

Załącznik 2 / Attachment 2

Autoreferat / Abstract

AUTOREFERAT

1. Imię i nazwisko

Grzegorz Kwiatek

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

- 2007 Doktor Nauk o Ziemi
- Instytut Geofizyki Polskiej Akademii Nauk, Zakład Sejsmologii i Fizyki Wnętrza Ziemi, ul. Księcia Janusza 64, 01-452 Warszawa, Polska.
- Tytuł pracy doktorskiej: Tomografia źródła wybranych zjawisk sejsmicznych w kopalni miedzi "Rudna".
- 2002 Magister Inżynier
- Akademia Górniczo-Hutnicza, wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, ul. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska.
- Kierunek: Inżynieria Środowiska, Specjalność: Geofizyka
- Tytuł pracy dyplomowej: Program komputerowy do analizy lokalnego hazardu sejsmicznego na podstawie katalogu sejsmicznego kopalni „Rudna” KGHM Polska Miedź S.A.

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/artystycznych

- od 2007 Staż podoktorski w GFZ German Research Centre for Geosciences, Sekcja 3.2: Geomechanics and Rheology, Poczdam, Niemcy
- 2007 Adiunkt w zakładzie Sejsmologii, Instytut Geofizyki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie
- 2002-2007 Asystent w zakładzie Sejsmologii, Instytut Geofizyki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. nr 65, poz. 595 ze zm.):

a) Tytuł osiągnięcia naukowego

Procesy fizyczne w ognisku i relacje skalowalności w sejsmiczności indukowanej i badaniach laboratoryjnych.

b) (autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa)

- [1] **Kwiatek, G.** (2008). Relative source time function deconvolution at the Rudna copper mine: Uncertainty Estimation. *J. Seismol.* **12**, 499–517, doi 10.1007/s10950-008-9100-8.
- [2] Moeck, I., **G. Kwiatek**, oraz G. Zimmermann (2009). Slip tendency analysis, fault reactivation potential and induced seismicity in a deep geothermal reservoir. *J. Struct. Geol.* **31**, 1174–1182, doi 10.1016/j.jsg.2009.06.012.
- [3] Orlecka-Sikora, B., E.E. Papadimitriou, oraz **G. Kwiatek** (2009). Study of the interaction among mining induced seismic events in the Legnica-Głogów Copper District, Poland. *Acta Geophys.* **57**, 413–434, doi 10.2478/s11600-008-0085-z.
- [4] Plenkers, K., **G. Kwiatek**, M. Nakatani, G. Dresen, oraz JAGUARS Research Group (2010). Observation of seismic events with frequencies $f > 25$ kHz at Mponeng deep gold mine, South Africa. *Seismol. Res. Lett.* **81**, 467–478, doi 10.1785/gssrl.81.3.467.
- [5] **Kwiatek, G.**, M. Bohnhoff, G. Dresen, A. Schulze, T. Schulte, G. Zimmermann, oraz E. Huenges (2010). Microseismicity induced during fluid-injection: A case study from the geothermal site at Gross Schoenebeck, North German Basin. *Acta Geophys.* **58**, 995–1020, doi 10.2478/s11600-010-0032-7.
- [6] **Kwiatek, G.**, K. Plenkers, M. Nakatani, Y. Yabe, G. Dresen, oraz JAGUARS Research Group (2010). Frequency-magnitude characteristics down to magnitude -4.4 for induced seismicity recorded at Mponeng gold mine, South Africa. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **100**, 1167–1173, doi 10.1785/0120090277.
- [7] **Kwiatek, G.**, K. Plenkers, oraz G. Dresen (2011). Source parameters of picoseismicity recorded at Mponeng deep gold mine, South Africa: Implications for Scaling Relations. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **101**, 2592–2608, doi 10.1785/0120110094.
- [8] Plenkers, K., D. Schorlemmer, oraz **G. Kwiatek** (2011). On the probability of detecting picoseismicity. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **101**, 2579–2591, doi 10.1785/0120110017.
- [9] Davidsen, J., oraz **G. Kwiatek**, oraz G. Dresen (2012). No Evidence of magnitude clustering in an aftershock sequence of nano- and picoseismicity. *Phys. Rev. Lett.* **108**, 038501, doi 10.1103/PhysRevLett.108.038501.
- [10] Davidsen, J., oraz **G. Kwiatek** (2013). Earthquake interevent time distribution for induced micro-, nano- and picoseismicity. *Phys. Rev. Lett.*, **110**, 068501, doi 10.1103/PhysRevLett.110.068501.
- [11] **Kwiatek, G.**, oraz Y. Ben-Zion (2013). Assessment of P and S wave energy radiated from very small shear-tensile seismic events in a deep South African mine. *J. Geophys. Res.* **118**, doi 10.1002/jgrb.50274.

c) Omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

Wprowadzenie

Jednym z najważniejszych zagadnień sejsmologii jest odpowiedź na pytanie czy jesteśmy w stanie zrozumieć podstawowe zasady rządzące fizyką nukleacji i propagacji wstrząsu sejsmicznego we wszystkich skalach. Chcielibyśmy wiedzieć w jaki sposób energia sprężysta zgromadzona w skałach przed trzęsieniem ziemi jest wyzwolona podczas pękania górotworu w postaci fal sejsmicznych i innych rodzajów energii, np. ciepła. Kolejnym niezwykle istotnym zagadnieniem jest sprawdzenie (ew. porównanie), czy rozpraszanie zgromadzonej energii sprężystej w skałach w inne formy energii jest identyczne (lub przynajmniej bardzo podobne) dla wszystkich wstrząsów bez względu na ich rozmiar, przykładowo: czy zasadniczo procesy fizyczne pękania górotworu dla niewielkiego zjawiska o magnitudzie 1.0 są podobne do procesów zachodzących dla wielkiego trzęsienia ziemi w Tohoku o magnitudzie 9.0.

Obserwacje mikrosejsmiczności (rozmiary ogniska <1km) w niewielkiej odległości od źródła, podobnie jak i niezwykle małe wstrząsy (aktywność akustyczna) obserwowane w badaniach laboratoryjnych na próbkach (rozmiary ogniska <1cm) mogą pomóc w analizie procesów fizycznych zachodzących w ognisku sejsmicznym (McGarr i inni, 2010). Niestety, istniejąca luka w zakresie magnitud pomiędzy badaniami laboratoryjnymi a badaniami wstrząsów *in-situ* nie pozwala na satysfakcjonującą odpowiedź na pytanie jak podobne są dynamiczne procesy pękania górotworu obserwowane w laboratorium do analogowych procesów występujących w trzęsieniach ziemi

Zrozumienie tzw. *relacji skalowalności* parametrów opisujących ogniska sejsmiczne dla trzęsień ziemi w całym zakresie magnitud ma także swoje praktyczne zastosowanie w analizie zagrożenia sejsmicznego (Gibowicz, 2009). Jeśli bowiem zrozumielibyśmy procesy fizyczne rządzące pękaniem górotworu w skali laboratoryjnej, i jeśli udowodnilibyśmy że procesy te są niezależne od skali (rozmiaru, siły wstrząsu), to wiedzę zdobytą w doświadczeniach na próbkach moglibyśmy ekstrapolować do zrozumienia i predykcji większych trzęsień ziemi.

Badanie procesów ogniskowych oraz relacji skalowalności wiąże się z analizą różnych parametrów statystycznych oraz fizycznych parametrów opisujących ogniska sejsmiczne. Przykładowym parametrem statystycznym, wykorzystywanym w analizie samopodobieństwa wstrząsów jest współczynnik *b* relacji Gutenberga-Richtera (por. Boettcher i inni, 2009; Kwiatek i inni, 2010). Statyczne i dynamiczne cechy fizyczne ogniska wstrząsów wykorzystywane do charakterystyki samopodobieństwa wstrząsów obejmują wielkości takie jak moment sejsmiczny, energię wyzwoloną w formie fal sejsmicznych, częstotliwość narożną, a także parametry pochodne: statyczny spadek naprężeń czy też naprężenie pozorne.

Ogólnie rzecz biorąc przyjmuje się, że statyczny spadek naprężeń powstały na skutek trzęsienia ziemi (tj. miara spadku naprężenia na jednostkę powierzchni uskoku) jest *zasadniczo* niezależny od rozmiaru ogniska, tzn. nie zmienia się z momentem sejsmicznym (por. Kanamori i Anderson, 1975; McGarr, 1984; Spottiswoode, 1984). Z drugiej strony wiadomo także, że statyczny spadek naprężeń obserwowanych wstrząsów może przyjmować wartości z szerokiego zakresu 0.1MPa do 100MPa dla różnych katalogów zjawisk sejsmicznych. Tak duża zmienność jest przypisywana różnorodnym czynnikom, niedostatecznie uwzględnionych przy obliczeniach spadku naprężeń: specyficznym własnościami geologicznym i tektonicznym górotworu, wpływu ciśnienia porowego, obecności wody lub innych cieczy, innej niż założona prędkości pękania górotworu, czy też zmienności naprężenia normalnego na powierzchni uskoku (Tomic i inni,

2009). Jeśli zmienność ta jest obserwowana w obrębie jednego katalogu bez wskazania przyczyny, często jest ona interpretowana jako załamanie samopodobieństwa wstrząsów. Duża zmienność jest także cechą naprężenia pozornego, który jest dynamicznym parametrem opisującym potencjał niszczący wstrząsu, niezależne od jego rozmiaru. Obserwowane wartości naprężenia pozornego oscylują typowo pomiędzy 0.01MPa a 10MPa dla różnych katalogów, ewentualnie obserwowane jest załamanie relacji skalowalności (tj. naprężenie pozorne zmienia się z magnitudą). Zmienność naprężenia pozornego przypisuje się niejednorodności budżetu energetycznego wstrząsu, tj. zmianom proporcji, w jakich energia sprężysta skumulowana w skałach jest wyzwolona jako ciepło, wykorzystana do propagacji pęknięcia w górotworze, czy też zamieniona w fale sejsmiczne. Stała wartość naprężenia pozornego jest raportowana przez wielu autorów w szerokim zakresie magnitud (Ide i Beroza, 2001; Yamada i inni, 2005; McGarr i inni, 2010) sugerując, że procesy fizyczne zachodzące w ognisku sejsmicznym są takie same, lub przynajmniej bardzo podobne, niezależnie od skali. Z drugiej strony wielu autorów przedstawiło dowody, że naprężenie pozorne maleje wraz z malejącym rozmiarem wstrząsu (Izutani i Kanamori, 2001; Prejean i Ellsworth, 2001; Kanamori i Rivera, 2004; Stork i Ito, 2004; Mayeda i inni, 2005). Oznaczałoby to, że małe wstrząsy wyzwalały generalnie mniej energii w formie fal sejsmicznych niż większe, a energia sprężysta jest wyzwolona albo w formie ciepła, lub zużyta w procesie pęknięcia. Oczywiście oznacza to, że wstrząsy nie są samopodobne niezależnie od ich rozmiaru.

Pytanie, czy małe i duże wstrząsy są samopodobne pozostaje na razie bez satysfakcjonującej odpowiedzi (Kanamori i Brodsky, 2004). Częściowo jest to spowodowane ograniczeniami naszych możliwości obserwacyjnych wstrząsów, niewystarczającymi danymi dotyczącymi ośrodka geologicznego (np. stosowanie zbyt uproszczonego modelu prędkościowego ośrodka, wpływ tłumienia fal etc.), ograniczeniami systemu akwizycji danych (np. niesatysfakcjonujące pokrycie azymutalne ogniska, niewielkie pasmo przenoszenia sejsmometrów). Także używane modele wydają się czasami zbyt uproszczone aby prawidłowo opisać zjawiska fizyczne zachodzące w ognisku sejsmicznym. Wiemy już, że pęknięcie górotworu jest procesem skomplikowanym, charakteryzującym się zmienną prędkością pęknięcia i skomplikowanym rozkładem powierzchniowym przemieszczenia na uskoku, nawet dla stosunkowo małych trzęsień ziemi (Domański i inni, 2002; Yamada i inni, 2002; Domański i Gibowicz, 2003; Imanishi i inni, 2004b; Kanamori i Brodsky, 2004; Dreger i inni., 2007; Kwiatek, 2008; Tomic i inni, 2009). Tymczasem typowo wykorzystywany model ogniska Madariagi (1976) zakłada stałą prędkość pęknięcia górotworu, równą 90% prędkości fal poprzecznych. Różnica między faktyczną a założoną prędkością pęknięcia górotworu wprowadza np. błędy w oszacowaniu finalnego rozmiaru ogniska (Kanamori i Brodsky, 2004). Konsekwencją tego jest zazwyczaj drastyczna zmiana w obserwowanych wartościach statycznego spadku naprężeń. Kolejny potencjalny problem jest związany z założeniem, że proces przemieszczania się płaszczyzn uskoku podczas trzęsienia ziemi jest czysto ścinający (tzn. nie ma zmian objętości w ognisku). Wiele prac wskazuje, że przynajmniej dla małych zjawisk składowe nieścinające przemieszczenia płaszczyzn uskoku w ognisku są istotne (Wiejacz, 1992; Ross i inni., 1996; Sileny i Milev, 2008; Vavryčuk i inni., 2008; Fischer i Guest, 2011). Ciągłe nie jest do końca jasne jak duży wpływ na fizykę procesu pęknięcia górotworu i obserwowane relacje skalowalności ma obecność składowych nieścinających w ognisku sejsmicznym.

Istnieje długa lista studiów zajmujących się zarówno badaniem zjawisk zachodzących w ognisku wstrząsu, jak i relacjami skalowalności, jednakże dopiero w ostatnich latach znacząco zwiększyła się ilość katalogów sejsmicznych zawierających rejestracje bardzo małych wstrząsów, szczególnie cennych dla analizy samopodobieństwa. Spowodowane jest to rozwojem czujników i systemów rejestracyjnych, zwiększoną ilością obserwacji pochodzących z otworów i kopalni celem zminimalizowania odległości pomiędzy czujnikami i ogniskiem wstrząsu (Gibowicz i inni, 1991; Imanishi i inni, 2004a; Nakatani i inni, 2008; Bohnhoff i inni, 2010;

McGarr i inni, 2010). Analiza dużej ilości danych mikro-, nano- i pikosejsmicznych (rozmiar ogniska od 1km do kilku cm) jest obiecującym narzędziem służącym zrozumieniu fizycznych procesów zachodzących w ognisku wstrząsu i relacji skalowalności, ponieważ:

- a. Duża ilość danych sejsmicznych jest dostępna w porównaniu do silniejszych wstrząsów.
- b. Niewielkie wstrząsy są rejestrowane przez lokalne sieci sejsmiczne przy niewielkich odległościach pomiędzy ogniskiem a czujnikami, pozwalając na rejestrację szczegółów procesu pęknięcia górotworu ze znacznie większą precyzją.
- c. Częstokroć proces powstawania małych wstrząsów może być w niewielkim stopniu kontrolowany (np. w kopalniach czy zbiornikach geotermalnych podczas eksploatacji). Pozwala to na instalację sieci sejsmicznej w bezpośredniej bliskości zjawisk.

Niezwykle istotne są także badania procesów zachodzących w ognisku w skali laboratoryjnej (tu rozmiary ogniska typowo nie przekraczają 1cm). Te ekstremalnie małe trzęsienia ziemi rejestrowane są przy pomocy czujników seismoakustycznych. Proste charakterystyki takie jak amplituda pierwszych wstąpień fali P zostały już wykorzystane do badania samopodobieństwa wstrząsów w femtoskali przy użyciu parametru b relacji Gutenberga-Richtera. Wykonano także pierwsze próby obliczenia pełnego tensora momentu sejsmicznego i parametrów ogniska (np. Graham i inni, 2010). Wydaje się, że badania laboratoryjne stanowią niezbędny element studiów fizycznych procesów zachodzących w ognisku (McGarr i inni, 2010).

