

Konzeptionelle Ansätze zur Überwachung induzierter Seismizität im Oberrheingraben in Rheinland-Pfalz

JOACHIM R. R. RITTER

Kurzfassung: Im Rahmen einer nachhaltigen Energie- und Rohstoffversorgung wird in Zukunft die Nutzung regionaler Georessourcen verstärkt. Hierfür werden auch zunehmend unterirdische Räume einbezogen, die durch Bergwerke oder Bohrungen zugänglich gemacht werden. Der Oberrheingraben in Rheinland-Pfalz ist hierfür ein interessanter Standort, da dort Erdöl, geothermische Wärme und Speichergesteine für Fluide und Gase vorkommen. Bergmännische Eingriffe in den tiefen Untergrund sind häufig mit dem Auftreten induzierter – d.h. menschlich verursachter – Seismizität verbunden, die meist unterhalb der menschlichen Spürbarkeitsgrenze bleibt. Wenn die Spürbarkeitsgrenze überschritten wird, dann ergeben sich Akzeptanzprobleme und bei stärkeren Ereignissen können auch wirtschaftliche Schäden eintreten. Daher ist eine rechtzeitige Entwicklung von leistungsfähigen Überwachungskonzepten notwendig, um eine transparente Überwachung und eventuelle Gegensteuerung bei zunehmender induzierter Seismizität zu erreichen. Wichtige Elemente sind die kontinuierliche präzise Datenakquisition und Analyse in Echtzeit sowie eine transparente, offene und langfristige Messdatenspeicherung. Die Überwachung und wissenschaftliche Analyse induzierter Seismizität sind Voraussetzungen, um eine Wirtschaftlichkeit der Förderung von tiefen Georessourcen und deren Akzeptanz in der Bevölkerung zu erreichen.

Das Ministerium für Umwelt, Verbraucherschutz und Forsten des Landes Rheinland-Pfalz hatte diese Studie unterstützt. Diskussionen mit vielen Kollegen haben zur Entwicklung wichtiger Gedanken beigetragen, besonders danken möchte ich Herrn Dr. R. Fritschen, Herrn Dr. J. Groos und Herrn Geologierat B. Schmidt. Die Karten wurden mit GMT (WESSEL & SMITH 1998) erstellt.

Abstract: In the future the utilisation of regional georesources will increase to provide us with a sustainable supply of energy and mineral resources. The exploitation of these georesources will lead to an increase of deep mining and drilling activities worldwide. Especially the state of Rhineland-Palatinate, SW Germany, is an interesting region for such deep mining, because there are oil, geothermal heat and also porous sediment layers which can serve as caverns for fluids and gas. However, deep mining activities are often related to man-made or induced seismicity. This means that small seismic events start or increase to occur due to the intervention into the natural tectonic stress regime. Typically these events are below human perception. In case such events are above a certain level of perception, they will derogate the acceptance of deep mining activities by the local population. Stronger events can even cause damage. Therefore, it is necessary to develop efficient monitoring concepts which will allow a transparent monitoring procedure or even help one to introduce countermeasures against perceptible induced seismicity. I argue that the principal elements for such a monitoring procedure are continuous and precise data acquisition and data analysis, both in real-time, as well as a transparent, open and long-term data storage. Such a monitoring system and accompanying research on induced seismicity are requirements to achieve economic efficiency and acceptance by the population for the exploitation of valuable underground resources.

Inhalt

1. Hintergrund
 2. Zielsetzungen für die Überwachung induzierter Seismizität
 3. Hochauflösendes seismologisches Netzwerk
 4. Folgerungen
- Schriften

1. Hintergrund

1.1. Seismotektonik des Oberrheingrabens

Der Oberrheingraben ist eine 320 km lange tektonische Dehnungs- und Senkungsstruktur, die sich von Basel bis Frankfurt erstreckt (Abb. 1). Die ersten Absenkungen begannen vor zirka 45 Millionen Jahren (Ma) im Miozän, die stärksten Absenkungen ereigneten sich vor zirka 40 bis 20 Ma (LGB 2005). Strukturell sind die Absenkungen als Halbgräben ausgeprägt, deren Hauptabschiebungsflächen entlang des Oberrheingrabens alternierend am westlichen und östlichen Grabenrand liegen (DERER et al. 2005). Die Gräben sind mit Sedimenten gefüllt, deren Schichtmächtigkeiten entlang des Oberrheingrabens stark variieren, wobei die mächtigsten Sedimentabfolgen auf der Seite der Hauptabschiebung abgelagert wurden (DOEBL 1974). Neben den tiefreichenden Hauptabschiebungen, die entlang den Grabenschultern verlaufen und vermutlich tief in den kristallinen Sockel reichen, existieren parallel verlaufende, schräg dazu einfallende, sogenannte antithetische Verwerfungen und viele untergeordnete Verwerfungssysteme, die meist auch grabenparallel angelegt sind (MEIER & EISBACHER 1991). Insgesamt ist der tiefe sedimentäre und kristalline Untergrund des Oberrheingrabens von Verwerfungssystemen unterschiedlicher Größenska-

len durchzogen. Der Nachweis von Verwerfungen in den jüngsten Sedimentschichten (WIRSING et al. 2007) zeigt, dass die tektonische Entwicklung im Oberrheingraben noch anhält. Dies wird auch durch die rezente Seismizität belegt (siehe unten). Die Verwerfungssysteme stellen potentielle Wegsamkeiten für Fluide dar, welche je nach örtlicher Situation gewünscht oder störend bei der Nutzung des Untergrunds sind. Die Verwerfungssysteme sind auch potentielle Bruchflächen bei Erdbeben, da sie als vorgeschwächte Zonen des Gesteinskörpers reaktiviert werden können.

Die Erdkruste des Oberrheingrabens ist in das natürliche Spannungsfeld der globalen Plattentektonik eingebettet, wobei die regionale maximale horizontale Hauptspannung in NNW-SSE (150°) Richtung zeigt (MÜLLER et al. 1997). Die regionalen tektonischen Spannungen werden von lokalen Spannungen im Zusammenhang mit der Abschiebungstektonik des Grabens überlagert. Hierbei ergeben sich verschiedene bevorzugte Bruchmechanismen (PLENEFISCH & BONJER 1997). Wenn die Festigkeit des Gesteins oder die Haftreibung auf den Verwerfungsflächen überschritten werden, dann verursachen die anliegenden Spannungen im Gebirge die natürliche Erdbebenaktivität (Abb. 1).

1.2. Tiefer Bergbau im Oberrheingraben

Die Sedimente des Oberrheingrabens enthalten vielfältige Rohstoffe. Im tieferen Bereich (einige 100 m bis etwa 2 km Tiefe) sind kohlenwasserstoffhaltige Reservoirs, d.h. die Erdöl- und Erdgasfelder des Oberrheingrabens bedeutsam (SCHAD 1962, MESSNER & BRINKMANN 2010). Die vermehrte Öl- bzw. Gasförderung ist angesichts neuer Auffindungen und steigender Rohstoffpreise geplant bzw. schon im Aufbau befindlich (Speyer) und wird in Zukunft auch für derzeit noch unrentable Reservoirs wieder wirtschaftlich attraktiver. Das Potential unkonventioneller Erdgas-Lagerstätten ist hier noch nicht ausreichend erforscht.

