

Induzierte Seismizität

Von Menschen gemachte Erdbeben

JOACHIM RITTER

Bergbau, Staudämme, Geothermie, Erdöl- und Erdgasförderung, Fracking und CO₂-Speicherung: Der Mensch greift zunehmend in dynamische Prozesse unterhalb der Erdoberfläche ein. Eine Folge sind vermehrte Erdbeben. Meist sind es Mikrobenen, doch sie können auch so stark sein, dass sie zu schweren Schäden führen.

Der Mensch greift zunehmend in die dynamischen Vorgänge an der Erdoberfläche ein, wobei der Klimawandel oder Änderungen von Flusssystemen und damit verbundene Massentransporte bekannte Phänomene sind. Aber auch Eingriffe innerhalb der festen Erde nehmen zu, wie Senkungen oder Hebungen des Bodens, künstlich hervorgerufene Erdfälle oder gar Erdbeben aufzeigen (Abbildung 1). Solche induzierten Erdbeben sind Reaktionen auf menschliche Eingriffe in das Spannungsfeld der Lithosphäre [1], besonders durch dadurch verursachte Massenumlagerungen oder das Verpressen von Flüssigkeiten bis in mehrere Kilometer Tiefe (Abbildung 2).

In den mittleren Staaten der USA, die historisch als wenig seismisch aktiv bekannt sind, hat die jährliche Rate von spürbaren Erdbeben mit Magnituden von 3 und mehr inzwischen diejenige von Kalifornien, einem tektonisch aktiven Plattenrand, überschritten [2] (siehe „Magnitude: Maß für die Erdbebenstärke“, S. 31). Diese Zunahme ist auf die Injektion von Fluiden bei der Gas- und Ölförderung zurückzuführen.

Allgemein betrachtet sind Erdbeben Scherbrüche in Gesteinskörpern. Sie treten auf, wenn eine anliegende Spannung die interne Gesteinsfestigkeit oder den Scherwiderstand an einer bereits existierenden Verwerfungs- oder Störungszone überschreitet. Generell steht das Erdinnere durch die Auflast der Gesteine und plattentektonische Prozesse unter starken Spannungen.

Man unterscheidet menschlich induzierte Seismizität von natürlichen tektonischen Erdbeben, die alleine auf natürliche Spannungsprozesse im Erdinneren und einer dabei auftretenden Überschreitung der Gesteinsfestigkeit zurückzuführen sind. Es gibt auch Überschneidungen von natürlicher und induzierter Seismizität, beispielsweise wenn jemand in eine tektonisch vorgespannte Störung ein Fluid

injiziert und dadurch ein Erdbeben auslöst. Die Stärke solcher „getriggerten“ Erdbeben wird durch die Vorspannung bestimmt und kann dadurch auch bei geringer Fluidmenge – darunter versteht man die Größenordnung von 10^5 m^3 in einigen Stunden – deutlich spürbare Erschütterungen bewirken. Im Folgenden beschreibe ich die Stärke von Erdbeben mit der Magnitude M , ein Maß für die Stärke im Herd (siehe „Magnitude: Maß für die Erdbebenstärke“).

Physikalische Grundlagen

Ein Erdbeben entsteht, wenn sich eine Scherspannung zwischen zwei Gesteinskörpern in einem Scherbruch entlädt. Grundsätzlich wird die Haftreibung zwischen zwei Körpern mit dem Gesetz von Guillaume Amontons beschrieben. Der Scherwiderstand τ für Haftreibung oder die notwendige Scherspannung σ_s zur Überwindung dieser Haftreibung ist danach:

$$\tau = \sigma_s = \mu_s \cdot \sigma_n, \quad (1)$$

wobei μ_s der statische Reibungswiderstand ist, der für Gesteine etwa 0,6–0,85 beträgt. Die Normalspannung σ_n zwischen den Gesteinskörpern steht senkrecht zu σ_s , presst diese aneinander und erschwert dadurch die Bildung eines Scherbruchs (Abbildung 3 links). Charles Augustin de Coulomb führte zusätzlich eine spannungsunabhängige Komponente ein, die Kohäsion c , welche die Festigkeit des Gesteinsmaterials an der Scherfläche bei einem Neubruch beschreibt:

