

Prof. dr hab. inż. Zenon Pilecki  
Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN  
31-261 Kraków, Wybickiego 7A

Kraków, 31 sierpnia 2022

**Recenzja**  
**rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Pawła Wandycza**  
**pt. „Wyznaczenie współczynnika dobroci Q na podstawie zdarzeń mikrosejsmicznych**  
**indukowanych podczas procesu szczelinowania hydraulicznego oraz ocena możliwości jego**  
**wykorzystania w przetwarzaniu danych mikrosejsmicznych”**

Rozprawa doktorska została opracowana w Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie na Wydziale Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, pod kierunkiem promotora Pana dr hab. inż. Michała Stefaniuka prof. AGH i Pana dr inż. Tomasza Maćkowskiego jako promotora pomocniczego

**1. Informacje wstępne**

Recenzję rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Pawła Wandycza pt. „Wyznaczenie współczynnika dobroci Q na podstawie zdarzeń mikrosejsmicznych indukowanych podczas procesu szczelinowania hydraulicznego oraz ocena możliwości jego wykorzystania w przetwarzaniu danych mikrosejsmicznych” opracowałem na podstawie pisma Pana prof. dr hab. inż. Jacka Matyszkiewicza Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej - Nauki o Ziemi i Środowisku Akademii Górniczo-Hutniczej z dnia 28 czerwca 2022 r., o znakach WGGiOŚ – dz.51/510-75/2022.

Przewód doktorski Doktoranta prowadzony jest zgodnie z Ustawą z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach naukowych i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2017 poz. 1789 z późn. zm.). Zgodnie z wymogami Ustawy rozprawa doktorska powinna być *oryginalnym rozwiązaniem przez Doktoranta określonego zagadnienia naukowego oraz wykazywać jego ogólną wiedzę teoretyczną w danej dyscyplinie naukowej i umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej*. Do tych trzech wymagań ustawowych recenzent odniósł się w ocenie rozprawy doktorskiej.

Rozprawa doktorska posiada 88 stron objętości. Składa się z dwóch części. Część pierwsza o objętości 60 stron zawiera streszczenie w języku polskim i angielskim, wprowadzenie, określenie celu i zakresu pracy, opis obszaru badań, metodykę pracy, skrócony opis wyników, podsumowanie i literaturę. Spis literatury obejmuje 83 pozycje. W części drugiej znajdują się trzy artykuły opublikowane w czasopismach *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, *Interpretation* i *Acta Geophysica*. Artykuły te zawierają szersze omówienie autorskiej metodyki

badania i ich wyników wraz z analizą oraz wnioski. Rozprawa jest tak skonstruowana, że w części pierwszej znajdują się odniesienia do omawianych zagadnień szerzej przedstawionych w części drugiej.

Problem badawczy będący przedmiotem rozprawy doktorskiej dotyczy sposobu monitorowania sejsmiczności indukowanej pracami szczelinowania hydraulicznego tzw. mikrosejsmiczności w technologii pozyskiwania gazu z łupków. Obecnie utrwaliło się pojęcie mikrosejsmiczność w odniesieniu do obserwowanej sejsmiczności w wyniku indukowanego szczelinowaniem hydraulicznym wstrząsów sejsmicznych. Jednak należy pamiętać, że pojęcie mikrosejsmiczności jest szersze i obejmuje również bardzo słabe zjawiska sejsmiczne do energii  $10^2$  Joula rejestrowane w typowych kopalniach podziemnych np. węgla kamiennego, w wyniku prowadzonych prac górniczych (np. publikacje R. Hardy'ego Jr. już z lat 70-80-tych XX w.).

