



**BUNDESVERBAND
GEOTHERMIE**

BVG-RICHTLINIE SEISMIZITÄT BEI GEOTHERMIEPROJEKTEN

Teil 3:

Seismologisches Basisgutachten

BVG 1101 | Teil 3, 2023 (2025)

BVG-Richtlinie Seismizität bei Geothermieprojekten

Teil 3: Seismologisches Basisgutachten | BVG 1101 Teil 3, 2023, (2025)

Inhalt

1. Vorbemerkung	3
2. Zielsetzung und Abgrenzung	3
2.1 Verfügbare Datenbasis	4
3. Allgemeine Grundlagen, Aufgaben des Basisgutachtens	5
3.1 Bergrechtliche Anforderungen	5
3.2 Grundlagen zur Induzierten Seismizität	5
3.2.1 Induzierte Seismizität bei Geothermieranlagen	6
3.3 Erdbebenstärken, Magnituden, Intensitäten	7
3.4 Anforderungen der DIN 4150, Bodenschwinggeschwindigkeiten	8
4. Geologische und seismotektonische Gegebenheiten	9
4.1 Betrachtungsgebiet	9
4.2 Stratigraphie, Strukturgeologie und Tektonik	9
4.3 Hydrogeologie, hydraulische Parameter	10
4.4 Natürliche Seismizität	10
4.5 Lokales Spannungsfeld, Reaktivierungspotenziale	10
5. Vorgesehene operative Maßnahmen, betriebliche Situation	11
5.1 Verwendete Methoden	11
6. Abschätzung der Seismischen Gefährdung	11
6.1 Methodische Ansätze zur Gefährdungsbewertung	11
7. Minderung der Seismischen Gefährdung	12
7.1 Gutachterliche Begleitung, kontrollierter Betrieb, jährliche Fortschreibung des Gutachtens	13
7.2 Seismologisches Monitoring, Messnetze	13
7.2.1 Öffentliche und betriebliche Kataloge, Kommunikation	15
7.3 Reaktionsschema, Ampel, Bezug zu Betriebsparametern	15
7.4 Jährliche Fortschreibung des Basisgutachtens	15
8. Schadensbeurteilung und Schadensregulierung	16
9. Zusammenfassung	18
10. Literatur	18

1. Vorbemerkung

Diese Richtlinie liegt in der vollen Verantwortung des Bundesverbandes Geothermie e. V. Inhaltlich beruft sie sich in weiten Teilen auf Ergebnisse der FKPE- Arbeitsgruppe ›Induzierte Seismizität‹ (AGIS). Die Richtlinie 2025 berücksichtigt die Überarbeitungen des FKPE 2025. Die FKPE ›Milestones‹ sind unter <https://www.fkpe.org/arbeitsgruppen/induzierte-seismizitaet> zu finden. Gutachten, auch die zu seismologischen Risiken, liegen grundsätzlich in der vollen Verantwortung der Gutachter. Eine Richtlinie, wie diese, kann daher nur eine Anregung geben oder ein Vorschlag sein und aufzeigen, was sich die Fachwelt in einem derartigen Basisgutachten als Minimalinhalt wünscht. Regionale oder auch betriebliche Besonderheiten können eine wesentlich unterschiedliche Art von Basisgutachten erforderlichen machen.

Die nachfolgenden Empfehlungen sollen nur eine Orientierung geben, wie die seismische Gefährdung im Rahmen eines Basisgutachtens thematisiert werden kann. Die Richtlinie zum Aufbau und zur Ausführung der Gutachten stellt einen allgemeinen Rahmen dar, der sukzessive den Anforderungen der einzelnen Arbeitsfelder angepasst werden kann und letztlich zur Handlungssicherheit der Beteiligten bergrechtlich zugelassen werden muss.

Die Richtlinie lehnt sich an entsprechende Empfehlungen des Forschungskollegiums Physik des Erdkörpers (FKPE), AG Induzierte Seismizität an¹. Dort steht:

›Bundesweit haben sich in den vergangenen Jahren die Akzeptanz und das Sicherheitempfinden in Bezug auf den Betrieb geothermischer Anlagen stark verändert. Dabei spielt der Aspekt der seismischen Gefährdung eine zentrale Rolle.

Die Empfehlungen zum Aufbau und zur Ausführung der seismologischen Stellungnahmen stellen einen allgemeinen Rahmen dar, der sukzessive den Anforderungen der einzelnen Arbeitsfelder angepasst werden kann und den Beteiligten im bergrechtlichen Genehmigungsverfahren Handlungssicherheit bieten soll«.

2. Zielsetzung und Abgrenzung

Diese Richtlinie beschreibt allgemeine Inhalte und Richtlinien zur nachvollziehbaren Verwendung methodischer Ansätze, die der Beurteilung der seismischen Gefährdung bei Projekten der Tiefengeothermie dienen. Darüber hinaus kann es notwendig sein, das seismische Risiko zu quantifizieren, insbesondere dann, wenn Auswirkungen potenziell verursachter Seismizität im sachschadensrelevanten Bereich erwartet werden. Bei Unterschreitung der in DIN 4150-3 genannten Anhaltswerte kann davon ausgegangen werden, dass keine Sachschäden auftreten. DIN 4150-2 gibt darüber hinaus Hinweise, ab wann Erschütterungen spürbar sind.

Die Einschätzung, ob überhaupt eine seismische Gefährdung durch ein Projekt der Tiefengeothermie besteht und eine Aussage darüber, wie hoch diese ist, ist maßgeblich vom aktuellen Kenntnisstand des Untergrunds, den geplanten operativen Maßnahmen sowie der verwendeten methodischen Ansätze der Erdwärmegewinnung abhängig.

Im Gegensatz zur natürlichen, quasi-stationären Seismizität können die Prozesse, die induzierte Seismizität bedingen, wesentlich schneller ablaufen, wenn Randbedingungen geändert werden. Deshalb sind methodische Ansätze seismischer Gefährdungsanalysen aus dem Bereich der natürlichen Seismizität, etwa die

¹ FKPE Milestones

Interpretation der Magnituden-Häufigkeits-Verteilung, auf ihre Gültigkeit und Anwendbarkeit bei nicht-stationärem Verhalten zu überprüfen. Zur Abschätzung der seismischen Gefährdung vor Beginn einer Thermalwasser-Reinjektion kann von einer konstanten Seismizitätsrate ausgegangen werden. In der Betriebsphase können nicht-stationäre Prozesse auftreten, auf die ggf. durch gefährdungsmindernde Maßnahmen reagiert werden muss. Diese Prozesse können z. B. durch Veränderungen der Produktionsparameter bei Prozesssteuerung, Störfällen oder der Reaktion auf Störfälle, aber auch bei unerwarteten Reaktionen im Untergrund (rasche Druckänderungen) ausgelöst werden. Im langfristigen Betrieb werden Temperaturänderungen im Untergrund und damit verbundene thermoelastische Prozesse die Seismizitätsentwicklung wesentlicher beeinflussen.