$$\sigma_s = c + \mu_s \cdot \sigma_n. \quad (2)$$

Dringt ein natürlich vorkommendes oder künstlich injiziertes Fluid in den Gesteinskörper ein, so verteilt es sich dort in Porenräumen oder Klüften (Abbildung 3 rechts). Wenn das Fluid mit der Erdoberfläche verbunden ist, etwa durch eine Bohrung oder offene Klüfte, dann steht es durch sein Eigengewicht unter hydrostatischem Druck p_{fl} :

$$p_{fl} = \rho_{fl} \cdot g \cdot z, \quad (3)$$

wobei g die Gravitationskonstante, z die Höhe der Fluidsäule und ρ_{fl} die Dichte des Fluids sind. Dieser hydrostatische Druck ist etwa zwei bis drei Mal geringer als der

lithostatische Druck (p_{lith}), da die Gesteine 1,5 bis drei Mal dichter (ρ_{lith}) als Fluide sind:

$$p_{\text{lith}} = \rho_{\text{lith}} \cdot g \cdot z. \quad (4)$$

Befinden sich fluidundurchlässige Gesteinsschichten über einem fluidhaltigen Gesteinskörper, wird das Fluid eingeschlossen und p_{fl} nähert sich ρ_{lith} an. Es entsteht folglich ein hydrostatischer Überdruck, der besonders beim Anbohren gefährlich werden kann. Der Porenflüssigkeitsdruck p_{fl} wirkt in alle Richtungen und verringert die Normalspannung auf Klüften oder Verwerfungen. Diese Eigenschaft führt zur effektiven (Normal-) Spannung:

$$\sigma_{\text{n,eff}} = \sigma_{\text{n}} - p_{\text{fl}}, \quad (5)$$

und mit Gleichung (2) ergibt sich:

$$\sigma_{\text{s}} = c + \mu_{\text{s}}(\sigma_{\text{n}} - p_{\text{fl}}) = c + \mu_{\text{s}}\sigma_{\text{n,eff}}. \quad (6)$$

Mit Fluiddruck reicht somit eine geringere anliegende Scherspannung als im fluidfreien Fall aus, um ein bruchhaftes Versagen zu verursachen. Dieser Prozess wirkt besonders auf die bereits existenten, tektonisch vorgespannten Verwerfungen und kann dort Erdbeben triggern.

Ein anderer physikalischer Bruchmechanismus geht auf den britischen Ingenieur Alan Arnold Griffith zurück und beschreibt Neubrüche in Gesteinen. Griffith fand heraus, dass an Defekten oder Inhomogenitäten in Materialien enorme Spannungskonzentrationen auftreten können, die dann zum Bruch führen. Solche Heterogenitäten, zum Beispiel Korngrenzen oder Risse, sind in natürlichen Gesteinen sehr vielfältig enthalten. Eine wichtige Größe ist die maximale Spannung σ_{max} an den Enden eines Risses. Dazu hat sich ein von Griffith entwickeltes Modell für Materialermüdungen bewährt, das einen Riss zum Beispiel als flaches, langgestrecktes Ellipsoid mit einer langen Achse L und der kurzen Achse l beschreibt (Abbildung 4). Damit folgt:

