

Wrocław, 14 lipca 2021 rok

prof. dr hab. inż. Cezary Madryas
Politechnika Wrocławska
Wybrzeże St. Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław
cezary.madryas@pwr.edu.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej
Pana mgra inż. Witolda Bogusza pt.:
„Prediction of Tunneling-Induced Ground Movements”.
(„Prognoza przemieszczeń podłoża gruntowego spowodowane realizacją tuneli”)

1. Podstawy opracowania recenzji

Recenzję opracowałem na zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej Instytutu Techniki Budowlanej Pana prof. Andrzeja Garbacza, który zwrócił się do mnie z prośbą o jej wykonanie pismem (DZ-04647R:262/EB/18) z dnia 5 lipca 2021 roku. Do korespondencji dołączono egzemplarz rozprawy doktorskiej sygnowany przez jej Autora mgra inż. Witolda Bogusza i afiliowany przez Instytut Techniki Budowlanej w roku 2021 oraz zlecenie na wykonanie recenzji.

2. Informacje formalne o zawartości rozprawy

Przedłożoną do recenzji rozprawę napisano na 123 stronach w języku angielski. Autorem rozprawy jest mgr inż. Witold Bogusz. Promotorem w przewodzie doktorskim jest Pani prof. dr hab. inż. Anna Siemińska-Lewandowska, a promotorem pomocniczym Pan dr hab. inż. Tomasz Godlewski, prof. Instytutu Techniki Budowlanej.

Rozprawę podzielono na 6 rozdziałów poprzedzonych jednostronicowymi streszczeniami w języku angielskim i polskim oraz listą oznaczeń i symboli. Na końcu pracy umieszczono spisy literatury, rysunków i tabel. Przedstawiony układ pracy jest przejrzysty ułatwia analizę jej tekstu.

3. Tematyka rozprawy

Tematykę rozprawy, jej cel, opis problemu badawczego oraz wyniki analizy literatury tematu Doktorant opisał w dwóch pierwszych rozdziałach dysertacji („Introduction” i „Review of the current state of knowledge”), uzasadniając podjęcie rozważań na temat przemieszczeń podłoża spowodowanych budową tuneli. Wskazał (za literaturą), że tunele wyróżnia spośród innych budowli fakt, że ich stateczność zależy nie tylko od cech konstrukcji ale także, od redystrybucji obciążeń w otaczającym je ośrodku gruntowym. Efektem tej interakcji są tworzące się na



powierzchni terenu wzdłuż osi tuneli niecki osiadań. Dla zapobiegania negatywnym skutkom tego zjawiska konieczne jest przewidywanie rozkładu i wartości tych przemieszczeń.

Wskazał, że odbywa się to zazwyczaj w wyniku stosowania półempirycznych metod, których parametry określone są na podstawie doświadczeń i obserwacji poczynionych na już zrealizowanych tunelach. Doktorant słusznie stwierdza, że najczęściej stosowanym modelem obliczeniowym jest tu, doskonalony później, model Peck'a z 1969 roku. Wskazuje również, że metody empiryczne pozwalają na uzyskanie wysokiej wiarygodności wyników przewidywań przy relatywnie małej liczbie wymaganych parametrów, tzn.: wartości maksymalnego osiadania nad osią tunelu s_{\max} , szerokości niecki odniesionej do zagłębienia osi tunelu K (niezależnej od jego konstrukcji, wymiarów i technologii realizacji) oraz od utraty objętości gruntu V_L (zależnej od warunków gruntowych i technologii budowy). Określenie wiarygodnych wartości wymienionych parametrów wymaga oceny ich zmienności na podstawie analizy dużych zbiorów danych pochodzących z badań w skali rzeczywistej.

Na podstawie tych rozważań jako cel pracy Doktorant przyjął ocenę i analizę zmienności wymienionych parametrów dla modeli półempirycznych z uwzględnieniem wagi porównywalnych lokalnych doświadczeń i warunków gruntowych. Dla realizacji celu Kandydat dokonał szczegółowej analizy wyników obserwacji osiadań generowanych budową drugiej linii metra w Warszawie (M2). Stąd też, główną część dysertacji stanowią analizy danych zawartych w 7319 plikach źródłowych pochodzących z badań na tym obiekcie.