Zagadnienie to jest znane w dotychczasowych publikacjach, przede wszystkim w zakresie doświadczeń światowych. Natomiast zagadnienie to bardzo słabo jest rozpowszechnione w odniesieniu do krajowych doświadczeń, które z drugiej strony są, jak do tej pory nieliczne. W związku z tym na podkreślenie zasługuje podjęcie tego tematu przez Doktoranta, co ma duże znaczenie w rozwoju tego rodzaju badań, nie tylko pod kątem monitorowania procesu szczelinowania hydraulicznego, lecz również innych prac górniczych.

Stwierdzam również, że przedmiotowa rozprawa pod względem podjętej tematyki i swojej treści mieści się w obszarze dyscypliny naukowej Nauki o Ziemi i Środowisku.

## **2. Krytyczna analiza rozprawy doktorskiej**

Recenzent sformułował krytyczne uwagi, które można pogrupować na: merytoryczne, merytoryczno-pojęciowe oraz uwagi do strony edycyjnej rozprawy doktorskiej. W związku z tym, że niektóre elementy rozprawy wymagają udzielenia dodatkowych wyjaśnień, w końcowej części tej analizy sformułowano pytania do Doktoranta, na które recenzent oczekuje odpowiedzi w trakcie obrony rozprawy doktorskiej.

### Uwagi merytoryczne

Konstrukcję rozprawy należy uznać za nietypową, dość złożoną, w której oryginalne osiągnięcia Doktoranta nie są w sposób jednoznaczny uporządkowane. Odwoływanie się do metodyki, która jest głównym osiągnięciem Doktoranta, do załączonych artykułów nie ułatwia jej oceny. Korzystnym zabiegiem, częściowo porządkującym układ rozprawy, jest krótki opis wprowadzony przez Doktoranta zatytułowany „Struktura pracy”, na wstępie rozprawy. Ten opis w zasadzie jest niezbędny, gdyż zapoznanie się z treścią merytoryczną rozprawy jedynie na podstawie spisu treści jest utrudnione. Niemniej jednak rozprawa zawiera wszystkie elementy niezbędne do sformułowania recenzji rozprawy.

Tytuł rozprawy doktorskiej jest dość rozbudowany i zdaniem recenzenta nie jest wystarczająco precyzyjny w odniesieniu do sformułowanego przez Doktoranta głównego celu

badania. Druga część tytułu tj. sformułowanie - *ocena możliwości jego* (przyp. rec. współczynnika dobroci Q) *wykorzystania w przetwarzaniu danych mikrosejsmicznych* – jest zbyt ogólna i nie precyzuje jakie zagadnienie badawcze Doktorant miał na myśli. W przypadku formułowania publikacji na podstawie tej rozprawy, Doktorant powinien opracować bardziej precyzyjny tytuł.

Doktorant, w streszczeniu rozprawy, sformułował główny jej cel jako ... *wyznaczenie współczynnika dobroci Q w warstwach syluru i ordowiku w obrębie obniżenia bałtyckiego, oraz wykorzystanie tego parametru w opracowanej autorskiej metodyce analizy sprawności powierzchniowej sieci monitorującej proces szczelinowania hydraulicznego*. Cel ten został uszczegółowiony w rozdziale 2 pt. Cel i zakres pracy. Niestety Doktorant nie definiuje co należy rozumieć przez sprawność sieci monitorującej proces szczelinowania hydraulicznego. Z dalszej części rozprawy wynika, że może to dotyczyć efektywności sieci monitorującej pod kątem aktywności (liczby zjawisk sejsmicznych w jednostce czasu) lub intensywności energii (energii/magnitudy zjawisk sejsmicznych w jednostce czasu) zarejestrowanej mikrosejsmiczności.

W rozdziale 2, w podkreśleniu celu pracy, a zwłaszcza na stronie 16 należałoby wyraźnie podkreślić główny cel rozprawy doktorskiej, który dość poprawnie został sformułowany w streszczeniu rozprawy.

Ponadto treść rozdziału 2 została napisana w taki sposób, że bez znajomości całości rozprawy trudno zorientować się jakie są autorskie elementy badań opracowane przez Doktoranta. Natomiast istotną informację o udziale Doktoranta w badaniach można szerzej znaleźć w oświadczeniach do części II rozprawy od strony 52 do 58.

