

Prof. dr hab. Krzysztof Szamatek

Wydział Geologii

Uniwersytet Warszawski

## Recenzja

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Aurelii Zając

**„Uwarunkowania poszukiwań skał zbiornikowych w głębokiej części basenu czerwonego spągowca pod kątem możliwości odkrycia złóż gazu ziemnego”**

przygotowanej pod kierunkiem naukowym Promotora prof. dr hab. Inż. Wojciecha Góreckiego w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.

### **1. Wprowadzenie.**

Rada Dyscypliny Naukowej „Nauki o Ziemi i Środowisku” Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie decyzją z dnia 5 czerwca 2023 roku powołała mnie na recenzenta omawianej rozprawy doktorskiej. Recenzję przygotowałem kierując się najlepszą wiedzą i obiektywizmem oraz przepisami Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z 2017 r. poz. 1789) w związku z art. 179 ust.1 i 2 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające.

### **2. Zakres i tematyka rozprawy doktorskiej**

Rozprawa dotyczy optymalizacji wykorzystania danych geofizycznych dla celów określenia występowania gazu ziemnego w skałach zbiornikowych. Doktorantka analizuje i wybiera narzędzia informatyczne, które następnie wykorzystuje do przetworzenia danych z dwóch profili sejsmicznych (2D AGH17511 Golce oraz 2D AGH285111 Obrzycko-Zabartowo) wykonanych w ramach eksperymentalnego profilowania sejsmicznego przez przedsiębiorstwo Geofizyka Toruń SA. Realizacja tych badań była możliwa dzięki podjęciu w latach 2009-2015 projektu badawczego „Poprawa efektywności badań sejsmicznych w poszukiwaniach i rozpoznawaniu złóż gazu ziemnego w utworach facji czerwonego spągowca” kierowanego przez prof. dr hab. inż. Wojciecha Góreckiego.

Doktorantka analizowała zapisy sejsmiczne dotyczące głębokiego kompleksu skał zbiornikowych leżących w głębokich partiach basenu czerwonego spągowca. Były to dwa kompleksy skał: 1. piaskowce fluwialne z osiowej części basenu permskiego oraz 2. piaskowce

eoliczne z przykrawędziowej, NE strefy tego basenu. Ponieważ badania geofizyczne są (mimo ciągle ulepszanej techniki pomiaru i interpretacji zapisów fal dźwiękowych) pośrednim materiałem dotyczącym budowy wewnętrznej górotworu to każda metoda zwiększająca zakres informacji o parametrach badanych warstw skał zbiornikowych i ich potencjale złożowym w zakresie węglowodorów jest niezwykle istotnym aspektem naukowym o praktycznym znaczeniu. Doktorantka dokonała wyboru stosownych narzędzi analitycznych i zastosowała do obliczeń i analizy modele Gassmana (1951), Wylliego et al. (1956) oraz Raymera et al. (1980) opisujące zależności między parametrami sprężystymi i zbiornikowymi dwóch badanych typów skał zbiornikowych o różnej porowatości i stopniu nasycenia skały gazem na prędkość propagacji fal sprężystych w tych dwóch typach skał. Ustalenie takich zależności ma ogromne znaczenie dla oceny złożowej warstw skał zbiornikowych. Ich znajomość pozwala na dalsze prowadzenie prac rozpoznawczych mających większe prawdopodobieństwo udokumentowania zasobów węglowodorów o znaczeniu gospodarczym.

### **3. Układ rozprawy doktorskiej**

Rozprawa doktorska została skomponowana z 6 rozdziałów wraz z podrozdziałami oraz dodatkowo z *Wstępu* oraz *Bibliografii*.

