

dr hab. inż. Marian Łupieżowiec, prof. PŚ.
Politechnika Śląska
Wydział Budownictwa
Katedra Geotechniki i Dróg
ul. Akademicka 5
44–100 Gliwice

Gliwice, 26 czerwca 2023 r.

R E C E N Z J A

**rozprawy doktorskiej autorstwa mgr inż. Miłosza Justa
pt. „Ocena odkształceń wybranych gruntów spoistych wyznaczonych metodą analizy
wstecznej z zastosowaniem metody elementów skończonych”**

1. Podstawa opracowania recenzji

Niniejszą recenzję pracy doktorskiej mgr inż. Miłosza Justa pt. „Ocena odkształceń wybranych gruntów spoistych wyznaczonych metodą analizy wstecznej z zastosowaniem metody elementów skończonych” wykonano na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport – Pana prof. dr hab. inż. Jacka Pielechę z dnia 26 kwietnia 2023 roku, działającego na podstawie Uchwały Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Poznańskiej z dnia 24 kwietnia 2023 roku.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy doktorskiej

Recenzowana rozprawa jest napisana w języku polskim, liczy łącznie 208 stron tekstu. Spis literatury zawiera 159 pozycji, w tym 141 publikacji naukowych i naukowo–technicznych, 9 norm, instrukcji i aktów prawnych, 6 dokumentacji oraz 3 odnośniki do stron internetowych. Praca doktorska zawiera również spis rysunków i tabel oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. Praca została podzielona na 6 rozdziałów, a te z kolei zostały podzielone na podrozdziały. Szczegółowy spis treści ułatwia szybkie odnajdywanie treści interesujących czytelnika.

3. Aktualny stan wiedzy w zakresie tematyki rozprawy

Bardzo ważnym aspektem modelowania numerycznego zagadnień geotechnicznych, jest dobór właściwego modelu konstytutywnego opisującego złożone właściwości ośrodka gruntowego, a w dalszej kolejności właściwa specyfikacja wartości parametrów tego modelu. W przypadku bardziej zaawansowanych modeli, ich parametry nie zawsze mają prostą interpretację fizyczną, stąd dobór parametrów na podstawie wyników badań wykonywanych w trakcie rozpoznania podłoża jest zadaniem bardzo trudnym. Często, aby móc przyjąć realistyczne wartości parametrów, które pozwolą na uzyskanie wiarygodnych wyników, potrzebne są analizy wsteczne. Nierzadko korzysta się też również z wartości literaturowych, choć trzeba pamiętać, że dużo złego w tym zakresie zrobiło powszechne wykorzystywanie starej normy PN-81/B-03020 w czasach, gdy zaawansowane modelowanie numeryczne zaczęło być coraz bardziej popularne wśród inżynierów.

Grunty spoiste stanowią ośrodek o bardzo złożonych właściwościach wytrzymałościowo-odkształceniowych. Charakterystyki odpowiedzi tego ośrodka na złożone ścieżki obciążenia są niekiedy silnie nieliniowe, a sztywność ośrodka zależy od bardzo wielu czynników. Niezwykle ważne jest uwzględnienie dużej sztywności w zakresie małych odkształceń. Duży wpływ na ich zachowanie stanowią również oddziaływania

cykliczne, które wskutek kumulacji odkształceń plastycznych (nieodwracalnych) dawać będą inne odpowiedzi w porównaniu do oddziaływań monotonicznych. Ważne jest również uwzględnienie wpływu ciśnienia wody w porach gruntów spoistych na ich zachowanie się w odpowiedzi na oddziaływania występujące w konkretnym czasie. Ważne dla obserwowanej odpowiedzi są zarówno zjawiska rozpraszania się tych ciśnień, które w tego rodzaju gruntach występują bardzo wolno, jak również właściwości reologiczne szkieletu gruntowego.

Analizując zagadnienie zachowania się podłoża gruntowego poddanemu oddziaływaniom przekazany przez fundamenty przekazujące znaczne obciążenia, należy z jednej strony zapewnić uzyskanie właściwego wyniku, a z drugiej strony łatwość prowadzenia analiz, przez co mogą być one stosowane szeroko w praktyce. Nie bez znaczenia jest również właściwe ustalenie zakresu badań laboratoryjnych i polowych, co pozwoli na dobór do analiz właściwych wartości parametrów. Stąd celowość wykonania szczegółowej analizy możliwości zastosowania danej generacji modeli konstytutywnych wobec przewidywanego oddziaływania. Nie bez znaczenia są również analizy współpracy konstrukcji budowlanej z podłożem, dzięki czemu wyniki analiz mogą w jeszcze lepszy sposób symulować zachowanie się obiektu (np. poprzez uwzględnienie efektów drugiego rzędu).

