

**Abschlussbericht für das Verbundprojekt MAGS:  
Konzepte zur Begrenzung der mikroseismischen Aktivi-  
tät bei der energetischen Nutzung geothermischer Sys-  
teme im tiefen Untergrund**

Einzelprojekt EP 4:

Untersuchung der seismischen Gefährdung aufgrund  
induzierter Seismizität bei tiefer geothermischer Energiegewinnung

Projektleiter:	Dr. T. Spies, Dr. J. Schlittenhardt
Förderkennzeichen:	0325191A
Laufzeit:	01.10.2010 bis 30.09.2013
Berichtszeitraum:	01.09.2010 bis 30.09.2013

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit unter dem Förderkennzeichen 0325191A gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

## Inhalt

1	Einleitung .....	5
1.1	Aufgabenstellung von EP4 .....	5
1.2	Voraussetzungen für das Vorhaben und Bezug zu den förderpolitischen Zielen .....	6
1.3	Die Arbeitspakete von EP .....	6
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand der Anknüpfung.....	8
1.4.1	Stand der Wissenschaft und Technik .....	8
1.4.2	Bisherige Arbeiten des Antragstellers.....	10
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	10
2	Eingehende Darstellung der Ergebnisse .....	11
2.1	Ermittlung der seismischen Gefährdung aufgrund natürlicher Seismizität (AP1) .....	11
2.2	Auswahl und Test geeigneter Bodenbewegungsmodelle der maximalen Bodenschwinggeschwindigkeit (AP2) .....	13
2.3	Zusammenstellung der Seismizitätsparameter für induzierte Ereignisse (AP3). .....	16
2.4	Probabilistische seismische Gefährdungsanalyse induzierter Seismizität (AP4) .....	20
2.4.1	Eingabeparameter für PSHA .....	20
2.4.2	Beschreibung der seismischen Quellen .....	20
2.4.3	Magnituden-Häufigkeitsverteilungen .....	21
2.4.4	Bodenbewegungsmodelle.....	23

---

2.4.5	Behandlung von Unsicherheiten .....	23
2.4.6	Berechnung der seismischen Gefährdung bei induzierter Seismizität .....	25
2.5	Vergleich der Gefährdung natürlicher und induzierter Seismizität (AP5) .....	30
2.6	Ausgaben- und Zeitplanung.....	34
2.7	Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeit.....	34
2.8	Verwertbarkeit der Ergebnisse .....	34
2.9	Während der Laufzeit bei anderen Stellen bekannt gewordene Fortschritte ..	35
2.10	Erfolge und geplante Veröffentlichungen .....	36
3	Zusammenfassung und Empfehlungen .....	38
4	Literatur.....	40

## 1 Einleitung

### 1.1 Aufgabenstellung von EP4

Im Einzelprojekt 4 ‚Untersuchung der seismischen Gefährdung aufgrund induzierter Seismizität bei tiefer geothermischer Energiegewinnung‘ wird die seismische Gefährdung durch menschlich verursachte (induzierte) Rissbildungen und ggf. getriggerte Erdbeben in der Nähe von ausgewählten Geothermiekraftwerken mit deterministischen und probabilistischen Analysen ermittelt. Die Gefährdung durch induzierte Seismizität wird mit der Gefährdung durch natürlich auftretende Erdbeben verglichen. Die Ziele sind:

- Bewertung der seismischen Gefährdung an Geothermie-Standorten 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 Richtlinie zur effektiven seismischen Überwachung bei tiefer geothermischer Energiegewinnung

Das Verbundforschungsprojekt MAGS wird finanziell vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) gefördert. Projektträger ist das Forschungszentrum Jülich-Erneuerbare Energien (PtJ-EEN).

## **1.2 Voraussetzungen für das Vorhaben und Bezug 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 der tiefen Geothermie soll zukünftig einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz und einer zukunftsfesten Energieversorgung leisten. Die Geothermie ist nach menschlichen Maßstäben unerschöpflich. Ein weiterer 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 Megawatt pro Kraftwerk entspricht dies mehr als 50 Kraftwerken. Nach 2020 wird mit einer Beschleunigung des Wachstums und einer installierten elektrischen Leistung von 850 Megawatt 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-Forêt (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.

## **1.3 Die Arbeitspakete von EP**

Das Einzelprojekt EP4 ist in die folgenden fünf Arbeitspakete (AP) untergliedert:

AP 1: Ermittlung der seismischen Gefährdung aufgrund natürlicher Seismizität

- Auswahl von bis zu drei Standorten: Mögliche Standorte sind Landau, Unterhaching und die Geothermiebohrung in Hannover

- Erstellung von Auszügen aus seismischen Katalogen und Bestimmung von Seismizitätsparametern
- Ermittlung von seismotektonischen Regionen
- Ermittlung von standortnahen Störungssystemen anhand geologischer und tektonischen Daten
- Durchführung deterministischer und probabilistischer Gefährdungsberechnungen

AP 2: Ermittlung und Bereitstellung von Bodenbewegungsmodellen bei flachen seismischen Quellen mit geringer Stärke

- Recherche der Literatur in Hinblick auf bereits publizierte Abnahmebeziehungen
- Falls erforderlich, werden Basisdaten aus der Literatur zusammengestellt, wie z.B. Ergebnisse makroseismischer Untersuchungen für schwache Erdbeben in geringer Tiefe und Abnahmebeziehungen abgeleitet.

AP 3: Zusammenstellung der Seismizitätsparameter für induzierte Ereignisse

- Ermittlung maximal auftretender Ereignisse
- Erstellung von Magnituden- und Intensitätsverteilungen während Ausbau und Betrieb der Anlagen anhand des mikroseismischen Monitorings, z.B. aus publizierten oder von den Projektpartnern ermittelten Katalogen (Stimulation mit Erzeugung von Rissystemen, Zirkulation in Produktionsphase, Aktivität in Ruhephasen)
- Überprüfung der Gutenberg-Richter-Beziehung
- Bestimmung von Aktivitätsraten und Steigungswerten in den Magnituden- und Intensitätsverteilungen

AP 4: Probabilistische seismische Gefährdungsanalyse induzierter Seismizität

- Berücksichtigung zeitlich veränderlicher Seismizitätsparameter

- Berechnungen für die Stimulationsphase
- Berechnungen für die Produktionsphase
- Sensitivitätsanalysen mit Parametervariationen und Unsicherheitsanalysen anhand Logischer-Baum-Modelle

#### AP 5: Vergleich der Gefährdung natürlicher und induzierter Seismizität

- Ermittlung der Veränderung der seismischen Gefährdung während Ausbau und Betrieb der Anlage und nach dem Betrieb der Anlage
- Ableitung möglicher auftretender Bodenbeschleunigungen und Bodenschwinggeschwindigkeiten und ihre Bewertung anhand von einschlägigen ingenieurtechnischen Regelwerken
- Schlussfolgerungen für die Erstellung einer Richtlinie zur effektiven seismischen Überwachung bei tiefer geothermischer Energiegewinnung
- Erstellung eines Abschlussberichts

### **1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand der Anknüpfung**

#### 1.4.1 Stand der Wissenschaft und Technik

Aufgrund der Anlage und des Betriebs von Geothermiekraftwerken werden Bruchvorgänge unterschiedlichen Maßstabs im Untergrund hervorgerufen oder ausgelöst. Zum einen wird das Gebirge durch Druckbeaufschlagung stimuliert („gefract“), um größere Austauschflächen im Untergrund zu erzeugen. Dabei werden kleinere und größere Risse erzeugt und erweitert, die sich als mikroseismische Aktivität bemerkbar machen. Im Betrieb der Anlage wird das kalte Fluid in das Bohrloch gepresst und das erwärmte Fluid wieder herausgepumpt, so dass das Gebirge Injektionsdrücken und thermischen Beanspruchungen ausgesetzt ist. Gerade die Wechsel beim Injektionsdruck stellen Belastungsphasen für das Gebirge dar, in dem Rissbildungen fortschreiten können. Neben dieser Form der induzierten Seismizität können in seismisch aktiven Gebieten tektonisch bedingte Erdbeben aufgrund der Anlage und des Betriebs von Geothermiekraftwerken ausgelöst („getriggert“) werden. Die Erhöhung der Fluidrucks auf bestehenden Störungsflächen unter tektonischer Beanspruchung und die Herab-

setzung der Reibung auf Bruchflächen durch migrierende Fluide sind dabei mögliche Ursachen (hydro-mechanische Wechselwirkungen). Beide Phänomene werden hier als induzierte Seismizität bezeichnet, da ihr Eintreten das Resultat von Prozessen bei der tiefen geothermischen Energienutzung ist.

Die klassischen deterministischen und probabilistischen Methoden werden genutzt, um die Gefährdung durch die natürliche, tektonisch bedingte Seismizität an einem Standort zu ermitteln. Ein wichtiger Baustein dabei ist die möglichst genaue Erfassung und Bewertung der aktiven Störungssysteme in der Nähe des Standorts. Besondere Bedeutung bei der tiefen Geothermie haben aktive Störungssysteme, die sich im potentiellen Einflussbereich der Bohrungen befinden. Der Einflussbereich ist durch das Auftreten von Rissprozessen mit irreversibler Volumenzunahme (Dilatanz) im näheren Umfeld der Bohrung und in größeren Entfernungen mit einer Erhöhung des Porendrucks und der Migration von Fluiden gekennzeichnet. An aktiven Störungssystemen können Erdbeben im Einflussbereich der Bohrungen getriggert werden.

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 Auftretenswahrscheinlichkeit von Erdbeben mit einer bestimmten Magnitude beschreibt und ein Ausbreitungsmodell, das die von einem festgelegten Erdbeben erzeugten Bodenbeschleunigungen 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 Auftretenswahrscheinlichkeit großer Erdbeben in der Zukunft abzuschätzen. Maximale mögliche Magnituden sind für einzelne seismotektonische Regionen charakteristisch. Sie ergeben sich aus der physikalisch limitierten Größe einer Störungszone.

## 1.4.2 Bisherige Arbeiten des Antragstellers

Der Arbeitsbereich ‚Ingenieurseismologische Gefährdungsanalysen‘ der BGR im Fachbereich B4.4 ‚Gefährdungsanalysen, Fernerkundung‘, dem die Antragsteller angehören, verfügt über langjährige Erfahrungen in der Ermittlung der seismischen Gefährdung. Dazu gehören die anspruchsvollen Arbeiten zu den seismischen Lastannahmen für Sonderbauten wie Atomkraftwerken sowie Zwischen- und Endlager für gefährliche Abfälle. Um diese Arbeiten durchführen zu können, wurden in der Vergangenheit auch Forschungsprojekte auf dem Gebiet der Erdbebengefährdung durchgeführt. Diese Erfahrungen sind die Grundlage für die Ermittlung der seismischen Gefährdung aufgrund induzierter Seismizität.

Ein wichtiges Standbein des Arbeitsbereichs in Bezug auf die Untersuchung induzierter Seismizität stellen die Arbeiten zur Überwachung von Bergwerken dar (Gebirgsschläge, Auflockerung und Bruchvorgänge in Grubengebäuden, Verfüllung von Abbauen, Bewertung von Standsicherheit und hydraulischer Integrität). Dies betrifft klassische seismologische Untersuchungen als auch Messungen der akustischen Emission als Langzeit-Monitoring in Bergwerken.

Weiterhin bestehen langjährige Erfahrungen im Bereich der numerischen Berechnungen in der Bodendynamik inklusive der Interaktion zwischen Untergrund und Bauwerken.

Im Literaturverzeichnis ist eine Auswahl von Arbeiten der Mitglieder des Arbeitsbereichs enthalten, die einen engen Bezug zum Thema des hier bearbeiteten Projekts haben.

## 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Eine enge Zusammenarbeit fand mit folgenden anderen Einzelprojekten von MAGS statt:

- EP 1: Bereitstellung des seismischen Katalogs des seismischen Netzwerks Landau und Auswertung der Amplituden- und Magnitudeninformationen (KIT: J. Groos, J. Ritter)

- EP 2: Bereitstellung des seismischen Katalogs des seismischen Netzwerks Unterhaching, Auswertung der Amplituden- und Magnitudeninformationen (LMU: T. Megies, J. Wassermann)
- EP 6: Zusammenarbeit bei der Bewertung von Ergebnissen numerischer Modellberechnungen, insbesondere der Magnitudenberechnungen (TUC: M. Hou, T. Kracke).

## **2 Eingehende Darstellung der Ergebnisse**

Im Folgenden werden die Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete von EP4 dargestellt. Dabei können im vorliegenden Bericht aus Platzgründen die Ergebnisse der APs 1 bis 3 mit der Bereitstellung der Input-Daten für die Gefährdungsanalysen nur zusammengefasst werden, wogegen die seismischen Gefährdungsanalysen in AP4 und AP5 ausführlich beschrieben werden. Alle Ergebnisse sind in ausführlicher Form den Zwischenberichten des Einzelprojekts zu entnehmen: MORALES AVILES et al. (2012), MORALES AVILES et al. (2013a), MORALES AVILES et al. (2013b) und KOPERA et al. (2013).