Szczegółowe omówienie prac stanowiących osiągnięcie naukowe

Procesy w ognisku wstrząsów indukowanych górnictwem działalnością człowieka

Artykuły:

- [1] **Kwiatek, G.** (2008). Relative source time function deconvolution at the Rudna copper mine: Uncertainty Estimation. *J. Seismol.* **12**, 499–517, doi 10.1007/s10950-008-9100-8.

Praca ta przedstawia metodologię obliczania relatywnej czasowej funkcji źródła (RCFZ) wraz z szacowaniem niepewności jej wyznaczenia. Metodologia została zastosowana do analizy dwóch małych wstrząsów ($M_w=2.9$ i 3.0) indukowanych działalnością człowieka w kopalni miedzi „Rudna” w Polsce. Wstrząsy były zarejestrowane przez grupę 60 krótkookresowych czujników rejestrujących składową pionową drgań gruntu, zlokalizowanych w odległości 0.4-8km od analizowanych ognisk.

W pracy wykorzystałem pseudospektralną aproksymację RCFZ, polegającą na jej sparametryzowaniu przy pomocy skończonej sumy Gaussowskich funkcji jądrowych (Dębski i Domański, 2002). RCFZ zostały obliczone dla każdego czujnika z osobna używając metody empirycznej funkcji Greena. Inwersja seismogramów do postaci pseudospektralnej została wykonana z wykorzystaniem algorytmu symulowanego wyżarzania (Ingber, 1989, 1993). Efektem inwersji było uzyskanie stabilnych RCFZ spełniających fizyczne kryteria, w odróżnieniu od innych algorytmów takich jak metoda ilorazu spektrów albo dekonwolucja Landwebera (Bertero i inni, 1997; Piana i Bertero, 1997). Dodatkowo, opracowana metodologia pozwoliła na oszacowanie niepewności wyznaczenia RCFZ z wykorzystaniem algorytmu Metropolisa-Hastingsa (Metropolis i inni, 1953; Hastings, 1970; Chib i Greenberg, 1995).

Opracowana metodologia jest efektywnym narzędziem służącym wiarygodnemu obliczeniu RCFZ oraz niepewności ich wyznaczenia. Pozwala na określenie, czy obserwowany, częstokroć skomplikowany charakter RCFZ jest spowodowany

rzeczywistymi procesami zachodzącymi w ognisku, czy np. artefaktem przetwarzania danych.

- [3] Orlecka-Sikora, B., E.E. Papadimitriou, oraz **G. Kwiatek** (2009). Study of the interaction among mining induced seismic events in the Legnica-Głogów Copper District, Poland. *Acta Geophys.* **57**, 413–434, doi 10.2478/s11600-008-0085-z.

W pracy przedstawiono aplikację teorii transferu naprężeń Coulombowskich celem zbadania interakcji pomiędzy zjawiskami sejsmicznymi indukowanymi działalnością człowieka w kopalni miedzi „Rudna”. Do analizy wybrano 217 zjawisk o magnitudach $M_L > 2.0$, zarejestrowanych przez kopalnianą sieć sejsmometryczną. Dla badanych zjawisk obliczone zostały zarówno parametry spektralne (por. Kwiatek i inni, 2011), jak i tensory momentu sejsmicznego (por. Wiejacz, 1992).

Obliczenia skumulowanych zmian naprężenia Coulombowskiego zostały wykonane z wykorzystaniem pakietu Coulomb 3.0. Oszacowano statyczne zmiany naprężeń po wystąpieniu wstrząsu i czy/jak te zmiany wpłynęły na pojawienie się kolejnego wstrząsu w analizowanej sekwencji. Zaobserwowano, że silne wstrząsy kopalniane zdolne są do wprowadzenia otaczającego je górotworu w stan krytyczny, skutkujący pojawieniem się kolejnego zjawiska. Więcej niż 60% analizowanych zjawisk koreluje się z obszarami, w których wartość naprężenia Coulombowskiego wzrosła. Otrzymane rezultaty sugerują, że transfer statycznych naprężeń może wpłynąć na proces generowania zjawisk sejsmicznych w kopalni.

Procesy w ognisku wstrząsów indukowanych działalnością geotermalną człowieka

Gross Schoenebeck (GRSK) jest kluczowym laboratorium przeprowadzającym badania efektywności tzw. *Enhanced Geothermal Systems* dla geologicznego obszaru zwanego Północno-Wschodnim Basenem Niemieckim. W 2007 roku istniejący otwór iniekcyjny został wykorzystany do wielokrotnych stymulacji hydraulicznych (fracking) formacji skalnych dolnego Permu, położonych na głębokości ok. 4km. Celem zweryfikowania wpływu i efektywności stymulacji na górotwór, zainstalowana została sieć sejsmiczna złożona z czujników powierzchniowych oraz czujnika umieszczonego w otworze w pobliżu stymulowanej formacji (Huenges i inni, 2009). Przeprowadzone stymulacje spowodowały pojawienie się niewielkiej aktywności sejsmicznej – ok. 60 zjawisk - o magnitudach momentu sejsmicznego nie przekraczających $M_w - 1.0$. Analiza dostępnych danych sejsmicznych skupiła się na określeniu parametrów ogniska [5] oraz na interpretacji procesów prowadzących do powstania obserwowanej sejsmiczności w powiązaniu z parametrami geomechanicznymi i geologicznymi stymulowanej formacji [2].

Dyskusja:

- [2] Moeck, I., **G. Kwiatek**, oraz G. Zimmermann (2009). Slip tendency analysis, fault reactivation potential and induced seismicity in a deep geothermal reservoir. *J. Struct. Geol.* **31**, 1174–1182, doi 10.1016/j.jsg.2009.06.012.

W pracy analizowaliśmy potencjał reaktywacyjny („slip tendency”) uskoków występujących w obszarze GRSK na skutek gwałtownych zmian naprężeń, będących efektem eksploatacji geotermalnej zbiornika. Dla każdego uskoku znanego z profilowań sejsmicznych obliczono prawdopodobieństwo pojawienia się na nim wstrząsu przy uwzględnieniu jego geometrii, stanu geomechanicznego ośrodka (naprężenia) oraz obecności zaburzeń w związku z eksploatacją (zmiany ciśnienia porowego). Przetestowano także czy zastosowana metodologia jest w stanie przewidzieć orientację i rozmiar uskoków wywołanych przez stymulację. Przeprowadzone badania dowodzą, że

główne uskoki występujące w stymulowanych formacjach wulkanicznych mają niewielki potencjał reaktywacyjny. Oznacza to, że bardzo wysokie dodatkowe ciśnienie płuczki jest konieczne do reaktywowania uskoków normalnych lub przesuwczych. Znajduje to potwierdzenie w niewielkiej obserwowanej aktywności sejsmicznej, która pojawia się na drugorzędym systemie uskoków posiadającym większy potencjał reaktywacyjny. Otrzymane rezultaty wskazują na znaczny stopień rezydualnego spękania górotworu stymulowanych formacji. Studium wskazuje na skuteczność proponowanej metodologii do badania i charakteryzacji potencjału reaktywacyjnego uskoków w obszarach planowanej eksploatacji geotermalnej.

- [5] **Kwiatek, G.**, M. Bohnhoff, G. Dresen, A. Schulze, T. Schulte, G. Zimmermann, oraz E. Huenges (2010). Microseismicity induced during fluid-injection: A case study from the geothermal site at Gross Schoenebeck, North German Basin. *Acta Geophys.* **58**, 995–1020, doi 10.2478/s11600-010-0032-7.

Artykuł [5] prezentuje analizę parametrów ognisk sejsmicznych, wzbudzonych przez stymulacje przeprowadzone w GRSK w 2007. Przeanalizowano niewielką ilość 29 zjawisk z magnitudami $-1.8 < M_w < -1.0$, zarejestrowanych wyłącznie przez pojedynczy czujnik zlokalizowany w otworze produkcyjnym, 500m od stymulowanych formacji skalnych. Analiza czasoprzestrzennego rozkładu wstrząsów pozwoliła zweryfikować hipotezę, że lokalne własności geologiczno-tektoniczno-geomechaniczne miały wpływ na niewielką aktywność sejsmiczną podczas stymulacji. Obserwowana sejsmiczność charakteryzuje się silną tendencją do grupowania w czasoprzestrzenne klastry. Potwierdzono, że główny klaster sejsmiczności jest związany z podrzędnym systemem uskoków, który zgodnie z pracą [2] charakteryzuje się jednak wysokim potencjałem reaktywacyjnym. Dodatkowo, zaobserwowaliśmy propagację zjawisk od początkowego punktu stymulacji.

Zamknięcie luki pomiędzy eksperymentami laboratoryjnymi na próbkach i pikosejsmicznością obserwowaną in situ.

Kopalnie głębinowe stanowią naturalne laboratorium geomechaniczne *in-situ*, które może być łącznikiem umożliwiającym badanie procesów pękania górotworu dla niewielkich wstrząsów o rozmiarach nie przekraczających kilkunastu metrów, w skali znajdującej się pomiędzy silnymi trzęsieniami ziemi (rozmiar ogniska $> 1\text{km}$) i ekstremalnie małymi zjawiskami sejsmoakustycznymi rejestrowanymi podczas badań laboratoryjnych na próbkach (rozmiar ogniska $< 1\text{cm}$).

Celem projektu JAGUARS (Japanese-German Acoustic Emission Research in South Africa) była analiza procesów zachodzących w ognisku sejsmicznym oraz relacji skalowalności dla nano- i pikosejsmiczności obserwowanej w kopalni złota Mponeng w Republice Południowej Afryki. Warunki panujące na głębokości 3.5km tworzą unikalny analog laboratorium geomechanicznego, pozwalający na badanie kinematycznych i dynamicznych procesów zachodzących w ognisku, parametrów spektralnych, jak i stanu naprężeń w otaczającym górotworze. Monitoring niezwykle małych wstrząsów pozwolił na obserwację lokalnych niestabilności górotworu, indukowanych tak działalnością człowieka, jak i niejednorodnościami ośrodka geologicznego (dajki, uskoki).

Sieć sejsmiczna JAGUARS została zainstalowana na głębokości ok. 3500m, wzdłuż korytarzy transportowych, zlokalizowanych ok. 90 metrów poniżej poziomu eksploatacyjnego. Ważniejszą niejednorodnością geologiczną zlokalizowaną w bezpośredniej bliskości sieci JAGUARS była zapadająca niemalże pionowo dajka o średniej miąższości ok. 40m, przecinająca tunele i poziom eksploatacyjny. Sieć sejsmiczną JAGUARS tworzyło 8 czujników

sejsmoakustycznych oraz wysokoczęstotliwościowe akcelerometry. Częstotliwość próbkowania systemu wynosiła 500kHz, a całkowity efektywny zakres częstotliwościowy rejestracji wynosił od 50Hz do ok. 200000Hz. Przeprowadzone testy potwierdziły, że zainstalowana sieć jest w stanie zarejestrować wstrząsy o rozmiarach od kilkunastu metrów do kilku centymetrów w odległości do 50m od centrum sieci. Pomiędzy czerwcem 2007 i kwietniem 2009 sieć JAGUARS zarejestrowała ok. 600000 zjawisk w obszarze 300x300x300m, pomimo niewielkiej wydajności rzędu 30%

Katalog sejsmiczny JAGUARS składa się zasadniczo z dwóch podstawowych podkatalogów:

- Sekwencji wstrząsów wtórnych po wstrząsie w magnitudzie M_w 1.9, który wystąpił 30m od centrum sieci JAGUARS. Po zjawisku zaobserwowano ponad 25000 wstrząsów wtórnych o magnitudach pomiędzy -5 i -0.8. Katalog ten jest unikatowy w skali świata.
- Aktywności sejsmicznej indukowanej przez strzelania na poziomie eksploatacyjnym położonym ok. 80m powyżej centrum sieci JAGUARS. Katalog zawiera kilkadziesiąt tysięcy zjawisk.

Oba podstawowe katalogi JAGUARS były bazą dla różnych badań, które przeprowadziłem wraz z kolegami w latach 2008-2013 dotyczących:

- Samopodobieństwa wstrząsów (artykuły [6], [7], [9] oraz [10]).
- Dynamicznych i statycznych parametrów ogniska sejsmicznego (prace [7] oraz [11]).
- Rozkładów czasoprzestrzennych zjawisk (artykuł [4], por. także artykuły w sekcji 5a tego autoreferatu).
- Granic detekcji nano- i pikosejsmiczności, oraz estymacji magnitudy kompletności katalogu sejsmicznego (prace [6] i [8]).
- Kalibracji czujników sejsmoakustycznych (por. sekcja 5a autoreferatu).
- Obserwacji mechanizmów nieścinające w ognisku oraz dyskusji wiarygodności obliczania energii wyzwolonej w formie fal sejsmicznych (praca [11]).

Szczegółowa dyskusja prac związanych z projektem JAGUARS:

- [6] **Kwiatek, G.**, K. Plenkers, M. Nakatani, Y. Yabe, G. Dresen, oraz JAGUARS Research Group (2010). Frequency-magnitude characteristics down to magnitude -4.4 for induced seismicity recorded at Mponeng gold mine, South Africa. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **100**, 1167–1173, doi 10.1785/0120090277.

W pracy analizowaliśmy samopodobieństwo procesu pęknięcia górotworu dla nano- i pikosejsmiczności obserwowanej w projekcie JAGUARS. Porównaliśmy katalog wstrząsów wtórnych zjawiska o magnitudzie M_w 1.9 z kilkoma katalogami aktywności zaobserwowanymi po strzelaniach eksploatacyjnych. W pierwszej kolejności opracowaliśmy metodę obliczania estymatora magnitudy momentu sejsmicznego z wykorzystaniem czujników sejsmoakustycznych i akcelerometrów. Dla wybranych katalogów zawierających magnitudy zjawisk i lokalizacje obliczono progi kompletności, a następnie utworzono wykresy powtarzalności i oszacowano wartości współczynników b relacji Gutenberga-Richtera. Analiza wykazała, że katalog sejsmicznych wstrząsów wtórnych zjawiska M_w 1.9 złożony z blisko 10000 zjawisk jest kompletny aż do magnitudy -4.4, odpowiadającej rozmiarowi ogniska równemu kilku centymetrom. Analiza kształtu wykresu powtarzalności i otrzymane wartości współczynnika b wskazują, że nie istnieje minimalny promień ogniska sejsmicznego aż do magnitudy -4.4. Wszystkie analizowane rozkłady częstotliwość-magnituda wstrząsów można było scharakteryzować przy pomocy relacji Gutenberga-Richtera, a obliczone wartości współczynnika b , którego wartości nie odbiegały od obserwowanych dla większych wstrząsów. Przedstawione wyniki pozwalają

na stwierdzenie, że proces pękania górotworu jest samopodobny aż do ognisk o rozmiarach kilku centymetrów.

- [7] **Kwiatek, G.**, K. Plenkers, oraz G. Dresen (2011). Source parameters of picoseismicity recorded at Mponeng deep gold mine, South Africa: Implications for Scaling Relations. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **101**, 2592–2608, doi 10.1785/0120110094.

