



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit



**Förderprogramm des BMU zu Forschung und Entwicklung im Bereich
Geothermie**

**Verbundprojekt MAGS: Konzepte zur Begrenzung der mikroseismischen
Aktivität bei der energetischen Nutzung geothermischer Systeme im tiefen
Untergrund, Koordination, EP3 (Echtzeitauswertung induzierter Erdbeben) und
EP4 (Seismische Gefährdung)**

FKZ: 0325191A, 0325191B, 0325191C, 0325191D, 0325191E

Projektpartner: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (Koordinator); Karlsruher Institut für Technologie (KIT) - Fakultät für Physik - Geophysikalisches Institut; Ludwig-Maximilians-Universität München - Fakultät für Geowissenschaften - Department für Geo- und Umweltwissenschaften - Sektion Geophysik; Freie Universität Berlin - Fachbereich Geowissenschaften - Institut für Geologische Wissenschaften; Technische Universität Clausthal - Energie-Forschungszentrum Niedersachsen

Zuwendungssumme: 2.034.274 EUR

Laufzeit: 01.05.2010 – 30.04.2013

MAGS – Mikroseismische Aktivität geothermischer Systeme

Die Projektdarstellung sowie die Beschreibung der Einzelprojekte sind im Wesentlichen den Vorhabensbeschreibungen der Einzelprojekte entnommen. Eine kurze Darstellung des Projekts ist auf der BGR-Seite zu finden unter

http://www.bgr.bund.de/clin_109/nn_335066/sid_55C6159E566BC7ECBD52836C26F37352/DE/Themen/Seismologie/Projekte/wegler__mags.html?__nnn=true

Motivation

Der weltweit weiter anwachsende Energiebedarf wird derzeit vorwiegend aus fossilen Brennstoffen gewonnen. Hierdurch steigt der CO₂-Anteil in der Erdatmosphäre, was zu einer unerwünschten Klimaerwärmung führen kann. Die Nutzung der tiefen Geothermie soll zukünftig einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz und einer zukunftsfesten Energieversorgung leisten. Ein wesentlicher Vorteil geothermischer Energie ist ihre Verfügbarkeit unabhängig von Tageszeiten, saisonalen Schwankungen und Witterungsbedingungen. Sie ist damit sowohl grundlastfähig als auch eine saubere Energieversorgung unabhängig von fossilen Rohstoffen. Laut eines Berichts zur Geothermie, den das Bundeskabinett am 13. Mai 2009 beschlossen hat, sollen bis zum Jahr 2020 ca. 280 Megawatt Leistung zur geothermischen Stromerzeugung installiert sein. Bei einer Leistung von ca. 5 MW pro Kraftwerk entspricht dies mehr als 50 Kraftwerken. Nach 2020 wird mit einer Beschleunigung des Wachstums und einer installierten elektrischen Leistung von 850 MW bis 2030 gerechnet. Dieser Ausbau der Geothermie ist derzeit durch das Auftreten induzierter Erdbeben in der Nähe geothermischer Kraftwerke gefährdet. Nach einem induzierten Erdbeben in Basel wurde das dortige Geothermieprojekt gestoppt. In Deutschland traten in der Nähe des Geothermiekraftwerks Landau Erdbeben auf, die zu Beunruhigungen in der Bevölkerung führten. Auch in Soultz-sous-Forêts (Elsass) und in Unterhaching traten induzierte Erdbeben im Zusammenhang mit der Geothermie auf. Für die Akzeptanz der Energiegewinnung aus tiefer Geothermie ist es entscheidend, wissenschaftlich klar darzulegen, ob diese Seismizität auf Mikrobeben begrenzt bleibt oder ob eine Gefahr für Menschen und Gebäude von den induzierten seismischen Ereignissen ausgehen könnte.

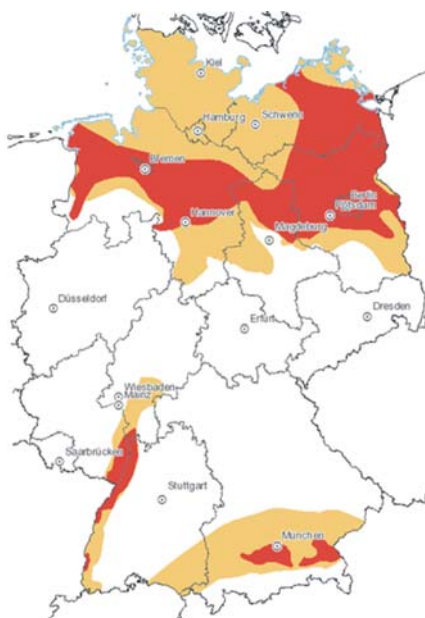


Abbildung 1: Gebiete für hydrothermale Nutzung nach Schulz et al. (2007). Ocker zeigt eine Aquifertemperatur von 60°C an; rot entspricht einer Aquifertemperatur von 100°C.

Norddeutsches Becken, Oberrheingraben sowie die Molasse sind die Schwerpunktregionen für hydrothermale Geothermie, die deshalb im Verbundprojekt untersucht werden sollen.

Induzierte Seismizität

Als induzierte Seismizität bezeichnet man Erdbebenaktivität, welche durch menschlichen Eingriff in den Untergrund verursacht wird (Gupta & Chadha, 1995; McGarr et al., 2002). Solche Eingriffe sind beispielsweise das Einbringen von Fluiden in den Untergrund, untertägiger Bergbau oder der Aufbau extremer Auflasten (z.B. bei Staudämmen; Abbildung 2). Man unterscheidet zwischen direkt induzierten Erdbeben (z.B. durch Hohlraumbildung im Bergbau oder unter hohem Druck, um z.B. notwendige Fluid-Wegsamkeiten innerhalb geothermischer Reservoirs zu schaffen und ausgelösten Erdbeben an tektonisch vorgespannten Verwerfungen (s.u.). Eine, durch Änderung des Fluidhaushaltes im Gebirge verursachte, Erdbebenaktivität ist von mehreren geothermischen Standorten bekannt (Majer et al., 2007), jedoch ist die Stärke der Erdbeben, vor allem im Vergleich mit natürlichen Ereignissen, relativ gering. Die gemessene Lokalmagnitude (M_L) bleibt meist unter 3. Die von der Bevölkerung verspürte Intensität (I) ist stark standort- bzw. untergrundabhängig; meist bleibt die Intensität unter der Stufe V (Grünthal, 1998), d.h. Schäden treten selten auf.

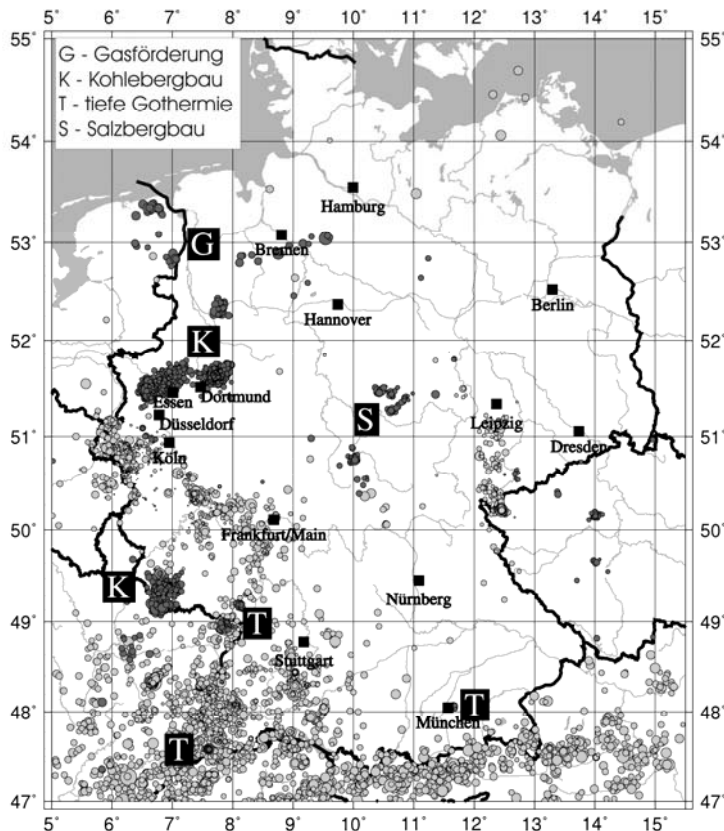


Abbildung 2: Natürliche (grau) und vermutlich induzierte (schwarz) Erdbeben in Deutschland (BGR-Katalog). Die möglichen Ursachen sind jeweils durch Buchstaben indiziert.

Physikalisch können direkt induzierte und ausgelöste (getriggerte) Seismizität im Umfeld geothermischer Anlagen folgendermaßen unterschieden werden:

a) Direkt induzierte Erdbeben entstehen i.a. beim Aufbrechen des Gebirges durch hohe Wasserdrücke zur Stimulation, d.h. Rissbildung, um Wegsamkeiten für Fluide zu schaffen (Baisch & Harjes, 2003; Charléty et al., 2007).

