Leibniz Online, Nr. 24 (2016)
Zeitschrift der Leibniz-Sozietät e. V.
ISSN 1863-3285

Peter Knoll (MLS)

Induzierte seismische Ereignisse beim Anstieg des Grubenwassers in stillgelegten Bergwerken – Geomechanische Charakteristika

Abstract

Bei der Stilllegung und Sicherung ausgedehnter untertägiger Bergbaufelder nach der Beendigung der Rohstoffgewinnung stellt die Flutung, d.h. der kontrollierte Anstieg des vorher in der aktiven Bergbauphase abgesenkten Grubenwasserspiegels oft die einzige anwendbare Sicherungs- und Verwahrungsmaßnahme dar. Dieser Vorgang ist jedoch bei einigen Grubengebäuden ein höchst komplexer Vorgang, der einige Risiken für die Umwelt und die Sicherheit an der Erdoberfläche in sich birgt. Es ist erforderlich, diese Risiken vorher zu definieren und Möglichkeiten der Beherrschung zu identifizieren.

Der Beitrag widmet sich dem Risiko „flutungsinduzierte Seismizität“, d.h. der Entstehung induzierter seismischer Ereignisse durch den Grubenwasser-Wiederanstieg, die nachteilige Auswirkungen auf die Erdoberfläche haben. Der derzeitige geowissenschaftliche Kenntnisstand lässt die quantitative Modellierung mit rechnerischer Analyse und Vorausberechnung der Verhaltensweise des Gebirgsverbandes von den untertägigen Grubenbauen bis zur Erdoberfläche (noch) nicht hinreichend zu, so dass auf den Prozess begleitende Messungen und Untersuchungen und deren zeitnaher Auswertung (Beobachtungsmethode) zurückgegriffen werden muss. Von entscheidender Bedeutung dabei ist, dass ausreichend aussagekräftige und verifizierte Vergleichsbeobachtungen, die an ähnlichen Flutungsvorhaben gewonnen wurden, zur Bewertung der Beobachtungen zur Verfügung stehen.

Konkret steht derzeit die Flutung des Bergwerkes Saar zur Realisierung an und es werden Bewertungen der damit verbundenen Risiken erforderlich. Für das Risiko „flutungsinduzierte Seismizität“ steht das gut untersuchte und gut dokumentierte Vergleichsvorhaben Flutung der Grubenbaue in der Lagerstätte Schlema/Alberoda im Erzgebirge zur Verfügung. Der Beitrag arbeitet die wesentlichen gebirgsmechanischen Sachverhalte bei diesem Vorhaben u.a. an Hand der publizierten Daten eines komplexen Forschungsvorhabens heraus und zieht Schlussfolgerungen für das Vorhaben Flutung des BW Saar. Für das letztere Vorhaben stehen Daten und bisher gewonnene Untersuchungs- und Messergebnisse, die im Rahmen der Antragstellung für das Genehmigungsverfahren zugänglich sind, zur Verfügung.

Im Ergebnis ergibt sich die Schlussfolgerung, dass sich die Risiken, die mit der flutungsinduzierten Seismizität im BW Saar verbunden sind, eingrenzen lassen und die Restunsicherheiten durch geeignete Maßnahmen beherrscht werden können.

Problemstellung

Die Schließung von Tiefbaubetrieben im Bergbau stellt erhöhte Anforderungen an die nachhaltige Sicherheit der darüber liegenden Erdoberfläche. Das gilt insbesondere für sehr ausgedehnte untertägige Grubengebäude, die außerdem große Tiefen erreichen. In der Zeit des aktiven Bergbaus kommt es unvermeidlich zu differenzierten Senkungen der Erdoberfläche, z.T. zu Erschütterungen, zu Veränderungen im Grundwasserspiegel, z.T. zu Gasaustritten u.a. Auswirkungen. Ein Ziel besteht deshalb darin, die Bergarbeiten so zu führen, dass diese Begleiterscheinungen die öffentliche Sicherheit nicht unvertretbar beeinträchtigen und die Umwelt nicht mehr als öffentlich tolerierbar nachteilig beeinflussen.

Diese Zielstellung gilt ebenso für die Zeit nach der Stilllegung der betreffenden bergbaulichen Anlagen und zwar dauerhaft für alle Zukunft.

In der Gegenwart kommt es vermehrt zur Stilllegung von bergbaulichen Gewinnungsbetrieben, so dass die o. gen. Anforderungen an die nachhaltige Sicherheit und den Schutz der Umwelt zu hoch aktuellen Aufgaben geworden sind, die in den Vordergrund der Aufmerksamkeit der Öffentlichkeit gerückt sind.

Ein Beispiel einer Sicherungsvariante stillgelegter untertägiger Abbaubetriebe, die besonders für ausgedehnte und bis in große Tiefen vorgedrungene Grubenbaue von Bedeutung ist, ist die Sicherung/Verwahrung des Grubengebäudes der Lagerstätte Schlema/Alberoda durch das wieder Ansteigenlassen des beim aktiven Bergbau abgesenkten Wasserspiegels in den untertägigen Grubenbauen und damit im gesamten Gebirgsverband, die sogenannte „Flutung“ der untertägigen bergbaulichen Hohlräume. Die Flutung ist auch in diesem Fall die einzig vertretbare Verwahrungsvariante, sie enthält aber einige Risiken, die im Zuge der Genehmigung dieser Verwahrungsvariante durch die Genehmigungsbehörden sorgfältig untersucht werden mussten. Das Ziel der Untersuchung bestand darin, die Risiken so weit zu minimieren, dass die damit verbundenen Gefährdungen der öffentlichen Sicherheit und der Umwelt das tolerierbare Maß nicht überschreiten.

Im Folgenden soll an Hand dieses Beispiels das Teil-Risiko „Entstehung induzierter seismischer Ereignisse, durch die Flutung untertägiger Hohlräume, die ein Schadenspotential für die Sicherheit an der Erdoberfläche beinhalten“ dargestellt, das Risiko näherungsweise quantifiziert und Möglichkeiten der Beherrschung dieses Risikos aufgezeigt werden.

Es handelt sich dabei um eine bereits abgeschlossene Flutung der Uranerzgrube in der Lagerstätte Schlema-Alberoda im Erzgebirge. Dort sollen allgemeingültige Verhaltensweisen extrahiert, von den nur lokal gültigen Verhaltensweisen separiert und auf die teilweise begonnene bzw. bevorstehende Flutung der stillgelegten untertägigen Steinkohlengewinnungsbereiche im Saarland (Bergwerk Saar) übertragen werden. Beide Grubenbausysteme haben während der Zeit des aktiven Abbaus eine große flächenmäßige Ausbreitung und große Tiefen erreicht; die darüber liegende Erdoberfläche wird intensiv genutzt und die dort lebende Bevölkerung ist u.a. durch die bereits mit dem Abbau zeitweilig verbundene Entstehung von Erschütterungen an der Erdoberfläche (z.T. mit Schadenspotential) sehr sensibilisiert. Bei beiden Gruben fanden während der aktiven Bergbauphase bergbauinduzierte seismische Ereignisse statt und bei der Flutung traten (Schlema/Alberoda) bzw. treten (BW Saar) erneut induzierte seismische Ereignisse auf.

Ausgangspunkte

Ehe die Sachverhalte in beiden Gruben erörtert und analysiert werden, sollen einige allgemeingültige gebirsgsmechanische und seismologische Ausgangspunkte zur induzierten Seismizität zusammengestellt werden. Grundsätzlich kann dabei auf die zusammenfassenden Arbeiten Knoll 2016 und Knoll 2014 und die dort angegebenen weiteren Quellen verwiesen werden.

Durch die laufende Abbautätigkeit induzierte seismische Ereignisse treten in der Regel unter den Bedingungen einer aktiven Wasserhaltung auf, d.h. in den Herdbereichen dieser Ereignisse sind die Poren- und Kluftwasserdrücke (p) in dem die Grubenbaue umgebenden Gebirgsverband $p = 0$. Die Gebirgsspannungen insgesamt entstehen in diesem Fall durch das Zusammenwirken des natürlichen tektonischen Spannungszustandes im Gebirge, des Gewichts des den betrachteten Punkt im Gebirge (z.B. den Herd eines Ereignisses) überlagernden Gebirges und die bergbaubedingten Spannungsumlagerungen, die bei der Hohlraumbildung im Zuge der Gewinnung der Rohstoffe im Abbauprozess entstehen (von thermischen Zusatzspannungen, die in der Lagerstätte Schlema/Alberoda eine Rolle spielen können, soll hier abgesehen werden). Bei nicht abgesenktem Gebirgswasserspiegel tritt zu diesen Spannungskomponenten der Poren- und Kluftwasserdruck p bzw. seine Änderung Δp hinzu.

Man unterscheidet Ereignisse, deren Herde im unmittelbaren Konturbereich der bergbaulichen Grubenbaue (Hohlräume) im dort anstehenden Gebirgsverbund positioniert sind, solche, die im Gebirgsverband abseits der unmittelbaren Grubenbaukonturen entstehen, und solche, deren Herde an Schwächeflächen im Gebirgsverband gebunden sind, wobei die Herde im letztgenannten Fall in Ab-

hängigkeit von konkreten geologisch-tektonischen Bedingungen und der Wasserleitfähigkeit bestimmter Störungen auch in größerer Entfernung von den aktiven Abbaufronten entstehen können.

