

Dr hab. inż. **Tomasz Stoch** – prof. uczelni  
Katedra Ochrony Terenów Górniczych,  
Geoinformatyki i Geodezji Górniczej  
Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska  
Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie

Kraków 30.08.2023

## R E C E N Z J A

Rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Bartosza Apanowicza  
pt. „**Analiza obniżeń powierzchni na terenach górniczych i pogórniczych w aspekcie  
zasięgu i czasu z wykorzystaniem interferometrii satelitarnej**”

### 1. Podstawa opracowania recenzji

Recenzja została opracowana na zlecenie Dyrektora Głównego Instytutu Górnictwa w Katowicach Pana Prof. dr hab. inż. Stanisława Pruska z dnia 6.07.2023 r.

### 2. Wstęp – tematyka pracy

Pomimo stale zmniejszającej się liczby czynnych obszarów eksploatacji górniczej w Polsce, deformacje powierzchni terenu będące efektem działalności górniczej są tematem nadal aktualnym ze względu na aspekt bezpieczeństwa obiektów budowlanych, które tym deformacjom podlegają. Prowadzone od wielu lat geodezyjne pomiary deformacji na terenach górniczych są niezwykle istotne z tego punktu widzenia, lecz obejmują tylko fragmenty stref oddziaływań eksploatacji górniczej. Metody teledetekcyjne, nieustannie rozwijane, umożliwiają przestrzenny quasi-ciągły monitoring całej powierzchni terenu górniczego. Z tego względu zastosowanie metod interferometrii radarowej oraz ich doskonalenie ma duże znaczenie dla uzupełnienia wyników klasycznych pomiarów geodezyjnych na terenach górniczych. Autor recenzowanej pracy podjął się wykorzystania metod satelitarnej interferometrii radarowej (InSAR) do wyznaczania pionowych przemieszczeń powierzchni terenu (obniżeń) w całym zakresie ich wartości i przestrzennego zasięgu a także czasu zanikania ich przyrostów po ustaniu działalności górniczej. W tym celu opracował własną metodę korekty obniżeń wyznaczonych metodą SBAS umożliwiającą osiąganie obniżeń o wartościach powyżej 1000 mm/rok na podstawie geodezyjnych pomiarów referencyjnych. W etapie drugim, na podstawie analizy wartości minimalnych obniżeń podlegających detekcji oraz ich błędów, przeprowadził analizę zasięgu obniżeń od krawędzi pola eksploatacji. W trzecim etapie dokonał wyznaczenia współczynnika czasu oraz obliczenia na podstawie przyjętych założeń czasu (t) zanikania przyrostów obniżeń po ustaniu eksploatacji.

### 3. Ogólna charakterystyka rozprawy doktorskiej

Przedstawiona do recenzji praca mieści się w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka. Składa się z 9 rozdziałów i liczy łącznie 189 stron w tym 161 stron tekstu, 28 stron spisów (bibliografia, spis rysunków i tabel) oraz 1 załącznika mapowego. Spis bibliograficzny zawiera 186 pozycji, z czego w 1 publikacji doktorant występuje jako współautor oraz w 2 publikacjach jest jedynym autorem. Większość cytowanych publikacji to pozycje anglojęzyczne, 76 w języku polskim. Przeważają publikacje z okresu ostatnich 10 lat. Świadczy to o dobrym rozeznaniu przez Autora podjętej tematyki badań w kraju i na świecie.

Praca jest bogato ilustrowana, zawiera 127 rysunków dokumentujących postęp badań w prezentowanej tematyce oraz prezentujących graficznie opracowaną metodykę badań. Rysunki są przejrzyste i dobrej jakości, czytelnie prezentują uzyskane w pracy wyniki.

Zarówno dane wejściowe jak i wynikowe są również prezentowane w formie tabelarycznej, łącznie w 16 tabelach.

Układ pracy jest przejrzysty i logiczny.

**Rozdział pierwszy** krótko wprowadza czytelnika w zagadnienia poruszane w pracy, koncentrując się głównie wokół metod satelitarnej interferometrii radarowej stosowanych do wyznaczania przemieszczeń powierzchni terenu wywołanych działalnością górniczą. Jako istotne i wymagające rozwiązania zostały wskazane: niedoszacowanie dużych obniżeń terenu przekraczających wartości 1 m/rok wyznaczanych na podstawie metod InSAR oraz wykorzystanie tych metod do analiz przestrzennego i czasowego rozkładu obniżeń umożliwiającego wyznaczenie zasięgu niecki obniżeniowej na zewnątrz pola górniczego oraz czasu ujawniania się wpływów eksploatacji po zakończeniu wydobywania.