Hierfür werden Teilbereiche eines Bohrlochs verschlossen, worin dann ein Druck erzeugt wird, der die minimale Hauptspannung des Gebirges überschreitet. Meist kann sich dann ein Bruch senkrecht zu dieser Richtung ausbreiten. Direkt induzierte

Erdbeben und ihre Stärke korrelieren stark mit der Amplitude des eingebrachten Drucks und ihr zeitliches Auftreten ist ebenfalls eng mit dem Einpress-Zeitraum verbunden, wobei nach Beendigung des Einpressens noch Ereignisse auftreten, welche dann aber auch ausgelöst (getriggert) sein können.

b) Ausgelöste (getriggerte) Erdbeben benötigen eine tektonisch vorgespannte Verwerfung (Simpson, 1986). An dieser wirken Scherkräfte, wobei die auf der Verwerfung senkrecht stehende Normalspannung einer Scherbewegung entgegensteht – diese presst sozusagen die Verwerfung zusammen. Durch Fluide ergibt sich wegen des Porendrucks eine Reduzierung der Normalspannung, d.h. eine kleinere effektive Spannung wird wirksam, und somit eine Verringerung des Zusammenpressens der Verwerfungsflächen (Abbildung 2). Dadurch kann die vorgespannte Fläche mit einer geringeren Scherspannung bewegt werden als ohne das Vorhandensein von Fluiden (McGarr et al., 2002; Shapiro et al., 2005). Die Stärke der ausgelösten Erdbeben hängt von der tektonischen Spannung, den Größen der existierenden Verwerfungsflächen und den Parametern des Pumpbetriebs (Fluiddruck und -menge) ab.

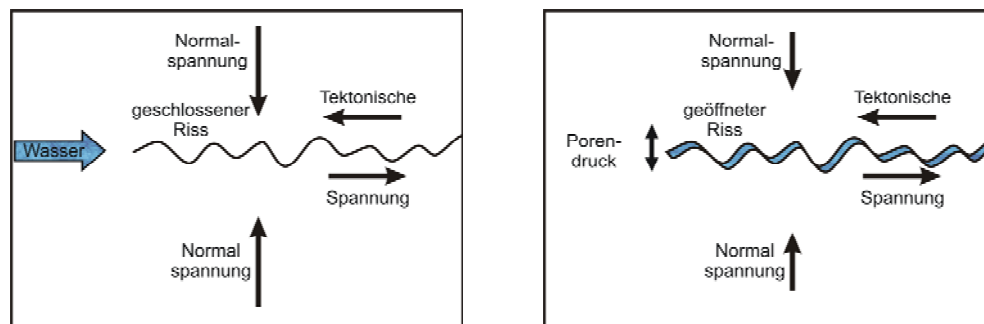


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Öffnung eines präexistenter Risses durch herabsetzen der Scherspannung bei Fluidinjektion

Die seismische Überwachung der Reservoirs und die Auswertung der registrierten Seismizität hat wesentlich zum heutigen Verständnis der Interaktion zwischen eingepresstem Fluid und dem umgebenden Gestein beigetragen. Hierdurch konnte der Kenntnisstand hinsichtlich der Auslösemechanismen fluidinduzierter Erdbeben erweitert werden. Des Weiteren können die aufgezeichneten seismischen Ereignisse für eine Charakterisierung des Reservoirs herangezogen werden (Warpinski et al., 1998, 2001). Dabei ermöglicht die präzise Lokalisierung eine detaillierte Abbildung der aktivierten Bruchsysteme (Rowe et al., 2002). Die Analyse der zeitlich-räumlichen Entwicklung der Seismizität erlaubt die Abschätzung von hydraulischen Kenngrößen wie die Permeabilität des stimulierten Reservoirs (Shapiro et al., 2002, Dinske et al., 2010).

Projektbeschreibung

Im Rahmen des Forschungsverbundes MAGS sollen Konzepte zur Begrenzung der mikroseismischen Aktivität bei der energetischen Nutzung geothermischer Systeme im tiefen Untergrund entwickelt werden. Hierzu soll die Seismizität an deutschen Standorten der tiefen Geothermie zunächst möglichst genau charakterisiert werden. Die seismische Gefährdung an Standorten, die Seismizität im Kraftwerkbetrieb zeigen, soll berechnet und mit der Gefährdung durch natürliche Erdbeben am selben

Standort verglichen werden. Des Weiteren sollen Strategien zur Vermeidung spürbarer Seismizität bei hydraulischen Stimulationen und im Dauerbetrieb geothermischer Kraftwerke entwickelt werden. Schließlich soll das Verbundprojekt zu einem verbesserten Prozessverständnis zum Entstehen fluidinduzierter Erdbeben beitragen.

Einen Schwerpunkt der Forschungsarbeiten werden hydrothermale Systeme bilden, da hier für die nahe Zukunft die meisten Anwendungen zu erwarten sind. Abbildung 1 zeigt die geothermischen Potentiale in Deutschland (Schulz et al., 2007). Hiernach ist eine hydrothermale Nutzung in der Molasse, im Oberrheingraben sowie im norddeutschen Becken zu erwarten, in Form von Nutzung stimulierter geothermischer Systeme (enhanced geothermal system - EGS) aber auch in anderen Gebieten, z.B. im Kristallin Sachsens. Diese Regionen bilden daher die geographischen Schwerpunkte der im Verbundvorhaben untersuchten Gebiete. Abbildung 2 zeigt hierzu im Vergleich die natürliche und bergbauinduzierte Seismizität in Deutschland. Es zeigen sich deutliche Unterschiede: Während der Oberrheingraben eine hohe natürliche Seismizität aufweist, ist diese im norddeutschen Becken äußerst gering.

Im Rahmen des Verbundprojektes sollen drei Zeitabschnitte während des Baus und des Betriebs eines geothermischen Kraftwerks analysiert werden:

- vor Bohrbeginn: bisher Abschätzung des Fündigkeitsrisikos durch den Investor
Hierbei konzentrierten sich die Analysen bisher auf eine Abschätzung der Temperatur und der hydraulischen Permeabilität des Zielaquifers. Als weiterer wichtiger Parameter, der abgeschätzt werden muss, kommt nun auch die seismische Gefährdung hinzu. Erste Erfahrungswerte scheinen aber zu zeigen, dass die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von induzierten Erdbeben in Gebieten hoher natürlicher Seismizität höher ist als in Gebieten geringer natürlicher Seismizität.
- während der hydraulischen Stimulationen
Die Rissbildungen, die in vielen Fällen erforderlich sind, um ein geothermisches Reservoir zu erzeugen, entsprechen aus geophysikalischer Sicht Mikrobeben. Die hydraulischen Parameter der Stimulation müssen hierbei so eingestellt werden, dass einerseits ausreichend Risse im Untergrund erzeugt und andererseits die seismische Gefährdung im Rahmen bleibt. Im Vergleich zu den Standardverfahren der seismischen Gefährdungsanalyse muss hier aber berücksichtigt werden, dass die seismische Gefährdung zeitabhängig ist und sich im Laufe von Tagen ändern kann. Es sollen Methoden entwickelt werden, die die seismische Gefährdung während hydraulischer Stimulationen zeitabhängig berechnen. Des Weiteren sollen Kriterien entwickelt werden, wie beim Erreichen bestimmter Gefährdungsgrenzwerte die hydraulischen Parameter während der Stimulation modifiziert werden müssen.
- Dauerbetrieb des geothermischen Kraftwerks
Hierbei wurde bis vor kurzem angenommen, dass keine Seismizität zu erwarten ist. Die Beispiele Unterhaching und Landau zeigten jedoch, dass auch im Dauerbetrieb Mikrobeben verursacht werden können. An Hand der beobachteten Mikro-seismizität lässt sich auch in diesem Zeitabschnitt die seismische Gefährdung einschätzen. Existierende Methoden der probabilistischen seismischen Gefährdungsanalyse sollen auf den Fall fluidinduzierter Seismizität angepasst werden.

Die wissenschaftlichen Ergebnisse zu neuen Auswertemethoden und zum verbesserten Prozessverständnis des Entstehens fluidinduzierter Erdbeben sollen in Fachzeitschriften publiziert werden und somit der Allgemeinheit zur Verfügung stehen. Spezielles Interesse an den zu erwartenden Forschungsergebnissen besteht auf Seiten der Genehmigungsbehörden. Von MAGS zu erwartende Ergebnisse können erstens in Richtlinien für ein effizientes seismisches Monitoring einfließen. Zweitens trägt MAGS dazu bei, Richtlinien für hydraulische Stimulationen zu entwickeln. Drittens werden Methoden entwickelt, die es ermöglichen, die von Geothermiekraftwerken im Dauerbetrieb ausgehende seismische Gefährdung quantitativ zu berechnen. Ein für Betreiber und Investoren wichtiger Punkt ist die Abschätzung der zu erwartenden induzierten Seismizität bereits vor Beginn der Bohrphase. Hierzu will MAGS ebenfalls einen Beitrag leisten. Auf Grund der Komplexität dieses Problems kann ein Erfolg zum jetzigen Zeitpunkt jedoch nicht garantiert werden. Das verbesserte Verständnis der Zusammenhänge zwischen hydraulischen Parametern und induzierter Seismizität hilft den Kraftwerksbetreibern, die hydraulischen Parameter so einzustellen, dass das Verhältnis zwischen Energiegewinnung und seismischer Gefährdung optimiert wird.

