

Hintergrundpapier

Induzierte Seismizität bei Geothermieprojekten

1. Vorbemerkung

Das Hintergrundpapier wird inhaltlich vom GtV-Bundesverband Geothermie e. V. (BVG) verantwortet. Der Verband hat sich bei der Formulierung des vorliegenden Hintergrundpapiers von einer Gruppe international bekannter Experten beraten lassen. Da die Expertenmeinungen in einigen Punkten divergierten, stellt das Hintergrundpapier nicht immer die Meinung jedes der Experten dar, sondern eine Mehrheitsmeinung der Gruppe.

Zur Expertengruppe gehörten: Baisch (Deutschland), Baumgärtner (Deutschland), Bohnhoff (Deutschland), Bönnemann (Deutschland), Majer (USA), Wenzel (Deutschland), Gottlieb (Deutschland), Heidebach (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).

Das Hintergrundpapier wurde 2010 erstellt und 2023 überarbeitet. An der Überarbeitung beteiligt waren: Buchholz (Deutschland), Fritschen (Deutschland), Kremers (Deutschland), Rüter (Deutschland).

2. Hintergrund

Die internationale Erfahrung beim Betrieb von Geothermieprojekten hat gezeigt, dass diese induzierte Seismizität auslösen können. Das Auftreten dieser meist mikroseismischen Ereignisse (Magnitude $M < 3$) ist von einer Reihe von Parametern abhängig, die jeweils projektspezifisch zu betrachten sind. Während die Mehrheit der betriebenen Geothermieprojekte keine oder zumindest keine spürbare induzierte Seismizität aufweist, gibt es nur wenige Projekte, die teils stark spürbare Erschütterungen erzeugt haben. Diese waren der Hauptgrund dafür, dass die Akzeptanz der Geothermie in der Öffentlichkeit zurückgegangen ist. Es ist daher bei der Umsetzung von Geothermieprojekten unbedingt notwendig, sich ernsthaft mit dem Thema der induzierten Seismizität auseinanderzusetzen. Sowohl eine öffentliche Diskussion als auch weitere intensive Forschung sind nötig. Es sind Handlungsanweisungen und Richtlinien zu entwickeln, wie bei Installationen im Untergrund vorzugehen ist, und wie Geothermieprojekte zu betreiben sind¹. Ohne klare Regelungen, wie mit dem Auftreten von Seismizität umzugehen ist, können diese Akzeptanzprobleme geothermische Projekte wesentlich verzögern oder den Bau und den Betrieb von Anlagen beeinträchtigen oder gar verhindern.

¹ Siehe hierzu auch die Richtlinien des BVG: <https://www.geothermie.de/bibliothek/downloads.html>

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 Hintergrundpapier wendet sich an die Öffentlichkeit, also insbesondere an:

- Politiker
- Behörden
- Investoren
- Projektentwickler
- Medien
- Die allgemeine Öffentlichkeit

Dieses Hintergrundpapier ist keine wissenschaftliche Veröffentlichung im engeren Sinn und verzichtet bewusst auf Abbildungen, Formeln sowie Quellen- und Literaturangaben.

3. Natürliche Seismizität

Natürliche Seismizität ist Teil unserer natürlichen Umwelt. Sie ist eine Folge der Drift der Kontinente, genauer der Plattentektonik. Nur eine kleine Zahl zerstörerischer Beben erlangt öffentliche Aufmerksamkeit. Sie sind der Grund für die gut begründete allgemeine Angst vor Erdbeben. Mikroseismizität, also Erdbeben in einem Magnitudenbereich von $M = 0 - 3$, 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 der Grenzen der Kontinentalplatten.

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 Erde²
- Erdbebenkataloge der vorinstrumentellen Zeit incl. Paläoereignisse
- Kataloge aufgezeichneter Ereignisse
- Lokalisierung der Erdbebenherde
- Statistiken wie Gutenberg-Richter Beziehungen
- Herdflächenlösungen
- Schadensberichte und mikroseismische Studien
- Intensitätskarten
- Medienresonanz

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 sind in der jahrzehntelangen Erfahrung der Beobachtung von induzierter Seismizität keine Fälle bekannt, in

² Zu Fachbegriffen siehe: <https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie.html>

dem ein induziertes Ereignis größer war als die größten natürlichen Ereignisse in der betrachteten seismotektonischen Region.

