

Prof. dr hab. inż. Józef Dubiński
Czł. Koresp. PAN
Główny Instytut Górnictwa
Pl. Gwarków 1, Katowice

Katowice, 15.09.2017r.

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgr inż. Rafała CZARNEGO
pt. „Ocena budowy i właściwości sprężystych górotworu metodą interferometrii
sejsmicznej”

Rozprawa została wykonana w Instytucie Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią
Polskiej Akademii Nauk w Krakowie
pod kierunkiem Pana dr hab. inż. Zenona Pileckiego, prof. IGSMiE PAN

1. WPROWADZENIE

Recenzję rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Rafała Czarnego pt. „*Ocena budowy właściwości sprężystych górotworu metodą interferometrii sejsmicznej*” opracowałem na podstawie pisma Dyrektora Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk w Krakowie dr hab. inż. Krzysztofa Galosa z dnia 11.07.2017r., o znakach AO-520-3/2014. Stwierdzam, że przedmiotowa rozprawa pod względem poruszanej tematyki i swojej treści mieści się w dziedzinie nauk technicznych i w obszarze dyscypliny naukowej **górnictwo i geologia inżynierska**.

Wymieniony w tytule rozprawy doktorskiej problem badawczy dotyczy wykorzystania rozwijającej się w ostatnich latach, a więc można powiedzieć, że nowej metody geofizycznej o nazwie interferometria sejsmiczna (IS). Wykorzystanie to łączy się z oryginalną aplikacją tej metody do rozwiązania jednego ze specyficznych problemów górniczych związanych z oddziaływaniem podziemnej eksploatacji górniczej na ośrodek skalny (górotwór). W trakcie realizacji tego zadania Doktorant rozwija szereg nowych zagadnień metodologicznych, które mogą być wykorzystywane w zastosowaniu metody interferometrii sejsmicznej do innych zadań geoinżynierskich.

Rozprawa doktorska zgodnie z wymogami nowej ustawy z dnia 14 marca 2003 roku „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” (Dz. U. 2003.65.595 z dnia 16 kwietnia 2003r.z późn. zm.) powinna być oryginalnym rozwiązaniem przez Doktoranta określonego zagadnienia naukowego oraz wykazywać jego ogólną wiedzę teoretyczną w danej dyscyplinie naukowej i umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Stąd moim zadaniem jako recenzenta będzie dokonanie analizy przedmiotowej rozprawy pod kątem oryginalności przedstawionego w niej zagadnienia naukowego, a także ustalenie tych jej elementów, które potwierdzają wiedzę teoretyczną i inne istotne umiejętności Doktoranta.

2. ANALIZA I OCENA ROZPRAWY

Przedmiotowa rozprawa doktorska posiada pewne cechy opracowania naukowego, w którym Autor podjął się wykazania przydatności metody interferometrii sejsmicznej do rozwiązania konkretnego zadania geoinżynierskiego, to jest do oceny budowy przypowierzchniowej strefy górotworu oraz zmian jej właściwości pod wpływem podziemnej eksploatacji górniczej. Używając wyrażenia „przypowierzchniowej” chodzi tutaj o wielkości kilkuset metrowe (od 200m do 500m). Oryginalność zastosowanej metody interferometrii sejsmicznej polega na wykorzystaniu niskoczęstotliwościowego szumu sejsmicznego. Należy podkreślić, że interferometria sejsmiczna jest metodą, którą można określić jako nową, gdyż jej praktyczne zastosowania w różnych aspektach datują się na początek lat 2000. Potwierdza to chociażby spis literatury przedstawiony przez Doktoranta.