Die Schwächeflächen werden durch tektonische Störungszonen im Gebirgsverband gebildet, sofern diese Störungszonen eine Scherfestigkeit besitzen, die niedriger liegt als jene des Gebirgsverbandes und ihre Deformationseigenschaften so geartet sind, dass sie in der Lage sind, Deformationsenergie zu speichern, ehe das Versagen eintritt. Die gespeicherte Energie kann zum Zeitpunkt des Versagens der Schwächezone plötzlich freigesetzt werden. Wenn diese Voraussetzungen nicht erfüllt sind, deformieren sich die Schwächeflächen ab dem Zeitpunkt des Versagens aseismisch und die Deformationsenergie wird dabei verbraucht. Sie steht als seismisch abgestrahlte Energie nicht mehr zur Verfügung. Die tektonischen Störungen der ersten Art sind seismogen, die der zweiten Art aseismisch deformierbare Störungen. Von Knoll (Knoll et al., 1978) wurden die Bezeichnungen „potenzielle Schwächeflächen“ für die erste und „ausgeprägte Schwächeflächen“ für die zweite Art tektonischer Störungszonen eingeführt.

Beim Ansteigen des Grubenwasserspiegels nach der Beendigung des Bergbaus finden keine neuen Hohlraumbildungen durch Abbau mehr statt. Die Störung des Spannungszustandes im Gebirge (und damit auch in den potenziellen und ausgeprägten Schwächezonen) wird jetzt nicht mehr durch die abbaubedingte Hohlraumschaffung, sondern durch die mit dem Ansteigen des Grundwasserspiegels zunehmenden Poren- und Kluftwasserdrücke im Gebirgsverband und in den Schwächeflächen bewirkt ($\Delta p > 0$).

In beiden Fällen (aktiver Bergbau und Grundwasseranstieg) werden somit verschiedene Mechanismen bei der Entstehung der (bergbau-)induzierten seismischen Ereignisse wirksam.

Auf einen Umstand soll noch explizit hingewiesen werden: Bergbaubedingte Spannungsänderungen in den potenziellen Herden der induzierten seismischen Ereignisse können nicht nur in der unmittelbaren Umgebung der Abbauräume entstehen, sie können ebenso auch infolge großräumiger bergbaubedingter Spannungsumlagerungen im Gebirge und in seinen Störungszonen entstehen, wenn es zu differenzierter Senkungsentwicklung im Gebirge kommt. Das ist z.B. der Fall, wenn zwischen ausgedehnten Abbaufeldern z.B. Abbaufreibereiche verbleiben oder andere (im Vergleich zu einzelnen Grubenbauen und Grubenbaugruppen) großmaßstäbliche Unregelmäßigkeiten im Gebirgsmassiv durch den Bergbau erzeugt werden. Das ist meist die Folge ungleichmäßig verteilter abbauwürdiger Lagerstättenteile oder anderer Vorgaben für die Abbauentwicklung (z.B. technologischer Art, wegen unterschiedlicher Schutzbedürfnisse an der Erdoberfläche usw.). In den letztgenannten Fällen können induzierte seismische Ereignisse mit größerer zeitlicher Verzögerung und in größerer räumlicher Entfernung von einzelnen Abbaufeldern sowohl während des aktiven Abbaus als auch in der Phase des Grundwasseranstiegs im Zusammenhang mit einer differenzierten großräumigen Senkungsentwicklung im Gebirgsverband entstehen.

Bei der Analyse der Entstehungsbedingungen induzierter seismischer Ereignisse, insbesondere flutungsinduzierter seismischer Ereignisse, ist somit u.U. mit Herdzonen zu rechnen, die in größerer Entfernung von den vorher aktiven Abbaufeldern und mit erheblicher zeitlicher Verzögerung zu den Abbauarbeiten auftreten. Eine Ursache kann ebenso in den besonderen Ausbreitungsbedingungen von Kluftwasserdruck-Änderungen ($\Delta p > 0$) entlang von Störungszonen mit großer Wasserleitungsfähigkeit bestehen. Im Ergebnisbericht des National Research Council (2013) wird mit Blick auf die Entstehung induzierter seismischer Ereignisse bei der Anwendung verschiedener technologischer Verfahren der Energiegewinnung ausdrücklich auf diesen Umstand hingewiesen.

Flutung des untertägigen Grubengebäudes in der Lagerstätte Schlema-Alberoda

Die Uranerz-Lagerstätte liegt am nördlichen Rand des Eibenstocker Granits im Bereich der Ortschaften Schneeberg, Ober- und Niederschlema, Hartenstein und Alberoda. Sie beginnt bei Schneeberg/Oberschlema tagesnah und erreichte bis zum Ende der Abbauarbeiten im Bereich Hartenstein/Alberoda Teufen bis 1800 m. Die Ganglagerstätte ist hydrothermaler Genese, sie entstand in Verbindung mit dem Aufsteigen eines Granitplutons. Das Aufsteigen des Granits führte zum Aufreißen von Spalten im darüber liegenden Gebirge (hier: Schiefer-Deckgebirge genannt), die sich im Bereich auflagernder ordovozischer, silurischer und devonischer Gesteinshorizonte mit

Gangmaterial füllten und zur Mineralisation der sog. Wismut-Kobalt-Nickel-Formation führten. Der Granit fällt im beschriebenen Bereich mit etwa 35-50° in Richtung NNW ein, der erzführende Bereich fällt gleichsinnig, aber steiler ein. Das bedeutet, dass mit zunehmender Teufe die Mächtigkeit der zwischen dem Granit und den erzführenden Horizonten (Schiefer-Deckgebirge) liegenden Schichten abnimmt. Der Abbaubereich nähert sich daher dem Granit und setzt in ungefähr 1800 m Teufe auf den Granit auf (Leonhardt, 1998).

Der Abbau der Uranvorräte begann im Jahr 1946 und wurde im Jahr 1990 eingestellt. Im gleichen Jahr begann, am 02.07.1990, die Flutung; der flutbare Hohlraum wurde auf ca. 36 Mio m³ geschätzt.

In der Zeit des aktiven Abbaus wurden zunehmend mit dem Fortschreiten der Gewinnung in Tiefen unterhalb 1.300m seismische Ereignisse beobachtet (Konietzky, 1990); das stärkste fand am 25. 09. 1979 mit einer Lokalmagnitude M_L = 2,9 statt. Das Hypozentrum dieses Ereignisses war in dem die Lagerstätte kontaktierenden Granitmassiv in einer Tiefe >2.000m zu suchen, in dem keine Abbauarbeiten stattfanden. Der Abbauschwerpunkt lag zu dieser Zeit bei etwa 1.300m (Docekal, et al. 2003). Das zeigte bereits beim Abbau, dass die abbaubedingte Spannungsumlagerung im Schiefer auch im kontaktierenden Granit zu Spannungsumlagerungen führte, die an geeigneten Schwächezonen zu induzierten seismischen Ereignissen führten. Ein weiterer Teil der Ereignisse entstand im unmittelbaren Konturbereich von Grubenbauen sowohl im Granit (Thoma et al., 1969) als auch im Schiefer. Bei der Mehrzahl der Ereignisse lag der Herd im Granit. Die Herde von ca. 30% der georteten Ereignisse lagen nach den Ortungsergebnissen im Schiefer (Docekal, et al. 2003); *„… die Ursache der seismischen Ereignisse im Granit …* [waren] *sekundäre bzw. tertiäre Scherbrüche auf bestimmten in den Granit eintauchenden Strukturen der die hauptsächliche Erzführung der Lagerstätte bestimmenden Kluftsyteme …* " (Docekal, et al. 2003, S. 150).

Aus den Ergebnissen der Analyse der bergbauinduzierten seismischen Ereignisse beim Abbau wurde bereits frühzeitig der Schluss gezogen, dass auch bei der Flutung der untertägigen Grubenräume nach der Stilllegung der Abbauarbeiten mit seismischen Ereignissen zu rechnen ist.

Die Flutung der Grubenräume (1990 bis etwa 2001) wurde aus den genannten Gründen mit umfangreichen seismischen Registrierungen und deren Bewertung (Docekal, et al. 2003) sowie von Forschungsarbeiten (Verbundprojekt, 2014 und Schütz und Konietzky, 2016) begleitet. Das Flutungsvorhaben ist damit eines der am besten untersuchten Projekte dieser Art und hat zahlreiche allgemeingültige Ergebnisse erbracht.

Mit Blick auf die späteren Flutungsvorhaben in anderen Bergbaurevieren sollen hier einige Ergebnisse festgehalten werden:

1. *„Die Flutung … bewirkt in dem durch den Bergbau beanspruchten Gebirge, durch Aufbau von Kluftwasser- und Porendrücken, Versatzverlagerung und Versatzverdichtung erneute Veränderungen im jeweils gegebenen Spannungszustand. Diese Veränderungen sind wiederum verbunden mit entsprechenden Verschiebungen im Gebirge"* (Docekal, et al. 2003, S. 158). Dieser Feststellung ist hinzuzufügen, dass die erwähnten Verschiebungen durchaus auch Gebirgsbereiche erfassen, die sich entfernt von den Abbaufeldern im Hangenden und Liegenden der Abbaufelder befinden und die zu zeitabhängigen Spannungsumlagerungen führen, in deren Folge es auch längere Zeit nach Abschluss der Flutung dort noch zum Versagen auf bestimmten Schwächeflächen bzw. Schwächeflächenabschnitten kommen kann. Wenn die gebirgsmechanischen Eigenschaften dieser Schwächeflächen geeignet sind (potenzielle Schwächeflächen im oben definierten Sinne), muss dort auch längere Zeit nach Ende der Flutung mit seismischen Ereignissen gerechnet werden.