### **2.1 Ermittlung der seismischen Gefährdung aufgrund natürlicher Seismizität (AP1)**

Als Pilotstandorte wurden die Projekte in Landau (Oberrheingraben) und Unterhaching (bayrische Molasse) ausgewählt. Aufgrund sehr geringer induzierter Seismizität an Standorten in den Sedimentgesteinen des Norddeutschen Beckens wurden diese nicht betrachtet, z.B. das GeneSys-Projekt in Hannover. Für die Pilotstandorte wurde die seismische Gefährdung für natürliche Seismizität ermittelt.

Schwerpunkt von AP1 war der Einsatz deterministischer Methoden für die seismische Bestimmung der Gefährdung der natürlichen Seismizität. Dabei wurden klassische Vorgehensweisen betrachtet für die deterministische seismische Gefährdungsanalyse als auch die Gleitendenzanalyse und der Einsatz numerischer Modellberechnungen. Bei der klassischen deterministischen Analyse wurden die Datengrundlagen erörtert und es wurde besonders auf die Ableitung der maximal möglichen Magnituden eingegangen. Abbildung 2.1 zeigt als Beispiel das Ergebnis der deterministischen Bestimmung der maximalen Standortintensität (KOPERA et al., 2013) bei Anwendung eines mit ArcView© erstellten GIS-Programms (GÜNTHER, 2010). Der Geothermie-Standort be-

findet sich im Zentrum des betrachteten Einflussgebietes (hier 200 km Radius wie es bei kerntechnischen Anlagen berücksichtigt wird). Begrenzungs-Polygone (rote Linien) definieren die seismotektonischen Einheiten, also Gebiete annähernd gleichförmiger Seismizität. Schwarze Ziffern geben die darin aufgetretene maximale Epizentralintensität an. Schwarze Linien zeigen vom Ort der maximalen Epizentralintensität zum standortnächsten Punkt der Regionsgrenze – hier wird keine Intensitätsabnahme angesetzt. Kleine (blaue) Ziffern über blauen Linien geben die berechnete „fiktive“ Standortintensität an, die sich aufgrund der Intensitätsabnahme innerhalb der Standortregion ergäbe. Die fett-rote Zahl ist die maximale Standortintensität. Eine dicke rote Linie zeigt vom Standort zum Epizentrum, das der berechneten maximalen Standortintensität  $I_{S_{max}}$  zugrundeliegt. Die deterministisch bestimmte Standortintensität  $I_{S_{max}} = 7.5$  EMS ergibt sich als Auswirkung des historischen Bebens bei Rastatt im Jahre 1728 in der Quellregion „Mittlerer und Südlicher Oberrheingraben“ mit der Intensität  $I_0 = VII$  bis VIII EMS. Die relativ hohe Standortintensität resultiert aus der Verschiebung dieses Bebens in Standortnähe, da das Epizentrum innerhalb derselben Region wie der Standort liegt (Standortregion).

Das klassische deterministische Verfahren ist geeignet, die Gefährdung aufgrund natürlicher Seismizität zu ermitteln und diese für Standorte in verschiedenen tektonischen Regionen Deutschlands (Oberrheingraben, Molasse, Norddeutsches Becken) zu vergleichen, siehe KOPERA et al., 2013. Weiterhin kann es als Abschätzung maximaler Einwirkungen von getriggerten Ereignissen auf tektonisch aktiven Verwerfungen bei der Geothermie eingesetzt werden, wenn keine lokalen tektonischen und geologischen Daten für den Standort vorliegen, z.B. im Vorfeld einer Standorterkundung. Dafür sollte vorrangig die Standortregion betrachtet werden.



im Rahmen der probabilistischen seismischen Gefährdungsanalyse (PSHA) von zentraler Bedeutung. Für den Fall der natürlichen Seismizität liegen qualitativ hochwertige Modelle bzw. Gleichungen für stärkere Erdbeben ( $m > 5$ ) in unterschiedlichen tektonischen Regionen der Erde vor. Aufgrund der signifikant kleineren Magnituden, Herdtiefen und Herd-Standort Entfernungen können diese für die natürliche Seismizität entwickelten Modelle nicht für die Analyse der induzierten Seismizität bei der Tiefengeothermie eingesetzt werden. Dieser Informationsmangel kann zu hohen Unsicherheiten bei den Eingangsparametern für eine probabilistische seismische Gefährdungsanalyse führen. Schwerpunkt von AP2 war daher die Auswahl geeigneter Bodenbewegungsmodelle (GMPEs) für den Fall der induzierten Seismizität. Die Entwicklung neuer eigener GMPEs unter Verwendung der verfügbaren Daten konnte aufgrund der nicht ausreichenden Datenbasis nicht realisiert werden. Insgesamt wurden sieben neu veröffentlichte Bodenbewegungsmodelle für kleine Magnituden und die infrage kommenden Tiefen- und Hypozentralentfernungsbereiche aus der Literatur ausgewählt (BOMMER et al., 2006; BRAGATO & SLEJKO, 2005; CHIOU, et al., 2010; DOST et al., 2004; FRISENDA et al., 2005; MASSA et al., 2008; MCGARR & FLETCHER, 2005). Für eine detaillierte Beschreibung und Begründung dieser Auswahl siehe MORALES AVILES et al. (2013a).

Ein Vergleich zwischen den aus den ausgewählten Bodenbewegungsmodellen berechneten Werten und den beobachteten seismischen Daten, die in Enhanced Geothermal Systems (EGS) in der Nähe Basel, Unterhaching und Landau aufgezeichnet wurden, ist in Abbildung 2.2, 2.3 und 2.4 dargestellt. Die erforderlichen Amplitudendaten wurden den Katalogen von Unterhaching und Landau, die von MEGIES (2012) und Gross (2012) im Rahmen der wissenschaftlichen Zusammenarbeit bei MAGS zur Verfügung gestellt wurden, entnommen. Die Amplitudendaten für den Vergleich mit dem EGS in der Nähe von Basel gehen auf RIPPBERGER et al. (2009) zurück.

Für die Bestimmung der bei den probabilistischen Gefährdungsberechnungen in AP4 verwendeten Bodenbewegungsmodelle wurde jeweils ein visueller Vergleich der Residuen, wie in Abbildung 2.3 und 2.4 dargestellt, durchgeführt. Die Residuen der PGV- (Peak Ground Velocity; maximale Bodenschwinggeschwindigkeit) Amplituden sind als Differenz zwischen dem Logarithmus der beobachteten und der berechneten PGVs definiert. In der probabilistischen Analyse können mehrere Bodenbewegungsmodelle nebeneinander berücksichtigt werden und Unsicherheiten bei Verwendung eines logischen Baums mit in Betracht gezogen werden. Für Basel wiesen die

Bodenbewegungsmodelle von BRAGATO & SLEJKO (2005) und MASSA et al. (2008) die beste Übereinstimmung auf. Im Fall von Unterhaching weisen die Bodenbewegungsmodelle von MASSA et al. (2008) und FRISENDA et al. (2005) die beste Tendenz auf und zeigen eine allgemeine Übereinstimmung im Vergleich zu allen anderen GMPEs. Um die Unsicherheit in den Ergebnissen dieser Vergleiche zu verringern, sind spezifischere Informationen erforderlich, wie der bodendynamische Parameter  $V_{S30}$  und Parameter des Herdmechanismus (für Details siehe MORALES AVILES et al., 2013a). Im Fall Landau wurde die beste Übereinstimmung für die Bodenbewegungsmodelle von FRISENDA et al. (2005), MASSA et al. (2008), MCGARR & FLETCHER (2005) und CHIOU et al. (2010) CCAL festgestellt. Die am besten passenden Bodenbewegungsmodelle werden als Eingabe für die probabilistischen Gefährdungsberechnungen der Geothermieanlagen in AP4 verwendet. Bei zwei oder mehr Bodenbewegungsmodellen wird ein logischer Baum eingesetzt.

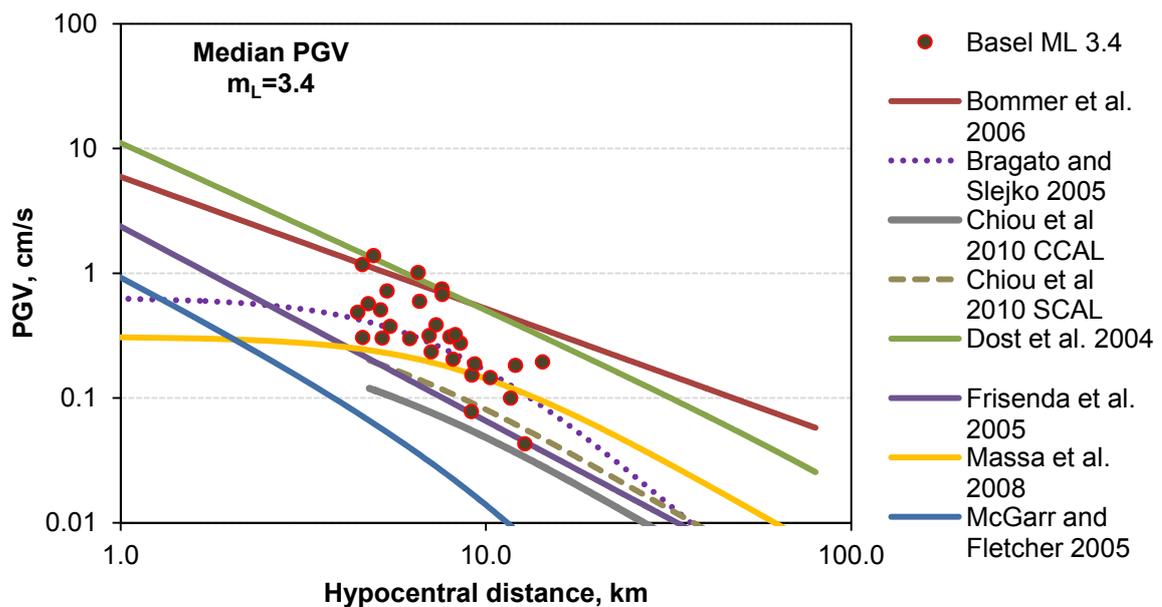


Abb. 2.2: Vergleich der anhand ausgewählter Bodenbewegungsmodelle (GMPEs) berechneten PGV- (Peak Ground Velocity) Amplituden (farbige Linien, s. Legende rechts) mit gemessenen Daten (Punkte) an den Baseler Stationen (RIPPBERGER et al., 2009).

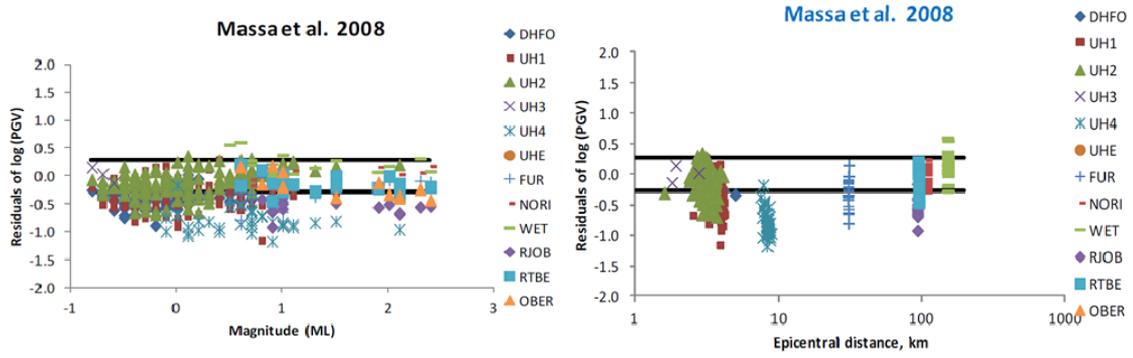


Abb. 2.3: Vergleich der Messwerte am Standort Unterhaching mit dem Bodenbewegungsmodell von MASSA et al. (2008). Dargestellt sind die Residuen der Beobachtungen und der berechneten PGV- (Peak Ground Velocity) Amplituden (als Funktion von  $M_L$ , links, bzw. der Epizentralentfernung, rechts). Die Daten der einzelnen Stationen sind entsprechend der Legende auf der rechten Seite farbkodiert. Die schwarzen Linien stellen die Standardabweichung des Bodenbewegungsmodells ( $\pm 1\sigma$ ) dar.

