

dr hab. inż. Piotr Krzywiec, prof. ING PAN
Instytut Nauk Geologicznych PAN
ul. Twarda 51/55
00-818 Warszawa
email: piotr.krzywiec@twarda.pan.pl

Warszawa, 21.07.2022

RECENZJA

**rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Gabriela Ząbka zatytułowanej
„Modelowania parametrów geomechanicznych skał syluru i ordowiku na
wybranych obszarach basenu bałtyckiego oraz ich wykorzystanie w prospekcji
naftowej”**

1. WSTĘP

Recenzowana praca doktorska mgr inż. Gabriela Ząbka, zatytułowana „*Modelowania parametrów geomechanicznych skał syluru i ordowiku na wybranych obszarach basenu bałtyckiego oraz ich wykorzystanie w prospekcji naftowej*”, została przygotowana na Wydziale Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH pod kierunkiem dr hab. inż. Michała Stefaniuka, prof. AGH. Promotorem pomocniczym był dr inż. Bartosz Papiernik. Liczy ona 189 strony i składa się z poprzedzonych polskim i angielskim streszczeniem 11 rozdziałów: (1) **Wstęp**, (2) **Budowa geologiczna obszaru badań**, (3) **System naftowy**, (4) **Wybrane parametry geomechaniczne skał**, (5) **Sieć szczelin naturalnych**, (6) **Metodyka trójwymiarowych modeli geologicznych**, (7) **Materiał badawczy i metodyka pracy**, (8) **Wyniki modeli trójwymiarowych**, (9) **Interpretacja i dyskusja uzyskanych wyników**, (10) **Wnioski**, (11) **Literatura**, po którym znajdują się jeszcze trzy nienumerowane rozdziały: **Spis tabel**, **Spis rycin** i **Załączniki**.

Recenzowana praca doktorska została przygotowana na wysokim poziomie edytorskim, jest bogato ilustrowana, poziom techniczny przygotowania figur jest wysoki, co ułatwia jej lekturę i zrozumienie uzyskanych wyników.

Praca powstała w ramach programu badawczego BlueGas – Polski Gaz Łupkowy (projekty ŁUPZAS, GAZGEOLMOD, GASLUPMIKROS i GASLUPSEJSM), Programu Badań Stosowanych SHALECORR oraz grantu dziekańskiego o tytule takim jak tytuł doktoratu.

2. OMÓWIENIE I ANALIZA TREŚCI ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Punktem odniesienia dla rozprawy doktorskiej mgr inż. Gabriela Ząbka były poszukiwania węglowodorów niekonwencjonalnych prowadzone na obszarze basenu bałtyckiego. Jej celem była analiza parametrów geomechanicznych (w szczególności kruchości i naturalnej szczelinowatości) utworów ordowiku i syluru z rejonu zdjęcia sejsmicznego 3D Opalino-Lubocino związanych z tego typu złożami węglowodorów.

W pierwszym rozdziale (**Wstęp**) Doktorant omówił krótko cel wykonanych prac badawczych, opisując ich kontekst ogólnogeologiczny i poszukiwawczy, naszkicował

zastosowaną metodykę i sformułował zasadniczy problem badawczy, odnosząc się również do projektów badawczych, w ramach których były realizowane jego badania.