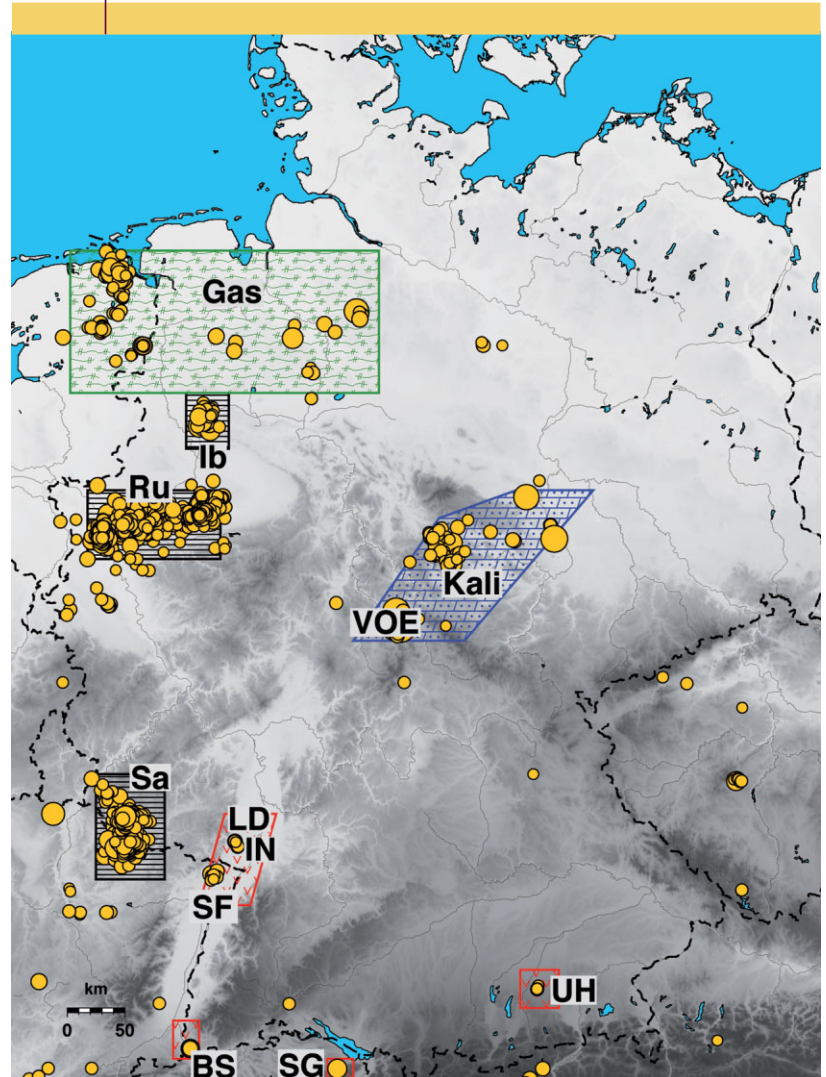
$$\sigma_{\text{max}} = \sigma \left(1 + \frac{2L}{l} \right). \quad (7)$$

Der Term $(2L/l)$ beträgt zum Beispiel 10 für $L = 5l$ und 40 für $L = 20l$. Das heißt, dass Fluidinjektionen in langen Rissen oder ähnlichen Defekten große Spannungskonzentrationen erreichen können, wodurch das Gestein aufreißt. Dieser Mechanismus kann besonders die Neubildung von Rissen in Gesteinen fördern. Das sogenannte Hydraulic Fracking nutzt gezielt diesen Mechanismus des hydraulischen Zerbrechens, um eine Öl- oder Gasförderung effizienter zu machen oder einen unterirdischen Wärmetauscher zur geothermischen Energieerzeugung zu erweitern.

Arten induzierter Seismizität

Induzierte Erdbeben werden nach ihren Ursachen unterschieden (Abbildungen 4A bis F). Dabei bewirken drei phy-