Najlepszą weryfikacją prawidłowości podjętych analiz jest porównanie uzyskanych wyników z rezultatami prowadzonego monitoringu. Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów in-situ, którymi w przedmiotowym przypadku są osiadania w miejscu zainstalowanych reperów, możliwa jest zarówno specyfikacja wartości parametrów, jak i ostateczna weryfikacja modelu przyjętego do analiz. Bez konfrontacji wyników analiz numerycznych z pomiarami wykonywanymi w terenie, podjęte rozważania są jedynie czysto akademickie.

4. Struktura i treść rozprawy doktorskiej

Po krótkim wstępie (rozdział **pierwszy**), gdzie autor wyjaśnia cele pracy oraz jej zakres, w rozdziale **drugim** opisywane są modele stosowane w analizach zachowania się ośrodka gruntowego. Największą uwagę poświęcono gruntom spoistym. Przedstawiono podstawowe równania charakteryzujące modele poszczególnych generacji oraz przedstawiono możliwości ich zastosowania, a także zalety i wady. Autor posłużył się podziałem zaproponowanym przez prof. M. Gryczmańskiego. Uwaga w pracy skupiona była również na zagadnieniach zmiennych w czasie – właściwościach reologicznych gruntów. Przedstawiono też główne zasady prowadzenia analiz metodą elementów skończonych dotyczących współpracy konstrukcja – podłoże gruntowe. W rozdziale **trzecim** analizowane są zagadnienia współpracy fundamentu płytowo-palowego z podłożem gruntowym. W odróżnieniu od zapisów starej normy PN-83/B-02482, która nakazuje przyjąć, że całość obciążenia z konstrukcji obiektu na głębsze warstwy podłoża, gdzie zalegają grunty nośne, mają przenosić tylko pale bez uwzględnienia wpływu oczepu, dzisiejsze analizy numeryczne zakładają współpracę całości fundamentu (czyli pali łącznie z oczepem) z podłożem gruntowym, na którym posadawiany jest przedmiotowy obiekt. W tym rozdziale zdefiniowano funkcje transformacyjne (specyfikowane na podstawie próbnych obciążeń pali), które opisują charakterystyki pali. Funkcje te będą miały ważne znaczenie w dalszych analizach. Rozdział **czwarty** dotyczy analizy właściwości iłóv plioceńskich serii poznańskiej na podstawie wyników serii przeprowadzonych badań geotechnicznych. Rozważania zostały podparte danymi zawartymi w licznych publikacjach z tego zakresu. Rozdział ten jest cenną pozycją w zakresie danych i parametrów charakteryzujących powyższe ily. Zestawiono w nim zarówno ich cechy fizyczne, jak i wiele wartości parametrów modeli wykorzystywanych w analizach teoretycznych i numerycznych.

Najważniejszym rozdziałem recenzowanej pracy jest rozdział **piąty**, w którym przedstawiono analizę numeryczną silosu cukrowniczego w Gostyniu, który stanowi studium przypadku obrazującym wykonane zaawansowane analizy. Rozdział ten stanowi oryginalną część rozprawy doktorskiej. Ważnymi przedstawionymi wynikami są rezultaty monitoringu przedstawione w postaci wykresu osiadań w okresie sierpień 2013 – lipiec 2020 na łącznie 16 reperach zamocowanych na płycie fundamentowej. W dalszej części zamieszczono wyniki analiz sześciu wariantów obliczeniowych, w których zastosowano różne modele do analizy zachowania się podłoża poddanego obciążeniom przekazywanym przez układ fundamentowy (pale + oczep) obiektu. Po wykonaniu zbiornika uwzględniono ciężar własny jego konstrukcji oraz rozważano łącznie 7 cykli napełniania i opróżniania. Przedmiotem szczegółowych analiz wykonanych przez doktoranta były zarówno wykresy zmiany osiadań w czasie w wybranych punktach płyty dennej zbiornika, jak i uzyskanych map osiadań. Oceniano poprawność uzyskanych wyników, jak również skuteczności danego modelu w oparciu o zgodność wyników z wykresami uzyskanymi z monitoringu. Podsumowaniem tego rozdziału jest algorytm modelowania zagadnienia współpracy konstrukcja – podłoże gruntowe. Rozprawę kończy krótkie podsumowanie (rozdział **szósty**), w którym przedstawiono wnioski oraz propozycję dalszych badań.

Strukturę i zawartość rozprawy doktorskiej oceniam pozytywnie. Mam pewne zastrzeżenia odnośnie tytułu pracy, co zostanie dokładnie omówione w uwagach krytycznych i dyskusyjnych.

