

Anwendung der Cluster-Analyse auf Schallemissionsereignisse aus Festigkeitsuntersuchungen von zylindrischen Gesteinsproben

Gerd Manthei^{*}, Jürgen Eisenblätter^{**}

^{*} THM Technische Hochschule Mittelhessen, Wiesenstraße 14, D-35390 Gießen, gerd.manthei@me.thm.de

^{**} GMuG Gesellschaft für Materialprüfung und Geophysik mbH, Dieselstraße 9, D-61231 Bad Nauheim, j.eisenblaetter@gmug.eu

Kurzfassung. In einer zylindrischen Steinsalzprobe sind unter Extensionsbelastung drei große Cluster aufgetreten, die alle parallel zur Stirnfläche der Probe liegen. Diese Cluster konnten durch eine sinnvolle Wahl der primären Cluster-Parameter, deren Größe vor allem von der räumlich-zeitlichen Dichte der Ereignisse abhängt, gefunden werden. Im Vergleich mit In-situ-Messungen im Bergwerk ist die Größe der primären Cluster-Parameter bei Festigkeitsuntersuchungen an Gesteinsproben um Größenordnungen niedriger. Deshalb wurden für die Probenuntersuchungen als primäre Cluster-Parameter ein maximaler Abstand zwischen 4 und 30 mm und ein maximaler zeitlicher Abstand von 0,5 bis 9 min herangezogen, während für die Cluster-Analyse im Bergwerk Werte von 1 bis 3 m und von 30 oder 60 min benutzt werden. Die breite Variation der Parameter hängt mit großen Unterschieden der Ereignisdichte bei den Proben zusammen. Die zur Untersuchung der Dimension (Fläche oder nicht?), der räumlichen Lage sowie der zeitlichen und räumlichen Korrelation der Ereignisse herangezogenen Methoden werden am Beispiel der drei großen Cluster beschrieben.

1 Einleitung

Seit über 20 Jahren haben die Autoren über Schallemissions- oder mikroakustische Messungen im Steinsalz referiert. Der erste Beitrag mit dem Titel „Überwachung von Rißbildung im Salzgestein mit dreidimensionaler Ortung von Quellen“ wurde 1990 auf dem 8. Kolloquium Schallemission in Zittau gehalten [1]. Bis heute konnten für zehn Kolloquien Schallemission insgesamt 14 Vorträge zur Anwendung der Schallemission im Salzgestein beigesteuert werden [1-14]. Neben der dreidimensionalen Ortung der Schallquellen, die im Laufe der Jahre hinsichtlich der Ortungsgenauigkeit und -geschwindigkeit stetig verbessert wurde, wurden auch weiterführende Auswertungen, wie die Momententensor-Methode, das Collapsing-Verfahren oder die Cluster-Analyse von SE-Ereignissen aus In-situ-Messungen und Laborversuchen entwickelt und erfolgreich angewendet. Auch der Frage, welche Messgröße die eingesetzten SE-Aufnehmer (Weg, Geschwindigkeit, Beschleunigung) in welchem Frequenzbereich erfassen, wurde nachgegangen. Aufbauend darauf, konnte ein vernünftiges Maß für Magnitude und Energie von Ereignissen der Schallemission und Mikroakustik vorgeschlagen werden.

Zum tieferen Verständnis der Mikrorissbildung und der Risserweiterung im Gebirge, insbesondere bei geringer Beanspruchung, sowie zur Identifikation von Heilungsprozessen wurden u.a. in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und an der Technischen Universität Clausthal-Zellerfeld Laboruntersuchungen an Gesteinsproben durchgeführt.

Die bisherigen Untersuchungen haben ergeben, dass in einzelnen Phasen der Festigkeitsversuche geometrisch begrenzte Ansammlungen akustischer Emissionen festzustellen sind, die auf Vernetzungen von Mikrorissen und eventuell auf Bildung oder Wachstum von größeren Rissen hindeuten. Solche Ansammlungen von georteten Ereignissen der akustischen Emission werden als Cluster bezeichnet. Clusterung von Ereignissen kann auf die Ausbildung makroskopischer Rissflächen hinweisen, also einen Zustand nahe der Kritikalität. Es ist daher von Bedeutung, diesen Anteil der SE-Aktivität zu erkennen und zu bewerten.

Da die Erkennung solcher Cluster nur in Ausnahmefällen schon bei der üblichen Auswertung möglich ist, ist eine Cluster-Analyse für die im Bergwerk erfassten Mikroakustik-Daten entwickelt worden [7,10]. Da auch im Rahmen der genannten Festigkeitsuntersuchungen an Gesteinsproben im Allgemeinen sehr viele Ereignisse auftreten (oft deutlich mehr als 10.000 Ereignisse in einem Versuch), wurde die genannte Cluster-Analyse an die Bedingungen dieser Laborversuche angepasst. Ziel dieser Maßnahme ist es, aus der Vielzahl der georteten Ereignisse diejenigen herauszufinden, die auf potentielle Trenn- und Scherflächen bzw. auf die Entstehung von Makrorissen hinweisen. Dadurch kann eine deutlich verbesserte Bewertung der Untersuchungsergebnisse in Verbindung mit den Befunden der visuellen Begutachtung der Gesteinsproben erreicht werden.

2 Umstände der Messungen und deren wichtigste Ergebnisse

2.1 Versuchsaufbau

Der hier beschriebene Versuch an einer großen zylindrischen Steinsalzprobe (Durchmesser 150 mm, Länge 300 mm) aus dem Forschungsbergwerk Asse wurde im Labor der Professur für Deponietechnik und Geomechanik der TU Clausthal durchgeführt. Der Versuch fand in einer Triaxialzelle statt, in welche die Steinsalzprobe eingebaut war. Die Probe war mit einem ca. 3 mm starken Gummischlauch ummantelt. Der Versuch wurde unter Extensionsbelastung durchgeführt, d.h. der axiale Druck auf die Stirnfläche war geringer als der radiale Druck auf die Mantelfläche des zylindrischen Probenkörpers. Der Probenzylinder wurde bei einem konstanten Axialdruck von 5 MPa in radialer Richtung hydraulisch beaufschlagt. Der maximale Radialdruck der hydraulischen Prüfmaschine betrug 75 MPa und die maximale Axialkraft 2.500 kN. Während des Versuchs wurden Stempelweg, Axialkraft, Radialdruck, Temperatur und die Volumenänderung der Probe, die aus der ab- und zugeführten Ölmenge in der Zelle bestimmt wird, gemessen und in einer Datei abgespeichert. Ausgehend von einem isostatischen Zustand bei 5 MPa wurde die Probe in der Triaxialzelle bei ansteigendem Manteldruck und einer konstanten Stempelgeschwindigkeit von 0,15 mm/min bis zum Bruch belastet.