Projektziele

- Entwicklung von Konzepten zur Begrenzung der mikroseismischen Aktivität bei der energetischen Nutzung tiefer geothermischer Systeme
- Verbessertes Verständnis der Prozesse, die zum Entstehen fluidinduzierter Erdbeben führen
- Zusammenarbeit mit Betreibern und Genehmigungsbehörden für eine sichere Energiegewinnung aus tiefer Geothermie

Forschungsverbund

Der Forschungsverbund setzt sich zusammen aus Wissenschaftlern der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, der Freien Universität Berlin, des Karlsruher Instituts für Technologie, der Ludwig-Maximilians Universität München, der Technischen Universität Clausthal / Energie-Forschungszentrum Niedersachsen und der Technischen Universität Bergakademie Freiberg. Das Verbundprojekt besteht aus sieben Einzelprojekten.



Karlsruher Institut für Technologien

J. Ritter, J. Groos

Quantifizierung und Charakterisierung des induzierten seismischen Volumens im Bereich Landau, Südpfalz



Ludwig-Maximilians-Universität München

J. Wassermann, T. Megies

Untersuchung von Mikro-Erdbeben in der bayerischen Molasse im Umfeld geothermischer Reservoirs



Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

U. Wegler, C. Bönnemann, M. Bischoff, M. Vasterling

Echtzeitauswertung induzierter Erdbeben und Gefährdungsabschätzung bei hydraulischen Stimulationen geothermischer Reservoirs

J. Kopera, T. Spies, J. Schlittenhardt

Untersuchung der seismischen Gefährdung aufgrund induzierter Seismizität bei tiefer geothermischer Energiegewinnung



Freie Universität Berlin

S. Shapiro, C. Dinske, C. Langenbruch

Modellierung der Auftretswahrscheinlichkeiten fluidinduzierter Erdbeben mit einer gegebenen Magnitude bei der Stimulation geothermischer Systeme



Technische Universität Clausthal / Energie-Forschungszentrum Niedersachsen

M. Hou, T. Kracke, R. Sonwa

THMC gekoppelte Untersuchungen zu Mechanismen und freigesetzten Deformationsenergien der seismischen Ereignisse in der Reservoirstimulations- und Betriebsphase



Technische Universität Bergakademie Freiberg

H. Konietzky, R. Mittag, H. Schütz

Prognose der möglichen induzierten/getriggerten Seismizität im Kristallin in Auswertung der flutungsbedingten seismischen Ereignisse im Bergbaurevier Aue/Schlema in Sachsen

Einzelprojekt 1: Quantifizierung und Charakterisierung des induzierten seismischen Volumens im Bereich Landau, Südpfalz

Im Folgenden wird mit geothermischer Energiegewinnung die tiefe Geothermie bezeichnet, bei welcher Strom und Wärme mit erhitztem Wasser aus über 2-3 km Tiefe gewonnen wird. Im Umfeld eines zu diesem Zwecke errichteten geothermischen Kraftwerks in Landau, Südpfalz, sind im Sommer und Herbst 2009 deutlich spürbare Erdbeben aufgetreten. Diese Ereignisse werden mit dem Kraftwerksbetrieb direkt in Verbindung gebracht. Im benachbarten Insheim wurden bei Stimulationsversuchen für ein weiteres geothermisches Kraftwerk ebenfalls spürbare Erschütterungen verursacht. Die Ereignisse von Landau haben in der Öffentlichkeit bereits eine generelle Skepsis gegenüber der erneuerbaren Energiequelle tiefe Geothermie ausgelöst, obwohl die dortigen Vorgänge noch nicht

abschließend geklärt sind. Diese schwachen Erdbeben gefährden daher den weiteren Kraftwerksbetrieb in Landau und insgesamt die weitere Entwicklung tiefer geothermischer Energiegewinnung an anderen Standorten in der Südpfalz.

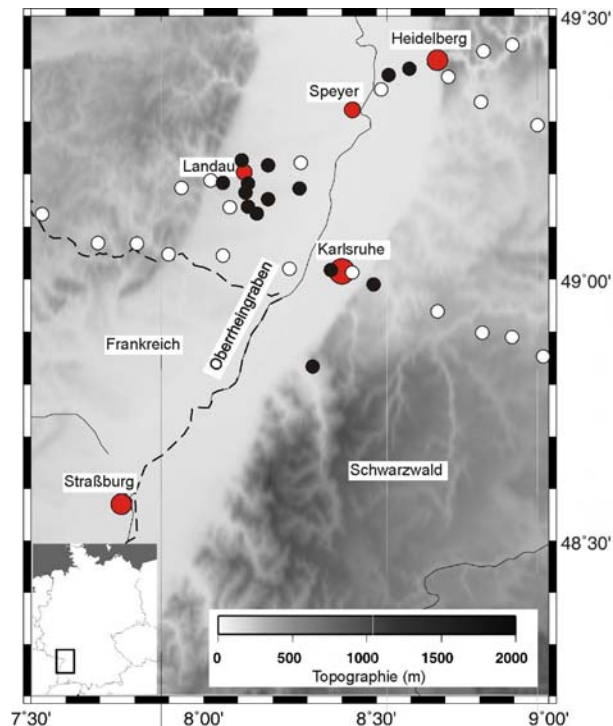


Abbildung 4: Seismologische Messstationen im Untersuchungsgebiet, schwarz: TIMO2 (aktuell), weiß: TIMO (2004 - 2006)

Der für Deutschland einmalige seismologische Datensatz aus Landau soll erweitert, vereinheitlicht, veröffentlicht und umfassend bzgl. der Seismizitätsparameter ausgewertet werden. Hierzu sollen weitere seismologische Messungen im Rahmen einer Echtzeitüberwachung beispielhaft durchgeführt werden (Abbildung 4). Mit dem bestehenden und vor allem mit dem neu zu messenden Landauer Datensatz sollen die raum-zeitliche Entwicklung der Seismizität rekonstruiert und das aktivierte seismische Volumen unter Landau beschrieben werden. Bei einem Auftreten deutlicher Seismizität an benachbarten Geothermie-Standorten soll diese ebenfalls in die Auswertung einbezogen werden, um eine möglichst repräsentative Einschätzung der Seismizität an tiefen geothermischen Standorten im Oberrheingraben zu erhalten.

Aus diesen Ergebnissen sollen Modelle abgeleitet werden, welche die Ursachen und Mechanismen der induzierten Seismizität erklären, um Maßnahmen zur Vermeidung zukünftiger starker Seismizität ergreifen zu können.

Die übergeordneten Arbeitsziele von EP1 sind somit:

- Verbesserung der seismologischen Datenbasis in der Südpfalz durch Echtzeit-Messung im Bereich der geothermischen Anlagen für die gesamte Arbeitsgruppe dieses Verbundprojektes
- Detaillierte Untersuchung des seismisch aktivierten Volumens, um die Prozesse zur Entstehung induzierter Seismizität zu verstehen
- Aufklärung der Ursachen für die Seismizität an den Standorten mit tiefer geothermischer Energiegewinnung
- Entwicklung von Maßnahmen zur Vermeidung von starker Seismizität

Einzelprojekt 2: Untersuchung von Mikro-Erdbeben in der bayerischen Molasse im Umfeld geothermischer Reservoirs

Durch produktionsbegleitende, seismische Messungen sowie neo-tektonische Re-Interpretationen des Spannungs- und Störungssystems in der bayerischen Molasse südlich von München soll gezielt untersucht werden, inwieweit die Ausbeutung geothermaler Tiefenwässer zu einer Erhöhung der natürlichen Seismizität führen

kann. Die seismische Überwachung wird dabei ab Beginn der Bohrtätigkeit angestrebt und gegebenenfalls mit den Bohrlochdaten im Verlauf des Betriebs (Druck, Temperatur etc.) korreliert. Ziel des Forschungsprojekts ist es, Hinweise bzw. Mechanismen zu untersuchen, die eine mögliche Erhöhung der natürlichen Seismizität durch die Ausbeutung geothermaler Aquifere erklären können. Im Vordergrund stehen dabei Geothermiebohrungen ohne Druckstimulation (Abbildung 5), wie sie in der bayerischen Molasse üblich sind.

