

Warszawa, 27 czerwca 2023 r.

Prof. dr hab. Andrzej Konon
Katedra Tektoniki i Kartografii Geologicznej
Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski
Al. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa

RECENZJA

rozprawy doktorskiej magistra inż. Gabriela Ząbka

pt. „Modelowania parametrów geomechanicznych skał syluru i ordowiku na wybranych obszarach basenu bałtyckiego oraz ich wykorzystanie w prospekcji naftowej”

1. Podstawa prawna

Niniejszą recenzję opracowałem na podstawie pisma nr RDN-NoZiŚ-dz.510-3/2023 z dnia 17.05.2023 r. wystosowanego zgodnie z decyzją Rady Dyscypliny Naukowej „Nauki o Ziemi i Środowisku” Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie z dnia 15.05.2023 r.

2. Treść i zakres pracy

Przedstawiona rozprawa przygotowana została pod kierunkiem naukowym dr. hab. inż. Michała Stefaniuka, prof. AGH i dr. inż. Bartosza Papiernika na Wydziale Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH. Praca obejmuje 181 stron, na które składa się tekst wraz z 17 tabelami, 98 figurami oraz 11 załączników graficznych. W wykazie literatury podano 276 pozycji. Całość rozprawy łącznie ze wstępem i wnioskami została podzielona na 10 rozdziałów.

We wstępie (Rozdział 1) Doktorant przedstawił główne cele prowadzonych badań, którymi są przygotowanie modelu strukturalnego umożliwiającego przeprowadzenie modelowania kruchości, w wyniku czego miały być pozyskane informacje o przestrzennym rozkładzie modelowanych parametrów w odniesieniu do wybranych formacji skalnych ordowiku i syluru w badanym fragmencie basenu bałtyckiego. Doktorant stwierdza w tej części, że w oparciu o te dane zostanie przeprowadzona szczegółowa analiza tych formacji skalnych uwzględniająca wyniki modelowań naturalnej sieci spękań, co pozwoli w efekcie końcowym na ocenę procesu szczelinowania w otworze Lubocino-2H.

W 2-gim rozdziale Autor opisał budowę geologiczną obszaru badań, uwzględniającą ewolucję tektoniczną tego obszaru oraz profil pokrywy osadowej podłoża krystalicznego.

W 3-cim rozdziale Doktorant zawarł szczegółowy opis systemu naftowego w basenie bałtyckim.

W rozdziale 4-tym Autor opisał parametry geomechaniczne skał, których uwzględnienie jest konieczne podczas planowania zabiegów szczelinowania hydraulicznego. W rozdziale tym podane zostały opisy takich parametrów jak kruchość skał, parametrów sprężystych skał, czyli modułu Younga i współczynnika Poissona i pola naprężeń w ośrodku skalnym.

W kolejnym, 5-tym rozdziale Doktorant zawarł opis typów spękań występujących w skałach osadowych oraz metod rozpoznania sieci tych struktur.

W rozdziale 6-tym Autor przedstawił metodykę wykonywania przestrzennych modelowań geologicznych opisując bardzo szczegółowo m.in. zasady przygotowania danych wejściowych takich jak np. archiwalne materiały kartograficzne, dane z otworów wiertniczych, dane sejsmiczne itd. Ponadto Doktorant opisał metody konstruowania modeli strukturalnych, w tym zastosowaną w rozprawie doktorskiej metodę wykonania modelu poprzez modelowanie uskoków w programie Petrel. Następnie Doktorant omówił zasady uzupełnienia modelu poprzez wprowadzenie pakietów poszczególnych warstw zgodnych z obowiązującą w danym terenie stratygrafią. W dalszej części Autor przedstawił już metodykę przeprowadzania modelowania parametrycznego.