2.2 Mess- und Auswertetechnik

Abbildung 1 zeigt die Abmessungen der Probe und die Lage der Aufnehmer mit dem Ursprung des Koordinatensystems im Zentrum. Zur Schallemissionsmessung wurden 12 Aufnehmer (E1 bis E12) benutzt, von denen 10 in drei Höhenniveaus auf der Mantelfläche der Probe und je einer an beiden Stirnflächen angebracht waren. Mit den noch zusätzlich angebrachten Sendern (S1 bis S3) konnten Durchschallungsmessungen längs der Probe und in radialer Richtung auf zwei Niveaus durchgeführt werden. Die Aufnehmer waren in eingefrästen Bohrungen vollständig in der Probe versenkt und mit einem spröden Kleber an der Stirnseite der Einsenkung angeklebt. Diese Aufnehmer enthielten zylindrische piezoelektrische Wandlerelemente (Durchmesser 7 mm, Dicke 5 mm) aus Bleimetaniobat. Dieses Material ist zwar etwas unempfindlicher als das üblicherweise verwendete PZT-Material. Es hat

aber den Vorteil einer leichteren Bedämpfbarkeit, d.h. die Signale werden breitbandiger aufgenommen, und fehlender Querempfindlichkeit [14]. Beides führt zu klareren P-Einsätzen. Die Wandlerelemente waren in Messinggehäuse eingebaut, das den Aufnehmer vor Beschädigung durch den hohen Kompressionsdruck schützen sollte. Für die Messung an dieser Probe konnte ein 12-Kanal-Gerät der BGR zur kombinierten Anwendung von Schallemission und Durchschallung (Hersteller: Fa. GMuG) herangezogen werden, das die Signale sehr hochfrequent mit einer Abtastfrequenz von 10 MHz und einer Auflösung von 14 bit digitalisierte.

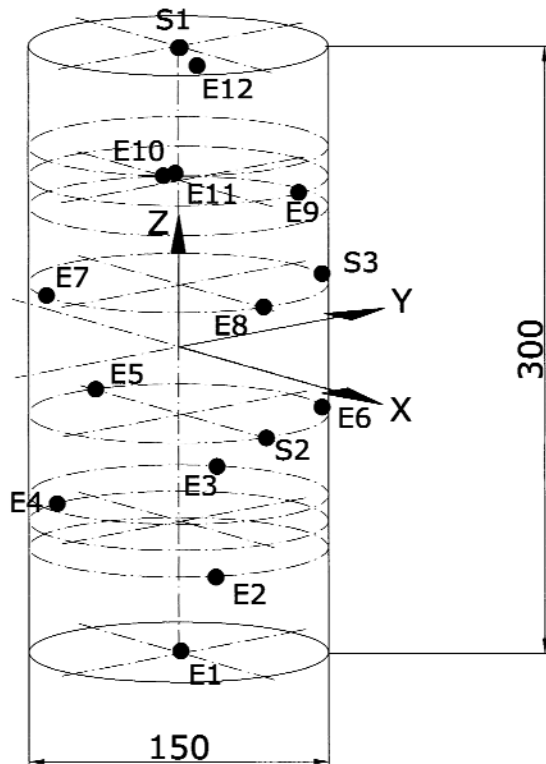


Abbildung 1: Abmessung der Probe (in mm), Lage der Aufnehmer mit dem Ursprung des Koordinatensystems.

2.3 Ortungsergebnisse

Der Versuch dauerte ca. fünf Stunden. Während dieser Zeit konnten 70.400 SE-Ereignisse registriert werden. Insgesamt waren 32.883 Ereignisse mit mindestens sechs P- und S-Einsätzen ortbar. Viele dieser Ereignisse waren sehr zuverlässig geortet worden, so z.B. 17.269 mit mindestens 10 Einsätzen, 8.047 Ereignisse mit 14 Einsätzen und noch 2.394 Ereignisse mit mindestens 18 Einsätzen. Abbildung 2 stellt das Ortungsergebnis dieses Versuchs in drei Ansichten dar. Da mindestens zehn Einsätze zur Ortung herangezogen wurden, ist das Ergebnis vertrauenswürdig. Es fällt auf, dass die Mantelfläche des Zylinders dicht durch Ereignisse belegt ist, was besonders gut in Aufsicht, also im Teilbild links oben von

Abbildung 2, zu erkennen ist. Außerdem deuten sich in den seitlichen Ansichten zwei kurze waagerechte Linien im unteren Teil der Probe an, die auf Risse zurückgehen könnten. Erwähnenswert ist, dass die genannten auffälligen Häufungspunkte schon relativ kurz nach Beginn des Versuchs beobachtet wurden.

3 Anwendung der Cluster-Analyse

3.1 Zur Cluster-Analyse benutzte Methoden

Die zur Cluster-Analyse benutzten Methoden wurden auf dem 12. Kolloquium schon vorgestellt und werden deswegen hier nur kurz beschrieben. Bei der Analyse größerer Cluster geht es vor allem darum, flächige Cluster als die potentiell gefährlichsten Strukturen – sie können von einem sich bildenden makroskopischen Riss herrühren – von wolkenartigen, voluminösen Strukturen auf der einen und linearen Strukturen auf der anderen Seite zu unterscheiden. In einem Volumen verteilte Ortungen weisen auf eine Verformungszone mit verteilten Mikrorissen hin. Bevor solch eine Zone kritisch werden kann, muss sich erst ein makroskopischer Riss entwickeln [15]. Lineare Strukturen andererseits rühren im Bergwerk meistens von Bohrungen her. In diesem Fall kann eine große Zahl von Ortungen zwar auf hohe Spannungen hindeuten, ist aber kein Anzeichen einer strukturellen Gefährdung. Eine Kombination mehrerer Verfahren kann benutzt werden, um insbesondere flächige Cluster von den genannten voluminösen oder linearen Strukturen zu unterscheiden.