Artykuł rozszerza analizę danych prezentowanych w pracy [6], skupiając się na badaniu relacji skalowalności z wykorzystaniem statycznych i dynamicznych parametrów ogniska sejsmicznego. Dla wybranych zestawów danych – zjawisk zarejestrowanych po strzelaniach na froncie eksploatacyjnym – obliczono takie parametry jak: moment sejsmiczny, energia wyzwolona w formie fal sejsmicznych, promień ogniska, naprężenia pozorne oraz statyczne spadki naprężeń. Obliczenia te były poprzedzone opracowaniem metody kalibracji czujników sejsmoakustycznych z wykorzystaniem akcelerometrów. Zastosowana technika pozwoliła na wiarygodną estymację parametrów ogniska dla zjawisk o magnitudach od -4.1 do -0.8.

W pracy przeanalizowano także zależności pomiędzy statycznym spadkiem naprężeń i magnitudą momentu sejsmicznego oraz naprężeniem pozornym i magnitudą momentu sejsmicznego. Jak zostało to już wspomniane wcześniej, brak zależności pomiędzy magnitudą i statycznym spadkiem naprężeń/naprężeniem pozornym są ważnymi wskaźnikami sugerującym samopodobieństwo procesu pękania górotworu (Ide i Beroza, 2001; Kanamori i Brodsky, 2004; Yamada i inni, 2005; McGarr i inni, 2010).

Otrzymane rezultaty jednoznacznie wskazują, że proces pękania górotworu jest samopodobny i zgodny z obserwacjami poczynionymi dla większych zjawisk sejsmicznych, przynajmniej aż do magnitudy -4.1. W analizowanym zakresie magnitud nie występuje górna granica dla obserwowanych częstotliwości narożnych, a statyczny spadek naprężeń oscyluje *średnio* wokół wartości równej ok. 10MPa i jest niezależny od magnitudy. Podobnie, analizowane zjawiska *na ogół* wyzwalamy podobną ilość energii w formie fal sejsmicznych na jednostkę powierzchni uskoku i na jednostkę jego przemieszczenia (tj. naprężenie pozorne jest niezależne od magnitudy). W konsekwencji, analiza statycznych i dynamicznych parametrów ogniska wskazuje na samopodobieństwo procesu pękania górotworu w rozważanym zakresie magnitud. Z drugiej strony wysoka rozdzielczość danych pozwoliła na obserwację pewnych niejednorodności: zależności pomiędzy wartością statycznego spadku naprężeń i naprężenia pozornego od parametrów geomechanicznych i geologicznych. Także znaleziono oznaki wskazujące na obecność zjawisk, dla których proces pękania górotworu mógł być znacząco powolniejszy od zakładanego w modelach ogniska, a także wskazówki, że mechanizm przynajmniej części zjawisk obserwowanych w projekcie JAGUARS może posiadać znaczącą składową nieścinającą.

- [11] **Kwiatek, G.** oraz Y. Ben-Zion (2013). Assessment of P and S wave energy radiated from very small shear-tensile seismic events in a deep South African mine. *J. Geophys. Res.* **118**, doi 10.1002/jgrb.50274.

Artykuł obejmuje problemy związane z wiarygodnym oszacowaniem energii wyzwolonej w formie fal sejsmicznych oraz wykorzystanie ilorazu energii wyzwolonej w formie fal P do energii fal S (E_S/E_P) jako współczynnika pozwalającego na detekcję zjawisk o mechanizmie nieścinającym. Przedstawiona metodologia jest zastosowana do analizy ilorazu energii przenoszonej w falach S i P dla 539 zjawisk o magnitudach $-5.23 \leq M_L \leq -2.41$ (rozmiary ogniska do $<1\text{dm}$). W pracy wykorzystano model ścinająco-tensyjny do symulowania radiacji fal P i S dla całej rodziny uskoku: od pełnego ścinania (tzw. Typ II

pęknięcia, shear crack), do pełnego otwarcia (tzw. typ I pęknięcia, tensile crack). Obliczone współczynniki radiacji fal P i S zostały wykorzystane do wprowadzenia poprawek na mechanizm ogniska do obserwowanych wartości energii. Kolejnym krokiem było oszacowanie wpływu ograniczonego pasma przenoszenia czujników i tłumienia na obliczone wartości E_S/E_P . Uzyskane po wprowadzeniu poprawek wartości E_S/E_P wskazują, że mechanizmy znacznej części zjawisk obserwowanych w projekcie JAGUARS zawierają składową izotropową.

- [4] Plenkers, K., **G. Kwiatek**, M. Nakatani, G. Dresen, oraz JAGUARS Research Group (2010). Observation of seismic events with frequencies $f > 25\text{kHz}$ at Mponeng deep gold mine, South Africa. *Seismol. Res. Lett.* **81**, 467–478, doi 10.1785/gssrl.81.3.467.

Artykuł stanowi przegląd danych sejsmicznych zgromadzonych w projekcie JAGUARS. Pierwsza część manuskryptu skupiona jest na analizie efektywności sieci w rejestracji niezwykle małych wstrząsów obserwowanych podczas trwania projektu. Efektem tej części pracy jest tzw. mapa czułości sieci („network sensitivity plot”) która pokazuje zużycie rejestrowanych częstotliwości fal o wysokie częstotliwości wraz z odległością od centrum sieci. Opracowana technika pozwoliła na zaobserwowanie wpływu niejednorodności ośrodka geologicznego (tunele, dajka, poziom eksploatacyjny, szybiki etc.) na kształt i charakterystykę częstotliwościową sygnałów, a jednocześnie pozwoliła na odpowiednie wyselekcjonowanie danych o wysokiej jakości w pracach [7] i [11]. Doświadczenia zebrane w tej fazie mogą posłużyć do optymalizacji jakości przyszłych eksperymentów. Druga część pracy skupia się na charakterystyce czaso-przestrzennej katalogu JAGUARS. Zaproponowana metodologia pozwoliła na organizację i podział dostępnego katalogu na podkatalogi: aktywności tła, aktywności sejsmicznej po strzelaniach, sejsmiczności będącej odzwierciedleniem różnych prac inżynierskich oraz wstrząsów wtórnych. Właściwy podział katalogu JAGUARS na podkatalogi miał zasadnicze znaczenie dla wszystkich pozostałych prac przeprowadzonych w ramach projektu.

- [8] Plenkers, K., D. Schorlemmer, oraz **G. Kwiatek** (2011). On the probability of detecting picoseismicity. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **101**, 2579–2591, doi 10.1785/0120110017.

Znajomość progu kompletności katalogu sejsmicznego jest bardzo ważna dla niemal każdej statystycznej analizy katalogu. Niestety, analiza progu kompletności katalogu sejsmicznego dla tak czułych sieci jak ta wykorzystywana w projekcie JAGUARS jest skomplikowana. Jest to spowodowane faktem, że wysokoczęstotliwościowe fale pochodzące od małych wstrząsów są tłumione i modyfikowane na skutek obecności nawet niewielkich lokalnych niejednorodności ośrodka geologicznego. Celem pracy było oszacowanie przestrzennego rozkładu progu kompletności katalogu sejsmicznego – parametr ten jest ważny także z punktu widzenia relacji skalowalności, ponieważ wpływa na wartość współczynnika b relacji Gutenberga-Richtera. W studium wykorzystano zmodyfikowaną metodologię przedstawioną w pracy Schorlemmera i Woessnera (2008) uwzględniając specyfikę warunków panujących przy akwizycji danych w projekcie JAGUARS, a związanych z obecnością i silnym wpływem struktur geologicznych, inżynierskich i tektonicznych na wartość progu kompletności katalogu (por. praca [4]).

Przygotowana metodologia została wykorzystana do obliczenia wartości probabilistycznego progu kompletności katalogu sejsmicznego jako funkcji azymutu obserwacji i odległości dla każdego czujnika seismoakustycznego z osobna. Uzyskane rozkłady zostały wykorzystane do utworzenia map progu kompletności katalogu. Stwierdzono, że wpływ konstrukcji inżynierskich (tunele, szybiki etc.) na próg detekcji i magnitudę kompletności katalogu jest znaczący i niepomijalny w badaniach związanych ze statystyczną przestrzenną analizą katalogu sejsmicznego. Uzyskane charakterystyki

zostały także wykorzystane do analizy jakości rejestracji samych czujników: zidentyfikowano sensory charakteryzujące się obniżonym progiem detekcji na skutek złego przymocowania do masy skalnej.

- [9] Davidsen, J., oraz **G. Kwiatek**, oraz G. Dresen (2012). No evidence of magnitude clustering in an aftershock sequence of nano- and picoseismicity. *Phys. Rev. Lett.* **108**, 038501, doi 10.1103/PhysRevLett.108.038501.

W pracy przetestowaliśmy hipotezę, czy magnitudy kolejnych wstrząsów występujących w sekwencji są niezależne od siebie (nieskorelowane) i czy można je uważać za losowo wybrane na podstawie skumulowanej dystrybuanty funkcji prawdopodobieństwa rozkładu magnitudy. Warunek nieskorelowania magnitud stanowi podstawę wielu statystycznych modeli (np. ETAS), jest wykorzystywany w probabilistycznej analizie hazardu sejsmicznego oraz stanowi bardzo ważną cechę wspierającą hipotezę o samopodobieństwie wstrząsów. W niektórych pracach sugerowano, że istnieje statystycznie znacząca korelacja pomiędzy magnitudami kolejnych trzęsień ziemi, zatem zasadniczo istnieje możliwość określenia magnitudy trzęsienia na podstawie wstrząsów poprzedzających.

Do pracy wybrano katalog 9444 wstrząsów pochodzących z katalogu JAGUARS. Przeanalizowano rozkład różnic magnitud pomiędzy wstrząsami sąsiadującymi w czasie powyżej progu kompletności katalogu sejsmicznego. Jeśli magnitudy następujących po sobie wstrząsów byłyby skorelowane, to rozkład różnic magnitud powinien być znacząco różny od syntetycznego rozkładu różnic magnitud wygenerowanego z rozkładu Gutenberga-Richtera przy założeniu identycznego progu kompletności katalogu. Przeprowadzona analiza wykazała, że nie ma dowodu na obecność korelacji pomiędzy magnitudami następujących po sobie zjawisk. Otrzymane rezultaty wskazują na to, że założenie niezależności magnitud przyjęte w analizach statystycznego przewidywania wstrząsów jest uzasadnione.

- [10] Davidsen, J., oraz **G. Kwiatek** (2013). Earthquake interevent time distribution for induced micro-, nano- and picoseismicity. *Phys. Rev. Lett.*, **110**, 068501, doi 10.1103/PhysRevLett.110.068501.

W pracy zaprezentowano analizę rozkładów różnicy czasów pomiędzy następującymi po sobie wstrząsami dla wybranych katalogów projektu JAGUARS oraz innych katalogów. Funkcje rozkładu prawdopodobieństwa różnic czasów z różnych katalogów mogą być przedstawione i porównywane między sobą, gdy czasy pomiędzy zjawiskami są znormalizowane średnią częstością pojawiania się zjawisk sejsmicznych w danym katalogu. Przetestowaliśmy hipotezę statystyczną o niezmienności rozkładu czasów pomiędzy następującymi zjawiskami dla nano- i pikosejsmiczności obserwowanej w projekcie JAGUARS, a także dla danych mikrosejsmicznych z otworu KTB w Niemczech (Jost i inni, 1998; Baisch i inni, 2002; Baisch i Harjes, 2003). Dane JAGUARS pochodziły z aktywności tła poprzedzającej wstrząs o magnitudzie $M_w 1.9$, wykorzystano także dodatkowe dane z aktywności po strzelaniach eksploatacyjnych.

Otrzymane rezultaty potwierdziły, że rozkład czasów pomiędzy następującymi zjawiskami ma taki sam kształt, niezależnie od wybranego katalogu sejsmicznego, obserwowanego zakresu magnitud, czy też rodzaju sejsmiczności (po strzelaniach, indukowanej wstrzykiwaniem płynów w górotwór, naturalnej).

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

a) Badania

W tej sekcji zaprezentowane zostaną zarówno zakończone przeze mnie projekty, jak i aktualne badania, w które jestem obecnie zaangażowany.

Procesy w ognisku oraz relacje skalowalności dla wstrząsów wulkaniczno-hybrydowych

Badania przeprowadzone w ramach pracy [12] stanowią kontynuację analizy procesów zachodzących w ognisku celem zweryfikowania hipotezy o samopodobieństwie wstrząsów w szerokim zakresie magnitud. Doświadczenie zdobyte podczas pracy w projekcie JAGUARS zostało wykorzystane do analizy ponad 6000 niskoczęstotliwościowych zjawisk zarejestrowanych we wrześniu 2006 roku przez tymczasową sieć sejsmiczną, zainstalowaną w rejonie góry Świętej Heleny w USA. Celem pracy było oszacowanie statycznego spadku naprężeń i naprężeń pozornych dla niewielkich zjawisk pojawiających się na kontakcie skał formujących krater i komin wulkanu. Otrzymane wyniki sugerują samopodobieństwo analizowanych zjawisk.

Referencja:

- [12] Harrington, R. M., **G. Kwiatek**, oraz S. C. Moran. Volcanic hybrid earthquakes at mount St. Helens exhibit constant radiated energy scaling in 2006 [Draft pracy w załączniku 9]

Badania laboratoryjne na próbkach - emisja sejsmoakustyczna

Zrozumienie procesów fizycznych zachodzących w ognisku wstrząsu i relacji skalowalności wymaga analizy sejsmiczności w szerokim zakresie magnitud, także w skali laboratoryjnej. Wysokoczęstotliwościowe zjawiska sejsmoakustyczne (typowo 0.1-2MHz), generowane przez różnorakie procesy zachodzące w próbce skalnej (pękanie ziaren, przesuwania fragmentów ziaren, kompaktacja etc.), są rejestrowane przez czujniki sejsmoakustyczne przyklejone bezpośrednio do badanej próbki (e.g. Stanchits i inni, 2006, 2010). Badania laboratoryjne pozwalają na studiowanie procesów ogniskowych zachodzących w naturze w kontrolowanych warunkach, stanowiąc wartościowy wkład służący zrozumieniu relacji skalowalności oraz fizyki procesu pęknięcia górotworu.

Zrozumienie relacji skalowalności poprzez badanie procesów zachodzących w ognisku wstrząsów rejestrowanych w laboratorium wymaga użycia odpowiednio skalibrowanych czujników. Niestety, cechą czujników sejsmoakustycznych jest to, że nie są one skalibrowane w sensie absolutnym (tak jak np. geofony), a jakość rejestracji zależy w zasadniczy sposób od jakości przytwierdzenia czujnika do skały. W pracy [13] przedstawiono metodologię względnej kalibracji czujników sejsmoakustycznych na potrzeby analizy tensora momentu sejsmicznego (TMS). Porównanie błędów wyznaczania TMS przed i po zaaplikowaniu względnej kalibracji wskazuje na znaczącą poprawę wiarygodności TMS otrzymanych za pomocą skalibrowanych danych. Opracowana metodologia została porównana z techniką hybrydowego tensora momentu sejsmicznego (Andersen, 2001). Praca [14] skupia się na porównaniu metodyki przedstawionej w [13] z inną metodą kalibracji czujników zwaną AMT (Davi i inni, 2012). Pokazano, że obie metody są komplementarne i pozwalają na wiarygodne obliczenie TMS przy wykorzystaniu czujników sejsmoakustycznych.

