

Leitfaden

zur Festlegung des Einwirkungsbereichs nach Auftritt einer Erschütterung, verursacht durch ein seismisches Ereignis, im Sinne der Bergverordnung über Einwirkungsbereiche (EinwirkungsBergV) und des Bundesberggesetzes (BBergG).

Ergebnisse des Arbeitskreises 7 „Vollzugshilfe EinwirkungsBergV“ des Direktorenkreises der Staatlichen Geologischen Dienste Deutschlands und der Milestonegruppe 6 „Einwirkbereich und Makroseismik“ der Arbeitsgruppe Induzierte Seismizität des Forschungskollegium Physik des Erdkörpers.

Datum der Erstellung: 2.7.2018

Gliederung

1. Präambel
2. Auftrag
3. Empfehlungen für die Vollzugshilfe
4. Formaler Ablauf zur Festlegung eines Einwirkungsbereichs
 - 4.1. Meldepflichtiges seismisches Ereignis
 - 4.2. Beteiligte Stellen
 - 4.3. Voraussetzungen
 - 4.4. Ablauf
5. Festlegung des Einwirkungsbereichs
 - 5.1. Grundlagen
 - 5.2. Methoden
 - 5.3. Szenarien
 - 5.4. Berücksichtigung von Unsicherheiten
 - 5.5. Diskrepanzen zwischen verschiedenen Methoden
 - 5.6. Berücksichtigung früherer Auswertungen
6. Zuordnung zu einem Bergbaubetrieb
7. Erfassung, Auswertung und Bewertung instrumenteller Messdaten
 - 7.1. Erfassung
 - 7.2. Auswertung und Bewertung
 - 7.3. Empfehlungen für die Instrumentierung
8. Erfassung, Auswertung und Bewertung makroseismischer Daten
 - 8.1. Erhebung
 - 8.2. Auswertung und Bewertung
 - 8.3. Ergebnisse und Produkte
 - 8.4. Empfehlungen für die Makroseismik
9. Modellrechnungen und empirische Beziehungen
 - 9.1. Einsatz von Modellrechnungen - Bodenschwinggeschwindigkeiten
 - 9.2. Methoden der Modellrechnungen
 - 9.3. Einsatz von Modellrechnungen - Makroseismik
 - 9.4. Grenzen der Modellrechnungen
10. Haftungsausschluss
11. Glossar
12. Literatur
13. Mitglieder des Arbeitskreises 7 und der Milestonegruppe 6

1. Präambel

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 Bodenschwingungsgeschwindigkeit [...] 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.

2. Auftrag

Nach der Novellierung des Bundesberggesetzes (Drucksache 18/4714 des Bundestages vom 23.4.2015) hat der Direktorenkreis der Staatlichen Geologischen Dienste Deutschlands am 15. und 16. Februar 2017 (167. Direktorenkonferenz) beschlossen, den Arbeitskreis 7 „Vollzugshilfe EinwirkungsBergV“ einzurichten. Der Arbeitskreis hat die Aufgabe, bei der Erstellung der Vollzugshilfe zur Umsetzung der Anforderungen der EinwirkungsBergV mitzuwirken.

Der Arbeitskreis hat den vorliegenden Leitfaden in Zusammenarbeit mit der Milestonegruppe 6 „Einwirkbereich und Makroseismik“ der Arbeitsgruppe Induzierte Seismizität des Forschungskollegium Physik des Erdkörpers erstellt.

3. Empfehlungen für die Vollzugshilfe

Die Grenze des Einwirkungsbereichs ist so festzulegen, dass außerhalb ein Bergschaden durch die Erschütterungen nicht zu vermuten ist. Innerhalb des Einwirkungsbereiches gilt die Bergschadensvermutung.

Für die Umsetzung der Anforderungen der EinwirkungsBergV ergeben sich aus seismologischer Sicht die folgenden Empfehlungen.

1. Für die Festlegung des Einwirkungsbereichs werden alle geeigneten instrumentellen und makroseismischen Daten genutzt. Der Einwirkungsbereich wird je nach Verfügbarkeit geeigneter Daten als das Gebiet mit Bodenschwinggeschwindigkeiten von 5 mm/s und höher im Frequenzbereich von 1 Hz bis 10 Hz und/oder mit einer Intensität V und höher (EMS-98) festgelegt. Ergebnisse von Modellrechnungen oder Erfahrungswerte können hinzugezogen werden.
2. Die Bergbehörde muss sicherstellen, dass die Bergbauregion seismisch überwacht wird. Sie muss sicherstellen, dass im Fall eines seismischen Ereignisses relevante Daten, die von Bergbaubetrieben und Fachstellen erfasst werden oder vorliegen (z. B. Wellenformdaten seismischer Stationen oder Meldungen über Schäden an Gebäuden) für die Festlegung des Einwirkungsbereichs zur Verfügung gestellt werden.
3. Durch die mögliche Notwendigkeit, einen Einwirkungsbereich nach einem induzierten seismischen Ereignis bestimmen zu müssen, ergeben sich neue Anforderungen bezüglich der seismologischen Überwachung von Bergbaubetrieben und für die Erfassung makroseismischer Beobachtungen. Dies betrifft sowohl neue Bergbauaktivitäten als auch Bestandsbetriebe, bei denen zum Zeitpunkt der Betriebsgenehmigung diese Aspekte eventuell noch keine Berücksichtigung gefunden haben. Es ist für jeden Betrieb zu prüfen, ob die Voraussetzungen erfüllt sind, um im Falle eines meldepflichtigen seismischen Ereignisses die für die Festlegung des Einwirkungsbereichs notwendigen Daten zu erfassen.
4. Die Zuordnung des seismischen Ereignisses zu einem Bergbaubetrieb oder zu mehreren Bergbaubetrieben und die Entscheidung über die Ursache des seismischen Ereignisses sind Aufgaben der Bergbehörde. Die Bergbehörde muss sicherstellen, dass die erforderlichen Informationen vorliegen.
5. Der Einwirkungsbereich gilt ab Beginn der Erschütterungen als Folge des seismischen Ereignisses und für die Dauer der Erschütterungen. Bei der Festlegung des Einwirkungsbereichs werden nur Auswirkungen berücksichtigt, die unmittelbar durch die Erschütterungen verursacht werden.
6. Die Festlegung des Einwirkungsbereichs erfolgt in der Regel innerhalb von zwei Monaten. Sollte eine längere Bearbeitungszeit erforderlich sein, ist dies zu begründen.

4. Formaler Ablauf zur Festlegung eines Einwirkungsbereichs

4.1 Meldepflichtiges seismisches Ereignis

Ein seismisches Ereignis wird zum *meldepflichtigen seismischen Ereignis*, wenn es mindestens plausibel erscheint, dass eins oder mehrere der nachfolgenden Kriterien erfüllt sind:

1. Das Epizentrum des seismischen Ereignisses liegt in der räumlichen Nähe eines Bergbaubetriebes und die Magnitude ist größer oder gleich zwei.
2. Es liegen Hinweise vor, dass eine Erschütterung der makroseismischen Intensität IV oder höher in der räumlichen Nähe eines Bergbaubetriebes aufgetreten ist.
3. Es liegen Hinweise vor, dass eine Bodenschwinggeschwindigkeit von über 1 mm/s in der Nähe eines Bergbaubetriebes aufgetreten ist.

Die Zusammenhänge zwischen den Messwerten, Intensitäten und dem seismischen Ereignis sowie zwischen dem seismischen Ereignis und dem Bergbaubetrieb müssen plausibel sein.

Folgende Angaben über das meldepflichtige seismische Ereignis sind der zuständigen Bergbehörde vorzulegen (soweit vorhanden oder bestimmbar, nach dem aktuellen Kenntnisstand):

1. Datum und Uhrzeit
2. Koordinaten des Epizentrums
3. Herdtiefe
4. Magnitude
5. maximale gemessene Bodenschwinggeschwindigkeit
6. maximale beobachtete Intensität.

4.2 Beteiligte Stellen

In der nachfolgenden Tabelle (Tabelle 1) sind die im Zusammenhang mit der Festlegung des Einwirkungsbereichs beteiligten Stellen und ihre zugeordneten Aufgaben aufgeführt.

Tabelle 1: An der Festlegung eines Einwirkungsbereichs nach einer Erschütterung beteiligte Stellen und deren Aufgaben.