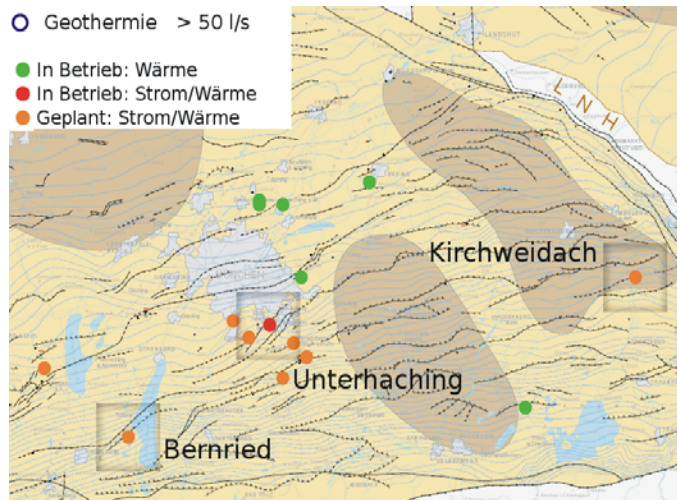


Abbildung 5: Geothermiestandorte und Störungen im Malm (bayerisches Landesamt für Umwelt, 2008). An der LMU im Rahmen von MAGS und anderen Projekten untersuchte Standorte sind grau umrandet.

Um dieses Ziel zu erreichen, wird ein seismologisches Überwachungsnetz an einer prospektierten Bohrung im Süd-Westen Münchens installiert (Bohrbeginn Juni 2011). Eine bisher mündlich ausgehandelte Kooperationsvereinbarung mit der Firma "BE Geothermal GmbH" wird nach Bewilligung dieses Antrags schriftlich niedergelegt. Diese Kooperationsvereinbarung umfasst die Überlassung eines 3D-Geschwindigkeitsmodells, welches für die Erhöhung der Lokalisierungsgenauigkeit der Mikrobeben benötigt wird und für das Zielgebiet bereits existiert. Es werden insgesamt sechs Oberflächenstationen installiert, wobei eine Station als seismisches Array, zur Senkung der Detektionsschwelle kleiner seismischer Ereignisse, ausgebaut wird. Zusätzlich ist geplant in einer etwa 5-6 km entfernten, ca. 1800m tiefen Bohrung ein 3Komponenten Bohrlochseismometer zu installieren. Zusammen mit dem Array kann damit eine erhebliche Verbesserung der Lokalisierungsgenauigkeit, insbesondere in der Tiefengenauigkeit erzielt werden. Das Bohrlochinstrument dient zusammen mit den Oberflächenstationen als wichtiger Baustein zur Entwicklung neuer Methoden, welche eine zeitlich hochauflösende Überwachung des Bohrlochumfeldes ermöglichen. Damit sollen Veränderungen des Spannungs- bzw. Deformationszustandes oder Fluidhaushaltes untersucht werden. Die Verwendung von 3D-Modellen der Untergrundstruktur ermöglicht zudem den Einsatz von hochauflösenden Simulationen der seismischen Quellvorgänge sowie der seismischen Wellenausbreitung. Dies kann in Folge wiederum zur deutlich präziseren Bestimmung des Herdmechanismus und der Ortsbestimmung benutzt werden. Der Vergleich mit den parallel erhobenen Produktionsdaten (Entnahmedruck, Re-Injektionsdruck, Schüttrate, Temperatur) ermöglicht abschließend eine Beurteilung der Ursachen, die zu etwaig beobachteten Erdbeben führen.

Durch eine luftbildgestützte und geologische Re-Interpretationen der tektonischen Situation der bayerischen Molasse kann zusammen mit bestimmten Hauptspannungsrichtungen und Deformationsakkumulation geklärt werden, ob Regionen bzw. Störungssysteme existieren, für die, bedingt durch ihre Orientierung

zum rezent herrschenden Spannungsfeld, ein erhöhtes Risiko induzierter oder getriggertter Erdbeben­­tätigkeit besteht. Dabei ist anzumerken, dass bisher nur vereinzelt Erdbeben in der Umgebung von Produktionsbohrungen (Geothermie, Erdöl, Erdgas) in der bayerischen Molasse aufgetreten sind. Durch die Verwendung von rezenten Deformationsmessungen soll geklärt werden, inwieweit bekannte Störungssysteme für eine Erhöhung der sonst üblichen, natürlichen Seismizität verantwortlich gemacht werden können. Die Untersuchung weshalb eine offensichtliche räumliche Beschränkung der bisher registrierten Mikrobeben (Unterhaching) existiert, stellt einen der Hauptpunkte der geplanten Forschungsarbeiten dar.

Eine weitere, in Zusammenarbeit mit den Einzelprojekten (EP) der Verbundpartner an der BGR-Hannover (EP4) und FU-Berlin (EP5) zu klärende Frage stellt die abschließende Gefährdungsanalyse einer in der bayerischen Molasse projektierten Bohrung dar. Diese Fragestellung soll in diesem Fall nicht an einer einzelnen Bohrung festgemacht werden, sondern vielmehr eine Fallstudie für das ganze Explorationsgebiet "bayerische Molasse" sein.

Zusammenfassend lassen sich folgende Kernfragen formulieren, welche dieses Projekt beantworten soll:

- Existieren tektonische und lagebedingte Voraussetzungen für das Auftreten von induzierter oder getriggertter Seismizität in der bayerischen Molasse?
- Können neue Verfahren (seismische, fernerkundliche) im Rahmen der Überwachung geothermaler Erlaubnisfelder eingesetzt werden?
- Wirken sich unterschiedliche Produktionsbedingungen auf die induzierte oder getriggerte Seismizität aus?
- Welche maximalen Erdbebenereignisse können in der bayerischen Molasse auftreten und welche Folgen können diese Ereignisse haben?

Einzelprojekt 3: Echtzeitauswertung induzierter Erdbeben und Gefährdungsabschätzung bei hydraulischen Stimulationen geothermischer Reservoirs

In Einzelprojekt 3 soll ein automatischer Auswertalgorithmus entwickelt werden, um die seismische Gefährdung während der Stimulation aus der aktuellen Beobachtung abzuschätzen. Ein Erdbebenkatalog mit Lokationen und Magnituden soll daher in Echtzeit erstellt und laufend aktualisiert werden. Die bisherige Erdbebenstatistik wird dann verwendet, um die Auftrittswahrscheinlichkeit für spürbare Erdbeben zu berechnen und ebenfalls entsprechend zu aktualisieren, so dass die zeitliche Änderung der Gefährdung berücksichtigt wird. Durch das vorgeschlagene System kann dann abgeschätzt werden, wie die hydraulischen Parameter der Stimulation die Gefährdung beeinflussen und wie sie gegebenenfalls zu modifizieren sind, um diese gering zu halten (Abbildung 6). Schließlich können die Ergebnisse des Projekts einfließen in Richtlinien für ein effizientes seismisches Monitoring und die hydraulische Stimulation selbst.

Um für die Nutzung der tiefen geothermischen Energie Wärmeaustauschflächen im Untergrund zu schaffen, werden bei der hydraulischen Stimulation Fluide in den Untergrund verpresst. Die Rissbildung kann durch empfindliche Seismometer an der Erdoberfläche als induzierte Seismizität beobachtet werden. Diese meist nicht

spürbaren Erdbeben sind notwendig, um die gewünschten Wärmeaustauschflächen zu schaffen. Ihre Lokationen werden zur Charakterisierung der erzeugten geothermischen Reservoirs ausgewertet. In jüngster Zeit traten jedoch einzelne seismische Ereignisse mit $M_I \leq 3.4$ auf (Häring et al., 2008), die an der Erdoberfläche deutlich spürbar waren und eine Diskussion über die seismische Gefährdung durch Geothermie-Projekte entfachten.

Zusätzlich soll daher aus der seismischen Überwachung auch die seismische Gefährdung während der Risserzeugung beurteilt werden. Eine deterministische Vorhersage von Erdbeben ist nach bisherigem Wissensstand unmöglich. Es können jedoch statistische Aussagen über zu erwartende Erdbeben und ihre Auswirkungen getroffen werden. So beschreibt die Gutenberg-Richter-Relation die relative Häufigkeit von kleinen zu großen Erdbeben und gilt in erster Näherung auch für Mikroseismizität während hydraulischer Simulationen oder während des Betriebs geothermischer Kraftwerke. Hierdurch lässt sich die Auftretswahrscheinlichkeit großer Erdbeben aus der gemessenen Häufigkeit kleiner Erdbeben abschätzen.

