

Kraków, 15.08.2025

Prof. dr hab. inż. Ryszard Hejmanowski

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr inż. Natalii Bugajskiej-Jędraszek
pod tytułem.:

**„Integracja metod satelitarnej interferometrii radarowej z
geofizycznym opisem zjawiska wstrząsów indukowanych”**

Recenzję sporządzono na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka, Politechniki Wrocławskiej z dnia 19 maja 2025 r (RDND08/115/2025).

1. Ogólna charakterystyka zakresu i treści rozprawy

Recenzowana praca została opracowana przez Doktorantkę w Katedrze Geodezji i Geoinformatyki, na Wydziale Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej – Panią mgr inż. Natalię Bugajską-Jędraszek pod kierunkiem promotorów, Pana dr hab. inż. Wojciecha Milczarka, prof. PWr oraz Pana dr hab. Grzegorza Lizurka, profesora IGF PAN. Praca została złożona w formie monograficznego manuskryptu.

Manuskrypt pracy doktorskiej obejmuje łącznie 204 str. i zawiera spis treści, listę stosowanych akronimów, spis 283 źródeł literaturowych zamieszczony na 18 stronach pracy, oraz trzy dodatki:

- 1) dodatek A własne opracowanie wykazu wstrząsów indukowanych za okres 2015-2022, wg. bazy danych HiQuake
- 2) dodatek B zawierający wykaz pozyskanych zobrazowań satelitarnych, konfigurację baz przestrzennych oraz czasowych par interferometrycznych, a także obrazy skumulowanych przemieszczeń LOS w szeregach czasowych dla poszczególnych wstrząsów
- 3) dodatek C zawierający ilustracje przemieszczeń obserwowanych, modelowanych i rezydualnych dla wszystkich analizowanych wstrząsów.

Głównym celem pracy było opracowanie spójnej metody integracji danych geofizycznych i obserwacji radarowych deformującej się wskutek wstrząsu powierzchni terenu celem wyjaśnienia mechanizmu powstawania wstrząsów indukowanych. Zarysowanie w pierwszym rozdziale pracy głównej motywacji do podjęcia badań bardzo pomaga w studiowaniu dalszej części manuskryptu. Cennie zwrócono uwagę na znaczenie badań nad zdalnym pozyskiwaniem informacji o deformacjach powierzchni przy pomocy technologii

radarowej jako komplementarnego narzędzia do modelowania procesów geofizycznych. Faktycznie w tym zakresie można mówić o niszy badawczej, która jest obecnie mocno eksplorowana, ale wciąż niepozbawiona potencjału poznawczego. Niewątpliwie motywacja do podjęcia tematu pracy wyniknęła z jednej strony z dobrego rozpoznania stanu wiedzy, z drugiej ze wspomnianego potencjału badawczego i poznawczego. Motywacja i wyznaczone cele części dysertacji pozwoliły Doktorantce na postawienie tezy w skrócie sprowadzającej się do stwierdzenia, że rezultaty przeprowadzonych badań pozwolą na pozyskanie danych do oceny wpływów sejsmiczności indukowanej. W świetle wyводу logicznego jest to teza poprawna, jakkolwiek fakt dostarczenia danych bądź ich niedostarczenia jest zerojedynkowy w sensie dowodowym. Zapewne trudniej z oceną tego faktu w sensie jakościowym. Rodzi się tu bowiem pytanie czy rezultaty badań będą wystarczające jakościowo, by dało się w oparciu o wygenerowane dane faktycznie dokonać oceny wpływów sejsmiczności indukowanej. A więc jakie kryteria powinny zostać spełnione, aby ta ocena wpływów została uznana za wystarczającą. Tego jakościowego dowodzenia poszukiwałem jako faktycznego potwierdzenia postawionej tezy.

Jeszcze w rozdziale pierwszym Doktorantka zarysowuje plan badań, co również służy przejrzystości pracy, gdyż podrozdział ten wyraźnie definiował w którym kierunku rozwijały się badania i jakie decydowały o formalnym dowodzeniu postawionych tez. Badania wstępne służyły definiowaniu kryteriów dla danych wejściowych do badań zasadniczych i selekcji zjawisk sejsmicznych opracowywanych w sposób szczegółowy. W tej części ograniczono od razu zakres magnitudy wstrząsów poddawanych analizie do $M > 3,0$ z uwagi na możliwość generowania przemieszczeń okołowstrząsowych o wartościach dobrze widocznych na obrazowaniach InSAR. Bardziej szczegółową charakterystykę wstrząsów wyselekcjonowanych do badań podano w rozdziale 4, gdzie analizie poddano pełną charakterystykę warunków geologicznych i górniczych oraz ich parametry sejsmiczne. Sama integracja obu typów danych została schematycznie pokazana w rozdziale pierwszym z wyróżnieniem obszarów, w których jej dokonywano.

