

# Akustische Emission und Ultraschall-Rückstreuung zur Charakterisierung von Rissgeflechten im Salzgestein

Horst KÜHNICKE, Eberhard SCHULZE,  
Fraunhofer-Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren, Institutsteil Dresden

**Kurzfassung.** Für langlebige giftige oder radioaktive Abfälle ist die untertägige Lagerung in geologisch stabilen und kaum durchlässigen Salzsteinformationen eine Möglichkeit des sicheren Einschlusses der Gefahrstoffe. In diesem Zusammenhang spielt die Charakterisierung der sogenannten Auflockerungszone im Wirtsgestein Steinsalz eine wichtige Rolle. Die Spannungsumlagerungen an den Rändern von aufgefahrenen Hohlräumen verursachen ausgedehnte Mikrorissgeflechte, welche die Durchlässigkeit für flüssige und feste Schadstoffe erhöhen. Die zerstörungsfreie Charakterisierung der Auflockerungszone besitzt gegenüber dem bisher gebräuchlichen Injektionsverfahren zur Permeabilitätsbestimmung den Vorteil, dass sie ein detailliertes räumliches Abbild des Auflockerungsgrades ohne zusätzliche Schädigung des Gesteins ermöglicht.

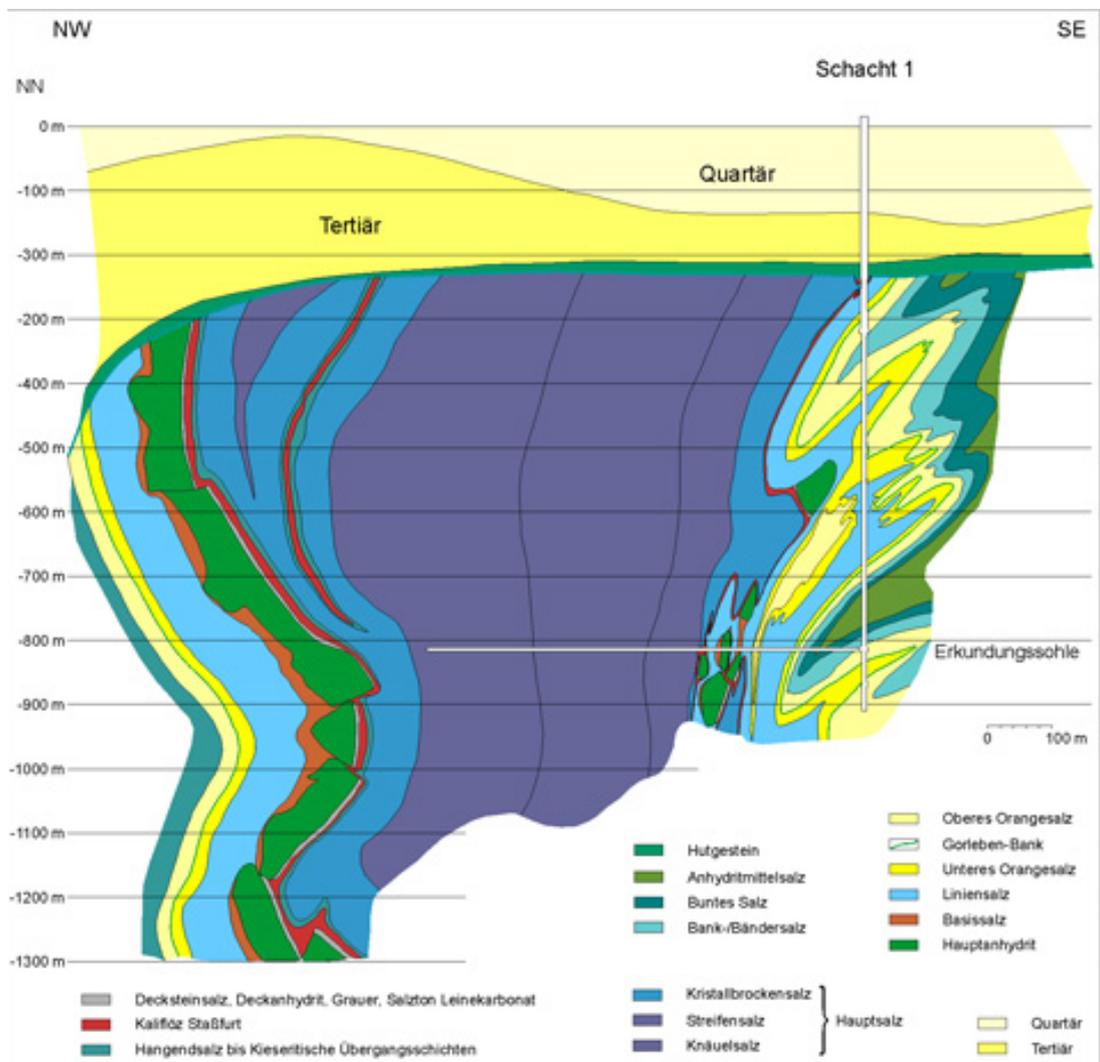
Eingesetzt werden die Verfahren Mikroseismik (Akustische Emission) und Geosonar (Ultraschall-Rückstreuung). Mit der Akustischen Emission können die zeitlichen und räumlichen Veränderungen in den Auflockerungszonen mit geringem Instrumentierungsaufwand beobachten werden. Das Ultraschallverfahren arbeitet mit einer Mittenfrequenz von 200 kHz misst die Rückstreuung der Mikrorissgeflechte und ist für das Bestimmen des momentanen Auflockerungszustands geeignet.

