

Zur Diskriminierung induzierter Seismizität

DGG-FKPE Arbeitsgruppe und externe Experten:

T. Dahm^{1,2}, D. Becker³, M. Bischoff⁴, S. Cesca², B. Dost⁵, R. Fritschen⁶, S. Hainzl¹, C.D. Klose⁷, D. Kühn⁸, S. Lasocki⁹, Th. Meier¹⁰, M. Ohrnberger², E. Rivalta¹, U. Wegler⁴, S. Husen⁵

¹ Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ), Potsdam, Germany

² Institut für Erd- und Umweltwissenschaften, Universität Potsdam, Germany

³ Institut für Geophysik, Universität Hamburg, Germany

⁴ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover, Germany

⁵ Royal Netherland Meteorological Institute (KNMI), De Bilt, The Netherlands

⁶ DMT GmbH, Essen, Germany

⁷ Think Geohazards, Bronxville, New York, USA

⁸ NORSAR, Kjeller, Norway

⁹ Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences, Warsaw, Poland

¹⁰ Institut für Geowissenschaften, Christian Albrecht Universität zu Kiel, Germany

Die DGG-FKPE Arbeitsgruppe „Induzierte Seismizität“ diskutierte während der letzten Jahre die Frage der Diskriminierung von anthropogen induzierter, anthropogen getriggelter und natürlicher Seismizität. Die Ergebnisse der Diskussionen wurden in zwei kurzen Publikationen zusammengefasst (Dahm et al., 2010, 2013). Arbeiten zu der Problematik, die innerhalb der Gruppe entstanden sind, wurden u.a. in dem im Januar 2013 erschienenen Journal of Seismology (Cesca, Oth and Dost, 2013) über induzierte Seismizität publiziert (z.B. Barth et al., 2013; Dinske and Shapiro, 2013; Passarelli et al., 2013; Cesca et al., 2013; Klose 2013).

Die Erläuterungen in den Kapiteln zwei bis sechs fassen die Ergebnisse der Diskussionen in Kurzform zusammen.

1. Einführung

Am 22. November 2012 ereignete sich bei Verden in Niedersachsen ein schwaches Erdbeben ($M_L 2.8$), das von der Bevölkerung wahrgenommen wurde. Bereits in den Jahren zuvor traten in der näheren Umgebung mehrere Mikrobeben mit Magnituden $M > 1$ auf. Die Epizentren befinden sich in unmittelbarer Nähe konventioneller Gasfelder (z.B. Völkersen-Feld), die seit Jahrzehnten ausgebeutet werden und zu den produktionsstarken Gasfeldern Deutschlands auf dem Festland gehören. Darüberhinaus wird für diese Region der Einsatz von Fracking-Verfahren zur zukünftigen Förderung aus unkonventionellen Gaslagerstätten erörtert. Des Weiteren wird in jüngster Zeit verstärkt diskutiert, ob die kontinuierliche Niederdruckverpressung von salinen Restfluiden aus der Gasförderung in tiefer liegende Sedimente eine weitere Bedrohung durch induzierte Erdbeben darstellt. Induzierte Seismizität wird auch im Zusammenhang mit anderen anthropogenen Eingriffen in den Untergrund diskutiert, z.B. in der Geothermie, an Staudämmen im Tagebau und bei untertägigem Bergbau oder bei der CO_2 -Speicherung.

Obwohl nach dem Verden-Beben die Herdtiefe zunächst widersprüchlich war, wurde das Beben unmittelbar als möglicherweise induziert von der Öffentlichkeit wahrgenommen und diskutiert. Ein eindeutiges und allgemein akzeptiertes Verfahren zur Unterscheidung von induzierter, getriggelter und natürlicher Seismizität, das z.B. auch vorhandene Unsicherheiten

berücksichtigt, existiert bisher nicht. Seismologen, Rohstoff- und Energiewirtschaftler sowie geowissenschaftliche Ingenieurbüros nutzen eine Reihe unterschiedlicher Ansätze, um Erdbeben und Bruchprozesse nahe geotechnischer Anlagen zu untersuchen und zu beurteilen. Diese Situation birgt sowohl für die Betreiber geotechnischer Anlagen als auch für die betroffene Bevölkerung oder Gemeinden einige Risiken.