Niejasno jest sformułowany cel podrzędny na str. 16. (w. 12 od dołu) jako *Określenie i dyskusja założeń optymalizacji sieci monitorującej*. Przymuszczalnie chodzi o „Określenie optymalnych uwarunkowań dla rejestracji zjawisk sejsmicznych w sieci monitorującej”. Ponadto „dyskusja” nie może być celem rozprawy doktorskiej.

Możliwe, że niejasności związane ze sformułowanymi przez Doktoranta tematem i celem rozprawy doktorskiej, można było uniknąć, gdyby Doktorant sformułował tezy swoich badań.

W streszczeniu i kolejno we wnioskach, obliczone wartości współczynnika dobroci Q i przypisane dla określonych wartości prędkości fali P i fali S powinny być wyraźnie opisane, że są wartościami średnimi. Natomiast należałoby również podać przedziały wartości prędkości fal P i S dla których współczynniki Q zostały obliczone.

Doktorant na stronie 15 (w. 20 od dołu) stwierdził, że: *Poprawnie zaprojektowana sieć monitorująca pozwala również na prewencje w zakresie ewentualnych skutków środowiskowych przez zastosowanie metody tzw. systemu sterowania ruchem (ang. traffic light system), która określa sposoby oraz kierunek działania operatora w przypadku pojawienia się zdarzeń mikrosejsmicznych o pewnych progowych wartościach magnitud*. W zasadzie to nie wiadomo o co chodzi w przytoczonym „systemie sterowania ruchem” - brak również powołania na literaturę. Przymuszczalnie Doktorant miał na myśli system ostrzegania przed zagrożeniem nadmiernymi drganiem na powierzchni terenu, jak również dla procesu technologicznego szczelinowania hydraulicznego. Należy podkreślić, że takie sejsmiczne

systemy ostrzegające są w Polsce rozpowszechnione, a przyjęta metoda ma charakter kryterialny i jest dostosowana do specyfiki każdego obszaru monitorowania.

Fragment tekstu na stronie 29 (w. 9 od góry) do końca akapitu należy do wniosków, lecz sformułowane stwierdzenia nie zostały przedstawione we wnioskach. W zasadzie, zdaniem recenzenta, rozdział 5 zatytułowany *Podsumowanie* powinien być nazwany Podsumowanie i wnioski. Natomiast zebrane w tym rozdziale wnioski powinny kompleksowo obejmować wnioski wynikające ze wszystkich etapów badań, w tym wiele ujętych w załączonych artykułach. W podsumowaniu brakuje też odniesienia do propozycji kierunków przyszłych badań, mających na celu dalsze doskonalenie przedstawionej metodyki.

#### Uwagi merytoryczno-pojęciowe

W rozprawie występują pojęcia i sformułowania mało precyzyjne, na które Doktorant powinien zwrócić większą uwagę w publikowaniu swoich kolejnych prac.

Jednym z nich jest pojęcie *monitoring*, które dość szybko upowszechnia się w języku potocznym, a jest sformułowaniem nieprecyzyjnym. Często używając pojęcia *monitoringu* nie wiadomo czy dotyczy on systemu do monitorowania czy czynności monitorowania. Dużo poprawniej jest używanie pojęcia *monitorowanie* w odniesieniu do zespołu czynności związanych z obserwacją, a system monitorujący do aparatury wykorzystywanej do monitorowania. Doktorant używa tego pojęcia dość często, lecz należy również przyznać, że również w formie poprawnej.

Użycie przez Doktoranta pojęcia *gaz łupkowy* jest kolokwializmem. Bardziej poprawną formą jest *gaz z łupków*. Natomiast bardziej poprawnym słowem kluczowym, zamiast *gaz z łupków*, byłoby *szczelinowanie hydrauliczne*.

