

Prof. dr hab. inż. Maciej Kordian Kumor  
Politechnika Bydgoska im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy. Emeritus  
[maciej.kumor@engeo.com.pl](mailto:maciej.kumor@engeo.com.pl)

## **Recenzja** **Rozprawy doktorskiej mgr inż. Miłosza Just**

*pt.: „Ocena odkształceń wybranych gruntów spoistych wyznaczonych metodą analizy wstecznej z zastosowaniem metody elementów skończonych”*,

**promotor: dr hab. Katarzyna Machowiak prof. PP**

**promotor pomocniczy: dr inż. Andrzej Wojtasik**

**w dziedzinie: nauki inżyniersko-techniczne**

**w dyscyplinie: inżynieria lądowa, geodezja i transport**

### **1. Wstęp**

Podstawy opracowania recenzji.

- Zlecenie prof. dr hab. inż. Jacka Pielecha, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Poznańskiej, z dnia 26 kwietnia 2023 roku,
- Umowa o dzieło, nr 0410/2023/51, zawarta pomiędzy prof. dr hab. inż. Jackiem Pielecha Dziekanem Wydziału Inżynierii Lądowej i Transportu, który działa w imieniu Politechniki Poznańskiej a recenzentem.

### **2. Omówienie i ogólna ocena rozprawy**

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Miłosza Just przedstawiona jest w języku polskim i zawarta została w jednym tomie.

Jest to **rozprawa doktorska** wykonana w Zakładzie Geotechniki, Geologii Inżynierskiej i Geodezji Wydziału Inżynierii Lądowej i Transportu Politechniki Poznańskiej pod promotorstwem **dr hab. Katarzyny Machowiak** profesora PP i promotora pomocniczego **dr inż. Andrzeja Wojtasika**.

Rozprawa - obejmuje **208** stron tekstu plus streszczenie, spisy rysunków i tabel.

Część tekstowa składa się z **6** rozdziałów, które zawierają między innymi:

1. Wstęp, z przedstawieniem problemu, określonym celem i tezą pracy,
2. Modelowanie i analiza numeryczna środowiska gruntowego,
3. Współpracę fundamentu płytowo-palowego z podłożem gruntowym,
4. Identyfikację parametryczną łąk mioceńsko-plioceńskich serii poznańskiej.
5. Analizę numeryczną silosu cukrowniczego w Gostyniu,
6. Zakończenie,
  - 6.1. Podsumowanie.

6.2. Wnioski.

6.3. Program dalszych badań.

**Bibliografia** licząca 159 pozycji, (w tym strony internetowe, normy).

Doktorant mgr inż. Miłosz Just podjął w rozprawie kontaktowe zagadnienie badawcze z obszaru geotechniki bardzo spoistych osadów iłów serii poznańskiej, o właściwościach ekspansywnych, opracował numeryczne i wykorzystał modele konstytutywne opisujące w matematyczny sposób mechanizmy zachodzące w podłożu gruntowym obiektu posadowionego na fundamencie płytowo-palowym. Obiekt badawczy to przykładowy silos w Gostyniu do magazynowania cukru luzem, posadowiony pośrednio, nietypowo w podłożu z iłami serii poznańskiej oraz gruntami słabonośnymi.

Iły serii poznańskiej są ekspansywnymi osadami o złożonej genezie geologicznej, powstałymi w okresowym morzu epikontynentalnym w strefie późniejszej działalności procesów glacialnych transgresji lodowców i post-glacialnych. Anizotropia genetyczna i procesy post-syngenetyczne powodują trudności w identyfikacji właściwości i w prognozie zmian wartości liczbowych parametrów geotechnicznych, szczególnie obejmujących cechy mechaniczne wytrzymałość na ścinanie oraz ściśliwość.

Doktorant omawia w rozdziale pierwszym rozprawy podmiot rozważań określając i uzasadniając wybór tematyki badawczej. Przedstawiono stan aktualnej wiedzy w zakresie modelowania gruntów spoistych, współpracy fundamentu płytowo-palowego z podłożem gruntowym, obciążeń cyklicznych oraz uzasadnienie analizy wstecznej z wykorzystaniem modelowania numerycznego. Autor formułuje cel pracy określa jej zakres i cele cząstkowe.

Główny aspekt rozprawy – modelowanie numeryczne i problematykę modelowania obciążanego podłoża gruntowego przedstawia w rozdziale drugim, na podstawie studium wybranej literatury dotyczącej przedmiotu. W przeglądzie literatury, skupia się na podstawach i zagadnieniach wyrażenia w formie matematycznej zjawisk, które interpretuje współczesna mechanika gruntów.

