

Zusammenfassung

Kluftnetzwerke in unterirdischen Reservoiren sind wichtige Fließwege für Fluide und daher ein entscheidender Faktor bei der Entwicklung geothermischer Systeme. Sie sind jedoch schwer zu charakterisieren, da sie in der Regel nicht direkt zugänglich sind. Gegenstand dieser Dissertation ist die Untersuchung der induzierten Seismizität in sogenannten Enhanced geothermal systems zur Charakterisierung des unterirdischen Kluftnetzwerks. Ziel ist das Erlangen eines besseren Verständnisses der Strukturen, die den Fluidfluss steuern, und der Prozesse, die für die induzierte Seismizität verantwortlich sind.

Der erste Teil dieser Arbeit konzentriert sich auf die Fallstudie des tiefen geothermischen Reservoirs Rittershoffen. Es wird gezeigt, wie die Integration moderner Analysemethoden wie Template Matching Detection, relative Erdbebenlokation und Waveform-Clustering zu einem tieferen Einblick in die Struktur des Störungssystems und seiner Reaktion auf wiederholte Fluidinjektion führen kann. Die Bohrung GRT1 in Rittershoffen bietet einzigartige Bedingungen für eine solche Untersuchung. Es wurde einer Sequenz bestehend aus thermischer, chemischer und hydraulischer Stimulation unterzogen, wodurch sich die Möglichkeit ergibt, die seismische Reaktion des Störungssystems auf Fluidinjektionen mit verschiedenen operativen Parametern zu überwachen. Durch die angewandte Methodik in der Datenprozessierung konnte ein deutlich höherer Detailgrad in der zeitlichen und räumlichen Auflösung der induzierten Seismizität erreicht werden als in vorhergehenden Studien.

Das Ergebnis zeigt die Entwicklung des sukzessiv aktivierten Störungssystems über die verschiedenen Injektionsschritte hinweg. Dies ermöglicht den Einfluss der verschiedenen Stimulationen auf das Reservoir nachzuvollziehen sowie eine Analyse der Mechanismen, die zu der induzierten Seismizität führten. Zwei räumlich getrennte Störungssegmente wurden im Verlauf der Stimulationssequenz seismisch aktiv, eines während der Injektionen selbst, das andere ganz am Ende der hydraulischen Stimulation und ein weiteres Mal vier Tage nach Einstellen der Fluidinjektion. Die seismischen Ereignisse assoziiert mit diesen beiden Störungssegmenten zeigen deutliche Unterschiede in Bezug auf räumlich-zeitliche Migration und Wellenformen, was auf unterschiedliche Aktivierungsmechanismen beider Störungen hindeutet. Die Seismizität auf der ersten Störung zeigt ähnliche Charakteristika für thermische und hydraulische Stimulation in dem Bereich des Reservoirs, der während beider Injektionsvorgänge seismisch aktiv war. Das gut charakterisierte geologische Umfeld und die einzigartige Stimulationsabfolge ermöglichen in Kombination mit der detaillierten Analyse ein tieferes Verständnis der hydromechanischen Wechselwirkungen im Reservoir und zeigen eine Änderung des mechanischen Zustands der ersten Störung zwischen dem Einsetzen der Seismizität während der thermischen und der hydraulischen Stimulation.

Im Fall der in Rittershoffen induzierten Seismizität machte die relative Relokalisierung der Ereignisse zwei planare Störungssegmente sichtbar, deren Orientierungen und Ausdehnungen gut eingegrenzt werden konnten. In anderen Fällen kann es jedoch sein, dass trotz genauer Verortung der induzierten seismischen Ereignisse das zugrundeliegende Störungssystem im Reservoir unklar bleibt, weil die Seismizität eine räumlich dichte Wolke bildet, wodurch einzelne Strukturen schwer zu identifizieren sind. Deshalb wird im zweiten Teil dieser Arbeit eine neue Methode vorgeschlagen, um das Störungsnetzwerk in seismischen Wolken, die keine klar ersichtlichen planaren Strukturen bilden, sichtbar zu machen. Mit dieser Methode wird aus der Verteilung der seismischen Ereignisse und weiterer ihrer Eigenschaften die Wahrscheinlichkeit der Lokation einer Kluft an einem bestimmten Ort berechnet. Das Ergebnis hat die Form eines sogenannten Pseudo



Probabilistic Fracture Network (PPFN). Im Gegensatz zu anderen Methoden, die zum Ziel haben, Kluffnetzwerke in seismischen Wolken zu identifizieren, berücksichtigt das PPFN nicht nur die Hypozentren der seismischen Ereignisse, sondern auch deren Magnituden und Herdflächenlösungen, um einen engeren Zusammenhang mit den geophysikalischen Eigenschaften der Erdbeben zu erhalten.

Das Grundprinzip der PPFN Identifizierung besteht darin, die Konnektivität zwischen einer beliebigen räumlichen Position in der seismischen Wolke und den einzelnen seismischen Ereignissen abzuschätzen. Dies geschieht auf der Grundlage der Entfernung jedes räumlichen Punktes zu jedem Ereignis, der minimalen Größe der Bruchfläche, die von der Magnitude der Ereignisse abgeleitet wird, und der Orientierung, die durch die Herdflächenlösungen bereitgestellt wird. Die Methode wird an synthetischen Datensätzen getestet, wobei gezeigt wird, dass sie in der Lage ist, Störungsflächen zu reproduzieren, die in einer Wolke zufällig verteilter seismischer Ereignisse liegen. Die PPFN Identifizierung wird dann auf die seismische Wolke angewendet, die während der Stimulation der Bohrung GPK2 am Geothermiestandort Soultz-sous-Forêts induziert wurde. Das Ergebnis zeigt eine prominente Störung im tiefen, nördlichen Teil der seismischen Wolke, was in Übereinstimmung mit früheren Studien steht, sowie eine kleinere Struktur im südlichen oberen Bereich, die ein Zweig der Hauptstörung sein könnte.