Użycie pojęcia *trzęsienie ziemi* (str. 15, w. 6 od góry) nie jest w tym przypadku precyzyjne. W zasadzie *szczelinowanie hydrauliczne* należy do robót górniczych, w związku z tym towarzysząca temu procesowi *mikrosejsmiczność* jest związana z działalnością człowieka. Wobec tego taką *sejsmiczność* nazywamy *indukowaną* a zarejestrowane zjawiska wstrząsami sejsmicznymi. Z drugiej strony, w najbardziej ogólnym znaczeniu, należy je zaliczyć do bardzo słabych trzęsień ziemi.

Doktorantowi zdarza się używać pojęć w bezpośrednio przetłumaczonych z języka angielskiego na język polski. Należy pamiętać, że w polskim języku specjalistycznym mogą występować utrwalone pojęcia, które z bezpośrednim tłumaczeniem z języka angielskiego nie mają nic wspólnego.

Na przykład:

- Doktorant używa określenia *mechanizm fokalny* (ang. *focal mechanism*) (str. 30 w. 15 od dołu), które poprawnie nazywane jest *mechanizmem ogniska wstrząsu*.
- W podpisie rysunku 11 pojawia się pojęcie *mapa cieplna* (ang. *heat map*) w odniesieniu do mapy izolinowej gęstości prawdopodobieństwa położenia punktu strzałowego.
- Doktorant niewłaściwie używa wyrazu *trój-komponentowy* w odniesieniu do czujników trójskładowych i *jednoskładnikowe* w odniesieniu do czujników jednoskładowych.

- Nieraz Doktorant używa wyrazów angielskich przeplatanych z polskimi bez właściwego objaśnienia np. w podpisie rysunku 9 mamy: *funkcję maximum stack, funkcję semblance*.

Doktorant na stronie 41 (w. 4 od góry) pisze o *własnościach mechanicznych skał*. Pojęcie „własności” w użytym kontekście od wielu lat zostało zastąpione w naukach geologicznych pojęciem „właściwości”. „Własność” odnosi się w ogólności do posiadania rzeczy takich jak np. nieruchomość, samochód, itp., natomiast „właściwość” odnosi się do charakterystycznych cech w tym przypadku skał. Należy jednak wspomnieć, że w podstawowych, starszych, słownikach języka polskiego oba pojęcia są równoznaczne.

W publikacji 3 w Acta Geophysica pojawia się jako słowo kluczowe niewłaściwe określenie *Polish shale gas*. Ponadto w tym artykule, oś pozioma na rysunku 3 z prawej strony powinna być opisana jako prędkość fali poprzecznej. Natomiast, zdaniem recenzenta, korzystniej byłoby dodać w tym artykule równanie 1 z artykułu 2 (jako równanie 2), celem podkreślenia sposobu obliczeń tłumienia.

### Uwagi edycyjne

Doktorant niekiedy używa wyrazów *wysoki* i *niski* zamiast bardziej poprawnie *duży/większy* lub *mały/mniejszy* np. *niższe tłumienie, wyższa wartość Q, niska magnituda, niska gęstość, niska energia, itp.*

Jeżeli Doktorant pisze *Współczynnik dobroci Q nie zależy od wartości magnitudy zdarzenia mikrosejsmicznego* (str. 14 w. 13 od dołu), to logika nakazuje napisać, że dotyczy to również wartości współczynnika dobroci Q. Najkorzystniej byłoby napisać, że „Współczynnik dobroci Q nie zależy od magnitudy zjawiska mikrosejsmicznego”.

Doktorant używa wyrazów *powyższy, pewny*, które są bardzo nieprecyzyjne np.: *powyższy rysunek, pewny stopień, itp.*, W tych przypadkach należy konkretnie napisać gdzie znajduje się rysunek, lub o jaki stopień chodzi.

Nie wiadomo co oznacza wyraz CYTACJA w podpisie rysunku 1.

