

dr hab. inż. Sławomir Stelmach, prof. ITPE
Instytut Technologii Paliw i Energii
ul. Zamkowa 1
41-803 Zabrze

Zabrze, dn. 21.05.2025 r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr. inż. Przemysław Sierodzkiego

pt.:

„WYSOKOROZDZIELCZE MONITOROWANIE ZMIAN PRĘDKOŚCI ROZCHODZENIA SIĘ FAL SEJSMICZNYCH W REJONIE FRONTU EKSPLOATOWANEJ ŚCIANY POKŁADU WĘGLA Z WYKORZYSTANIEM PERMANENTNEGO, PNEUMATYCZNEGO ŹRÓDŁA SEJSMICZNEGO”

Recenzja została sporządzona na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej z dnia 24 kwietnia 2025 r., na mocy której zostałem wyznaczony do pełnienia funkcji recenzenta niniejszej rozprawy doktorskiej. Pismo w tej sprawie (sygn. RIE-BD.512.21.2025) podpisał Przewodniczący Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej, prof. dr hab. Krzysztof Labus.

Przesłana do recenzji rozprawa doktorska pt. „Wysokorozdzielcze monitorowanie zmian prędkości rozchodzenia się fal sejsmicznych w rejonie frontu eksploatowanej ściany pokładu węgla z wykorzystaniem permanentnego, pneumatycznego źródła sejsmicznego” została przygotowana przez mgr. inż. Przemysław Sierodzkiego w Katedrze Maszyn i Urządzeń Energetycznych Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Leszek Remiorz, prof. PŚ, a promotorem pomocniczym – dr hab. inż. Zbigniew Isakow.

Zagadnienia związane z propagacją fal sejsmicznych w pokładach węgla, w tym m.in. z wyznaczaniem prędkości fal kanałowych przy użyciu metod numerycznych, należą do istotnych i złożonych problemów współczesnej geofizyki oraz inżynierii górniczej. Ich znaczenie wykracza poza ramy czysto akademickie – mają one bezpośrednie przełożenie na bezpieczeństwo eksploatacji w kopalniach węgla kamiennego, gdzie ryzyko występowania zjawisk sejsmicznych i tąpnięć wciąż stanowi jedno z kluczowych zagrożeń naturalnych.

W rzeczywistych warunkach górniczych dokładne pomiary prędkości propagacji fal są trudne do realizacji, a złożoność strukturalna ośrodka – obejmująca m.in. zróżnicowanie litologiczne, anizotropię, szczelinowatość oraz zmienne warunki naprężeniowe – często ogranicza skuteczność tradycyjnych metod analizy. W tym kontekście modelowanie numeryczne, oparte na metodach różnic skończonych, elementów skończonych czy metodach spektralnych, stanowi niezastąpione narzędzie umożliwiające analizę zjawisk sejsmicznych w warunkach kontrolowanych, odtwarzających z dużą wiernością rzeczywistą strukturę górotworu.

Na całym świecie – w tym również w Polsce – od lat prowadzone są intensywne badania dotyczące analizy i predykcji fal kanałowych, ich związku z właściwościami mechaniczno-geologicznymi ośrodka oraz możliwości wykorzystania tych fal jako nośników informacji o stanie naprężenia czy lokalizacji potencjalnych ognisk przyszłych wstrząsów. Recenzowana praca znakomicie wpisuje się w ten nurt badań. Porusza aktualne, interdyscyplinarne i wysoce istotne zagadnienia, lokujące się na styku geofizyki, mechaniki ośrodków ciągłych oraz górnictwa. Choć tematyka ta jest intensywnie rozwijana, nadal pozostaje wiele otwartych pytań, co czyni ją obszarem o dużym potencjale badawczym, także w ujęciu aplikacyjnym.

Głównym celem rozprawy oraz opisanych w niej prac badawczych było opracowanie nowej metody pozyskiwania parametrów górotworu z wykorzystaniem dostępnej aparatury sejsmoakustycznej oraz prototypowego, iskrobezpiecznego pneumatycznego wzbudnika sejsmicznego.