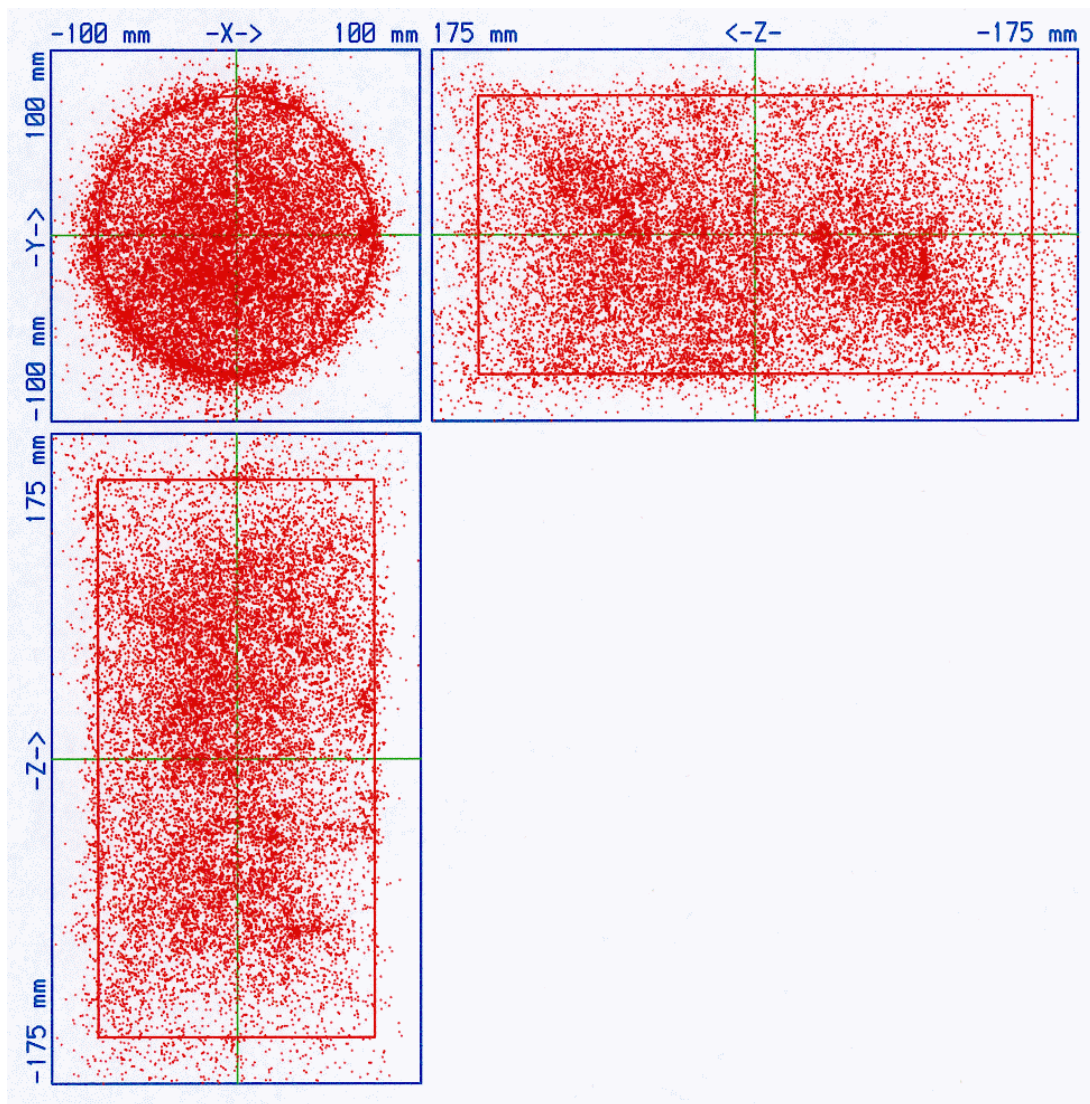


Abbildung 2: Darstellung der Ereignisse des Versuchs ASSE 228, die mit mindestens zehn P- und S-Einsätzen geortet wurden, in Projektionen auf die Koordinatenebenen.

Zunächst soll hier auf das Verfahren der Volumenminimierung eingegangen werden. Hierzu wird ein Volumen der Ereigniswolke aus den mittleren Streuungen in x-, y- und z-Richtung aller zum Cluster gehörigen Ereignisse um den Cluster-Schwerpunkt ermittelt. Diese Werte und somit auch das aus diesen Werten berechnete Volumen sind natürlich von der jeweiligen Orientierung des Koordinatensystems abhängig. Durch Drehung des Koordinatensystems um zwei zueinander senkrechte Achsen in einem größeren Winkelbereich wird diejenige Orientierung bestimmt, bei der das Volumen minimal wird. Aus den Werten der mittleren Streuung der Koordinaten bei minimalem Volumen kann Folgendes abgeleitet werden: Falls alle drei Streuungen ähnliche Größe haben, liegt eine voluminöse Struktur vor. Falls dagegen einer der Werte wesentlich kleiner ist als die beiden anderen, liegt eine Fläche vor. Falls einer der Werte wesentlich größer ist als die beiden anderen, ist die Struktur linear.

