

Gdańsk, dnia 17 kwietnia 2026 roku

prof. dr hab. inż. Lech Bałachowski
Katedra Geotechniki i Inżynierii Wodnej
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Politechnika Gdańska

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra inż. Szczepana Grosela
pt. „Numeryczna identyfikacja podłoża gruntowego”

promotor rozprawy: Prof. dr hab. inż. Dariusz Łydźba
promotor pomocniczy: Dr inż. Maciej Sobótka

1. Podstawa opracowania

Niniejszą recenzję pracy doktorskiej sporządziłem na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Wrocławskiej i otrzymanego egzemplarza rozprawy.

2. Tematyka i cel rozprawy

Przedmiotem rozprawy doktorskiej Pana mgra inż. Szczepana Grosela jest identyfikacja parametrów materiałowych podłoża gruntowego na podstawie opracowanego modelu matematycznego oraz długoletnich obserwacji zachowania się Obiektu Unieszkodliwiania Odpadów Wydobywczych rudy miedzi Żelazny Most. Zbiornik ten jest kluczowym elementem infrastruktury KGHM Polska Miedź S.A., będąc największym tego typu obiektem w Europie i drugim na świecie. Autor podejmuje temat stateczności składowiska odpadów powydobywczych rud miedzi. Zagadnienie to jest szeroko analizowane w wielu krajach takich jak: Kanada, Brazylia, Chile, Australia, Szwecja i Węgry i związane ze składowaniem odpadów z wydobycia rud żelaza, cynku, boksytów, fluorytu lub złota.

Na podstawie modelu budowy podłoża, obwałowań zbiornika, plaż oraz masy osadów Autor prowadzi złożone analizy numeryczne stateczności skarp obwałowań zbiornika, z uwzględnieniem kolejnych etapów wznoszenia i eksploatacji tego obiektu oraz prognoz dotyczących jego dalszej rozbudowy. Celem rozprawy jest opracowanie metody kalibracji dużej liczby parametrów ośrodka gruntowego (podłoża, obwałowań, plaż oraz samych osadów) na podstawie algorytmu genetycznego z wykorzystaniem metody obserwacyjnej, tj. na podstawie długoletniego monitoringu przemieszczeń oraz poziomów piezometrycznych w wybranych punktach. Należy podkreślić, że analizy dotyczą obiektu w wielkiej skali o skomplikowanej i niejednorodnej strukturze, wypełnionym niestandardowym materiałem. Ponadto obiekt charakteryzuje się zmienną geometrią, a jego rozbudowa i eksploatacja, ze względu na wielkość planowanych obciążeń, mogą też wpływać na zachowanie i parametry niżej leżących warstw. Oszacowanie bezpieczeństwa tak ważnego obiektu wiąże się z koniecznością

prowadzenia bieżącej kalibracji modeli obliczeniowych na poszczególnych etapach eksploatacji oraz oceną jakości ich predykcji. Cel ten Doktorant realizuje w przedstawionej rozprawie.

3. Ogólna charakterystyka rozprawy

Recenzowana praca zawiera 137 stron tekstu z uwzględnieniem streszczeń w języku polskim i angielskim oraz spisu treści i literatury.

Doktorant podzielił tekst rozprawy doktorskiej na siedem rozdziałów o zróżnicowanej objętości. Krótki rozdział pierwszy dotyczy charakterystyki Obiektu Unieszkodliwiania Odpadów Wydobywczych (OUOW) Żelazny Most, metod wznoszenia zbiorników odpadów poflotacyjnych oraz systemu monitoringu. Autorka przedstawia metody oceny bezpieczeństwa zapór oraz podaje przyjęty sposób wyznaczenia stateczności skarp obiektu metodą redukcji wytrzymałości. Autor zakłada, że do prawidłowej kalibracji modelu wystarczy zgodność pomierzonych przemieszczeń z wynikami symulacji numerycznych. Doktorant dyskutuje możliwe przyczyny rozbieżności pomiarów i obliczeń. W podsumowaniu podaje cel i zakres pracy.