Die Validierung der entwickelten Prüfverfahren in einer 35 Jahre alten Maschinenstrecke mit einem runden (Durchmesser ca. 3 m) und nach zwei neuen Auffahrungen mit rechteckigem (3 m x 9 m) Querschnitt an den Ergebnissen direkter Permeabilitätsmessverfahren verliefen positiv. Die Mächtigkeit der Auflockerungen beträgt ca. 0,5 m. Die Rissflächen der Einzelrisse sind parallel zu der Hohlraumoberfläche orientiert. Als Belastungstyp tritt überwiegend Normalspannungsbruch (Mode I) auf. Für die Permeabilitäten wurden am Stoß Werte von  $10^{-16}$  m<sup>2</sup> und im ungeschädigten Gebirge von  $10^{-23}$  m<sup>2</sup> gemessen.

Die erzielten Fortschritte beruhen in erster Linie auf der Anwendung signalformbasierter Techniken, wie z.B. konditionierte Sendesignale oder Momententensoranalyse. Das entwickelte Messsystem ist vor Staub und Wasser geschützt (Schutzgrad IP67). Sowohl das Messsysteme als auch die Bewertungsalgorithmen können auch bei anderen Werkstoffen mit groben Strukturen wie Beton oder faserverstärkten Polymeren eingesetzt werden.

## 0 Einführung

Die Entsorgung hochradioaktiver wärmeentwickelnder Abfälle stellt hohe technische Ansprüche an den sicheren Einschluss des langlebigen radioaktiven Inventars. Bleibt es in Deutschland bei dem vorgesehenen Ausstieg aus der Kernenergie, fallen bis zum Jahre 2040 ca. 24.000 m<sup>3</sup> hochradioaktive Abfälle an [1]. Ein Endlager soll nach den heutigen Vorstellungen spätestens im Jahre 2035 einsatzbereit sein. Anderenfalls besteht die Gefahr, dass die jetzigen Zwischenlager zu Endlagern werden. Ein Szenario, das jeder halbwegs umweltbewusst Handelnde ablehnen muss. Die Abfälle besitzen auch in einer Million Jahre noch eine gefährliche Radioaktivität. Die Entwicklung der Menschheit kann über einen so langen Zeitraum nicht vorhergesagt werden. Keiner kann garantieren, dass zukünftige Generationen technisch in der Lage sind, mit dieser Gefahrenquelle umzugehen. Es gibt keine Alternative zu einer sicheren Endlagerung der hochradioaktiven Abfälle. Die angestrebte Lösung muss ohne Zutun künftiger Generationen auskommen.



