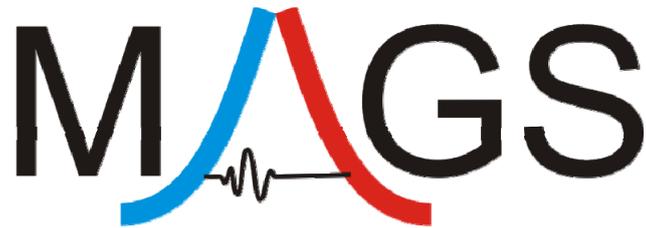


## Verbundprojekt



# Konzepte zur Begrenzung der mikroseismischen Aktivität bei der energetischen Nutzung geothermischer Systeme im tiefen Untergrund

## Übersicht und Empfehlungen

<b>Gesamtprojektleiter:</b>	Dr. Ulrich Wegler
<b>Förderkennzeichen:</b>	0325191A-F
<b>Laufzeit:</b>	01.05.2010 bis 30.09.2013
<b>Berichtszeitraum:</b>	01.05.2010 bis 30.09.2013

### Projektpartner

- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover
- Karlsruher Institut für Technologien
- Ludwig-Maximilians-Universität München
- Freie Universität Berlin
- Technische Universität Clausthal / Energie-Forschungszentrum Niedersachsen
- Technische Universität Bergakademie Freiberg

Das Verbundprojekt MAGS – Konzepte zur Begrenzung der mikroseismischen Aktivität bei der energetischen Nutzung geothermischer Systeme im tiefen Untergrund wird finanziert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit und betreut vom Projektträger Jülich.



Projektträger für



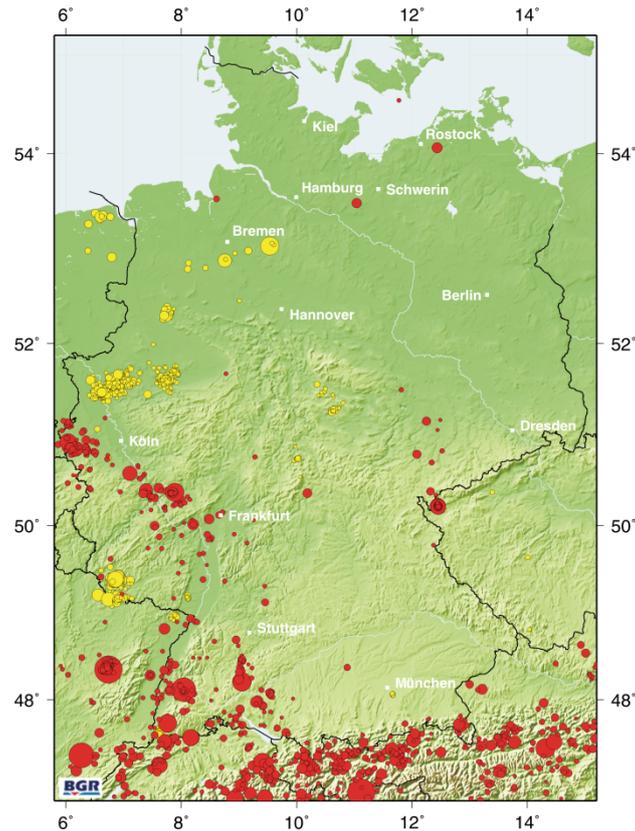
# **I. Übersicht über das Verbundprojekt MAGS**

## **Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen**

Der weltweit weiter anwachsende Energiebedarf wird derzeit vorwiegend aus fossilen Brennstoffen gewonnen. Hierdurch steigt der CO<sub>2</sub>-Anteil in der Erdatmosphäre, was zu einer unerwünschten Klimaerwärmung führen kann. Die Nutzung alternativer Energie aus tiefer Geothermie könnte zukünftig einen Beitrag zum Klimaschutz leisten. Ein Vorteil der tiefen Geothermie gegenüber anderen alternativen Energiequellen ist, dass die Energie unabhängig von Tageszeiten, saisonalen Schwankungen und Witterungsbedingungen erzeugt werden kann. Der weitere Ausbau der tiefen Geothermie wurde jedoch durch das Auftreten induzierter Erdbeben in der Nähe geothermischer Anlagen gebremst. Nach einem durch eine hydraulische Stimulation verursachten 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. Für die Akzeptanz der Energiegewinnung aus tiefer Geothermie ist es entscheidend zu klären, ob diese Seismizität auf Mikroerdbeben begrenzt bleibt oder ob hiervon eine Gefahr für Menschen und Gebäude ausgehen könnte. Im Rahmen des vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit geförderten Forschungsverbundes MAGS wurden Konzepte zur Begrenzung der mikroseismischen Aktivität bei der energetischen Nutzung geothermischer Systeme im tiefen Untergrund entwickelt, die in diesem Bericht vorgestellt werden.

## **Induzierte Seismizität in Deutschland**

Bei der Nutzung des tiefen Untergrundes, etwa im Rahmen von Bergbau, kann der Mensch vorhandene Spannungen im Gestein der oberen Erdkruste verändern oder neue verursachen. Dies kann z.B. durch Auflaständerungen in Folge von Abbau oder durch Eingriffe in den Fluidhaushalt geschehen. Solche Spannungsänderungen können dazu führen, dass die Scherfestigkeit des Untergrundes an bestimmten Stellen überschritten wird und das Gestein bricht. Dieser (Scher-)Bruchprozess wird als Erdbeben bezeichnet. Bei einer großen Bruchfläche kann sich das Erdbeben durch Erschütterungen an der Erdoberfläche bemerkbar machen. Kleinere Erdbeben, die an der Erdoberfläche vom Menschen nicht mehr wahrgenommen werden, sind noch mit Hilfe von Seismometern nachweisbar. Diese Erdbeben werden auch als Mikroseismizität bezeichnet. Abbildung 1 zeigt die registrierten Erdbeben in Deutschland, wobei zwischen tektonischen Erdbeben und vermutlich induzierten Erdbeben unterschieden wird. Tektonische Erdbeben werden durch Spannungen verursacht, die durch die Kräfte der Plattentektonik hervorgerufen werden. Bei induzierten Erdbeben hingegen spielen auch durch Menschen verursachte Spannungsänderungen eine Rolle. In Deutschland werden solche Erdbeben insbesondere durch den Kohlebergbau, die Erdgasförderung und die Kalisalzgewinnung verursacht. Spürbare Erdbeben durch tiefe Geothermie traten in Deutschland und angrenzenden Gebieten bislang in Basel, St. Gallen, Soultz-Sous-Forêts, Landau, Insheim und Unterhaching auf. An den Standorten Bad Urach, Groß-Schönebeck und Horstberg wurden Mikroerdbeben mit Seismometern nachgewiesen, die jedoch zu keinen spürbaren Erschütterungen führten.



**Abbildung 1:** Seismizität in Deutschland und benachbarten Gebieten im Zeitraum 01.01.2000 – 29.03.2011. Rote Kreise stellen tektonisches Erdbeben dar, während gelbe Kreise induzierten Erdbeben entsprechen. Gezeigt sind nur Erdbeben mit Magnitude größer oder gleich 2.

Neben der in Deutschland beobachteten induzierten Seismizität ist aus anderen Gebieten bekannt, dass auch durch das Befüllen großer Wasserreservoirs hinter Staudämmen oder durch Schwankungen des Wasserniveaus induzierte Seismizität ausgelöst werden kann. Darüber hinaus wurde induzierte Seismizität auch beim Fracking zur Förderung nicht-konventioneller Gasvorkommen und bei der Verpressung flüssiger Abfälle in tiefe Gesteinsschichten beobachtet.

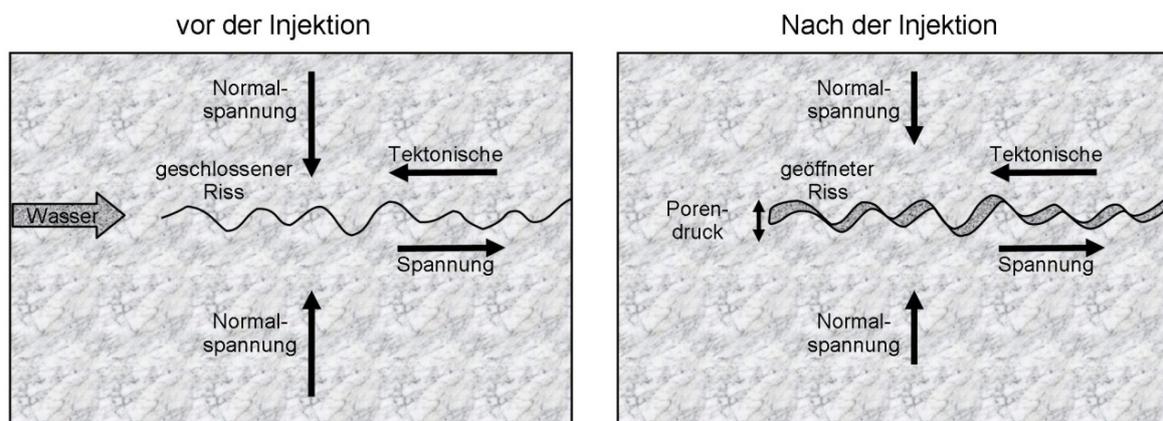
### Das Standardmodell zur Erklärung fluid-induzierter Seismizität