Treści rozprawy zawarte są w siedmiu rozdziałach i obejmują 95 stron tekstu. Ponadto rozprawę uzupełniają wspomniany już spis 126 pozycji literaturowych, w zdecydowanej większości (101 pozycji) zagranicznych i pochodzących z ostatnich lat. Doktorant jest 1 raz samodzielnym autorem publikacji, 5 krotnie współautorem. Kolejnym uzupełnieniem rozprawy są 2-stronicowe streszczenia w języku polskim i angielskim. Praca zawiera w tym wstęp i podsumowanie, oraz spis literatury obejmujący 181 pozycji, z czego ich większość pochodzi z okresu ostatnich 15 lat, a 62 to pozycje angielskojęzyczne. W tekście rozprawy znajduje się 67 rysunków oraz autor powołuje się na 3 załączniki (zał. A. - Zbiory korelogramów dla wszystkich wirtualnych źródeł z I rejonu badań; zał. B. - Tabela lokalizacji promieni sejsmicznych z II rejonu badań; zał. C. - Wyniki tomografii sejsmicznej dla częstotliwości centralnych z zakresu od 0,19 do 0,40 Hz.). Należy podkreślić, że układ pracy jest logiczny i tworzy spójną całość. Praca jest edytowana bardzo starannie, szczególnie w części graficznej i napisana jasnym i poprawnym językiem.

W 1-szym rozdziale stanowiącym rodzaj wprowadzenia Doktorant na stronie 6 charakteryzuje zwięźle zawartość merytoryczną każdego z siedmiu rozdziałów. Uważam, że w sensie ogólnym jest to wystarczające. Analiza poszczególnych rozdziałów i całości rozprawy wskazuje, że za oryginalne i autorskie należy uznać rozdziały 5 i 6. Ponadto, za ważny uważam także rozdział 3, w którym Autor dokonuje wnikliwej analizy stanu wiedzy dotyczącej przedmiotowego zagadnienia, a więc metody interferometrii sejsmicznej. Chciałbym podkreślić krytyczną analizę fundamentalnych publikacji literaturowych w tym obszarze, co z pewnością skutkuje oryginalnością w zaprojektowaniu metodyki badań własnych przez Doktoranta.

Przechodząc do oceny pierwszego z wymienionych rozdziałów autorskich, to jest rozdziału 5, który pod względem wartości naukowej uważam za najważniejszy i stanowiący istotę przedmiotowej rozprawy doktorskiej. Została w nim przedstawiona metodyka rozwiązania postawionego zadania badawczego obejmująca wszystkie zasadnicze etapy procesów: pomiarowego, przetwarzania danych, interpretacji i wizualizacji wyników. Na

szczególne podkreślenie zasługuje tutaj schemat blokowy metodologii postępowania z zastosowaniem interferometrii sejsmicznej, przedstawiony na rys. 5.1, oraz dokładny opis procedur stosowanych w każdym z powyższych etapów. Z kolei rozdział 6 zawiera interesujące omówienie własnych badań Doktoranta przeprowadzonych na dwóch wyraźnie się różniących poligonach pomiarowych. Pierwszy z nich był zlokalizowany na terenie KWK „Borynia – Zofiówka – Jastrzębie” na obszarze ruchu górniczego „Jastrzębie”, a przedmiotem badań był górotwór w rejonie filara ochronnego pomiędzy dawnymi kopalniami „Jastrzębie” i „Moszczenica”. Profil pomiarowy zlokalizowany na powierzchni posiadał długość ok. 450m i zainstalowano na nim 11 czujników pomiarowych (sejsmometry szerokopasmowe Guralp CMG-6td rejestrujące drgania niskoczęstotliwościowe już od 1/30 Hz). Za wartościowy uznaję wynik końcowy procesu interpretacyjnego przedstawiony na rys. 6.12. w postaci rozkładu pola prędkości fali poprzecznej wzdłuż profilu pomiarowego, w korelacji z warunkami geologicznymi górniczymi, krzywą osiadania powierzchni terenu i sejsmicznością w postaci zaznaczonych ognisk wstrząsów o energii sejsmicznej $E \geq 10^5 J$. Widoczne jest wyraźne zróżnicowanie prędkości fali poprzecznej i jej wzrost wraz z głębokością rozpoznania, które sięga tutaj do około 220m. Można na podstawie powyższego zróżnicowania wydzielić pewne granice stratygraficzne w budowie górotworu i przypisać je różnym formacjom geologicznym (czwartorzęd, miocen, górną karbon).