Trzeci rozdział opracowano analizując bogate dane literaturowe, stanowi on jeden z ważniejszych metodycznych punktów rozprawy. Doktorant określa mechanizm współpracy pala oraz fundamentu płytowo-palowego z gruntem. Przedstawia opis zachowania fundamentu pod obciążeniem, zapewniający realne uwzględnienie mobilizacji oporu podstawy i pobocznicy pala. W metodzie funkcji transformacyjnych pal jest rozpatrywany, jako sprężysty pręt charakteryzujący się stałą sztywnością podłużną swojego trzonu. Odwołując się do metody prof. K. Gwizdały, określa się za pomocą funkcji transformacyjnych. Wartości oporów granicznych pod podstawą pala  $q_{bmax}$  i wzdłuż pobocznic  $t_{max,j}$  poszczególnych warstw  $j$ , są możliwe do określenia, na podstawie formuł zawartych w normach oraz w literaturze fachowej (Gwizdała, 2011; Krasieński, 2018). Jednymi z uznanych i najczęściej stosowanych metod identyfikacji rozkładu wartości parametrów geotechnicznych podłoża gruntowego w warunkach in situ są publikacje (Bustamante i Giaseneli1982). Odnoszą się do wyników sondowania CPTu dodatkowo z pomiarem wartości ciśnienia porowego, co umożliwia uzyskanie w sposób obliczeniowy nośności krytycznej pala lub kolumny, między innymi zapewniającej bezpieczną pracę oraz pewien zapas niewykorzystanej nośności.

Zastosowana w dysertacji analiza wsteczna (lub inaczej odwrotna), metodycznie polega na iteracyjnej procedurze estymacji danych wyjściowych modelu, dzięki którym otrzymuje się wynik najbardziej zbliżony do oczekiwanego. Algorytm analizy odwrotnej przeszukuje zbiór danych wyjściowych, zapewniając najmniejszą możliwą różnicę pomiędzy wynikiem modelu i rzeczywistym rezultatem pomiarowym. W geotechnice mają znaczenie, z uwagi na mnogość czynników i zmienność parametrów. Założenia poczynione przez Doktoranta są właściwe, dające możliwość zweryfikowania zależności osiadania – obciążenie fundamentu w oparciu o

realne pomiary przemieszczeń. Rozdział napisany szeroko, uzupełniony wiedzą merytoryczną świadczy o dobrym rozeznaniu teoretycznym i praktycznym Doktoranta w problemach i przygotowaniu do posługiwania się metodami analizy wstecznej w przypadku badanego obiektu dużego silosu w Gostyniu.

Rozdział czwarty poświęcony jest charakterystyce geotechnicznej wybranych gruntów bardzo spoistych, tzn.: iłom mioceńsko-pliedeńskim serii poznańskiej, na których posadowiono badany obiekt w Gostyniu. Doktorant korzystając z bardzo starannie przygotowanych analiz geotechnicznych podłoża silosu, wyjaśnia specyfikę podłoża, genezę, specyficzne właściwości podłoża tj.: naturalnych utworów ekspansywnych i wzorowo udokumentowane lokalne problemy geotechniczne podłoża gruntowego silosu. Po analizie geotechnicznej podłoża, zastosował zaawansowany, wieloparametrowy model konstytutywny *SCLAYIS* charakteryzujący złożone zachowanie gruntów spoistych pod obciążeniem oraz określił parametry niezbędne w celu opisu gruntu modelem. Na podstawie posiadanych bogatych archiwalnych wyników badań oraz własnych *in situ*, iłów serii poznańskiej, a przede wszystkim analiz właściwości fizyko-mechanicznych próbek podłoża analizowanego silosu, przeprowadzono identyfikację parametryczną gruntów modelem konstytutywnym *SCLAYIS*. Wyprowadzono wartości liczbowe parametrów konstytutywnych iłów budujących podłoże obiektu badawczego silosu.

W rozdziale piątym została przedstawiona charakterystyka techniczna obiektu, stanowiącego przedmiot badań w pracy, z wykorzystaniem metod numerycznych – żelbetowy silos cukrowniczy w Gostyniu, mający średnicę 50 m, wysokość 55 m, zdolny do pomieszczenia 80 000 ton cukru luzem. Konstrukcja ówczesnie była nietypowa z uwagi na wielkość silosu, a także na specyficzne warunki gruntowe i niekonwencjonalny sposób posadowienia.

Jest to zasadniczy rozdział rozprawy dotyczący analizy numerycznej silosu. Obejmuje 69 stron, który zawiera między innymi trójwymiarowy i osiowosymetryczny model numeryczny, parametryzację podłoża, modelowanie pracy pała, warianty analizy, fazy konstrukcyjne. Analizy, które zostały przeprowadzone i opisane w rozdziale piątym w zakresie pracy konstrukcji fundamentu bazują na założeniach sformułowanych w rozdziale trzecim.

Na podstawie wyników analizy, wyeksportowanych do arkusza kalkulacyjnego, stworzono wykresy przemieszczenia pionowego węzłów płyty fundamentowej w czasie, wykazujących największe oraz najmniejsze osiadania. Po weryfikacji poprawności założeń, w oparciu o zebraną bazę wiedzy w dysertacji, opracowano algorytm wiarygodnej analizy numerycznej silosu. Stanowi propozycję autorską pozwalającą na bezpieczne oszacowanie osiadania, optymalizację posadowienia, oraz predykcję zachowania konstrukcji silosów w czasie.

