

Prof. dr hab. inż. Jadwiga Jarzyna
Katedra Geofizyki
Wydział Geologii Geofizyki i Ochrony Środowiska
Akademia Górniczo-Hutnicza im Stanisława Staszica w Krakowie

Recenzja

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Kingi BOBEK pt. Characteristics of serial fractures distribution in mechanically stratified shale complexes based on borehole data analysis from the Baltic Basin, Poland

Recenzja została wykonana na zlecenie Zastępców Dyrektora Państwowego Instytutu Geologicznego – Państwowego Instytutu Badawczego w Warszawie ds. Badań i Rozwoju – dr. hab. Piotra Szreka oraz ds. Administracyjno-Ekonomicznych – mgra Mirosława Piskorza na podstawie umowy z dnia 26 maja 2023 r. Wykonującej recenzję przekazano plik zawierający rozprawę doktorską oraz życiorys Doktorantki, Listę publikacji i Oświadczenie uzasadniające wkład autorów w powstanie złożonych publikacji.

Uwagi ogólne

Rozprawa doktorska obejmuje 19 stron tekstu w j. angielskim oraz 4 Appendixy A-D, zawierające 3 artykuły opublikowane w latach 2018-2021, w czasopismach o zasięgu międzynarodowym (2 – w Geological Quarterly, 1 – Interpretation) oraz jeden manuskrypt przyjęty do druku w Biuletynie AAPG.

Appendix A - Bobek K., & M. Jarosiński, 2021. Modifications of methods for the fracture analysis from borehole data in application to shale formations. Geological Quarterly, 65: 23, doi:10.7306/gq.1591,

Appendix B - Bobek K., & M. Jarosiński, 2018. Parallel structural interpretation of drill cores and microresistivity scanner images from gas-bearing shale (Baltic Basin, Poland). Interpretation, 6, 1- 14, doi: 10.1190/INT-2017-0211.1,

Appendix C - Olkowicz M., K. Bobek, M. Jarosiński, R. Pachytel, 2021. Comparison of joint sets orientation in the Lower Paleozoic shales exposed in Scania (SW Sweden) and concealed in N Poland: a multimethodological approach. Geological Quarterly, 65: 63, doi: 10.7306/gq.1632,

Appendix D - Jarosiński M., K. Bobek, A. Głuszyński, K. Sowizdzał, T. Słoczyński, in press. Fracture stratigraphy, stress and strain evolution in shale succession of the Lower Paleozoic Baltic Basin (Poland). AAPG Bulletin, doi: 10.1306/10112221140.

Na podstawie załączonego oświadczenia uzasadniającego wkład autorów w powstanie złożonych publikacji, stwierdzam udział Doktorantki jako 205/400 %, co stanowi 51,25 %.

W pracy przedstawionej w Appendix B (r. 2018) udział Doktorantki był największy – 80 % i dotyczył przeprowadzenia profilowania strukturalnego rdzeni wiertniczych, interpretacji strukturalnej elektrycznego obrazowania ścianki otworu sondą XRMI, analizy porównawczej wyników interpretacji strukturalnej obrazu XRMI i rdzeni wiertniczych. Podobnie, w pracy przedstawionej w Appendix A (r. 2021, udział 75 %) Doktorantka wykonała profilowanie strukturalne rdzeni wiertniczych i interpretację strukturalną obrazów XRMI. Także opracowała i wykonała testowanie kodu (MatLab, Python) do wyznaczania spękań widocznych w rdzeniu i na obrazie XRMI na podstawie kąta krytycznego. Również testowała algorytm do projekcji ważonych diagramów rozetowych i algorytm do tworzenia profili intensywności zeszcelinowania. W pracy przedstawionej w Appendix C (r. 2021, udział 15%) Doktorantka pomierzyła sieci spękań w odsłonięciach kompasem geologicznym oraz wykonała analizy statystyczne danych zebranych z odsłonięć. Przeprowadziła także

interpretację struktur tektonicznych na rdzeniach wiertniczych i obrazach XRMI. W pracy przedstawionej w Appendix D (w druku, udział 35 %) wykonała analizę sieci spękań i innych struktur tektonicznych na rdzeniach wiertniczych i w obrazach XRMI oraz opracowała uzyskane wyniki. Także przeprowadziła analizę danych geofizyki otworowej.