Das erste in der Literatur beschriebene Fallbeispiel fluid-induzierter Seismizität fand bereits in den 1960er Jahren in der Nähe von Denver (USA) statt, wo flüssiger Abfall in tiefen Bohrlöchern verpresst wurde. Seit dieser Zeit ist bereits bekannt und allgemein anerkannt, dass Änderungen im Druck des Porenwassers in tiefen Gesteinsschichten Erdbeben auslösen können. Das Gestein der Erdkruste steht auf Grund der tektonischen Kräfte in vielen Gebieten der Welt unter Spannung. Übersteigt die Scherspannung im Untergrund einen kritischen Wert  $\tau_{crit}$ , kommt es zu einem Scherbruch im Gestein. Diese kritische Scherspannung wird auch als Scherfestigkeit bezeichnet. Hierbei treten Brüche insbesondere an bereits vorhandenen Schwächezonen der Erdkruste auf. Nach dem Mohr-Coulomb-Bruchkriterium kann die kritische Scherspannung  $\tau_{crit}$ , bei der es zu einem Erdbeben kommt, durch die folgende Gleichung abgeschätzt werden:

$$\tau_{crit} = \mu(\sigma_n - p_f) + \tau_{crit}^0$$

Hierbei sind  $\mu$  der Reibungskoeffizient,  $\sigma_n$  die Normalspannung, die senkrecht auf der potenziellen Bruchfläche liegt,  $p_f$  der Druck des Porenwassers und  $\tau_{crit}^0$  die kritische Scherspannung bei einer Normalspannung von 0, die auch als Kohäsion bezeichnet wird. Das Mohr-Coulomb-Bruchkriterium besagt, dass eine Spannung, die senkrecht auf der möglichen Bruchfläche liegt, die Schwächezone zusammendrückt und so dem möglichen Bruchprozess durch verstärkte Reibung entgegenwirkt. Je höher die Normalspannung  $\sigma_n$  ist, desto höher wird die kritische Scherspannung  $\tau_{crit}$ , bei der es zum Scherbruch entlang einer Schwächezone kommt. Der Porenwasserdruck  $p_f$  wirkt dieser Normalspannung  $\sigma_n$  entgegen. Durch eine Erhöhung des Porendrucks wird die Reibung herabgesetzt und die kritische Scherspannung  $\tau_{crit}$  sinkt (Abbildung 2). Wenn die tektonische Spannung im Gestein nun schon vorher nahe der Scherfestigkeit lag, kann dieses Herabsetzen dazu führen, dass die Scherspannung im Untergrund die Scherfestigkeit überschreitet und somit ein Erdbeben ausgelöst wird. Bei diesem Vorgang werden bereits im Untergrund vorhandene tektonische Spannungen abgebaut. Die Erdbebenaktivität hängt somit entscheidend vom Porenwasserdruck  $p_f$  im Gesteinskörper ab, der durch den geothermischen Kraftwerksbetrieb beeinflusst wird.

Darüber hinaus können auch die Abkühlung des Gesteins sowie chemische Vorgänge im Rahmen der geothermischen Nutzung die Gesteinsfestigkeit beeinflussen.



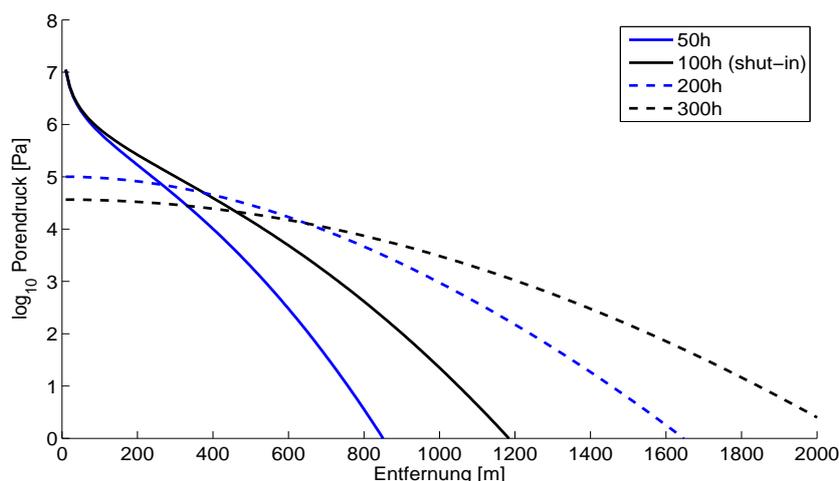
**Abbildung 2:** Prinzipskizze zur Wirkung einer Fluidverpressung: Vor der Injektion herrscht geringer Porendruck  $p_f$ . Die Normalspannung  $\sigma_n$  bewirkt eine hohe Reibung auf der Fläche eines bereits vorher im Gestein existierenden Risses. Die Scherfestigkeit  $\tau_{crit}$  des Risses ist dadurch hoch genug, um der tektonischen Spannung standzuhalten. Nach der Injektion wirkt der erhöhte Porendruck  $p_f$  der Normalspannung  $\sigma_n$  entgegen. Dadurch wird die Reibung entlang des Risses herabgesetzt und die Scherfestigkeit  $\tau_{crit}$  des Gesteins nimmt ab. Unter Umständen ist sie nun geringer als die tektonische Spannung und es kommt zum Scherbruch.

## Hydraulische Stimulationen und Zirkulationsbetrieb

Bei der tiefen Geothermie ist zwischen den sogenannten hydraulischen Stimulationen und der Betriebsphase des geothermischen Kraftwerks, der Zirkulation, zu unterscheiden. Wenn die natürlich vorhandene Durchlässigkeit des Untergrundes nicht ausreicht, um ein geothermisches Kraftwerk zu betreiben, wird mit hohem Druck Wasser in das Bohrloch verpresst. Dieser Vorgang wird als hydraulische Stimulation bezeichnet. Hierdurch werden neue Risse im Untergrund erzeugt oder bestehende aufgeweitet. Diese Rissbildungen, die in vielen Fällen erforderlich sind, um ein geothermisches Reservoir zu erzeugen, entsprechen aus geophysikalischer Sicht kleinen Erdbeben (Mikrobeben). Während der Betriebsphase eines geothermischen Kraftwerks wird im Allgemeinen aus einem Bohrloch heißes Wasser entnommen. Nach der Nutzung zur Energiegewinnung oder zum Heizen wird das abgekühlte Wasser in einem zweiten Bohrloch anschließend wieder in den Untergrund verbracht. Auch durch diese Zirkulation werden der Porendruck und andere Untergrundprozesse beeinflusst, die unter Umständen Erdbeben verursachen können.

## Nachbebenfähigkeit

Das mit einem gewissen Druck am Bohrloch injizierte Wasser breitet sich entlang von existierenden oder neu entstandenen Porenräumen und Kluftzonen im Untergrund unter Umständen nur langsam aus (z.B. durch einen Diffusionsprozess, Abbildung 3). In diesem Fall stellen sich nach einer Änderung der Parameter einer hydraulischen Stimulation oder der hydraulischen Parameter eines Geothermiekraftwerks im Zirkulationsbetrieb die neuen Porenwasserdruckverhältnisse im Untergrund auch erst langsam ein. Unerwünscht hohe Seismizität lässt sich daher zwar durch Reduktion der Fluidfließrate und des Fluiddruckes verringern, die möglicherweise langsame Fluidausbreitung im Untergrund kann jedoch zu einer zeitlichen Verzögerung zwischen der Änderung der hydraulischen Parameter einer Geothermieanlage und der daraus folgenden Änderung der Erdbebenfähigkeit führen. Die Verzögerungszeit und die damit verbundene Zeitdauer einer Nachbebenfähigkeit hängen unter anderem von der Permeabilität des Untergrundes ab und können nach den bisherigen Erfahrungen von einigen Tagen bis zu Monaten dauern.



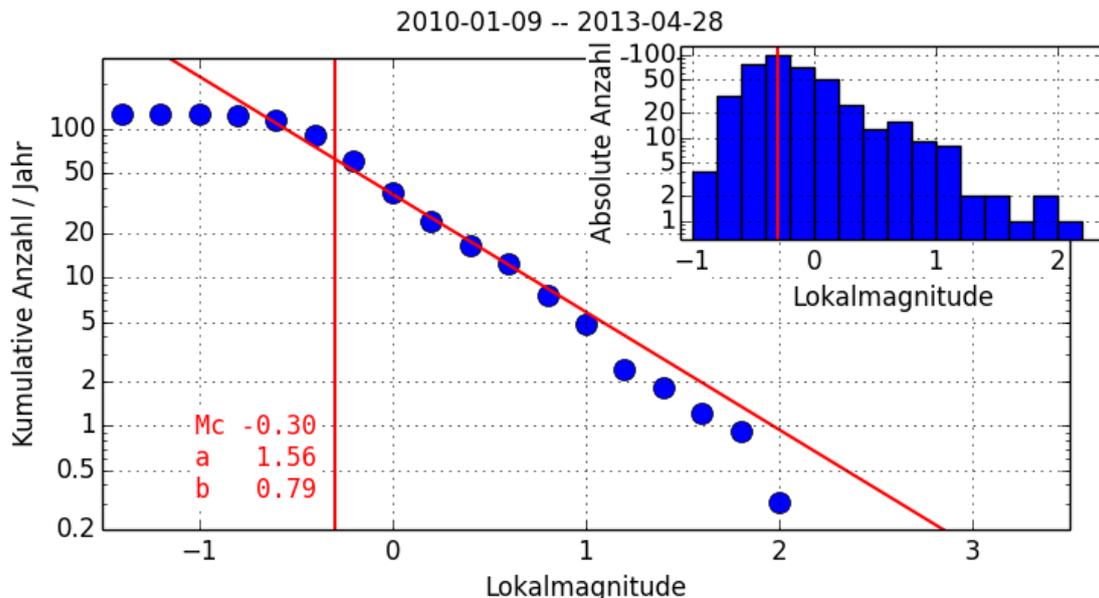
**Abbildung 3:** Modellierter Porenwasserdruck im Gestein als Funktion der Entfernung vom Bohrloch. Es sind vier Zeitabschnitte während einer hydraulischen Stimulation gezeigt. Während der Stimulation nach 50 Stunden (blau, durchgezogen), nach 100 Stunden am Ende der Stimulation (schwarz, durchgezogen), nach 200 Stunden (blau, gestrichelt) und nach 300 Stunden (schwarz, gestrichelt). Man beachte die Porendruckzunahme auch nach dem Ende der Stimulation in größerer Entfernung vom Bohrloch.