Rozdział 2 (**Budowa geologiczna obszaru bada**) poświęcony został syntetycznemu omówieniu budowy i ewolucji geologicznej obszaru badań i jego otoczenia. W podrozdziale 2.1 dotyczącym ewolucji tektonicznej – kluczowej ze względu na rozwój szczelinowatości - Autor najpierw naszkicował historię badań geologicznych i geofizycznych prowadzonych na tym obszarze a następnie szczegółowo opisał kolejne etapy rozwoju tektonicznego obszaru badań w okresie od ediakaru do syluru. Krótko omówiona została też budowa geologiczna krystalicznego podłoża prekambryjskiego. W opisie tym znalazło się niezbyt szczęśliwe określenie o „umiejscowieniu” ciał intruzywnych w obrębie orogenu fennoskandzkiego – „umiejscowienie” to jak sądzę kalka językowa angielskiego terminu „emplacement” ale w kontekście rozwoju ciał intruzywnych nie jest to dobre określenie. Niezbyt jasne jest też stwierdzenie, że luki stratygraficzne w obrębie utworów kambru związane są z „typowymi dla obszarów platformowych ruchami wypiętrzającymi” – to jest nadzwyczaj ogólne określenie, bez żadnego kontekstu genetycznego, i zarazem problematyczne o tyle, że obecnie nie mówi się już o zjawiskach typowych dla obszarów platformowych, we wczesnym paleozoiku basen bałtycki przechodził różne, dość dobrze rozpoznane fazy swojego rozwoju, i w kontekście historii kambryjskiej należy mówić o pasywnej krawędzi oceanu Tornquista a nie o jakichś enigmatycznych „ruchach wypiętrzających typowych dla obszarów platformowych”. W opisie historii tektonicznej bardzo zdawkowo został wspomniany etap późnopaleozoiczny – w tekście jest wzmianka o reaktywacji stref tektonicznych w późnym karbonie jednak bez podania żadnej informacji co do powodów i charakteru tej reaktywacji, wspomniano również, że osady dewonu i karbonu zostały usunięte przez erozję w późnym karbonie i permie. Nie opisano z jakimi procesami tektonicznymi te zjawiska mogły być związane a przecież mogło one mieć istotny wpływ na rozwój szczelinowatości skał dolnego paleozoiku. W opisie ewolucji tektonicznej pominięta została również kwestia powstania i inwersji permo-mezozoicznego basenu polskiego, który objął swym zasięgiem również omawiany rejon badań, a procesy tektoniczne odpowiedzialne za jego subsydencję i inwersję mogły mieć wpływ na rozwój szczelinowatości skał dolnego paleozoiku. Dopiero w podrozdziale 2.2 dotyczącym pokrywy osadowej pojawia się wzmianka o basenie polskim wraz z krótkim opisem permo-mezozoicznej pokrywy osadowej. Na fig. 2.4 opisano podłożę krystaliczne, kompleks górnoediakarsko-dolnopaleozoiczny i kompleks permsko-mezozoiczny – w tym ostatnim przypadku oznaczenie jest częściowo błędne gdyż obejmuje on również utwory kenozoiku. Warto przy tej okazji nadmienić, że, jak to pokazały ostatnie badania (*Stachowska & Krzywiec, 2023, The Late Cretaceous tectono-sedimentary evolution of northern Poland – a seismic perspective on the role of transverse and axial depositional systems during basin inversion. MPG, 152, <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2023.106224>*), historia mezozoiczna tego obszaru była znacznie bardziej skomplikowana niż to dotychczas przyjmowano, a co za tym idzie również mezozoiczne zjawiska tektoniczne mogły wpłynąć na rozwój szczelinowatości skał dolnego paleozoiku.

Rozdział 3 zatytułowany jest **System naftowy**. Doktorant omówił w nim wszystkie kluczowe elementy systemu naftowego basenu bałtyckiego takie jak skały macierzyste, skały zbiornikowe, skały uszczelniające, podstawowe typy pułapek dla węglowodorów oraz procesy generacji i migracji węglowodorów. Jako główny etap

generacji wskazany został późny dewon i wczesny karbon czyli etap rozwoju basenu bałtyckiego, który został w rozdziale 2 potraktowany dość „po macoszemu”, co może nieco utrudniać poprawne zrozumienie relacji systemu naftowego do ewolucji tektonicznej obszaru badań. Konwencjonalny system naftowy został omówiony w głównej części rozdziału 3, niekonwencjonalny („łupkowy”) system naftowy opisany jest w podrozdziale 3.1. Taka konstrukcja nie jest do końca optymalna, najlepiej byłoby oba te systemy omówić w wydzielonych podrozdziałach 3.1 i 3.2. Opis niekonwencjonalnego systemu naftowego dotyczy tak kwestii ogólnych związanych z tego typu systemami naftowymi jak i szczegółów niekonwencjonalnego systemu naftowego basenu bałtyckiego związanego z formacjami Sasina i Jantaru.

