Kraków, 06.01.2025

Prof. dr hab. inż. Andrzej Leśniak

Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

RECENZJA

rozprawy doktorskiej **mgr inż. Moniki Staszek**

wykonanej w Instytucie Geofizyki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie. Promotorem pracy zatytułowanej „Joint multiplet and static stress drop analysis for enhanced characterization of reservoir undergoing fluid injection" jest dr hab. Łukasz Rudziński, prof. PAN.

Zawartość dysertacji

Przedstawiona do recenzji dysertacja napisana jest w języku angielskim i powstała na bazie trzech recenzowanych publikacji doktorantki. Chronologicznie pierwszą jest praca pt. „Temporal static stress drop variations due to injection activity at The Geysers geothermal field, California" opublikowana w Geophysical Research Letters, 44(14) wspólnie z czterema innymi osobami. Doktorantka jest pierwszą autorką i ma większościowy udział w powstaniu publikacji (60%). Kolejną jest praca zatytułowana „Temporal response of magnitude distribution to fluid injection rates in The Geysers geothermal field" (Acta Geophysica 67(1)) w której doktorantka jest jedyną współautorką z udziałem 20%. Ostatnią z prac na których mgr Staszek oparła doktorat jest publikacja w Scientific Reports, 11(1) zatytułowana „Spatial and temporal multiplet analysis for identification of dominant fluid migration path at The Geysers geothermal field, California". Doktorantka jest pierwszą z trojga współautorów i podobnie jak w pierwszej wymienionej tu publikacji ma udział 60%. Prace te są dołączone do doktoratu jako Dodatki 1,2 i 3.

Doktorat składa się ze wstępu, czterech rozdziałów zasadniczych oraz podsumowania. Na końcu dysertacji zamieszczono również spis tabel, spis ilustracji, bibliografię, wspomniane powyżej Dodatki zawierające artykuły oraz oświadczenia o współautorstwie a także inne publikacje doktorantki, niezwiązane z dysertacją. Zasadnicza część dysertacji została napisana w języku angielskim z wyjątkiem, umieszczonego na jej wstępie, polskiego opisu pracy.

Zasadniczym przedmiotem rozprawy jest analiza struktur sejsmogennych w rejonie otworów iniekcyjnych Prati-9 i Prati-29 zlokalizowanych na terenie pola geotermalnego The Geysers w Kalifornii (USA). W ramach prowadzonych przez doktorantkę badań zrealizowano łączną analizę czasoprzestrzenną emisji sejsmicznej w trakcie kilkuletniej stymulacji złoża geotermalnego, wydzielono zjawiska podobne oraz dokonano oceny zmienności statycznych

spadków naprężeń. Rezultaty analizy posłużyły do identyfikacji i opisu struktur sejsmogenicznych na obszarze analizowanego pola geotermalnego. Badania jakie zostały przedstawione w rozprawie doktorskiej pani mgr Staszek, zarówno od strony danych jak i poruszanych zagadnień, stanowią wąski wycinek zagadnień związanych z użyciem mikrosejsmiczności do charakterystyki skał zbiornikowych. Doktorantka sformułowała trzy ogólne tezy, które w trakcie omawiania rezultatów opublikowanych w artykułach kolejno uzasadnia.

W rozdziale pierwszym, w sposób wystarczający dla celów jakie stawia sobie w doktoracie, doktorantka charakteryzuje rejon badań, tj budowę geologiczną pola geotermalnego The Geysers w Kalifornii (USA) jak również sam rejon analizowanej emisji sejsmicznej, zlokalizowany we wschodniej części Obszaru Demonstracyjnego EGS (Enhanced Geothermal System). W kolejnej części rozdziału prezentuje obraz emisji sejsmicznej w latach 2007 – 2014, tj w okresie stymulacji złoża, ze szczególnym zwróceniem uwagi na rejon północno-zachodni, gdzie zlokalizowane są otwory iniekcyjne Prati-9 i Prati-29 oraz chmura emisji analizowana w doktoracie. Kolejna część rozdziału zawiera przegląd literaturowy poświęcony wybranym technikom analiz sejsmiczności na polach geotermalnych, szczególnie tym, które były i są stosowane w trakcie stymulacji złóż geotermalnych. Szczególną uwagę poświęca autorka badaniom prowadzonym na polu The Gejzers, omawiając rezultaty dotychczasowych badań.