Die weiteren Entwicklungen bzgl. der unterirdischen Speicherung von CO₂ (CCS-Technologie: carbon dioxide capture and storage) könnten theoretisch auch die Region Oberrheingraben einbeziehen, wobei die Speicherpotentiale im Norddeutschen Becken erheblich größer und wirtschaftlicher als im Oberrheingraben sind. Eine besondere potentielle Energiequelle stellt die Geothermie dar: Eine großräumige geothermische Wärmeflussanomalie mit einem Maximum von bis zu 150 mW/m² im Raum Landau ermöglicht die Auffindung relativ hoher Temperaturen in vergleichsweise geringen Teufen (zirka 150°C in 3 km Tiefe) (HURTIG et al. 1991). Die oben skizzierten Verwerfungsflächen können hierbei als natürliche Wegsamkeiten für Fluide bzw. großflächige Wärmetauscher wirken. Erste geothermische Kraftwerke sind bereits in Betrieb (Landau, Bruchsal und Riehen), in Vorbereitung (Insheim und Soultz sous-Forêts) oder in Planung (Schaidt, Brühl, Dierbach, etc.). Eine weitere Nutzung des tiefen unterirdischen Raumes erfolgt durch Speicher, in denen beispielsweise Erdgas gelagert wird (Frankenthal und Stockstadt) (SEDLACEK 2000).

Tiefe bergbauliche Eingriffe beeinflussen potentiell das lokale Spannungsfeld und somit die Seismizität. Nachgewiesen sind entsprechende induzierte Ereignisse im Umfeld der geothermischen Versuchsanlage in Soultz sous-Forêts und des Kraftwerks bei Landau (Abb. 2). In Basel führten sie zum Abbruch eines geothermischen Vorhabens.

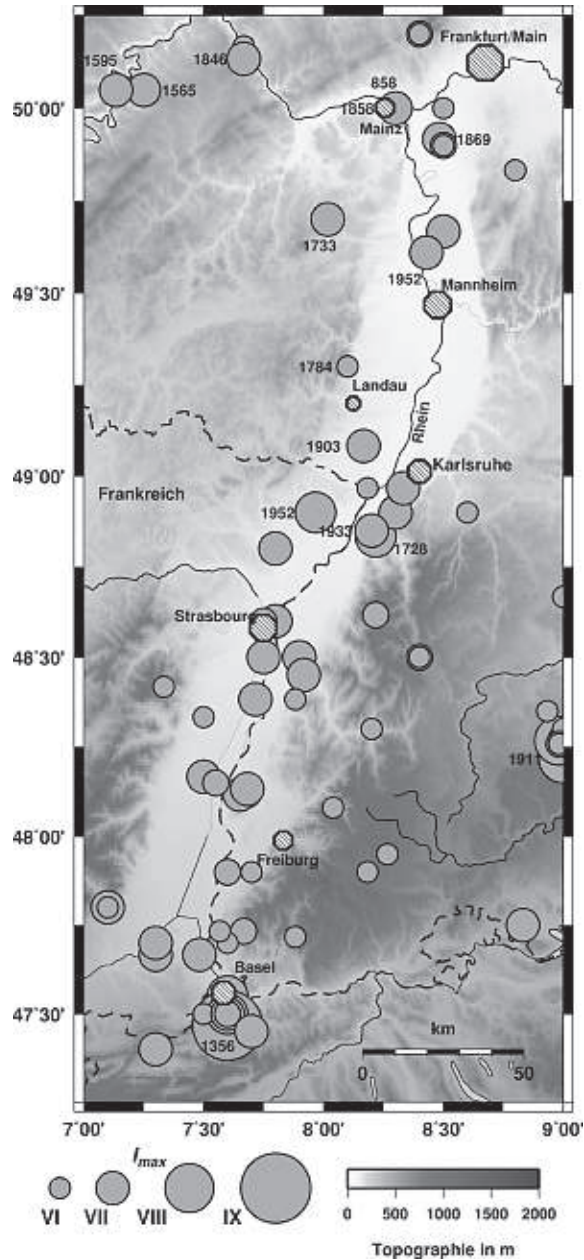


Abb. 1: Der Oberrheingraben, seine Umgebung und die Epizentren von Schadensbeben seit 800 n. Chr. Die Erdbeben ab Intensität VI sind dem Katalog von LEYDECKER (2009) entnommen, bei ausgewählten Erdbeben ist deren Jahreszahl angegeben.

1.3. Natürliche und induzierte Seismizität im Oberrheingraben

Die natürliche Seismizität des Oberrheingrabens ist als schwach bis moderat zu bezeichnen, für Deutschland stellt der Oberrheingraben aber neben der Niederrheinischen Bucht, dem Bereich Albstadt und dem Vogtland eines der vier bekannten Erdbebengebiete dar. Im Jahre 1356 ereignete sich bei Basel ein Erdbeben mit der Momentenmagnitude $M_W \sim 6,7$ bis $7,1$ bzw. der Maximalintensität XIII (FÄH et al. 2009). Dieses Ereignis ist das heftigste historisch bekannte Erdbeben in Mitteleuropa. Die Karte in Abb. 1 zeigt die historische (ab 800 n. Chr.) Seismizität basierend auf dem Katalog von LEYDECKER (2009). Es wurde hier als minimale Intensität (I) der Wert VI gewählt wurde, da ab $I \sim VI$ Gebäudeschäden auftreten und solche Erdbeben sicher beobachtet werden, d.h. entsprechende historische Quellen werden als zuverlässig eingeschätzt. Die Verteilung der Epizentren mit ($I \geq VI$) ist relativ gleichmäßig entlang des Oberrheingrabens mit der Ausnahme des Großraums Basel, wo eine deutliche Häufung zu beobachten ist. Der Bereich von Rheinland-Pfalz zeigt keine besondere Auffälligkeit bzgl. der Seismizität mit $I \geq VI$.

In Abb. 2 wird die instrumentell erfasste Seismizität nach dem Katalog der Landeserdbebenregistrierung (nun Erdbebendienst Südwest) im Bereich des mittleren und nördlichen Oberrheingrabens im Zeitraum 2001 bis 2010 gezeigt. Die Lokalmagnituden M_L sind meist unter 3; das stärkste Erdbeben mit $M_L = 3,4$ ereignete sich im Dezember 2010 unter Mainz. Eine besondere regionale Häufung ist für den Zeitraum 2000 bis 2010 nicht sichtbar, wenn man die Region um Landau ausspart (siehe unten). Analysen der instrumentell erfassten Seismizität zeigen über längere Zeiträume, dass Seismizität im südlichsten Oberrheingraben am häufigsten auftritt, am zweithäufigsten im nördlichsten Oberrheingraben und am geringsten im Mittleren Oberrheingraben (BONJER et al. 1984, BARTH & RITTER 2009). Im Oberrheingraben treten Blattverschiebungen und Extensionsbrüche auf (PLENEFISCH & BONJER 1997), wobei die Extensionsbrüche auf ein Andauern der Grabenbildung hinweisen können (RITTER et al. 2009).

Anthropogen verursachte oder induzierte Seismizität spielt im Oberrheingraben bisher keine bedeutende Rolle. Die bekannten Ereignisse fanden an geothermischen Anlagen statt: Basel (2004 massive Reservoir-Stimulierung durch Fluidinjektion), Soultz sous-Forêts (verschiedene Fluidinjektionen), Insheim (Stimulierung durch Fluidinjektion) und Landau (Stimulation und Betrieb) (Abb. 2). Man beobachtet induzierte Seismizität sowohl während der initialen Stimulationsphase als auch während der Betriebsphase. Hierbei kann Seismizität an Orten auftreten, wo bisher wenig natürliche Seismizität bekannt war, bzw. es ergeben sich lokale Häufungen (Abb. 2). Kleine geothermische Anlagen mit hydrothermaler Energiegewinnung (Riehn, Bruchsal) blieben bisher ohne beobachtete Seismizität. Die Art der geothermischen Nutzung (petrothermal, hydrothermal, hot-dry-rock, etc.) ist ein wichtiger Aspekt bezüglich induzierter Seismizität, da in unterschiedlicher Weise die Festigkeit, das Spannungsfeld und der Fluidhaushalt im Gebirge betroffen sind (MAJER et al. 2007). Insgesamt sind die Häufigkeit und Stärke induzierter seismischer Ereignisse im Oberrheingraben deutlich geringer als in beispielsweise in Regionen mit untertägigem Steinkohlebergbau (BISCHOFF et al. 2009). Seismische Ereignisse im Zusammenhang mit der Kohlenwasserstoff-Förderung oder Gasspeicherung sind im Oberrheingraben bislang nicht bekannt.