W rozdziale drugim Autor przedstawia identyfikację parametrów materiałowych podłoża jako zagadnienie optymalizacji. Parametry te mogą być określone w sposób deterministyczny, probabilistyczny lub na podstawie metody obserwacyjnej. Ostatnia z nich wykorzystywana jest w analizowanej rozprawie. Identyfikacja parametrów materiałowych podłoża polega na minimalizacji funkcji celu, rozpatrywanej jako różnica między wielkościami mierzonymi a wynikiem symulacji numerycznych. Autor omawia zagadnienie optymalizacji stosowane w przypadku niewielkiej liczby parametrów i przedstawia metody optymalizacji globalnej oraz optymalizacji wielokryterialnej. Stosując optymalizację z wykorzystaniem algorytmu genetycznego uzyskuje dobrą zgodność symulacji i pojedynczego pomiaru przemieszczeń lub wysokości piezometrycznej. Ze względu na punktowe i ograniczone co do głębokości rozpoznanie podłoża Doktorant przedstawia też próbę wykorzystania algorytmu genetycznego do identyfikacji przestrzennej budowy podłoża. Tak uzyskany model podłoża jest jednak diametralnie różny od teoretycznego, opracowanego na podstawie odwiertów. W dalszej części pracy Autor zakłada pewien teoretyczny układ warstw, a zagadnienie optymalizacji ogranicza jedynie do parametrów podłoża. Podkreśla, że rozpatrywane zagadnienie optymalizacji jest trudne i nowatorskie ze względu na dużą liczbę parametrów i wielkoskalowość zagadnienia o wysoce zmiennej geometrii, a funkcja celu charakteryzuje się występowaniem licznych minimów lokalnych.

W rozdziale trzecim Doktorant opisuje ewolucyjne algorytmy operacyjne z uwzględnieniem algorytmów genetycznych oraz strategii ewolucyjnych. Szczegółowo przedstawia algorytmy genetyczne kodowane liczbami rzeczywistymi oraz algorytmy ewolucyjne oparte na froncie Pareto. W optymalizacji wielokryterialnej wykorzystuje funkcje testowe do ogólnej oceny działania algorytmów optymalizacyjnych, tj. szybkości zbieżności oraz ich dokładności. Do testów trzech wybranych algorytmów wybiera dwie funkcje. Ostatecznie do dalszych rozważań wybiera algorytm ewolucyjny kodowany liczbami rzeczywistymi z odpowiednimi procesami krzyżowania, mutacji, selekcji rankingowej oraz elitaryzmu.

Rozdział czwarty dotyczy modelowania numerycznego stanu przemieszczenia, odkształcenia oraz rozkładu ciśnienia wody w porach w obiektach o zmiennej geometrii. Autor przytacza przykłady z literatury dotyczące modelowania numerycznego zbiorników odpadów poflotacyjnych. Opisuje wybrane modele konstytutywne ośrodka gruntowego oraz zagadnienie sprzężania poro-mechanicznego w przypadku pełnego nasycenia gruntu wodą oraz przy częściowej saturacji. Modele

te są zaimplementowane w programie metody elementów skończonych wykorzystywanym w rozprawie doktorskiej. Doktorant opisuje podział obiektu na strefy, sposób doboru parametrów mechanicznych podczas etapowania prac oraz przedstawia warunki brzegowe modelu numerycznego podłoża. Parametry geotechniczne przyjmowane są generalnie jako stałe w obrębie warstwy. Odstępstwo od tej zasady dotyczy kluczowej dla pracy obiektu warstwy iłów neogeńskich (9n), gdzie moduł sztywności wzrasta wraz z głębokością. Autor sprawdza wpływ wielkości siatki elementów skończonych oraz przyjętego kroku czasowego na uzyskane wartości przemieszczeń i poziomu piezometrycznego w wybranych węzłach oraz wyliczone wartości wskaźnika stateczności. Ostatecznie do dalszych analiz wykorzystuje podstawowy model M1 o wysokości warstw 5m i długości kroku czasowego 0,25 roku.

