



Prof. dr hab. inż. Marek Lefik  
Politechnika Łódzka  
Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska  
Katedra Geotechniki i Budowli Inżynierskich  
Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź.

Łódź, 10 października 2021 roku.

Recenzja  
rozprawy doktorskiej mgr inż. Kamila Stacheckiego  
„Analiza możliwości konwersji krzywej próbnego statycznego obciążenia  
pala przy zmianie jego geometrii”

### 1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawą opracowania recenzji jest uchwała Senatu Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie (ZUT), powołująca mnie na recenzenta w przewodzie doktorskim Pana mgr. inż. Kamila Stacheckiego oraz pismo Prorektora ds. Nauki ZUT, Pana prof. dr. hab. inż. Jacka Przepiórskiego, z dnia 1 lipca br., zlecające mi napisanie recenzji.

### 2. Przedmiot oceny

Przedmiotem oceny jest rozprawa doktorska napisana przez mgr inż. Kamila Stacheckiego, zatytułowana „Analiza możliwości konwersji krzywej próbnego statycznego obciążenia pala przy zmianie jego geometrii”. Praca ta powstała w Katedrze Geotechniki WBIA Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego. Promotorem pracy jest profesor dr hab. inż. Zygmunt Meyer.

Praca liczy 195 stron, jest podzielona na 10 rozdziałów, w jedenastym rozdziale zawarto 9 załączników. Rozprawę ilustruje 112 rysunków i wykresów, zamieszczono w niej 85 tabel. Spis literatury zawiera 85 pozycji, w tym pięć dokumentów mających charakter norm. Spis skrótów i oznaczeń oraz streszczenia w języku angielskim i polskim umieszczono na początku rozprawy.

### 3. Szczegółowa analiza treści rozprawy i jej ocena merytoryczna

3.1. Rozdział pierwszy zawiera w punkcie 1.1. i w punkcie 1.2 (odpowiednio) wprowadzenie ogólne i uzasadnienie podjęcia badań dotyczących analizy możliwości konwersji krzywej próbnego statycznego obciążenia pala przy zmianie jego geometrii.

W rozdziale tym Autor wyjaśnia, że celem Jego pracy będzie zbadanie możliwości wykorzystanie krzywej zależności obciążenie-osiadanie, uzyskanej w wyniku polowego badania statycznego pała, do oceny nośności oraz do projektowania pała o innej geometrii niż pał badany.

Badania statyczne nośności pała prowadzone są albo dla zweryfikowania nośności wykonanych pali albo dla uzyskania danych do projektowania, przed realizacją przedsięwzięcia inwestycyjnego. Jak się wydaje, przedstawiona praca znajdzie zastosowanie jedynie w procesie projektowania pali na podstawie badań pali próbnych. Autor zauważa, że aktualne przepisy prawne dotyczące projektowania pali pozwalają na projektowanie z wykorzystaniem obciążeń próbnych. Przewiduje On uzyskanie dużych oszczędności w procesie wykonywania pali bądź to - dzięki ograniczeniom liczby badań statycznych, bądź to - przez uzyskanie oszczędności materiałowych w wyniku wykorzystania wiedzy o pracy statycznej pała na podstawie wykonanych doświadczeń. Już na tym etapie pojawia się wątpliwość, która towarzyszyła mi podczas lektury całej pracy, związana z tym, że jedyne zmienne, jakie są brana pod uwagę to wymiary pała zaś rozumowanie dotyczy ich modyfikacji, która jest możliwa jedynie przez wykonanie innego pała w innym miejscu. Pojawia się tu naturalny problem oceny, na ile warunki gruntowe dla tego kolejnego, projektowanego pała powinny być takie same. Problem zmiany warunków gruntowych a nawet problem osadzenia kolejnego zaprojektowanego metodą konwersji pała jako elementu grupy pali nie jest nigdzie podjęty, mimo tego, że jest to ważne ograniczenie zakresu stosowalności praktycznej podjętej analizy. Po raz pierwszy na stronie 44. Doktorant zwraca uwagę na warunki gruntowe, zakładając, że pozostają one bez zmian. Później wielokrotnie założenie takie pojawia się w tekście rozprawy, jednak we wzorze 4.63 pojawią się sztywności gruntu przed i po konwersji. Konwersja przeprowadzona w rozprawie doktorskiej nie bierze pod uwagę równań konstytutywnych poszczególnych warstw geotechnicznych gruntu, w którym osadzono pał a jedynie wymiary samego pała. Kolejnym problemem, który jest wyraźnie opisany w pracy jest (naturalna) konieczność rozdziału oporu pała na opory podstawy i poboczniczy (Eurokod 7). Z tego wymagania Autor zdaje sobie sprawę w rozdziale wstępnym (zapisuje to wymaganie explicite). Zapis krzywych M-K pozwala na to, większość rozważań teoretycznych zapisanych w pracy dotyczy tego zagadnienia.

Zarówno zależność konwersji od warunków gruntowych jak i rozdział oporu pała na siły rozwinięte na poboczniczy i odpór gruntu pod stopą muszą napotkać na podstawową trudność: w badaniach statycznych pali nie ma informacji doświadczalnej ani o podziale reakcji pała na pobocznicę i stopę ani tym bardziej o udziale poszczególnych warstw geotechnicznych w nośności poboczniczy. Badanie statyczne daje informacje tylko o sumie tych sił. Wszystkie informacje, które pozwalają na ocenę składników tej sumy to informacje zależne od interpretacji teoretycznej pracy pała. W doświadczeniu nie ma tej informacji, doświadczenie może jedynie obalić lub potwierdzić trafność interpretacji. Ta sama uwaga dotyczy krzywej Meyera-Kowalowa (krzywej M-K). Dopiero dodatkowe założenia dotyczące pracy pała pozwalają na zapisanie drugiej krzywej M-K, pozwalającej na rozdział reakcji pała na jej dwa addytywne składniki.