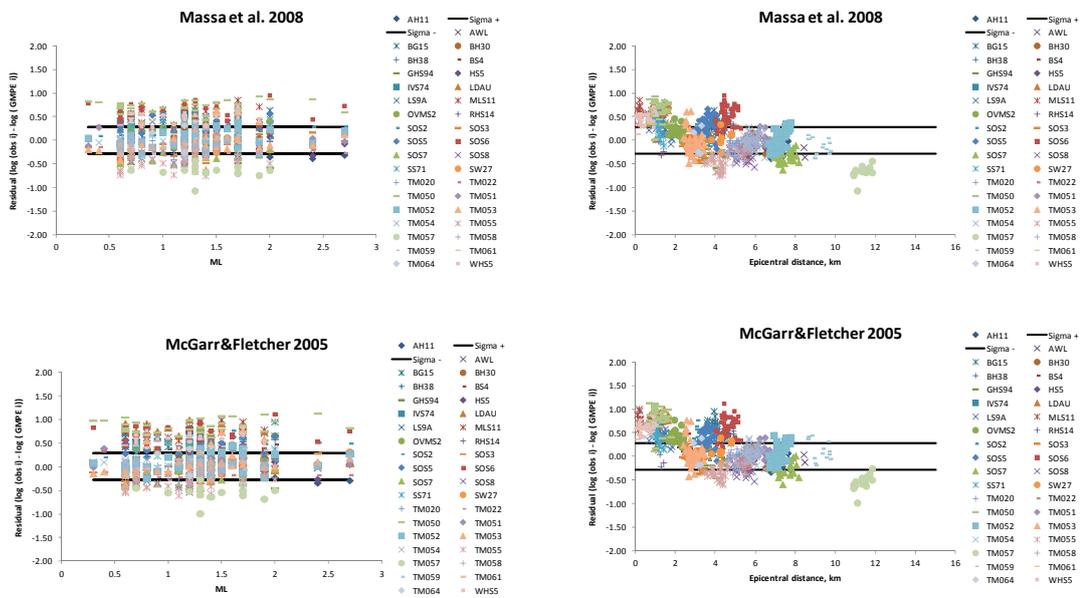


Abb. 2.4: Vergleich der Messwerte wie in Abb. 2.3, jedoch für den Standort Landau und die Bodenbewegungsmodelle von MASSA et al. (2008) sowie MCGARR & FLETCHER (2005).

### 2.3 Zusammenstellung der Seismizitätsparameter für induzierte Ereignisse (AP3)

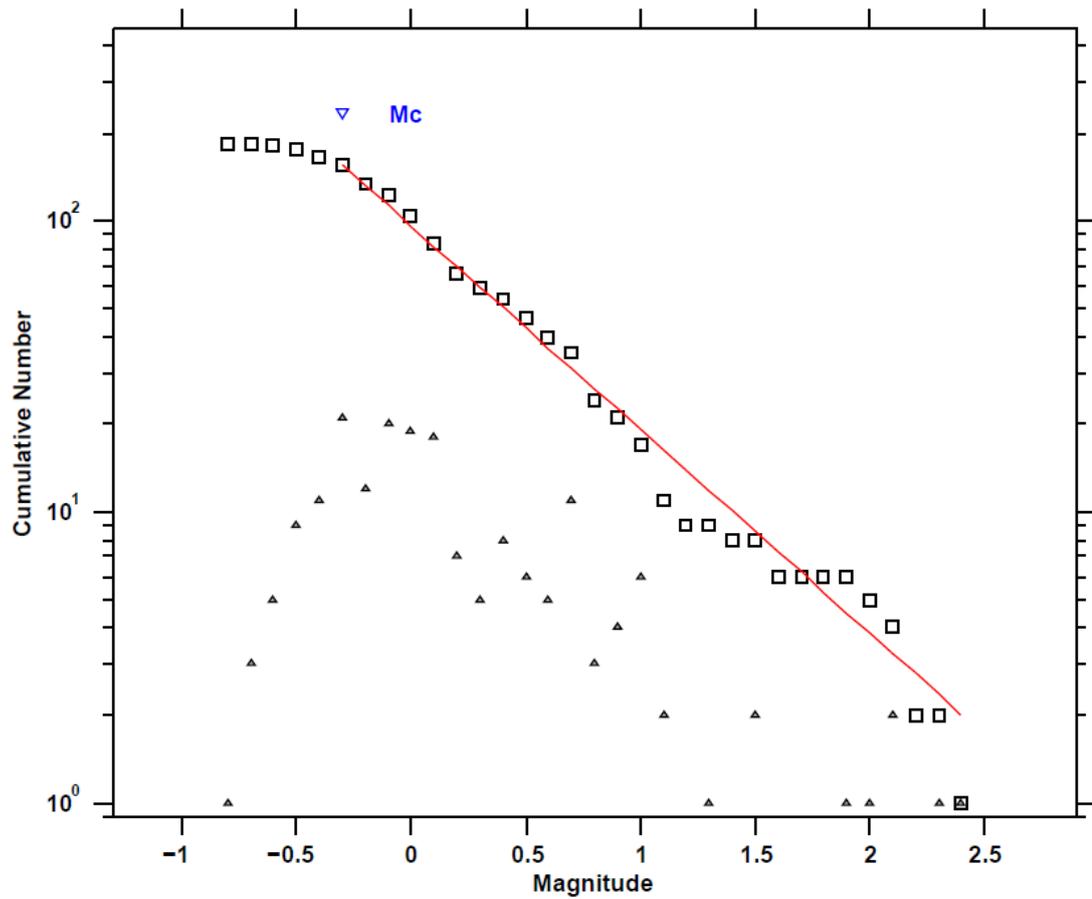
Schwerpunkt des AP3 ist die Bereitstellung der statistischen Parameter der induzierten Seismizität sowie der räumlichen Abgrenzung der seismischen Quellen, die als Ein-

gangparameter der probabilistischen seismischen Gefährdungsabschätzung in AP4 benötigt werden. Die erforderlichen Daten der induzierten seismischen Ereignisse (Häufigkeit, Magnitude, Koordinaten) wurden den Katalogen von Unterhaching und Landau, die von MEGIES (2012) und GROSS (2012) im Rahmen der wissenschaftlichen Zusammenarbeit im Projekt MAGS zur Verfügung gestellt wurden, entnommen. Die erforderlichen Angaben für den Geothermiestandort nahe Basel konnten der Literatur entnommen werden (SECANELL et al., 2009).

Abbildung 2.5 zeigt die Magnituden – Häufigkeitsverteilung für den Standort Unterhaching in kumulativer (Vierecke) und nicht-kumulativer Darstellung (Dreiecke). Die sogenannten Gutenberg-Richter Parameter sind die Steigung der Verteilung (b-Wert) und die Seismizitätsrate (a-Wert als Logarithmus) in der kumulativen Darstellung. Die Daten sind im Zeitraum von rund 4,25 Jahren ermittelt worden. Zu ihrer Bestimmung wurde das Programm ZMap (WYSS et al., 2001) verwendet, das auch die sogenannte Vollständigkeitsmagnitude  $m_c$  ermittelt. Alle Ereignisse mit einer Magnitude oberhalb von  $m_c$  wurden bei den Messungen erfasst. Die entsprechende Darstellung für den Standort Landau zeigt Abbildung 2.6.

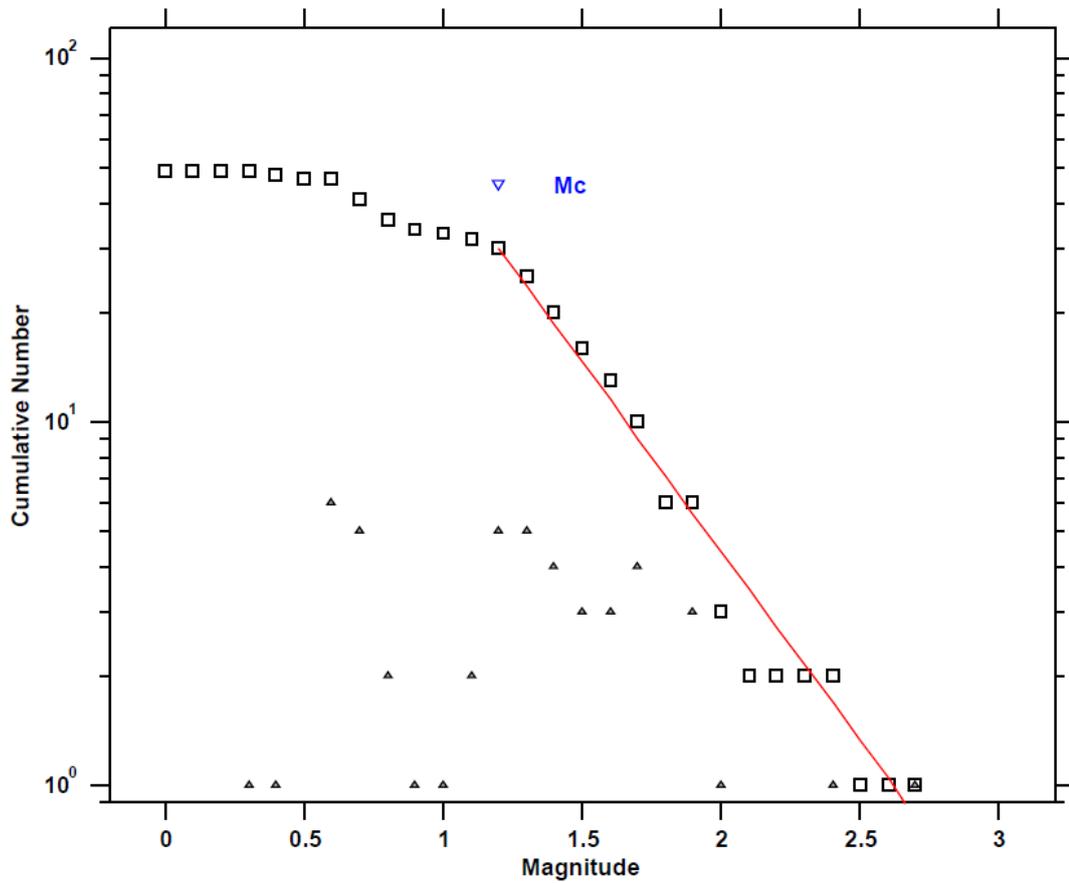
Ein weiterer Eingangsparameter, der für die probabilistischen Berechnungen gebraucht wird, ist die Maximalmagnitude  $m_{max}$ . (Dies kann die Momentenmagnitude oder die Lokalmagnitude sein.) Im Fall der natürlichen Seismizität ist  $m_{max}$  die größte Magnitude, oberhalb derer die jeweilige seismogene oder seismotektonische Zone keine Erdbeben hervorrufen kann (MCGUIRE, 2004). Zur Ermittlung dieser Größe für die induzierte Seismizität bei tiefer Geothermie wurden die maximalen Magnituden zusammengestellt, siehe AP4.

Der Tiefenbereich der Quellregion der induzierten Seismizität wurde anhand der ermittelten Lokationen eingegrenzt (Hypozentren) und mit MEGIES und GROSS (persönliche Mitteilungen, 2013) festgelegt, siehe AP4 und AP5.



Maximum Likelihood Solution  
 b-value = 0.7 +/- 0.05, a value = 1.98, a value (annual) = 1.35  
 Magnitude of Completeness = -0.3

Abb. 2.5: Magnituden – Häufigkeitsverteilung für den Standort Unterhaching in kumulativer (Vierecke) und nicht-kumulativer Darstellung (Dreiecke), Einzelheiten siehe Text.



Maximum Likelihood Solution  
 b-value = 1.04 +/- 0.2, a value = 2.73, a value (annual) = 2.26  
 Magnitude of Completeness = 1.2

Abb. 2.6: Magnituden – Häufigkeitsverteilung für den Standort Landau in kumulativer (Vierecke) und nicht-kumulativer Darstellung (Dreiecke), Einzelheiten siehe Text.

## **2.4 Probabilistische seismische Gefährdungsanalyse induzierter Seismizität (AP4)**

### **2.4.1 Eingabeparameter für PSHA**

In diesem Projekt wird der Ansatz verfolgt, die Elemente der probabilistischen seismischen Gefährdungsanalyse für natürliche Seismizität auf den Fall der induzierten Erdbeben zu übertragen. Die Komponenten der PSHA (probabilistic seismic hazard analysis) können folgendermaßen zusammengefasst werden:

- Identifizierung und Charakterisierung der seismischen Quellen (Seismizitätsmodelle)
- Charakterisierung wiederkehrender seismischer Ereignisse (Magnitude – Häufigkeitsverteilungen)
- Definition und/oder Auswahl von Bodenbewegungsmodellen (GMPEs)
- Behandlung von Unsicherheiten

### **2.4.2 Beschreibung der seismischen Quellen**

Bei der PSHA natürlicher Seismizität werden die seismischen Quellen auf Basis von tektonischen und geologischen Informationen, historischer und instrumenteller Seismizität sowie paläoseismischen Befunden festgelegt. Im Fall induzierter Seismizität ist die Quellregion im Bereich des Bohrlochs durch das von seismischen Ereignissen markierte Volumen festzulegen. Darüber hinaus können auch weiter entfernte Bereiche als Quellregionen in Frage kommen. Dies kann durch tektonische Störungen in der Nähe der Bohrung bedingt sein, welche aufgrund der Eingriffe aktiviert werden.

In den Fällen, in denen keine verfügbaren Informationen vorhanden sind, kann bei der Einstufung der lateralen Ausdehnung der Quellregion von einer Mindestgröße von 2 km<sup>2</sup> ausgegangen werden, denn dies ist die Mindestgröße für eine wirtschaftlich tragfähige Anlage (SECANELL et al., 2009).