Die Dimension des Clusters kann auch als so genannte fraktale Dimension D aus einer doppelt-logarithmischen Auftragung des Korrelationsintegrals

$$C(R) = \frac{2}{N \cdot (N - 1)} \cdot N_{r < R}$$

gegenüber dem Abstand R zwischen den Ereignissen bestimmt werden. Hierzu werden alle Ereignispaare $N_{r < R}$ gezählt, deren Abstand r kleiner als ein vorgegebener Abstand R ist. Dabei ist $N \cdot (N - 1) / 2$ die Zahl aller Ereignispaare in dem Cluster. Wenn

$$C(R) \sim R^D$$

d.h. wenn in dieser Auftragung über einen größeren Bereich von R näherungsweise ein linearer Anstieg mit der Steigung D entsteht, so bezeichnet D die fraktale Dimension des Clusters (siehe beispielsweise Abbildung 5 links). Ist D etwa 2, so liegt das Cluster näherungsweise auf einer Fläche, ist D etwa 1, so sind die Ereignisse längs einer Linie angeordnet und bei $D = 3$ sind sie wolkenartig in einem Volumen verteilt. Bei ganzzahligen Werten entspricht also die fraktale Dimension der üblichen geometrischen Dimension.

Eine weitere Methode zur Bestimmung der Dimension des Clusters lässt sich auch aus der Darstellung der Richtungen aller Verbindungslinien zwischen den Ereignissen des Clusters gewinnen. Hierzu werden die Durchstoßpunkte dieser Richtungsvektoren in einer so genannten Equal area projection auf die untere Erdhalbkugel projiziert (siehe rechtes Teilbild von Abbildung 5). Eine lineare Ansammlung von Ereignissen zeigt dabei Durchstoßpunkte, die sich in der Projektion um einen Punkt herum konzentrieren, während auf einer Fläche liegende Ereignisse zu Durchstoßpunkten führen, die um einen Kreisbogen herum streuen. Im Falle eines voluminösen Clusters verteilen sich die Durchstoßpunkte über die ganze Projektionsfläche.

3.2 Zur Definition der Cluster

Im ersten Schritt der Cluster-Analyse werden so genannte primäre Cluster-Parameter zur Gewinnung der Primärcluster mit mindestens drei Ereignissen benutzt. Aus diesen werden im zweiten Schritt durch Verschmelzung der Cluster mit gemeinsamen Ereignissen die endgültigen Cluster gebildet. Die primären Cluster-Parameter sind:

- die Mindestzahl von Ereignissen, die ein Cluster bilden,
- der maximale räumliche Abstand und
- der maximale zeitliche Abstand zwischen Ereignissen,

die zum Cluster gehören sollen. Die primären Cluster-Parameter bestimmen wesentlich die Anzahl der gefundenen Cluster und deren Größe, das ist die Zahl der zum Cluster gehörigen Ereignisse. Cluster, die sowohl räumlich als auch zeitlich korrelierte Ereignisse aufweisen, werden als Cluster 1. Art bezeichnet. Sind die Ereignisse nur räumlich korreliert, so handelt es sich um ein Cluster 2. Art.

3.3 Ergebnis der Cluster-Analyse

Zur Cluster-Analyse dieses Versuchs wurden primäre Cluster-Parameter verwendet, die – im Fall der maximalen Zeit zwischen Ereignissen – zwischen etwa 0,5 min und 2 min sowie – im Fall des maximalen räumlichen Abstands – zwischen 4 und 12 mm variierten. **Tabelle 1** gibt alle Cluster mit einer Clustergröße ab 20 in der Reihenfolge ihrer Größe an. Die Buchstaben A bis H beziehen sich auf Cluster in verschiedener Lage, deren Schwerpunktskoordinaten unterhalb der Tabelle angegeben sind. Diese Koordinaten gelten zwar exakt nur für die primären Cluster-Parameter 1 min und 10 mm, für welche auch die Reihenfolge A bis H gilt, liegen aber für die meisten Parameterkombinationen sehr ähnlich. Die in Klammern hinter den Buchstaben angegebenen Zahlen bedeuten die jeweilige Clustergröße und die Dauer des Clusters.