## Viele kleine und wenige große Erdbeben – Die Magnituden-Häufigkeits-Verteilung

In einer seismisch aktiven Region kann die Anzahl  $N_{\geq M}$  der Erdbeben bestimmt werden, die eine festgelegte Magnitude  $M$  überschreiten. Bei solchen Untersuchungen wurde weltweit sowohl bei tektonischer als auch bei induzierter Seismizität eine Gesetzmäßigkeit in der Magnituden-Häufigkeits-Verteilung beobachtet: Die Anzahl der kleinen Erdbeben ist nicht unabhängig von der Anzahl der großen Erdbeben, sondern es besteht ein Zusammenhang (Abbildung 4). Dieser Zusammenhang lässt sich mathematisch durch die sogenannte Gutenberg-Richter-Beziehung beschreiben:

$$\log_{10}(N_{\geq M}) = a - bM$$

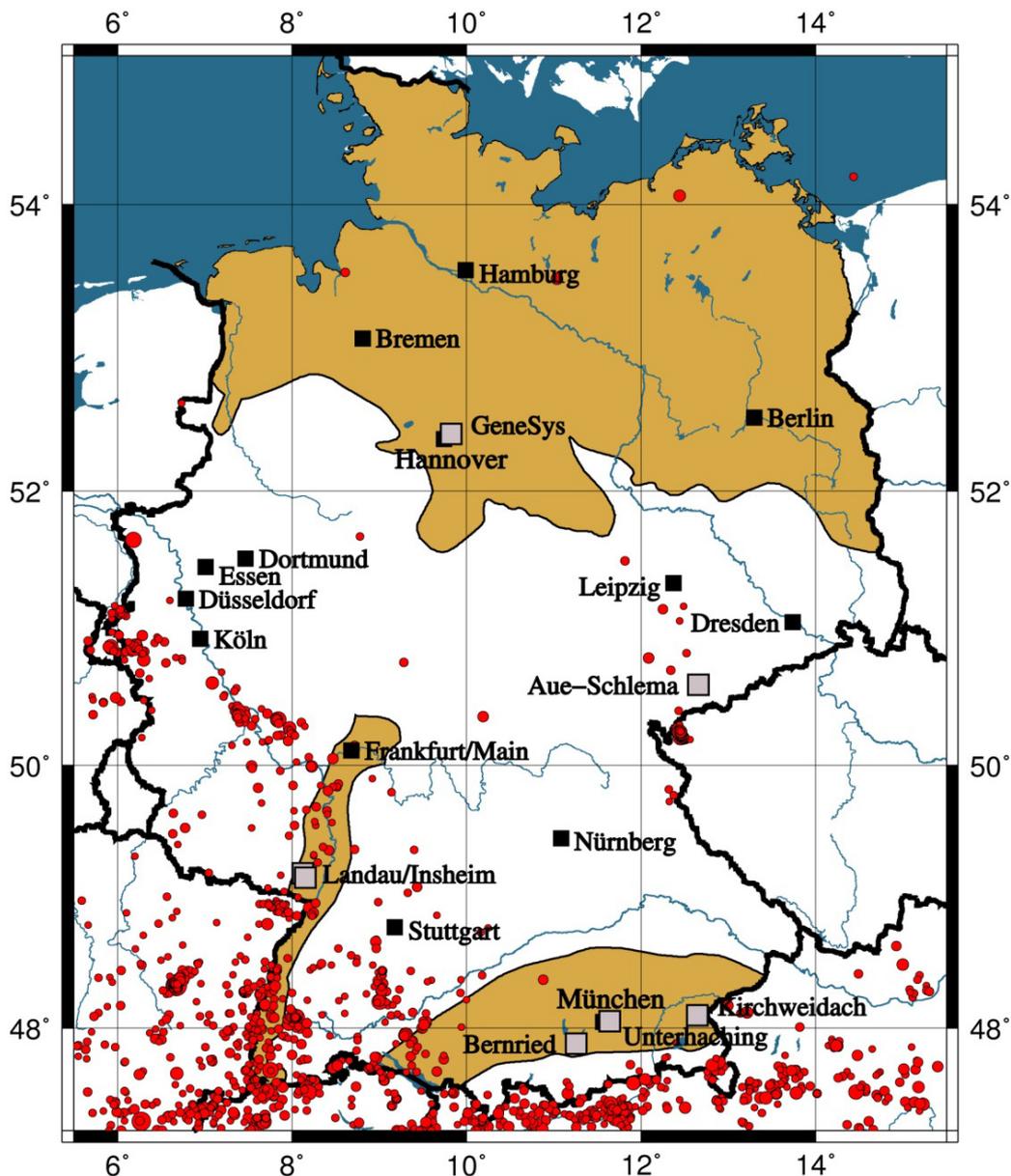
Hierbei sind  $\log_{10}$  der Logarithmus zur Basis 10 und  $N_{\geq M}$  die Anzahl der Erdbeben größer als Magnitude  $M$  pro Zeiteinheit und in einem festgelegten Volumen der Erde.  $a$  und  $b$  sind zwei Parameter, wobei  $a$  etwas über die Gesamtanzahl der Erdbeben in dieser Region aussagt, während  $b$  das Verhältnis zwischen der Anzahl der großen und der kleinen Beben festlegt. Der  $b$ -Wert liegt im Allgemeinen im Bereich  $b = 0,6 \dots 1,3$ , kann für induzierte Seismizität aber auch größere Werte bis etwa 2 annehmen. Die Gutenberg-Richter-Beziehung ist in Abbildung 4 am Beispiel des Standorts Unterhaching dargestellt. Unterhalb einer bestimmten Magnitude folgen die beobachteten Daten nicht mehr der Gutenberg-Richter-Beziehung. Dies liegt jedoch nicht an der Ungültigkeit der Beziehung, sondern daran, dass diese Erdbeben zu klein sind, um noch beobachtet werden zu können. Diese Grenzmagnitude  $M_c$  wird daher auch als Vollständigkeitsmagnitude des Erdbebenkatalogs bezeichnet. Bei hohen Magnituden können durch einen zu kurzen Beobachtungszeitraum im Vergleich mit der Wiederkehrperiode oder aufgrund der Begrenzung des seismisch aktiven Volumens durch tektonische oder strukturgeologische/geometrische Gegebenheiten Abweichungen von der Geraden auftreten. An Hand der Gutenberg-Richter-Beziehung und der beobachteten kleinen Erdbeben, kann nun eine Wahrscheinlichkeit für das Auftreten größerer Magnituden abgeschätzt werden.



**Abbildung 4:** Anzahl  $N_{\geq M}$  der Erdbeben mit einer Magnitude größer als  $M$  pro Jahr als Funktion der Magnitude  $M$  für den Standort Unterhaching (09.01.2010 - 28.04.2013). Die senkrechte rote Linie markiert die Vollständigkeitsmagnitude  $M_c$ . Die blauen Punkte sind die beobachteten Erdbebenanzahlen, während die rot markierte Gerade der am besten angepassten Gutenberg-Richter-Beziehung entspricht.

### Ziele des MAGS-Forschungsvorhabens

Im Rahmen des MAGS-Projekts sollte die Seismizität an verschiedenen deutschen Standorten der tiefen Geothermie durch seismologische Messungen und Auswertungen möglichst genau charakterisiert werden. Die seismische Gefährdung an Standorten mit induzierter Seismizität sollte berechnet und mit der Gefährdung durch natürliche Erdbeben verglichen werden. Des Weiteren sollten Strategien zur Vermeidung spürbarer Seismizität bei hydraulischen Stimulationen und im Zirkulationsbetrieb geothermischer Kraftwerke entwickelt werden. Schließlich sollte das Verbundprojekt zu einem verbesserten Prozessverständnis bezüglich des Entstehens fluidinduzierter Erdbeben beitragen.



**Abbildung 5:** Deutschlandkarte mit den Geothermiestandorten, an denen im Rahmen des MAGS-Projekts seismische Monitoringnetzwerke aufgebaut wurden (graue Vierecke). Die Gebiete für mögliche hydrothermale Nutzung in Deutschland mit einer Aquifertemperatur von über 60° C nach Schulz und anderen (2007) sind in braun dargestellt. Die roten Kreise stellen tektonische Erdbeben aus dem Erdbebenkatalog der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe dar, die im Zeitraum vom 01.01.2000 bis zum 14.02.2012 stattfanden und eine Magnitude größer oder gleich 2 hatten.

