckanstieg spricht für diese Interpretation. Bei der zweiten Injektionsphase ist der Druckanstieg nahezu linear, und der Kurvenverlauf während der Einschlussphase wird sehr gut angepasst (siehe Abbildung 5-7).



Abb. 5-6Vollständiger Testverlauf im Kluftbereich (unteres Testintervall). Rot:Fließrate (negativ wegen Injektion), blau: gemessener Druck, grün:
Kurvenanpassung an den Druckverlauf.



Abb. 5-7Linearer Druckverlauf der zweiten Einschlussphase im Kluftbereich
(unteres Testintervall). Blau: Druckmesswerte, grün: Kurvenanpassung.

Diese Anpassung ließ sich nur unter Berücksichtigung eines negativen Skinfaktors von -3 erzielen, der als Schädigung der Bohrlochwand zu sehen ist. Eine solche Interpretation ist sinnvoll, da Ausbrüche der Bohrlochwand im Kluftbereich (Abbildung 5-1 oben rechts) sichtbar sind. Die durch die Anpassung ermittelte Permeabilität liegt bei 1.6· 10⁻¹⁵ m². Die Kluftpermeabilität wird dabei noch deutlich höher sein, da sich der Fluss vermutlich nicht auf die 30 cm Testintervalllänge verteilt, sondern in der Kluft konzentriert.

Der Verlauf der Injektionsrate und des Laugendrucks im oberen Testintervall im intakten Anhydrit ist zusammen mit der angepassten Druckkurve in Abbildung 5-8 dargestellt.



Abb. 5-8Vollständiger Testverlauf im intakten Anhydrit (oberes Testintervall). Rot:Fließrate (negativ wegen Injektion), blau: gemessener Druck, grün:Kurvenanpassung an den Druckverlauf.

Auch hier lässt der Druckverlauf während der Injektionsphase den Schluss auf ein Gaspolster im Injektionsintervall zu. Wegen der erheblich dichteren Formation im Bereich dieses Testintervalls war hier allerdings keine zweite Injektionsphase möglich. Die Druckabfallkurve während der Einschlussphase ist auch zu kurz, um einen sicheren Schluss auf die Permeabilität zuzulassen. Die in Abbildung 5-8 gezeigte Anpassungskurve entspricht einem Permeabilitätswert von 10⁻¹⁸ m². Dieser ist als obere Grenze anzusehen. Es kann davon ausgegangen werden, dass die tatsächliche

Durchlässigkeit noch deutlich niedriger sein wird. Diese Annahme wird auch dadurch unterstützt, dass bereits in dem vorhergehenden Vorhaben "BARITON" /FLA 00/ Permeabilitäten des Anhydrits von unter 10⁻²¹ m² ermittelt wurden.

6 Interpretation der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Bohrlochinspektion zeigen, dass die Ereignisse im mikroseismischen Cluster I (siehe Abbildung 4-5), dem bei weitem aktivsten Cluster, im Wesentlichen durch die Aktivierung einer vorhandenen Kluft hervorgerufen werden. Die Orientierung der Ereignisse in den anderen Clustern im Anhydrit, die ebenfalls entlang relativ schmalen Bändern ausgerichtet sind (Abbildung 4-4 und 4-5), lässt den Schluss zu, dass diese ebenfalls Klüfte im Anhydrit markieren. Die Neubildung von Mikrorissen in vorher intakten Bereichen scheint im Anhydrit eine sehr untergeordnete Bedeutung zu haben.

Die Bohrlochinspektion und die Permeabilitätstests bestätigen, dass der Anhydrit oberhalb der Klüfte nicht beeinträchtigt ist. Dies wurde zwar nur im Bereich eines Bohrloches nachgewiesen; da es jedoch kein Cluster gibt, das eine Verbindung zum Steinsalz hat, scheint plausibel, dass dies für den gesamten Anhydrit im Überwachungsbereich gilt. Dabei belegt die Tatsache, dass der Kluftbereich durch die Bohrung genau dort angetroffen wurde, wo die Mikroseismik eine Schwächezone prognostizierte, die Genauigkeit des Ortungsverfahrens.