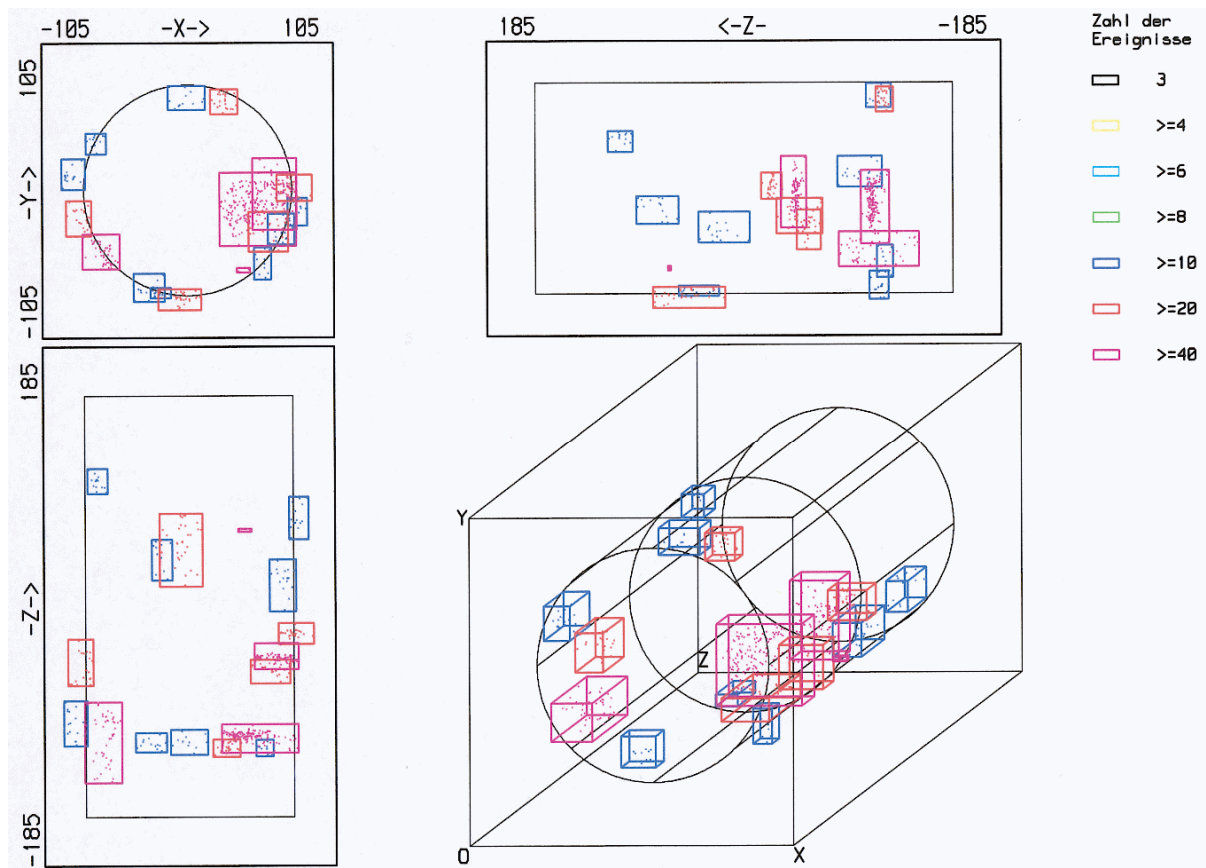


Abbildung 3: Alle Cluster ab Clustergröße 10, die mit den primären Cluster-Parametern 1 min und 10 mm bei Versuch ASSE 228 gefunden wurden.

Die Tabelle zeigt, dass die Cluster A, B und E bei allen Parameterkombinationen, auch schon bei geringen maximalen Abständen zwischen den Ereignissen von 4 bis 6 mm, auftreten und dann mit weiterer Vergrößerung des zweiten Parameters nur noch mäßig anwachsen (d.h. ihre Clustergröße nimmt zu). Ihre Dauer bleibt immer unter 5 min. In **Abbildung 3**, in der die Lage aller Cluster ab Clustergröße 10, die mit den primären Cluster-Parametern 1 min und 10 mm gefunden wurden, in der üblichen Weise in vier Projektionen wiedergegeben ist, stellen die genannten Cluster A, B und E Cluster dar, die in der x-y-Ebene, also parallel zu den Endflächen der Probe, verlaufen. In **Abbildung 4**, die alle Cluster ab Clustergröße 20 zeigt, die mit den kleineren Primär-Parametern 0,49 min und 6 mm noch übrig bleiben, sind diese drei Cluster die einzigen verbliebenen. (Ein punktförmiges Cluster, das hier noch zu erkennen ist, beruht wohl auf einer ungewollten Vielfachspeicherung eines Ereignisses bei einer Versuchsunterbrechung. Es wurde hier nicht bewertet.) Die Cluster A, das unterste in Abbildung 4, und B, das mittlere in Abbildung 4, sind übrigens auch die einzigen, die im Innern der Probe liegen, während alle anderen Cluster in Abbildung 3 deutlich von der Mantelfläche des Probenkörpers stammen. Die Lage der beiden Cluster A und B stimmt im Übrigen mit den beiden horizontalen Linien überein, die schon bei Betrachtung der Abbildung 2 aufgefallen waren. Wie bereits oben erwähnt, traten die drei Cluster A, B und E nicht lange nach Versuchsbeginn auf, und zwar alle in den wenigen Minuten von 13:47 bis 13:53 h.

Die Cluster A, B und E erfüllen die Kriterien für ebene Cluster: Dafür sprechen sowohl die mittleren Streuungen, die in einer Koordinatenrichtung immer wesentlich geringer sind als in den beiden anderen Richtungen, als auch die Steigung des Korrelationsintegrals, die im Anfangsbereich bis zu Abständen von etwa 20 mm näherungsweise 2 beträgt, wie das linke Teilbild von **Abbildung 5** am Beispiel des Clusters A nachweist. Im rechten Teilbild liegen übrigens – wie für ein horizontales Cluster zu erwarten – die Durchstoßpunkte der

Verbindungslinien zwischen Ereignissen durch die Lagehalbkugel alle nahe der Peripherie, d.h. alle Verbindungslinien verlaufen nahezu horizontal.

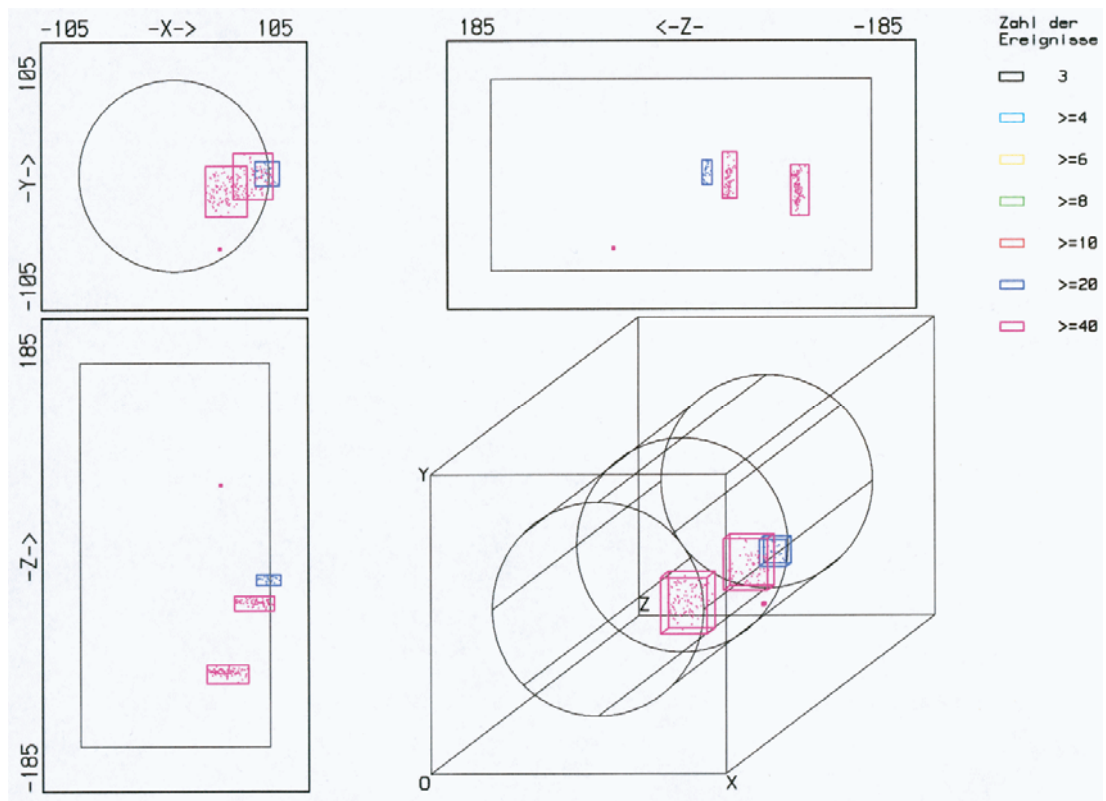


Abbildung 4: Alle Cluster ab Clustergröße 20, die mit den primären Cluster-Parametern 0,49 min und 6 mm bei Versuch ASSE 228 gefunden wurden.

