

Induzierte Seismizität Position des GtV-BV Geothermie e.V. ¹

1. Hintergrund

Die internationale Erfahrung hat gezeigt, dass Geothermieprojekte Induzierte Seismizität auslösen können. Keines dieser Ereignisse hat jedoch die Tragkonstruktion von Gebäuden, Verkehr, Infrastruktur oder gar Menschen gefährdet. Dennoch waren sie der Hauptgrund dafür, dass die Akzeptanz der Geothermie in der Öffentlichkeit zurückgegangen ist. Als Folge müssen sich diejenigen, die sich mit Geothermie beschäftigen, ernsthaft mit diesen Problemen auseinandersetzen. Sowohl eine öffentliche Diskussion als auch weitere intensive Forschung ist nötig. Es sind Handlungsanweisungen zu entwickeln, wie bei Installationen im Untergrund vorzugehen ist, und wie Geothermieanlagen zu betreiben sind. Da den Genehmigungsbehörden diese Probleme bekannt sind, können diese Akzeptanzprobleme geothermische Projekte wesentlich verzögern oder den Bau und den Betrieb von Anlagen beeinträchtigen.

Im Gegensatz zu natürlichen Erdbeben ist Induzierte Seismizität nicht unvorhersehbar und kann im Grundsatz beherrscht werden. Hierüber wissen wir nach Jahren der Forschung wesentlich mehr als noch vor einigen Jahren. Dennoch ist weitere Forschung notwendig.

Dieses Positionspapier wendet sich an die Öffentlichkeit, also insbesondere an:

- Politiker
- Behörden
- Investoren
- Projektentwickler
- Medien

Es ist ein Positionspapier des GtV-Bundesverband Geothermie, gibt aber die Ansicht vieler führender Experten auf dem Gebiet Induzierter Seismizität wieder. Der Bundesverband hat sich bei der Formulierung von einem internationalen Expertenteam beraten lassen. Wegen der zum Teil uneinheitlichen Expertenmeinungen kann das Positionspapier jedoch nicht jeder der

¹ Das 'Positionspapier' wird inhaltlich vom GtV-Bundesverband Geothermie e.V. verantwortet. Er hat sich von einer Gruppe international bekannter Experten beraten lassen. Da die Expertenmeinungen in einigen Punkten divergierten, stellt das 'Positionspapier' nicht immer die Meinung jedes der Experten dar. Zur Expertengruppe gehörten: Baisch (Deutschland), Baumgärtner (Deutschland), Bohnhoff (Deutschland), Bönnemann (Deutschland), Majer (USA), Wenzel (Deutschland), Gottlieb (Deutschland), Heidbach (Deutschland), Hinzen (Deutschland), Ritter (Deutschland), Joswig (Deutschland), Wassermann (Deutschland), Young (Kanada), Heatherly (Australien), Fritschen (Deutschland), Jung (Deutschland), Gritto (USA), Baria (UK), Schulz (Deutschland), Shapiro (Deutschland), Rüter (Deutschland)

geäußerten Ansichten gerecht werden. Es ist auch keine wissenschaftliche Veröffentlichung und verzichtet bewusst auf Abbildungen, Formeln sowie Quellen- und Literaturangaben.

2. Natürliche Seismizität

Natürliche Seismizität ist Teil unserer natürlichen Umwelt. Sie ist eine Folge der Drift der Kontinente und der Plattentektonik. Nur eine kleine Zahl zerstörerischer Beben erlangt öffentliche Aufmerksamkeit. Sie sind der Grund für die allgemeine Angst vor Erdbeben. Mikroseismizität ist dagegen eine alltägliche Erscheinung, die allerdings in der Öffentlichkeit kaum bekannt ist. Etwa 1000 Ereignisse mit Magnituden zwischen 2 und 3 und etwa 150 mit Magnituden zwischen 3 und 4 werden weltweit täglich aufgezeichnet. Die Ereignisherde sind auf der Erde nicht gleichmäßig verteilt sondern konzentrieren sich in seismisch aktiven Gebieten, zum größten Teil entlang von Plattengrenzen.

