

Relative Ortungsmethoden in der Schallemissionsanalyse

Gerd MANTHEI

THM Technische Hochschule Mittelhessen, Wiesenstraße 14, 35390 Gießen

Kontakt E-Mail: gerd.manthei@me.thm.de

Kurzfassung. Die Ortung von Schallemissions(SE)ereignissen ist eines der Hauptinstrumente in der SE-Analyse. Eine zuverlässige Lage der SE-Quellen ermöglicht eine genaue Untersuchung der Mechanismen, die zu einem Riss in einem Material geführt haben. Es ist bekannt, dass die Genauigkeit der Ortung durch verschiedene Faktoren beeinflusst wird, darunter die Genauigkeit der Ablesung der Ankunftszeit der elastischen Wellen, die geometrische Verteilung der SE-Sensoren und am wichtigsten, durch die physikalischen Eigenschaften des Ausbreitungsmediums.

Das Ziel dieser Studie ist die Anwendung und Erprobung von Lokalisierungsalgorithmen, die in der Lage sind, den Einfluss des bei der Berechnung verwendeten Geschwindigkeitsmodells und den Einfluss menschlicher Fehler bei der Auswahl der Ankunftszeiten elastischer Wellen zu verringern. Ein einheitliches Geschwindigkeitsmodell ist wegen der zum Teil komplizierten Bauteilstruktur nicht im Detail verfügbar. Glücklicherweise sind die mit dem Geschwindigkeitsmodell verbundenen Fehler bei der Ortung von SE-Ereignissen, die in einem engen Abstand zueinander stehen systematisch, und die in dieser Studie angewandten Techniken, wie die "Master-Event-Technik", das sogenannte "Joint Hypocenter Determination (JHD-Verfahren)" oder das "Double Difference (DD) Verfahren" basieren auf diesen Merkmalen. Diese Algorithmen werden auf ein Cluster aus SE-Ereignissen angewendet, bei denen der Abstand der Ereignisse viel kürzer ist als der Abstand zwischen dem Schwerpunkt des Clusters und den Sensoren.

1 Einleitung

Die heute zur SE-Prüfung verwendeten Vielkanalsysteme sind in der Lage, on-line (d.h. während der Prüfung) vorhandene SE-Quellen zu orten und zusätzlich die groben Signalparameter jeden Ereignisses (wie Peakamplitude oder Energie, Anstiegszeit und Dauer) festzuhalten. Bei Bedarf ist es auch möglich, die ganzen Wellenformen eines SE-Ereignisses abzuspeichern. Für eine lückenlose Überwachung, d.h. ohne Datenverlust, ist auch eine kontinuierliche Datenerfassung mit den heutigen SE-Systemen im vertretbaren Aufwand möglich. Zur Ortung werden die Differenzen in der Ankunftszeit des Signals an mehreren Sensoren gemessen und vom Systemrechner ausgewertet. Zur Zeitdifferenzmessung kann dabei entweder das erste Überschreiten einer eingestellten Schwelle (sogenannte Schwellenortung) oder das Erreichen des Signalmaximums (sogenannte Peakortung) festgestellt werden. Beide Arten sind mit erheblichen Fehlern behaftet, die im Mittel, wie z.B. bei der Druckbehälterprüfung, zwar unterhalb einer Wanddicke liegen; die Einzelfehler können aber durchaus auch größere Werte annehmen.



1

Diese großen Fehler werden verständlich, wenn berücksichtigt wird, dass ein Schallemissionssignal, das sich in einem dickwandigen Objekt wie einem Druckbehälter ausbreitet, dies nicht mit einheitlicher Geschwindigkeit tut, sondern unterschiedlich schnelle Signalanteile enthält. Die Quelle sendet Longitudinal- und Transversalwellen aus, die entweder direkt oder nach verschiedenen Reflexionen an den Oberflächen die Sensoren erreichen können. Welcher dieser Zickzacklaufwege die Schwelle zum ersten Mal überschreitet bzw. das Signalmaximum bildet, ist vom Abstand zwischen Quelle und Sensor, die Quellstärke und der Art und Lage der Schallemissionsquelle abhängig.

Einfachere Verhältnisse liegen nun vor, wenn die Quelle an der gleichen Oberfläche liegt wie die Sensoren. In diesem Fall wird nämlich ein erheblicher Teil der Signalenergie als Oberflächenwelle abgestrahlt, die sich mit einer einheitlichen Geschwindigkeit, dispersionsfrei längs der Oberfläche ausbreitet. Die Ortungsgenauigkeit ist dabei sehr gut.