Drugi rejon badawczy, jak już wspominałem, dotyczy zupełnie odmiennego środowiska geologicznego i jest położony w Zakładzie Górniczym „Rudna” należącym do KGHM Polska Miedź S.A. Przedmiotem działalności górniczej była tutaj eksploatacja złoża rud miedzi i innych metali towarzyszących, w stosunkowo bliskim przedpolu osadnika „Żelazny Most”. Zastosowana metodyka pomiarowa w tym rejonie badań różni się od tej, którą Doktorant testował w rejonie I. Odmienny jest tutaj schemat pomiarowy, gdzie 11 sejsmometrów zainstalowano na stanowiskach kopalnianej sieci sejsmometrycznej kopalni „Rudna”, a więc w różnych odległościach pomiędzy poszczególnymi parami sejsmometrów (od 1,5 do 12 km). Wyraźnie dłuższy był też czas prowadzenia przedmiotowych pomiarów (ponad 3 miesiące – tj. 2552 godz.). Doktorant uzyskał bogaty materiał pomiarowy, który w wyniku przetwarzania i interpretacji umożliwił uzyskanie finalnych rozkładów prędkości fali poprzecznej przedstawionych na pięciu kolejnych rysunkach od rys.6.31. do 6.35. Bez wątpienia pozwalają one na zróżnicowanie budowy geologicznej górotworu w oparciu wartości kryterialne parametru prędkości fali poprzecznej, co wyraźnie widać na rys. 6.35. W przypadku badań w kopalni „Rudna” uzyskano, co należy podkreślić, wyraźnie większy zasięg głębokościowy informacji do około 500m.

Uzyskane przez Doktoranta wyniki badań polowych oceniam bardzo wysoko, mając świadomość trudności w zakresie nie tylko samych pomiarów, ale objętości i czasochłonności obróbki uzyskanych danych pomiarowych w procesach ich przetwarzania i interpretacji.

Tym niemniej, po szczegółowej analizie poszczególnych rozdziałów rozprawy formułuję kilka uwag w odniesieniu do jej treści:

- W tytule rozprawy „Ocena budowy i właściwości sprężystych górotworu metodą interferometrii sejsmicznej” jest mowa o budowie i o właściwościach sprężystych. Jeśli chodzi o budowę to rzeczywiście wynikowe rozkłady prędkości fali porzeczej, omówione powyżej, pozwalają na wydzielenie stratygraficznych cech tej budowy i jej poszczególnych formacji geologicznych. Natomiast Doktorant nigdzie nie wspomina o właściwościach sprężystych górotworu, chociażby stwierdzeniem, że parametr prędkości fali S może być takim miernikiem. Mówi się o strefach osłabienia i wzmocnienia górotworu, ale to wymaga wyjaśnienia. Proszę o odpowiedź w powyższej kwestii.
- Problem dotyczy bardziej wnikliwej analizy i dyskusji błędów, uwzględniającej wpływ różnych etapów procesu pomiarowego, przetwarzania danych i interpretacji na wynik końcowy. Doktorant w podrozdziałach 6.2.4. i 6.3.4. podaje co prawda wartość pewnych miar błędów, ale to nie wyczerpuje problemu w tej materii. Również proszę o wyjaśnienie tej kwestii w czasie publicznej dyskusji nad rozprawą.
- Wyniki pomiarowe na obydwóch poligonach pomiarowych, a szczególnie na I-szym, przedstawiają sytuację, którą można określić jako statyczną. Oznacza to, że pomiary metodą interferometrii sejsmicznej odzwierciedlają układ deformacyjno-naprężeniowy wywołany przez dokonaną eksploatację. Natomiast wnioskowanie o zmianach tego układu zachodzących w strukturze badanego fragmentu górotworu musiałoby bazować na rejestrowaniu anomalii, w tym przypadku przedmiotowej metody parametru prędkości wynikowej fali porzeczej. Tylko wówczas metoda interferometrii sejsmicznej będzie mogła oceniać dynamikę zmian procesów deformacyjno-naprężeniowych następujących w górotworze w wyniku oddziaływania eksploatacji górniczej. Proszę o komentarz Doktoranta w tej kwestii w trakcie obrony rozprawy.