W rozdziale 7-ym zostały opisane dane zastosowane w niniejszej pracy, jak i kroki jakie Autor wykonał podczas konstruowania modeli strukturalnych, trójwymiarowe modelowania kruchości w obrębie modelu półszczegółowego obejmującego obszar w pobliżu otworów Opalino-2, Opalino-3, Opalino-4 oraz Lubocino-1 oraz modelowania sieci spękań w modelu szczegółowym w pobliżu otworu horyzontalnego Lubocino-2H. Tak przygotowane modele umożliwiły analizę parametrów geomechanicznych w obrębie formacji skalnych ordowiku i syluru.

W rozdziale 8-ym Doktorant szeroko zaprezentował wyniki przeprowadzonych modelowań. Autor wyznaczył moduł Younga, współczynnik Poissona, wartości charakteryzujące kruchość dla 4 analizowanych otworów. W dalszej części Doktorant przedstawił wykonane przez Niego modele strukturalne: półszczegółowy oraz szczegółowy obejmujący odpowiednio 53 km² i 1,62 km², co pozwoliło na przeprowadzenie modelowania parametrycznego przy pomocy algorytmu inwersji genetycznej i algorytmu śledzenia mrówek. W dalszej części tego rozdziału Doktorant opisał uzyskane modele kruchości w półszczegółowym modelu strukturalnym. Wyniki zostały zaprezentowane na szeregu mapach i wykresach.

Następnie Autor przedstawił wyniki modelowania sieci naturalnych spękań w otoczeniu otworu horyzontalnego Lubocino-2H, gdzie został opracowany szczegółowy model strukturalny.

Rozdział ten obejmuje 59 stron, co bez załączników dołączonych na końcu rozprawy stanowi około 39% tekstu bez cytowanej literatury. Wraz z kolejnym rozdziałem, gdzie została przedstawiona interpretacja danych, część ta stanowi około 44% tekstu.

W rozdziale 9-tym Doktorant zawarł na 7 stronach dyskusję wyników badań, zaś same już wyniki zostały zaprezentowane w rozdziale 10-tym.

3. Merytoryczna ocena pracy

Badania przeprowadzone w ramach przygotowywania rozprawy doktorskiej opierają się na przygotowaniu danych archiwalnych w formie projektu bazodanowego, co pozwoliło następnie na analizę danych sejsmicznych i otworowych podczas reambulacji archiwalnych modeli strukturalnych, sporządzeniu modeli parametrycznych i na modelowaniu sieci naturalnych spękań. Tekst rozprawy jest napisany w zdecydowanej większości poprawnym językiem. Na pochwałę zasługują zawarte w rozprawie opisy niektórych metod, do których niewątpliwie należy fragment tekstu opisujący działanie algorytmu śledzenia mrówek.

Do najważniejszych zadań jakie zostały wykonane przez Doktoranta należy zaliczyć wykonanie obliczeń zmienności modułu Younga i współczynnika Poissona oraz 5 wariantów zmienności kruchości w wytypowanych 4 otworach wiertniczych (Opalino-2, Opalino-3, Opalino-4 i Lubocino-1).

Należy w tym miejscu podkreślić, że rozprawa doktorska jest bardzo dobrze ilustrowana, wykonanie 17-stu tabel, 98 figur oraz 11 załączników graficznych wymagało ogromnego nakładu pracy, jak i świadczy o dużej biegłości Doktoranta w posługiwaniu się wymagającymi programami komputerowymi.

Tak duża ilość poddanych analizie danych pozwoliła Autorowi rozprawy na wyciągnięcie szeregu ważnych wniosków, m.in. dotyczących zmian dynamicznych wartości modułu Younga i współczynnika Poissona w obrębie formacji z Pucka i Pelplina w stosunku do głębiej występujących formacji skalnych. Doktorant ponadto wskazał słusznie, że różnice te wynikają ze zmienności składu mineralnego. Na kolejne ważne obserwacje pozwalają wykonane obliczenia krzywych kruchości K1 i K2 oraz krzywych indeksu kruchości K3, K4 i K5.