Układ edycyjny recenzowanej rozprawy doktorskiej jest zgodny z typowymi standardami dla prac naukowych. Autor w sposób zwięzły, lecz wyczerpujący, przedstawił zagadnienia badawcze, przyjętą metodykę oraz uzyskane wyniki wraz z ich interpretacją. Praca liczy 104 strony i została podzielona na dziesięć rozdziałów, z odpowiednimi podrozdziałami. Zawiera 44 rysunki oraz 17 tabel – wszystkie ujęte w odpowiednich spisach – a także 111 pozycji literaturowych. Rozprawa została opatrzona streszczeniami w języku polskim i angielskim.

W krótkim wstępie (rozdział 1) autor przedstawił syntetyczne wprowadzenie do zagadnienia opracowanego rozwiązania technicznego – systemu wysokorozdzielczego monitoringu sejsmicznego z wykorzystaniem stałego pneumatycznego źródła wzbudzenia – którego szczegółowy opis zawarł w dalszych rozdziałach pracy. W rozdziale 2 zaprezentował cel rozprawy, którym było zaprojektowanie metody pozyskiwania parametrów geomechanicznych górotworu

z zastosowaniem dostępnej infrastruktury sejsmoakustycznej oraz eksperymentalnego, pneumatycznego źródła sejsmicznego o konstrukcji iskrobezpiecznej. Przedstawił również szczegółowy zakres pracy, jednak nie sformułował wprost tez badawczych – choć można się ich domyślać na podstawie celów i przyjętej metodyki.

Rozdział 3 doktorant poświęcił omówieniu zagadnień związanych z charakterystyką sejsmicznego pola falowego w pokładzie węgla kamiennego. Przedstawił rodzaje fal sejsmicznych oraz charakteryzujące je parametry, prezentując również podstawowe informacje dotyczące metod obliczania ich wybranych cech. Natomiast rozdział 4 został poświęcony szczegółowemu opisowi metodyki wyznaczania prędkości propagacji fal kanałowych w pokładzie węgla z wykorzystaniem trójwymiarowego modelowania numerycznego. Doktorant zaprezentował wprowadzenie teoretyczne dotyczące metody różnic skończonych, przedstawił sposób opracowania modelu oraz opisał przebieg symulacji propagacji fali sejsmicznej w oparciu o trójwymiarowy opis struktury pokładu.

W kolejnym fragmencie rozprawy (rozdział 5) doktorant szczegółowo scharakteryzował certyfikowany, iskrobezpieczny wzbudnik sejsmiczny WZB-2, przeznaczony do zastosowań w warunkach podziemnych zakładów górniczych. Urządzenie to służy do generowania kontrolowanych impulsów sejsmicznych, inicjujących propagację fal w pokładzie węgla lub innym ośrodku geologicznym, co umożliwia prowadzenie analiz jego właściwości geofizycznych. Autor zaprezentował również konkretny przykład zastosowania wzbudnika w rzeczywistych warunkach górniczych – w kopalni KWK ROW Ruch „Rydułtowy”.

Najobszerniejszy w rozprawie rozdział 6 zawiera szczegółowy przegląd oraz analizę rozdzielczości aparatury geofizycznej stosowanej w krajowym górnictwie. Autor przedstawił w nim m.in. informacje dotyczące rozwoju systemów i urządzeń wykorzystywanych do oceny zagrożeń tąpnięciami, koncentrując się przede wszystkim na rozwiązaniach polskich. Przeprowadził również analizę rozdzielczości sejsmoakustycznej aparatury pomiarowej stosowanej w warunkach podziemnych, zwracając uwagę na przewagę systemów cyfrowych nad analogowymi.

Zastosowanie wspomnianego wcześniej wzbudnika WZB-2 jako alternatywy dla materiałów wybuchowych w tomografii sejsmicznej, prowadzonej w trakcie eksploatacji rud miedzi (KGHM O/ZG „Rudna”), autor przedstawił w rozdziale 7. Omówił charakterystykę geologiczno-górniczną badanego rejonu oraz przedstawił

schemat układu pomiarowego zastosowanego podczas testów. Przeprowadził również analizę porównawczą wyników uzyskanych przy użyciu materiałów wybuchowych i wzbudnika WZB-2. Zakres testów nowego rozwiązania był jednak ograniczony, a uzyskane rezultaty miały w tym przypadku głównie charakter ilustracyjny i nie pozwalały na jednoznaczną ocenę skuteczności metody.