Autor przedstawił dwa cele pracy:

- cel naukowy obejmujący: *Adaptację metod InSAR do wykrywania dużych obniżeń powierzchni w warunkach GZW, a także wyznaczenia zasięgu i czasu zaniku deformacji,*

oraz

- cel użytkowy: *Wyznaczenie deformacji (obniżeń) powierzchni oraz granic zasięgu i czasu zaniku deformacji powierzchni na terenach górniczych i pogórnicych wykorzystaniem metod InSAR, a także ich weryfikacja na podstawie klasycznych pomiarów geodezyjnych.*

W oparciu o przedstawione cele sformułowana została teza pracy:

*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 pogórnicych.*

W końcowej części rozdziału pierwszego Autor przedstawił krótką charakterystykę poszczególnych części pracy oraz zawartość kolejnych rozdziałów.

**Rozdział drugi** dotyczy charakterystyki postawionego problemu badawczego. Zawiera on krótki opis zasady działania interferometrii radarowej oraz przetwarzania danych radarowych a także problemy jakie wynikają z zastosowania InSAR do wyznaczania przemieszczeń pionowych na przykładach opisanych w literaturze światowej. Autor uzasadnił co należy rozumieć przez określenie „duże deformacje” w odniesieniu do obniżeń powierzchni terenu wywołanych działalnością górniczą na obszarze GZW. Przedstawił również problematykę wyznaczania zasięgu deformacji górniczych oraz czasu ujawniania się deformacji na powierzchni terenu po zakończeniu eksploatacji, które wymagają aktualizacji ze względu na zmieniające się warunki geologiczno-górnicze prowadzenia eksploatacji. Na tej podstawie uzasadnił podjęcie tematyki badań opisanej w dysertacji.

**Rozdział trzeci** zawiera informacje na temat aktualnego stanu wiedzy dotyczącego postawionych problemów badawczych. Autor scharakteryzował w nim zarówno problematykę górniczych deformacji powierzchni terenu, ich modelowania (prognozowania) i wyznaczania parametrów zasięgu i czasu, jak i opis zasady działania satelitarnej

interferometrii radarowej wraz z przedstawieniem aktualnie stosowanych metod przetwarzania obrazów satelitarnych SAR.

**Rozdział czwarty** to charakterystyka obszaru badań tj. Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW). Zawiera ona opis warunków geologicznych i górniczych prowadzonej eksploatacji węgla oraz charakterystykę wybranych do analiz 7 rejonów badawczych w kontekście dokonanej eksploatacji górniczej oraz wyników geodezyjnych pomiarów linii obserwacyjnych, stanowiących referencję dla metod InSAR. Szczegółowo scharakteryzowany został rejon filara ochronnego Śródmieścia miasta Bytom, dodatkowo włączony do zbioru rejonów badań w celu wyznaczenia czasu zanikania deformacji powierzchni terenu.

**Rozdział piąty** opisuje przyjętą przez Autora metodykę badań i sposób realizacji postawionych w pracy celów. Scharakteryzowano w nim metody przetwarzania obrazów SAR wykorzystane w pracy, tj. SBAS i PSInSAR, pozyskane obrazowania SAR oraz oprogramowanie wykorzystane do ich przetwarzania. W kolejnych podrozdziałach przedstawione zostały uzyskane wyniki. W pierwszej kolejności zaprezentowano wartości skumulowanych przemieszczeń pionowych uzyskanych metodą SBAS w całym obszarze objętym obrazowaniami SAR w latach 2015 – 2022, a następnie dokonano walidacji otrzymanych wyników w każdym z wytypowanych rejonów badawczych w oparciu o wyniki pomiarów geodezyjnych. Walidacja dotyczyła rocznych przyrostów obniżen oraz obniżen pojedynczego punktu w funkcji czasu. Różnice pomiędzy  $w_{\text{geod}}$  oraz  $w_{\text{SBAS}}$  przedstawiono ilościowo za pomocą pierwiastka błędu średniokwadratowego RMSE. Na podstawie tak przeprowadzonej analizy Autor stwierdził, że metoda SBAS nie sprawdza się w warunkach GZW do identyfikacji dużych obniżen. Następnie przedstawione zostały wyniki przetwarzania obrazów SAR metodą PSInSAR dla rejonu Śródmieścia Bytomia. Procedurę wyznaczania obniżen w tym rejonie poprzedzono analizą dyspersji amplitudy  $D_A$ . W dalszej kolejności przedstawione zostały wyniki w formie map rozkładu wartości przemieszczeń pionowych w punktach PS. Walidacja otrzymanych wyników polegała na porównaniu wartości obniżen uzyskanych z geodezyjnych pomiarów 4 reperów z wartościami obniżen uzyskanymi z przetwarzania obrazów SAR metodą PSInSAR wyznaczanymi jako średnie wartości dla bufora o promieniu 40 m wokół danego repera. Analiza porównawcza potwierdziła przydatność wyników PSInSAR do wyznaczania czasu zanikania deformacji.