3.2. Rozdział drugi zawiera sformułowanie tezy pracy oraz określa cel pracy i jej zakres. Tezę pracy sformułowano następująco:

„Istnieje możliwość konwersji z dostateczną dla celów praktycznych obliczeń dokładnością krzywej próbnego statycznego obciążenia pała w przypadku zmiany jego wymiarów”.

Istnienia takiej możliwości Doktorant dowodzi przez przedstawienie procedury konwersji. Problem „dostatecznej dla celów praktycznych obliczeń dokładności” tej konwersji, akcentowany w drugiej części tezy, jest trudniejszy do formalnej oceny. Metodyka, jaką przyjął Autor, aby to wykazać, jest bardzo skomplikowana i rodzi wiele pytań. Na ocenę tej

dokładności złoży się suma wszelkich komentarzy dotyczących przyjętych założeń w kolejnych rozdziałach.

Określając zakres pracy, Doktorant wymienia zadania badawcze, które rzeczywiście zrealizował, takie jak sformułowanie metody konwersji i zastosowanie jej do analizy danych pochodzących z rzeczywistych badań kilku pali. Zapowiada jednak jednocześnie badania, które trudno uznać za zrealizowane w recenzowanej rozprawie. Doktorant twierdzi, że oprócz błędów związanych z dokładnością pomiarów przemieszczeń i sił, dane eksperymentalne zawierają błędy jakościowe, tu cytuję: „Wynikają one ze sposobu prowadzenia badań, odkształcenia przestrzeni gruntowej oraz sposobu współpracy pala z gruntem”. Doktorant deklaruje, że przeprowadzi badania dotyczące statystycznych metod prowadzących do wykrycia i eliminacji tych błędów, cytuję: „...przewidziano badania dotyczące statystycznych metod wyznaczania parametrów w celu ustalenia, którą część krzywej testu statycznego należy wybrać do estymacji parametrów (krzywej?) M-K...”. Doktorant zapowiada również, że przeprowadzi analizę zmierzającą do zminimalizowania wpływu błędów pomiarowych na, jak zgaduję, wiarygodność wniosków wyciągniętych z pomiarów obciążonych błędami metodologicznymi wymienionymi powyżej. W ciągu lektury pracy nie znalazłem przekonywujących elementów zapowiadanej tu analizy błędów.

3.3. W rozdziale trzecim przedstawiono w sposób syntetyczny opis obecnego stanu wiedzy na temat obliczania przemieszczeń pala obciążanego statycznie siłą osiową i opisu jego interakcji z gruntem. Autor rozpoczyna rozdział przeglądem podstawowych dla tej dziedziny wiedzy prac, następnie omawia szczegółowo kilka ważniejszych podejść do tego zagadnienia. Skupienie uwagi na zastosowaniu funkcji transformacyjnych (opis metody zajmuje znaczną część rozdziału i obejmuje wiele jej wariantów) nie ma znaczenia dla dalszego ciągu pracy, gdyż metoda ta, w rozprawie doktorskiej nigdzie nie jest zastosowana. Z tego samego powodu nie krytykuję całkowitego pominięcia metod numerycznych w modelowaniu pracy pala. Autor opisuje bardzo szczegółowo funkcje transformacyjne, pisząc przy tej okazji, że powinny one wynikać z równań fizyki matematycznej dotyczących mechaniki gruntów (cytuję ze strony 21: „Zależność  $T(s)$  jest zależnością podstawową i jej określenie powinno wynikać z równań fizyki matematycznej dotyczących mechaniki gruntów”). Trudno się z tym zgodzić: jako związki konstytutywne powinny być one raczej wynikiem doświadczenia, będąc jedynym nieraz elementem zastosowania metody indukcyjnej, a nie dedukcyjnej w mechanice.

Część przeglądu obejmuje literaturę poświęconą analizie wyników próbnych obciążeń statycznych (podejście Mazurkiewicza, zalecenia Instytutu Budowy Dróg i Mostów).

Znaczna część przeglądu poświęcona jest podstawowemu dla rozprawy piśmiennictwu dotyczącemu metody Meyera-Kowalowa reprezentacji krzywej osiadania pala. Sama krzywa M-K i interpretacja jej parametrów oraz możliwość rozdzielenia oporu pala na część zależną od poboczniczy i od oporu gruntu pod stopą pala jest opisana prawidłowo, jednak uważam za swój obowiązek skomentować tu niestaranność terminologii matematycznej. Doktorant pisze, że krzywa ta ma dwie asymptoty, co nie jest prawdą, gdyż jest ograniczona przez asymptotę i styczną. Stycznej nie można nazywać asymptotą. Z greckiego asymptota - ἀσύμπτωτη, oznacza „nie stykać się”.

Podobnie, nie jest jasne co Autor nazywa obszarem zależności liniowej. W definicji krzywej M-K nie ma takiego obszaru. Na rysunku 3.8 jest to jeszcze mniej zrozumiałe. Kolejna uwaga terminologiczna: jak się wydaje, Doktorant zalicza metodę najmniejszych kwadratów do metod statystycznych. Tak nie jest, metoda ta nie operuje żadnymi pojęciami statystycznymi, choć w statystyce jest używana bardzo często, podobnie jak w innych gałęziach matematyki. Uwaga ta jest ważna, gdyż teoria bazująca na doświadczeniu (testy statyczne pali) powinna wziąć pod uwagę możliwości popełnienia błędu pomiaru. Wpływ przypadkowych błędów na interpretację danych zwykle rozważany jest przy użyciu statystyki matematycznej.



