

Prof. dr hab. Krzysztof Szamałek
Wydział Geologii, Zakład Geologii Złożowej i Gospodarczej
Uniwersytet Warszawski
02-089 Warszawa
ul. Żwirki i Wigury 93

Recenzja

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Andrzeja Pasternackiego

pt. *Ocena efektywności procesu szczelinowania hydraulicznego w eksploatacji gazu ziemnego z łupków ilastych na podstawie badań mikrosejsmicznych* przygotowana w związku z decyzją Rady Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH w Krakowie z dnia 4 lipca 2016 r. zgodnie z przepisami ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z dnia 22 grudnia 2014 r. poz. 1852 tekst jednolity – Ustawa 2014).

Wprowadzenie

Rozprawa doktorska dr inż. Andrzeja Pasternackiego przygotowana została pod kierunkiem promotora dr hab. inż. Michała Stefaniuka (promotor główny) oraz dr inż. Tomasza Maćkowskiego jako promotora pomocniczego. Recenzowana rozprawa składa się ze 195 stron tekstu (plus załączniki graficzne) podzielonego na 6 rozdziałów merytorycznych oraz spisu wykorzystanej literatury i spisu ilustracji. Ponadto rozprawa zawiera 8 załączników graficznych w postaci map geofizycznych służących wydzieleniu jednostek litologiczno-stratygraficznych w badanym górotworze. Każdy rozdział merytoryczny zawiera liczne podrozdziały i części. W rozprawie zamieszczone są 130 figury oraz 6 tabel. Autor wykorzystał przy przygotowaniu rozprawy 77 pozycji literatury, z czego 67 w języku angielskim. Problematyka zagospodarowania gazu z formacji łupkowych jest młodą dziedziną geologii naftowej dlatego wśród cytowanych pozycji literatury tylko 16 pochodzi sprzed 2000 roku, 7 z lat 2001-2005, 30 pozycji z lat 2006-2010 i 24 pozycje z okresu od roku 2011.

Doktorant podjął w swojej dysertacji ważny problem badawczy o istotnym znaczeniu praktycznym. Chodzi o proces eksploatacji złóż gazu ziemnego z tzw. niekonwencjonalnych złóż tj. łupków gazonośnych w trakcie której dla stymulacji i intensyfikacji wydobycia (utrzymania ciśnienia)

stosuje się zabieg szczelinowania hydraulicznego. Szczelinowanie ma wytworzyć szczeliny w skale macierzystej i je otworzyć oraz utrzymać ich drożność dla migracji węglowodorów poprzez działanie propantów. Ponieważ proces szczelinowania zachodzi na dużych głębokościach i utrudniona jest ocena poprawności wykonania zabiegu, ale także jego efektywności poszukuje się metod, które umożliwiłyby taką obiektywną ocenę i pozwalałyby na utrzymanie produkcji gazu bądź korektę wykonywanych wcześniej zabiegów.

Ocena zawartości merytorycznej rozprawy

Doktorant w obszernym **Wstępie** dokonuje wprowadzenia w problematykę badań mikrosejsmicznych. W pierwszym rzędzie analizuje stosowane nazewnictwo terminologiczne tego obszaru starannie prezentując różnice w ich zakresie i znaczeniu (od mikrosejsmiki do mikrosejsmologii). Wprowadza i właściwie stosuje w rozprawie, w ślad za propozycjami innych autorów (Eisner et al. 2010), termin zdarzenie sejsmiczne. Autor wskazuje także na kontrowersje występujące wśród geofizyków, a dotyczące tego czy istnieją zależności między wielkością produkcji gazu a wielkością strefy zeszczelinowanej wyrażając jednocześnie opinię, iż ten nierozwiązany problem wymaga dalszych badań. Ponadto Autor wymienia wśród założeń swojej dysertacji także określenie możliwości wykorzystania połączonej interpretacji danych mikrosejsmicznych z danymi z sejsmiki refleksyjnej. Ponadto stwierdza on, że identyfikacja *sweet spots* w oparciu o analizę LMR ($\Lambda\text{-}\mu\text{-}\rho$) jest jednym z najważniejszych celów wykonywanych badań. Pan mgr inż. Andrzej Pasternacki wprowadza w tym rozdziale także w metodykę wykonywanych przez siebie badań oraz rodzaj używanych do modelowań narzędzi informatycznych. Wprowadza także informację o szeregu pytaniach i wątkach pobocznych powstałych w trakcie przygotowywania rozprawy (np. ocena efektu *tuningu* w warstwach, w których prowadzona jest eksploatacja, wpływ materii organicznej na parametry sprężyste ośrodka, modelowanie sejsmiczne nieciągłości tektonicznych), które podjął i rozwinął w rozprawie. Autor wykonał szereg modelowań sejsmicznych oraz ich przetworzeń na

użytek procesu efektywnej eksploatacji gazu w rejonie Lubocina (w aspekcie zaprojektowania układu pomiarowego w głębokim otworze monitorującym).