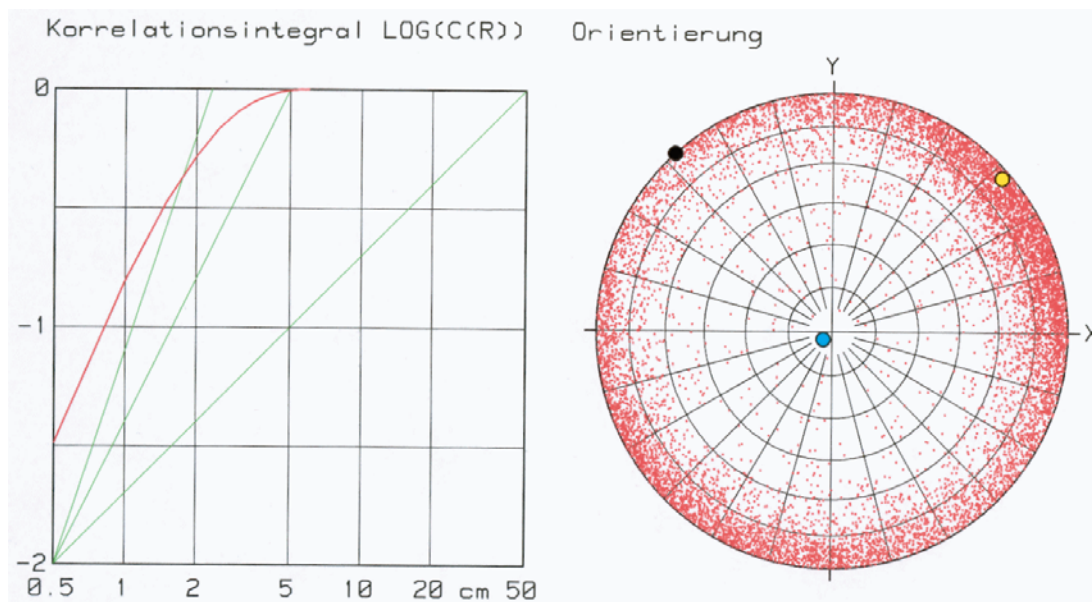


Abbildung 5: Korrelationsintegral (links) und Orientierung der Durchstoßpunkte der Verbindungslinien zwischen Ereignissen (rechts) des Clusters Nr. 274, das 142 Ereignisse umfasst.

Aus Tabelle 1 geht hervor, dass sich die Reihenfolge der größten Cluster im unteren Teil dieser Tabelle bei den primären Cluster-Parametern 2 min und 9 mm bzw. 10 mm verändert, indem das Cluster D so anwächst, dass es an die zweite Stelle in der Tabelle vorrückt. Dieses Cluster liegt etwa bei einem Azimut von 270° . Die Ereignisse liegen nahe der Mantelfläche und streuen über einen Azimut-Bereich von etwa 60° , so dass die Abweichung der Ereignisse von einer (senkrecht einfallenden) Ebene deutlich zu erkennen ist, wie die Cluster-Darstellung von Abbildung 6 zeigt. Bezüglich ihrer Höhenkoordinate z streuen die Ereignisse über einen Bereich von 90 mm.