Die Erdbebenaktivität in einem bestimmten Gebiet wird als ‚Seismizität‘ bezeichnet. Die Beschreibung der Seismizität ist statistischer Natur und enthält meist folgende Elemente:

- Lokale geologische und tektonische Situation
- Lokales Spannungsfeld der Erde
- Erdbebenkataloge der vorinstrumentellen Zeit
- Kataloge aufgezeichneter Ereignisse
- Lokalisierung der Erdbebenherde
- Statistiken wie Gutenberg-Richter Beziehungen
- Herdflächenlösungen
- Schadensberichte und mikroseismische Studien.
- Intensitätskarten

Die natürliche Seismizität kann als ein natürlich vorgegebener Rahmen für Induzierte Seismizität angesehen werden. Induzierte Ereignisse sind statistisch gesehen kleiner als die größten möglichen natürlichen Ereignisse. Es wurde in der Vergangenheit kein Fall bekannt, in dem ein induziertes Ereignis größer war als die größten natürlichen Ereignisse im Untersuchungsgebiet.

In Gebieten ohne natürliche Seismizität existiert dieser ‚Rahmen‘ natürlich nicht, so dass er auch nicht zur Abschätzung Induzierter Seismizität in Bezug auf ihre Maximalmagnitude und Auftretenshäufigkeit genutzt werden kann. Diese Gebiete gelten jedoch grundsätzlich als weniger gefährdet.

3. Induzierte Seismizität

Es ist offensichtlich, dass alle größeren Eingriffe in den Untergrund das Spannungsfeld ändern und so das Potenzial haben, seismische Ereignisse auszulösen. Seismische Ereignisse wurden berichtet von:

- Staudämmen
- Bergbau
- Verkehrstunneln
- Ausgrabungen
- Öl-/Gasproduktion
- Unterspeicherung (Gas, Druckluft)
- Flüssigkeitsverpressungen
- Mineralwasserbrunnen
- Hydraulischer Stimulation von Öl-/Gaslagerstätten

Induzierte Seismizität bei geothermischen Installationen hat denselben physikalischen Grund wie bei anderen Fluidinjektionen. Der Hauptmechanismus ist, dass der zusätzlich aufgebrachte Porendruck die Normalspannung und somit die Reibungskräfte auf einer Störung zwischen zwei Gesteinsblöcken reduziert. Folge kann eine plötzliche Scherbewegung entlang dieser Störung sein.

Beim Betrieb geothermischer Anlagen können darüber hinaus thermo-mechanische Effekte eine Rolle spielen. Auch diese können Reibungskräfte reduzieren, sind aber meist auf sehr kleine Gesteinsvolumen beschränkt.

Über seismische Effekte bei geothermischen Projekten wurde weltweit berichtet. Nirgendwo traten zerstörerische Beben auf, die die Tragstruktur von Gebäuden beeinträchtigt hätten, die Infrastruktur geschädigt oder sogar eine Gefahr für Menschen dargestellt hätten. Kleinere Schäden wie in Basel oder Landau wurden ohne nähere Ermittlung der Verursachungszusammenhänge auf dem Kulanzwege reguliert oder es steht eine einvernehmliche Schadensabwicklung aus.

Wesentlich für die Akzeptanz von Geothermieprojekten ist die Frage, ob größere natürliche Ereignisse ‚getriggert‘ werden können, entweder durch die Fluidinjektion oder durch ein kleineres induziertes Ereignis. Wir sprechen von einem getriggerten Ereignis, wenn die aktivierte Störungsfläche viel größer ist als die Ausbreitung des Fluids oder zumindest teilweise außerhalb des Injektionsbereichs liegt. Für Basel wurden derartige Ereignisse von den Gutachtern ausgeschlossen. Weltweit sind keine Fälle von Triggerung bei Geothermieprojekten bekannt, was aber nicht bedeutet, dass sie völlig unmöglich sind.

Kleine induzierte Ereignisse können auch zur Beschreibung des Reservoirs und zur Erkundung der Reservoirumgebung genutzt werden. Diese Methode wird üblicherweise als ‚Passive Seismik‘ bezeichnet und ist eine wichtige und wertvolle Methode beim geothermischen Reservoirmanagement.