Na podstawie przeprowadzonych studiów Doktorant uznał, że niecka osiadań, której kształt z dobrym przybliżeniem odzwierciedla odwrócona krzywa Gaussa może być rozpatrywana w płaskim stanie odkształcenia a zakres jej istotnego oddziaływania, w kierunku poprzecznym do osi tunelu. Przyjął, że odległość punktu przegięcia niecki może być aproksymowana liniową zależnością pomiędzy parametrem szerokości niecki (K) zależnym od rodzaju gruntu i głębokością do osi tunelu. Przytacza także, przykładowe przedziały wartości parametru (K) wyznaczonego przez badaczy tematu na podstawie studiów przypadków przeprowadzonych dla tuneli budowanych na w innych krajach.

Za drugi istotny parametr Doktorant uznaje parametr utraty objętości (V_L) opisujący wpływ tunelowania na deformacje ośrodka gruntowego i definiowany jako procentowy stosunek objętości niecki osiadań do objętości tunelu. Słusznie podkreśla, że określenie wielkości tego parametru jest trudne na etapie projektowania, ponieważ jest on ściśle związany z procesem realizacji tunelu i zależy, w przypadku metody tarczowej, od straty objętości gruntu na przodku, wokół tarczy i za tarczą. Stąd też, określenie wartości wypadkowej utraty objętości (V_L) może w praktyce być podejmowane po zakończeniu budowy tunelu na podstawie wyników pomiarów przemieszczeń, w celu uzyskania reprezentatywnej liczby danych empirycznych dla oceny rozkładu prawdopodobieństwa tego parametru. Doktorant podkreśla za literaturą, że wielkość parametru utraty objętości może być rozważana dla typowych warunków, największych możliwych oraz spowodowanych zdarzeniami nietypowymi, jak: rozruch tarczy inicjujący tunelowanie czy przy wznowieniu robót, znaczące zmiany warunków gruntowych, kawerny itp. Opisane utrudnienia w udokumentowaniu rozkładów statystycznych parametru powodują, co słusznie

zauważa Doktoranta, że w praktyce projektowej często wykorzystuje się alternatywne rozwiązania np. wartość określoną do podstawie doświadczeń eksperta. Podejście takie jest ponieważ uzasadnione zróżnicowaną charakterystyką lokalnych warunków w jakich realizowane są poszczególne tunele.

Konkludując rozważania i argumenty Autora przedstawione w rozdziałach 1 i 2, wzmocnione szerokimi studiami aktualnej literatury uważam, że Doktorant dobrze przygotował się do właściwego określenia celu pracy, wybierając do analizy oryginalny, aktualny i ważny problem badawczy prawidłowo dobierając narzędzie badawcze.

Podjęta przez Doktoranta tematyka badań jest szczególnie ważna dla dyscypliny inżynieria lądowa i transport w świetle budowy coraz większej liczby tuneli w Polsce, przy równoczesnym deficycie badań krajowych dotyczących tej problematyki. Stąd też uważam, że z uwagi na przedmiot badań jest oryginalna a w wyniku szerokich studiów literatury tematu odnosi się do aktualnego stanu wiedzy. Ma znaczące walory poznawcze mogące przełożyć się na wymiar ekonomiczny oraz społeczny, biorąc pod uwagę szeroko rozumianą ochronę środowiska, w którym odbywa się tunelowanie. Tytuł pracy dobrze odzwierciedla jej zawartość.

4. Charakterystyka pracy

4.1. Rozdział 3: „*Subject and methodology of the conducted analyses*”

W trzecim rozdziale dysertacji Doktorant opisał metodologię analizy oraz jej założenia i ograniczenia a także, przeprowadzone obserwacje z budowy drugiej linii warszawskiego metra (M2). Przedstawił również drogę dojścia od wyników pomiarów dla określania parametrów charakteryzujących nieckę (s_{max} , K i V_L).

Druga linia metra (M2) budowana była jako dwa równoległe tunele, w odległości między osiami od 13,0m do 15,5m i głębokości od 9,0m do 22,0m, drażone przy użyciu TBM (*Tunnel Boring Machines*) o średnicy zewnętrznej 6,3m w technologii EPB (*Earth Pressure Balance*). Obudowę tunelu o wymiarze zewnętrznym 6,0m i wewnętrznym 5,4m stanowią tubingi żelbetowe. Schemat przebiegu linii M2 Doktorant przedstawił na rys.3.1 a zmienność zagłębienia osi tunelu na rys.3.2.