## **Untersuchte Gebiete und Standorte**

Einen Schwerpunkt der Forschungsarbeiten bildeten hydrogeothermale Systeme, da hier für die nahe Zukunft die meisten Anwendungen zu erwarten sind. Abbildung 5 zeigt die geothermischen Potentiale in Deutschland nach Schulz et al. (2007). Hiernach ist eine hydrothermale Nutzung in Gebieten des Oberrheingrabens, der Molasse sowie des norddeutschen Beckens zu erwarten. Diese Regionen sind daher die geographischen Schwerpunkte der im Verbundvorhaben untersuchten Gebiete. Es zeigen sich deutliche Unterschiede in der Erdbebenaktivität: Während der Oberrheingraben eine für Deutschland hohe natürliche Seismizität aufweist, ist diese im norddeutschen Becken äußerst gering (Abbildung 5). Insgesamt wurden im Rahmen des MAGS-Projekts an sieben verschiedenen Standorten in Deutschland seismische Monitoringnetzwerke aufgebaut (Abbildung 5). Dort wurde die Seismizität detailliert aufgezeichnet und ausgewertet. Von diesen sieben Standorten befanden sich zwei im Oberrheingraben (Landau, Insheim), drei in der Molasse (Unterhaching, Bernried, Kirchweidach) und einer im Norddeutschen Becken (Hannover). Darüber hinaus wurde ein seismisches Monitoring auch am geplanten Standort einer petrothermalen Geothermiebohrung in Aue-Schlema installiert. Da die Forschungsarbeiten möglichst praxisnah erfolgen sollten und im Rahmen des MAGS-Projekts keine eigene Geothermieanlage aufgebaut oder betrieben wurde, kooperierte der MAGS-Forschungsverbund mit verschiedenen Geothermiefirmen, wobei sowohl fertige Anlagen in der Betriebsphase als auch Anlagen in der Planungs- und Aufbauphase untersucht wurden. Ein Datennutzungsvertrag ermöglichte den MAGS-Projektteilnehmern auch die Daten der entsprechenden Betreiberfirmen an diesen sieben Standorten zu Forschungszwecken zu nutzen. Neben den von uns größtenteils selbst gewonnenen seismologischen Daten stellten die Eigentümer der Anlagen hierbei freundlicherweise insbesondere detaillierte Untergrundinformationen sowie hydraulische Parameter des Kraftwerkbetriebs zur Verfügung.

Die folgenden sieben Standorte wurden näher untersucht:

### **Landau (Oberrheingraben)**

Betreiber (im Zeitraum des MAGS-Projekts): Geo x GmbH

Das Kraftwerk nutzt Heißwasservorkommen aus bis zu 3.000 m tiefen Gesteinsschichten zur Stromerzeugung und Wärmeversorgung. Basis der Anlage sind zwei Bohrungen, die bis in eine Tiefe von rund 3.000 m reichen, wo eine Thermalwassertemperatur von rund 160 °C vorliegt. Der Abstand der Bohrungen unter Tage beträgt fast 1,5 km. Das Kraftwerk startete im November 2007 mit dem Probetrieb, der offiziellen Inbetriebnahme und der Stromerzeugung. Am 15.08.2009 kam es zu einem Erdbeben bei Landau, welches eine Magnitude von  $M_L = 2,7$  hatte und im ganzen Stadtgebiet von Landau und teilweise im Umkreis deutlich spürbar war. Dieses Ereignis war einer der Gründe sich in unserem Forschungsverbund näher mit der Thematik auseinanderzusetzen. Insbesondere im Bericht zum Einzelprojekt 1 wird über die Ergebnisse zu diesem Standort berichtet.

### **Insheim (Oberrheingraben)**

Betreiber: Pfalzwerke geofuture GmbH

Das Geothermiekraftwerk Insheim liegt ebenfalls im Oberrheingraben nur 4 km vom Kraftwerk Landau entfernt. Es wird eine Thermalwassertemperatur von 165 °C erreicht. Im April 2009, im November 2009 und im März bis April 2010 wurden dort Zirkulationstests durchgeführt, um die Fließraten zu überprüfen. In diesem Zusammenhang kam es dort zu Seismizität. Die Inbetriebnahme des Kraftwerks fand im November 2012 statt. Die Ergebnisse unse-

res Forschungsvorhabens zu diesem Standort sind ebenfalls im Bericht zum Einzelprojekt 1 enthalten.

### **Unterhaching (Molasse)**

Betreiber: Geothermie Unterhaching GmbH & Co KG

Das Geothermiekraftwerk Unterhaching fördert aus einer Tiefe von 3.350 Metern 122 °C heißes Thermalwasser einer Malmkarstschicht über eine Bohrung mit einer Schüttung von 150 Litern pro Sekunde. Nach der Nutzung wird es in einer zweiten, 3.590 Meter tiefen Bohrung wieder in den Untergrund injiziert. Das Kraftwerk liefert seit Oktober 2007 Fernwärme an die Haushalte der Gemeinde. Seit Mai 2008 wird zusätzlich mit Hilfe der Kalina-Technologie Strom erzeugt. In der Nähe der Anlage konnte ebenfalls Mikroseismizität festgestellt werden, über die im Einzelprojekt 2 berichtet wird.

### **Bernried (Molasse)**

Betreiber: Bernried Erdwärme Kraftwerk GmbH

In Bernried wird von der Firma Bernried Erdwärme Kraftwerk GmbH ein Geothermieprojekt zur Fernwärmeerzeugung mit zusätzlicher Verstromung mit geplanten zwei Dubletten und hohen Förderraten (> 120 l/s) entwickelt. Im Rahmen des MAGS-Projekts wurde ein seismologisches Netzwerk auf dem Erlaubnisfeld Bernried am Starnberger See errichtet. Bis zum Verfassen dieses Berichts wurde jedoch entgegen der ursprünglichen Planung noch keine Geothermiebohrung niedergebracht, so dass damit lediglich Daten zur Dokumentation von natürlicher Mikroseismizität an diesem Standort vorliegen. Details finden sich im Bericht zum Einzelprojekt 2

### **Kirchweidach (Molasse)**

Betreiber: GEOenergie Kirchweidach GmbH

Am Standort Kirchweidach war von der Firma GEOenergie Kirchweidach eine Dublette mit hohen Förderraten (> 120 l/s) zur Fernwärmeversorgung und Verstromung geplant. Im Laufe der Zirkulationstests (gegen Mitte der MAGS Projektlaufzeit) konnte jedoch letztlich gegenüber den Genehmigungsbehörden kein stabiler Betrieb bei diesen hohen Förderraten nachgewiesen werden, so dass nach aktuellem Stand keine Verstromung möglich ist. Als alternative Nutzung der erzeugten Wärme wurde jedoch bereits die Nutzung durch einen landwirtschaftlichen Großbetrieb vertraglich geregelt. Auch hier wurde im Rahmen des MAGS-Projektes ein seismologisches Netzwerk errichtet. Es konnte während des MAGS Projektes keine Mikroseismizität festgestellt werden. Details finden sich im Bericht zum Einzelprojekt 2.

### **Hannover (GeneSys, Norddeutsches Becken)**

Betreiber: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

Das GeneSys-Projekt der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe hatte sich zum Ziel gesetzt, exemplarisch das Nutzungspotenzial der geringporösen, kaum durchlässigen Sedimentgesteine des Norddeutschen Beckens in Hannover aufzuzeigen. Mit der fast 4 km tiefen GeneSys-Bohrung sollte Erdwärme gewonnen werden, um die Bürogebäude des Geozentrums Hannover geothermisch zu beheizen. Hier wurde im Mai 2011 eine hydraulische Stimulation durchgeführt. Es konnte jedoch trotz intensiven seismologischen Monitorings kein einziges induziertes Erdbeben festgestellt werden. Die Details hierzu finden sich im Bericht zum Einzelprojekt 3.

## **Aue-Schlema (Kristallin)**

Betreiber: WISMUT GmbH

In unmittelbarer Nähe zu einem geplanten Standort für eine tiefe Geothermiebohrung ins Kristallin wurden im Rahmen des MAGS-Projekts ebenfalls Untersuchungen durchgeführt. Induzierte und natürliche Seismizität wurde bereits seit Beginn der 90er Jahre detailliert verfolgt, wobei insbesondere der Flutungsprozeß der Wismut-Grube Schlema/Alberoda interessierte. Hierzu berichtet das Einzelprojekt 7.

### **Die untersuchten Zeitabschnitte**

Im Rahmen des Verbundprojektes sollten drei Zeitabschnitte während des Baus und des Betriebs eines geothermischen Kraftwerks analysiert werden. Der erste Zeitabschnitt liegt vor dem Bohrbeginn. Zu diesem Zeitpunkt erfolgt eine 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. Bisher bestehen keine standardisierten Methoden, um vor dem Auftreten von Mikroseismizität die seismische Gefährdung zu berechnen. Erste Erfahrungswerte scheinen aber zu zeigen, dass die Wahrscheinlichkeit des Auftretens induzierter Erdbeben in Gebieten hoher natürlicher Seismizität (z.B. Oberrheingraben) höher ist als in Gebieten geringer natürlicher Seismizität (z.B. Norddeutsches Becken). Bei ausreichender Kenntnis der physikalischen Eigenschaften des Untergrundes kann die zu erwartende Seismizität mit Hilfe numerischer Simulationen abgeschätzt werden. Diese Methoden werden unter anderem in den Berichten zu den Einzelprojekten EP6 und EP7 vorgestellt.

