

2015/26285/2023

Prof. dr hab. Stanisław Mazur

Instytut Nauk Geologicznych PAN

Ośrodek Badawczy w Krakowie

ul. Senacka 1, 31-002 Kraków

e-mail: ndmazur@cyf-kr.edu.pl

Kraków, 10/07/2023

Ocena 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”, przygotowanej pod opieką naukową dr. hab. Marka Jarosińskiego prof. Państwowego Instytutu Geologicznego - Państwowego Instytutu Badawczego.

Zakres i cel pracy

Recenzowana rozprawa składa się z trzech publikacji, które ukazały się w latach 2018-2021 oraz z jednego zaakceptowanego manuskryptu, który zostanie opublikowany w roku 2023. Trzy opublikowane prace ukazały się w krajowych i zagranicznych periodykach naukowych o współczynnikach wpływu w granicach 1.47 – 1.58:

1. **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 (*Impact factor: 1.58*)
2. **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 (*Impact factor: 1.47*)
3. 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 multi-methodological approach. *Geological Quarterly*, 65: 63, doi: 10.7306/gq.1632 (*Impact factor: 1.58*)

W dwóch spośród tych trzech prac doktorantka była pierwszą autorką.

Czwartym elementem rozprawy jest manuskrypt zaakceptowany do druku w AAPG Bulletin:

Jarosiński M., **K. Bobek**, A. Głuszyński, K. Sowizdżał, 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 (*Impact factor: 3.86*)

Zakres prac badawczych opisanych w recenzowanej rozprawie obejmował:

1. Dostosowanie metod analizy strukturalnej tak, aby były bardziej wiarygodne w charakteryzowaniu naturalnych spękań na podstawie danych otworowych.
2. Porównanie dostępnych danych otworowych – opisu rdzenia i profilu mikrooporności oraz ustalenie, które z tych danych są bardziej wiarygodne i jak postępować w przypadku niespójności pomiędzy nimi.

3. Ustalenie czy system spękań opisany na podstawie danych otworowych z basenu bałtyckiego w Polsce jest porównywalny z tym występującym w odsłonięciach powierzchniowych w południowej Szwecji.
4. Ustalenie w jaki sposób analizę sieci szczelin bazującą na danych otworowych można zintegrować z historią subsydencji, modelem generacji węglowodorów oraz rekonstrukcją ewolucji naprężeń i odkształceń basenu sedymentacyjnego.

Motywacją dla podjęcia tych badań był fakt, że nowoczesne oprogramowanie wykorzystywane przez firmy naftowe ignoruje spękania w modelowaniu Discrete Fracture Network ze względu na ich małe rozmiary. Ponadto dostępne rozwiązania komercyjne często nie są dostosowane do interpretacji i przetwarzania danych na temat spękań ograniczonych do pojedynczych wydzieli litostratygraficznych. Wyniki przeprowadzonej analizy sieci spękań zostały wykorzystane w rekonstrukcji sylurskiej historii tektonicznej basenu bałtyckiego.

Struktura i zawartość rozprawy

Tekst rozprawy obejmuje 106 stron druku, na które składają angielskojęzyczne omówienie wyników przeprowadzonych badań oraz cztery wymienione wyżej artykuły naukowe. Streszczenia rozprawy w języku polskim i angielskim dostarczono na osobnych kartach.

Angielskojęzyczne omówienie wykonanych badań i otrzymanych rezultatów obejmuje łącznie 16 stron tekstu na które składa się 8 krótkich rozdziałów: (1) Wstęp, (2) Położenie geologiczne, (3) Spękania w danych otworowych, (4) Metody analizy spękań na podstawie danych otworowych (będący streszczeniem publikacji nr 1), (5) Porównanie interpretacji spękań z rdzenia odwiertu i danych skanera mikrooporności (będący streszczeniem publikacji nr 2), (6) System spękań w basenie bałtyckim od Pomorza Gdańskiego do Skanii (będący streszczeniem publikacji nr 3), (7) Spękania a ewolucja basenu sedymentacyjnego (będący streszczeniem publikacji nr 4), (8) Wnioski ogólne oraz spis wykorzystanej literatury. Ten ostatni obejmuje 40 pozycji opublikowanych w czasopiśmie zagranicznych i krajowych. Ta część rozprawy zawiera także jedną schematyczną figurę.