Rozdział piąty stanowi jeden z zasadniczych elementów rozprawy, w którym Autor przedstawia algorytm identyfikacji parametrów podłoża OUOW Żelazny Most. Opisuje metodę symulacji dla modeli wielkoskalowych o dużej liczbie parametrów. Z tego względu stosuje identyfikację grup materiałów, których parametry w trakcie optymalizacji zmieniają się w ten sam sposób, wprowadza modyfikację parametrów zależnych od innych wielkości oraz możliwość jednoczesnej kalibracji wielu modeli numerycznych, w których występują te same materiały. Doktorant definiuje funkcję celu jako różnicę wyników obliczeń dla modelu oraz wartości pomierzonych przez system monitoringu. Wykorzystanie danych z wielu czujników oznacza optymalizację wielokryterialną, którą Autor upraszcza do zagadnienia z jednym kryterium. Tak zatem formuje funkcję celu, aby uwzględniała ona wyniki pomiarów różnych wielkości (przemieszczenia, wysokości piezometryczne), którym przyporządkowano różne wagi. Analizując powyższą różnicę Doktorant przedstawia definicje sześciu różnych rodzajów błędów statystycznych. Dla danego punktu pomiarowego sprawdza dopasowanie wyników modelu do pomierzonych przemieszczeń w czasie i określa wartości błędów. Funkcja celu, w przypadku wykorzystania pomiarów z czujników mierzących różne wielkości, musi mieć postać bardziej złożoną. Autor przedstawia tu trzy warianty. Dwa z nich dotyczą odpowiedniego wyznaczenia wagi pomiarów piezometrycznych. W trzecim wariantcie funkcja celu definiowana jest jako iloczyn dwóch czynników związanych z przemieszczeniem i poziomem piezometrycznym.

Doktorant testuje efektywność algorytmu genetycznego w przypadku dużej liczby parametrów dla modelu o zmiennym obszarze. Analizuje obszar zbudowany z pięciu materiałów opisanych łącznie z zastosowaniem 24 parametrów. Wykorzystuje numerycznie generowane dane obserwacyjne do przeprowadzenia kalibracji modelu porównując przemieszczenia i wysokości piezometryczne w zadanych punktach. Kolejna generacja danych daje z reguły polepszenie zgodności wyników symulacji z wartościami pomierzonymi. Autor szacuje błąd odwzorowania wartości wskaźnika stateczności od funkcji celu dla aktualnego stanu oraz w przypadku rozbudowy obiektu w predykcji na rok 2027 oraz rok 2033. Autor stwierdza, że niższe wartości funkcji celu odpowiadają mniejszemu błędowi predykcji i wnioskuje, iż lepsze dopasowanie danych w procesie identyfikacji zwiększa szanse na prawidłową prognozę. Doktorant wyznacza wartość wskaźnika stateczności na podstawie regresji liniowej funkcji celu, wtedy gdy osiąga ona wartość zero. Tak wyznaczony wskaźnik jest bliski rozwiązaniu teoretycznemu.