Weiterhin können neue Erkenntnisse anhand zusätzlich gewonnener oder veränderter Messdaten eine Neueinschätzung der seismischen Gefährdung bedingen. In diesem Sinne kann eine Ermittlung der seismischen Gefährdung immer nur eine Aussage aufgrund des aktuellen Daten- und Wissensstands darstellen.

Eine Bewertung der seismischen Gefährdung sollte auf Grundlage lokal gewonnener Daten (z. B. 2D/3D-Seismik, Informationen über das Spannungsfeld, tektonische Randbedingungen, natürliche Seismizität, Beschleunigungs-Antwortspektren) erstmals zu Projektbeginn erfolgen. Da zu diesem Zeitpunkt in der Regel noch keine In-situ-Messdaten zur Verfügung stehen, sollte die Begutachtung mit wachsendem Daten-/Erkenntnisgewinn projektbegleitend aktualisiert werden (Projektbegleitung von Experten mit seismologischer Expertise, jährliche Fortschreibung). Eine Aktualisierung kann auch erforderlich sein, wenn die Planung zukünftiger operativer Maßnahmen geändert wird.

2.1 Verfügbare Datenbasis

Gutachten hängen nach Art, Inhalt und Ausführlichkeit immer von der zum Zeitpunkt der Gutachtenerstellung gegebenen Datenlage ab. Diese kann auch regional sehr unterschiedlich sein, da in manchen Regionen Vorabdaten aus anderen Bergbauzweigen (Erdöl/Erdgas, Kohle) zur Verfügung stehen, die mitbenutzt werden können und müssen. Hier wird auch auf das Geologiedatengesetz verwiesen, das diese Daten über die Geologischen Dienste der Bundesländer allgemein verfügbar macht. Vieles ist auch in wissenschaftlichen Veröffentlichungen oder Datenbanken verfügbar.

Weiterhin können neue Erkenntnisse anhand zusätzlich gewonnener oder veränderter Messdaten eine Neueinschätzung der seismischen Gefährdung bedingen. In diesem Sinne kann eine Ermittlung der seismischen Gefährdung immer nur eine Aussage aufgrund des jeweils aktuellen Daten- und Wissensstands darstellen.

Basisgutachten und Aktualisierungen (Fortschreibungen)

Eine Bewertung der seismischen Gefährdung sollte auf Grundlage lokal gewonnener Daten (z. B. 2D/3D-Seismik, Informationen über das Spannungsfeld, tektonische Randbedingungen, natürliche Seismizität, Beschleunigungs-Antwortspektren) erstmals zu Projektbeginn erfolgen (Basisgutachten). Da zu diesem Zeitpunkt in der Regel noch keine im Rahmen des Geothermieprojektes gewonnenen standortbezogenen Messdaten zur Verfügung stehen, sollte die Begutachtung mit wachsendem Daten-/Erkenntnisgewinn projektbegleitend aktualisiert werden (Projektbegleitung von Experten mit seismologischer Expertise, jährliche Fortschreibung des Gutachtens).

3. Allgemeine Grundlagen, Aufgaben des Basisgutachtens

Das Gutachten kann mit allgemeinen Grundlagen in die Thematik einführen. Hierzu könnte gehören:

- Aufführen allgemeiner Feststellungen zu anthropogenen Eingriffen, die grundsätzlich mit der Verursachung induzierter Seismizität zusammenhängen können: Erschließung, Stimulation und Betrieb tiefengeothermischer Anlagen.
- Darstellen der grundlegenden Mechanismen, die zu Spannungsveränderungen im Untergrund und spürbarer Seismizität führen können. Dies sind meist sowohl hydraulische als auch thermische Effekte.

3.1 Bergrechtliche Anforderungen

Geothermische Anlagen werden unter bergrechtlichen Bedingungen erstellt und betrieben. Das Bergrecht ist ein ›privilegierendes‹ Recht, da es im Grundsatz die Rohstoffversorgung in Sinne eines Allgemeinguts sicherstellen soll. Erdwärme ist ein ›Bergfreier Bodenschatz‹. Der Einzelne muss daher definierte und geringfügige Einschränkungen, auch Schädigungen, in Kauf nehmen. Andererseits genießt er einen besonderen Schutz, hier definiert durch Begriffe wie ›Bergschadensvermutung‹, ›Einwirkungsbereich‹ und ›Bergschadensausfallkasse‹. Der Geschädigte hat also im Grundsatz einen gesicherten Anspruch auf Regulierung oder Entschädigung, ohne dass er nachweisen muss, dass die Geothermieanlage der Schadensverursacher war (Beweislastumkehr).

Im Basisgutachten sind in jedem Fall eindeutige Angaben zu machen, zu den Fragen, ob die begutachtete Geothermieanlage so betrieben werden kann, dass im Sinne des BBergG §52 Abs. 1 Ziffern 5 und 9

- dem Schutz der Oberfläche im Interesse der persönlichen Sicherheit und des öffentlichen Verkehrs Sorge getragen ist, und
- gemeinschädliche Einwirkungen der Aufsuchung oder Gewinnung nicht zu erwarten sind.

Insbesondere ist zu beurteilen, ob

- die persönliche Sicherheit der Bevölkerung gewährleistet ist,
- die Sicherheit des öffentlichen Verkehrs gewährleistet ist,
- mit gemeinschädlichen Einwirkungen nicht zu rechnen ist.

Das BBergG bleibt allerdings eine genaue Definition des Begriffs ›gemeinschaftlich‹ schuldig.

Die genannten gravierenden Einwirkungen sind also mit Sicherheit zu verhindern. Kleinere Einwirkungen hingegen, auch Sachschäden, sind zulässig, aber unbürokratisch zu regulieren.

Details sind grundsätzlich in Betriebsplänen zwischen Betreiber und Bergbehörde schriftlich und rechtsverbindlich zu regeln.

3.2 Grundlagen zur Induzierten Seismizität

Es ist offensichtlich, dass alle größeren Eingriffe in den Untergrund das Spannungsfeld in der Erde 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
- Sonstigen Eingriffe in den Untergrund

Geothermie ist also nur eine der vielen Ursachen Induzierter Seismizität. Erkenntnisse, die im Zusammenhang mit anderen Ursachen gewonnen wurden, lassen sich oft auf die Geothermie übertragen.

3.2.1 Induzierte Seismizität bei Geothermieranlagen

Wie bei allen anderen Aktivitäten unter Tage besteht auch bei der Tiefengeothermie eine latente Gefahr der Auslösung von Induzierter Seismizität. Entscheidend ist es, in seismisch aktiven Gebieten zu betrachten, ob diese die Gesamtseismizität relevant ändert. Dieses kann nur abgeschätzt werden durch eine Analyse der natürlichen Seismizität der Region und durch eine Betrachtung, wie diese durch geothermische Installationen verändert werden könnte. Derartige Analysen setzen eine gute Datenlage voraus. Da Magnitudenverteilungen exponentiell abnehmend sind (Gutenberg-Richter-Beziehung), also kleine Ereignisse viel häufiger auftreten als große, kann eine ausreichende statistische Datenbasis nur erreicht werden, wenn kleine (nicht spürbare) Ereignisse in großer Zahl beobachtet werden. Aus den statistischen Gegebenheiten dieser kleinen Ereignisse wird dann auf das Auftreten großer Ereignisse (die ja immer nur in einer begrenzten Region in einer für statistische Betrachtungen nicht ausreichenden Zahl auftreten) extrapoliert. So lässt sich z. B. abschätzen, welche Maximalereignisse in einer Region denkbar sind und wie wahrscheinlich sie sind (Auftrittshäufigkeit, statistischer Zeitabstand zwischen dem Auftreten, *return period*).