Beteiligte Stelle	Aufgabe
Bergbehörde	Verfahrensführend für die Festlegung der Grenze des Einwirkungsbereichs, der Ursache des seismischen Ereignisses und der Zuordnung des seismischen Ereignisses zu einem Bergbaubetrieb
Fachstelle (Erdbebendienst oder andere)	Erarbeitung einer Stellungnahme für den Einwirkungsbereich und für die Ursache des seismischen Ereignisses
Bergbaubetrieb (Betrieb oder Betriebe in der Bergbauregion)	Bereitstellung von Daten und Informationen, die für die Festlegung des Einwirkungsbereichs, für die Festlegung der Ursache des seismischen Ereignisses und die Zuordnung zu einem Bergbaubetrieb relevant sind.

4.3 Voraussetzungen

Die **Bergbehörde** muss sicherstellen, dass die seismische Überwachung einer Bergbauregion dergestalt gewährleistet ist, dass die im Leitfaden spezifizierten Kriterien für ein meldepflichtiges seismisches Ereignis geprüft werden können.

Sollte eine geeignete lokale seismische Überwachung nicht existieren, kommen benachbarte oder regionale Erdbebendienste für die Überwachung in Frage. Die **Bergbaubetreiber** können in diesem Fall im Betriebsplan zu entsprechenden Maßnahmen (z.B. Aufbau von Messstationen zur seismischen Überwachung) verpflichtet werden.

Sollte eine seismische Überwachung (noch) nicht vorhanden sein, sodass die Kriterien für ein meldepflichtiges seismisches Ereignis nicht ausreichend geprüft werden können, und die **Bergbehörde** erhält Kenntnis von einem seismischen Ereignis, muss aufgrund von Plausibilitätsüberlegungen und Erfahrungswerten entschieden werden, ob ein Einwirkungsbereich festzulegen ist oder nicht.

4.4 Ablauf

Der Ablauf nach einem meldepflichtigen seismischen Ereignis ist in die nachfolgend aufgeführten drei Stufen eingeteilt:

1. Die **Bergbehörde** erhält Kenntnis über ein meldepflichtiges seismisches Ereignis.
2. Die **Bergbehörde** entscheidet, ob ein Einwirkungsbereich festzulegen ist und fordert in diesem Fall von der **Fachstelle** eine Stellungnahme an.

3. Auf Grundlage der Stellungnahme der **Fachstelle** legt die **Bergbehörde** die Grenze des Einwirkungsbereichs fest und stellt fest, welchem **Betrieb** oder welchen **Betrieben** der Einwirkungsbereich zuzurechnen ist. Die **Bergbehörde** gibt dem **Betrieb** und der Öffentlichkeit den Einwirkungsbereich bekannt.

5. Festlegung des Einwirkungsbereichs

5.1 Grundlagen

Die Grenze des Einwirkungsbereichs ist als Linie festzulegen. Innerhalb des Einwirkungsbereiches ist davon auszugehen, dass eine seismische Erschütterung der makroseismischen Intensität V oder höher oder eine Bodenschwinggeschwindigkeit größer oder gleich 5 mm/s im Frequenzbereich von 1 Hz bis 10 Hz aufgetreten ist (Kap. 3). Außerhalb des Einwirkungsbereichs ist davon auszugehen, dass diese Werte nicht erreicht wurden. Der Einwirkungsbereich kann auch aus mehreren, nicht zusammenhängenden Gebieten bestehen.

Die Bekanntgabe des Einwirkungsbereichs hat durch eine Kartendarstellung oder durch die Definition eines Polygons oder mehrerer Polygone über Koordinatenangaben zu erfolgen. Die Festlegung hat transparent, schlüssig und nachvollziehbar unter Offenlegung der verwendeten Daten und Methoden zu erfolgen.

5.2 Methoden

Der Einwirkungsbereich nach einem meldepflichtigen seismischen Ereignis ist für jedes seismische Ereignis individuell auf der Grundlage aller geeigneten Daten, d.h. sowohl instrumentellen als auch makroseismischen Daten, und, falls möglich oder notwendig, auf der Basis weiterer Auswertungen festzulegen. Die räumliche Verteilung der Erschütterungsstärke hängt von verschiedenen Einflussfaktoren ab, vor allem von der Stärke des Ereignisses (Magnitude), der Entfernung zum Erdbebenherd (Epizentrum, Herdtiefe) und den Ausbreitungseigenschaften des Mediums (z.B. Dämpfung). Weitere wichtige Einflussfaktoren sind der Bruchprozess im Untergrund (Quelleffekte) und Eigenschaften des lokalen Untergrundes am Ort der Erschütterung (Standorteffekte).

Zur Festlegung der Grenze des Einwirkungsbereichs können die folgende Auswertungen und Methoden herangezogen werden:

- Messungen der Bodenschwinggeschwindigkeit an einzelnen Messstationen bzw. daraus abgeleitete Isolinien der Bodenschwinggeschwindigkeit
- Isoleisten bzw. einzelne Intensitätsdatenpunkte
- Lokalisierung und Magnitude des seismischen Ereignisses in Kombination mit empirischen Beziehungen (Ground Motion Prediction Equation, GMPE) oder Modellierungen unter Berücksichtigung von Informationen über die Geologie, lokale Standorteffekte, Quelleffekte.

Die Festlegung des Einwirkungsbereichs erfolgt in der Regel durch eine Kombination dieser verschiedenen Ansätze. Datenerhebungen und Auswertungen müssen dabei in einem ausgewogenen Verhältnis zum Aufwand stehen, den die zuständige Behörde, die Erdbebendienste oder die Betreiber im Schadensfall oder präventiv zu leisten haben.

5.3 Szenarien

Mit welchen Methoden ein Einwirkungsbereich im Einzelfall festgelegt wird, hängt maßgeblich davon ab, welche Daten im konkreten Fall zur Verfügung stehen und welche Genauigkeiten bei deren Auswertungen erreicht werden. Je weniger geeignete Daten vorliegen, desto mehr muss sich die Festlegung des Einwirkungsbereichs auf empirische Beziehungen und Modellierungen stützen.

Bei der Verwendung von Messwerten der Bodenschwinggeschwindigkeit und bei der makroseismischen Auswertung ist jeweils zu prüfen, ob die vorliegenden Daten ausreichen, um Isolinien – vor allem die Isolinie der Bodenschwinggeschwindigkeit von 5 mm/s bzw. der Isoleiste V – festzulegen. Sollte dies nicht möglich sein, können einzelne Messwerte der Bodenschwinggeschwindigkeit oder einzelne Intensitätsdatenpunkte dennoch genutzt werden. Sie können zur Ergänzung anderer Methoden sowie zur Plausibilitätsprüfung einer Modellierung herangezogen werden.

Nachfolgend werden verschiedene Szenarien zur Festlegung eines Einwirkungsbereichs betrachtet. Diese hängen insbesondere von den folgenden Faktoren ab:

- Anzahl und Qualität der Messwerte (z.B. Entfernungen der Stationen und azimutale Anordnung bezogen auf das Epizentrum)
- Anzahl, Qualität und Verteilung der makroseismischen Beobachtungen
- Kenntnis über lokale Untergrundbedingungen (Standorteffekte)
- Kenntnis über Ausbreitungseigenschaften seismischer Wellen

Als lokale seismische Stationen werden in diesem Leitfaden Stationen bezeichnet, die innerhalb eines Radius liegen, der der doppelten Herdtiefe des zu untersuchenden seismischen Ereignisses entspricht.

Szenario 1: Daten eines lokalen Messnetzes stehen nicht zur Verfügung

Ohne lokale Stationen kann das Epizentrum in vielen Fällen nur ungenau bestimmt werden. Messwerte von Bodenschwinggeschwindigkeiten aus geringen Entfernungen liegen in diesem Fall nicht vor.

Makroseismische Daten haben in diesem Szenario eine besonders hohe Bedeutung. Die Festlegung des Einwirkungsbereichs basiert auf den Ergebnissen der makroseismischen Auswertung in Kombination mit empirischen Beziehungen und/oder einer Modellierung.

Stehen so wenige makroseismische Daten zur Verfügung, dass keine Intensitätsdatenpunkte festgelegt werden können, muss die Festlegung des Einwirkungsbereichs auf einer Modellierung und auf Erfahrungswerten beruhen. Aufgrund dieser Erfahrungswerte kann der Einwirkungsbereich anhand der Magnitude, der Herdtiefe oder

der Tiefe der Lagerstätte und weiterer geologischer und anderer Parameter festgelegt werden.