### 2.4.3 Magnituden-Häufigkeitsverteilungen

Die gebräuchliche Darstellung der Magnitudenverteilung eines seismischen Herds wird gemäß KRAMER (1996) folgendermaßen beschrieben:

$$\lambda_m = v_{m_{\min}} \frac{e^{-\beta(m-m_{\min})} - e^{-\beta(m_{\max}-m_{\min})}}{1 - e^{-\beta(m_{\max}-m_{\min})}} \quad m_{\min} \leq m \leq m_{\max} \quad (2.1)$$

wobei  $\lambda_m$  die Zahl der Erdbeben mit Stärke  $m$  pro Zeiteinheit ist,  $v_{m_{\min}}$  ist die Anzahl der Erdbeben pro Zeiteinheit mit  $m \geq m_{\min}$ ,  $\beta = b \ln(10) \cong 2,3 b$ ,  $b$  ist die Steigung der Gutenberg-Richter-Beziehung,  $m_{\min}$  ist die kleinste Magnitude und  $m_{\max}$  ist die größte Magnitude.  $m_{\min}$  wird auf der Grundlage der kleinsten Magnitude gewählt und muss in die Entscheidungen zur Risikominimierung (MCGUIRE, 2004) einbezogen werden.  $m_{\max}$  ist die größte Magnitude, oberhalb deren Stärke keine Erdbeben beobachtet oder angenommen werden (MCGUIRE, 2004). Eine grafische Darstellung von Gleichung 2.1 wird in Abbildung 2.7 gezeigt. In diesem Beispiel wird von einer kleinsten Magnitude von 0, einer größten Magnitude von 5,  $b = 0,7$  und  $v_{m_{\min}} = 22,4$  Erdbeben pro Jahr (bei  $m_{\min} = 0$ ) ausgegangen.

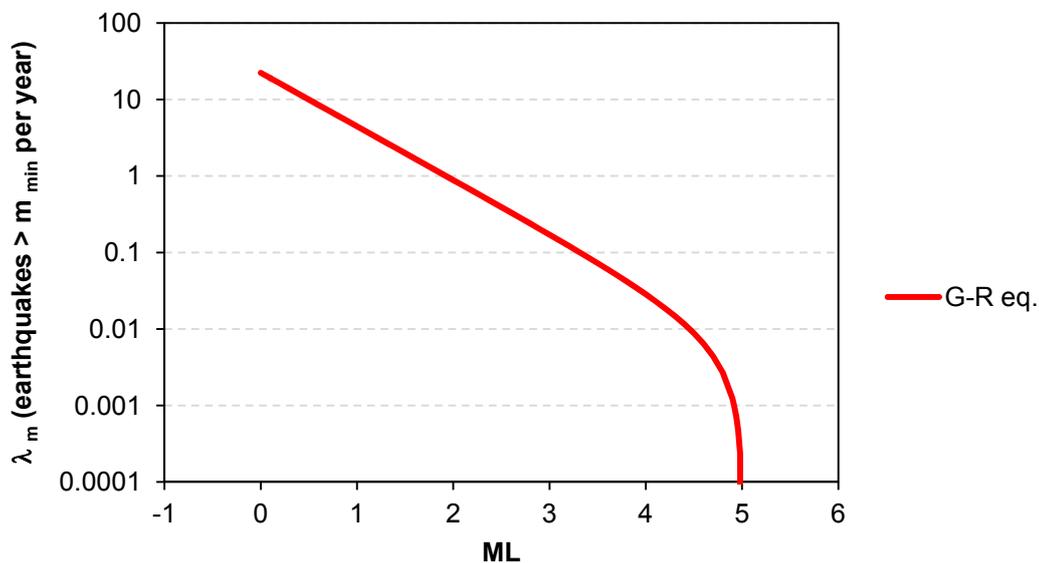


Abb. 2.7: Gutenberg-Richter-Beziehung (GR), siehe Gleichung 2.1: in diesem Beispiel wird von einer kleinsten Magnitude von 0, einer größten Magnitude von 5,  $b = 0,70$  und  $v_{m_{\min}} = 22,4$  Erdbeben pro Jahr (bei  $m_{\min} = 0$ ) ausgegangen.

### **2.4.3.1 Kleinste Magnitude**

Bei induzierter Seismizität gibt es keine Vorgaben in bestehenden Veröffentlichungen, wie die kleinste Magnitude in PSHA-Untersuchungen zu bestimmen ist. Diese kleinste Magnitude wird als unterer Wert der Magnitude angesehen, die Auswirkungen auf Menschen oder Gebäude verursacht. Bei Personen wäre dies die Fühlbarkeitsgrenze, im Fall von Gebäuden leichte Beschädigungen.

#### Auswirkungen auf Menschen: Fühlbarkeitsgrenze

GROOS (2013) verwendete die Referenzwerte der Norm 4150 "Schwingungen in Gebäuden", DIN 4150-1 (2001), DIN 4150-2 (1999) und DIN 4150-3 (1999), um die Erschütterungen von 35 induzierten Erdbeben ( $0,7 \leq m_L \leq 2,7$ ) in einer Tiefe von ca. 3 km in der Nähe des Geothermiekraftwerks Landau zu untersuchen.  $m_L$  ist die gemessene Lokalmagnitude. GROOS (2013) stellt fest, dass Erdbeben ab etwa  $m_L = 1,3$  die Wahrnehmbarkeitsgrenze für Vibrationen überschreiten und 6 Erdbeben ab ca.  $m_L = 1,7$  gut wahrnehmbar sind.

#### Leichte Schäden an Gebäuden

Der Schwellenwert der kleinsten Magnitude wurde unter Berücksichtigung natürlicher und induzierter Seismizität – auch bei Bergbau, Öl- und Gasproduktion - zu  $m_L = 2,0$  geschätzt (siehe MORALES AVILES et al., 2013b).

### **2.4.3.2 Größte Magnitude**

Auf der Grundlage von MCGUIRE (2004) sollte die maximale Magnitude der natürlichen Seismizität anhand von geologischen Nachweisen (Bruchlängen oder tektonische Strukturen), geophysikalischen Daten und anderen Verfahren geschätzt werden. Dies wurde im Zwischenbericht von EP4 diskutiert (KOPERA et al., 2013).

In erster Näherung wurde für den Fall der induzierten Seismizität in EP4 die größte Magnitude auf Basis der maximalen Magnituden der seismischen Überwachungsergebnisse geothermischer Aktivitäten bestimmt. Die größten Magnituden, die in geothermischen Reservoiren auftraten, sind in Abbildung 2.8 dargestellt. In Anbetracht der beobachteten größten Magnitude (4,6 beim Geysers-Projekt) plus einem Sicherheitszuschlag von 0,5 Magnituden-Einheiten, wird die größte Magnitude in den Berechnungen auf  $m_L = 5,1$  geschätzt. Die Einzelheiten finden sich im EP4-Bericht von MORALES AVILES et al. (2013b).

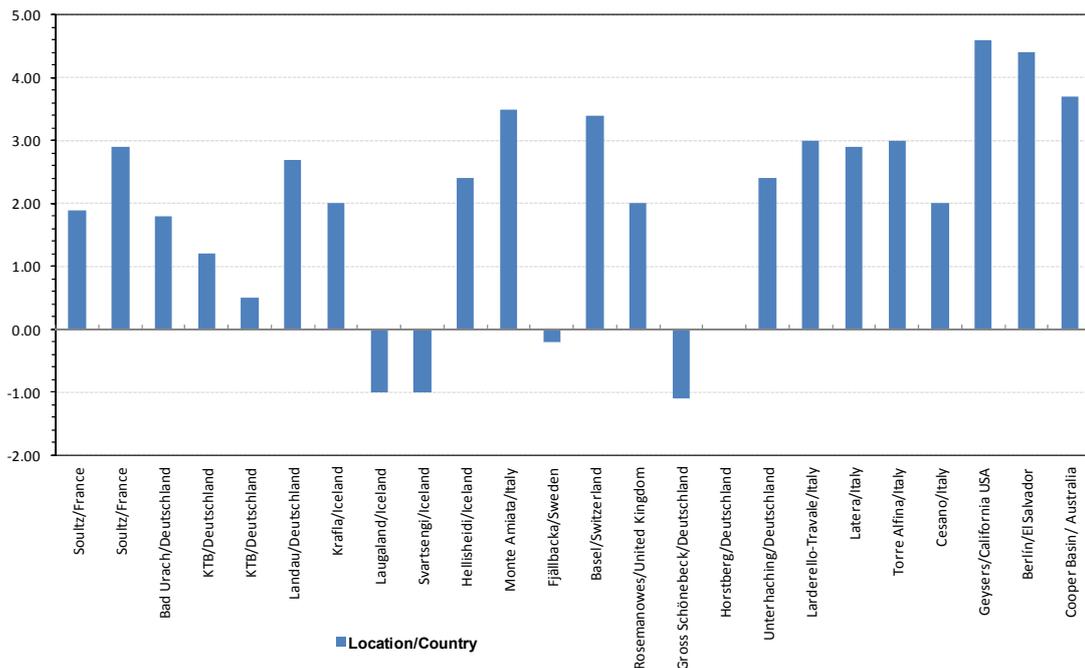


Abb. 2.8: Größte beobachtete Magnituden induzierter Ereignisse (Lokalmagnitude  $m_L$  oder Momentmagnitude  $m_W$ ), die weltweit in Reservoiren auftraten.

## 2.4.4 Bodenbewegungsmodelle

Für das Projekt Basel wiesen die Modelle von BRAGATO & SLEJKO (2005) und MASSA et al. (2008) die beste Übereinstimmung auf, siehe Abschnitt 2.2. Für Unterhaching zeigten die Modelle GMPEs von MASSA et al. (2008) und FRIENDA et al. (2005) die beste Übereinstimmung. Im Fall Landau wurde die beste Übereinstimmung mit den Modellen von FRIENDA et al. (2005), MASSA et al. (2008), MCGARR & FLETCHER (2005) und CHIOU et al. (2010), Modellvariante „CCAL“, festgestellt. Die am besten passenden Modelle wurden als Eingabe bei den folgenden PSHA der Standorte berücksichtigt.

## 2.4.5 Behandlung von Unsicherheiten

Die Verwendung von logischen Bäumen liefert einen Rahmen für die Berücksichtigung der epistemischen Unsicherheiten in Bezug auf die Verwendung bestimmter seismischer Gefährdungsmodelle (mögliche Kombinationen von Eingabe-Parametern). Die Parameter bzw. die Modelle können Bodenbewegungsmodelle, Magnituden-Verteilungen (b-Werte und a-Werte) oder größte Magnituden sein. Der Einsatz von logischen Bäumen ermöglicht die Berücksichtigung von vielen Kombinationen. Jeder

Pfad wird mit einer relativen Wahrscheinlichkeit verknüpft, dass das Modell richtig ist (KRAMER, 1996). Eine grafische Darstellung eines typischen einfachen logischen Baums ist in Abbildung 2.9 dargestellt.

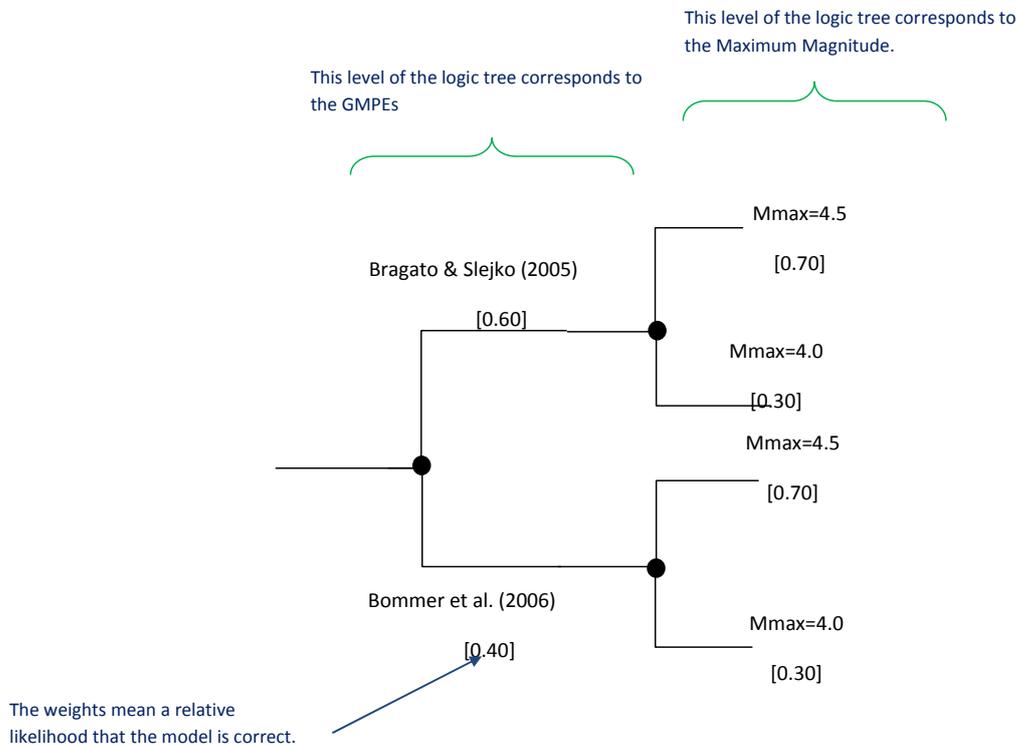


Abb. 2.9: Darstellung eines einfachen logischen Baums für Berechnungen der seismischen Gefährdung; variiert werden Bodenbewegungsmodell (,GMPE') und maximale Magnitude.