Das Ereigniscluster im Steinsalz (Abbildung 4-4) befindet sich im Bereich der Abbaue und dokumentiert damit die Ausbildung von Auflockerungszonen um die neu entstandenen Hohlräume. Hierbei handelt es sich vermutlich überwiegend um neugebildete Mikrorisse.

7 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Errichtung, Betrieb und Nachbetriebsphase eines Endlagers für radioaktiven Abfall in einer Steinsalzformation erfordern ein umfassendes Verständnis der Spannungsumlagerungen und ihrer Folgen innerhalb des Systems. Während im Steinsalz erhöhte Spannungen durch Kriechen abgebaut werden, neigt der steifere Anhydrit zur Spannungskonzentration, die Rissbildung zur Folge haben kann. Daher können vorhandene Klüfte oder neugebildete Risse zu Fließpfaden für Laugen werden, die Einfluss auf die Langzeitsicherheit des Endlagers nehmen. Der Einfluss großräumiger Spannungsumlagerungen wurde im Salzbergwerk Bernburg untersucht.

Ein mikroseismisches Array aus 16 Dreikomponenten-Beschleunigungsaufnehmern wurde zur Überwachung der abbaubedingten Rissbildung im Anhydrit und im darüberliegenden Steinsalz über einen Zeitraum von vier Jahren eingesetzt. Die Auswertung der registrierten Daten umfasste die Bestimmung von Ereignisort, Häufigkeit, Clusterbildung und Herdmechanismus.

Ein etwa 59 m langes Bohrloch wurde in das Zentrum des aktivsten mikroseismischen Clusters gebohrt. Die Inspektion mit der Bohrlochkamera zeigte zwei laugeführende Klüfte etwa 10 m und 16.3 m unterhalb des Übergangs zwischen Steinsalz und Anhydrit. Die hydraulische Integrität des Anhydrits wurde mittels Permeabilitätstests untersucht. Laugeninjektionsversuche resultierten in einer deutlich erhöhten Permeabilität im Kluftbereich (ca. $2 \cdot 10^{-15}$ m²), während die Permeabilität oberhalb der Klüfte unter 10^{-18} m² liegt.

Die Untersuchungen im Rahmen des Projektes BARIANO zeigten, dass die mikroseismische Überwachung ein zuverlässiges und genaues Werkzeug zur Lokalisierung von Schwächezonen im Anhydrit, die in Folge von abbaubedingten Spannungsumlagerungen aktiviert werden, ist. Die Spannungsumlagerungen hatten insbesondere eine Aktivierung vorhandener Klüfte sowie die Bildung neuer Mikrorisse im Anhydrit, aber nicht eine Veränderung des Übergangsbereiches zwischen Steinsalz und Anhydrit oder die Ausbildung hydraulischer Kurzschlüsse zur Folge.

Im Hinblick auf den Bau eines Endlagers für radioaktive Abfälle im Steinsalz stellt der in Bernburg praktizierte Kammer-Pfeiler-Bau eine erheblich stärkere Belastung dar, als für ein Endlager mit relativ kleinen Hohlräumen zu erwarten ist. Der Versuchsort in Bernburg war absichtlich gewählt worden, um die maximale Auswirkung der Spannungsumlagerungen zu untersuchen. Die hier erzielten Ergebnisse erlauben den Schluss, dass Zonen erhöhter Permeabilität auf den Anhydrit beschränkt bleiben und den Übergangsbereich zwischen Salz und Anhydrit nicht beeinträchtigen. Daher erscheint es durchaus möglich, ein Endlager im Salz ohne Kurzschlüsse zu hydraulisch aktiven Klüften im Anhydrit zu errichten. Um diesen Schluss abzusichern, wären allerdings weitergehende Untersuchungen zum Durchlässigkeitsverhalten sinnvoll.

Die voneinander unabhängigen Untersuchungsmethoden

- mikroseismische Überwachung
- visuelle Bohrlochinspektion
- Permeabilitätstests

haben zu konsistenten und plausiblen Ergebnissen geführt, die sich gegenseitig bestätigen und ergänzen. Das unterstreicht die Sinnfälligkeit des Einsatzes dieser Methoden und ihrer Weiterentwicklung für zukünftige Untersuchungen.