Rozdział 2 poświęcony jest **Metodyce i technice badań monitoringu mikrosejsmicznego** i wskazuje jak ważną rolę odgrywa poszukiwanie i dobór środków oraz metod zbierania danych mikrosejsmicznych dla celów analizy efektywności szczelinowania hydraulicznego. Rozdział składa się z trzech podrozdziałów (*Metody akwizycji danych mikrosejsmicznych, Przetwarzanie rekordów zarejestrowanych w trakcie szczelinowania hydraulicznego w głębokim otworze monitorującym oraz Dyskusja możliwości optymalizacji otworowego układu pomiarowego z wykorzystaniem modelowania sejsmicznego*), a w ich obrębie 6 części. Autor omawia wady i zalety metody powierzchniowej, podziemnej (wglębnej) oraz para-powierzchniowej, wskazując na zastosowania i ograniczenia każdej z metod zbierania danych mikrosejsmicznych. Doktorant bardzo szeroko i z dużą znajomością tematu rozważa (uwzględniając dane literaturowe oraz własne przemyślenia) m.in. zagadnienia związane z rozmieszczeniem pomiarowych urządzeń rejestrujących fale, zakłóceniami antropogenicznymi, geometrią rozmieszczenia czujników na jakość rejestracji, możliwości interpretacyjne i diagnostyczne. W podrozdziale 2.1.2 Doktorant szeroko i wyczerpująco przedstawia założenia i wdrożenie systemu rejestracji powierzchniowej wykorzystywanej w trakcie operacji szczelinowania hydraulicznego w otworze Lubocino-2H. W podrozdziale tym Autor używa jednak cały czas terminów bezosobowych „opracowano, przyjęto, zaprojektowano, wykonano”. Powstaje zasadne pytanie jaki był (jest) udział Doktoranta w tych działaniach. Może być bowiem tak, iż projekt systemu rejestracji opracowano w PGNiG (należy wówczas podać dane dokumentu i autorów), można domniemywać, że Doktorant był w grupie współautorów tego projektu, może być wreszcie tak, że Doktorant sam opracował ten system w ramach projektu *Blue gas* i dlatego nie podaje bliższych danych o autorach. W rozdziale **1 Wstęp** Doktorant stwierdza jedynie, że „w pracy (doktorskiej – przyp.KSZ) wykorzystano wyniki projektów badawczych opracowywanych przez Katedrę Surowców Energetycznych AGH w Krakowie, w których brał udział autor niniejszej pracy”. Jednak w spisie literatury nie widnieją takie projekty z udziałem Doktoranta. Wskazana w spisie pozycja Górecki W. i

in. 2013 (sic!) „Opracowanie końcowe projektu pt. Modelowanie procesu udostępnienia gazu ziemnego w łupkach na wybranych obszarach objętych koncesjami PGNiG SA-Zadanie 2” nie odnosi się chyba do tego zakresu tematyki badań, no i nie wskazuje udziału Doktoranta (chyba że kryje się pod kryptonimem i inni). Zagadnienie to powinno być wyjaśnione w trakcie publicznej obrony rozprawy doktorskiej. Podobne pytanie dotyczy wykonania symulacji propagacji fal sejsmicznych w wariancie elastycznym i z uwzględnieniem współczynnika dobroci (str.23). Czytając na przykład na str.25 zdanie „Przetestowanych zostało szereg procedur konstrukcji modeli sejsmogeologicznych”, aż prosi się dodanie „Na potrzeby rozprawy doktorskiej przetestowanych zostało – dawałoby to jednoznaczność zakresu wykonanych przez Doktoranta działań. Należy o tym pamiętać choćby w kontekście wymagań ustawy (2014), iż w recenzji należy określić dokonania i wkład Doktoranta w rozwój nauki. Należy jednak podkreślić, że Doktorant w tym rozdziale wykazuje bardzo dobrą znajomość tematyki, podnosi złożone problemy teoretyczne i ich wykorzystanie do modeli symulacyjnych, omawia przyczyny zaburzeń rejestracji sygnałów i możliwości korekcji dla otrzymania wiarygodnych danych do interpretacji. Przedstawione materiały ilustracyjne w tej części są bardzo ważną i czytelną częścią, dobór figur na przykład pozwala dobrze prześledzić symulację wpływu odległości ogniska wstrząsów na rejestrację sygnałów w otworze monitorującym i na czytelność interpretacyjną (fig.2-14 i 2-15). Recenzent przyjmuje, iż informacje na str.42 w rozdziale 2 części 2.2.1. *Opracowanie modelu prędkości* jest autorstwa Doktoranta.