ABB. 1 | MENSCHENGEMACHTE ERDBEBEN

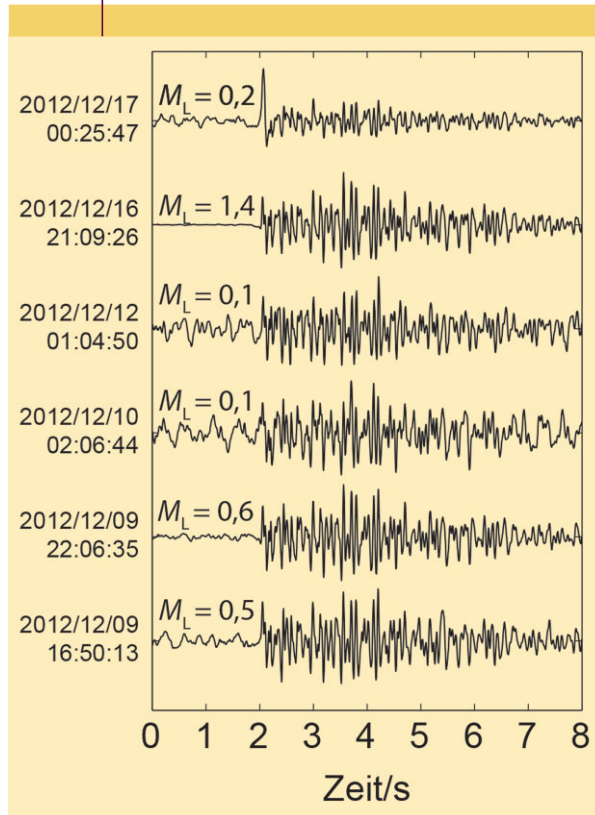


Karte mit induzierten Erdbeben ($M_L \geq 2$) in Deutschland und anliegenden Gebieten (1950-2013). Steinkohlereviere: Ib – Ibbenbüren, Ru – Ruhrgebiet, Sa – Saargebiet; Geothermieprojekte: BS – Basel, LD – Landau, IN – Insheim, SF – Sultz-sous-Forêts, SG – St. Gallen, UH – Unterhaching. Das stärkste Beben ereignete sich 1989 bei Völkershäusen (VOE, $M_L \approx 5,6$). Datengrundlagen: [8–10] sowie eigene Recherchen.

sikalische Mechanismen das Überschreiten einer kritischen Spannung relativ zur Gesteinsfestigkeit. In Hohlräumen kann die Decke aufgrund der Schwerkraft kollabieren, wenn die Festigkeit des Gesteins überschritten wird (A). Solche Kollapsbeben treten in Bergbaugebieten wie den Steinkohlereviere des Saar- und Ruhrgebiets auf. Beim Kammerpfeiler-Abbau (B), beispielsweise im Kalibergbau in Mitteldeutschland (Abbildung 1), zerbersten bei zu kleiner Dimensionierung die Pfeiler durch die Auflast, wobei große Grubenfelder einbrechen können. Beim Bergschlag unter Völkershäusen am 13. März 1989 versagten auf einer Fläche von 6,8 km² rund 3200 Pfeiler und verursachten mit $M \approx 5,6$ das bisher stärkste induzierte Erdbeben in Deutschland [3].

Eine zweite Möglichkeit, induzierte Seismizität zu erzeugen, ist eine Spannungsänderung im Untergrund durch

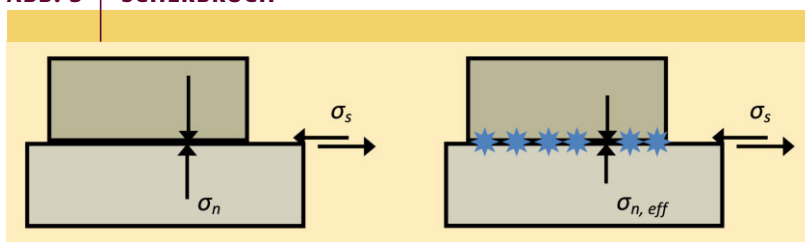
ABB. 2 | MIKROBEBEN DURCH GEOTHERMIE



Seismogramme sechs verschiedener induzierter Mikrobenen mit Lokalmagnituden $M_L = 0,1$ bis $M_L = 1,4$ in etwa 5 km Entfernung von einem geothermischen Reservoir. Aufgetragen ist hier die Bodenschwing-Geschwindigkeit der Vertikal-Komponente des Bebens über die Zeit. Man beachte die hohe Ähnlichkeit der Wellenformen für verschiedene Bebenstärken. Die Amplituden jedes Seismogramms sind auf den jeweils maximalen Ausschlag normiert.

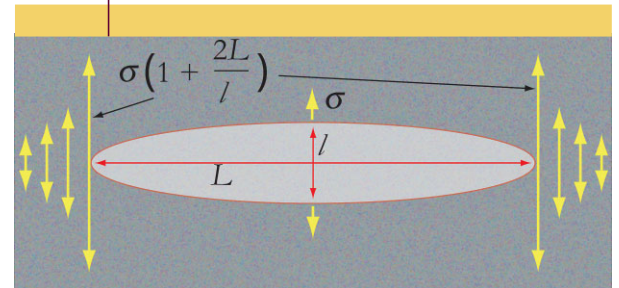
Massentransport. Dabei wird die vertikale Spannungskomponente im Gebirgskörper zum Beispiel durch Rohstoffabbau, also Gesteins- oder Fluidentnahme, verringert (C) oder beispielsweise durch Befüllen eines Stausees erhöht (D). Druckentlastungen an großen Tagebauen können heftige Erdbeben ($M > 4$) bewirken. Eine Studie zum Erdbeben von 2011 bei Lorca in Spanien mit einer Stärke von $M \approx 5,1$ und neun Toten macht die massive Grundwasserentnahme der

ABB. 3 | SCHERBRUCH



Links: Normalspannung σ_n und Scherspannung σ_s zwischen zwei Gesteinskörpern. Rechts: Natürlich vorkommendes oder künstlich injiziertes Fluid reduziert σ_n zu einer effektiven Normalspannung $\sigma_{n,eff}$.