W kolejnym podrozdziale doktorantka omawia zagadnienia związane ze statycznymi spadkami naprężeń jakie zachodzą podczas wstrząsów sejsmicznych, podając podstawowe wzory i omawiając podstawowe modele procesów a także sposoby estymacji ich parametrów oraz błędów związanych z ich estymacją. Warto podkreślić, że doktorantka w dysertacji używa, najprostszego liniowego modelu relaksacji naprężeń (str. 33). Następny podrozdział został przez doktorantkę poświęcony omówieniu związków statycznego spadku naprężeń z wielkością wstrząsów a także innym wielkościom mającym wpływ na wielkość tych spadków (np. głębokość występowania emisji, typ skał, ich wytrzymałość na odkształcenia i zwięzłość oraz stopień zeszczelinowania a także obecność płynów złożowych). Omówiono w nim rezultaty nie tylko badań terenowych lecz również badań laboratoryjnych. Odniesiono się również do zagadnień odkształceń asejsmicznych górotworu (np. poślizgów po płaszczyźnie uskoku bez emisji energii sprężystej), co było istotne dla interpretacji wyników uzyskanych przez doktorantkę w trakcie jej badań. W opinii recenzenta podrozdział ten w wystarczający sposób dokonuje przeglądu literaturowego zagadnień spadku naprężeń statycznych w rezultacie wstrząsu sejsmicznego, które są przez doktorantkę podejmowanego w doktoracie.

Kolejny podrozdział poświecono omówieniu zagadnień związanych z poprawą dokładności lokalizacji źródeł emisji sejsmicznej. Szczególny nacisk położono na zagadnienia związane z poprawą dokładności lokalizacji z użyciem zjawisk podobnych. Zwięźle omówiono ideę multipletów i możliwości jakie daje ich zastosowanie w lokalizacji źródeł wstrząsów. Wspomniano również o innych technikach, głównie opartych na relokalizacji zdarzeń sejsmicznych. Doktorantka w ostatnim z artykułów używa do lokalizacji zjawisk metody

podwójnych różnic (double-difference DD) i używa w tej technice precyzyjnej różnicy czasów pomiędzy zjawiskami w multiplecie wyznaczonych z funkcji korelacji podobnych sygnałów sejsmicznych. Omówieniu tych zagadnień jak i literaturze tego tematu poświęcony jest kolejny podrozdział rozprawy. Autorka podaje niezbędne definicje, prezentuje sposób inwersji podwójnych różnic oraz omawia sposób oceny błędów lokalizacji źródeł.

Rozdział drugi, trzeci i czwarty rozprawy są wyczerpującym omówieniem zagadnień poruszanych w trzech tematycznie powiązanych artykułach, których doktorantka jest współautorką.

W rozdziale drugim doktorantka omawia zagadnienia odnoszące się do zmian statycznego spadku naprężeń związanych z mikrowstrząsami indukowanymi na drodze stymulacji złoża geotermalnego w rejonie dwóch odwiertów wymienionych powyżej z nazwy. W celu weryfikacji istotności zmian wartości średniej spadków naprężeń w trakcie zwiększania bądź zmniejszania ilości pompowanych do złoża płynów wykonano testy statystyczne (rangowy test sum Wilcoxona oraz test Kołmogorowa -Smirnowa). Pozwoliły one na wydzielenie w okresie analizy trzech przedziałów czasowych o istotnie różnych medianach i rozkładach. Przedziały te były następnie porównywane z parametrami opisującymi proces iniekcji, parametrami mechanizmu źródeł oraz ich przestrzennym rozkładem. Nie stwierdzono związku pomiędzy zmianami statycznego spadku naprężeń a mechanizmem źródeł oraz ich przestrzennym rozkładem. Z kolei okresy intensywnego wtłaczania wody korelowały się okresami w których statyczny spadek naprężeń był istotnie mniejszy niż w okresach mniej intensywnego zatłaczania. Doktorantka interpretuje tę obserwację zależnością spadku naprężeń od ciśnienia porowego, którego wartości są istotnie mniejsze podczas intensywnego zatłaczania płynu do odwiertu. Wysokie ciśnienie porowe jak konkluduje doktorantka może przyczyniać się do spadku adhezji na płaszczyźnie poślizgu, redukcji statycznych spadków naprężeń a w granicznej sytuacji do poślizgu asejsmicznego.

Również w rozdziale drugim doktorantka odnosi się do drugiego z artykułów w którym analizowane były zmiany parametru „b" rozkładu Gutenberga-Richtera w trakcie stymulowania górotworu w tym samym co poprzednio rejonie. Nie wykryto korelacji zmian tego parametru ze zmianami statycznego spadku naprężeń, podobnie jak nie stwierdzono korelacji zmian parametru „b" z objętością wstrzykiwanych do złoża płynów. Stwierdzono zaś korelację „b" ze zmianami tempa zatłaczania tych płynów.