Die für die Modellierung und die Anwendung empirischer Beziehungen benötigte Magnitude des seismischen Ereignisses kann aus den Messdaten regionaler Netze bestimmt werden. Die hierfür ebenfalls notwendigen Angaben zum Epizentrum des seismischen Ereignisses können aus den Messdaten regionaler Netze nur ungenau (Genauigkeit schlechter als ± 3 km für das Epizentrum) bestimmt werden. Eine belastbare Aussage über die Herdtiefe ist nicht möglich. Deshalb sind für diese Angaben Lage, Ausdehnung und Tiefe der Lagerstätte und das makroseismisch bestimmte Hypozentrum zu berücksichtigen.

Szenario 2: Wenige Daten eines lokalen Messnetzes stehen zur Verfügung

Es stehen nur wenige instrumentelle Daten von lokalen Stationen zur Festlegung des Einwirkungsbereichs zur Verfügung. Das Epizentrum des seismischen Ereignisses kann, auch unter Hinzuziehen regionaler Messstationen, zuverlässig bestimmt werden (Genauigkeit besser als ± 3 km, Herdtiefe besser als ± 5 km). Die wenigen Datenpunkte der Bodenschwinggeschwindigkeit eignen sich nicht zur Interpolation und zur Ableitung einer Isolinie von 5 mm/s.

Die Festlegung des Einwirkungsbereichs wird sich in diesem Szenario eher auf eine Modellierung und die Anwendung empirischer Beziehungen sowie eine makroseismische Auswertung stützen. Die wenigen Datenpunkte der Bodenschwinggeschwindigkeit können verwendet werden, um die Modellierung und Anwendung empirischer Beziehungen zu überprüfen und die Intensitätsdatenpunkte zu ergänzen.

Szenario 3: Daten eines lokalen seismischen Netzwerkes stehen zur Verfügung

Eine hinreichend genaue Lokalisierung des Hypozentrums (Epizentrum besser als ± 1 km, Herdtiefe besser als ± 3 km) des seismischen Ereignisses ist möglich. Eine Interpolation der Bodenschwinggeschwindigkeiten ist möglich und eine Isolinie für 5 mm/s kann aus den Messdaten festgelegt werden. Eine Modellierung und Anwendung empirischer Beziehungen sind aufgrund der genaueren Parameter des seismischen Ereignisses ebenfalls zuverlässiger als in den Szenarien 1 und 2 und können anhand der Messdaten verifiziert werden.

Messwerte der Bodenschwinggeschwindigkeiten haben in diesem Szenario eine besonders hohe Bedeutung. Die Isolinie von 5 mm/s ist die wichtigste Grundlage zur Festlegung der Grenze des Einwirkungsbereichs. Auch in diesem Szenario ist ein Abgleich mit den makroseismischen Daten vorzunehmen.

5.4 Berücksichtigung von Unsicherheiten

Die Ergebnisse aller genannten Auswertungen sind mit Unsicherheiten behaftet, da die ihnen zugrundeliegenden Methoden und Modelle die Realität nur bedingt abbilden können. Unsicherheiten treten in Abhängigkeit von der Anzahl und Lage der installierten Messstationen, der Güte der Messdaten, der Kenntnis des lokalen Untergrundes, der Möglichkeit des Einsatzes von 1D, 2D und 3D Modellen, bei der Bestimmung des Hypozentrums induzierter seismischer Ereignisse sowie bei der Bestimmung und Interpolation der Bodenschwingungsgeschwindigkeitswerte und der Intensitäten auf. Daher sind für alle Ergebnisse Genauigkeitsbereiche und die dazugehörigen statistischen Verteilungen anzugeben, so dass sie bei der Festlegung des Einwirkungsbereichs berücksichtigt werden können. Genauigkeiten in den Analyseergebnissen sind abhängig von dem jeweiligen Vorgehen und Szenario. Sie sind nachvollziehbar darzustellen.

Wichtige Einflussgrößen auf die Ergebnisse der oben genannten Methoden sind:

- Genauigkeiten von Magnitude, Epizentrum und Herdtiefe (instrumentell und/oder makroseismisch),
- Genauigkeiten von Isolinien, die durch Inter- oder Extrapolation von gemessenen Bodenschwingungsgeschwindigkeiten bestimmt werden sowie Genauigkeiten einzelner Messungen der Bodenschwingungsgeschwindigkeit (Einfluss von Gerätetyp, lokalem Untergrund etc.),
- Genauigkeiten der Isoseisten sowie Genauigkeiten der Intensitätsdatenpunkte in Abhängigkeit von Beobachtungsdichte und Bevölkerungsdichte bzw. Bebauungsdichte,
- Unsicherheit bei der Auswahl geeigneter empirischer Beziehungen (GMPE) und deren Variabilität,
- Genauigkeit, mit welcher die Eingangsparameter bei Modellrechnungen bekannt sind und Variabilität von Modellierungsergebnissen.

Unsicherheiten sind bei der Festlegung der Grenze des Einwirkungsbereichs konservativ zu berücksichtigen. Eine Kombination von Unsicherheiten in mehreren Teilschritten, die zu einem unplausibel großen Einwirkungsbereich führt, sollte jedoch vermieden werden.

5.5 Diskrepanzen zwischen verschiedenen Methoden

Bei möglichen Diskrepanzen in den Daten und Auswertergebnissen verschiedener Methoden sind die Ursachen zu ermitteln.

Bei der Festlegung des Einwirkungsbereichs ist die Aussagesicherheit der verwendeten Daten und Methoden zu berücksichtigen und es sind diejenigen mit höherer Aussagesicherheit höher zu gewichten.

5.6 Berücksichtigung früherer Auswertungen

Wenn es zur Festlegung des Einwirkungsbereichs hilfreich und sinnvoll erscheint, können frühere seismische Ereignisse und deren Auswirkungen in der Bergbauregion berücksichtigt und mit dem zu untersuchenden Ereignis verglichen werden (z.B. Intensitätsabnahmekurven, Gebiete mit lokalen Untergrundeffekten).

6. Zuordnung des Einwirkungsbereichs zu einem Bergbaubetrieb

Die Bergbehörde hat die Aufgabe festzustellen, welchem Bergbaubetrieb oder welchen Bergbaubetrieben der Einwirkungsbereich zuzurechnen ist (EinwirkungsBergV § 3 Abs. (4)). In diesem Leitfaden wird von der Zuordnung zu einem Bergbaubetrieb gesprochen, da dies der häufigere Fall ist, gemeint ist jedoch auch die Möglichkeit der Zuordnung zu mehreren Bergbaubetrieben.

Nach BBergG § 120 (Bergschadensvermutung) wird davon ausgegangen, dass ein Schaden durch einen Bergbaubetrieb verursacht wurde, wenn er im Einwirkungsbereich entstanden ist und nach seiner Art ein Bergschaden sein kann. Die Bergschadensvermutung gilt unter anderem dann nicht, wenn die Erschütterungen „durch natürlich bedingte geologische oder hydrologische Gegebenheiten oder Veränderungen des Baugrundes verursacht wurden“. Die Zuordnung des Einwirkungsbereichs zu einem Bergbaubetrieb wird deshalb in zwei Aufgaben unterteilt:

1. Entscheidung, ob das seismische Ereignis durch den Bergbau induziert wurde oder ob es ein natürliches, tektonisch verursachtes Erdbeben war.
2. Zuordnung des seismischen Ereignisses zu dem Bergbaubetrieb, der die Erschütterung verursacht hat.

Die beschriebenen Aufgaben liegen im Verantwortungsbereich der Bergbehörde. Die Bergbehörde muss sicherstellen, dass die hierfür erforderlichen Informationen und Daten vorliegen. Inwieweit die seismische Überwachung nach den Szenarien 1, 2 oder 3 (Kap. 5.3) für eine Entscheidungsgrundlage ausreicht, muss im Einzelfall entschieden werden. In einem Gebiet ohne natürliche Seismizität und einem großen Abstand benachbarter infrage kommender Betriebe, kann ein seismisches Monitoring gemäß Szenario 1 durchaus ausreichend sein.

Die Entscheidung über die Ursache eines seismischen Ereignisses kann je nach den Gegebenheiten schwierig sein und auf Wahrscheinlichkeitsangaben beruhen. In der Regel beruht sie auf mehreren Indizien, z. B. Informationen über die historische Seismizität, zeitlicher Entwicklung und räumlicher Verteilung von Seismizität, Herdmechanismen sowie dem Bezug zu Störungszonen. Zur Unterscheidung zwischen induzierter und natürlicher Seismizität wird auf Empfehlungen des Forschungskollegiums Physik des Erdkörpers (FKPE) verwiesen (Dahm et al., 2013).