Die Absicht der Expertengruppe liegt darin aufzuzeigen, wie man mit Hilfe probabilistischer Ansätze gekoppelt mit Bayesschen Netzen transparente Entscheidungen treffen kann, um die Ursache eines seismischen Ereignisses zu ermitteln. Das Ergebnis einer solchen probabilistischen Diskriminierung ist eine Wahrscheinlichkeitsverteilung der in Frage kommenden Ursachen eines Erdbebens (induziert/getriggert/natürlich). Die probabilistische Diskriminierung bietet jedoch keine Entscheidungshilfe, wie die Gesellschaft, die Betreiber oder die Aufsichtsbehörden mit der gefundenen Wahrscheinlichkeit umgehen sollen.

2. Diskriminierungsprobleme

Induzierte oder getriggerte Erdbeben weisen sehr unterschiedliche Charakteristika auf, beobachtet werden z.B. vereinzelte stärkere Erdbeben (z.B. Ottemöller et al., 2005; Pechmann et al., 2008; Cesca et al., 2011), Schwärme von schwachen oberflächennahen Erdbeben (z.B. Häring et al., 2008; Cuenot et al., 2008), „langsam“ erfolgende Beben (slow slip events) mit emergenten Phaseneinsätzen (z.B. Nachterstädt, 18. July 2009; Korn, 2010, pers. Kommun.), über einen längeren Zeitraum räumlich verstreut auftretende Erdbeben (z.B. Pandey and Chadha, 2003), Erdbeben, die über einen längeren Zeitraum entlang vorhandener Schwächezonen auftreten (z.B. Dost and Haak, 2007), oder bedeutende Änderungen in zeitlichem und räumlichen Auftreten der Seismizität (z.B. Richardson and Jordan, 2002; Fritschen, 2010; Bischoff et al., 2010; Becker et al., 2010).

Die Diskussion innerhalb der Gruppe ergab, dass die Unterscheidung zwischen getriggerten und induzierten Erdbeben wichtig ist, auch wenn es nicht immer einfach ist, diesen Unterschied in die Öffentlichkeit zu kommunizieren. Zum Beispiel kann die Ursache des Bebens unmittelbaren Einfluss auf die Größe der Bruchfläche und damit auf die Magnitude des Ereignisses haben. Zudem kann die Unterscheidung zwischen getriggerten und induzierten Erdbeben im Fall der Kompensation von Schäden wirtschaftliche Konsequenzen haben. Auf der anderen Seite ist diese Differenzierung im Bergbau seit Jahren üblich. Wir schlagen folgende Definition vor (Dahm et al., 2010; 2013):

- Ausschließlich getriggerte Erdbeben treten auf vorteilhaft orientierten Schwächezonen (Verwerfungen) in Übereinstimmung mit dem vorhandenen regionalen oder lokalen Spannungsfeld und geologischen Strukturen auf. Die Stärke dieser Ereignisse wird nicht durch die anthropogen erzeugten Spannungsänderungen kontrolliert, die lediglich den Bruchprozess (Nukleation) auslösen. Jedoch kann die vom Menschen erzeugte Spannungsänderung einen natürlichen seismischen Zyklus beschleunigen.
- Ausschließlich induzierte Erdbeben werden vollständig durch die anthropogen verursachten Spannungsänderungen kontrolliert und würden ohne den Eingriff des Menschen in die Natur nicht auftreten. Der gesamte Bruchprozess wird durch die menschlich induzierte Spannung gesteuert.

Mögliche Untersuchungsverfahren zur Unterscheidung von getriggerten und induzierter Seismizität, die in naher Zukunft entwickelt werden sollten, sollen kein „Kochrezept“

ergeben; stattdessen versucht unsere Gruppe, Rahmenempfehlungen für Vorgehensweisen und Methoden zu geben, die den Fachleuten bis dato zur Verfügung stehen, in vielen Fällen aber noch besser getestet und kalibriert werden sollten.