Eine wesentliche Verbesserung der Ortungsgenauigkeit von Schallemissionsquellen ist möglich, wenn – ähnlich wie dies die Seismologie seit langem tut – eine detaillierte Analyse der Zeitsignale vornimmt, um einzelne Einsatzzeitpunkte genau zu identifizieren. Die nun hier vorgestellten Verfahren zur relativen Ortung von SE-Ereignissen, die in einem engen Abstand zueinanderstehen, ist eine erweiterte Fassung der Ortung von SE-Ereignissen wie sie üblicherweise in der Seismologie aber auch in der Schallemissionsanalyse angewendet wird.

2 Grundlagen zu Ortungsverfahren von SE-Ereignissen

2.1 Ortungsverfahren von einzelnen SE-Ereignissen

Als Grundlage zur Ortung von Einzelereignissen dient das Gradientenverfahren, das von Eisenblätter [1] zur Ortung von SE-Ereignissen im massiven Salzgestein entwickelt wurde. Zum Teil ist der Algorithmus auch in konventionellen SE-Systemen zu finden [2]. Diese Ortungsverfahren beruhen auf dem Prinzip der Triangulation (siehe Abb. 1).



Abb. 1. Prinzips der Ortung durch Triangulation [3].

Eine SE-Quelle an der Position Q emittierte elastische Wellen. Die Wellen breiten sich gleichmäßig in alle Richtungen aus und gelangen zu unterschiedlichen Zeiten und unterschiedlichen Strahlwegen zu den Sensoren S. Das Ortungsverfahren geht davon aus,

dass die Einsatzzeitpunkte optisch oder – bei einfacher Signalstruktur – auch automatisch bestimmt werden. Nehmen wir zunächst an, dass nur ein Einsatzzeitpunkt, z.B. der des ersten Longitudinalpulse, bestimmt wird. Die daraus errechneten Zeitdifferenzen zum ersten ansprechenden Sensor mit Nummer k_0 seien Δt_k . Die N Sensoren haben die Koordinaten x_k , y_k, z_k mit k = 1, 2, ..., N. Für die wahren Quellenkoordinaten x, y, z müssten die gemessenen Zeitdifferenzen Δt_k^{mess} mit den aus den Laufwegen Quelle–Sensor errechneten Δt_k^{ber} übereinstimmen. Der Laufweg r_k zum Sensor mit der Nummer k ist:

$$r_k = \sqrt{(x_k - x)^2 + (y_k - y)^2 + (z_k - z)^2}.$$
(1)

Der Laufweg r_{k0} zum ersten ansprechenden Sensor ist entsprechend:

$$r_{k0} = \sqrt{(x_{k0} - x)^2 + (y_{k0} - y)^2 + (z_{k0} - z)^2}.$$
(2)

Sind c_L und c_T die Geschwindigkeiten der Longitudinal- und Transversalwelle, dann sind die berechneten Laufzeitdifferenzen mit den Laufwegen in Gleichung (1) und (2) also:

$$\Delta t_k^{berL} = (r_k - r_k)/c_L \qquad \qquad \text{für die Longitudinalwelle und}$$
$$\Delta t_k^{berT} = \left(\frac{r_k}{c_T} - \frac{r_{k_0}}{c_L}\right) \qquad \qquad \text{und die Transversalwelle.}$$

Stellen die Koordinaten x, y, z nur einen Lösungsansatz dar, dann bestimmen die Abweichungen zwischen den errechneten und berechneten Laufzeitdifferenzen den Ortungsfehler. Die Funktion

$$F(x, y, z) = \sum_{\substack{k=1\\k\neq k_0}}^{N} \left(\Delta t_k^{berL} - \Delta t_k^{messL}\right)^2 + \left(\Delta t_k^{berT} - \Delta t_k^{messT}\right)^2$$
(3)

muss also minimal werden. Um diese Minimalisierungsaufgabe in Gleichung (3) zu lösen gibt es verschiedene Möglichkeiten. Eisenblätter führte dazu ein iteratives *Gradientenverschiebungsverfahren* durch. Dazu wird zunächst für das Ausgangstripel (Startwerte). x_0, y_0, z_0 der Funktionswert und der Gradient der Funktion (die partiellen Ableitungen nach den Koordinaten) berechnet. Durch die Verschiebung der Koordinatenwerte in Richtung des Gradienten, der ja die Richtung des steilsten Abfalls der Funktion *F* festlegt, wird ein neues Ausgangskoordinatentripel bestimmt. Mit diesen neuen Ausgangswerten wird die Prozedur so oft wiederholt, bis der Gradient nur noch sehr klein ist. Bei den meisten Anwendungen reichen 20 bis 30 Iterationen aus, um eine genügende Genauigkeit zu erzielen. Der verbleibende Restfehler ist ein Maß im Wesentlichen für die Genauigkeit der Bestimmung der Einsatzzeitpunkte.