4. Rechtlicher Hintergrund

In Deutschland wird die Nutzung geothermischer Energie durch das Bundesberggesetz geregelt. Dies schreibt vor:

- dass für den Schutz der Oberfläche im Interesse der persönlichen Sicherheit und des öffentlichen Verkehrs Sorge getragen wird (§55 Abs.1 Ziffer 5) und
- dass gemeinschädliche Einwirkungen der Aufsuchung oder Gewinnung nicht zu erwarten sind (§55 Abs.1 Ziffer 9)

Generell bedeutet dies, dass kleinere Schäden toleriert werden müssen, diese aber zu entschädigen sind. Dieser bergrechtliche Grundsatz ist Folge der seit langem bestehenden Notwendigkeit der Rohstoffsicherung, der sich heute auch auf das öffentliche Interesse am verstärkten Einsatz der Geothermie als erneuerbare Energie erstreckt.

5. Abschätzung von Maximalmagnitude und Wiederkehrperiode

Die Abschätzung einer maximal möglichen Magnitude an einer bestimmten Lokation ist eine der Hauptforderungen an einen Seismologen, der ein Geothermieprojekt begleitet. Eine erste Abschätzung wird durch die Betrachtung der natürlichen Seismizität erreicht, da diese für die induzierte Seismizität einen statistischen Rahmen setzt. Die Möglichkeit zu einer seriösen Abschätzung wächst mit dem Fortschreiten des Projekts. Die erste Bohrung wird Informationen über das lokale Spannungsfeld ergeben. Seismologische Aufzeichnungen während der Bohr- und Stimulationsphase erlauben die Anwendung statistischer Methoden.

Grundsätzlich stehen uns mehrere Ansätze zur Abschätzung der maximal möglichen Magnitude und der Wiederkehrperiode zur Verfügung:

- Die deterministische Methode
- Die probabilistische (statistische) Methode
- Die empirische Methode
- Die Methode des kontrollierten Betriebs (step-by-step)

Die drei erst genannten Methoden sind im Annex kurz beschrieben. Nachfolgend wird die Methode des kontrollierten Betriebs (step-by-step) vorgestellt.

Beziehungen zwischen Injektionsparametern und Induzierter Seismizität können nicht nur durch theoretische oder statistische Methoden im Vorfeld bestimmt werden, sondern auch durch Beobachtungen während der Durchführung.

Es ist anerkannt, dass selbst bei einer guten Kenntnis der lokalen und regionalen Geologie die im Annex dargestellten Methoden keine abschließende Abschätzung der Maximalmagnituden und des seismischen Risikos erlauben. Die Vermeidung größerer Ereignisse bedarf daher einer weitergehenden Methode, die wir hier ‚Methode des kontrollierten Betriebs‘ oder eine ‚step-by-step‘-Vorgehensweise nennen. Hierbei werden alle betrieblichen Maßnahmen, die Einfluss auf die Seismizität haben könnten, so gestaltet, dass das seismische Risiko nur langsam und kontrolliert anwächst und die Ereignisse (statistisch) unterhalb der Fühlbarkeitsschwelle bleiben.

Alle Schritte, wie Bohren, Stimulieren, hydraulische Tests und Produktion müssen messtechnisch durch ein seismisches Monitoring begleitet werden. Die Messungen werden kontinuierlich statistisch und bezüglich ihrer räumlichen Verteilung ausgewertet. Auch deterministische Abschätzungen können einfließen. Letztlich ist die Methode eines kontrollierten Betriebs eine intelligente und praktikable Kombination verfügbarer Methoden. Auch andere nicht gezielt erhaltene Informationen können genutzt werden. Teile dieses Vorgehens könnten sein:

- Ein Überwachungskonzept und ein Reaktionsplan
- Überwachung der Bohrungen
- Überwachung der Stimulationen
- Überwachung der Produktion

5.1 Monitoring und Reaktionsplan

Entscheidend bei der Durchführung der Methode eines kontrollierten Betriebs ist das Monitoring der Induzierten Seismizität. Dies geschieht durch seismische Online-Netze. Grundsätzlich sind zwei Netze mit unterschiedlicher Aufgabenstellung nötig, die technisch jedoch auch zu einem Netz zusammengefasst werden können, wenn dabei sowohl die Aufgaben eines seismologischen Netzes als auch die eines Immissionsnetzes erfüllt werden:

Bei einem seismologischen Netz sind eine gute Überdeckungsgeometrie zur Ereignisortung und eine niedrige Detektionsschwelle zur Erfassung kleiner Ereignisse wesentlich. So kann eine ausreichende Datenbasis für statistische Auswertungen geliefert werden. Ein Teil der Messstationen kann in Bohrlöchern installiert werden. Es gibt hier keine verbindlichen Vorschriften.