Wzbudnik WZB-2 został przez autora wykorzystany również do wyznaczania prędkości fal sejsmicznych na poligonie badawczym w KWK Mysłowice-Wesoła, w trudnych warunkach eksploatacyjnych ścian pokładu 510. Przebieg przeprowadzonych prac został przedstawiony w rozdziale 8 rozprawy. Doktorant zrealizował 14 sesji pomiarowych, wykorzystując aparaturę geofizyczną ARAMIS M/E. Przeprowadził przetwarzanie i interpretację uzyskanych danych, porównując efekty wzbudzeń uzyskanych z użyciem wzbudnika z rezultatami pomiarów wykonanych przy użyciu młota o masie 5 kg. Zaprezentował również wybrane wartości prędkości fal sejsmicznych obliczone na podstawie zarejestrowanych danych. Testy wzbudnika zostały ocenione jako udane i zakończyły się pozytywną opinią techniczną.

Działania analogiczne do opisanych wcześniej autor zaprezentował w rozdziale 9, gdzie przedstawił wyniki badań przeprowadzonych – również w wymagających warunkach górniczych – w KWK ROW Ruch „Rydułtowy”. Doktorant szczegółowo scharakteryzował lokalizację oraz warunki geologiczno-górnice miejsca eksperymentu, a także opisał zastosowany schemat pomiarowy. Przeprowadził ponadto przetwarzanie danych pomiarowych oraz ich szczegółową interpretację. Badania te stanowiły kolejny element walidacji wzbudnika w warunkach rzeczywistych, uzupełniający wcześniej przedstawione wyniki.

W końcowym, dziesiątym rozdziale autor dokonał podsumowania przeprowadzonych prac związanych z opracowaniem i wdrożeniem nowego źródła fal sejsmicznych. Zaproponowane przez niego i opisane w pracy rozwiązanie przyczynia się do zwiększenia skuteczności predykcji zagrożenia tąpnięciami, co w efekcie przekłada się na istotne podniesienie poziomu bezpieczeństwa eksploatacji węgla.

W mojej ocenie podejście przyjęte przez autora pracy, polegające na zastosowaniu modelowania numerycznego do analizy propagacji fal sejsmicznych w pokładach węgla, świadczy o trafnym wyborze problematyki badawczej oraz dobrej orientacji w aktualnych kierunkach rozwoju wiedzy w tym obszarze. Rozprawa stanowi istotny wkład w rozwój wiedzy w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka – ze szczególnym uwzględnieniem aspektów górniczych – zarówno

w wymiarze teoretycznym, jak i praktycznym. Może ona mieć realne znaczenie dla poprawy bezpieczeństwa eksploatacji w kopalniach głębinowych.

Całość pracy należy ocenić jako przykład prawidłowo zrealizowanego projektu badawczo-rozwojowego, osadzonego w aktualnych potrzebach przemysłu górniczego. Zarówno zastosowana metodyka, jak i zaproponowane rozwiązania techniczne świadczą o dojrzałości badawczej doktoranta oraz jego umiejętności integrowania wiedzy teoretycznej z praktyką inżynierską. W mojej opinii rozprawa spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim, a uzyskane wyniki mogą znaleźć zastosowanie w praktyce inżynierskiej w zakładach górniczych.