*Abb. 1 Schachtanlage Gorleben*

Deutschland verfügt im Gegensatz zu vielen anderen Ländern über ausgedehnte Steinsalzlagerstätten. Steinsalz besitzt unter Gebirgsdruck eine sehr geringe Permeabilität und ist deshalb für den Einschluss gefährlicher Stoffe besonders geeignet. Ein möglicher Standort für ein Endlager ist die in Abbildung 1 gezeigte Schachtanlage Gorleben. Hier würden die gefährlichen Abfälle inmitten eines aus homogenem Steinsalz bestehenden Salzstockes deponiert.

Die heute diskutierten Konzepte einer Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen [3,4] beruhen auf Mehrbarrierekonzepten. Dabei übernehmen zunächst technische und geotechnische Barrieren solange den sicheren Einschluss, bis die durch die bergmännischen Tätigkeiten verletzten geologischen Barrieren ausgeheilt sind. Tabelle 1 zeigt die drei wichtigsten Barrieren und die zugehörige Dauer des geforderten sicheren Einschlusses. Bemerkenswert ist die ungewöhnlich lange Haltbarkeit für die technischen und geotechnischen Bauwerke.

*Tabelle 1*

BARRIEREART	INTEGRITÄTSDAUER
Abfallbehälter	ca. 500 Jahre
geotechnische Barrieren (Verschlussbauwerke)	mehrere tausend Jahre
geologische Barriere (Wirtsgestein)	eine Million Jahre

Das Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfung (IZFP) in Dresden beteiligt sich seit 1994 intensiv an der vom Bundesministerium für Forschung und Bildung geförderten Grundlagenforschung auf diesem Gebiet. Dabei ging es um folgende zwei Schwerpunkte:

- Zerstörungsfreie Charakterisierung der Permeabilität des Wirtsgesteins Steinsalz im Nahbereich von Verschlussbauwerken (geotechnische Barriere).
- Erkundung von Problemzonen im Wirtsgestein Steinsalz (geologische Barriere).

Dieser Beitrag befasst sich mit der zerstörungsfreien Charakterisierung der sogenannten Auflockerungszone, einem Saum der sich um im Salinar aufgefahrene Hohlräume bildet und durch kleine Risse im Salzgestein gekennzeichnet ist.

## **1 Verfahren und Messtechnik**

Zur Charakterisierung von Auflockerungszonen und Erkundung von Problemzonen im Salinar wird eine Vielzahl von geophysikalischen Methoden eingesetzt. Oft lassen sich nur ausreichend belastbare Ergebnisse erzielen, wenn mehrere Verfahren gleichzeitig verwendet werden.

Das IZFP Dresden hat sich über viele Jahre an der Entwicklung akustischer Methoden beteiligt und diese Verfahren im Verbund mit der Universität Leipzig, der TH Ilmenau, der BA Freiberg und dem LIAG Hannover, die alternative Verfahren, wie Georadar, Geoelektrik oder Seismik bearbeiten, in vorhandenen Gruben der Kaliindustrie getestet.

Tabelle 2

Mittenfrequenz	Typ	Hauptbewertungsalgorithmen	gebräuchliche Bezeichnung	Anwendung im Salinar
50 kHz	passiv	Ortung, Momententensor	Akustische Emission	Beobachtung von Rissbildung und -wachstum
18 kHz	aktiv	SAFT (Einzelspurmigration)	Geosonar	Erkundung von Inhomogenitäten bis 100 m
200 kHz	aktiv	Rückstreuung	Niederfrequenter Ultraschall	Charakterisierung von Auflockerungen bis 2 m

Die eingesetzten akustischen Verfahren arbeiten in einem Frequenzbereich zwischen 10 kHz und 250 kHz. Alle Messungen wurden mit dem modulare Schallemissionssystem AE.net durchgeführt. Dabei handelt es sich sowohl um aktive Ultraschallverfahren als auch um passive Schallemissionstechniken. In Tabelle 2 sind die eingesetzten Methoden mit ihren wesentlichen Parametern aufgeführt, die sich bezüglich Mittenfrequenz, Anregungstyp und Bewertungsalgorithmen.