In einem weiteren Verfahren, das auch als Standardverfahren in der Seismologie zur Ortung von Erdbeben eingesetzt wird [4], wird das nichtlineare Gleichungssystem:

$$t_k = F_k(x, y, z, t) = t + \frac{1}{c_L} \sqrt{(x_k - x)^2 + (y_k - y)^2 + (z_k - z)^2}$$
(4)

durch eine Reihenentwicklung um die Startwerte überführt und nach dem linearen Glied abgebrochen. Die Linearisierung von Gleichung (4) setzt allerdings voraus, dass die Startwerte (unterer roter Kreis in Abb. 2) hinreichend nahe beim wahren Ereignisort (oberer roter Kreis in Abb. 2) liegen. Das ist eine entscheidende Einschränkung; sie bedeutet, dass fast alles über das Ausbreitungsmedium bekannt sein muss, und nur noch kleine Verbesserungen nötig sind. Die Einsatzzeiten und partiellen Ableitungen für die Startwerte x_0, y_0, z_0, t_0 sind

$$t_{k0} = F_{k0}(x_0, y_0, z_0, t_0) = t_0 + \frac{1}{c_L}\sqrt{(x_k - x_0)^2 + (y_k - y_0)^2 + (z_k - z_0)^2},$$
(5)

mit

$$G_{k1} = \frac{\partial F_{k0}(x_0, y_0, z_0, t_0)}{\partial t_0} = 1,$$

$$G_{k2} = \frac{\partial F_{k0}(x_0, y_0, z_0, t_0)}{\partial x_k} = -\frac{x_k - x_0}{c_L \cdot R_{k0}},$$

$$G_{k3} = \frac{\partial F_{k0}(x_0, y_0, z_0, t_0)}{\partial y_k} = -\frac{y_k - y_0}{c_L \cdot R_{k0}},$$

$$G_{k4} = \frac{\partial F_{k0}(x_0, y_0, z_0, t_0)}{\partial z_k} = -\frac{z_k - z_0}{c_L \cdot R_{k0}}.$$

Mit diesen Ausdrücken folgt aus

$$t_{k} - t_{k0} = t - t_{0} + \frac{1}{c_{L}} \left[n_{kx} \cdot (x_{k} - x_{0}) + n_{ky} \cdot (y_{k} - y_{0}) + n_{kz} \cdot (z_{k} - z_{0}) \right]$$
(6)



Z

Abb. 2. Koordinatensystem mit Startereignis, Ereignisort und Lage des Sensors k. Mit $\vec{n}_k = \frac{1}{R_{k0}} (x_k - x_0, y_k - y_0, z_k - z_0)$ in Richtung vom Startereignis zum Sensor k.

und mit den Definitionen $\Delta d_k = t_k - t_{k0}$, $\Delta m_1 = t - t_0$, $\Delta m_2 = x_k - x_0$, $\Delta m_3 = y_k - y_0$ und $\Delta m_4 = z_k - z_0$ dann Gleichung (6):

$$\Delta d_k = \sum_{j=1}^4 G_{kj} \cdot \Delta m_j \qquad \qquad k = 1, 2, \dots, N.$$
(7)

In der Praxis wird Gleichung (7) auch in Fällen angewendet, in den der endgültige Ereignisort weit weg vom Startereignis liegt. Gleichung (7) wird dann iterativ angewendet, bis die berechneten Daten mit den gemessenen Daten und neuen partiellen Ableitungen in *G* im Rahmen des Beobachtungsfehler übereinstimmen. Konvergenz ist bei diesem Verfahren allerdings nicht garantiert. Zur weiteren Verbesserung des Ortungsverfahrens können neben der Einsatzzeitpunkte der Longitudinalwelle auch Transversalwelleneinsätze berücksichtigt werden. Das geschieht durch Anfügen weiterer Gleichungen der Form wie in Gleichung (7).

2.2 Relative Ortungsverfahren von benachbarten SE-Ereignissen

Relative Ortungsverfahren dienen zur Lokalisierung eines Ereignisses relativ zu einem benachbarten, bereits lokalisierten Ereignis; dem sogenannten Referenz- oder Masterereignis [5]. Die Daten sind die Longitudinal- und Transversalwellen-Differenzlaufzeiten Δt_k der beiden Ereignisse zu den weit gelegenen Sensoren k = 1, 2, ... N. Die Unbekannten sind die drei Relativkoordinaten x, y, z, die zum Vektor $\vec{L} = (x, y, z)$ zusammengefasst werden und die Differenz τ der Ursprungszeitpunkt der Ereignisse. Zu ihrer Bestimmung werden konstante Longitudinal- und Transversalwellengeschwindigkeiten im Volumen, das beide Ereignisse enthält, vorausgesetzt. Die Master-Event-Ortung kann auch nur dann angewendet werden, wenn die elastischen Wellen von Referenzereignis 1 und Ereignis 2 (rote Kreise in Abb. 3) zu jedem Sensor parallel verlaufen. Das ist erfüllt, wenn die Entfernungen der Ereignisse zu den Sensoren viel größer als der Abstand $L = |\vec{L}|$ sind. Nach Dreieck (12Q) in Abb. 3 gilt:

$$\Delta t_k = \tau - \frac{L \cdot \cos \vartheta_i}{c_L} = \tau - \frac{\vec{L} \cdot \vec{n}_k}{c_L} = \tau - \left(n_{kx} \cdot x + n_{ky} \cdot y + n_{kz} \cdot z \right) \qquad k = 1, 2, \dots, N.$$
(8)

