

Dr hab. inż. Piotr Bańka, prof. PŚ
Wydział Górnictwa, Inżynierii Bezpieczeństwa
i Automatyki Przemysłowej
Politechnika Śląska

Gliwice, 11.01.2021 r.

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgr. inż. Jacka Krupanka
p.t.: „Ocena stanu zagrożenia sejsmicznego z wykorzystaniem rozkładu
Gutenberg-Richtera i metody geotomografii aktywnej”

Podstawa prawna wykonania recenzji: zamówienie Dyrektora Głównego Instytutu Górnictwa Pana prof. dr. hab. inż. Stanisława Pruska, zawarte w piśmie z dnia 8 grudnia 2020 r. o numerze NSR/213/2020.

1. Ogólna charakterystyka, tematyka rozprawy

Recenzowana rozprawa składa się z 8 rozdziałów, poprzedzonych streszczeniami w językach polskim i angielskim, spisem treści oraz wykazem symboli. Po ósmym rozdziale rozprawy znajduje się obszerny spis wykorzystanej literatury, liczący 148 pozycji. Do pracy dołączono także 7 załączników, które bardzo dobrze dokumentują wyniki obliczeń stanu zagrożenia sejsmicznego z wykorzystaniem opracowanej przez Autora metody, a także płytę CD z nagraniem arkuszem kalkulacyjnym Ocena_GRTA.

Promotorem rozprawy jest Pani dr hab. inż. Krystyna Stec, prof. GIG, promotorem pomocniczym Pan dr inż. Łukasz Kortas.

Tematyka rozprawy dotyczy problemu prognozowania zagrożenia sejsmicznego indukowanego prowadzonymi robotami wybierkowymi w kopalniach węgla kamiennego Górnośląskiego Zagłębia Węglowego.

W wielu zakładach górniczych prowadzone roboty indukują zjawiska sejsmiczne, które mogą być przyczyną odprężeń i tępnię, stwarzających zagrożenie dla pracowników i mienia kopalni. Niektóre wysokoenergetyczne wstrząsy górotworu wywołują silne drgania gruntu, które często są powodem zaniepokojenia mieszkańców, sporadycznie powodują uszkodzenia obiektów budowlanych.

Zwiększając się głębokość eksploatacji oraz objętość wybranego złoża, konieczność prowadzenia robót w skomplikowanych warunkach geologiczno-górnich, wpływają na wzrost zagrożenia sejsmicznego. W związku z tym, praktycznie we wszystkich zakładach górniczych w GZW, prowadzony jest ciągły monitoring sejsmiczności indukowanej. Dokonuje się znaczący postęp technologiczny w odniesieniu do konstrukcji aparatów seismologicznych. Stale rozbudowywane są sieci obserwacyjne. Coraz częściej kopalniane stacje geofizyki górniczej wyposażone są w kilkadziesiąt stanowisk seismometrycznych. Zwiększająca się liczba stanowisk podziemnych sieci obserwacyjnych powoduje, przy ograniczonych powierzchniach obszarów górniczych, że część tych stanowisk lokalizowana jest w niedużej odległości od przodków prowadzonych wyrobisk górniczych. Wpływa to na wzrost liczby rejestrowanych wstrząsów górotworu, ponieważ zmniejsza się próg energetyczny zjawisk, które mogą być poprawnie zaobserwowane. Duża liczba rejestrowanych zjawisk pozwala wykorzystywać do analizy sejsmiczności indukowanej metody statystyczne.

Równie istotny postęp dokonał się w przypadku aparatów wykorzystywanych do przeprowadzania badań sejsmicznych. Wzrosła także ich dostępność. Coraz częściej badania takie są niemal rutynowo wykonywane w przypadku prowadzenia robót w rejonach, w których spodziewany lub obserwowany jest wysoki poziom zagrożenia sejsmicznego i tąpnięciami.

Dokonującemu się postępowi technologicznemu towarzyszy znacznie mniej spektakularny rozwój metod interpretacyjnych. W przypadku obserwacji seismologicznych rezultaty prowadzonego monitoringu z reguły wykorzystywane są jedynie do wyznaczenia lokalizacji i energii sejsmicznych zjawisk i następnie wykorzystania tych danych w metodzie kompleksowej oraz do jakościowych analiz położenia epicentrow wstrząsów względem prowadzonych i utrzymywanych wyrobisk górniczych. Z kolei w rezultacie prac sejsmicznych najczęściej sporządzane są mapy rozkładów prędkości fal podłużnych w pokładzie i w skałach otaczających oraz kilku wskaźników charakteryzujących stan zagrożenia sejsmicznego i tąpnięciami.