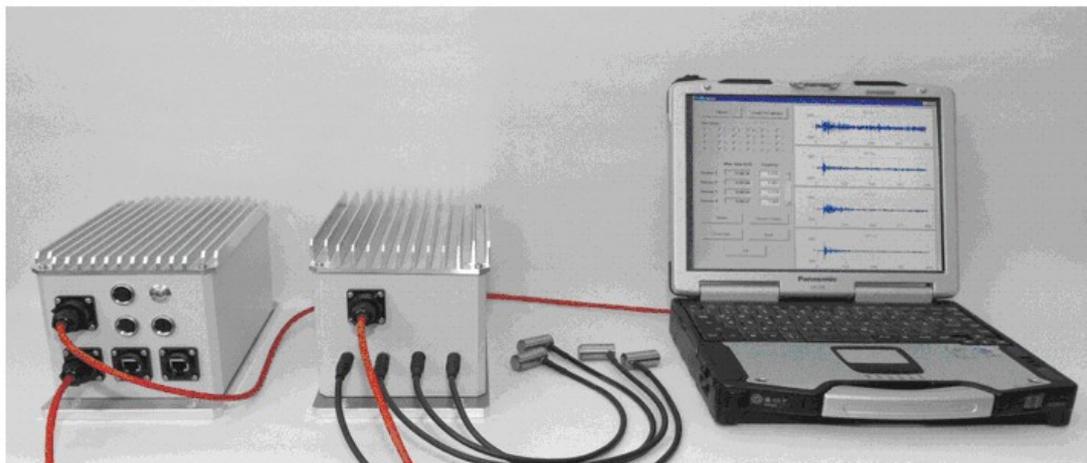
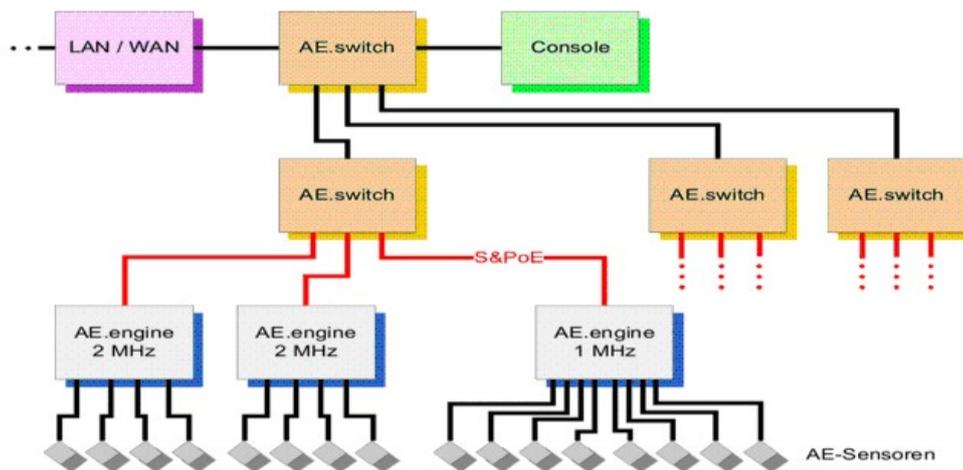


Abb. 2 Modulares Schallemissionssystem AE.net

Das Messsystem AE.net (Abb. 2) zeichnet sich durch folgende Haupteigenschaften aus:

- modularer Aufbau, jeweils vier Kanäle bilden eine Einheit mit separatem embedded PC, d.h. verteilte, von der Kanalzahl unabhängige Rechenleistung
- spezielles Dateisystem mit angepasster Datenkompression erlaubt vollständige Signalformaufzeichnung über 64 Stunden Messzeit
- Kompletter Schutz gegen Staub und Eintauchen bis 1 m Wassertiefe (IP67).