In Gebieten ohne natürliche Seismizität existiert dieser ‚seismische Rahmen‘ 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.

4. Induzierte Seismizität

Alle größeren Eingriffe in den Untergrund haben einen Einfluss auf das lokale Spannungsfeld und haben somit das Potenzial, seismische Ereignisse auszulösen. Induzierte seismische Ereignisse wurden berichtet im Zusammenhang mit:

- Staudämmen
- Bergbau
- Verkehrstunneln
- Ausgrabungen
- Öl-/Gasproduktion
- Untergrundspeicher (Gas, Druckluft)
- Flüssigkeitsverpressungen
- Mineralwasserbrunnen
- Hydraulischer Stimulation von Öl-/Gaslagerstätten
- Sonstige Eingriffe in den Untergrund

Das Auftreten induzierter Seismizität bei geothermischen Installationen hat überwiegend dieselbe physikalische Ursache 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, ausgelöst durch die dort anliegenden Scherspannungen. Eine wesentliche Rolle spielt dabei die geometrische Ausrichtung der Störung im lokalen Spannungsfeld und die Vorspannung dieser Störungszonen.

Beim Betrieb geothermischer Anlagen können darüber hinaus temperaturbedingte Volumenänderungen, chemische Alterationen oder andere thermo-mechanische Effekte eine Rolle spielen. Auch diese können Normalspannungen oder Reibungskräfte reduzieren, sind aber meist auf kleine Gesteinsvolumen beschränkt.

Über seismische Effekte bei geothermischen Projekten wurde weltweit berichtet. Von Geothermieanlagen in Deutschland wurden nur kleinere Schäden gemeldet, die, wie in Landau, meist im Interesse der Betroffenen auf dem Kulanzwege reguliert wurden. In diesen Fällen konnte deshalb nicht abschließend (gerichtlich) für jeden Einzelschaden festgestellt werden, ob das Geothermieprojekt wirklich der Schadensverursacher war.

Eine Ausnahme ist das Erdbeben in Pohang, Südkorea vom 15.11.2017 mit der Magnitude 5,5, bei dem von einer Wissenschaftlergruppe angenommen wird, dass es durch eine Fluidinjektion getriggert wurde. Man spricht dann von einem getriggerten Ereignis, wenn die aktivierte Störungsfläche viel größer ist als das Volumen in dem sich das Fluid ausgebreitet hat oder zumindest teilweise außerhalb des Injektionsbereichs liegt. In einem solchen Fall ist die Fluidinduktion nicht die Ursache des Bebens, sondern ist der Auslöser und man nimmt an, dass dieses Beben auch ohne die Fluidinjektion irgendwann aufgetreten wäre.

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. Sie ist nicht Gegenstand dieses Hintergrundpapiers.

5. Rechtlicher Hintergrund

In Deutschland wird die Nutzung geothermischer Energie durch das Bundesberggesetz (BBergG) 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 regulieren sind. Dieser bergrechtliche Grundsatz ist Folge der Notwendigkeit der Rohstoffsicherung, der sich heute auch auf das öffentliche Interesse am verstärkten Einsatz der Geothermie als erneuerbare Energie erstreckt. Geothermie wird politisch heute, wie andere Erneuerbare, als von ‚herausragendem öffentlichen Interesse‘ und als ‚sicherheitsrelevant‘ eingestuft.

5.1 Das Bergrecht, Bundesberggesetz (BBergG) - Betriebsplanverfahren

Das im Bundesberggesetz (BBergG) verankerte Betriebsplanverfahren ist ein im Bergbau angewandtes Verfahren zur Betriebsüberwachung. Nach dem Bundesberggesetz dürfen bergbauliche Aktivitäten wie Aufsuchen, Gewinnen und Aufbereiten von Bodenschätzen nur mit einem zugelassenen Betriebsplan durchgeführt werden. Für die Zulassung und Überwachung ist die Bergbehörde zuständig. Folgende Betriebspläne sieht das Gesetz vor:

- Rahmenbetriebsplan
- Hauptbetriebsplan
- Sonderbetriebsplan
- Abschlussbetriebsplan.

