

Schallemissionsmessungen zur Verfolgung von Rissbildung in der Umgebung einer druckbeaufschlagten Bohrung im Salzgestein

Gerd MANTHEI, Jürgen EISENBLÄTTER, Gesellschaft für Materialprüfung und Geophysik, Bad Nauheim
Till POPP, Institut für Gebirgsmechanik, Leipzig

Kurzfassung. In einem vom Bundesamt für Strahlenschutz in Salzgitter geförderten Forschungsprojekt mit dem Titel „Untersuchungen zur Barriereintegrität im Hinblick auf das Ein-Endlager-Konzept“ wurden über einen Zeitraum von zwei Jahren Schallemissionsmessungen im Salzbergwerk Bernburg durchgeführt. Ziel dieser Messung war die Detektion einer möglichen gasdruckinduzierten Rissbildung und deren Lokalisierung im Bereich um ein Bohrloch, das in einem abgeschotteten Bereich stufenweise mit Gas unter hohem Druck beaufschlagt wurde. Die automatische In-situ-Ortung der Schallemissionsereignisse am Versuchsort zeigt, dass während des Beobachtungszeitraumes infolge von Konvergenz (durch Gebirgsdruck bedingte Hohlraumverformung) an den Streckenkonturen Mikrorisse entstehen und dadurch die Teile der Streckenkonturen, die der Aufnehmeranordnung zugewandt sind, abgebildet werden. In der näheren Umgebung der Injektionsbohrung befinden sich Ortungsschwerpunkte, aus denen immer wieder Ereignisse geortet wurden, die aber nicht mit der Druckbeaufschlagung korrelieren. In der höchsten Druckstufe bei 154 bar wurde zwar ein deutlicher Druckabfall festgestellt. Dieser Druckabfall erfolgt aber offensichtlich nicht schnell genug, um deutliche Schallemission wie bei einem schnellen Frac-Versuch hervorzurufen. Er rührt also nicht von makroskopischer Rissbildung her, sondern wahrscheinlich von „aseismischen“ Permeationsvorgängen im mikroskopischen Maßstab.

1 Einleitung

Bei der Entsorgung von überwachungsbedürftigen (chemisch-toxischen) Abfällen sowie bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle in einer Salzformation ist der vollständige und dauerhafte Abschluss der Schadstoffe von der Biosphäre das erklärte Ziel. Das bedeutet, dass das Wirtsgestein Salz über **einen sehr langen Zeitraum** mechanisch stabil bleiben und seine Integrität erhalten muss - sowohl unter den Belastungen, die aus der Erstellung und dem Betrieb des Deponiebergwerkes resultieren, als auch unter den Belastungen, welche die vom Abfallgut ausgehenden Prozesse in der Nachbetriebsphase auslösen [1]. Unter Integrität wird hier verstanden, dass die Belastungen zu keiner Zeit Wegsamkeiten schaffen, welche die geologischen Barrieren in Gänze undicht und für Schadstoffe durchlässig werden lassen.

Bei der Auffahrung eines Endlagers wird durch die Hohlräume der vorliegende Gleichgewichtszustand gestört und es bildet sich im Nahbereich des Gebirges eine Auflockerungszone (EDZ). In der Nachbetriebsphase kommt es über die Zersetzung organischer Substanzen und chemische Reaktionen zwischen Feuchtigkeit und metallischen Komponenten sowie im Falle radioaktiver Abfallstoffe zusätzlich infolge von Radiolyse zur Gas-

entwicklung. Diese kann im zeitlichen Verlauf zu einem Gasdruckanstieg bis zum Erreichen oder sogar zum Überschreiten des Gebirgsdruckes, d.h. genauer der minimalen Hauptspannung im Gebirge führen, wobei der *gasdruckbedingte Verlauf der Mikrorissbildung in Salzgestein* nicht bekannt ist.

Vor diesem Hintergrund sollen in einem untertägigen Feldexperiment in der Steinsalzgrube Bernburg mittels Gasinjektion in ein Bohrloch in einer untertägigen Salzformation die grundlegenden Prozesse hinsichtlich der relevanten Einflussparameter für einen Gastransport im Salz bei erhöhten Porendrücken experimentell charakterisiert und bezüglich der Veränderung der entsprechenden Transporteigenschaften quantifiziert werden.

Ausgehend davon, dass ein gasdruckinduzierter Riss mit entsprechender Schallemissionsaktivität (SE-Aktivität) verbunden sein sollte, ist zum Nachweis von Rissbildung im druckbeanspruchten Gebirge ein SE-Überwachungsmesssystem installiert worden, das eine kontinuierliche Erfassung der SE-Aktivität mit Mikrorissortung ermöglicht.

2 Zum Versuchsort

Der Versuchsort liegt im nördlichen Teil des Grubenfeldes des Salzbergwerkes Bernburg-Gröna in einer Teufe von ca. 500 m im Leinesteinsalz. Dort ist ein Untertageversuchsort mit einer Bohrlochanordnung von neun Bohrungen, jede mit einer Länge von ca. 25 m, eingerichtet worden, wobei in dem zentralen, durch einen speziellen Packer abgedichteten Bohrloch Druckaufbautests bis zu einem maximalen Gasdruck von 20 MPa durchgeführt werden können. Das Bohrlocharray besteht aus einem zentralen, 25 m langen, horizontal verlaufenden Injektionsbohrloch MB2 (Durchmesser 62 mm), vier parallel dazu verlaufenden Kontrollbohrungen (Durchmesser 42 mm) zum Nachweis eines möglichen Gasdurchtritts und vier weiteren Messbohrungen (Durchmesser 101 mm) zur Aufnahme der SE-Bohrlochsonden.