Rozdziały 2 i 3 są przeglądem literatury i omówieniem podstaw teoretycznych zarówno zjawisk sejsmicznych (rozd. 2), jak i metod przetwarzania radarogramów celem detekcji przemieszczeń wstrząsowych (rozd. 3). W obu rozdziałach niezwykle szczegółowo omówiono istotne elementy wiedzy zarówno z zakresu sejsmologii, jak i interferometrii radarowej. Rozdziały te zostały wykorzystane w zasadniczej części badawczej pracy jako baza metodologiczna wykorzystanych technik badawczych. Ten fakt broni aż tak obszerną część teoretyczną (41 stron), która w pracach badawczych o dużym stopniu zaawansowania specjalistycznego z reguły występuje w znacznie skromniejszym wymiarze i nie zawiera absolutnych podstaw wiedzy z poruszanej dziedziny.

W rozdziale 4 dokonano selekcji zjawisk sejsmicznych o charakterze antropogenicznym do dalszych analiz. Wykorzystując opracowane wcześniej kryteria selekcji, w oparciu o bazę danych HiQuake wybrano 6 wstrząsów indukowanych, które wystąpiły po 2015 r i dla których istniały dobre jakościowo obrazowania radarowe. W rozdziale tym omówiono również każde z wyselekcjonowanych zjawisk pod kątem geologiczno-sejsmologicznym.

Na stronie 77 rozpoczyna się zasadnicza część metodologiczno-badawcza pracy. W rozdziale 5 omówiona została metodyka badań. Bardzo skrupulatnie przedstawiono zarówno

stosowane do obróbki danych satelitarnych metody znane w badaniach dotyczących interferometrii radarowej, w odniesieniu do przygotowania danych, procesingu różnicowego oraz krótkich baz, a także wprowadzone korekty ze względu na redukcję wpływu opóźnienia troposferycznego. Ciekawym novum wprowadzonym przy badaniach przemieszczeń powstrząsowych jest wdrożona przez Doktorantkę metoda gradientu fazy zastosowana celem identyfikacji nieciągłości w rejonie stref uskokowych. Metoda ta jest znana literaturowo i często stosowana na terenach bez nadkładu i pokrycia roślinnego do identyfikacji uskoku po trzęsieniach ziemi, zapadlisk i osuwisk. W badaniach przemieszczeń powstrząsowych stosunkowo jest jednak rzadko stosowana ze względu na niezbędną w takich przypadkach wysoką koherencję.

- Tutaj chciałbym zadać pytanie, dlaczego do filtracji interferogramów różnicowych, po uśrednieniu użyto filtru górnoprzepustowego Gaussa o długości 800m? Nie wyjaśniono tego założenia w treści rozprawy.

W oparciu o dane dotyczące pola przemieszczeń na powierzchni określonego przez processing InSAR, wyznaczono na drodze zagadnienia odwrotnego parametry źródła każdego z analizowanych wstrząsów. Zastosowany model Okady zgodnie z literaturą najlepiej odpowiada istocie powstawania wstrząsów indukowanych z przemieszczeniem w płaszczyźnie uskokowej. Doktorantka zdefiniowała bardzo złożoną metodykę inwersji źródła wstrząsu, proponując przeprowadzenie tej procedury w oparciu o dwie niezależne procedury obliczeniowe z dodatkowym wykorzystaniem elementów probabilistyki bayesowskiej. Przyczyną przyjęcia takiej metodyki była chęć porównania wpływu generalizacji modelu skorupy ziemskiej na zmienność parametrów geometrycznych płaszczyzny uskokowej. Dalej chodziło o stwierdzenie który z parametrów cechuje największa zmienność i niepewność wyznaczenia dla poszczególnych analizowanych wstrząsów. Takie podejście metodologiczne nieco skomplikowało cały proces, dało jednak znacznie szersze pole badaniom w sensie lepszego poznania istoty analizowanych zjawisk sejsmicznych w kontekście ich identyfikacji na bazie przemieszczeń powierzchni. W moim przekonaniu wpłynęło to znacząco na wartość oraz oryginalność zaprezentowanych badań.

