

Gliwice, dnia 04.08.2023 r.

Prof. dr hab. inż. Piotr Strzałkowski
Wydział Górnictwa, Inżynierii Bezpieczeństwa
i Automatyki Przemysłowej

R E C E N Z J A
PRACY DOKTORSKIEJ P.T.:
„ANALIZA OBNIŻEŃ POWIERZCHNI NA TERENACH GÓRNICZYCH
I POGÓRNICZYCH W ASPEKCIE ZASIĘGU I CZASU Z WYKORZYSTANIEM
INTERFEROMETRII SATELITARNEJ”,
autorstwa Pana mgr. inż. Bartosza Apanowicza

1. PODSTAWA FORMALNA RECENZJI

Podstawę formalną recenzji stanowi pismo z dnia 06.07.2023 r. Pana prof. dr hab. inż. Stanisława Pruska, Dyrektora Głównego Instytutu Górnictwa. W piśmie tym Pan Profesor S. Prusek zwrócił się o wykonanie recenzji pracy doktorskiej pt.: „Analiza obniżeń powierzchni na terenach górniczych i pogórnicznych w aspekcie zasięgu i czasu z wykorzystaniem interferometrii satelitarnej”, autorstwa Pana mgr. inż. Bartosza Apanowicza

2. OMÓWIENIE PRACY

W rozdziale 1, Wprowadzeniu, Autor oprócz stwierdzeń dotyczących oddziaływania górnictwa na środowisko przedstawił cel pracy. Dokonał przy tym jego rozgraniczenia na cel naukowy i użyteczny. Cel naukowy pracy to: „*Adaptacja metod InSAR do wykrywania dużych obniżeń powierzchni w warunkach GZW, a także wyznaczenia zasięgu i czasu zaniku deformacji.*”

Natomiast cel użyteczny określono następująco: „*Wyznaczenie deformacji (obniżeń) powierzchni oraz granic zasięgu deformacji powierzchni na terenach górniczych*”

z wykorzystaniem metod InSAR, a także ich weryfikacja na podstawie klasycznych pomiarów geodezyjnych.”

Mając na względzie powyższe cele, Autor sformułował tezę pracy, która brzmi następująco: *„Metody interferometrii satelitarnej pozwalają na wyznaczenie dużych obniżeń powierzchni powstałych na skutek eksploatacji górniczej prowadzonej w warunkach GZW oraz na określenie granic zasięgu i czasu zaniku deformacji powierzchni na terenach górniczych i pogórniczych.”*

Rozdział 2 pracy zatytułowany został: *„Charakterystyka problemu badawczego”*. Istotnym spostrzeżeniem zawartym w tym rozdziale jest uwaga dotycząca braku w literaturze przykładów wykorzystania metod InSAR do określania dużych wartości obniżeń (większych niż 1 m) na danym obszarze, objętym pomiarami wykonywanymi przy wykorzystaniu tradycyjnych technik geodezyjnych. Tym samym wyniki pomiarów InSAR nie zostały objęte dokładną walidacją opartą na wynikach uzyskanych na podstawie tradycyjnych metod geodezyjnych.

W rozdziale tym Autor zdefiniował również pojęcia związane z czasem zaniku ruchów powierzchni i zasięgu strefy objętej wpływami eksploatacji górniczej. Stwierdził, że jego zdaniem, najnowsze badania prowadzone nad czasem zaniku ruchów powierzchni prowadzone były w Dolnośląskim Zagłębiu Węglowym w 2000 r. i czas ten wyniósł 5 lat. W badaniach nad zagadnieniem tym wykorzystuje się model teoretyczny zaproponowany przez S. Knothego. Przy czym występujący we wzorze wyrażającym prawo ograniczonego wzrostu współczynnik c zależny jest od głębokości eksploatacji, budowy geologicznej górotworu i stopnia jego zruszenia eksploatacją górniczą. Wymienione przez Autora czynniki mają, Jego zdaniem, bezpośredni wpływ na dokładność określania czasu zaniku ruchów górotworu.

Rozdział 3 pracy zawiera informacje dotyczące deformacji terenu górniczego i ich prognozowania ze szczególnym uwzględnieniem teorii Budryka-Knothego. Przytoczono również informacje dotyczące zasięgu deformacji oraz zaniku ruchów górotworu. Przytacza również pogląd mówiący, że górotwór jest uspokojony, gdy miesięczne przyrosty obniżeń nie przekraczają wartości 3 mm.