2.1 Installation der SE-Aufnehmer und Voruntersuchungen

Die Installation der SE-Aufnehmer wurde Ende 2004 im Zeitraum vom 13.12.2004 bis 16.12.2004 vorgenommen. Der Verlauf der vier Messbohrungen (rote Linien), die Positionen der acht Bohrlochsonden (gelbe Punkte) und der Verlauf der zentralen Injektionsbohrung MB2 (schwarze Linie) sind in **Abbildung 1** zusammen mit dem Streckenverlauf am Versuchsort dargestellt. In den leicht nach oben (AE6 und AE7) und unten geneigten (AE5 und AE8) Messbohrungen sind die acht Sonden im Abstand von 5 bis 10 m um die zentrale Injektionsbohrung untergebracht. Jeweils zwei SE-Sonden befinden sich im gegenseitigen Abstand von ca. 10 m in einem Bohrloch. Die Aufnehmer wurden so angeordnet, dass die Umgebung des druckbeaufschlagten Intervalls der Injektionsbohrung ab 10 m Bohrlochteufe überwacht werden kann.

Nach Installation von sechs Bohrlochsonden in den drei Messbohrungen AE6 bis AE8 wurden in der vierten - noch freien - Bohrung AE5 Durchschallungsmessungen und vier Frac-Versuche durchgeführt. Die Installation der beiden verbleibenden Bohrlochsonden fand nach der Durchschallung und den Frac-Versuchen statt. Die Durchschallungsmessungen ergaben für das Salzgebirge Geschwindigkeiten von 4,52 km/s für die P-Welle und 2,57 km/s für die S-Welle. Weiterhin wurden zur Bestimmung der In-situ-Spannungen in dem 101-mm-Bohrloch AE5 in 2 m, 5 m, 8 m und 12 m Bohrlochteufe jeweils ein Hydrofractest mit Frac- und ein Refrac durchgeführt. Dazu wurde die im Rahmen eines FuE-Vorhabens gemeinsam von IfG Leipzig und GMuG (Bad Nauheim) entwickelte Bohrlochsonde (HYFRASEIS) eingesetzt. Mit dieser Sonde ist es möglich, aus einer einzigen Bohrung heraus den Betrag und die Lage der minimalen Hauptspannung zu ermitteln. Das HYFRASEIS-Messsystem besteht im Wesentlichen aus zwei SE-

Aufnehmerkränzen mit jeweils vier SE-Aufnehmern, der Injektionseinheit zur Druckerzeugung im abgedichteten Bohrlochabschnitt und den beiden Packern. Eine detaillierte Beschreibung des Verfahrens wird in [2] gegeben. Die Ergebnisse der Frac-Versuche in 5 bis 12 m Bohrlochteufe weisen darauf hin, dass schon in 5 m Bohrlochteufe ein isotroper Spannungszustand herrscht.

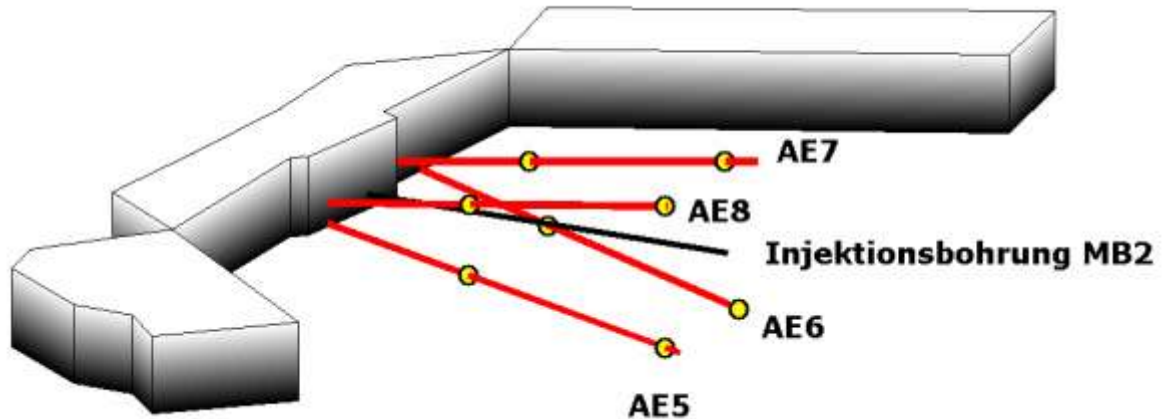


Abbildung 1: Lage der vier SE-Bohrungen AE5 bis AE8 (rote Linien) mit den SE-Bohrlochsonden (gelbe Punkte), der zentralen Injektionsbohrung MB2 (schwarze Linie) und den Konturen der Strecken am Messort in einer perspektivischen Darstellung bei Blick aus einer leicht erhöhten Position.

2.2 Zur eingesetzten SE-Messtechnik und zum automatischen Ortungsverfahren

Die zur Dauerüberwachung unter Tage verwendeten SE-Aufnehmer bestehen im Wesentlichen aus dem piezoelektrischen Wandlerelement, das in ein Gehäuse aus Metall eingebaut wird. Das piezoelektrische Wandlerelement besteht aus PZT und hat einen Durchmesser von etwa 35 mm und eine Höhe von etwa 15 mm. Die Aufnehmer sind auf Schlitten montiert, die mit einem Gestänge an die vorgesehene Position im Bohrloch gebracht werden (vgl. **Abbildung 2**). Über einen Pneumatikzylinder wird der Aufnehmer beim Einbau in das Bohrloch niedergehalten. Ist die gewünschte Position erreicht, so wird die Pneumatik entlüftet und der Aufnehmer durch eine Feder an die Bohrlochwand gepresst.

Das elektrische Signal wird über Kabel - teilweise über Entfernungen von 80 bis 100 m - zur zentralen Messstation geleitet, die einen Vielkanal-Transientenrekorder enthält, der die Signale mit einer Digitalisierungsrate bis 1,25 MHz, einer Auflösung von 12 bit und einer Speichertiefe bis 16 kSamples pro Kanal (Aufzeichnungsdauer ca. 13 ms) abtastet und an einen Steuerrechner weitergibt.