5. Ocena dorobku naukowego rozprawy

Będąca przedmiotem analiz konstrukcja silosu jest żelbetową powłoką o średnicy ok. 50 m i wysokości 55 m. Może pomieścić 80 000 t cukru luzem. Całkowita wartość obciążeń wynosi ok. 1 000 MN, co przekłada się na naciski na podłoże wynoszące ok. 500 kPa. Obiekt posadowiony jest na palach przemieszczeniowych wykonanych w technologii CMC/SPD o średnicy 400 mm. Pale zostały zbrojone kształtownikiem IPE 140. Ich długość wynika z zagłębienia w grunty nośne na długość min. 2,5 D, gdzie D jest średnicą pali. Konstrukcję oczepową, która przenosi obciążenia na pale, stanowią dwie płyty żelbetowe usztywnione słupami, co przypomina konstrukcję skrzyni fundamentowej. Duża sztywność tej konstrukcji jest konieczna aby zapewnić spełnienie warunków stanu granicznego użytkowalności, które są warunkiem właściwego użytkowania obiektu. Praca nie zawiera na tyle czytelnych rysunków konstrukcyjnych, aby można było dowiedzieć się jakie grubości mają płyty dolna i górna powyższej konstrukcji oczepowej, jak również jaka jest długość słupów w tej konstrukcji. Wybór powyższego silosu do analizy w ramach studium przypadku, w opinii recenzenta należy uznać jako bardzo dobry. Na analizowanym przykładzie można analizować wykorzystanie różnych modeli gruntów, gdyż reakcja podłoża w żadnym wypadku nie jest możliwa do wykonania prostymi zależnościami dawniej stosowanymi przez inżynierów, chyba że wykonuje się analizę bardzo uproszczoną, wręcz trywialną, jednakże w takim przypadku nie ma mowy o jakiegokolwiek optymalizacji rozwiązania. Specyfika pracy układu płytowo-palowego powoduje, że bardzo istotne jest ujęcie współpracy fundament-podłoże, co w prostych analizach inżynierskich bardzo rzadko jest realizowane w sposób prawidłowy. Ponadto duża wysokość obiektu umożliwia analizę efektów drugiego rzędu, co jest kolejnym argumentem potwierdzającym prawidłowość dokonanego wyboru.

Niewątpliwą dużą wartością ocenianej pracy jest bardzo szczegółowa analiza dostępnych modeli konstytutywnych, które umożliwiają realistyczną symulację pracy podłoża poddanego obciążeniom przekazywanym przez fundamenty silosu. Rozważano zarówno modele o prostym opisie plastyczności, jak i modele bardziej zaawansowane, gdzie ujęte są złożone mechanizmy wzmocnienia oraz, co w obecnych czasach jest niesłychanie ważne, są

w stanie opisać dużą zmianę sztywności ośrodka w zakresie małych odkształceń. W opisie teoretycznym ujęte są również modele uwzględniające wpływ czasu na przebieg procesu (*time-dependent*), co przejawia się w takich zjawiskach jak wpływ prędkości na otrzymywane wyniki (w tym przypadku ma to mniejsze znaczenie), a także pełzanie i relaksacja. Wreszcie opisano także sprzężony model filtracji wody i deformacji ośrodka gruntowego, co w sposób najbardziej pełny umożliwia analizę postawionego zagadnienia. Powyższe stwierdzenia świadczą o dużej wiedzy autora w tym zakresie, a także nabytej biegłości w zakresie modelowania bardzo złożonego ośrodka, jakim jest grunt.

Wśród analizowanych modeli konstytutywnych, w opinii autora na pierwszym miejscu należy wskazać model SCLAY1S, który jest rozwinięciem modelu stanu krytycznego Modified Cam-Clay. Model ten uwzględnia anizotropię (poprzez obrót powierzchni plastycznego płynięcia) oraz zjawisko pełzania. Analizowane jest również zagadnienie wiązań strukturalnych, a także stopień konsolidacji gruntu, który jest wynikiem historii geologicznej. Na uwagę zasługuje zestawienie w rozdz. 4.4.7 wszystkich parametrów modelu wraz z przedstawieniem sposobów doboru ich wartości do wykonywanych analiz numerycznych na podstawie badań laboratoryjnych (badania edometryczne, konsolidometryczne lub trójosiowe) i polowych (sondowania statyczne CPT, dylatometry oraz dynamiczne SPT). W analizach wykorzystano również inne modele, takie jak Modified Mohr-Coulomb, Hardening Soil Small Strain Stiffness, Modified Cam Clay oraz Soft Soil Creep.

