

Prof. dr hab. inż. Joanna Bzówka
Politechnika Śląska
Wydział Budownictwa
Katedra Geotechniki i Dróg
ul. Akademicka 5
44-100 Gliwice

Gliwice, 12 lipca 2021 roku

RECENZJA

rozprawy doktorskiej autorstwa mgr inż. Witolda Bogusza
pt. „Prediction of tunneling-induced ground movements”
(„Prognoza przemieszczeń podłoża gruntowego spowodowanych realizacją tuneli”)

1. Podstawa opracowania recenzji

Niniejszą recenzję pracy doktorskiej mgr inż. Witolda Bogusza pt. „Prediction of tunneling-induced ground movements” („Prognoza przemieszczeń podłoża gruntowego spowodowanych realizacją tuneli”) wykonano na zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej ITB – Pana prof. dr hab. Andrzeja Garbacza, bazujące na uchwale Rady Naukowej Instytutu Techniki Budowlanej z dnia 25 marca 2021 roku.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy doktorskiej

Recenzowana praca doktorska została napisana w języku angielskim, liczy 123 strony tekstu podstawowego oraz 140 pozycji literatury, w tym: 129 publikacji naukowych oraz naukowo-technicznych, 2 dokumentacje inżynierskie oraz 9 norm i raportów. Ponad połowa materiałów źródłowych pochodzi z ostatnich 20 lat, a 95% materiałów to literatura opublikowana w języku angielskim. Praca doktorska zawiera objaśnienia symboli stosowanych w rozprawie, spis rysunków i tabel oraz streszczenia w języku polskim i języku angielskim.

Praca została podzielona na 6 rozdziałów, a te zostały podzielone na podrozdziały.

2.1. Aktualny stan wiedzy w zakresie tematyki rozprawy

Budowa tunelu powoduje zmianę stanu naprężeń, a tym samym zmianę deformacji w ośrodku gruntowym. Na powierzchni terenu obserwuje się deformacje w formie niecki osiadań z maksymalną ich wartością nad osią tunelu. Niecka ta może być rozpatrywana w kierunku poprzecznym i podłużnym względem tunelu. Standardowo, większość przemieszczeń wywołanych budową tuneli występuje przy niewielkim odkształceniu podłużnym, a sama niecka może być rozpatrywana w płaskim stanie odkształcenia. Zakres podłoża narażonego na istotne przemieszczenia może być traktowany jako zasięg strefy oddziaływania tunelu w kierunku poprzecznym. Z tego względu, ocena niecki osiadań w kierunku poprzecznym jest najczęściej wykorzystywana przy analizach wpływu na zabudowę sąsiednią. Kształt niecki osiadania jest zazwyczaj aproksymowany za pomocą odwróconej krzywej rozkładu normalnego, tj. Gaussa. Rozkład osiadań terenu w kierunku poprzecznym do osi tunelu jest opisywany przez wartość maksymalnego osiadania nad osią tunelu oraz przez wartość odchylenia standardowego funkcji reprezentującego odległość punktu przegięcia niecki od osi tunelu, która jest głównie związana z głębokością, na której tunel jest budowany oraz zależy od rodzaju podłoża. W celu oceny parametru szerokości niecki Mair i Taylor (1997), na przykładzie kilku studiów przypadków dla realizacji tuneli w piaskach i ilach, ustalili w ilach średnią wartość $K = 0,50$, zaś dla gruntów piaszczystych

Bzówka

wartość średnią $K = 0,35$. Te wartości najczęściej są przyjmowane w praktyce do obliczeń. Zestawienie przykładowych zakresów wartości parametru K , przedstawionych w literaturze przez różnych autorów zostało przedstawione przez Bogusza i in. (2021).

Poza parametrem szerokości niecki osiadania K , najczęściej wykorzystywanym w analizach projektowych parametrem jest utrata objętości gruntu V_L , która opisuje wpływ realizacji tunelu na deformacje ośrodka gruntowego, jako procentowy stosunek objętości niecki osiadania V_s do teoretycznej objętości drążonego tunelu V_t (por. Peck, 1969; BTS-ICE, 2004; Mair, 2008).