Ponieważ wszystkie prace przeszły pozytywną weryfikację recenzentów i zostały opublikowane/przyjęte do druku w renomowanych czasopismach w recenzji Rozprawy Doktorskiej skupiłam się na osiągnięciach Doktorantki. Za najważniejsze pod względem wykazania zdolności Doktorantki do pracy twórczej oraz wprowadzenia nowości w przetwarzaniu informacji pochodzących z sondy do elektrycznego obrazowania ścianki otworu (XRMI) dla ich głębszego wykorzystania w interpretacji geologicznej uważam dwie pierwsze prace. W dwóch pozostałych Doktorantka wykorzystwała metody opracowane i sprawdzone wcześniej do przetwarzania danych otworowych i włączenia wyników do interpretacji geologicznej.

Omówienie Rozprawy Doktorskiej

Rozprawa składa się z 9. rozdziałów.

W Rozdziale *Introduction* Doktorantka krótko omówiła wybrane pozycje literatury z ostatnich lat, dotyczące analiz struktur tektonicznych w warstwach geologicznych, w szczególności w łupkach. Wspomniała też historyczną pracę Ortona z r. 1899, w której autor zwrócił uwagę na znaczenie naturalnych uskoków i szczelin przy produkcji węglowodorów. Cytowała także prace z okresu wzmożonego zainteresowania produkcją gazu z formacji łupkowych i innych niekonwencjonalnych źródeł węglowodorów oraz konieczności szczelinowania tych formacji. Krótko przedstawiła wybrane cechy spękań ciosowych, popularnych w formacjach osadowych, w szczególności w łupkach: powszechne występowanie w basenach sedymentacyjnych, stabilna orientacja, znaczna liczebność oraz powszechne bliskie występowanie szczelin obok siebie. Podkreśliła, że te cechy pozwalają na rozszerzenie wyników uzyskanych na odsłonięciach, rdzeniach wiertniczych czy z otworowego profilowania - elektrycznego obrazowania ścianki otworu na większą objętość badanej skały zbiornikowej. Na podstawie doświadczeń własnych i współautorów przedstawiła w Rozprawie następujące zagadnienia:

1. Jak poprawić metody strukturalnej analizy danych otworowych, aby uzyskać najbardziej zbliżoną do rzeczywistości charakterystykę naturalnych szczelin,
2. Jak porównać dane z dostępnych informacji otworowych (rdzeni oraz elektrycznego obrazowania ścianki otworu) i wykorzystać informację zawartą w oczywistej rozbieżności tych wyników,
3. Czy wyniki prac nad systemem naturalnych szczelin w Basenie Bałtyckim na obszarze Polski na podstawie danych otworowych i danych uzyskanych z odsłonień w południowo-wschodniej Szwecji są spójne i mogą być podstawą do wyciągania wniosków o charakterze regionalnym,
4. Czy wyniki analiz naturalnych szczelin są przydatne w modelowaniu ewolucji basenów sedymentacyjnych.

Zagadnienia te można potraktować jako tezy w Rozprawie doktorskiej, udowodnione w przedstawionych artykułach.

W Rozdziale *Geological Setting* krótko przedstawiła łupkowe formacje ordowickie i sylurskie w polskiej części basenu bałtyckiego, przewiercone 7. (w ostatniej pracy, Appendix D – 8.) otworami położonymi na lądowym obszarze platformy wschodnioeuropejskiej, w których były prowadzone wszystkie analizy szczelin ciosowych na danych z otworów. Szczegółowy opis formacji znalazł się w każdym artykule z podkreśleniem elementów składu mineralnego, cech geochemicznych i własności sprężystych formacji z Pelplina, Pasłęka, Jantar, Prabut i Sasina, które wpływały na obraz naturalnych szczelin.