Die physikalischen Ursachen der induzierten Seismizität sind teilweise bereits verstanden (siehe SHAPIRO et al. 2010 und Verweise dort). Induzierte Seismizität wird beim tiefen Bergbau vor allem durch folgende Prozesse erzeugt: a) Einsturz von Hohlräumen (z.B. Steinkohle- und Steinsalzabbau), b) Entspannungsbrüche durch Gebirgsabtrag (z.B. bei großen Steinbrüchen), c) Aufbrechen von Gestein durch Einpressen von Wasser unter hohem Druck (z.B. während der Stimulati-on von Reservoiren zur Schaffung von Wegsamkeiten für Reservoirfluide oder -gase) und d) Reduktion der Normalspannung auf präexistenten Bruchflächen durch die Erhöhung des Porendrucks auf Grund eingebrachter Fluide. Im letzten Fall können natürlich anliegende Scherspannungen (z.B. durch tektonische Prozesse) einen plötzlichen Versatz von Gebirgsblöcken bewirken – hierbei spricht man von ausgelösten oder getriggerten Erdbeben.

1.4. Stand der derzeitigen seismischen Überwachung

Die Überwachung der Seismizität im Bereich des Oberrheingrabens wird auf Grund seiner Grenzlage von vier Institutionen wahrgenommen: Schweizer Erdbebedienst (SED), Nationale Erdbebenüberwachung Frankreichs (RéNaSS), Hessischer Erdbebedienst (HED) und gemeinsamer Erdbebedienst Südwest der Länder Baden-Württemberg (LED) und Rheinland-Pfalz (LER). Weitere Messstationen gehören zum Deutschen Seismologischen Regionalnetz (GRSN), das von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) koordiniert wird. Die BGR misst seit Herbst 2009 mit der Station LDAU bei Landau (Abb. 2), zusätzliche Messstationen werden von Betreibern geothermischer Anlagen und temporär von Forschungseinrichtungen unterhalten. Eine einheitliche oder gar koordinierte gemeinsame Überwachung mit diesen heterogenen Stationsnetzen besteht nicht.

Die Messnetze der Erdbebedienste an den Geologischen Landesämter dienen der Landesüberwachung bzgl. spürbarer Erdbeben und Schadensbeben sowie zur schnellen Information im Krisenfall. Typische Stationsabstände der Registriereinheiten betragen 30 bis 60 km. Im Bereich des Erdbebedienstes Südwest wird die Seismizität sehr präzise und in Echtzeit beobachtet, ausgewertet und gemeldet. Die Magnituden-Vollständigkeit beträgt zirka $M_L \sim 2$, wobei auch viele schwächere Erdbeben detektiert werden. Innerhalb des Oberrheingrabens in Rheinland-Pfalz betreibt der Erdbebedienst Südwest bisher keine Messstation (Abb. 2). Die dort auftretende natürliche Seismizität kann im Rahmen der Aufgabenstellung gut mit den Messstationen auf den Grabenschultern überwacht werden, wobei Daten der Station LDAU von der BGR ergänzend verwendet werden.

Wegen fehlender Messstationen innerhalb des Oberrheingrabens (und beschränkten personellen Ressourcen) haben die Erdbebedienste keine ausreichende Datenbasis für eine verlässliche Überwachung von induzierter Seismizität mit $M_L < 2$ nach den unten vorgeschlagenen Kriterien. Es ist daher dringend geboten, ein Beobachtungsnetzwerk bezüglich tiefer bergbaulicher Aktivitäten grundlegend neu zu konzipieren, um eine hohe Auflösung hypozentraler Parameter zu erzielen.

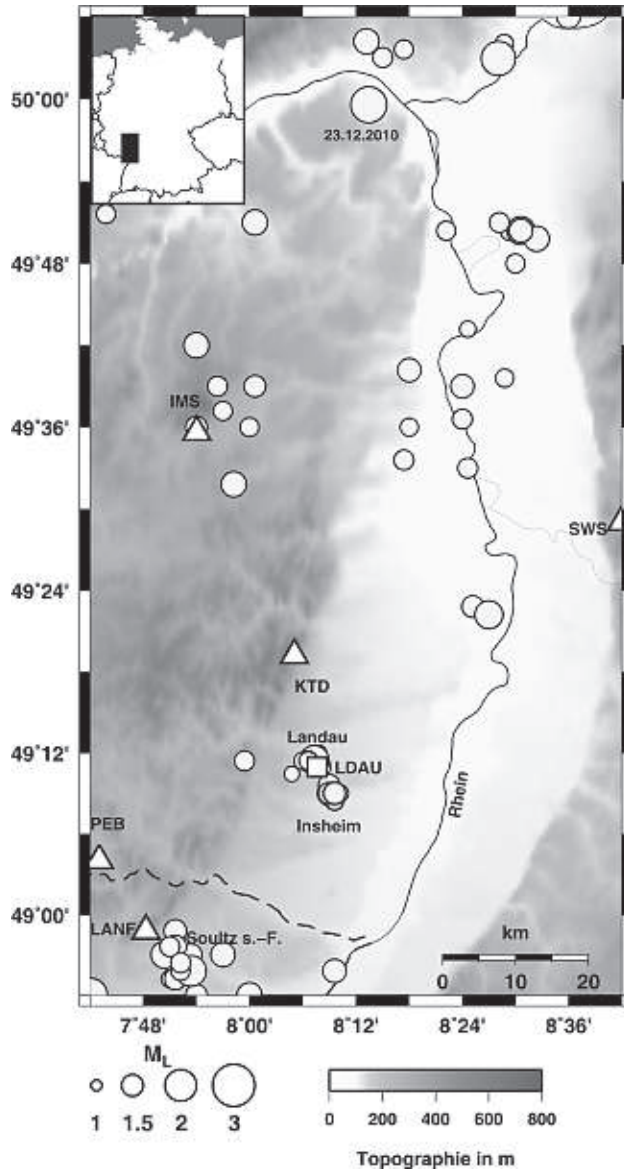


Abb. 2: Der Oberrheingraben und seine Seismizität in der Dekade 2001 bis 2010 nach dem Katalog der Landeserdbebenregistrierung Rheinland-Pfalz. Die Messstationen des Erdbebendienstes Südwest sind als Dreiecke dargestellt (IMS, KTD, PEB und SWS). LDAU wird z.Z. von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) und LANF von französischer Seite betrieben. Die Erdbeben bei Soultz sous-Forêts, Landau und Insheim ereigneten sich direkt an tiefen bergbaulichen Einrichtungen.