Die Ereignisse werden in situ direkt nach ihrer Entstehung geortet. Haben bei einem Ereignis mindestens 3 oder 4 Kanäle eine einstellbare Schwelle überschritten, so wird dieses Ereignis zur Ortung herangezogen. Hierzu werden die (softwaremäßig) erkannten Einsatzpunkte sowohl der P- als auch der S-Welle benutzt. Nur bei Verwendung beider Einsätze ist eine Ortung auch bei außerhalb der Sondenordnung gelegenen Quellen hinreichend genau. Bei allen georteten Ereignissen werden die Ortskoordinaten und weitere Kenndaten vor Ort ermittelt; die vollen Wellenzüge werden im Allgemeinen nur bei größeren Ereignissen abgespeichert. Die wichtigsten Daten, insbesondere die Merkmale aller in situ georteter Ereignisse, werden vom Labor aus per Modem abgefragt; Einstellungen zur Steuerung der Hard- und Software werden ebenfalls auf diese Weise vorgenommen.

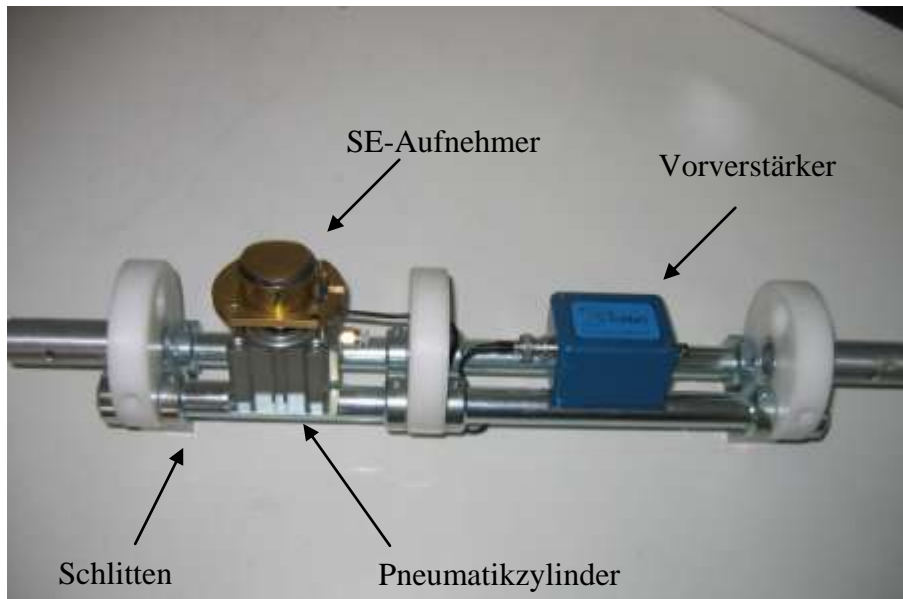


Abbildung 2: Foto der eingesetzten Bohrlochsonde (Typ MA Blw-90, Fa. GMuG) für die SE-Messungen im Gebirge.

Im Einzelnen: Zuerst wird das Ereignis nur mit P-Welleneinsatzzeiten geortet. Zur Ortung werden nur solche Ereignisse herangezogen, bei denen genügend viele Kanäle eine gewisse Signalgüte aufweisen. Die Güte des Signals entspricht dem Signal-zu-Untergrund-Verhältnis. Das ist das Verhältnis des Signalmaximums zum Maximum innerhalb eines Zeitintervalls vor dem Einsatz des Signals. Ist dieses Kriterium nicht erfüllt, so wird das Ereignis sofort verworfen. Ist es jedoch erfüllt, so wird ein Ereignis mit ausreichend vielen P-Welleneinsatzzeiten geortet. Die Mindestanzahl der P-Welleneinsätze hängt von der Anzahl der Messkanäle ab. Das Ortungsergebnis wird als gültig bewertet, wenn der Restfehler, der aus den Laufzeitresiduen berechnet wird, kleiner ist als eine vorgegebene Fehlergrenze, die an die Größe des zu überwachenden Untersuchungsbereichs angepasst wird. Ist der Restfehler größer, so wird die Ortung mit zwei Varianten wiederholt. Bei der ersten Variante wird der erstansprechende Kanal weggelassen, bei der zweiten Variante der Kanal mit dem größten Laufzeitresiduum. Die Variante mit dem kleineren Restfehler wird übernommen. Diese Prozedur wird so lange durchgeführt, bis der Ortungsfehler unterhalb der Fehlergrenze liegt (hier 80 cm) oder zu wenige P-Welleneinsätze übrig bleiben. Im letzten Fall wird das Ereignis verworfen.

Nach einer gültigen Vorortung mit den P-Welleneinsätzen alleine werden die S-Welleneinsatzzeiten automatisch bestimmt. Zur Suche nach den Einsätzen der S-Welle wird eine Triggerschwelle verwendet, die zwischen der Höhe des Untergrunds vor dem rechnerisch bestimmten S-Welleneinsatz und dem absoluten Maximum der Spur liegt. Diese Schwelle ist immer wesentlich höher als die Schwelle beim Anreißen der P-Welleneinsätze. Die bei dieser Triggerschwelle gefundenen S-Welleneinsatzzeiten werden zusammen mit den zur Vorortung herangezogenen P-Welleneinsatzzeiten benutzt, um eine Ortung durchzuführen; dabei werden wieder Einsätze mit großem Laufzeitresiduum verworfen, um die oben genannte Fehlergrenze nicht zu überschreiten.