Wielokrotnie pojawiają się w pracy zapowiedzi analizy statystycznej jednak samej analizy statystycznej nie znajdują. Jest w tym rozdziale wiele zdań niezręcznie zbudowanych, niestety jest to wada całej dysertacji. Na przykład zdanie „...analiza numeryczna (czego?) przeprowadzona w oparciu o pale obciążone do zniszczenia, która ma na celu zoptymalizowanie sposobu estymacji parametrów krzywej M-K, aby zminimalizować wartości błędów pomiarowych wpływających na otrzymane rezultaty” jest nie dość, że niezręcznie stylistycznie to jeszcze zapowiada działania trudne do wykonania (jak można zminimalizować wartości tych błędów, które już są popełnione?).

W podsumowaniu rozdziału trzeciego Doktorant skupia uwagę na istniejących pracach związanych z wykorzystaniem krzywej M-K w projektowaniu pali wspomaganym wynikami sondowania, ekstrapolacji tej krzywej oraz podziałem wykresu na dwa addytywne składniki związane z pracą pobocznicy i stopy pala. Można zgodzić się z wnioskiem, że brak jest prac dotyczących konwersji krzywej M-K przy zmianie geometrii pala.

Rozdział trzeci jest napisany dość chaotycznie (trudno jest znaleźć myśl przewodnią w wyborze kolejności przedstawianych nurtów w obrębie omawianej dyscypliny). Pełen jest również niezręczności językowych.

3.4. Rozdział czwarty („Analiza zjawiska”) zawiera autorski opis matematyczny zjawiska współpracy pala i ośrodka gruntowego.

Również w tym rozdziale zauważa się chaos w przedstawianiu kolejnych kroków wyprowadzeń oraz niedostatek komentarza. Nigdy Doktorant nie pisze w jakim celu podejmuje przekształcenia. Już w równaniu 4.1 nie wiadomo o jaką siłę  $Q$  chodzi zaś zmienna  $z$  zgodna z rysunkiem 4.1 sugeruje, że wzór ten dotyczy obszaru sztywnego pala. W równaniu (4.5) wyjaśnia się wiele, ale i tak nie wiadomo, czy równanie to obowiązuje od zera czy może tylko od  $z=H$  (jest ważny szczegół zapisu). W równaniu 4.4 zapomniano prawdopodobnie o wysokości pala. Czym są szczególne punkty  $z_1$  i  $z_2$  występujące w równaniu 4.6? Równanie 4.8 i, na przykład, 4.16 są formalnie niepoprawne:  $z$  występuje w granicach całki, wobec tego pod znakiem całki oraz  $dz$  powinny być zastąpione inną zmienną pomocniczą. Zwracam na to uwagę, ponieważ jest to przykład ogólnego nieporządku w opisach wyprowadzenia wzorów. Autor pisze w kilku miejscach: „Osiedlenie pobocznicy pala spowodowane naprężeniami  $\tau$  można również obliczyć...”. Chodzi prawdopodobnie o to, że naprężenia jest związane z tym osiedleniem, jednak, jeśli sugeruje się tu związek przyczynowo skutkowy to jest on odwrotny do zapisanego. Należy również zwrócić uwagę na fakt, że Doktorant przyjmuje liczne założenia upraszczające bez właściwego komentarza. Na przykład: „Dla gruntu jednorodnego można przyjąć, że moduł sprężystości  $E$  nie zmienia się,...”. W mechanice gruntów moduł  $E$  zależy również od historii stanu naprężenia w gruncie i od ścieżki naprężeń. Nie wiem, czy można tak samo traktować moduł  $E$  pod stopą i w pobliżu pobocznicy. Co więcej, mimo tego założenia, w pewnych obszarach pracy te wielkości są rozróżniane!

Kolejne uproszczenie: „Zakładając, że  $r \ll H$ , można pominąć  $r^2$  w równaniach (4.10) i (4.11)”, jednak w tych równaniach w wyrażeniach na sumę w mianownikach nie występuje  $H$  ale  $z-H$ , również w strefie podstawy pala. Co wtedy dzieje się z wartością tej sumy, jeśli pominie się  $r$ ? Bez żadnego komentarza, z równania 4.10 i 4.11 Doktorant oblicza różne wartości  $s$ . Jest to sprzeczne z rysunkiem 4.1 i z założeniem o sztywności pala. Można oczywiście zgadywać jaki sens mają te równania, ale wyraźne objaśnienia Autora rozprawy są tu konieczne.

Nie jest dla mnie jasne jak Autor rozprawy interpretuje fizycznie wielkość, opisaną równaniem 4.14. Jeśli przyjęto absolutną sztywność pala to równość ugięcia wynikająca z równań 4.18 i 4.19 raczej nie zaskakuje, zwłaszcza że przyjęto również brak poślizgu wzdłuż pobocznicy.

W dalszej części tego rozdziału Doktorant koncentruje się na analizie współpracy pala z innym, sąsiednim palem. Można się tego jedynie domyślać, bo zagadnienie to nie jest ani

wprowadzone, ani poprzedzone jakimkolwiek komentarzem ani nawet zilustrowane rysunkiem. Co ważniejsze, rola tych rozważań w wyprowadzeniu metody konwersji krzywej M-K nie jest wytłumaczona. Rysunek 4.2 ilustruje bardzo spekulatywne założenia przyjęte dla tej procedury.