Rozdział 1 *Zarys budowy geologicznej obszaru badań* przedstawia w sposób kompetentny i wszechstronny przegląd piśmiennictwa i materiałów archiwalnych związanych z obszarem badań i opisem utworów budujących wnętrze górotworu. Przedstawiono w nim zarówno położenie fizjogeograficzne obszaru badań, jak i jego charakterystykę geologiczną tj. przynależność do jednostek podziału geologicznego kraju. Szczegółowo scharakteryzowano profil litostratygraficzny skał pokrywy permsko-mezozoicznej i kenozoicznej. Zwrócono uwagę na elementy tektoniki stwierdzonej w obszarze badań, jak i szczegółowo opisano karbońsko-permski system naftowy, koncentrując się na utworach czerwonego spągowca i występujących w nich złożach gazu ziemnego.

Rozdział 2 *Zakres i metodyka interpretacji parametrów zbiornikowych formacji czerwonego spągowca w głębszej części basenu* składa się z trzech podrozdziałów i przedstawia bazę wykorzystywanych danych opartą o profile sejsmiczne 2D AGH17511 Golce oraz 2D AGH285111 Obrzycko-Zabartowo. Ponadto zawiera informacje o wykorzystywanym oprogramowaniu głównie firmy Haliburton Landmark. Rozdział ten prezentuje także

informacje o zastosowanych metodach sejsmicznych modelowań stratygraficznych w oparciu o program Tesserat Pro ze szczegółową informacją o zastosowanych parametrach analizy. Doktorantka omawia szeroko także teoretyczne aspekty wpływu zmian porowatości i stopnia nasycenia gazem skały na prędkość propagacji fal sprężystych. W tym celu zastosowała model Gassmana, model Wylliego oraz metodę Raymera-Hunta-Gardnera.

W rozdziale 3 *Modele seismogeologiczne* Autorka przedstawiła modele oddzielnie dla osiowej części basenu górnego czerwonego spągowca oraz dla NE strefy krawędziowej basenu górnego czerwonego spągowca.

Rozdział 4 *Wpływ zmian porowatości i nasycenia przestrzeni porowej piaskowców czerwonego spągowca na prędkość fali podłużnej* zawiera przegląd literatury związany z tym ważnym zagadnieniem teoretycznym i praktycznym w rozbiciu na dwie odrębne części analizowanego obszaru badań (podobnie jak w rozdziale 3). Przedstawiono wyliczenia zależności między parametrami wymienionymi w tytule rozdziału stosując do ich ustalenia trzy modele obliczeń Gassmana, Wylliego oraz Raymera-Hunta-Gardnera. Co istotne w podrozdziale 4.2 dokonano analizy porównawczej wyników obliczeń uzyskanych trzema metodami przy zmiennej porowatości z wartościami rzeczywistymi uzyskanymi w badaniach laboratoryjnych próbek skał z rdzeni wiertniczych.

Doktorantka w rozdziale 5 *Zmiany amplitudy refleksów sejsmicznych pod wpływem porowatości i nasycenia przestrzeni porowej piaskowców czerwonego spągowca* przyjęła tę samą jak w poprzednich rozdziałach metodę prezentacji wyników oddzielnie dla skał z osiowej części basenu i dla tych z N skłonu basenu. Wykonane modelowanie przeprowadzono dla warstw zawodnionych oraz warstwy nasyconej gazem (formacja z osiowej części basenu).

Rozdział 6 *Podsumowanie i wnioski* zawiera konkluzje płynące z wykonanej pracy badawczej. Zawiera 14 wniosków badawczych i obserwacji jakie Doktorantka wywiodła z przeprowadzonych badań.

Opisany powyżej układ rozprawy jest właściwy i racjonalny, dobrze organizuje wywód naukowy Doktorantki, rozdziały teoretyczne wprowadzają w metodykę zrealizowanych badań i modelowań. W rozprawie wykorzystano bardzo bogaty materiał dokumentacyjny w postaci map, profili i przekrojów zamieszczonych jako figury. Łącznie zamieszczono 73 figury o dobrej jakości, wyraźne i doskonale prezentujące szczegóły budowy geologicznej omawianego rejonu bądź przetworzone impulsy geofizyczne (sejsmiczne) w profile i przekroje. Ponadto Autorka zamieszcza 15 tabel zawierających głównie informacje o wartości pomierzonych parametrów

geofizycznych lub obliczenia parametrów przy pomocy wykorzystanych równań dla trzech modeli oceny wpływu zmian porowatości i stopnia nasycenia gazem skały na prędkość propagacji fal sprężystych.