W rozdziale 4 **Wybrane parametry geomechaniczne skał** Doktorant opisał zagadnienia dotyczące własności geomechanicznych skał, mających kluczowe znaczenie dla zabiegów szczelinowania stosowanych w trakcie wydobywania węglowodorów związanych z niekonwencjonalnymi systemami naftowymi. W części wstępnej opisana jest kruchość skał w kontekście jej wyznaczenia i znaczenia dla zabiegów szczelinowania. Podrozdział 4.1 zawiera opis parametrów sprężystych skał takich jak moduł Younga, współczynnik Poissona oraz moduł sprężystości objętościowej. Podrozdział 4.2 poświęcony został polu naprężeń w ośrodku skalnym – zagadnieniu bardzo ważnemu ale nie kwalifikującemu się wprost do parametrów geomechanicznych skał, chyba lepszym byłoby poświęcenie polu naprężeń w ośrodku skalnym osobnego rozdziału. Podrozdziały 4.3 i 4.4 to kontynuacja rozważań na temat kruchości skał, odpowiednio jej wartości średniej oraz indeksowi kruchości.

Rozdział 5, zatytułowany **Sieć szczelin naturalnych**, zawiera szczegółowy opis szczelin występujących w ośrodku skalnym, ich definicji, klasyfikacji oraz metodom detekcji w odślonięciach, na danych sejsmicznych, przy wykorzystaniu danych karotażowych oraz rdzeni wiertniczych. Rozdział ten stanowi bardzo ważny punkt odniesienia dla wyników badań wykonanych w ramach doktoratu.

Rozdział 6 **Metodyka trójwymiarowych modelowań geologicznych** to bardzo obszerne i szczegółowe omówienie szeregu zagadnień związanych z tworzeniem cyfrowych modeli ośrodka geologicznego. Doktorant omówił w nim organizację danych do modelowań oraz metodykę modelowań strukturalnych i modelowań parametrycznych. W tym ostatnim przypadku szczególna uwaga została zwrócona na rolę danych sejsmicznych i ich różnych atrybutów w modelowaniach geologicznych, oraz metodyce modelowań naturalnych sieci spękań.

W rozdziale 7 **Materiał badawczy i metodyka pracy** Doktorant opisał dane wykorzystane do zrealizowanych przez siebie badań (podrozdział 7.1) oraz ich metodykę (podrozdział 7.2). W swoich pracach wykorzystał on różnego rodzaju dane archiwalne (mapy strukturalne oraz wcześniej opracowany model numeryczny), dane z 6 otworów, zdjęcie sejsmiczne 3D Opalino-Lubocino w wersji głębokościowej wraz z wyinterpretowanymi przez Geofizykę Toruń głównymi powierzchniami strukturalnymi i uskoki. Metodyka prac objęła przygotowanie bazy danych w programie Petrel, obliczenie modułu Younga, współczynnika Poissona i kruchości dla 4 otworów oraz modelowania geologiczne, których ostatnim etapem było trójwymiarowe modelowanie kruchości oraz modelowanie naturalnej sieci spękań.