Rozdział 3 **Interpretacja strukturalna, litologiczna i petrofizyczna w obrębie zdjęcia sejsmicznego Lubocino-3D** dotyczy problematyki przygotowania modeli geologicznych i geofizycznych służących wraz z wynikami badań mikrosejsmicznych do interpretacji sytuacji w górotworze, zwłaszcza w utworach kambryjskich, ordowickich, dolny sylur. Doktorant użył w tym celu sejsmicznych danych archiwalnych, które przetworzono dla uzyskania poprawy jakości obrazu. W rozdziale zamieszczono dokładną procedurę przetwarzania danych sejsmicznych oraz przykładowe figury obrazujące mapy rozkładu wartości amplitud wyekstrahowanych wzdłuż horyzontu OrV (Fug.3-1 i 3-2). W rozdziale tym Doktorant podejmuje bardzo kompetentnie dyskusję i prezentację

dotyczącą zakłóceń wpływających na jakość sygnału oraz stosowania metod służących eliminacji tych zjawisk. Efektem wykonanych prac jest interpretacja budowy tektonicznej w obszarze zdjęcia sejsmicznego oraz oszacowanie zawartości TOC w określonych warstwach skał. Dla rozwiązania tego zadania badawczego Doktorant określił empiryczne zależności między gęstością, prędkością, impedancją akustyczną a zawartością materii organicznej i składem mineralnym ośrodka skalnego. Jak podkreśla to Doktorant opracowanie takich zależności jest szczególnie ważne i potrzebne na obszarach inicjalnych poszukiwań złóż węglowodorów lub dla dokładniejszego rozpoznania złoża, gdy zmiany lateralne badanych parametrów się znacznie różnicują. Doktorant na podstawie danych z wierceń Lubocino-1, Lubocino-2H i Opalino-IG1 prezentuje szczegóły budowy geologicznej podłoża zbudowanego ze skał starszego paleozoiku. Niestety czasami narracja Autora się urywa i prowadzi to do konfuzji czytającego. Tak jest np. na str.70 zdanie *Charakterystyka sygnału ekstrahowanego w zestawieniu z sygnałem zero-fazowym ukazuje przesunięcie zarówno w spektrum fazowym*. Opis dotyczy figury 3-6 i zapewne Autorowi chodziło także o spektrum amplitudowe. Na podstawie przeprowadzonej analizy Autor wyinterpretował 8 horyzontów litologiczno-stratygraficznych (załączniki 1-8) od stropu utworów kambru środkowego Cm2 po strop środkowego pstrego piaskowca Tp2. Następnie w części 3.1.4 tego rozdziału Autor szeroko prezentuje dyskusję związaną z **Analizą atrybutów geometrycznych** i uzasadnieniem wyboru do analizy programu GeoTeric. Bardzo ciekawy fragment dysertacji stanowi część 3.1.5 **Testowanie hipotezy interpretacji** oraz 3.1.6 **Interpretacja tektoniczna w obrębie piętra staro-paleozoicznego**, ponadto 3.1.7 **Interpretacja tektoniczna w obrębie pietra permsko-mezozoicznego** - zaprezentowano w nich bowiem geometrię uskoków otrzymywaną przy zastosowaniu różnych metod symulacji, a w końcu wyinterpretowane powierzchnie uskokowe w obszarze Lubocino (Fig.3-15, 3-16 i 3-17). Podrozdział 3.2 **Inwersja sejsmiczna** jest rozbudowany o teoretyczne założenia i wskazania zalet i wad różnych metod wykorzystywanych w geofizyce, w tym inwersji symultanicznej (ISS). Autor racjonalnie uzasadnia dlaczego do interpretacji wybrał metodę mieszaną uwzględniającą w głębszym interwale 0.66 wagi z metody SSI (inwersji rzadkich spike'ów) oraz 0.33 metody MBI, a w interwale płytszym odpowiednio

0.66 MBI i 0.33 SSI. Wykonana analiza dała Autorowi podstawę do sformułowania wniosku o mniejszych wartościach impedancji warstw północnej części zdjęcia sejsmicznego i większych wartościach impedancji w południowej części (Fig.3-20).