W Rozdziale *Joints in the borehole data* zwróciła uwagę na możliwość badania szczelin ciosowych na rdzeniach wiertniczych i na wynikach elektrycznego obrazowania ścianki otworu sondą XRMI. Dane pochodziły z 7. otworów zlokalizowanych blisko siebie. Obejmowały 1361 m rdzeni, z czego 449,64 m stanowiły rdzenie zorientowane na północ oraz 2545 m wyników profilowań elektrycznego obrazowania otworu. Doktorantka skupiła się na badaniu szczelin ciosowych i żył mineralnych rozwiniętych na szczelinach oraz włączyła także płaszczyzny poślizgu. Analiza statystyczna pokazała, że szczeliny o kątach upadu wyższych niż 50° stanowią ponad 95 % rozpoznanych obiektów. Autorka szczegółowo opisała szczeliny, o długości min. 2 cm, które były rozpoznawane na rdzeniach oraz obiekty o długości większej od 5 cm, rozpoznawane na obrazach XRMI, podzielone na klasy A-E, szczegółowo opisane w pracy w Appendix A. Przeprowadzone profilowanie rdzeni oraz interpretacja obrazów mikroopornościowych pozwoliły wyróżnić 3 systemy szczelin: J1 – NNE – SSW o azymucie z przedziału $0-40^{\circ}$, J2 – o azymucie ok. 110° oraz J3 – ok. 60° .

W Rozdziale *Methods for fractures analysis from borehole data* Doktorantka skupiła się na przedstawieniu modyfikacji metod stosowanych do analizy szczelin opracowanych dla skał łupkowych (Appendix A). Podkreśliła, że specyficzne cechy szczelin ciosowych, powszechnych w skałach łupkowych, nie są brane pod uwagę w metodach interpretacyjnych opracowanych dla konwencjonalnych skał zbiornikowych. Prawie pionowa pozycja szczelin ciosowych w warstwowych, niezaburzonych poziomach łupkowych umożliwia pozyskanie wysokości szczelin w pionowych otworach przewiercających prawie poziome formacje łupkowe. Doktorantka napisała programy (korzystając ze środowiska MatLab i Python) dotyczące uwzględnienia błędu związanego z orientacją rdzenia, wysokości szczelin jako wagi przy konstrukcji diagramów rozetowych oraz budowy profili intensywności szczelin ciosowych i zastosowała opracowane korekty w programie Techlog (Schlumberger). Modyfikacje zostały starannie opisane i wytestowane w pierwszym artykule (Appendix A).

W Rozdziale *Comparison of fracture interpretation from borehole core and microresistivity scanner data* Doktorantka przedstawiła ideę kąta krytycznego i proces filtracji danych za pomocą tego parametru, aby zniwelować rozbieżność między wynikami uzyskanymi z badania rdzeni oraz przetwarzania i interpretacji obrazów z sond do obrazowania ścianki otworu. Artykuł w Appendix B (r. 2018), w którym przedstawiono wyniki interpretacji rdzeni i obrazów XRMI zmodyfikowanymi metodami został opublikowany wcześniej niż praca metodyczna w Appendix A, co wskazuje, że sposoby modyfikacji i korekty były już wcześniej opracowane i testowane. Jego treść skupiona jest na porównaniu wyników z obu metod i omówieniu przyczyn rozbieżności. Doktorantka omówiła przypadek, w którym więcej szczelin obserwuje się na obrazie mikrooporności i stwierdziła, że główną przyczyną jest pomijanie szczelin o małej rozwartości na rdzeniach. Zwróciła także uwagę, że szczeliny obserwowane na rdzeniach w warstwowych formacjach mogą być krótsze niż te same obiekty widoczne na obrazie XRMI. Tak może być w przypadku żył mineralnych obecnych na podzielonych rdzeniach, które nie są w całości widoczne. Przedyskutowała także przeciwną sytuację, gdy obserwuje się niższą liczbę szczelin na obrazie XRMI w porównaniu do rdzeni. Taki przypadek ma miejsce w formacjach z Jantaru i Sasina, gdzie wysokooporowy gaz w szczelinach daje taki sam obraz z sondy XRMI jak żyły kalcytowe. Doktorantka zwróciła także uwagę na obecność pirytu w formacji z Jantaru i jego wpływ na obraz XRMI. Podobnie, w formacji z Sasina zaobserwowała wzrost liczby naturalnych szczelin obserwowanych w programie Techlog, wywołany procesem wiercenia. W tej pracy (Appendix B) autorzy zwracają także uwagę na rolę uskoków rozpoznawanych poprzez płaszczyzny poślizgowe.