TORO et al. (1997) definiert die aleatorische Unsicherheit der Beurteilung von Bodenbewegungen als "Unsicherheit, die mit der Unvorhersehbarkeit zukünftiger Ereignisse verbunden ist". Sie steht für Variationen von Quelleigenschaften, des Ausbreitungsmediums und der lokalen Struktur, die nicht quantifiziert werden können bevor das Erdbeben auftritt. Aleatorische Unsicherheiten können nicht durch Erhebung zusätzlicher Informationen reduziert werden. Die Unsicherheit im Zusammenhang mit den Bodenbewegungsmodellen wird mittels der entsprechenden logarithmischen Standardabweichung  $\sigma$  berücksichtigt, die bei der Ableitung der Modelle bestimmt wird. Sie ist ein Eingangswert der probabilistischen Analyse im Zusammenhang mit dem Bodenbewegungsmodell.

## **2.4.6 Berechnung der seismischen Gefährdung bei induzierter Seismizität**

Die seismischen Gefährdungskurven wurden mit dem Programm EZ-FRISK, Version 7.62, erstellt (RISK ENGINEERING, 2011). Eine Validierung und ein Benchmark-Test wurden von MORALES AVILES et al. (2012) vorgenommen. EZ-FRISK ist ein kommerzielles Programm, dessen Vorgänger schon seit 1976 entwickelt und getestet wurden. Das Programm wird routinemäßig zur Gefährdungsanalyse bei industriellen Großanlagen in den USA eingesetzt. Es bietet viele Einsatzmöglichkeiten und ist gut dokumentiert. Es ist für den Einsatz auch in solchen Ingenieurbüros geeignet, die nicht primär seismische Gefährdungsanalysen durchführen.

Im Folgenden werden die Ergebnisse für die beiden Pilotstandorte Unterhaching (Bayerische Molasse) und Landau (Oberrheingraben) präsentiert.

Für die beiden Standorte wurden die seismischen Kataloge von MEGIES (2012) bzw. GROOS (2012) zugrunde gelegt. Es handelt sich hier allerdings um die Entwicklung und Präsentation der Methodik zur Ermittlung der seismischen Gefährdung bei induzierter Seismizität und nicht um belastbare Gefährdungsanalysen für diese beiden Geothermieanlagen. Aufgrund der Begrenztheit der zugrunde liegenden Daten ist eine standortspezifische Beurteilung hier nicht möglich. Die Ergebnisse sind als vorläufig zu bewerten. Z.B. konnten lokale Verstärkungseffekte nicht berücksichtigt werden, da keine geologisch/geotechnischen Daten vorlagen.

Berechnungen für den Standort Basel wurden ebenso durchgeführt, aber hier aus Platzgründen nicht dargestellt, siehe MORALES AVILES et al. (2013b).

### **2.4.6.1 Unterhaching**

Eine Zusammenfassung der Eingabeparameter ist in Tabelle 2.1 angegeben. Abbildung 2.10 zeigt die Verteilung der Magnituden nach Gleichung 2.1 mit den Werten aus Tabelle 2.1.

Tab. 2.1: Bei der PSHA für Unterhaching verwendete Eingabeparameter.

$ML_{min}$	Jahresmittelwert der Überschreitung der Magnitude $ML_{min}$ , $\nu_{mmin}$ (1/year)	$\beta$	$ML_{max}$	H (km)	GMPE
2,0	0,89	1,62	5,0	4 bis 10	- Massa et al. (2008), Wichtung 0,50 - Frisenda et al. (2005), Wichtung 0,50

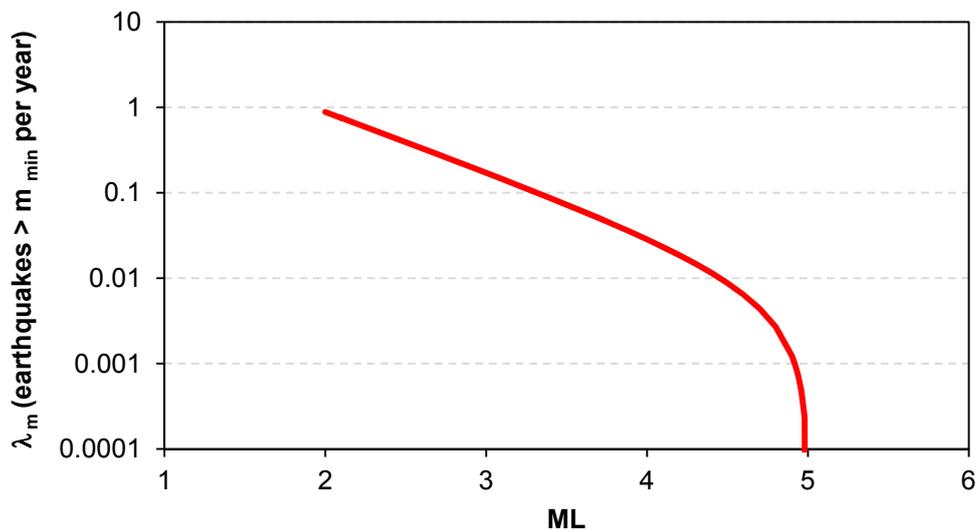


Abb. 2.10: Häufigkeitsverteilung der Magnituden, die für die Berechnungen für Unterhaching eingesetzt wurde (Gleichung 2.1).

Das Modell der seismischen Quellregion wurde so einfach wie möglich gehalten, siehe Abbildung 2.11. Die seismische Aktivität verteilt sich homogen in einem quaderförmigen Volumen, dessen Tiefenbereich und seitliche Ausdehnung entsprechend der an den Standorten beobachteten Hypozentren angegeben wird. Der Tiefenbereich der Quelle wurde zwischen 4 und 10 km festgelegt. Hier wurde nur eine Quellregion berücksichtigt. Prinzipiell sind beliebig viele Quellregionen möglich, die direkt am Bohrloch oder in dessen Umgebung liegen könnten. Der betrachtete Standort an der Ober-

fläche, für den die Gefährdung bestimmt wird, befindet sich direkt an der Geothermiebohrung.

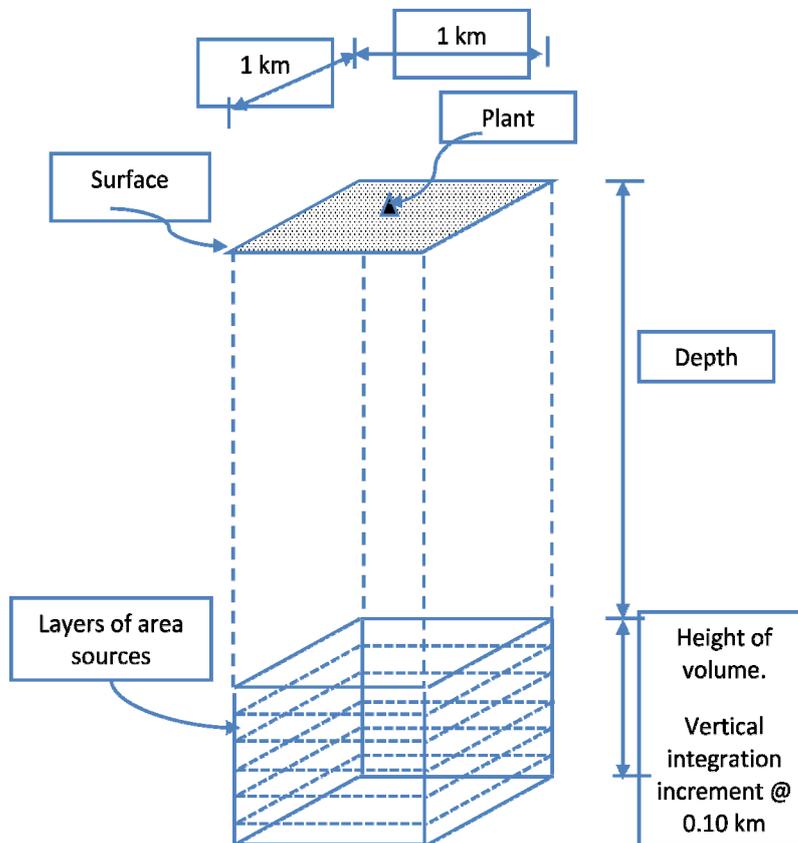


Abb. 2.11: Seismisches Quellmodell; die Aktivität verteilt sich im Volumen gleichmäßig. Die Bohrung im Zentrum ist nicht dargestellt. Der Standort befindet sich an der Oberfläche („Plant“).

Die Bodenbewegungsmodelle von MASSA et al. (2008) und FRISENDA et al. (2005) wurden verwendet, weil sie die beste Übereinstimmung mit den aufgezeichneten PGVs in Unterhaching aufwiesen (siehe MORALES AVILES et al., 2013a). Beide wurden im logischen Baum gleich gewichtet. In den Berechnungen wurde von steifen Sedimenten als Standortstruktur ausgegangen (MORALES AVILES et al., 2013b). Dies erschien für den Standort angemessen, genaue Standortangaben waren jedoch nicht erhältlich.

Die berechnete mittlere jährliche Häufigkeit der Überschreitung (Einheit 1/Jahr) für Unterhaching ist in Abbildung 2.12 als Funktion von PGV angegeben. Die Abbildung

zeigt die seismischen Gefährdungskurven für die beiden Bodenbewegungsmodelle und die mittlere Kurve.

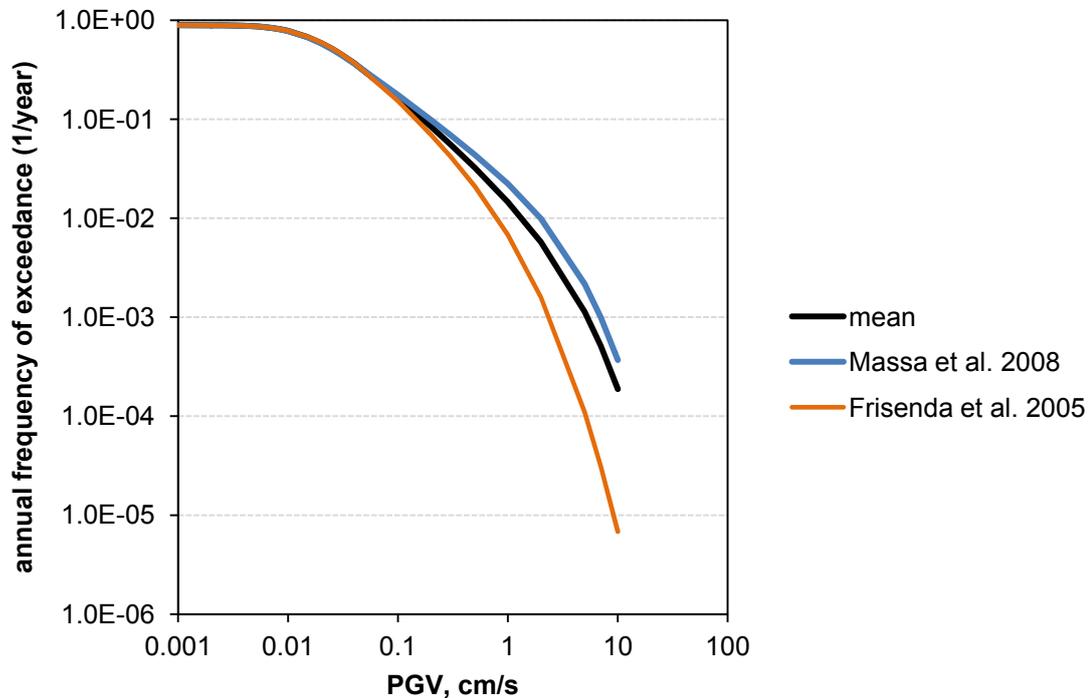


Abb. 2.12: Gefährdungskurve für induzierte Seismizität am Pilotstandort Unterhaching (mittlere jährliche Häufigkeit der Überschreitung der maximalen Bodenschwinggeschwindigkeit, PGV).

#### 2.4.6.2 Landau

Eine Zusammenfassung der Eingabeparameter ist in Tabelle 2.2 angegeben. Abbildung 2.13 zeigt die Verteilung der Magnituden nach Gleichung 2.1 mit den Werten aus Tabelle 2.2. Das seismische Quellmodell ist das gleiche wie zuvor (Abbildung 2.11), mit Ausnahme des Tiefenbereichs, der anhand der Hypozentren im seismischen Katalog zu 2,4 - 4,6 km bestimmt wurde.

Die Bodenbewegungsmodelle von MASSA et al. (2008), FRISENDA et al. (2005) und CHIOU et al. (2010), Modellvariante „CCAL“, wurden für den Fall Landau verwendet, weil sie die beste Übereinstimmung mit den aufgezeichneten PGVs aufwiesen (siehe MORALES AVILES et al, 2013a). Alle drei wurden im logischen Baum gleich gewichtet (mit jeweils 1/3). In den Berechnungen wurde von steifen Sedimenten als Standortstruktur ausgegangen (MORALES AVILES et al., 2013a). Dies erschien für den Standort angemessen, genaue Standortangaben waren jedoch nicht erhältlich.

Die berechnete mittlere jährliche Häufigkeit der Überschreitung (Einheit 1/Jahr) für Landau ist in Abbildung 2.14 als Funktion von PGV angegeben. Die Abbildung zeigt die seismischen Gefährdungskurven für die drei Bodenbewegungsmodelle und die mittlere Kurve.

Tab. 2.2: Bei der PSHA für Landau verwendete Eingabeparameter.