Rozdział 4 **Analiza parametrów petrofizycznych w obrębie zdjęcia sejsmicznego Lubocino 3D na potrzeby połączonej analizy z danymi monitoringu mikrosejsmicznego** składa się z sześciu podrozdziałów. Ze względu na dysponowanie pełnym pakietem danych tylko z jednego otworu wiertniczego Autor słusznie podjął się określenia zależności pomiędzy wielkościami fizycznymi pozyskanymi z sejsmiki a tymi parametrami jakie pozyskano z pomiarów w otworze wiertniczym. Wykorzystano w tym celu bazę danych zawierającą wyniki pomiarów skał z rdzeni wiertniczych oraz wyniki profilowania akustycznego, profilowania gęstościowego, krzywe oceny udziału TOC. Autor wybrał do oceny zawartości TOC krzywą Jarvie'go et al. (2012) wykazał bowiem jej wysoką zgodność statystyczną z wynikami udziału TOC oznaczonymi laboratoryjnie w próbkach skał. Stwierdził ponadto, że geofizyczny pomiar wartości prędkości fali podłużnej i gęstości skał może służyć do określania zawartości TOC w skale. Dodatkowo zauważył zależność większego wpływu zawartości TOC na zmiany gęstości ośrodka niż na zmiany prędkości fali podłużnej. Doktorant opracował zestaw krzywych profilowania prędkości i gęstości dla zmiennego udziału TOC. Te oraz inne opracowane i wykorzystane przez Autora modele posłużyły w obrębie zdjęcia sejsmicznego Lubocino 3D do identyfikacji obszarów bardziej zasobnych w TOC oraz bardziej podatnych na szczelinowanie a tym samym wskazujących na fragmenty górotworu potencjalnie perspektywiczne do zagospodarowania. Doktorant opracował szereg wykresów krzyżowych (Fig.4-2 do 4.19) wraz z dopasowanymi funkcjami liniowymi (zależność zawartości TOC, kerogenu, piaskowców, węglanów, minerałów ilastych, wskaźnika kruchości od impedancji AI oraz Zs) i określił progi wartości TOC wpływające na wiarygodność wyników. Autor następnie wykonał wariantowe modelowanie dotyczące wpływu zmiany zawartości TOC na zapis sejsmiczny (Fig.4-20 i 4-21). Szczegółowe analizy wykonywane były przede wszystkim dla dwóch interwałów odpowiadających ogniwu iłowców bitumicznych z Jantaru oraz formacji iłowców z Sasina. Doktorant przygotował mapy rozkładu zawartości TOC (Fig.4-22, 4-

23) i zróżnicowania wskaźnika kruchości litologicznej (Fig.4-24, 4-25). W podrozdziale 4.4 **Analiza parametrów kruchości ośrodka geologicznego** Doktorant wykorzystując opracowania dotyczące formacji Barnett w USA określił, iż badane w rejonie Lubocino skały ogniwa z Jantaru oraz formacji iłowców z Sasina należą do grupy skał „mniej plastycznych” i „mniej kruchych”, co pozwala określić, że są podatne na szczelinowanie hydrauliczne. W ostatnim podrozdziale **Interpretacja wyników inwersji sejsmicznej przed składaniem z wykorzystaniem wykresu LMR** Doktorant szeroko wprowadza w teorię zastosowań metody ISS (inwersji przed składaniem) oraz zastosowań metody LMR (Lambda mu-rho). Na podstawie danych z literatury przedstawia przesłanki za przyjęciem (dla dalszych analiz), iż utwory *Upper Barnett* i *Lower Barnett* są odpowiednio analogami ogniwa Jantaru i formacji Sasina. Przesłanki te to podobny skład mineralny i geneza. Jednocześnie Autor dostrzega, że to porównanie jest nie do końca trafne bowiem „*głębokość zalegania obydwu formacji* (tj. amerykańskiej i polskiej – przyp.KSZ) *jest inna*”. Zdaniem recenzenta takie pozostawienie charakterystyki porównawczej jest zbyt lakoniczne, bowiem różnice w głębokości zalegania obu formacji (z USA i Polski) są zasadnicze i mają bardzo istotny wpływ na historię geologiczną osadów i ich właściwości. Wymaga to zatem rozszerzonego komentarza. W dalszej części podrozdziału Autor omawia podstawy analizy LMR i uzasadnia wyróżnienie 4 obszarów anomalii a, b, c, d zaprezentowanych na mapie (Fig.4-39). Anomalie a i b pokrywają się z uprzednio wyznaczonymi anomaliami wskaźnika kruchości oraz TOC na podstawie analizy inwersji akustycznej. Doktorant stwierdza, że udało mu się *wskazać potencjalne miejsca w obrębie zdjęcia sejsmicznego Lubocino-3D* o wystarczająco podwyższonej zawartości TOC oraz odpowiednich parametrów sprężystych skał do przeprowadzenia szczelinowania hydraulicznego. Ponadto analiza danych archiwalnych upoważnia do stwierdzenia, że warstwy górnego ordowiku i dolnego syluru mają stopień przeobrażenia (okno) umożliwiający generowanie gazu mokrego.