Bei einer ausreichenden Ausstattung der Region mit Messgeräten sind derartige Untersuchungen auch für induzierte Ereignisse möglich. Hierbei müssen insbesondere sehr kleine Ereignisse beobachtet werden, um eine ausreichende Datenbasis zu erhalten. Wobei zwischen

- der Errichtungsphase (Bohrarbeiten, Test- und Stimulationsmaßnahmen in den Bohrungen) und
- der Betriebsphase (stationärer Betrieb und betriebsübliche Besonderheiten)

unterschieden werden muss.

Sowohl bei der Errichtung als auch bei dem Betrieb von Anlagen gibt es eine ganze Reihe von Parametern, die auf das Induzieren von Ereignissen Einfluss haben können. Dies sind beispielsweise:

- Einleitungsgeschwindigkeit, Einleitungsraten bzw. Einpressdruck und Temperatur des reinjizierten Thermalwassers
- Gesamt-Einleitungsmenge und Einleitungsdauer
- Chemische und physikalische Fluideigenschaften (Dichte und Viskosität)
- Einleitungsbereich (Bohrlochabschnitt)
- Lage und Ausmaß angeschlossener Horizonte bzw. Störungszonen
- Die zeitlichen Änderungen dieser Betriebsgrößen.

Die Vielzahl dieser Einflussfaktoren lässt erwarten, dass es gelingen kann, durch eine geeignete Wahl dieser Größen die Gefahr induzierter Seismizität besser zu beherrschen, genauer gesagt, die induzierten Ereignisse in einem Magnitudenbereich möglichst unterhalb der Fühlbarkeit und erst recht unterhalb der Schadensgrenze zu halten. Die Prognosen eines Basisgutachtens gehen meist von einer statistischen Aufarbeitung der bisher registrierten Ereignisse aus. Die Ergebnisse stellen daher eine Obergrenze dar, und ein Ausschöpfen der angesprochenen technischen Möglichkeiten kann die Gesamtsituation sicher weiter verbessern.

3.3 Erdbebenstärken, Magnituden, Intensitäten

Einige zentrale Begriffe der Seismologie sollen hier kurz erläutert werden. Auch in den Basisgutachten zur Seismizität wird es oft angebracht sein, zentrale Begriffe kurz zu erklären, da diese Gutachten auch von nicht-Fachleuten gelesen werden und man nicht immer unterstellen kann, dass sich die Leser zusätzlich informieren, z. B. im Lexikon der Geothermie (Homepage des Bundesverbandes Geothermie e. V.).

Seismizität

Unter Seismizität versteht man eine Beschreibung der Erdbebenaktivität in einer definierten Region. Seismizität definiert sich dabei durch eine Beschreibung der

- Häufigkeit von Erdbeben
- statistischen Verteilung der Bebenstärken (Magnituden)
- räumlichen Verteilung der Beben (Epizentren)
- Tiefenverteilung der Beben (Hypozentren)
- Herdmechanismen
- Makrobeobachtung einzelner stärkerer Ereignisse (Bebenintensität, Schadensbilder) und anderer relevanter Größen und Beobachtungen.
- Sonstiges.

Induzierte und getriggerte (anthropogene) Seismizität

Dies ist eine besondere Art von Seismizität, wobei menschliches Handeln die Seismizität beeinflusst. Im Engeren versteht man dabei unter ›induziert‹ solche Ereignisse, die in ihrem Auftreten und in ihrer Intensität durch die menschliche Einwirkung bestimmt sind und unter ›getriggert‹ natürliche Ereignisse, bei denen zwar der Zeitpunkt des Auftretens durch die menschliche Einwirkung bestimmt wurde, jedoch nicht deren Intensität. Unter Umständen kann damit, dass ein natürliches Ereignis zeitlich vorgezogen wird, das Spannungsfeld (zumindest geringfügig) umgestaltet werden. Neben dem zeitlichen Ablauf kann auch die statistische Verteilung der Ereignisstärken beeinflusst werden (beispielsweise viele kleine statt wenige große Ereignisse).

Eine genaue Unterscheidung zwischen induzierten und getriggerten Ereignissen (Diskriminierung) ist oft nur schwer möglich. Eine zunächst vorgenommene Definition, nach der man von induziert nur sprach, wenn die im Ereignis umgesetzte Energie vorwiegend aus der menschlichen Einwirkung bezogen wurde, hat sich als nicht brauchbar erwiesen. Heute differenzieren die meisten Autoren nach der räumlichen Zuordnung. Im Zusammenhang mit der Stimulation eines geothermischen Reservoirs macht es demnach trotzdem Sinn, zu unterscheiden zwischen induzierten Beben, deren Herde sich innerhalb des unmittelbar von der Wasserinjektion betroffenen Gesteinsvolumen befinden und dessen Herddimensionen die Ausdehnung dieses Volumens nicht überschreiten, und getriggerten Beben, deren Herde entweder außerhalb dieses Volumens liegen oder, falls sie darin liegen, deren Herdausdehnung wesentlich größer ist als dieses Volumen.

Da in seismologischen Gutachten Magnituden, insbesondere Lokalmagnituden M_L nach Richter und Momenten-Magnituden M_W eine besondere Rolle spielen, sollen diese kurz erläutert werden:

Magnitude

Die Magnitude ist ein Maß für die Stärke von Erdbeben am Erdbebenherd (Emissionsmaß). Magnituden werden überwiegend aus den Amplituden, seltener auch aus anderen Parametern von Seismogrammen bestimmt. Diese werden wiederum weltweit an Erdbebenmessstationen mit Seismographen aufgezeichnet. Im Gegensatz dazu wird die Intensität von Erdbeben – also ihre Auswirkungen auf Menschen, Gebäude und Landschaft – ohne Instrumente beobachtet.

Lokalmagnitude nach Richter (M_L)

Die älteste Magnitudenskala ist die so genannte Richterskala, die in den 1930er Jahren von Charles Francis Richter zur Quantifizierung kalifornischer Erdbeben entwickelt wurde. Richter hatte erkannt, dass ein Zusammenhang zwischen dem Maximalausschlag im Seismogramm und der Entfernung vom Epizentrum besteht. Dies gilt für seismische Wellen, deren Strahlwege größtenteils nur durch die Erdkruste verlaufen. Dadurch ist die Richterskala nur für den Gebrauch bis maximal 600 bis 1000 km Abstand vom Epizentrum anwendbar. Sie wird deshalb auch als Lokalmagnitude (M_L) bezeichnet. Lokalmagnituden sind für einen bestimmten Seismographen (Wood-Anderson) definiert. Werden andere Instrumente verwendet, sind entsprechende Korrekturen vorzunehmen.