W Rozdziale *Joint system in the Baltic Basin from Gdańsk Pomerania to Scania* przedstawiona jest praca załączona w Appendix C. Jej celem jest pokazanie ciągłości systemu szczelin obserwowanych i mierzonych w terenie na obszarze Skanii oraz szczelin badanych

na Pomorzu Gdańskim na materiale otworowym. W badaniach łupków z gazem ważnym aspektem jest pokazanie zdolności ruchu mediów w formacji. Udowodnienie ciągłości systemu szczelin w dużym regionie jest bardzo istotną cechą geologiczną i złożową. Doktorantka zastosowała wypracowane wcześniej i wytestowane metody badania obrazów XRMI i połączenie wyników uzyskanych na rdzeniach.

W Rozdziale *Serial fractures vs. sedimentary basin evolution* omówiono pracę przedstawioną w Appendix D. Jej celem było pokazanie, że włączenie analiz szczelinowatości ciosowej do modelowania ewolucji basenu sedymentacyjnego na przykładzie danych z Pomorza Gdańskiego poszerza informację o historii zmian tektonicznych na podstawie 3 epizodów: otwarcia poziomych żył, powstania systemu spękań J1 NNE-SSW oraz systemu J2 WNW-ESE. W pracy zwrócono uwagę, że pojęcie *mechanical stratigraphy* ma znaczenie w formacjach łupkowych i pozwala analizować wyniki w szerszym kontekście kruchości skał łupkowych.

W Rozdziale *General Conclusions* Doktorantka zebrała wnioski wynikające z omówionych publikacji. Pokazała, że postawione problemy zostały rozwiązane.

Rozdział 9. stanowi spis literatury, w którym znajduje się 40 wybranych publikacji, na które Doktorantka powołuje się w tekście Rozprawy Doktorskiej, które zostały wybrane spośród prac cytowanych w 4. ww. artykułach.

Ocena Rozprawy Doktorskiej

Artykuły przedstawione jako Rozprawa Doktorska powstały na bazie danych opracowanych w ramach projektu BG2/SHALEMECH/14, realizowanego w latach 2014-2017 przez konsorcjum, którego liderem był Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, dofinansowanego z NCBiR. Dane do projektu dostarczyło PGNiG S.A. Projekt wchodził w skład programu *Blue Gas*.

Ocena merytoryczna

Wartość naukowa Rozprawy Doktorskiej obejmuje udoskonalenie metod rozpoznawania i analizy ilościowej naturalnych szczelin występujących w formacjach łupkowych. Doktorantka wykazała analityczne podejście przy ocenie uzyskanych wyników. Opracowała poprawki do standardowych metod stosowanych w systemach interpretacyjnych (np. w Techlogu, Schlumberger) do przetwarzania i interpretacji wyników elektrycznego obrazowania ścianki otworu i dopasowała je do specyficznych cech formacji łupkowych. Umiejętnie rozpoznała przyczyny rozbieżności między wynikami oceny szczelinowatości przy profilowaniu rdzeni okiem gołym i uzbrojonym w lupę oraz wynikami interpretacji obrazów pochodzących z ciągłego profilowania oporności ścianki otworu. Zapoznała się i wytestowała możliwości oprogramowania Techlog w zakresie przetwarzania i interpretacji opornościowych obrazów ścianki otworu, co samo w sobie jest dużym osiągnięciem inżynierskim, biorąc pod uwagę złożoność oprogramowania przystosowanego do konkretnego urządzenia pomiarowego i konieczność dopasowania danych pochodzących z innych sond. Opracowała algorytmy do konstrukcji poprawek, przygotowała i wytestowała oprogramowanie oraz umiejętnie połączyła wyniki. Dobra znajomość procedur przetwarzania danych, doskonała znajomość budowy geologicznej w obszarze badań i wiedza statystyczna pozwoliły Jej na analizę wyników łącznie z aspektami mineralogicznymi, geochemicznymi i mechanicznymi. Wykazała intuicję badawczą i umiejętność łączenia wyników pomiarów i geologicznych cech formacji. Pracowała samodzielnie przy profilowaniu rdzeni i przy obróbce wyników profilowania geofizycznego, co pozwoliło Jej na dogłębne zrozumienie przyczyn powstawania konkretnych wyników. Uważam, że powołania Doktorantki na swoje inne prace podkreśla ciągłość Jej rozwoju naukowego.