Publikacja 1

W pierwszej pracy przedstawiono nowe podejście do analizy szczelinowatości dostosowane do spękań warstwowych rozpoznanych w danych otworowych. Głównym tematem artykułu jest prezentacja nowych metod analizy statystycznej sieci spękań, takich jak ważone wykresy róz kierunków oraz zmodyfikowana metoda średniej ruchomej do obliczeń gęstości spękań. Poza tym w artykule omówiono koncepcję kąta krytycznego, decydującego o tym, które spękania widoczne w obrazie skanera mikrooporności będą również widoczne w rdzeniu odwiertu. Na koniec pracy poruszono problem efektywności orientacji rdzenia i analizy wynikających z tego błędów pomiarowych w diagramach rozetowych. Wszystkie wymienione wyżej zmodyfikowane metody zostały opracowane przy użyciu oprogramowania TechLog oraz kodów zaimplementowanych w językach programowania MatLab i Python. Ich zastosowanie ujawniło rozwarstwienie gęstości spękań, które w niektórych przypadkach może nie być bezpośrednio obserwowane ze względu na niedostatek danych z otworów wiertniczych.

Publikacja 2

Głównym tematem drugiego artykułu jest porównanie wyników analizy strukturalnej wykonanej dla obrazu mikrooporności i odpowiadającego mu rdzenia odwiertu. W pracy wyjaśniono przyczyny

różnic w gęstości spękań otrzymanych dla tych samych formacji z obu zestawów danych. Opracowana metodologia, opisana w publikacji nr 1, posłużyła do oceny wiarygodności wyników analizy strukturalnej wykonanej na rdzeniach otworów wiertniczych i obrazach mikrooporowych. Ważone diagramy rozetowe wskazują na stabilny kierunek orientacji spękań pomiędzy badanymi otworami, określony na podstawie obrazów mikrooporowości i zorientowanego rdzenia wiertniczego. Jednak wyniki obliczeń gęstości spękań wyznaczone dla próbek rdzeniowych i obrazów skaningowych z odpowiednich przedziałów głębokości ujawniły nieoczekiwane istotne rozbieżności. Wykorzystując opracowaną metodę filtracji „kąta krytycznego” sprawdzono, czy rozbieżności te można wytłumaczyć różnicą w przestrzeni obserwacyjnej obrazu skanera i rdzenia odwiertu. Badania miały więc na celu wyjaśnienie ujawnionych różnic i ocenę kompletności charakterystyki sieci spękań na podstawie komplementarnych zestawów danych otworowych. Systematycznie obserwowana przewaga intensywności spękań w obrazie skanera nad profilem rdzenia jest tłumaczona dużą liczbą drobnych niespękanych żył, które lepiej rejestruje skaner niż nieuzbrojone oko. Na odwrót, gęstość spękań w przedziałach wzbogaconych w substancję organiczną (TOC) jest zawsze wyższa w rdzeniu niż w obrazie skanera, ze względu na wzrost rezystywności związany z obecnością gazu.

Publikacja 3

W trzecim artykule porównano charakterystykę spękań uzyskaną dzięki analizie danych otworowych z Pomorza z wynikami badań odsłoneń w południowej Szwecji przeprowadzonych z wykorzystaniem fotogrametrii i interpretacji zdjęć satelitarnych. Badania pozwoliły przetestować spójność orientacji zestawów spękań pomiędzy tymi regionami. Aby ekstrapolować wyniki obserwacji z odwiertów punktowych na większy obszar rezerwuaru łupkowego, konieczne było potwierdzenie, czy w skali basenu sedimentacyjnego można wyróżnić analogiczne zestawy spękań. Obserwacje terenowe wykonano w południowej Szwecji, gdzie na powierzchni są odsłonięte sekwencje łupków o porównywalnej litostratygrafii. Zmierzono atrybuty spękań, takie jak kąt nachylenia i/lub azymut biegu, z jedenastu odsłoneń. Ze względu na lokalnie ograniczony dostęp do ścian odkrywek parametry spękań zostały zmierzone trzema różnymi metodami przy użyciu: ręcznego kompasu geologicznego, fotogrametrycznego modelu cyfrowego 3-D oraz zdjęć satelitarnych dostarczonych przez Google Earth. Po zebraniu i przetworzeniu wszystkich danych porównano wyniki pod kątem oceny skuteczności metod pomiarowych i podobieństwa sieci spękań z otworów wiertniczych na Pomorzu Gdańskim i odsłoneń w Skanii. W efekcie statystycznego zestawienia pomiarów zidentyfikowano pięć wspólnych zestawów spękań (oznaczonych jako JS 1 do JS 5), które można prześledzić pomiędzy Pomorzem a południową Szwecją. Stwierdzono, że trzy wspólne zestawy, JS 1 przebiegający NNE-SSW, JS 2 przebiegający WNW-ESE i JS 3 o orientacji NNW-SSE, dominują w większości lokalizacji. Mając najbardziej niezmienną orientację, zestawy JS 1 i JS 3 posłużyły jako wskaźniki możliwej rotacji bloków tektonicznych lub pola naprężeń w badanym regionie.