Referencje:

- [13] **Kwiatek, G.**, E.-M. Charalampidou, G. Dresen, oraz S. Stanchits (2013). An improved method for seismic moment tensor inversion of acoustic emissions through assessment of sensors' coupling and sensitivity to incidence angle. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. [in press, draft pracy w załączniku 10]
- [14] Davi, R., V. Vavryčuk, E.-M. Charalampidou, oraz **G. Kwiatek** (2013). Network sensor calibration for retrieving accurate moment tensors of acoustic emissions. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 62, 59–67, doi 10.1016/j.ijrmms.2013.04.004

Badania sejsmiczności indukowanej działalnością człowieka

Analiza zmienności pola naprężeń w zbiornikach geotermalnych / złożach węglowodorów jest ważnym elementem służącym ich przygotowaniu i eksploatacji, a także zrozumieniu zaangażowanych w nie procesów geomechanicznych. W pracy [15] przedstawiono aplikację inwersji tensora naprężeń do detekcji czasoprzestrzennych zmian orientacji pola naprężeń spowodowanych eksploatacją pola geotermalnego The Geysers w USA w latach 2007-2012.

Otrzymane rezultaty wyraźnie wskazują na zmianę reżimu naprężeń wraz z głębokością – od pola naprężeń faworyzującego uskoku przesuwczego poza złożem geotermalnym do faworyzującego uskoki normalne na poziomie złoża. Dodatkowo, zaobserwowano rotację osi głównych naprężeń w odpowiedzi na wstrzykiwane płuczki do otworu, a największa wartość rotacji tensora pola naprężeń jest skorelowana z największą intensywnością wstrzykiwania. Zastosowana metodologia może zostać użyta do lepszego scharakteryzowania stanu geomechanicznego zbiornika podczas jego przygotowania i eksploatacji.

W pracy [16] przedstawiono kompleksową analizę sejsmiczności indukowanej podczas stymulacji otworu TR8A w polu geotermalnym Berlín w Republice Salwadoru. Sejsmiczność indukowana była monitorowana przez przemysłową sieć sejsmiczną złożoną z 13 trójkomponentowych stanowisk umieszczonych w płytkich otworach. Przeanalizowano katalog złożony z 581 zjawisk (M_w pomiędzy -0.5 i 3.7). Oryginalny katalog dostarczony przez operatora pola geotermalnego został znacząco poprawiony. W pierwszej kolejności wstrząsy zostały zrelokalizowane z wykorzystaniem algorytmu HypoDD (Waldhauser i Ellsworth, 2000). Następnie obliczone zostały charakterystyki spektralne zjawisk z wykorzystaniem techniki spectral ratio (np. Kwiatek i inni, 2011). Zastosowanie obydwu metod zaaowocowało bardzo znaczącą poprawą jakości katalogu sejsmicznego i pozwoliło na szczegółową analizę czasoprzestrzennych charakterystyk sejsmiczności oraz parametrów spektralnych. Osiągnięta precyzja estymacji hipocentrow wstrząsów (względna rozdzielczość sięgająca kilku metrów) pozwoliła na zaobserwowanie zarówno migracji sejsmiczności wzdłuż istniejących uskoczków przy wzroście intensywności stymulacji, ewentualnie koncentracji zjawisk w określonych miejscach po stymulacji. Zauważono, że migracja sejsmiczności jest zależna od tempa wstrzykiwania oraz efektu pamięci skał (efekt Kaisera). Zaobserwowano także, że najsilniejsze zjawiska sejsmiczne pojawiają się zaraz po zakończeniu stymulacji. Analiza parametrów spektralnych (m.in. statycznego spadku naprężeń) wskazuje na samopodobieństwo zjawisk.

Studia [15] oraz [16] zostały przedstawione w pracy [17], w której zaprezentowaliśmy przegląd nowych technik analizy danych pasywnego monitoringu sejsmicznego, do analizy i kompleksowej charakterystyki zbiorników geotermalnych.

Praca [18] prezentuje analizę sekwencji wstrząsów wtórnych zarejestrowanych po wstrząsie o magnitudzie $M_w 1.9$, zaobserwowanym podczas projektu JAGUARS. Badania zostały przeprowadzone na zrelokalizowanych zjawiskach, co pozwoliło na otrzymanie szczegółowego obrazu powierzchni uskoku, odkrywając tym samym jego znaczącą złożoność (lokalne undulacje powierzchni, sprzężone uskoki, zagięcia powierzchni etc.) pomimo niewielkiego rozmiaru

wstrząsu. Przeprowadzona analiza potwierdziła, że punkt nukleacji zjawiska znajdował się w centrum dajki i że samo zjawisko było klasycznym pęknięciem zgodnym z prawem Mohr-Coulomba.

Referencje:

- [15] Martínez-Garzón, P., M. Bohnhoff, **G. Kwiatek**, oraz G. Dresen (2013). Stress tensor changes related to fluid injection at The Geysers Geothermal Field, California. *Geophys. Res. Lett.* 40, 2596–2601, doi 10.1002/grl.50438.
- [16] **Kwiatek, G.**, F. Bulut, M. Bohnhoff, oraz G. Dresen (2013). High-resolution analysis of seismicity induced at Berlín geothermal field, El Salvador. Special issue of *Geothermics on Induced Seismicity* [in press, por. załącznik 11]
- [17] **Kwiatek, G.**, M. Bohnhoff, P. Martínez-Garzón, F. Bulut, oraz G. Dresen (2013). High-resolution reservoir characterization using induced seismicity and state of the art waveform processing techniques. *First Break* 31, 81–88.
- [18] Naoi, M., M. Nakatani, Y. Yabe, **G. Kwiatek**, T. Igarashi, oraz K. Plenkers (2011). Twenty thousand aftershocks of a very small (M2) earthquake and their relations to the mainshock rupture and geological structures. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **101**, 2399–2407, doi 10.1785/0120100346.

b) Projekty badawcze

List projektów naukowo-badawczych w których byłem zaangażowany w latach 2007-2013.

JAGUARS (Japanese-German Acoustic Emission Research in South Africa) projekt mający na celu badanie procesów pękania górotworu w nano- i pikoskali. W projekcie uczestniczyło kilkunastu naukowców z instytucji: University of Tokyo, Tohoku University, Ritsumeikan University (Japonia), GFZ German Research Center for Geosciences, GMuG Gesellschaft für Materialprüfung und Geophysik (Niemcy), Seismogen CC, AngloGoldAshanti Ltd., ISS International, and CSIR Johannesburg (RPA). Moim zadaniem w projekcie była organizacja, analiza i interpretacja zarejestrowanych danych sejsmicznych. Uczestniczyłem także w pracach polowych związanych z instalacją i naprawą sieci JAGUARS w kopalni Mponeng.

GEISER (Geothermal Engineering Integrating Mitigation of Induced Seismicity in Reservoirs) jest projektem europejskim w ramach siódmego programu ramowego. Projekt zgromadził 12 instytucji naukowych i partnerów przemysłowych. Celem projektu jest kompleksowa analiza sejsmiczności indukowanej w zbiornikach geotermalnych i jej ograniczenie do poziomu umożliwiającego bezpieczną eksploatację. W ramach projektu zajmowałem się obliczaniem parametrów ogniska sejsmicznego, a następnie interpretacją i korelacją uzyskanych danych z parametrami eksploatacyjnymi, naprężeniami w ośrodku, danymi geologicznymi, tektonicznymi i geomechanicznymi (Working Package 3: Analysis of induced seismicity). Zaangażowany byłem także w prace nad stworzeniem metabazy sejsmiczności indukowanej dla projektu (Working Package 2: Compilation of induced seismicity data from geothermal sites).

FASTLOC jest projektem mającym na celu utworzenie oprogramowania umożliwiającego w czasie bliskim rzeczywistemu lokalizację i relokację wstrząsów na podstawie zarejestrowanych sejsmogramów. Projekt obejmuje stworzenie oprogramowania umożliwiającego detekcję niewielkich zjawisk sejsmicznych, pikowania wstąpień fali P i S, lokalizacji a następnie relokacji zjawisk z wykorzystaniem algorytmu HypoDD. Moja rola w projekcie: wykonawca - całość opracowania metodologii i przygotowania oprogramowania.

c) Recenzje artykułów

W latach 2011-2013 zrecenzowałem 12 artykułów zgłoszonych do następujących periodyków: *Journal of Seismology*, *Geophysical Journal International*, *Tectonophysics*, *Journal of Geophysical Research*, *Pure and Applied Geophysics* oraz *Geothermics*.

d) Współpraca naukowa

- University of Southern California (prof. Yehuda Ben-Zion)
- California Institute of Technology (dr Thomas Goebel)
- Karlsruhe Institute of Technology (dr Rebecca Harrington)
- Academy of Sciences of the Czech Republic (prof. Vaclav Vavrycuk, dr Rosalia Davi)
- Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences (dr hab. Beata Orlecka-Sikora)
- Alberta University (prof. Joern Davidsen)
- University of Tokyo, Tohoku University (prof. Masao Nakatani, dr Makoto Naoi)

e) Konferencje

Rezultaty moich badań zostały zaprezentowane na wielu międzynarodowych konferencjach (ponad 60 materiałów pokonferencyjnych) – szczegóły w załączniku 6.

f) Inne aktywności

TAIS (Triggered and Induced Seismicity Working group) jest częścią komisji CoSOI działającej w ramach IASPEI, zajmującej się obserwacją i interpretacją danych sejsmicznych. Grupa założona w 2007 roku, ma na celu integrację i archiwizację wiedzy związanej z sejsmicznością indukowaną. W ramach tej grupy zajmuję się rozwojem i utrzymaniem strony WWW grupy: <http://tais.iaspei.net>. Strona ma na celu popularyzację tematyki, wymianę informacji i doświadczeń pomiędzy naukowcami, jest także zbiorem darmowych publikacji związanych z tematyką sejsmiczności indukowanej.

Od zakończenia studiów doktoranckich zajmuję się rozwojem oprogramowania FOCI do analizy tensora momentu sejsmicznego i parametrów spektralnych (<http://www.induced.pl/foci>). Program został stworzony w ten sposób, by być prostym i efektywnym narzędziem pozwalającym na określenie zaawansowanych parametrów ogniska sejsmicznego. Program został początkowo dostosowany do danych pochodzących z kopalni miedzi Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego, jednak obecna wersja jest w stanie obsłużyć praktycznie wszystkie formaty sygnałów sejsmicznych spotykane w kopalnianych stacjach sejsmicznych w Polsce. Program jest używany na stacjach sejsmicznych kopalni miedzi, niektórych kopalniach węgla, a także przez jednostki badawczo-rozwojowe (Uniwersytet Śląski, Instytut Geofizyki PAN).

W 2012 roku zostałem zaproszony do komitetu technicznego 4th EAGE Passive Seismic Workshop. Warsztaty odbyły się w Amsterdamie w 2013r. Jako członek komitetu technicznego zajmowałem się przygotowaniem tematyki warsztatu oraz selekcją nadsyłanych prac.

W kwietniu 2013 miałem możliwość wygłoszenia dwóch seminariów dla studentów Massachusetts Institute of Technology. Seminaria miały wspólny tytuł „Is earthquake rupture process self-similar between km- and cm- scale (M_w 4 to -6)? Experiences from induced seismicity in South African gold mines and laboratory experiments on rock samples”, prezentujący całość moich badań związanych z analizą procesów zachodzących w ogniskach

niezwykle małych wstrząsów. Podobny wykład został także zaprezentowany na zaproszonym seminarium na Uniwersytecie Harvardzkim w ramach SEPS Solid Earth Physics Seminars (<http://esag.harvard.edu/rice/SOLID.EARTH.SEMINAR.html>).

W latach 2011-2012 wraz z Rebecą Harrington (Karlsruhe Institute of Technology) zorganizowaliśmy na EGU General Assembly w Wiedniu sesję tematyczną „SM2.4: Seismic source processes and scaling relations”. Na tej samej konferencji współorganizowałem także inną sesję pod tytułem "SM5.2/ERE5.6: Induced Seismicity: Theory and Observation". W 2013 kontynuowaliśmy organizację sesji tematycznej SM2.4 pod zmienionym tytułem „Earthquake source processes - Imaging methods, physical rupture models and scaling” w szerszym gronie organizatorów. Planujemy kontynuację organizacji sesji SM2.4 na EGU2014.

Począwszy od kwietnia 2012 roku jestem zastępcą przewodniczącego EPOS Working Group 10: Infrastructure for Georesources, w ramach europejskiego projektu EPOS (European Platform Observing System). Grupa została założona celem integracji środowiska naukowego i danych związanych z sejsmicznością indukowaną, oraz budowę wspólnej platformy badawczo-rozwojowej w tym obszarze działalności naukowej. W ramach tej grupy zajmowałem się dotychczas opracowaniem schematu integracji danych pochodzących z różnych typów sejsmiczności indukowanej (związanej z górnictwem, eksploatacją geotermalną, CCS/CO₂, sztucznymi zbiornikami wodnymi, czy też związaną z eksploatacją podziemną złóż węglowodorów).

Bibliografia

- Andersen, L.M. (2001). A relative moment tensor inversion technique applied to seismicity induced by mining, PhD Thesis, Univ. of the Witwatersrand, Johannesburg.
- Baisch, S., H.-P. Harjes (2003). A model for fluid-injection-induced seismicity at the KTB, Germany, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **152**, no. 1, 160–170.
- Baisch, S., M. Bohnhoff, L. Ceranna, Y. Tu, H.-P. Harjes (2002). Probing the crust to 9-km depth: Fluid injection experiments and induced seismicity at the KTB superdeep drilling hole, Germany, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **92**, no. 6, 2369–2380.
- Beeler, N.M., T.-F. Wong, S.H. Hickman (2003). On the expected relationships among apparent stress, static stress drop, effective shear fracture energy and efficiency, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **93**, 1381–1389.
- Bertero, M., D. Bindi, P. Boccacci, M. Cattaneo, C. Eva, V. Lanza (1997). Application of the projected Landweber method to the estimation of the source time function in seismology, *Inv. Prob.* **13**, 465–486.
- Boettcher, M.S., A. McGarr, M. Johnston (2009). Extension of Gutenberg-Richter distribution to M_w -1.3, no lower limit in sight, *Geophys. Res. Lett.* **36**, L10307, doi 10.1029/2009GL038080.
- Bohnhoff, M., G. Dresen, W.L. Ellsworth, H. Ito (2010). Passive Seismic Monitoring of Natural and Induced Earthquakes: Case Studies, Future Directions and Socio-Economic Relevance, in *New Frontiers in Integrated Solid Earth Sciences*, edited by S. Cloetingh and J. Negendank, pp. 261–285, Springer Science+Business Media B.V. 2009.
- Chib, S., E. Greenberg (1995). Understanding the Metropolis-Hastings Algorithm, *American Statistician* **49**, 327–335.
- Davi, R., V. Vavryčuk, E.-M. Charalampidou, G. Kwiatek (2012). Accurate moment tensor inversion of acoustic emissions, in *Proceedings of AIM 3rd Advanced Industrial Monitoring*

Workshop on Induced Seismicity, October 10-13rd, 2012, Smolenice Castle, Czech Republic.