2. Allgemeine Beobachtungen: *„Schwache Ereignisse: … Anteil an den erfassten Gesamtereignissen beträgt über 90%. … Sie sind ± diffus auf den gesamten gebauten Lagerstättenbereich verteilt und werden auch im Schieferpaket geortet… Stärkere seismische Ereignisse:… Der Anteil der stärkeren Ereignisse an der Gesamtzahl der Ereignisse beträgt zum gegenwärtigen Stand < 10 %. … Sie sind lokal begrenzt an einige wenige Strukturen im Granit aber auch im Quarzitschiefer gebunden und traten bisher diskontinuierlich und gehäuft in bestimmten Phasen des Flutungsprozesses auf."*

(Docekal, et al. 2003, s.158)

3. Die Hypozentrentiefe erreicht Werte bis über 2.000m im Granit (Abb.2) und über 1.500m in Schiefer (Abb.3). Hinweis: die in den Abb. 1 bis 3 dargestellten Ereignisse wurden z.T. noch lange Zeit nach dem Ende der Flutung registriert. Die Ursache liegt offensichtlich in den zeitabhängigen Spannungsumlagerungen im Gebirge nach dem Abbau- und dem Flutungsende (Verbundprojekt 2014).

4. Untersuchungen in Verbundprojekt, 2014 haben gezeigt, dass sich die Orientierung (Streichrichtung) der Herdflächen im Flutungsverlauf ändert. Wie Abb. 4 zeigt, nimmt zu Beginn der Flutung die Streichrichtung kontinuierlich ab und ändert sich bei konstantem Flutungspegel scheinbar nicht mehr. Der Sachverhalt kann so gedeutet werden, dass mit zunehmendem Δp weitere Störungen, die die am ungünstigsten orientierten Schwächeflächen mit geringen Abweichungen der Streichrichtung begleiten, zeitverzögert ebenfalls noch in den Grenzzustand geraten.

5. Zur Abschätzung der zu erwartenden Maximalmagnitude der induzierten Ereignisse wurden in Verbundprojekt, 2014 mit verschiedenen Modellen Magnitudenhäufigkeitsverteilungen der flüssigkeitsinduzierten Ereignisse auf der Basis der Datensätze berechnet. Es ergaben sich Maximalmagnituden im Bereich M_L = 1,8 …2,5 (Abb. 5), die etwa um eine Magnitudeneinheit niedriger liegen als die während der aktiven Abbauphase beobachteten bergbauinduzierten seismischen Ereignisse.

6. Weitere Ergebnisse über das sehr gut untersuchte Flutungsvorhaben Schlema/Alberoda liegen in Docecal,2003 und Verbundprojekt,214 auf der Basis detaillierter Untersuchungen und Analysen vor, die für weitere Flutungsvorhaben insbesondere das Vorhaben Flutung des untertägigen Grubengebäudes im Bergwerkes Saar (BW Saar) von sehr großer Bedeutung sind.

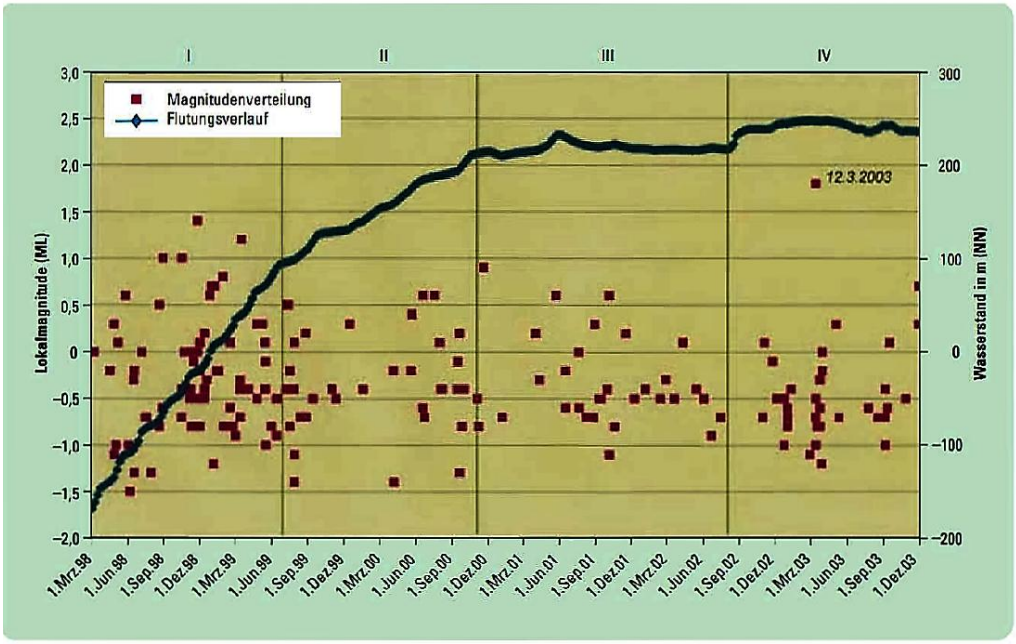

Abb. 1: Darstellung des Flutungsverlaufes und der dabei registrierten seismischen Ereignisse bei der Flutung der Grubenbaue in der Lagerstätte Schlema-Alberoda. Ende 2000 war der maximale Flutungspegel praktisch erreicht. Seismische Ereignisse traten noch mindestens bis Ende 2003 auf; zum maximalen flutungsbedingten Ereignis kam es im Betrachtungszeitraum von Abb.1 am 12.03.2003 (M ≈ 1.8, Herdtiefe 1,9 km), d.h. ca. 3 Jahre nachdem der höchste Flutungspegel praktisch erreicht war (Erdbebenbeobachtung im Freistaat Sachsen, Zweijahresbericht 2002-2003, dort Abb.5)

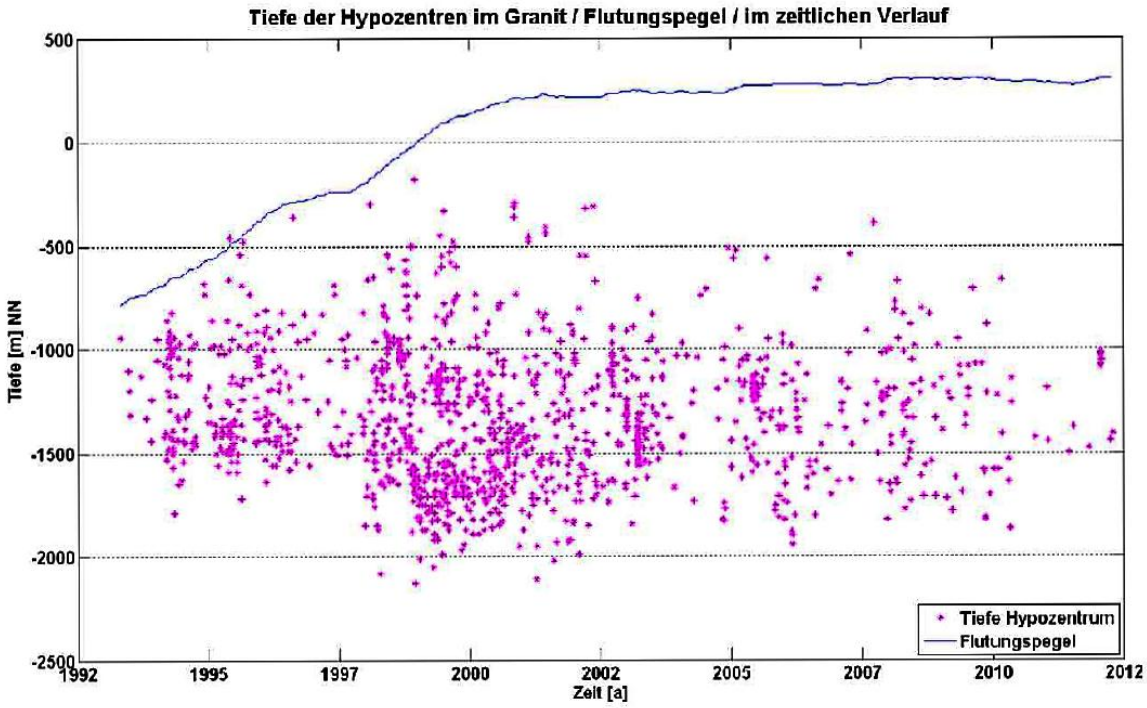

Abb. 2: Zeit-Tiefen-Verteilung der seismischen Ereignisse im Granit und Flutungspegel (entspricht Abb. 5-10 in Verbundprojekt, 2014)

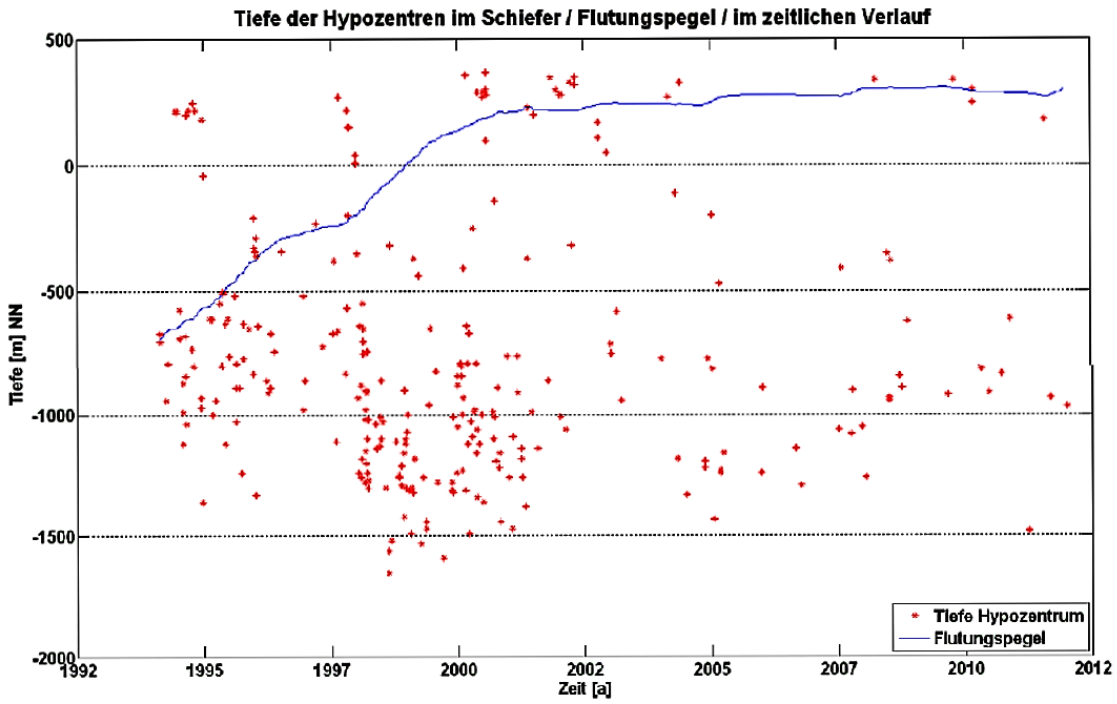

Abb. 3: Zeit-Tiefen-Verteilung der seismischen Ereignisse im Schiefer und Flutungspegel (entspricht Abb. 5-11 in Verbundprojekt, 2014

