

Warszawa, 5.12.2016

dr hab. Mariusz Majdański, prof. PAN
Instytut Geofizyki PAN
ul. Księcia Janusza 64
01-452 Warszawa
Email: mmajd@igf.edu.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej

Pana mgr inż. Rafała Matuły zatytułowanej

„Konstrukcja sejsmicznego modelu utworów polodowcowych na bazie kompleksowych pomiarów sejsmiki wysokiej rozdzielczości w płn.-zach. Części Niżu Polskiego”

Recenzowana rozprawa doktorska wykonana została pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Ryszarda Ślusarczyka na Wydziale Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, na podstawie zlecenia Dziekana tegoż Wydziału prof. dr hab. inż. Jacka Matyszkiewicza z dnia 11.10.2016 roku (WGGiOŚ 424/2016).

Problem badawczy

Głównym celem pracy jest opracowanie metodyki optymalnego wykorzystania połączonej analizy różnych typów sejsmiki inżynierskiej do rozpoznania niezwykle trudnej do zobrazowania struktury jakim są utwory postglacjalne. Ideą pracy jest przedstawienie teoretyczne poszczególnych metod wraz z ich możliwościami oraz ograniczeniami, a następnie przykład aplikacji tych metod do danych pomiarowych. Struktura pracy pokazuje jednocześnie optymalny kierunek przepływu wyników pomiędzy metodami prowadzący do końcowej interpretacji badanej struktury. Układ pracy jest jednocześnie przykładem jak projekt badawczy tego typu powinien być zaplanowany i zrealizowany.

Z dużym zainteresowaniem podjąłem się recenzji tej pracy ponieważ jest ona bardzo aktualna. Pomimo szerokiego stosowania technik sejsmiki w geoinżynierii od ponad 50 lat nadal rozwijane są nowe metody analiz jak na przykład techniki MASW opracowane w 1999, interferometria typu *ambient-noise* czy wykorzystanie tzw. *land-streamerów*. Doktorant odnosi się do większości z tych nowych technik co jest silną stroną pracy.

Struktura rozprawy

Praca jest niezwykle obszerna, zawiera 241 stron, 130 rysunków oraz bardzo duży spis literatury zajmujący 30 stron. Podzielona jest podzielona 9 rozdziałów o przemyślanej i czytelnej strukturze. Pomimo zdarzających się literówek praca napisana jest jasnym, zrozumiałym językiem. Czytanie pracy utrudnione jest jedynie przez niedbałe łamanie tekstu,

gdzie pojedyncze linie tekstu pojawiają się nad lub pod obrazkami. Nie wpływa to jednak na odbiór merytoryczny. Praca jest bogato ilustrowana. W większości są to dobrze przemyślane, czytelne i uzasadnione ilustracje. Szczególnie ciekawe są rysunki ilustrujące zagadnienia metodyczne. Problemem są jedynie wyniki obrazowania sejsmiki refleksyjnej, które w przedstawionej skali są mało czytelne. W sposób znaczący utrudnia to poznanie najważniejszej części pracy, czyli poprawy jakości obrazowania w wyniku łączonej interpretacji różnych metod.

Rozdział 1. Opiniowaną rozprawę otwiera wstęp, w którym Doktorant jasno określa swoje dzieło jako opis przykładowej realizacji projektu. Następnie Doktorant stawia cztery tezy badawcze, upraszczając:

- I) Sejsmika wysokiej rozdzielczości pozwala efektywnie wyznaczyć poprawki statyczne
- II) Dodatkowe informacje o przypowierzchniowym polu prędkości podnosi efektywność estymacji poprawek
- III) Analiza fal powierzchniowych (MASW) może zastąpić płytkie pomiary odwiertowe
- IV) Wstępne badania pilotażowe wspierają projektowanie pomiarów

Zgodnie z ogólnie przyjętą wiedzą w zakresie przetwarzania sejsmiki tezy I, II oraz IV są oczywiste. Po przeczytaniu całości pracy nie do końca rozumiem dlaczego cele szczegółowe zostały określone w ten właśnie sposób. Rozprawa zawiera dowody na znacznie ciekawsze, nowatorskie rozwiązania, które można było ująć w tezach. W powyższym zestawieniu broni się jedynie teza III, która jest zresztą dobrze udowodniona w pracy.