Rozdział trzeci oparty na trzecim z wymienionych artykułów poświęcony jest identyfikacji struktur sejsmogennych w chmurze zjawisk w opisanym powyżej rejonie i zmianom statycznego spadku naprężeń w zidentyfikowanych strukturach. W części pierwszej doktorantka przedstawia metodę zwiększenia dokładności lokalizacji struktur sejsmogennych opartą na identyfikacji multipletów a następnie na ich precyzyjnej lokalizacji. W oparciu o tę metodę wydziela trzy struktury sejsmogenne, zakwalifikowane jako szczeliny i jedną zidentyfikowaną jako płaszczyzna uskoku. Doktorantka stwierdza, że czasy emisji zjawisk sejsmicznych związanych ze szczelinami są dodatnio skorelowane ze zmianami tempa

zatłaczanych płynów w przeciwieństwie do czasów emisji zjawisk związanych z płaszczyzną uskoku, dla których korelacja jest ujemna. Ponadto statyczne spadki naprężeń dla zjawisk związanych z płaszczyzną uskoku są znacząco co do wartości mniejsze od spadków naprężeń dla zjawisk związanych ze szczelinami. W dalszej części rozdziału doktorantka omawia czynniki prowadzące do odmiennego zachowania ośrodka skalnego w rejonie szczelin i silnie spękanej strefy uskokowej.

W rozdziale 4 dokonano rozdziału wpływów zmian ciśnienia porowego i heterogeniczności ośrodka skalnego na wartości statycznych spadków naprężeń wstrząsów. Wyniki przeprowadzonej analizy potwierdzają, że zmienność czasowego spadku naprężeń zidentyfikowana w rozdziale 2 nie jest artefaktem jego zmienności przestrzennej. Co więcej, różnica w średnich wartościach spadków naprężeń między okresami zróżnicowanych wartości spadków naprężeń (wyróżnionych w pierwszej publikacji doktorantki jako okresy TI2 i TI3) jest jeszcze bardziej stabilna po wykluczeniu wpływu zmienności przestrzennej spadków naprężeń. Dlatego doktorantka podsumowuje, że zmiany ciśnienia porowego wpływają na spadek naprężeń statycznych wstrząsów w analizowanym obszarze niezależnie od heterogeniczności przestrzennej złoża.

Podsumowując zawartość części pierwszej zasadniczej dysertacji recenzent jest zdania, że doktorantka w bardzo dobry, wyczerpujący a jednocześnie zwięzły sposób omówiła niezbędną literaturę oraz zagadnienia, które są podstawą zagadnień opisanych w dalszych częściach doktoratu jak i w trzech dołączonych artykułach doktorantki, będących podstawą dysertacji. W kolejnych rozdziałach (2, 3 i 4) doktorantka dokonała krótkiej syntezy treści trzech wymienionych artykułów, wskazując na udowodnienie trzech tez sformułowanych na wstępie rozprawy.

Uwagi ogólne

Recenzent świadomie chciałby pominąć omawianie i komentowanie trzech artykułów, których współautorką jest doktorantka. Zostały one opublikowane w bardzo dobrych periodykach naukowych co świadczy o ich naukowej wartości. Merytoryczny udział doktorantki w ich powstaniu był jak wspomniano znaczący (zgodnie z oświadczeniami doktorantki) co pozwala stwierdzić, że w sposób twórczy potrafi ona włączyć się w proces badawczy w reprezentowanej przez nią dyscyplinie naukowej. Niestety poza oświadczeniami dołączonymi do dystertacji brak bardziej szczegółowych informacji o osiągnięciach doktorantki (np. typach zrealizowanych procedur obliczeniowych w oparciu o własnoręcznie napisane programy) w trakcie badań prowadzonych w tak znamienitych zespołach badawczych. Niejakim zaskoczeniem jest również fakt, że wszystkie oświadczenia doktorantki podpisał również promotor (będący współautorem tylko w trzeciej publikacji) a nie wszyscy współautorzy. Recenzent nie wie jak to można to interpretować (może wyjaśni się to w trakcie obrony).

Trzy artykuły będące podstawą dysertacji zostały dobrane właściwie. Wykorzystuje się w nich prawie ten sam zestaw danych pochodzących z tego samego rejonu i dotyczą one podobnych

zagadnień. Rezultaty opisane w pierwszym artykule są rozwijane bezpośrednio w trzecim a częściowo i w drugim. Uzyskane w nich rezultaty są zdaniem recenzenta istotnym przyczynkiem do dyskusji toczonej już od kilkudziesięciu lat w środowisku naukowym.

W trakcie czytania dysertacji i załączonych artykułów narodziło się kilka pytań, które recenzent chciałby zadać licząc na odpowiedź w trakcie obrony.