Auch die Zuordnung zu einem Bergbaubetrieb kann auf Wahrscheinlichkeitsangaben beruhen. Sie kann auf folgende Auswertungen gestützt werden:

- Epizentrum
- Herdtiefe
- Weitere seismologische Auswertungen (z.B. Herdmechanismus, Bruchfläche, Identifikation von Störungen)
- Produktionsdaten

Die für die Zuordnung zum Bergbaubetrieb erforderlichen Genauigkeiten des Epizentrums und der Herdtiefe richten sich nach dem Abstand benachbarter Bergbaubetriebe. Im Fall von eng benachbarten Bergbaubetrieben ist eine höhere Genauigkeit als Entscheidungsgrundlage erforderlich (Szenario 3, Kap. 5.3). Eine Zuordnung zu mehreren Betrieben ist ebenfalls möglich. Produktionsdaten der in Frage kommenden Bergbaubetriebe (z.B. Förderzeiträume, Fördermengen, Lage und Teufe der Förderung) können hilfreiche Informationen sein und möglicherweise die Zuordnung zu einer Lagerstätte ermöglichen, wenn mehrere Lagerstätten betroffen sein können.

Alle fachlichen Bewertungen zur Zuordnung des Einwirkungsbereichs zu einem Bergbaubetrieb sind zu begründen und nachvollziehbar darzustellen. Die Festlegung erfolgt durch die Bergbehörde.

7. Erfassung, Auswertung und Bewertung instrumenteller Messdaten

Die Messung von Bodenschwinggeschwindigkeiten ist eine wichtige Voraussetzung für die Festlegung der Grenze des Einwirkungsbereichs. Dafür muss schon vor dem Eintreten des zu bewertenden seismischen Ereignisses ein Netz von Messstationen im Gebiet der zu erwartenden Erschütterungen installiert sein.

Als ein Kriterium für die Grenze des Einwirkungsbereiches wird das Erreichen bzw. Überschreiten einer Schwinggeschwindigkeit von 5 mm/s festgelegt (Kap. 3 und 5). Die Beurteilung erfolgt auf der Grundlage der gemessenen maximalen Schwinggeschwindigkeiten aller geeigneten Stationen (Kap. 7.1).

7.1 Erfassung

Bei der seismischen Überwachung werden häufig die Emission, die Betrachtung der seismischen Quelle im Untergrund, und die Immission, die Überwachung der Auswirkungen auf die Tagesoberfläche, getrennt betrachtet. Emissionsuntersuchungen erfordern häufig hochempfindliche Messstationen, die in der Lage sind, sehr geringe Bodenschwinggeschwindigkeiten nur wenig oberhalb der natürlichen Bodenunruhe zu erfassen. Diese Messstationen werden daher an ruhigen Standorten möglichst abseits von besiedelten Gebieten betrieben. Immissionsstationen hingegen dienen vor allem der Erfassung der maximalen Bodenschwinggeschwindigkeit. Immissionsstationen werden meist in Wohnhäusern installiert. Mit den Messwerten kann die Erschütterungswirkung am Ort der Messung direkt bewertet werden.

Die Registrierungen von Emissionsstationen können für die Bewertung von Erschütterungswirkungen herangezogen werden, wenn die Charakteristika der Messsysteme berücksichtigt werden. Ebenso ist es möglich, Immissionsstationen für die Ortung von seismischen Ereignissen zu nutzen, wenn die Signalqualität dies zulässt.

Für die Festlegung des Einwirkungsbereichs können also sowohl Messstationen am Gebäudefundament (entsprechend der DIN 4150-3) als auch solche im Freifeld verwendet werden. Die maximalen Schwinggeschwindigkeiten an Gebäudefundamenten sind im Vergleich zum Freifeld im Allgemeinen etwas niedriger. Dieser Effekt ist meist jedoch vernachlässigbar (Studer et al., 2007) und wird deshalb zur Ermittlung des Einwirkungsbereiches nicht berücksichtigt.

7.2 Auswertung und Bewertung

Eine zuverlässige Lokalisierung ist wichtig für die Zuordnung eines seismischen Ereignisses zu einem Bergbaubetrieb und für die Anwendung von Modellrechnungen zur Bewertung von Immissionen. Die Anordnung der Messstationen relativ zum Ereignisort hat direkten Einfluss auf die Genauigkeit der Lokalisierung (Kap. 5.3). Darüber hinaus ist die Lokalisierung abhängig von dem verwendeten Untergrundmodell. Die Unsicherheiten in der Bestimmung der Lokalisierung sind zu erfassen und anzugeben, so dass sie bei den darauf aufbauenden Bewertungen (Kap. 6 und 9) nachvollziehbar berücksichtigt werden können. Anzustreben ist die Verwendung lokaler Messstationen (Kap. 5.3 und 7.3).

Auch auf die Bewertung der Erschütterungen durch instrumentelle Messungen der Bodenschwinggeschwindigkeit haben Anzahl und Anordnung von Messstationen einen großen Einfluss (Kap. 5.3). Die Bodenschwinggeschwindigkeit seismischer Ereignisse nimmt in erster Näherung mit zunehmender Entfernung vom Epizentrum ab. Daher ist es von hoher Bedeutung, dass Messwerte nahe des Epizentrums für die Bewertung genutzt werden.

Zur Festlegung der Grenze des Einwirkungsbereiches müssen Daten von seismischen Messsystemen verwendet werden, deren Übertragungscharakteristik bekannt ist. Die Daten müssen gemäß der Übertragungscharakteristik korrigiert werden, so dass die wahren Bodenschwinggeschwindigkeiten bewertet werden können. Der Grenzwert von 5 mm/s ist in Anlehnung an DIN 4150-3 für den Frequenzbereich von 1 Hz bis 10 Hz gewählt und gilt für diesen Frequenzbereich. Wenn anhand der Registrierungen nachgewiesen wird, dass höhere Frequenzen berücksichtigt werden müssen, dann ist dies nachvollziehbar darzulegen und zu begründen. Anhaltswerte dafür gibt die DIN 4150-3 (Tab. 1).

Es muss sichergestellt sein, dass Amplituden der Bodenschwinggeschwindigkeit von 5 mm/s im Messbereich der verwendeten Messsysteme liegen. Bei Werten oberhalb von 5 mm/s ist zu prüfen, ob die Registrierungen noch zuverlässig sind oder ob die Messsysteme übersteuern (Clipping, Soft-Clipping). Sollten in Einzelfällen Messsysteme verwendet werden, deren Messbereiche auf Werte unterhalb von 5 mm/s beschränkt sind, können sie bei der Festlegung des Einwirkungsbereichs hilfreiche Zusatzinformationen liefern. Werden Werte unterhalb von 5 mm/s zuverlässig registriert, weisen diese auf einen Messstandort außerhalb des Einwirkungsbereichs hin.

Interpolation der Messwerte

Die Erschütterungen durch induzierte seismische Ereignisse können große Bereiche an der Oberfläche betreffen. Anhand von Messungen der Bodenschwinggeschwindigkeit können zunächst aber nur die Erschütterungswirkungen an den Messorten bewertet werden. Die Festlegung des Einwirkungsbereichs erfordert eine flächenhafte Bewertung und damit die Interpolation der punktuellen Einzelmessungen. Die Interpolation der Messwerte ist mit einem transparenten und nachvollziehbaren Verfahren

durchzuführen und zu dokumentieren. Die Interpolation liefert als Resultat Isolinien gleicher Bodenschwinggeschwindigkeit. Die wichtigste Isolinie für den auszuweisenden Einwirkungsbereich ist die Isolinie der Bodenschwinggeschwindigkeit von 5 mm/s.

Berücksichtigung von Quellgrößen und von lokalen Standorteffekten

Bodenschwinggeschwindigkeiten können räumlich sehr variabel sein. Ein Grund hierfür ist die Variabilität der Abstrahlung seismischer Wellen in verschiedene Raumrichtungen (Quelleffekte). Durch die Heterogenität des oberflächennahen Untergrundes können Erschütterungen an der Oberfläche lokal verstärkt oder abgeschwächt werden (Standorteffekte). Wenn diese Effekte sehr kleinräumig sind, kann es sein, dass der Schwellwert der Bodenschwinggeschwindigkeit von 5 mm/s überschritten wird, obwohl die existierenden Messdaten niedrigere Maximalamplituden aufweisen. Auch ist es möglich, dass die höchsten Bodenschwinggeschwindigkeiten abseits des Epizentrums auftreten. Im Vorfeld eines seismischen Ereignisses sind Epizentrum und Verteilung der Bodenschwinggeschwindigkeiten nicht bekannt. Deshalb wird das absolute Maximum der hervorgerufenen Bodenschwinggeschwindigkeiten meist nicht registriert. Dies ist bei der Bewertung zu berücksichtigen (Kap. 5.4), wobei auf Modellrechnungen (Kap. 9) und/oder auf weitere Daten, z.B. auf frühere Auswertungen (Kap. 5.6), zurückgegriffen werden kann.