Cennym zabiegiem było wykonanie przez Doktoranta krzywej K2 w oparciu o zmodyfikowany przez Doktoranta wzór Rickmana i in. (2008), uwzględniający urealnione wartości modułu Younga i współczynnika Poissona dla całego analizowanego pakietu skał

w obrębie badanych otworów wiertniczych. Pozwoliło to na uzyskanie informacji o kruchości najpełniej odzwierciedlającej rodzaj skał, co jest zgodne z obserwowanymi wartościami parametrów sprężystych. Słuszność wyboru sposobu obliczenia wartości średniej kruchości K2 potwierdza m.in. wykonana mapa (Fig. 8.29), która w sposób precyzyjny wskazuje różnice w rozprzestrzenieniu tych wartości w obrębie formacji mułowców z Sasina. Dobrze zaprojektowane i przeprowadzone badania pozwoliły Doktorantowi na sformułowanie ważnego wniosku, że modele K2 i K5 w poprawny sposób opisują utwory ordowiku i syluru na badanym obszarze.

W rozprawie zwracają uwagę wyniki uzyskane w związku z wykonaniem szczegółowego modelu strukturalnego, obejmującego obszar wokół otworu wiertniczego Lubocino-1, a mającego za zadanie rozpoznanie sieci spękań naturalnych, które powinny być brane pod uwagę w związku ze szczelinowaniem przeprowadzonym w otworze Lubocino-2H. Uzyskane w wyniku modelowań mapy gęstości dla poszczególnych formacji skalnych: ordowickich formacji wapienia z Kopalina, mułowca z Sasina, z Prabut oraz sylurskich formacji z Jantaru i mułowca z Pasłęka umożliwiają nie tylko analizę gęstości, ale i azymutów bieęgów spękań, co ma duże znaczenie podczas projektowania zabiegów szczelinowania.

Za równie ważne należy uznać obserwację poczynioną przez Doktoranta, dotyczącą wzrostu wartości współczynnika sigma w obrębie formacji mułowców z Sasina w strefie objętej szczelinowaniem hydraulicznym. Na podstawie tej obserwacji Doktorant sformułował wniosek dotyczący możliwości zwiększenia ilości nowopowstających spękań indukowanych powstających w wyniku zabiegu szczelinowania. Możliwa interakcja, na którą Doktorant zwrócił uwagę, między spękaniami naturalnymi a spękaniami indukowanymi, co może zwiększać objętość stref objętych deformacjami jest cennym spostrzeżeniem. We wnioskach Autora do najważniejszych osiągnięć należy wskazać możliwość uzyskania wiarygodnego modelu średniej kruchości dzięki zastosowaniu zmodyfikowanego przez Niego wzoru Rickmana i in. (2008).

Uwagi krytyczne

W rozprawie można znaleźć wiele cennych spostrzeżeń, które należy uznać jako ważne osiągnięcia. Oprócz tych pozytywnych osiągnięć w rozprawie występują również słabsze elementy.

Uwagi szczegółowe

Pierwsza uwaga dotyczy stosowanej przez Doktoranta terminologii odnoszącej się do spękań, szczelin i pęknięć. Terminy spękania i szczeliny są bardzo bliskimi terminami, z czego wynika możliwość różnego stosowania tych terminów. W języku angielskim są to odpowiednio

fracture i fissure (patrz Dadlez i Jaroszewski 1994, str. 215). Wojciech Jaroszewski wskazał, że słowo szczelina jest słowem potocznym, które „...nie ogranicza się tylko do spękań (np. szczeliny międzyławicowe). W niektórych polskich źródłach spękania i szczeliny rozumie się synonimicznie, i wówczas ogół zjawisk spękania określa się jako szczelinowatość”. Rozważania te wskazują, że powszechniej stosowanym terminem w geologii strukturalnej jest termin spękania (ang. fracture), a termin szczeliny powinien być używany w ścisłych przypadkach np. gdy opisujemy proces szczelinowania. Wymienne stosowanie tych terminów przez Autora prowadzi do zamieszczenia tytułów rozdziałów 5 i 8.3.3 rozprawy, odpowiednio: Sieć szczelin naturalnych i Model naturalnej sieci spękań w modelu lokalnym. Doktorant powinien również podjąć decyzję, czy termin naturalny dotyczy sieci czy spękań?