Recenzowana rozprawa doktorska posiada ewidentne cechy charakterystyczne dla doktoratu wdrożeniowego, zarówno pod względem opisanej metodyki badań, jak i zakresu zastosowań prezentowanego rozwiązania technicznego. Praca została osadzona w realiach przemysłu wydobywczego i skupia się na opracowaniu oraz testowaniu w warunkach rzeczywistych innowacyjnego rozwiązania technicznego – pneumatycznego, iskrobezpiecznego wzbudnika sejsmicznego, przeznaczonego do oceny stanu górotworu i predykcji zagrożeń tąpnięciami. Badania przeprowadzono w czynnych kopalniach węgla i rud miedzi (m.in. KWK Mysłowice-Wesoła, KWK ROW Ruch „Rydułtowy”, KGHM Rudna), a rezultaty eksperymentów uzyskały pozytywną ocenę techniczną. Praca zawiera istotne elementy badawczo-rozwojowe, takie jak numeryczne modelowanie propagacji fal sejsmicznych, analiza skuteczności różnych źródeł wzbudzenia czy ocena rozdzielczości aparatury geofizycznej. Opracowane rozwiązanie ma wymierny potencjał wdrożeniowy, który może zostać wykorzystany przez przemysł w celu poprawy bezpieczeństwa eksploatacji w kopalniach głębinowych, co czyni rozprawę bardzo dobrym przykładem pracy o charakterze wdrożeniowym.

Mam dwie niezbyt istotne uwagi krytyczne. Rozprawa sprawia ogólne wrażenie solidnie przygotowanej pracy inżynierskiej, co – w kontekście doktoratów wdrożeniowych – trudno uznać za wadę. Brakuje w niej jednak wyraźnie sformułowanej tezy badawczej, która byłaby weryfikowana poprzez przedstawione rezultaty prac autora. Choć jej obecność została zasygnalizowana w tytule rozdziału 2, to w treści brakuje jednoznacznego jej sformułowania. Za taką tezę mogłoby posłużyć na przykład zmodyfikowane zdanie z tego rozdziału: *„Możliwa jest identyfikacja zmian prędkości fal sejsmicznych, świadczących o zmianach naprężeń, niedostępna dla obecnych metod, a poprawiająca skuteczność profilaktyki*

tąpaniowej...". Drugą uwagę zwraca znaczący udział dorobku promotora pomocniczego – aż 75 spośród 111 pozycji w bibliografii to publikacje jego autorstwa lub współautorstwa. Mimo to autor rozprawy jest współautorem kilku publikacji z zakresu omawianej tematyki, co potwierdza, że jego wkład w opracowanie przedstawionego rozwiązania jest istotny i merytorycznie uzasadniony.

W mojej ocenie doktorant sprostał wymaganiom stawianym kandydatom do stopnia naukowego doktora, czego dowodem jest interesująca, spójna, logicznie skonstruowana i – co trzeba podkreślić – starannie przygotowana rozprawa. W tekście dostrzec można jedynie nieliczne, drobne uchybienia językowe, które nie wpływają na jego ogólną dobrą jakość i nie wymagają szczegółowej analizy. Praca wnosi z pewnością wartościowy wkład poznawczy, ale przede wszystkim praktyczny w obszar nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka (z oczywistym naciskiem na część górnictwą).

Recenzowana rozprawa może okazać się przydatna dla środowiska naukowego, jak i dla praktyków zajmujących się zagadnieniami monitoringu sejsmicznego w górnictwie podziemnym oraz analizą stanu naprężenia górotworu w rejonie eksploatowanych ścian. Dostarcza ona szczegółowych informacji na temat projektowania i implementacji systemów pomiarowych z wykorzystaniem bezpiecznych źródeł wzbudzenia, a także możliwości zastosowania modelowania numerycznego do analizy propagacji fal sejsmicznych w złożonych warunkach geologicznych. Przedstawione w pracy wyniki mogą również stanowić cenny materiał wspierający podejmowanie decyzji w zakresie profilaktyki *tąpaniowej*, projektowania systemów bezpieczeństwa sejsmicznego w kopalniach oraz dalszego rozwoju technologii diagnostycznych dla przemysłu wydobywczego.

Proszę, aby autor podczas publicznej obrony odniósł się do kilku kwestii, które mogą wymagać doprecyzowania lub dodatkowego wyjaśnienia, a które zwróciły moją uwagę podczas lektury rozprawy. Wymieniam je poniżej:

1. Brak jasno sformułowanej tezy (wspomniany wcześniej w tekście recenzji – nie wymagam wyjaśniania).
2. We wzorze 4.4 opisano symbol θ jako „Kubiczną dylatację”. Czy nie lepiej użyć określenia „dylatacja objętościowa”?
3. Czy zdaniem autora, dla testów wzbudnika WZB-2 opisanych w rozdziale 5, energia wymuszenia wynosząca 150J przy odległości geofonów ok. 200m jest

wystarczająca dla uzyskania danych o jakości umożliwiającej rzetelną interpretację sejsmoakustyczną?