W rozdziale szóstym Autor wykorzystuje przetestowany algorytm do kalibracji modelu zapory zachodniej OUOW Żelazny Most. Analizuje przemieszczenia w sześciu punktach kontrolnych na skarpie zapory i dla sześciu inklinometrów oraz odczyty 50 piezometrów. Do kalibracji modelu wykorzystuje wybrane trzy czujniki przemieszczenia, jeden inklinometr i siedem piezometrów (w sumie 14 wielkości pomierzonych). Dla wybranej postaci funkcji celu przeprowadza pięciokrotną kalibrację parametrów geotechnicznych warstw podłoża, wykonując w każdej z nich serię 50 generacji. Wyniki kalibracji

przedstawiono w tabeli i w postaci rozrzutu 28 parametrów. Autor wnioskuje, że parametry o mniejszym rozrzucie są prawdopodobnie kluczowe do uzyskania dobrego dopasowania wyników symulacji z danymi z monitoringu. Takie trzy parametry, spełniające powyższy warunek, dotyczą warstwy dominującej w podłożu (9n). Doktorant wyznacza wartości wskaźnika stateczności dla pięciu kalibracji. Stwierdza, że wartości te, wyznaczone metodą regresji liniowej, są dla wszystkich kalibracji podobne i stanowią dolne oszacowanie wskaźnika stateczności. Górnym oszacowaniem tego wskaźnika jest maksymalna wartość uzyskana w procesie kalibracji.

Rozdział siódmy stanowi zwięzłe podsumowanie rozprawy.

4. Ocena merytoryczna pracy

Rozprawa doktorska mgr inż. Szczepana Grosela dotyczy numerycznej identyfikacji parametrów mechanicznych uwarstwionego podłoża obiektu wielkoskalowego z wykorzystaniem metody obserwacyjnej. Pragnę podkreślić, że Doktorant podjął się analizy obiektu w rozbudowie, tj. o zmiennej geometrii, uwzględniając wyniki wieloletniego monitoringu przemieszczeń gruntu i wartości poziomu piezometrycznego oraz rezultaty zaawansowanych badań laboratoryjnych i polowych. Autor przeanalizował olbrzymie ilości wieloletnich danych z wierceń oraz czujników zainstalowanych na różnych głębokościach i w różnym czasie. W rozprawie wykorzystał zaawansowane modele reologiczne podłoża oraz uwzględnił zachowanie się gruntu w pełni nawodnionego oraz osadów w stanie częściowego nasycenia wodą. Doktorant sformułował funkcję celu i rozwiązał zagadnienie optymalizacji polegające na takim doborze parametrów mechanicznych, aby różnica wyników symulacji numerycznych i obserwacji była minimalna. Autor rozpatrywał tu zarówno przemieszczenia pionowe i poziome, jak również wartości poziomu piezometrycznego. Analizował różne warianty funkcji celu oraz szczegółowo dyskutował dobór przyjętego rodzaju błędu między wynikiem pomiaru i symulacji.

Doktorant dokonał przeglądu metod optymalizacji wielokryterialnej. Literatura przedmiotu dotyczy przypadków optymalizacji zagadnienia, w którym występuje jedynie kilka parametrów. W analizowanej rozprawie Doktorant rozwiązuje zagadnienie optymalizacji wielokryterialnej w przypadku 24, a nawet 28 parametrów. Wykorzystuje tu algorytmy genetyczne i zaawansowane procedury. Rozpatrywana praca nie ma jednak charakteru wyłącznie numerycznego, gdyż wymagała od Doktoranta szczegółowej, krytycznej analizy wyników odwiertów, badań polowych i laboratoryjnych oraz olbrzymiej bazy danych z monitoringu z uwzględnieniem historii faz rozbudowy i eksploatacji danego obiektu. Takie podejście świadczy o dużej sumienności i pracowitości Autora rozprawy oraz jego szerokich zainteresowaniach naukowych.

Ze względu na ograniczony zakres rozpoznania geologicznego podłoża i zróżnicowany przestrzennie charakter osadów Autor rozprawy musiał przyjąć szereg założeń upraszczających dotyczących budowy podłoża oraz podziału na warstwy. Biorąc pod uwagę ograniczoną liczbę odwiertów, przy interpretacji budowy podłoża i interpolacji danych między odwiertami Doktorant stosuje metodę krigingu. Autor wykorzystuje trówymiarowy model obiektu, biorąc jednak pod uwagę złożoność zagadnienia i efektywność obliczeń numerycznych, do dalszych rozważań wybiera pewne przekroje charakterystyczne, w których prowadzi analizy w układzie płaskim.