3. Relevante Daten

Folgende Daten werden für die Planung und Ausführung einer Diskriminierungsstudie als relevant erachtet:

1) Hintergrundwissen

- instrumentelle und historische (regionale) natürlich auftretende Seismizität, statistische Parameter vor, während und nach dem menschlichen Eingriff (maximale Magnituden, Vollständigkeitsmagnitude, b-Werte usw.); siehe auch die Empfehlungen für ein seismisches Überwachungsprogramm der Monitoring-Gruppe des FKPE;
- regionales Spannungsfeld und tektonisch induzierte Spannungen;
- Charakterisierung bereits bestehender Verwerfungen;
- Grundgebirgsteufe (siehe z.B. Klose and Seeber, 2007) und sedimentbezogene Spannungsraten;

2) standortspezifische Geologie und Tektonik:

- Charakterisierung der lokalen Geologie und der Schichtenfolge, insbesondere starker Scherfestigkeitskontraste und Entkopplungshorizonte (z.B. Salzsichten) ;
- lokale Inhomogenitäten;
- poroelastische Parameter;

3) seismologische Herdparameter der betrachteten Ereignisse:

- Epizentrum und Tiefe einschließlich ihrer Unsicherheiten;
- Herdmechanismus (Herdflächenlösung, Momententensor);
- Bruchdauer, Herdradius und daraus abgeleitete Parameter (siehe z.B. Kwiatek et al., 2011);
- räumliche und zeitliche Ausbreitung der Seismizität (falls anwendbar);

4) technische Parameter des menschlichen Eingriffs:

- Ort, Beginn und Dauer der geotechnischen Tätigkeiten;
- induzierte Porendruck- und Spannungsänderungen;
- Injektions- und Extraktionsvolumen und -raten von Fluiden bzw. Gesteinsmassen;
- Wasserspiegel und aufgestaute Wassermasse eines Stausees;
- geotechnische Konstruktionen wie Stützpfiler, Tunnel, etc.;
- Ablauf des Bergbaubetriebs, wie z.B. Strebbau, Kammer-Pfeiler-Bau.

Dabei ist zu erwarten, dass häufig nur ein Teil der angeführten Daten für eine Studie zur Verfügung stehen wird. Probabilistische und Bayessche Ansätze können unsichere und lückenhafte Daten verarbeiten. Dennoch sollte das Ziel sein, möglichst viele Informationen einzubeziehen.

4. Methoden der Diskriminierung

Dahm et al. (2013) schlagen drei unterschiedliche Ansätze zur Diskriminierung von getriggertem, induziertem und natürlicher Seismizität vor. In allen drei Fällen wird die Wahrscheinlichkeit berechnet, mit der ein Ereignis durch menschlichen Eingriff verursacht wurde.

a) Physikalisch orientierter Ansatz

Dieses Modell - obwohl in der Anwendung nicht immer einfach, da es einen hohen Grad an Detailwissen verlangt, - bietet den Vorteil, dass die physikalischen Ursachen von induzierter

und getriggert Seismizität berücksichtigt werden. Das tektonische Spannungsfeld im Untersuchungsgebiet verursacht eine natürlich auftretende Seismizität. Diese Seismizitätsrate kann entweder aus Erdbebenkatalogen bestimmt oder aus dem tektonischen Spannungsfeld abgeschätzt werden (Dieterich, 1994; Klose, 2011; Passarelli et al., 2012). Die zeit- und raumabhängige Änderung der Coulombspannung, die durch die menschliche Tätigkeit verursacht wird, muss ebenfalls abgeschätzt werden (siehe z.B. Code Aster, <https://www.code-aster.org>). Mit Hilfe eines Seismizitätsmodells (z.B. rate- and state constitutive model; Dieterich, 1994) kann die durch den menschlichen Eingriff verursachte Seismizität aus der Spannungsänderung berechnet werden. Ein Bayesscher Diskriminator prüft anschließend, ob die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten des Erdbebens am gegebenen Ort und zu gegebener Zeit für die natürliche oder für die anthropogen verursachte Seismizitätsrate höher ist (für technische Details z. B. Passarelli et al., 2012). So kann eine Wahrscheinlichkeit angegeben werden, mit der das Ereignis getriggert wurde. Soll zusätzlich geprüft werden, ob das Beben induziert wurde, muss die erhaltene Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (probability density function) über die Bruchfläche des Bebens integriert werden (Dahm et al., ESC 2012).