3 Zeitlicher Verlauf und örtliche Verteilung der SE-Ereignisse

Nach Installation der beiden verbliebenen Bohrlochsonden in Bohrung AE5 wurden alle Aufnehmer angeschlossen und am 16.12.2004 wurde mit der Dauerüberwachung der Injektionsbohrung begonnen. Anhand von Testmessungen mit Hammerschlag am Stoß der Zu-

fahrtsstrecke wurden die Funktion der Bohrlochsonden und das automatische Ortungsverfahren überprüft. Nach Abschluss der Installation der Packersonden in den Injektions- und Kontrollbohrungen, der Gasdruckarmaturen und der Druckerfassungseinheit wurden im April 2005 mit den ersten Drucktests begonnen. Die Packersonde wurde zunächst in ca. 10 m Bohrlochteufe positioniert. Dort lag nach dem Befund der Bohrkerne ein vergleichsweise homogener Bereich vor. Nach einer Haltezeit von ca. 2 Wochen (Setzungsphase des Packers) wurde bei den mehrfach wiederholten Drucktests jeweils ein Druckabfall beobachtet, der zumindest bei den ersten Tests auf eine Packerumläufigkeit durch das Salzgestein zurückgeführt werden konnte. Da auch in den nachfolgenden Tests ungewöhnlich hohe Abströmraten beobachtet wurden, die offensichtlich mit schichtartigen Anhydriteinschaltungen korreliert sind, wurde der Packer in den hinteren homogenen Bereich des Bohrlochs in 20 m Teufe versetzt. Dadurch ergab sich als Messbeginn der Gasinjektionstests der 13.9.2005. Kontinuierliche SE-Messungen begannen schon 9 Monate vor diesem Termin.

In dem Forschungsvorhaben wurden sog. Pulstests durchgeführt. Bei einem Pulstest wird über einen kurzen Zeitraum (weniger als eine Minute) Gas mit einer sehr hohen Rate in das Injektionsintervall injiziert. Nach Erreichen eines bestimmten Druckniveaus wird die Injektion gestoppt und das Injektionsintervall wieder verschlossen. Gemessen wird bei einem Pulstest die Änderung des Druckes mit der Zeit, die zur Permeabilitätsbestimmung mit geeigneten Strömungsmodellen ausgenutzt wird. Der Messzeitraum umfasste, wie aus **Abbildung 3** ersichtlich, rund 600 Tage, mit insgesamt 10 Pulstests bis 140 bar und Haltezeiten jeweils bis zu 50 Tagen. Daran anschließend wurde bei einer sehr niedrigen Rate zwischen 50 und 1000 ml/min Gas kontinuierlich bis ca. 154 bar injiziert.

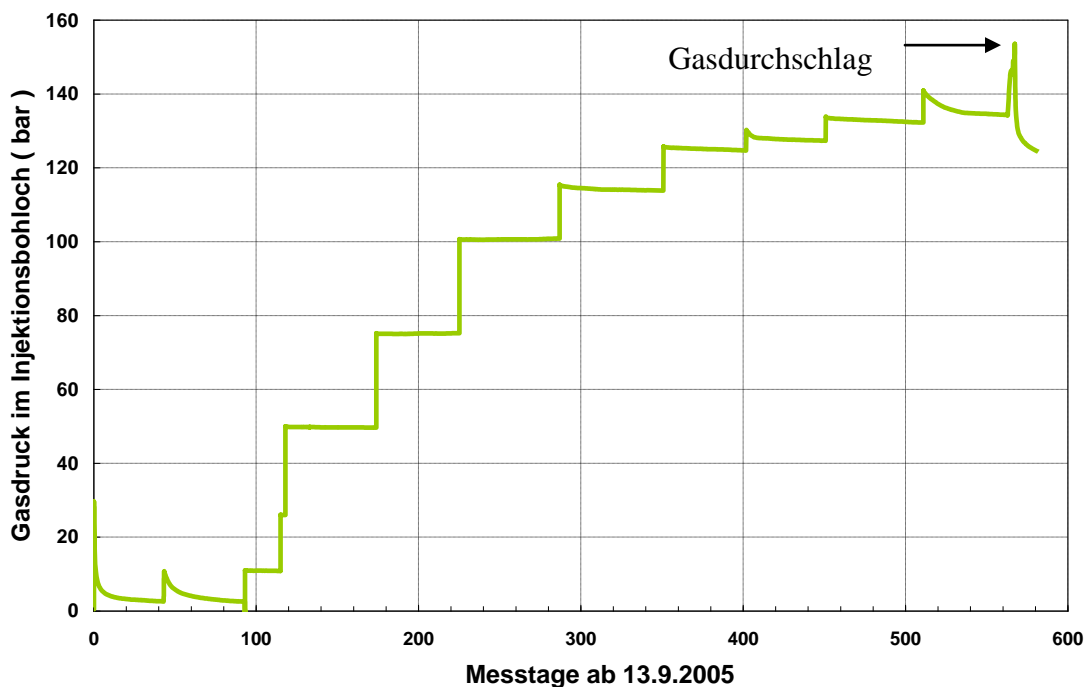


Abbildung 3: Verlauf des Gasdrucks in Injektionsbohrung MB2 ab dem 13.9.2005.

Die Druckverlauf zeigt, dass bis 100 bar praktisch kein signifikanter Druckabfall auftritt und dieser danach bei höheren Drücken nur gering ist. Erst ab 115 bis 135 bar ist jeweils eine stetige Druckabnahme zu erkennen. Die Druckabfallraten liegen zwischen 15 mbar/Tag und 20 mbar/Tag. Der deutliche Druckabfall bei ca. 154 bar (Messtag 560) deutet auf ein erhöhtes Abströmen des Gases ins Gebirge hin. Es kann davon ausgegangen werden, dass es zu einem Gasdurchschlag gekommen ist, bei dem die Permeabilität des Gesteins um einige Größenordnungen zugenommen hat.