Immissionsnetze müssen den nationalen Standards entsprechen, die die Messgeräte, deren Aufstellung und die Auswertung verbindlich vorschreiben. Wesentlich ist in Deutschland die DIN-gerechte Aufzeichnung der maximalen Schwingungsgeschwindigkeiten (PGV).

Diese Netze sollten bevorzugt durch nationale Stellen oder von diesen beauftragten Dienstleistern betrieben werden. Dies ist insbesondere dann von Vorteil, wenn sich die Netze benachbarter Lokationen überlappen. Gleichzeitig wird so die Akzeptanz erhöht.

Ein öffentlich gemachter Reaktionsplan, der auf den gemessenen Werten maximaler Schwingungsgeschwindigkeit beruht, sollte erstellt werden. Dies stellt sicher, dass die Schwingungsgeschwindigkeiten einen vorgegebenen Wert im Verlauf der Aktivitäten statistisch nicht überschreiten.

Das Überwachungskonzept und der Reaktionsplan sollten einvernehmlich zwischen allen Beteiligten einschließlich der Zulassungs- und Aufsichtsbehörde entwickelt werden.

5.2. Bohren

Bisher wurden bei geothermischen Tiefbohrungen keine induzierten Ereignisse beobachtet. Es wird dennoch im Zuge des step-by-step Vorgehens vorgeschlagen, dass auch diese Projektphase seismologisch überwacht wird, schon um möglichst frühzeitig eine ausreichende seismologische Datenbasis (auch der natürlichen Seismizität) zu erhalten.

5.3 Hydraulische Stimulation

Die hydraulische Stimulation ist meist die Projektphase mit dem höchsten Risiko induzierter Seismizität. Stimulationen müssen ihrer Natur nach mit seismischen Ereignissen einher gehen. Es ist einem Plan zu folgen, der mit niedrigen Drucken, niedrigen Fließraten, kleinen Einpressvolumina und begrenzten Einpresszeiten beginnt. Dann werden diese Parameter systematisch erhöht, bis das Stimulationsergebnis erreicht wird. Ein detaillierter und

öffentlicher Reaktionsplan schreibt alle Maßnahmen vor, die zu ergreifen sind, wenn hierbei vorgegebene Werte der maximalen Schwinggeschwindigkeit überschritten werden. Fühlbare oder gar schädliche Ereignisse werden so mit hoher Wahrscheinlichkeit vermieden.

5.4 Produktion

Nachdem die Produktion in eine stationäre Phase eingetreten ist und sich entnommene und reinjizierte Flüssigkeitsmengen die Waage halten, sind Injektionsdrucke konstant oder eher abnehmend und fallen meist unter den kritischen Druck, der für eine Bruchauslösung erforderlich ist. Die Gefahr Induzierter Seismizität ist wesentlich kleiner als in Fällen, in denen nur verpresst wird (Abfallflüssigkeiten, überkritisches CO₂). Die Überwachung kann in dieser Phase mit reduzierten seismischen Netzen erfolgen.

Besondere Aufmerksamkeit ist nötig, wenn die Produktion unterbrochen wird, oder wenn Produktionsparameter kurzfristig geändert werden. Generell können Änderungen seismische Reaktionen nach sich ziehen.

6. Gutachten und gutachterliche Begleitung

Seismologische Gutachten sind natürlich zu jeder Phase des Projekts möglich. Der Inhalt und Wert dieser Gutachten wird immer entscheidend von der verfügbaren Datenlage abhängen. Gutachten können demnach beim Anwachsen dieser Datenlage nachgebessert werden. Dies bedeutet, dass ein Projekt über die gesamte Laufzeit von einem Seismologen gutachterlich begleitet werden sollte. Diese Begleitung ist Bestandteil der Methode kontrollierten Betriebs (step-by-step).