Praca napisana jest w sposób przejrzysty, a przedstawione treści są dobrze usystematyzowane. Pragnę podkreślić dobry poziom edytorski rozprawy. Brakuje mi jednak spisu oznaczeń, który ułatwiłby lekturę pracy.

Do najważniejszych osiągnięć ocenianej rozprawy doktorskiej zaliczam:

- przyjęcie modelu obiektu i dobór jego parametrów mechanicznych na podstawie badań laboratoryjnych i polowych,
- opracowanie modelu numerycznego uwzględniającego wiele warstw, zmienną geometrię obiektu oraz etapowanie jego rozbudowy,
- opracowanie metody optymalizacji wielokryterialnej z wykorzystaniu dużej liczby parametrów,
- zastosowanie zaawansowanych algorytmów genetycznych i odpowiednich procedur,
- właściwe zdefiniowanie funkcji celu oraz analiza błędów,
- kalibrację modelu numerycznego z wykorzystaniem monitoringu przemieszczeń oraz poziomu piezometrycznego,
- wyznaczenie stateczności skarp w wybranym przekroju metodą optymalizacji dla stanu aktualnego oraz opracowanie predykcji tej stateczności w kolejnych fazach rozbudowy i eksploatacji.

5. Uwagi dyskusyjne i krytyczne

Autor rozpatruje zagadnienie stateczności OUOW Żelazny Most w warunkach z odpływem, tj. z wykorzystaniem efektywnych parametrów wytrzymałościowych. Czy szybkość przykładanych obciążeń, warunki brzegowe oraz niejednorodność masy odpadów pozwalają przyjąć założenie warunków z drenażem? Czy nie mamy tu do czynienia z przypadkiem częściowego drenażu? Zmiany wysokości piezometrycznej (Rys. 6.5) mogłyby świadczyć o przyroście ciśnienia wody w porach gruntu wskutek obciążenie od kolejno układanej warstwy. Trudno tu jednak rozróżnić zmianę ciśnienia wody w porach gruntu wskutek przyłożenia obciążenia od tej wywołanej procesem ścinania. Czy Autor podejmował próbę analizy stateczności w warunkach bez odpływu?

W literaturze stosowane są diagramy klasyfikacyjne dla odpadów poflotacyjnych (prace z Brazylii, Szwecji) na podstawie sondowań statycznych metodą CPTU i badań sejsmicznych. Pozwalają one na pokazanie, czy dany materiał podlega cementacji oraz czy istnieje ryzyko statecznego upłynnienia odpadów. Dobrze byłoby przedstawić wyniki pomiarów z tych badań na diagramie G_0/q_c w zależności od q_{c1} . Brakuje też informacji na temat granulometrii osadów.

Odpady poflotacyjne kierowne są do zbiornika z zastosowaniem hydrotransportu. Czy struktura tego materiału zmienia się w czasie wskutek konsolidacji, cementacji i przebudowy kontaktów między ziarnami? Depozycja materiału w wodzie powoduje, że jego współczynnik filtracji w kierunku poziomym jest zwykle większy niż w kierunku pionowym. W tabeli 5.2 w przypadku osadów zależność ta jednak nie występuje. Dodatkowo, parametry wodoprzepuszczalności w warstwie iłu są rozbieżne w różnych analizach zawartych w rozprawie. W tabeli 6.2 są one o trzy rzędy mniejsze niż w Tabeli 4.1.