#### **4. Ocena merytoryczna rozprawy**

Doktorantka podjęła się ambitnego zadania dokonania reinterpretacji wcześniej zarejestrowanych sygnałów z wykonanych profili sejsmicznych celem stwierdzenia czy otrzymane wyniki mogą wpłynąć na lepsze poznanie właściwości zbiornikowych skał i określenie perspektywiczności występowania złóż gazu ziemnego. Zadanie to zrealizowała wykorzystując dane będące pokłosiem wcześniej zrealizowanych w ramach projektu badawczego AGH profilowań sejsmicznych na obszarze słabo poznanego fragmentu skał basenu czerwonego spągowca w obrębie segmentu pomorskiego antyklinorium śródpolskiego. Reinterpretacja danych geofizycznych, w tym sejsmicznych, z użyciem nowych narzędzi informatycznych oraz modelowań jest obecnie silnie rozwijającym się obszarem badawczym wpływającym na nowe możliwości geologii naftowej w zakresie określenia perspektyw złożowych węglowodorów. Do przeprowadzenia modelowań i interpretacji Doktorantka gruntownie zapoznała się z literaturą dotyczącą budowy tektonicznej omawianego rejonu, jak również z litostratygrafią utworów stwierdzonych w wykonanych wcześniej wierceniach poszukiwawczych i badawczych.

Doktorantka w rozprawie doktorskiej wykorzystwała dwa profile sejsmiczne, jeden znacznie dłuższy (28 km) i dowiązany do trzech otworów wiertniczych (Zabartowo 1, Zabartowo 2 oraz Obrzycko 1) oraz drugi znacząco krótszy (6,5 km) oparty na danych z otworu Golce 1. Istota użycia tych dwóch profili opierała się na zróżnicowanym charakterze skał z obu obszarów, ilości danych i wiedzy o budowie podłoża. Profil Golce przecina osiową część basenu czerwonego spągowca, natomiast profil Zabartowo przechodzi przez NE strefę krawędziową tego basenu. Strop skał czerwonego piaskowca występuje w obu przypadkach na dużej głębokości 3500-3700 m ppt. Skompilowana historia geologiczna tego rejonu powodowała osadzanie się permskich skał okruchowych czerwonego spągowca w trzech możliwych do

identyfikacji środowiskach sedymentacyjnych typu playa, depozycji fluwialnej oraz eolicznej. Zatem analizowane przez Doktorantkę skały wykazywały wystarczająco istotne zróżnicowanie litofacjalne by można było próbować uchwycić ich zróżnicowanie właściwości jako skał zbiornikowych. Doktorantka swobodnie porusza się po tematyce budowy geologicznej obszaru, cytuje właściwą dla tego tematu literaturę. Wykorzystuje i interpretuje przekroje geologiczne i profile litostratygraficzne publikowane wcześniej w materiałach archiwalnych, dokumentacjach czy artykułach naukowych. Ważną rolę w tej analizie spełnia także znajomość literatury z zakresu paleogeografii makroregionu w czasie odpowiadającym powstawaniu osadów czerwonego spągowca czy cechsztynu. Oczywiście warunki depozycji osadów tych trzech facji prowadziły w konsekwencji do ich zróżnicowania, głównie w zakresie ich porowatości, ale także składu mineralnego, później zaś w skałach tych następowały zmiany diagenetyczne i kompaktacja utrwalające te różnice w zbiornikowym charakterze skał. Zmienny jest zwłaszcza w skałach tych facji udział fazy ilastej i mułowcowej, a przede wszystkim piaskowcowej mającej zasadniczy wpływ na zdolności zbiornikowe (porowatość efektywna). Autorka szeroko cytuje dostępne wyniki badań z literatury nad zagadnieniem zależności przepuszczalności określonego typu skały od jej porowatości (utworów eolicznych, fluwialnych i typu playa), bowiem skały czerwonego spągowca są w zachodniej Europie istotną formacją zbiornikową z odkrytymi i eksploatowanymi wieloma znaczącymi złożami gazu ziemnego. Stąd też obfitość literaturowych danych petrofizycznych i geofizycznych.