1.5. Zukünftige Überwachung induzierter Seismizität

Die obigen Ausführungen zeigen, dass der Oberrheingraben für tiefe bergbauliche Aktivitäten sehr interessant ist und hierdurch bereits eine erhöhte seismische Aktivität stattfindet. Zudem ist das tektonische Inventar und somit die Verteilung potentieller Bruchflächen sehr komplex. Eine hochauflösende Echtzeit-Überwachung der Seismizität im Oberrheingraben ist wegen der oben genannten, zunehmenden bergbaulichen Aktivitäten dringend erforderlich, da eine Zunahme der induzierten Seismizität zu erwarten ist. Die Umsetzung der Überwachung erfordert technische, gesetzliche und regulatorische Maßnahmen sowie begleitende Forschungsarbeiten. Die übergeordneten Zielsetzungen einer seismischen Überwachung sollten erstens eine sichere Planungsbasis für politische und wirtschaftliche Entscheidungsträger und zweitens eine nachvollziehbare, transparente Informationsbasis für die Öffentlichkeit sein.

2. Zielsetzungen für die Überwachung induzierter Seismizität

Die Überwachung induzierter Seismizität kann in zwei Aufgabenbereiche unterteilt werden: Erstens die emissions- oder quellorientierte Überwachung zur Bestimmung der Herdparameter: Hypozentrum, Herdzeit, Herdstärke (Magnitude) und gegebenenfalls Herdmechanismus. Zweitens die immissionsorientierte Überwachung zur Bestimmung der Wirkung, welche aus den emittierten seismischen Wellen resultiert: Maximale Bodenschwing-Geschwindigkeit (ggf. auch -Beschleunigung) und Intensität (nach der European Macroseismic Scale, GRÜNTHAL 1998). Die immissionsorientierte Überwachung beinhaltet vor allem eine Messung der Bodenschwing-Geschwindigkeit nach der DIN 4150, wobei diese nur punktuell erfolgen kann. Solche Messungen können zur Beweissicherung im Falle des Auftretens von Schäden an Infrastruktur verwendet werden und sind gegebenenfalls Teil des Betriebsplans. Traditionell sind die emissions- und immissionsorientierten Überwachungen meist getrennt. Diese Trennung sollte in Zukunft überwunden werden, besonders im Hinblick auf einen effizienten Datenaustausch (siehe unten).

Wegen der Nähe der bergbaulichen Aktivitäten zu Besiedlungen, der flachen Herdtiefen und der wenig kompetenten oberflächennahen Gesteinsformationen des Oberrheingrabens können Erdbeben mit relativ kleinen Lokalmagnituden ($M_L \sim 1,5$) von der Bevölkerung verspürt werden. Eine entsprechende seismische Überwachung muss solche Ereignisse zuverlässig detektieren. Die Analyse schwächerer Ereignisse ($M_L < 1,5$) ist ebenfalls notwendig, um

- Bruchentwicklungen zu rekonstruieren,
- die Ereignisse mit tektonischen Störungen zu korrelieren sowie
- fundierte lokale Gutenberg-Richter-Relationen aufzustellen.

Gutenberg-Richter-Relationen (die Häufigkeit von seismischen Ereignissen als Funktion ihrer Magnitude) werden benötigt, um eine Abschätzung zu erwarten der Maximalmagnituden vorzunehmen (SHAPIRO et al., 2007).

Eine transparente und präzise Echtzeit-Überwachung der induzierten Seismizität im Bereich des Oberrheingrabens soll folgende Kriterien erreichen:

- Echtzeit-Übertragung der Messdaten von den seismischen Messstationen an eine zentrale Einrichtung (Echtzeit bedeutet in diesem Zusammenhang eine Verzögerung)

rung von wenigen Sekunden). Die Einrichtung kann beim Betreiber oder einem Kontraktor angesiedelt sein; zusätzlich sollten die Daten ausgewählter Messstationen an ein öffentliches (staatliches) Datenzentrum übertragen werden.

- Quasi-Echtzeit-Verfügbarkeit (innerhalb weniger Minuten) der seismologischen Wellenformen für interessierte Institutionen wie betroffene Unternehmen, kommerzielle und staatliche Überwachungsdienste, Forschungseinrichtungen etc.
- Automatische Detektion aller potentiell spürbarer seismischer Ereignisse innerhalb einer Minute. Potentiell spürbar sind Bodenschwing-Geschwindigkeiten \dot{u} ab zirka 0,3 mm/s, wobei dies die Scherwelle (S) betrifft (Abb. 3). Eine solche Bewegung entspricht etwa einer Intensität $I \sim 2$. Für flache Erdbeben mit einer Hypozentraltiefe von etwa 1 bis 5 km sowie den wenig konsolidierten Sedimenten im Oberrheingraben bedeutet dies, dass Erdbeben ab Magnitude $M_L \sim 1,5$ potentiell spürbar sind.
- Detektionssicherheit für etwas schwächere Erdbeben, um die richtungsabhängige Abstrahlcharakteristik von Erdbeben zu berücksichtigen und um eine bessere Gutenberg-Richter-Relation aufstellen zu können. Es wird eine Detektionsschwelle von $\dot{u} = 30 \mu\text{m/s}$ vorgeschlagen, um eine Magnitudeneinheit, das entspricht einem Faktor 10 der Verschiebungsamplitude, als Sicherheit abzudecken.
- Automatische Lokalisierung von signifikanten Ereignissen (bei Überschreitung einer vorgegebenen Bodenschwing-Geschwindigkeit von beispielsweise 3 mm/s), um erste Hinweise auf die Ursache der Erschütterungen zu erhalten. Eine folgende manuelle, meist präzisere Bestimmung der Herdparameter im Umfeld (<5 km) bergbaulicher Aktivitäten soll folgende Kennwerte erreichen: Epizentrum-Unsicherheit $<0,5$ km; Herdtiefe-Unsicherheit $<1,5$ km (jeweils 2σ). Im Rahmen dieser Genauigkeiten kann aufgelöst werden, ob sich ein Ereignis in bzw. nahe einem Reservoir ereignet hat.
- Wenn die Ereignisse präzise lokalisiert werden sollen, dann muss die P-Welle erfasst werden (Faktor $\sim 0,2$ zur S-Wellenamplitude, siehe Abb. 3), d.h. $\dot{u} = 6 \mu\text{m/s}$ muss gemessen werden. Um den Ersteinsatz der P-Welle in den Daten eindeutig bestimmen zu können, benötigt man ein Signal/Stör-Verhältnis von mindestens 3 (Abb. 4). Somit darf der Rauschpegel nur in wenigen Fällen kurzfristig den Wert $\dot{u} = 2 \mu\text{m/s}$ überschreiten. Der Rauschpegel an einer Messstation kann beispielsweise über den 95%-Wert aller kontinuierlich gemessenen Amplitudenwerte (I95-Kriterium, siehe Abb. 5) festgelegt werden (GROOS & RITTER 2010).
- Automatische Bereitstellung der Hypozentralparameter per Internet bei signifikanten Ereignissen.
- Automatische Meldung der Hypozentralparameter und einer ersten Einschätzung per SMS, Fax, E-mail an Interessierte (Behörden, betroffene Firmen, Presse, ...) bei signifikanten Ereignissen.
- Erstellung der zeitlichen Korrelation der Seismizität mit Produktionsparametern umliegender bergbaulicher Aktivität (Pumpraten, Pumpdrucke etc.) bei signifikanten Ereignissen, um Gegenmaßnahmen einleiten zu können.
- Seismo-tektonische Analysen wie raum-zeitliche Vor-, Haupt- und Nahbebenanalyse, Herdflächenlösung, 3D Darstellung der Hypozentren in Überschneidung mit bekannten strukturgeologischen Elementen innerhalb weniger Tage nach signifikanten Ereignissen.

- Gegebenenfalls Einrichtung von mobilen Messstationen zur Verdichtung der Beobachtungen (z.B. mit seismischen Kleinststationen, GFZ DSS-Box o.ä.) nach deutlich spürbaren Ereignissen, um Nachbeben zu erfassen.
- Erstellung makroseismischer Karten, evtl. online „ShakeMaps“ etc. bei deutlich spürbaren Ereignissen.