7. Forschung

Weitere Forschung ist notwendig und unbedingt zu unterstützen. Insbesondere sind die Kenntnisse über die Beziehungen zwischen Betriebsparametern und Seismizität zu verbessern. Modellierungscodes für die komplexen Bedingungen sind zu erarbeiten, die auch die Fluid-Gesteins-Interaktion einschließen. Modellierung des statischen (strukturellen) Untergrunds und des materiellen (Fluid-) und immateriellen (Wärme-)Transports sind zu ergänzen durch die Simulation der Kinematik der Bewegung von Gesteinsvolumina einschließlich der daran gebundenen Trägheitskräfte.

8. Fazit

Geothermische Einrichtungen haben bis heute weltweit noch nie zu einem zerstörerischen Erdbeben geführt, das Gebäude strukturell zerstört oder Menschenleben gefährdet hätte. Es wurde insbesondere in Deutschland nur über kleinere Schäden berichtet und auch diese wurden in keinem Fall gerichtlich bestätigt.

Geothermische Projekte werden unter dem Berggesetz durchgeführt. Dies schreibt vor, dass Sorge getragen werden muss, dass weder Menschen noch die Verkehrsinfrastruktur gefährdet wird oder ein Gemeenschaden eintritt. Kleinere Gebäudeschäden sind zu entschädigen.

Dennoch hat die Geothermie durch die in Einzelfällen verspürte Seismizität ein erhebliches Akzeptanzproblem. Die natürliche Furcht vor ‚Erdbeben‘ ist tief verankert, sie gelten als (und sind) unvorhersagbar und unbeherrschbar.

Im Gegensatz dazu können geothermische Installationen in einer Art hergestellt und betrieben werden, dass auch kleinere seismische Ereignisse sehr unwahrscheinlich sind. Der gesamte Prozess (Errichtung und Betrieb) ist kontrollierbar. Es wird hierbei die Herangehensweise eines kontrollierten Betriebs (step-by-step) empfohlen, begleitet durch eine seismologische Überwachung.

Experten können feststellen, dass aufgrund ganz besonderer geologischer Bedingungen in bestimmten Gebieten das seismische Risiko nicht akzeptabel ist. Dies können Gegenden sein mit oberflächennahen Lockerablagerungen oder Gegenden mit intensiver natürlicher Seismizität und einer Geschichte von Erdbeben-Katastrophen. Geologische Projekte sollten in diesen (seltenen) Gebieten nicht vorgesehen werden.

9. Handlungsempfehlungen und Maßnahmen

Unter Zugrundelegung der vorstehenden Ausführungen hält der GtV – BV folgendes für erforderlich:

Um größere seismische Ereignisse zu vermeiden, sollte in Geothermieprojekten nach der „Methode des kontrollierten Betriebs“ vorgegangen werden („step-by-step“-Vorgehensweise). Dabei wird jede Maßnahme, die Einfluss auf die Seismizität haben könnte, so gestaltet, dass das Risiko nur langsam und kontrolliert anwächst und alle Ereignisse (statistisch) unterhalb der Schwelle der Fühlbarkeit bleiben.

Entscheidend dafür ist ein durchgehendes Monitoring durch seismische Online-Netze. Benötigt werden ein seismologisches Netz mit niedriger Detektionsschwelle und ein Immissionsnetz. Wesentlich ist dabei die Messung der maximalen Schwinggeschwindigkeiten². Diese Netze

² Die maximale Schwinggeschwindigkeit der Bodenbewegung (PGV) ist in Deutschland nach DIN 4150 das Kriterium der Schadensbeurteilung. Schwinggeschwindigkeiten unter 5 mm/s können demnach keine

sollten durch öffentliche Stellen oder von diesen beauftragten Dienstleistern betrieben werden; die Messergebnisse sind öffentlich zugänglich zu machen.

Basierend auf den gemessenen Werten muss ein Reaktionsplan erstellt werden, der ebenfalls öffentlich zugänglich ist.

Das Überwachungskonzept und der Reaktionsplan sollten einvernehmlich zwischen allen Beteiligten einschließlich Zulassungs- und Aufsichtsbehörde entwickelt werden.