Im Rahmen der SE-Messungen wurden seit Versuchsbeginn am 13.9.2005 bis zum Versuchsende am 19.4.2007 ca. 70.100 Ereignisse automatisch mit mindestens 6 Einsatzzeiten geortet. Die Ereignisse, die vor dem Versuchsbeginn geortet wurden, sind ausgeblendet. Im Folgenden werden nur die stärksten Ereignisse berücksichtigt, bei denen mindestens 6 P-Einsätze und 2 S-Einsätze zur Ortung benutzt wurden. Dieses Kriterium erfüllen ca. 21.000 Ereignisse (entspricht etwa 30 % aller georteten Ereignisse).

In **Abbildung 4** sind diese Ereignisse als blaue Punkte in drei Projektionen dargestellt, oben links in Aufsicht (x-Koordinate in östlicher, y-Koordinate in nördlicher Richtung), oben rechts und unten links in zwei Seitenansichten. Das Koordinatennetz ist im 20-m-Raster angegeben. (Hinweis: alle Zahlenangaben in dieser Darstellung in Metern). Die Tiefenkoordinate z bezieht sich auf die Teufe am Versuchsort. Die Lage der acht SE-Sonden ist mit roten Kreisen gekennzeichnet. Zur besseren Orientierung ist in der Aufsicht (links oben) der Verlauf der Strecken am Versuchsort eingezeichnet.

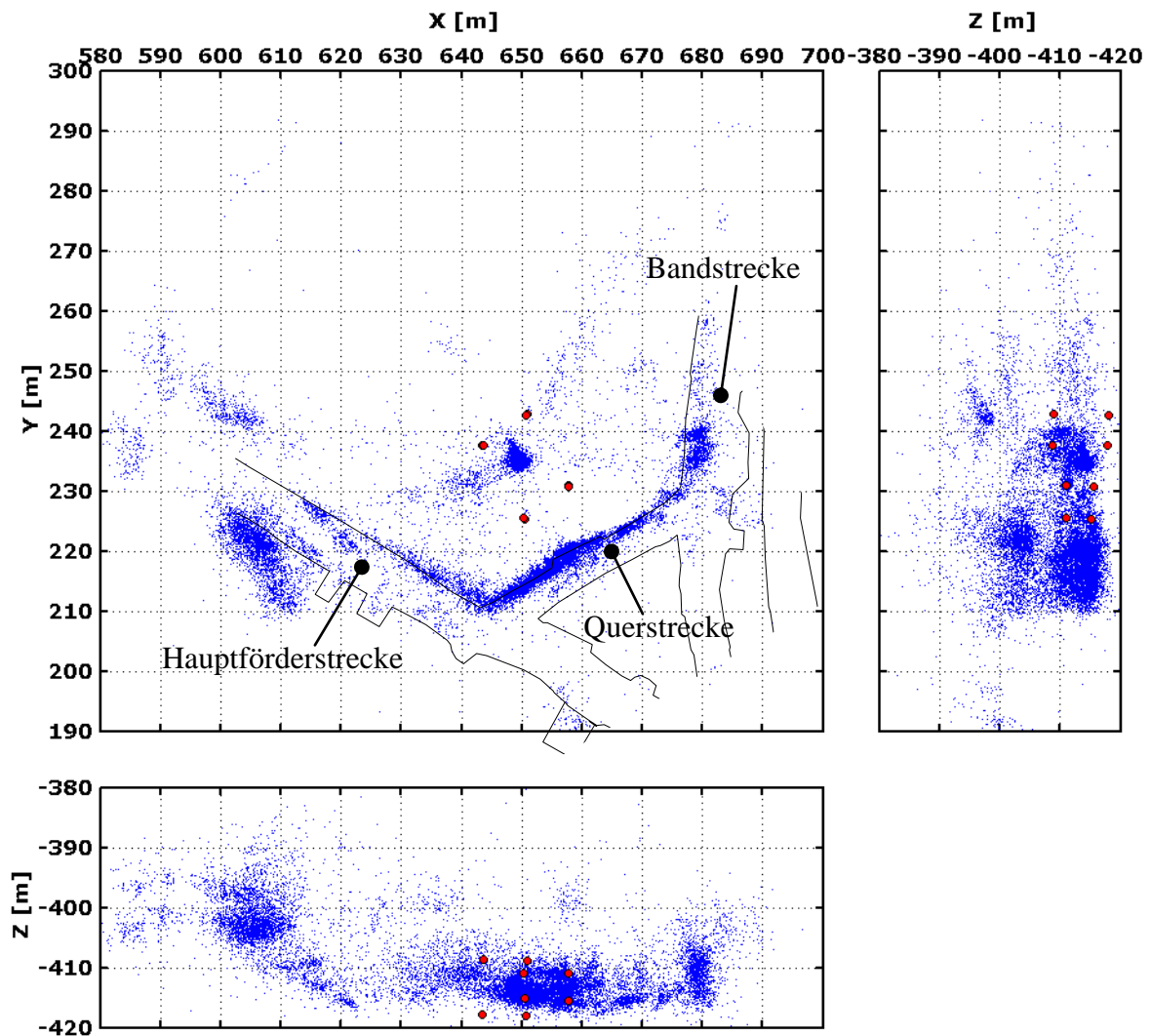


Abbildung 4: Vom 13.9.2005 bis 19.4.2007 geortete Ereignisse (blaue Punkte) in Projektionen auf die drei Koordinatenebenen. In der Aufsicht ist zusätzlich der Streckenverlauf am Versuchsort eingezeichnet.

Aus dieser Abbildung ist zu entnehmen, dass viele Ereignisse aus einem engen Saum um solche Streckenstöße herum stammen, die zur Sondenanordnung hin ausgerichtet sind. Besonders viele Ereignisse kommen aus dem Stoß der Querstrecke, an dem die Bohrungen ansetzen. Aber auch die weiter entfernten Strecken, die Hauptförderstrecke (links) und die Bandstrecke (rechts), sind deutlich von Ereignissen gesäumt. Auch eine weiter östlich

liegende Strecke, im Niveau 15 m höher als die Querstrecke, wird durch viele, jedoch stark gestreute Ereignisse angedeutet.