Das von Dieterich (1994) vorgeschlagene Modell wurde bereits in vielen Bereichen der Seismologie erfolgreich angewendet und bietet den Vorteil, dass sich auch dann eine Änderung der Seismizitätsrate abschätzen lässt, wenn die absolute Rate so niedrig ist, dass bisher kein Ereignis auftrat. Deshalb eignet sich diese Diskriminierungsmethode besonders zur Untersuchung von Einzelereignissen in Regionen mit geringer, natürlich auftretender Seismizität, wie z.B. des Verden-Erdbebens vom November 2012. Entscheidend für diesen Ansatz ist, die durch die menschliche Tätigkeit erzeugten Spannungsraten mit Hilfe eines physikalischen Modells zu berechnen. Zum Beispiel kann der Einfluss der Porendruckänderung in einem Gasfeld auf Coulombspannungen im umgebenden Gestein bereits mit einem einfachen Ansatz (nuclei of strain, Geertsma, 1973) und einer Rand- oder Finite-Elemente-Methode abgeschätzt werden. Passarelli et al. (2013) verwenden ein ähnliches Modell, um die zeitabhängige Wahrscheinlichkeit der Triggerung von seismischen Ereignissen als Folge einer Magmaintrusion zu bestimmen. Auch andere Prozesse, wie die Auswirkungen der Fluidinjektion bei einer Stimulation, können durch solche physikalischen Modelle beschrieben werden.

b) Statistisch orientierter Ansatz

Der zweite Ansatz basiert auf empirischen Beziehungen natürlicher Seismizität und ist nur für Fälle geeignet, in denen entsprechend viele Erdbeben beobachtet wurden. Wenn sich die statistischen Parameter für ein Ensemble beobachteter Beben ändern (z. B. Hainzl und Ogata, 2005) und diese mit der menschlichen Aktivität korrelieren, dann kann eine Aussage über die Wahrscheinlichkeit getroffen werden, mit der diese Ereignisse induziert/getriggert wurden. Mit Hilfe dieser Methode kann jedoch nicht zwischen getriggerten und induzierten Ereignissen unterschieden werden. Dieser Ansatz beruht ausschließlich auf der Auswertung des Erdbebenkatalogs und bedarf daher weniger Hintergrundwissens. Die Ursachen für die Seismizität bleiben dabei unberücksichtigt.

Dahm et al. (2013) sprechen zwei Beispiele an. Der erste Ansatz verwendet ein Modell zur Berechnung des Auftretens von Nachbeben (epidemic-type aftershock sequency oder ETAS-Modell; Ogata, 1988; 1998), das sich inzwischen zum Standard entwickelt hat, um räumliche und zeitliche Seismizitätsverteilungen auf kurzen und mittellangen Zeitskalen statistisch zu beschreiben (Zhuang et al., 2011). Dieser Ansatz wird in zwei Schritten umgesetzt. Als erstes werden die Modellparameter und ihre Unsicherheiten mit Hilfe der Maximum-Likelihood-

Methode auf Basis der regionalen Hintergrundseismizität bestimmt. In einem zweiten Schritt wird die Wahrscheinlichkeit dafür berechnet, dass die beobachtete Anzahl an Ereignissen in dem gewählten Raum-Zeit-Fenster mit dem ETAS-Modell erklärt werden kann. Letzteres ist der Fall, wenn die beobachtete Seismizitätsverteilung einer Poissonverteilung entspricht, deren Mittelwert durch den Erwartungswert des ETAS-Modells gegeben ist.