W ciągu najbliższych lat, pomimo ograniczania wydobycia węgla kamiennego w GZW, należy oczekiwać dalszego utrzymywania się, a nawet wzrostu zagrożenia sejsmicznego towarzyszącego prowadzonym robotom górniczym. Dlatego konieczne jest dalsze rozwijanie metod interpretacji wyników badań sejsmicznych i obserwacji seismologicznych. Recenzowana rozprawa wpisuje się w tę tematykę badawczą.

W świetle powyższych uwag, podjęcie przez Autora rozprawy tematyki związanej z opracowaniem nowej metody prognozowania zagrożenia sejsmicznego uważam za bardzo celowe, biorąc pod uwagę zarówno względy poznawcze jak i aplikacyjne.

2. Zawartość merytoryczna rozprawy doktorskiej

We wstępie do pracy Autor krótko omówił zagadnienia dotyczące prognozowania zagrożenia sejsmicznego w zakresie związanym z tematyką rozprawy.

W drugim rozdziale przedstawione zostały cel oraz zakres pracy. Celem przeprowadzonych badań było opracowanie nowej metody prognozowania zagrożenia sejsmicznego. W zaproponowanej przez Autora metodzie wykorzystane zostały dwa podejścia: statystyczne – zależność Gutenberga-Richtera oraz sejsmiczne – rozkład prędkości fal refrakcyjnych typu P w skałach stropowych określony metodą aktywnej tomografii sejsmicznej.

Poligon badawczy stanowiły trzy rejony eksploatacji ścianowej prowadzonej w warunkach dużego zagrożenia sejsmicznego i tąpnięciami w dwóch kopalniach węgla kamiennego położonych w GZW. W każdym z rejonów przeanalizowano prowadzenie dwóch wyrobisk ścianowych.

Zakres pracy obejmował:

- odpowiednią interpretację wyników badań tomograficznych,
- wyznaczenie, z dobowym krokiem, wartości parametru b zależności Gutenberga-Richtera z wykorzystaniem zarchiwizowanych danych o zjawiskach sejsmicznych,
- obliczenie odchylenia wartości parametru b od wartości średniej tego parametru określanej od początku biegu rozpatrywanego wyrobiska ścianowego,
- ustalenie wartości parametru Z_{GR-TA} , będącego podstawą wyznaczenia stanu zagrożenia sejsmicznego zgodnie z nowoopracowaną metodą.

Autor pracy zrezygnował z formułowania tezy pracy. Uważam, że podawanie tezy rozprawy nie jest konieczne, stąd nie należy tego traktować jako uchybienie.

Natomiast w streszczeniu pracy znalazło się stwierdzenie:

„W niniejszej pracy pt. ... założono i podjęto próbę zweryfikowania tezy, że możliwe jest wykorzystanie połączenia:

- *trendu zmian współczynnika b rozkładu Gutenberga-Richtera w przesuwających się oknach czasowych i z określonym krokiem,*

- *wyników badań geofizycznych metodą aktywnej tomografii sejsmicznej (w skałach otaczających)*

jako dodatkowej składowej (kryterium) oceny zagrożenia sejsmicznego (tąpnięciami) dla prowadzonej eksploatacji pokładów węgla kamiennego systemami ścianowymi.”

Tak sformułowana, hipotetyczna teza, przede wszystkim w zakresie zagrożenia sejsmicznego, została w pracy udowodniona. Wprawdzie dużemu zagrożeniu sejsmicznemu z reguły (ale nie zawsze) towarzyszy duże zagrożenie tąpnięciami, uważam jednak, że nie należy utożsamiać prognozy tych dwóch różnych, chociaż genetycznie ze sobą związanych, zjawisk.

W rozdziale 3 został przedstawiony przegląd metod oceny stanu zagrożenia sejsmicznego. Autor w tym rozdziale dużo uwagi poświęcił zależności Gutenberg-Richtera, co jest w pełni uzasadnione, biorąc pod uwagę tematykę rozprawy. Przedstawione zostały: metodyka wyznaczania wartości parametru b zależności Gutenberg-Richtera oraz szacowania dokładności wyznaczenia tej wartości, a także przykłady literaturowe prezentujące możliwość wykorzystania zmian wartości parametru b do prognozowania stanu zagrożenia sejsmicznego.