8 Literatur

/AKE 02/AkEND (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. – Empfehlungen des AkEND - Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, Köln, Dezember 2002.

- /CIC 93/ Cichowicz, D. (1993): Automatic S phase picker. Bull. Seismol. Soc. Am., 83, 180-189.
- /FLA 95/ Flach, D. (1995): Geotechnische Untersuchungen im Salinar zur Ermittlung des gebirgsmechanischen Verhaltens von Anhydrit und Salzton. –
 Band IVg: Gläß, F.: Bestimmung der Verbandseigenschaften mittels geophysikalischer und hydraulischer Methoden. GSF-Bericht 26/95.
- /FLA 00/ Flach, D.; Miehe, R.; Wieczorek, K.; Zimmer, U. (2002): Untersuchung der Barrierewirksamkeit des Gesteinsverbandes Steinsalz/Anhydrit/Salzton (BARITON). – Abschlussbericht, GRS-160, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, Januar.
- /GIB 94/ Gibowicz, S. J., A. Kijko (1994): An Introduction to Mining Seismology. Academic Press, San Diego, CA.
- /HUD 89/ Hudson, J. A., R. G. Pearce, R. M. Rogers (1989): Source type plot for inversion of the moment tensor. J. Geophys. Res., 94, 765-774.
- /KAM 02/ Kamlot, P., G. Manthei, H. Bock (2002): Untersuchung des Barriereverhaltens von Anhydrit bei großräumigen Spannungsumlagerungen (BARIAN). - B IfG 23/98, Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig, August.
- /PRE 92/ Press, W.H., B.P. Flannery, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling (1992):
 Numerical Recipes in FORTRAN: The Art of Scientific Computing, Cambridge University Press, Cambridge, Massachussetts.
- /SCH 97/ Schlumberger-Geoquest (1997): Weltest 200 Technical Description. -Logined BV.

- /TRI 00/ Trifu, C-I., D. Angus, V. Shumila (2000): A fast evaluation of the seismic moment tensor for induced seismicity. Bull. Seismol. Soc. Am., 90, 1521-1527.
- /TRI 02/ Trifu, C-I., V. Shumila (2002): Reliability of seismic moment tensor inversions for induced microseismicity at Kidd mine, Ontario. PAGEOPH, 159, 145-164.
- /WIE 98/ Wieczorek, K.; Zimmer, U. (1998): Untersuchungen zur Auflockerungszone um Hohlräume im Salzgebirge. - GRS-A-2651, Gesellschaft für Anlagenund Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, Oktober.
- /WIE 03a/ Wieczorek, K.; Miehe, R.; Flach, D.; Zimmer, U. (2003): Untersuchung des Barriereverhaltens von Anhydrit bei großräumigen Spannungsumlagerungen (BARIAN). – Abschlussbericht, GRS-186, Gesellschaft für Anlagenund Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, Juli.
- /WIE 03b/ Wieczorek, K.(2003): EDZ in Rock Salt: Testing Methods and Interpretation. - European Commission CLUSTER Conference on the Impact of EDZ on the Performance of Radioactive Waste Geological Repositories. 3-5 November 2003, Luxembourg.
- /WIE 05/ Wieczorek, K., Trifu, C.-I., Miehe, R., Rothfuchs, T., Shumila, V. (2005):
 Influence of Mining Activity on the Integrity of Salt Formations as Candidate
 Host Rocks for Nuclear Repositories. WM '05 Conference, February 27 –
 March 3, Tucson, AZ, WM-5217.
- /XUJ 96/ Xu, L., M. I. Jordan (1996): On convergence properties of the EM algorithm for Gaussian mixtures. Neural Computation, 8, 129-151.

Gesellschaft für Anlagenund Reaktorsicherheit (GRS) mbH

Schwertnergasse 1 50667 Köln Telefon +49 221 2068-0 Telefax +49 221 2068-888

Forschungsinstitute **85748 Garching b. München** Telefon +49 89 32004-0 Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200 **10719 Berlin** Telefon +49 30 88589-0 Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4 **38122 Braunschweig** Telefon +49 531 8012-0 Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de