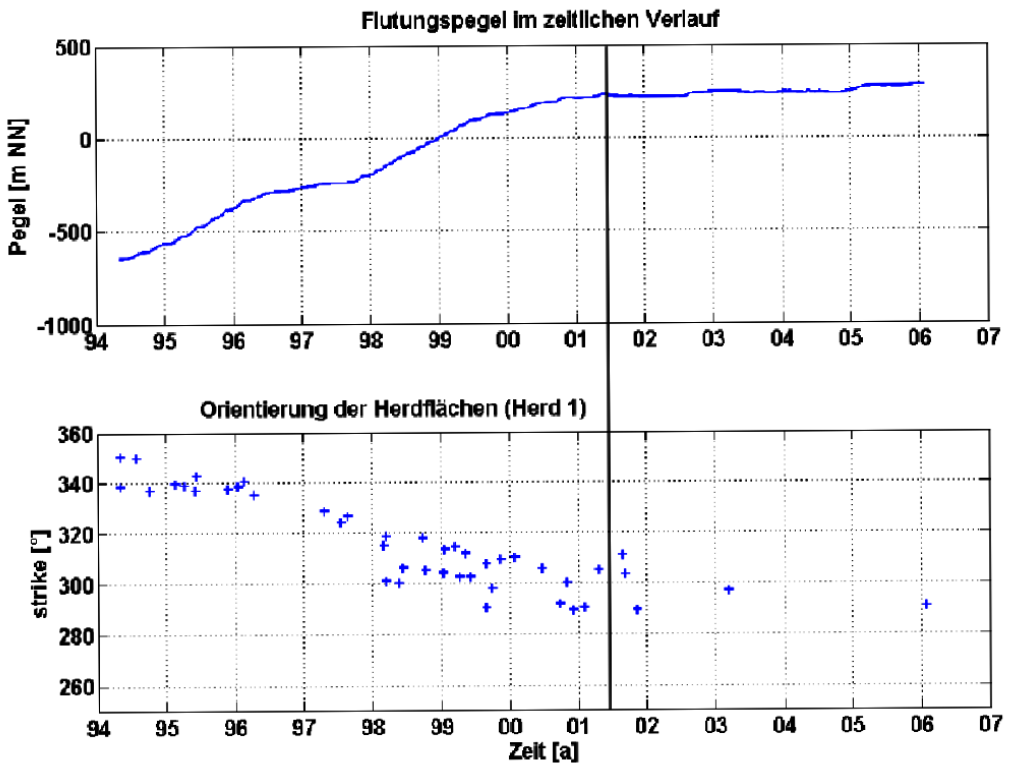

Abb. 4: Orientierungsänderung von Herdflächen eines Herdbereiches im Flutungsverlauf (Verbundprojekt, 2014 Abblidung 5-15)

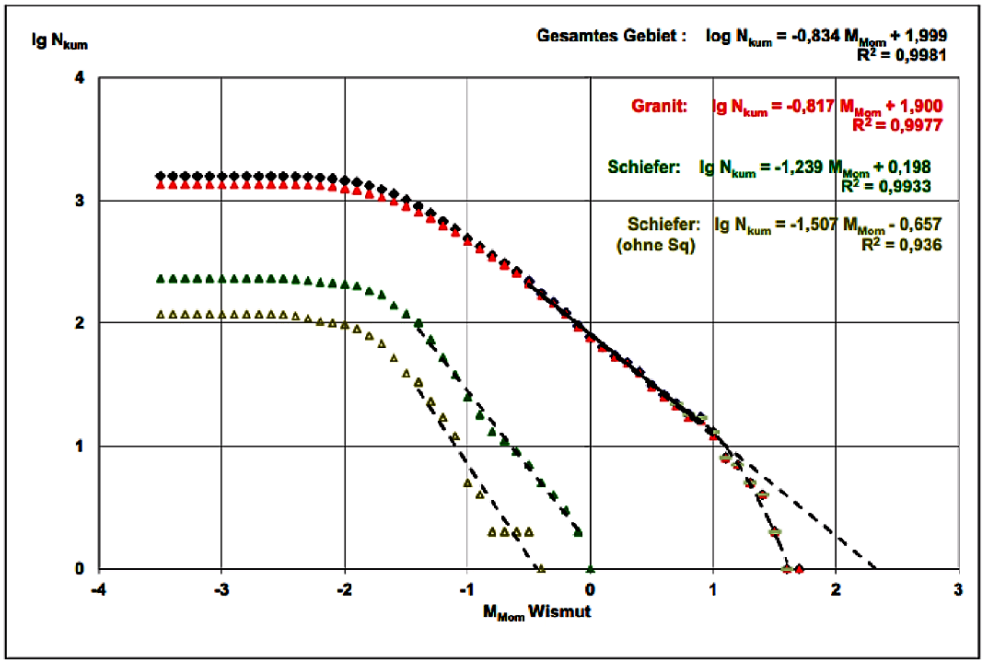

Abb.5: Abschätzung der Maximalmagnitude induzierter seismischer Ereignisse im Bereich der Grube Schlema/Alberoda auf der Basis eines linearen und nichtlinearen Modells der Gutenberg-Richter-Beziehung (Verbundprojekt, 2014, Abb. 5-22)

Flutung des untertägigen Grubengebäudes im Bergwerk Saar

Nach der endgültigen Beendigung der Abbauarbeiten im Bergwerk Saar (BW Saar) am 30.06.2012 plant die RAG AG die Sicherung der untertägigen bergbaulichen Anlagen durch Ansteigenlassen des Grubenwasserspiegels (Flutung) in mehreren Schritten zunächst bis in das Niveau -320mNN in den Wasserprovinzen Reeden und Duhamel (Antrag 2016). Gemessen an der größten bis zur Beendigung der Abbauarbeiten erreichten Abbautiefe von ca. 1.400m entstehen damit ähnlich große Poren- und Kluftwasserdruckanstiege wie in dem oben beschriebenen und bereits abgeschlossenen Vorhaben in der Lagerstätte Schlema/Alberoda (Abb. 6), allerdings in anderer geologischer Umgebung.

Um die dabei zu erwartenden maximalen flutungsinduzierten seismischen Ereignisse abzuschätzen, ist es hilfreich, zunächst auch für dieses Grubengebäude die möglichen gebirgsmechanischen Mechanismen der Entstehung flutungsinduzierter seismischer Ereignisse in ausgedehnten Lagerstätten zu betrachten. Der Abbau der Steinkohlenflöze verlangt zunächst vor dem Beginn der Bergarbeiten die Absenkung des natürlichen Gebirgswasserspiegels bis unterhalb des Abbauniveaus. Dadurch werden auch geologische Störungen, die gebirgsmechanische Schwächeflächen im Gebirgsverband bilden, entwässert und der Kluftwasserdruck sinkt auf p = 0. Da dieser Vorgang vergleichsweise langsam erfolgt, hat er in der Regel stabilisierende Auswirkungen auf die Schwächeflächen. Die durch den nachfolgenden Abbau erzeugten bergbaubedingten Zusatzspannungen wirken dagegen destabilisierend, weil sie die Scherbeanspruchungen in den Schwächezonen erhöhen. Das führt abbaubegleitend wie auch in der Lagerstätte Schlema/Alberoda zu den bekannten bergbauinduzierten seismischen Ereignissen, über die bzgl. des BW Saar umfassend

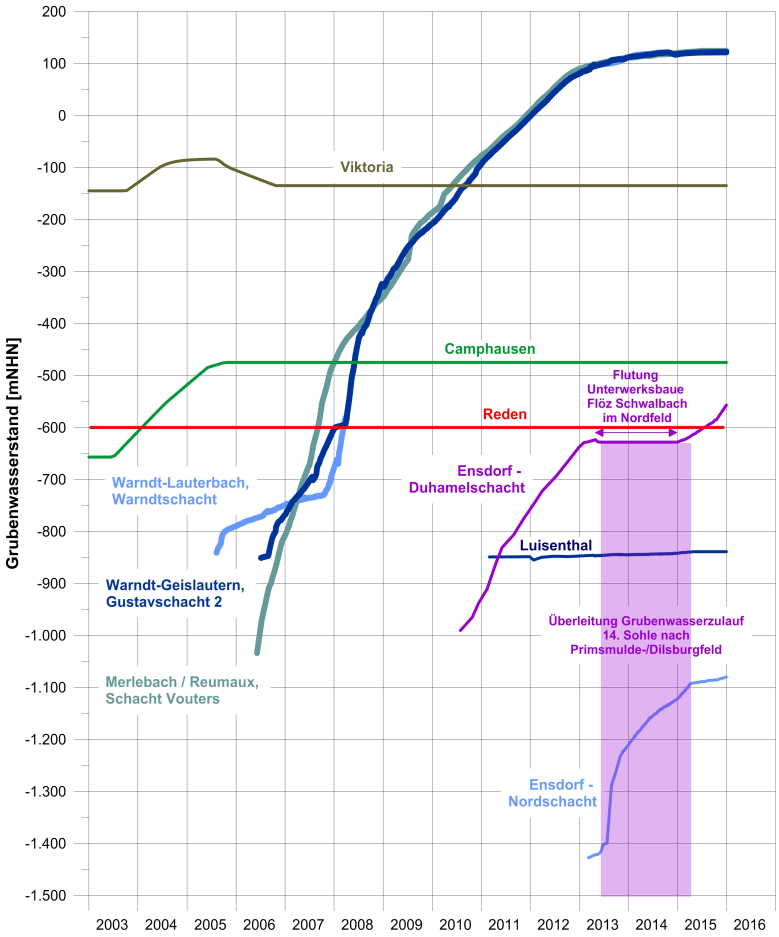

Abb. 6: Grubenwasserniveaus und zeitlicher Verlauf von Teilanstiegen des Grubenwassers im Saarrevier (Heitfeld et al. 20016, Abb. 3). Für das am tiefsten liegende Abbaufeld Primsmulde gilt die blaue Kurve rechts unten „Ensdorf-Nordsachacht“.