Der Einfluss lokaler Standorteffekte kann durch andere Methoden (Kap. 9) explizit bewertet und bei der Interpolation von Messungen der Bodenschwinggeschwindigkeit zusätzlich berücksichtigt werden.

7.3 Empfehlungen für die Instrumentierung

Folgende Empfehlungen für die Instrumentierung gelten, wenn im Zusammenhang mit einem Bergbaubetrieb induzierte seismische Ereignisse nicht ausgeschlossen werden können:

- Nach § 22b ABergV „kann“ die zuständige Bergbehörde „verlangen“, „ein seismologisches Basisgutachten erstellen zu lassen, Maßnahmen für einen kontrollierten Betrieb zu ergreifen und den Betrieb regelmäßig nach dem Stand der Technik zu überwachen“.
- Die Überwachung der Seismizität ist durch die Bergbaubetriebe zu gewährleisten. Empfehlungen für die Überwachung induzierter Seismizität, speziell für die Qualität von Messstationen, für die Konfiguration und den Betrieb von Messnetzen und für die bei der Lokalisierung anzustrebenden Genauigkeiten, gibt das FKPE (Baisch et al., 2012). Bei der Planung einer konkreten seismischen Überwachung sollten auch Methoden und Ansätze zur Unterscheidung von natürlichen und induzierten seismischen Ereignissen des FKPE (Dahm et al., 2013) berücksichtigt werden.

- Anzahl und Verteilung der seismischen Stationen eines Messnetzes sind an die seismische Gefährdung, d.h. an die zu erwartende Häufigkeit und Stärke, und an die räumliche Verteilung der (möglichen) induzierten Ereignisse anzupassen und für jeden Bergbaubetrieb im Einzelfall festzulegen. Je nach Entwicklung der Seismizität kann es notwendig werden, die seismische Überwachung auszubauen (Stufenkonzept). Dies sollte auf der Grundlage von vorhandenen Auswertungen entschieden werden.
- Es ist sicherzustellen, dass für meldepflichtige seismische Ereignisse (Kap. 4.1) hinreichend hohe Lokalisierungsgenauigkeiten erreicht werden, um die Zuordnung zum Bergbaubetrieb und die Anwendung von Modellrechnungen und empirischen Beziehungen zu ermöglichen.
- Für die Festlegung der Grenze des Einwirkungsbereichs sollten lokale Messstationen zur Verfügung stehen (Szenario 3, Kap. 5.3, Kap. 7.2). Es ist erforderlich in unterschiedlichen Richtungen und Entfernungen von der (voraussichtlichen) Quelle zu messen, um eine gute Abdeckung des Messgebietes zu gewährleisten, eine Interpolation der Messwerte zu ermöglichen und mögliche Quell- und Standorteffekte zu identifizieren.

8. Erfassung, Auswertung und Bewertung makroseismischer Daten

Die Erfassung makroseismischer Daten ist eine wichtige Voraussetzung für die Festlegung der Grenze des Einwirkungsbereichs (Kap. 5). Dafür muss die notwendige Infrastruktur zur Erfassung makroseismischer Beobachtungen und von Schäden vorhanden sein. Die Erdbebendienste, die Bergbaubetreiber oder andere Fachstellen können von der zuständigen Behörde mit der Erfassung und Auswertung der makroseismischen Daten beauftragt werden.

8.1 Erhebung

Die Erfassung makroseismischer Daten erfolgt nach den Vorgaben in der EMS-98 (Grünthal et al., 1998). Es ist anzustreben, dass die makroseismischen Beobachtungen über einen bundesweit einheitlichen Fragebogen (Kaiser, 2014) erfasst werden, um einen Austausch der Daten zwischen den Erdbebendiensten und Bergbaubetreibern über die Grenzen der Bundesländer hinaus sicherzustellen. Es wird empfohlen, den digitalen Fragebogen im Internet möglichst vor einem seismischen Ereignis bereitzustellen, um unmittelbar nach dem seismischen Ereignis Informationen sammeln zu können. Makroseismische Beobachtungen, die bei dem Bergbaubetreiber eingehen, sind einzubeziehen.

Für den Fall, dass keine oder wenige Daten eines lokalen Messnetzes zur Verfügung stehen (Szenario 1 oder 2, Kap. 5.3) und den makroseismischen Daten eine besonders hohe Bedeutung zukommen, kann die Begutachtung von Gebäudeschäden Teil der makroseismischen Bewertung sein.

Die Erfassung der als Folge der Erschütterung aufgetretenen Schäden sollte in diesem Fall möglichst schnell (innerhalb weniger Tage) nach dem Ereignis erfolgen. Wenn notwendig sind der Schadensgrad an den Gebäuden und die Zuordnung der Gebäude zu Vulnerabilitätsklassen (EMS-98) durch geschultes Fachpersonal zu erfassen und ergänzende Fragebögen zu nutzen. Der Bewertung von Gebäudeschäden kommt eine besonders wichtige Rolle für die Abgrenzung zwischen Intensität IV und V zu, da es sich um objektive Beobachtungen handelt, die unabhängig von Fragebögen sind. Vor allem bei Schadensgraden 1 und 2 nach EMS-98 ist eine zeitnahe Inaugenscheinnahme empfehlenswert um schon bestehende von neuen Schäden abgrenzen zu können. Informationen über Gebäudeschäden sollten zwischen Bergbauunternehmen, zuständigen Behörden und Erdbebendiensten vollständig ausgetauscht werden.

In Bergbaugebieten mit hoher seismischer Aktivität und häufig verspürten seismischen Ereignissen ist eine Vorbegutachtung von Gebäuden für repräsentative Stichproben vor dem Auftreten eines Schadensbebens in Betracht zu ziehen. Diese Informationen sind bei der makroseismischen Auswertung mit einzubeziehen.

Die makroseismisch erfassten Daten unterliegen dem Datenschutz, der bei der Verarbeitung und dem Austausch zu beachten ist.

8.2 Auswertung und Bewertung

Die Auswertung der makroseismischen Daten erfolgt nach den Vorgaben der EMS-98 (Grünthal et al., 1998).

Bei der Intensitätsbestimmung ist der statistische Charakter der makroseismischen Intensitätsskala zu berücksichtigen. Für die Intensitätsbestimmung an einem Ort sollten so viele Beobachtungen vorliegen, dass den Empfehlungen der EMS-98 genügt wird.

Im Falle von stark abweichenden Antworten der Fragebögen, die zu einer deutlich höheren makroseismischen Intensität (ein Intensitätsgrad und mehr) als erwartet führen, ist zu prüfen, ob dies einen belastbaren Hintergrund hat oder auf fehlerhafte Angaben in den Fragebögen zurückzuführen ist. Konsistenzprüfungen der Fragebögen, Überprüfungen der gemeldeten Schäden, statistische Verfahren und Modellrechnungen können hilfreiche Informationen liefern, um Ausreißer oder systematische Überbewertungen zu identifizieren. Des Weiteren können Ergebnisse anderer makroseismischer Untersuchungen zum Vergleich und zur Plausibilisierung herangezogen werden.

8.3 Ergebnisse und Produkte

Wenn die makroseismische Auswertung eine entscheidende Bedeutung für die Festlegung des Einwirkungsbereichs besitzt, ist eine Karte anzufertigen, auf der das Gebiet bzw. die Gebiete, in dem die Intensität V oder größer aufgetreten ist (sind), abgegrenzt wird von dem Gebiet (den Gebieten), in dem Intensität IV oder kleiner aufgetreten ist (sind).