Dann ist ein lineares Gleichungssystem der Form in Gleichung (7) für M = 4 Unbekannte:

$$d_k = \sum_{j=1}^{M} G_{kj} \cdot m_j \qquad k = 1, 2, ..., N.$$
(9)

und $d_k = \Delta t_k$, $m_1 = \tau$, $m_2 = x$, $m_3 = y$ und $m_4 = z$. Die Koeffizientenmatrix G_{kj} berechnet sich aus:

$$G_{k1} = 1, \ G_{k2} = -\frac{n_{kx}}{c_L}, \ G_{k3} = -\frac{n_{ky}}{c_L} \text{ und } G_{k4} = -\frac{n_{kz}}{c_L}.$$

Ein Vergleich von Gleichung (6) und (8) zeigt, dass die Linearisierung von Gleichung (4) exakt zur Master-Event-Ortung führt. Das Startereignis entspricht dem Referenzereignis 1 und der wahre Ereignisort dem benachbarten Ereignis 2. Im Unterschied zur Ortung von Einzelereignissen ist aber bei der Master-Event-Ortung keine Iteration, also mehrfache Anwendung von Gleichung (6), notwendig. Auch bei diesem Verfahren kann zur Verbesserung der Ortung die Transversalwelleneinsätze, durch Anfügen weiterer Gleichungen, berücksichtigt werden.



Abb. 3. Prinzip der Ortung von zwei zusammenliegenden Ereignissen 1 und 2 (rote Kreise) mit dem Richtungsvektor \vec{n}_k der elastischen Wellen in Richtung Sensor k.

Eine Erweiterung der einfachen Master-Event-Ortung führt dazu, dass z.B. nicht nur ein Referenzereignis (Master-Event) gewählt wird, sondern jedes Ereignis eines Clusters als Referenzereignis dient. Alle Ereignisse des Clusters werden dann simultan geortet. Grundlage des Ortungsalgorithmus ist wieder die Linearisierung von Gleichung (4). Dieser Ansatz wird in der sogenannten Doppelten-Differenzen(DD)-Ortung angewendet [6,7]. Die Laufzeitunterschied zwischen den Ereignissen *i* und *j*, die an den Sensoren *k* und *l* gemessen werden sind $\Delta t_k^{ij} = (t_k^i - t_k^j)^{mess}$ bzw. $\Delta t_l^{ij} = (t_l^i - t_l^j)^{mess}$ (grüne Kreise in Abb. 4). Aus den doppelten Differenzen zwischen gemessenen und berechneten Einsatzzeitpunkten für ein Paar der Ereignisse *i* und *j* am Sensor *k* ergeben sich die Laufzeitresiduen Δd_k^{ij} :

$$\Delta d_k^{ij} = \Delta t_k^{ij,mess} - \Delta t_k^{ij,ber} = \left(t_k^i - t_k^j\right)^{mess} - \left(t_k^i - t_k^j\right)^{ber}.$$
(10)

Nach zweimaliger Anwendung von Gleichung (7) ergibt sich ausgeschrieben:

$$\frac{\partial F_k^i}{\partial t} \Delta t^i + \frac{\partial F_k^i}{\partial x} \Delta x^i + \frac{\partial F_k^i}{\partial y} \Delta y^i + \frac{\partial F_k^i}{\partial z} \Delta z^i - \frac{\partial F_k^j}{\partial t} \Delta t^j - \frac{\partial F_k^j}{\partial x} \Delta x^j - \frac{\partial F_k^j}{\partial y} \Delta y^j - \frac{\partial F_k^j}{\partial z} \Delta z^j = \Delta d_k^{ij}.$$
(11)

In Gleichung (11) stehen die partiellen Ableitungen der Laufzeiten für die Ereignisse *i* und *j* bezogen auf ihre Ursprungszeiten und Orte. Δt , Δx , Δy , Δz sind die relativen Änderungen der Laufzeiten und Koordinaten zwischen den beiden Ereignissen damit eine Anpassung der berechneten an die gemessenen Daten erfolgt.



Abb. 4. Prinzip der Ortung von zwei benachbarten Ereignissen 1 und 2 (rote Kreise) mit dem Richtungsvektor \vec{n}_i der elastischen Wellen in Richtung zum Sensor *i*.

