

Prof. dr hab. inż. Eugeniusz Koda
Instytut Inżynierii Lądowej
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Szczepana Grosela
pt. „Numeryczna identyfikacja podłoża gruntowego”**

1. Wstęp

Recenzję rozprawy doktorskiej mgr. inż. Szczepana Grosela opracowano na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Wrocławskiej z 16 lutego 2026 roku, realizującego Uchwałę Rady Dyscypliny nr 284/23/RDND06/2024-2028 z 21 stycznia 2026 roku.

Opiniowana rozprawa zawiera 137 stron druku formatu A4 (tekst z Literaturą, Streszczeniem w języku polskim i angielskim). Nie udostępniono elektronicznej wersji pracy.

Głównym celem rozprawy było *„opracowanie metody automatyzacji procesu kalibracji przy użyciu sprawdzonych, także w zagadnieniach geotechnicznych, heurystycznych algorytmów optymalizacji.”* Modelowanie numeryczne i zastosowanie algorytmu identyfikacji parametrów podłoża przeprowadzono dla wybranej sekcji zapory zachodniej OUOW Żelazny Most. Szczegółowym celem było opracowanie metody identyfikacji parametrów mechanicznych podłoża, tak aby wyniki modelu numerycznego pozostawały zgodne z wynikami pomiarów z sieci monitoringu dla wybranych czujników.

Istotnym wyzwaniem naukowym była kalibracja modelu numerycznego analizowanego obiektu w sposób umożliwiający uzyskanie zgodności pomiędzy wynikami obliczeń a danymi z systemu monitoringu OUOW Żelazny Most. Problem ten jest przedmiotem analizy prowadzonej od kilkunastu lat na Politechnice Wrocławskiej, oraz przez powołany w 1992 roku Zespół Ekspertów Międzynarodowych pod kierownictwem profesora Michele Jamiolkowskiego.

Dla osiągnięcia powyższego celu i udowodnienia postawionego wyzwania naukowego, Doktorant przeprowadził analizy i zaproponował autorską metodę numerycznego modelowania procesu namywania osadów, z analizą wpływu gęstości siatki elementów skończonych i długości kroku czasowego na otrzymywane wyniki, oraz sformułował algorytm kalibracji oparty na algorytmach genetycznych, wraz z testem jego działania polegającym na odtwarzaniu wyników modelu numerycznego. Realizacja powyższych celów jest powiązana z zastosowaniem metody obserwacyjnej i dostępnością wyników pomiarów z sieci monitoringu.

2. Treść i charakterystyka pracy

Praca doktorska mgr. inż. Szczepana Grosela składa się ze Spisu treści, siedmiu rozdziałów tekstowych, spisu Literatury (139 pozycji), oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. W treści pracy zamieszczono 80 rysunków i 10 tabel.

Nie zamieszczono wykazu symboli, skrótów i akronimów, spisu rysunków i spisu tablic. Praca nie zawiera załączników.

Praca stanowi logicznie uporządkowaną całość, łączącą elementy mechaniki gruntów i geotechniki oraz analizy numeryczne zagadnień geotechnicznych z wykorzystaniem Metody Obserwacyjnej.

Rozdział 1 – *Wprowadzenie* (9 stron), zawiera motywację podjęcia tematu pracy, charakterystykę OUOW Żelazny Most, przegląd metod oceny bezpieczeństwa zapór zbiorników wydobywczych, kalibrację modelu dla przedmiotowego obiektu oraz cele i zakres poszczególnych rozdziałów rozprawy. Ponadto, Doktorant zamieścił schematy metod wznoszenia zapór zbiorników poflotacyjnych i zakres bardzo rozbudowanego systemu monitoringu obiektu oraz metodykę kalibracji modelu numerycznego zapór OUOW Żelazny Most.