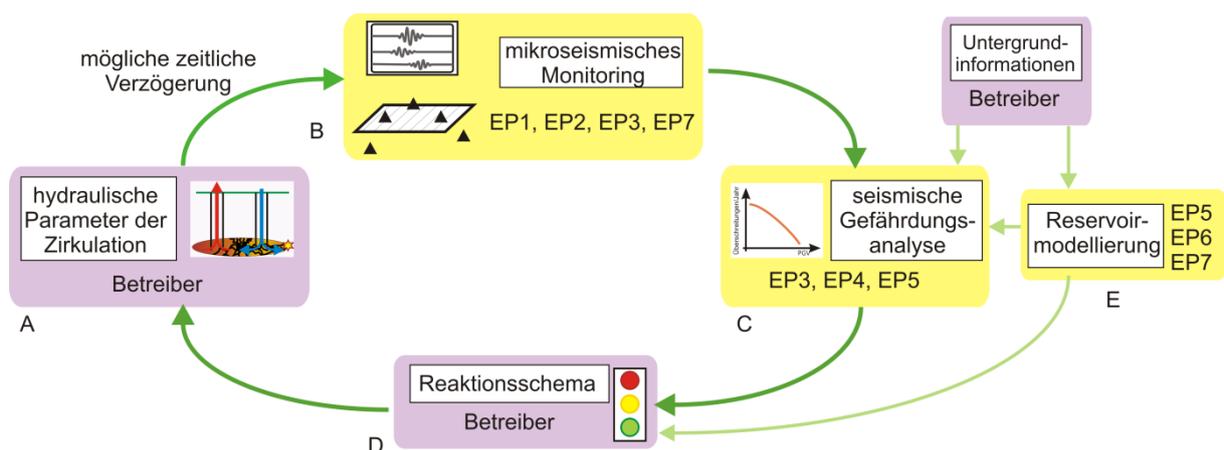
Im zweiten Zeitabschnitt, der im Rahmen von MAGS untersucht wurde, geht es um hydraulische Stimulationen. Wenn die Durchlässigkeit des Untergrundes nicht ausreicht, um ein geothermisches Kraftwerk zu betreiben, werden mit Hilfe einer hydraulischen Stimulation neue Risse im Untergrund erzeugt oder bestehende aufgeweitet. Die hydraulischen Parameter der Stimulation müssen hierbei so eingestellt werden, dass einerseits ausreichend Durchlässigkeiten im Untergrund erzeugt werden und andererseits möglichst wenige spürbare Erschütterungen und keine Gebäudeschäden an der Erdoberfläche verursacht werden. Zur Einschätzung der seismischen Gefährdung während hydraulischer Stimulationen konnte auf bewährte Methoden der seismischen Gefährdungsanalyse zurückgegriffen werden, die aber auf den speziellen Fall angepasst werden mussten. Die zu Beginn der Stimulation beobachtete Mikroseismizität kann verwendet werden, um Magnituden-Häufigkeits-Verteilungen und die zeitliche Entwicklung der Seismizität abzuschätzen. Im Vergleich zu den Standardverfahren der seismischen Gefährdungsanalyse muss aber berücksichtigt werden, dass die seismische Gefährdung zeitabhängig ist und sich im Laufe von Tagen ändern kann. Im Rahmen von MAGS wurden Methoden entwickelt, welche die seismische Gefährdung während hydraulischer Stimulationen zeitabhängig berechnen. Des Weiteren wurden Kriterien entwickelt, wie beim Erreichen bestimmter Grenzwerte der Gefährdung die hydraulischen Parameter der Stimulation modifiziert werden müssen. Die Details zu diesen Untersuchungen sind in den Berichten der Einzelprojekte EP3, EP5 und EP6 zu finden.

Der letzte im Rahmen von MAGS untersuchte Zeitabschnitt war der Dauerbetrieb eines geothermischen Kraftwerks. Hierbei wurde bis vor kurzem angenommen, dass keine Seismizität zu erwarten ist. Die Beispiele Landau und Unterhaching zeigten jedoch, dass auch im Zirkulationsbetrieb Mikrobeben verursacht werden können. Ein wichtiger Bestandteil des Verbundprojekts war die verbesserte Erfassung and Analyse der Mikroseismizität in der Nähe geothermischer Kraftwerke insbesondere in der Südpfalz und in der bayerischen Molasse.

An Hand der beobachteten Mikroseismizität lässt sich auch in diesem Zeitabschnitt die seismische Gefährdung einschätzen. Existierende Methoden der probabilistischen seismischen Gefährdungsanalyse wurden im Rahmen von MAGS auf den Fall fluidinduzierter Seismizität angepasst. Zu diesem Zeitabschnitt berichten insbesondere die Einzelprojekte EP1, EP2, EP4 und EP5.

### Konzept der kontrollierten Stimulation bzw. des kontrollierten Betriebs

Das wesentliche Konzept zur Begrenzung der seismischen Aktivität, das im MAGS-Projekt verfolgt wurde, ist in Abbildung 6 am Beispiel des Zirkulationsbetriebs dargestellt. Eine ähnliche Abbildung gilt auch für die hydraulische Stimulation. Durch die Zirkulation von heißem Thermalwasser mit festgelegten hydraulischen Parametern (Abbildung 6 A) erhöht sich der Porenwasserdruck in bestimmten Regionen des Untergrundes. Hierdurch kann Mikroseismizität ausgelöst werden, die mit Hilfe eines seismischen Monitorings (Abbildung 6 B) beobachtet wird. Aus der gemessenen Anzahl der Mikroerdbeben wird in einer seismischen Gefährdungsanalyse (Abbildung 6 C) die Wahrscheinlichkeit stärkerer Erdbeben abgeschätzt. Dieser aktuelle Gefährdungszustand wird in einem Reaktionsschema (Abbildung 6 D) mit festgelegten Grenzwerten verglichen. Beim Überschreiten eines Grenzwertes erfolgt eine Änderung der hydraulischen Parameter des geothermischen Kraftwerks (Abbildung 6 A) mit dem Ziel, den Porenwasserdruck zu senken. Auf Grund des Ausbreitungsprozesses des Wassers im Untergrund kann hier eine zeitliche Verzögerung zwischen dem Senken des Porendrucks am Bohrloch und dem Senken des Porendrucks im seismisch aktiven Gesteinsvolumen auftreten. Neben diesen grundsätzlichen Schritten A-D aus Abbildung 6 wurden im Rahmen von MAGS auch Reservoirmodellierungen durchgeführt (Abbildung 6 E). Die im Untergrund ablaufenden Prozesse werden durch numerische Algorithmen am Computer simuliert. Hierdurch wird das Prozessverständnis verbessert, was dann zur Verbesserung der seismischen Gefährdungsanalyse sowie der Ableitung von Gegenmaßnahmen im Reaktionsschema führt.



**Abbildung 6:** Prinzipskizze zur kontrollierten Zirkulation. Die im Rahmen des MAGS-Forschungsprojekts bearbeiteten Schritte sind in gelb unterlegt, wobei zusätzlich auch das entsprechende Einzelprojekt (EP) angegeben ist.

Im Rahmen des MAGS-Projekts wurden insbesondere Methoden den Themen seismisches Monitoring, seismische Gefährdungsanalysen und Reservoirmodellierung entwickelt. Die Reaktionsschemen sowie die tatsächlich angewandten hydraulischen Parameter wurden hingegen von den Eigentümern der Kraftwerke, den Betreiberfirmen, festgelegt.

### **Mikroseismisches Monitoring**

Um die in Deutschland im Zusammenhang mit geothermaler Energiegewinnung auftretende Seismizität genauer zu charakterisieren, wurden seismologische Messstationen im Umfeld von sieben Geothermiebohrungen und –kraftwerken aufgebaut. Die Installation dieser neuen seismologischen Messstationen erfolgte in den drei derzeitigen Regionen für hydrogeothermale Energiegewinnung in Deutschland - dem Oberrheingraben, dem Molassebecken und dem norddeutschen Becken sowie in unmittelbarer Nähe zu einem Standort für eine geplante petrothermale Geothermieanlage. Hierbei wurde sowohl die Seismizität im Zusammenhang mit hydraulischen Stimulationen (EP3) als auch im Zusammenhang mit dem Dauerbetrieb von Kraftwerken gemessen und charakterisiert (EP1 und 2). Die im Rahmen des Projektes durchgeführten Auswertungen der so gewonnenen Registrierungen und bereits vorliegenden Daten beinhaltete die Ermittlung von Herdzeiten und –orten sowie von Erdbebenmagnituden als Maß für die Stärke. Die Auswertung der Seismizität wurde sowohl interaktiv (EP1, 2 und 7) als auch automatisch (EP1, 2 und 3) durchgeführt. Weiterhin wurden Herdflächenlösungen und Seismizitätscluster sowie Anisotropie bestimmt. In EP1 wurde eine 3-D Wellenfeldsimulation zur ersten Überprüfung der Ergebnisse berechnet und eine Analyse der maximalen Bodenschwinggeschwindigkeiten durchgeführt.

### **Seismische Gefährdungsanalyse**

In seismischen Gefährdungsanalysen werden die Einwirkungen der induzierten Seismizität an der Oberfläche quantifiziert (EP4), bzw. nach DIN 4150 gemessen und bewertet (EP1). Diese Einwirkungen können in Form von Intensitäten oder Bodenbewegungsgrößen wie der Geschwindigkeit oder der Beschleunigung des Bodens spezifiziert sein. Damit wird der notwendige Schritt von der Charakterisierung der induzierten Seismizität in Bezug auf ihre räumliche Lage und die Häufigkeitsverteilung der Magnituden zur Beschreibung ihrer Wirkung an der Oberfläche vollzogen. Die probabilistische seismische Gefährdungsanalyse ist die Standardmethode, um die Gefährdung durch natürliche tektonische Erdbeben zu berechnen. Eine Grundannahme dabei ist, dass sich die tektonischen Kräfte nur in geologischen Zeiträumen ändern und daher hier als zeitlich konstant angesehen werden können. Das Ergebnis ist somit eine zeitunabhängige seismische Gefährdung, die etwa die Grundlage zur Einteilung Deutschlands in Erdbebenzonen in der DIN 4149 ist. Die Methode wurde auf die induzierte Seismizität bei tiefer Geothermie übertragen (EP4), wobei angenommen wurde, dass bei konstanten hydraulischen Parametern im Zirkulationsbetrieb keine oder nur eine sehr langsame Änderung der seismischen Gefährdung mit der Zeit auftritt.