3. OCENA SPEŁNIENIA WYMOGÓW STAWIANYM PRACOM DOKTORSKIM

3.1. Zasadność wyboru tematu rozprawy

Od wielu już lat problem oddziaływania podziemnej eksploatacji złóż na powierzchnię terenu jest przedmiotem różnych badań i analiz, zarówno w polskim jak i światowym górnictwie. W naszym kraju dotyczy to kopalń węgla kamiennego (w GZW i LZW) oraz kopalń rud miedzi (LGOM). Dominującą rolę odgrywają tutaj metody geodezyjne koncentrujące się jednak głównie na deformacjach powierzchni terenu (osiadania, przemieszczenia poziome). Geofizyka górnicza dzięki swoim specyficznym cechom staje się w tym obszarze niezwykle użytecznym narzędziem pomiarowym. Obserwując jej rozwój nie sposób nie zauważyć powstawania nowych rozwiązań w zakresie tych metod, które poszerzają dotychczasowe możliwości badawcze. Do nich, bez wątpienia, należy metoda interferometrii sejsmicznej, będąca przedmiotem niniejszej rozprawy doktorskiej. Notuje ona swój rozwój i pierwsze zastosowania w praktyce od niedawna – pojawiają się one w obecnym wieku, w latach 2000.

Zatem należy wyrazić uznanie w stosunku do Doktoranta – autora przedmiotowej rozprawy – i jego Promotora, że podjęli wyzwanie rozwoju tej metody w Polsce. Znalezione zostały obszary potencjalnych zastosowań tej metody w celach geoinżynierskich, a Doktorant mgr inż. Rafał Czarny przeprowadził na dwóch poligonach pomiarowych różniących się warunkami geologicznymi i górnictwami interesujące badania z wykorzystaniem metody interferometrii sejsmicznej. Metoda wnosi nowe możliwości poznawcze, które mogą mieć znaczenie użytkowe. Godne podkreślenia jest to, że Doktorant wyraźnie udoskonalił tą metodę, przede wszystkim poszerzając i testując zakres procedur rejestracji, przetwarzania i interpretacji danych.

W świetle powyższych stwierdzeń uważam, że temat rozprawy doktorskiej został trafnie wybrany i wytycza on nowy kierunek dla praktycznego stosowania metody interferometrii sejsmicznej w szeroko rozumianej problematyce geoinżynierskiej.

3.2. Ocena tezy rozprawy

Doktorant sformułował tezę składającą się z dwóch części. Należy zauważyć, że pierwsza z nich jest w zasadzie tożsama z celem rozprawy podanym na początku rozdziału 2. Recenzent uważa, że w tym przypadku ograniczenie się tylko do podania celu rozprawy byłoby wystarczające.

Natomiast druga część tezy dotyczy wykazania, że rozkład prędkości fali poprzecznej uzyskiwany jako wynik finalny w metodzie interferometrii sejsmicznej pozwala identyfikować strefy anomalne w strukturze górotworu związane z jej osłabieniem lub wzmocnieniem, wywołane przez procesy deformacyjno-naprężeniowe związane z eksploatacją górnictwami. Relacje te są znane w geofizyce górnictwami, natomiast tutaj ta część tezy wskazuje, że umożliwia to także metoda interferometrii sejsmicznej. Zatem, można przyjąć, że teza ta jest prawidłowa.