Autorka słusznie zauważa, że głęboka część basenu czerwonego spągowca w rejonie badań jest słabo i fragmentarycznie poznana, bowiem w rejonie tym wykonano niewiele otworów wiertniczych. Wiele istotnych interpretacji, zwłaszcza rozkład parametrów petrofizycznych czy dystrybucja utworów czerwonego spągowca jest wysoce hipotetycznych. Z tych nielicznych wykonanych w rejonie badań wierceń inni autorzy zrealizowali badania laboratoryjne na próbkach z rdzeni wiertniczych określając porowatość czy przepuszczalność skał czerwonego spągowca (Buniak, Kiersnowski 2006 dla otworu Zbartowo-1) różnych facji osadowych (plaji, fluwialnej, aluwialnej, eolicznej i ich kombinacji). Potwierdzili oni, że badane skały z otworów Zabartowo 1 i Zabartowo 2 mają niskie właściwości zbiornikowe. Jednocześnie historia geologiczna w tym rejonie wskazuje, że karbońskie skały przechodząc etap okna gazowego mogły być źródłem migracji gazu i jego koncentracji zarówno jako gazu zamkniętego w utworach czerwonego spągowca., jak i klasycznych złóż gazu w pułapkach złożowych.

Doktorantka przygotowała i wykorzystała w swojej rozprawie modelowanie sejsmiczne oparte o istniejące dane sejsmiczne z wcześniej wykonanych badań. Modelowanie to polega na symulowaniu propagacji fal sejsmicznych w określonych przedziałach głębokości profilu i porównaniu otrzymanych wyników modelowania z wynikami rzeczywistych pomiarów i zapisów profilowania sejsmicznego. Doktorantka wykonała stratygraficzne modelowania sejsmiczne umożliwiające ocenę litologii, porowatości i charakterystyki płynu nasycającego przestrzeń porową skały. Jak wspomniano w części 3 niniejszej recenzji Doktorantka fachowo i szeroko opisała założenia teoretyczne oraz praktyczne wykorzystanie wyników modelowań sejsmicznych. Szczególnym zainteresowaniem Doktorantki było określenie zmian parametrów zbiornikowych skał czerwonego spągowca. Zwłaszcza skoncentrowała się na porowatości skał oraz rodzaju i stopnia nasycenia przestrzeni porowej ośrodka skalnego. Modelowania te dotyczyły skał z dwóch fragmentów zbiornika czerwonego spągowca o czym pisano już wcześniej w recenzji. W swoich dociekaniach naukowych Doktorantka wykorzystała wcześniej zrealizowane badania skał z tego rejonu, a mianowicie Góreckiego et al. (2015) oraz pracę Czopek & Nowak (2010). Do obliczeń Doktorantka wykorzystała parametry matrycy skalnej i płynu wypełniającego przestrzeń porową podane przez Czopek & Nowak (2010).

Problem badawczy związany z określeniem wpływu płynu nasycającego przestrzeń porową skały na prędkość fali podłużnej określano wykorzystując program *Decision Space Well Seismic Fusion* firmy *Halliburton Landmark*. Dla korelacji danych sejsmicznych z danymi z geofizyki otworowej wykorzystano także program *SynTool* firmy *Halliburton Landmark*. Model rozkładu porowatości skał czerwonego spągowca na podstawie wyników inwersji sejsmicznej obliczono programem *HampsonRussell* firmy *GeoSoftware*. Stratygraficzne modelowanie sejsmiczne wykonano z wykorzystaniem oprogramowania *TesseralPro* firmy *Tesseral Technologies Inc.*