## 2 Messergebnisse zur Charakterisierung der Umgebung geotechnischer Barrieren

Verschlussbauwerke sind wichtige geotechnische Barrieren, die in der Betriebs- und zu Beginn der Nachbetriebsphase den Zufluss von Laugen in das Endlager verhindern. Diese Bauwerke werden zur Abdichtung in Strecken und Schächte eingebaut. Die Dichtwirkung hängt unter anderem von der Permeabilität des umgebenden Gebirges ab. Steinsalz, das unter Gebirgsdruck steht, hat eine sehr geringe Permeabilität von ca.  $10^{-23}$  m<sup>2</sup>. Durch die bergmännische Auffahrung der Grubengebäude entstehen in der Umgebung der neuen Hohlräume Spannungsumlagerungen, die dazu führen, dass sich Rissgeflechte bilden. Dadurch verringert sich die Permeabilität und es besteht die Gefahr einer Umströmung der Verschlussbauwerke. Belastbare Permeabilitätswerte des umgebenden Gesteins sind deshalb für die Funktionstüchtigkeit von Verschlussbauwerken notwendig.



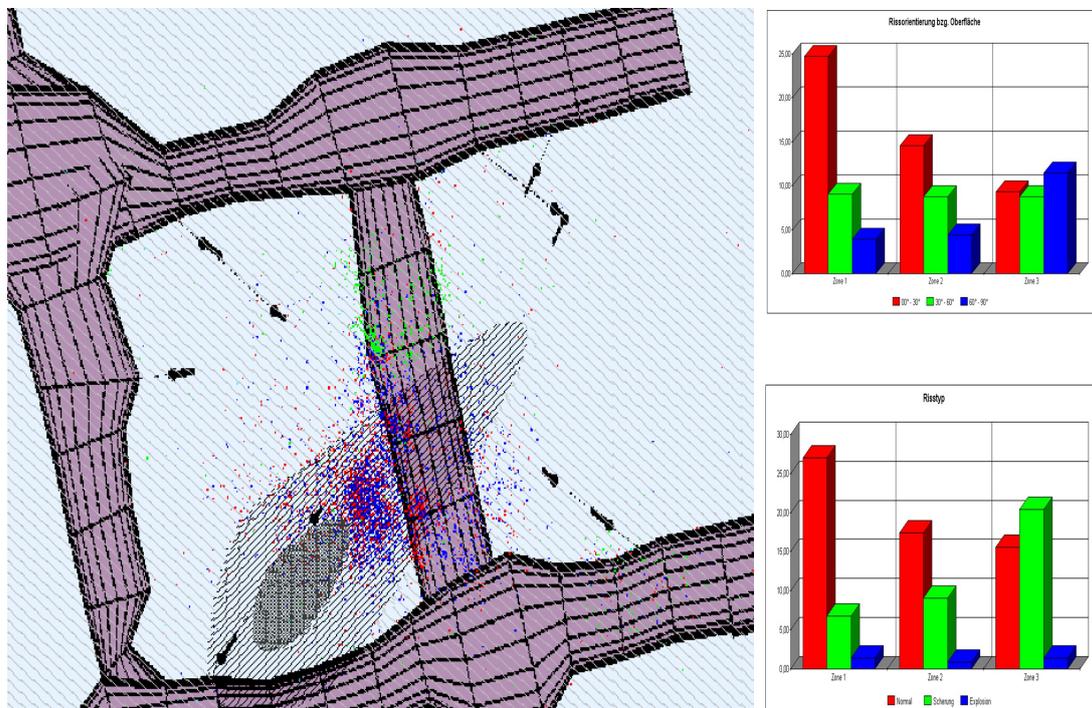
*Abb. 3 Messort Auffahrung Borth*

Herkömmlich werden Permeabilitäten mit sogenannten Injektionsverfahren bestimmt. Dabei werden in einem mit Packern abgedichteten Bohrloch Flüssigkeiten oder Gase verpresst. Aus der zeitlich verpressten Menge wird auf die Permeabilität geschlossen. Die Injektionsverfahren besitzen die Nachteile, dass Bohrlöcher notwendig sind, die das Gestein weiter schädigen und dass lediglich punktuelle Messungen möglich sind.