Durch Kombination von allen möglichen Ereignispaaren für alle Sensoren entsteht ein System von linearen Gleichungen der Form:

$$\boldsymbol{d} = \boldsymbol{G} \cdot \boldsymbol{m}. \tag{12}$$

G ist eine Matrix der Größe $M \times 4N$ (*M* ist die Anzahl der Doppeldifferenzen und *N* Anzahl der Ereignisse) mit den partiellen Ableitungen, *d* ist ein Datenvektor mit den Doppeldifferenzen und *m* ist ein Vektor der Länge 4N mit den Änderungen Δt , Δx , Δy , Δz (Abb. 5).

Ein wichtiger Aspekt der Relativlokalisierung mit Differenzlaufzeiten besteht auch darin, dass Differenzlaufzeiten für ähnliche Wellenformen viel genauer bestimmt werden können als automatisch oder handgepickten Einsatzzeiten. Dazu können z.B. Kreuzkorrelationen zwischen den Wellenformen an einem Sensor von zwei unterschiedlichen Ereignissen benutzt werden.

3 Anwendungen

3.1 Zum Experiment

Zur Anwendung der oben beschriebenen Ortungsverfahren werden geeignete SE-Ereignisse ausgewählt, die im Rahmen eines Forschungs- und Entwicklungsvorhabens des Instituts für Gebirgsmechanik (IfG) in Leipzig detektiert wurden. Mit den SE-Messungen wurde während sogenannten hydraulischen Aufreißversuchen (Frac-Versuche) die Rissbildung mit dem Ziel verfolgt, die Risslage und -ausdehnung zu bestimmen, um eine Aussage zum vorherrschenden Spannungsverlauf im Gebirge treffen zu können [8].

Die hydraulischen Frac-Versuche im Salzbergwerk Bernburg fanden von Dezember 1994 bis Februar 1995 auf der 420-m-Sohle im Leinesteinsalz statt [9]. Das Versuchsfeld befand sich in einem Barrierepfeiler zwischen der Zufahrtsstrecke XVIII und der westlichen Seitenwand einer riesigen Abbaukammer von 120 m Länge, 25 m Breite und 30 m Höhe in etwa 20 m Entfernung (Abb. 5a). Aufgrund der großen Hohlräume steht der Barrierepfeiler unter hohen Druck- und Differenzspannungen mit maximalen und minimalen Hauptspannungen von ca. 25 bzw. 10 MPa. In einer horizontalen Injektionsbohrung (Durchmesser 42 mm, Länge ca. 12 m; markiert durch eine rote horizontale Linie in Abb. 5) wurden sechs Frac-Versuche mit Refrac-Versuchen mit einem injizierten Ölvolumen von 100 bzw. 300 ccm und Injektionszeitintervallen von 15 min durchgeführt. Acht AE-Bohrlochsensoren (Abb. 5b) wurden in vier Beobachtungsbohrungen (10 m Länge, 100 mm Durchmesser) um die zentrale Injektionsbohrung platziert.



Abb. 5. Hydraulische Frac-Versuch im Salzbergwerk Bernburg. (a) Versuchsort auf der 420-m-Sohle in der Nähe von riesigen Abbaukammern mit der ca. 12 m langen horizontalen Injektionsbohrung (rote Linie). (b) Messbohrungen mit Lage der acht Bohrlochsensoren (blaue Punkte). (c) Berechnetes Spannungsfeld (Kreuze) am Versuchsort zusammen mit den Konturen der Zufahrtsstrecke (links) und der riesigen Abbaukammer (rechts) [9].

3.1 Gesamtübersicht der Ortungen

Während der Frac-Versuche wurden insgesamt 735 Ereignisse einzeln mit dem Gradientenverfahren geortet, die ein einer Gesamtübersicht in Projektionen auf die 3 Koordinatenebenen in Abb. 6 dargestellt sind.



Abb. 6. Projektionen auf die drei Koordinatenebenen bei der Frac-Serie im Salzbergwerk Bernburg. Die rote Linie stellt die Lage der Injektionsbohrung dar. Die georteten Ereignisse beim Frac-Versuch in 7,2 m Bohrlochteufe sind durch einen grünen Kreis markiert.

Die Abbildung zeigt die SE-Ereignisse in einer Aufsicht von oben (x-y-Ebene) und zwei Seitenansichten (x-z-Ebene und y-z-Ebene). Der Ursprung des lokalen Koordinatensystems befindet sich im Ansatzpunkt der Injektionsbohrung (rote Linie). Die Lage der Injektionsintervalle wird durch die Ortungen in der x-y-Ebene und der y-z-Ebene wiedergegeben.