$ML_{min}$	Jahresmittelwert der Überschreitung der Magnitude $ML_{min}$ , $\nu_{mmin}$ (1/year)	$\beta$	$ML_{max}$	H (km)	GMPE
2,0	1,51	2,40	5,0	2,4 bis 4,6	- Massa et al. (2008) Wichtung 1/3 - Frisenda et al. (2005) Wichtung 1/3 - Chiou et al. (2010) Wichtung 1/3

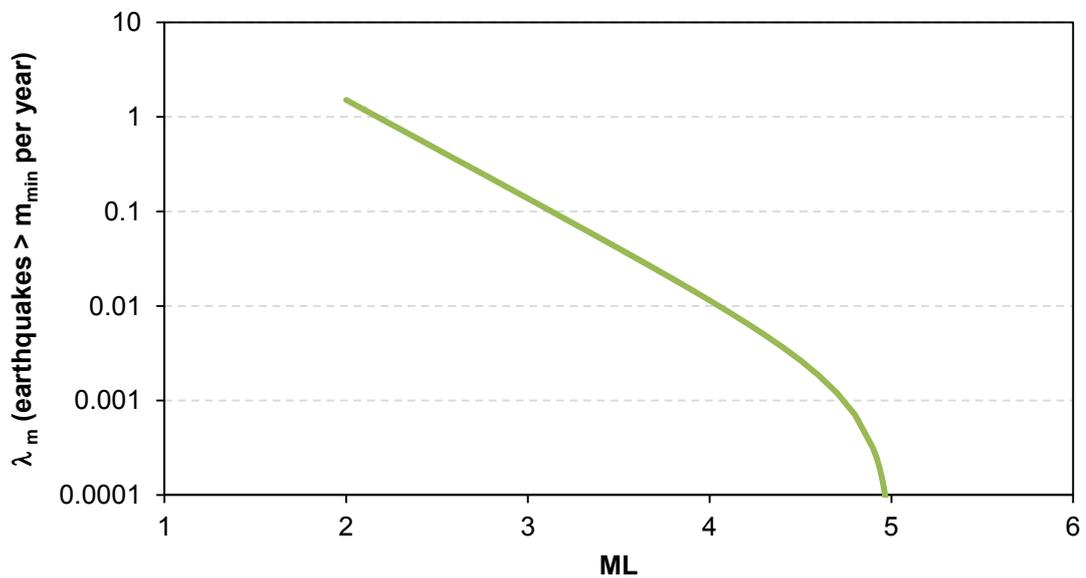


Abb. 2.13: Häufigkeitsverteilung der Magnituden, die für die Berechnungen für Landau eingesetzt wurde (Gleichung 2.1).

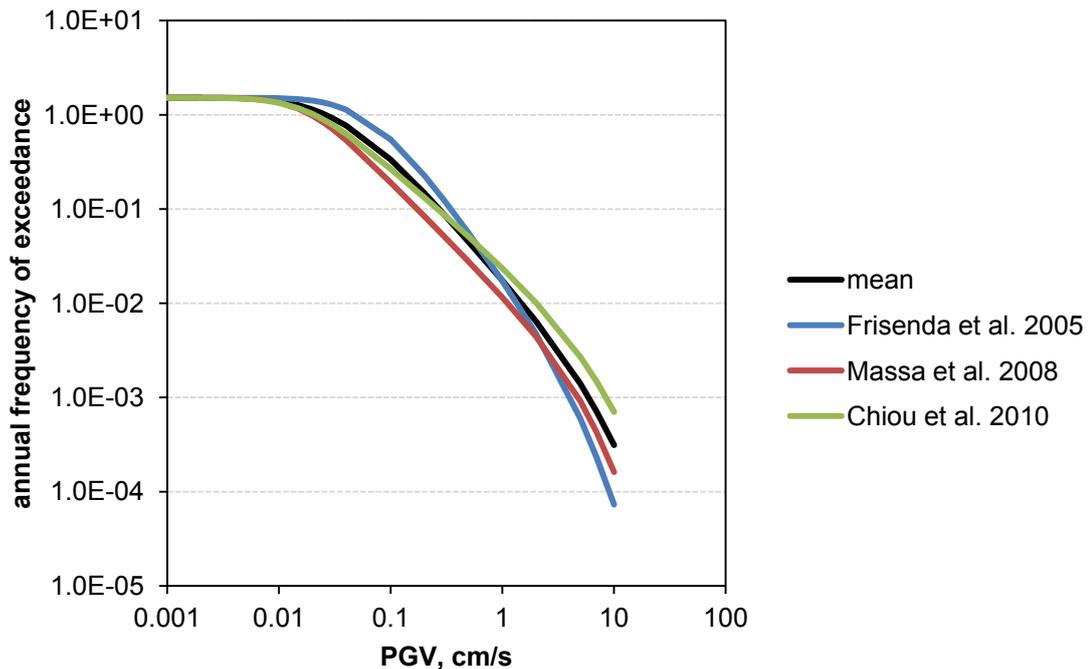


Abb. 2.14: Gefährdungskurve für induzierte Seismizität am Pilotstandort Landau (mittlere jährliche Häufigkeit der Überschreitung der maximalen Bodenschwinggeschwindigkeit, PGV).

## 2.5 Vergleich der Gefährdung natürlicher und induzierter Seismizität (AP5)

Im vorausgegangenen Kapitel wurde ein robustes Modell entwickelt, um die seismische Gefährdung bei induzierter Seismizität als Wahrscheinlichkeit für das Auftreten bzw. Überschreiten von Bodenbewegungen bestimmter Größe zu ermitteln. Als besonders geeigneter Parameter der Bodenbewegung kann die maximale Bodenschwinggeschwindigkeit, PGV, angesehen werden, da mit ihr die Verbindung zur DIN 4150, Teil 2 und 3, hergestellt werden kann und somit die Anzahl der Überschreitungen von Schwellenwerten pro Jahr (potentiell schädigender oder belästigender Wirkung in Gebäuden) ermittelt werden kann. Auf dieser Basis können die Vorgehensweisen von Normen und Richtlinien für die natürliche Seismizität auf die Behandlung der induzierten Seismizität übertragen werden. Tabelle 2.3 gibt die gegenüber einer im vorausgegangenen Abschnitt durchgeführten Berechnung für Unterhaching (Tabelle 2.1) leicht veränderten Eingabeparameter wieder. Nach Besprechungen mit MEGIES & WASSERMAN (2013) wurde der Bereich für die Herdtiefe sowie  $m_{\min}$  angepasst. Die berechnete mittlere jährliche Häufigkeit der Überschreitung (Einheit 1/Jahr) für Unterha-

ching ist in Abbildung 2.15 als Funktion von PGV angegeben. Die Abbildung zeigt die mittlere seismische Gefährdungskurve für die beiden angegebenen Bodenbewegungsmodelle (Tabelle 2.3). Schwellenwerte für die Spürbarkeit (PGV = 0.05 cm/s) bzw. für mögliche Schäden an Wohngebäuden (PGV = 0.5 cm/s) nach DIN 4150 sind mit vertikalen gestrichelten Linien markiert. Die jährlichen Häufigkeiten der Überschreitung können anschaulich interpretiert werden. Anhand der Ergebnisse in Abbildung 2.15 kann man ablesen, dass beispielsweise die Spürbarkeitsgrenze im Mittel dreimal im Jahr erreicht wird. Mit der hier vorgestellten Methodik steht somit ein Werkzeug bereit, mit dem die Anzahl der jährlichen Überschreitungen vorgegebener Schwellenwerte für PGV berechnet werden kann. Es bleibt geeigneten Expertengruppen oder den zuständigen Genehmigungsbehörden vorbehalten, Werte für die ‚akzeptable‘ oder ‚erlaubte‘ Anzahl bzw. Wahrscheinlichkeit der Überschreitungen festzulegen, die dann in Folge z. B. bei Genehmigungsverfahren eingehalten werden müssen. Es soll aber noch einmal betont werden, dass es sich hier um die Entwicklung und Präsentation der Methodik zur Ermittlung der seismischen Gefährdung bei induzierter Seismizität und nicht um eine belastbare Gefährdungsanalyse für die Geothermie-Anlagen handelt. Demnach sind die Ergebnisse als vorläufig zu bewerten; aufgrund der Begrenztheit der zugrunde liegenden Daten ist eine standortspezifische Beurteilung hier nicht möglich.

Tab. 2.3: Bei der PSHA für Unterhaching verwendete Eingabeparameter.

Aktivitätswert für $m_{min}$ [1/a]	$\beta$ -Wert	Minimale Magnitude	Maximale Magnitude	Herdtiefe [km]	Bodenbewegungsmodelle	Untergrundklasse
$\nu'_{mmin} = 22.4$	1,61	$m_{min} = 0$	$m_{max} = 5$	4,9 – 5,2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Massa et al. (2008), <math>w=0,5</math></li> <li>• Frisenda et al. (2005), <math>w=0,5</math></li> </ul>	Steife Sedimente

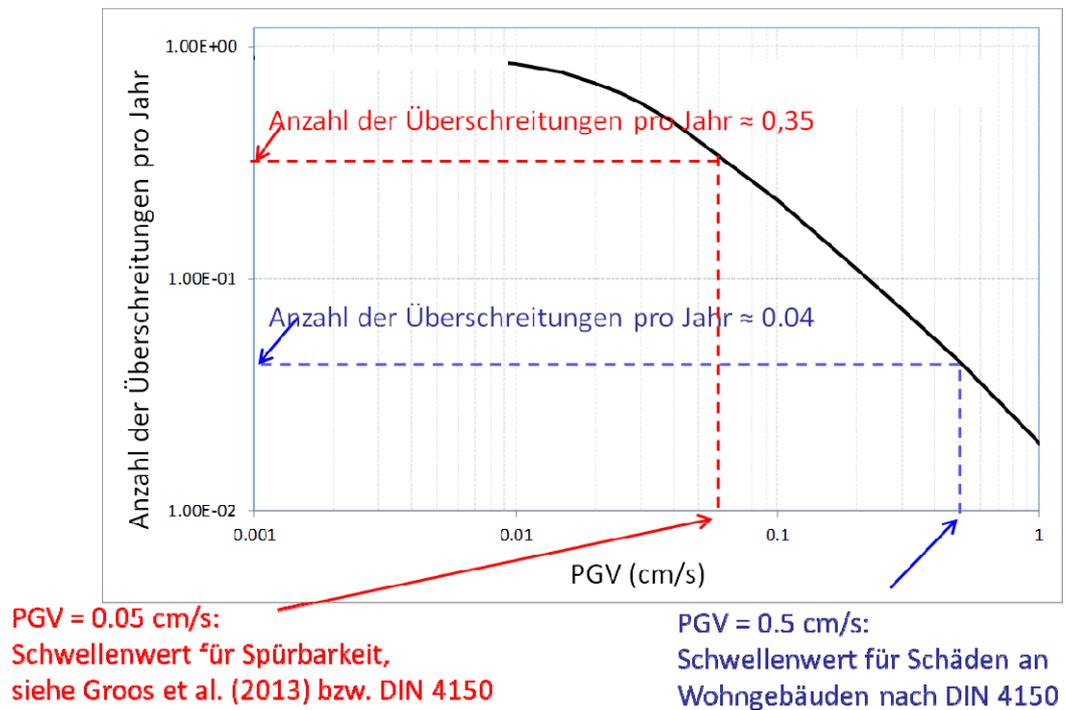


Abb. 2.15: Gefährdungskurve für induzierte Seismizität am Pilotstandort Unterhaching (mittlere jährliche Häufigkeit der Überschreitung der maximalen Bodenschwinggeschwindigkeit, PGV), berechnet für die Eingabeparameter aus Tabelle 6.1. Schwellenwerte für die Spürbarkeit (rot) bzw. für Schäden an Wohngebäuden (blau) nach DIN 4150 sind mit vertikalen gestrichelten Linien markiert.

Bisher stehen keine standardisierten Methoden zur Verfügung, um vor dem Auftreten von Mikroseismizität die seismische Gefährdung zu berechnen. Erste Erfahrungswerte scheinen aber zu zeigen, dass das Auftreten induzierter Erdbeben in Gebieten hoher natürlicher Seismizität (z.B. Oberrheingraben) höher ist als in Gebieten geringer natürlicher Seismizität (z.B. norddeutsches Becken). Die seismische Gefährdung an einem Pilotstandort mit Seismizität im Kraftwerksbetrieb wurde im obigen Teil dieses Kapitels berechnet (Abb. 2.15). Sie soll im Folgenden mit der Gefährdung durch natürliche Erdbeben am selben Standort verglichen werden.

Zur Berechnung der natürlichen seismischen Gefährdung wurde ein von GRÜNTAL et al. (2010) für das GEM-Projekt entwickeltes Seismizitätsmodell modifiziert (GRÜNTAL, 2013). Die benötigten Seismizitätsdaten wurden dem Erdbebenkatalog CENEC von GRÜNTAL et al. (2009) entnommen. Die seismische Gefährdungskurve für die natürliche Seismizität wurde mit dem Programm EZ-FRISK, Version 7.62, berechnet (Risk

ENGINEERING, 2011), das zugrunde gelegte Bodenbewegungsmodell stammt von AKKAR & BOMMER (2010).