- Dębski, W., B. Domański (2002). An application of the pseudo-spectral technique to retrieving source time function, *Acta Geophys. Pol.* **50**, no. 2, 207–221.
- Domański, B., S.J. Gibowicz (2003). The accuracy of source parameters estimated from source time function of seismic events at Rudna copper mine in Poland, *Acta Geophys. Pol.* **51**, no. 4, 347–367.
- Domański, B., S.J. Gibowicz, P. Wiejacz (2002). Source time function of seismic events at Rudna copper mine, Poland., *Pure Appl. Geophys.* **159**, 131–144.
- Dreger, D., R.M. Nadeau, A. Chung (2007). Repeating earthquake finite source models: Strong asperities revealed on the San Andreas Fault, *Geophys. Res. Lett.* **32**, L23302, doi 10.1029/2007GL031353.
- Fischer, T., A. Guest (2011). Shear and tensile earthquakes caused by fluid injection, *Geophys. Res. Lett.* **38**, no. 5, L05307, doi 10.1029/2010GL045447.
- Gibowicz, S.J. (2009). Seismicity Induced by Mining: Recent Research, in *Advances in Geophysics*, vol. 51, edited by R. Dmowska, pp. 1 – 53, Elsevier.
- Gibowicz, S.J., R. P. Young, S. Talebi, D.J. Rawlence (1991). Source parameters of seismic events at the Underground Research Laboratory in Manitoba, Canada: Scaling relations for events with moment magnitude smaller than 2, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **81**, 1157–1182.
- Graham, C. C., S. Stanchits, I. G. Main, G. Dresen (2010). Comparison of polarity and moment tensor inversion methods for source analysis of acoustic emission data, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **47**, no. 1, 161–169, doi 10.1016/j.ijrmms.2009.05.002.
- Hastings, W.K. (1970). Monte Carlo Sampling Methods Using Markov Chains and Their Applications, *Biometrika* **57**, no. 1, 97–109.
- Huenges, E., K. Erbas, I. Moeck, G. Bloecher, W. Brandt, T. Schulte, A. Saadat, G. Kwiatek, G. Zimmermann (2009). The EGS project Gross Schoenebeck - Current status of the large scale research project in Germany, in *Proceedings of 33rd Annual Meeting Geothermal Resources Council*, pp. 403–404, Reno, USA 2009.
- Ide, S., G.C. Beroza (2001). Does apparent stress vary with earthquake size?, *Geophys. Res. Lett.* **28**, 3349–3352.
- Imanishi, K., W.L. Ellsworth, S.G. Prejean (2004a). Earthquake source parameters determined by the SAFOD Pilot Hole seismic array, *Geophys. Res. Lett.* **31**, L12S09, doi 10.1029/2004GL019420.
- Imanishi, K., M. Takeo, W.L. Ellsworth, H. Ito, T. Matsuzawa, Y. Kuwahara, Y. Iio, S. Horiuchi, S. Ohmi (2004b). Source Parameters and Rupture Velocities of Microearthquakes in Western Nagano, Japan, Determined Using Stopping Phases, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **94**, no. 5, 1762–1780, doi 10.1785/012003085.
- Ingber, L. (1989). Very fast simulated re-annealing, *Math. Comput. Modeling* **12**, no. 8, 967–973.
- Ingber, L. (1993). Simulated annealing: Practice versus theory, *Math. Comput. Modeling* **18**, no. 11, 29–57.
- Izutani, Y., H. Kanamori (2001). Scale-dependence of seismic energy-to-moment ratio for strike-slip earthquakes in Japan, *Geophys. Res. Lett.* **28**, no. 20, 4007–4010.
- Jost, M.L., T. Busselberg, O. Jost, H.-P. Harjes (1998). Source parameters of injection-induced microearthquakes at the KTB deep drilling site, Germany, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **88**, 815–832.

- Kanamori, H., D. Anderson (1975). Theoretical basis of some empirical relations in seismology, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **88**, 667–676.
- Kanamori, H., E. Brodsky (2004). The physics of earthquakes, *Reports on Progress in Physics* **67**, no. 8, 1429–1496, doi 10.1088/0034-4885/67/8/R03.
- Kanamori, H., and L. Rivera (2004). Static and dynamic scaling relations for earthquakes and their implications for rupture speed and stress drop, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **94**, 314–319.
- Kwiatek, G. (2008). Relative source time function deconvolution at the Rudna copper mine: Uncertainty Estimation, *J. Seismol.* **12**, no. 4, 499–517, doi 10.1007/s10950-008-9100-8.
- Kwiatek, G., K. Plenkers, M. Nakatani, Y. Yabe, G. Dresen (2010). Frequency-Magnitude Characteristics Down to Magnitude -4.4 for Induced Seismicity Recorded at Mponeng Gold Mine, South Africa, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **100**, no. 3, 1167–1173, doi 10.1785/0120090277.
- Kwiatek, G., K. Plenkers, G. Dresen (2011). Source Parameters of Picoseismicity Recorded at Mponeng Deep Gold Mine, South Africa: Implications for Scaling Relations, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **101**, no. 6, 2592–2608, doi 10.1785/0120110094.
- Madariaga, R. (1976). Dynamics of an expanding circular fault, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **66**, 639–666.
- Mayeda, K., R. Gok, W.R. Walter, A. Hofstetter (2005). Evidence for non-constant energy/moment scaling from coda-derived source spectra, *Geophys. Res. Lett.* **32**, L10306, doi 10.1029/2005GL022405.
- McGarr, A. (1984). Scaling of ground motion parameters, state of stress, and focal depth., *J. Geophys. Res.* **89**, no. B8, 6969–79.
- McGarr, A., J.B. Fletcher, M. Boettcher, N. Beeler, J. Boatwright (2010). Laboratory-Based Maximum Slip Rates in Earthquake Rupture Zones and Radiated Energy, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **100**, no. 6, 3250–3260.
- Metropolis, N., A. Rosenbluth, M. Rosenbluth, A. Teller, and E. Teller (1953). Equation of state calculations by fast computing machines, *J. Chem. Phys.* **21**, 1087–1092.
- Nakatani, M., Y. Yabe, J. Philipp, G. Morema, G. Stanchits, G. Dresen (2008). Acoustic Emission Measurements in a Deep Gold Mine in South Africa — Project Overview and Some Typical Waveforms, *Seismol. Res. Lett.* **79**, no. 2, 311.
- Piana, M., M. Bertero (1997). Projected Landweber method and preconditioning, *Inv. Prob.* **13**, 441–463.
- Prejean, S.G., W.L. Ellsworth (2001). Observations of earthquake source parameters at 2 km depth in the Long Valley caldera, eastern California, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **91**, 165–177.
- Ross, A., G.R. Foulger, B.R. Julian (1996). Non-double-couple earthquake mechanisms at the Geysers Geothermal Area, California, *Geophys. Res. Lett.* **23**, no. 8, 877–880, doi 10.1029/96GL00590.
- Schorlemmer, D., J. Woessner (2008). Probability of Detecting an Earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America* **98**, no. 5, 2103–2117, doi 10.1785/0120070105.
- Šílený, J., A. Milev (2008). Source mechanism of mining induced seismic events — Resolution of double couple and non-double-couple models, *Tectonophysics* **456**, no. 1-2, 3–15, doi 10.1016/j.tecto.2006.09.021.
- Spottiswoode, S.M. (1984). Source mechanisms of mine tremors at Blyvooruitzicht gold mine, edited by N. C. Gay and E. H. Wainwright, pp. 29–37, S. Afr. Inst. Min. Metal, Johannesburg.

- Stanchits, S., S. Vinciguerra, G. Dresen (2006). Ultrasonic Velocities, Acoustic Emission Characteristics and Crack Damage of Basalt and Granite, *Pure Appl. Geophys.* **163**, no. 5-6, 975–994, doi 10.1007/s00024-006-0059-5.
- Stanchits, S., G. Dresen, (2010). Formation of Faults in Diorite and Quartzite Samples Extracted from a Deep Gold Mine (South Africa), *Geophys. Res. Abstr.* **12**, EGU2010–5605.
- Stork, A.L., H. Ito (2004). Source parameter scaling for small earthquakes observed at the western Nagano 800 m-deep borehole, central Japan, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **94**, 1781–1796.
- Tomic, J., R.E. Abercrombie, A. F. doNascimento (2009). Source parameters and rupture velocity of small $M < 2.1$ reservoir induced earthquakes, *Geophys. J. Int.* **179**, 1013–1023.
- Vavryčuk, V., M. Bohnhoff, Z. Jechumtálová, P. Kolář, J. Šílený (2008). Non-double-couple mechanisms of microearthquakes induced during the 2000 injection experiment at the KTB site, Germany: A result of tensile faulting or anisotropy of a rock?, *Tectonophysics* **456**, no. 1–2, 74–93, doi 10.1016/j.tecto.2007.08.019.
- Waldhauser, F., W.L. Ellsworth (2000). A Double-Difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Fault, California, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **90**, no. 6, 1353–1368, doi 10.1785/0120000006.
- Wiejacz, P. (1992). Calculation of seismic moment tensor for mine tremors from the Legnica-Głogów Copper Basin, *Acta Geophys. Pol.* **40**, 103–122.
- Yamada, T., J. Mori, H. Kawakata, H. Ogasawara, S. Ide, S. Tanbo (2002). Rupture velocities of small earthquakes ($0 < M < 1.5$) in a South African gold mine: constraints on fracture energy, *EOS Trans. AGU, Fall Meeting Suppl.* **83**, S72B–1143.
- Yamada, T., J.J. Mori, S. Ide, H. Kawakata, Y. Iio, H. Ogasawara (2005). Radiation efficiency and apparent stress of small earthquakes in a South African gold mine, *J. Geophys. Res.* **110**, B01305.

Greg Kwid

ABSTRACT

1. Name

Grzegorz Kwiatek

2. Diplomas, academic degrees – including name, location and year of award, as well as the title of the doctor's thesis.

- 2007 Doctor of Earth Sciences (PhD)
- Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences, Department of Seismology, ul. Księcia Janusza 64, 01-452 Warszawa, Poland.
- Title of the PhD thesis: Source tomography of seismic events recorded in Rudna Copper Mine, Poland.
- 2002 Master of Engineering (MEng)
- AGH University of Science and Technology, Department of Geology, Geophysics and Environmental Protection, ul. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Poland; Specialization: Environmental Engineering
- Title of the master thesis: A computer program for the local seismic hazard assessment based on the catalog of Rudna Copper Mine, Poland

3. Information on employment status

- 2007-present Postdoctoral Researcher, GFZ German Research Centre for Geosciences, Section 3.2: Geomechanics and Rheology, Potsdam, Germany
- 2007 Assistant Professor, Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences, Warsaw, Poland
- 2002-2007 Assistant, Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences, Warsaw, Poland

4. Indication of research achievement resulting from Art. 16 item 2 of the Act dated 14 March 2003 on the academic degrees and the academic title as well as on the degrees and the title within the scope of art (Journal of Laws No. 65, item 595, as amended):

a) Title of the research achievement:

Source processes and scaling relations from induced seismicity to laboratory studies on rock samples

b) Bibliography documenting the research achievement

- [1] **Kwiatek, G.** (2008). Relative source time function deconvolution at the Rudna copper mine: Uncertainty Estimation. *J. Seismol.* **12**, 499–517, doi 10.1007/s10950-008-9100-8.
- [2] Moeck, I., **G. Kwiatek**, and G. Zimmermann (2009). Slip tendency analysis, fault reactivation potential and induced seismicity in a deep geothermal reservoir. *J. Struct. Geol.* **31**, 1174–1182, doi 10.1016/j.jsg.2009.06.012.
- [3] Orlecka-Sikora, B., E. E. Papadimitriou, and **G. Kwiatek** (2009). Study of the interaction among mining induced seismic events in the Legnica-Głogów Copper District, Poland. *Acta Geophys.* **57**, 413–434, doi 10.2478/s11600-008-0085-z.
- [4] Plenkers, K., **G. Kwiatek**, M. Nakatani, G. Dresen, and JAGUARS Research Group (2010). Observation of seismic events with frequencies $f > 25$ kHz at Mponeng deep gold mine, South Africa. *Seismol. Res. Lett.* **81**, 467–478, doi 10.1785/gssrl.81.3.467.
- [5] **Kwiatek, G.**, M. Bohnhoff, G. Dresen, A. Schulze, T. Schulte, G. Zimmermann, and E. Huenges (2010). Microseismicity induced during fluid-injection: A case study from the geothermal site at Gross Schoenebeck, North German Basin. *Acta Geophys.* **58**, 995–1020, doi 10.2478/s11600-010-0032-7.
- [6] **Kwiatek, G.**, K. Plenkers, M. Nakatani, Y. Yabe, G. Dresen, and JAGUARS Research Group (2010). Frequency-magnitude characteristics down to magnitude -4.4 for induced seismicity recorded at Mponeng gold mine, South Africa. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **100**, 1167–1173, doi 10.1785/0120090277.
- [7] **Kwiatek, G.**, K. Plenkers, and G. Dresen (2011). Source parameters of picoseismicity recorded at Mponeng deep gold mine, South Africa: Implications for Scaling Relations. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **101**, 2592–2608, doi 10.1785/0120110094.
- [8] Plenkers, K., D. Schorlemmer, and **G. Kwiatek** (2011). On the probability of detecting picoseismicity. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **101**, 2579–2591, doi 10.1785/0120110017.
- [9] Davidsen, J., **G. Kwiatek**, and G. Dresen (2012). No Evidence of magnitude clustering in an aftershock sequence of nano- and picoseismicity. *Phys. Rev. Lett.* **108**, 038501, doi 10.1103/PhysRevLett.108.038501.
- [10] Davidsen, J., and **G. Kwiatek** (2013). Earthquake interevent time distribution for induced micro-, nano- and picoseismicity. *Phys. Rev. Lett.*, **110**, 068501, doi 10.1103/PhysRevLett.110.068501.
- [11] **Kwiatek, G.** and Y. Ben-Zion (2013). Assessment of P and S wave energy radiated from very small shear-tensile seismic events in a deep South African mine. *J. Geophys. Res.* **118**, doi 10.1002/jgrb.50274.

c) Discussion of the research goal in the above-mentioned papers and obtained results, including discussion of their possible use.

Introduction

A key question in seismology is if we can understand what governs the physics of earthquake nucleation and propagation in all scales. Essentially, we want to know how elastic strain energy accumulated before an earthquake is partitioned into seismic radiation and other types of energy during the faulting process. Finally, it is also a question whether similar partitioning of energy is applicable to all earthquakes, regardless of scale - whether rupture process of a small, mining-induced earthquake of magnitude 1.0 recorded in a coal mine is similar to magnitude 9.0 Tohoku mega-earthquake.

It is important to decide whether near field observations of microearthquakes and the observation of extremely small magnitude -6.0 seismic events recorded in laboratory tests on rock samples help to analyze source mechanisms and faulting process (McGarr et al., 2010). Obviously, a broad observational gap exists between experiments performed in the laboratory tests field observations. It still remains controversial to what extent dynamic rupture and faulting observed in laboratory tests may provide insights into the nucleation and fracture processes of tectonic earthquakes and rockbursts in mines.

Understanding of scaling relations of earthquake source parameters would be of practical importance in seismic hazard analysis (Gibowicz, 2009). If we understood the rupture process in smaller scale in details, and if we confirmed the rupture process is the same regardless of scale, we could extrapolate our knowledge on physical processes related to nucleation and faulting in picoscale to larger scales.

Studies of earthquake faulting process and scaling relations involve the analysis of a variety of statistical and physical parameters of the recorded seismicity. Statistical parameters such as the magnitude-frequency Gutenberg-Richter relation have been used to characterize earthquakes and self-similarity (see Boettcher et al., 2009; Kwiatek et al., 2010 and references therein). Physical parameters involve a direct comparison of the static and dynamic characteristics of the seismic source including seismic moment, radiated energy, and corner frequency, as well as parameters derived from these, for example the static stress drop and the apparent stress.