Następnie Doktorant przedstawia lokalizację badań oraz powołuje się na większy projekt sejsmiki prospekcyjnej realizowany przez AGH, którego dane dalej wykorzystuje. W dalszej części Doktorant przedstawia bardzo dokładną analizę literatury dotyczącą badań utworów polodowcowych z wykorzystaniem różnych technik geofizycznych, a następnie przedstawia koncepcję badawczą wyszczególniającą użycie trzech metod sejsmiki przypowierzchniowej: fal powierzchniowych, sejsmiki refrakcyjnej i refleksyjnej.

Rozdział 2 to ponownie bardzo dokładna analiza dostępnych materiałów (map, publikacji) dotyczących budowy obszaru badań. Doktorant nie ogranicza się do określenia aktualnej wiedzy o strukturze, ale przeprowadza również wstępną analizę procesów generujących tę strukturę.

Rozdział 3 zawiera opis prac polowych. Jest to bardzo precyzyjny opis dotyczący możliwości i ograniczeń poszczególnych metod, ze stosownymi referencjami do literatury światowej wraz z opisem urządzeń, geometrii oraz parametrów pomiarowych. Rozdział ten omawia również sposób przeprowadzenia prac pilotażowych oraz omawia uzyskane optymalne parametry akwizycji. Jest to jeden z najbardziej wartościowych części rozprawy. W rozdziale tym brakuje mi jednak opisu kiedy ten projekt był realizowany i jaki był udział doktoranta. Czy w ogóle uczestniczył od w pracach terenowych czy dostał gotowy zbiór danych do obróbki.

Rozdział 4 to opis badań otworowych oraz wielokanałowa analiza fal powierzchniowych. W pierwszym podrozdziale omówiono sposób wykonania oraz wyniki sejsmiki otworowej.

Podrozdział 4.2 bardzo precyzyjnie opisuje zjawisko fal powierzchniowych oraz metodę wielokanałowej interpretacji tych fal wspierając się bogatym przeglądem literatury dotyczących badań geoinżynierskich i przemysłowych. Przy inwersji krzywych dyspersji fal powierzchniowych Doktorant przyjął szereg parametrów, tj. początkowe wartości V_p , V_s , zależności pomiędzy prędkościami, bazując na opublikowanych przykładach użycia techniki MASW do badania osadów lodowcowych. Jest to jedna z możliwości chociaż obliczenia te są tak szybkie że można pokusić się o znacznie szersze analizy warunków początkowych i ich wpływu na wynik końcowy. Dziwi mnie też duże ograniczenie na stałą miąższość warstw. W inwersjach tego typu zazwyczaj jest to jeden z parametrów inwersji.

Rysunek 4.2-2 jest zaczerpnięty z najbardziej znanej pracy Parka i nie jest to opisane, choć praca jest cytowana przez Doktoranta.

Wykorzystanie wyższych modów jest opisane nieprecyzyjnie. Domyślam się, że rozwiązanie to była zaimplementowane w oprogramowanie używane przez doktoranta. Niestety nie zostało opisane w rozprawie.

Rysunek 4.3-6 przedstawia rozdzielczość metody MASW, ale nigdzie nie znalazłem opisu jak zostało to obliczone. Niestety w dalszej części pracy ten ważny wynik nie jest wykorzystany.

Podrozdział 4.4 omawia technikę interferometrii sejsmicznej przedstawiając niejednoznaczne wyniki, które są pominięte w dalszej części rozprawy. Brakuje opisu akwizycji danych pasywnych. Czy były to dane pasywne rejestrowane poza produkcją (tzw. *ambient noise*) czy raczej była to próba interferometrii strzałowej. Jaki był czas pasywnego nasłuchu? W obu przypadkach metoda ta powinna dać poprawny wynik o ile czas nasłuchu był wystarczający. Porzucenie tej analizy uważam za błąd. To jeden z najbardziej nowatorskich aspektów w tej rozprawie i niestety nie jest dokładnie opisany.

Doktorant wprowadza polskie nazewnictwo techniki *ambient noise* jako "szum dookólny", ale nie jestem przekonany czy termin się przyjmie.

Rysunek 4.5-5 przedstawia bardzo dokładną wizualizację strefy obniżonych prędkości na głębokości 10 metrów uzyskany metodą kross-korelacji kolekcji czasowych, co jest bardzo ważnym rezultatem niemożliwym do uzyskania metodami refrakcyjnymi.