Das Monitoring muss alle Phasen umfassen:

- Bohrung (auch wenn bislang noch keine induzierten Ereignisse bei geothermischen Tiefenbohrungen beobachtet wurden)
- Hydraulische Stimulation: die Phase mit dem höchsten Risiko. Hier muss ein Plan erstellt und eingehalten werden, nach dem die Drucke, Fließraten, Einpressvolumina und Einpresszeiten systematisch und kontrolliert erhöht werden, bis das Ergebnis erreicht wird.
- Produktion: das Risiko ist in dieser Phase äußerst gering, daher können die Überwachungsnetze reduziert werden. Besondere Aufmerksamkeit ist aber geboten, wenn die Produktion unterbrochen wird oder die Parameter geändert werden.

Jedes Projekt sollte über die gesamte Laufzeit von einem Seismologen gutachterlich begleitet werden.

Weitere Forschung ist notwendig, vor allem, um die Kenntnisse über die Beziehungen zwischen Betriebsparametern und Seismizität zu verbessern. Dabei ist der erreichte Stand der Wissenschaft zur Risikoeinschätzung und zur Risikoeingrenzung als Grundlage fortgesetzter Forschung darzustellen.

Die Projektträger sind aufgefordert, einen umfassenden und überzeugenden Versicherungsschutz nachzuweisen. Dabei ist durch hohe Versicherungssummen (z. B. 50 Mio. €) und Vorsorge gegen den Ausfall von Prämienzahlungen der Sorge unzureichender Ersatzleistungen im Schadensfall zu begegnen; vor allem für den Bereich nicht auszuschließender kleiner Schäden (z.B. Putzrisse) muss eine unbürokratische Schadensabwicklung (z.B. Einsetzung eines Ombudsmann, Kulanzzahlungen) gewährleistet sein.

Das Überwachungskonzept und der Versicherungsschutz sind aufeinander abzustimmen, um für die Bürger im möglichen Einwirkungsbereich eines Geothermieprojekts sowohl vorlaufende Beweissicherungen als auch im Schadensfall hinreichende Beweiserleichterungen zu gewährleisten.

Schäden verursachen. Strukturelle Schäden an Gebäuden sind erst ab 70 mm/s zu erwarten. Höherfrequente Schwingungsanteile sind weniger schädlich.

Die Erweiterung der Beteiligungsrechte der Bürger in den Betriebsplanzulassungsverfahren ist zu prüfen. Hierzu reichen die vorhandenen bergrechtlichen Vorschriften aus. Die jüngst geforderte Einführung der Planfeststellungspflicht für Geothermieprojekte ist überzogen.

Die Kommunikation zwischen den Beteiligten, also insbesondere den Bürgern, Projektträgern, Wissenschaftlern und Zulassungsbehörden in Sachen induzierte Seismizität ist zu verbessern. Es muss anhand der erreichten wissenschaftlichen Erkenntnisse verdeutlicht werden, dass Erdbeben nicht gleich Erdbeben ist. Mikroseismische Ereignisse, wie sie beispielsweise im Rahmen des Forschungsprojekts in Soultz-sous-Forêts etwa 50 mal pro Monat auftreten, können nicht mit Schadensbeben gleichgesetzt werden, die die Gesundheit von Menschen schädigen oder deren Eigentum substantiell beeinträchtigen.

Der GtV-BV wird seine aktive Öffentlichkeitsarbeit fortentwickeln. Hierzu zählt insbesondere der Aufbau einer Internet-Plattform (www.geothermie-dialog.de) und das Angebot von Vorort-Veranstaltungen. Die Informationsvermittlung muss sachgerecht auf Basis eines breiten Wissens- und Meinungsspektrums erfolgen, damit sie sich nicht dem Vorwurf der Beschönigung ausgesetzt sehen kann.

Die angesprochenen Beteiligten sind eingeladen, die vorstehenden Vorschläge sowie die vorgestellten Positionen zum Thema „Induzierte Seismizität“ mit dem GtV - BV zu erörtern.