Ein ähnlicher Ansatz kann im Fall von Fluidinjektionen verwendet werden: der zeitabhängige a-Wert der Gutenberg-Richter-Beziehung wird in einen konstanten Wert und eine zeitabhängige Komponente aufgeteilt, die mit ingenieurtechnischen Parametern wie z.B. Injektions Fließ- oder Massenrate (Shapiro et al., 2010) verknüpft ist. Wird diese Beziehung für einen Ort kalibriert und werden sowohl der zeitabhängige Anteil des a-Wertes (seismogener Index) als auch der konstante b-Wert aus der beobachteten Seismizität abgeschätzt, kann die Wahrscheinlichkeit berechnet werden, mit der induzierte Beben zukünftig auftreten. Diese Methode nutzt aus, dass die anthropogene Änderung der Spannungsrate die natürliche Änderung übersteigt. Die Seismizität, die durch den menschlichen Eingriff verursacht wird, korreliert daher gut mit Änderungen der geotechnischen Parameter, z.B. der Förderrate in einem Bergbaubetrieb oder dem Bohrlochdruck bei einer hydraulischen Risszeugung (hydraulic fracturing).

(c) Quellparameter-orientierter Ansatz

In einigen Fällen zeichnet sich induzierte Seismizität durch spezielle Bruchprozesse aus, die bei natürlichen Erdbeben im Allgemeinen nicht auftreten. Zum Beispiel resultieren Einstürze von Hohlräumen, Pfeilerversagen und Sprengungen im Bergbau in volumetrischen Quellanteilen, die für tektonische Beben nicht zu erwarten sind. Das Vorhandensein solcher Quellanteile kann daher als Hinweis auf induzierte Seismizität interpretiert werden (z.B. Ford et al., 2008; Cesca et al., 2013). Die Schwierigkeit besteht bei diesem Ansatz darin, Momententensoren und ihre Unsicherheiten zuverlässig zu bestimmen. Dahm et al. (2013) geben dafür Empfehlungen, die auf Erfahrungen von Momententensorinversionen für schwächere lokale Ereignisse, z.B. im Bergbau, basieren. Cesca et al. (2013) stellen eine Idee zur Umrechnung von Momententensorlösungen in eine probabilistische Diskriminierung vor.

5. Abschlussbericht und Datenspeicherung

Der Abschlussbericht sollte alle oben beschriebenen Arbeitsschritte dokumentieren und sollte zusätzlich:

- eine einfache Erklärung des Gutachters zur Ursache des Erdbebens beinhalten;
- weitere Untersuchungen, Sondierungen und/oder Überwachung empfehlen, um die Ursache zu bestimmen, falls diese nicht identifiziert werden konnte;
- eine Wahrscheinlichkeit angeben mit der das Erdbeben getriggert oder induziert wurde einschließlich einer eindeutigen Referenz zu dem verwendeten Modell und den verwendeten Daten, d.h. einschließlich sämtlich vorhandener Informationen über die geotechnischen Tätigkeiten und die natürlich auftretende Seismizität;
- die Unsicherheiten der verwendeten Eingabeparameter des Modells berücksichtigen, einschließlich der Unsicherheiten des Epizentrums, der Herdtiefe, der Stärke (seismisches Moment), des Bruchtyps und, falls möglich, der Herdlösung und des Bruchvorgangs.

Die Expertengruppe empfiehlt außerdem, dass der Abschlussbericht sowie alle Rohdaten an eine nationale Einrichtung für induzierte und getriggerte Seismizität weitergereicht werden müssen. Des Weiteren sollte diese Datenbank regelmässig gepflegt und für alle interessierten Beteiligten oder die Öffentlichkeit verfügbar gemacht werden.

6. Schlussfolgerung

Alle drei vorgeschlagenen Ansätze sind auf die Verfügbarkeit von standortspezifischen seismologischen und technischen Daten angewiesen. Obwohl die Verwendung probabilistischer Methoden keine übliche Praxis ist und bisher nur wenig Erfahrung in spezifischen Anwendungen gesammelt werden konnte, empfehlen wir sie zur Diskriminierung von getriggelter, induzierter und natürlicher Seismizität. Die dadurch entstehenden Anforderungen sollten schon bei der Planung eines seismischen Netzwerks sowie bei der Erfassung geophysikalischer und geologischer Daten berücksichtigt werden. Mit verschiedenen Verfahren erlangte Ergebnisse können mit Hilfe von Bayesschen Methoden verknüpft werden.