Utrata objętości jest trudna do przewidzenia na etapie projektowym, ponieważ zależy od szeregu czynników związanych z samą realizacją i często będących poza pełną kontrolą projektanta. Utrata objętości jest uznawana za kluczowy parametr wpływający na predykcję przemieszczeń terenu związanych z tunelowaniem. W praktyce, zależy ona od wpływu kilku faz realizacji tuneli drążonych metodami tarczowymi, w tym od straty objętości na przodku, wokół tarczy, za tarczą, z uwagi na odkształcenie obudowy oraz efekty długoterminowe.

Łączny wpływ wszystkich pojedynczych etapów realizacji tunelu można przedstawić w postaci jednego współczynnika utraty objętości V_L , reprezentującego całkowity wpływ realizacji na otaczający ośrodek gruntowy.

Utratę objętości można ocenić powykonawczo na podstawie wyników prowadzonego monitoringu przemieszczeń podłoża, jednakże miarodajna ocena wartości tego parametru na potrzeby projektowania nadal jest problematyczna, gdyż wymaga znacznej liczby danych empirycznych dających podstawę do statystycznej oceny rozkładu prawdopodobieństwa tego parametru. Znajomość zmienności parametru jest istotna dla racjonalnego przyjmowania wartości w projektowaniu.

Maksymalne osiadania nad tunelem s_{max} mogą różnić się między poszczególnymi przekrojami. Według Pecka (1969) można wyróżnić trzy rodzaje osiadań: osiadania typowe s_{max} , największe przemieszczenia, jakie mogą wystąpić w przekrojach s_{max} oraz osiadania spowodowane przez nietypowe zdarzenia (np. lokalną utratę stateczności).

Problem utraty objętości można zatem rozważać w podobny sposób, rozróżniając warunki „typowe” (lub „normalne”), „największe możliwe” oraz spowodowane przez nietypowe zdarzenia i sytuacje wyjątkowe. Sytuacjami, które mogą skutkować nadmiernymi osiadaniami i utratą objętości mogą być np.: rozruch tarczy podczas rozpoczęcia robót tunelowych, wstrzymanie prac i ich wznowienie, przeszkody, obszary naruszonego gruntu, a także znaczne zmiany warunków gruntowych.

W kontekście projektowania, utrata objętości może być traktowana jako oddziaływanie geotechniczne, ponieważ jest ono przekazywane przez grunt na obiekty budowlane. Charakterystyczna wartość oddziaływania powinna odpowiadać górnemu lub dolnemu oszacowaniu dla oczekiwanego prawdopodobieństwa nieprzekroczenia wartości parametru, w praktyce jednak często wykorzystuje się alternatywne podejście, w którym jest przyjmowana wartość nominalna oszacowania w inny sposób niż statystyczny, np. wartość ekspercka bazująca na doświadczeniu.

Autor rozprawy doktorskiej mgr inż. Witold Bogusz wykorzystał w swojej pracy m.in. obserwacje z budowy II linii metra w Warszawie. Dotychczas zrealizowana część linii była podzielona na pięć etapów obejmujących 17 tuneli szlakowych pomiędzy obiektami stacyjnymi. Dostęp do materiałów źródłowych, zawierających historię przemieszczeń reperów gruntowych zlokalizowanych wzdłuż i w otoczeniu tunelu stanowi cenny pod względem skali i zakresu obserwacji poligon doświadczalny dla przygotowanej przez mgr inż. Witolda Bogusza rozprawy doktorskiej.

2.2. Struktura rozprawy doktorskiej

Pan mgr inż. Witold Bogusz swoją pracę doktorską przedstawił w sześciu rozdziałach.

W. Bogusz

- Rozdział 1 zawiera wstęp do problematyki przemieszczeń podłoża spowodowanych realizacją tuneli oraz uzasadnieniu podjęcia przez Doktoranta danej tematyki. Rozdział ten zawiera również cele i zakres pracy.