Kluczowe dla dalszego rozumowania, które Doktorant prowadzi, są wyniki wzięte z prac [44] i [47] (numeracja prac cytowanych wg bibliografii w doktoracie). Autor rozprawy nie napisał żadnego komentarza do tych wyników, dlatego sprawdzenie założeń, przy jakich są one uzyskane wymaga od recenzenta zapoznania się bezpośrednio z pracami, do których odsyła Doktorant. Niestety, różnorodność założeń wyjściowych jest bardzo trudna do syntetycznego podsumowania i powinna jednak pozostać obowiązkiem Doktoranta. W szczególności rysunek 4.3 zmienia jaskrawo i bez żadnego, jak dotąd, komentarza kontekst teoretyczny rozpatrywanego zagadnienia. Jaki ma sens użycie formuły 4.50, wziętej z pracy [52] po „samodzielnym” wyprowadzeniu wielu wyrażeń na osiadanie w poprzednich akapitach rozdziału 4.1? Podobnie, po przedstawieniu wyprowadzeń, o których napisano powyżej, Doktorant bez żadnego komentarza przyjmuje wyniki podejścia alternatywnego (jak sam pisze w pierwszej linii na stronie 40.), w którym pojawiają się inne niż na rysunkach parametry materiałowe, mianowicie moduł sprężystości gruntu pod podstawą pała i moduł sprężystości gruntu na poboczniczy pała (które miały być takie same, na mocy komentowanych powyżej założeń upraszczających).

Założenie, że  $F(q_b)$  można aproksymować w wyjątkowo szczególnej postaci danej wzorem 4.55 jest nie dość, że nie uzasadnione w tekście rozprawy, to nawet nie wiadomo skąd pochodzi. Układ tego rozdziału jest całkowicie nielogiczny i nie ułatwia zrozumienia toku wyprowadzeń. Co więcej, fragment, który mógłby objaśnić przynajmniej ostatnie akapity podrozdziału 4.1 pojawia się na początku podrozdziału 4.2 jako konkluzja podrozdziału poprzedniego!

W podrozdziale 4.2 przedstawiono sposób przejścia od pewnej krzywej M-K uzyskanej dla pała o danej geometrii do krzywej M-K dla pała o innej średnicy i długości. Procedura ta opisana jest dość jasno, choć i w tym wypadku Autor deklaruje, że dla wyników testu statycznego  $\{N_i; S_i\}$ , cytując: „można wyznaczyć za pomocą statyst(y)ki parametry pierwotnej krzywej M-K”. Tych obliczeń statystycznych nie znalazłem w rozprawie. Prawdopodobnie i tutaj chodzi o metodę najmniejszych kwadratów. Procedura konwersji polega na wyznaczeniu nowych parametrów krzywej M-K na podstawie wzorów przedstawiających związek parametrów krzywej M-K (przedstawionej w formie opisanej wzorami 3.23 i 3.24) ze średnicą i długością pała. Centralnym elementem tej koncepcji jest postulat niezmienniczości relacji 4.47 (parametr U). Postulat ten nie jest nigdzie w pracy Doktoranta ani wytłumaczony ani nawet skomentowany, choć moim zdaniem powinno to być centralnym punktem rozprawy i można było przypuszczać, że liczne wzory przedstawione w ramach „analizy zagadnienia” (rozdział 4.1) zmierzają właśnie ku temu. Czytelnik tej pracy musi sięgnąć do innych źródeł, aby wyrobić sobie pogląd na to, czy niezmienniczość tego związku jest uzasadniona. Wobec tego, że ta fundamentalna relacja nie jest w pracy komentowana a jedynie wzięta z innych publikacji, moja opinię na ten temat jej zasadności pozostawię poza zakresem tej recenzji. Podobnie istotną kwestią jest prawidłowość rozkładu reakcji pała na reakcję na poboczniczy i odpór gruntu pod stopą pała. Tak jak poprzednio, Doktorant nie dyskutuje tej kwestii w swojej pracy. Jedyna, jak mi się wydaje, refleksja dotycząca tego zagadnienia pojawia się na stronie 45., gdzie Doktorant pisze: „Założenie, że wartość  $\beta$  nie ulega zmianie na skutek konwersji pozwala na sformułowanie...” kolejnych równań konwersji. Wartość ta to współczynnik we wzorze 4.68 wziętym z pracy [77]. W ostatnich liniach strony 45. i na stronie 46. pojawiają się niespodziewanie obliczenia szczegółowe dla początkowych wartości  $H=27,5\text{m}$  i  $D=1\text{m}$  i dla zmienionych wymiarów na  $29\text{m}$  i  $1,1\text{m}$  odpowiednio. Wzory użyte w tych obliczeniach nie są numerowane, można

zgadywać, że rysunki 4.4 i 4.5 ilustrują wyniki tego przykładu rachunkowego. Nie jest to jednak pewne, gdyż małe zmiany parametrów pała (około 5% i 10%) prowadzą tu do około 25% wzrostu siły przenoszonej przez pobocznice. Rozdział ten kończy się zapowiedzią, że ostateczna wersja metody konwertowania krzywej M-K pojawi się w rozdziale 8.