**Rozdział szósty** przedstawia autorską metodę korekty niedoszacowania obniżen wyznaczonych metodą SBAS w oparciu o analizę zależności liniowej pomiędzy prędkością obniżania się powierzchni terenu a wielkością tego niedoszacowania ( $\Delta w_{\text{SBAS-GEOD}}$ ). Zależność taka została przez Autora wykazana a następnie wykorzystana do wprowadzenia zależności korygującej wartości obniżen w strefach, gdzie prędkość obniżen jest większa niż 20 mm/miesiąc. Walidacja opracowanej procedury w oparciu o wyniki 30 serii pomiarów geodezyjnych w 4 rejonach badawczych potwierdziła skuteczność korekt a tym samym możliwość stosowania opracowanej metody do wyznaczania dużych wartości obniżen.

**Rozdział siódmy** prezentuje wyniki wyznaczania zasięgu deformacji górniczych w odniesieniu do obniżen powierzchni terenu. Graniczna wartość obniżenia określająca zasięg wpływów górniczych została określona na drodze analizy obniżen InSAR (SBAS) w rejonach centrów miast, w których eksploatacja górnicza nie była prowadzona w ostatnich latach. Przyjęto wartość błędu wyznaczania obniżen  $m_w = \pm 13$  mm. Następnie przeprowadzono korektę położenia konturu pola eksploatacji w wytypowanym przykładzie na podstawie analizy asymetrii niecki obniżeniowej oraz obrzeża eksploatacyjnego. Po tych korektach wyznaczono zasięg obniżen znajdujących się w przedziale opisanego wyżej błędu. Wartość

ostateczna zasięgu L została wyznaczona na podstawie dwukrotnego filtrowania wyników ze względu na zależności teoretyczne i doświadczenia oraz analizę statystyczną zbioru wyników. Przedstawioną procedurę zastosowano do wszystkich 7 rejonów badawczych.

**Rozdział ósmy** dotyczy wyznaczania czasu ujawniania się wpływów górniczych po zakończeniu eksploatacji. Analizy wykonano dla obszaru Śródmieścia Bytomia w oparciu o obniżenia wyznaczone na podstawie geodezyjnych pomiarów reperów znajdujących się w rejonie zakończonej w 2015 roku eksploatacji górniczej oraz przemieszczeń w kierunku LOS wyznaczonych metodą PSInSAR. Czas zakończenia ujawniania się wpływów górniczych wyznaczono na podstawie obliczonych wartości współczynnika czasu „c”. W przypadku danych PSInSAR konieczne było wyznaczenie trendu przemieszczeń LOS w czasie, do czego zastosowano modele: logarytmiczny, wielomianowy i potęgowy. W końcowej części rozdziału porównano obliczone na podstawie współczynnika czasu okresy zanikania deformacji (t) potwierdzając przydatność metodyki opartej na PSInSAR na terenach pogórnich.

**Rozdział dziewiąty** stanowi podsumowanie pracy oraz przedstawia wnioski będące rezultatem przeprowadzonych prac badawczych.