- Rozdział 2 został poświęcony przedstawieniu problemu badawczego oraz przeglądowi aktualnego stanu wiedzy w zakresie predykcji przemieszczeń podłoża gruntowego związanych z tunelowaniem. Zostały również przedstawione dane empiryczne uzyskane z wybranych opublikowanych studiów przypadków realizacji tuneli na świecie.

- W Rozdziale 3 zawarto opis metodologii przeprowadzonej analizy oraz opis przedmiotu badań, czyli II linii metra M2 w Warszawie.

- Rozdział 4 zawiera wyniki przeprowadzonych analiz, w tym m.in. zmienność analizowanych parametrów wzdłuż 17 zrealizowanych odcinków tuneli, wyniki analizy dla całego zbioru danych ze wszystkich odcinków, z podziałem na zgeneralizowane typy podłoża oraz rozkłady statystyczne analizowanych parametrów w postaci histogramów.

- W Rozdziale 5 mgr inż. Witold Bogusz przedstawił rekomendacje dotyczące praktycznego zastosowania przedstawionych wyników na potrzeby projektów tunelowych realizowanych w przyszłości w rejonie Warszawy. Na podstawie uzyskanych zakresów zmienności parametrów charakteryzujących nieckę osiadania, mgr inż. Witold Bogusz zaproponował konkretne wartości reprezentatywne parametrów, jakie można stosować w projektowaniu. W Rozdziale 5 zostały również przedstawione zalety podejścia etapowego do oceny wpływu tuneli i wskazano optymalny zakres stosowalności metod półempirycznych stosowanych w predykcji przemieszczeń podłoża.

- Rozdział 6 zawiera wnioski z analiz przeprowadzonych przez Doktoranta w swojej pracy doktorskiej, jak również potencjalne kierunki dalszych prac badawczych.

Strukturę rozprawy doktorskiej, jak również tytuł rozprawy oceniam bardzo pozytywnie.

3. Ocena dorobku rozprawy

Głównym celem przygotowanej przez mgr inż. Witolda Bogusza rozprawy doktorskiej jest ocena parametrów istotnych w przypadku podejścia półempirycznego oraz ocena ich zmienności, uwzględniając wagę lokalnych doświadczeń porównywalnych oraz warunków gruntowych przy doborze wartości projektowych. Cele badawcze prace obejmowały: przegląd dostępnej literatury i aktualnego stanu wiedzy w zakresie tematyki wpływu realizacji tuneli na przemieszczenia podłoża, przegląd opublikowanych doświadczeń związanych z realizacją tuneli w różnych regionach i warunkach gruntowych, ocenę i analizę efektów realizacji tuneli metodą EPB-TBM w złożonych uwarunkowaniach geologicznych Warszawy, zarówno w skali lokalnej, jak i regionalnej oraz ocenę zmienności parametrów opisujących nieckę osiadania (tj. osiadanie maksymalne s_{max} , parametr szerokości niecki K , utrata objętości V_L).

Zasadnicza część pracy doktorskiej jest związana z analizą doświadczeń z realizacji linii metra w Warszawie, bazującą na danych zawartych w 7319 plikach źródłowych, z których 4048 zawierały historię przemieszczeń reperów gruntowych zlokalizowanych wzdłuż i w otoczeniu tuneli. Na podstawie plików źródłowych, mgr inż. Witold Bogusz przedstawił autorski skrypt napisany w języku Python, przeprowadził analizy oraz wygenerował dane dla opracowania 1047 przekrojów poprzecznych zlokalizowanych wzdłuż tuneli. Z otrzymanego zbioru, ok. 75% spełniało założone kryteria pozwalające na bezpośrednie wykorzystanie ich do wyznaczenia poszukiwanych parametrów i oceny ich zmienności. Autor rozprawy zaproponował wartości osiadań maksymalnych, parametry szerokości niecki oraz utraty objętości rekomendowane do stosowania w przypadku realizacji tuneli w Warszawie, w odniesieniu do uogólnionych typów podłoża gruntowego dominującego na analizowanym obszarze.