Tunele wykonywano w zmiennych warunkach gruntowych poniżej zwierciadła wody gruntowej w związku z czym, na potrzeby prowadzonych analiz Doktorant przyjął trzy dominujące typy warunków geotechnicznych: GT1 (czwartorzędowe grunty niespoiste), GT2 (czwartorzędowe grunty spoiste) oraz GT3 (trzeciorzędowe iły plicieńskie). Przykład profilu geologicznego dla jednej z sekcji przedstawił na rys. 3.3.

Podstawę dla przeprowadzonej przez Kandydata analizy stanowiły dane w formie plików csv (*comma-separated values*) pozyskane ze standardowych zapisów systemu monitoringu na których, uwzględniając potrzeby analiz prowadzonych w dysertacji, przeprowadzono dodatkowe działania dla wyodrębnienia danych istotnych do określenia wartości badanych parametrów. W tym celu Doktorant użył autorskiego skryptu w języku *Python* opracowanego specjalnie dla prowadzonej

analizy, która wyodrębniała dane dotyczące przemieszczeń krótkoterminowych implikowanych budową każdego tunelu z osobna. Przemieszczenia wyznaczano jako różnicę między osiadaniami analizowanego punktu po przejściu tarczy i przed jej przejściem. Na podstawie tak wyznaczonych przemieszczeń dopasowywano funkcję Gaussa dla każdej niecki osiadań w rozważanych przekrojach na długości tuneli. Przekroje zdefiniowano na podstawie punktów pomiarowych, wokół których wyszukiwano dodatkowe punkty pomiarowe. Przykład strefy wyszukiwania punktów w opracowanym algorytmie Doktorant przedstawił na rys.3.8. Dopasowania profili osiadań opisanych funkcją Gaussa do wyników pomiarów prowadzono na podstawie dwóch parametrów: maksymalne osiadanie (s_{max}) oraz szerokości niecki (K), i weryfikowano wizualnie.

Wykorzystanie autorskiego skrypt w języku *Python* umożliwiło automatyczną analizę danych i wygenerowanie na jej podstawie 1047 przekrojów poprzecznych wzdłuż osi tunelu, z czego 787 spełniło założone kryteria. Uzyskane dane pozwoliły na dalszą ocenę zmienności parametrów charakteryzujących niecki i w konsekwencji, na zaproponowanie ich wartości do stosowania przy projektowaniu tuneli w Warszawie, w odniesieniu do zgeneralizowanych i dominujących typów podłoża gruntowego.

Tę część dysertacji oceniam wysoko doceniając ogromny nakład pracy, jaką musiał wykonać Doktorant dla zrealizowania przyjętego planu badań. Zawarte w tym rozdziale dysertacji treści świadczą o dobrym przygotowaniu Doktoranta do prowadzenia rozważań teoretycznych i rozwiązywania trudnych zadań naukowych metodami naukowymi. Również pod względem redakcyjnym, graficznym, stosowanego nazewnictwa oraz odwołań do literatury ta część pracy nie budzi moich zastrzeżeń.

4.2. Rozdział 4: „Results of the conducted analysis”

W rozdziale czwartym Doktorant opisuje i prezentuje wyniki badań i przeprowadzonych analiz, pokazując zmienność badanych parametrów (s_{max} , K , V_L) wzdłuż tras 17 odcinków wybudowanych tuneli oraz wyniki analizy całego zbioru danych z podziałem na dominujące typy podłoża. W końcowej części rozdziału zilustrował w postaci histogramów rozkłady statystyczne analizowanych parametrów oraz skumulowanych wykresów prawdopodobieństwa.

Wyodrębnienie wyników badań dla dominujących typów podłoża umożliwiło Kandydatowi ocenę rozkładu osiadań (s) w kierunku poprzecznym wzdłuż całej linii M2 (analizowano 6985 punktów danych z 4048 reperów gruntowych). Zasięgi oddziaływań osiadań w relacji do stwarzanych zagrożeń dla obiektów na terenie nad tunelem podzielono na cztery strefy od tej, w której budowie powinny być tylko monitorowane do tej, w której osiadania mogą powodować utratę nośności konstrukcji. Zilustrowano to na rys. 4.18.