Gleichzeitig muss der zeitliche Verlauf der Mikroseismizität berücksichtigt werden. Dieser hängt während der Stimulation von den hydraulischen Parametern ab. Nach Shapiro und Dinske (2009) nimmt bei konstanter Flussrate der verpressten Flüssigkeit die Anzahl der Mikrobeben mit einer festgelegten Magnitude linear mit der Zeit zu. Die zeitliche Entwicklung nach dem Shut-In (Beendigung der Verpressung und Schließen des Bohrlochs) folgt nach Langenbruch und Shapiro (2009a,b) der Omori-Relation (Utsu, 1961). Diese Relation wurde ursprünglich für natürliche Erdbeben gefunden und beschreibt die Erdbebenrate der Nachbeben nach einem Hauptbeben. Hieraus lässt sich die Auftretswahrscheinlichkeit von Mikrobeben nach Beendigung der hydraulischen Stimulation abschätzen. Weil die seismische Gefährdung zeitabhängig ist und sich im Laufe weniger Stunden ändern kann, ist eine Echtzeitauswertung notwendig, so dass eine Gefährdungsabschätzung möglich wird. Falls eine hohe seismische Gefährdung zu erwarten ist, sind die hydraulischen Parameter der Stimulation dann entsprechend eines vorzugebenden Reaktionsschemas zu modifizieren (Abbildung 6).

Zur Abschätzung, wann die hydraulischen Parameter einer Stimulation geändert werden müssen bzw. wann eine Stimulation ganz abgebrochen werden muss, schlugen Bommer et al. (2006) ein sogenanntes Ampelsystem vor. Hierbei bedeutet grün, dass wie bisher weiter verpresst werden darf. Gelb zeigt an, dass eine Reduktion der Flussrate notwendig ist, während rot für den Abbruch der Stimulation steht. Als Maß für die Stärke der Erdbeben führten diese Autoren eine Magnitude ein, die auf Messungen der maximalen Bodenschwingungsgeschwindigkeit (englisch: peak ground velocity - PGV) beruht. Die maximale Bodenschwingungsgeschwindigkeit ist laut diesen Autoren besonders geeignet, da hiermit die Wahrnehmbarkeit der Erdbeben durch den Menschen sowie mögliche Gebäudeschäden abgeschätzt werden können.

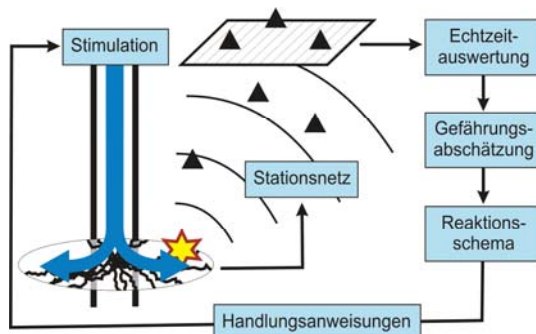


Abbildung 6: Schema eines automatisierten Systems zur Risikominimierung bei hydraulischer Stimulation

Einzelprojekt 4: Untersuchung der seismischen Gefährdung aufgrund induzierter Seismizität bei tiefer geothermischer Energiegewinnung

Im Teilprojekt 4 wird die seismische Gefährdung durch menschlich verursachte (induzierte) Rissbildungen und eventuell auch getriggerte Erdbeben in der Nähe von Geothermiekraftwerken mit deterministischen und probabilistischen Analysen ermittelt (Abbildung 7). Die Gefährdung durch induzierte Seismizität wird mit der Gefährdung durch natürlich auftretende Erdbeben verglichen.

Um die Wahrscheinlichkeit des Auftretens seismischer Einwirkungen in Form von Intensitäten oder Bodenbeschleunigungen anzugeben, wird die probabilistische Methode eingesetzt. Hierbei wird ein Seismizitätsmodell, das die Überschreitenswahrscheinlichkeit von Erdbeben mit einer bestimmten Magnitude beschreibt und ein Ausbreitungsmodell, das die von einem festgelegten Erdbeben erzeugten Bodenbewegungen und deren Abklingen mit der Entfernung beschreibt, benötigt. Für die natürliche Seismizität wird das Seismizitätsmodell mit Hilfe der in der Vergangenheit aufgetretenen Erdbeben festgelegt und unter Annahme von Zeitunabhängigkeit als Wahrscheinlichkeitsmodell für die Zukunft angenommen. Die Magnituden-Häufigkeits-Verteilung kann hierbei durch das Gutenberg-Richter-Gesetz beschrieben werden, das einen Zusammenhang zwischen der Häufigkeit kleiner Erdbeben und der Häufigkeit großer Erdbeben herstellt. Die gemessene Häufigkeit kleiner Erdbeben in der Vergangenheit kann somit verwendet werden, um die Überschreitenswahrscheinlichkeit größerer Erdbeben in der Zukunft abzuschätzen. Maximale zu erwartende Magnituden sind für einzelne seismotektonische Regionen charakteristisch. Sie ergeben sich aus der physikalisch limitierten Größe einer Störungszone.

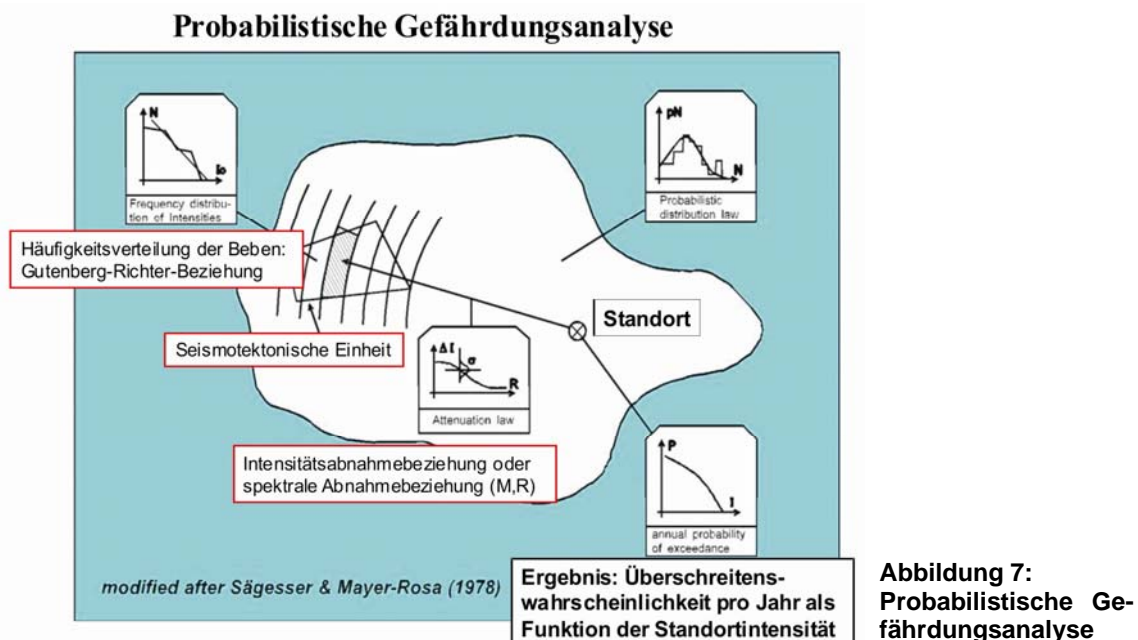


Abbildung 7: Probabilistische Gefährdungsanalyse

Die Übertragung der probabilistischen Methode auf die Abschätzung der seismischen Gefährdung aufgrund induzierter Seismizität wirft die Fragen auf:

- Wie kann die Zeitabhängigkeit des seismischen Prozesses berücksichtigt werden? Stationarität des seismischen Prozesses kann bei induzierter Seismizität a priori nicht vorausgesetzt werden, z.B. aufgrund der Stimulation des Bohrlochs während der Ausbauphase oder der Variationen des Betriebsdrucks.
- Gilt das Gutenberg-Richter-Gesetz auch bei kleinen induzierten Ereignissen? Gibt es eine ermittelbare maximal mögliche Magnitude? Eine Maximalmagnitude kann sich aus der Tatsache ergeben, dass der Einflussbereich der Bohrung, das „angeregte“ geothermische Reservoir, nur eine endliche Ausdehnung hat. Durch die Abschätzung dieses Volumens könnte auf eine maximal mögliche Bruchlänge zurückgeschlossen werden, die dem Durchmesser des Volumens entspricht.
- Welche Ausbreitungsmodelle müssen gewählt werden? Da induzierte Seismizität im Allgemeinen deutlich flacher als tektonische Erdbeben stattfindet, erzeugt sie bei gleicher Magnitude stärkere Bodenbeschleunigungen. Wie sind die lokalen bodendynamischen Bedingungen des Untergrunds einzubeziehen?

Ansätze zur Beantwortung dieser Fragen gibt es bisher im Bereich der durch Bergbau induzierten Seismizität. Auch die Untersuchung von Nachbeben-Serien oder Schwarmbeben, also von einer großen Anzahl schwacher Ereignisse in geringen Herdtiefen, z.B. in Umbrien-Marken, kann wertvolle Beiträge liefern.