Autor rozpatruje obiekt wielkoskalowy o dużej wysokości. Można zakładać, że kolejne etapy rozbudowy zbiornika spowodowały istotny przyrost składowej pionowej naprężenia w już ułożonych warstwach. Jak wpłynie to na zachowanie się tego materiału? Czy może w przypadku przyszłych analiz należałoby modyfikować parametry poszczególnych warstw po znaczącej rozbudowie obiektu. Ponadto należy zauważyć, że warstwa iłu, o dominującym wpływie na zachowanie podłoża, cechuje się wskaźnikiem prekonsolidacji OCR niewiele wyższym od 1. Po rozbudowie będzie prawdopodobnie zachowywała się jak grunt normalnie skonsolidowany, charakteryzujący się zwiększoną odkształcalnością.

Autor nie precyzuje wartości współczynnika parcia spoczynkowego zastosowanego w obliczeniach w poszczególnych warstwach. Czy wyliczane są one na podstawie wartości efektywnych kąta tarcia wewnętrznego?

Wątpliwości budzi bardzo wysoki przyrost modułu odkształcenia z głębokością w warstwie iłu. Czy warstwa ta jest niejednorodna i jaka jest przyczyna tak dużego przyrostu modułu?

Autor zakłada występowanie częściowego nawodnienia w warstwie osadów. W tabeli 4.1 i 6.3 wartości stopnia nasycenia gruntu wodą S , są jednak wszędzie równe zero (grunt suchy). Jaki jest profil ciśnienia wody w strefie częściowego nasycenia? Niehydrostatyczny rozkład ciśnienia wody wpływa w sposób istotny na rozkład naprężeń efektywnych i wyliczany wskaźnik stateczności. Jaka jest miąższość strefy częściowego nasycenia wodą przyjęta do obliczeń?

Zdefiniowana funkcja celu uwzględnia zarówno pomiary przemieszczeń jak i wysokości piezometrycznych, przypisując im różne wagi. W przypadku przemieszczeń waga wynosiła 1, a dla wysokości piezometrycznej 7. Dlaczego zastosowano aż tak różne wagi?

Prośba o skomentowanie braku jakościowej zgodności pomierzonych przemieszczeń pionowych (rys. 6.17) z wynikami kalibracji.

Autor wnioskuje, że parametry o mniejszym rozrzucie są prawdopodobnie kluczowe do uzyskania dobrego dopasowania wyników symulacji z danymi z monitoringu. Takie trzy parametry, spełniające powyższy warunek, dotyczą warstwy iłu dominującej w podłożu (9n). Są to parametr R opisujący kształt zamknięcia powierzchni cap w modelu Druckera-Pragera, współczynnik filtracji w kierunku pionowym oraz współczynnik Poissona. Taki dobór parametrów na pewno nie jest rozwiązaniem intuicyjnym.

6. Podsumowanie i wniosek końcowy

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Szczepana Grosela dotyczy ważnego zagadnienia naukowego i praktycznego związanego z analizą stateczności obiektów w wielkiej skali. Autor identyfikuje numerycznie parametry podłoża gruntowego na podstawie wskazań monitoringu oraz metod optymalizacji wielokryterialnej przy dużej liczbie parametrów. Praca ta stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, dotyczy ważnego i aktualnego problemu nauk inżynierijno-technicznych oraz wnosi istotne elementy poznawcze. Oceniana rozprawa doktorska spełnia wymogi określone w odpowiednich przepisach. Pragnę podkreślić, że Autor wykazuje się w rozprawie umiejętnością analizy danych pomiarowych, wyników zaawansowanych badań laboratoryjnych i polowych oraz prowadzenia zaawansowanych badań i analiz numerycznych w dyscyplinie Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport. Zawarte w pracy sformułowania i rozwiązania problemu badawczego potwierdzają, że Doktorant zgodnie z ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2024, poz. 1571 z późn. zm.) sprostął wymaganiom stawianym kandydatom do stopnia naukowego doktora. Wnioskuje o dopuszczenie rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Szczepana Grosela pt. „Numeryczna identyfikacja podłoża gruntowego” do publicznej obrony. Ponadto wnoszę o wyróżnienie tej rozprawy.