Równie dużo uwagi zostało poświęcone metodzie sejsmiki górniczej. Omówione zostały metody badań sejsmicznych wykorzystywane w górnictwie, a także wybrane przykłady literaturowe pokazujące rezultaty pomiarów sejsmicznych.

Rozdział 4 zawiera szczegółowy, podany w formie algorytmu, opis sposobu obliczania wartości wskaźnika Z_{GR-TA} wykorzystywanego w opracowanej przez Autora metodzie prognozowania zagrożenia sejsmicznego na wybiegach prowadzonych wyrobisk ścianowych. W tym fragmencie rozprawy zostały także przedstawione sposoby obliczania wartości parametru b zależności Gutenberg-Richtera oraz wykorzystywana aparatura i sposób interpretacji wyników badań metodą aktywnej tomografii sejsmicznej.

Piąty rozdział stanowi blisko połowę recenzowanej rozprawy. Jest to uzasadnione, ze względu na istotność zawartych w nich rozważań. W rozdziale tym zostały przedstawione warunki geologiczno-górniczne i kształtowanie się zagrożenia sejsmicznego i tąpnięciami, wraz ze stosowaną profilaktyką dla rozpatrywanych trzech rejonów eksploatacji górniczej prowadzonej w KWK Ruda Ruch Bielszowice i KWK Mysłowice-Wesoła. Autor podał także wyniki badań metodą aktywnej tomografii sejsmicznej oraz obliczeń zmian wartości parametru b zależności Gutenberg-Richtera. Należy podkreślić bardzo staranne przygotowanie materiału badawczego.

Doskonale udokumentowanie rezultatów badań sejsmicznych oraz obliczeń wartości parametru b przekłada się na wiarygodność uzyskanych wyników, które zostały podane w siódmym rozdziale pracy oraz w załącznikach 1 ÷ 6.

W szóstym rozdziale pracy Doktorant podał kryteria oceny stanu zagrożenia sejsmicznego z wykorzystaniem opracowanej przez Niego nowej metody prognozowania. Rozdział ten można traktować jako instrukcję stosowania metody. Dzięki temu, że Autor opracował arkusz kalkulacyjny służący do obliczania wartości wskaźnika Z_{GR-TA} , nowa metoda prognozowania zagrożenia sejsmicznego może zostać natychmiast wdrożona w pozostałych zakładach górniczych, w pierwszym etapie w celu weryfikacji empirycznie przyjętych wartości wag.

Rozdział 7, drugi pod względem obszerności rozdział pracy, zawiera analizę uzyskanych wyników. Wykorzystując rezultaty badań Autor pozytywnie zweryfikował zdolności prognostyczne nowo opracowanej metody oceny stanu zagrożenia sejsmicznego. Podkreślił, że jest to weryfikacja jakościowa i subiektywna, ale należy się w pełni zgodzić z wnioskami formułowanymi przez Doktoranta, dotyczącymi zgodności rezultatów obliczeń prognostycznych z rzeczywistym kształtowaniem się zagrożenia sejsmicznego.

W rozdziale 8 przedstawione zostały wnioski wynikające z przeprowadzonych badań. Są one poprawnie sformułowane, wynikają z rozważań zaprezentowanych w rozprawie.

Podsumowując merytoryczną charakterystykę rozprawy, chciałbym podkreślić staranność jej przygotowania. Autor omówił wyczerpująco wszystkie istotne zagadnienia. Materiał ilustracyjny i tabelaryczny został bardzo starannie opracowany i opisany.

3. Uwagi i komentarze

Podczas lektury recenzowanej rozprawy nasunęło mi się kilka uwag o charakterze dyskusyjnym i wątpliwości.

1. Autor w prowadzonych badaniach wykorzystał następującą postać zależności Gutenberga-Richtera: $\log N = a - b M$. Ze względu na to, że kopalniane stacje geofizyki górniczej określają energię sejsmiczną wstrząsów, konieczne było przeliczanie energii sejsmicznej na magnitudę z użyciem wzoru $\log E = 1,8 + 1,9 M_L$. Wydaje się, że było to spowodowane wykorzystywaniem do przeprowadzania obliczeń programu GMB, w którym zaimplementowano taki

algorytm. Warto zwrócić uwagę, że zastosowanie zależności Gutenberga-Richtera w postaci $\log N = a - b \log E$ nie wymagałoby przeliczania energii sejsmicznej wstrząsu na magnitudę, a tym samym można by uniknąć dyskusji dotyczącej aktualności wzoru przeliczeniowego.