Tym niemniej zwracam uwagę, aby Doktorant na publicznej obronie rozprawy wyraźnie w swoim wystąpieniu pokazał prawdziwość tej drugiej części tezy.

3.3. Zagadnienia naukowe samodzielnie rozwiązane przez Doktoranta

Dostrzegam w przedmiotowej rozprawie kilka istotnych i moim zdaniem oryginalnych rozwiązań, których autorstwo należy przypisać Doktorantowi.

a/. Podstawowym osiągnięciem jest opracowanie oryginalnej metodyki estymacji pola prędkości fali poprzecznej dla potrzeb analizy budowy i właściwości górotworu naruszonego podziemną eksploatacją z wykorzystaniem metody interferometrii sejsmicznej opartej na rejestracji niskoczęstotliwościowego szumu sejsmicznego. W metodyce tej umiejętnie zostały zaadoptowane procedury przetwarzania i interpretacji danych sejsmicznych znane w sejsmologii, sejsmice poszukiwawczej oraz sejsmice inżynierskiej. Metodykę tą dobrze ilustruje schemat blokowego na rys. 5.1. Przedstawiony algorytm został również opracowany przez Doktoranta w języku programowania Matlab. Dużym osiągnięciem

merytorycznym związanym z rozprawą jest dostosowanie oprogramowania do przetwarzania dużych, kilkuset gigabajtowych pakietów danych sejsmicznych.

b/. Istotnym osiągnięciem Doktoranta jest również praktyczne zweryfikowanie opracowanej metodyki badań w górotworze naruszonym podziemną eksploatacją pokładów węgla kamiennego oraz eksploatacją złoża rudy miedzi. Badania zostały przeprowadzone na obszarach górniczych KWK „Borynia-Zofiówka-Jastrzębie” Ruch Jastrzębie oraz KGHM ZG Rudna. W przypadku KWK „Borynia-Zofiówka-Jastrzębie” Ruch Jastrzębie Doktorant opracował model 2D pola prędkości fali poprzecznej do głębokości ok. 220 m, natomiast w przypadku KGHM ZG Rudna model 3D do głębokości ok. 500 m. Opracowane modele 2D i 3D pola prędkości fali poprzecznej korelowały się z danymi geologiczno-górnictwami w tym: głównymi granicami stratygraficznymi, strefami osiadania powierzchni terenu oraz strefami występowania sejsmiczności indukowanej. Doktorant zaobserwował wyraźne strefy osłabienia w górotworze, w szczególności w rejonie dokonanej eksploatacji. Zauważył również, że prędkość fali poprzecznej maleje w strefach rozwoju procesu osiadania, a zwłaszcza nad bieżącą eksploatacją. Dodatkowo, w warunkach górotworu KGHM ZG Rudna, w strefie przecięcia się większych uskoków występowały duże gradienty prędkości fali poprzecznej, którym towarzyszyła duża sejsmiczność. Uzyskane wyniki mogą wskazywać na przydatność zastosowanego rozwiązania w monitorowaniu procesów deformacyjnych górotworu.

c/. Z analizy treści rozprawy doktorskiej wynika, że Doktorant opracował własne schematy pomiarowe oraz samodzielnie wykonał specyficzne przetwarzanie i interpretację danych sejsmicznych. Rejestracja danych sejsmicznych polegała na specjalnym zastosowaniu niskoczęstotliwościowych sejsmometrów typu Guralp, przystosowanych do ciągłego zapisu pola szumu sejsmicznego. Istotnym wymogiem była synchronizacja rejestracji grupy 11 czujników, którą uzyskano za pomocą zegara GPS. W zakresie przetwarzania i interpretacji Doktorant wykazał się znajomością unikalnych procedur sejsmicznych związanych z usuwaniem silnych zjawisk sejsmicznych metodą STA/LTA, wybielaniem spektralnym, rotacją komponentów, lub analizą kształtowania się wiązki sejsmicznego pola falowego. Istotnym wyzwaniem interpretacyjnym była inwersja krzywych dyspersji na model pola prędkości fali poprzecznej metodą „sąsiadów” oraz gradientów. Do trudniejszych elementów interpretacji należała również estymacja krzywych dyspersji prędkości grupowej metodą FTAN.