Zasadnicze techniki jakie zostały przez doktorantkę użyte w trzecim artykule do obrazowania rozkładu źródeł emisji sejsmicznej jest identyfikacja zjawisk podobnych (*ang.* multiplets) w chmurze sejsmicznej oraz techniki podwójnych różnic (*ang.* double-difference). Dla zwiększenia precyzji lokalizacji źródeł emisji sejsmicznej zarówno jedna jak i druga metoda mogą być używane osobno jaki i wspólnie. Doktorantka wybiera drugi sposób wstępnie dokonując wydzielenia multipletów a następnie metodą podwójnych różnic dokonuje ich relokalizacji.

W związku z tak przyjętym sposobem przetwarzania danych rodzi się kilka pytań:

1) Jakie informacje zawiera katalog (prócz sejsmogramów) na podstawie którego wykonano badania (lokalizacje źródeł ?, błędy/elipsoidy lokalizacji? mechanizmy źródeł ?)
2) Jak na potrzeby badań zostały zdefiniowane zjawiska podobne (np. poprzez odpowiednio dużą wartość kroskorelacji) ?
3) Z jakiego oprogramowania korzystano do relokalizacji multipletów (HypoDD) ?
4) Czy zdaniem doktorantki użycie filtracji pasmowej wpłynęło znacząco na rezultat wydzielania zjawisk podobnych?
5) Czy na potrzeby badań identyfikowano podwójne (*ang.* doublets) zjawiska (ile ich było) a jeśli nie to jaki wpływ miało ich pominięcie na wyniki analiz?
6) Czy do zdarzeń pojedynczych (SE) zastosowano jakieś techniki poprawy ich lokalizacji?

Rezultaty (nawiasem mówiąc świetne) uzyskane i opisane w pracy i w trzecim artykule zostały uzyskane w oparciu o niewielki podzbiór całej emisji uzyskanej w wybranym rejonie. Poprawiona lokalizacja pozwoliła na wydzielenie kilku prostych struktur i analizę zmian geomechanicznych w oparciu o te struktury.

7) Czy obraz jaki można uzyskać wykorzystując większą liczbę zarejestrowanych zjawisk i bardziej złożone modele pękań górotworu w opinii doktorantki obiegałyby w sposób zasadniczy od rezultatów przez nią uzyskanych ?

Mimo tych kilku pytań (które w żaden sposób nie wpływają na ocenę pracy) recenzent pozostaje pod wrażeniem osiągnieć doktorantki, szczególnie jeśli chodzi o skrupulatność prowadzenia badań jak i rezultatów w zakresie szerokiego wachlarza technik używanych do przetwarzania danych mikrosejsmicznych jak i interpretacji zmian sejsmiczności oraz jej parametrów w trakcie operacji stymulacji .

Dostrzeżone usterki techniczne:

Praca napisana jest praktycznie bez większych usterek technicznych. Listę dostrzeżonych usterek przedstawiono poniżej.

Str 27. Brak cytowań publikacji (Thomas et al., 1981)x2, (Gunderson, 1991) i (Walters et al., 1999) w spisie literatury

Str 27. Odwiertów Prati -9 i Prati-29 nie ma na rysunku 2 mimo iż autorka odwołuje się również do tego rysunku w tekście.

Str 28. Brak cytowań publikacji (Klein, 2002) i (Eberhart-Phillips and Oppenheimer, 1984) w spisie literatury

Wniosek końcowy

Podsumowując, zaprezentowana przez Panią mgr inż. Monikę Staszek dysertacja wnosi dużą wartość w udoskonalenie interpretacji danych mikrosejsmicznych a w szczególności wykorzystania multipletów do zwiększania dokładności lokalizacji emisji sejsmicznej, identyfikacji struktur sejsmogennych i interpretacji procesów zachodzących w trakcie stymulacji złóż geotermalnych z użyciem zjawisk sejsmicznych.

Pani mgr inż. Monika Staszek udowodniła zdaniem recenzenta, iż w sposób bardzo dobry opanowała zagadnienia związane z interpretacją emisji sejsmicznej na polach geotermalnych, zaprezentowała swoją biegłość w wykorzystaniu narzędzi obliczeniowych na potrzeby prezentowanej problematyki naukowej, oraz uzasadniła postawione tezy.

Recenzowana rozprawa doktorska w częściach i w zakresie wynikającym z oświadczenia doktorantki (popartego autorytetem promotora) jest jej samodzielnym i oryginalnym dziełem. Tym samym **recenzent stwierdza**, że rozprawa doktorska Pani mgr inż. Monika Staszek pt. „Joint multiplet and static stress drop analysis for enhanced characterization of reservoir undergoing fluid injection" **spełnia wymogi** określone w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2023 r. poz. 742) (z uwzględnieniem zmian wprowadzonych później i ogłoszonych w obwieszczeniu Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 11 września 2024 r. (Dz. U. poz. 1571)) i **wnioskuje o dopuszczenie** Pani mgr inż. Monika Staszek do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Leśniak.