Während einer hydraulischen Stimulation wäre es ebenfalls wünschenswert, eine seismische Gefährdungsanalyse durchzuführen. Hierzu müsste aber bei laufender Stimulation die Seismizität genau ausgewertet werden, um dann daraus während des laufenden Prozesses die zeitabhängige Gefährdung zu berechnen. Auf Grund der notwendigen kurzen Reaktionszeit ist diese Aufgabe noch anspruchsvoller als die Berechnung für den Dauerbetrieb. In EP3 und EP5 wurde daher im Rahmen von MAGS nicht die seismische Gefährdung, sondern nur die Überschreitenswahrscheinlichkeit bestimmter Erdbebenmagnituden analysiert.

## **Reservoirmodellierung**

Numerische Reservoirmodellierungen können helfen, eine mögliche Zeitabhängigkeit der seismischen Gefährdung abzuschätzen. Hierbei wurde die durch das Geothermiereservoir verursachte hydraulische und mechanische Spannungsänderung und die daraus folgende Erdbebenfähigkeit modelliert (EP5, 6, und 7). Voraussetzung zur Modellierung ist die Erstellung eines detaillierten Modells des geothermischen Reservoirs und seiner Umgebung inklusive der Störungzonen. EP6 setzte hauptsächlich deterministische Methoden mit thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelten Modellen ein, um die Fallbeispiele GeneSys und Basel zu modellieren. In EP5 wurden Analysen durchgeführt, bei denen die Hydraulik deterministisch modelliert wurde, das Auftreten von Erdbeben aber durch einen statistischen Prozess simuliert wurde. Des Weiteren wurden auch Modelle entwickelt, die auf der Grundlage von Injektionsparametern und seismotektonischen Eigenschaften des geothermischen Reservoirs eine Vorhersage der zeitlichen Entwicklung der Mikroseismizität erlauben (EP5). Neben der Abschätzung der Gefährdung durch induzierte Seismizität und dem verbesserten Prozessverständnis wurden auch Strategien entwickelt, um hydraulische Stimulationen so verbessern zu können, dass es nicht zu spürbarer Erdbebenfähigkeit kommt (EP6).

## **Wesentliche Ergebnisse des MAGS-Projekts**

Im Bereich Landau-Insheim wurden beide Standorte auf Grund des geringen Abstandes der beiden Kraftwerke mit demselben seismologischen Netzwerk analysiert. Hierbei baute hauptsächlich das Karlsruher Institut für Technologie (EP1) und ab 2012 auch die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (EP3) seismische Messstationen auf. Zusätzlich stellten die Betreiber ihre eigenen seismologischen Daten zur Verfügung. Hierdurch stand für die Forschungsarbeiten ein sehr dichtes Messnetz zur Verfügung. Während der Projektlaufzeit von MAGS konnten 1.982 Ereignisse im Zeitraum zwischen März 2006 bis September 2013 detektiert und einem der beiden seismischen Volumen (Landau bzw. Insheim) zugeordnet werden. 1.363 Ereignisse entfallen auf Landau und 619 Ereignisse auf Insheim. Unter Verwendung ausschließlich regionaler Aufzeichnungen, z.B. der Station BFO (Black Forest Observatory, Epizentraldistanz etwa 100 km), konnte für den Zeitraum vor Beginn des MAGS-Projekts eine Vollständigkeitsmagnitude von ca.  $M_L = 1$  bis 1,5 erreicht werden. Während des MAGS-Projektzeitraums sank die Detektionsschwelle (Vollständigkeitsmagnitude) von  $M_L = 0,5$  am Anfang des Projekts auf  $M_L = -0,5$  gegen Ende des Projekts, was insbesondere auch durch die Installation von zwei Bohrlochseismometern in Flachbohrungen erreicht wurde.

In Unterhaching wurde das seismologische Netzwerk von der Ludwig-Maximilians-Universität München aufgebaut und betrieben. In der Zeit vor Beginn des lokalen Monitorings standen fast ausschließlich regionale Stationen des Erdbebendienstes Bayern zur Verfügung. Hier betrug die Vollständigkeitsmagnitude etwa  $M_L = 1,5$ . In der Zeit von November 2008 bis Januar 2010 wurden bereits zwei lokale Seismometer eingesetzt. Damit konnte für diesen Zeitraum eine Magnitude der Vollständigkeit von  $M_L = 0,1$  erreicht werden. Für den MAGS-Zeitraum von Januar 2010 bis Ende April 2013 liegt mit einer Vollständigkeitsmagnitude von  $M_L = -0,3$  die beste Datenbasis vor. Insgesamt konnten 470 Mikrobeben detektiert werden.

In Hannover wurde durch die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe ein seismologisches Beobachtungsnetz zur Überwachung der hydraulischen Stimulation der GeneSys-Bohrung installiert. Hier zeigte sich, dass trotz des Einsatzes von mehreren Geophonen in Flachbohrungen kein einziges Mikroerdbeben registriert werden konnte. Ein Vergleich mit dem Rauschniveau an den eingesetzten Seismometern ergab, dass bereits ein Mikroerdbeben mit einer Magnitude von  $M_W = -0,5$  sicher detektiert worden wäre. Dies bestätigte die

vorherige Einschätzung, dass im Norddeutschen Becken bei tiefer Geothermie eine eher geringe Gefährdung durch fluid-induzierte Seismizität besteht.

Eine genaue Lokalisierung der Herdgebiete der Mikrobeben und die Berechnung der Bruchmechanismen einiger stärkerer Erdbeben sind in guter Übereinstimmung mit dem Standardmodell für fluidinduzierte Seismizität (Abbildung 2). Die vom KIT (EP1) ausgewerteten Mikrobeben in Landau liegen entlang bereits aus anderen Untersuchungen bekannten Störungszonen im Untergrund. Die Bruchprozesse der stärkeren Erdbeben zeigen eine Bruchrichtung, die ebenfalls mit den vorhandenen Schwächezonen im Einklang ist. Dies sind beides wichtige Hinweise, dass tatsächlich entsprechend dem Standardmodell zur Erklärung fluid-induzierter Seismizität vorhandene Störungszonen durch eine Erhöhung des Porenwasserdrucks reaktiviert werden.

Auch in Unterhaching konnte ähnlich wie in Landau gezeigt werden, dass die Messdaten gut mit diesem Standardmodell erklärt werden können. Eine genaue Relativlokalisierung der LMU München (EP2) zeigt eine Ausrichtung der Mikroerdbeben entlang bekannter Störungszonen. Auch die bestimmten Herdmechanismen sind im Einklang mit der Vorstellung, dass durch eine Porenwasserdruckerhöhung eine Schwächezone der Erdkruste reaktiviert wurde.

Die Verwendung der Anhaltswerte der DIN 4150 zur Untersuchung der Erschütterungen aufgrund von 35 induzierten Erdbeben ( $0,7 \leq M_L \leq 2,7$ ) in einer Tiefe von  $\sim 3$  km im Umfeld des Geothermiekraftwerks Landau zeigt, dass deren Erschütterungen ab etwa  $M_L = 1,3$  die Spürbarkeitsgrenze überschreiten. Bei den zwei stärksten Ereignissen mit  $M_L = 2,7$  und  $M_L = 2,4$  wurde der Anhaltswert der DIN 4150-3 von 3 mm/s für mögliche Schäden an sehr empfindlichen Gebäuden (z. B. Fachwerkhäuser) überschritten. Der Anhaltswert von 5 mm/s für mögliche Schäden an gewöhnlichen Wohnhäusern wurde nahezu erreicht.

An der Freien Universität Berlin (EP5) wurde der Zusammenhang zwischen der Anzahl der induzierten Erdbeben und dem bei einer hydraulischen Stimulation verpressten Flüssigkeitsvolumen untersucht. Weltweite Datensätze bestätigten, dass die Anzahl der Erdbeben proportional zum Volumen ansteigt. Mit Hilfe der entwickelten Methoden lässt sich an Hand der in der frühen Phase der Stimulation auftretenden Mikroseismizität die noch zu erwartende Seismizität berechnen. Darüber hinaus wurden auch Methoden zur Abschätzung der nach dem Ende der Stimulation zu erwartenden Seismizität, der Nachbebenetätigkeit, entwickelt. Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (EP3) entwickelte einen automatischen Erdbebendetektor, der die in Echtzeit übertragenen seismologischen Daten analysiert und auch kleine Erdbebensignale zuverlässig in der kontinuierlichen Bodenunruhe findet. Dieser Algorithmus wurde in ein etabliertes seismologisches Frühwarnsystem integriert, so dass beim Auftreten von Erdbeben automatisch Alarm-E-Mails und Alarm-SMS verschickt werden können. Die von der FU Berlin entwickelten Methoden wurden ebenfalls in dieses automatische Analyseprogramm integriert, so dass nun während einer hydraulischen Stimulation in Echtzeit Abschätzungen berechnet werden können, wie sich auftretende Seismizität weiter entwickeln wird.