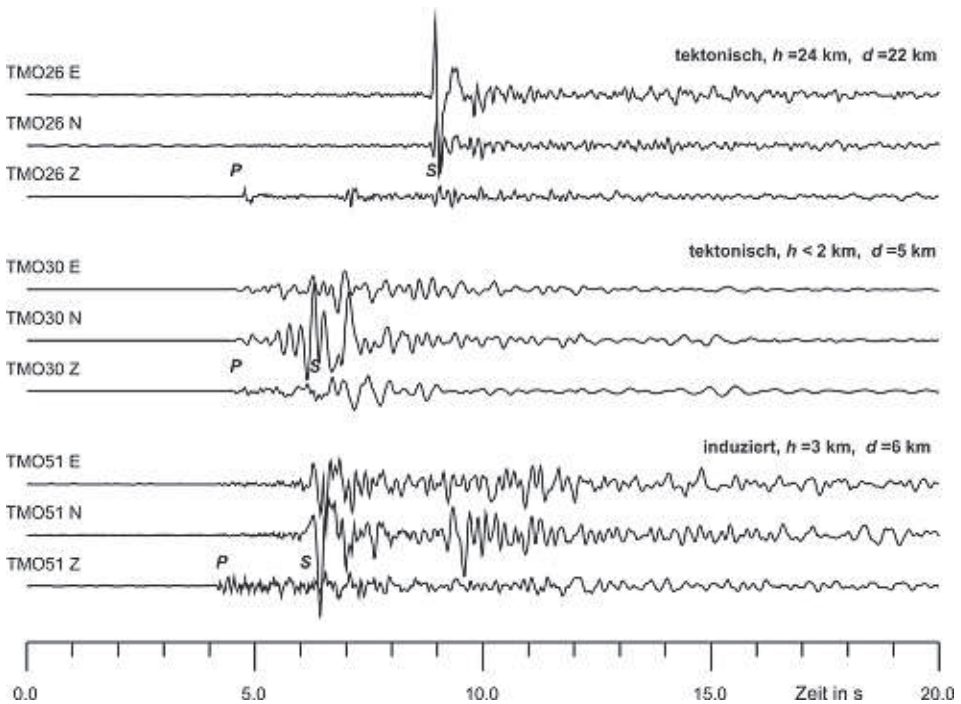


Abb. 3: Registrierungen schwacher Erdbeben ($2,4 < M_L < 2,8$) im Oberrheingraben. Die Wellenformen der Bodenverschiebung zeigen die Variabilität der Seismogramme sowie ihre Charakteristika. Oben werden die Registrierungen eines tiefen ($h = 24$ km) tektonischen Erdbebens gezeigt (Herdentfernung $d = 22$ km; $M_L = 2,8$). Man erkennt den Kompressionswelleneinsatz (P) auf der Vertikalkomponente und den impulsiven Scherwelleneinsatz (S) auf den Horizontalkomponenten. In der Mitte werden Seismogramme eines flachen tektonischen Erdbebens ($d = 22$ km, $M_L = 2,8$) gezeigt, die in diesem Beispiel weniger impulsive P - und S -Phasen aufweisen. Unten befinden sich Registrierungen eines induzierten Erdbebens ($M_L = 2,7$), dessen P - und S -Phasen denjenigen von natürlichen Erdbeben sehr ähneln. Die Amplituden der oberen drei Seismogramme sind um den Faktor 2 gegenüber den restlichen Seismogrammen verstärkt.

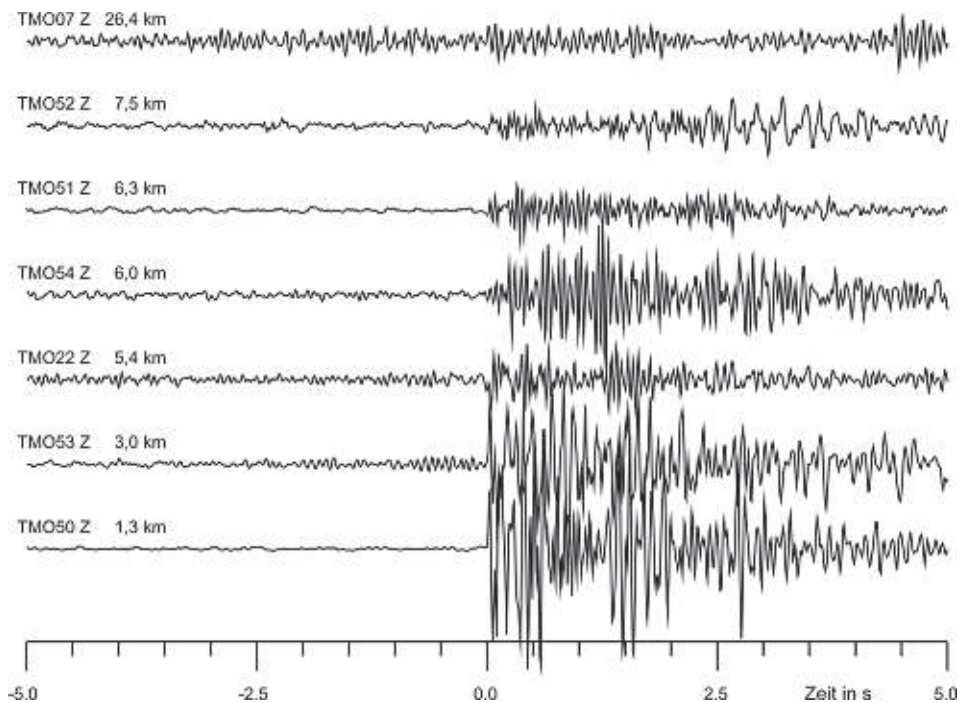


Abb. 4: Registrierungen eines schwachen Erdbebens in verschiedenen Entfernungen zur Verdeutlichung des Signal/Stör-Verhältnisses (SNR) der *P*-Wellenphasen. Im Entfernungsbereich von 5 bis 6 km wird noch ungefähr ein SNR von 3 für den Ersteinsatz erreicht. Die gezeigten Bodenschwing-Geschwindigkeiten der Vertikalkomponente sind einheitlich amplitudenverstärkt.

3. Hochauflösendes seismologisches Netzwerk

3.1. Technische Kennwerte

Um seismische Ereignisse gemäß den oben genannten Zielsetzungen detektieren und lokalisieren zu können, werden mindestens 5 bis 6 Messstationen im Umfeld bergbaulicher Anlagen benötigt (<5 bis 6 km Entfernung). Bei 15 bergbaulichen Einrichtungen (dies entspricht beispielsweise den derzeit geplanten geothermischen Kraftwerken) im Mittleren und Nördlichen Oberrheingraben sind somit etwa 90 bis 120 neue Messstationen, deren Datenübertragung, -prozessing, -auswertung und -speicherung notwendig. Bei einer koordinierten und offenen Überwachung kann die Gesamtanzahl der Messstationen verringert werden (siehe unten).