Podobnie niezrozumiałym terminem jest termin zestaw szczelin. Czy Autor miał na myśli zespoły spękań? Doktorant powinien się również wystrzegać określeń typu „...wyróżnić można główny zespół oraz zrotowane względem niego zespoły poboczne”. Termin rotacja zespołów spękań sugeruje ich obrót wywołany jakimś czynnikiem tektonicznym np. ciągnięciem przyuskokowym, co może spowodować ich rotację np. wokół osi pionowej. Czyli powinniśmy raczej zdecydować się na opisanie zespołów z podziałem na główny i drugorzędne, co należy również wytłumaczyć, z czego wynika ten podział.

Innym, nie do końca zrozumiałym określeniem jest stosowanie przez Autora określeń np. str. 4 „...Łądowa część basenu bałtyckiego”. Doktorant nie podaje ściśle do jakiego czasu odnosi się to stwierdzenie, co czyni to zdanie lekko zastanawiającym. Autor stosuje również termin obniżenie bałtyckie (Fig. 2.5), co też powoduje pewną konsternację, czego dotyczy to określenie.

Podobnie można nie do końca zrozumieć, czy Autor dopuszcza istnienie uskoku Łaby, bo opisuje go jako lineament Łaby (str. 5).

Pewną niekonsekwencją jest stosowanie przez Doktoranta symboli opisujących naprężenia np.: maksymalne naprężenie poziome na str. 28 jest opisywane jako σ_H , a na str. 30 już jako S_H . Podobnie Autor postępuje w przypadku cytowania niektórych prac: np. na str. 31 jest opisany wzór stworzony przez Rickmana i in. (2008), ale już na dalszych stronach współautorzy nie są wskazywani, choć w w/w pracy jest ich czterech. Niekonsekwencja w pracy jest zauważalna też w sposobie odmieniania obcych nazwisk np. „Younga’a” i „Wells’a”, gdy kilka stron dalej jest już stosowana poprawna forma odmienionego nazwiska: „Younga”.

Kolejne drobne uwagi wiążą się z zauważalną dużą ilością literówek w tekście. Nie wpływa to w istotny sposób na zrozumienie pracy, ale wskazuje na nieco pospieszny tryb

przygotowywania rozprawy. Przytoczę tu parę przykładów literówek np.: str. 4 „stosukowo”, str. 8 „Rodonii”, str. 17 „temu sytemu uskokowego”, str. 48 „pietra strukturalne”.

Do drobnych uwag należy też dodać brak podanej stratygrafii na szeregu figurach np.: 7.1, 8.34, 8.35, 8.46, 9.3, Zał. 1, 2, 3, 4, 5. Można się jej domyślać, ale powinno być to wyraźnie pokazane, choćby symbolami.

Doktorant prowadząc badania dotyczące danego obszaru powinien odnieść się do wszystkich prac, które rozpatrują podobne czy też te same zagadnienia. Prace te mogłyby posłużyć jako element cennej dyskusji. W rozprawie zabrakło m.in. prac:

Cyz M., Mulińska M., Pachytel R., Malinowski M. 2018. Brittleness prediction for the Lower Paleozoic shales in northern Poland. *Interpretation* 6, 3, SH13–SH23,

Bobek K. and Jarosiński M. 2018. Parallel structural interpretation of drill cores and microresistivity scanner images from gas-bearing shale (Baltic Basin, Poland). *Interpretation*, 6, 3, SH25–SH38,

Cyz M. and Malinowski M. 2018. Seismic azimuthal anisotropy study of the Lower Paleozoic shale play in northern Poland. *Interpretation*, 6, 3, 1-12.