Berlin, 7. Juli 2010

Annex

1. Begriffsbestimmungen

1.1 Magnituden

Magnituden beschreiben die Stärke oder den Energieumsatz von Erdbeben oder kleineren seismischen Ereignissen. Sie basieren auf gemessenen Amplituden der Bodenbewegung. Die Magnitude ist ein logarithmisches Maß, weshalb ein seismisches Ereignis der Magnitude 4 etwa 30 mal so viel Energie umsetzt wie ein Ereignis der Magnitude 3. Lokale Ereignisse in Entfernungen unter ca. 1000 km werden meist durch die Lokalmagnitude M_L nach Richter beschrieben (so gen. Richter-Skala). Neuerdings wird diese immer mehr durch die Momentenmagnitude M_W ersetzt, ein mehr physikalisches Maß, das den Erdbebenherd besser beschreibt. Momentenmagnituden können sich von Lokalmagnituden etwas unterscheiden und sind oft bis zu 0,5 größer, abhängig von der lokalen Geologie.

1.2 Intensität

Die Intensität ist eine Skala, die sich aus den Beobachtungen der Betroffenen und aus den aufgetretenen Schäden an Gebäuden (und der Landschaft) definiert. Intensitäten sind für Beben der vorinstrumentellen Zeit besonders wichtig, für die es keine Magnitudenangaben gibt. Es gibt keine feste Beziehung zwischen Magnituden und Intensitäten, derartige Beziehungen können aber für bestimmte Gegenden und Gruppen von Ereignissen abgeleitet werden. Eine bessere Beziehung besteht zwischen der Intensität und der Maximalen Schwinggeschwindigkeit (GV) der Bodenbewegung.

Zur Ermittlung von Intensitäten und zur Erstellung von Intensitätskarten stehen heute Internetplattformen zur Verfügung, auf denen etwaige Erfahrungswerte eingegeben werden können.

1.3 Schadensbeurteilung

Schadensbeurteilung ist ein Thema der jeweiligen nationalen Gesetzgebung und Normung. In Deutschland ist die maximale Schwinggeschwindigkeit der Bodenbewegung (PGV) das Kriterium wie in DIN 4150³ festgelegt. Generell gilt, dass Schwinggeschwindigkeiten unter 5 mm/s keinerlei Schäden verursachen können. Echte (Tragwerks-) Schäden an Gebäuden sind erst ab 70 mm/s zu erwarten. Die DIN 4150 berücksichtigt darüber hinaus, dass höherfrequente Schwingungsanteile weniger schädlich für Gebäude sind.

³ DIN 4150, Februar 1999. Erschütterungen im Bauwesen - Teil 3: Einwirkungen auf bauliche Anlage

Manchmal sind induzierte Ereignisse durch ein donnerartiges Geräusch begleitet. Grund hierfür ist der hochfrequente Anteil an den Bodenbewegungen, was wiederum bedeutet, dass diese Ereignisse weniger schädlich sind als lautlose Ereignisse derselben Magnitude.

Aus empirischen Beziehungen können Karten für die maximalen Schwingungsgeschwindigkeiten erstellt werden, wie sie für ein bestimmtes Ereignis in einer bestimmten Region erwartet werden. Voraussetzung ist ein gutes Modell des Untergrundes, speziell der obersten Schichten und Daten über ihre Dämpfung seismischer Wellen. Derartige Berechnungen geben nur eine erste Vorstellung der auftretenden Schwingungsgeschwindigkeiten, sie müssen durch Messungen validiert und kalibriert werden. Direkte Messungen der Schwingungsgeschwindigkeiten mindern auch Probleme bei der Berechnung der Magnituden lokaler Ereignisse mit Magnituden kleiner 4, die auch bestehen, wenn Magnituden durch seismische Momente ersetzt werden. Direkte Messungen sind in jedem Fall die bessere Wahl bei der Schadensabschätzung.

Für die internationale Problembehandlung wären internationale Standards der Schadensabschätzung oder zumindest eine gewisse Harmonisierung vorteilhaft.

Die maximale Bodenbeschleunigung (PGA), die in der Seismologie für Großbeben genutzt wird, ist für hochfrequente Ereignisse nicht angemessen und entspricht auch nicht den deutschen Normen.