Many studies indicate that the static stress drop, a measure of stress release during an earthquake is independent of the size of the earthquake, i.e. it does not change with seismic moment (see e.g. Kanamori and Anderson, 1975; McGarr, 1984; Spottiswoode, 1984). On the other hand, it is generally observed that stress drop varies between 0.1MPa and 100MPa for different data sets. Potential physical causes for a wide variation in static stress drop include site-specific differences in tectonic settings, fluid pressure, variations in rupture velocity and fault plane normal stress (Tomic et al., 2009). Similar large variations are observed for apparent stress, which may be considered a measure of damaging potential of earthquakes. Here, typically observed values range from 0.01MPa to 10MPa. Differences in apparent stress may result from partitioning of strain energy that is released during the earthquake rupture process as heat, fracture growth and damage and the energy spent on radiation of elastic waves. Constant apparent stress values are observed by many authors over a large magnitude range suggesting that similar physical processes govern large and small earthquakes as similar amount of energy is radiated as seismic waves per unit slip and unit area of the fault regardless of scale (Ide and Beroza, 2001; Yamada et al., 2005; McGarr et al., 2010). However, other authors find evidence that apparent stress increases with seismic moment (Izutani and Kanamori, 2001; Prejean and

Ellsworth, 2001; Kanamori and Rivera, 2004; Stork and Ito, 2004; Mayeda et al., 2005). This implies that small seismic events radiate a smaller fraction of the total energy as seismic waves than large events. If this is true, in smaller events more energy is spent either in heat or in fracturing of the fault plane.

The question whether small and large earthquakes are governed by the same underlying physical mechanisms is still controversial (Kanamori and Brodsky, 2004). This is partly due to severe constraint on the resolution of seismic observations, limited data on seismic velocities and attenuation, network geometries and limitations of the recording system. Also, the existing seismic source models seem to be somehow too simplified to reflect the actual processes occurring in the earthquake source. The rupture process even for small earthquakes may be pretty complicated (Domański and Gibowicz, 2003; Kwiatek, 2008). The typically used seismic source model of Madariaga (1976) assumes that the rupture propagate with a speed of 0.9 of the shear wave velocity in the source region however a great variety of rupture velocities ranging 0.3-0.9 of shear wave velocity is actually observed (Domański et al., 2002; Yamada et al., 2002; Imanishi et al., 2004b; Kanamori and Brodsky, 2004; Dreger et al., 2007; Tomic et al., 2009). Changes in rupture speed affects the amount of energy released as seismic waves, as well as the source radii (Kanamori and Brodsky, 2004). As a result, both static stress drop and apparent stress may be drastically different in comparison to standard models. Another important assumption considers motion on the fault plane as purely shear movement between two blocks. Many studies suggest the existence of more complicated fault kinematics including tensile (non-double-couple) fracturing (Wiejacz, 1992; Ross et al., 1996; Sileny and Milev, 2008; Vavryčuk et al., 2008; Fischer and Guest, 2011). It is still unclear to what extent the so-called non-double-couple mechanisms influence the scaling relations and the rupture process.

There is a long record of studies investigating the earthquake rupture process and scaling relations. However, only recently more data has become available from very small magnitude events. This is partly due to improved instrumentation, efforts to improve the signal-to-noise ratio and near-field observations using boreholes (Gibowicz et al., 1991; Imanishi et al., 2004a; Nakatani et al., 2008; Bohnhoff et al., 2010; McGarr et al., 2010). The analysis of micro-, nano- and picoseismicity is a promising tool to understand the earthquake rupture process in details because:

- a. Huge amount of seismic data is available compared to events with larger magnitudes
- b. Smaller events are recorded by local networks and short source-receiver distances allow recording the details of rupture process in a well resolved scale.
- c. The generation process of earthquakes may be semi-controlled, i.e. the seismicity induced by human mining operations allows to set-up the seismic network “on the spot” of seismic activity.

There is also a strong demand on a more extensive analysis of rupture process and scaling relations in laboratory scale (seismic events in a sub-cm scale). These extremely small seismic events are recorded using acoustic emission sensors. The simple source characteristics such as the amplitude of the P-wave arrival were used to investigate the self-similarity of earthquake occurrence rate in femtoscale, for example using Gutenberg-Richter scaling relation. Also, the first attempts to assess the existence of non-double-couple components and source parameters have been made (Graham et al., 2010). It seems that laboratory experiments on rock samples are an essential part of study on earthquake rupture process that have not been addressed sufficiently enough so far.

Review of papers constituting the research achievements

Source processes in mining-induced seismicity

Discussion of papers:

- [1] **Kwiatek, G.** (2008). Relative source time function deconvolution at the Rudna copper mine: Uncertainty Estimation. *J. Seismol.* **12**, 499–517, doi 10.1007/s10950-008-9100-8.

In this study I proposed the methodology for the relative source time function (RSTF) uncertainty assessment and apply it to two small, mining-induced seismic events ($M_w=2.9$ and 3.0) that occurred at Rudna copper mine in Poland. The seismograms of selected events were recorded by the seismic network composed of over 60, short-period, vertical seismometers, recording ground velocity, located in the distance ranging from 400m up to 8km from their hypocenters. The RSTFs were calculated for each seismic station independently, using the empirical Green's function technique.

I used the pseudospectral approximation of the sought RSTF (Dębski and Domański, 2002) that relies on replacement of the RSTF by a finite sum of Gaussian kernel functions. The highly non-linear optimization problem was solved using the Adaptive Simulated Annealing algorithm (Ingber, 1989, 1993). This improved the stability of the deconvolution procedure and physical correctness of the final solution in comparison to the classical deconvolution methods such as the spectral ratio method or projected Landweber method (Bertero et al., 1997; Piana and Bertero, 1997). To estimate the inversion uncertainties I proposed the classical Markov-chain Monte-Carlo techniques – the Metropolis-Hastings sampling algorithm (Metropolis et al., 1953; Hastings, 1970; Chib and Greenberg, 1995).

The proposed methodology is an efficient tool to assess the quality of RSTF deconvolution. It allows discriminating whether the observed complexity of RSTFs is an artificial effect or, rather, a reliable signature of the complex physical processes in the source of an earthquake. This is of uttermost importance for the following selection of *a priori* data for the inversion for the determination of kinematic rupture process.

- [3] Orlecka-Sikora, B., E. E. Papadimitriou, and **G. Kwiatek** (2009). Study of the interaction among mining induced seismic events in the Legnica-Głogów Copper District, Poland. *Acta Geophys.* **57**, 413–434, doi 10.2478/s11600-008-0085-z.

In this study we applied the Coulomb stress transfer technique to investigate the interactions among seismic events induced by mining activity in Rudna copper mine, Poland. We selected 217 seismic events with local magnitudes $M_L > 2.0$ recorded by industrial seismic networks of the mine. For the selected seismic events, the source parameters, as well as the fault plane solutions were calculated using spectral fitting (cf. Kwiatek et al., 2011) and moment tensor inversion techniques (Wiejacz, 1992).

The cumulative stress changes calculations were performed using the software Coulomb 3.0. We examined the static stress changes after the occurrence of each event according to the faulting type of the next event in the dataset. At each stage we examined the possible triggering by correlating the particular event location and the stress-enhanced zones. We found that strong mining tremors are capable of producing changes in the state of stress of a sufficient magnitude to move a specified area into the failure regime. We found that the location of more than 60% of the analyzed events is consistent with the stress-enhanced areas. The results suggested that the transfer of static stresses can impact the seismic generation process in mines.

Source processes in fluid-induced seismicity

Gross Schoenebeck (GRSK) is a key site in the Enhanced Geothermal Systems of the Northeast German Basin. In 2007 it was stimulated multiple times by hydraulic fracturing. To assess the seismic response of the reservoir to changing stress conditions resulting from massive fluid injection, a seismic network composed of a borehole and surface stations was installed and used to record the microseismic activity during and after the stimulation of the volcanic rocks (Huenges et al., 2009). The massive stimulation induced unexpectedly only a weak seismic activity – merely less than a hundred of small seismic events with magnitudes below M_w -1.0 were recorded. My studies focused on investigation of the source processes [5] of induced seismicity and its relation to the geomechanical state of the reservoir [2].

Discussion of papers:

- [2] Moeck, I., **G. Kwiatek**, and G. Zimmermann (2009). Slip tendency analysis, fault reactivation potential and induced seismicity in a deep geothermal reservoir. *J. Struct. Geol.* **31**, 1174–1182, doi 10.1016/j.jsg.2009.06.012.

In this study we performed a slip tendency analysis to assess the reactivation potential of fractures in GRSK. We tested the likelihood of occurrence of induced seismicity along fractures with certain orientations from the perspective of fault reactivation related to stress field perturbations and ambient stresses. We also tested whether slip tendency is capable to forecast rupture plane orientation and intensity of rupture induced by hydraulic stimulation of geothermal reservoir. Results showed that faults in the volcanic succession of the reservoir have a low tendency to slip indicating that high additional fluid pressure is needed to reactivate potential strike-slip and/or normal faults. A massive water stimulation of the volcanic rocks over 6 days ended in a surprisingly low level of seismicity along a presumed normal fault, although the in situ fluid pressure was increased dramatically. The results indicated a high degree of fracturing in the stimulated rocks. This study demonstrated that the slip tendency analysis, originally applied for earthquake assessment, provides an appropriate method to investigate, characterize, and understand the faulting behavior in engineered sub-surface reservoirs, such as Enhanced Geothermal Systems.

- [5] **Kwiatek, G.**, M. Bohnhoff, G. Dresen, A. Schulze, T. Schulte, G. Zimmermann, and E. Huenges (2010). Microseismicity induced during fluid-injection: A case study from the geothermal site at Gross Schoenebeck, North German Basin. *Acta Geophys.* **58**, 995–1020, doi 10.2478/s11600-010-0032-7.

Paper [5] discusses the source properties of the seismicity induced by the multiple stimulations at GRSK. A surprisingly low number of 80 small microearthquakes with magnitudes $-1.8 < M_w < -1.0$ could be detected using one deep borehole sensor located at only 500m distance to the injection point. By analyzing the spatial distribution of seismic events it was concluded local geological and tectonic conditions are responsible for the very low seismicity rate and low magnitudes. Nevertheless, we found the seismicity displays strong spatio-temporal clustering. The most prominent cluster of seismicity forms a planar structure which is in accordance to the findings of [2], who independently detected a highly shear-stressed minor fault system in the vicinity of injection well. We also confirmed events migrated outside the injection area with progressing stimulation. We concluded almost all events analyzed were attributed to the reactivation of the fault plane(s) due to increased pore pressure in the vicinity of injection point.

Closing the gap between laboratory experiments and picoseismicity in situ

The study of faulting and rupture processes requires direct observations. In the Earth crust deep mines provide a unique opportunity for this purpose by giving access to the focal depth of earthquakes. To investigate the physics of earthquakes and link laboratory and seismological observations, we established the JAGUARS (Japanese-German Acoustic Emission Research in South Africa) Research Group.

JAGUARS aimed on the continuous monitoring of nano- and picoseismic activity (seismic source size down to a few centimeters) at 3.5km depth in Mponeng gold mine, Republic of South Africa. The deep gold mine is a unique natural laboratory to study kinematic and dynamic properties both of source and propagation of seismic events, fault properties as well as stress conditions. The seismic monitoring can provide direct observations of local instabilities in the rock mass induced by mine excavations and in existing geological structures such as dyke contacts or natural faults.

The JAGUARS network was located at the depth of 3543m in Mponeng deep gold mine. The network was located along the tunnel system, 90m below the gold reef, where intensive mining were performed. The network was located also next to the Pink Green dyke, which is a major local geologic feature. The network consisted of 8 acoustic emission (AE) sensors and high-frequency accelerometers. The sampling frequency of the acquisition system was 500kHz and the total frequency range recorded is between 50Hz and 200 000Hz. The network was capable to detect seismic events with the source sizes from a few meters down to a few centimeters (the smallest confirmed moment magnitude M_w was -4.1). The JAGUARS network operated between June 2007 and April 2009, recording more than 600,000 events in the area of approx. 300x300x300m.

Despite of exploitation noises, the JAGUARS dataset contains two major categories of seismicity:

- The aftershock sequence of M_w 1.9 seismic event that occurred 30m above JAGUARS network. The event was followed by more than 25000 aftershocks with M_w ranging from -0.8 down to at least -4.1. This makes the dataset unique in a worldwide scale.
- The seismic activity induced by blasting of rocks at the exploitation level located approximately 80m above the JAGUARS network containing several tens of thousands of recordings.

The seismicity was thoroughly investigated in numerous peer-reviewed papers. My research interests focused on:

- Scaling relations of nano- and picoseismicity (papers [6], [7], [9], [10])
- Source parameters (papers [7], [11])
- Spatio-temporal patterns of the seismicity (paper [4], see also section 5a of the abstract)
- Nano- and picroearthquakes detection capabilities ([6], [8])
- Acoustic emission calibration techniques (see section 5a of the abstract)
- Discussion on shear-tensile rupture processes of picoseismicity [11]

Discussion of papers:

- [6] **Kwiatek, G.**, K. Plenkers, M. Nakatani, Y. Yabe, G. Dresen, and JAGUARS Research Group (2010). Frequency-magnitude characteristics down to magnitude -4.4 for induced seismicity recorded at Mponeng gold mine, South Africa. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **100**, 1167–1173, doi 10.1785/0120090277.

In this study we investigated the self-similarity of earthquake rupture process of nano- and picoseismicity observed in JAGUARS project. For that purpose we used and compared two subsets including the aftershock sequence of M_w 1.9 event and a few post-blasting activity datasets. We developed a procedure for calculation of moment magnitude using combined network of acoustic emission sensors and accelerometer. For the analyzed datasets we calculated the magnitudes of completeness and Gutenberg-Richter b-values. We found events with magnitudes as low as -4.4 (size of a few centimeters) may be recorded from a distance of tens of meters away from the sensor. Our near-source observation suggested that with regard to statistical parameter such as b value, there is no evidence for a physical limit for the nucleation zone and minimum magnitudes down to at least M_w -4.4. Also, there is no difference in frequency-magnitude relationships between post-blasting datasets and aftershock sequence. Therefore, this study concluded that there is no breakdown in the self-similarity of earthquake rupture process down to magnitude -4.4.

- [7] **Kwiatek, G.**, K. Plenkers, and G. Dresen (2011). Source parameters of picoseismicity recorded at Mponeng deep gold mine, South Africa: Implications for Scaling Relations. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **101**, 2592–2608, doi 10.1785/0120110094.

The paper extends the results presented in [6] regarding the investigation of the self-similarity of earthquake rupture process in nano- and picoscale. However, this time we focused on the reliable determination of source parameters including seismic moment, radiated energy, source radius, apparent stress and static stress drop using AE sensors and accelerometer. The analysis was preceded by developing the procedure for the absolute calibration of the AE sensors. This allowed us to use AE sensors to determine reliably the source parameters using unique network capable of recording the seismic events between magnitudes 0.0 and -4.5.