2. Do obliczania zasięgu oddziaływania krawędzi wykorzystano w pracy program Zasięg, który wykorzystuje zależności analityczne. Można było również wykorzystać nomogramy opracowane przez prof. J. Dubińskiego na podstawie wyników badań sejsmicznych. Zgodnie z tymi nomogramami zasięg oddziaływania krawędzi w miarę wzrostu odległości pionowej początkowo zwiększa się, by następnie zacząć zmniejszać się. W dużej odległości oddziaływanie krawędzi zanika.
3. Na 23 stronie pracy Autor podał, że długość okna była ustalana tak, by w danym przedziale czasu wystąpiło $25 \div 30$ wstrząsów. Czy przyjęta liczba wstrząsów wynika z rozważań teoretycznych (np. z wykorzystaniem rezultatów prac prof. J. Kornowskiego), czy została ustalona empirycznie?
Na tej samej stronie podano, że obliczana jest wartość odchylenia standardowego parametru b oznaczona σ_b . W związku z tym powstaje pytanie, czy ustalona została jakaś wartość kryterialna tego odchylenia, czy stosowano indywidualną interpretację jego wartości?
4. Na rysunku 5.9 i kolejnych mu odpowiadających, przedstawiono wykres zmian wartości parametru b zależności Gutenberga-Richtera. Na wykresie tym naniesiono także średnią wartość tego parametru. Wydaje się, że wynika to z algorytmu zastosowanego programu GMB (na co wskazuje rysunek 4.5). W przypadku publikacji tego rysunku proponowałbym na wykres nanieść wartości b_{sr} , określane zgodnie z metodologią przyjętą w pracy, tak jak np. na rysunku 5.12.
5. W tabeli 5.4 i kolejnych jej odpowiadających, podano wartości minimalnej i maksymalnej magnitudy wstrząsów. Nie znalazła się natomiast informacja, jaką przyjęto wartość magnitudy progowej od której obowiązuje zależność Gutenberga-Richtera. Czy była to jedna wartość przyjęta dla wszystkich rejonów, czy ustalano ją niezależnie dla każdej z rozpatrywanych ścian, czy dla każdego dnia obserwacji? Jeżeli została określona w pierwszy bądź drugi z powyższych sposobów, to ile wynosiła; jeżeli zgodnie z trzecim – jaki był zakres przyjmowanych wartości?

6. W opracowanej metodzie w celu określenia wartości wskaźnika Z_{GR-TA} , Autor przyjmuje maksymalną wartość prędkości fal podłużnych stwierdzoną na obszarze miesięcznego odcinka wybiegu ściany. W związku z tym mam pytanie, czy był to arbitralny wybór, czy przeprowadzono analizy porównawcze, rozpatrując na przykład możliwość uwzględniania wartości gradientu pola prędkości fal sejsmicznych.
7. W tabeli 6.1 brakuje ustalenia wagi dla przypadków, gdy $b = b_{sr}$ oraz $b = 1,5$. Ponadto warunek $b < b_{sr}$ i $b > 1,5$ oraz warunek $b > b_{sr}$ i $b > 1,5$ można zastąpić warunkiem $b > 1,5$ (przy założeniu, że jedna z nierówności wymienianych jako pierwsze jest nieostra). Ustalenie wagi dla przypadku, gdy $b = b_{sr}$ i $b = 1,5$ jest istotne, bowiem wtedy $z_{A_{G-R}} = 0$, co zgodnie z tab. 6.2 oznacza, że waga $z_{A_{G-R}}$ może wynosić 1 lub 2, zależnie od wagi z_b .
8. W opracowanej metodzie Autor przyjął, że wagi parametrów $z_{A_{G-R}}$ i $z_{V_{psmax}}$ są sumowane. Nie neguję takiego podejścia, ale warto zwrócić uwagę, że można także rozpatrywać inne, na przykład wartość średnią wag. Czy podczas opracowywania metody były analizowane inne sposoby ustalania wartości wypadkowej wag, czy przyjęto rozwiązanie zgodne z instrukcją stosowania metody kompleksowej?
9. W rozdziale 7 Doktorant przedstawił wyniki weryfikacji opracowanej metody. Duża zmienność obliczonych ocen stanu zagrożenia sejsmicznego świadczy o tym, że wskaźnik Z_{GR-TA} jest czuły na zmiany zachodzące w górotworze. Przedstawione rezultaty porównania obliczanego i rzeczywistego stanu zagrożenia sejsmicznego wskazują, że metoda może być wykorzystywana jako skuteczne narzędzie do prognozowania poziomu tego zagrożenia. Rezultaty analiz, których wyniki zostały podane w rozdziale 7 byłyby jeszcze bardziej przekonujące, gdyby Doktorant przedstawił zbiorcze zestawienie tabelaryczne, w którym podane byłyby wskaźniki charakteryzujące skuteczność wykonywanych prognoz, na przykład:
 - liczba „sukcesów” – wystąpienie wstrząsu wysokoenergetycznego przy prognozie stanu powyżej „a”,
 - liczba „porażek” – wystąpienie wstrząsu wysokoenergetycznego przy prognozie stanu „a”,
 - wystąpienie wstrząsu o energii rzędu 10^6 J i większych przy prognozowanych stanach „a”, „b”, „c” i „d”,