Ergebnisse, die die Festlegung des Einwirkungsbereichs ermöglichen, können sein:

- Eine makroseismische Karte und/oder Tabelle, die die Verteilung der makroseismischen Intensität der Erschütterung an den einzelnen Orten (Intensitätsdatenpunkt) darstellt. Für jede Intensität sollte die Aussagesicherheit durch die kleinste und größte Intensität angegeben werden, die mit dem Beobachtungsmaterial im Einklang steht.
- Makroseismisches Epizentrum (mit Angabe der Genauigkeit).
- Makroseismisch abgeschätzte Herdtiefe (mit Angabe der Genauigkeit).
- Ausweisung von Gebieten mit Auswirkungen des lokalen Untergrundes auf die Stärke von seismischen Erschütterungen.

8.4 Empfehlungen für die Makroseismik

Die Qualität der makroseismischen Auswertung hängt entscheidend von einer möglichst großen Anzahl zurückgemeldeter Fragebögen ab. Dies kann z.B. durch eine frühzeitige Information der Bevölkerung über die Möglichkeit der Erfassung und Aus-

wertung makroseismischer Daten erfolgen. Des Weiteren kann über die Zuständigkeiten bei Erdbeben in Bergbaugebieten informiert werden. Die Akzeptanz kann durch eine internetbasierte Erfassung der Beobachtungen (Fragebögen) erhöht werden sowie durch ein einheitliches Portal, welches auf entsprechende Seiten der Erdbebendienste hinweist. Die Verbreitung kann durch Aufrufe der zuständigen Behörde und der Erdbebendienste zum Ausfüllen des Fragebogens in Pressemitteilungen, in den Medien und an Mitarbeiter in großen öffentlichen Einrichtungen erhöht werden. Die Erfassung von Beobachtungen mittels mobiler Geräte (Smartphone etc.) und angepasster Anwendungen kann zu einer großen Anzahl von sehr zeitnahen Informationen führen mit zusätzlichen Standortinformationen. Zusätzliche Beobachtungen, die beispielsweise in sozialen Medien veröffentlicht werden und die nicht in dem Erdbeben-Fragebogen erfasst wurden, können ebenfalls berücksichtigt werden.

Insgesamt ist ein standardisiertes, bundesweit einheitliches Verfahren für die Erhebung und Auswertung makroseismischer Daten mit einem einheitlichen Fragebogen anzustreben.

9. Modellrechnungen und empirische Beziehungen

Für die Festlegung des Einwirkungsbereichs können laut EinwirkungsBergV neben Messungen der Bodenschwinggeschwindigkeit und neben der makroseismischen Intensität, auch „sonstige Daten“ genutzt werden. Hierunter sind auch die Ergebnisse von Modellrechnungen und die Einbeziehung von empirischen Beziehungen zu verstehen.

Über den Einsatz von Modellrechnungen muss im Einzelfall anhand der vorliegenden Informationen und Daten zu dem jeweiligen seismischen Ereignis entschieden werden. Der Einsatz der jeweiligen Methode muss gut begründet werden und die Gültigkeit der Modellparameter für den jeweiligen Fall belegt sein.

Methoden der Modellierung sollten vor allem dann unterstützend zum Einsatz kommen, wenn die Anzahl, Verteilung oder Qualität von Messdaten der Bodenschwinggeschwindigkeit und von Intensitäten nicht ausreichen, um den Einwirkungsbereich festzulegen. Des Weiteren können sie für die Extra- und Interpolation von Messwerten sowie für die Abschätzung und Erklärung von Quelleffekten und von Bodenverstärkungseffekten eingesetzt werden.

Modellrechnungen können auch helfen, Diskrepanzen in den Daten verschiedener Methoden zu erklären.

9.1 Einsatz von Modellrechnungen - Bodenschwinggeschwindigkeiten

Falls im Umfeld eines induzierten seismischen Ereignisses keine Messwerte zur Abschätzung der Bodenschwinggeschwindigkeit vorliegen (Szenario 1, Kap. 5.3) bzw. wenn diese Messwerte keine ausreichende flächendeckende Aussagekraft haben (Szenario 2, Kap. 5.3), dann können Aussagen zu möglichen Bodenschwinggeschwindigkeiten über Modellrechnungen abgeschätzt werden.

Modellrechnungen sollten eingesetzt werden, wenn die lokalen seismologischen Stationen nicht flächig und in allen Raumwinkelbereichen verteilt sind. Die punktuell erfassten Messwerte der Bodenschwinggeschwindigkeit werden durch eine Vielzahl an Effekten beeinflusst, die oft nicht im Einzelnen quantifizierbar sind (Kap. 7.2). Somit ist es nicht eindeutig, ob der jeweilige Wert auch für ein größeres Gebiet repräsentativ und übertragbar ist.

Modellrechnungen können für die Bewertung der Messwerte unterstützend genutzt werden, um die Plausibilität der Messwerte abzuschätzen. In dichtbesiedelten Gebieten sollte die Modellierung der Bodenschwinggeschwindigkeiten zur Inter- bzw. Extrapolation von Messwerten für eine erhöhte Aussagekraft der Schütterwirkung herangezogen werden. Modellrechnungen zur flächigen Bestimmung der auftretenden Bodenschwinggeschwindigkeiten müssen an vorhandenen Messwerten verifiziert werden.

Bei Betrieb einer einzelnen Station im Bereich eines möglichen Einwirkungsbereichs kann lediglich eine grundlegende Einschätzung der Seismizität vollzogen werden, um die mögliche Ursache eines seismischen Ereignisses (tektonisch und/oder induziert)

festzulegen. Der somit ermittelte punktuelle Messwert der Bodenschwinggeschwindigkeit an dieser Station wird in der Regel nicht der tatsächlich aufgetretene Maximalwert sein, kann aber zur Validierung der Modellrechnungen verwendet werden.

9.2 Methoden der Modellrechnungen

Im Folgenden wird unter den Modellrechnungen im Zusammenhang mit der Festlegung des Einwirkungsbereichs die Simulation (auch Interpolation und Extrapolation) der seismischen Wellenausbreitung bei Vorgabe eines Untergrundmodells (Geschwindigkeit, Dämpfung etc.), Herdmechanismus und bestehender Aufzeichnungen verstanden. Nachfolgend sind einige Beispiele von möglichen Verfahren aufgeführt, die im Zusammenhang mit der Festlegung des Einwirkungsbereichs mit zunehmender Komplexität der Methoden zum Einsatz kommen können.

- Abschätzung der Bodenschwinggeschwindigkeit aus empirisch abgeleiteten Beziehungen (GMPE). Dieses Verfahren kommt vor allem bei ungenügender Stationsabdeckung und schlechter Informationslage über den seismischen Untergrund bzw. dem vorherrschenden Herdmechanismus zum Einsatz.
- Abschätzung des Einflusses von Quelleffekten auf die Einwirkungen an der Oberfläche mittels geeigneter Verfahren.
- Numerische Modellierung von Oberflächenwirkungen seismischer Ereignisse mittels synthetischer Seismogramme.
- Abschätzung des Einflusses von lokalen, unter Umständen kleinräumigen Standorteffekten (Mikrozonierung).
- Flächige Extrapolation und Interpolation von Messdaten zur besseren Einschätzung der Grenze des Einwirkungsbereichs.

Die aufgeführten Anwendungsgebiete stellen einen wichtigen Teil der verfügbaren und möglichen Modellierungen dar, erheben aber keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Die Modellierungen erfordern die Festlegung von Modellparametern. Um die Erstellung des Einwirkungsbereichs, welcher unter Zuhilfenahme von Modellierungen ermittelt worden ist, nachvollziehbar zu machen, müssen die Modellannahmen dokumentiert werden. Als Mindestanforderung müssen folgende Informationen in die Dokumentation einfließen:

- Herdparameter (Magnitude, Hypozentrum, Herdmechanismus und ggf. weitere),
- Verwendete Methode (GMPE, seismische Wellenausbreitung mit Methoden der Spektralen-Finiten-Elementen oder Finiten-Differenzen, etc.) unter Angabe des verwendeten Programms zur Simulation bzw. der verwendeten Beziehung,
- Frequenzbereich, für den die Modellierung gültig ist,

- Verwendetes Untergrundmodell (Geschwindigkeit, Dichte, Absorption oder ähnliche Parameter),
- Parameter des verwendeten Gitters/Modellrasters,
- Weitere Annahmen, die für die Modellierung gemacht wurden.

Bei der Anwendung von Modellrechnungen ist der Abgleich mit der Geologie erforderlich. Diese kann z. B. in Form eines 3-dimensionalen Untergrundmodells berücksichtigt werden oder auch mittels Korrekturtermen bei empirischen Beziehungen.