ABB. 4 | SPANNUNG AM RISS



Das Modell von Griffith beschreibt einen Riss als langgestreckten, ellipsoidförmigen Hohlraum, an dessen Enden sich Spannungen aufbauen (gelbe Pfeile). Die Spannung direkt am jeweiligen Ende beschreibt Gleichung (7).

Landwirtschaft für das Auslösen dieses Bebens verantwortlich.

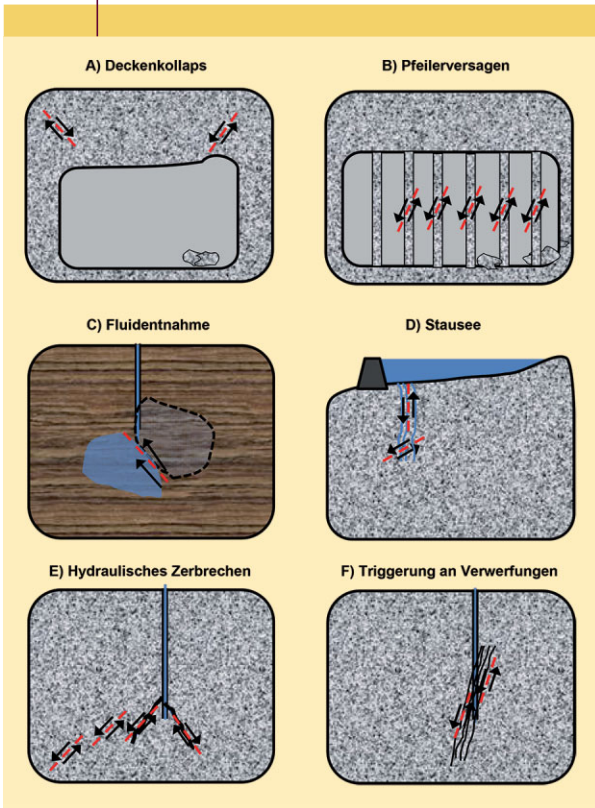
Erdgas- und Erdölförderungen können ebenfalls induzierte Beben verursachen, in Norddeutschland wurden bereits Magnituden von mehr als 4 erreicht. In den Niederlanden gab es in der Region von Groningen Schadensbeben durch die Gasförderung. Die Folge sind massive Proteste der Anwohner und ein derzeitiger Stopp des weiteren Ausbaus der Förderung. Dass das Auftreten von Erdbeben mit der Füllhöhe von Staudämmen korreliert, ist seit langem bekannt (D) [4]. Es ist jedoch nicht eindeutig geklärt, ob die zusätzliche Auflast auf den Gebirgskörper oder das Eindringen von Fluiden in den Untergrund jeweils entscheidend sind.

Fluidinjektionen und -bewegungen umfassen die dritte Ursache induzierter Seismizität (E und F). Das Verpressen von toxischen Abwässern oder die Reinjektion von Fluiden, die bei der Erdgas- und Erdölförderung mit an die Erdoberfläche gepumpt werden, kann wegen der Änderung des Porenwasserdrucks in tektonischen Bruchzonen in mehreren Kilometern Tiefe Erdbeben auslösen (Abbildung 3 rechts). Fluidinjektionen mit hohem Druck von mehr als 100 MPa werden angewandt, um das Gebirge aufzubrechen, damit die hydraulische Leitfähigkeit zunimmt (E). Mit diesem Hydraulic Fracking werden Wege für Schiefergas oder geothermale Fluide geschaffen.