Bei der Magnitudenbestimmung der Ereignisse geothermischer Anlagen sind die Epizentralentfernungen oft selbst für die übliche Bestimmung von M_L zu klein, so dass weitere Korrekturen nötig werden.

Momenten-Magnitude (M_W):

Die Momenten-Magnituden-Skala (M_W) ist eine weitere und modernere Methode zur Bestimmung von Erdbeben-Magnituden und wurde 1979 von den Wissenschaftlern Tom C. Hanks und Hiroo Kanamori als Alternative zur Richter-Skala entwickelt. Sie wird hier nur kurz eingeführt, da wir vorschlagen, dass sich Gutachten ausschließlich auf M_L beziehen. M_W beschreibt die Energiemenge, die bei einem Erdbeben freigesetzt wird, anhand des von K. Aki 1966 eingeführten seismischen Moments, das sich aus der Größe der Rissfläche im Untergrund, der mittleren Verschiebung der Gesteinsblöcke und der Gesteinsfestigkeit ergibt.

Die Momenten-Magnituden können sich von den Lokalmagnituden systematisch unterscheiden. Auch innerhalb einer Magnituden-Skala können systematische Unterschiede auftreten, wenn die Magnituden unterschiedlich bestimmt werden. In Basisgutachten muss daher nicht nur angegeben werden, welche Magnitudenskala verwendet wurde, sondern auch, wie die Magnitude ermittelt wurde.

Intensität

Die Intensität ist ein empirisches Maß für die Erschütterungsstärke an einem Einwirkungsort. Üblich ist heute die *European Macroseismic Scale* (EMS). Dabei werden die Intensitätsstufen I - V nach den Wahrnehmungen der Erschütterung, die Stufen VI - XII nach den aufgetretenen Schäden bestimmt. Da bei Geothermieanlagen die Erschütterungen am Einwirkungsort grundsätzlich im Immissionsnetz als PGV-Werte gemessen werden, haben Intensitätsangaben nur eine untergeordnete Bedeutung.

3.4 Anforderungen der DIN 4150, Bodenschwingungsgeschwindigkeiten

Für eine quantitative und gerichtlich verwertbare Beurteilung einer möglichen Schadenswirkung induzierter Ereignisse eignet sich in Deutschland ausschließlich die maximale Schwingungsgeschwindigkeit PGV (*peak ground velocity*) nach DIN 4150, Teil 3. Diese muss in der dort vorgeschriebenen Form gemessen und ausgewertet werden. Die DIN-Norm bezieht sich auf Erschütterungseinwirkungen in einem vorgegebenen Frequenzbereich, unabhängig von der Erschütterungsquelle. Sie ist daher für natürliche und induzierte Seismizität anwendbar, wenn die Erschütterungen im in der DIN angegebenen Frequenzbereich liegen.

Die Schwinggeschwindigkeit, also die Partikelgeschwindigkeit der Bodenbewegung, ist nicht zu verwechseln mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit seismischer Wellen. Viele Experimente haben gezeigt, dass die Schwinggeschwindigkeit die frequenzabhängige Empfindlichkeit von Gebäuden am besten berücksichtigt. Wenn auch die DIN 4150 hier umfanglich differenziert, so kann doch bei einer Mischbebauung davon ausgegangen werden, dass 5 mm/s am Gebäudefundament nicht überschritten werden sollten. Wird im Zuge der Beweissicherung nachgewiesen, dass dieser Wert nicht überschritten wurde, so ist gesichert, dass beobachtete Schäden auf andere Ursachen zurückzuführen sind (Bedeutung des Begriffes »Anhaltswert«). Bei einer deutlichen Überschreitung des Anhaltswertes von 5 mm/s drohen zunächst nur kleinste Bewegungen auf vorhandenen Rissen, dann eventuell das Auftreten einzelner neuer Putzrisse. Umfangreiche Untersuchungen beispielsweise bei der Erarbeitung der DIN-Norm haben gezeigt, dass signifikante Schäden, insbesondere Schäden an der tragenden Konstruktion eines Gebäudes, erst bei sehr viel höheren Schwinggeschwindigkeiten auftreten. Hier kann von Schwinggeschwindigkeiten in einem Bereich ab 50–70 mm/s ausgegangen werden. Werden die Anhaltswerte der DIN überschritten, sind grundsätzlich weitere Untersuchungen am betroffenen Objekt durch Sachverständige notwendig.

Während Teil 3 der DIN 4150 sich mit Einwirkungen auf bauliche Anlagen beschäftigt, regelt Teil 2 die Einwirkungen auf den Menschen. Eine mögliche Gefährdung von Menschen geht jedoch mehr indirekt von der Einwirkung auf bauliche Anlagen aus, beispielsweise durch das Herunterfallen loser oder baufälliger Gebäudebestandteile (Kamine, Ziegel), auch bei geringen Erschütterungseinwirkungen. Hier muss (auch in einer gutachterlichen Äußerung) unterstellt werden, dass die Bausubstanz in der Erdbebenzone 1 den Ansprüchen dieser Zone entspricht. Es ist davon auszugehen, dass bei Erschütterungseinwirkungen, die nach Teil 3 der Norm allenfalls zu Kleinstschäden wie Putzrissen führen können, das Herunterfallen von Bauteilen (und damit eine persönliche Gefährdung) nicht eintreten kann.

4. Geologische und seismotektonische Gegebenheiten

Geologische Daten und auch die seismotektonischen Gegebenheiten sind in der Regel vor Beginn der Errichtung einer Geothermieanlage mehr oder weniger bekannt. Sie sind daher ein wesentlicher Bestandteil eines Basisgutachtens, denn auf ihnen beruhen zusammen mit den operativen Planungen die Abschätzung einer seismologischen Gefährdung und die Formulierung der daraus abgeleiteten Maßnahmen zu deren Beherrschung.

4.1 Betrachtungsgebiet

Das Betrachtungsgebiet für seismologische Basisgutachten, die geologischen Gegebenheiten und seismologischen Einflüsse, ist in der Regel sowohl die gesamte seismotektonische Region als auch das nähere Umfeld um die Anlage, z. B. 30 km.

4.2 Stratigraphie, Strukturgeologie und Tektonik

Folgende Eigenschaften und Charakteristika des Untergrunds sollten in die Beschreibung des Projektgebiets eingehen. Dabei ist jeweils Bezug zu nehmen auf die methodische Verwendung dieser Daten:

- Natürliche Seismizität in der angesprochenen seismotektonischen Region, vorliegende Informationen zu historischer Seismizität und ggf. Paläoseismizität.