Rozdział 2 – *Identyfikacja parametrów materiałowych podłoża jako zagadnienie optymalizacji* (14 stron). Doktorant dokonał przeglądu literatury obejmującej identyfikację parametrów materiałowych gruntów w oparciu o dane uzyskane z monitoringu. Zwrócono uwagę na połączenie identyfikacji parametrów z modelowaniem numerycznym i sformułowanie funkcji celu oraz jej przebiegu w przestrzeni podłoża gruntowego. Omówiono wybrane przykłady dostępne w literaturze dotyczące zastosowania algorytmu genetycznego do identyfikacji parametrów materiałowych. Zastosowana tego typu identyfikacja jest traktowana jako zagadnienie odwrotne, które można rozwiązywać przez minimalizację funkcji celu, stanowiącej różnicę pomiędzy wynikami symulacji numerycznej a pomiarami. Doktorant wykazał że ocena bezpieczeństwa ważnych obiektów, takich jak OUOW Żelazny Most, jest konieczna, co powoduje konieczność prowadzenia kalibracji modeli obliczeniowych, szczególnie w zakresie dokładności przewidywania zachowania się konstrukcji i odtworzenia wskaźnika stateczności. To klasyczne wykorzystanie metody obserwacyjnej, zakładającej identyfikację i aktualizację modelu w oparciu o nowsze dane pomiarowe z sieci monitoringu. W dalszej analizie danych pomiarowych zastosowano algorytmy genetyczne i strategie ewolucyjne, przy ustalonej geometrii podłoża.

Rozdział 3 – *Ewolucyjne algorytmy optymalizacyjne* (18 stron). Doktorant opisuje klasyczny algorytm genetyczny, jego modyfikacje i podobne do niego strategie ewolucyjne oraz algorytm genetyczny kodowany liczbami rzeczywistymi. Porównano działanie różnych rodzajów algorytmów, w tym oparte na froncie Pareto stosowane w optymalizacji wielokryterialnej,

polagające na poszukiwaniu minimum funkcji testowych, wykazujących podobieństwo do funkcji celu zmierzającej do identyfikacji parametrów materiałowych. Z analizy i porównania trzech algorytmów, Doktorant wybrał do dalszej analizy algorytm ewolucyjny, określając jego oczekiwane cechy: kodowanie liczbami rzeczywistymi, krzyżowanie jednorodne, mutację na podstawie strategii ewolucyjnych, selekcję rankingową i elitaryzm (najlepsze rozwiązania nie są usuwane z populacji).

Rozdział 4 – *Modelowanie numeryczne stanu przemieszczenia, odkształcenia, rozkładu ciśnienia porowego w obiektach o zmiennej geometrii* (28 stron). Doktorant prezentuje sposoby numerycznego modelowania wznoszenia zapór zbiorników poflotacyjnych przedstawiane w literaturze, **proponując autorską metodę numerycznego modelowania procesu namywania osadów, która jest rozwinięciem sprawdzonej metody polegającej na pojawianiu się kolejnych warstw elementów skończonych.** Do modelowania numerycznego zastosowano program ZSoil, oparty głównie na czworokątnych elementach skończonych. Doktorant przeanalizował wpływ gęstości siatki elementów skończonych i długości kroku czasowego na otrzymywane wyniki modelowania, a następnie ustalił optymalną liczbę elementów i długość kroku czasowego, które wykorzystywał w dalszych analizach.

Podkreślam wysoką wartość metodyczną, poznawczą i aplikacyjną tej części rozprawy. Rozdział ten uznaję za najważniejszą wartość ocenianej rozprawy doktorskiej.