Rozdział 8, zatytułowany **Wyniki modelowań trójwymiarowych**, to kluczowa część pracy doktorskiej. Doktorant podzielił go na trzy części. Część pierwsza (podrozdział 8.1) zawiera wyniki estymacji kruchości wybranych formacji skalnych opartej na danych otworowych. Przeanalizowane zostały formacja z Prabut, formacja mułowców z Sasina, formacja wapieni z Kopalina, formacja ze Słuchowa i formacja mułowca z Piaśnicy. Parametry geomechaniczne (dynamiczne wartości modułu Younga i współczynnika Poissona) obliczone zostały w oparciu o krzywą DT dla fali P i S oraz krzywą gęstościową dla otworów Lubocino-1, Opalino-2, Opalino-3 i Opalino-4. W oparciu o tak pozyskane wartości modułu Younga i współczynnika Poissona obliczona została średnia kruchość dla poszczególnych formacji skalnych, a indeks kruchości dla czterech opracowanych otworów obliczono w oparciu o dane z sondy GEM. W podrozdziale 8.2 opisane zostały wyniki modelowań strukturalnych, które stworzyły podstawę strukturalną dla najważniejszej części zrealizowanych badań czyli modelowań parametrycznych. Opracowany został model półszczegółowy obejmujący północną część zdjęcia sejsmicznego Opalino-Lubocino 3D oraz model szczegółowy obejmujący najbliższe otoczenie otworów Lubocino-1, Lubocino-2H i Lubocino-3H. Model szczegółowy skonstruowano dla formacji z Pasłęka, formacji z Jantaru, formacji z Prabut, formacji z Sasina i formacji z Kopalina. Ostatnia, trzecia część (podrozdział 8.3) poświęcona została modelowaniom parametrycznym. Modele rozkładu modułu Younga, współczynnika Poissona i kruchości opracowane na podstawie danych otworowych zostały wykorzystane do konstrukcji przestrzennych rozkładów tych parametrów z wykorzystaniem danych sejsmicznych 3D. Ostatnim krokiem zrealizowanych badań było opracowanie modelu naturalnej sieci spękań. Model ten opracowano dla szczegółowego modelu strukturalnego. Również w tym przypadku wykorzystano dane otworowe jako dane kalibrujące. Opracowane modele pokazują lokalizację stref o podwyższonych i o obniżonych wartościach intensywności szczelin. W końcowej części tego podrozdziału zamieszczone zostały mapy obrazujące gęstości naturalnych szczelin dla formacji litostratygraficznych analizowanych w doktoracie.

Rozdział 9 zatytułowany **Interpretacja i dyskusja uzyskanych wyników** wraz z rozdziałem 10 **Wnioski** zawierają podsumowanie uzyskanych wyników. W efekcie przeprowadzonych badań Doktorant skonstruował wiarygodny, przestrzenny model kruchości badanych formacji skalnych oraz naturalnej sieci spękań, wyciągając zarazem wnioski istotne dla zabiegów szczelinowania, kluczowych dla wzmiankowanej w tytule rozprawy prospekcji naftowej.

3. WNIOSEK KOŃCOWY

Reasumując, można stwierdzić, iż recenzowany doktorat to zaawansowane studium geofizyczno-geomechaniczne oparte na danych sejsmicznych 3D i danych otworowych samodzielnie przeanalizowanych przez Doktoranta, dokumentujące jego wiedzę dotyczącą interpretacji danych sejsmicznych oraz geologicznych modelowań strukturalno-parametrycznych. Doktorant udowodnił zdolność do prowadzenia samodzielnych badań naukowych odpowiednio definiując problem badawczy, odpowiednio dobierając metodykę badań dostosowaną do tego problemu oraz odpowiednio realizując zaplanowane badania. Biorąc to pod uwagę mogę stwierdzić, że praca doktorska mgr inż. Gabriela Ząbka, zatytułowana „*Modelowania parametrów geomechanicznych skał syluru i ordowiku na wybranych obszarach basenu bałtyckiego oraz ich wykorzystanie w prospekcji naftowej*”, spełnia

wymagania stawiane rozprawom doktorskim w stosownej Ustawie o stopniach i tytule naukowym, i w związku z tym wnioskuję o dopuszczenie Doktoranta do dalszego postępowania w przewodzie doktorskim.