- Tektonik der umgebenden Region und Strukturgeologie der reservoornahen Gebiete (Spannungen, Klüftung, rheologische Eigenschaften, vorhandene tektonische Elemente wie Störungszonen).
- Hydraulische Parameter der Untergrundstrukturen und des Gebirges des reservoornahen Gebiets (z. B. hydraulische Durchlässigkeit, Porosität, hydraulische Eigenschaften der Störungen, ggf. separat für jeden Horizont), soweit verfügbar.
- Temperaturverteilung im Untergrund (3-dimensional)

4.3 Hydrogeologie, hydraulische Parameter

Entscheidende petrophysikalische und hydrogeologische Angaben bei allen Projekten der hydrothermalen Geothermie sind Angaben zur Porosität und Permeabilität der für die Produktion vorgesehenen Schichten. Dabei können, je nach Gesteinsart, auch statisch verteilte kleine oder diskrete größere Klüfte und Störungen eine entscheidende Rolle bei der Beurteilung der hydraulischen Gebirgseigenschaften spielen. Je nach Datenlage, insbesondere in Bezug auf Explorationsdaten, sind alle Angaben mit einer gewissen Unsicherheit behaftet, die im Gutachten berücksichtigt werden muss. Mit zunehmend besserer Datenlage können auch diese Angaben im Zuge der jährlichen Fortschreibungen des Gutachtens nachbearbeitet werden. Dies gilt insbesondere auch für Ergebnisse der hydraulischen Tests, zumindest für die der ersten Bohrung im Erlaubnisfeld.

4.4 Natürliche Seismizität

Die natürliche Seismizität ist mit der in der Seismologie üblichen Methodik zu beschreiben. Hier ist es wichtig, sich auf ein definiertes Umfeld zu beziehen. Allgemeine Beschreibungen betreffen in der Regel die gesamte seismotektonische Region. Bei einem größeren Betrachtungsgebiet ist die Anzahl der zur Verfügung stehenden Ereignisse größer und somit die statistischen Aussagen sicherer. Andererseits fehlt dann oft der strenge Bezug zur Lokation der Geothermieanlage. Um diesen Bezug zu sichern haben sich oft Betrachtungsgebiete von ca. 30 km Ausdehnung bewährt.

Für das Betrachtungsgebiet sind die veröffentlichten Bebenkataloge interessant und die daraus abgeleiteten statistischen Beziehungen, wie die Gutenberg-Richter-Beziehung. Betrachtet werden sollten auch die Herdlokationen in ihrer Beziehung zu den bekannten tektonischen Elementen, die Herdtiefen und soweit bekannt Herdflächenlösungen.

Bedeutung haben auch Ereignisse aus der vorinstrumentellen Zeit (historische Beben), gegebenenfalls auch Paläobeben, die in den üblichen Katalogen nicht gelistet sind.

4.5 Lokales Spannungsfeld, Reaktivierungspotenziale

Das Spannungsfeld, seine Größe und Orientierung relativ zu den erarbeiteten tektonischen Elementen spielt bei der Beurteilung der seismischen Gefährdung eine herausragende Rolle. Im Gutachten sollte ausführlich dargestellt sein, aus welchen Daten sich die Aussagen zum präexistierenden Spannungsfeld ergeben. Es ist dann in einem zweiten Schritt abzuschätzen, wie sich die Spannungssituation durch die operativen Eingriffe in den verschiedenen Projektschritten ändert.

Zentral ist die Modellierung der Reaktivierungspotenziale für die verschiedenen Störungen. Diese Berechnungen er-

möglichen dann gegebenenfalls auch Aussagen zu maximal zulässigen Drücken oder Einspeiseraten bei der Injektion.

Da sowohl die Angaben zur Tektonik als auch die zum Spannungsfeld je nach Datenlage unterschiedlich fehlerbehaftet sein können, sind Aussagen zur Unsicherheit der abgeleiteten Angaben notwendig.

5. Vorgesehene operative Maßnahmen, betriebliche Situation

Die geplanten operativen Maßnahmen, wie Bohrungen, sind ausführlich zu beschreiben, soweit sie bekannt sind, z. B. auch durch Vergleich mit bestehenden Projekten. Dies könnten sein:

- Beschreibung der geplanten operativen Maßnahmen
- Allgemeine Bewertung der operativen Maßnahmen hinsichtlich der seismischen Gefährdung
- Methodische Ansätze zur Gefährdungsbewertung
- Erkenntniszuwachs durch neu gewonnene In-situ-Daten
- Abschätzung von Effekten, die in der Betriebsphase (bei Betriebsänderungen) zu spürbarer Seismizität führen können

5.1 Verwendete Methoden

Es ist darzustellen, wie und welche der operativen Parameter zu erfassen sind. Dabei ist die Errichtungsphase von der Betriebsphase zu trennen.

6. Abschätzung der Seismischen Gefährdung

Ein zentraler Teil eines Basisgutachtens ist die Bewertung der seismischen Gefährdung anhand einer datenbasierten wissenschaftlichen Vorgehensweise.

6.1 Methodische Ansätze zur Gefährdungsbewertung

Ein zentraler Teil ist die Bewertung der seismischen Gefährdung anhand einer datenbasierten wissenschaftlichen Vorgehensweise. Dabei muss die verwendete Methodik nachvollziehbar und unter Beachtung guter wissenschaftlicher Praxis² dargestellt werden. Im Rahmen dieser Richtlinie werden dazu folgende Richtlinien genannt:

² Eine umfassende Darstellung ist zum Beispiel in »Deutsche Forschungsgemeinschaft (2013): Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis 2013, Denkschrift, Empfehlungen der Kommission »Selbstkontrolle in der Wissenschaft«, WILEY-VCH, Weinheim« zu finden.

- Beachtung allgemeiner Prinzipien wissenschaftlicher Arbeit und wissenschaftlicher Standards. Dazu zählt insbesondere das Zitieren der verwendeten Quellen.
- Dokumentation von Datengrundlagen und Resultaten. Modelle sollten durch einen Experten grundsätzlich reproduzierbar sein.
- Prinzipiell kann zwischen probabilistischen und deterministischen Methoden zur Gefährdungsbewertung unterschieden werden.

Aussagen zur seismischen Gefährdung können statistischer oder modellhafter Natur sein oder eine Kombination aus beiden darstellen (hybrider Ansatz). Eine generelle Bevorzugung einer der beiden Methoden kann nicht empfohlen werden, da die Eignung der Methoden von der jeweiligen Problemstellung und insbesondere der Datenlage abhängig ist. Daher sollte in einer Stellungnahme begründet werden, warum eine bestimmte Methodik verwendet wird. Es sei darauf hingewiesen, dass sich probabilistische Modelle des Auftretens von Erdbeben im Vorfeld geothermischer Erschließungsmaßnahmen in der Regel nicht sinnvoll aufsetzen lassen, da zu diesem Zeitpunkt noch keine Datengrundlage verfügbar ist.

Die Unsicherheiten der verwendeten Datengrundlagen sind darzulegen, und die Auswirkungen auf die Gefährdungsabschätzung sind darzustellen. Unter Umständen (z. B. bei hohem Risiko) kann es sinnvoll sein, im konservativen Sinne abdeckende Szenarien (Extremfälle) in Abhängigkeit von der Unsicherheit der Eingangsdaten zu betrachten, d. h. was könnte passieren, wenn die Bedingungen und Eigenschaften in-situ nicht den wahrscheinlichsten Erwartungen entsprechen, sondern der Kombination extremer Fälle gemäß den spezifizierten Unsicherheiten.