Rozdział 5 – *Algorytm identyfikacji parametrów podłoża OUOW Żelazny Most* (27 stron). Doktorant przedstawił autorski algorytm kalibracji oparty na algorytmach genetycznych. Algorytm służy do określania wielkości parametrów materiałowych podłoża OUOW Żelazny Most, polegający na znalezieniu zestawu parametrów, dla którego wyniki obliczeń numerycznych w możliwie największym stopniu będą pokrywać się z rzeczywistymi wynikami pomiarów uzyskanymi z monitoringu. Otrzymany w procesie identyfikacji zestaw parametrów jest ściśle związany z użytym modelem numerycznym. Zaproponował autorskie warianty postaci funkcji celu, które umożliwiają wykorzystanie różnych czujników, dobranych do mierzonych wielkości. Przeprowadził test działania algorytmu, polegający na odtwarzaniu wyników modelu numerycznego. Sprawdził też poprawność odtworzenia wartości wskaźników stateczności i jakości predykcji w zależności od jakości dopasowania do danych z monitoringu. Działanie algorytmu sprawdzono podczas odtwarzania wyników teoretycznego modelu numerycznego. Identyfikowanie wartości 24 parametrów wielkoskalowego obiektu jest bez wątpienia podejściem nowatorskim - udokumentowane wcześniej w literaturze przypadki dotyczyły obiektów znacznie mniejszych z identyfikacją do 8 parametrów. Z uwagi na ocenę bezpieczeństwa obiektu szacowano wartości wskaźnika stateczności z uwzględnieniem danych otrzymanych we

wszystkich iteracjach algorytmu genetycznego, wskazując również na dalszy kierunek badań. Proponowana procedura identyfikacji jest zalecana jako odpowiednia do poszukiwania wielu parametrów obiektów wielkoskalowych, jakim niewątpliwie jest OUOW Żelazny Most. Proponowana procedura ma więc wartość metodyczną, poznawczą i aplikacyjną.

Rozdział 6 – *Zastosowanie algorytmu na przykładzie zapory zachodniej OUOW Żelazny Most* (19 stron). Jako przykład do sprawdzenia działania proponowanego algorytmu kalibracji i procedury z wykorzystaniem rzeczywistych danych pomiarowych, Doktorant wybrał zaporę zachodnią OUOW. Kalibrację modelu numerycznego przeprowadzono z wykorzystaniem danych z 3 punktów kontrolnych przemieszczeń, 7 wirtualnych piezometrów i 3 dodatkowych opisujących inklinometr. Kalibrację przeprowadzono pięciokrotnie, za każdym razem otrzymując dopasowanie o wysokiej jakości. Uzyskane odwzorowania w połączeniu z wynikającą z metody obserwacyjnej weryfikacją przyjętych założeń pozwalają na opracowanie predykcji zachowania się konstrukcji obiektu. Wysoką jakość dopasowania uzyskano wykorzystując nieskomplikowane modele konstytutywne o łatwiejszej interpretacji parametrów i umożliwiającą obliczanie wskaźników stateczności, niezbędnych do oceny bezpieczeństwa eksploatacji i projektowanej rozbudowy zbiornika odpadów poflotacyjnych.

Rozdział 7 – *Podsumowanie* (4 strony), w którym Doktorant podsumował uzyskane wyniki i treść rozprawy, sformułował wnioski, wskazał nowe elementy i perspektywy dotyczące kierunków dalszych badań związanych z potwierdzeniem poprawności proponowanej metody i zastosowaniem metody obserwacyjnej do projektowania i bezpiecznej eksploatacji obiektów wielkoskalowych. Sformułowane wnioski są poparte uzyskanymi wynikami przeprowadzonych analiz numerycznych przez Doktoranta i opisanych w treści rozprawy. Wnioski są poprawne i cenne, wskazują na udowodnienie postawionego we wprowadzeniu wyzwania naukowego i osiągnięcie głównego celu rozprawy, którym było opracowanie algorytmu identyfikacji wielu parametrów podłoża ze wskazaniem do stosowania w przypadku wielkoskalowych konstrukcji o zmiennej geometrii.

Kolejną (8) częścią rozprawy jest *Bibliografia* (139 pozycji, 7 stron). Wykaz wykorzystanych źródeł jest bardzo obszerny, zawiera zarówno pozycje książkowe, artykuły z renomowanych czasopism zagranicznych, jak i z materiałów konferencyjnych oraz opracowania niepublikowane i normy. Również pod względem chronologicznym należy uznać wykaz za wzorcowy, obejmujący głównie pozycje wcześniejsze i mniej nowszych, ostatnie kilka z 2022 roku. Brakuje pozycji z literatury specjalistycznej z ostatnich kilku lat.