berichtet wurde (Alber und Fritschen, 2014; Knoll und Kowalle, 2009 u.a.). Dieser Vorgang, der reine bergbauinduzierte seismische Ereignisse beschreibt, soll hier als „Mechanismus 1 (***M1***)“ bezeichnet werden. Da nicht bei allen geeignet orientierten Schwächezonen im Gebirge die bergbaubedingten Zusatzspannungen ausreichend groß sind, um bergbauinduzierte seismische Ereignisse entsprechend ***M1*** unter der Bedingung p = 0 hervorzurufen, ist nach dem Ende der Abbauarbeiten an verschiedenen Stellen im Gebirge mit „beim Abbau gerade noch nicht in den Grenzzustand geratenen Schwächezonen im Gebirge“ zu rechnen. Das gilt insbesondere im Bereich des Abbaufeldes Primsmulde-Süd, weil dort bereits vor dem Abbaubeginn Hinweise auf sehr hohe Beanspruchungen von Schwächezonen aufgetreten sind (Alber und Fritschen, 2011, Verweis auf Ereignis Mai, 2005, S. 362).

Tritt nun bei der Flutung in diesen Schwächezonen ein Kluft- bzw. Porenwasserdruck $\Delta p > 0$ ein, können auch ohne neue bergbauliche Hohlraumbildung weitere Schwächezonen nach dem im Abschnitt „Ausgangspunkte“ geschilderten Mechanismus in den Grenzzustand geraten und seismisch aktiv werden. Es entstehen nahe den stillgelegten Abbaubereichen flutungsinduzierte seismische Ereignisse. Dieser Vorgang soll hier als „Mechanismus 2 (***M2***)“ bezeichnet werden.

Bei einem dritten möglichen Entstehungsmechanismus induzierter Ereignisse spielen zeitabhängige Deformationen im Gebirgsverband die entscheidende Rolle. So können auch nach dem Ende der bergbaulichen Arbeiten – auch ohne Flutung – verzögert induzierte seismische Ereignisse entstehen, wenn bei hochbelasteten potenziellen Schwächezonen einzelne Materialbrücken oder Rauigkeiten auf den Schwächeflächen, die das sofortige Entstehen der Ereignisse zunächst verhindern, durch zeitabhängige Schädigungsprozesse versagen und so den Scherwiderstand in der Schwächezone auch verzögert herabsetzen. Es kommt bei geeigneten gebirgsmechanischen Eigenschaften in der Schwächezone zu induzierten seismischen Ereignissen. Ebenso ist es möglich, dass die mit der Herstellung der bergbaulichen Hohlraumsysteme im Abbaufeld hervorgerufenen Senkungsvorgänge im umgebenden Gebirge insbesondere bei Senkungsunterschieden zwischen einzelnen Abbaufeldern und beim Vorhandensein ungleichmäßiger Abbauintensitäten benachbarter Abbaufelder einzelne Schwächezonen ebenfalls verzögert in den Grenzzustand geraten und seismische Ereignisse hervorrufen. Dieser Mechanismus soll als Mechanismus 3 (***M3***) bezeichnet werden. ***M3*** wird zeitverzögert in Gang gesetzt und kann sowohl ohne als auch mit Grubenwasseranstieg auftreten. Er ist nicht auf die unmittelbare Umgebung der einzelnen Abbaufelder begrenzt.

Im BW Saar waren mit dem Steinkohlenabbau in mehreren Abbaufeldern (Dilsburg-Ost, Nordfeld, Feld Primsmulde-Süd) z.T. energiereiche induzierte seismische Ereignisse nach ***M1*** in den letzten Jahren vor der Einstellung des Abbaus aufgetreten. In den Jahren 2007/2008 kam es z.B. im Feld Primsmulde-Süd zu 191 Ereignissen, deren Stärke oberhalb einer bestimmten Erschütterungsschwelle an der Erdoberfläche lag. Das stärkste Ereignis vom 23.02.2008 hatte die Lokalmagnitude M_L=4,0 (maximale Erschütterungsstärke an der Erdoberfläche v_{max} = 94 mm/s) und führte zur sofortigen und dauerhaften Einstellung aller Abbauarbeiten in diesem Feld. Die Ereignisse nach Mechanismus ***M1*** fanden im Umfeld der Gewinnungsarbeiten in einem Gebiet von ca. 200m unterhalb und 300m oberhalb der aktiven Strebe Prims 1 und Prims 2, sowie ca. 300m vor der eigentlichen Abbaufront statt (Alber und Fritschen, 2011). Die Raumstellung der Bruchflächen der Ereignisse korrespondierte mit großer Annäherung mit der Raumstellung bekannter tektonischer Störungen in diesem Gebiet.

Aber auch nach der Einstellung der Abbauarbeiten fanden vereinzelt kleinere Ereignisse (jetzt nach Mechanismus ***M3*** mit p=0) statt (z.B. Ereignis vom 15.05.2012 im Bereich des Feldes Primsmulde-Süd (Knoll, 2012)).

Nach der Einstellung der Abbauarbeiten wurden am 01.03.2013 die Pumpen zur Wasserhebung abgestellt und damit die Flutung des untersten Abschnittes des Grubenfeldes im Tiefenbereich ca. 1.400 mNN bis ca. -1.050mNN begonnen. Am 13.04.2015 wurde die Wasserhebung zunächst wieder in Betrieb genommen und der Grubenwasseranstieg kam praktisch zum Stillstand (Abb. 6, blaue Kurve rechts unten für „Ensdorf-Nordschacht“). Das entspricht einem Anstieg des Grubenwasserdruckes in diesem Zeitraum und bezogen auf die tiefsten Grubenbaue von ca. 3,5 MPa (ca. 350 m Wassersäule). In dieser Zeit entstanden 372 flutungsinduzierte seismische Ereignisse mit der maximalen Magnitude M_L=2,8, von denen man zunächst vereinfachend annehmen kann, dass sie der Umgebung des gefluteten Abbau-Bereiches im Feld Primsmulde-Süd entstanden sind. Diesen Ereignissen lag nach

den oben ausgeführten Überlegungen zum gebirgsmechanischen Mechanismus offensichtlich der Vorgang ***M2*** zu Grunde.

In der Zeit nach der Einstellung der Flutung (14.04.2013 bis 15.08.2916) entstanden weitere 12 Ereignisse, denen offensichtlich der Mechanismus ***M3*** zu Grunde zu legen ist. Das korreliert auch mit den Ergebnissen der Flutung des Grubengebäudes der Lagerstätte Schlema/Alberoda (Abb. 1), wo eine große Zahl von Ereignissen in den Jahren 2001ff. entstanden sind, nachdem der Flutungspegel praktisch konstant geblieben ist. Den Ereigniszahlen liegen die Informationen aus BID, 2016, Stand 31.07.2016) zu Grunde.

Im Beitrag Fritschen und Alber, 2016 wurden die oben genannten Ereignisse aus BID, 2016 über dem primär betroffenen Grubengebäude grafisch dargestellt. In Folie 28 dieser Publikation stellen die Autoren alle registrierten Ereignisse im ersten Zeitabschnitt der Flutung (01.07.2013 bis 01.04.2015) über den teilweise gefluteten Grubenbauen (blau) des Feldes Primsmulde-Süd sowie der westlichen Teile des Dilsburgfeldes dar. Diese Darstellung ist hier in Abb.7 nach einer Bearbeitung des Autors wiedergegeben.

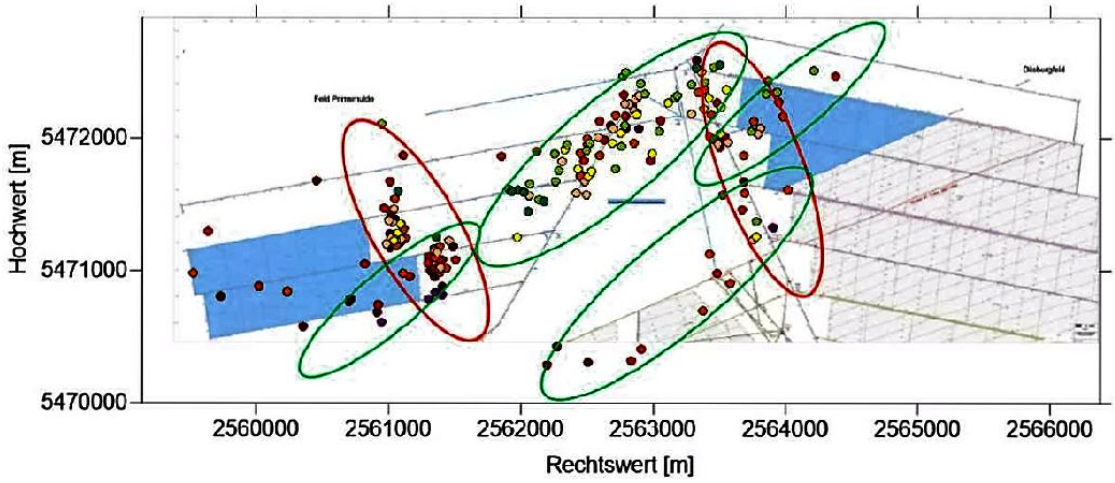

Abb. 7: Grubenwasseranstieg Saar; Stand Anstieg 01.04.2015; Ereigniszeitraum 01.07.2013 bis 01.04.2015 (Folie 28 aus Fritschen und Alber, 2016); bearbeitet durch Knoll in Form der Ergänzung der farbigen Ellipsen zur Markierung bestimmter Ereignischeiner.