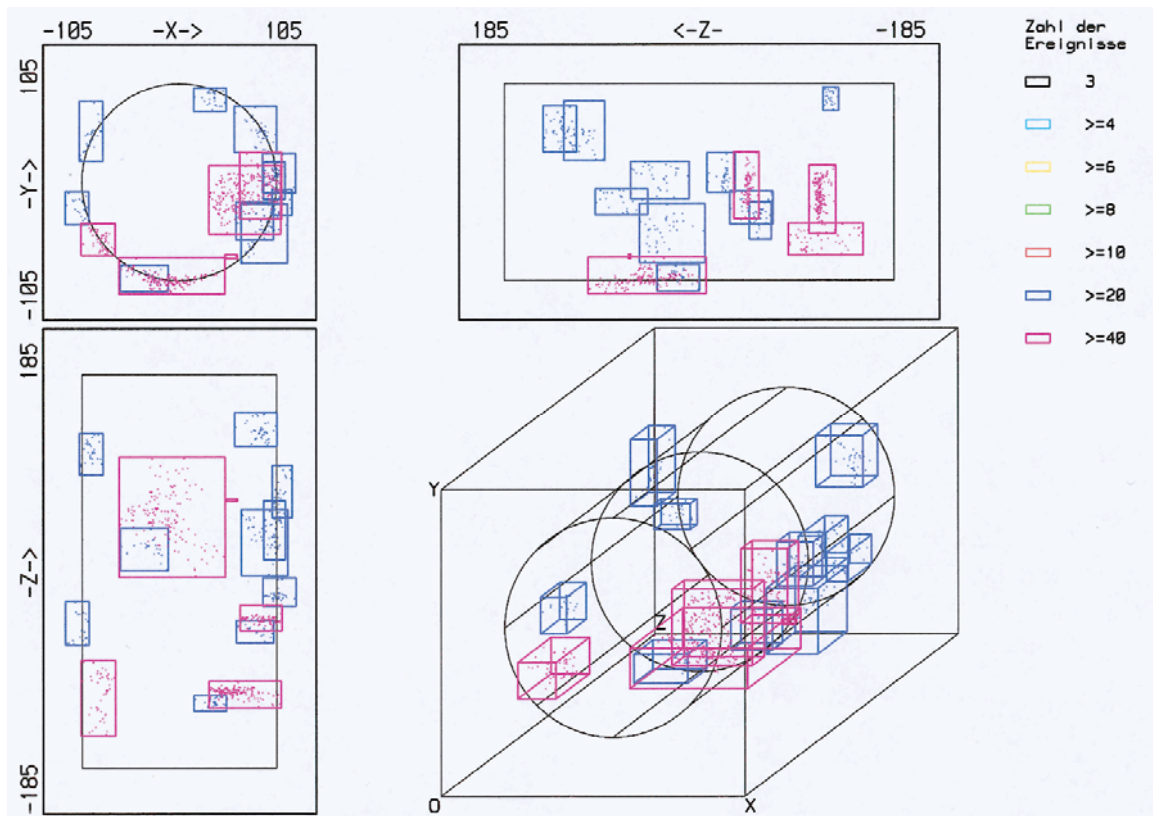


Abbildung 6: Alle Cluster ab Clustergröße 20, die mit den primären Cluster-Parametern 2 min und 10 mm bei Versuch ASSE 228 gefunden wurden.

4 Zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse

Die hier vorgestellten Methoden zur Detailanalyse von Clustern, nämlich Drehung in eine extreme Lage, Angabe der fraktalen Dimension, Darstellung der Orientierung der Abstandsvektoren zwischen den Ereignissen, sind zum größten Teil nur auf größere Cluster, d.h. auf Cluster mit vielen Ereignissen, anwendbar. Außerdem sollten die Ereignisse hinreichend genau geortet sein. Die Größe der zu wählenden primären Cluster-Parameter hängt in erster Linie von der räumlich-zeitlichen Dichte der Ereignisse ab. An dem hier untersuchten Steinsalz kern war die Ereignisdichte mit über 17.000 Ereignissen innerhalb von 5 Stunden recht groß. Als primäre Cluster-Parameter wurden gewählt: 0,5 bis 2 min und 4 bis 12 mm. **Abbildung 7** zeigt Fotos der Probe vor (linkes Teilbild) und nach dem Extensionsversuch (rechtes Teilbild).



Abbildung 7: Foto der zylindrischen Steinsalzprobe ASSE 228 vor dem Extensionsversuch (linkes Teilbild) und nach dem Extensionsversuch (rechtes Teilbild).

Im rechten Teilbild ist deutlich die Taillenbildung durch den enorm hohen maximalen Manteldruck bei Extension der Probe und die damit verbundene Längung der Probe um ca. 3 cm (entspricht 10%) zu erkennen. Im unteren Drittel der belasteten Probe ist eine scharfe Linie (schwarzer Pfeil) quer zur Probenlängsachse zu erkennen. Diese Linie markiert die makroskopische Bruchfläche, auf der das Versagen der Probe stattgefunden hat. Die sehr ebene Bruchfläche liegt horizontal und verläuft quer durch den ganzen zylindrischen Probekörper. Die Lage der Bruchfläche lässt darauf schließen, dass das Versagen der Probe durch einen plötzlichen Zugbruch genau an der Stelle der Probe hervorgerufen wurde, an der das große Cluster A mit 142 Ereignissen auftrat. Interessanterweise wurden in dem Zeitintervall von ca. 4 Stunden zwischen dem Auftreten des Clusters und dem Versagen der Probe keine weiteren SE-Ereignisse aus dieser Cluster-Region geortet.

Referenzen

- [1] Eisenblätter, J., Manthei, G., Meister, D.: Überwachung von Ribbildung im Salzgestein mit dreidimensionaler Ortung von Quellen, 8. Kolloquium Schallemission, Zittau, 1990, S. 17-24.
- [2] Manthei, G., Eisenblätter, J., Kühnicke, H.: Bestimmung der Quellenparameter von SE-Quellen in Salzgestein mit der Methode des Momententensors, 9. Kolloquium Schallemission, Zittau, Berichtsband 32 der DGZfP, 1992, S. 126-137.
- [3] Manthei, G., Dahm, T., Eisenblätter, J., Kühnicke, H.: Anwendung von Methoden der absoluten und relativen Amplitudeninversion auf Schallemissionsquellen im Salzgestein zur Bestimmung der Quellenparameter, 10. Kolloquium Schallemission, Jena, Berichtsband 42 der DGZfP, 1994, S. 32-41.
- [4] Eisenblätter, J., Spies, T.: Dauerüberwachung in Salzbergwerken mit mikroakustischen Messungen, 11. Kolloquium Schallemission, Jena, Berichtsband 58 der DGZfP, 1997, S. 135-146.
- [5] Manthei, G., Schäfer, P., Kamlot, P.: Feststellung von Größe und Orientierung hydraulisch erzeugter Risse im Gestein, 11. Kolloquium Schallemission, Jena, Berichtsband 58 der DGZfP, 1997, S. 147-157.
- [6] Eisenblätter, J., Spies, T.: Ein Magnitudenmaß für Schallemission und Mikroakustik, 12. Kolloquium Schallemission, Jena, Berichtsband 72 der DGZfP, 2000, S. 29-41.
- [7] Spies, T., Eisenblätter, J.: Untersuchung von Clustern mikroakustischer Emission an geologischen Grenzflächen. 12. Kolloquium Schallemission, Jena, Berichtsband 72 der DGZfP, 2000, S. 139-150.
- [8] Manthei, G., Eisenblätter, J., Spies, T., Eilers, G.: Bestimmung von Quellenparametern mikroakustischer Ereignisse im Salzgestein, 12. Kolloquium Schallemission, Jena, Berichtsband 72 der DGZfP, 2000, S. 173-187.
- [9] Manthei, G., Eisenblätter, J., Pusch, G., Alkan, H.: Schallemissionsmessungen bei triaxialen Druckversuchen mit gleichzeitiger Gasdurchströmung von Steinsalzproben, 13. Kolloquium Schallemission, Jena, Berichtsband 78 der DGZfP, 2001, S. 103-115.
- [10] Eisenblätter, J., Manthei, G., Spies, T.: Charakterisierung von Clustern bei dreidimensionaler Ortung von Schallemissionsquellen, 13. Kolloquium Schallemission, Jena, Berichtsband 78 der DGZfP, 2001, S. 23-38.