Alle Faktoren, die einen Einfluss auf das Auftreten von induzierter Seismizität haben könnten oder deren Überwachung und Regulierung dient, sind in Betriebsplänen zu regeln. Dies gilt z.B. für

- die Menge des umlaufenden Thermalwassers
- den Injektionsdruck
- die zu installierenden Monitoringnetze (Seismologisches Messnetz, Immissionsmessnetz)
- das Rektionsschema (Ampelsteuerung)
- die Vorgehensweisen im Schadensfall (Bergschadensvermutung, Versicherung, Ausfallkasse)

Betriebspläne haben immer nur eine Laufzeit von einigen Jahren und sind dann ev. geänderten Gegebenheiten anzupassen.

5.2 Einwirkungsbereich

Nach dem Bundesberggesetz und der Einwirkungsbereichsverordnung hat die Bergbehörde nach dem Auftreten einer signifikanten Bodenerschütterung einen 'Einwirkungsbereich' festzulegen, in dem die Bergschadensvermutung und somit die Beweislastumkehr gilt. Der Einwirkungsbereich ist gemäß dem derzeit (2023) gültigen Leitfaden der Länder-Bergbehörden festzulegen, entlang der Linie innerhalb der Bodenschwinggeschwindigkeiten $> 5 \text{ mm/s}$ aufgetreten sein können.

Hierzu sollte bevorzugt auf Messwerte eines Immissionsnetzes zurückgegriffen werden. Sind ausreichende Messwerte nicht verfügbar, kann auch auf Modellierungen und/oder Aussagen der Bevölkerung zurückgegriffen werden (Makroseismik). Hier gilt dann die Grenzlinie zwischen den Intensitäten IV und V als Begrenzung des Einwirkungsbereichs. Nennenswerte, auch nur kosmetische, Schäden sind allerdings erst ab der Intensität VI zu erwarten.

Der ermittelte Einwirkungsbereich muss nicht notwendigerweise eine zusammenhängende Fläche sein, sondern kann durchaus aus mehreren 'Inseln' bestehen. Diese wären dann jeweils durch ein Perimeter zu beschreiben.

Genauer regeln die Einwirkungsbereichsbergverordnung (EinwirkungsBergV) und ein Leitfaden der Bundesanstalt für Geologie und Rohstoffe (BGR) zusammen mit den Bundesländern. Dieser Leitfaden gilt für die Festlegung eines Einwirkungsbereichs „nach Auftritt einer Erschütterung“ (EinwirkungsBergV §3, Abs. 4). Der vorliegende Leitfaden unterstützt die Bergbehörden der Länder bei der Erstellung der Vollzugshilfe zur Umsetzung der Anforderungen der EinwirkungsBergV. Er enthält weiterhin detaillierte Ausführungen für die praktische Umsetzung bei der Festlegung des Einwirkungsbereichs. Der Einwirkungsbereich ist „auf Grund von Ergebnissen seismologischer Messungen und sonstiger Daten, der makroseismischen Intensität und festgestellten Bodenschwinggeschwindigkeit [...] festzulegen“ (EinwirkungsBergV §3, Abs. 4). Es wird davon ausgegangen, dass die Erschütterung durch einen Bergbaubetrieb verursacht wurde und nicht „durch natürlich bedingte geologische ...Gegebenheiten“ (BBergG §120). Der seismologische Fachbegriff hierfür ist „bergbau-induziertes seismisches Ereignis“ oder „bergbau-induziertes Erdbeben“. Im Leitfaden wird in diesem Sinne der Begriff „seismisches Ereignis“ benutzt. Der Leitfaden soll eine bundesweit einheitliche Behandlung für die Festlegung der Grenze des Einwirkungsbereichs sicherstellen.

5.3 Mikrozonierung

Gegenstand von seismischen Mikrozonierungen ist die Kartierung der variierenden Erdbebeneinwirkung aufgrund von räumlichen Unterschieden in den geologischen und topografischen Verhältnissen des Untergrunds (Bebenverstärkung/-schwächung durch Standorteffekte). Unterschiede in den genannten lokalen Untergrundverhältnissen, insbesondere bei dem Verlauf der Scherwellengeschwindigkeiten mit der Tiefe, beeinflussen die Dauer, den Frequenzgehalt und die Stärke der Erdbebeneinwirkung (Verstärkung oder Dämpfung der Erschütterung). Standorteffekte können innerhalb kurzer Distanzen zu teilweise gravierenden Unterschieden bei den von einem Erdbeben verursachten Schäden führen.