Die TU Clausthal (EP6) vollzog mit Hilfe numerischer Modelle verschiedene hydraulische Stimulationen am Computer nach. Hierdurch konnte insbesondere erklärt werden, warum während der GeneSys-Stimulation in Hannover keine Seismizität auftrat, während bei der Stimulation in Basel bei ähnlichen hydraulischen Parametern starke Seismizität beobachtet wurde. Es zeigte sich, dass ein wesentlicher Unterschied in der Gesteinsart (Sandstein gegenüber Granit) liegt. Wichtig sind auch das lokale Spannungsfeld (extensional gegenüber transpressiv) und der damit einhergehende unterschiedliche Versagensprozess (dominantes

Zugbruchverhalten gegenüber dominantem Scherbruchverhalten). Schließlich besteht auch ein signifikanter Unterschied in den unmittelbar lokal vorhandenen Störungszonen.

Die an der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe im Rahmen von EP4 durchgeführten Arbeiten konzentrierten sich auf die Bereitstellung eines Verfahrens für die probabilistische Gefährdungsberechnung für induzierte Seismizität bei tiefer Geothermie im Zirkulationsbetrieb zur Anwendung bei Standortuntersuchungen. Dabei werden die zu erwartenden Häufigkeiten für die Überschreitung vorgegebener Werte der Einwirkungen berechnet. Mit der Berechnung der Häufigkeiten für die Bodenschwinggeschwindigkeit (PGV) konnte der Bezug zu genormten Werten für die Einwirkungen auf bauliche Anlagen und auf Menschen hergestellt werden (DIN 4150). Es ist damit möglich, die erwartete Anzahl des Auftretens von Einwirkungen oberhalb der Fühlbarkeitsgrenze und oberhalb der Grenze von leichten Gebäudeschäden anzugeben. Werte für eine „akzeptable“ oder „erlaubte“ Anzahl von Überschreitungen können von Expertengruppen oder von Genehmigungsbehörden festgelegt werden. Das Verfahren kann weiterhin in Monitoring-Konzepte („Ampel-Systeme“) integriert werden, um die Einwirkungen gemessener oder vorgegebener Magnituden der induzierten Seismizität einzubeziehen. In MAGS durchgeführte erste Vergleiche der seismischen Gefährdung durch natürliche und induzierte Seismizität zeigen, dass die Gefährdung oberhalb der Fühlbarkeitsgrenze von der natürlichen Seismizität dominiert wird und die induzierte Seismizität erst bei kleineren PGV-Werten relevant ist. Insbesondere bei dem DIN 4150-Grenzwert von 5 mm/s wird die Gefährdung durch die natürliche Seismizität dominiert. Eine Verallgemeinerung dieser Resultate der Pilotstudie ist allerdings aufgrund der Begrenztheit der zugrunde liegenden Daten nicht möglich. Die Ergebnisse sind als vorläufig zu bewerten und Abschätzungen nach unten, da im Modell lokale Verstärkungseffekte und mögliche getriggerte Seismizität nicht berücksichtigt wurden.

## II. Empfehlungen als Ergebnisse des Verbundprojekts MAGS

Die hier dargestellten Empfehlungen entsprechen als Ergebnisse des Forschungsprojekts MAGS dem derzeitigen wissenschaftlichen Kenntnisstand. Mit fortschreitender Forschung ist eine Weiterentwicklung der Methoden und damit auch der Empfehlungen zu erwarten. Wir empfehlen zur schnellen Umsetzung neuer Forschungsergebnisse daher die Kooperation zwischen Wissenschaft und Bergbehörden, bzw. Betreibern.

### Empfehlungen zur Umsetzung in die Praxis

Zur Begrenzung der seismischen Gefährdung empfehlen wir die Anwendung des Prinzips der kontrollierten Zirkulation (Abbildung 6). Dieses beinhaltet die folgenden drei Elemente:

1. ein mikroseismisches Monitoring,
2. eine Methode zur Berechnung der aktuellen seismischen Gefährdung und
3. ein Reaktionsschema mit
  - a. festgelegten Grenzwerten der seismischen Gefährdung sowie
  - b. Gegenmaßnahmen für den Fall, dass die aktuelle seismische Gefährdung einen der Grenzwerte überschreitet.

#### zu 1. Mikroseismisches Monitoring

Für das Monitoring induzierter Seismizität sollen die Empfehlungen im Positionspapier des FKPE e.V. beachtet werden.

Baisch, S., Fritschen, R., Groos, J., Kraft, T., Plenefisch, T., Plenkens, K., Ritter, J.R.R., Wassermann, J., Empfehlungen zur Überwachung induzierter Seismizität, Positionspapier des FKPE e.V., *Mitteil. Deut. Geophys. Gesell.*, 3/2012, 17-31, 2012.

Die Analyse seismischer Ereignisse erlaubt Rückschlüsse auf die Ursachen und Geometrie der Seismizität. Weiterhin können strukturelle Eigenschaften des Untergrunds (seismische Geschwindigkeiten, Anisotropie etc.) bestimmt werden. Diese sind wiederum wichtige Parameter zur Ursachenforschung. Deshalb ist zunächst die Detektion von seismischen Ereignissen (auch sehr schwachen) notwendig. Wir empfehlen eine automatische Echtzeitauswertung der seismologischen Aufzeichnungen und eine anschließende manuelle Überprüfung. Für die automatische Detektion hat sich im MAGS-Projekt der Kreuzkorrelationsdetektor als zuverlässigste Methode erwiesen.

Für eine genaue Lokalisierung der induzierten Seismizität sind lokale seismische Geschwindigkeitsmodelle des Untergrundes notwendig. Dies bezieht sich neben der Kompressionswellengeschwindigkeit ( $v_p$ ) insbesondere auch auf die Scherwellengeschwindigkeit ( $v_s$ ). Für eine ausreichend genaue Bestimmung der Hypozentraltiefe wird eine Kalibration des Geschwindigkeitsmodells ( $v_p$  und  $v_s$ ) empfohlen. Hierzu bieten sich entsprechend der FKPE-Richtlinie beispielsweise Kalibrationsschüsse in Bohrlöchern oder VSP-Messungen (VSP: Vertical Seismic Profiling) an. Wenn kein dreidimensionales Geschwindigkeitsmodell erstellt werden kann, empfehlen wir, ein eindimensionales, tiefenabhängiges Geschwindigkeitsmodell mit Stationskorrekturen zu verwenden. Dies Geschwindigkeitsmodell sollte vom Betreiber in der Projektentwicklung erstellt, bzw. in Auftrag gegeben werden und auch den Landeserdbebendienst idealerweise vor Injektionsbeginn zur Verfügung gestellt werden. Für die Kraftwerke Landau und Insheim wird empfohlen, etwaige zukünftige Bohrungen für Kalibrationsschüsse zu nutzen.

Im Forschungsprojekt MAGS2 sind Scherwellen-VSP-Messungen für den Bereich „Südlicher Großraum München“ geplant.

Für das Monitoring benachbarter Geothermieranlagen einer Region empfehlen wir die Entwicklung eines kosten- und detektions-optimierten, standortübergreifenden seismisches Monitoringnetzwerks. Dies beinhaltet auch den Austausch von seismologischen Daten in festgelegten Formaten zwischen verschiedenen Anlagen und dem zuständigen Landeserdbeben-dienst.

## zu 2. Seismische Gefährdungsanalyse

In vielen zurzeit verwendeten Reaktionsschemen werden als Stand der Technik zur Einschätzung des derzeitigen seismischen Gefährdungszustandes lediglich die Magnitude (M) und/oder die maximale Bodenschwinggeschwindigkeit (englisch: Peak Ground Velocity, PGV) des stärksten bisher aufgetretenen induzierten Erdbebens verwendet. Wir empfehlen die statistische Auswertung aller über einen gewissen Zeitraum aufgetretenen Erdbeben. Zu unterscheiden ist dabei zwischen der Zirkulation mit konstanten hydraulischen Betriebsparametern, bei der die seismische Gefährdung als gering zeitabhängig angenommen werden kann, und hydraulischen Stimulationen, wo sich die seismische Gefährdung zeitlich schnell ändern kann.

Als Ergebnis der Arbeiten von MAGS wird empfohlen, probabilistische Gefährdungsanalysen für Standorte tiefer Geothermie-Anlagen in der Betriebsphase durchzuführen. Hierbei werden die Einwirkungen der induzierten Seismizität an der Oberfläche quantifiziert. Diese Einwirkungen können in Form von Intensitäten oder Bodenbewegungsgrößen wie der Geschwindigkeit oder der Beschleunigung des Bodens spezifiziert sein. Mit der Berechnung der Häufigkeiten für die Bodenschwinggeschwindigkeit (PGV) kann der Bezug zu genormten Werten für die Einwirkungen auf bauliche Anlagen und auf Menschen hergestellt werden (DIN 4150). Es ist damit möglich, die erwartete Anzahl des Auftretens von Einwirkungen oberhalb der Fühlbarkeitsgrenze und oberhalb der Grenze von leichten Gebäudeschäden anzugeben. Im Laufe der Erkundung und des Betriebs der Anlagen sollen die standortspezifischen Datengrundlagen wie die Überprüfung und Auswahl der Bodenbewegungsmodelle, die Parameter der Magnituden-Häufigkeits-Verteilung bzw. Verteilungen, die Angabe der maximal möglichen Magnituden ebenso wie die Lagen der möglichen Quellen induzierter Seismizität ermittelt werden. Der Einsatz von Daten lokaler seismischer Netze ist hier von besonderer Bedeutung. Die Analyse muss bei Änderungen der o.g. Parameter jeweils neu durchgeführt werden.