Dotychczas zrealizowana II część linii metra w Warszawie, została podzielona przez mgr inż. Witolda Bogusza na 5 etapów obejmujących 17 tuneli szlakowych (D05–D21) pomiędzy obiektami stacyjnymi (C04–C21). Odcinek centralny (C10–C15) realizowano w latach 2010–2015. Następnie zrealizowano I etap odcinka zachodniego (C06–C10) oraz północno-wschodniego (C15–C18). Obecnie trwa realizacja II etapu przedłużenia linii po obu stronach (C04–C06 i C18–C21). W ramach tych prac zakończono już realizację tuneli.

Tunele II linii metra zrealizowano jako dwa równoległe tunele wydrążone w technologii EPB-TBM. Obudowa tuneli została wykonana z prefabrykowanych żelbetonowych segmentów, średnica zewnętrzna pierścienia wynosi 6,0 m, a wewnętrzna 5,4 m. Średnica tarcz drążących wynosiła 6,3 m. Odległość pomiędzy osiami tuneli na całej linii mieści się w granicach 13,0 – 15,5 m, zaś głębokość tuneli od powierzchni terenu do osi jest zmienna na długości całej linii, ale generalnie mieści się w zakresie od 9,0 do 22,0 m. Łączna długość wszystkich dotychczas zbudowanych odcinków tuneli wynosi 13,6 km (łącznie ok. 27,1 km długości dla obu tuneli).

W pracy mgr inż. Witold Bogusz opisał warunki gruntowo-wodne dla realizowanych odcinków tuneli; na całej rozpatrywanej długości realizacja tuneli odbywała się poniżej zwierciadła wód gruntowych. Na potrzeby analiz Doktorant zastosował uogólnioną kategoryzację warunków gruntowych; tj. przyjął trzy dominujące typy warunków geotechnicznych, mające istotny wpływ na zachowanie podłoża i obserwowane przemieszczenia wywołane budową tuneli: GT1 – czwartorzędowe grunty niespoiste, GT2 – czwartorzędowe grunty spoiste, GT3 – trzeciorzędowe iły plicieńskie.

Podczas budowy został wdrożony szeroki program monitoringu obejmujący różne techniki pomiarowe. Pomiarów były realizowane na znacznej liczbie punktów zlokalizowanych nad i w sąsiedztwie drążonych tuneli. Największą liczbę punktów pomiarowych stanowiły repery gruntowe służące do obserwacji przemieszczeń pionowych powierzchni terenu. Mgr inż. Witold Bogusz wykorzystał wyniki z 4048 punktów pomiarowych (średnio 1 punkt pomiarowy na ok. 3,4 m długości linii).

Mgr inż. Witold Bogusz do analizy wyników z monitoringu wykorzystał dane z systemu, pozyskane w formie plików csv, czyli *comma-separated values*. Dla potrzeb badawczych, Autor rozprawy przeprowadził dodatkowe działania na zgromadzonych zbiorach danych, aby wyodrębnić istotne dane i umożliwić wprowadzenie poszukiwanych parametrów. Mgr inż. Witold Bogusz opracował i wykorzystał autorski skrypt w języku Python w wersji 3.7, który umożliwił wykorzystanie zalet programowania obiektowego oraz wykorzystanie bibliotek „open source” dostępnych dla języka Python. Przeprowadzenie analizy wymagało od Autora pracy zautomatyzowanej korelacji danych z monitoringu przemieszczeń z historią postępu tarcz TBM, a także przejścia z globalnego układu współrzędnych punktów na układ lokalny. Przeprowadzona przez mgr inż. Witolda Bogusza analiza obejmowała wyodrębnienie danych dotyczących przemieszczeń krótkoterminowych (do 2 tygodni), spowodowanych realizacją każdego z tuneli z osobna. Wartości przemieszczeń zostały wyznaczone jako różnica między osiadaniem danego punktu po przejściu tarczy a odczytem przed jej przejściem, co pozwoliło Doktorantowi wyeliminować inne czynniki mogące powodować przemieszczenia podłoża.