7. Minderung der Seismischen Gefährdung

In der bestehenden Praxis gibt es gefährdungsmindernde Maßnahmen z. B. in Form einer »Ampelsteuerung«, durch die operative Maßnahmen modifiziert bzw. abgebrochen werden, bevor die verursachte Seismizität bestimmte Schwellenwerte (z. B. Spürbarkeit oder Unbedenklichkeitsschwelle für Sachschäden) erreicht. Solche Maßnahmen sollen entwickelt und detailliert beschrieben werden. Falls eine Ampelsteuerung als gefährdungsmindernde Maßnahme Bestandteil des Gutachtens wird und hydraulische Stimulationen geplant sind, muss der Nachlaufeffekt (d.h. Post-Injektions-Seismizität mit unter Umständen größeren Magnituden) explizit berücksichtigt werden.

Seismische Ampelsysteme (TLS, *traffic light system*) werden eingesetzt, um das Auftreten seismischer Ereignisse bei anthropogenen Eingriffen in das Spannungsfeld der Erde durch gezielte Steuerungsentscheidungen zu limitieren. Grundlage jedes seismischen Ampelsystems ist die Erfassung der lokalen Seismizität. Ampelsysteme sind Echtzeitsysteme, so dass eine kontinuierliche seismische Echtzeitüberwachung zwingend erforderlich ist. Die Echtzeitfähigkeit ist wichtig, um Steuerungsbefehle des Ampelsystems zeitig genug einleiten zu können. Zur Konzeption geeigneter Überwachungssysteme siehe Richtlinie GTV 1101-1.

Ziel eines Ampelsystems ist es, Erdbeben mit zuvor definierten Auswirkungen, z. B. mit Schadenspotential oder spürbare Erdbeben, zu vermeiden. In einem Ampelsystem sind Schwellenwerte vorgegeben, die vorab definierte Handlungen nach sich ziehen. So könnte beispielweise bei einem dreistufigen System bei »Grün« unverändert mit dem Betrieb fortgefahren werden, bei »Gelb« wäre eine Veränderung der operativen Maßnahmen vorzunehmen mit dem Ziel, stärkere Erdbeben der Stufe »Rot« zu verhindern, und bei »Rot« wäre der Betrieb nach einem vorab definierten Abschaltprozess einzustellen. Die Anzahl der Stufen im Ampelsystem spiegelt neben dem Schadenspotential auch konzeptionelle, auf den geltenden Rechtsrahmen bezogene und gesellschaftliche Faktoren wider. Die für die Änderung der operativen Parameter anzusetzenden

Reaktionszeiten sollten aus dem in der Begutachtung gewonnenen Prozessverständnis a priori festgelegt werden. Eine Abschaltung bei Rot erfordert zwingend eine Neubewertung der seismischen Gefährdung vor einer möglichen Wiederinbetriebnahme.

Als Messgröße für die Schwellenwerte im Ampelsystem empfehlen wir die Bodenschwinggeschwindigkeit (PGV, *peak ground velocity*). Sie steht in direktem Bezug zu DIN4150-2/DIN4150-3 und kann in Kategorien von Fühlbarkeit und Schadenspotential übersetzt werden, die letztendlich die Kriterien des Ampelsystems für Eingriffe in das Produktionsgeschehen bilden.

Die Effizienz eines Ampelsystems ist von der Steuerbarkeit der Erdbebenaktivität abhängig und wird durch mögliche Nachlaufeffekte und einen sprunghaften Anstieg der Erdbebenmagnitude eingeschränkt. Schwellenwerte müssen daher entsprechend niedrig angesetzt werden, um trotz der erwähnten Effekte Erdbeben unerwünschter Stärke zu vermeiden. Die Auslegung des dafür notwendigen Sicherheitspuffers sollte globale Erfahrungen in vergleichbaren Projekten berücksichtigen. Die Handlungsoptionen bei Grenzwertüberschreitung reichen von in Kenntnis setzen von Aufsichtsbehörden über Einschränkungen der Produktion bis zum vollständigen Herunterfahren der Anlage.

Generell ist die Effizienz von operativen Maßnahmen zur Seismizitätsminderung schwer zu beurteilen. Es ist aktuell nicht prognostizierbar, wie sich die Erdbebenaktivität unter jeweils anderen operativen Rahmenbedingungen entwickelt hätte. Durch Erfahrung gut belegt ist bisher nur, dass sich die lokale Erdbebenaktivität nach Beendigung operativer Maßnahmen wieder der tektonischen Hintergrundrate nähert. Ein möglicher Lösungsansatz ist die Entwicklung eines »digitalen Zwillings«, mit dem sich bei gleichem Anfangszustand verschiedene Szenarien erproben lassen. Allerdings besteht hier noch erheblicher Forschungsbedarf, ebenso wie bei den sogenannten adaptiven seismischen Ampelsystemen (ATLS, *adaptive traffic light system*). Bei adaptiven seismischen Ampelsystemen werden die Schwellenwerte nicht a priori wie bei einem TLS festgelegt, sondern dynamisch in Echtzeit über Beobachtungsdaten angepasst.

Obwohl Ampelsysteme keine abschließende Sicherheit garantieren, dass Schwellenwerte nicht übersprungen werden können, leisten seismische Ampelsysteme einen wertvollen Beitrag zur Minimierung der seismischen Gefährdung. Trotz dieses Restrisikos und dem nicht unerheblichen Aufwand eines Ampelsystems, empfehlen wir den Einsatz eines Ampelsystems für jedes tiefe Geothermieprojekt in Deutschland.

7.1 Gutachterliche Begleitung, kontrollierter Betrieb, jährliche Fortschreibung des Gutachtens

Der ausgearbeitete Vorschlag zu einer gutachterlichen Begleitung des Projektes während seiner gesamten Laufzeit ist ein zentraler Teil eines Basisgutachtens. In der Regel setzt sich die gutachterliche Begleitung und damit die Sicherstellung eines kontrollierten Betriebes zusammen aus

- Basisgutachten
- Jährliche Fortschreibung des Basisgutachtens
- Planung, Aufbau und Betrieb von Messnetzen (Seismologisches Netz, Immissionsnetz)
- Einigung auf ein Reaktionsschema (Ampel, TLS)
- Interne Berichterstattung z. B. an die Bergbehörde (meist online)
- Öffentlichkeitsarbeit, Kommunikation.

7.2 Seismologisches Monitoring, Messnetze

Alle Aussagen über natürliche und induzierte Seismizität beruhen auf Messungen mit seismologischen Stationen. Einzelne Stationen haben eine geringe Aussagekraft, daher sind Stationen in Netzen anzuordnen, die vorgegebenen Bedingungen genügen. Diese Bedingungen sind aufgrund der unterschiedlichen Aufgabenbeschreibung für öffentliche Netze und betriebliche Monitoringnetze unterschiedlich. Bei den Messnetzen wird dabei üblicherweise zwischen einem Emissionsnetz (Seismologisches Netz) und einem Immissionsnetz unterschieden (Richtlinie BVG 1101-1).

Öffentliches Netz:

Öffentliche Netze werden meist durch die Geologischen Landesämter, aber auch z. B. von Universitäten und anderen Forschungseinrichtungen betrieben. Sie haben eine Detektionsschwelle (Vollständigkeitsmagnitude) von bundesweit etwa $M_L = 2$.