Rozdział 5 **Połączona interpretacja lokalizacji indukowanych zdarzeń sejsmicznych z danymi sejsmiki refleksyjnej** zawiera dwa podrozdziały **Estymacja objętości strefy zeszczelinowanej** oraz **Analiza statystyczna atrybutów sejsmicznych dla miejsc wystąpienia hipocentrow wstrząsów**

indukowanych. Na wstępie rozdziału Doktorant dokonuje na podstawie literatury przedmiotu wprowadzenia w teorię mechaniki powstawania i rozwoju szczelin/spękań w trakcie stosowania zabiegu frakowania. Szczególnie istotne jest tu poznanie wielkości i geometrii podstawowych parametrów skupisk ognisk wstrząsów. Autor przedstawia obraz 3D (Fig.5-4) lokalizacji ognisk wstrząsów (w trakcie 6 etapów/faz szczelinowania hydraulicznego) pozwalający na określenie rozwoju szczelin. Szczegółowo analizuje i omawia obserwowane zróżnicowanie lokalizacji zdarzeń stwierdzając, że w I i II etapie szczelinowania rozrzut zdarzeń sejsmicznych jest niewielki, największy zaś w III i IV. Wyznaczone azymuty przebiegu szczelin są do siebie podobne, choć można je wydzielić w trzy zespoły: 1. azymut 104° etap 1 szczelinowania, 2. $93-94^\circ$ dla etapu dwa i trzy, 3. 80 i 89° dla etapu cztery, pięć i sześć. Tak wyznaczone azymuty zostały nieznacznie skorygowane poprzez uwzględnienie lokalizacji miejsc zatłaczania płynu szczelinującego (Fig.5-5). Z kolei w krótkim podrozdziale 5.1 Doktorant przedstawia poglądy o stosowanych metodach obliczania wielkości wydobywania gazu ze złóż typu *shale gas* opierających się na wyliczaniu objętości zeszczelinowanej strefy złożowej. Za Cipola & Wallace (2014) Doktorant stosuje metodę wyznaczania objętości mikrosejsmicznej MV i sporządza stosowne wykresy wartości MV dla kolejnych 6 szczelinowań uwzględniając liczbę zdarzeń sejsmicznych (Fig.5-8). W podrozdziale 5.2 Doktorant bardzo szeroko i szczegółowo zgodnie z literaturą przedmiotu omawia założenia teoretyczne dla przeprowadzonej analizy statystycznej atrybutów sejsmicznych dla miejsc wystąpienia hipocentrow wstrząsów indukowanych. To bardzo bogato ilustrowana stosownymi figurami (16 figur) część rozprawy. Efektem końcowym tego podrozdziału jest przedstawienie 5 map lokalizacji hipocentrow na tle atrybutu semblancji z przedstawieniem przebiegu hipotetycznych płaszczyzn uskokowych. Mapy te prezentują przebieg hipotetycznych (wyinterpretowanych) uskoków na różnej głębokości tj. 2760, 2808, 2820, 2856 i 2872 mppm. Na zakończenie podrozdziału zamieszczono mapę kierunków naprężenia SH_{max} opartą na interpretacji danych z 7 otworów wiertniczych wykonanych w regionie (2 na lądzie, 5 na morzu).