Die Ziele von Einzelprojekt 4 sind:

- Bewertung der seismischen Gefährdung an Geothermiestandorten aufgrund der natürlichen Seismizität
- Ermittlung und Bereitstellung von Abnahmebeziehungen für seismische Amplituden bei sehr flachen seismischen Quellen in der Nähe von Geothermiebohrungen unter Berücksichtigung lokaler bodendynamischer Eigenschaften
- Entwicklung und Bereitstellung von Methoden zur Berücksichtigung nicht-stationärer Seismizität bei probabilistischen Analysen sowie von Methoden und Verfahren zur Erstellung und Aufbereitung von Eingangsdaten.
- Ermittlung der seismischen Gefährdung aufgrund induzierter Seismizität und Ermittlung der möglichen Erhöhung der gesamten seismischen Gefährdung
- Schlussfolgerungen für die Erstellung einer Leitlinie zur effektiven seismischen Überwachung bei tiefer geothermischer Energiegewinnung.

Einzelprojekt 5: Modellierung der Auftretswahrscheinlichkeiten fluidinduzierter Erdbeben mit einer gegebenen Magnitude bei der Stimulation geothermischer Systeme

Eine bisher weniger erforschte Charakteristik fluidinduzierter Seismizität ist deren Magnitudenstatistik. Die Relaxation der Perturbationen von elastischer Spannung

Für den Inhalt der Projektbeschreibung ist der Projektnehmer verantwortlich.

und Porenfluiddruck, die durch die Injektion hervorgerufen werden, kontrollieren das zeitlich-räumliche Auftreten der Erdbeben (Pearson, 1981, Talwani & Acree, 1985, Shapiro et al., 1997). Dieser Relaxationsprozess kann mit der (nichtlinearen) Diffusion des Fluiddruckes im Gesteinsporenraum beschrieben werden (Shapiro & Dinske, 2009). Die tektonische Spannung in der oberen Erdkruste ist stellenweise nahe einem Zustand, bei dem bereits kleine Störungen genügen, um seismische Aktivität auszulösen. Das Einpressen von Fluid verursacht ein Ansteigen des Fluiddruckes im verbundenen Gesteinsporenraum und im vorhandenen natürlichen Bruch- beziehungsweise Rissystem. Der erhöhte Porenfluiddruck bewirkt eine Verringerung der effektiven Normalspannung. Entsprechend dem Mohr-Coulomb-Bruchkriterium werden bei Überschreiten der Scherfestigkeit des Gesteines vorhandene Risse, Klüfte oder auch großräumige Verwerfungszonen reaktiviert und somit seismische Ereignisse ausgelöst.

Ziel des Einzelprojektes ist es, einen Modellierungsansatz zu erarbeiten, der es ermöglicht, auf der Grundlage von Injektionsparametern und seismotektonischen Eigenschaften geothermischer Systeme die Entwicklung der Magnitudenstatistik fluidinduzierter Erdbeben vorherzusagen. Dieser Ansatz soll zur Bestimmung der seismischen Gefährdung, die von der hydraulischen Stimulation geothermischer Reservoire ausgeht, anwendbar sein. Ebenfalls soll das entwickelte Modell auch dazu beitragen, das grundsätzliche physikalische Verständnis fluidinduzierter Seismizität zu erweitern und somit eine Grundlage für das Verständnis der Seismizität während des normalen Betriebs geothermischer Systeme schaffen. Es wird erwartet, dass der entwickelte Modellierungsansatz in der 'seismic response procedure' (Ampelsystem) Anwendung findet und somit am sicheren Betrieb eines geothermischen Systems mitwirkt. Ein Schwerpunkt des Projektes wird die Untersuchung der grundlegenden Physik der fluidinduzierten Seismizität sein, die nach der Stimulationsphase auftritt. Von gesteigertem Interesse unserer Forschung sind besonders signifikante seismische Ereignisse, die während aber auch nach der hydraulischen Stimulation auftreten.

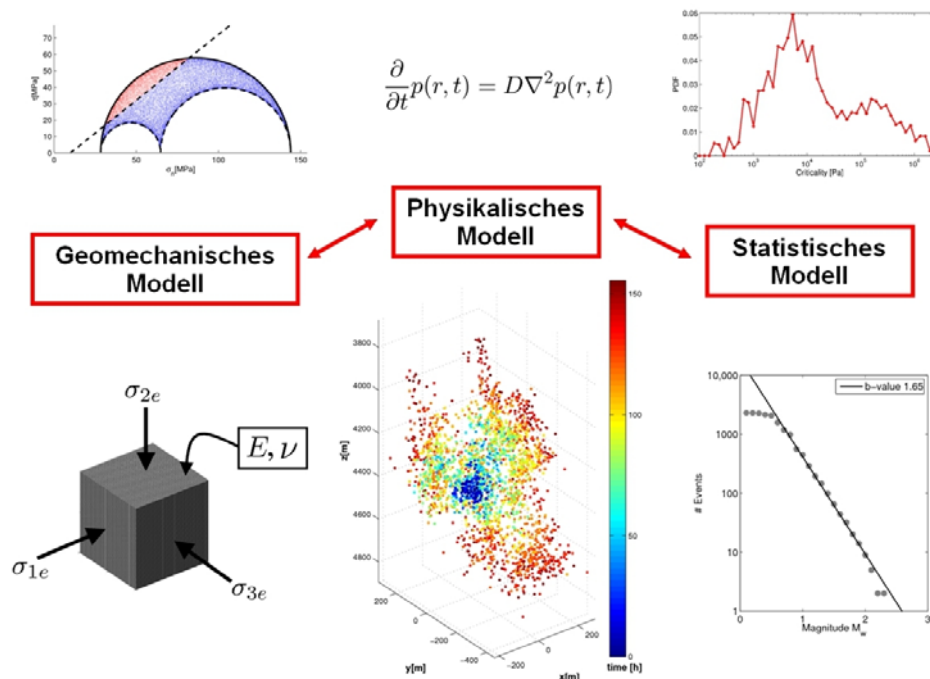


Abbildung 8: Modellierung der Auftretswahrscheinlichkeit fluidinduzierter Seismizität

Für den Inhalt der Projektbeschreibung ist der Projektnehmer verantwortlich.

Im Einzelnen ist die Bearbeitung der folgenden wissenschaftlichen Fragestellungen geplant:

- Welche Injektions- und seismotektonischen Parameter kontrollieren die Statistik der Seismizität während und nach einer Stimulation?
- Welche Schlussfolgerungen lassen sich aus einer Analyse der Wartezeiten zwischen aufeinander folgenden seismischen Ereignissen ziehen?
- Welche Skalierungsgesetze gelten für fluidinduzierte Seismizität? In wie weit können Skalierungsgesetze natürlicher Seismizität übertragen werden (wie z. B. Omori Gesetz, Gutenberg Richter Gesetz)?
- Welche Auswirkungen hat eine nicht monotone Fließrate auf die Statistik induzierter Seismizität? Welche Gefahren bzw. welcher Nutzen entsteht hierbei?
- Welche Unterschiede zwischen der Stimulationsphase und dem normalen Betrieb geothermischer Systeme haben eine seismogene Bedeutung?
- Wie können Abweichungen (z.B. das Auftreten signifikanter Ereignisse) von der „normalen“ Seismizitätsstatistik erklärt werden?
- Was für eine Rolle spielt hierbei die Statistik der Gesteinsfestigkeit? Wie kann ein Reservoir mit mehreren Bruchsystemen statistisch beschrieben werden?
- Welchen Einfluss hat hydraulische Heterogenität und Anisotropie in geothermischen Systemen auf die Statistik der Seismizität?
- Welche Bedeutung haben Kopplungsphänomene wie Nichtlinearität, Poroelastizität und Thermoelastizität?
- Welche maßgeblichen Parameter induzierter Seismizität lassen sich aus kurzzeitigen Injektionsexperimenten abschätzen?

Es ist geplant, diese Fragestellungen auf Grundlage theoretischer und numerischer Untersuchungen zu bearbeiten (Abbildung 8). Für die numerische Modellierung werden kommerzielle Pakete zur Simulation fluidinduzierter Erdbeben eingesetzt. Die Ergebnisse der theoretischen und der numerischen Studien werden dann mit realen Beobachtungen an geothermischen Systemen verglichen. Die Modelle werden entsprechend den resultierenden Erkenntnissen modifiziert. Hierdurch wird Schritt für Schritt ein Modell entwickelt, welches die Einflüsse der oben genannten Parameter bestmöglich beschreibt.