Die Ereignisse, die direkt aus dem Injektionsintervall stammen, liegen vorzugsweise quer, d.h. normal zur Bohrlochachse und sind deutlich auf fast kreisförmigen Flächen mit einem Durchmesser von 1 bis 1,8 m angeordnet. Auffällig ist, dass die Rissflächen der Frac-Versuche in größeren Bohrlochteufen um ca. 27° bis 30° zur vertikalen Achse (z-Achse) geneigt sind. Die Orientierung dieser Rissflächen (sogenannte transversal Risse) stimmt bemerkenswert gut mit der Orientierung der berechneten Hauptspannungen überein (Vergleich der y-z-Ebene in Abb. 6 mit Abb. 5c).

3.2 Anwendung von absoluten und relativen Ortungsverfahren

Zur Anwendung von absoluten und relativen Ortungsverfahren werden die Ereignisse des Frac-Versuchs in 7,2 m Bohrlochteufe herangezogen (grüner Kreis in Abb. 6). Abb. 7 zeigt die drei Projektionsebenen mit dem Verlauf der Injektionsbohrung in y-Richtung (rote Linien). Dargestellt sind 169 geortete Ereignisse des Frac- und Refrac-Versuchs zusammen. Die meisten Ereignisse liegen konzentriert um das Injektionsintervall. In der y-z-Ebene (oben rechts) ist zu erkennen, dass die Rissfläche in zwei Teile zerfällt. Beide Flächen haben eine ähnliche Neigung von ca. 27° gegenüber der z-Achse und liegen parallel zueinander. Im Folgenden werden die Ereignisse betrachtet, die aus der fast kreisförmigen Hauptrissfläche (grünes Oval) stammen. Diese Ereignisse liegen eng beieinander und erfüllen damit die Voraussetzung für die relative Ortung mit und ohne Referenzereignis.



Abb. 7: Projektionen auf die drei Koordinatenebenen bei dem Frac- und Refrac-Versuch in 7,2 m Bohrlochteufe. Die rote Linie stellt die Lage der Injektionsbohrung dar. Das grüne Oval kennzeichnet die Ereignisse der Hauptrissfläche.

Abb. 8 bis 10 zeigen die Projektion auf die y-z-Ebene von 150 Ortungen, die aus der Hauptfläche des Frac-Versuchs in 7,2 m Bohrlochteufe stammen (grünes Oval in Abb. 7). In dieser Ansicht ist die Lage und Ausdehnung der querliegenden Rissfläche als Linie gut zu erkennen. Dargestellt sind in Abb. 8 die Ortungsergebnisse des Gradientenverfahrens (a), Ortung durch Linearisierung (b) und nach dem Master-Event-Verfahren (c). Der Ort der Schallquellen wurde aufgrund der sich aus den automatisch bestimmten Einsatzzeiten ergebenden Zeitdifferenzen und den gemessenen Schallgeschwindigkeiten der Longitudinalwelle ($c_L = 4,5 \ m/ms$) und der Transversalwelle ($c_T = 2,6 \ m/ms$) mit den drei Ortungsverfahren bestimmt. Die Teilbilder zeigen, dass die Lage und Ausdehnung der Rissfläche bei allen drei Ortungsverfahren gleich groß sind. Bei dem Master-Event-Verfahren (c) liegen die Ortungen wesentlich konzentrierter entlang der Rissfläche und streuen bei Weitem nicht so stark, wie es bei der herkömmlichen Ortung in Abb. 8 (a) und (b) zu sehen ist.



Abb. 8: Projektion auf die y-z-Ebene von 150 georteten SE-Ereignisse des Frac-Versuchs in 7,2 m Bohrlochteufe. Die rote Linie stellt die Lage der Injektionsbohrung dar. (a) Ergebnis der Ortung nach dem Gradientenverfahren, (b) nach Linearisierung und (c) nach dem Master-Event-Verfahren.

In Abb. 9 sind die bei den genannten Ortungsverfahrenn festgestellten Fehlerhäufigkeiten als Histogramm gezeigt. Der Ortungsfehler berechnet sich aus der Summe der an den einzelnen Sensoren festgestellten Laufzeitresiduen der L- und T-Welle. Eine Verbesserung der Ortungsgenauigkeit bei dem Master-Event-Verfahren ist nicht zu erkennen. Der mittlere Ortungsfehler beträgt 9 bis 11 cm.

Ein ähnliches Ergebnis wie in Abb. 8 ergibt die Ortung mit dem doppelten Differenzenverfahren (Abb. 10). Als Eingangsdaten wurden in Gleichung (12) die aus den drei Ortungsverfahren berechneten Einsatzzeiten zur Bildung der doppelten Differenzen der Longitudinal- und Transversalwellen eingesetzt. Bei der Bildung des Gleichungssystems wird jedes Ereignis des Clusters als Referenzereignis verwendet. Das sind bei 150 Ereignissen, 8 Sensoren und jeweils zwei Einsatzzeiten (L- und T-Einsatzzeiten) 60.915 Gleichungen mit 600 Unbekannten. Bei der Aufstellung des Gleichungssystems wurden nur die Sensoren berücksichtigt, an denen auch die Einsatzzeiten zur Ortung herangezogen wurden. Zur Lösung dieses großen Gleichungssystems wurde die Singulärwertzerlegung (SVD) gewählt.