Rysunek 4.6-2 jest zupełnie nie opisany i ciężko się zorientować, że chodzi o zmienny krok interpolacji. Wynik inwersji przedstawiony na rysunku 4.6-3 jest bardzo słaby, z wyraźnymi artefaktami wynikającymi jak zgaduje z liniowej interpolacji. Jeżeli to pole prędkości ma być dalej wykorzystywane w przetwarzaniu to powinno być w miarę gładkie.

Podrozdział 4.7 pokazuje, że wyniki MASW mogą z powodzeniem zastąpić analizy odwiertowe (vsp) dla rozpoznania rozkładu prędkości V_s do głębokości 30 m. Doktorant

wyjaśnia że średnia różnica pomiędzy tymi technikami to 14%, ale nie dyskutuje dalej przyczyn tej różnicy. Czy może to być wynik anizotropii (VTI) spodziewanej w warstwach przypowierzchniowych?

Rozdział 5 skupia się na analizie fal refrakcyjnych. Doktorant definiuje fale refrakcyjne, podstawowe metody interpretacji pierwszych wstąpień oraz podstawy tomografii sejsmicznej. Rysunek błędnie oznaczony jako 8.2-11, powinno być 5.2-11, w ciekawy sposób definiuje rozdzielczość fali refrakcyjnej.

Podrozdział 5.3 to zupełnie dla mnie nie zrozumiała i długa analiza ustalania modelu początkowego dla prostej tomografii pierwszych wstąpień. Proces obliczeń takiej prostej tomografii 2D jest obecnie tak szybki, że wystarczy przeprowadzić analizę zależności od losowego modelu początkowego i po prostu znaleźć rozkład prędkości najlepiej tłumaczący obserwowane dane. W tym miejscu brakuje mi wyniku gładkiej tomografii pierwszych wstąpień, a prezentowane wyniki wyglądają bardzo nienaturalnie.

Podrozdział 5.4 w sposób bardzo długi i skomplikowany opisuje uzyskanie poprawek statycznych.

Podrozdział 5.5 to analiza zależności prędkości od azymutu wykazująca standardowy układ anizotropii VTI, choć określenie anizotropia nie pojawia się w rozprawie.

Podrozdział 5.6 to opis tomografii pierwszych wstąpień dla sejsmiki prospekcyjnej. Do opisu wyników używany jest jedynie parametr RMS i pomimo długiego opisu brakuje analizy dokładności wyników.

Rozdział 6 najważniejsza wg mnie część rozprawy opisująca analizę sejsmiki refleksyjnej. Doktorant bardzo precyzyjnie opisuje usuwanie fal powierzchniowych, które są największym problemem w analizie danych polodowcowych. Optymalna metoda polegająca na odjęciu wyseparowanych fal powierzchniowych jest słabo opisana. Czy stosowano algorytm tzw. *adaptive subtraction*?

Podrozdział 6.4 to bardzo dokładny opis analizy prędkości nakierowanej na utwory polodowcowe. Doktorant stosuje niestandardową metodę składania sejsmiki refleksyjnej z pominięciem usunięcia energii refrakcyjnych, ponieważ mieszają się one z użytecznym sygnałem. To niestandardowe podejście działa i jest jednym z najciekawszych nowatorskich rozwiązań w tej rozprawie.

Podrozdział 6.5 to najważniejsze w pracy porównanie efektów różnych wyliczonych wcześniej poprawek statycznych, które mają największy wpływ na jakość końcową obrazowania. Niestety wielkość rysunków w tym podrozdziale jest zbyt mała, a przez to nieczytelna.

W ostatnim podrozdziale 6.6 Doktorant wyjaśnia, że nie stosował standardowych metod migracji czy dekonwolucji ponieważ wg literatury nie poprawiają jakości obrazowania. Czy były podjęte próby zastosowania tych standardowych kroków przetwarzania?