Bardzo pozytywnie należy ocenić rozdział czwarty, w którym autor dokonał szerokiego przeglądu literatury w celu znalezienia możliwie szerokiej bazy danych wyników badań iłów serii poznańskiej. Obecność tych gruntów w podłożu ma decydujący wpływ na postać deformacji podłoża oraz wartości pomierzonych osiadań, stąd autor za słuszne uznał poznanie właściwości tych gruntów w jak najbardziej szerokim zakresie. Na podstawie lektury tego rozdziału można stwierdzić, że doktorant dysponuje dużą wiedzą w zakresie geologii, jak również może wykazać się znajomością literatury w tym zakresie. Rozdział ten jest kluczowy w zakresie doboru wartości parametrów do analiz. Pewnym mankamentem tego rozdziału jest fakt, że zestawione dane zawierają przede wszystkim charakterystyki fizyczne iłów poznańskich. Przedstawiono również wartości parametrów opisujących właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe, jednakże są one tylko parametrami dotychczas stosowanych tradycyjnych modeli gruntów i bardzo trudno jest na ich podstawie wyspecyfikować wartości zaawansowanych modeli. Z tego typu problemem bardzo często mają do czynienia projektanci, którzy chcą wykorzystać zaawansowany model do analiz wykonywanych w trakcie obliczeń, natomiast dysponują jedynie wynikami typowych badań wykonywanych podczas rozpoznawania podłoża. Jak jednak wskazuje treść podrozdziału 4.5, doktorant potrafił rozwiązać ten problem i był w stanie oszacować wartości parametrów modelu SCLAY1S, które wykorzystał w swoich obliczeniach. Oczywiście w tym celu konieczne było posiłkowanie się wieloma zależnościami podanymi w literaturze. Oprócz kalibracji wartości parametrów modelu SCLAY1S, w rozdziale 4 przedstawiono również sposób wyznaczania parametrów pozostałych modeli wykorzystywanych w analizach. W dużej części w użytych modelach niektóre parametry się pokrywają, co jednakże nie świadczy o tym, że nakład pracy autora był w jakiś sposób mniejszy.

Oddzielną omawianą kwestią jest monitoring przemieszczeń pionowych silosu, którego rezultaty były podstawą weryfikacji modeli rozważanych w analizach. Na uwagę zasługuje bardzo długi okres prowadzenia tego monitoringu, który wynosi ok. 7 lat. Pomiar geodezyjne osiadań prowadzono na aż 12 reperach, co pozwoliło nie tylko na oszacowanie średnich osiadań, ale przede wszystkim na odwzorowanie obrazu deformacji płyty dennej. To okazało się być głównym kryterium świadczącym o poprawności konkretnego modelu wykorzystanego do modelowania zachowania się ośrodka gruntowego. Można mieć tylko

zastrzeżenia do faktu, że pomiary były prowadzone przy różnym stopniu napełnienia silosu, co w oczywisty sposób ma wpływ na uzyskane wykresy. Można domniemywać, że autor nie miał wpływu na konkretne daty wykonywania pomiarów, aby zapewnić ten sam stopień wypełnienia zbiornika, jednakże warto byłoby np. w tabeli 5.5 zestawić w jakim procencie był napełniony silos w trakcie konkretnego pomiaru. Mankament ten został zniwelowany w trakcie analizy wyników poszczególnych wariantów obliczeniowych poprzez wprowadzenie przez autora linii trendu, ale dotyczy to tylko charakterystyk otrzymanych z analiz numerycznych.

W najważniejszej, zdaniem recenzenta części pracy, którą stanowią analizy numeryczne, autor rozważał łącznie 6 zdefiniowanych przez siebie wariantów obliczeniowych. Różniły się one modelem wykorzystanym do opisu zachowania się poszczególnych warstw. Szczególną uwagę poświęcono warstwie iltów poznańskich w stanie twaroplastycznym i półwartym, które stanowią głębsze podłoże pod analizowanym silosem. Ze względu na bardzo duże obciążenia przekazywane przez konstrukcję obiektu na podłoże, rozmiar tego obiektu, a także posadowienie go na palach, pomimo iż powyższe ily znajdują się dosyć głęboko (średnio ok. 20 m poniżej poziomu terenu), przedmiotowa warstwa ma istotny wpływ na wartości osiadań. Ponadto zróżnicowany kształt jej stropu, gdzie obserwuje się spore wyniesienia, ily poznańskie wydają się mieć największy wpływ na deformację płyty dennej, stanowiącej oczep na palach fundamentowych. Analizując otrzymane wyniki autor skupiał się nie tylko na samych wartościach osiadań w miejscach instalacji poszczególnych reperów, ale dużą uwagę poświęcił analizie mapy osiadań i jej zgodności z wynikami pomiarów. Oceniając sposób dokonywania analiz wyników, a także podawane przez autora wnioski, bardzo wysoko oceniam wiedzę oraz umiejętności doktoranta.