Folgende technische Kennwerte werden pro Messstation vorgeschlagen:

- 3-Komponenten-Seismometer mit vertikaler, Nord-Süd und Ost-West Ausrichtung und einer breitbandigen Frequenzabdeckung von mindestens 4,5 Hz bis mindestens 40 Hz (in Bohrlöchern bis 80 Hz); tiefere Frequenzen sollten optional registriert werden, da sie bei stärkeren Ereignissen auftreten,
- Abtastrate von 200 Hz, um Nutzsignale bis etwa 80 Hz zu erhalten (unter Berücksichtigung der Antialiasing-Filterung),
- 24-bit analog-digital Wandlung (d.h. ~144 dB Amplitudendynamik),
- Echtzeit-Datenübertragung der kontinuierlichen Wellenformen (24 h, 7 Tage die Woche),
- ungestörte Messstations-Standorte, ggf. in Bohrlöchern, um Bodenschwing-Geschwindigkeiten $\dot{u} \sim 6 \mu\text{m/s}$ mit einem Signal/Stör-Verhältnis (SNR) von mindestens 3 beobachten zu können (Abb. 5). Bei $\text{SNR} > 3$ können Phaseneinsätze im Seismogramm während einer Datenanalyse gut bestimmt werden (Abb. 4).

Diese Kennwerte sind bereits Stand der Technik; entsprechende Instrumente werden von mehreren Herstellern angeboten und die Installation kann mit vertretbarem personellem und finanziellem Aufwand umgesetzt werden. Das Hintergrundrauschen an einem Messstandort sollte vor einer dauerhaften Installation geprüft werden (Abb. 5), um $\text{SNR} > 3$ für eine Welle mit $6 \mu\text{m/s}$ Bodenschwinggeschwindigkeit zu erreichen (siehe beispielsweise BORMANN 1998, GROOS & RITTER 2010). Das Auflösungsvermögen eines Messnetzes kann vor der Installation numerisch modelliert werden, um gegebenenfalls die Stationskonfiguration zu optimieren.

Ausfälle der Registrierung bzw. Änderungen der Registrierqualität sollten automatisch erfasst und schnell beseitigt werden (z.B. System der BGR zur Registrierqualität der GRSN-Stationen, siehe <http://www.szgrf.bgr.de/logmsg/index.html>). Die Datenspeicherung muss in einem anerkannten seismischen Format erfolgen (SEED, miniSEED oder GSE2), um den Datenaustausch zwischen verschiedenen Institutionen reibungslos zu gewährleisten. Die vorhandenen Datenportalsysteme ermöglichen einen effizienten Datenaustausch (z.B. das integrierte seismologische Datenportal WebDC, www.webdc.eu).

Für die Echtzeit-Datenakquisition sowie automatische Bestimmung der Hypozentralparameter und Meldung stehen bewährte Programmpakete zur Verfügung (z.B. ANTELOPE, EARTHWORM oder SEISCOMP3, siehe Beschreibungen im In-

ternet). Die automatische Detektion von Mikroerdbeben mit $M_L < 1$ und geringem Signal/Stör-Verhältnis in besiedelten Gebieten bedarf noch weiterer Forschung.

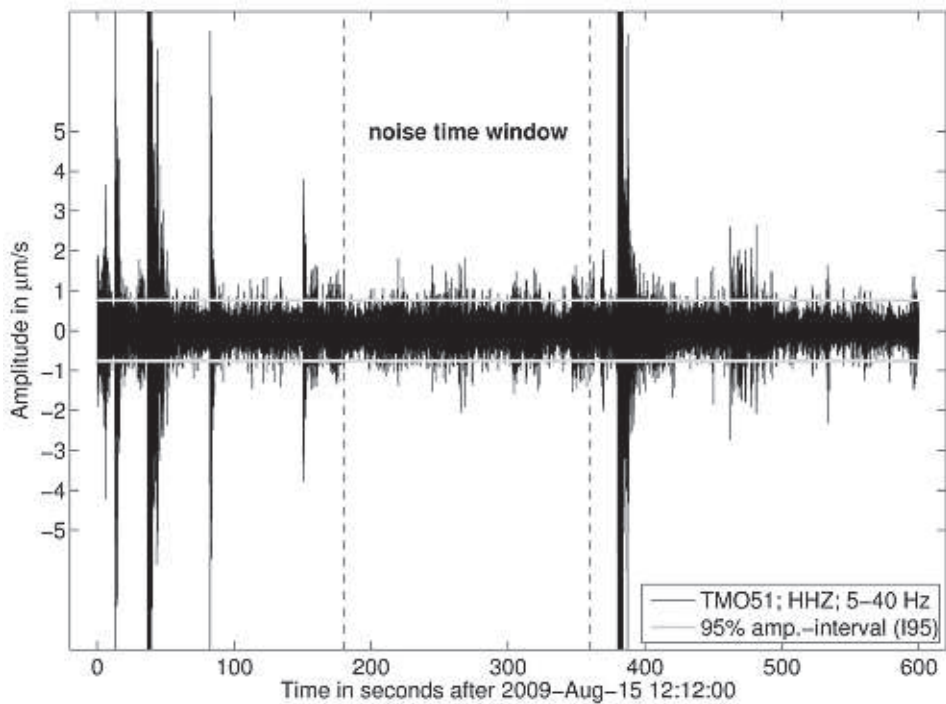


Abb. 5: Darstellung des Amplitudenintervalls I_{95} (zwischen den grauen Linien) zur Evaluierung des Rauschpegels an einer Messstation. Innerhalb I_{95} befinden sich 95% der gemessenen Amplitudenwerte. Transiente Rauschereignisse können diese Amplitude kurzfristig übertreffen. Die größeren, in dieser Darstellung teilweise saturierten Ereignisse sind induzierte Erdbeben. Der Standort TMO51 befindet sich im Oberrheingraben (Oberflächenstation am Ortsrand), I_{95} liegt innerhalb von $\pm 2 \mu\text{m/s}$ (Quelle: Dr. J. Groos, KIT-GPI).

3.2. Seismische Geschwindigkeitsmodelle

Zur Lokalisierung von Erdbeben wird neben den Messdaten der seismischen Überwachungsstationen auch ein präzises und detailliertes Modell der Ausbreitungsgeschwindigkeiten der seismischen Wellen (Kompressions- und Scherwellen) benötigt. In diesem Modell wird die Wellenausbreitung und Laufzeit der seismischen Wellen berechnet. Die Bebenserie bei Landau 2009 zeigte, dass verschiedene seismische Geschwindigkeitsmodelle zu signifikant unterschiedlichen Lokalisierungen führen (Expertengruppe, 2010).

Seismische Geschwindigkeitsmodelle werden mit aktiven Quellen (z.B. Refraktionsseismik, Kalibrierschüsse oder Bohrlochmessungen) bestimmt. Wenn passiv genügend Ereignisse gemessen worden sind, dann ist auch eine gemeinsame Inversion von Herdparametern und seismischen Geschwindigkeiten möglich. Meist werden gemittelte 1D-Geschwindigkeitsmodelle für die Lokalisierung verwendet. Für präzisere Lokalisierungen können individuelle Stations-Laufzeitkorrekturen angebracht werden, die laterale 3D Anomalien berücksichtigen. Wenn genügend Messdaten vorhanden sind, dann sollte versucht werden, ein 3D Modell für die Lokalisierungen zu erstellen. Hierfür können auch die Informationen aus den 3D Strukturmodellen berücksichtigt werden, die schon während der vorbereitenden Explorationsphase erstellt wurden.

3.3. Berücksichtigung nicht-seismischer Parameter zur Überwachung

Neben den seismologischen Parametern sind weitere Kenngrößen der bergbaulichen Produktion notwendig, um den Zusammenhang von Seismizität und tiefem Bergbau zu beschreiben und besser zu verstehen. Die wichtigsten Daten sind hierbei die umgesetzten Fluidmengen (Injektionsraten), Pumpdrucke und Fluidtemperaturen. Um Korrelationen mit der induzierten Seismizität durchführen zu können, müssen diese Kenngrößen in Echtzeit zur Verfügung gestellt werden, um Abhängigkeiten der Seismizität von der Produktion zu finden und steuernd eingreifen zu können.