Bei Kenntnis der lokalen, oberflächennahen Geologie (z.B. Scherwellengeschwindigkeit der oberen 30 m) können Standorteffekte modelliert und bei der Festlegung des Einwirkungsbereichs explizit berücksichtigt werden. Liegen diese Kenntnisse nicht vor, kann die Charakterisierung von lokalen Verstärkungseffekten (Mikrozonierung) durch die Auswertung geologischer Karten, Erhebungen im Rahmen der Landesaufnahme, Bewertungen seismologischer Gutachten im Rahmen von Betriebsplanverfahren, Daten von Explorationsseismiken sowie passiver seismischer Messverfahren erreicht werden. Falls solche Methoden die Messung und Interpolation von Bodenschwingungsgeschwindigkeit ergänzen, sind sie nachvollziehbar darzustellen.

9.3 Einsatz von Modellrechnungen - Makroseismik

Modellierungen können auch auf der Grundlage von makroseismischen Intensitäten angewendet werden. Hierbei können empirische Abnahmebeziehungen der Intensität angewendet und zum Vergleich mit beobachteten Intensitäten sowie gemessenen oder modellierten Bodenschwingungsgeschwindigkeiten herangezogen werden.

Da in manchen Bergbaugebieten Deutschlands umfangreiche makroseismische Beobachtungen zu induzierten seismischen Ereignissen aus der Vergangenheit vorliegen, kann für diese Gebiete die Anwendbarkeit empirischer Abnahmebeziehungen der Intensität gut überprüft werden.

Die Anwendung einer empirischen Abnahmebeziehung der Intensität ist z.B. dann gerechtfertigt, wenn abzusehen ist, dass die Anzahl und Qualität der makroseismischen Beobachtungen für eine Auswertung nicht ausreichen und andere Messwerte nicht vorliegen. Des Weiteren ist es möglich, die Plausibilität der Ergebnisse auf der Basis der makroseismischen Erhebung zu überprüfen. Die Übertragbarkeit der empirischen Beziehung auf den anzuwendenden Einzelfall ist hinreichend zu begründen.

9.4 Grenzen der Modellrechnungen

Beim Einsatz von Modellrechnungen muss nachvollziehbar dargelegt werden, dass die Methode und die angewendeten Parameter in dem spezifischen Umfeld und Einzelfall Gültigkeit haben.

Die bei Modellrechnungen eingesetzten Verfahren erfordern grundsätzlich Vereinfachungen und Näherungen. Die Komplexität des Bruchprozesses und des Untergrunds

ist im Allgemeinen nicht detailliert bekannt oder für die Modellierung nicht vollständig umsetzbar. Somit stellen die Ergebnisse der Modellrechnungen nur Näherungen dar. Aus diesem Grund sind die getroffenen Annahmen und Parameter mit entsprechenden Fehlerbereichen zu versehen, die eine Abschätzung der Genauigkeit der Ergebnisse bzw. der enthaltenen Unsicherheiten erlauben.

Bei der Anwendung von empirisch gewonnenen Beziehungen ist die Übertragbarkeit auf das zu untersuchende Gebiet zu prüfen, zu begründen und Unterschiede wenn möglich zu quantifizieren.

Lokale Standorteffekte lassen sich im Allgemeinen nur unzureichend identifizieren und quantifizieren. Somit ist es schwierig, diese Effekte bei der Modellierung umfassend zu berücksichtigen. Durch geeignete geophysikalische Messungen können diese Effekte näher untersucht werden, wenn Hinweise auf erhebliche Standorteffekte vorliegen.

10. Haftungsausschluss

Der Inhalt des Leitfadens zur Festlegung des Einwirkungsbereichs nach Auftritt einer Erschütterung, verursacht durch ein seismisches Ereignis, im Sinne der Bergverordnung über Einwirkungsbereiche (EinwirkungsBergV) und des Bundesberggesetzes (BBergG) wurde von den beteiligten Autoren gemeinsam nach ihrem besten Wissen und Verständnis auf der Grundlage der wissenschaftlichen Erkenntnis zum derzeitigen Zeitpunkt (2.7.2018) erarbeitet. Eine Haftung der Autoren oder der durch sie vertretenen Institutionen für jegliche Folgen aus der Anwendung dieser Empfehlungen wird ausdrücklich ausgeschlossen.

11. Glossar

Im Nachfolgenden werden Fachbegriffe erläutert, die im Leitfaden benutzt werden.

Absorption. Beschreibt den Teil der Amplitudenabnahme einer seismischen Welle beim Durchgang durch ein Medium (z.B. die Erde), der auf Umwandlung in Wärmeenergie zurückzuführen ist (intrinsische Dämpfung).

Bodenschwinggeschwindigkeit. Die maximale Bodenschwinggeschwindigkeit (englisch: peak ground velocity, PGV) beschreibt die größte Amplitude einer seismischen Welle an der Erdoberfläche, gemessen als Schwinggeschwindigkeit (im Unterschied zu Verschiebung oder Beschleunigung).

Bruchprozess. Bei seismischen Ereignissen verschieben sich Bereiche tektonischer Störungsflächen/Verwerfungen im Untergrund. Diese werden als Bruchflächen bezeichnet. Innerhalb der Bruchfläche liegt das Hypozentrum des seismischen Ereignisses. Je grösser eine Bruchfläche im Untergrund ist und je größer die Verschiebung ist, desto stärker ist das seismische Ereignis. Die Details dieser Verschiebung werden als „Bruchprozess“ bezeichnet.

Clipping, Soft-Clipping. Clipping ist eine Form der Verzerrung, die ein Signal begrenzt, sobald es einen Schwellenwert überschreitet. Clipping kann auftreten, wenn ein Signal von einem Sensor aufgezeichnet wird, der Einschränkungen hinsichtlich der messbaren Datenbereiche aufweist. Es kann auftreten, wenn ein Signal digitalisiert wird, oder ein analoges oder digitales Signal transformiert wird. Soft-Clipping ist eine weichere Begrenzung des Signals und führt zu weniger Oberwellen und Intermodulationsverzerrungskomponenten höherer Ordnung.

Emission. Die Emission (= Abstrahlung) seismischer Wellen beschreibt im Gegensatz zur Immission den Prozess, der an der Quelle einer Erschütterung stattfindet. Größen, die diesen Prozess beschreiben, sind beispielsweise die Magnitude, die seismische Energie und die Bruchflächengröße.

Epizentrum. Punkt an der Erdoberfläche, der genau senkrecht über dem Erdbebenherd (Hypozentrum, seismische Quelle), also dem Bruchprozess, liegt.

Erschütterung (seismische ~). Mechanische Schwingungen fester Körper mit potentiell schädigender oder belästigender Wirkung.

Finite-Differenzen-Methode. Ist eine Klasse numerischer Verfahren zur Lösung gewöhnlicher und partieller Differentialgleichungen. Diese numerischen Verfahren werden zur Berechnung der seismischen Wellenausbreitung und von Bruchprozessen eingesetzt, die den dreidimensionalen Charakter der Erdmodelle und der Wellenfelder berücksichtigen können.

GMPE (Ground Motion Prediction Equation, Bodenbewegungsmodell). GMPE sind Beziehungen, die es erlauben, die Stärke von Erschütterungen (starke Bodenbewegung), die an einem Standort auftreten können, zu schätzen. Die meisten GMPEs

geben die Erschütterung in Abhängigkeit von der Magnitude und der Entfernung des seismischen Ereignisses und weiterer Parameter an. GMPEs sind von entscheidender Bedeutung für das Erdbebeningenieurwesen, da sie zur Bewertung der seismischen Gefährdung verwendet werden und somit Schätzungen der Belastung liefern, die ein Bauwerk während eines zukünftigen Erdbebens erleiden kann.

Herdtiefe. Als Herdtiefe eines Erdbebens wird die Tiefe verstanden, in der der Bruchprozess eines Erdbebens stattfindet.

Hypozentrum. Das Hypozentrum, auch Bebenherd oder seismische Quelle genannt, ist der Punkt, von dem der Bruchprozess ausgeht. In der Seismologie wird das Hypozentrum charakterisiert durch die Herdtiefe und die Lage des Epizentrums an der Erdoberfläche.

Immission. Die Immission beschreibt im Gegensatz zur Emission den Einfluss des seismischen Ereignisses auf die Erdoberfläche. Größen, die diesen Effekt beschreiben, sind Bodenschwinggeschwindigkeit, Bodenbeschleunigung und seismische Intensität.