Einzelprojekt 6: THMC gekoppelte Untersuchungen zu Mechanismen und freigesetzten Deformationsenergien der seismischen Ereignisse in der Reservoirstimulations- und Betriebsphase

Eine deterministische Vorhersage von Erdbeben ist nach bisherigem Wissensstand unmöglich. Die bisher eingesetzten Simulatoren gehen von einer probabilistisch abgeschätzten maximalen bzw. vorgegebenen Magnitude aus und beruhen auf einer statistischen Methode, in der die Beben durch eben diese Magnitude klassifiziert und ihre Eintrittswahrscheinlichkeiten errechnet werden. Sie basieren weitgehend auf hypothetischen Annahmen über den Entstehungsort, den Eintrittszeitpunkt und die dominierenden Mechanismen, die zur Auslösung der seismischen Aktivitäten führen, Für den Inhalt der Projektbeschreibung ist der Projektnehmer verantwortlich.

und sind deshalb mit Unsicherheiten behaftet. Vielmehr sind sie funktionell darauf ausgelegt, die Folgen des Bebens (Intensität) an der Tagesoberfläche in Form von strukturellen Schäden zu ermitteln und Empfehlungen für geeignete Bau- bzw. Gegenmaßnahmen zu erarbeiten. Angaben über Quelle und Entstehung eines Bebens wie z.B. wann, wo, warum und wie hoch die freigesetzte Deformationsenergie ist, sind folglich durch solche Erdbebensimulatoren noch nicht möglich. Bislang stehen noch keine numerischen Modelle zur Verfügung, die in der Lage sind, die freigesetzte Deformationsenergie und ihre Energiefreisetzungsrate unter Berücksichtigung der geothermalen, dynamischen Prozesse mit Berücksichtigung der THM:C-Kopplungen (T: thermisch, H: hydraulisch, M: mechanisch, C: chemisch) zu berechnen und somit die künstlich induzierten Mikrobeben zu simulieren (Abbildung 9).

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass sich dieses Projekt vorerst mit der Nachsimulation bzw. Vorausberechnung der durch die Stimulation und durch den Dauerbetrieb induzierten Seismizitäten bzw. Mikrobeben beschäftigt. Dies beinhaltet nicht die Simulation natürlicher und getriggertter Erdbeben. Hierbei wird auf die in EP4 ermittelte Standortauswahl zurückgegriffen, um seismisch aktive Lokationen zu vermeiden.

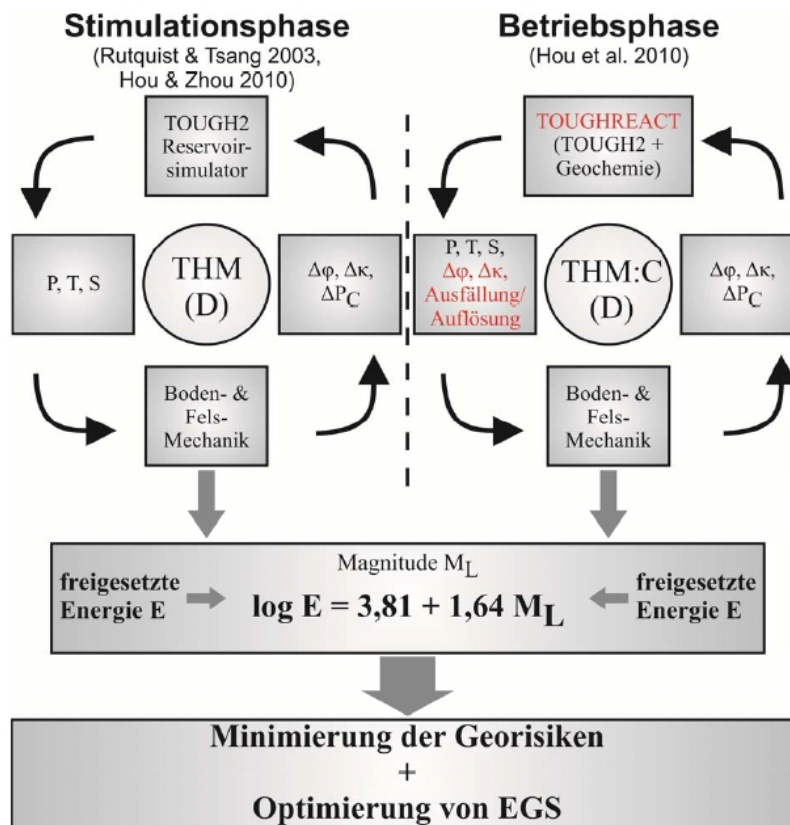


Abbildung 9: Schema der Modellkonzepte für Stimulations- (links) und Betriebsphase (rechts) unter Berücksichtigung THM bzw. THM:C-gekoppelter Prozesse.

Um die natürliche Zeitfolge des Entstehens der induzierten Beben realitätsnah wiedergeben zu können, erfolgt in diesem Einzelprojekt die Umsetzung eines entsprechenden Simulationskonzepts, , um den Stimulationsvorgang und die

Für den Inhalt der Projektbeschreibung ist der Projektnehmer verantwortlich.

Betriebsphase zu optimieren bzw. die Georisiken zu minimieren. Daher sind folgende Arbeitsziele im EP6 zu erreichen:

- Bestimmung der dominierenden Frac-Mechanismen in einer geothermalen und in einer Erdöl- und Erdgasbohrung sowie und Aufklärung der Ursachen für die Seismizität an den Standorten mit tiefer geothermischer Energiegewinnung
- Weiterentwicklung eines THM gekoppelten Modells für eine realitätsnahe Simulation und Erfassung wesentlicher Merkmale der induzierten Seismizität während der hydraulischen Reservoirstimulationsphase sowie seine Verifizierung anhand von Daten aus den Projekten Soultz-sous-Forêts, Basel und/oder Cooper Mine
- Neuentwicklung eines THM:C gekoppelten Modells für eine realistischere Simulation der Betriebsphase und Erfassung wesentlicher Merkmale der induzierten Seismizität während langjähriger Zirkulationsphasen sowie Verifizierung des Modells anhand von Daten aus den Projekten Landau und Unterhaching
- Erste Vorausberechnungen der zeitabhängigen und räumlich verteilten seismischen Ereignisse in der Betriebsphase der Projekte Landau und Bernried bzw. während der Projektdauer Vergleich der Berechnungen mit Messwerten der Projektpartner (EP 1-3)
- Optimierung der Injektions-/Zirkulationsparameter zur Vermeidung spürbarer Mikrobeben bei hydraulischen Stimulationen und im Dauerbetrieb geothermischer Kraftwerke
- Beiträge zum Prozessverständnis der induzierten Mikrobeben und der Minimierung des damit verbundenen Georisikos sowohl bei hydraulischen Stimulationen als auch während des Kraftwerkbetriebs

Einzelprojekt 7: Prognose der möglichen induzierten/getriggerten Seismizität im Kristallin in Auswertung der flutungsbedingten seismischen Ereignisse im Bergbaurevier Aue/Schlema

Die induzierte und natürliche Seismizität an der Lokation Aue (Erzgebirge) wird seit Beginn der 90-iger Jahre mittels seismischer Netze (Seismisches Netz im Grubenbereich [Wismut-Netz], seismisches Netz der TU Bergakademie Freiberg [Aue-Netz] sowie regionales Netz [Sachsen-Netz]) detailliert verfolgt, wobei insbesondere der Flutungsprozeß der Wismut-Grube interessiert. Ca. 1.400 auswertbare Ereignisse wurden seit 1990 durch das teilweise unterirdisch angelegte mikroseismische Netz der Wismut registriert, wovon seit 1998 die stärksten Ereignisse (ca. 260 mit Magnituden von -0.5 bis 1.8) durch das übertage installierte Stationsnetz der Bergakademie Freiberg erfasst werden konnten. Im Zusammenhang mit den geologischen und geomechanischen Kenntnissen aus dem Bergbau in bis zu 2 km Teufe steht somit ein einmaliger Fundus an Daten zum Thema „Induzierte Seismizität im Kristallin“ zur Verfügung, der durch weitere Messungen erweitert, vereinheitlicht und umfassend bzgl. der Seismizitätsparameter ausgewertet werden soll. Auf der Basis eines konsistenten seismologischen Datensatzes soll das aktivierte Volumen sowie die raum-zeitliche Entwicklung der fluidinduzierten

Für den Inhalt der Projektbeschreibung ist der Projektnehmer verantwortlich.

Seismizität rekonstruiert und in Beziehung zu den geomechanischen Verhältnissen des gefluteten Grubenbaus sowie seiner Umgebung gebracht werden. Unter Einbezug der seismotektonischen Situation sowie ingenieurseismologischer Untersuchungen im Umfeld der Grube sollen Prognoseparameter zur Abschätzung der seismischen Gefährdung fluidinduzierter Seismizität im Kristallin abgeleitet werden.