Abb. 9: Häufigkeit von Ortungsfehlern für die drei Ortungsverfahren (a) Gradientenverfahren, (b) nach Linearisierung und (c) Master-Event-Verfahren.



Abb. 10: Darstellung wie in Abb. 8. Ortungsergebnis des doppelten Differenzenverfahrens aus den berechneten Einsatzzeiten (a) mit dem Gradientenverfahren, (b) mit Linearisierung und (c) mit dem Master-Event-Verfahren.

Die Ergebnisse zeigen, dass die relativen Ortungsverfahren mit und ohne Referenzereignis die Rissfläche zwar scharf abbilden, jedoch ohne Verbesserung der Ortungsgenauigkeit. Zur Beurteilung des Ortungsfehlers zeigt Abb. 11 beispielhaft die Wellenformen eines SE-Ereignisses mit den markierten Einsatzzeitpunkten der Longitudinal- und Transversalwelle. In dieser Abbildung sind jeweils oberhalb des Signals die gemessenen Einsatzzeitpunkte (grüne senkrechte Striche) und unterhalb des Signalzuges sind die berechneten Einsatzzeiten (rote senkrechte Striche) zu sehen. Die gestrichelte senkrechte Linie markiert die Ursprungszeit des Ereignisses.



Abb. 11: Beispiel von Signalformen eines SE-Ereignisses mit den gemessenen (grüne Striche) und berechneten (rote Striche) Einsatzzeiten. Die gestrichelte Line markiert die Ursprungzeit des Ereignisses. Die Zahlen am Ende der Spur geben die Maximalamplituden in Millivolt an.

Stimmen die berechneten Einsatzzeitpunkten mit den dargestellten Einzelheiten des Signals überein, dann kann davon ausgegangen werden, dass die Triggerzeitpunkte richtig erkannt wurden und die Ortung richtig ist. Das ist allerdings nicht der Fall bei Sensor 2 und 5. Eine Verbesserung der Ortung kann erreicht werden, wenn diese systematischen Fehler eliminiert werden. Dazu wird der (zeitliche) Fehler bei der Ortung an den einzelnen Sensoren über alle Ortung berechneten Einsatzzeiten (diese Differenz ist das schon genannte Residuum) zu finden. Für die Ortung wirksam werden allerdings nur die Unterschiede dieser systematischen Abweichungen von einer über alle Sensoren gemittelten Abweichung. Dies geschah iterativ, indem alle Ereignisse des Frac-Versuchs mehrere Male mit den jeweils ermittelten Laufzeitkorrekturen geortet wurden. Aus den so bestimmten Laufzeitkorrekturen wurde örtliche Sensorkorrekturen in die drei Koordinatenrichtungen (sogenannter Fehlerellipsoid) berechnet. Daraus ergaben sich Korrekturen von 2 cm an Sensor 3 bis 37 cm an Sensor 2. Dieses Vorgehen entspricht dem sogenannten "Joint Hypocenter Determination" (JHD-Verfahren) [10,11].

Wie Abb. 12 zeigt erbrachte die Verwendung der Sensorkorrekturen eine deutliche Verringerung der Laufzeitresiduen. An allen Sensoren stimmen nun die gemessenen und berechneten Einsatzzeiten der Longitudinal- und Transversalwelle sehr gut überein. Die Verringerung der Laufzeitresiduen führt zu einer wesentlichen Verbesserung der Ortungsgenauigkeit. Der mittlere Ortungsfehler liegt nun bei ca. 2 bis 3 cm (Abb. 13).



Abb. 12: Darstellung wie in Abb. 11 nach Korrektur der Sensorpositionen.



Abb. 13: Häufigkeit von Ortungsfehlern nach Korrektur der Sensorpositionen für die drei Ortungsverfahren (a) Gradientenverfahren, (b) nach Linearisierung und (c) Master-Event-Verfahren.

Abb. 14 zeigt die Ortungsergebnisse nach Korrektur der Sensorpositionen mit dem Gradientenverfahren (a), Ortung durch Linearisierung (b) und dem Master-Event-Verfahren (c). Alle Teilbilder zeigen ein wesentlich verbessertes und nahezu gleiches Ortungsbild. Die Ereignisse liegen jetzt sehr konzentriert entlang der linienförmigen Risskontur. Die Streuungen bei den absoluten Ortungsverfahren ohne Sensorkorrekturen (Abb. 8 (a) und (b)) treten nicht mehr auf.