Na podstawie wyodrębnionych przemieszczeń pionowych Autor rozprawy dopasował funkcje rozkładu Gaussa, opisujące nieckę osiadania dla każdego z rozważanych przekrojów zlokalizowanych na długości tuneli. Przekroje zostały zdefiniowane przez mgr inż. Witolda Bogusza na podstawie punktów pomiarowych zlokalizowanych nad tunelami, w sąsiedztwie których były wyszukiwane dodatkowe punkty pomiarowe. Autor rozprawy uznał, że do dopasowania krzywej wymagane jest wykorzystanie minimum trzech punktów pomiarowych. Obszar wyszukiwania punktów został ograniczony do zakresu $x \pm 0,5 \cdot z_0$ (wzdłuż tunelu) i $y \pm 3,0 \cdot z_0$ (z_0 – odległość w pionie od powierzchni terenu do środka tunelu; głębokość tunelu).

1. Boga

Mgr inż. Witold Bogusz dopasował profil osiadania opisany funkcją rozkładu normalnego do wyników pomiarów bazując na dwóch parametrach: maksymalnym osiadaniu s_{max} (w zakresie $\pm 5\%$ od rzeczywistej zaobserwowanej wartości maksymalnej) oraz szerokości niecki K (w zakresie wartości od 0,01 do 1,00). Łącznie Autor rozprawy wygenerował 1047 przekrojów, dla których określił parametry charakteryzujące nieckę osiadania. Z dalszych analiz wykluczył przekroje dla których otrzymał współczynnik $R^2 < 0,75$ lub $K < 0,10$, zaś do dalszych analiz zakwalifikował 787 przekrojów, dzięki czemu była możliwa ocena zmienności parametrów charakteryzujących nieckę osiadania.

Rezultatem przeprowadzonych przez mgr inż. Witolda Bogusza analiz jest kompleksowe podsumowanie parametrów opisujących nieckę osiadania wywołaną realizacją tuneli, bazującą na doświadczeniach z budowy II linii metra w Warszawie.

Postawione na początku rozprawy doktorskiej przez mgr inż. Witolda Bogusza cele, m.in. analiza i ocena efektów realizacji tuneli metodą EPB-TBM w złożonych warunkach geologicznych Warszawy oraz ocena zmienności parametrów opisujących nieckę osiadania zostały osiągnięte.

4. Uwagi szczegółowe i dyskusyjne

Rozprawa doktorska została napisana przez mgr inż. Witolda Bogusza w języku angielskim bardzo dobrze, w sposób czytelny i przejrzysty. Rysunki i tablice zostały bardzo starannie opracowane. Na początku pracy Doktorant podał spis ważniejszych symboli stosowanych w rozprawie oraz określił cel i zakres pracy. Występujące w pracy drobne usterki redakcyjne, np. brak cytowania w tekście publikacji (Muir Wood 1994) lub błędy w cytowaniu Autorów publikacji, nie obniżają w żaden sposób wartości merytorycznej pracy doktorskiej.

Po zapoznaniu się z treścią pracy nasuwają się następujące pytania:

- Czy Autor rozprawy mając do dyspozycji obszerną dokumentację dotyczącą II linii metra w Warszawie planuje opracowanie i opublikowanie nomogramów ułatwiających inżynierom projektantom i wykonawcom wyznaczanie parametrów opisujących nieckę osiadania?
- Czy wnioski wypływające z rozprawy doktorskiej można przenieść bezpośrednio lub pośrednio na inne odcinki realizowanych tuneli?

5. Podsumowanie i wniosek końcowy

Autor rozprawy za cel prowadzonych przez siebie analiz przyjął ocenę parametrów charakteryzujących nieckę osiadania, istotnych w przypadku podejścia półempirycznego wraz z opisem ich zmienności, uwzględniając wagę lokalnych doświadczeń porównywalnych i warunków gruntowo-wodnych. Ponadto, Doktorant postawił przed sobą zadanie przedstawienia rekomendacji w zakresie wyznaczania reprezentatywnych wartości na potrzeby projektowania tuneli w warunkach aglomeracji miejskiej.