Zerstörungsfreie Verfahren, wie Akustische Emission und Ultraschallrückstreuung, sind in der Lage, dreidimensionale Abbildungen zur Charakterisierung der Rissgeflechte zu liefern.

Getestet wurden die akustischen Verfahren zur Charakterisierung der Rissgeflechte in den Bergwerken Bernburg, Borth (Abb. 3), Merkers (Abb. 4) und Sondershausen (Abb. 5).

Die dort durchgeführten In-situ-Messungen haben gezeigt, dass die Akustische Emission hervorragend geeignet ist, die zeitliche und räumliche Entwicklung des Auflockerungszustands zu verfolgen. Die Momententensoranalyse erlaubt es sogar, die Orientierung und das Belastungsregime der Einzelrisse eines Rissgeflechts zu bestimmen. Abb. 4 zeigt beispielhaft ein Messergebnis aus der Grube Merkers. Die Auffahrung der Verbindungsstrecke erfolgte nicht gebirgsschonend (drei Abschlänge mittels Bohren und Sprengen). Dargestellt sind die Ereignisse, die während einer Messzeit von reichlich einem Monat für die Momententensoranalyse geeignet waren. In der Abbildung wird eine tektonische Kluft durch eine weitreichende Auflockerungszone und vom Normalfall abweichende Orientierung der Einzelrisse markiert. Abb. 5 zeigt die georteten Ereignisse einer Auffahrung in der Grube Sondershausen. Auch hier reichen die Rissgeflechte weit in das Gebirge, da es sich ebenfalls um eine durch Sprengung aufgefahrene Strecke handelt.