Rozdział 7 to finalna interpretacja danych sejsmicznych i geologicznych. Na rysunku 7.4-2 widać dużą niezgodność wymodelowanych pól prędkości z danymi odwiertowymi, z wyjątkiem jednej nieciągłości w polu V_p . Ogólnie niewiele wymodelowanych cech ma odzwierciedlenie w danych odwiertowych. Cała prezentowana analiza jest mało czytelna. Doktorant używa oddzielnie stosunku V_p/V_s i współczynnika Poissona. Czy to nie jest to samo? Rysunki 7.4-4 i 7.4-5 są stanowczo zbyt małe i nieczytelne. Na rysunkach tych brakuje informacji o strukturach geologicznych rozpoznanych na powierzchni, które Doktorant przedstawiał w Rozdziale 2. Rysunek 7.4-7 przedstawia wyniki po konwersji głębokościowej, ale brak jest informacji które pole prędkości zostało wykorzystane do transformacji.

Rozdział 8 to podziękowania i wnioski, w którym doktorant w punktach wymienia najważniejsze wyniki w zakresie akwizycji, analizy fal powierzchniowych, refrakcji oraz sejsmiki refleksyjnej, potwierdzając skuteczność połączonej analizy różnych typów danych sejsmicznych w poprawie jakości obrazowania.

Krytyczne i dyskusyjne uwagi dotyczące rozprawy

Większość uwag wymienionych wcześniej może być uwzględniona przy publikowaniu wyników zgromadzonych przez Doktoranta. Pewne niedociągnięcia nie umniejszają poziomu merytorycznego rozprawy, który jest wysoki, a ich poprawa wpłynie jedynie na lepszą prezentację wyników.

Mam jednak kilka pytań które chciałbym zadać Doktorantowi podczas obrony publicznej:

1) W rozprawie brakuje mi analizy dokładności na każdym etapie przetwarzania. W tomografii sejsmicznej nie ma chociażby rozkładów promieni czy zwyczajowych analiz *checkerboard*. Używany jest jedynie parametr RMS niewiele mówiący o dokładnościach, które możemy uzyskać z danych. Techniki MASW z natury są bardzo niedokładne, dlatego zwyczajowo wyniki MASW podaje się w z wyznaczonymi błędami dla każdego z parametru. Dlaczego w rozprawie brakuje tych standardowych metod?

2) Rysunek 4.3-6 przedstawia analizę rozdzielczości metody MASW. W jaki sposób zostało to policzone?

3) W kilku analizach rozprawy pojawiają się wyraźne przesłanki wskazujące na występowanie anizotropii prędkości pomiędzy pionem i poziomem, czyli standardowej w takich utworach anizotropii typu VTI. Dlaczego problem anizotropii nie został podjęty w żadnej z analiz?

4) optymalna metoda usuwania fal powierzchniowych zastosowana przez Doktoranta opierała się na odjęciu wyseparowanych fal. W jaki sposób zostało to przeprowadzone? Czy stosowana technika *adaptive subtraction* czy inne rozwiązania?

5) Doktorant nie cytuje swoich prac i pomimo prób ich wyszukania nie udało mi się znaleźć żadnej pracy Doktoranta opublikowanej w recenzowanym wydawnictwie, z wyjątkiem abstraktu w *Geology, Geophysics and Environment* wydawanego przez AGH. Dlaczego prezentowane wyniki, które są mocne i bardzo interesujące nie zostały opublikowane?

Ocena rozprawy pod kątem wymogów ustawowych

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska mgr inż. Rafała Matuły, zdaniem recenzenta, spełnia warunki Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku, art. 13 o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z 2003 r., nr 65, poz.595, Dz.U. z 2005 r., nr 164, poz.1365 i Dz.U.z 2011 r. nr 84, poz. 455), dlatego że stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

W szczególności warte podkreślenia jest dostosowanie standardowych technik do szczególnego przypadku badania trudnych utworów post-glacialnych. Doktorant w swoich badaniach stosował szeroką gamę technik, tomografię sejsmiczną, analizę fal powierzchniowych, interferometrię sejsmiczną, profilowanie otworowe oraz obrazowanie sejsmiki refleksyjnej, analizując różne warianty połączonej interpretacji. Zakres analizowanych technik, także tych które nie zostały użyte w finalnym przetwarzaniu danych, jest ogromny i znacznie wykracza poza wymagania ustawowe. Opracowane optymalne warianty przetwarzania z pewnością będą w przyszłości używane w tego typu badaniach.

Wniosek końcowy

Stawiam wniosek do Wysokiej Rady Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie o dopuszczenie mgr. inż. Rafała Matuły do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia naukowego doktora.