### 3. Merytoryczna ocena pracy

Podjęty przez Doktoranta problem badawczy można podzielić na trzy etapy: wyznaczanie dużych obniżen, zasięgu wpływów eksploatacji oraz czasu ujawniania się wpływów górniczych po zakończeniu eksploatacji. We wszystkich etapach wykorzystane zostały metody satelitarnej interferometrii radarowej InSAR. Na podstawie analizy dotychczasowych badań w tym zakresie Autor stwierdził duży potencjał metod InSAR w porównaniu do aktualnie stosowanych w dziedzinie ochrony terenów górniczych metod opartych na wynikach pomiarów geodezyjnych w punktach linii obserwacyjnych. Pomimo istnienia rozwiązań części standardowych problemów dotyczących wykorzystania interferometrii radarowej InSAR na terenach górniczych, które zostały opisane w literaturze polskiej i światowej, wykorzystywane metody nadal wymagają udoskonalania w celu uzyskiwania wiarygodnych danych o przemieszczeniach powierzchni terenu. Autor podjął się analizy kilku takich problemów, a mianowicie:

- niedoszacowania dużych wartości obniżen wyznaczonych metodą SBAS,
- możliwości zastosowania metody SBAS do wyznaczania zasięgu deformacji górniczych,
- możliwości wyznaczania czasu zanikania wpływów górniczych po zakończeniu eksploatacji.

Do realizacji postawionych celów Doktorant wytypował 8 rejonów badań zlokalizowanych w granicach Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Zdecydowaną zaletą wszystkich analiz przeprowadzonych w pracy doktorskiej jest działanie na dwóch zbiorach danych wejściowych: zbiorze danych obejmujących zobrazenia SAR uzyskane z misji Sentinel 1 (satelity Sentinel 1A/B), które podlegały procedurom przetwarzania do interferogramów a następnie wieloetapowym analizom w celu wyznaczenia wartości obniżen oraz zbiorze danych referencyjnych uzyskanych z wyników pomiarów geodezyjnych.

W pierwszym etapie Doktorant opisał autorskie rozwiązanie dotyczące korekty obniżen wyznaczonych metodą SBAS w stosunku do dużych wartości obniżen referencyjnych. Procedura polegała na wyznaczeniu liniowej zależności pomiędzy prędkością obniżen oraz stwierdzoną różnicą  $\Delta_{WSABS-GEOD}$ . Rozwiązanie to pozwala wykonywać analizę wstecz przy znanej prędkości obniżen i wartości obniżen referencyjnych. Rozwiązanie to pozwala

korygować wartości obniżeń SBAS w całym obszarze ich występowania, co jest niewątpliwą zaletą metody. Można zatem uzyskać przestrzenne pole przemieszczeń pionowych o wartościach porównywalnych z referencyjnymi, które zwykle dotyczą pewnych profili lub wartości punktowych. Wadą tego rozwiązania jest brak uniwersalności, na co Autor również wskazał w pracy. Nie jest do końca jasno przedstawiony problem wykorzystania opracowanej procedury w przypadku braku referencji.

W etapie drugim metoda SBAS została wykorzystana do wyznaczenia zasięgu wpływów górniczych od krawędzi pola górniczego (L) na podstawie progowych wartości obniżenia. Wątpliwość budzi oszacowanie błędu obniżeń wyznaczonych metodą SBAS i zastosowanych w procedurze wyznaczenia zasięgu L, który został określony jako średnia wartość pseudo-obniżeń zarejestrowanych na terenach uspokojonych, gdzie wartość oczekiwana  $E(w) = 0$ . Podobnie przyjęta do filtrowania danych wynikowych wartość graniczna  $L = 2H$ , która nie ma dobrego uzasadnienia merytorycznego. Brakuje tutaj wykorzystania danych referencyjnych do wyznaczenia zasięgu wpływów i porównania go z wynikami metody opartej na SBAS. Uzyskaną empirycznie wartość L potwierdzają wyniki badań prowadzonych w oparciu o wyniki pomiarów geodezyjnych.