2. Ocena merytoryczna i formalna

Z formalnego punktu widzenia praca jest bardzo poprawna. Rozumowanie zostało poprowadzone niezwykle czytelnie, a struktura pracy przemyślana, dobrze wspiera rozwijanie opisu badań i wnioskowania. Redakcja tekstu jest bardzo staranna i nie budzi zastrzeżeń, nie zauważono błędów, czy niestarannych opisów bądź oznaczeń rysunków. Wszystko jest czytelne i poprawnie sformatowane. Nie zauważono niekonsekwencji w opisach rysunków, czy też powołaniach na źródła. Źródła bibliograficzne zostały w pełni wykorzystane poprzez nawiązania w tekście.

Z punktu widzenia pracy monograficznej przedstawiona dysertacja zasługuje na wysoką ocenę, zawiera bowiem oprócz części właściwej – badawczej całą masę opisów teoretycznych, z których czytelnik mógłby się sporo nauczyć. Zwłaszcza, że wiedza przytoczona w pracy jest nie tylko podstawowa dla poruszanej tematyki, co przede wszystkim została uzupełniona

i rozszerzona o najnowsze wyniki badań. Te wyniki, poruszające przecież nierzadko dokładnie tę samą tematykę zostały zacytowane poprzez źródła literaturowe. Gdyby patrzeć na tę pracę z punktu widzenia czysto badawczego, to uderzające jest, że właściwe części badawcze, czyli opis źródeł danych, metodyka, same badania i dyskusja oraz wnioski zajmują około 1/2 manuskryptu (str. 58-138). Gdyby zatem nie to wspomniane powyżej zacięcie monograficzne Autorki, mielibyśmy pracę, która mieściłaby się w 100 stronach. Po głębszej analizie doszedłem jednak do wniosku, że byłoby to ze szkodą dla tej dysertacji. Mocna podbudowa teoretyczna, od podstaw wiedzy aż do odwołań do najnowszych źródeł badawczych lepiej wprowadza w zasadniczą część badawczą. Metodologia jest dzięki temu czytelna, a założenia badawcze lepiej uzasadnione.

Metoda inwersji źródła wstrząsu zaproponowana w pracy jest podejściem kompleksowym, bazującym na przemieszczeniach krótkookresowych identyfikowanych poprzez analizę InSAR. Parametry źródeł wytypowanych wstrząsów były identyfikowane z wykorzystaniem dwóch typów oprogramowania: Geodetic Bayesian inversion Software oraz Grond. W rozdziale 5.2 podano ponadto sposób implementacji tych programów w badaniach Autorki.

- Z tekstu pracy nie wynika, czy implementacja GBIS oraz Grond jest własnym, autorskim dziełem, czy też wykorzystano gotowe rozwiązania istniejące w środowisku MATLAB i Python?

Badania ruchów krótkookresowych, długookresowych oraz nieciągłych wykonane kompleksowo, dobrze tłumaczą przebieg poszczególnych zjawisk sejsmicznych, wskazując na istotny element przemieszczeń poziomych związanych z płaszczyznami uskokowymi i bardzo interesujące zjawisko wypiętrzeń w strefie epicentrum. Autorka wykazała dużą biegłość w posługiwaniu się metodami analizy i dojrzałością badawczą w tej części pracy.

Z faktyczną integracją wyników interpretacji radarogramów z wynikami pomiarów sejsmicznych mamy do czynienia w rozdziale 6.2, poświęconemu analizie wyników inwersji źródła wstrząsów. Każde z analizowanych zjawisk sejsmicznych poddane zostało dwustopniowej procedurze identyfikacji parametrów. Czytelnie i wyczerpująco przedstawiono wyniki ilościowe, wraz z interpretacją statystyczną uzyskanych wyników. Ilustracja graficzna przeprowadzonych procedur obliczeniowych i uzyskanych wyników jest bardzo przekonująca i dojrzała. Autorka wsparła swoje wnioskowanie porównaniami z dostępnymi wynikami innych badaczy.