3.4. Ocena poprawności przeprowadzonych analiz, uzyskanych wyników i wniosków

W rozwiązaniu sformułowanych celów badawczych i postawionych tez rozprawy Doktorant musiał się wykazać nie tylko prawidłowym zrozumieniem fizycznej strony złożonych zjawisk geomechanicznych oddziałujących na strukturę górotworu, ale także dobrą znajomością i biegłością w posługiwaniu się procedurami przetwarzania specyficznych w tym przypadku sygnałów sejsmicznych i innych procedur prowadzących do uzyskania

finalnych rozkładów prędkości fali poprzecznej. Metodyka badawcza ujęta na schemacie blokowym (rys.5.1.) zasługuje tutaj na uwagę.

Uważam, że wszystkie operacje w tym zakresie zostały przeprowadzone prawidłowo i rzetelnie. Moja uwaga w rozdziale 2 recenzji została sformułowana w stosunku do bardziej wnikliwej analizy błędów. Uzyskane wyniki są poprawne i interesujące pod względem wartości poznawczej i użytecznej. Wnioski poprawne, wynikają z treści rozprawy, chociaż mogłyby być bardziej rozwinięte.

3.5. Ocena znajomości przedmiotu zagadnienia przez Doktoranta

W rozwiązaniu postawionego zadania badawczego, jakim była ocena przydatności metody interferometrii sejsmicznej wykorzystującej niskoczęstotliwościowy szum sejsmiczny do rozwiązywania konkretnego problemu geoinżynierskiego (tutaj ocena budowy geologicznej i oddziaływania eksploatacji górniczej na strukturę górotworu), Doktorant musiał się wykazać dobrą znajomością problematyki geologiczno-górniczej i geofizycznej, szczególnie w zakresie szeroko rozumianych metod sejsmicznych. Dotyczy to przede wszystkim zaawansowanego przetwarzania wyników pomiarowych, w sferze szeroko rozumianych metod sejsmicznych. W podrozdziale 3.3. wyraźnie podkreśliłem jego biegłość w zakresie zaawansowanego przetwarzania specyficznych sygnałów sejsmicznych.

W świetle tych faktów, a także dotychczasowych publikacji Doktoranta związanych z tematyką rozprawy doktorskiej oceniam pozytywnie Jego znajomość przedmiotu zagadnienia.

4. WNIOSEK KOŃCOWY

Na podstawie przedstawionej mi do recenzji rozprawy doktorskiej pt. „Ocena budowy i własności sprężystych górotworu metodą interferometrii sejsmicznej” autorstwa mgr inż. Rafała Czarnego stwierdzam, że Doktorant :

- wykazuje odpowiedni poziom wiedzy w zakresie dyscypliny górnictwo i geologia inżynierska i specjalności geofizyka górnicza,
- posiada bardzo dobre przygotowanie naukowe do rozwiązywania nowych problemów geoinżynierskich z wykorzystaniem metod geofizycznych, czego dowiódł w przedmiotowej rozprawie doktorskiej;
- potwierdził umiejętność samodzielnego formułowania problemów badawczych oraz organizacji i realizacji programu działań pozwalających na ich efektywne rozwiązania wraz z analizą i prezentacją wyników;
- zrealizował założone cele rozprawy, która posiada istotne walory naukowe i praktyczne.

Tak więc, rozprawa doktorska autorstwa mgr inż. Rafała Czarnego spełnia wymagania Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003r. Na tej podstawie wnioskuję do Rady Naukowej Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk w Krakowie o dopuszczenie Pana mgr inż. **Rafała Czarnego** do publicznej obrony przedmiotowej rozprawy. Doktorskiej.