Rozdział 6 **Podsumowanie** ma charakter ,zdaniem recenzenta, bardziej dyskusji wyników niż podsumowania i wskazania wniosków. Autor przedstawia uwarunkowania wykorzystania danych z analizy LMR, wskazuje możliwości określenia obszarów o podwyższonym potencjale węglowodorowym, zarówno pod względem podatności skały na szczelinowanie, jak i zwiększonej zawartości TOC. Rozdział ten nie jest dobrze napisany. Miejscami trudno śledzić ciąg logiczny wywodów. Powstają więc wątpliwości, co do istoty przedstawianych wywodów. Rozprawa nie zawiera osobnego rozdziału zawierającego wnioski a zwłaszcza syntetyczne wskazanie jakie Doktorant osiągnął wyniki w stosunku do założonych tez badawczych. Tytuł rozprawy doktorskiej zawiera ważne stwierdzenie „Ocena efektywności procesu szczelinowania (...) w eksploatacji gazu ziemnego (...) na podstawie badań mikrosejsmicznych”. W rozdziale 6 nie ma wyraźnie wskazanego osiągniętego efektu badawczego wynikającego z przeprowadzonych przez Doktoranta prac. W **Podsumowaniu** Doktorant w oparciu o przeprowadzone analizy podaje, iż objętość strefy występowania zdarzeń mikrosejsmicznych MV można oszacować na około 3 mln m³. We wcześniejszych rozdziałach Doktorant stwierdzał, iż objętość tej strefy jest bardzo ważną przesłanką do oceny wydobycia gazu ze złoża typu *shale gas*. Podaje on także, że ta oszacowana objętość nie może być uznana za produktywną wobec faktu, iż szczelinowanie przeprowadzono w pobliżu strefy uskokowej, co doprowadziło do dyssypacji części energii i, co nie pozwoliło na rozwój wystarczającej sieci szczelin w skale macierzystej. Dalej stwierdza, że biorąc pod uwagę wykonaną analizę LMR i jej wyniki, miejsce wykonania stymulacji wydobycia (szczelinowania) nie było optymalnym, bowiem warstwy górotworu (łupki) charakteryzowały się względną plastycznością zmniejszającą efektywność procesu tworzenia szczelin. Taki pogląd potwierdza się także poprzez wartości wyliczonego wskaźnika kruchości skały. Wcześniejszy pogląd recenzenta o słabo przygotowanym rozdziale **Podsumowanie** umacnia się choćby poprzez następujący fragment „...analiza LMR (...) **pozwała na ocenę podatności na szczelinowanie nawet w przypadku braku dłuższych offsetów, co nie pozwoliło na poprawną estymację gęstości**”. Doktorant wskazuje, że wykonana analiza archiwalnych wyników przetworzeń danych otworowego monitoringu mikrosejsmicznego upoważnia do wyciągnięcia

wniosku o niewystarczającej dokładności i poprawności lokalizacji wykrytych zdarzeń mikrosejsmicznych. To bardzo ważny wniosek o znaczeniu praktycznym. Zastosowane przez Doktoranta metody i techniki, a zwłaszcza szczegółowa analiza zapisów z perforacji rur okładzinowych pozwoliły na bardziej dokładne zlokalizowanie zdarzeń sejsmicznych. Wykonane przez Autora symulacje i modelowania sugerują, iż fala dochodząca do odwiertów monitorujących leżących w odległości ponad 1.5 km jest silnie osłabiona, gdy układ pomiarowy znajduje się na głębokości strefy szczelinowania. Pan Andrzej Pasternacki dowodzi (na podstawie wykonanych symulacji położenia układu pomiarowego), że lokalizacja zdarzeń sejsmicznych jest dokładniejsza, gdy czujniki umieszczone są w obrębie warstw o niewielkich kontrastach impedancji akustycznej. W zakończeniu rozdziału **Podsumowanie** Doktorant wskazuje, iż dowiódł istnienia zależności między lokalizacjami ognisk hipocentrowych indukowanych wstrząsów mikrosejsmicznych a wykorzystaniem atrybutów sejsmiki refleksyjnej. Najistotniejsze jest jednak stwierdzenie, że warstwy łupków poddane szczelinowaniu miały zawartość TOC na poziomie uzasadniającym uznanie ich za warstwy produktywne, jednak ze względu na cechy litologiczne są one mało podatne na szczelinowanie i rozwój systemu szczelin umożliwiający eksploatację gazu.

Uwagi szczegółowe

Rozprawę czyta się z dużym utrudnieniem, bowiem Autor nie używa dużych liter na początku nowego zdania. Wydawać by się mogło, że to drobnostka. Wszystkich, którzy tak uważają zapraszam zatem do lektury takiego tekstu, w którym nie wiadomo czy kolejne zdanie jest zdaniem wtrąconym, podrzędnym do poprzedniego czy też nową myślą. Jest to tak nieoczekiwane i niespotykane, że z dużym zdumieniem i zaskoczeniem przekonałem się jak znacznie utrudnia lekturę tekstu. Zmusza czytelnika do kilkukrotnego przeczytania tego samego fragmentu, bowiem sens następujących po sobie zdań jest niejasny. Oto jeden przykład z mnóstwa obecnych w rozprawie (właściwie $\frac{3}{4}$ rozprawy jest przygotowane w tej manierze). „Częstotliwość dominująca widma amplitudowego to ok. 40 [Hz] oraz faza ok. 65°. w przedziale od 1000 do 2200 [ms] czyli oknie czasowym (...)” str.89.