Pozostałe parametry niecki oceniono na podstawie 787 przekrojów, z których 383 przypada na czwartorzędowe grunty niespoiste (GT1), 201 na czwartorzędowe grunty spoiste (GT2) i 195 na trzeciorzędowe iły (GT3). Pominięto, ze względu na niereprezentatywną liczbę pomiarów (8 przekrojów), ocenę parametrów w gruntach

organicznych. Analizując współzależności pomiędzy parametrami niecki Doktorant stwierdza, że:

- najniekorzystniejsze oddziaływania budowy tuneli na przemieszczenia występują w przypadku wąskich niecek przy jednoczesnych nadmiernych osiadaniach, co jest szczególnie istotne dla gruntów niespoistych (GT1),
- w przypadku gruntów grupy GT3 (iły) występują znacznie korzystniejsze wartości osiadań niż w gruntach z grupy GT1 (piaski),
- wartości w gruntach GT2 (czwartorzędowe gruntu spoite) wpisują się pomiędzy zakresy obserwacji przeprowadzonych dla gruntów typu GT1 i GT3,
- rozrzut wartości parametru szerokości niecki (K) jest znaczny dla wszystkich typów podłoża, a jego zakres jest większy od podawanego w literaturze tematu.

Doktorant wskazuje, na stwierdzoną dla wszystkich trzech typów podłoża zmienność wartości parametrów. Zdaniem Kandydata może ona wynikać z poziomu uogólnień warunków gruntowych sprowadzających się li tylko do trzech typów gruntu bez analizy podtypów, nieuwzględnienia uwarstwienia gruntu nad tunelem oraz pominięcie faktu, że przy małych odkształceniach grunty pracują w zakresie quasi-sprężystym. Zmienność rozpatrywanych parametrów stworzyła konieczność przedstawienie jej w sposób statystyczny, co Kandydat zrobił przedstawiając rozkłady występowania wartości parametrów dla poszczególnych typów podłoża w formie histogramów i tabelarycznie wartości dla percentyli skumulowanego prawdopodobieństwa. Histogram dla największych zaobserwowanych osiadań (s_{max}) przedstawił na rys. 4.31.

Maksymalne osiadania występowały w gruntach niespoistych (GT1) i przyjmowały wartość 90 mm. Jednak po odrzuceniu 5% największych osiadań, 95% z osiadań nie przekraczało wartości 41,5 mm. W pozostałych gruntach (GT2 i GT3) stwierdzone osiadania są mniejsze. Doktorant podkreśla, że występowanie największych osiadań we wszystkich typach gruntów ma charakter incydentalny w stosunku do wartości określonych jako typowe.

Według mojej wiedzy, są to podsumowania wyników pierwszej w kraju tak kompleksowej analizy danych z rzeczywistych pomiarów wartości parametrów niecek osiadań tworzących się podczas tunelowania z użyciem TBM. Uważam to za autorskie i oryginalne osiągnięcie Doktoranta.

Kandydat słusznie podkreśla, że dokładne wyjaśnienie przyczyn stwierdzonej zmienności parametrów wymaga dalszych badań, co nie zmniejsza w mojej opinii wartości uzyskanych wyników na tym poziomie dokładności. Istotnym elementem tej części dysertacji są ilustracje, które moim zdaniem zostały wykonane starannie i są wystarczająco czytelne. Podobnie jak w poprzednich rozdziałach nie mam zastrzeżeń do redakcji tej części pracy, stosowanego nazewnictwa oraz odwołań do literatury.

4.3. Rozdział piąty: „Recommendations for practical implementation” i rozdział 6: „Conclusions”

W rozdziale piątym Doktorant na podstawie uzyskanych zakresów zmienności parametrów s_{max} , K i V_L przedstawił rekomendacje dotyczące praktycznego zastosowania wyników badań proponując ich reprezentatywne wartości (zestawione tabelarycznie – tab.5.3), jakie mogą być aplikowane w procesie projektowania tuneli w

rejonie Warszawy. Wyróżnia trzy typy wartości w relacji do zagrożeń stwarzanych tunelowaniem:

- wartości „oczekiwane” (mediana) stanowiące w analizach wpływu główne odniesienie,
- wartości „prawdopodobne”, które mogą wystąpić stwarzając większe zagrożenie,
- wartości „możliwe” (95% percentyl), których wystąpienia są mało prawdopodobne ale stwarzają znaczące zagrożenie.

Doktorant słusznie rekomenduje, że mimo iż analizy projektowe będą w większości prowadzone na podstawie wartości „oczekiwanych” to w przypadku obiektów wrażliwych należy je prowadzić uwzględniając nawet wartości „prawdopodobne”.

Kandydat przeprowadza także dyskusję na temat ryzyk implikowanych tunelowaniem, przedstawiając za literaturą zmodyfikowaną w 2020 roku w ITB matrycę ilustrującą poziomy zagrożeń (tab.5.4).