Abb. 7 zeigt somit die induzierte seismische Aktivität während des Grubenwasseranstiegs (nach dem Mechanismus ***M2,*** entsprechend der oben angegebenen Einstufung).

Abb.8 zeigt die gleichen Ereignisse wie Abb.7, jedoch ergänzt um die nach Einstellen des Grundwasseranstiegs hinzugekommenen Ereignisse (blaue Punkte), denen somit der Mechanismus ***M3*** zu Grunde liegt. Der Vergleich von Abb.7 mit Abb.8 zeigt, dass nach Einstellung des Grundwasseranstiegs das westliche rote Cluster nach NE und das südliche grüne Cluster nach S erweitert sind. In den vorher aktiven Gebieten (Abb.7) sind nach Einstellung der Flutung keine weiteren Ereignisse entstanden. Ebenso scheinen die von Fritschen und Alber (2016) in Abb.8 zusätzlich eingetragenen „Ereignisse aktiver Abbau“ nicht allen später flutungsinduzierten Clustern anzugehören.

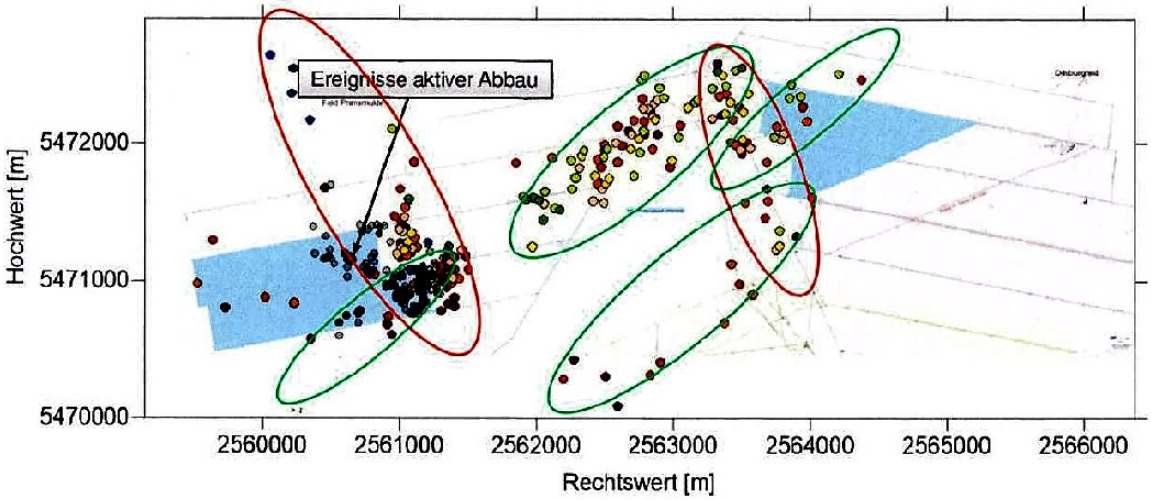

Abb. 8: Grubenwasseranstieg Saar; Stand Anstieg per 01.04.2015; Ereigniszeitraum 01.07.2013 bis 31.05.2016, d.h. einschließlich der Ereignisse nach der vorläufigen Beendigung des Grubenwasseranstiegs am 01.04.2015 (Folie 33 aus Fritschen und Alber, 2016); (vgl. Abb.7) jedoch gegenüber Abb.7 nicht weiter durch den Autor bearbeitet. Der deutlichste Unterschied zu Abb.7 besteht in der zusätzlichen Eintragung der Ereignisse, die nach Einstellung der Flutung am 01.04.2015 eingetreten sind (dunkle Punkte in den beiden westlichsten Clustern und jener vor dem Grubenwasseranstieg während des aktiven Bergbaus (besonders gekennzeichnete dunkle Ereignisse im Bereich des östlichen Endes der Abbaue der Strebe Primsmulde 1 und 2)

Auffallend ist in den Abb. 7 und 8, dass die „flutungsinduzierten Cluster" nicht nur nicht identisch sind mit den „Ereignissen aktiver Abbau". Sie treten im Gegenteil gehäuft im Abbaufreibereich zwischen dem Feld Primsmulde (links) und dem Dilsburgfeld (rechts) auf (4 östliche Cluster). Damit trifft für sie zum erheblichen Teil offensichtlich ein Zustandekommen nach dem Mechanismus ***M3*** – durch Spannungsunterschiede im Gebirgsverband zum großen Teil im Abbaufreibereich zwischen Feld Primsmulde-Süd und Dilsburgfeld gelegen – zu.

Da die Flutung der Grubenbaue in den Feldern des BW Saar künftig fortgesetzt werden soll, kann erwartet werden, dass weitere Ereignisse im Betrachtungsraum der Flutungsmaßnahme auftreten: nach Mechanismus ***M2*** in den Feldesteilen, die nahe an früher aktiven Abbaufeldern gelegen sind (primäre Ursachen: erheblicher Anstieg von Δp beim weiteren Grubenwasseranstieg in der folgenden Phase um weitere etwa $\leq$ 7,3 MPa) und nach dem Mechanismus ***M3*** durch zeitabhängiges Versagen von Gesteinsbrücken und Rauigkeiten auf den potenziellen Schwächeflächen in der unmittelbaren Umgebung von in der ersten Phase bereits seismisch aktiv gewesenen Schwächezonen in Abbaunähe.

Dazu kommen Ereignisse nach dem Mechanismus ***M3*** in jenen Teilen des Betrachtungsraumes der Flutungsmaßnahme, in denen sich zeitlich verzögerte Senkungsunterschiede im Gebirge entwickeln, die an Störungszonen, die seismisches Potential besitzen (potenzielle Schwächeflächen), ebenfalls zu flutungsinduzierten seismischen Ereignissen führen können. Das trifft besonders für Abbaufreibereiche und andere Gebirgsbereiche zu, die in der Folge des großräumigen Abbaus unter unterschiedlichen geologischen und bergtechnischen Bedingungen Spannungsunterschiede im Gebirge erzeugt haben (s.a. Abb. 7 und 8, mittlere grüne Cluster). Hinweise auf derartige Zonen mit deutlichen Senkungsdifferenzen im Gebirge werden z.B. in Heitfeld et al. (2016) im Zuge der Prognose der Bodenbewegungen im Ergebnis der Flutung bis -320mNN dargestellt (s.a. Abb.9). Vom gebirgsmechani-

schen Standpunkt gesehen, sind vor allem die von den Autoren in Heitfeld et al. (2106) in den Anlage 12 und 7 dargestellten Sachverhalte interessant (Abb.10).

Bei der Senkungs-/Hebungsentwicklung im Gebirge kann aus gebirgsmechanischer Sicht erwartet

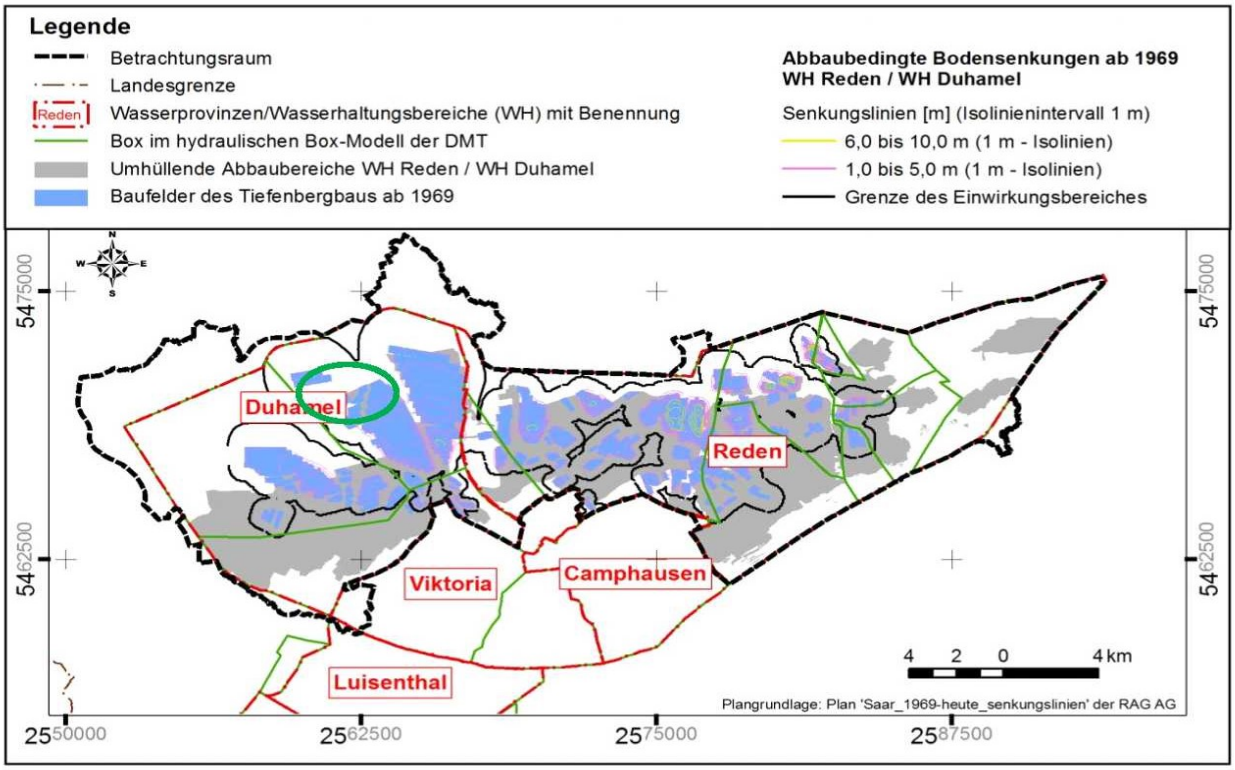

Abb.9: Abbaubedingte Bodenbewegungen ab 1969; Anlage 6 aus Heitfeld et al. 2016. In die Originalabbildung wurde vom Autor im westlichen Teil des Betrachtungsraumes eine grüne Ellipse eingetragen. Sie soll auf jenes Gebiet hinweisen, das in den Abb. 7 und 8 durch die 2 mittleren grünen Cluster gekennzeichnet ist.