Drugim etapem wykonanych analiz numerycznych są obliczenia wykonane z wykorzystaniem modelu płaskiego – osiowo-symetrycznego. Dzięki temu możliwa była analiza z uwzględnieniem zjawisk zależnych od czasu – rozpraszania nadwyżki ciśnienia wody w porach oraz zjawisk reologicznych. W tym wariancie autor był w stanie wykonać analizę wielu cykli (konkretnie 7) napełniania i opróżniania zbiornika. Trzeba zauważyć, że w modelu trójwymiarowym obciążenie wynikające z ciężaru cukru zmagazynowanego w silosie było analizowane jako monotoniczne. Wg autora pełna analiza zagadnienia 3D nie była możliwa do zrealizowania ze względu na bardzo długi czas obliczeń. Analizując wyniki uzyskane w ramach analiz zagadnienia płaskiego doktorant skupił się na porównywaniu wykresów osiadanie – czas. Ważnym elementem analiz jest wrysowanie linii trendu, dzięki czemu można porównać uzyskane wyniki analiz numerycznych z wynikami monitoringu.

Recenzent nie zgłasza uwag do literatury, na podstawie której autor przeprowadzał swoje rozważania. Można stwierdzić, że zostały wykorzystane wszystkie najbardziej istotne pozycje odnoszące się do rozważanych zagadnień. Wysoko należy również ocenić stosowanie języka polskiego, autor wyraża się w sposób jasny, ścisły i zrozumiały dla czytelnika. Prawidłowo opisywane są wzory i rysunki, które w zdecydowanej większości są dobrej jakości. Drobne zastrzeżenia można mieć tylko jakości niektórych tabel i wykresów, jak również niektórych rysunków zaczerpniętych z projektów, które są mało nieczytelne.

Biorąc pod uwagę treść i zakres pracy można z całą pewnością stwierdzić, że postawione na początku rozprawy doktorskiej przez mgr inż. Miłosza Justa cele naukowe zostały osiągnięte.

6. Uwagi szczegółowe i dyskusyjne

Recenzent zgłasza zastrzeżenie odnośnie tytułu pracy. Na jego podstawie można by uważać, że główny nacisk w pracy był położony na realizację różnych analiz wstecznych, których zadaniem jest taki dobór parametrów wejściowych analiz (do których należy również zaliczyć dobór modelu, co implikuje listę parametrów do wyspecyfikowania), aby móc

maksymalny się zbliżyć do wyników uzyskanych w badaniach (w tym przypadku rozkładu osiadań w miejscu styku płyty fundamentowej pracującej jako oczep z podłożem gruntowym) oraz rozwój tych osiadań w czasie, na który bardzo duży wpływ miało cykliczne obciążenie i odciążenie podłoża gruntowego wynikające z eksploatacji silosu (napełnianie i opróżnianie zgromadzonego cukru). Oczywiście recenzent podtrzymuje stwierdzenie, że tak sformułowane cele zostały w pracy osiągnięte, jednakże wydaje się, że głównym rozwiązywanym w pracy zagadnieniem jest modelowanie zachowania się gruntu poddanego złożonej ścieżce obciążenia. Uzyskano bardzo dobrą zgodność wyników analiz numerycznych z wynikami monitoringu (oczywiście dla konkretnych wariantów obliczeniowych), jednakże nie opisano w jaki sposób dobierano wartości parametrów modeli: czy tylko na podstawie wyników badań geotechnicznych i sposobów interpretacji podawanych w literaturze? czy też korygowano wartości tych parametrów w przypadkach stwierdzenia rozbieżności między charakterystykami uzyskanymi z obliczeń w stosunku do uzyskanych z pomiarów? Dla przykładu wykorzystując model Modified Mohr-Coulomb uzyskano wartości osiadań przeszacowane o ok. 40%. Autor słusznie stwierdza, że model ten nie nadaje się do wykorzystania w tym konkretnym przypadku, jednak rodzi się pytanie, czy można by tak dobrać wartości parametrów (głównie modułów odkształcenia), aby uzyskać lepszą zgodność? Z uwagi na powyższe, zdaniem recenzenta, tytuł rozprawy powinien wskazywać na fakt, że praca dotyczy przede wszystkim zaawansowanego modelowania zachowania się ośrodka gruntowego.

Ponadto tytuł wskazuje, że analiza wsteczna dotyczy iłów poznańskich. Faktycznie, cały rozdział 4 jest poświęcony analizie właściwości tych konkretnie gruntów, jednakże aktualne pozostaje spostrzeżenie, że autor do analiz numerycznych musiał dobrać również wartości parametrów gruntów leżących powyżej wcześniej wspomnianych iłów. W szczególności należało dobrać (i najprawdopodobniej autor to zrobił w sposób prawidłowy) wartości parametrów dla nasypów niebudowlanych. Można zauważyć, że doktorant dysponował wartościami parametrów opisujących cechy fizyczne gruntów nasypowych (często projektant fundamentów nie dysponuje nawet takimi informacjami), a dodatkowo zostały wykonane badania edometryczne (czego w praktyce prawie nigdy się nie robi), to warto by znać sposób doboru wartości parametrów dla gruntów, które nie zostały tak szczegółowo rozpoznane, jak szeroko opisane w rozdziale 4 iłóy poznańskie. Szkoda, że w pracy nie można odnaleźć wartości parametrów wykorzystanych modeli dla pozostałych warstw gruntowych budujących podłoże, a kupiono się tylko na jednej konkretnej warstwie, która oczywiście miała decydujący wpływ na uzyskane wyniki.