Ziel der seismischen Mikrozonierung ist daher die räumliche Bestimmung der Verstärkung/Abschwächung (z. B. der Bodenbeschleunigung, Schwinggeschwindigkeit) durch den lokalen Untergrund und ggf. durch die Geometrie des Felsuntergrunds (2D und 3D Effekte in Tälern und Bergrücken). Der durch Mikrozonierung entstehenden Unsicherheit bei der Beurteilung der Möglichkeit einer Erschütterung, Schäden verursacht zu haben, kann am besten durch ein ausreichend dichtes Immissionsmessnetz begegnet werden.

5.4 Bergschadensvermutung

Das Bergrecht kennt den Begriff der Bergschadensvermutung, der besagt, dass innerhalb des Einwirkungsbereichs beim Auftreten relevanter Schäden, davon ausgegangen wird, dass der Bergbaubetreiber (hier der Betreiber des Geothermieprojektes) den Schaden verursacht hat und dementsprechend auch regeln (reparieren oder entschädigen) muss. Ist der Betreiber der Ansicht, nicht der Verursacher zu sein, muss er dies nachweisen (Beweislastumkehr). Im Zusammenspiel von Messüberwachung und Ampelsteuerung kann er dies in der Regel nur, indem er nachweist, die Anhaltswerte der DIN 4150 - Teil 3 nicht überschritten zu haben oder in dem eine natürliche Ursache des seismischen Ereignisses ermittelt wird.

5.5 Bergschadensausfallkasse (BSAK)

Von einem nachgewiesenen Erschütterungsereignis betroffene Bürger haben einen Anspruch auf Ersatz des Schadens gegen den verursachenden Bergbauunternehmer (§ 115 BbergG), den Inhaber der dem Bergbaubetrieb zugrunde liegenden Bergbauberechtigung (§ 116 BbergG) oder deren Rechtsnachfolger.

Sofern der Geschädigte von keinem der Ersatzpflichtigen Ersatz erlangen kann, weil alle Ersatzpflichtigen ausfallen - d.h. nicht mehr vorhanden oder insolvent sind - kann er für einen nachgewiesenen Bergschaden von der Bergschadensausfallkasse (BSAK) Ersatz erlangen. Die BSAK wurde 1987 von Bergbauunternehmen, deren Betriebe mit ihrer Tätigkeit unter das Bergschadensrecht fallen, als eigetragener Verein gegründet. Damit konnte auf die Errichtung einer öffentlich-rechtlichen Ausfallkasse in Form einer rechtsfähigen Anstalt des öffentlichen Rechts beim Bundeswirtschaftsministerium verzichtet werden (§§122 und 123 BbergG).

Die BSAK hat über 60 Mitglieder (Unternehmen) aus 9 Unternehmensgruppen wovon eine Gruppe die Unternehmen zur Aufsuchung und/oder Gewinnung von Erdwärme i.S.d. §3 Abs.3, Satz 2, Ziffer 2, Buchstabe b, BbergG ist. Die BSAK musste seit ihrer Gründung 1987 in keinem Fall in eine Haftung für einen Bergschaden eintreten und daher auch keine Leistung erbringen. Die Geschäftsarbeiten werden von der Vereinigung Rohstoffe und Bergbau e.V. (VRB)³ wahrgenommen.

6. 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-, Test- und gegebenenfalls Stimulationsphase erlauben die Anwendung

³ Vereinigung Rohstoffe und Bergbau e. V., Am Schillertheater 4, 10625 Berlin, Telefon: +49 30 31 51 82 – 0, Fax: +49 30 31 51 82 – 35, E-Mail: info@v-r-b.de

statistischer Methoden. Grundsätzlich stehen 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

Die drei erst genannten Methoden sind im Annex kurz beschrieben. Nachfolgend wird die Methode des kontrollierten Betriebs 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‘ nennen. Hierbei werden alle betrieblichen Maßnahmen, die Einfluss auf die Seismizität haben könnten, so gestaltet, dass das seismische Risiko höchstens langsam und kontrolliert anwächst und die Ereignisse (statistisch) möglichst 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 Tests
- Überwachung der Stimulationen
- Überwachung der Produktion