- brak wstrząsu o energii rzędu 10^6 J i większych przy prognozowanych stanach „c” i „d”.

10. Wydaje się, że zwiększone zagrożenie sejsmiczne może wynikać także z procesów zachodzących w warstwach wstrząsogennych zalegających w dużej odległości od eksploatowanego pokładu, a znajdujących się w niekorzystnym stanie deformacyjno-energetycznym będącym rezultatem oddziaływania krawędzi wytworzonych w blisko leżących pokładach. Te krawędzie, ze względu na dużą odległość od eksploatowanego pokładu mogą praktycznie nie oddziaływać, zarówno na ten pokład jak i na warstwy stropu bezpośredniego. W tych warunkach aktywna tomografia sejsmiczna nie wykaże wzrostu prędkości fali refrakcyjnej. W trakcie dalszego rozwijania opracowanej metody proponowałbym podjęcie próby wykorzystania rezultatów analitycznych (numerycznych) prognoz stanów naprężeniowo-energetycznych, które umożliwią uwzględnienie procesów zachodzących w odległych warstwach skalnych.

Podsumowując, pragnę podkreślić, że wysoko oceniam merytoryczny poziom recenzowanej pracy. Sformułowane uwagi nie zmieniają wysokiej oceny rozprawy. W oparciu o analizę przedłożonej pracy stwierdzam, że Doktorant bardzo rzetelnie wykonał zaplanowany przez siebie zakres badań i analiz. Umożliwiło to zrealizowanie założonego celu pracy. Treść rozprawy świadczy o jego bardzo dobrej znajomości opisywanej problematyki.

Uważam, że ze względu na bardzo dużą wartość aplikacyjną uzyskanych wyników, powinny one zostać opublikowane. Rozprawa została bardzo starannie zredagowana, tym niemniej Doktorant nie ustrzegł się drobnych potknięć stylistycznych i językowych. Zauważone błędy zaznaczyłem w recenzentkim egzemplarzu pracy i przedyskutowałem z Autorem. W związku z tym, a także ze względu na to, że nie mają one wpływu na merytoryczną ocenę pracy, nie zostały one zamieszczone w recenzji.

4. Wniosek końcowy

W konkluzji wyrażam opinię, że recenzowana rozprawa doktorska mgr. inż. Jacka Krupanka p.t. **„Ocena stanu zagrożenia sejsmicznego z wykorzystaniem rozkładu Gutenberga-Richtera i metody geotomografii aktywnej”** dotyczy dyscypliny naukowej górnictwo i geologia inżynierska. Praca ma

charakter poznawczy i użyteczny, stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego sformułowanego w temacie rozprawy, potwierdza, że Autor posiada szeroką wiedzę teoretyczną i umiejętność prowadzenia badań naukowych w zakresie dyscypliny górnictwo i geologia inżynierska.

Analizowana rozprawa doktorska spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim w *Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule naukowym w zakresie sztuki oraz Ustawie z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*. Na tej podstawie wnoszę do Rady Naukowej GIG o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