Autor powinien się np. odnieść do diagramu spękań zamieszczonego przez Cyz i Malinowskiego (2018) na figurze 11, analizowanego w otworze Lubocino-1 podobnie jak to poczynił Doktorant przy pomocy XRMI.

W swojej pracy doktorskiej Autor zamieścił szereg interesujących obserwacji dotyczących sieci uskoków. Nie ustrzegł się jednak przed daleko idącymi uproszczeniami. Na przykład na ważnej figurze 3.3. pokazującej Mapę strukturalną stropu formacji z Jantaru są pokazane ślady uskoków, ale całkowicie brakuje tu objaśnienia ich kinematyki. W literaturze cytowanej przez Autora były już podane takie informacje.

Zastosowane w pracy doktorskiej modelowania strukturalne, które były najważniejszym punktem pozwalającym na prawidłowe przeprowadzenie modelowań parametrycznych, zostały oparte o metodę modelowania uskoków CPG (ang. Corner Point Grid) w programie Petrel. Autor słusznie wskazał na początku rozprawy na ograniczenia wynikające ze stosowania tej metody, ale jednak powinien przeprowadzić dyskusję, gdzie w obrębie modelu możemy spodziewać się słabszych wyników w związku z zastosowaną metodą.

W badanym obszarze dominują uskoki odwrócone i prawoskrętne uskoki przesuwcze (np. Konon i in. 2021). Uskoki te przecinają różne wiekowo formacje skalne. Analiza profili sejsmicznych sugeruje brak możliwości przecinania przez uskoki odwrócone części tych formacji skalnych. Przykładowo uskoki odwrócone występujące np. w skrzydłach antykliny

Opalina nie przecinają raczej pakietów warstw występujących ponad stropem sylurskiej formacji z Jantaru. Z kolei występująca pomiędzy otworami Opalino-3 i 4 a Lubocino-1 strefa uskoku przesuwczego, przecina na pewno również młodsze skały należące do ogniwa Redy i prawdopodobnie nieco wyżej ponad nim. To pokazuje na różnice w możliwości występowania uskoku w obrębie badanego górotworu. Modele Autora obejmują profil skał poniżej sylurskiego ogniwa Redy. Wydaje się, że Autor powinien rozważyć brak uskoku odwróconych w kilkuset metrowym pakiecie skał ponad stropem sylurskiej formacji z Jantaru.

Jak już wspomniałem Doktorant wskazał na początku rozprawy na niedoskonałości zastosowanej metodyki pisząc, że trudność sprawia ujęcie „...w jednym modelu strukturalnym dwóch niezależnych przestrzennie generacji uskoku (dwa i więcej piętra strukturalne), ale należy podkreślić, że brak tych uskoku może wpłynąć na wyniki modelowań parametrycznych obejmujących ten pakiet skał”. Może w przyszłości należy jednak rozważyć wykonanie dwóch modeli strukturalnych uwzględniających różnice w głębokości występowania uskoku zrzutowych.

Ważną część rozprawy stanowią spękania pionowe opisywane przez Doktoranta. Są one ważnym elementem rozważań, decydującym np. o sukcesie zabiegu szczelinowania hydraulicznego. Autor nie odniósł się jednak w żadnym fragmencie pracy do genezy tych spękań. Nie wiemy z pracy, jak mogły powstać, w wyniku jakich procesów tektonicznych?

To jest punkt, w którym należy też zadać Autorowi ogólne pytanie, kiedy powstały struktury tektoniczne w obrębie badanego polskiego fragmentu basenu bałtyckiego? Doktorant podał w opisie budowy i ewolucji tektonicznej, że „...system głównych stref uskoku basenu bałtyckiego powstał w lochkowie, co dokumentują dane sejsmiczne z jego litewskiej, łotewskiej i rosyjskiej części a następnie reaktywowany w późnym karbonie (Poprawa i in. 2006). Powyżej omówione założenia tektoniczne determinują styl strukturalny pokrywy osadowej, szczególnie jej kaledońskiego kompleksu strukturalnego, który jest elementem analizy w niniejszej rozprawie”