Przeprowadzona przez mgr inż. Witolda Bogusza analiza wszystkich wyników łącznie, z wyodrębnieniem wyników dla poszczególnych dominujących typów podłoża, pozwoliła na ocenę rozkładu osiadań w kierunku poprzecznym wzdłuż całej linii. Wyciągnięte przez mgr inż. Witolda Bogusza wnioski są następujące:

- zasięg występowania zauważalnych osiadań $y \leq 3,0 \cdot z_0$ można uznać za pierwsze oszacowanie oddziaływania budowy tuneli. Obiekty w tej strefie powinny być objęte monitoringiem,

- strefa istotnego ryzyka $y \leq 2,0 \cdot z_0$ – w tym zasięgu osiadania mogą przekraczać 5 mm – strefa potencjalnych wpływów na warunki użytkowania obiektów na poziomie architektonicznym,
- strefa znacznego ryzyka $y \leq 1,2 \cdot z_0$ – w której osiadania mogą przekroczyć 10 mm – strefa potencjalnych wpływów na warunki użytkowania obiektów na poziomie funkcjonalnym,
- strefa największego ryzyka $y \leq 0,5 \cdot z_0$ – zasięg największych osiadań mogących przekraczać 20 mm – strefa potencjalnych wpływów z uwzględnieniem ryzyka utraty nośności obiektów.

Rozpatrując współzależności między parametrami, mgr inż. Witold Bogusz zaobserwował zależność między współczynnikami szerokości niecki osiadania K oraz maksymalnymi osiadaniami s_{max} . Autor rozprawy stwierdził, że szersze niecki osiadań, dla których $K > 0,6$, nie zostały zaobserwowane w przypadku, gdy maksymalne osiadania nad tunelem przekraczały 20 mm. Najniekorzystniejsze przypadki oddziaływania realizacji tuneli na przemieszczenia podłoża są związane z relatywnie wąskimi nieckami, przy jednocześnie nadmiernych osiadaniami, w szczególności dla gruntów niespoistych. Różnice między parametrami dla różnych typów gruntów są jeszcze bardziej widoczne porównując utratę objętości z maksymalnymi osiadaniami. Jak stwierdza mgr inż. Witold Bogusz, w przypadku ilów są obserwowane znacznie korzystniejsze wartości osiadań niż w przypadku piasków, nawet dla podobnych wartości parametru utraty objętości. W przypadku gruntów piaszczystych, utrata objętości ok. 1% może skutkować występowaniem nadmiernych osiadań (> 30 mm).

Dla wszystkich typów podłoża, mgr inż. Witold Bogusz zauważa istotny rozrzut parametru K . W przypadku gruntów niespoistych typu GT1, parametr szerokości niecki zasadniczo mieści się w zakresie $0,25 \div 0,60$, zaś dla gruntów spoistych/przejściowych typu GT2 oraz dla ilów typu GT3, wartości parametru K wynoszą $0,30 \div 0,80$.

Dla Autora rozprawy doktorskiej, duża zmienność parametru K wynika z wpływu na obserwowane rezultaty następujących założeń: poziomu uogólnienia warunków gruntowych, mechanizmu ewolucji niecki osiadań oraz zależności parametru K od poziomu odkształcenia.

Rozkłady występowania wartości parametrów dla poszczególnych typów podłoża, mgr inż. Witold Bogusz przedstawił w formie histogramów, natomiast wartości dla charakterystycznych percentyli skumulowanego prawdopodobieństwa przedstawił w formie tabelarycznej. Niewątpliwie, taki sposób przedstawienia wyników przez Autora rozprawy stanowi oryginalne i kompleksowe podsumowanie doświadczeń z realizacji tuneli na terenie Warszawy.

Mgr inż. Witold Bogusz w rozprawie doktorskiej zawarł w postaci tabeli rekomendowane wartości parametrów, które mogą być stosowane w analizach wpływu, jako główne wartości odniesienia dla celów projektowych. W tabeli można znaleźć tzw. wartości parametrów „oczekiwane”, „prawdopodobne” oraz „możliwe”. Jak podkreśla Autor rozprawy, dla większości obiektów sąsiednich analiza zakresu oddziaływania może bazować na wartościach „oczekiwanych”, ale dla niektórych obiektów, np. wrażliwych lub zaliczanych do wyższych klas konsekwencji, występujących w strefie największego ryzyka, może zachodzić potrzeba dodatkowej weryfikacji z uwzględnieniem bardziej niekorzystnych wartości parametrów. Wówczas zalecana jest dodatkowa weryfikacja z wykorzystaniem wartości „możliwych”.