We investigated the dependence of static stress drop and apparent stress on seismic moment as indicators for the self-similarity of earthquake rupture process. Many studies indicate that the static stress drop, a measure of stress release during an earthquake is independent of the size of the earthquake, i.e. it does not change with seismic moment. Also, constant apparent stress values are observed by many authors over a large magnitude range suggesting that similar physical processes govern large and small earthquakes as the same amount of energy is radiated as seismic waves per unit slip and unit area of the fault regardless of scale (Ide and Beroza, 2001; Kanamori and Brodsky, 2004; Yamada et al., 2005; McGarr et al., 2010). On the other hand, many authors report the breakdown in the self-similarity, especially for smaller earthquakes (Izutani and Kanamori, 2001; Kanamori and Rivera, 2004; Mayeda et al., 2005). Overall, the question whether small and large earthquakes are governed by the same underlying physical mechanisms is still controversial.

The results presented in this study provide evidence for the self-similarity of earthquake rupture process down to at least M_w -4.1. Within magnitude range -0.8 and -4.1 we do not observe an upper limit to the radiated frequency of events and there is no dependence of stress drop on seismic moment. Also, our observations clearly indicate that for the same magnitude range the same proportion of energy is radiated as seismic waves per unit of slip and unit area. At the same time we observed spatial variations in the static stress drop and apparent stress that could be attributed to the changes in the geological setup. We also found indications for the slow rupture velocities of nano- and picoseismicity as well as the evidence for the abundance of seismic events with non-shear (tensile) components.

- [11] **Kwiatek, G.** and Y. Ben-Zion (2013). Assessment of P and S wave energy radiated from very small shear-tensile seismic events in a deep South African mine. *J. Geophys. Res.* **118**, doi 10.1002/jgrb.50274.

This paper discuss requirements for reliable estimates of radiated seismic energy in S and P phases and derive ratios of S-to-P radiated energy (E_S/E_P) of 539 seismic events with local magnitudes $-5.23 \leq M_L \leq -2.41$ (subdecimeter size) recorded during the aftershock sequence of $M_W 1.9$ seismic event. A shear-tensile model is used to simulate the radiation pattern of P and S phases from a family of rupture models ranging from pure shear to pure tensile failure. The calculations include correction factors for energy estimates associated with given source-receiver geometries and expected focal mechanism with possible tensile component. Synthetic calculations are used to assess the effects of limited observed frequency band and attenuation on the estimated E_S/E_P ratios. The model calculations provide guidelines on when different approximations may be used. The obtained E_S/E_P ratios for the analyzed events are relatively low (median value < 5) for the full range of model parameters tested, suggesting that significant number of the events display a tensile component. Events with very small ratios (e.g., < 1) may reflect enhanced P radiation associated with rock damage in the source volumes.

- [4] Plenkers, K., **G. Kwiatek**, M. Nakatani, G. Dresen, and JAGUARS Research Group (2010). Observation of seismic events with frequencies $f > 25$ kHz at Mponeng deep gold mine, South Africa. *Seismol. Res. Lett.* **81**, 467–478, doi 10.1785/gssrl.81.3.467.

This study provides an overview of seismic data recorded with the JAGUARS network. In the first part we discussed the performance of the network. This is analysed by the sensitivity plot that shows the depletion of the high frequency content of waveforms with distance. This allowed to demonstrate the influence of local geology, engineering structures, gold exploitation and network itself on the recorded signals and may be used in the following projects to optimize the network design for the purpose of nano- and picoseismic monitoring. The second part of the paper discuss various patterns of the seismicity observed in JAGUARS dataset that were differentiated base on their spatial and temporal occurrence as well as on the frequency content of waveforms. Here, we present the methodology for discriminating signals related to 1) background activity, 2) post-blasting seismic activity, 3) seismicity recorded during working hours, and 4) aftershock sequences. An interesting result is that the post-blasting activity is observed up to 20-30 hours after the ore production blasting, what has serious implications for the safety of mining operation.

- [8] Plenkers, K., D. Schorlemmer, and **G. Kwiatek** (2011). On the probability of detecting picoseismicity. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **101**, 2579–2591, doi 10.1785/0120110017.

Knowledge of the recording completeness of seismic networks is essential for almost every statistical study in seismological research including the scaling relations. Analyzing the recording completeness of very sensitive underground networks such as that of JAGUARS project is difficult because the high-frequency waves of small-scale seismicity are significantly influenced even by local heterogeneities. To analyze the local variations in recording completeness of the JAGUARS network we developed a detection completeness analysis that is able to take into account a complex and heterogeneous observational space. We extended the probability-based magnitude of completeness (PMC) method (Schorlemmer and Woessner, 2008) to take into account the direction of observation. This is because the detection capability of each sensor is changing dramatically with the direction of observation due to: existence of engineering structures (e.g. tunnels, stope, shafts etc.) and localized geological and tectonic features (e.g. dykes, faults).

The analysis is used to gain insight into the detection probabilities of sensors and the location of significant heterogeneities in the observational volume. Local heterogeneities that interact with the seismic wave field are reflected in the detection analysis by decreased detection probabilities. We demonstrate that the fracture zone around a tunnel cavity as well as the highly fractured rock near the stope face have a crucial influence on the detection probability. Furthermore, the detection probabilities allow us to analyze the performance of individual sensors, identifying broken sensors or sensors with poor rock-sensor coupling. We demonstrate that the new approach is able to resolve the strongly varying recording completeness of the JAGUARS network in a very accurate way. We conclude that incorporating the direction of observation in the analysis allows us to resolve and to apply the PMC method to networks in complex underground settings making it a reliable tool to insure proper sensor and network operation.

- [9] Davidsen, J., **G. Kwiatek**, and G. Dresen (2012). No evidence of magnitude clustering in an aftershock sequence of nano- and picoseismicity. *Phys. Rev. Lett.* **108**, 038501, doi 10.1103/PhysRevLett.108.038501.

In this study we investigated whether the magnitudes of earthquakes are independent of one another and can be considered as randomly drawn from the Gutenberg-Richter distribution. This assumption is an essential property of ETAS (epidemic-type aftershock sequence) models, as well as it is important feature supporting the idea of self-similarity of earthquake rupture process, forming the basis of many approaches for forecasting seismicity rates and hazard assessment. Recently, it was suggested that statistical correlations exist between magnitudes of earthquakes. That would imply that one could predict the magnitude of a future earthquake based on the magnitude of previously observed earthquakes. However, the catalog incompleteness can lead to a spurious detection of magnitude correlations.

We selected a subset of 9444 aftershocks following the M_w 1.9 event and studied the magnitude difference between subsequent events above a given magnitude threshold. If subsequent magnitudes were correlated, the statistical distribution of magnitude differences should deviate from the distribution of magnitude differences between randomly chosen earthquakes above the same magnitude threshold. We found there is no significant evidence for the presence of magnitude correlations. Moreover, no systematic dependence on the magnitude threshold is visible supporting the high level of completeness of the considered catalog. This all implies that the assumption of independent earthquakes magnitudes often used for forecasting seismicity rates and hazard assessment is indeed justified.

- [10] Davidsen, J., and **G. Kwiatek** (2013). Earthquake interevent time distribution for induced micro-, nano- and picoseismicity. *Phys. Rev. Lett.*, **110**, 068501, doi 10.1103/PhysRevLett.110.068501.

In this study we analyzed the distribution of time intervals between successive earthquakes in a recorded catalog. The probability density function of time intervals can be described by a unique scaling function if time is rescaled with the mean rate of seismic occurrence. It was shown this observation holds from worldwide to local and laboratory scale. Here, we tested the hypothesis of scale invariance of the distribution of interevent times for nano- and picoseismicity observed in JAGUARS project and microseismicity recorded at KTB project in Germany (Jost et al., 1998; Baisch et al., 2002; Baisch and Harjes, 2003). Data from JAGUARS project covered the seismic activity preceding the M_w 1.9 event, as well as other subsets including post-blasting activity.

We found that the distribution of interevent times is form invariant between the different catalogs of micro-, nano- and picoseismicity. This is not only regardless of the energy scale but also independent of the physical origin of the seismicity (blasting, fluid-injection, natural seismicity) and whether weak non-stationarity in the catalog are present.

5. Discussion on other scientific and research achievements

a) Research

In this section I present studies I was involved in as well as ongoing studies.

Source processes and scaling relations for volcanic-hybrid earthquakes

I continue my main research topic related to the investigation of source processes and scaling relations using data from micro- to femtoseismicity. Study [12] analyzes more than 6000 low-frequency earthquakes recorded during a week-long temporary deployment of broadband seismometers at distances of less than 3km from the crater at Mount St. Helens in September 2006. We estimated the static stress drop and apparent stress of more than 500 events using spectral ratio approach. The source characteristics suggest a self-similarity scaling between different clusters of seismicity detected at the site. This observation is the first of its kind for such a large group of low frequency volcanic-tectonic earthquakes.

Reference:

[12] Harrington, R. M., **G. Kwiatek**, and S. C. Moran. Volcanic hybrid earthquakes at mount St. Helens exhibit constant radiated energy scaling in 2006 [in preparation, see attachment 9]

Acoustic emission in Laboratory studies on rock samples

The comprehensive analysis of physical processes occurring in earthquake source and scaling relations requires investigation of extremely small seismic events observed in experiments performed on rock samples in the laboratory. High frequency acoustic emission (AE) activity produced from microcracking and fracturing is recorded by AE sensors mounted directly on the laboratory samples (e.g. Stanchits et al., 2006, 2010). Laboratory experiments on rock samples allow studying source processes of high frequency seismic events on the sample scale under simulated in-situ conditions (Beeler et al., 2003), making them an extremely valuable tool in scaling relations studies.

The investigation of source characteristics and scaling relation in all scales requires calibrated sensors. Unfortunately, the AE sensors are not calibrated in an absolute sense and they characteristics are seriously affected by coupling quality and other factors. In paper [13] our efforts focused on the determination of the coupling quality of AE sensors and their sensitivity to the incidence angle. The developed ultrasonic calibration (UC) methodology was used to correct the raw AE data and performed the seismic moment tensor inversion for two laboratory experiments. The comparison of errors of moment tensor estimation using raw and calibrated input data confirmed the significant improvement in the data quality while using the calibrated data. We compared the calibration method with Hybrid moment tensor inversion technique of Andersen (2001). The second paper [14] focuses on comparison of the developed UC technique with the moment tensor inversion with unknown amplification (Davi et al., 2012).

The results show the complementarity of both methods allowing for a reliable determination of seismic moment tensors from AE data.

References:

- [13] **Kwiatek, G.**, E.-M. Charalampidou, G. Dresen, and S. Stanchits (2013). An improved method for seismic moment tensor inversion of acoustic emissions through assessment of sensors' coupling and sensitivity to incidence angle. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* [in press, see attachment 10]
- [14] Davi, R., V. Vavryčuk, E.-M. Charalampidou, and **G. Kwiatek** (2013). Network sensor calibration for retrieving accurate moment tensors of acoustic emissions. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 62, 59–67, doi 10.1016/j.ijrmms.2013.04.004

Induced seismicity

Studying variations of the stress field in reservoirs caused by massive fluid injection is important towards an improved understanding of geomechanical processes involved. In study [15] we report on spatio-temporal variations of the local stress tensor orientation at The Geysers geothermal field, California and apply two stress inversion methods with detailed uncertainty assessments using a selection of events recorded between 2007 and 2012.

Our results clearly indicate variations in the orientation of the principal stress axes for the reservoir as a whole showing a normal faulting regime at the reservoir depth between 2 and 3.7 km bounded by a strike-slip regime above and below. Analyzing the temporal evolution of the stress tensor orientation for a prominent seismicity cluster we observe a clear correlation of changes in orientation for σ_1 - σ_3 with the highest injection rates. These results suggest that temporal changes in the stress tensor orientation could contribute to a better characterization of the reservoirs during stimulation.

Study [16] we performed the analysis of induced seismicity during a hydraulic stimulations of well TR8A at the Berlín geothermal field, El Salvador. The induced seismicity was monitored using 13 three component seismic stations deployed in shallow boreholes. The analyzed dataset was composed of 581 events (M_w ranging from -0.5 to 3.7). The original industrial catalog was substantially refined. We relocated the dataset using double-difference technique (Waldhauser and Ellsworth, 2000) with waveforms cross-correlation. We recalculated source parameters using spectral ratio technique. The application of both methods resulted in a dramatic improvement of data quality and allowed for a detailed analysis of spatio-temporal characteristics of induced seismicity in response to injection. The achieved hypocentral precision allowed resolving the spatiotemporal changes in seismic activity down to a scale of a few meters. We observe clustering of the seismicity around the injection well as well as the migration of seismicity outside of injection point along the pre-existing faults. The migration of seismicity is determined by increasing injection rate and “crustal memory” (Kaiser) effect. We observe larger magnitude events after the shut in of the injection well. We finally observe the decrease of the static stress drop with the distance from injection point and the self-similarity of earthquake rupture processes, as the constant value of the stress drop is observed regardless of the magnitude.

Studies [15] and [16] are summarized in [17], where we discuss state-of-the-art waveform processing techniques to investigate physical processes during stimulation of geothermal reservoirs.

Study [18] provides a detailed description of an aftershock sequence of M_w 1.9 seismic event that occurred in the direct proximity of JAGUARS network in December 2007 during Christmas vacation period. The analysis is based on the results of the relocation of more than 20000 aftershocks (as small as the moment magnitude -4.4) using manually picked arrival times. The relocated aftershocks provided a detailed picture of the fracture plane revealing its surprising complexity (branching, conjugate fault plane generation, bending of the plane, local clustering of events) despite of the low magnitude of the main shock. We found the rupture associated with the event was a classical Mohr-Coulomb failure that nucleated in a practically intact rock.

References:

- [15] Martínez-Garzón, P., M. Bohnhoff, **G. Kwiatek**, and G. Dresen (2013). Stress tensor changes related to fluid injection at The Geysers Geothermal Field, California. *Geophys. Res. Lett.* 40, 2596–2601, doi 10.1002/grl.50438.
- [16] **Kwiatek, G.**, F. Bulut, M. Bohnhoff, and G. Dresen (2013). High-resolution analysis of seismicity induced at Berlín geothermal field, El Salvador. Special issue of Geothermics on Induced Seismicity [in press, see attachment 11]
- [17] **Kwiatek, G.**, M. Bohnhoff, P. Martínez-Garzón, F. Bulut, and G. Dresen (2013). High-resolution reservoir characterization using induced seismicity and state of the art waveform processing techniques. *First Break* 31, 81–88.
- [18] Naoi, M., M. Nakatani, Y. Yabe, **G. Kwiatek**, T. Igarashi, and K. Plenkers (2011). Twenty thousand aftershocks of a very small (M_2) earthquake and their relations to the mainshock rupture and geological structures. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **101**, 2399–2407, doi 10.1785/0120100346.

b) Scientific projects

The list of scientific project I was directly involved in between 2007 and 2013.

JAGUARS – Japanese-German Acoustic Emission Research in South Africa, the joint project of of the University of Tokyo, Tohoku University, Ritsumeikan University (Japan), GFZ German Research Center for Geosciences, GMuG Gesellschaft für Materialprüfung und Geophysik (Germany), Seismogen CC, AngloGoldAshanti Ltd., ISS International, and CSIR Johannesburg (South Africa). Apart from my direct involvement in and analysis and interpretation of JAGUARS dataset (described in section 4c) I participated in two field campaigns regarding the installation of the JAGUARS network and further maintenance of the network.

GEISER - The GEISER (Geothermal Engineering Integrating Mitigation of Induced Seismicity in Reservoirs) project address several of the major challenges the development of geothermal energy including the mitigation of induced seismicity to an acceptable level. The GEISER consortium is formed by 12 European research institutions and industrial partners. Within the project I analyzed the source properties of fluid-induced seismicity in comparison to the injection parameters, stress field, geological and tectonic setup (Working Package 3: Analysis of induced seismicity). I also provided expertise on the GEISER metadatabase design (Working Package 2: Compilation of induced seismicity data from geothermal sites).