Tak, należy zgodzić się z Autorem, że to prawdopodobny scenariusz, ale nie uwzględniono w nim obszaru polskiej części basenu bałtyckiego, który jest bliższy w stosunku do kaledońskiego frontu deformacji (Mazur et al. 2016). Doktorant powinien rozważyć sugestię zawartą w artykule Konona i in. (2021), że stadium powstawania fałdów i związanych z nimi uskoku odwróconych w tej części basenu mogło być wcześniejsze, niż podaje to Doktorant. Taką możliwość sugeruje obecność ponad skrzydłem rosnącej antykliny Opalina około 100 metrowej syntektonicznej sekwencji warstw należących do sylurskiej formacji z Pucka (Pridoli).

Do krytycznych uwag należy dodać również nieco zachowawcze podejście do stworzonych przez Doktoranta map wartości średniej kruchości. Autor podał, że dużym stopniem zaufania obdarza wyniki otrzymane na podstawie modelu kruchości K2, ale nie podjął On próby wytłumaczenia, z czego mogą wynikać różnice w wartościach średniej kruchości na mapie np. 8.29. Przykładowo, bardzo ciekawym obszarem, gdzie widoczny jest wzrost wartości średniej kruchości K2 jest obszar położony na północ od otworu Opalino-2. Taka podjęta próba byłaby bardzo cennym efektem przeprowadzonych analiz w tej rozprawie doktorskiej i ważnym wnioskiem pozwalającym lepiej prognozować możliwość występowania podobnych obszarów.

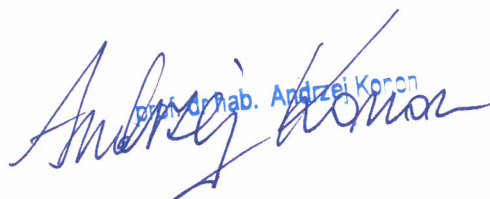
4. Wnioski końcowe

Reasumując, stwierdzam, że rozprawa Pana mgr. inż. Gabriela Ząbka poszerza znacznie wiedzę na temat możliwości i korzyści płynących z zastosowania modeli parametrycznych, szczególnie pod kątem przygotowania, a następnie oceny wykonania zabiegów szczelinowania hydraulicznego. Należy również podkreślić, że rozprawa doktorska zawiera szereg bardzo interesujących elementów stanowiących niewątpliwie oryginalny dorobek Autora.

Jednoznacznie stwierdzam, że praca doktorska Pana mgr. inż. Gabriela Ząbka pt. „Modelowania parametrów geomechanicznych skał syluru i ordowiku na wybranych obszarach basenu bałtyckiego oraz ich wykorzystanie w prospekcji naftowej” spełnia warunki i wymagania Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku (Dz.U. z 2017 r., poz. 1789 z późn. zm.) o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki.

Recenzowana rozprawa doktorska spełnia warunki i wymagania zapisane w art. 13-tym Ustawy w brzmieniu: „...*Rozprawa doktorska, przygotowywana pod opieką promotora albo pod opieką promotora i promotora pomocniczego, powinna stanowić oryginalne rozwiązanie problemu naukowego lub oryginalne rozwiązanie problemu w oparciu o opracowanie projektowe, konstrukcyjne, technologiczne, lub oryginalne dokonanie artystyczne, oraz wykazywać ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w danej dyscyplinie naukowej lub artystycznej oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej*”.

Biorąc pod uwagę spełnienie tych warunków i wymagań oraz moją pozytywną ocenę rozprawy doktorskiej, wnioskuję o przyjęcie rozprawy doktorskiej przez Radę Dyscypliny Naukowej „Nauki o Ziemi i Środowisku” Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie oraz dopuszczenie Pana mgr. inż. Gabriela Ząbka do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.


mgr. dr hab. Andrzej Koron