Publikacja 4

Czwarta publikacja jest poświęcona powiązaniu genezy spękań z poszczególnymi etapami ewolucji basenu, wraz z ewolucją paleo-naprężeń i odkształceń, w tym stratygrafii mechanicznej i anizotropii sprężystej. Modelowanie ewolucji basenu bałtyckiego wykazało, że jego historia tektoniczna obejmuje trzy główne epizody: (1) otwarcie żył poziomych, (2) utworzenie zestawu spękań J1 przebiegającego NNE-SSW i (3) utworzenie zestawu spękań J2 o biegu WNW-ESE. Profilowanie strukturalne rdzeni i obrazów skanera mikrooporowości z ośmiu odwiertów poszukiwawczych ujawniło, że rozkład intensywności spękań, żył równoległych do uwarstwienia i rys ślizgowych jest

kontrolowany stratygraficznie i koreluje się z intensywnością generowania węglowodorów. Kryteria geomechaniczne powstawania spękań rozpatrywane łącznie z uwarunkowaniami tektonicznymi i historią generacji węglowodorów umożliwiły rekonstrukcję ewolucji naprężeń i ciśnienia porowego w mechanicznie uwarstwionym i anizotropowym ośrodku skalnym. Dzięki integracji wyników modelowania tektonicznego i basenowego zidentyfikowano wyjątkowy okres w historii basenu bałtyckiego, w którym szczytowa produkcja gazu i maksymalne nadciśnienie współwystępowały z reżimem naprężeń wymagany dla powstania spękań.

Podsumowanie i wnioski

Opracowanie nowych metod interpretacji spękań było możliwe dzięki zbiorowi danych, w tym długim profilom rdzeni odwiertów i obrazom skanera mikrooporowego, dostarczonym przez Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo. Recenzowana rozprawa oferuje rozszerzony zakres analiz strukturalnych oraz zwiększenie ich precyzji. Dotyczy to głównie analizy spękań powszechnie spotykanych w łupkach, których wpływ na efekty szczelinowania hydraulicznego musi być bardzo istotny, ze względu na ich penetracyjny charakter. W pionowych otworach poszukiwawczych było możliwe określenie rzeczywistej wysokości pionowych spękań, który to parametr został włączony do analizy statystycznej gęstości spękań i wykresów rozetowych ich orientacji. Diagramy rozetowe były również ważne w stosunku do apertury żył, a błąd w pomiarach biegu spękań zaprezentowano graficznie.

Jednoczesne profilowanie rdzenia odwiertu i skanera mikrooporowości z tego samego interwału głębokościowego ujawniło znaczne rozbieżności w gęstości spękań. Przeanalizowano, w jakim stopniu zjawisko to można przypisać różnicom w przestrzeni obserwacyjnej między rdzeniem a obrazem ze skanera. Wprowadzono nowy parametr „kąt krytyczny” do analizy porównawczej spękań obserwowanych na obrazie skanera i w rdzeniu odwiertu. Chociaż udokumentowano lokalny wpływ tego parametru to okazało się, że litologia, warunki odwiertu i występowanie węglowodorów są głównymi przyczynami różnic w intensywności spękań.

Różne techniki pomiaru orientacji spękań w odsłonięciach powierzchniowych zlokalizowanych w południowej Szwecji wykazały zadowalającą zgodność otrzymanych wyników niezależnie od zastosowanej metody. Pomiar orientacji spękań wykonane ręcznym kompasem geologicznym nie odbiegały znacząco od cyfrowych modeli odsłonień, które dostarczają znacznie bogatszych informacji. Systemy spękań rozpoznane w danych z otworów wiertniczych z Pomorza mają orientację podobną do spękań odsłoniętych w południowej Szwecji. Potwierdzenie występowania systemów spękań o zbliżonej orientacji w skali całego basenu bałtyckiego wskazuje na stabilną propagację naprężeń przez kompleks łupków sylurskich i możliwość ekstrapolacji punktowych obserwacji z otworów wiertniczych na większe obszary basenu łupkowego.