Der Vergleich der seismischen Gefährdung durch natürliche und induzierte Seismizität in Abbildung 2.16 zeigt, dass der Beitrag der natürlichen Seismizität zur Gefährdung bis nahe der Fühlbarkeitsgrenze überwiegt und dass der Beitrag der induzierten Seismizität erst bei kleineren PGV-Werten relevant ist. Insbesondere bei dem DIN4150-Grenzwert von 0,5 cm/s wird die Gefährdung durch die natürliche Seismizität dominiert. Auch an dieser Stelle soll nochmals betont werden, dass es sich bei diesen Ergebnisse um die Entwicklung und Präsentation der Methodik zur Ermittlung der seismischen Gefährdung bei induzierter Seismizität und nicht um belastbare Gefährdungsanalysen für die Geothermieanlage Unterhaching handelt. Aufgrund der Begrenztheit der zugrunde liegenden Daten ist eine standortspezifische Beurteilung hier nicht möglich.

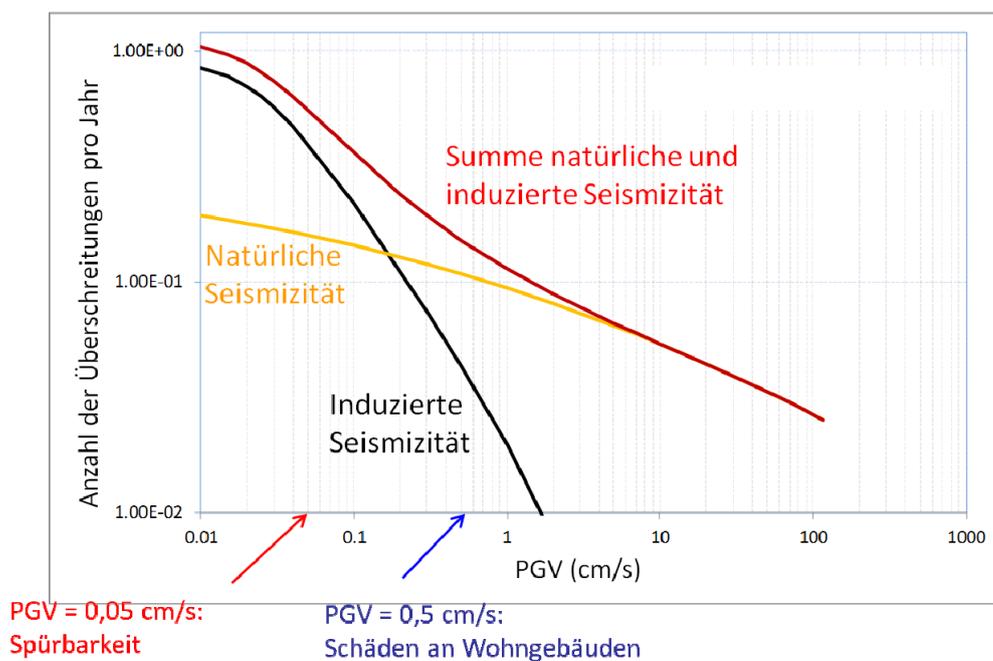


Abb. 2.16: Gefährdungskurve für induzierte Seismizität am Pilotstandort Unterhaching (schwarze Kurve) wie in Abb. 2.15 im Vergleich mit der Gefährdungskurve für die natürliche Seismizität (gelbe Kurve) am selben Standort. Die Summenkurve aus natürlicher und induzierter Seismizität ist ebenfalls eingezeichnet (rot). Die Schwellenwerte für die Spürbarkeit bzw. für Schäden an Wohngebäuden nach DIN 4150 sind (entsprechend Abb. 2.15) mit roten bzw. blauen Pfeilen markiert.

## **2.6 Ausgaben- und Zeitplanung**

Die Ausgaben wurden wie geplant getätigt. Dies betraf die Beschäftigung eines für drei Jahre angestellten wissenschaftlichen Mitarbeiters sowie die Durchführung seiner Dienstreisen (Herr Jürgen Kopera). Die Zeitplanung des Projekts wurde eingehalten.

## **2.7 Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeit**

Für das Erreichen des in EP4 angestrebten Ziels, die Entwicklung eines Verfahrens zur Ermittlung der seismischen Gefährdung der induzierten Seismizität bei tiefer Geothermie, war die Umsetzung der im Arbeitsplan definierten Arbeitspakete notwendig und angemessen.

## **2.8 Verwertbarkeit der Ergebnisse**

Die tiefe Geothermie bietet neben dem ökologischen Vorteilen betriebs- und volkswirtschaftliche Erfolgsaussichten. Nationale und internationale Nutzer sind Unternehmen der Wirtschaft (Investoren, Ausführende), Behörden (mit Aufgaben in Bezug auf Vorsorge und Genehmigung), Staat und Gesellschaft (ökologische verträgliche Energieerzeugung, Unabhängigkeit der Energieversorgung, Steuereinnahmen). Aufgrund der induzierten Seismizität bei Vorhaben der tiefen Geothermie ist die sichere Anwendung dieser Technologie jedoch in Frage gestellt worden. Die Bereitstellung von Methoden und Empfehlungen zur Abschätzung und Beherrschung der seismischen Gefährdung wird Firmen in Zukunft Grundlagen für ihre Investitionen und den Behörden Grundlagen für die Genehmigung liefern. Dies zeigt die Bedeutung der Nutzung der Forschungsergebnisse für die Produktion im wichtigen Markt der Energieversorgung auf. Die Umsetzung der Ergebnisse in Form von Empfehlungen einschlägiger Expertengremien kann in Anschluss an das Projekt begonnen werden.

Ergebnisse des Vorhabens können direkt von Ingenieurbüros übernommen werden, die sich mit der Erkundung von Standorten für tiefe geothermische Nutzung und/oder mit der Planung der Anlagen beschäftigen. Für die Berechnungen der Versicherungswirtschaft zum Risiko bei tiefer geothermischer Energienutzung sind die Ergebnisse

Grundlage für die Abschätzung monetärer Risiken und der Gestaltung entsprechender Prämiensysteme. Ebenso werden die Ergebnisse direkt für die Vertreter von Genehmigungsbehörden verwendet werden können. Die Ergebnisse können von Expertengremien genutzt werden, um verbindliche Empfehlungen für die Planung und sicheren Bau und Betrieb der Anlagen erarbeiten zu können. Die mit dem entwickelten Verfahren zu erhaltenden Ergebnisse informieren die Öffentlichkeit über die auftretenden seismischen Gefährdungen und deren Beherrschung und können so zu einem fachlich fundierten gesellschaftlichen Dialog führen.

## **2.9 Während der Laufzeit bei anderen Stellen bekannt gewordene Fortschritte**

Während der Laufzeit von MAGS wurde von der Arbeitsgruppe „Induzierte Seismizität“ des Forschungskollegiums Physik des Erdkörpers e.V. (FKPE) ein Positionspapier zu Empfehlungen für die Erstellung seismologischer Gutachten bei Projekten der tiefen Geothermie erarbeitet und dem FKPE vorgelegt („Milestone 3“). In diese Arbeiten flossen die Erfahrungen aus EP4 in MAGS ein (Vertreter Spies und Schlittenhardt). Das Papier befindet sich momentan (März 2014) in der internen Abstimmung im FKPE.

Im Rahmen des Projekts GEISER wurde ebenfalls an der Problematik seismischer Gefährdung durch Fluidinjektionen sowie der Erarbeitung von Vorhersagemöglichkeiten gearbeitet, siehe z.B.

B. MENA, WIEMER, S., BACHMANN, S. (2013). Building Robust Models to Forecast the Induced Seismicity Related to Geothermal Reservoir Enhancement, Bull. Seismol. Soc. Am., 103, 383--393, doi: 10.1785/0120120102.

Die Arbeiten wurden zeitgleich mit MAGS durchgeführt und die Ergebnisse wurden zeitgleich herausgegeben.

## **2.10 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen**

Folgende Vorträge, Poster und schriftlichen Beiträge mit Bezug zur Ermittlung der Gefährdung induzierter Seismizität wurden publiziert oder sind für die Publikation vorgesehen. Zusätzlich wurde auf allen der halbjährlich stattgefundenen Workshops des MAGS-Projekts ein Vortrag über den Projektfortschritt gehalten. Diese werden hier nicht einzeln aufgeführt.

KOPERA, J.; SPIES, T. & SCHLITTENHARDT, J. (2011): Verbundprojekt MAGS: Einzelprojekt 4: Untersuchung der seismischen Gefährdung aufgrund induzierter Seismizität bei tiefer geothermischer Energiegewinnung, 71. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft, 21. - 24. Februar 2011, Tagungsband mit Abstracts: 88, Köln.

U. WEGLER, M. BISCHOFF, C. BÖNNEMANN, C. DINSKE, J. GROOS, M.Z. HOU, H. KONIETZKY, J. KOPERA, T. KRACKE, C. LANGENBRUCH, T. MEGIES, R. MITTAG, J. RITTER, T. SPIES, J. SCHLITTENHARDT, H. SCHÜTZ, S. SHAPIRO, M. VASTERLING, J. WASSERMANN (2012): Konzepte zur Begrenzung der mikroseismischen Aktivität bei der energetischen Nutzung geothermischer Systeme im tiefen Untergrund, 72. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft, 5. – 8. März 2012. Tagungsband mit Abstracts: 170, Hamburg.

KOPERA, J., W. MORALES, J. SCHLITTENHARDT & T. SPIES (2012): Ermittlung der seismischen Gefährdung beim Ausbau und Betrieb von EGS-Anlagen, GeoHannover, Jahrestagung der Deutschen Geowissenschaftlichen Gesellschaft vom 01. - 03. Okt. 2012, Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften (Abstract), ISSN: 1860-1782, Hannover.

MORALES AVILÉS, W., SPIES, T.; SCHLITTENHARDT, J. & KOPERA, J. (2012): PGV-based probabilistic seismic hazard analysis for enhanced geothermal systems : Basel case study, Abstract volume : FKPE-LFZG Workshop Induced Seismicity; 26. - 28. November 2012, Karlsruher Institut für Technologie KIT, Karlsruhe.

VASTERLING, M., WEGLER, U., BISCHOFF, M., BÖNNEMANN, C., DINSKE, C. ; GROOS, J., HOU, M.Z., KRACKE, T., KOPERA, J., SCHLITTENHARDT, J., MAGS - concepts of mitigating microseismic activity of geothermal systems, FKPE-LFZG Workshop Induced Seismicity; 26. - 28. November 2012, Karlsruhe

- MORALES AVILES, W., SCHLITTENHARDT, J. & SPIES, T. (2012): Verification and Benchmark of EZ-FRISK program for Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA). – Federal Institute for Geosciences and Natural Resources, Reference no.: B4.4/B70312-02/2013-0001, Hannover.
- MORALES AVILÉS, W., SCHLITTENHARDT, J. & SPIES, T. (2013a): MAGS Project: Interim Report MAGS January–June 2012: Ground Motion Prediction Equations for Induced Seismicity. 39 pp., 12 Fig., 2 Tab., – Federal Institute for Geosciences and Natural Resources, Reference no.: B4.4/B70312-02/2013-0004/001, Hannover.
- MORALES AVILÉS, W., SCHLITTENHARDT, J. & SPIES, T. (2013b): MAGS Project: Interim Report MAGS July 2012 – March 2013: Probabilistic Seismic Hazard Analysis for Induced Seismicity. 20 Fig., 8 Tab., – Federal Institute for Geosciences and Natural Resources, Reference no.: B4.4/B70312-02/2013-0004/005, Hannover.
- KOPERA, J.R., SPIES, T. & SCHLITTENHARDT, J. (2013): MAGS-Einzelprojekt EP4: Untersuchung der seismischen Gefährdung aufgrund induzierter Seismizität bei tiefer geothermischer Energiegewinnung, Interimsbericht 10/2010–12/2011, 73 S., 8 Abb., 2 Tab., 3. Anh.; – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Geschäftszeichen: B4.4/B70312-02/2013-0003/001, Hannover.
- KAISER, D., SPIES, T. & SCHMITZ, H. (2013): Mikroakustisches Monitoring in Bergwerken zur Bewertung aktueller Rissprozesse. In: Sörgel, U.; Schack, L.(Hrsg.): Tagungsband Geomonitoring 2013, 14. bis 15. März 2013 in Hannover, S. 37 – 54.
- SPIES, T., SCHLITTENHARDT, J. MORALES AVILES, W., KOPERA, J. (2014): Seismische Gefährdung aufgrund induzierter Seismizität bei der tiefen Geothermie 74. Jahrestagung der DGG, 10. - 13. März 2014, Karlsruhe.
- SPIES, T., SCHLITTENHARDT, J. MORALES AVILES, W., KOPERA, J.: Estimation of Seismic Hazard Due to Induced Seismicity Related to Deep Geothermal Wells, Jahrestagung der Seismological Society of America (SSA), Anchorage, 28.4. - 3.5.2014.

SCHLITTENHARDT, J. SPIES, T., MORALES AVILES, W., KOPERA, J.(2014): A Simple Model for Probabilistic Seismic Hazard Analysis of Induced Seismicity Associated With Deep Geothermal Systems, Jahrestagung der European Geophysical Society (EGU), 27.4. – 2.5.2014, Wien.