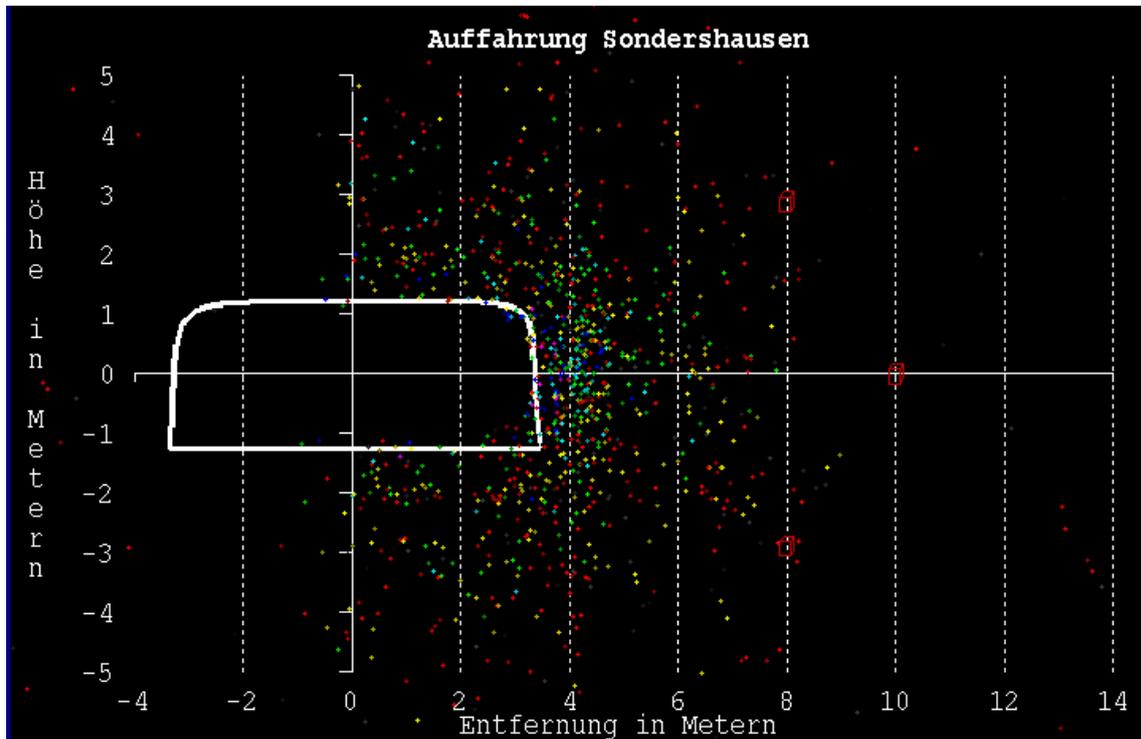


**Abb. 4 AE-Ortung und Momententensoranalyse im Schacht Merkers**

Mit dem Verfahren Akustische Emission wurden folgende Forschungsergebnisse erzielt:

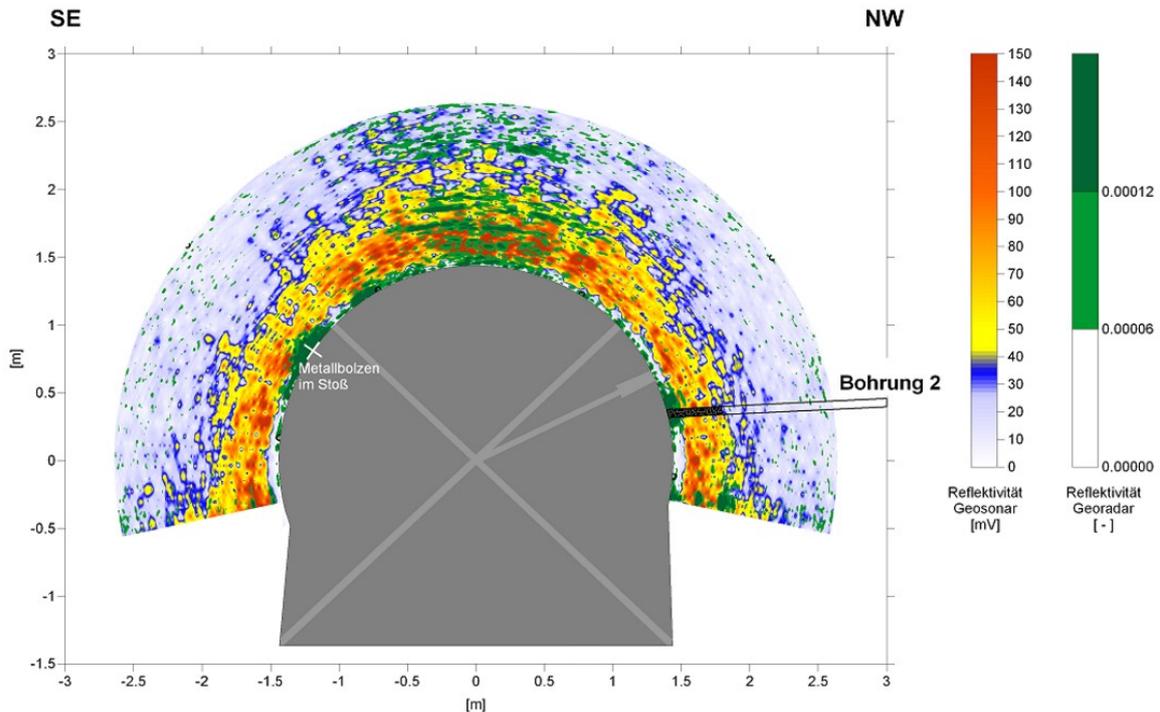
- Die Erhöhung der Permeabilität in den Saumzonen wird durch die Bildung von Rissgeflechten hervorgerufen.
- In Bereichen ohne größere tektonische Verwerfungen sind die Einzelrisse nahezu parallel zur Hohlraumoberfläche orientiert.
- Die Herdflächen liegen in der Größenordnung von 1 cm<sup>2</sup>.
- Das Belastungsregime entspricht entgegen bisherigen Annahmen hauptsächlich dem Öffnungsbruch. Der Scherbruchanteil ist gering.
- Die Rissdichte nimmt exponentiell mit dem Abstand zum Stoß ab.