Abb. 14: Darstellung wie in Abb. 8 nach Korrektur der Sensorpositionen. Ortungsergebnis (a) nach dem Gradientenverfahren, (b) nach Linearisierung und (c) nach dem Master-Event-Verfahren.

4 Zusammenfassende Diskussion

In dieser Studie wurden neben Verfahren zur absoluten Ortung von Einzelereignissen auch Algorithmen zur relativen Ortung mit und ohne Referenzereignis auf ein Cluster von SE-Ereignissen angewendet, bei denen der Abstand der Ereignisse viel kürzer ist als der Abstand zwischen dem Schwerpunkt des Clusters und den Sensoren. Zur Anwendung der Ortungsverfahren wurden geeignete SE-Ereignisse ausgewählt, die während eines hydraulischen Frac-Versuchs im Salzbergwerk Bernburg im massiven Salzgestein erzeugt wurden. Diese Ereignisse liegen eng beieinander und erfüllen damit die Voraussetzung für eine relative Ortung.

Die hier vorgelegten Ergebnisse zeigen, dass bei dem relativen Master-Event-Verfahren die Ortungen wesentlich konzentrierter entlang der Rissfläche liegen und bei Weitem nicht so stark streuen, wie es bei der herkömmlichen absoluten Ortungsverfahren der Fall ist. Eine wesentliche Verbesserung der Ortungsgenauigkeit mit dem Master-Event-Verfahren ist nicht zu erkennen. Die mittleren Ortungsfehler liegen unabhängig von der Ortungsverfahren im Bereich von 9 bis 11 cm. Die kleinen Verschiebungen gegenüber des Referenzereignisses führen bei der Master-Event-Ortung zwar zu einer strukturellen Verbesserung innerhalb des Clusters. Die Ausdehnung des Fehlerellipsoids bleibt jedoch unverändert.

Bei relativen Ortungsverfahren wird davon ausgegangen, dass die wahren strukturabhängigen Residuen absolut korrekt aus dem Referenzereignis gewonnen werden können, jedoch sind in den Messwerten des Referenzereignisses selbst Fehler vorhanden. Eine Verbesserung der Ortungsgenauigkeit wird erst dann erzielt, wenn eine Korrektur der Sensorpositionen nach Verringerung der Laufzeitresiduen unter Verwendung des gesamten Datensatzes vorgenommen wird. Dadurch wird die Ortungsgenauigkeit unabhängig vom Verfahren bis zu einem Faktor 5 erhöht.

Referenzen

- [1] Eisenblätter, J., Manthei, G., Meister, D. (1998). Monitoring of Microcrack Formation around Galleries in Salt Rock. In Hardy, H.R. Jr. (ed) (1998), Proc. 6th Conf. on Acoustic Emission/Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials. Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, 227–243.
- [2] Vallen, H. (2003), Die Schallemissionsprüfung, Castell-Verlag GmbH, Wuppertal.
- [3] Eisenblätter, J. (1980). Einführung in die Schallemissionsanalyse. In Schallemission, Einführungskurs und Praktikum, Battelle-Institut e.V.
- [4] Geiger, L. (1910), Herdbestimmung bei Erdbeben aus den Ankunftszeiten. Nachrichten von der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch- Physikalische Klasse, 331-349. (In 1912 translated to English by Peebles, F. W. L., and Corey, A. H.: Geiger, L. (1912). Probability method for the determination of earthquake epicenters from the arrival time only. Bulletin St. Louis University, 8, 60–71.
- [5] Havskov, J., Bormann, P., Schweitzer, J. (2012 online). Seismic source location. In: Bormann, P. (Ed.), New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP-2), Potsdam: Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, 1–36, doi:10.2312/GFZ. NMSOP-2_IS_11.1.
- [6] Waldhauser, F., Ellsworth, W. L. (2000). A double-difference earthquake location algorithm: method and application to the northern Hayward fault, California. Bull. Seism. Soc. Am., 90, 1353–1368, doi:10.1785/0120000006.
- [7] Waldhauser, F. (2001). hypoDD A Program to Compute Double-Difference Hypocenter Locations: U.S. Geological Survey Open-File Report 01-113, 25, https://pubs.usgs.gov/of/2001/0113/.
- [8] Manthei, G., Plenkers, K. (2018). Review on In Situ Acoustic Emission Monitoring in the Context of Structural Health Monitoring in Mines, Applied Sciences, 8, 1595, doi:10.3390/app8091595.
- [9] Manthei, G., Eisenblätter, J., Dahm, T. (2001). Moment tensor evaluation of acoustic emission sources in salt rock, Construction and Building Materials, 15, 2001, S. 297–309.
- [10] Douglas, A. (1967). Joint hypocenter determination. Nature, 215, 47–48.
- [11] Pujol, J. (2000). Joint event location the JHD technique and applications to data from local networks. In: Thurber Rabinowitz (2000), 163–204.