Emissionsnetz:

Diese Netze werden von Wissenschaftlern (Seismologen) so gestaltet, dass sie u. a.

- eine möglichst niedrige Detektionsschwelle (Vollständigkeitsmagnitude) haben, wenn möglich $M_L < 1$
- eine Ortung in der geforderten Genauigkeit ermöglichen
- eine Magnitudenbestimmung in der geforderten Genauigkeit ermöglichen
- bei größeren Ereignissen eine Bestimmung der Herdmechanik gestatten

Hierzu werden Stationsorte mit möglichst geringer Bodenunruhe gesucht, manchmal wird die Installation in flachen oder auch tieferen Bohrungen bevorzugt. Instrumentiert werden diese Stationen mit empfindlichen seismologischen Sensoren, um dann letztlich auch Herdparameter bestimmen zu können und so einen Zugang zu möglichen Herdmechanismen zu haben.

Seismologische Netze zur Beobachtung des Reservoirverhaltens bei der Stimulation (z. B. Rissausbreitung) und beim Betrieb stellen dabei wieder eine Besonderheit dar, da es hier vor allem um die Erfassung hochfrequenter Signalanteile geht. Diese Netze werden oft weniger von Seismologen (erdbebenorientiert) sondern von Explorationsgeophysikern betrieben. In ihrer Nomenklatur werden diese Methoden als »Passive Seismik« bezeichnet, also als seismische Exploration ohne künstliche Quellen (Sprengungen, Vibratoren). Diese Methode hat in den letzten Jahren eine sehr große Verbreitung gefunden. Im Zusammenhang mit den Aufgaben dieses Gutachtens werden diese Messungen und die zugehörigen Netze nicht betrachtet.

Die Leistungsfähigkeit von Emissionsnetzen kann kartographisch dargestellt werden, z. B. in Bezug auf die Vollständigkeitsmagnitude, die horizontale und vertikale Ortungsgenauigkeit, die Genauigkeit der Magnitudenbestimmung.

Emissionsnetze werden nicht nur als öffentliche Netze, meist von den geologischen Landesämtern oder Forschungseinrichtungen betrieben, sondern können auch durch private Einrichtungen wie Kraftwerksbetreibern oder Bergbautreibenden, also auch den Betreibern von Geothermieanlagen, eingerichtet und unterhalten werden.

Immissionsmessnetz:

Im Gegensatz zu den (wissenschaftlichen) seismologischen Netzen gibt es für Immissionsmessnetze in den verschiedenen Ländern sehr genaue Vorschriften. Derartige Netze sollten nur von nach § 26, 28 Bundesimmissionschutzgesetz (BImSchG) zugelassenen Stellen betrieben werden und haben sich in Deutschland nach den Vorgaben der DIN 4150 zu richten. Da die Lokation der (erwarteten) Ereignisse nicht bekannt ist,

kann nicht (wie gefordert) die Station in dem wahrscheinlich betroffenen Gebäude aufgestellt werden, sondern mehrere Stationen (Netz) sind so zu verteilen, dass sie das betroffene Gebiet repräsentativ abdecken. In Deutschland liegen zur ordnungsgemäßen Aufstellung und zum Betrieb derartiger Netze aus den durch induzierte Seismizität hauptsächlich betroffenen Gebieten (Steinkohlenbergbau NRW und Saarland) ausreichende Erfahrungen vor. Hier werden derartige Netze seit Jahrzehnten (z. B. seit 1909 in Bochum für den Steinkohlenbergbau) betrieben und bestanden zeitweise aus weit mehr als 100 Einzelstationen.

Stationen des Immissionsnetzes sind wesentlich preiswerter als solche des wissenschaftlichen Netzes (z. B. können hier günstige MEMS-Stationen verwendet werden). Dadurch wird ein wesentlich dichteres Netz möglich, was Probleme der Mikrozonierung mindern kann und eine realistische Bestimmung von Einwirkungsradien erleichtert. Auch die Aufstellung in z. B. Wohnhäusern reduziert die Kosten. Die übliche ›Event-triggerung‹, also das Vermeiden einer aufwendigen kontinuierlichen Datenaufzeichnung und –Speicherung, bedeutet eine weitere Kostenreduzierung.

7.2.1 Öffentliche und betriebliche Kataloge, Kommunikation

Die Aufzeichnungen und Auswertungsergebnisse der öffentlichen Netze werden in öffentlichen Katalogen zur Verfügung gestellt. Im Gutachten kann vorgeschlagen werden, dass dies auch für die vom Betreiber der Geothermieanlage so gehandhabt wird.

Eine Internetbasierte Öffentlichkeit kann ein wesentlicher Bestandteil öffentlicher Kommunikation sein und maßgeblich zur allgemeinen Akzeptanz beitragen. Die Kommunikation mit den Bergbehörden ist üblicherweise im Betriebsplan geregelt.

7.3 Reaktionsschema, Ampel, Bezug zu Betriebsparametern

Der Vorschlag zu einer angemessenen Methode des ›kontrollierten Betriebs‹ der Anlage und dessen detaillierte Ausarbeitung ist neben der Abschätzung der Risiken der zentrale Teil eines Basisgutachtens. Details hierzu finden sich in den Teilen 1 und 2 dieser Richtlinie.

Die Betriebsparameter sind die ›Stellschrauben‹ des Systems. Mit ihnen wird das Systemverhalten letztlich kontrolliert. Eine besondere Bedeutung haben hier

- Die Durchflussrate des umlaufenden Thermalwasser
- der Injektionsdruck
- die Einspeisetemperatur.

7.4 Jährliche Fortschreibung des Basisgutachtens

Die einem seismologischen Basisgutachten zugrundeliegende Datenlage wird sich im Laufe der Zeit ständig erweitern. Neben anderen hinzukommenden Erkenntnissen ist dies schon durch die neu aufgezeichneten Daten der Messnetze gegeben. Die jährliche Fortschreibung des Basisgutachtens soll nicht in einer Neufassung bestehen, sondern nur Elemente enthalten, die sich durch den Daten- oder Erkenntniszuwachs des jeweils vorausgegangenen Jahres geändert haben und so eine Neubeurteilung oder eine Modifizierung der Beurteilung erforderlich machen. Die Fortschreibung sollte nicht vorrangig das jeweils vorausgegangene Jahr z. B. in Bezug auf die Statistik der seismischen Ereignisse darstellen, sondern eine Analyse des Gesamtdatensatzes wiedergeben, der sich durch die neu hinzugekommenen Daten mehr oder weniger deutlich verändert hat.

Im Regelfall wird eine jährliche Fortschreibung ausreichend sein. Dies gilt jedoch nicht, wenn entscheidende Einzelereignisse aufgetreten sind, wie z. B. große, grenzwertüberschreitende seismische Ereignisse. Eine Fortschreibung oder gar Neubeurteilung ist auch nötig, wenn einschneidende operative Änderungen vorgenommen wurden oder geplant sind. Dies könnten z. B. zusätzliche Bohrungen, drastische Änderungen der Pumpendrucke oder Pumpraten sein. Es könnten aber auch Ergebnisse zusätzlicher Explorationsmaßnahmen sein.