Recenzent chciałby podnieść w dyskusji również zagadnienie analizy postawionego problemu przy użyciu modelu osiowo-symetrycznego. Trzeba wyraźnie zauważyć, że aby takie uproszczenie mogło być przyjęte, rozwiązywane zagadnienie musi odznaczać się osiową symetrią zarówno w zakresie geometrii konstrukcji tworzącej obiekt, ale również warunków gruntowych. Można odnieść wrażenie, że autor jest świadomy tych ograniczeń i dokładnie o nich informuje (np. stwierdza o braku możliwości zamodelowania wieży technologicznej, a także o konieczności przyjęcia układu warstw jako poziome), jednakże w pewien sposób kłóci się to z jednym z wniosków, który mówi, że wypiętrzenia warstw iłów mają decydujący wpływ na rozkład osiadań i deformacji płyty dennej silosu. Wpływ ten najpewniej jest równie istotny dla rozkładu nacisków wywoływanych przez płytę na podłoże, czego jednak autor nie pokazuje, gdyż nie jest to przedmiotem jego analiz. Oczywiście wykonane analizy z wykorzystaniem modeli osiowo-symetrycznych są bardzo istotne w pracy w kontekście rozważania charakterystyk zmiany osiadań w czasie, jednakże szkoda, że nie wykonano choć jednego modelu, który pozwoliłby na analizę zagadnienia sprzężonego filtracji wody w ośrodku gruntowym + deformacji tego ośrodka, nawet, gdyby czas jego rozwiązywania na konkretnym komputerze miał trwać kilka dni.

W trakcie prezentacji treści rozprawy na publicznej obronie, recenzent oczekiwałby również odpowiedzi na poniższe pytania:

- na początku p. 6.1 jest mowa, że obecność iłów wiąże się z występowaniem skomplikowanych warunków gruntowych w myśl odpowiedniego rozporządzenia ministra z roku 2012; czy chodzi o ich właściwości ekspansywne? jeżeli tak, to powinno to być doprecyzowane w tekście, chyba że jednak chodzi o coś innego, gdyż ekspansywność iłów nie była przedmiotem analizy podjętym w pracy,
- jakie funkcje transformacyjne opisujące zachowanie się pali zostały użyte w analizach: czy tylko funkcje rosnące na początku i stałe od pewnego momentu, czy również z osłabieniem (wartości funkcji zmniejszają się od pewnego momentu) lub wzmocnieniem (wartości cały czas rosną, choć od pewnego momentu można zauważyć inną charakterystykę). Wzory (3.22) i (3.23) wskazują, że wykorzystano tylko pierwszy typ funkcji transformacyjnych, choć na rys. 3.9 można zauważyć wszystkie 3 rodzaje tych funkcji,
- jak funkcje transformacyjne określające charakterystykę pali zdefiniowano w modelu MES? (jako dodatkowe podpory?),
- w ostatnim akapicie p. 5.5 stwierdzono, że „wartości sił osiowych w niektórych miejscach przekraczają nośność możliwą do osiągnięcia przez pale fundamentowe”; należy wyjaśnić ten fragment, gdyż taka forma tego zdania wskazywałaby, że funkcje transformacyjne zostały dobrane w sposób nieprawidłowy,
- jak modelowano elementy konstrukcyjne obiektu silosu: powłoki?, belki?, elementy kratowe?, model liniowo-sprężysty z parametrami jak dla betonu?
- na czym polega modyfikacja w modelu Modified Mohr-Coulomb w porównaniu do klasycznej wersji tego modelu,
- jak modelowano oddziaływanie ciężarem cukru: czy tylko jako rozłożony (stały lub w jakiś sposób zmienny) nacisk na dno o wartości ciężaru cukru przemnożonego przez wysokość składowania, czy też w jakiś inny sposób? Trzeba pamiętać, że jeżeli obciążenie było przykładane tylko na płytę na dole, to nie jest uwzględniona siła tarcia między cukrem a powierzchnią boczną silosu. Wtedy, wskutek tego tarcia, część obciążenia przenoszona jest na podłoże w miejscach styku ścian zewnętrznych z płytą (a nie tylko równomiernie poprzez płytę na podłoże lub na pale). Jeżeli cukier modelowany był jako kontinuum wewnątrz zbiornika, to jaki wybrano dla niego model materiałowy oraz jakie przyjęto wartości parametrów?
- przy omawianiu modelowania warunków brzegowych, wskazano konieczność zastosowania blokady rotacji w węzłach na dolnym brzegu modelu; ponieważ jednak węzły elementów kontynualnych (sześciściany w analizie 3D lub czworościany w modelach płaskich) nie mają stopnia swobody polegającego na obrocie (mają tylko stopnie swobody dotyczące przemieszczeń), to autor powinien doprecyzować o jakie obroty chodzi; podobnie recenzent jest zdania, że użycie określenia, że na brzegu zastosowano podpory przegubowo przesuwne lub nieprzesuwne jest błędne (skoro węzeł nie ma stopnia swobody na obrót, to nie można go zablokować lub pozostawić wolny); oczywiście blokadę obrotów można zastosować, gdy do węzła na brzegu dochodzi element konstrukcyjny taki jak belka lub powłoka,
- dlaczego nie wprowadzono linii trendu dla wyników monitoringu osiadań zmierzonych na reperach zainstalowanych na płycie dennej zbiornika?; uzyskana krzywa była otrzymana przy różnym stopniu napełnienia zbiornika (często