Strukturę i układ pracy uznaję za prawidłową, zawierającą dobrze opisane cele i naukowe wyzwanie, ułożenie aktualnej problematyki badań w literaturze polskiej i zagranicznej. Na

wyróżnienie zasługuje dobrze opanowana przez Doktoranta metodyka analizy numerycznej złożonych zadań inżynierskich na potrzeby projektowania z wykorzystaniem metody obserwacyjnej oraz znajomość i wykorzystanie zaawansowanych narzędzi numerycznych do modelowania procesów na wielkoskalowym obiekcie.

Praca spełnia kryteria solidnego opracowania naukowego o charakterze metodycznym i obliczeniowym, posiada silne aspekty poznawcze i aplikacyjne.

3. Ogólna ocena pracy

Podstawowym problemem projektowania geotechnicznego jest opracowanie modelu i rozwiązanie zagadnienia opisującego wzajemną interakcję struktury budowli i podłoża gruntowego, a w przypadku analizowanego zbiornika odpadów poflotacyjnych, dodatkowo konieczna jest ocena bezpieczeństwa geotechnicznego eksploatowanego i rozbudowywanego obiektu. Przy przyjętych założeniach zwykle uzyskuje się rozwiązanie w formie przybliżonej, na przykład z wykorzystaniem metod numerycznych. Specyfika ośrodka gruntowego, w porównaniu do innych materiałów budowlanych, polega na jego niejednorodności, a co za tym idzie trudności w rozpoznaniu właściwości fizycznych i parametrów (charakterystyk) mechanicznych. Badania bezpośrednie zwykle pozwalają na określenie właściwości w określonym miejscu, gdzie wykonywanie jest badanie in situ lub pobierana próbka do badań laboratoryjnych. Zagadnienie brzegowe, które jest podstawą matematyczną projektowania geotechnicznego wymaga podania parametrów konstrukcji budowli i podłoża gruntowego. Parametry te są danymi wejściowymi do opisu związków konstytutywnych. W przypadku ośrodka gruntowego, zwiększenie liczby oznaczeń powoduje wzrost kosztów i czasu niezbędnego do określenia reprezentatywnych właściwości (parametrów, charakterystyk) niezbędnych do przeprowadzenia obliczeń (lub modelowania numerycznego). Dlatego w praktyce geotechnicznej często wykorzystuje się wyniki obserwacji (monitoringu) na podobnych obiektach do wyznaczania parametrów na podstawie zadania odwrotnego.

Doktorant rozszerzył obszar identyfikacji parametrów materiałowych na podstawie zagadnienia odwrotnego, wykorzystując do tego celu wyniki monitoringu i narzędzia modelowania numerycznego. Podjęta w rozprawie problematyka ma charakter poznawczy, z ukierunkowaniem rozwoju w kierunku aplikacyjnym.

Doktorant posiada bardzo dobre przygotowanie merytoryczne do prowadzenia modelowania numerycznego, a wybór tematu rozprawy jest właściwy i aktualny, poparty wieloletnim doświadczeniem w tym zakresie. Zastosowanie metody obserwacyjnej w inżynierii geotechnicznej jest nadal zagadnieniem nie rozpoznanym, wymagającym indywidualnego podejścia.

Uzyskane z badań wyniki stanowią cenny materiał eksperymentalny, rzadko przeprowadzany w tak kompleksowym metodycznym zakresie na rzeczywistym przykładzie projektowym. Zebrane dane monitoringowe i modelowanie numeryczne pozwoliły na identyfikację i kalibrację wpływu wielu parametrów i czynników mających znaczenie przy projektowaniu geotechnicznym.