Generelle quantitative Relationen zur Steuerung sind nicht bekannt, hierfür sind individuelle Kenngrößen für jeden Standort zu erstellen. Ob dies zuverlässig gelingen kann, ist derzeit nicht absehbar und bedarf noch weiterer Forschung, die aber nur an realen Projekten getestet werden kann. Reine Modellierungen können die Unsicherheiten wegen beschränktem Wissen über lokale Reservoirs nicht ausreichend berücksichtigen. Wegen des Einflusses der Fluide auf die Seismizität sollte auch geprüft werden, ob beispielsweise mit weiteren geophysikalischen Methoden wie elektromagnetischer Messverfahren eine Ausbreitung von Fluiden im Gebirge und speziell in Verwerfungen verfolgt und lokalisiert werden kann.

3.4. Empfehlungen zur Umsetzung

Die Koordination und Verantwortlichkeit der seismischen Überwachung muss von einer unabhängigen Einrichtung erfolgen. Diese Einrichtung kann beispielsweise vom Betreiber einer bergbaulichen Anlage beauftragt oder von einer staatlichen Behörde getragen werden. Die Aufgaben einer unabhängigen Überwachungs-Einrichtung wären:

- a) standardisierte Messung nach oben genannten Kriterien,
- b) zentrale, einheitliche und standardisierte Datenverwaltung,

- c) Qualitätskontrolle der Daten,
- d) automatische und manuelle Hypozentralparameter-Bestimmung,
- e) Meldung von seismischen Ereignissen,
- f) Weitergabe der Messdaten an Interessierte.

Eine unabhängige Einrichtung würde für Transparenz bezüglich der seismischen Überwachung sorgen. Besonders geeignet sind hierfür die Erdbebendienstleistungen an den Geologischen Landesämtern in Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Wenn die Nutzung unterirdischer Rohstoffe (z.B. Geothermie) oder Speicher (z.B. CCS) ein erklärter politischer Wille ist, dann sollte bei der staatlichen Förderung entsprechender Wirtschaftszweige auch die personelle und instrumentelle Stärkung der seismischen Überwachung berücksichtigt werden. Die staatlichen Einrichtungen verfügen über:

- a) die notwendigen Fachkenntnisse zum technischen Aufbau einer genannten Überwachung,
- b) die Befugnis dies unabhängig als hoheitliche Aufgabe durchzuführen,
- c) Möglichkeiten diese Aufgaben langfristig ohne Rücksichtnahme auf kommerzielle Gesichtspunkte durchzuführen. Die Langfristigkeit betrifft einerseits die Überwachung im Bereich eines ausgebeuteten Reservoirs welche auch nach Einstellung der Produktion fortgeführt werden muss, da große Zeitkonstanten den Zusammenhang zwischen Fluidbewegungen und der Seismizität steuern. Andererseits muss eine langfristige Datenspeicherung gewährleistet sein.

Als Vorbild einer integrierten seismologischen Registrierung könnte das Deutsche Seismologische Regionalnetz (GRSN) dienen, welches unter dem Dach der BGR die Breitband-Messungen verschiedenster Institutionen zusammenführt (KORN 2003). Die Geologischen Landesämter können mit den Bergämtern koordiniert Maßnahmen absprechen, wenn eine erhöhte seismische Aktivität auftritt. Angepasste gesetzliche bzw. bergrechtliche Regelungen könnten finanzielle Beiträge der Betreiber sowie Maßnahmen beim Auftreten von signifikanten Ereignissen verbindlich festlegen. Entsprechende Vorschriften müssten im Bergrecht neu formuliert werden – auch dies ist möglich, wenn die Nutzung tiefer Georesourcen ein politisches Ziel ist.

Das Modell einer integrierten seismischen Überwachung im Oberrheingraben schafft vorteilhafte Synergien:

- a) Die Betreiber jeder einzelnen bergbaulichen Anlage müssen nicht jeweils ein eigenes Überwachungssystem aufbauen und finanzieren (24-Stunden-Betrieb, 7 Tage in der Woche).
- b) Mit einer geschickten Platzierung der Messstationen können von einer Messstelle aus mehrere aneinander liegende, bergbauliche Anlagen von verschiedenen Betreibern überwacht werden, d.h. die Gesamtanzahl der Messstationen kann reduziert werden.
- c) Ein einheitliches Datenportal für Ämter, Betreiber und Forschungseinrichtungen wird gewährleistet.
- d) Eine transparente seismische Überwachung ist gewährleistet und kann für eine proaktive Öffentlichkeitsarbeit eingesetzt werden.

e) Es wird ein einmaliges Datenarchiv geschaffen, welches die Basis für grundlegende angewandte Forschungsarbeiten bildet.

4. Folgerungen

Bergbauliche Eingriffe in den tiefen Untergrund des Oberrheingrabens können und werden je nach Art des Eingriffs spürbare seismische Ereignisse verursachen. Das erfordert eine entsprechende Überwachung, die für jede Einrichtung gezielt geplant und im Laufe des Betriebs unter Umständen angepasst werden muss. Die Öffentlichkeit und die politischen Entscheidungsträger haben einen Bedarf an schneller und umfassender Information bezüglich auftretender seismischer Ereignisse. Es sollten daher seismische Überwachungssysteme nach dem Stand der Technik und Forschung implementiert werden. Um die Unabhängigkeit der Überwachung zu gewährleisten, muss sie zumindest teilweise von staatlichen Fachbehörden durchgeführt werden. Damit diese unter den neuen Rahmenbedingungen ihre Aufgaben durchführen können, sind personelle und instrumentelle Stärkungen dringend notwendig. Deren Finanzierung können über verschiedene denkbare Kostenmodelle getragen werden: a) Kostenbeteiligung durch die Wirtschaft (die absoluten Kosten der Überwachung sind im Budgetrahmen geplanter geothermischer Energiegewinnungsanlagen oder CO₂-Sequestrierungsanlagen marginal), b) staatliche Subvention von bergbaulichen Maßnahmen, wenn diese ausdrücklich politisch gewünscht sind oder c) Mischfinanzierungen. Hierfür müssen vom Gesetzgeber gegebenenfalls neue Regelungen geschaffen werden, wenn entsprechende bergbaulichen Maßnahmen ein gesellschaftspolitischer Konsens sind.

Strukturpläne zur seismischen Überwachung sollten von Expertengruppen jetzt weiterentwickelt werden, da die folgende gesetzgeberische und technische Umsetzung unterschiedlich große Zeiträume erfordern wird: Formulierung und Verabschiedung neuer regulatorischer, länderübergreifender Maßnahmen, Aufbau von Infrastruktur, Implementierung vorhandener Technologie, Entwicklung neuer technischer Konzepte etc. Die politischen Entscheidungsträger sollten länder- und ämterübergreifend die neue Problemstellung schnell und zielführend angehen.

Der Zusammenhang zwischen bergbaulich verursachten Fluidbewegungen im Untergrund und dem Auftreten, der Ausbreitung und der Magnitude von seismischen Ereignissen ist noch nicht ausreichend bekannt. Aus diesem Grund sollten dringend begleitende Forschungsvorhaben initiiert werden. Wichtige Themen sind:

- Automatische Detektion und Lokalisierung kleinster Ereignisse bei hohem seismischen Rauschen, besonders in urbanen Räumen,
- Maximalmagnituden-Abschätzung,
- Vermeidung von seismischen Krisen,
- Gegensteuerung bei seismischen Krisen.