Neben diesen Ereignissen aus der Auflockerungszone im oberflächennahen Saumbereich fällt ein Ortungsschwerpunkt im Zentrum der Aufnehmeranordnung auf. Die Ereignisse aus diesem Ortungsschwerpunkt (etwa 4.400 Ereignisse) sind in einer vergrößerten Darstellung in **Abbildung 5** nach Drehung des Koordinatensystems um einen Winkel von 30° um eine vertikale Achse nach Westen mit Drehpunkt am Bohrlochansatz der zentralen Injektionsbohrung MB2 (die Querstrecke liegt nach Drehung etwa parallel zur x-Koordinatenachse) zu sehen.

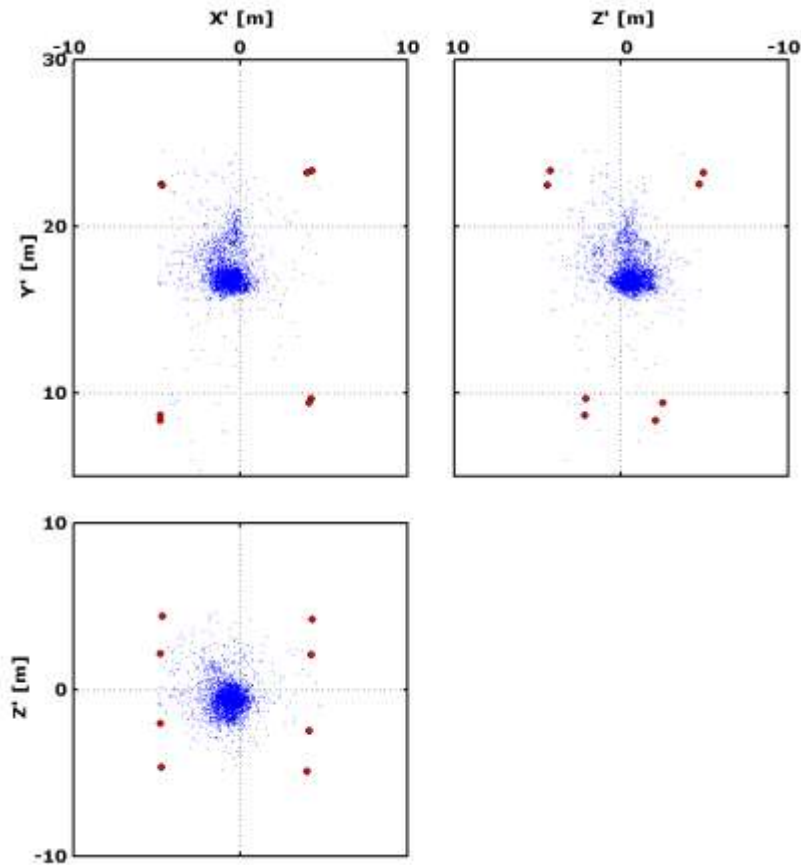


Abbildung 5: Ereignisse (etwa 4.400) innerhalb der Aufnehmeranordnung im gedrehten Koordinatensystem in Projektionen auf die drei Koordinatenebenen. Die Lage aller acht Sonden ist mit roten Kreisen gekennzeichnet

Die meisten Ereignisse innerhalb der Aufnehmeranordnung liegen in einem fast kugelförmigen Häufungspunkt um die zentrale Injektionsbohrung in ca. 15,5 m Bohrloch-
teufe (Y'-Koordinate). Der Häufungspunkt hat einen Radius von ca. 1 m. Ausgehend davon erstreckt sich ein kleineres Nebenmaximum über eine Länge von etwa 5,5 m in Richtung Bohrloch-
tiefstes. Zu bemerken ist, dass alle Ereignisse außerhalb des mit Gasdruck beaufschlagten Bohrlochabschnitts liegen und daher mit der Druckbeaufschlagung direkt nichts zu tun haben. Die Vermutung, dass diese Ereignisse durch den bergmännischen Betrieb hervorgerufen werden, kann ausgeschlossen werden, da auch die Ereignisse, die außerhalb der Fröhschicht (6:00 Uhr bis 14:00 Uhr) geortet wurden, in der die stärkste bergmännische Aktivität stattfindet, in dem gleichen Ortungsschwerpunkt liegen. In einer vorläufigen Bewertung werden diese Ereignisse auf eine eingelagerte Anhydritschicht zurückgeführt, die im Übergangsbereich zum Bohrloch zu einer Spannungslokalisierung mit Mikrorissbildung führt.