Oceniana praca doktorska ma zarówno charakter poznawczy, jak i aplikacyjny, między innymi z uwagi na wdrożenie do projektowania o oceny bezpieczeństwa geotechnicznego jednego z najważniejszych w Polsce obiektów geotechnicznych, OUOW Żelazny Most. Wyniki przeprowadzonych analiz mogą być adoptowane do innych zagadnień geotechnicznych, realizowanych z wykorzystaniem metody obserwacyjnej, aby mogła być szerzej stosowana w praktyce inżynierskiej. Najkorzystniej by było, aby dalsze analizy były prowadzone również przy realizacji określonych zadań inwestycyjnych.

Praca ma również charakter metodyczny. Autor podaje w niej szczegółową metodykę postępowania przy wykorzystywaniu metody obserwacyjnej do rozwiązywania zagadnień geotechnicznych oraz prowadzenie obliczeń z wykorzystaniem narzędzi numerycznych. W każdym z rozdziałów Doktorant wprowadził własne elementy i komentarze dotyczące przedmiotu rozprawy. Postawiony cel rozprawy został osiągnięty, a wyzwanie naukowe rozprawy zrealizowane przeprowadzoną analizą, wynikami badań i modelowania oraz ich interpretacją.

Za główne osiągnięcie naukowe rozprawy uznaje opracowanie i zweryfikowanie procedury automatycznej identyfikacji parametrów podłoża gruntowego dla wielkoskalowego obiektu geotechnicznego z wykorzystaniem danych monitoringowych i algorytmów ewolucyjnych.

4. Uwagi krytyczne i pytania

Przy czytaniu pracy zauważono zbyt skrótowe opisy niektórych zagadnień, nieuporządkowaną terminologię specjalistyczną oraz błędy edycyjne. Przedstawiam kilka uwag ogólnych i szczegółowe o charakterze merytorycznym oraz kwestie dyskusyjne. Mimo że nie umniejszają one wartości pracy, proszę Doktoranta o ustosunkowanie się do niektórych z nich:

- Wnioski z przeprowadzonych analiz i kierunki dalszych badań sformułowano prawidłowo, natomiast brakuje szerszej dyskusji uzyskanych wyników obliczeń numerycznych w nawiązaniu do zagranicznej literatury specjalistycznej.
- Czy na podstawie przeprowadzonej analizy można zaproponować weryfikację i rozbudowę sieci monitoringu oraz rozszerzenie zakresu pomiarów? Czy Doktorant może ocenić przydatność stosowanych czujników pomiarowych stosowanych do pomiaru przemieszczeń pionowych i poziomych oraz ciśnienia wody w porach na OUOW Żelazny Most?

- Jakie procedury powinny być stosowane do oceny lokalnych anomalii pomiarów monitoringowych, np. obserwowanych na Rys. 6.16 pomiarów ciśnienia piezometrycznego?
- Czy na podstawie przeprowadzonych analiz Doktorant byłby w stanie podać własne zalecenia dotyczące wykorzystania metody obserwacyjnej do rozwiązywania zagadnień odwrotnych na potrzeby projektowania geotechnicznego?
- Proszę o opinię dotyczącą możliwości wykorzystania proponowanego rozwiązania do rozwinięcia Metody Obserwacyjnej, wskazanej w normie Eurokod 7 do stosowania w projektowaniu geotechnicznym.

Ponadto, w recenzowanym egzemplarzu pracy zaznaczono dość uwagi szczegółowe i sugestie natury gramatycznej, stylistycznej i nazewnictwa, które mogą być uwzględnione przez Doktoranta w przygotowaniu pracy lub jej części do publikacji.

Praca zawiera uchybienia redakcyjne, np. numeracja stron nieparzystej od lewej, wiele pustych części stron w treści rozprawy, nieujednoliczone opisy rysunków - wielkość, zróżnicowana czcionka, opisy osi, słabo czytelne oznaczenia liczbowe i symbole, niepełne lub nieprecyzyjne podpisy (np. Rys. 4.7, 6.10), tabele dzielone na dwie strony (np. Tab. 4.1, 5.1, 6.1). Niektóre rysunki są słabej jakości (np. Rys. 1.3, 3.10-3.15), na niektórych występują terminy polskie i angielskie (np. 4.9), należy to poprawić przy przygotowaniu rozprawy lub jej części do publikacji.