W rozprawie zdarzają się również nieumiejętne formy powoływania się na publikacje np. *... zaproponowana przez Batha (Bath, 1974).*, zamiast” *... zaproponowane przez Batha (1974); W pracy Wandycza i in. (2019) ...*, zamiast: *W pracy Wandycza i in. (2019)*.

W całej rozprawie zauważa się raczej nieliczne usterki typu „literówek”.

### Pytania do Doktoranta

W związku z występującymi nieścisłościami w tekście rozprawy oraz potrzebą, według recenzenta, wyjaśnienia niektórych zagadnień, proszę o odpowiedzi na następujące pytania w trakcie obrony rozprawy doktorskiej:

1. Proszę zdefiniować pojęcie „sprawność” sieci monitorującej proces szczelinowania hydraulicznego.

2. W jaki sposób Doktorant wyznaczał czas pierwszego wejścia fali S na sejsmogramach – czy można to pokazać na graficznym przykładzie.
3. Proszę o wyjaśnienie stwierdzenia ze str. 27 (w. 12 od dołu): *Zastosowanie pojedynczego otworu monitorującego, choć korzystne z punktu widzenia ekonomicznego pociąga za sobą pewne ograniczenia, głównie w precyzji inwersji momentu tensora wynikającej z niskiej gęstości próbkowania sfery fokalnej (Dohmen i in., 2014).*
4. Proszę o wyjaśnienie na czym polega „system sterowania ruchem”.
5. Proszę o wyjaśnienie w jaki sposób w przeprowadzonych obliczeniach współczynnika Q zostało uwzględnione zjawisko rozwarcia geometrycznego w propagacji sygnału sejsmicznego.

### 3. OCENA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Pan mgr inż. Paweł Wandycz przedstawił oryginalne rozwiązanie zadania badawczego, które polega na wybranym sposobie obliczeń współczynnika dobroci Q, a następnie wykorzystaniu tego współczynnika do oceny układu pomiarowego pod względem rejestracji mikrosejsmiczności indukowanej w czasie procesu szczelinowania hydraulicznego w charakterystycznych warunkach utworów syluru i ordowiku na obszarze obniżenia bałtyckiego.

Należy podkreślić, że zagadnienie badania mikrosejsmiczności jest bardzo słabo rozpowszechnione pod kątem krajowych doświadczeń. W związku z tym przedstawienie tego zagadnienia przez Doktoranta jest w dużym stopniu oryginalne w skali krajowej, jak również światowej. Ma ono duże znaczenie aplikacyjne, nie tylko pod kątem monitorowania procesu szczelinowania hydraulicznego, lecz również innych zastosowań w górnictwie lub tunelowaniu.

W ramach rozprawy doktorskiej Doktorant przedstawił oryginalną metodykę badawczą, która w ogólnym ujęciu polegała na:

W I etapie - obliczeniach współczynnika dobroci Q na podstawie zjawisk mikrosejsmicznych indukowanych podczas procesu szczelinowania hydraulicznego, a w szczególności:

- Przetwarzaniu danych otworowych pod kątem identyfikacji wejść fal P oraz S dla strzałów perforacyjnych, konstrukcji modelu prędkościowego i jego kalibracji na podstawie znanych lokalizacji strzałów perforacyjnych.
- Detekcji indukowanych szczelinowaniem hydraulicznym zjawisk mikrosejsmicznych z wykorzystaniem algorytmu STA/LTA i ich lokalizacji na podstawie skalibrowanego modelu prędkości.
- Selekcji zjawisk mikrosejsmicznych do analiz Q z wykorzystaniem analizy spektralnej.
- Wyznaczeniu częstotliwości dominującej na podstawie metody czasu trwania „połowy okresu” pierwszego wstąpienia właściwej fali sejsmicznej oraz obliczeniu współczynnika dobroci Q i weryfikacji tych obliczeń.