4. Czy dla zachowania umownego podziału rozprawy na część literaturową i badawczą nie byłoby celowe zamienienie kolejności rozdziałów 5 i 6? Obecna struktura może sprawiać wrażenie zaburzenia logicznego toku wyводу. Warto również rozważyć zmianę tytułu rozdziału 6, ponieważ odnosi się on wyłącznie do górnictwa węglowego, podczas gdy już w pierwszym podrozdziale (6.1) poruszana jest tematyka obejmująca również kontekst eksploatacji rud miedzi.
5. Nie jest do końca jasne, dlaczego w rozdziale 6 (str. 52-53) umieszczono wyróżnione zdanie: *„Niniejsza praca doktorska udowodniła, że możliwe jest skonstruowanie mobilnego, iskrobezpiecznego i sterowanego pneumatycznego źródła sejsmicznego [...] do bieżącej oceny stanu zagrożenia tąpnięciami [...]”*. Treść ta – mająca charakter jednoznacznego wniosku – znacznie lepiej pasowałaby do końcowego podsumowania rozprawy, gdzie pełniłaby funkcję podkreślenia osiągniętego celu i znaczenia przeprowadzonych prac.
6. Str. 53 – warto unikać sformułowania *„niniejsza praca badawczo-wdrożeniowa”*, nawet jeśli odzwierciedla ono rzeczywisty charakter prowadzonych działań. Rozprawa została złożona jako praca doktorska, i jako taka powinna być konsekwentnie określana w treści dokumentu. Użycie innego określenia może wprowadzać niepotrzebne wątpliwości co do jej formalnego statusu.
7. Z czego wynika ograniczenie w możliwości ciągłego śledzenia prędkości propagacji fal sejsmicznych przed frontem eksploatowanej ściany węglowej? Na str. 80 autor używa sformułowania *„niemal ciągłe”*, co sugeruje istnienie pewnych barier technicznych, organizacyjnych lub metodycznych. Warto byłoby doprecyzować, jakie konkretne czynniki ograniczają pełną ciągłość pomiarów – czy wynika to z charakterystyki aparatury, ograniczeń środowiskowych, czy też przyjętej metodyki pomiarowej.

Przedstawione wyżej pytania i uwagi nie wpływają w żaden sposób na moją dobrą ocenę recenzowanej pracy. Wyniki w niej zaprezentowane są bardzo interesujące i cechują się olbrzymim potencjałem aplikacyjnym. Autor jasno i logicznie przedstawił rezultaty swoich prac, podejmując próbę głębokiej interpretacji uzyskiwanych wyników w kontekście dotychczasowej wiedzy. W mojej opinii wykazał się zarówno rozległą wiedzą naukową, jak i ekspercką w zakresie geoinżynierii

sejsmicznej w górnictwie podziemnym, co jednoznacznie wpisuje się w zakres dziedziny inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

Wykonana przez doktoranta praca ma wymiar zarówno naukowy, jak i praktyczny – wnioski z niej płynące mogą posłużyć do udoskonalenia systemów monitoringu sejsmicznego w kopalniach, optymalizacji metod oceny stanu naprężeń w górotworze oraz rozwoju bezpiecznych, alternatywnych metod wzbudzania fal sejsmicznych w środowiskach wysokiego ryzyka. Potencjalne wdrożenie przedstawionych rozwiązań może przyczynić się do zwiększenia bezpieczeństwa eksploatacji w kopalniach głębinowych oraz lepszego zarządzania ryzykiem tąpniowym.

Po szczegółowej analizie przedstawionej do recenzji rozprawy doktorskiej ostatecznie stwierdzam, że spełnia ona wymagania stawiane pracom doktorskim, określonym w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.

W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie Pana mgr. inż. Przemysława Sierodzkiego do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Podpisał Sławomir Stelmach