Autor w całej dysertacji używa określenia formacja z Barnett, poprawna zaś nazwa to formacja **Barnett**.

W zakresie cytowania:

Rozdział 7 **Cytowana literatura** nie zaczyna się od pozycji według alfabetu, lecz 3 pierwsze pozycje są na literę B, M, R zaś dopiero od pozycji 4 wg alfabetu nazwisk autorów.

str. 7 cytowanie Wessels et al. 2011 – w spisie literatury na str.182 jest ten zapis wiernie powtórzony, natomiast et al. (i inni) powinno zostać przedstawione w formule rozwiniętej tj. wraz z nazwiskami współautorów, podobny błąd z:

Hickman et al. 2013 (str.7 i 179),

Shuck et al. 2015 (str.15 i 182)

Roux et al. 2014 (str. 15 i 181)

Górecki et al. 2013 (str. 57 i 179)

Modlińska et al. 2007 (str.65 i 181)

Mavko (2009) str. 129, 175 i 180

Cipolla et al. (2010) str.142 i 178

Mayerhofer et al. (2010) str.149 i 181

Norton et al. (2011) str. 153 i 181

Heidbach et al. (2008) str.169 i 179

Jest to tym bardziej dziwne, że inne prace wieloautorskie przywoływane i cytowane w spisie są poprawnie.

Autor źle przywołuje w tekście pozycje literatury np. str. 8 jest (Duncan, 2011),(Maxwell, 2014) powinno być (Duncan 2011; Maxwell 2014), takich przypadków jest znacznie więcej np. str. 15,

Na stronie 17 jest „...takiego wykorzystania podaje (Chambers & Kendall (2010))” powinno być „...podaje Chambers & Kendall (2010).”

Na str. 23 jest przywołanie Janski (2013) zaś w spisie literatury na str.180 jest Jansky J., Plicka V., Eisner L. 2013, zatem na str. 23 powinno być Jansky et al. (2013). To samo dotyczy pracy Danek (2009) str. 23 i w spisie Danek T., Leśniak A., Pięta A. 2009 str. 178, podobnie str. 100 Jarvie (2012) i str.180; str. 103 jest Jarvie (2007) tymczasem to praca zespołowa (str. 180); str. 103 jest Wang (2009) powinno być Wang &Gale (2009) str. 182; str. 150 jest Cipolla (2014) powinno być Cipolla & Wallace (2014).

W rozprawie jest bardzo wiele tzw. literówek, niektóre z nich zasadniczo mogą zmieniać sens zdania np. **zmian i zamiana** str. 175, **rozwnaniem i rozwiązaniem** str.74 itd. Wszystkie te uchybienia powinny być usunięte na etapie przygotowania rozprawy do druku.

Ogólna ocena dysertacji

Doktorant poprawnie i właściwie skonstruował układ dysertacji. Metodą „odwróconego salami” najpierw wprowadza warstwa po warstwie teoretyczne podstawy zastosowanych technik geofizycznych zwłaszcza z zakresu mikrosejsmiki, przedstawia założenia opracowań symulacji i modelowań. Wskazuje na wady i zalety stosowanych technik, korygując niedoskonałości otrzymywanych z nich wyników poprzez zastosowanie zaawansowanych technik statystycznych. Dokonuje wreszcie syntezy (połączenia oddzielnych plastrów w „całe salami”) wyników cząstkowych i przeprowadza interpretację całości uzyskanych informacji, szczególnie poprzez modelowania matematyczne. Zdaniem recenzenta tytuł rozprawy ***Ocena efektywności procesu szczelinowania hydraulicznego w eksploatacji gazu ziemnego z łupków ilastych na podstawie badań mikrosejsmicznych*** właściwie i trafnie oddaje zarysowany ważny temat badawczy i jego potencjalne znaczenie aplikacyjne. Lektura **Wstępu** nie daje jednak już takiego właściwie sformułowanego i zobiektywizowanego celu badawczego. Wstęp bardziej koncentruje się na zagadnieniach teoretycznych a mniej na jednoznacznym wskazaniu dlaczego, po co i jakimi metodami zamierza Autor zrealizować badania i udowodnić (pozytywnie lub negatywnie), że można dokonywać oceny efektywności procesu szczelinowania na podstawie badań mikrosejsmicznych. To wrażenie z lektury