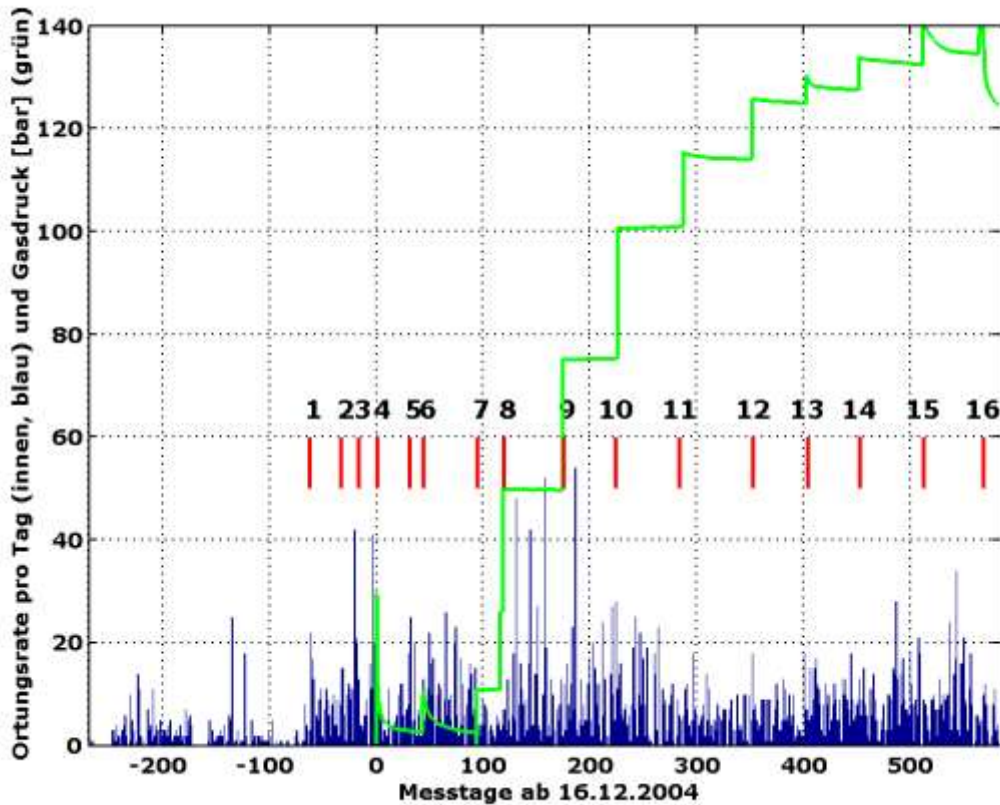
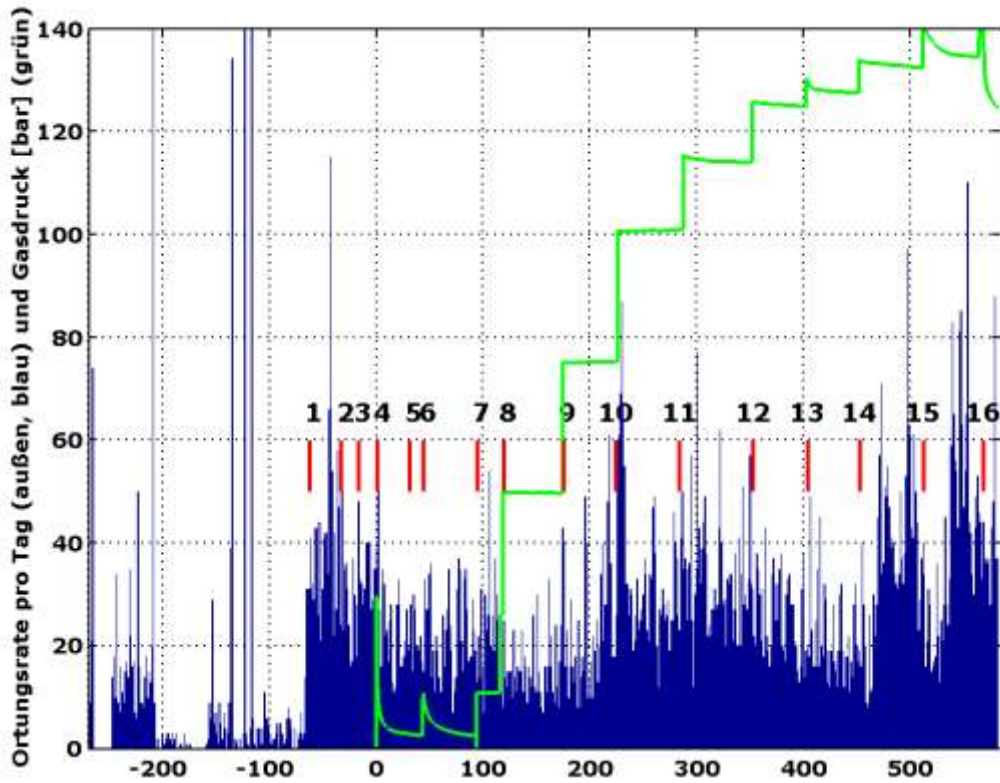


Abbildung 6: Rate der georteten oberflächennahen Ereignisse (Teilbild oben) und der Ereignisse aus der Umgebung der Injektionsbohrung (Teilbild unten) im zeitlichen Verlauf. Hinweis: Der Messbeginn der Untertagemessungen ist terminiert auf den 13.9.2005, an dem mit den Drucktests begonnen wurde.

Abbildung 6 zeigt den zeitlichen Verlauf der Rate oberflächennaher Ereignisse (oberes Teilbild) und von Ereignissen aus der Umgebung der Injektionsbohrung (unteres Teilbild)

sowie des Gasdruckes im Injektionsbohrloch (grüne Linie). Zusätzlich markieren die roten Striche Tage, an denen entweder Arbeiten am Versuchsort durchgeführt wurden oder der Bohrlochdruck erhöht wurde. Messtag 0 entspricht dem 13.9.2005.

Die beiden Teilbilder zeigen, dass schon vor Versuchsbeginn im ersten Halbjahr 2005 vereinzelt sehr hohe Ortungsraten auftreten, die zum Teil auf Arbeitsgeräusche am Stoß und bei der Instrumentierung der Injektionsbohrung und den umgebenden Beobachtungsbohrungen zurückzuführen sind. Abgesehen von diesen Peaks ist die mittlere Ortungsrate relativ gering und liegt bei etwa 6 Ereignissen pro Tag im oberflächennahen Bereich (oberes Teilbild) und in der Umgebung der Injektionsbohrung bei etwa 3 Ereignissen pro Tag (unteres Teilbild). Eine leichte Abnahme der Ortungsraten bis Anfang Juli 2005 (Messtag -70) ist zu erkennen. Der sprunghafte Anstieg der Ortungsrate am 7.7.2005 (Markierung 1) ist auf Veränderungen der Einstellungen am Messsystem zurückzuführen. Die Triggerschwelle wurde dabei um die Hälfte verringert und das Entscheidungskriterium für eine Ortung der Ereignisse von mindestens drei Kanälen auf nur noch einen Kanal geändert. Diese Maßnahmen erhöhten die Empfindlichkeit des Messsystems deutlich, und die Ortungsraten stiegen auf 22 bzw. 7 Ereignisse pro Tag im oberflächennahen Bereich und in der Umgebung der Injektionsbohrung an.