8. Schadensbeurteilung und Schadensregulierung

Da die Bevölkerung nach dem Bundesberggesetz geringfügige Schädigungen hinnehmen muss, kommt auch der öffentlichen Diskussion der Schadenbeurteilung und der Schadenregulierung eine besondere Rolle zu.

Schadensbeurteilung

Die im Basisgutachten festzulegende Schadensbeurteilung hat nach DIN 4150 - 3 zu erfolgen. Nur so kann sichergestellt werden, dass sie auch gerichtsfest ist. In der Regel setzt dies ein funktionierendes Immissionsnetz mit ausreichender Stationsdichte voraus. Festlegungen der Methode der Schadensbeurteilung haben also mit Vorschlägen zur Einrichtung eines ausreichenden Immissionsnetzes Hand in Hand zu gehen.

Die nachfolgenden Begriffsbeschreibungen zeigen hier die Argumentationslinien auf:

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 der Geothermieanlage) den Schaden verursacht hat und dementsprechend auch regulieren (reparieren oder entschädigen) muss. Ist der Betreiber der Ansicht, nicht der Verursacher zu sein, muss er dies nachweisen (Beweislastumkehr). Im Zusammenspiel von Messüberwachung und Ampel kann er dies in der Regel meist zunächst nur, indem er nachweist, die Anhaltwerte der DIN 4150 - Teil 3 nicht überschritten zu haben.

Einwirkungsbereich

Nach dem Bundesberggesetz und der Einwirkungsbereichs-Bergverordnung³ 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 einem derzeit (2022) gültigen Leitfaden⁴ der Länder-Bergbehörden festzulegen entlang der Linie, innerhalb der Bodenschwinggeschwindigkeiten > 5 mm/s möglich waren.³

Hierzu sollte bevorzugt auf Messwerte eines Immissionsnetzes zurückgegriffen werden. Sind ausreichende Messwerte nicht verfügbar, kann auch auf 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.

³ Einwirkungsbereichs-Bergverordnung <https://www.gesetze-im-internet.de/einwirkungsbergv/BJNR015580982.html>

⁴ Leitfaden zur Festlegung des Einwirkungsbereichs nach Auftritt einer Erschütterung, verursacht durch ein seismisches Ereignis, https://www.infogeo.de/Infogeo/DE/Downloads/leitfaden_einwirkungsBergV_20180702.html?submit=Senden&searchEngineQueryStringBIZ=einwirkungsbereich

Der Einwirkungsbereich muss nicht notwendigerweise eine zusammenhängende Fläche sein, sondern kann durchaus aus mehreren »Inseln« bestehen. Diese wären dann jeweils durch einen Perimeter zu beschreiben. Da sich bezogen auf Einzelgebäude rechtliche Konsequenzen daraus ergeben, ob diese innerhalb oder außerhalb des Einwirkungsbereiches liegen, müsste der Einwirkungsbereich grundstücksgenau festgelegt werden.

Genauerer regeln die Einwirkungsbereichs-Bergverordnung (EinwirkBergV) und der oben genannte Leitfaden, der von einer Expertenkommission unter Mitwirkung der Bundesanstalt für Geologie und Rohstoffe (BGR) und den Geologischen Diensten der Bundesländer erarbeitet wurde. Dieser Leitfaden gilt für die Festlegung eines Einwirkungsbereichs »nach Auftritt einer Erschütterung« (EinwirkBergV § 3, Abs. 4). Der vorliegende Leitfaden unterstützt die Bergbehörden der Länder bei der Erstellung der Vollzugshilfe zur Umsetzung der Anforderungen der EinwirkBergV. 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 Bodenschwingungsgeschwindigkeit [...] festzulegen« (EinwirkBergV § 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 neutralere Begriff »seismisches Ereignis« benutzt. Der Leitfaden soll eine bundesweit einheitliche Behandlung für die Festlegung der Grenze des Einwirkungsbereichs sicherstellen.

Mikrozonierung:

Gegenstand von seismischen Mikrozonierungen ist die Kartierung der veränderten 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 Abmilderung 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 Bodenschwingungsgeschwindigkeit) 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 Immissionsnetz begegnet werden.

Bergschadensausfallkasse (BSAK):

Von einem nachgewiesenen Erschütterungsereignis betroffene Bürger haben einen Anspruch auf Ersatz des Schadens gegen den verursachenden Bergbauunternehmer (§ 115 BBergG), also den Inhaber der dem Bergbaubetrieb zugrunde liegenden Bergbauberechtigung (§ 116 BBergG). In der Regel hat dieser eine Versicherung eingeschaltet.

Sofern der Geschädigte von keinem der Ersatzpflichtigen Ersatz erlangen kann, weil alle Ersatzpflichtigen ausfallen - d. h. nicht mehr vorhanden oder insolvent sind - wird er für einen 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 rechtfähigen 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. BbergG, § 3 Abs.3, Satz 2, Ziffer 2, Buchstabe b) sind. Die Satzung der BSAK verlangt von Erdwärmeunternehmen, dass für sämtliche Aufsuchungsvorhaben jeweils eine auskömmliche Haftpflichtversicherung für Bergschäden mit Absicherung des Insolvenzfalles (Nachhaftung über mindestens fünf Jahre) abgeschlossen wurde.

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) wahrgenommen.

9. Zusammenfassung

Gutachten, auch die zu seismologischen Risiken, liegen grundsätzlich in der vollen Verantwortung der Gutachter. Basisgutachten zum seismologischen Risiko (Erdbebenrisiko) eines Geothermieprojektes werden meist zu Beginn der Projektplanung im Zusammenhang mit den bergrechtlichen Genehmigungen gefordert. Je nach geologischer Situation, aber auch der operativen Planung der Anlage können die Anforderungen an dieses Basisgutachten sehr unterschiedlich sein. Eine generelle Richtlinie, wie die hier vorliegende des Bundesverbandes Geothermie e. V., kann nur allgemeine Hinweise darauf geben, was von einem derartigen Gutachten üblicherweise erwartet wird.

Schon der Begriff ›Basisgutachten‹ weist darauf hin, dass dieses Gutachten einer kontinuierlichen Fortschreibung bedarf. Dies ergibt sich aus der stetigen Erweiterung der Datenbasis, sei es durch gezielte Maßnahmen, wie Exploration oder auch einfach durch den Fortschritt bei der Errichtung der Anlage oder beim Monitoring des Betriebs der Anlage.

Diese Richtlinie basiert auf dem aktuellen Kenntnisstand der wissenschaftlichen Forschung. Sie ist ein ›lebendes‹ Dokument und soll weiterentwickelt werden, wenn sich aus der Erstellung zukünftiger Basisgutachten ergänzende Gesichtspunkte ergeben.

10. Literatur

- DIN 4150 »Erschütterungen im Bauwesen«, Teil 3 »Einwirkungen auf bauliche Anlagen« (02-1999)
- DIN 45669-1 »Messung von Schwingungsimmissionen«, Teil 1 »Schwingungsmesser; Anforderungen, Prüfung« (09-2010)
- DIN 45669-2 »Messung von Schwingungsimmissionen«, Teil 2 »Messverfahren« (06-2005)