Intensität (makroseismische ~). Die Intensität ist ein Maß für die Stärke der Auswirkungen eines Erdbebens an der Oberfläche. Ermittelt wird sie anhand der Auswirkungen auf Menschen, Objekte und Gebäude. Die Intensität eines Erdbebens wird nach der EMS-98 bestimmt und bis zur Intensität 7 in der Regel überwiegend durch Fragebogenerhebungen ermittelt.

Intensitätsdatenpunkt. Ein Intensitätsdatenpunkt wird klassifiziert durch die beobachtete Intensität an einem Ort mit Angabe der geografischen Koordinaten, dem Ortsnamen und oft auch einer Qualitätsangabe (z.B. der Anzahl der Fragebögen, die zur Intensitätsbestimmung benutzt wurden).

Isoseisten. Isoseisten sind Isolinien, die Orte gleicher (ganzzahliger) Intensitäten eines Erdbebens verbinden.

Lokale Messstation. Seismische Messstation in geringer Entfernung zum Hypozentrum. Als lokale seismische Stationen werden in diesem Leitfadens Stations bezeichnet, die innerhalb eines Radius liegen, der der doppelten Herdtiefe des zu untersuchenden seismischen Ereignisses entspricht.

Magnitude. Die Magnitude ist ein Maß für die Stärke von Erdbeben. Sie ist ein Maß für die seismische Energie, die beim Bruchprozess im Erdbebenherd freigesetzt wird. Die Magnitude eines Erdbebens kann aus dem Logarithmus der Amplitude der Bodenbewegungen bestimmt werden (z.B. Lokalmagnitude, Richter-Skala). Andere Methoden berechnen die Magnitude eines Erdbebens aus den Größen des Bruchprozesses (Momentmagnitude).

Makroseismische Daten sind Beobachtungen der Auswirkungen von seismischen Erschütterungen auf Menschen, Objekte und Gebäude. Makroseismische Daten werden für die Bestimmung der makroseismischen Intensität benötigt.

Mikrozonierung. Untersuchungen mit dem Ziel der (frequenzabhängigen) Quantifizierung der lokalen Standorteffekte.

Modellraster/Gitter. Aufteilung (Diskretisierung) eines Untergrundmodells in eine Vielzahl kleiner Teilgebiete, die miteinander verbunden sind.

Quelleffekte. Effekte, die die Abstrahlung seismischer Energie vom Erdbebenherd (der Quelle) beeinflussen. Hierzu zählen insbesondere die Lage der Bruchfläche und die Richtung der Verschiebung auf der Bruchfläche. Auch dynamische Effekte des Bruchprozesses, z.B. die Ausbreitungsrichtungsrichtung des Bruches während des seismischen Ereignisses (Direktivität der Quelle) oder die Bruchgeschwindigkeit beeinflussen die Eigenschaften der abgestrahlten seismischen Wellen. Zum Beispiel werden in Bruchausbreitungsrichtung höhere Bodenschwingungsgeschwindigkeiten beobachtet als in entgegengesetzter Richtung.

Scherwellengeschwindigkeit. Ausbreitungsgeschwindigkeit von seismischen Raumwellen, deren Schwingungsrichtung im rechten Winkel zur Ausbreitungsrichtung orientiert ist.

Spektrale-Finite-Elemente. Als Methode der Spektralen-Finiten-Elementen wird die numerische Lösung von partiellen Differentialgleichungen bezeichnet. Die Spektral-Element-Methode ist eine Formulierung der Finiten-Elemente-Methode (FEM), die hochgradige abschnittsweise Polynome (z.B. Tschebyscheff-Polynome) als Ansatzfunktionen verwendet.

Standorteffekte. Unterschiede in den lokalen Untergrundverhältnissen. Insbesondere die Scherwellengeschwindigkeiten des oberflächennahen Untergrundes beeinflussen die Amplituden, die Dauer und den Frequenzgehalt von Erschütterungen. Standorteffekte können innerhalb kurzer Distanzen zu teilweise bedeutenden Unterschieden führen. Siehe „Mikrozonierung“.

12. Literatur

Gesetze, Verordnungen und Normen

Bergverordnung über Einwirkungsbereiche (Einwirkungsbereichs-Bergverordnung - EinwirkungsBergV) vom 11. November 1982 (BGBl. I S. 1553, 1558), die durch Artikel 3 der Verordnung vom 18. Oktober 2017 (BGBl. I S. 3584) geändert worden ist.

Bundesberggesetz (BBergG) vom 13. August 1980 (BGBl. I S. 1310), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 4 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808) geändert worden ist.

Deutsches Institut für Normung e.V. (2016). DIN 4150-3:2016-12, Erschütterungen im Bauwesen - Teil 3: Einwirkungen auf bauliche Anlagen. Dezember 2016, Beuth, Berlin.

Entwurf eines Gesetzes zur Ausdehnung der Bergschadenshaftung auf den Bohrlochbergbau und Kavernen (2015). Drucksache 18/4714, Deutscher Bundestag, April 2015, Berlin.

Fachliteratur

Baisch, St., Fritschen, R., Groos, J., Kraft, T., Plenefisch, Th., Plenkers, K., Ritter, J. & Wassermann, J. (2012). Empfehlungen zur Überwachung induzierter Seismizität - Positionspapier des FKPE. Mitteilungen der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft, 3/2012, 17-31, <https://doi.org/10.3929/ethz-a-010589968>.

Dahm, T., Becker, D., Bischoff, M., Cesca, S., Dost, B., Fritschen, R., Hainzl, S., Klose, C.D., Kühn, D., Lasocki, S., Meier, Th., Ohnberger, M., Rivalta, E., Wegler, U. & Husen, S. (2013). Zur Diskriminierung induzierter Seismizität. Mitteilungen der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft, 2/2013, 5-9.

Grünthal, G. (Hrsg., 1998). European Macroseismic Scale 1998 EMS-98, Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, 15, Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Luxembourg, 99 S., 1998. http://media.gfz-potsdam.de/gfz/sec26/resources/documents/PDF/EMS-98_Original_englisch.pdf

Kaiser, D. (2014). Der neue einheitliche Erdbeben-Fragebogen. Mitteilungen / Deutsche Geophysikalische Gesellschaft, 2/2014, 29-33.

Studer, J.A., Laue, J. und Koller, M.G. (2007). Bodendynamik – Grundlagen, Kennziffern, Probleme und Lösungsansätze. 3. Aufl., 340 S., Springer, Berlin.

13. Mitglieder des Arbeitskreises 7 und der Milestonegruppe 6

Nachfolgend sind die Mitglieder des Arbeitskreises 7 und der Milestonegruppe 6 aufgeführt, die an der Erstellung des Leitfadens mitgearbeitet haben.

Leitung

Dr. Christian Bönemann Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover (BGR)

Geschäftsführung, Vertretung der Leitung

Nicolai Gestermann Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover (BGR)

Vertretung der Geschäftsführung

Monika Bischoff Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Niedersachsen, Hannover (LBEG)

Mitglieder (alphabetische Liste)

Dr. Silke Beinersdorf Bauhaus-Universität Weimar
Dr. Sebastian Busch Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen, Krefeld
Dr. Ralf Fritschen DMT GmbH & Co. KG, Essen
Joachim Fritz Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Niedersachsen, Hannover (LBEG)
Dr. Erwin Geiß Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg (LfU)
Astrid Gessert K-UTEC AG Salt Technologies, Sondershausen
Jörg Heßlau Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Niedersachsen, Hannover (LBEG)
Dr. Thomas Höding Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg
Dr. Benjamin Homuth Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Wiesbaden (HLNUG)
Dr. Diethelm Kaiser Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover (BGR)
Dr. Matthias Kracht Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Wiesbaden (HLNUG)
Dr. Simon Kremers DMT GmbH & Co. KG, Essen
Dr. Ottomar Krentz Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden (LfULG)
Dr. Klaus Lehmann Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen, Krefeld
Andreas Omlin Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume, Schleswig-Holstein, (LLUR)
Dr. Thomas Plenefisch Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover (BGR)
Ina Pustal Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie, Jena (TLUG)

Dr. Ivo Rappsilber	Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt, Halle (LAGB)
Bernd Schmidt	Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz, Mainz (LGB)
Dr. Stefan Stange	Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden- Württemberg (LGRB), Regierungspräsidium Freiburg
Jürgen Völkel	K-UTECH AG Salt Technologies, Sondershausen
Dr. Joachim Wassermann	Ludwig-Maximilians Universität, München (LMU)
Markus Winkelmann	Bezirksregierung Arnsberg, Nordrhein-Westfalen