Die oben vorgeschlagene Überwachung wird für solche grundlegenden Forschungsarbeiten wichtige Daten liefern und auf diese Weise zu datenbasierten Ergebnissen und Modellen sowie weiteren Empfehlungen führen. Ein zentraler Punkt ist hierbei die Verfügbarkeit der Daten: Nur wenn die erhobenen Rohda-

ten frei und vollständig (Instrumenten-Charakteristika etc.) verfügbar sind, kann die Forschung die notwendige Unterstützung leisten. Die Datenverfügbarkeit ist auch in denjenigen Fällen eine notwendige Voraussetzung, in welchen es um die Überprüfung von strittigen Einzelereignissen geht.

Schriften

- BARTH, A. & RITTER, J. (2009): Seismicity pattern and magnitude frequencies of the Upper Rhinegraben. Journées Luxembourgeoises de Géodynamique 95, November 2009, Echternach, extended abstracts, 5 p. PDF: www.ecgs.lu/jlg95-abstracts/.
- BISCHOFF, M. & CETE, A. & FRITSCHEN, R. & MEIER, T. (2009): Coal mining induced seismicity in the Ruhr area, Germany. – *Pure and Applied Geophysics*, **167**, S. 63-75, (Springer) Heidelberg.
- BONJER, K.-P. & GELBKE, C. & GILG, B. & ROULAND, D. & MAYER-ROSA, D. & MASSINON, B. (1984): Seismicity and dynamics of the Upper Rhinegraben. – *Journal of Geophysics*, **55**, S. 1-12, (Springer) Heidelberg.
- BORMANN, P. (1998): Conversion and comparability of data presentation on seismic background noise. – *Journal of Seismology*, **2**, S. 37-45, (Kluwer Acad. Publishers) Dordrecht.
- DERER, C.E. & SCHUMACHER, M.E. & SCHÄFER, A. (2005): The northern Upper Rhine Graben: basin geometry and early syn-rift tectono-sedimentary evolution. – *Int. J. Earth Sci. (Geol Rundschau)*, **94**, S. 640-656, (Springer) Heidelberg.
- DOEBL, F. & OLBRECHT, W. (1974): An isobath map of the Tertiary base in the Rhinegraben. – In: Illies, J.H. & Fuchs, K. (eds): *Approaches to Taphrogenesis*, S. 71-72, (Schweitzerbart) Stuttgart.
- Expertengruppe (2010): Das seismische Ereignis bei Landau vom 15. August 2009, Abschlussbericht, 55 S. http://www.lgb-rlp.de/fileadmin/cd2009/images/content/endbericht_landau/Landau_Endbericht_101103_corr.pdf (9.6.2011).
- FÄH, D. & GISLER, M. & JAGGI, B. & KÄSTLI, P. & LUTZ, T. & MASCIADRI, V. & MATT, C. & MAYER-ROSA, D. & RIPPMANN, D. & SCHWARZ-ZANETTI, G. & TAUBER, J. & WENK, T. (2009): The 1356 Basel earthquake: an interdisciplinary revision. – *Geophysical Journal Inter.*, **178**, S. 351-374, (Wiley-Blackwell) Oxford.
- GROOS, J. & RITTER, J. (2010): Seismic noise: A challenge and opportunity for seismological monitoring in densely populated areas. – In: RITTER, J. & OTH, A. (eds): *Induced Seismicity*. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, **30**, S. 87-97, Luxemburg.
- GRÜNTAL, G. (1998) European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98). – *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie*, **15**, 99 S., Luxemburg, online: <http://edoc.gfz-potsdam.de/gfz/get/1048/0/ab9566eb9f135990e5ca9f-7772be5098/1048.pdf>.
- HURTIG, E. & ČERMÁK, V. & HAENEL, R. & ZUI, V. (1991): *Geothermal Atlas of Europe*. 156 S., (Haack) Gotha.
- KORN, M. (2003): Ten Years of German Regional Seismic Network (GRSN). Report 25 of the Senate Commission for Geosciences. 299 Seiten, (Wiley-VCH) Weinheim.
- LEYDECKER, G. (2009): Erdbebenkatalog für die Bundesrepublik Deutschland mit-Randgebieten für die Jahre 800 bis 2007. Datafile, (BGR) Hannover.

- LGB (Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz)(2005): Geologie von Rheinland-Pfalz. 400 S., (Schweitzerbart) Stuttgart.
- MAJER, E.L. & BARIA, R. & STARK, M. & OATES, S. & BOMMER, J. & SMITH, B. & ASANUMA, H. (2007): Induced seismicity associated with enhanced geothermal systems. – *Geothermics*, **36**, S. 185–222, (Elsevier) Amsterdam.
- MEIER, L. & EISBACHER, H.G. (1991): Crustal kinematics and deep structure of the northern Rhine Graben, Germany. – *Tectonics*, **10**(3), S. 621-630, (American Geophysical Union) Washington.
- MESSNER, J. & BRINKMANN, S. (2010): Erdöl- und Erdgasreserven in der Bundesrepublik Deutschland am 1. Januar 2010. 6 S., 4 Abb., (Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie) Hannover.
- MÜLLER, B. & WEHRLE, V. & ZEYEN, H. & FUCHS, K. (1997): Short-scale variations of tectonic regimes in the western European stress province north of the Alps and Pyrenees. – *Tectonophysics*, **275**, S. 199-219, (Elsevier) Amsterdam.
- PLENEFISCH, T. & BONJER, K.-P. (1997): The stress field in the Rhine Graben area inferred from earthquake focal mechanisms and estimation of frictional parameters. – *Tectonophysics*, **275**, S. 71-97, (Elsevier) Amsterdam.
- RITTER, J.R.R. & WAGNER, M. & BONJER, K.-P. & SCHMIDT, B. (2009): The 2005 Heidelberg and Speyer earthquakes and their relationships to active tectonics in the central Upper Rhine Graben. – *Int. J. Earth Sci. (Geol. Rundschau)*, **98**, S. 697-705, (Springer) Heidelberg.
- SCHAD, A. (1962): Voraussetzungen für die Bildung von Erdöllagerstätten im Rheingraben. – *Abh. geol. Landesamt Baden-Württemberg*, **5**, S. 29-40, Freiburg.
- SEDLACEK, R. (2000): Untertage-Erdgasspeicherung in Deutschland. – *Erdöl, Erdgas, Kohle*, **116**, S. 536-544, (Urban) Hamburg, Wien.
- SHAPIRO, S.A. & DINSKE, C. & KUMMEROW, J. (2007): Probability of a given-magnitude earthquake induced by a fluid injection. – *Geophys. Res. Lett.*, **34** (1-5), L22314, (American Geophysical Union) Washington.
- SHAPIRO, S.A. & DINSKE, C. & LANGENBRUCH, C. & WENZEL, F. (2010): Seismogenic index and magnitude probability of earthquakes induced during reservoir fluid stimulations. – *The Leading Edge*, **29**, S. 304-309, (SEG) Tulsa.
- WESSEL, P. & SMITH, W.H.F. (1998): New, improved version of Generic Mapping Tools released. – *Eos*, **79**, S. 579, Transactions American Geophysical Union, Washington.
- WIRSING, G. & LUZ, A. & ENGESSER, W. & KOCH, A. & ELSASS, P. & PERRIN, J. (2007): Hochauflösende Reflexionsseismik auf dem Rhein und dem Rheinseitenkanal. – *LGRB-Fachbericht 01/07*, 60 S., 32 Abb., 7 Tab., 1 CD-ROM, Freiburg.

Anschrift des Autors:
Privatdozent Dr. Joachim R. R. Ritter,
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Geophysikalisches Institut,
Hertzstraße 16, Gebäude 6.42, D-76187 Karlsruhe;
E-Mail: joachim.ritter@kit.edu .

Manuskript eingegangen am 2.8.2011