Referenzen

A. Barth, F. Wenzel, C. Langenbruch, 2013. [*Probability of earthquake occurrence and magnitude estimation in the post shut-in phase of geothermal projects*](#). *Journal of Seismology*, Volume 17, Issue 1, pp 5-11

Becker, D., Cailleau, B. and Dahm, T. and Shapiro, S. and Kaiser, 2010. *D. Stress triggering and stress memory observed from acoustic emission records in a salt mine*. *Geophys. J. Int.*, doi:10.1111/j.1365-246X.2010.04642.x

Bischoff, M., Cete, A., Fritschen, R. and Meier, Th., 2010. *Coal Mining Induced Seismicity in the Ruhr Area, Germany*. *Pure and Applied Geophysics*, 167, No. 1-2, p. 63-75

Cesca, S. and B. Dost and A. Oth, 2013. *Preface to the special issue "Triggered and induced seismicity: probabilities and discrimination*, Volume 17, Issue 1, pp 1-4

Cesca S., Rohr A., Dahm T. *Discrimination of induced seismicity by full moment tensor inversion and decomposition*, 2013. *J. Seismology*, Volume 17, Issue 1, pp 147-163.

Cesca, T. Dahm, C. Juretzek, D. Kühn. *Rupture process of the 7 May 2001 Mw 4.2 Ekofisk induced earthquake*. *Geophys. J. Int.*, 10.1111/j.1365-246X.2011.05151.x

Cuenot, N., Dorbath, C. and Dorbath, L., 2008. *Analysis of the microseismicity induced by fluid injections at the hot dry rock site of the Soultz-sous-Forêts (Alsace, France): Implications for the characterisation of the geothermal reservoir properties*. *Pure and appl. Geophys.* 165, 797-828.

Dahm, T, D. Becker, M. Bischoff, S. Cesca, B. Dost, R. Fritschen, S. Hainzl, C.D. Klose, D. Kühn, S. Lasocki, Th. Meier, M. Ohrnberger, E. Rivalta, U. Wegler, Stephan Husen, 2013. *Recommendation for the discrimination of human-related and natural seismicity*. *Journal of Seismology*. *Journal of Seismology, Letter to the Editors*, Volume 17, Issue 1, pp 197-202.

Dahm, T. Hainzl, S., Becker, D., Bischoff, M., Cesca, S., Dost, R., Fritschen, R., Kühn, D., Lasocki, S., Klose, Chr., Meier, Th., Ohrnberger, M., Rivalta, E., Shapiro, S., Wegler, U., 2010: *How to discriminate induced, triggered and natural seismicity*. In *Proceedings of the workshop "Induced Seismicity"*, Nov 15-17, 2010, Luxembourg. Eds.: J. Ritter and A. Oth. *Cahier du Centre Europeen de Geodynamique et de Seismologie*, Vol. 30, 69-76.

Dinske and Shapiro, S., 2013. [Seismotectonic state of reservoirs inferred from magnitude distributions of fluid-induced seismicity](#). Volume 17, Issue 1, pp 13-25

Davis, R.O. and Selvadurai, A.P.S., 1996. *Elasticity and Geomechanics*. Cambridge University Press, pp 201.

Dieterich, 1994. *A constitutive law for rate of earthquake production and its application to earthquake clustering*. *J. Geophys. Res.* 99, 2601-2618.

Dost, B. and H.W. Haak, 2007. *Natural and induced seismicity. Geology of The Netherlands*. Editors: Th. E. Wong, D.A.Z. Batjes and J. de Jager, Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences, 2007, p. 223-239.

Ford, S.R. and Dreger, D.S. and Walter, W.R., 2008. *Source characterization of the 6 August 2007 Crandall Canyon Mine seismic event in central Utah*. *Seism. Res. Lett.* 79, No 5, 10.1785/gssrl.79.5.637.

Fritschen, R., 2010. *Mining-induced seismicity in the Saarland, Germany*. *Pure Appl. Geophysics* 167, 77-89, 10.1007/s00024-009-0002-7.