przypadkowym) i na pewno wykorzystanie wyników monitoringu sprawiło autorowi kłopot; warto by również zestawić uzyskane wyniki z 6 analizowanych wariantów oraz wyników monitoringu na jednym wykresie,

- czy autor próbował porównywać wyniki pojedynczego cyklu odciążenie-obciążenie powtarne z wynikami monitoringu? Recenzent zdaje sobie sprawę, że tak postawionemu problemowi może nie dać się rozwiązać mając do dyspozycji tylko wyniki monitoringu przedstawione na rys. 5.7, jednak warto byłoby się pokusić chociaż o analizę jakościową uzyskanych wyników,
- zdaniem recenzenta, na podstawie przedstawionych wyników analiz najlepszym modelem opisującym zachowanie się gruntów spoistych jest model HS-small; proszę autora o komentarz dotyczący ewentualnych zalet modeli SCLAY1S oraz SoftSoil Creep w porównaniu do HS-small; ponadto dlaczego w p. 6.1 autor twierdzi, że model SCLAY1S najdokładniej opisuje zachowanie się łąw poznańskich pod obciążeniem.

W pracy zauważono występowanie kilku usterek, które względnie łatwo można poprawić lub uzupełnić. Niektóre z nich wymieniono poniżej:

- we wstępie napisano, że łąy poznańskie mają zdolność do znacznych deformacji, a w kolejnej linijce, że charakteryzują się niską ściśliwością; prawdopodobnie chodzi o dużą wartość współczynnika Poissona dla tego rodzaju gruntów, jednakże pewna sprzeczność nadal pozostaje,
- w podpunkcie 1.2, we fragmencie dotyczącym sondowań statycznych nie wspomniano o pracach Młynarka i Wierzbickiego, którzy są reprezentantami polskiej szkoły w tym zakresie,
- przy omawianiu wzoru 2.1, należy dopowiedzieć, że liczba składowych niezależnych tensora C_{ijkl}^e redukuje się do dwóch parametrów E oraz ν w przypadku ośrodka izotropowego,
- wzór (2.9) jest błędny (tak naprawdę jest on identyczny ze wzorem 2.8, który dotyczy innego modelu); oczywiście wzór (2.10) jest już prawidłowy,
- recenzent nie zgadza się ze stwierdzeniem, że równania powierzchni nie można analizować w trójwymiarze – można to robić np. w przestrzeni (trójwymiarowej) naprężeń głównych; ponadto należy pamiętać, że matematyka umożliwia analizę różnych zagadnień w n wymiarach (gdzie n to liczba naturalne), z tym, że dla $n > 3$ nie ma interpretacji geometrycznej takiego zagadnienia,
- rys. 2.2: przedstawiono tam modele „ze wzmocnieniem”, a nie „z umocnieniem”,
- wzór 2.11: na podstawie potencjału plastycznego oblicza się przyrost odkształceń plastycznych; stwierdzenie, że opisuje to zależność między naprężeniami a odkształceniami to bardzo duży skrót myślowy,
- stwierdzenie „postać liniowego wzmocnienia nie musi być liniowa” jest wzajemnie sprzeczne,
- model Winklera w żadnym wypadku nie można zaliczyć do modeli sprężysto-plastycznych (model ten został wymieniony obok sprężysto-idealnie plastycznych modeli Mohra-Coulomba i Druckera-Pragera),
- warunek $\sigma_2 = \sigma_3$ opisuje stan osiowo-symetryczny, a nie stan trójosiowy, oczywiście w tym kontekście myląca jest nazwa aparatu często wykorzystywanego w badaniach laboratoryjnych,