7. Monitoring und Reaktionsplan⁴

Entscheidend bei der Durchführung der Methode eines kontrollierten Betriebs ist das Monitoring der induzierten Seismizität. Dies geschieht durch ein seismologisches Echtzeit-Monitoring. Grundsätzlich sind zwei Messnetze mit unterschiedlicher Aufgabenstellung nötig, die technisch jedoch auch zu einem Messnetz zusammengefasst werden können, wenn dabei sowohl die Aufgaben eines Seismologischen Messnetzes als auch die eines Immissionsmessnetzes erfüllt werden:

Bei einem Seismologischen Messnetz sind eine gute Überdeckungsgeometrie zur Ereignisortung und eine niedrige Detektionsschwelle zur Erfassung kleiner Ereignisse wesentlich. So kann eine ausreichende

⁴ Siehe hierzu Richtlinien des BVG: <https://www.geothermie.de/bibliothek/downloads.html>

Datenbasis für statistische Auswertungen geliefert werden. Ein Teil der Messstationen kann in Bohrlöchern installiert werden. Es gibt hierfür keine verbindlichen Vorschriften, zu beachten ist jedoch die Richtlinie BVG 1101 - Teil 1.

Immissionsmessnetze müssen den nationalen Standards entsprechen, die die Messgeräte, deren Aufstellung und die Auswertung verbindlich vorschreiben. Wesentlich ist in Deutschland die DIN-gerechte Aufzeichnung (DIN 4150) der maximalen Schwinggeschwindigkeiten (PGV). Zur Vermeidung der durch Mikrozonierung bedingten Unsicherheiten sollte das Immissionsnetz ausreichend dicht sein, also über eine ausreichend große Stationszahl verfügen.

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

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

Das Überwachungskonzept und der Reaktionsplan sollten einvernehmlich zwischen allen Beteiligten einschließlich der Wissenschaft und der Zulassungs- und Aufsichtsbehörde (Betriebsplanverfahren) entwickelt und festgeschrieben werden. Ein transparenter Umgang mit der Überwachung und den ermittelten Daten, beispielsweise über eine Projekt-Internetseite mit einer Echtzeit-Veröffentlichung der detektierten Seismizität, kann die Akzeptanz für das Projekt weiter erhöhen.

8. Bohren

Bisher wurden bei geothermischen Tiefbohrungen in Deutschland keine induzierten Ereignisse durch Spannungsveränderungen im Umfeld des Bohrloches beobachtet. Es wird dennoch im Rahmen eines kontrollierten Betriebs vorgeschlagen, dass auch diese Projektphase seismologisch überwacht wird, schon um möglichst frühzeitig eine ausreichende seismologische Datenbasis (auch der natürlichen Seismizität) zu erhalten.

9. Hydraulische Stimulation, Tests

Die hydraulische Stimulation ist, falls vorgesehen, meist die Projektphase mit dem höchsten Risiko induzierter Seismizität. Stimulationen müssen ihrer Natur nach mit seismischen Ereignissen einhergehen. 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, für die Stimulation speziell erstellter 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.

Auch in den Bohrungen durchgeführte hydraulische Tests z.B. zur Bestimmung der Produktivität gehen mit einer Druckbeaufschlagung einher. Auch sie müssen zwingend seismologisch begleitet werden.

10. Produktion

Nachdem die Produktion in eine stationäre Phase eingetreten ist und sich entnommene und reinjizierte Flüssigkeitsmengen die Waage halten (Thermalwasser-Zirkulation), sind Injektionsdrucke konstant oder eher abnehmend und fallen meist unter den kritischen Druck, der für eine Bruchauslösung erforderlich ist. Die Gefahr induzierter Seismizität ist dabei wesentlich kleiner als in Fällen, in denen nur verpresst oder entnommen wird (Abfallflüssigkeiten, überkritisches CO₂, Förderung von Erdgas. Dennoch ist die Anlage in der gesamten Lebenszeit von oft mehreren Jahrzehnten seismologisch zu überwachen.

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

11. 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. Die Basisgutachten sollten jährlich fortgeschrieben werden. Diese Begleitung ist Bestandteil der Methode des kontrollierten Betriebs.

12. 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.