3.5. W rozdziale 5. Doktorant przedstawia metody efektywnego wyznaczenia parametrów krzywej M-K tak, aby aproksymowała ona najlepiej ciąg danych doświadczalnych. Po krótkiej dygresji (podrozdział 5.1) opisującej przykłady testów statycznych w pełnym zakresie obciążenia, które posłużą za przykłady obliczeniowe, przedstawiono metody aproksymacji zbioru danych doświadczalnych krzywą M-K. Aproksymacja ta polega na optymalnym doborze trzech parametrów krzywej M-K, czyli  $N_{gr2}$ ,  $\kappa_2$  oraz  $C_2$ . Z uważnej lektury rozdziału wynika, że kryterium optymalnego doboru parametrów to najlepsza zgodność przemieszczeń pomierzonych w trakcie testów statycznych i ich odpowiedników obliczonych zgodnie z równaniem krzywej M-K w sensie metody najmniejszych kwadratów. Przedstawiono trzy metody. W metodzie I ilustruje to sekwencja równań 5.4-5.6. W metodzie II jest to równanie 5.9, w którym jednak, z przyczyn o których Doktorant nie wspomina, pomierzone ugięcia zastąpiono stosunkiem kolejnego do poprzedniego. Problem ten staje się jeszcze mniej zrozumiały, gdy w zakończeniu opisu metody Autor stwierdza: „Wadą metody II jest wyznaczenie  $\delta^2$  z różnicy proporcji osiadania, zamiast tak jak w metodzie I, z różnicy wartości osiadania”. W metodzie III kryterium jest zapisane w formie 5.14. Jedynie w tym wypadku nie musimy zgadywać, że chodzi o minimum, gdyż sformułowanie „metoda najmniejszych kwadratów użyte jest explicite. Różnice pomiędzy proponowanymi metodami polegają na tym, że w każdej z nich proces minimalizacji prowadzony jest przy innych założeniach upraszczających. W pierwszej z nich wartości  $\kappa_2$  są zadane i zmieniają się w określonym przedziale. Doborowi metodą najmniejszych kwadratów podlegają tylko dwa pozostałe parametry. W metodzie II funkcja 5.9 podlega optymalizacji jedynie z uwagi na parametr  $\kappa_2$  przy założonych wartości  $N_{gr2}$ . Parametr  $C_2$  nie bierze udziału w aproksymacji, jest on wyznaczany na końcu obliczeń.

W metodzie III wszystkie parametry krzywej M-K otrzymywane są bezpośrednio, jako wynik minimalizacji funkcji 5.14. Autor rozprawy proponuje własne metody poszukiwania minimum sumy kwadratów odchyłek wartości pomierzonych od wartości obliczonych. Opisane są one w załączniku B. W tym miejscu przedstawię i skomentuję treść tego załącznika. Opis tam zawarty nie jest precyzyjny. Nie wiadomo, na przykład co w przedstawionych algorytmach oznacza słowo „wyszukaj” w odniesieniu do minimum zapisanej (i obliczonej już dla pewnych wartości) sumy kwadratów. Można zgadywać, że operacja „wyszukaj” to po prostu odczytanie wartości minimalnej z wykresu sumy kwadratów w funkcji wybranego parametru, przy zmianach pozostałych parametrów (lub bez ich zmieniania, zależnie od metody). Wydaje mi się, że takie wyszukiwanie nie jest podobne do żadnej ze znanych metod minimalizacji funkcji trzech zmiennych. Cechą wspólną trzech algorytmów jest obliczanie wszystkich wartości minimalizowanej funkcji dla wybranych wartości zmiennych niezależnych i wybór minimum spośród zbioru tych wartości. Na szczęście, z numerycznego punktu widzenia, liczba danych wejściowych jest bardzo mała. Biorąc pod uwagę łatwość tych obliczeń i co najwyżej trzy pętle dla trzech zmiennych, stwierdzam, procedura ta jest wykonalna. Sprawdziłem również, że jej wyniki są podobne do tych jakie można otrzymać znanymi mi metodami. Zawartość tej części rozdziału podsumuję jeszcze raz w punkcie 4. recenzji.

Wracając do treści rozdziału piątego należy zauważyć (wciąż w podrozdziale 5.2) niespodziewaną zmianę tematyki rozważań. Począwszy od strony 59. Autor przedstawia analizy wpływu poszczególnych części zbioru danych eksperymentalnych na dokładność przeprowadzonej optymalizacji parametrów M-K. Na różne sposoby wybierane są jedynie



podzbiory zbioru  $\{s_i, N_i\}$  otrzymanego w wyniku testu statycznego. Niestety, Autor nie wyjaśnia czego spodziewa się po analizach, w których **intencjonalnie nie zapewnia** dopasowania części krzywej M-K do krzywej doświadczalnej. Analizy te są całkowicie chaotyczne, wybierane są części początkowe zboru, jego części końcowe, niektóre parametry krzywej obliczane są z jednego podzbioru zaś inne z innego. Autor nie wytłumaczył czemu to służy. Jest rzeczą oczywistą, że aby wyznaczyć krzywą M-K wystarczą trzy punkty doświadczalne, jest też rzeczą oczywistą, że można w ten sposób otrzymać całą rodzinę rozwiązań, tyle ile jest kombinacji trójelementowych z wszystkich par doświadczalnych, jednak nie znalazłem koncepcji wprowadzenia jakiegokolwiek porządku, ani w tak otrzymanym zbiorze, ani w wynikach uzyskanych na podzbiórach wybranych przez Autora rozprawy. Co więcej, Doktorant pisze na stronie 60.: "Rezultaty obliczeń przedstawione na rys. 5.10 wskazują, że w przypadku wykorzystania wartości parametru  $\kappa_2$  oraz  $C_2$  wyznaczonych niezależnie, dla różnych części zbioru  $\{s_i, N_i\}$  uzyskane zostaną błędne krzywe M-K.". Było to łatwe do przewidzenia, celowość zamieszczenia tych rozważań (jeśli nawet da się wykazać) nie została w rozprawie przedstawiona.