Zastosowanie dokładnej analizy statystycznej spękań i innych powtarzalnych struktur nieciągłych przyniosło korzyści w zintegrowanym modelowaniu genezy spękań na tle ewolucji basenu. Intensywność spękań, luster tektonicznych i żył poziomych pozwoliła na rozpoznanie rozkładu stratygraficznego spękań we wszystkich analizowanych otworach wiertniczych. Przeprowadzone badania wykazały, że generacja gazu ziemnego była głównym czynnikiem kontrolującym nadciśnienie w złożu, powodując następnie otwarcie żył poziomych i naturalne uformowanie się dwóch zestawów spękań pionowych. Ta sekwencja wydarzeń została przypisana relaksacji stresu po ustąpieniu kompresji waryscyjskiej. Kwantyfikacja czynników odpowiedzialnych za naturalne szczelinowanie

doprowadziła do wniosku, że nadciśnienie porowe było zdominowane przez wpływ kompaktacji łupków ze znaczącym udziałem generowania gazu.

Ogólna ocena rozprawy

Rozprawa doktorska prezentuje wyniki bardzo pracochłonnych i czasochłonnych badań z pogranicza geologii strukturalnej i geomechaniki. Nie jest to specjalność geologii, gdzie przy zastosowaniu nowoczesnej technologii można szybko uzyskać atrakcyjne wyniki. Dlatego doceniam ogrom pracy konieczny do przygotowania niniejszej rozprawy i siłę woli doktorantki, której udało się sfinalizować ten projekt. Zgromadzone dane będą mogłyby być w przyszłości wykorzystane zarówno w geologii regionalnej jak i prospekcji za węglowodorami.

Rozprawa dokumentuje wysoki poziom fachowy doktorantki i dobre zrozumienie przez nią stosowanej metodologii oraz tematyki geologicznej podejmowanej w jej badaniach. Mgr inż. Kinga Bobek przetrąła nowe szlaki w zakresie stosowania metod analizy spękań do analizy pola naprężeń tektonicznych w skali lokalnej i regionalnej jak również symulacji odpowiedzi ośrodka skalnego na szczelinowanie hydrauliczne. Podjęła także wątki związane z analizą systemów naftowych w złożach węglowodorów niekonwencjonalnych.

Wszystkie artykuły wchodzące w skład rozprawy doktorskiej prezentują spójny schemat postępowania zalecany przy analizie naturalnych systemów spękań w obrębie niekonwencjonalnych systemów naftowych. Przeprowadzone badania obejmowały zastosowanie nowego podejścia do ilościowej charakterystyki gęstości i orientacji spękań, integrację wyników z danych otworowych i terenowych oraz ich zastosowanie przy modelowaniu basenów. Ewentualne użycie wyników rozprawy w eksploracji może poprawić dokładność estymacji zasobów węglowodorów i symulacji odpowiedzi ośrodka skalnego na szczelinowanie hydrauliczne. Może również lepiej zdefiniować warunki brzegowe dla genezy spękań i związanej z nią ewolucji pola naprężeń i odkształceń. Zaprezentowane wnioski są dobrze uzasadnione wynikami przeprowadzonych analiz.

Zaprezentowane osiągnięcia mają potencjał do stania się punktem wyjścia dla dalszych badań i ewentualnego stworzenia dalszych publikacji. Cała rozprawa jest napisana przy użyciu prawidłowej terminologii fachowej, co świadczy o dobrym opanowaniu przez mgr inż. Kingę Bobek warsztatu badawczego w zakresie geologii strukturalnej i geomechaniki.

Uwagi krytyczne

Oprócz niekwestionowanych osiągnięć, recenzowana rozprawa ma – oczywiście – również swoje strony słabsze. Mają one drugorzędne znaczenie i nie wpływają na pozytywną ocenę pracy. Poniżej wskazuję na te elementy rozprawy, które można uznać za wątpliwe lub dyskusyjne. Omawiam je w takiej kolejności w jakiej pojawiają się w tekście rozprawy.

1. We wprowadzeniu do rozprawy metody są wzmiankowane przed objaśnieniem celu pracy co powoduje pewną konfuzję.
2. Omówienie położenia geologicznego obszaru badań pomija nowsze prace. Mam tu na myśli szczególnie artykuł Batora et al. (2021), który oferuje interpretację odmienną od tej przedstawionej w rozprawie.