Für die Stimulation empfehlen wir die Verwendung des im MAGS-Projekt entwickelten Modells zur Vorhersage von Auftrittswahrscheinlichkeiten induzierter Ereignisse mit Magnitude größer einer festgelegten Magnitude. Zur Berechnung werden neben den hydraulischen Parametern die Untergrundparameter b-Wert, seismogener Index und Omori-Parameter ( $p$ -Wert) benötigt. Für den Fall, dass diese Parameter für den gegebenen Standort noch nicht bekannt sind, lassen sie sich auf Grundlage von beobachteter Seismizität während eines hydraulischen Stimulationstests ermitteln.

### zu 3.a Grenzwerte der seismischen Gefährdung

Als Grenzwerte werden in bisherigen Reaktionsschemen meistens eine kritische Magnitude und/oder ein kritischer PGV-Wert angegeben. Für die empfohlene Gefährdungsanalyse sind nun zusätzlich eine maximale Auftritts- /Überschreitenswahrscheinlichkeit und ein Zeitraum, in dem dies zu erwarten ist, anzugeben. Zur Festlegung der Grenzwerte für den kritischen

PGV-Wert wird auf die DIN 4150 verwiesen. Werte für die „akzeptable“ oder „erlaubte“ Anzahl von Überschreitungen in einem definierten Zeitraum sollten von den Genehmigungsbehörden festgelegt werden, wobei auch die Gefährdung durch natürliche Seismizität Berücksichtigung finden sollte.

### zu 3.b Gegenmaßnahmen

Als einzige derzeit bekannte Maßnahme zur Reduktion der seismischen Gefährdung empfehlen wir eine langsame Reduktion des Drucks, bzw. der Förderraten.

Zusätzlich wird empfohlen als Informations-Maßnahme die (mögliche) Spürbarkeit aufgetretener Ereignissen zu kommunizieren (z.B. Spürbarkeitsampel). Dies gilt auch für kleine Magnituden, da beispielsweise die Untersuchungen zur Spürbarkeit der Ereignisse unter Landau (Groos et al., 2013) gezeigt haben, dass ab einer Lokalmagnitude von 1 eine Spürbarkeit bei ungünstigen Bedingungen (Tageszeit, Aufenthalt in höheren Stockwerken) grundsätzlich nicht ausgeschlossen werden kann.

Groos, J., Fritschen, R., Ritter, J.R.R., Untersuchung induzierter Erdbeben hinsichtlich ihrer Spürbarkeit und eventueller Schadenswirkung anhand der DIN 4150. Bauingenieur, 88, 374-384, 2013.

## **Empfehlungen bezüglich weiterer Forschung**

### 1. Erweitertes mikroseismisches Monitoring zu Forschungszwecken

#### a. Bohrlochstationen

Das seismische Monitoring bei Landau und GeneSys Hannover hat den großen Nutzen von Bohrlochmessstationen gezeigt, da das Signal-Stör-Verhältnis deutlich verbessert werden kann. Daher wird empfohlen, bei zukünftigen Forschungsprojekten in ähnlichen Umgebungen zur Untersuchung der Mikroseismizität Bohrlochseismometer mit Bohrloch-tiefen von 100-200 m einzusetzen.

Für Forschungszwecke wird zudem der Einsatz tiefer Bohrlochgeophone bei hydraulischen Stimulationen empfohlen, um auch sehr kleine Ereignisse zu detektieren und eine verbesserte Tiefenlokalisierung zu ermöglichen. Wenn technisch möglich, sollte bei der Stimulation ein Bohrlochgeophon in der Hauptbohrung installiert werden.

#### b. Relativlokalisierungen und Herdmechanismen

Um die Ursachen induzierter Seismizität zu analysieren, empfehlen wir die Bestimmung von Relativlokalisierungen und eine Clusteranalyse nicht-lokalisierbarer induzierter Ereignisse sowie die Bestimmung der Herdmechanismen. Diese Ergebnisse sollten mit bekannten Störungszonen im Untergrund verglichen werden. Durch die Beobachtung der räumlichen und zeitlichen Aktivität des Untergrunds sollen Aussagen ermöglicht werden, wo und wann im Untergrund zukünftig induzierte Mikroseismizität entstehen könnte.

### 2. Seismische Gefährdungsanalyse

#### a. Erschütterungsmessungen und -modellierungen

Bisher beinhalten Erschütterungsmessungen die Angabe eines PGV-Wertes an einem Seismometerstandort. Dieser wird dann mit den Grenzwerten aus der DIN 4150 verglichen. Der gemessene Wert gilt streng genommen nur für das Haus, in dem gemessen wurde. Wir empfehlen weitere Forschungsarbeiten zur flächenhaften Interpolation der

PGV-Werte, um zu einer Abschätzung der Erschütterungen an Standorten zu kommen, an denen nicht gemessen wurde. Die hierbei auftretenden Unsicherheiten sind zu quantifizieren. Die elastische Wellenausbreitung in der Erde und die auftretenden PGV-Werte bei hypothetischen Erdbeben sollten numerisch modelliert werden. Wir empfehlen zudem die Untersuchung von Standorteffekte, also die Verstärkung der Bodenerschütterung (PGV-Werte) durch den lokalen Untergrund. Diese Fragestellungen werden im derzeit laufenden Nachfolgeprojekt MAGS2 behandelt.

b. Gefährdungsanalyse und Reaktionsschemen - probabilistische Methoden

Die probabilistischen Methoden sollen durch die Einbeziehung der tektonischen Störungen erweitert werden, um Triggerung von Seismizität berücksichtigen zu können. Darüberhinaus ist der Einfluss der obersten Schichten auf die Auswirkung der seismischen Ereignisse an der Erdoberfläche zu untersuchen. Hierzu wird in MAGS2 die Methode der Mikrozonierung verwendet.

c. Untersuchung möglicher gegenseitiger seismischer Beeinflussung naheliegender Injektionsbohrungen

Wir empfehlen Forschungen zum seismischen Zusammenwirken nahe beieinanderliegender Kraftwerke. Zu beantworten ist hier insbesondere die Frage, unter welchen Umständen zwei Kraftwerke als seismologisch unabhängig voneinander betrachtet werden können und wann sie gemeinsam ein größeres seismisches Volumen bilden. Hiermit im Zusammenhang steht, ob die seismische Gefährdung gleich der Summe der Gefährdungen aus beiden Kraftwerken ist oder ob sie sich durch das Zusammenwirken erhöhen oder verringern kann. Diese Fragen sind Thema im laufenden Nachfolgeforschungsprojekt MAGS2.

3. Reservoir- und Seismizitätsmodellierung

a. Aussagen zur seismischen Gefährdung vor dem Bohren

Induzierte Seismizität kann dazu führen, dass eine Anlage nicht mit den gewünschten Fließraten betrieben werden kann. Daher sollte die seismische Gefährdung an einem geplanten Standort bereits vor dem Bohren abgeschätzt werden. In MAGS2 sind dazu Untersuchungen in Form einer vergleichenden Auswertung von gemessener und modellierter Seismizität geplant. Weiterhin sollen numerische Analysen bezüglich der zeitlichen Entwicklung der Seismizität, Untersuchungen zum Spannungsfeld und zum standortbezogenem Prozessverständnis durchgeführt werden. Wir empfehlen zu prüfen, inwieweit oder unter welchen Bedingungen Schlussfolgerungen von einem bereits erschlossenen auf einen neuen Standort übertragen werden können.

b. Sensitivitätsanalysen

Wir empfehlen mit Hilfe numerischer Modellierungen eine Sensitivitätsanalyse von Untergrund- und Betriebsparametern hinsichtlich ihres Einflusses auf die seismische Aktivität des geothermischen Reservoirs durchzuführen. Insbesondere sollten folgende Einflussgrößen untersucht werden:

- Temperaturänderungen
- Spannungsänderungen
- Größe und Geometrie des Reservoirs
- Chemismus (Fluidchemismus, chemische Wechselwirkungen zwischen Reservoir und Fluid)

- Viskosität des Fluids
  - Energiespeichervermögens
  - Sprödigkeit des Gesteins
  - Geschwindigkeit der Änderungen hydraulischer Parameter, z.B. beim Hoch- und Runterfahren einer geothermischen Anlage
- c. Untersuchung des Einflusses von Störungen
- Kenntnisse zu Störungs- und Schwächezonen im Untergrund sind zur Interpretation der beobachteten Mikroseismizität und/oder zur Modellierung der zu erwartenden Seismizität im Vorfeld einer geplanten Stimulation wichtig. Wir empfehlen die Einbeziehung von strukturgeologischen Informationen (insbesondere Störungen) im Umfeld des Reservoirs (z.B. basierend auf 3D-Seismikmessungen).
- d. Untersuchung des Einflusses des Spannungsfelds
- Kenntnisse zum Spannungsfeld sind zur Interpretation der beobachteten Mikroseismizität und/oder zur Modellierung der zu erwartenden Seismizität im Vorfeld einer geplanten Stimulation ebenfalls wichtig. Wir empfehlen eine Bestandsaufnahme des regionalen Spannungsfeldes und die Auswertung von lokalen Stressindikatoren in Bohrlochlogs (idealerweise auch die Abschätzung der Stressmagnituden) insbesondere in durchteuften Störungen.
- e. Der Porenwasserdruck im Reservoir ist die entscheidende Größe für die statistische Korrelation der hydraulischen Parameter mit der Seismizität sowie für die Modellierung. Wenn technisch möglich, sollte daher neben dem Kopfdruck auch der Druck im Bohrloch-tiefsten gemessen werden.
- f. Numerische Modellierungen aus MAGS deuten darauf hin, dass eine zyklische Injektionsstrategie und alternative Erschließungsmethoden wie beispielsweise der Multifrac-Ansatz die seismische Aktivität bei hydraulischen Stimulationen reduzieren können.