W dalszej kolejności przedstawiono istotę pomiarów dokonywanych za pomocą interferometrii satelitarnej, schemat działania pomiaru oraz scharakteryzowano obecnie wykorzystywane metody przetwarzania zobrażeń satelitarnych.

W rozdziale 4 przedstawiono objęte pracą rejony prowadzonych pomiarów w GZW. Scharakteryzowano warunki geologiczno-górnicze GZW i przedstawiono 7 rejonów, w których

proawdzono pomiary oraz zaprezentowano ich wyniki w formie wykresów niecek osiadania i osiadań reperów w czasie.

Rozdział 5 zawiera charakterystykę zastosowanych metod badawczych oraz analizę otrzymanych wyników. Do przetwarzania zobrazaowań SAR zastosowano metodę SBAS. Przedstawiono porównania obniżeń stwierdzonych pomiarami wykonanymi za pomocą niwelacji geometrycznej i InSAR z terenu 6 kopalń. Zamieszczone wykresy obniżeń w kolejnych cyklach pomiarowych oraz obniżeń reperów w czasie wskazały na bardzo duże rozbieżności pomiędzy wynikami pomiarów dokonanyimi obiema metodami. Uzyskane wyniki doprowadziły Autora do słusznego wniosku, „...*że klasyczna metoda SBAS nie sprawdza się w warunkach GZW i konieczne jest stosowanie dodatkowych rozwiązań w celu identyfikacji dużych obniżeń.*” Biorąc pod uwagę powyższy wniosek Autor postanowił przeprowadzić obliczenia metodą PSInSAR. Stwierdził on, że metoda nadaje się do zastosowania z uwagi na wysoką oraz stabilną amplitudę odbicia sygnału na terenie zurbanizowanym i pozwala na wykrywanie ruchów rzędu 1-3 mm i ich przyrostów w czasie rzędu 0.1 – 0.5 mm/rok. Walidacja wyników została wykonana w oparciu o wyniki pomiarów niwelacji geometrycznej przeprowadzonych na czterech reperach zlokalizowanych w północnej części filara ochronnego śródmieścia Bytomia. Przedstawiono wykresy obniżeń tych reperów w czasie uzyskane w wyniku przeprowadzenia niwelacji geometrycznej oraz na podstawie pomiarów InSAR.

W rozdziale 6 Autor przedstawił w pierwszej kolejności analizę mającą na celu znalezienie zależności pomiędzy prędkością osiadania reperów a niedoszacowaniem wyników uzyskanych na drodze InSAR-SBAS w stosunku do wyników pomiarów uzyskanych na podstawie niwelacji geometrycznej. Analiza ta wykazała istnienie zależności liniowej pomiędzy tymi wielkościami. W dalszej kolejności wykorzystano zależność liniową do oszacowania wartości błędów w wynikach i określono wartości obniżeń przy ich uwzględnieniu. Następnie przedstawiono porównanie wartości obniżeń stwierdzonych pomiarami niwelacyjnymi i otrzymanymi po skorygowaniu wartości obniżeń o wyliczone wartości błędów. Porównanie takie przedstawiono dla kilku linii pomiarowych, wykazując przy tym, że zastosowanie funkcji liniowej do wyliczenia wartości błędów pozwoliło na uzyskanie dobrej zgodności pomiędzy wartościami obniżeń stwierdzonych obiema metodami. Podsumowując, Autor wykazał, jak sam to lakonicznie określił, że „*Hybrydowe podejście SBAS+zależność liniowa może być z powodzeniem stosowane w GZW z dokładnością do kilkunastu centymetrów.*”

Rozdział 7 pracy dotyczy określenia zasięgu deformacji górniczych. Przeprowadzone analizy doprowadziły Autora do wniosku, że średni zasięg deformacji wynosi:

$$L_{\text{sr}}(H) = 1.16 H \pm 0.22 H$$

gdzie H jest głębokością eksploatacji.

Jednocześnie Autor zauważył, że: „W GZW nie można wybrać rejonów badań, w których nie ma eksploatacji prowadzonej w sąsiedztwie.” Biorąc pod uwagę stwierdzone obniżenia metodą InSAR w rejonie, gdzie nie była prowadzona eksploatacja górnicza, określono, że błąd wyznaczenia obniżeń metodą SBAS wynosi ± 13 mm.