Doktorantka kompetentnie i z erudycją przedstawiła teoretyczne aspekty wpływu zmian porowatości i stopnia nasycenia gazem skały na prędkość propagacji fal sprężystych (podrozdział 2.3 rozprawy). Doktorantka porusza się w tej tematyce swobodnie, cytując stosowne prace i opisując zalety oraz wady istniejących modeli i uzasadniając wybór trzech wykorzystanych przez Nią w rozprawie. Wpływ zmiany porowatości i nasycenia porów w skale na zapis sejsmiczny określono na podstawie jedno- i dwuwymiarowych modelowań teoretycznych. Wyniki stratygraficznych modelowań sejsmicznych są omówiono fachowo, jasno i konkludownie. Doktorantka zamieszcza stosowne i liczne materiały graficzne, co jest dla każdego geologa czy geofizyka niezbędnym uzupełnieniem tekstowego wyводу autora.

Figury są dobrze przygotowane, czytelne i ostre – pozwalają na interpretację otrzymanych wyników modelowań. Doktorantka przyjęła do obliczeń zmienne wartości parametrów porowatości (1, 5, 9 i 13%) oraz nasycenia gazem ((80%) czy zawodnienia skały (100%) . Ta obszerna część rozprawy jest bardzo wartościowa i otrzymane wyniki mają istotne znaczenie aplikacyjne w poszukiwaniach złożowych węglowodorów.

Doktorantka wyciągnęła właściwe i uzasadnione wnioski z wykonanych prac. Zdaniem recenzenta wnioski te są jednak słabo wyeksponowane i nie są uszeregowane według istoty i wagi naukowo-praktycznej. Błędem zdaniem recenzenta jest nie rozdzielenie podsumowania od wniosków. Wnioski podstawowe odnoszące się do hipotezy badawczej wymagają znaczącego wyeksponowania, bo to jest właściwym dorobkiem Doktorantki. Podkreślam, że ten wkład i dorobek jest istotny i zauważalny, a w przyjętej konwencji edycyjnej nie jest odpowiednio wyeksponowany.

## 5. Uwagi krytyczne

Rozprawa doktorska jest dojrzała i właściwie przygotowana i napisana. Jednak można do niej sformułować kilka uwag krytycznych. Po pierwsze zdaniem recenzenta Doktorantka niewłaściwie terminologicznie używa określenia **własności** zamiast **właściwości**. Określane podczas badań czy modelowań cechy skał takich jak porowatość, skład mineralny, rodzaj spoiwa etc. to są właściwości a nie własności. Własność odnosi się do pojęcia majątkowego. Mimo, iż w potocznym języku słowa te są używane zamiennie to jednak wydaje się, że w pracach o charakterze technicznym powinien ten termin być rozróżnialny. Przy przygotowaniu rozprawy do druku sugeruję stosowne zmiany.

W rozprawie jak mantra pojawiają się kilkunastokrotnie te same opisy obu profili wykorzystanych przez Autorkę w rozprawie, zawierają te same opisy i desygnaty. Sugeruję aby po przedstawieniu tych profili we wstępie i oznaczeniu ich odpowiednimi symbolami, dalej w tekście rozprawy (publikacji) posługiwać się tymi skrótami, a nie kolejnym opisaniem tych samych, znanych już faktów.

Wymaga uzupełnienia i uporządkowania kwestia bibliografii i zasad cytowania. Na przykład strona 17 cytowanie Karnkowski 1987a, 1987b można i powinno się zastąpić cytowaniem Karnkowski 1987 a,b. Na tej samej stronie jest przywołanie Kiersnowski, Buniak

2006 – w spisie literatury są zamieszczone dwie prace tych autorów z tego roku oznaczone a i b, w tekście zatem należy to przywołać o którą pozycję chodzi.

Na str. 26 przywołani są Stalder 1973 oraz Seemann 1979 cytowani za Selley & Sonnenberg 2015 – jednak nie ma tych autorów i ich prac w spisie literatury. To że jest to cytowanie wtórne za innymi (Selley & Sonnenberg 2015) nie zwalnia z potrzeby umieszczenia prac i autorów w spisie.