Die Zunahme der Ortungsrate Anfang August 2005 (Messtag -40), Anfang Juli 2006 (Messtag 300) und im Mai 2007 (Messtag 500) in den oberflächennahen Auflockungszonen (Teilbild oben in Abbildung 6) in den Frühjahrs- bzw. Sommermonaten liegt an der jahreszeitlich bedingten hohen Luftfeuchtigkeit im Grubengebäude, die zu einer Erhöhung der Rissbildungsrate an den Stößen der Strecken führt. In der Umgebung der Injektionsbohrung (Teilbild unten in Abbildung 6) sind keine deutlichen jahreszeitlichen Schwankungen der Ortungsrate zu erkennen, weil die Feuchtigkeit nicht in oberflächenferne Bereiche eindringt.

Für die Bewertung des Gasfracverhaltens ist wichtig festzuhalten, dass es vor dem Druckabfall keine signifikante Zunahme der Druckabfallrate sowie keine erhöhte SE-Aktivität vor und während des Prozesses gab und somit kein „Pre-Cursor“-Ereignis auftrat. Weiterhin ist wichtig, dass nach dem deutlichen Druckabfall am Versuchsende auf ca. 110 bar die Druckabfallrate sich bei ca. 50 mbar/Tag wieder stabilisierte, d.h. dass die vorherige Dichtheit teilweise wieder erreicht wurde.

4 Zusammenfassende Diskussion

Im Rahmen eines F&E-Vorhabens wurden Schallemissionsmessungen im Frequenzgebiet von ca. 1 kHz bis 100 kHz eingesetzt, um Rissbildung und die damit verbundene Auflockerung des Gesteins festzustellen. Die Messungen wurden im Steinsalzbergwerk Bernburg zur Dauerüberwachung einer mit Gasdruck beaufschlagten Injektionsbohrung angewendet.

Konzentriert man sich auf die Ortungsraten innerhalb des Bohrlocharrays, dann liegen die Ortungsraten meistens unter 10 Ereignissen pro Tag. Berücksichtigt man, dass der Gasdurchschlag spontan und mit hoher Dynamik erfolgt, so ist zunächst überraschend, dass selbst im Moment der Perkolation keine besondere SE-Aktivität zu beobachten ist. Somit unterscheidet sich der Prozess sehr deutlich von einer üblichen Rissbildung, wie er bei einem pneumatischen Gasfrac zu erwarten wäre. Es bilden sich vielmehr „Kurzschlüsse“ zwischen schon vorhandenen Wegsamkeiten entlang von Korngrenzen, die bewirken, dass größere Volumina für das einströmende Gas zur Verfügung stehen. Dieser Prozess ist mit geringer Neubildung von Rissoberfläche verbunden, was auch durch die Hysterese einer Wiederherstellung der Gasdichtheit infolge des gleichzeitig stattfindenden Druckabfalls nachgewiesen wird (Selbstverheilungsvermögen von Steinsalz). Daher wird nur wenig Energie in Form von seismischen Ereignissen freigesetzt. Der Druckabfall rührt also nicht

von makroskopischer Rissbildung her, sondern wahrscheinlich von „aseismischen“ Permeationsvorgänge im mikroskopischen Maßstab.

Aufgrund der bisher bei GMuG vorliegenden Erfahrung beispielsweise zu dynamischen Bruchprozessen im Salzgebirge kann davon ausgegangen werden, dass die dynamische Empfindlichkeit des mikroseismischen Messsystems ausreichend ist, um auch kleine Rissbildung registrieren zu können.

5 Literatur

- [1] Schulze, O., 2002. Auswirkung der Gasentwicklung auf die Integrität geringdurchlässiger Barrieregesteine. - BGR-Fachbericht im Auftrag des BMU, 142 S.
- [2] Manthei, G., Eisenblätter J. & Kamlot, P., 2003. Stress measurements in salt mines using a special hydraulic fracturing borehole tool. Geotechnical measurements and modelling, O. Natau, E. Fecker and E. Pimentel, (eds.), A.A. Balkema Publishers, Lisse, Abingdon, Exton (Pa), Tokyo, 355-360.

Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) in Salzgitter für die Förderung der hier beschriebenen Arbeiten. Die Projektleitung des Vorhabens mit der Bezeichnung „Untersuchungen zur Barriereintegrität im Hinblick auf das Ein-Endlager-Konzept“, BfS Förderkennzeichen: SR 2470, liegt beim Institut für Gebirgsmechanik, Leipzig. Die Schallemissionsmessungen wurden im Rahmen eines Unterauftrags an GMuG, Bad Nauheim, durchgeführt. Die beschriebenen Messungen wurden im Salzbergwerk Bernburg der „european salt company“ (esco) vorgenommen. Dieser Stelle, insbesondere der Betriebsleitung des Salzbergwerkes Bernburg und dem Grubengeologen Herrn J. Wendzel, sei für die sorgfältige Betreuung der Versuche gedankt. Dabei haben wir auch gern die Möglichkeit genutzt, unsere Ergebnisse mit Experten verschiedener Institutionen zu diskutieren. Namentlich genannt seien hier die Herren M. Beushausen, G. Stier-Friedland (beide BfS), G. Pusch, V. Meyn (beide TU Clausthal) und O. Schulze (BGR).