Die Entsorgung von toxischen Abwässern nahe Denver (USA) im Jahr 1967 zum Beispiel löste Beben mit einer maximalen Magnitude von etwa 5,4 aus. 2006 sorgte die Reservoirstimulation für geothermische Energie in Basel für Erdbeben bis $M \approx 3,4$, und das Fracking in British Columbia in Kanada verursachte 2014 und 2015 Beben bis $M \approx 4,4$.

Eines der heftigsten induzierten Erdbeben ereignete sich 1967 in Indien am Konya-Staudamm mit $M \approx 6,3$. Als Folge waren rund 200 Tote zu beklagen [4]. Vermutlich wurde es wie schon diskutiert durch Spannungsänderung durch Auflast und die Infiltration einer Verwerfungszone mit aufgestautem Wasser ausgelöst. Gerade bei Staudämmen können ungünstige Verhältnisse zusammenkommen. Flussläufe bil-

ABB. 5 | SZENARIEN



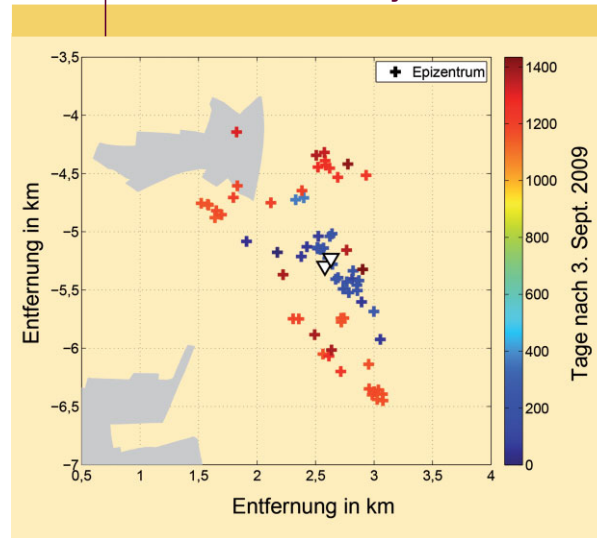
Szenarien zu menschengemachten Spannungsänderungen im Erdinneren. Die schwarzen Pfeile zeigen Scherspannungen an den rot skizzierten Bruchlinien. A) Deckenkollaps in einem Hohlraum, einem Abbaugang. B) Bruchhaftes Versagen bei Kammer-Pfeiler-Abbau. C) Entlastung einer Bruchfläche durch Fluidentnahme. D) Vertikale Spannungsbelastung durch aufgestautes Wasser hinter einem Staudamm, das durch Fluidinfiltration zusätzlich die Normalspannung reduziert. E) Hydraulische Stimulation des Untergrunds durch Hochdruck-Injektion (Hydraulic Fracking). F) Triggern einer vorgespannten Scherzone durch Fluidinjektion.

den sich bevorzugt an geologisch-tektonischen Schwäche-zonen. Der Fluideintrag kann dort bereits existierende Verwerfungen in der Erdkruste reaktivieren, das Aufstauen des Wasserreservoirs kann zusätzlich die vertikale Spannungs-komponente kritisch verändern.

Anwendungsmöglichkeiten

Aus Sicht der Wissenschaft und Wirtschaft können induzierte Erdbeben grundlegende Daten zum Ablauf von dynamischen Prozessen im Erdinneren liefern. Die berechneten Orte der induzierten Erdbeben erlauben die Verortung eines Bruchvorgangs in einem Raum, der nicht direkt zugänglich oder erfassbar ist. Die Verpressdrucke bei Fluidinjektionen, bei denen ein Versagen des Gesteins einsetzt, ergeben Hinweise auf die Gesteinsfestigkeit und Spannungsverhältnisse im Erdinneren. Ermittelt man die Geometrie und die Bewegungsrichtung der Bruchfläche, dann kann man hieraus den Spannungszustand bestimmen. Da

ABB. 6 | BEBEN DURCH FLUIDINJEKTION



Zeitliche und räumliche Verteilung von Epizentren mit $M_L = 0,5$ bis $M_L = 2,4$ um eine Fluidinjektion (Dreiecke) im September 2009. Die induzierten Erdbeben ereignen sich mit zunehmender Zeit immer weiter entfernt vom Bohrloch, was die Ausbreitung des Fluids widerspiegelt. Die Nordwest-Südost-Ausrichtung der Bebencluster entspricht der Ausrichtung bekannter Verwerfungen in der oberen Erdkruste. Besiedlungen sind grau hinterlegt.