Na str. 30 w podpisie Fig. 1.10 jest przywołany Kiersnowski 2006 – nie ma takiej pracy w spisie literatury. Na str. 36 przywołany Stephenson 1993 – brak w spisie. Na str. 44 przywołany Buniak et al. 2008 – brak pracy w spisie. Na str. 49 w podpisie figury 1.23 przywołany Kus et al. 2005, Teichmuller et al. 1984 – brak ich w spisie.

Przy niektórych figurach brak jest źródła, (np. str. 46 Fig. 1.19 czy 1.20, str. 47 fig. 1.21 i 1.22). Jeśli są to figury przygotowane przez Autorkę to powinno to być podpisane „*opracowanie własne*”. Podobnie na str. 46 zdanie „*Według informacji prasowych wielkość złoża oszacowano na 630 mln m<sup>3</sup>*” – powinno być podane źródło tej informacji.

Wracam także do wcześniej zawartej w recenzji uwagi o niezbyt dobrym zakończeniu w postaci *Podsumowania i wniosków*. Rozdział ten zawiera 14 tez i spostrzeżeń opisanych razem, tymczasem, zdaniem recenzenta, najważniejsze ustalenia Doktorantki kryją się pod podpunktami 4, 6, 10, 12 i 14. Są to ważne ustalenia naukowe i jako takie powinny być wyodrębnione dla podkreślenia wartości osiągniętych przez Doktorantkę wyników. Na przykład wniosek 14 o wskazaniu na podstawie interpretacji potwierdzonej wynikami modelowań stratygraficznych możliwości istnienia dwóch potencjalnych pułapek dla akumulacji gazu zmiennego w utworach plaji, powyżej 550 m pod spągiem cechsztynu. To ważny wniosek badawczy i aplikacyjny, który ginie w tak zredagowanym i przydługim rozdziale Podsumowanie i wnioski.

Wskazane powyżej uwagi krytyczne (głównie o charakterze edycyjno-redakcyjnym) nie zmieniają jednak wysokiej oceny merytorycznej przedstawianej do recenzji rozprawy doktorskiej, a są jedynie sugestiami, których uwzględnienie przez Autorkę w przygotowaniu rozprawy do druku uczyni ją jeszcze bardziej nośną naukowo i zauważalną wraz z jej możliwie wysoką cytowalnością.



## 6. Wniosek końcowy

Szczegółowa analiza rozprawy doktorskiej mgr inż. Aurelii Zając „*Uwarunkowania poszukiwań skał zbiornikowych w głębokiej części basenu czerwonego spągowca pod kątem możliwości odkrycia złóż gazu ziemnego*” wyraźnie wskazuje, że jest to rozprawa wartościowa, przygotowana właściwie i wskazująca duże kompetencje naukowe Doktorantki. Przeprowadzone przez Nią badania, głównie w postaci stratygraficznych modeli sejsmicznych i uzyskane wyniki mają istotne znaczenie naukowe oraz aplikacyjne dla prowadzenia prospekcji złożowej w badanym obszarze. Obszar ten do tej pory charakteryzuje się niewielką ilością złóż gazu ziemnego, jednak ustalenia Doktorantki wskazują, że mogą w głębokich partiach basenu czerwonego spągowca występować pułapki złożowe i geopotencjał węglowodorowy obszaru badań może być istotny. Rozprawa mgr inż. Aurelii Zając jest samodzielnym i istotnym wkładem naukowym w rozwój badań geologiczno-geofizycznych o przydatności złożowej.

Stwierdzam zatem, że rozprawa doktorska mgr inż. Aurelii Zając „*Uwarunkowania poszukiwań skał zbiornikowych w głębokiej części basenu czerwonego spągowca pod kątem możliwości odkrycia złóż gazu ziemnego*” spełnia wszelkie przesłanki stawiane rozprawom doktorskim zawarte w przepisach *Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki* (Dz.U. z 2017 r. poz. 1789 w związku z art. 179 ust.1 i 2 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające) by być dopuszczoną do dalszych postępowań, w tym publicznej obrony tej rozprawy doktorskiej, celem nadania Doktorantce stopnia naukowego doktora..

Warszawa 22 sierpnia 2023 r.

/ prof. dr hab. Krzysztof Szamałek/