- zagadnienie konsolidacji nie można zaliczyć do zagadnień reologicznych (dotyczy opisu rys. 2.19),
- dewiator naprężenia to tensor; w niektórych miejscach w pracy tym określeniem jest nazywana intensywność naprężenia, która to wielkość jest skalarem,
- w geotechnice przy redukcji zagadnienia trójwymiarowego do płaskiego używa się albo stanu osiowo-symetrycznego, albo płaskiego stanu odkształcenia; w mechanice wykorzystuje się jeszcze płaski stan naprężenia, który jest w zasadzie nie do uzyskania w ośrodku gruntowym; stąd stwierdzenie o wycinku konstrukcji o grubości 1 m (ostatnia strona rozdz. 2) jest bardzo nieprecyzyjne,
- podane wymagania wymienione pod wzorem (3.14) dotyczą wielkości używanych w staję normie PN-81/B-03020, a nie w Eurokodzie 7 (tam tych wielkości jest 8),
- wartość dopuszczalnych osiadań dla obiektów wysokościowych raczej jest zdecydowanie większa niż 50 mm, jak zapisano na zakończenie podpunktu 3.2.2,
- zwiększenie liczby pali zwiększa a nie zmniejsza sztywność fundamentu traktowanego jako całość; być może autorowi chodziło o coś innego i doszło do drobnego przekłamania (tekst poniżej wzoru 3.30),
- w tabelach 4.7 i 4.8 zestawiono tzw. wartości całkowite parametrów c i ϕ , natomiast do modelu opisującego zjawisko konsolidację należało wykorzystać parametry efektywne, które opisują zachowanie się szkieletu gruntowego; w tekście powinno być o tym wspomniane,
- recenzent ma wątpliwość, czy wzór (4.6) rzeczywiście opisuje spójność (uzyskiwało by się nierealistycznie duże wartości), czy też może wytrzymałość na ścinanie w warunkach bez odpływu,
- norma PN-88/B-04481 (dotycząca badań podłoża) nie podaje wartości parametrów geotechnicznych (błędny opis tabeli 4.9),
- w opisie konstrukcji silosu (punkt 5.2) brakuje podania zakresu długości pali; są one podane na rysunkach, jednakże nie są one na tyle czytelne, aby można się było zorientować na jakich głębokościach znajdują się podstawy pali,
- pale nie pracują jako wyciągane, stąd stwierdzenie o kotwieniu pali należy uznać za nieprecyzyjne (tekst poniżej rys. 5.14),

Ponadto czasami autor używa nieprawidłowych określeń: „ilość” zamiast „liczba”, „istotność” zamiast „poprawność”, „stałe materiałowe” zamiast „parametry modelu”, „inkrementy” zamiast „przyrosty”. Można odnaleźć również takie potoczne sformułowania jak np. „cała teoria”, „wielkogabarytowe modele trójwymiarowe”, „wysoka amplituda obciążenia”, „potężna amplituda”, itp., które nie powinny być używane w pracach naukowych. Zdaniem recenzenta nie powinno się też używać nazw „nasyp kontrolowany” i „nasyp niekontrolowany” (określenia z normy z roku 1974) – obecnie stosuje się określenia „nasyp budowlany” lub „nasyp niebudowlany”. Ponadto określenie nasyp niekontrolowany może być przez niektórych zrozumiane jako warstwa nierozpoznana. Zauważono również kilka małoistotnych literówek w tekście pracy.

Wskazane powyżej drobne usterki w żaden sposób nie wpływają na wysoką ocenę wartości merytorycznej pracy doktorskiej, natomiast mogą pomóc doktorantowi przy pisaniu artykułów w dalszej jego karierze naukowej.

7. Podsumowanie i wniosek końcowy

W ocenianej pracy doktorskiej autor skutecznie rozwiązał trudny problem modelowania zachowania się łąk poznańskich odznaczającymi się bardzo złożonymi właściwościami wytrzymałościowo-odkształceniowymi pod obciążeniem przekazywanym przez fundament płytowo-palowych bardzo wysokiego silosu na cukier. Był w stanie wykorzystać różne zaawansowane modele konstytutywne oraz w sposób właściwy dobrać wartości parametrów do analiz numerycznych na podstawie wykonanych badań oraz danych dostępnych w literaturze. Wykazał się dużą wiedzą i biegłością w tym zakresie. Wykazał również, że potrafi planować przebieg analiz oraz wyciągać odpowiednie wnioski z uzyskanych wyników.

Reasumując, stwierdzam, że praca doktorska Pana mgr inż. Miłosza Justa pt. „Ocena odkształceń wybranych gruntów spoistych wyznaczonych metodą analizy wstecznej z zastosowaniem metody elementów skończonych” spełnia 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, a także spełnia wymagania art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2022 r., poz. 574 z późn. zm.).

Biorąc powyższe pod uwagę oraz moją pozytywną ocenę rozprawy doktorskiej, wnioskuję o przyjęcie rozprawy doktorskiej przez Radę Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Poznańskiej oraz o dopuszczenie Pana mgr inż. Miłosza Justa do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