- [11] Manthei, G., Moriya, H., Jones, R.H., Niitsuma, H., Eisenblätter, J.: Anwendung der Collapsing-Methode auf Schallemissionsereignisse in einer Steinsalzprobe während eines triaxialen Kompressionsversuchs, 14. Kolloquium Schallemission, Berlin, Berichtsband 82 der DGZfP, 2003, S. 27-39.
- [12] Manthei, G., Eisenblätter, J., Spies, T.: Quellenmechanismen mikroakustischer Ereignisse aus einem Bereich zwischen großen Abbaukammern in einem Bergwerk, 15. Kolloquium Schallemission, Berlin, Berichtsband 99 der DGZfP, 2005, S 18-32.
- [13] Manthei, G., Popp, T., Eisenblätter, J.: Schallemissionsmessungen zur Verfolgung von Rissbildung in der Umgebung einer druckbeaufschlagten Bohrung im Salzgestein, 16. Kolloquium Schallemission, Berlin, Berichtsband 105 der DGZfP, 2007, S. 6-14.
- [14] Manthei, G.: Charakterisierung von breitbandigen Schallemissionsaufnehmern, 17. Kolloquium Schallemission, Bad Schandau, Berichtsband 118 der DGZfP, 2009, S. 77-85.
- [15] Lockner, D.A., Byerlee, J.D.: Precursory AE patterns leading to rock fracture. In: Acoustic Emission/ Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials V, H.R. Hardy, Jr. (ed.), Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, 1995, S. 45-57

Tabelle 1: Größe und Dauer der Cluster bei Versuch ASSE 228, die bei unterschiedlichen primären Cluster-Parametern gefunden wurden. Die Cluster sind nach Größe geordnet. Nur mit mindestens zehn P- und S-Einsätzen geortete Ereignisse wurden herangezogen.

0.49 min, 12 mm	A(132, 2.98 min)	B(80, 1.60 min)	C(26, 1.31 min)	E(25, 0.51 min)	G(24, 0.41 min)			
0.49 min, 10 mm	A(130, 2.98 min)	B(79, 1.58 min)	E(25, 0.51 min)	G(21, 0.41 min)				
0.49 min, 9 mm	A(127, 2.98 min)	B(77, 1.58 min)	E(25, 0.51 min)	G(21, 0.41 min)				
0.49 min, 8 mm	A(123, 2.98 min)	B(76, 1.58 min)	E(25, 0.51 min)					
0.49 min, 7 mm	A(106, 1.91 min)	B(72, 1.51 min)	E(24, 0.23 min)					
0.49 min, 6 mm	A(100, 1.91 min)	B(70, 1.51 min)	E(23, 0.23 min)					
0.49 min, 5 mm	A(87, 1.81 min)	B(43, 1.14 min)	E(21, 0.23 min)					

1 min, 12 mm	A(143, 4.70 min)	B(83, 3.11 min)	D(58, 4.25 min)	C(53, 2.63 min)	H(28, 1.30 min)	E(26, 1.01 min)	F(24, 2.46 min)	G(24, 0.41 min)
1 min, 10 mm	A(142, 4.70 min)	B(81, 2.23 min)	C(45, 2.58 min)	D(31, 3.76 min)	E(26, 1.01 min)	F(23, 2.46 min)	G(21, 0.41 min)	H(20, 1.18 min)
1 min, 9 mm	A(140, 4.70 min)	B(78, 1.60 min)	E(26, 1.01 min)	C(24, 1.51 min)	F(23, 2.46 min)	G(21, 0.41 min)		
1 min, 8 mm	A(132, 3.46 min)	B(78, 1.60 min)	E(26, 1.01 min)	F(23, 2.46 min)	C(20, 1.43 min)			
1 min, 7 mm	A(128, 3.11 min)	B(73, 1.51 min)	E(25, 1.01 min)	F(21, 2.28 min)				
1 min, 6 mm	A(120, 3.11 min)	B(70, 1.51 min)	E(23, 0.23 min)					
1 min, 5 mm	A(98, 2.50 min)	B(44, 1.50 min)	E(21, 0.23 min)					
1 min, 4 mm	A(53, 2.26 min)	B(25, 1.14 min)						

2 min, 10 mm	A(145, 4.70 min)	D(139, 13.9 min)	B(84, 3.11 min)	C(48, 2.63 min)	E(32, 4.23 min)	F(24, 2.46 min)	G(21, 0.41 min)	H(20, 1.18 min)
2 min, 9 mm	A(145, 4.70 min)	D(99, 9.41 min)	B(81, 3.01 min)	E(32, 4.23 min)	C(30, 2.41 min)	F(23, 2.46 min)	G(21, 0.41 min)	
2 min, 8 mm	A(134, 3.53 min)	B(81, 3.01 min)	D(32, 5.18 min)	E(30, 3.20 min)	C(29, 2.41 min)	F(23, 2.46 min)		
2 min, 7 mm	A(130, 3.53 min)	B(75, 2.41 min)	E(28, 3.20 min)	C(23, 1.85 min)	F(22, 2.46 min)			
2 min, 6 mm	A(122, 3.53 min)	B(71, 2.41 min)	E(26, 3.20 min)					
2 min, 5 mm	A(103, 3.53 min)	B(45, 2.40 min)	E(21, 0.23 min)					
2 min, 4 mm	A(55, 3.18 min)	B(26, 2.40 min)						

Erläuterungen: mittlere Koordinaten (bei Parametern 1 min und 10 mm)

- A x = 43.5 mm, y = -10.0 mm, z = -92.7 mm horizontale Fläche
- B x = 62.8 mm, y = -4.0 mm, z = -37.3 mm horizontale Fläche
- C x = -61.0 mm, y = -44.6 mm, z = -93.0 mm senkrechter Streifen
- D x = -5.5 mm, y = -76.4 mm, z = 45.3 mm senkrechter Streifen

- E x = 74.0 mm, y = 1.4 mm, z = -19.6 mm etwas einfall. Fläche
- F x = 26.3 mm, y = 63.8 mm, z = -100.3 mm
- G x = 58.2 mm, y = -27.8 mm, z = -45.5 mm etwas einfall. Fläche
- H x = -76.6 mm, y = -19.3 mm, z = -43.9 mm