13. Fazit

Als Fazit sind folgende Punkte hervorzuheben:

- Geothermische Einrichtungen haben bis heute in Deutschland noch nie zu einem zerstörerischen Erbeben geführt, das Gebäude strukturell zerstört oder Menschenleben gefährdet hätte. Es wurde insbesondere allenfalls über kleinere Schäden berichtet und auch diese wurden bisher in keinem Fall, bezüglich ihrer Ursache, 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 Gemeinschaften eintritt. Kleinere Gebäudeschäden sind zu regulieren.
- Die Geothermie hat durch die in Einzelfällen verspürte Seismizität ein erhebliches Akzeptanzproblem. Die natürliche Furcht vor ‚Erdbeben‘ ist tief verankert, natürliche Erdbeben 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 empfohlen, begleitet durch eine seismologische Überwachung.
- Experten können feststellen, dass aufgrund besonderer geologischer Bedingungen in bestimmten Gebieten das seismische Risiko nicht akzeptabel ist. Dies können mit intensiver natürlicher Seismizität und einer Geschichte von Erdbeben-Katastrophen. Geothermische Projekte sollten in diesen (seltenen) Gebieten nicht vorgesehen werden.

14. Handlungsempfehlungen und Maßnahmen

Unter Zugrundelegung der vorstehenden Ausführungen hält der BVG Folgendes für erforderlich:

1. Um größere seismische Ereignisse zu vermeiden, sollte in Geothermieprojekten nach der „Methode des kontrollierten Betriebs“ vorgegangen werden. Dabei wird jede Maßnahme, die Einfluss auf die Möglichkeit des Auftretens induzierter Seismizität haben könnte, so gestaltet, dass das Risiko nur langsam und kontrolliert anwächst und alle Ereignisse (statistisch) möglichst unterhalb der Schwelle der Fühlbarkeit bleiben. Entscheidend dafür ist ein durchgehendes seismologisches Echtzeit-Monitoring. Benötigt werden ein Seismologisches Messnetz mit niedriger Detektionsschwelle und ein Immissionsmessnetz. Wesentlich ist dabei die Messung der maximalen Schwingungsgeschwindigkeiten. Die maximale Schwingungsgeschwindigkeit der Bodenbewegung (PGV) ist in Deutschland nach DIN 4150 das Kriterium der Schadensbeurteilung. Schwingungsgeschwindigkeiten unter 5 mm/s können demnach keine Schäden an Wohngebäuden verursachen.
2. Die Messnetze sollten durch öffentliche Stellen oder von diesen beauftragten Dienstleistern betrieben oder kontrolliert werden; die Messergebnisse sind öffentlich zugänglich zu machen.
3. Basierend auf den gemessenen Werten muss ein Reaktionsplan (Ampelsteuerung) erstellt werden, der ebenfalls öffentlich zugänglich ist.
4. Das Überwachungskonzept und der Reaktionsplan sollten einvernehmlich zwischen allen Beteiligten einschließlich Wissenschaft sowie Zulassungs- und Aufsichtsbehörde entwickelt werden.

Das Monitoring muss alle Projektphasen 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.
- Hydraulische Tests

- Produktion: Besondere Aufmerksamkeit ist 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 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 Ombudsmanns, Kulanzzahlungen) gewährleistet sein. Das Bergrecht regelt die Vorgehensweise sehr im Interesse der Betroffenen. Stichworte sind hier:

- Einwirkungsbereich
- Bergschadensvermutung
- Beweislastumkehr
- Bergschadensausfallkasse

Das Überwachungskonzept und der Versicherungsschutz sind aufeinander abzustimmen, um für die Bürger im möglichen Einwirkungsbereich eines induzierten seismischen Ereignisses verursacht durch ein Geothermieprojekt sowohl vorlaufende Beweissicherungen als auch im Schadensfall hinreichende Beweiserleichterungen zu gewährleisten.

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 und deutlich unterhalb der Spürbarkeitsgrenze liegen, können nicht mit Schadensbeben gleichgesetzt werden.

Der BVG wird seine aktive Öffentlichkeitsarbeit fortentwickeln. Hierzu zählt insbesondere

- Hintergrundpapiere
- Richtlinien
- Allgemeine Informationen auf der Seite www.geothermie.de

Die Informationsvermittlung muss sachgerecht auf Basis eines breiten Wissens- und Meinungsspektrums erfolgen, damit sie sich nicht dem Vorwurf der Beschönigung ausgesetzt sehen kann. Dies kann z.B. durch den Verweis auf aktuelle, peer-reviewte Publikationen und Forschungsprojekte (z.B. MAGS, SEIGER) erfolgen.