W rozdziale szóstym będącym ostatnim rozdziałem pracy, Doktorant przedstawia wnioski z przeprowadzonych badań. Opisuje w pięciu punktach ich najistotniejsze wyniki liczbowe z syntetycznym komentarzem, co zdecydowanie ułatwia czytelnikowi zrozumienie poznawczych i użytkowych wartości pracy.

5. Uwagi ogólne

Praca zarówno pod względem tekstu jak i grafiki została opracowana starannie. Układ pracy jest prawidłowy i odpowiada standardom przyjmowanym w przypadku dysertacji doktorskich.

Nie wnoszę także uwag do merytorycznej zawartości pracy uważając, że jest ona pod tym względem poprawna, tak jak pod względem wykorzystanych przez Doktoranta metod i narzędzi badawczych.

Ciekawa wydaje się być zdanie Doktoranta na temat praktycznej możliwości wykorzystania wyników badań wykonanych dla warunków w obrębie Warszawy (lub ich części) w innych lokalizacjach.

Wartym rozważenia jest także problem szerszego wykorzystania pracy w polskim środowisku inżynierskim. Dysertacje napisano w języku angielskim, co bez wątpienia należy zaliczyć do jej zalet z uwagi na możliwość dotarcia do czytelnika spoza granic naszego kraju. Jednocześnie jednak, stwarza to barierę dla osób nie znających tego języka. Stąd też sugeruję aby najważniejsze fragmenty pracy, szczególnie dotyczące jej aplikacyjnych wartości, Autor opublikował w polskojęzycznych periodykach technicznych.

Przedstawione sugestie tematów do publicznej dyskusji w żadnej mierze nie umniejszają wartości pracy, którą oceniam bardzo wysoko.

6. Ocena osiągnięć zawartych w rozprawie

W przedstawionej do oceny dysertacji opisano wyniki badań naukowych i analiz dotyczących bardzo ważnego problemu (zadania naukowego), jakim jest prognozowanie przemieszczeń podłoża implikowanych procesem tunelowania.

Badania zostały przeprowadzone na drugiej linii metra w Warszawie co powoduje, że ich wyniki odnoszą się przede wszystkim do obszaru zblizonego do tego miasta. Jednak zaproponowana, oryginalna metodyka badań może moim zdaniem być przydatna do przeprowadzenia podobnych analiz w przypadku realizacji tuneli w innych warunkach lokalnych.

Na podstawie szerokiego studium dobrze dobranej literatury tematu, autorskiego modelu analizy oraz własnych badań Doktorant uzyskał wyniki istotne zarówno z poznawczego jak i utylitarne punktu widzenia.

Badania zostały przeprowadzone na odcinku o długości 27,1 km zawierającym 17 tuneli wybudowanych w latach 2012 do 2021, co pozwoliło na określenie reprezentatywnych parametrów niecki osiadań w 787 przekrojach. Parametry te zostały wyznaczone, zgodnie z przyjętym założeniem, z wykorzystaniem modeli półempirycznych w kontekście lokalnych doświadczeń i uwarunkowań geotechnicznych. Oznacza to, że Doktorant osiągnął główny cel pracy.

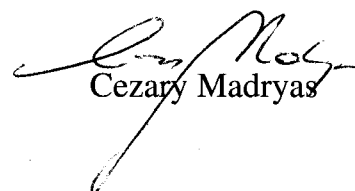
Zdaniem Doktoranta, z którym się zgadzam, daje to podstawę do stosowania reprezentatywnych wartości parametrów (s_{max} , K i V_L) w projektowaniu tuneli w obrębie Warszawy

7. Wniosek końcowy.

Reasumując stwierdzam, że Doktorant umiejętnie określił ważny problem naukowy, do rozwiązania którego użył prawidłowych narzędzi badawczych. Jak już napisałem, wyniki pracy mają potencjał aplikacyjny a zaproponowany sposób analizy może być pomocny w określaniu parametrów niecki dla projektowania innych tuneli, ułatwiając predykcję ewentualnych, negatywnych wpływów tunelowania na otoczenie.

Rozprawa przedstawia oryginalne wyniki rozwiązania ważnego problemu naukowego i bez wątpienia dokumentuje wysoki poziom wiedzy teoretycznej i inżynierskiej Kandydata z dyscypliny inżynieria lądowa i transport. Dokumentuje także umiejętność Doktoranta do samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

Przedstawiona do recenzji rozprawa spełnia moim zdaniem w stopniu wystarczającym wymagania artykułu 13. Ustę. 1 ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o *stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki* i może być dopuszczona do publicznej obrony.


Cezary Madryas