werden, dass aushaltende Störungszonen dann zu Deformations-Unstetigkeitszonen an der Erdoberfläche führen, wenn sie den Charakter ausgeprägter Schwächezonen haben. In diesem Fall können sich Senkungsdifferenzen im Bereich der Störungszone (aseismisch) bis zur Erdoberfläche fortsetzen und sich dort als Bewegungs-Unstetigkeitszonen darstellen. Wenn die von Senkungsdifferenzen betroffenen Störungen aber aus gebirgsmechanischer Sicht den Charakter von potenziellen Schwächeflächen haben, werden die beiden „Störungsränder“ sich solange nicht unterschiedlich bewegen, bis der Scherwiderstand auf den Flächen überwunden wird. Das kann mit (kleinen oder größeren) seismischen Ereignissen verbunden sein. In Abb.10 sind zwei kleine Ausschnitte aus den Anlagen 7 und 12 aus Heitfeld et al. (2016) dargestellt. Abb.10a zeigt einen Ausschnitt aus der Karte der tektonischen Störungszonen (Heitfeld et al. (2016), Anlage 7). Die hier betrachteten Teilgebiete sind mit grünen Rechtecken durch den Autor hervorgehoben worden.

In Abb. 10a ist auf diese Weise links eine Zone hervorgehoben worden, in der eine lang aushaltende tektonische Störungszone erkennbar ist. In diesem Bereich haben Heitfeld et al., 2016 eine mögliche Unstetigkeitszone im Senkungs-/Hebungsverhalten im Ergebnis der Flutung bis in das Niveau -320 mNN an der Erdoberfläche identifiziert bzw. prognostiziert (in Abb. 10b ockerfarben gestricheltes Lineament). Das entspricht dem geomechanischen Verhalten einer aseismisch deformierbaren ausgeprägten Schwächefläche. Folglich wären in diesem Bereich im Ergebnis der Flutung keine seismischen Ereignisse zu erwarten.

In Abb.10a wurde durch das rechte grüne Rechteck eine Zone markiert, die eine nicht deutlich und nicht aushaltende tektonische Störung hervorhebt. Dieser Bereich ist offensichtlich durch eine präexistente tektonische Störung gekennzeichnet, die nicht durchgängig ist und sich weniger deutlich

erkennbar darstellt. Sie kann als potenzielle Schwächefläche interpretiert werden. Hier sollten im Ergebnis der Flutung bis zum Niveau -320mNN induzierte seismische Ereignisse auftreten können. Heitfeld et al., 2016 finden hier keine Hinweise auf mögliche Unstetigkeitszonen im Bewegungsverhalten an der Erdoberfläche. Im bisherigen Verlauf der Flutung sind übereinstimmend mit dieser Bewertung in diesem Gebiet bereits flutungsinduzierte seismische Ereignisse registriert worden (mittlere grüne Cluster in den Abb. 7 und 8).

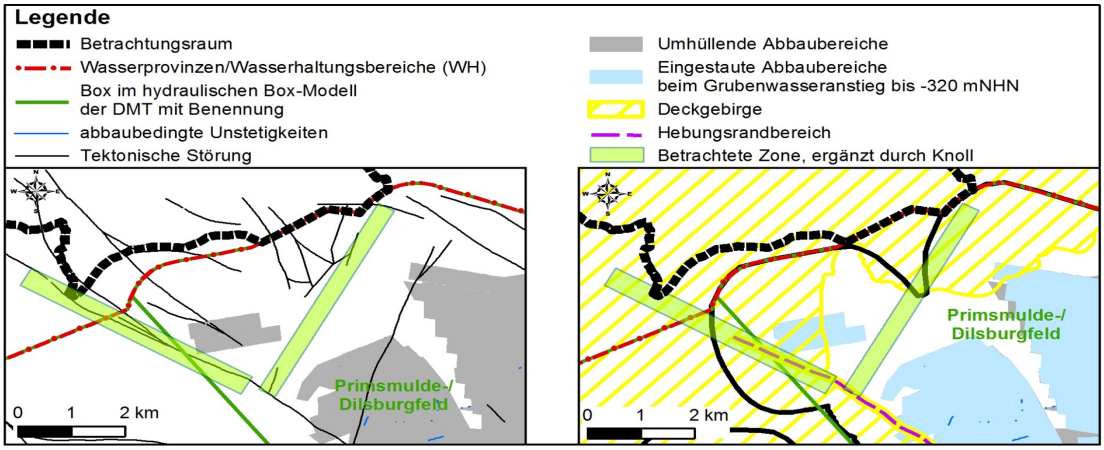

Abb.10 a *Abb. 10b*

10(a): Ausschnitt aus der Karte der tektonischen Störungszonen (Heitfeld,et al., 2016, Anlage 7); ergänzt durch grüne Rechtecke: Knoll

10(b): Ausschnitt aus der Karte der potenziellen Unstetigkeitszonen (Heitfeld,et al., 2016, Anlage 12); ergänzt ergänzt durch grüne Rechtecke: Knoll.

Die dicke unterbrochene schwarze Linie kennzeichnet die Grenze des Betrachtungsraumes, die rote Linie die Begrenzung einer Wasserprovinz, die gefluteten Grubenbau sind schwach farblich angelegt im Hintergrund zu sehen, die dünnen schwarzen Linien in Abb. 10a stellen die tektonischen Störungen dar.

Schlussfolgerungen

Es erhebt sich die Frage, welche Rolle die unterschiedlichen Mechanismen bei der Flutung ausgedehnter und tiefreichender Grubenbausysteme für die Entwicklung der induzierten Seismizität spielen können. Die Vorgänge im Gebirge sind so komplex, dass sie sich einer quantitativen rechnerischen Modellierung (noch) nicht ausreichend erschließen. Das zeigt u.a. der Versuch einer solchen rechnerischen Modellierung in Alber und Fritschen (2011). Hier konnten die komplexen geologischen und gebirgsmechanischen Bedingungen und die sie repräsentierenden Parameter nicht ausreichend in das Modell einbezogen werden, so dass die Ergebnisse zwar in einigen Fragen zum Verständnis der Entstehung der Ereignisse beigetragen haben, quantitative Interpretationen und Prognosen sind mit diesem Modell aber nicht möglich. Die wichtigsten Quellen für die Prognose der induzierten Seismizität können somit nur die bisherigen Beobachtungen und Messungen sowie die Auswertung vergleichbarer Maßnahmen in der bergbaulichen Geschichte sein. Eine solche Maßnahme ist die oben dargestellte und gut dokumentierte Flutung der Lagerstätte Schlema/Alberoda sowie Beobachtungen und Registrierungen während der Anfangsphase der Flutung im BW Saar.

Die Analyse der induzierten Seismizität bei der beendeten Flutung in der Lagerstätte **Schlema/Alberoda** führt mit Blick auf die bevorstehende bzw. fortzusetzende Flutung im BW Saar zusammenfassend zu folgendem Ergebnis:

Die rein abbauinduzierten Ereignisse (über die zeitnah nicht und später nur spärlich in der Literatur berichtet wurde, z.B. Konietzky, 1990) traten bei abgesenktem Grubenwasser und damit bei $\Delta p = 0$ im Gebirgsverband und auf den Schwächeflächen nach den Mechanismen ***M1*** und ***M2*** auf. Erstgenannter Mechanismus war in unmittelbarer Umgebung der bergbaulichen Hohlräume im Schiefer, der an zweiter Stelle genannte auch in abbauferneren Bereichen, z.B. an bestimmten tektonischen Strukturen im Granit nahe dem Kontaktbereich zum Schiefer wirksam.

Die flutungsinduzierten seismischen Ereignisse (mit ansteigendem Grubenwasser und damit bei Δp >0) wurden bestimmt durch die Mechanismen ***M2*** und ***M3***. Auch hier gilt: Der erstgenannte Mechanismus war in unmittelbarer Umgebung der bergbaulichen Hohlräume im Schiefer, der an zweiter Stelle genannte auch in abbauferneren Bereichen, z.B. an bestimmten tektonischen Strukturen im Granit nahe dem Kontaktbereich zum Schiefer wirksam. Hinzu kommt, dass auch hier die zeitabhängigen Spannungsumlagerungen im Gebirgsverband auch in ferneren Gebirgsbereichen das Versagen auf tektonischen Schwächeflächen bewirkt haben. Daraus sind seismische Ereignisse entstanden, wenn die betroffenen Schwächeflächen den Charakter potenzieller Schwächeflächen hatten.