Annex

Begriffsbestimmungen⁵

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 (sogen. Richter-Skala). Neuerdings wird diese immer häufiger durch die Momentenmagnitude M_w ersetzt, ein mehr physikalisches Maß, das den Energieumsatz im Erdbebenherd besser beschreibt. Momentenmagnituden können sich von Lokalmagnituden etwas unterscheiden und sind oft bis zu 0,5 größer, abhängig von der lokalen Geologie.

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 den maximalen Intensitäten, derartige Beziehungen können aber für bestimmte Gegenden und Gruppen von Ereignissen abgeleitet werden. Eine bessere Beziehung besteht zwischen der maximalen Intensität und der maximalen Schwinggeschwindigkeit (PGV) der Bodenbewegung. Zur Ermittlung von Intensitäten und zur Erstellung von Intensitätskarten stehen heute Internetplattformen (z.B. der Erdbebendienst der Länder) zur Verfügung, auf denen etwaige Erfahrungswerte eingegeben werden können.

Schadensbeurteilung anhand der Schwinggeschwindigkeiten

Schadensbeurteilung ist ein Thema der jeweiligen nationalen Gesetzgebung und Normung. In Deutschland ist die maximale Schwinggeschwindigkeit der Bodenbewegung (*peak ground velocity*, PGV) das Kriterium, wie in DIN 4150 - Teil 3 festgelegt. Generell gilt, dass Schwinggeschwindigkeiten unter 5 mm/s keine Schäden an Wohngebäuden 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 (DIN 4150, 1999. Erschütterungen im Bauwesen - Teil 3: Einwirkungen auf bauliche Anlagen).

Manchmal sind induzierte Ereignisse durch ein donnerartiges Geräusch begleitet. Grund hierfür ist der hochfrequente Anteil an den Bodenbewegungen.,

Aus empirischen Beziehungen können bereits in der Planungsphase eines Projektes Karten für die räumliche Verteilung der maximalen Schwinggeschwindigkeiten erstellt werden, wie sie für ein bestimmtes Ereignis in

⁵ Zu Begriffsdefinitionen siehe grundsätzlich: <https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie.html>

einer bestimmten Region und einer bestimmten Herdtiefe erwartet werden. Voraussetzung ist ein gutes Modell des Untergrundes, speziell der obersten Schichten und Daten über die Dämpfung seismischer Wellen. Derartige Berechnungen können jedoch nur eine erste Vorstellung der auftretenden Schwinggeschwindigkeiten liefern, sie müssen später durch Messungen validiert und kalibriert werden. Darüberhinaus mindern direkte Messungen der Schwinggeschwindigkeiten 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 der aufgetretenen Schwinggeschwindigkeit im Zusammenhang mit einem seismischen Ereignis sind, im Vergleich zu Modellierungen, 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.

Methodenbeschreibung

Zur wissenschaftlichen Bearbeitung der seismischen Gefährdung sind mehrere Methoden üblich:

Die deterministische Methode

Bei der deterministischen Methode wird versucht, mögliche Ereignisse am Computer zu simulieren oder zu modellieren. Wie bei allen Simulationen wird hierzu eine ausreichende Kenntnis der Untergrundparameter (Geometrie, Petrophysik, Spannungsfeld) zur Erstellung eines Modells benötigt und zusätzlich ein ausreichend brauchbarer Code (Software), um in diesem Modell Brüche zu generieren. Es wird im Einzelfall 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 zudem insbesondere Kenntnis von 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 Sensibilitätsanalysen durchzuführen und so aufzuzeigen, welche Einflussgrößen Maximalmagnituden und Raten vorrangig bestimmen. Hier ist weitere Forschung nötig.

Für 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.

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 sichergestellt werden, dass alle Ereignisse demselben Cluster zuzuordnen sind, in dem auch zukünftige Ereignisse zu erwarten sind.

Gutenberg-Richter Beziehungen steilen sich zu höheren Magnituden hin auf, da immer nur endliche Magnituden möglich sind. Ist diese Aufsteilung gut definiert, kann sie ein Hinweis auf die maximal mögliche Magnitude an diesem Standort sein.

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 jeden 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.