MAGNITUDE: MASS FÜR DIE ERDBEBENSTÄRKE

Als Maß für die Stärke von Erdbeben wurde die Magnitude eingeführt, für ihre Skala sind verschiedene Definitionen gebräuchlich. Der Magnitudenwert wird aus den Amplituden der Seismogramme bestimmt, die vom weltweiten Netz der Erdbebenmessstationen aufgezeichnet wird.

Die Richter-Skala als älteste Magnitudenskala geht auf Charles Francis Richter zurück, der sie in den 1930er-Jahren zur Quantifizierung kalifornischer Erdbeben entwickelt hat. Er fand einen logarithmischen Zusammenhang zwischen dem Maximalaus-schlag im Seismogramm und der Entfernung vom Epizentrum. Allerdings beschränkt sich die Richter-Skala auf seismische Wellen, die sich größtenteils durch die Erdkruste ausbreiten. Deshalb ist sie nur bis maximal etwa 1000 km Entfernung vom Epizentrum anwendbar, weshalb sie auch lokale Skala heißt, mit M_L als Magnitudensymbol.

Heute werden verschiedene Magnitudenskalen verwendet (siehe „Internet“ auf S. 32). Je nach Skala berück-

sichtigen sie seismische Oberflächenwellen, die entlang der Erdoberfläche verlaufen, Raumwellen, die sich durch das Innere des Erdkörpers ausbreiten, oder das Abklingverhalten der Erdbebenwellen.

Da die Amplituden der Erdbebenwellen bei sehr starken Beben saturieren, wurde die Momenten-Magnituden-Skala (M_W) entwickelt, auch das in diesem Artikel meist verwendete M entspricht ihrer Definition. Sie basiert auf dem seismischen Moment, einem Skalarprodukt aus der Größe der Bruchfläche im Untergrund, der mittleren Verschiebung der Gesteinsblöcke und dem Schermodul des Gesteins. M_W repräsentiert also die physikalischen Eigenschaften des Bruchs. Der Vorteil: Das seismische Moment erreicht selbst bei schwersten Beben keine Sättigung. Auch für diese Beben liefert die Momenten-Magnituden-Skala somit einen interpretierbaren Zahlenwert. Bei leichten bis mittleren Erdbeben entsprechen ihre Zahlenwerte in etwa denjenigen anderer Magnitudenskalen.

Ort und Zeitpunkt der bruchmechanischen Reaktion bei Fluidinjektionen bekannt sind, können gezielte Beobachtungsexperimente erfolgen, die bei sporadisch auftretenden natürlichen Erdbeben nicht möglich sind.

Ein Beispiel ist die wissenschaftliche Kontinentale Tiefbohrung (KTB) in der Oberpfalz, in der mehrfach Injektionsexperimente bis in 9 km Tiefe erfolgten. Diese weltweit einmaligen Experimente haben zum grundlegenden Verständnis des Spannungszustandes in der Erdkruste beigetragen. Es wurde nachgewiesen, dass Teile der Erdkruste unter einem kritischen Spannungszustand stehen. Das heißt, dass relativ kleine Spannungsstörungen ausreichen, um (Mikro-)Erdbeben zu induzieren [5].

In der Reservoirgeophysik sind das Monitoring und die Lokalisierung von induzierten Ereignissen essentielle praktische Werkzeuge, Vorgänge in mehreren Kilometern Tiefe zu visualisieren (Abbildung 6). Auf diese Weise kann man die Riss- oder Fluidausbreitung sowie die Permeabilität oder den Spannungszustand in Reservoirs bestimmen. Das sind wichtige Parameter für die Rohstoffförderung [6].

Auswirkungen

Beeinträchtigungen wie unerwünschte Bodenbewegungen oder gar Schäden durch induzierte Erdbeben müssen als Preis für die Rohstoffgewinnung gesehen werden. In den Steinkohlerevieren (Abbildung 1) nahm die Bevölkerung diese Auswirkungen meist hin, da sie früher durch sichere Arbeitsplätze kompensiert wurden. Allerdings ändert sich diese traditionelle Einstellung derzeit. 2008 führte ein Schadensbeben mit $M = 4$ sogar zur kompletten Einstellung der Steinkohleförderung im Saarland. Schon die schwachen induzierten Erdbeben an manchen Geothermie-Kraftwerken [7] sorgen heutzutage für heftige Diskussionen darüber, ob man bereit ist, auftretende Erschütterungen für diese erneuerbare Energieerzeugung in Kauf zu nehmen.