Powyższe uwagi mają charakter redakcyjny i dyskusyjny i nie umniejszają wartości naukowej opiniowanej rozprawy doktorskiej, którą uznaję za znaczącą dla wykorzystania i rozwoju narzędzi do numerycznego rozwiązywania zagadnień bezpośrednich i odwrotnych w projektowaniu geotechnicznym, analizującym interakcje gruntu z konstrukcją.

5. Podsumowanie

Podsumowując recenzję pracy doktorskiej mgr. inż. Szczepana Grosela stwierdzam, że:

- Doktorant przeprowadził studium literaturowe dotyczące teoretycznych i koncepcyjnych podstaw identyfikacji parametrów materiałowych podłoża jako zagadnienia optymalizacji i możliwości ich wykorzystania do rozwiązań z wykorzystaniem narzędzi numerycznych.
- Zastosował metodę obserwacyjną do rozwiązania złożonego przykładu z zakresu inżynierii geotechnicznej, ukierunkowaną na ocenę bezpieczeństwa geotechnicznego obiektu i odtwarzanie historycznych danych pomiarowych na potrzeby podejmowania decyzji o modyfikacjach projektowych.
- Stworzył model numeryczny w programie ZSoil, przeprowadził jego zautomatyzowaną kalibrację ukierunkowaną na ustalenie optymalnych parametrów materiałowych, tak aby wyniki predykcji były zbieżne z wynikami pomiarów monitoringowych.

- Do identyfikacji i optymalizacji parametrów mechanicznych zastosował zagadnienie odwrotne, bardziej złożone niż stosowane powszechnie zagadnienie bezpośrednie dla konkretnego zestawu parametrów; do optymalizacji parametrów zastosował algorytm genetyczny, analizując przypadki z literatury.
- Przedstawił nową metodę modelowania namywania odpadów wydobywczych, wraz z analizą wpływu gęstości siatki elementów skończonych i długości kroku czasowego na otrzymywane wyniki.
- Sformułował syntetyczne wnioski, przedstawił warunki stosowania metody oraz perspektywy dalszych badań nad jej rozwojem i sposobami weryfikacji wyników modelowania numerycznego z wykorzystaniem metody obserwacyjnej.
- Wykazał dużą wiedzę z zakresu mechaniki gruntów i geotechniki, oraz dobrze opanowaną metodykę interpretacji i weryfikacji uzyskanych wyników modelowania numerycznego.
- Napisał pracę doktorską spójnie i metodycznie, dość dobrze zredagowaną.
- Udowodnił przeprowadzonymi analizami, szczególnie w zakresie interpretacji wyników modelowania numerycznego i danych monitoringowych, postawionego wyzwania naukowego i osiągnął zamierzony jej cel.

Praca doktorska mgr. inż. Szczepana Grosela spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim określone w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*. Rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i wykazuje wysoki poziom wiedzy Doktoranta w dziedzinie nauk *inżynieryjno-technicznych* w dyscyplinie naukowej *inżynieria lądowa, geodezja i transport*, a także umiejętność samodzielnego prowadzenia analitycznej i eksperymentalnej pracy naukowej.

Biorąc pod uwagę wysoki poziom teoretyczny rozprawy, podjęcie aktualnej problematyki wykorzystania metody obserwacyjnej i narzędzi numerycznych do rozwiązywania zagadnień z obszaru projektowania inżynierskiego i duże możliwości aplikacyjne na ważnym dla gospodarki obiekcie, **wnioskuję o wyróżnienie rozprawy.**

Wnoszę o przyjęcie rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Szczepana Grosela przez Radę Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport, Politechniki Wrocławskiej, i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Podpisany certyfikatem wystawionym dla Eugeniusz Koda (Certyfikat kwalifikowany podpisu). Utworzony w dniu: 2026-05-04 07:49:14 +0200

Prof. dr hab. inż. Eugeniusz Koda