Wstępu pogłębia się bardziej po przeczytaniu rozdziału **Podsumowanie**. Wnioski i podsumowanie są „solą” artykułów naukowych, dysertacji doktorskich i habilitacyjnych. Od właściwego przygotowania wniosków końcowych tak naprawdę zależy ogólna ocena jakości pracy, a zwłaszcza osiągniętych wyników. Mimo pozytywnej oceny zawartości merytorycznej i poziomu całości dysertacji, po lekturze **Podsumowania** pozostaje poczucie niedosytu oraz wrażenie chaosu i braku przemyśleń ze zrealizowanych prac. Dochodzi do tego niejasność (o czym pisałem wcześniej) jaki jest udział Doktoranta w wykonanych pracach. Te podstawowe wątpliwości mam nadzieję, że uda się rozwiązać i usunąć w trakcie publicznej obrony rozprawy doktorskiej. Oczekuję na niej od Doktoranta odpowiedzi na następujące pytania: jakie są syntetyczne wnioski wypływające ze zrealizowanych prac? jaki jest udział Doktoranta w zrealizowanych modelowaniach i symulacjach oraz przetwarzaniach archiwalnych danych sejsmicznych? Jak wskazywałem to wcześniej udział ten (mimo opisywania w tekście rozprawy) nie znajduje potwierdzenia w żadnej cytacji pozycji literatury z udziałem Autora lub podaniem wprost jednoznacznie jakie prace wykonał i gdzie jest współautorem.

Dysertacja zawiera bardzo bogaty materiał ilustracyjny. Obrazy z modelowań są bardzo czytelne, interpretacja Doktoranta jest głęboka, merytoryczna i uzasadniona. Również wyciągane z nich wnioski nie budzą zastrzeżeń recenzenta. Bez wątplenia Doktorant porusza się bardzo biegle po literaturze przedmiotu. Zna wszystkie współcześnie wykorzystywane metody geofizyczne zarówno sesjmiki refleksyjnej, jak i mikrosejsmiki. Wyczuwalna biegłość warsztatowa Doktoranta pozwala mu na szereg komentarzy co do ograniczeń, stosowalności prezentowanych metod bądź też koniecznych zmian lub uzupełnień niezbędnych dla usunięcia wad metod lub poprawy czytelności i rozdzielczości otrzymywanych informacji. Rozprawa doktorska jest ważnym elementem rozwoju naukowego każdego badacza. Poza sprawnością warsztatową, wiedzą ogólną i szczegółową musi także pokazywać biegłość naukowca w przygotowywaniu prac do publikacji. W tym obszarze Doktorant wykazuje wiele uchybień o których już wspominałem wcześniej. Strona edytorska publikacji jest także bardzo ważnym elementem uzupełniającym końcową ocenę prezentowanych prac. Precyzja słowa, logika wyводу, trafność doboru argumentów, zakres i sposób cytowania literatury przedmiotu są

zatem ważną częścią publikacji i podlegają ocenie. W tym zakresie Doktorant ma wiele do zrobienia i poprawienia, tak aby w przyszłości stać się poważanym i uznanym naukowcem.

Wniosek końcowy

Biorąc pod uwagę wszystkie elementy oceny przedstawione w recenzji rozprawy doktorskiej mgr inż. Adama Pasternackiego pt. *Ocena efektywności procesu szczelinowania hydraulicznego w eksploatacji gazu ziemnego z łupków ilastych na podstawie badań mikrosejsmicznych* stwierdzam, że podjęte zadanie badawcze jest bardzo ważne zarówno z teoretycznego, jak i praktycznego punktu widzenia. Doktorant posiada głęboką wiedzę o problematyce metod geofizycznych stosowanych w trakcie wykonywania zabiegów stymulujących wydobywanie gazu ziemnego z tzw. formacji *shale gas*. Przedstawiona do recenzji dysertacja spełnia wszystkie wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z dnia 22 grudnia 2014 r. poz. 1852 tekst jednolity – Ustawa 2014) przewidziane w postępowaniu o nadanie stopnia doktora. Z głębokim przekonaniem o wartości rozprawy doktorskiej, wiedzy Doktoranta, Jego biegłości w zakresie dziedziny nauki, w której ma być nadany stopień doktora **wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Adama Pasternackiego do** dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora, w tym do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Warszawa 17 sierpnia 2016 r.

/prof. dr hab. Krzysztof Szamałek/