Hainzl, S., Ogata, Y., 2005. *Detecting fluid signals in seismicity data through statistical earthquake modeling*, *J. Geophys. Res.*, 110, B05S07, doi: 10.1029/2004JB003247

Häring, M.O. and Schanz, U. and Ladner, F. and Dyer, B.C., 2008. *Characterisation of the Basel 1 enhanced geothermal system*. *Geothermics* 37, 469-495, 101016/j.geothermics.2008.06.002.

Heimann, S., 2011. *A Robust Method to estimate Kinematic Earthquake Source Parameters*. PhD thesis, Department Geowissenschaften, University of Hamburg, pp 151.

Klose, C.D. 2011. *Evidence for anthropogenic surface loading as trigger mechanism of the 2008 Wenchuan earthquake*, *Environmental Earth Sciences*, 10.1007/s12665-011-1355-7.

Klose, C.D. and Seeber, L. 2007. *Shallow seismicity in stable continental regions*, *Seismological Research Letters* 76, 554-562.

Klose, C.D., 2013. *Mechanical and statistical evidence of the causality of human-made mass shifts on the Earth's upper crust and the occurrence of earthquakes*. *Journal of Seismology*, Volume 17, Issue 1, pp 109-135

Kwiatek, G., Plenkers, K., Dresen, G. and JAGUARS Research Group, 2011. *Source Parameters of Picoseismicity recorded at Mpong Deep Gold Mine, South Africa: Implications for Scaling Relations*. *Bull. Seism. Soc. Am* 101, 2592-2608, 10.1785/0120010094.

Ogata, Y., 1988: *Statistical models of point occurrences and residual analysis for point processes*, *J. Am. Stat. Assoc.*, 83, 9– 27.

Ogata, Y., 1998: *Space-time point-process models for earthquake occurrences*, *Ann. Inst. Stat. Math.*, 50, 379–402.

Ottmøller, L., Nielsen, H.H., Atakan, K., Braunmiller, J. & Haskov, J., 2005. The 7 May 2001 induced seismic event in the Ekofisk oil field, North Sea, *J. Geophys. Res.*, 110, 10.1029/2004JB003374.

Pandey, A.P. And Chadha, R.K., 2003. Surface loading and triggering earthquakes in the Koyana-Warna region, western India. *Physics Earth Planetary Int.* 139, 207-223, 10.1016/j.pepi.2003.08.003.

Passarelli, L.; Maccaferri, F.; Rivalta, E.; Dahm, T.; Abebe Boku, E., 2013. A probabilistic approach for the classification of earthquakes as 'triggered' or 'not triggered': application to the 1975 Krafla dike event followed by the 13th Jan 1976 M 6.2 earthquake on the Tjornes Fracture Zone, Iceland. *Journal of Seismology*, 17, 1, 165-187, 10.1007/s10950-012-9289-4

Pechmann, J.C., Arabasz, W.J., Pankow, K.L., Burlacu, R. and McCarter, M.K., 2008. Seismological report on the 6 August 2007 Crandall Canyon mine collapse in Utah. *Seism. Res. Lett.* 79, No5, 10.1785/gssrl.79.5.620.

Richardson, E. and Jordan, Th.H., 2002. Seismicity in Deep Gold Mines in South Africa: Implications for Tectonic Earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Am.* 92, 1766-1782.

Shapiro, S, C. Dinske and C. Langenbruch and F. Wenzel (2010). Seismogenic index and magnitude probability of earthquakes induced during reservoir fluid stimulations. *The Leading Edge*, v. 29, pp 304-309, 10.1190/1.3353727.

Utsu, T., Ogata, Y., Matsu'ura, R.S., 1995: The centenary of the Omori formula for a decay law of aftershock activity, *J. Phys. Earth*, 43, 1– 33.

Zhuang, J., Werner, M.J., Hainzl, S., Harte, D., Zhou, S., 2011: Basic models of seismicity: spatiotemporal models, *Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis*, doi:10.5078/corssa-07487583. Available at <http://www.corssa.org>.