Przedstawioną do recenzji Rozprawę Doktorską uważam za oryginalne rozwiązanie problemu z zakresu badań pomiarowo – interpretacyjnych w geologii i geofizyce poszukiwawczej. Cel pracy został osiągnięty, a całość rozprawy jest konsekwentną realizacją postawionych tez.

Inne aspekty

Pewnym mankamentem jest brak samodzielnej pracy Doktorantki. W spisie prac publikowanych (7 prac) także nie ma samodzielnego autorskiego opracowania. Współpracę Doktorantki ze specjalistami z innych gałęzi nauk geologicznych oceniam jako ważną i konieczną do rozwoju naukowego.

Rozprawa Doktorska jest napisana poprawnie, przedstawione są najważniejsze zagadnienia, szczegółowo omówione w pracach publikowanych. Postawione są tezy i wykazane jest ich udowodnienie.

W każdym artykule podkreślono zastosowanie praktyczne, związane z wykorzystaniem informacji o szczelinowatości ciosowej dla dokładniejszego rozpoznania i efektywnego zaplanowania szczelinowania hydraulicznego w formacjach łupkowych z gazem, co bardzo podnosi użyteczny charakter prac.

Doktorantka wykazała praktyczne umiejętności w przygotowaniu znakomitych ilustracji, zdecydowanie ułatwiających odbiór publikacji.

Uwagi końcowe

Wysoko oceniam pod względem merytorycznym przedstawione publikacje. Uważam, że współpraca Doktorantki ze specjalistami umożliwiła Jej szerokie, wieloaspektowe spojrzenie na zagadnienie szczelinowatości skał. Nie mam uwag krytycznych odnośnie Rozprawy Doktorskiej. Odczułam niedosyt w zakresie informacji dotyczącej otworów, z których pochodziły dane. W publikacjach, poza jedną, nie wymieniano nazw otworów, a prezentowane położenie na fragmentach map nie pozwoliło na ich dokładną identyfikację. Zatem, informacja podana w Rozprawie, że dane pochodziły z 7. otworów (w ostatniej publikacji, Appendix D, z 8.), nie pozwalała jednoznacznie stwierdzić, że ta siódemka oznacza zawsze te same, czy też inne otwory w każdej publikacji. Zaobserwowane drobne niedociągnięcia edytorskie jak przymiotnik polski – Polish w j. ang. pisany z małej litery, czy brak kompletu oznaczeń na niektórych rysunkach mogę traktować jedynie jako wskazówkę, na co należy zwracać uwagę przy kolejnych publikacjach.

W ramach dyskusji podczas publicznej obrony, biorąc pod uwagę programistyczne przygotowanie Doktorantki, proszę o komentarz w sprawie możliwości zautomatyzowania procesu przygotowania danych z sond do obrazowania ścianki otworu innymi firmami niż Schlumberger i włączenia danych do programu Techlog.

Podsumowanie

Uważam, że rozprawa doktorska mgr inż. Kingi Bobek pt. *Characteristics of serial fractures distribution in mechanically stratified shale complexes based on borehole data analysis from the Baltic Basin, Poland* przedstawia oryginalne rozwiązanie sformułowanych zagadnień. Przebadane problemy dotyczące charakterystyki naturalnych szczelin (szczelin ciosowych) w skałach, w szczególności w łupkach, posiadają nie tylko istotne znaczenie poznawcze, ale także użytkowe, co pozwala na zastosowanie uzyskanych wyników w jednostkach przemysłowych. Doktorantka wykazała wiedzę teoretyczną i doświadczenie praktyczne jako interpretatorka wyników elektrycznego obrazowania ścianki otworu i innych profilowań geofizycznych oraz pomiarów szczelin na rdzeniach. Pokazała umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Stwierdzam zatem, że spełnione zostały wymagania formalne stawiane pracom doktorskim i wnoszę o przyjęcie Rozprawy Doktorskiej i dopuszczenie mgr inż. Kingi Bobek do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora.

Kraków, 07.07.2023