W rozdziale 8 Autor przedstawił analizę czasu zanikania procesu deformacji w oparciu o wyniki pomiarów dokonywanych za pomocą niwelacji geometrycznej, a następnie o pomiary wykonane metodą InSAR. Do analiz wykorzystano wyznaczone wartości współczynnika c. Porównano czas zaniku ruchów powierzchni określony w oparciu o wyniki pomiarów PSInSAR z logarytmiczną linią trendu, teoretycznym czasem określonym w oparciu o wyniki pomiarów niwelacyjnych prowadzonych w trakcie dokonywania eksploatacji i po jej zakończeniu oraz w oparciu o wyniki pomiarów InSAR wykonane po zakończeniu eksploatacji. Rozdział 9 to wnioski wynikające z badań przedstawionych w pracy.

3. OCENA PRACY I UWAGI KRYTYCZNE

Tematykę pracy należy uznać za ważną i aktualną. Jest tak dlatego, że kopalnie w ostatnich latach ograniczyły ze względów ekonomicznych zakres pomiarów geodezyjnych wyłącznie do rejonów, gdzie prowadzona jest eksploatacja górnicza. Sytuacja ta prowadzi do braku możliwości jednoznacznego i obiektywnego stwierdzenia, czy dany obszar poddany jest jeszcze wpływowi zakończonej eksploatacji górniczej. Ten stan rzeczy może zmienić wykorzystanie do określenia ruchów górotworu nowych technik pomiarowych – pomiarów satelitarnych InSAR.

W pracy wykazano jednoznacznie, że wykorzystanie tych nowych technik jest możliwe, jednakże pod pewnymi warunkami. Stosowanie ich wymaga odpowiedniego sposobu interpretacji. Przetwarzanie wyników metodą SBAS, przedstawione w rozdziale 5, pozwoliło na uzyskanie bardzo małej zgodności z wynikami pomiarów prowadzonych za pomocą niwelacji geometrycznej. Generalnie wystąpiło, jak to określił Autor, „niedoszacowanie” wyników otrzymanych za pomocą metody InSAR. Opracowana przez Autora i opisana w rozdziale 6, „metoda liniowa” (liniowa zależność pomiędzy wielkością niedoszacowania wyników SBAS a prędkością obniżeń) pozwoliła na uzyskanie zadawalającej korelacji pomiędzy wynikami pomiarów satelitarnych i niwelacją geometryczną. Zdaniem recenzenta ta część pracy, a zwłaszcza zaproponowana metoda liniowa stanowi główne i bezsprzeczne

osiągnięcie Autora. Dzięki solidnie przeprowadzonym analizom Autor wykazał możliwość wykorzystania pomiarów satelitarnych do badania deformacji terenu górniczego i wskazał, jak z nich korzystać, aby otrzymywać wiarygodne wyniki.

Jeśli chodzi o materiał przedstawiony w rozdziale 7, dotyczący określania zasięgu deformacji, to pojawiają się tu pewne wątpliwości odnośnie do praktycznego wykorzystania metody. Wynikają one z kilku przesłanek. Po pierwsze, istotnie jak zauważył Autor, trudno znaleźć w GZW rejony prowadzonej odosobnionej eksploatacji pojedynczymi ścianami, co utrudnia dokonanie wiarygodnych analiz. Po drugie, proponowanie w tej sytuacji uogólnionych wzorów (wyłącznie w funkcji głębokości H) jest dużym uproszczeniem. Autor pomija przy tym całkowicie zależność obniżeń od rozmiarów pola eksploatacji. Eksploatacja prowadzona jedną ścianą wywoła, przecież w części brzeżnej (nad calizną), dużo mniejsze wartości obniżeń niż eksploatacja prowadzona szerokim frontem. W tej sytuacji wartość obniżeń rzędu 13 mm (błąd wyznaczonych obniżeń) wystąpi w większej odległości od granicy eksploatacji. Podobnie na wartość obniżeń wpływ ma wysokość furty eksploatacyjnej. Reasumując, zdaniem recenzenta, Autor przedstawił jedynie możliwość prowadzenia analiz związanych z określeniem zasięgu deformacji przy wykorzystaniu InSAR, natomiast do zaproponowanej zależności z podanych wyżej względów należy odnieść się z dużą rezerwą.