Trzeci etap dotyczył analizy czasu ujawniania się końcowych wpływów eksploatacji górniczej od momentu zakończenia wydobywania w danym rejonie. Autor wykorzystał w tym etapie metodę PSInSAR w rejonie filara ochronnego Śródmieścia Bytomia. Obniżenia końcowe uzyskane w pomiarach niwelacyjnych konfrontował z wartościami przemieszczeń w kierunku LOS. Stąd prawdopodobnie niewielkie systematyczne różnice w prezentowanych wynikach. W pierwszym kroku wyznaczone zostały wartości współczynnika czasu „c” na podstawie wyników pomiarów geodezyjnych w całym okresie pomiaru oraz w okresie po zakończeniu eksploatacji. Wartości te porównano z uzyskanymi na podstawie metody PSInSAR. Wartości przemieszczeń LOS porównywane z obniżeniami geodezyjnymi wyznaczono jako średnie wartości wokół reperów w buforze 40m co wynikało z przeprowadzonej analizy statystycznej. Duży rozrzut wartości przemieszczeń PSInSAR wymagał aproksymowania funkcjami nieliniowymi. Autor przyjął modele: logarytmiczny, wielomianowy i potęgowy, z których po analizie współczynnika determinacji odrzucił model wielomianowy. Wyznaczone wartości współczynnika czasu zostały porównane z wartościami wyznaczonymi z referencji, co pokazało istotne różnice, przy czym bardziej wiarygodna okazała się wartość wyznaczona metodą PSInSAR. Wartością dodaną w tej analizie było stwierdzenie wartości rezydualnych obniżeń w długim czasie po zakończeniu eksploatacji. Ze względu na opracowanie tylko jednego przykładu takiej analizy celowe byłoby powtórzenie przedstawionej metodyki na innych przykładach w rejonie GZW.

Wnioski sformułowane przez Autora na podstawie uzyskanych wyników przeprowadzonych w pracy analiz stanowią ważny element przeprowadzonych badań.

Można zatem uznać, że postawione przez Doktoranta cele zostały zrealizowane a teza pracy udowodniona.

Uważam, że mnogość wykonanych analiz oraz szczegółowe podejście do prezentowanego zagadnienia świadczy o dogłębnej analizie problemu, natomiast świadomość pozostających do rozwiązania problemów pokazuje rzetelność Doktoranta w podejściu do prac badawczych. Do oryginalnych osiągnięć Autora rozprawy należy zaliczyć *opracowanie metodyki przetwarzania obrazów interferometrycznych metodą SBAS pozwalającej na wyznaczenie dużych wartości obniżeń przystających do wyników pomiarów referencyjnych oraz opracowanie metod wyznaczenia granic zasięgu wpływów górniczych w oparciu o obniżenia InSAR (SBAS) i czasu zanikania przyrostów obniżeń na podstawie danych PSInSAR.*

#### 4. Uwagi krytyczne i pytania do Doktoranta

W rozprawie doktorskiej Autor nie ustrzegł się błędów i nieścisłości. Niektóre z nich przedstawiam poniżej. Powinny być one omówione w trakcie publicznej obrony.

- 1) Zdaniem recenzenta niepoprawne jest stwierdzenie „zanikanie deformacji”, wszak deformacje powierzchni terenu ujawniające się w formie niecki obniżeniowej nie zanikają a są trwałymi zmianami na powierzchni terenu. Bardziej właściwym byłoby określenie zanikanie wpływów eksploatacji górniczej w postaci malejących przyrostów wartości wskaźników deformacji. Taki skrót myślowy należy najpierw wyjaśnić, zwłaszcza, że jest stosowany w całym tekście pracy a zwłaszcza w określeniu tezy i celów pracy. Dopiero na stronie 32 napisano cyt. „zanik przyrostów deformacji” i to jest poprawne stwierdzenie. Należało je przytoczyć na początku pracy.
- 2) Kwestia porządkująca terminologię. Pisząc o deformacjach powierzchni terenu można uznać nieckę obniżeniową jako przejaw takiej deformacji, natomiast sam opis wymaga rozróżnienia występujących na powierzchni terenu przemieszczeń, takich jak obniżenia i przemieszczenia poziome oraz deformacji, opisujących zniekształcenia powierzchni takich jak nachylenia, krzywizny czy odkształcenia poziome. Określenie deformacje nie powinno być stosowane zamiennie z obniżeniami, natomiast można je stosować do określenia skutku zniekształcenia powierzchni terenu jakim jest niecka obniżeniowa.
- 3) W rozdziale 2 wspomniane są jeszcze inne oprócz wykorzystanych metody InSAR takie jak OTM/OTP (Offset Tracking). Jeśli metody te pozwalają na wykrywanie dużych przemieszczeń, z którymi nie radzą sobie inne metody InSAR, to dlaczego nie wykorzystano ich w pracy?
- 4) Wyniki metody SBAS dały duże niedoszacowanie wartości obniżeń. Czy Doktorant zastanawiał się dlaczego aż tak duże, skoro możliwości metody w oparciu o dane radarowe z misji Sentinel pozwalają osiągać obniżenia rzędu ponad 800 mm/rok? Może dało się uzyskać z metody SBAS trochę więcej? Na rys. 5.5 jest obniżenie maksymalne rzędu 150 mm a teoretycznie możliwe do osiągnięcia byłoby nawet 825 mm.
- 5) Autorska metoda korekty obniżeń SBAS działa jeśli uzyskamy zależność liniową pomiędzy różnicą obniżeń SBAS-GEOD a prędkością przyrostu obniżeń wyznaczoną z referencji. Jak poradzić sobie w przypadku, kiedy nie ma referencji i nie mamy informacji nt. przebiegu procesu deformacji w danym rejonie? Można było taki przykład pokazać, ponieważ na załączniku 1 widoczne są takie rejony, gdzie wyznaczono obniżenia i można było przetestować wprowadzenie korekt.
- 6) Wątpliwość budzi oszacowanie błędu obniżeń wyznaczonych metodą SBAS i zastosowanych w procedurze wyznaczania zasięgu  $L$ , który został określony jako średnia wartość pseudo-obniżeń zarejestrowanych na terenach uspokojonych, gdzie wartość oczekiwana  $E(w) = 0$ . W takim przypadku można przyjąć odchylenie standardowe jako miarę błędu. Podobnie przyjęta do filtrowania danych wynikowych wartość graniczna  $L = 2H$ , która nie ma dobrego uzasadnienia merytorycznego.
- 7) Czy zdaniem Autora zaprezentowana metodyka postępowania, opracowana dla warunków GZW jest możliwa do zastosowania w innych rejonach eksploatacji górniczej w Polsce czy na świecie?