Bei der Analyse in Verbundprojekt, 2016 wurden die Ereignisse bei abgesenktem Grubenwasser nicht behandelt und unter den Bedingungen der Flutung wurde nicht zwischen den einzelnen Mechanismen ***M2*** und ***M3*** unterschieden, sondern alle Ereignisse gemeinsam statistisch bearbeitet. Das ist am Ende des Flutungsprozesses, wenn praktisch alle Ereignisse für die Analyse zur Verfügung stehen und unter Ausschluss jener mit Δp = 0 aus der aktiven Bergbauphase, zulässig.

Aus der Analyse ergab sich eine obere Grenze der Stärke der flutungsbedingten Ereignisse. Sie führte auf eine Magnitude, die etwa eine Magnitudeneinheit unterhalb jener der rein bergbauinduzierten Ereignisse nach ***M1*** liegt.

Die Analyse der bisher bis zur „Flutungspause“ eingetretenen seismischen Ereignisse im **BW Saar** kann noch nicht abschließend – in ähnlicher Weise wie für die Lagerstätte Schlema/Alberoda geschehen – analysiert werden, da von einem in der ersten Flutungsphase und bezogen auf das Abbautiefste insgesamt zu erwartenden Δp ≈ 11 MPa erst Δp ≈ 3,7 MPa bis zur Flutungsunterbrechung eingetreten sind.

Dennoch zeigen die bisher vorliegenden Ergebnisse, dass im BW Saar die oben charakterisierten Mechanismen ***M1***, ***M2*** und ***M3*** ebenfalls wirksam sind und dass die gebirgsmechanischen Eigenschaften des Gebirgsverbandes und der Schwächeflächen im Gebirge die flutungsinduzierte Seismizität bestimmen. In der Fachliteratur wird wiederholt der Standpunkt vertreten, dass für die Entstehung seismischer Ereignisse die gebirgsmechanischen Eigenschaften der Schwächezonen von größerer Bedeutung sind, als die geologischen Eigenschaften des umgebenden Gebirgsversbandes und seiner Gesteinskomponenten (s.a. Byerlee, 1978). Insbesondere ist der Mechanismus ***M3*** relevant, wie die vier östlichen Ereignischeuster in den Abb. 7 und 8 belegen. Diese Folgerungen gelten für die Analyse der Entstehungsbedingungen der Ereignisse ebenso wie für die Prognose der weiteren Entwicklung der flutungsinduzierten Seismizität. Beim BW Saar ist in der jetzt zur Zulassung anstehenden Flutungsphase bis -320mNN (Antrag 2016) mit weiterer flutungsinduzierter Seismizität zu rechnen. Ein evtl. später stattfindender Grubenwasseranstieg bis in das Niveau des Vorfluters Saar sollte trotz weiteren Anstieges von Δp nicht mehr zu stärkeren flutungsinduzierten seismischen Ereignissen führen, da – nach Kenntnis des Autors – in den höheren geologischen Schichten das Vorhandensein von potenziellen Schwächeflächen (mit seismischem Potential) zu Gunsten von ausgeprägten Schwächeflächen (mit aseismischem Verformungsverhalten im Grenzzustand) zurücktritt.

Vom Autor wird aus den genannten Gründen bei der weiteren Flutung im BW Saar von der Anwendbarkeit des wesentlichsten Ergebnisses aus der Flutung (Mechanismen ***M2*** und ***M3***) der Lagerstätte Schlema/Alberoda, der zu erwartenden Maximalmagnitude eine Größenordnung unterhalb der maximalen Magnitude aus der rein abbauinduzierten Seismizität (Mechnismus ***M1***) ausgegangen. Falls bei der Fortsetzung der Flutung der wenig wahrscheinliche Fall eintreten sollte, dass es Anzeichen gibt, dass diese Magnitude überschritten werden könnte, wäre durch eine weitere Unterbrechung der Flutung die Möglichkeit der Risikominimierung gegeben.

Die vorstehend ausgeführten Überlegungen ersetzen nicht die ausführliche Begutachtung der Situation, sie sollten jedoch als Hinweise und Argumente dafür geeignet sein.

(Die Abb. 3 und die Anlagen 6, 7 und 12 aus Heitfeld et al., 2016 wurden mit freundlicher Genehmigung und Unterstützung der Autoren im Beitrag in den Abb. 6, 9 und 10 verwendet.)

Literatur- und Quellenverzeichnis

Alber, M. und Fritschen, R. (2011).: Rock mechanical analysis of a M_L = 4.0 seismic event induced by mining in the Saar District, Germany; Geophys. J. Int. (2011), 186, 359-372

Antrag eines bergrechtlichen Planfeststellungsverfahrens mit Umweltverträglichkeitsprüfung zum Ansteigenhlassen des Grubenwasserspiegels auf -320m NN in den Wasserprovinzen Reeden und Duhamel vom 26.04.2016, unter: www.bid.rag.de/bid/index.html =>Saarland => zusätzliche Informationen => Grubenwasseranstieg => Saar => Antrag

Byerlee, J.: Friction of Rocks, PAGEOPH Pure and Applied Geophysics Vol. 116 (1978), pp 615-626

BID (2016): => Saarland => zusätzliche Informationen => Erschütterungen => Bergwerk Saar; http://www.bid.rag.de/bid/index.html#

Docekal, A.; Forkmann, B.; Groß, U.; Künzel, U.; Thoma, K.; Wallner, O. (2003): Analyse und Bewertung seismischer Ereignisse bei der Flutung der Lagerstätte Schlema-Alberoda; 3. Altbergbau-Kolloquium, TU BA Freiberg, Verl. Glückauf Essen; S. 148-166

Erdbebenbeobachtung im Freistaat Sachsen, Zweijahresbericht 2002.2003; http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/geologie/9819.htm../geologie/Erdbeben_Zweijahresbericht_2002-2003)

Fritschen, R. und Alber, M. (2016): Seismisches Monitoring des Grubenwasseranstiegs an der Saar; 3. Essener Fachgespräch Bergbaufolgen, DMT Essen, 14.06.2016, Vortragsfolien

Heitfeld, M.; Rosner, P.; Mühlenkamp, M. (2016): Gutachten zu den Bodenbewegungen im Rahmen des stufenweisen Grubenwasseranstiegs in den Wasserprovinzen Reden und Duhamel. Aachen, 19.02.2016; www.bid.rag.de/bid/index.html (Saarland => zusätzliche Informationen => Grubenwasseranstieg => Saar => Antrag =>Fachgutachten)

Knoll, P. and Kowalle, G. (2009), Analyse der Erschütterungsausbreitung bergbauindizierter seismischer Ereignisse auf geomechanischer Basis, 10.Geokinematischer Tag, Freiberg 2009, Schriftenreihe des Instituts für Markscheidewesen und Geodäsie an der TU Bergakademie Freiberg, Heft 2009-1; ISBN 978-3-86797-053-2; S. 104-124

Knoll, P. (2012): Abschluss-Gutachten: Auswirkungen bergbauinduzierter Erschütterungen im Bereich des Bergwerkes Saar auf den Standort der AG der Dillinger Hüttenwerke, GTU-6-06/06/12 vom 21.06.2012 (unveröffentlicht)

Knoll, P. (2014): Induzierte Seismizität in Mitteleuropa – Gibt es Möglichkeiten für Prognose und Beherrschung?, Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät, Band 120, 2014, S. 103-130 (http://leibnizsozietaet.de/sitzungsberichte-der-leibniz-sozietaet-band-120-2014/#more-8260)

Knoll, P. (2016): Gebirgsmechanisch-seismologische Fragen im Zusammenhang mit der Fracking-Technologie; Leibniz-Online, Internetzeitschrift der Leibniz-Sozietät, Nr. 21, 2016, S.1-21 (http://leibnizsozietaet.de/internetzeitschrift-leibniz-online-nr-21-2016/)

Knoll, P.; Schwandt, A.; Thoma, K. (1978), Die Bedeutung geologisch-tektonischer Elemente im Gebirge für den Bergbau, dargestellt am Beispiel des Werra-Kalireviers der DDR, Proc. 5th Int. Symp. On Salt, Hamburg, 1978; Northern Ohio Geol. Soc., Vol.1,1979), pp. 105-113

Konietzky, H., (1990): Classification of seismic events in a mining area in the Erzgebirge mountains of the GDR., In: Gerlands Beiträge Geophysik, Nr. 99-2, S. 169-174.

Leonhardt, G. (1998), Uranbergbau der Wismut - technisch-wissenschaftliche Leistung und Umweltproblem; Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät; Band 26, Jahrgang 1998, S. 63-87 (http://leibnizsozietaet.de/sitzungsberichte-der-leibniz-sozietat-band-26-%e2%80%a2-jahrgang-1998/

National Research Council (2013): Induced Seismicity Potential in Energy Technologies; US National Academy of Sciences, 2013; ISBN-13: 978-0-309-25367-3

Schütz, H. und Konietzky, H. (2016): Results of investigations of flooding induced seismicity in the mining district of Schglema/Alberoda, Germany; Geomechanics and Tunneling 9 (2016), No 5, 508-514

Thoma, K., Knoll, P., Menzel, W., Milde, H., Lorenz, G.: Zur Bekämpfung von Gebirgsschlägen bei dem Auffahren bergmännischer Hohlräume im Granit; Bergakademie 21 (1969), Heft 2

Verbundprojekt (2014): MAGS-Konzepte zur Begrenzung der mikroseismischen Aktivität bei der energetischen Nutzung geothermaler Systeme im tiefen Untergrund. Einzelprojekt 7: Prognose der möglichen induzierten Seismizität im Kristallin in Auswertung der flutungsbedingten Ereignisse im Bergbaurevier Aue/Schlema; Abschlussbericht des Institutes für Geotechnik über die im Projekt durchgeführten Arbeiten; Förderkennzeichen: 0325191F, TU BAF 31.03.2014 http://www.mags-projekt.de/MAGS/DE/MAGS1/Einzelprojekte/EP7/EP7_node.html

Adresse des Verfassers:
Prof. Dr. Peter Knoll; prof.knoll@t-online.de