3. Uwagi szczegółowe

Analiza wyników korekcji troposferycznej GECO zilustrowana została na rysunkach 6.1-6.6, co daje obraz wpływu korekcji na przemieszczenia krótkookresowe, lecz nie do końca pozwala zorientować się jakie wartości korekcji uzyskano dla poszczególnych wstrząsów (mogłyby to być np. średnie względne). Rysunek 6.7 zestawia wyniki analizy ilościowej w postaci histogramów. Dyskusja wyników korekcji po analizie statystycznej jest stosunkowo skromna i nie do końca odnosi się do bardzo różnych rozkładów na poszczególnych histogramach. Trochę brak również szerszego odniesienia się do wartości parametrów statystycznych uzyskanych dla różnych wstrząsów.

W analizie przemieszczeń długookresowych uwagę przyciąga rysunek 6.17 pokazujący różne fazy zjawiska przemieszczającego się terenu w zależności od czasu zaistnienia wstrząsu. W każdym przypadku można zaobserwować wypiętrzenia powstrząsowe. O ile samo zjawisko wypiętrzeń zostało uzasadnione wzrostem naprężeń wskutek zatłaczania pod ciśnieniem wody w porowate zbiorniki eksploatowanych surowców gazowych (szczelinowanie w Chinach), o tyle brakło nieco bardziej rozszerzonej interpretacji tego faktu w przypadku zjawisk zachodzących np. w rejonie kamieniołomu we Francji czy rejonu eksploatacji wody i porównania uzyskanych wyników z innymi pracami naukowymi.

- Chciałbym zapytać, czy Autorka spotkała się z takimi pracami, w których analizowano by podobne sekwencje przemieszczeń okołowstrząsowych w dłuższych okresach i ewentualnie jakie były wyniki, czy również wypiętrzenia po wstrząsie?

4. Ocena końcowa rozprawy i konkluzja

Po dogłębnym zapoznaniu się z pracą doktorską Pani mgr inż. Natalii Bugajskiej-Jędraszek pt. „Integracja metod satelitarnej interferometrii radarowej z geofizycznym opisem zjawiska wstrząsów indukowanych” mogę stwierdzić, że dobrze przeanalizowała ona przedmiot swoich badań – wstrząsy sejsmiczne natury antropogenicznej i wykazała ogólną wiedzę w zakresie badań przemieszczeniowych skutków tych wstrząsów. W pracy zdefiniowała zagadnienie badawcze z zakresu dyscypliny inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka, postawiła hipotezę badawczą, samodzielnie zdefiniowała cele badawcze. Badania obejmujące analizy interferogramów celem identyfikacji przemieszczeń krótko i długookresowych oraz nieciągłości, jak również rozwiązanie zagadnienia inwersyjnego celem identyfikacji parametrów źródła wstrząsów były wykonane wszechstronnie, z wykorzystaniem nowoczesnego aparatu naukowego. Dyskusja wyników oraz wnioski zawarte w pracy dowiodły realizacji postawionych celów badawczych. Tym samym Autorka wykazała oryginalność i samodzielność w rozwiązaniu problemu badawczego i dowiodła, że teza postawiona na wstępie była uzasadniona.

W podsumowaniu stwierdzam, że Doktorantka:

- wykazuje bardzo dobry poziom wiedzy w zakresie dyscypliny badawczej, ze szczególnym uwzględnieniem teledetekcji satelitarnej, górnictwa i sejsmologii,
- posiada bardzo gruntowne przygotowanie naukowe do samodzielnego prowadzenia badań, czego dowiodła w recenzowanej rozprawie poprzez opracowanie i wdrożenie nowatorskich metod integracji oraz analizy danych InSAR z danymi geofizycznymi, jak również stosując zaawansowane metody analizy statystycznej,
- jednoznacznie zrealizowała cele rozprawy, która stanowi oryginalne i samodzielne dzieło badawcze, posiada istotne walory naukowe i stanowi istotny wkład w rozwój dyscypliny naukowej,
- biorąc pod uwagę kompleksowe, oryginalne i dojrzałe rozwiązanie przez Doktorantkę problematyki integracji danych satelitarnych i geofizycznych w procesie inwersji celem identyfikacji parametrów wstrząsów sejsmicznych, z pogłębioną analizą statystyczną, wnioskuję o rozważenie wyróżnienia rozprawy doktorskiej.

Wobec powyższego stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Natalii Bugajskiej-Jędraszek spełnia wymagania Ustawy z dnia 20 lipca 2018 Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2024 poz. 1571). Na tej podstawie wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynierii Środowiska, Górnictwa i Energetyki Politechniki Wrocławskiej o dopuszczenie mgr inż. Natalii Bugajskiej-Jędraszek do publicznej obrony rozprawy.