W przypadku materiału przedstawionego w rozdziale 8, zdaniem recenzenta należy stwierdzić, co następuje:

Praktyczne znaczenie (np. w przypadku wpływu na obiekty budowlane) przy ustalaniu czasu zaniku ruchów powierzchni mają przyrosty obniżeń rzędu 3 mm/miesiąc (jak podaje sam Autor), czy wg bardziej rozpowszechnionego poglądu, przyrosty nie większe od 10 mm pomiędzy pomiarami dokonywanymi w odstępach rocznych (błąd niwelacji technicznej). Autor rozpatrywał natomiast tzw. „ruchy resztkowe”, których znaczenie dla praktyki jest znikome. Ich określenie ma natomiast znaczenie poznawcze. Mówienie tu o praktycznym aspekcie wykorzystania pomiarów uznać można za pewną nieściśłość. Co więcej, przy dochodzeniu roszczeń o wystąpienie szkód w budowlach mogą mieć miejsce pewne nieporozumienia. Czas trwania końcowej fazy procesu obniżeń zależy od wielu czynników i uogólnianie go jest pewnym uproszczeniem. Analizy przeprowadzone przez Autora dotyczyły obniżeń rzędu do ok. 20 mm w skali kilku lat, przy czym pomiędzy sąsiednimi pomiarami, dokonywanymi w krótkich odstępach występowały różnice obniżeń rzędu kilku mm. Czy określenie czasu zaniku procesu deformacji nie jest w tym przypadku niemiernodajne? Prosiłbym o ustosunkowanie się Autora do tej uwagi.

Po zapoznaniu się z przedstawioną do recenzji pracą nasuwa mi się również pytanie dyskusyjne:

Czy można wykorzystać na terenie górniczym lub pogórnym pomiary InSAR w przypadkach, gdy nie jest możliwa ich walidacja w oparciu o wyniki pomiarów dokonywanych za pomocą niwelacji geometrycznej?

Pomimo powyższych uwag krytycznych i wątpliwości uważam, że praca jest wartościową dysertacją naukową, a Autor włożył wiele staranności w opracowanie i analizę wyników badań. Uwagi szczegółowe, mogące się przydać przy przygotowaniu pracy do druku:

Na stronie 28 Autor napisał:

„... wyznaczanie odbywa się na drodze niwelacji geometrycznej i/lub precyzyjnej.” Jest to oczywiste przejęzyczenie. Niwelacja geometryczna, jak wiadomo, dzielona jest ze względu na dokładność na niwelację techniczną oraz precyzyjną I i II klasy.

Podrozdział 2.2 dotyczący rozpoznania literaturowego problemu czasu zaniku ruchów górotworu jest bardzo lakoniczny i nie zawiera odwołań do szeregu istotnych publikacji (np. H. Ktatzsch: Mining Subsidence Engineering, Dudek, M.; Sroka, A.; Tajduś, K.; Misa, R.; Mrocheń, D. Assessment and Duration of the Surface Subsidence after the End of Mining Operations. *Energies* 2022, 15, 8711. <https://doi.org/10.3390/en15228711>, i kilku innych).

Na stronie 30 Autor stwierdza, że zasięg deformacji w teorii Budryka – Knothe wyraża wzór: $L = 1.5 r$. Z publikacji prof. S. Knothego wynika, że raczej $L = 1.4 r$.

Recenzent sugeruje, aby na rys. 6.2 – 6.10 zaznaczyć przedziały ufności. Uczyni to analizy statystyczne bardziej profesjonalnymi.


4. WNIOSEK KOŃCOWY

Przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska stanowi wartościowe, oryginalne i samodzielne rozwiązanie Autora. Cel pracy został zrealizowany. Osiągnięciem Autora jest wykazanie możliwości wykorzystania pomiarów InSAR do celów badania poeksploatacyjnych deformacji terenu górniczego oraz opracowanie metody interpretacji wyników pomiarów. Rozprawa mieści się w zakresie dyscypliny naukowej inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

Praca odpowiada warunkom określonym w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r.
Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, gdyż:

- Treść pracy świadczy o ogólnej wiedzy Kandydata w zakresie dyscypliny naukowej.
- Kandydat zaprezentował umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.
- Praca stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, które może być zastosowane w górnictwie.

Mając na względzie powyższe, wnoszę do Wysokiej Rady Naukowej Głównego Instytutu Górnictwa o dopuszczenie pracy Pana mgr inż. Bartosza Apanowicza do publicznej obrony.

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'B. Apanowicz', written in a cursive style.