W II etapie - na wykorzystaniu współczynnika dobroci Q do oceny efektywności rejestracji zjawisk mikrosejsmicznych przez sieć monitorującą powierzchniową, a w szczególności:

- Sprawdzeniu i ewentualnej korekcie geometrii powierzchniowej sieci monitorującej.
- Detekcji, lokalizacji wraz z korektą położenia efektów strzałów perforacyjnych i pozostałych zjawisk mikrosejsmicznych przez sieć powierzchniową.
- Wykonaniu porównawczej analizy spektralnej rejestracji efektów strzałów perforacyjnych do zarejestrowanych zjawisk mikrosejsmicznych z uwzględnieniem rozwierania sferycznego i współczynnika Q.
- Ocenie efektywności rejestracji zjawisk mikrosejsmicznych i strzałów perforacyjnych przez powierzchniową sieć monitorującą.

Metodyka została zweryfikowana podczas prac szczelinowania hydraulicznego dla otworu Lubocino 2H. Należy podkreślić, że w realizacji tej metodyki uczestniczył zespół osób, a Doktorant osobiście wykonał zadania badawcze związane z selekcją danych pomiarowych, analizą spektralną zjawisk mikrosejsmicznych oraz końcową analizą efektywności rejestracji sieci monitorującej. W pozostałych badaniach miał większościowy lub istotny udział w ich realizacji.

Zgłoszone w rozdziale 2 krytyczne uwagi mają charakter porządkowy i nie naruszają głównej konstrukcji merytorycznej rozwiązania zagadnienia badawczego oraz jego aspektów oryginalności.

Pan mgr inż. Paweł Wandycz wykazał się zdecydowanie ponad przeciętną znajomością ogólnej wiedzy teoretycznej w dyscyplinie Nauki o Ziemi i Środowisku. Rozprawa doktorska charakteryzuje się dość szerokim studium literaturowym przedstawionym przez Doktoranta. Zgromadzenie tak wielu interesujących publikacji świadczy o dużym zaangażowaniu Doktoranta we właściwe przygotowanie rozprawy. Ponadto Doktorant opracowując treść rozprawy doktorskiej wykazał się specjalistyczną wiedzą z problematyki budowy i rejestracji sejsmicznych sieci monitorujących, przetwarzania i interpretacji danych sejsmicznych, a także z zakresu procesu szczelinowania hydraulicznego i geologii regionalnej.

Ponadto, Pan mgr inż. Paweł Wandycz wykazał się wystarczającymi umiejętnościami do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. W rozwiązaniu zadania badawczego przedstawionego w rozprawie doktorskiej Doktorant wykazał się na dobrym poziomie znajomością metodyki prowadzenia badań. Doktorant potwierdził również dużą umiejętność w opisie i prezentacji wyników przetwarzania i interpretacji danych sejsmicznych, w tym publikując wyniki badań w czasopismach specjalistycznych.

Reasumując, przedłożona mi do recenzji rozprawa doktorska Pana mgra inż. Pawła Wandycza jest, w moim przekonaniu, oryginalnym rozwiązaniem problemu naukowego. Autor rozprawy doktorskiej, wykazał się ogólną wiedzę teoretyczną w zakresie swojej dyscypliny naukowej oraz umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

#### 4. WNIOSEK KOŃCOWY

Na podstawie przedstawionej mi do recenzji rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Pawła Wandycza pt. „Wyznaczenie współczynnika dobroci  $Q$  na podstawie zdarzeń mikrosejsmicznych indukowanych podczas procesu szczelinowania hydraulicznego oraz ocena możliwości jego wykorzystania w przetwarzaniu danych mikrosejsmicznych” stwierdzam, że spełnia ona wymagania Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003r. W związku z tym wnioskuję do Rady Dyscypliny Naukowej - Nauki o Ziemi i Środowisku Akademii Górniczo-Hutniczej o dopuszczenie Pana mgr inż. Pawła Wandycza do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