Die größten Gefahren kommen aber durch große Staudambauten in Gebieten mit erhöhter natürlicher Seismizität, zum Beispiel im Himalaya. Dort kann man das Triggern eines Starkbebens nicht ausschließen, wobei ein Großstaudamm komplett versagen und weitere, beträchtliche Schäden verursachen kann. Generell sind aktuelle Energieerzeugungskonzepte – sei es Wasserkraft, Geothermie oder

Fracking – sowie das in der Öffentlichkeit viel diskutierte Verpressen von flüssigem CO_2 im Untergrund – die CCS-Technologie – mit der Problematik induzierter Erdbeben verknüpft. Deshalb wird dieses Themenfeld zukünftig vermehrt in den Fokus geophysikalischer Forschung rücken.

Zusammenfassung

Mit induzierter Seismizität bezeichnet man Erdbebenprozesse, die durch äußere, meist menschliche, Eingriffe in den Untergrund verursacht werden. Die zunehmende Nutzung von Bodenschätzen hat weltweit zu vermehrter induzierter Seismizität geführt. Auch Deutschland ist davon betroffen. Besonders Fluidinjektionen in die Erdkruste, etwa beim Hydraulic Fracking, können direkt Bruchvorgänge erzeugen. Sie können zudem auf Verwerfungen stärkere Erdbeben auslösen, wenn tektonische Spannungszustände dies begünstigen. Entscheidend ist hierbei, dass der Porendruck des Fluids die stabilisierende Normalspannung auf einer Verwerfungsfläche reduziert und bruchhaftes Versagen fördert. Ein künstlicher Fluideintrag in das Gebirge kann daher zum Hebel für getriggerte Erdbeben werden, die deutlich spürbar sind.

Stichworte

Menschengemachte Erdbeben, induzierte Seismizität, getriggerte Erdbeben, Öl- und Gasförderung, Bergbau, Geothermie, bruchhaftes Versagen, Fluidinjektion, Hydraulic Fracking.

Literatur

- [1] W. Ellsworth, *Science*, **2013**, 341, 142.
- [2] K.M. Keranen et al., *Science*, **2014**, 345, 448.
- [3] G. Leydecker, *Z. angew. Geol.*, **1998**, 44, 22.
- [4] H. Gupta, *Earth-Science Reviews*, **2002**, 58, 279.
- [5] M.D. Zoback & H.-P. Harjes, *J. Geophysical Research*, **1997**, 102, 18477.
- [6] S.A. Shapiro & C. Dinske, *Geophysical Prospecting*, **2009**, 57, 301.
- [7] J.C. Groos et al., *Bauingenieur*, **2013**, 88, 347.
- [8] G. Leydecker, *Erdbebenkatalog für Deutschland*, E. Schweitzerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart 2011.
- [9] www.seismo.ethz.ch/prod/catalog/index
- [10] www.knmi.nl/nederland-nu/seismologie/aardbevingen

Autor



Joachim Ritter studierte Geophysik an der Universität Karlsruhe (TH), heute Karlsruher Institut für Technologie (KIT), wo er 1996 an der Fakultät für Physik promovierte. Nach Forschungstätigkeit und Habilitation an der Universität Göttingen kehrte er 2002 nach Karlsruhe zurück und leitet nun den Forschungsbereich Seismologie am Geophysikalischen Institut des KIT.

Anschrift

Priv.-Doz. Dr. Joachim Ritter, Karlsruher Institut für Technologie, Geophysikalisches Institut, Hertzstr. 16, D-76187 Karlsruhe, www.gpi.kit.edu, joachim.ritter@kit.edu

INTERNET

Erklärung der verschiedenen Magnitudenskalen
www.seismo.ethz.ch/silva_ethz/ETH/erdw/seismo/seismo/edu/FAQ/index#magtypen

Aktuelle Erdbeben-Info
geofon.gfz-potsdam.de/eqinfo/list.php