W podrozdziale 5.3 Doktorant wprowadza „metodę jednego równania”. Z opisu nie wynika jakie to jest równanie i które z wymienionych. Z analizy algorytmu przedstawionego w załączniku E można się domyślać, że nazwę swą algorytm zawdzięcza wyeliminowaniu jednej z pętli przy obliczaniu sum kwadratów odchyłek. W podrozdziale 5.4 przedstawiono metodę dwóch równań, opisaną równie lakonicznie jak poprzednia. Na stronie 67. Znajduje się stwierdzenie, że „*podstawowa różnica między nią (metodą dwóch równań), a metodą opierającą się na jednym równaniu, opisaną w pkt 5.3, polega na estymacji parametrów krzywej M-K z wykorzystaniem równania M-K zapisanego dla dwóch następujących po sobie punktów krzywej próbnego obciążenia statycznego pala*”. Oczywiście dopiero po ustaleniu jednego z trzech parametrów można przeprowadzić krzywą M-K przez dwa punkty pomiarowe, należy jednak zauważyć, że w takim wypadku niewątpliwie mamy do czynienia z krzywą, w której dla każdego jej odcinka wpływ możliwych błędów pomiarowych (o których Autor często wspomina) będzie bardzo wyraźny.

W pierwszych zdaniach wstępu do rozdziału 5. Doktorant zapowiada, że przedstawi analizę numeryczną, która ma na celu zminimalizowanie wpływu niedokładności pomiarowych, na estymowane wartości parametrów M-K. Niestety, ani dyskusji wielkości niedokładności pomiarowych ani badania ich wpływu na estymowane wartości parametrów ani, tym bardziej, próby ich ewentualnej minimalizacji nie znajduję w tym rozdziale ani w żadnym innym punkcie pracy doktorskiej. Jedynie w podrozdziale 5.4 pojawia się stwierdzenie, że „*Przeprowadzenie obliczeń w taki sposób ma na celu wyeliminowanie błędów pomiarowych, które mogą się znajdować w analizowanych zbiorach wartości*”. W jaki sposób metoda dwóch równań i odpowiedni algorytm przedstawiony w załączniku pozwala na osiągnięcie tego celu nie jest, niestety, wyjaśnione. Należy to wyjaśnić podczas dyskusji na obronie pracy.

W podrozdziale 5.5 przedstawiono wybór sposobu prowadzenia obliczeń. Wyboru tego dokonano analizując serię przykładów rozwiązanych różnymi metodami i obliczając dla nich sumę odchyłek ilorazów kolejnych przemieszczeń, obliczonych i pomierzonych - odpowiednio. Do wykonywania dalszych obliczeń prowadzących do konwersji krzywych M-K wybrano „metodę dwóch równań” jako najdokładniejszą.

3.6. Rozdział szósty zatytułowany jest „Równanie opisujące nośność graniczną pala”. To nowe równanie dotyczące nośności pala wzięte jest z publikacji [43], jego geneza w rozprawie nie jest wytłumaczona. W rozdziale tym pojawia się nowy parametr  $n$ , który związany jest z parametrem  $\beta$ , wprowadzonym w jednym z rozdziałów poprzedzających. Przedstawiona jest seria zależności  $\beta(n)$ , aproksymowana później przez kolejne dwa nowe parametry. Rysunki 6.3 – 6.10 ilustrują wysiłki doktoranta zmierzające do związania tych nowych parametrów

z charakterystykami geometrycznymi pali. Prawdopodobnie te obliczenia nazwane są analizą statystyczną, gdyż przypomina analizę korelacji zmiennych. Konkluzją tego rozdziału jest kolejny, wysoce spekulatywny moim zdaniem wzór 6.18 na obciążenie graniczne pala, używany do konwersji krzywych. Mimo, że Autor zapowiada badanie wpływu parametrów geotechnicznych gruntu, nie znalazłem w tym rozdziale takiej analizy.

3.7 W rozdziale siódmym, zatytułowanym „Wpływ rozkładu naprężeń pod podstawą pala na osiadanie” przedstawione są kolejne próby poprawiania wzoru na osiadanie pala. Doktorant pisze, że uwzględnia wpływ rozkładu naprężeń pod stopa pala, co nie jest prawdą już w świetle wzoru 7.1, w którym podzielono siłę przez nieznane pole pod palem opisane nieznana średnicą  $D_p$ , inną (w ogólności) niż średnica pala. Rozkład naprężeń pod palem w tym rozdziale nie został uwzględniony, ponieważ wzór 7.1 całkowicie oderwany jest od jakiegokolwiek rozkładu naprężeń: osiadanie jest tu otrzymane jako naprężenie podzielone przez moduł sprężystości strefy aktywnej pod podstawą pala (również ten moduł jest trudny do oszacowania), zaś zamiast jakiegokolwiek całkowania odkształceń zastosowano proste mnożenie przez tę samą średnicę „powierzchni aktywnej” pod podstawą pala. Możliwość dalszej analizy daje zależność 7.2, będąca w istocie interpretacją fizyczną parametru krzywej M-K. Doktorant twierdzi, że konieczne jest wprowadzenie współczynnika korelacji nazwanego parametrem dopasowania pala i oznaczonego przez  $\alpha$ , będącego kolejnym mnożnikiem w orientacyjnym wzorze 7.3. Parametr ten jest następnie wyrażony przez parametry krzywek M-K. W podsumowaniu tego rozdziału Doktorant stwierdza, że: „że  $\alpha$  jest znane na podstawie próbnych statycznych obciążeń, a zmiana geometrii pala nie wpływa na jego wartość”. Nie mogę się zgodzić z tym stwierdzeniem. W wynikach próbnych obciążeń statycznych nie ma informacji o kształcie „bryły” naprężeń pod stopą pala, wszystko co zostało napisane na ten temat jest jedynie dodaną do tego doświadczenia interpretacją o charakterze bardzo zgrubnym i to w myśl tej interpretacji możemy wnioskować z doświadczeń o tej wielkości.