Im Rahmen des Projektes sollen folgende Schwerpunkte aufgearbeitet werden:

- Abgleich der Magnituden, Ortungsergebnisse und Signalanalysen zwischen dem Grubennetz und dem Netz der TU Bergakademie Freiberg als Grundlage für eine gemeinsame Datenverarbeitung
- Auswertung der natürlichen Seismizität und Korrelation zur induzierten Seismizität
- Korrelation der induzierten Seismizität mit in-situ Spannungsfeld, Geologie, Geomechanik, Bergbau, Teufe sowie Ableitung von Flutungsparametern für fluidinduzierte Seismizität
- Abschätzung von Herdparametern und Prognose von maximalen Magnitudenwerten für induzierte Seismizität während der Flutung
- Erstellung von Magnituden-Häufigkeitsverteilungen und daraus abgeleitete Maximalmagnituden für natürliche und induzierte Seismizität
- Ableitung von Dämpfungsbeziehungen zwischen Lokalmagnitude und maximaler Schwinggeschwindigkeit zur Abschätzung der seismischen Gefährdung
- Ableitung von Prognoseparametern für geothermisch induzierte Seismizität aus bergbauinduzierter und natürlicher regionaler Seismizität
- Vergleich der im Auer Raum registrierten induzierten Seismizität mit der induzierten Seismizität an anderen Geothermiestandorten (Soulz, Basel, Landau etc.) und Schlussfolgerungen für andere petrothermale Geothermiestandorte
- Erstellung von Empfehlungen zur optimalen seismischen Überwachung eines potentiellen Geothermieprojektes im Kristallin

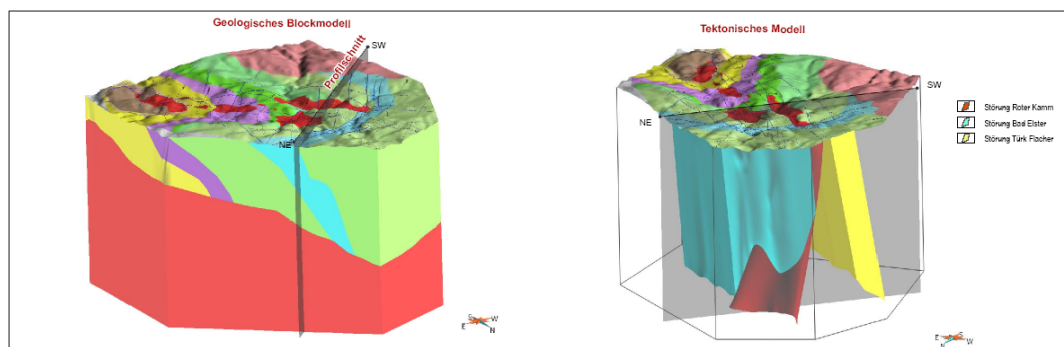


Abbildung 10: Untersuchungsgebiet Aue (Anlage 3 des "Forschungsberichtes Tiefengeothermie Sachsen" vom LfULG Sachsen)

Für den Inhalt der Projektbeschreibung ist der Projektnehmer verantwortlich.

Referenzen

- Baisch, S and R. Vörös, 2009. AP 3000 Report Induced Seismicity, *SERIANEX*.
- Bommer J., S. Oates, J. M. Cepeda, C. Lindholm, J. Bird, R. Torres & G. Marroqin, J. Rivas, 2006. Control of hazard due to seismicity induced by a hot fractured rock geothermal project. *Engineering Geology*, v. 83, pp. 287-306
- Charl ty, J., Cuenot, N., Dorbarth, L., Dorbath, C., Haessler, H. & Frogneux, M., 2007. Large earthquakes during hydraulic stimulations at the geothermal site of Soultz-sous-Forêts. *Int. J. Rock Mech. Mining Sci.*, 44, 1091-1105.
- Dinske, C., S. A. Shapiro & J. T. Rutledge, 2010. Interpretation of microseismicity resulting from gel and water fracturing of tight gas reservoirs. *Pure and Applied Geophysics*, 167, doi:10.1007/s00025-009-0003-6.
- Gr nthal, G., 1998. European Macroseismic Scale 1998. *Cahiers du Centre Européen de G odynamique et de S ismologie*, Conseil de L'Europe, Luxembourg
- Gupta, H.K. & Chadha, R.K. (eds.), 1995. Induced seismicity. *Pure and Applied Geophysics*, 145, Birkhäuser, Basel.
- H ring, M., Schanz, U., Lader, F. & Dyer, B. C., 2008. Characterisation of the Basel 1 enhanced geothermal system. *Geothermics* 37, pp. 469-495, 2008, doi: 10.1016/j.geothermics.2008.06.002
- Hou, M.Z., Gou, Y. & Rutqvist, J. 2010: Integration of the codes FLAC3D and TOUGHREACT for THMC coupled geo-process simulations in reservoirs. 72nd EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2010, Barcelona, Spain, 14-17 June 2010.
- Hou, M.Z. & Zhou, L., 2010. THM gekoppelte dynamische Simulationsmethode zur Vorausberechnung der freizusetzenden Deformationsenergie und ihre erste Anwendung zur Nachsimulierung der DHM Basel induzierten seismischen Ereignisse. DGMK Tagungsbericht 2010-1. DGMK/ GEW-Fr hjahrstagung 2010, Fachbereich Aufsuchung und Gewinnung, Celle, 12./13. April 2010.
- Langenbruch, C. & Shapiro, S. A., 2009a. Omori law for fluid induced microseismicity and its dependency on parameters of reservoir and source. In 71st EAGE Conference Exhibition, Extended abstract, Amsterdam
- Langenbruch, C. & Shapiro, S. A., 2009b. Induced seismicity after termination of rock stimulations: Possibilities for reservoir characterization. In 79th SEG Conference Expanded Abstracts, pages Paper-RC5.1, Houston
- Majer, E. L., R. Baria, M. Stark, S. Oates, J. Bommer, B. Smith & H. Asanuma , 2007. Induced seismicity associated with enhanced geothermal systems. *Geothermics*, 36, 185-222.
- McGarr, A., Simpson, D. & Seeber, L., 2002. Case histories of induced and triggered seismicity. In: Lee, W.H.K., Kanamori, H., Jennings, P.C. & Kisslinger, C. (eds.). *International handbook of earthquake and engineering seismology, Part A*, Academic Press, Amsterdam, 647-661
- Pearson, C., 1981. The relationship between microseismicity and high pore pressures during hydraulic stimulation experiments in low permeability granitic rocks. *Journal of Geophysical Research*, 86, 7855-7864.
- Rowe, C. A., R. C. Aster, W. S. Phillips, R. H. Jones & M. C. Fehler, 2002. Using automated, high-precision repicking to improve delineation of microseismic structures at the Soultz geothermal reservoir. *Pure and Applied Geophysics*, 159, 563-596.
- Rutqvist, J. & Tsang, C.F. 2003: TOUGH-FLAC: A numerical simulator for analysis of coupled thermal-hydrologic-mechanical processes in fractured and porous
- F r den Inhalt der Projektbeschreibung ist der Projektnehmer verantwortlich.

- geological media under multi-phase flow conditions. Proceedings of TOUGH Symposium 2003, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California, May 12-14, 2003.
- Sägesser, R. & Meyer-Rosa, D., 1978. Erdbebengefährdung in der Schweiz. Schweizerische Bauzeitung, Heft 7/78, Zürich
- Schulz, R., Agemar, T., Alten, A.-J., Kühne, K., Maul, A.-A., Pester, S. & Wirth, W., 2007. Aufbau eines geothermischen Informationssystems für Deutschland. *Erdöl Erdgas Kohle* 123, 2: 76-81. Hamburg.
- Shapiro, S. A., & C. Dinske, 2009. Scaling of seismicity induced by nonlinear fluid-rock interaction. *Journal of Geophysical Research*, 114, B09, 307, doi:10.1029/2008JB006145.
- Shapiro, S. A., Huenges, E. & Borm, G., 1997. Estimating the crust permeability from fluid-injection-induced seismic emission at the KTB site. *Geophys. J. Internat.*, 131, F15–F18.
- Shapiro, S. A., E. Rothert, V. Rath & J. Rindschwentner, 2002. Characterization of fluid transport properties of reservoirs using induced microseismicity, *Geophysics*, 67, 212–220
- Shapiro, S. A., S. Rentsch & E. Rothert, 2005. Characterization of hydraulic properties of rocks using probability of fluid-induced microearthquakes. *Geophysics*, 70, F27-F34.
- Simpson, D.W., 1986. Triggered earthquakes. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 14, 21-47.
- Talwani & Acree, 1985. Pore pressure diffusion and the mechanism of reservoir induced seismicity. *Pure and Applied Geophysics*, 122, 947–965.
- Utsu, T., 1961. A statistical study of the occurrence of aftershocks, *Geophysical Magazine*, vol. 30, pages 521-605.
- Warpinski, N.R., P. T. Branagan, R. E. Peterson, S. L. Wolhart & J. E. Uhl (1998), Mapping hydraulic fracture growth and geometry using microseismic events detected by a wireline retrievable accelerometer array. In *Proceedings 1998 SPE Gas Technology Symposium*, Paper 40014.
- Warpinski, N. R., S. L. Wolhart & C. Wright, 2001. Analysis and prediction of microseismicity induced by hydraulic fracturing. *Paper SPE 71649*.

http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/download/Forschungsbericht_TGT_Sn_02.12.10.pdf

http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/download/Forschungsbericht_TGTSN_Anlage_n.pdf