2. Methodenbeschreibung

2.1 Die deterministische Methode

Bei der deterministischen Methode wird versucht, mögliche Ereignisse am Computer zu simulieren oder zu modellieren. Wie bei allen Simulationen wird hierzu ein ausreichendes Modell der Untergrundparameter (Geometrie, Petrophysik, Spannungsfeld) benötigt und zusätzlich ein ausreichend brauchbarer Code (Software), um in diesem Modell Brüche zu generieren. Es wird für jede einzelne Lokation schwierig sein, ein ausreichendes statisches (strukturelles) Modell zu entwickeln. Sogar die Ergebnisse der heute üblichen 3D-Seismik werden hier oft nicht ausreichend detailliert sein. Generell sind auch Informationen über petrophysikalische Größen und über das Spannungsfeld schwer erhältlich. Wichtig ist insbesondere die Größe, Form und Richtung vorhandener Klüfte in Relation zu den Komponenten des Spannungsfeldes.

Die verfügbaren Codes zur Simulation von Brüchen sind ebenfalls begrenzt. Die Berechnungen müssen durch Messungen validiert und kalibriert werden. Sie können kaum genutzt werden, wenn derartige Messungen (noch) nicht vorliegen. Wenn der Einfluss der Messungen bei diesem Prozess auf die Endergebnisse dominant wird, verliert die Methode ihren deterministischen Charakter.

Nach unserer Auffassung ist die deterministische Methode alleine heute noch nicht in der Lage Maximalmagnituden oder Wiederkehrzeiten abzuschätzen. Sie ist aber sehr hilfreich um Sensi-

bilitätsanalysen durchzuführen und so aufzuzeigen, welche Einflussgrößen Maximalmagnituden und Raten vorrangig bestimmen. Hier ist weitere Forschung nötig.

For größere Ereignisse und insbesondere zur Beantwortung der Frage nach der Triggerbarkeit natürlicher Ereignisse in einer bestimmten Gegend steht hingegen nur die deterministische Methode zur Verfügung. Auch hier bedarf es weiterer Forschung.

2.2 Die probabilistische (statistische) Methode

Die probabilistische oder statistische Methode geht allein von einer Auswertung gemessener Ereignisse aus, ohne die geologische Situation zu berücksichtigen und ohne physikalische oder felsmechanische Gesetze zu unterlegen. Zentral ist hier die Gutenberg-Richter Beziehung, die die Häufigkeit in Abhängigkeit von der Magnitude zeigt. Auch andere statistische Methoden stehen heute zur Verfügung. Die probabilistische Methode benötigt eine ausreichende Datenbasis und somit eine längere Beobachtungszeit mit ausreichend niedrigen Detektionsschwellen, um eine große Anzahl kleiner Ereignisse aufzuzeichnen. Es muss darüber hinaus sicher gestellt werden, dass alle Ereignisse demselben Cluster zuzuordnen sind, in dem auch zukünftige Ereignisse zu erwarten sind.

2.3 Die rein empirische Methode

Einige Wissenschaftler haben Beziehungen zwischen bestimmten Reservoirparametern und der Maximalmagnitude hergestellt. Der dabei benutzte Reservoirparameter ist meist die Reservoirgröße. Einige Autoren geben diese als lineare Größe (Durchmesser des Reservoirs) an, andere als Fläche oder als Volumen. In jedem Fall wird eine lineare Beziehung zwischen der Reservoirgröße und der Maximalmagnitude angegeben.

Der physikalische Hintergrund dieser Beziehung wurde nicht erarbeitet (daher empirisch), es bleibt bei der generellen Erkenntnis, dass ein großes seismisches Ereignis ‚Platz‘ braucht, damit sich eine ausreichend große Bruchfläche entwickeln kann mit einem ausreichenden seismischen Moment.

Selbst die Bestimmung der Reservoirgröße ist schwierig. Bei HDR Projekten kann sie durch die Lokation mikroseismischer Ereignisse definiert werden. Bei ‚offenen‘ hydraulischen Systemen kann sie durch die Verbreitung des injizierten Fluids, alternativ durch die Ausbreitung des Zusatzdrucks definiert werden. Beide Größen können jedoch nur grob abgeschätzt werden.