3.8. Rozdział ósmy, zatytułowany „Metoda konwersji dla pełnego zakresu obciążenia” przedstawia ostateczny kształt procedury konwersji. Po zaakceptowaniu wszystkich założeń dotyczących pracy pala, przyjętych w poprzednich rozdziałach i komentowanych już w tej recenzji, przyjmując interpretacje dodatkowe, oparte na hipotezach dotyczących pracy gruntu pod stopa pala, wzory na konwersję krzywej M-K nie wymagają komentarza. Są one dość oczywiste. W rozdziale przedstawiono przykłady obliczeń nowych krzywych M-K dla licznych przypadków zmian średnicy pala i jego długości. Na rysunkach 8.2 do 8.8 przedstawiono wpływ geometrii na parametry krzywej i nośność pala (należy sprawdzić podpisy pod tymi rysunkami, rysunki oznaczone litera a i b są prawdopodobnie zamienione miejscami). Również komentarze Autora, jeśli zgodzimy się na dotychczas przyjęte założenia upraszczające – są trafne i uzasadnione otrzymanymi wynikami rachunkowymi.

3.9 W rozdziale dziewiątym przedstawiono zastosowania praktyczne przedstawionej metody konwersji na przykładzie dwóch pali. Trudno stwierdzić, czy sytuacja gruntowa obu pali jest identyczna, zmiana długości o 4m prawie na pewno wprowadza stopę pala w inny grunt. Jeśli jednak przyjąć, że założenia są spełnione to wyniki przedstawione na rysunkach są możliwe do zaakceptowania. W podrozdziale 9.2 Doktorant przedstawia możliwość użycia parametrów krzywej M-K do obliczenia współczynnika bezpieczeństwa rozumianego jako stosunek  $N_{gr}$  do  $N$  dopuszczalnego, wywiedzionego z dopuszczalnego osiadania. Zamieszczone w tym rozdziale rozważania analityczne dotyczące tego współczynnika są możliwe do zaakceptowania w ramach założeń upraszczających przyjętych dla zdefiniowanej metody analizy pali.



3.10 Rozdział dziesiąty zawiera wnioski i opinie Doktoranta dotyczące przedstawionej metody. Trudno odnieść się do wszystkich tych wniosków, wiele z nich jest całkowicie oczywistych, wiele – obciążonych konsekwencjami założeń, które już komentowałem podczas analizy kolejnych rozdziałów.

Dotyczy to także metody wyznaczania parametrów krzywej M-K.

Przedstawione w zakończeniu plany dalszego rozwoju badań zakładają przede wszystkim uwzględnienie warunków gruntowych w procedurze konwersji. Jest to warunek *sine qua non* stosowalności praktycznej proponowanej w doktoracie metody. Nie wydaje mi się, aby było to możliwe bez starannego (z fizycznego i matematycznego punktu widzenia) sformułowania zadania odwrotnego bazującego na testach statycznych i rozpoznaniu geotechnicznym gruntu. Inne plany wymienione w tym podrozdziale są prostą kontynuacją dotychczasowej pracy naukowej, prowadzonej tymi samymi narzędziami teoretycznymi.

Prace kończy zestaw załączników, które zawierają szczegóły obliczeń oraz zapis algorytmów. Ważniejsze z nich były już komentowane w tej opinii.

#### **4. Ogólna charakterystyka rozprawy, ocena trafności doboru jej tematu**

Doktorant podejmuje ważne zagadnienie projektowania pali na podstawie badań statycznych pali próbnych. Jest to jedna z wielu metod projektowania, bardzo droga, gdyż zależna od wykonania pali próbnych i badań statycznych ich nośności in situ. Proponowana w doktoracie metoda może być zastosowana jako narzędzie wspomagające tego typu działalność projektową.

Formalizm naukowy zastosowany w przedstawionej pracy jest rozwijany intensywnie w środowisku geotechników Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. Głównym elementem zastosowanego podejścia jest zapisanie związku konstytutywnego pala zagłębionego w gruncie (związku pomiędzy siłą osiową obciążającą pal a jego osiadaniem) w specjalnej formie znanej jako krzywa Meyera-Kowalowa. Trzy niezależne parametry tej krzywej doczekały się licznych interpretacji fizycznych pozwalających na pośrednie wnioskowania o odpowiedzi podstawy pala, jego pobocznicy oraz umożliwiające ocenę natury wyłożenia gruntu pod stopą pala. Praca Pana Kamila Stacheckiego wpisuje się w rozwój tej metody. Podjął on temat, który nie był dotąd analizowany przy jej użyciu.

**Uważam, że wybrana tematyka rozprawy jest ciekawa z naukowego i teoretycznego punktu widzenia oraz może okazać się ważna dla praktyki projektowania pali.**

Oceniając rozprawę należy mieć w pamięci wszystkie uwagi i komentarze krytyczne, jakie dotąd wyraziłem w szczegółowym opisie treści poszczególnych rozdziałów. Uważam, że praca napisana jest chaotycznie, zawiera wiele elementów, które rozbijają jej strukturę. Wiele wyjaśnień jest niejasnych i mylących. Założenia upraszczające są bardzo ograniczające (bardziej niż przy innych metodach projektowania pali!). Przyjęte idealizacje są bądź trudne do zweryfikowania bez doświadczeń dodatkowych (jak na przykład wspomagające badania sondą statyczną) bądź rażą daleko idącymi uproszczeniami.