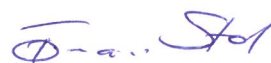
### ***Uwagi drobne, redakcyjne, komentarze i pytania***

- 1) Praca napisana jest w sposób czytelny i przejrzysty, jednak Autor nie ustrzegł się dość licznych błędów literowych a także interpunkcyjnych i stylistycznych.
- 2) Str. 29. cyt. „...obniżenia wynoszące 5 mm/m.” Obniżenia podajemy w [mm].
- 3) Na rys. 4.6 str. 50 brakuje wskazania lokalizacji linii obserwacyjnej, jest tylko wzmianka w tekście, że punkty linii umieszczone są wzdłuż ulicy Karbowskiej.
- 4) Str. 53 brakuje informacji na temat geometrii prowadzonej eksploatacji pokładu 510 przez kopalnię EKO-PLUS. Chodzi głównie o wysokość furty eksploatacyjnej drążonych wyrobisk.
- 5) Str. 82. We wzorze na RMSE jest błąd, brakuje wykładnika przy nawiasie. Poza tym, wzór na MSE czy RMSE zawiera kwadraty różnic pomiędzy wartością oczekiwaną (średnią) a wynikami obserwacji z jednej próby. W przypadku takiego definiowania tego błędu należało podać, że jako bardziej wiarygodne przyjmuje się wartości obserwacji geodezyjnych, do których odnoszone są obserwacje InSAR.
- 6) Co oznacza stwierdzenie cyt. „Suma błędu niwelacji prowadzonej w śródmieściu Bytomia wynosiła 10,7 mm.”?
- 7) W tabelach 8.1, 8.2, 8.4 i 8.6 i 8.7 i 8.8 brak jest jednostek w jakich podano wartości współczynnika „c”.
- 8) Jakie przyjmowano wartości  $\Delta w$  i  $w_{as}$  we wzorach 8.1, 8.2 i 8,3?

### **5. Wniosek końcowy**

Recenzowana rozprawa doktorska zawiera wszystkie niezbędne elementy świadczące o ogólnej wiedzy teoretycznej Autora a także umiejętności realizowania przez niego pracy naukowej, przy wykorzystaniu dostępnych metod oraz aplikacji. Pomimo kilku krytycznych uwag, praca jest oryginalnym rozwiązaniem zaprezentowanego w niej zagadnienia naukowego, a osiągnięcie w niej zawarte stanowi przyczynek do rozwoju dyscypliny naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji praca doktorska w pełni odpowiada warunkom określonym w *art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018, poz. 1668)* i wnioskuję o przyjęcie pracy i dopuszczenie do jej publicznej obrony.



.....  
Dr hab. inż. Tomasz Stoch – prof. AGH