Na podkreślenie zasługuje również fakt, że we wnioskach po przeprowadzonych analizach, mgr inż. Witold Bogusz zaznaczył, że rozpatrując wszystkie wyniki uzyskane dla II linii metra w Warszawie w kontekście regionalnych uwarunkowań geotechnicznych, można wykazać, że:

- rozpatrywane parametry charakteryzujące nieckę osiadania, tj. s_{max} , K , V_L , nie wykazują istotnych związków korelacyjnych w powiązaniu z głębokością tunelu z_0 , przynajmniej w zakresie rozpatrywanych głębokości 9 m lub $1,4 \cdot D \leq z_0 \leq 22$ m lub $3,5 \cdot D$ (D – średnica tunelu),
- zaobserwowano liniową zależność między wartościami maksymalnych osiadań a parametrem utraty objętości, z zauważalnymi różnicami pomiędzy trzema rozpatrywanymi typami podłoża. Ma to związek z różnicą w szerokości niecek osiadania,
- parametr szerokości niecki K przedstawia znaczną zmienność dla wszystkich rozpatrywanych typów podłoża, jednak rzadko przekracza wartość $K \geq 0,60$, w sytuacji, gdy obserwowane osiadania maksymalnie wynoszą $s_{max} \geq 20$ mm. Świadczy to o problemie wystąpienia ryzyka nadmiernych osiadań o bardzo lokalnym charakterze, jako ryzyka o małym prawdopodobieństwie, ale dużych konsekwencjach, szczególnie w przypadku gruntów niespoistych GT1,
- zmienność parametru szerokości niecki osiadania K , może być tak wysoka jak zmienność obserwowana pomiędzy realizacjami tuneli w różnych regionach na świecie.

Za oryginalne i twórcze elementy rozprawy doktorskiej należy uznać:

- wykorzystanie danych z realizacji linii metra M2 w Warszawie, zawartych w 7319 plikach źródłowych, z których 4048 zawierały historię przemieszczeń reperów gruntowych zlokalizowanych wzdłuż tunelu i w jego otoczeniu,
- opracowanie autorskiego skryptu w języku Python, za pomocą którego można było wygenerować dane dla opracowania 1047 przekrojów poprzecznych zlokalizowanych wzdłuż tuneli,
- propozycję autorską/rekomendację wartości parametrów, tj. osiadań maksymalnych s_{max} , parametrów szerokości niecki K oraz utraty objętości V_L do stosowania w przypadku realizacji tuneli w Warszawie, w odniesieniu do zgeneralizowanych typów podłoża gruntowego dominujących na analizowanym obszarze.

Reasumując, stwierdzam, że praca doktorska Pana mgr inż. Witolda Bogusza pt. „*Prediction of tunneling-induced ground movements*” („*Prognoza przemieszczeń podłoża gruntowego spowodowanych realizacją tuneli*”) spełnia w całej rozciągłości warunki i wymagania Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku (Dz.U. z 2017 r., poz. 1789 z późn. zm.) o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki.

Recenzowana rozprawa doktorska spełnia również art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2018 r., poz. 1668 z późn. zm.) w brzmieniu:

1. *Rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę kandydata w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej.*
2. *Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej albo oryginalne dokonanie artystyczne.*

Biorąc powyższe pod uwagę oraz moją pozytywną ocenę rozprawy doktorskiej, wnioskuję o przyjęcie rozprawy doktorskiej przez Radę Naukową Instytutu Techniki Budowlanej oraz dopuszczenie Pana mgr inż. Witolda Bogusza do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Z uwagi na aktualny, bardzo interesujący i aplikacyjny temat badawczy, a tym samym wnikliwy charakter pracy doktorskiej, wnoszę również o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.

Janusz Bzorek 7