FASTLOC is the project aiming on developing the procedure for a near-real-time relocation of induced seismicity. The ultimate aim is to provide a software package that is capable to provide a near-real-time analysis of online waveform data including: a) phase detection, b) phase

coincidence trigger, c) location and d) relocation of induced earthquakes. I am responsible for developing the software in this project.

c) Paper reviews

Between 2011 and 2013 I reviewed **12** papers submitted to the following journals: *Journal of Seismology*, *Geophysical Journal International*, *Tectonophysics*, *Journal of Geophysical Research*, *Pure and Applied Geophysics*, and *Geothermics*.

d) Collaboration

- University of Southern California (prof. Yehuda Ben-Zion)
- California Institute of Technology (dr Thomas Goebel)
- Karlsruhe Institute of Technology (dr Rebecca Harrington)
- Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences (dr Beata Orlecka-Sikora)
- Alberta University (prof. Joern Davidsen)

e) Conference proceedings

Results of my studies were presented in more than 60 conference proceedings (see attachment 6 for details)

f) Other activities

TAIS stands for the Triggered and Induced Seismicity Working group, which is a part of IASPEI commission on seismological observation and interpretation. Within this group I am responsible for the development and maintenance of TAIS Website (<http://tais.iaspei.net>) which provides a forum to share the experience related to analysis of induced seismicity (database of free electronic materials, technical papers, proceedings from conferences, information about meetings etc.).

Since PhD studies I am developing the software FOCI for the seismic moment tensor and source parameters estimation (<http://www.induced.pl/foci>). The program is designed to be a simple and efficient tool for determination of seismic moment tensors and source parameters for any type of induced seismicity. The software was predominantly developed for polish copper and coal mines. It is capable to read most of the formats typically used in mining seismic stations (ARAMIS, ELOGOR-C, SOS). The program is used by seismic stations located in Legnica-Głogów copper district, a few seismic stations of coal mines in Upper Silesia Coal districts and research/academic institutions (e.g. University of Silesia, Institute of Geophysics, Polish Academy of Science).

In 2012 I joined the technical committee of 4th EAGE Passive Seismic Workshop that took place in Amsterdam in April 2013. My responsibility was to provide expertise while assessing the submitted abstracts.

In April 2013 I performed two lectures for undergraduate students at the Massachusetts Institute of Technology. The lectures had a common title "Is earthquake rupture process self-similar between km- and cm- scale (M_w 4 to -6)? Experiences from induced seismicity in South African gold mines and laboratory experiments or rock samples" were discussing the methodology of analysis of source characteristics for extremely small seismic events.

In 2011 and 2012, together with dr Rebecca Harrington (Karlsruhe Institute of Technology) we organized the EGU Seismology session entitled “SM2.4: Seismic source processes and scaling relations”. In 2013 our session were arranged into session entitled “Earthquake source processes - Imaging methods, physical rupture models and scaling” together with other sessions related to earthquake sources. We continue with session organization in the following years.

Since April 2012 I co-chair the EPOS Working Group 10: Infrastructure for Georesources, which is a part of EPOS (European Platform Observing System) initiative. The group has been established to integrate and build the comprehensive research infrastructure for an optimum efficiency of scientific research in the area of induced seismicity. Within this group I am responsible for the integration of various data types related to different earthquake-inducing technologies (e.g. mining-induced, fluid-induced, reservoir induced, oil/CO₂/gas storage induced) into a common database.

Bibliography

- Andersen, L. M. (2001). A relative moment tensor inversion technique applied to seismicity induced by mining, Univ. of the Witwatersrand, Johannesburg.
- Baisch, S., and H.-P. Harjes (2003). A model for fluid-injection-induced seismicity at the KTB, Germany, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **152**, no. 1, 160–170.
- Baisch, S., M. Bohnhoff, L. Ceranna, Y. Tu, and H.-P. Harjes (2002). Probing the crust to 9-km depth: Fluid injection experiments and induced seismicity at the KTB superdeep drilling hole, Germany, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **92**, no. 6, 2369–2380.
- Beeler, N. M., T.-F. Wong, and S. H. Hickman (2003). On the expected relationships among, apparent stress, static stress drop, effective shear fracture energy and efficiency, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **93**, 1381–1389.
- Bertero, M., D. Bindi, P. Boccacci, M. Cattaneo, C. Eva, and V. Lanza (1997). Application of the projected Landweber method to the estimation of the source time function in seismology, *Inv. Prob.* **13**, 465–486.
- Boettcher, M. S., A. McGarr, and M. Johnston (2009). Extension of Gutenberg-Richter distribution to M_W -1.3, no lower limit in sight, *Geophys. Res. Lett.* **36**, L10307, doi 10.1029/2009GL038080.
- Bohnhoff, M., G. Dresen, W. L. Ellsworth, and H. Ito (2010). Passive Seismic Monitoring of Natural and Induced Earthquakes: Case Studies, Future Directions and Socio-Economic Relevance, in *New Frontiers in Integrated Solid Earth Sciences*, edited by S. Cloetingh and J. Nègèndank, pp. 261–285, Springer Science+Business Media B.V. 2009.
- Chib, S., and Greenberg (1995). Understanding the Metropolis-Hastings Algorithm, *American Statistician* **49**, 327–335.
- Davi, R., V. Vavryčuk, E.-M. Charalampidou, and G. Kwiatek (2012). Accurate moment tensor inversion of acoustic emissions, in *Proceedings of AIM 3rd Advanced Industrial Monitoring Workshop on Induced Seismicity*, October 10-13rd, 2012, Smolenice Castle, Czech Republic.

- Dębski, W., and B. Domański (2002). An application of the pseudo-spectral technique to retrieving source time function, *Acta Geophys. Pol.* **50**, no. 2, 207–221.
- Domański, B., and S. J. Gibowicz (2003). The accuracy of source parameters estimated from source time function of seismic events at Rudna copper mine in Poland, *Acta Geophys. Pol.* **51**, no. 4, 347–367.
- Domański, B., S. J. Gibowicz, and P. Wiejacz (2002). Source time function of seismic events at Rudna copper mine, Poland., *Pure Appl. Geophys.* **159**, 131–144.
- Dreger, D., R. M. Nadeau, and A. Chung (2007). Repeating earthquake finite source models: Strong asperities revealed on the San Andreas Fault, *Geophys. Res. Lett.* **32**, L23302, doi 10.1029/2007GL031353.
- Fischer, T., and A. Guest (2011). Shear and tensile earthquakes caused by fluid injection, *Geophys. Res. Lett.* **38**, no. 5, L05307, doi 10.1029/2010GL045447.
- Gibowicz, S. J. (2009). Seismicity Induced by Mining: Recent Research, in *Advances in Geophysics*, vol. 51, edited by R. Dmowska, pp. 1 – 53, Elsevier.
- Gibowicz, S. J., R. P. Young, S. Talebi, and D. J. Rawlence (1991). Source parameters of seismic events at the Underground Research Laboratory in Manitoba, Canada: Scaling relations for events with moment magnitude smaller than 2, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **81**, 1157–1182.
- Graham, C. C., S. Stanchits, I. G. Main, and G. Dresen (2010). Comparison of polarity and moment tensor inversion methods for source analysis of acoustic emission data, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **47**, no. 1, 161–169, doi 10.1016/j.ijrmms.2009.05.002.
- Hastings, W. K. (1970). Monte Carlo Sampling Methods Using Markov Chains and Their Applications, *Biometrika* **57**, no. 1, 97–109.
- Huenges, E., K. Erbas, I. Moeck, G. Bloecher, W. Brandt, T. Schulte, A. Saadat, G. Kwiatek, and G. Zimmermann (2009). The EGS project Gross Schoenebeck - Current status of the large scale research project in Germany, in *Proceedings of 33rd Annual Meeting Geothermal Resources Council*, pp. 403–404, Reno, USA 2009.
- Ide, S., and G. C. Beroza (2001). Does apparent stress vary with earthquake size?, *Geophys. Res. Lett.* **28**, 3349–3352.
- Imanishi, K., W. L. Ellsworth, and S. G. Prejean (2004a). Earthquake source parameters determined by the SAFOD Pilot Hole seismic array, *Geophys. Res. Lett.* **31**, L12S09, doi 10.1029/2004GL019420.
- Imanishi, K., M. Takeo, W. L. Ellsworth, H. Ito, T. Matsuzawa, Y. Kuwahara, Y. Iio, S. Horiuchi, and S. Ohmi (2004b). Source Parameters and Rupture Velocities of Microearthquakes in Western Nagano, Japan, Determined Using Stopping Phases, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **94**, no. 5, 1762–1780, doi 10.1785/012003085.
- Ingber, L. (1989). Very fast simulated re-annealing, *Math. Comput. Modeling* **12**, no. 8, 967–973.
- Ingber, L. (1993). Simulated annealing: Practice versus theory, *Math. Comput. Modeling* **18**, no. 11, 29–57.
- Izutani, Y., and H. Kanamori (2001). Scale-dependence of seismic energy-to-moment ratio for strike-slip earthquakes in Japan, *Geophys. Res. Lett.* **28**, no. 20, 4007–4010.

- Jost, M. L., T. Busselberg, O. Jost, and H.-P. Harjes (1998). Source parameters of injection-induced microearthquakes at the KTB deep drilling site, Germany, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **88**, 815–832.
- Kanamori, H., and D. Anderson (1975). Theoretical basis of some empirical relations in seismology, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **88**, 667–676.
- Kanamori, H., and E. Brodsky (2004). The physics of earthquakes, *Reports on Progress in Physics* **67**, no. 8, 1429–1496, doi 10.1088/0034-4885/67/8/R03.
- Kanamori, H., and L. Rivera (2004). Static and dynamic scaling relations for earthquakes and their implications for rupture speed and stress drop, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **94**, 314–319.
- Kwiatek, G. (2008). Relative source time function deconvolution at the Rudna copper mine: Uncertainty Estimation, *J. Seismol.* **12**, no. 4, 499–517, doi 10.1007/s10950-008-9100-8.
- Kwiatek, G., K. Plenkers, M. Nakatani, Y. Yabe, G. Dresen, and J. Group (2010). Frequency-Magnitude Characteristics Down to Magnitude -4.4 for Induced Seismicity Recorded at Mponeng Gold Mine, South Africa, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **100**, no. 3, 1167–1173, doi 10.1785/0120090277.
- Kwiatek, G., K. Plenkers, and G. Dresen (2011). Source Parameters of Picoseismicity Recorded at Mponeng Deep Gold Mine, South Africa: Implications for Scaling Relations, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **101**, no. 6, 2592–2608, doi 10.1785/0120110094.
- Madariaga, R. (1976). Dynamics of an expanding circular fault, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **66**, 639–666.
- Mayeda, K., R. Gok, W. R. Walter, and A. Hofstetter (2005). Evidence for non-constant energy/moment scaling from coda-derived source spectra, *Geophys. Res. Lett.* **32**, L10306, doi 10.1029/2005GL022405.
- McGarr, A. (1984). Scaling of ground motion parameters, state of stress, and focal depth., *J. Geophys. Res.* **89**, no. B8, 6969–79.
- McGarr, A., J. B. Fletcher, M. Boettcher, N. Beeler, and J. Boatwright (2010). Laboratory-Based Maximum Slip Rates in Earthquake Rupture Zones and Radiated Energy, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **100**, no. 6, 3250–3260.
- Metropolis, N., A. Rosenbluth, M. Rosenbluth, A. Teller, and E. Teller (1953). Equation of state calculations by fast computing machines, *J. Chem. Phys.* **21**, 1087–1092.
- Nakatani, M., Y. Yabe, J. Philipp, G. Morema, G. Stanchits, and G. Dresen (2008). Acoustic Emission Measurements in a Deep Gold Mine in South Africa — Project Overview and Some Typical Waveforms, *Seismol. Res. Lett.* **79**, no. 2, 311.
- Piana, M., and M. Bertero (1997). Projected Landweber method and preconditioning, *Inv. Prob.* **13**, 441–463.
- Prejean, S. G., and W. L. Ellsworth (2001). Observations of earthquake source parameters at 2 km depth in the Long Valley caldera, eastern California, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **91**, 165–177.
- Ross, A., G. R. Foulger, and B. R. Julian (1996). Non-double-couple earthquake mechanisms at the Geysers Geothermal Area, California, *Geophys. Res. Lett.* **23**, no. 8, 877–880, doi 10.1029/96GL00590.

- Schorlemmer, D., and J. Woessner (2008). Probability of Detecting an Earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America* **98**, no. 5, 2103–2117, doi 10.1785/0120070105.
- Šílený, J., and A. Milev (2008). Source mechanism of mining induced seismic events — Resolution of double couple and non double couple models, *Tectonophysics* **456**, no. 1-2, 3–15, doi 10.1016/j.tecto.2006.09.021.
- Spottiswoode, S. M. (1984). Source mechanisms of mine tremors at Blyvooruitzicht gold mine, edited by N. C. Gay and E. H. Wainwright, pp. 29–37, S. Afr. Inst. Min. Metal., Johannesburg.
- Stanchits, S., S. Vinciguerra, and G. Dresen (2006). Ultrasonic Velocities, Acoustic Emission Characteristics and Crack Damage of Basalt and Granite, *Pure Appl. Geophys.* **163**, no. 5-6, 975–994, doi 10.1007/s00024-006-0059-5.
- Stanchits, S., G. Dresen, and J. R. Group (2010). Formation of Faults in Diorite and Quartzite Samples Extracted from a Deep Gold Mine (South Africa), *Geophys. Res. Abstr.* **12**, EGU2010–5605.
- Stork, A. L., and H. Ito (2004). Source parameter scaling for small earthquakes observed at the western Nagano 800 m-deep borehole, central Japan, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **94**, 1781–1796.
- Tomic, J., R. E. Abercrombie, and A. F. doNascimento (2009). Source parameters and rupture velocity of small $M \leq 2.1$ reservoir induced earthquakes, *Geophys. J. Int.* **179**, 1013–1023.
- Vavryčuk, V., M. Bohnhoff, Z. Jechumtálová, P. Kolář, and J. Šílený (2008). Non-double-couple mechanisms of microearthquakes induced during the 2000 injection experiment at the KTB site, Germany: A result of tensile faulting or anisotropy of a rock?, *Tectonophysics* **456**, no. 1–2, 74–93, doi 10.1016/j.tecto.2007.08.019.
- Waldhauser, F., and W. L. Ellsworth (2000). A Double-Difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Fault, California, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **90**, no. 6, 1353–1368, doi 10.1785/0120000006.
- Wiejacz, P. (1992). Calculation of seismic moment tensor for mine tremors from the Legnica-Głogów Copper Basin, *Acta Geophys. Pol.* **40**, 103–122.
- Yamada, T., J. Mori, H. Kawakata, H. Ogasawara, S. Ide, and S. Tanbo (2002). Rupture velocities of small earthquakes ($0 < M < 1.5$) in a South African gold mine: constraints on fracture energy, *EOS Trans. AGU, Fall Meeting Suppl.* **83**, S72B–1143.
- Yamada, T., J. Mori, S. Ide, H. Kawakata, Y. Iio, and H. Ogasawara (2005). Radiation efficiency and apparent stress of small earthquakes in a South African gold mine, *J. Geophys. Res.* **110**, B01305.

Greg Kwid