HESSER, J., KAISER, D., SCHMITZ, H. & SPIES, T. (2014): Measurements of acoustic emission and deformation in a repository of nuclear waste in salt rock, IAEG XII Congress 2014 (International Association for Engineering Geology and the Environment), 15. – 19. September 2014, Turin, 7 pages.

Es wird angestrebt, im Laufe des Jahres 2014 die Ergebnisse aus EP4 in Fachzeitschriften zu veröffentlichen.

### **3 Zusammenfassung und Empfehlungen**

In seismischen Gefährdungsanalysen 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. Damit wird der notwendige Schritt von der Charakterisierung der induzierten Seismizität in Bezug auf ihre räumliche Lage und die Häufigkeitsverteilung der Magnituden hin zur Beschreibung ihrer Wirkungen an der Oberfläche vollzogen.

Die in EP4 durchgeführten Arbeiten konzentrierten sich auf die Bereitstellung eines Verfahrens für die probabilistische Gefährdungsberechnung für induzierte Seismizität zur Anwendung bei Standortuntersuchungen. Dabei werden die zu erwartende Häufigkeiten für die Überschreitung vorgegebener Werte der Einwirkungen berechnet. Das Verfahren umfasst ein Modell für die seismische Quelle oder seismischen Quellen in Form von Volumina mit vorgegebenen Magnituden-Häufigkeits-Verteilungen sowie die Auswahl von Bodenbewegungsmodellen für flache Herde und geringe Abstände zwischen seismischen Quellen und den Standorten. Ein geeignetes Programm für die probabilistische Berechnung wurde ausgewählt und ein Benchmark durchgeführt.

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 die ‚akzeptable‘ oder ‚erlaubte‘ Anzahl von Überschreitungen können somit von Expertengruppen oder von Genehmigungsbehörden festgelegt werden. Das Verfahren kann weiterhin in Monitoring-Konzepte („Ampel-Systeme“) integriert werden, um die Einwirkungen der induzierten Seismizität einzubeziehen.

Als Ergebnis der Arbeiten von EP4 im Projekt MAGS wird empfohlen, probabilistische Gefährdungsanalysen für Standorte tiefer Geothermie-Anlagen durchzuführen. Im Laufe der Erkundung und des Betriebs der Anlagen werden die standortspezifischen Datengrundlagen ermittelt. Dies betrifft 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. Der Einsatz von Daten lokaler seismischer Netze ist hier von besonderer Bedeutung. Mit der Verwendung standortspezifischer Daten verringert sich der Bereich der Unsicherheiten für die zu berechnenden Häufigkeiten der Überschreitung für die Fühlbarkeit von Ereignissen und für das Auftreten leichter Gebäudeschäden.

In EP4 durchgeführte Vergleiche der seismischen Gefährdung aufgrund natürlicher und induzierter Seismizität zeigten, dass der Beitrag der natürlichen Seismizität zur Gefährdung bei größeren Werten der Einwirkung überwiegt und dass der Beitrag der induzierten Seismizität nur bei kleineren Einwirkungen (hier PGV-Werten) relevant ist. Beim Grenzwert der DIN4150 für die Fühlbarkeit wird die Gefährdung von der induzierten Seismizität dominiert. Eine Verallgemeinerung dieser Resultate ist allerdings aufgrund der Begrenztheit der zugrunde liegenden Daten, hier für die Pilotstandorte, nicht möglich. Die Ergebnisse sind als vorläufig zu bewerten. Sie sind möglicherweise Abschätzungen nach unten, da die lokalen Verstärkungseffekte nicht berücksichtigt werden konnten. Hier ist der Ansatzpunkt für die Arbeiten in MAGS2: es wird empfohlen, mittels Mikrozonierung den Einfluss der der Sedimentschichten auf die Einwirkungen der seismischen Ereignisse an der Erdoberfläche zu untersuchen.

## 4 Literatur

- AKKAR, S. & BOMMER J.J. (2010): Empirical Equations for the Prediction of PGA, PGV, and Spectral Accelerations in Europe, the Mediterranean Region, and the Middle East. – *Seismological Research Letters*, 81 (2): 195–206.
- BRAGATO, P. L. & SLEJKO, D. (2005): Empirical Ground-Motion Attenuation Relations for the Eastern Alps in the Magnitude Range 2.5–6.3, – *Bull. Seism. Soc. Am.* 95 (1): 252–276.
- BOMMER, J. J., OATES, S., MAURICIO-CEPEDA, J., LINDHOLM, C., BIRD, J., TORRES, J., MARROQUIN, G. & RIVAS, J. (2006): Control of hazard due to seismicity induced by a hot fractured rock geothermal project. – *Engineering Geology*. 83: 287–306.
- CHIOU, B., YOUNGS, R., ABRAHAMSON, N. & ADDO, K. (2010): Ground-Motion Attenuation Model for Small-To-Moderate Shallow Crustal Earthquakes in California and Its Implications on Regionalization of Ground-Motion Prediction Models. – *Earthquake Spectra*, 26 (4): 907–926.
- DOST, B., VAN ECK, T. & HAAK, H. (2004): Scaling of peak ground acceleration and peak ground velocity recorded in the Netherlands. *Bollettino Di Geofisica Teorica Ed Applicata*, Vol. 45, N. 3, pp. 153–168.
- FRISENDA, M., MASSA, M., SPALLAROSSA, D., FERRETTI, G. & EVA, C. (2005): Attenuation relationship for low magnitude earthquakes using standard seismometric records. – *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 9, No. 1, pp. 23–40.
- GROSS, J. (2012): Personal communication.  
MAGS\_EPI\_Catalog\_Landau\_Vol\_20121129.
- GROOS, J. C., FRITSCHEN, R. & RITTER, J. R. R. (2013): Untersuchung induzierter Erdbeben hinsichtlich ihrer Spürbarkeit und eventueller Schadenswirkung anhand der DIN 4150, *Bauingenieur*, Band 88, 374–383.

- GRÜNTAL, G., ARVIDSSON, R & BOSSE, CH. (2010): Earthquake Model for the European Mediterranean Region for the Purpose of GEM1, Scientific Technical Report STR10/04, GFZ Potsdam, 38 pp.
- GRÜNTAL, G., WAHLSTRÖM, R. & STROMEYER, D. (2009): The unified catalogue of earthquakes in central, northern, and northwestern Europe (CENEC) - updated and expanded to the last millennium. *Journal of Seismology*, 13 (4): 517–541.
- GRÜNTAL (2013): Personal communication.
- GÜNTHER, A. (2010): D-SEIS: An ArcView GIS extension for deterministic seismic intensity analysis after Leydecker (1986). – Bundesanstalt f. Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover.
- KÖHLER, N., SPIES, T. & DAHM, T. (2009): Seismicity patterns and variation of the frequency-magnitude distribution of microcracks in salt. – *Geophys. J. Int. (GJI)*, 179, 489–499.
- KOPERA, J.R., SPIES, T. & SCHLITTENHARDT, J. (2013): MAGS-Einzelprojekt EP4: Untersuchung der seismischen Gefährdung aufgrund induzierter Seismizität bei tiefer geothermischer Energiegewinnung, Interimsbericht 10/2010–12/2011, 73 S., 8 Abb., 2 Tab., 3. Anh.; – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Geschäftszeichen: B4.4/B70312-02/2013-0003/001, Hannover.
- KRAMER, S. L. (1996): *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall, 653 pp.
- MASSA, M., MORASCA, P., MORATTO, L., MARZORATI, S., COSTA, G. & SPALLAROSSA, D. (2008): Empirical Ground-Motion Prediction Equations for Northern Italy Using Weak- and Strong-Motion Amplitudes, Frequency Content, and Duration Parameters. – *Bull. Seism. Soc. Am.*, 98 (3): 1319–1342.
- MCGARR, A. & FLETCHER, J. B. (2005): Development of Ground-Motion Prediction Equations Relevant to Shallow Mining-Induced Seismicity in the Trail Mountain Area, Emery County, Utah. – *Bull. Seism. Soc. Am.*, 95 (1): 31–47.
- MCGUIRE (2004): *Seismic Hazard and Risk Analysis*. Risk Engineering, Inc. Earthquake Engineering Research Institute.

MEGIES, T. (2012): Personal communication. Katalog Unterhaching, Stand 2012-09-11

MEGIES & WASSERMAN (2013): Personal communication.

MORALES AVILES, W., SCHLITTENHARDT, J. & SPIES, T. (2012): Verification and Benchmark of EZ-FRISK program for Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA). – Federal Institute for Geosciences and Natural Resources, Reference no.: B4.4/B70312-02/2013-0001, Hannover.

MORALES AVILÉS, W., SCHLITTENHARDT, J. & SPIES, T. (2013a): MAGS Project: Interim Report MAGS January–June 2012: Ground Motion Prediction Equations for Induced Seismicity. 39 pp., 12 Fig., 2 Tab., – Federal Institute for Geosciences and Natural Resources, Reference no.: B4.4/B70312-02/2013-0004/001, Hannover.

MORALES AVILÉS, W., SCHLITTENHARDT, J. & SPIES, T. (2013b): MAGS Project: Interim Report MAGS July 2012 – March 2013: Probabilistic Seismic Hazard Analysis for Induced Seismicity. 20 Fig., 8 Tab., – Federal Institute for Geosciences and Natural Resources, Reference no.: B4.4/B70312-02/2013-0004/005, Hannover.

LEYDECKER, G. (1998): Beziehung zwischen Magnitude und Größe des Bruchfeldes bei starken Gebirgsschlägen im deutschen Kalibergbau – ein Beitrag zur Gefährdungsprognose. – Zeitschrift für angewandte Geologie, 44, 1, 22–25, Hannover.

LEYDECKER, G. & KOPERA, J.R. (2003): Long Term Seismological Hazard Assessment for Morsleben Site: Deterministic and Probabilistic Approach. pp. 409–420, – In: Proceedings of OECD-NEA Workshop: On The Relations Between Seismological Data And Seismic Engineering Analysis. Oct. 16–18, 2002, Istanbul, Turkey. – NEA/CSNI/R (2003) 18. Nov. 2003, Issy-LesMoulineaux, France.

LEYDECKER, G., SCHMITT, T. & BUSCHE, H. (2006): Erstellung ingenieurseismologischer Gutachten für Standorte mit erhöhtem Sekundärrisiko auf der Basis des Regelwerks KTA 2201.1 – Leitfaden, 58 S., 16 Abb., 4 Tab., 2 Anh., ISBN 3-510-95952-3; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

LEYDECKER, G., BUSCHE, H., BONJER, K.-P., SCHMITT, T., KAISER, D., SIMEONOVA, S., SOLAKOV, D. & ARDELANU, L. (2008): Probabilistic seismic hazard in terms of in-

tensities for Bulgaria and Romania – updated hazard maps. – Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 8, 1431–1439.

LEYDECKER, G., SCHMITT, T., BUSCHE, H. & SCHAEFER, T. (2008): Seismo-engineering parameters for sites of interim storages for spent nuclear fuel at German nuclear power plants. – Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 28, 754–762.

RIPPERGER, J., KÄSTLI, P., FÄH, D. & GIARDINI, D. (2009): Ground motion and macroseismic intensities of a seismic event related to geothermal reservoir stimulation below the city of Basel – observations and modeling. – Geophysical Journal International. 179 (3): 1757–1771.

RISK ENGINEERING, INC. (2011): EZ-FRISK Version 7.62, Software for Earthquake Ground Motion Estimation.

SECANELL, R., CARBON, D., DUNAND, F. & MARTIN, C. (2009): AP5000 Report- Seismic Hazard and Risk assessments during three reference time periods (normal, stimulation and circulation). – Geoter S.A.S Final report Rev 1 Report GTR/CBAL/1009-698.

SPIES, T., ALHEID, H.-J. & SCHULZE, O. (2000): Einsatz ultraschallseismischer Verfahren zur Untersuchung der hydraulischen Integrität des Gebirges. – Felsbau 18, Nr. 5: 119–126.

SPIES, T. & EISENBLÄTTER, J. (2001): Acoustic emission investigation of microcrack generation at geological boundaries. – Engineering Geology 61: 181–188.

SPIES, T., HESSER, J. & EISENBLÄTTER, J. (2004): Seismology on a small scale: acoustic emission measurements in rock mechanics. – Proceedings of the Symposium in Memoriam of Prof. Gerhard Müller, Sonderband I/2004, ISSN-Nr. 0934-6554, Schweitzer (ed.), Deutsche Geophysikalische Gesellschaft e. V., 72–76.

SPIES, T., HESSER, J., EISENBLÄTTER, J. & EILERS, G. (2005): Measurement of acoustic emission during backfilling of large excavations. – Proceedings of the 6th Symposium on Rock Bursts and Seismicity in Mines, Eds. POTVIN, Y. & HUDYMA, M., Perth, Australia, 379–384, Perth.

TORO, G. R., ABRAHAMSON, N. & J. F. SCHNEIDER (1997): Model of Strong Ground Motions from Earthquakes in Central and Eastern North America: Best Estimates and Uncertainties.- Seismological Research Letters, 68 (1): 41-57.

WYSS, M., WIEMER, S. & ZUÑIGA, R. (2001): ZMAP A Tool for Analyses of Seismicity Patterns, Version 6,0. ETH Zürich.