Zaskakuje poświęcenie całego rozdziału pracy sposobowi poprowadzenia krzywej M-K przez punkty doświadczalne statycznego badania pala. Zaskakują specyficzne algorytmy, które opracowano w tym celu. Jak wiadomo zagadnienie typu „curve fitting” jest dobrze zbadane. Klasyczne podejście zakłada obliczenie pochodnych sumy kwadratów błędów po każdej z trzech zmiennych. Przyrównując je do zera otrzymamy układ trzech nieliniowych równań z trzema niewiadomymi parametrami. Taki układ równań rozwiązuje się standardowo metodami iteracyjnymi, choćby metodą Newtona. Funkcja definiująca krzywą M-K jest różniczkowalna, trudno spodziewać się problemów na tej drodze postępowania. Jeśli są, proszę

Doktoranta, aby je wskazał w dyskusji. Niestety, nie znalazłem w pracy komentarza na ten temat. Przekonanie, że jest to zagadnienie raczej techniczne niż przedmiot rozważań naukowych opieram również na tym, że istnieje wiele kodów pozwalających to zadanie rozwiązać. Na przykład w dobrze znanym młodemu naukowcom pakiecie *scipy* do programu *Python* zawarta jest procedura *curve fitting* dla wielu różnych typów krzywych. Można też, przy jej pomocy, dopasowywać do danych doświadczalnych parametry funkcji zdefiniowanej przez użytkownika! Zastosowanie jednej z klasycznych metod nie wzbudziłoby wątpliwości dotyczących poprawności i skuteczności bardzo oryginalnych aproksymacji zaproponowanych przez doktoranta. Algorytmy te działają poprawnie, co sprawdziłem porównując wyniki z własnymi obliczeniami dla przedstawionych danych. Wykazanie teoretyczne ich poprawności może być jednak trudne i nie zostało podjęte przez Autora rozprawy.

**Stwierdzam, że przedstawiona metoda konwersji jest merytorycznie poprawna.** Żałuję, że Autor rozprawy nie sprawdził dla każdego przykładu konwersji niezmienniczości wyrażenia  $U$  danego wzorem 4.47. Nie jestem pewien, czy wynik byłby idealny, mogłoby to być źródłem dyskusji.

Autor dysertacji rozwiązuje problem, w którym niemal na każdym kroku przyjmuje się idealizacje teoretyczne bardzo radykalne, nieraz dalekie od rzeczywistości fizycznej (choćby jednorodność ośrodka i identyczność jego opisu w sąsiedztwie zmienionego pola). Oceniana praca nie pozostawia wątpliwości, że Doktorant zdaje sobie sprawę z przyjętych przybliżeń i licznych uproszczeń, które wprowadza. Oczywiście, moje oceny wagi niektórych uproszczeń używanych do zbudowania modelu teoretycznego mogą być bardziej surowe niż Autora pracy, jednak **uważam, że twierdzenie o dokładności konwersji wystarczającej dla jej stosowania praktycznego jest przedwczesne. Wyniki konwersji są intuicyjnie akceptowalne jednak argumentów sprawdzających ich precyzję nie dostarczono.**

W trakcie merytorycznej analizy kolejnych rozdziałów przedstawiłem wiele uwag, które łatwo znaleźć w tekście opinii, nie będę ich powtarzał w tym punkcie.

Pomimo tych uwag krytycznych uważam, że praca dotyczy ważnego tematu praktycznego, ciekawego z akademickiego punktu widzenia. Rozwiązanie jest rozwinięciem oryginalnych koncepcji, praca napisana jest prawidłowo z formalnego punktu widzenia, w tym sensie, że zawiera wszystkie elementy wymagane od rozprawy doktorskiej. Doktorant dobrze opanował narzędzia teoretyczne potrzebne do rozwijania teorii pracy statycznej pola osadzonego w gruncie, w szczególności te, które są w oryginalny sposób rozwijane w ośrodku naukowym ZUT, w którym praca powstała. Zasadnicza teza pracy została wykazana.

## 5. Podsumowanie i wniosek końcowy

Wybór tematyki doktoratu i strategii projektowania pola w oparciu o badania statyczne pali próbnych, przy wykorzystaniu teorii opartej na zapisie krzywej Meyera-Kowalowa jest ciekawy i właściwy. Jest to cenny wkład w rozwój oryginalnej strategii badawczej.

Oryginalnym osiągnięciem naukowym mgr inż. Kamila Stacheckiego jest opracowanie procedury konwersji krzywej M-K przy zmianie długości i średnicy pola. Może to stać się ważnym narzędziem projektowania pali. Oryginalnym rysem teoretycznym pracy jest badanie interakcji pola i gruntu na podstawie wyników testów statycznych, zapisanych w formie krzywej M-K.

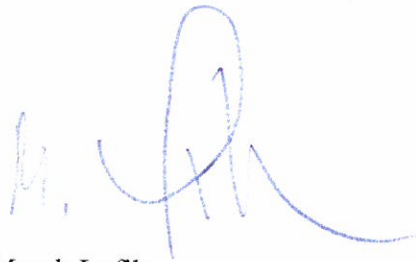
Zgadzam się z większością wniosków sformułowanych przez doktoranta w podsumowaniu rozprawy. Uważam, że świadczą one o jego sprawności naukowej i umiejętności dokonania krytycznej analizy teorii naukowych, w tym tych, które tworzy.

Doktorant zna metody rozwiązywania zagadnień inżynierskich w dziedzinie geotechniki, mechaniki gruntów i fundamentowania, potrafi posługiwać się literaturą naukową w swojej pracy badawczej. Stwierdzam, że przedstawiona rozprawa doktorska stanowi oryginalne

rozwiązanie problemu naukowego dokonane przez Doktoranta, a także wskazuje na umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez jej Autora.

Rozprawa dotyczy dyscypliny naukowych „geotechnika”, „mechanika gruntów”. Autor wykazał się dobrą znajomością najważniejszych prac naukowych i inżynierskich związanych z tematem rozprawy doktorskiej, ogólną wiedzą teoretyczną z zakresu objętego tematem rozprawy oraz ogólną i specjalistyczną wiedzą teoretyczną związaną z wymienionymi wyżej dyscyplinami naukowymi.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Kamila Stacheckiego spełnia wymagania „ustawy z dnia 14 marca 2003 r o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” oraz wnioskuję o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.



Marek Lefik