3. Autorka nie widzi różnicy pomiędzy 'Trans-European Suture Zone' i 'Teisseyre-Tornquist Zone' co sygnalizuje pomieszanie niektórych pojęć geologii regionalnej. Wynika to być może z braku powołania na klasyczne prace w tym temacie takie jak Berthelsen (1992, 1998) czy Pharaoh (1999).
4. Struktura rozprawy nie wydaje się optymalna. Rozpoczyna ją dwustronicowe wprowadzenie, po który następuje położenie geologiczne długie na półtorej strony oraz jednostronicowa część metodyczna zatytułowana 'Spękania w danych otworowych'. Te wszystkie rozdziały są bardzo krótkie, żeby nie napisać zbyt krótkie. Kolejne 7,5 strony to streszczenie poszczególnych artykułów omawianych kolejno jeden po drugim. Siłą rzeczy ta część nie jest wolna od powtórzeń względem samych artykułów stanowiących załączniki do rozprawy. Poza tym szkoda, że w sytuacji kiedy artykuły są w języku angielskim to rozprawa nie została napisana po polsku. Wyeliminowałoby to niektóre oczywiste podobieństwa do artykułów załączonych do rozprawy. W swojej recenzji powstrzymałem się od wytykania błędów angielszczyzny, która nie jest pierwszym językiem Autorki.
5. W wielu miejscach rozprawa podkreśla aplikowane znaczenie przeprowadzonych badań dla poszukiwań węglowodorów niekonwencjonalnych i oceny parametrów rezerwuarów, jak również dla estymacji efektywności szczelinowania hydraulicznego. Rozprawa nie podaje jednak informacji w jaki sposób wyniki mogą zostać zaimplementowane w przemyśle poszukiwawczym. Manualne powielanie przeprowadzonych badań może nie być dla przemysłu opcją atrakcyjną ze względu na ich czasochłonność. W pracy brakuje bliższego opisu ewentualnych lub realnie działających zastosowań praktycznych.
6. W rozprawie nie ma równania '1' natomiast dwa różne równania mają numer '2'. Myślę, że to jest pomyłka.
7. Przy omówieniu każdego z artykułów nie wyszczególniono zakresu prac przeprowadzonych bezpośrednio przez doktorantkę w ramach zespołów autorskich co nie pozwala na pełną ocenę jej wkładu w wykonanie badań oraz przygotowanie manuskryptów. Doktorantka powinna się też pochwalić stworzeniem kodów do obróbki danych o ile jej udział w ich powstaniu był znaczący.
8. W rozprawie jest napisane, że opracowane modyfikacje metod opisane w publikacji nr 1 posłużyły do oceny wiarygodności wyników analizy strukturalnej wykonanej na rdzeniach otworów wiertniczych i obrazach mikrooporowych przedstawionych w publikacji nr 2. Tymczasem, publikacja nr 2 ukazała się trzy lata wcześniej (2018) niż publikacja nr 1 (2021). Zatem sugerowany związek przyczynowo skutkowy nie jest możliwy.
9. Nie wszystkie prace ujęte w spisie literatury są cytowane w tekście rozprawy. Nie mogłem tego sprawdzić w sposób ilościowy, bo otrzymany przeze mnie plik pdf z rozprawą był uszkodzony i nie dawał się przeszukiwać automatycznie.

Podsumowanie recenzji

Recenzowana rozprawa zawiera oryginalne osiągnięcia badawcze autorki, świadczące o jej dużej wiedzy i opanowaniu warsztatu badawczego w zakresie geologii strukturalnej i, a także o umiejętności samodzielnego prowadzenia badań.

Rozprawa zawiera oryginalne i metodycznie poprawne rozwiązanie zagadnienia naukowego, polegającego na stworzeniu nowego podejścia metodycznego do analizy naturalnych systemów

spękań w obrębie niekonwencjonalnych złóż węglowodorów. Tym samym recenzowana praca jednoznacznie spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim przez Ustawę z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki. (Dz. U. 2003 nr 65 poz. 595). Na tej podstawie recenzent wnioskuje o dopuszczenie mgr. inż. Kingi Bobek do publicznej obrony przedstawionych w jej rozprawie tez.

Stanisław Mazar

Kraków, 10 lipca 2023 r.