- Unmittelbar nach der Auffahrung ist die Rissbildungsrate am höchsten. Sie nimmt schnell ab, kommt aber auch nach Jahren nicht zum völligen Stillstand.
- Die Mächtigkeit der Auflockerungszone hängt stark von der Standzeit, der Geometrie des Hohlraums, dem Vorhandensein tektonischer Verschiebungen und vom Auffahrungsverfahren ab. Die Werte für die Mächtigkeit der Auflockerungszone können im Bereich von 0,30 bis 6,00 m liegen.



*Abb. 5 Ortungsergebnisse der Auffahrung in der Grube Sondershausen*

Der wesentliche Nachteil des Verfahrens Akustische Emission besteht darin, dass sich zwar die zeitliche und räumliche Entwicklung der Rissgeflechte sehr gut beobachten lässt, aber absolute Messwerte für den momentanen Auflockerungszustand nicht mit einer befriedigenden Genauigkeit bestimmt werden können. Der momentane Auflockerungszustand kann mit dem Verfahren Ultraschallrückstreuung ermittelt werden. Als Sendesignal wurde ein Ricker-Wavelet benutzt. Die Mittenfrequenz von 200 kHz entspricht einer Wellenlänge von ca. 23 mm. Die Strahlöffnung der eingesetzten Sensoren betrug ca. 12°. Abb. 6 zeigt die Rückstreuungsmessungen in einer Maschinenstrecke der Grube Bernburg. Aufgrund des gebirgsschonenden Auffahrverfahrens beträgt die Mächtigkeit der detektierten Rissgeflechte nur ca. 60 cm. Zum Vergleich sind grün die Ergebnisse des Hochfrequenzradars der TU Ilmenau eingezeichnet. Es besteht auch eine gute Übereinstimmung mit direkten Injektionsmessungen, die die Bergakademie Freiberg durchgeführt hat. Weitere Details wurden in [5] veröffentlicht.



**Abb. 6 Radar und Ultraschall in einer Maschinenstrecke der Grube Bernburg**

### 3 Zusammenfassung

Um sichere Aussagen zu gewährleisten, muss das der Aufgabenstellung angepasste Verfahren eingesetzt werden, zusammenfassend deshalb Vor- und Nachteile der eingesetzten akustischen Verfahren:

#### Akustische Emission

- integral, wenige feste Sensorpositionen => Aufwand gering
- nur Veränderungen des Auflockerungszustandes detektierbar
- besonders geeignet für die Verfolgung der zeitlichen und räumlichen Entwicklung der Auflockerungszone

#### Ultraschallrückstreuung

- scannend mit direkter Ankopplung => Aufwand sehr hoch
- momentaner Auflockerungszustand detektierbar
- geringe Reichweite (ca. 2m)

#### Geosonar

- viele feste Sensorpositionen => mittlerer Aufwand
- große Reichweite (bis 80 m)
- besonders geeignet zum Nachweis der Homogenität des Wirtsgesteins Steinsalz

## Referenzen

- [1] Anforderungen an eine sichere Endlagerung, Eröffnungsrede des Bundesumweltministers Sigmar Gabriel zum Einlagerungssymposium, 30.10.-01.11.2009, Berlin
- [2] Schwerpunkte zukünftiger FuE-Arbeiten bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle (2007-2010), Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Referat III B 3, Dezember 2007
- [3] German Direct Disposal Project Special, Nuclear Technology Vol. 121, No 2, 1998
- [4] Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen, Entwurf des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bonn, Juli 2008
- [5] Abschlussbericht „Entwicklung eines Messsystems zur hochauflösenden zerstörungsfreien Erkundung von Gesteinsnahbereichen mittels Sonar“, 02 C 1184, Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe, Oktober 2008
- [6] Abschlussbericht „Universelles integriertes geophysikalische Mess- und Auswerteeinstrumentarium zur Charakterisierung von Problemzonen im Salinar“, 02 C 1305, 02 C 1315 und 02 C 1325, Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe, April 2009