Rozprawę podsumowują wnioski i nakreślone przez Doktoranta dalsze problemy badawcze do analizy i prac modelowych.

**Przyjęty przez Doktoranta układ formalny rozprawy uznaję za właściwie zestawiony obejmujący całość badanego problemu geotechnicznego.**

Rozprawa doktorska mgr inż. Miłosza Just, skupia się na problematyce związanej z wynikami bezpośrednich badań odkształcalności ekspansywnych iłów mio-pliedeńskich serii poznańskiej pod wpływem zmiennego wypełniania silosu. Zasadniczym problemem analizy jest odwzorowanie zmienności charakteru obciążeń użytkowych silosu, którą wykazały pomiary geodezyjne prowadzone przez dziesięć lat obserwacji. Zastosował w tej specyficznej sytuacji analizy numeryczne w programie korzystającym z metody elementów skończonych. Budowa modelu odpowiedniego modelu i analiza wsteczna w przypadku obiektu tej wielkości, pozwala na otrzymanie bliskich rzeczywistym pomiarów wyników osiadania. Zadanie wymagało zdefiniowania wielu czynników, które w ocenie Doktoranta determinowały rezultaty analizy - doboru geometrii samego modelu, określenia szeregu

parametrów gruntowych, doboru odpowiednich modeli konstytutywnych ośrodka gruntowego zalegającego w podłożu, a w fundamentach zamodelowanie charakterystyk mobilizacji pala w fundamencie płytowo-palowym.

Analiza wsteczna silosu posadowionego na skomplikowanym podłożu gruntowym daje niewątpliwą szansę na zweryfikowanie w praktyce dokładnie założeń cytowanych w literaturze naukowej zarówno krajowej, jak i zagranicznej. Jest to dla Doktoranta ważny aspekt praktyczny i poznawczy zarówno w przyszłych rozważaniach teoretycznych jak i w praktyce projektowo-wykonawczej oraz w prognozach długotrwałego użytkowania silosów.

Z geotechnicznego punktu widzenia badany silos poddawano nieregularnie zmiennym poziomem zapełnienia, a raz do roku jest całkowicie opróżniany. Wymusza to rejestracje odpowiedzi precyzyjnie w funkcji kolejnych cykli obciążeń-odciążenia, zmiennych charakterystyk wartości przemieszczeń obiektu, stanu podłoża gruntowego zbudowanego z ekspansywnych ilów serii poznańskiej.

**Rozprawa** doktorska mgr inż. Miłosza Just, obejmowała następujące cele:

1. *Studia teoretyczne, dokonanie przeglądu modeli konstytutywnych do opisanie zachowania ładu pod obciążeniem, z uwzględnieniem zjawisk opisywanych w mechanice gruntów, w intencji jak najlepszego odwzorowania złożonej natury gruntu w wynikach analiz numerycznych;*

2. *Wybranie nowego, zaawansowanego modelu konstytutywnego, którego parametry ładu serii poznańskiej nie zostały wcześniej wyznaczone oraz określenie ich wartości ładu, znajdującego się, w podłożu analizowanego silosu;*

3. *Weryfikacja wytypowanego modelu w szeregu analiz numerycznych, określenie jego skuteczności w oparciu o dane monitoringu geodezyjnego oraz konfrontacja z wynikami analiz, wykonanych przy użyciu innych modeli konstytutywnych;*

4. *Weryfikacja istotności zamodelowania mobilizacji podstawy i pobocznicy pali w fundamencie płytowo-palowym, w odniesieniu do wyników przemieszczeń silosu, opartych na danych z monitoringu geodezyjnego;*

5. *Weryfikacja istotności zamodelowania nadziemnej części silosu (płaszczka, kopuły i wieży technologicznej), w odniesieniu do wyników przemieszczeń silosu, opartych na danych z monitoringu geodezyjnego;*

6. *Osiągnięcie zbieżnych wyników całkowitych przemieszczeń płyty fundamentowej, uzyskanych za pomocą, analiz numerycznych, z pomiarami przemieszczeń reperów, odczytanymi z ostatniego cyklu obciążenia silosu;*

7. *Odwzorowanie przemieszczenia silosu w czasie, za pomocą, analiz numerycznych, uwzględniające zakresy sprężystego i plastycznego odkształcenia gruntu, wraz z uzyskaniem zbieżnych wyników analizy z pomiarami geodezyjnymi, w poszczególnych cyklach obciążenia i odciążenia;*

8. *Zdefiniowanie istotnych czynników wpływających na wyniki przemieszczeń w geotechnicznym modelowaniu numerycznym, tak aby cechowały się zbieżnością, z rzeczywistą pracą, posadowienia konstrukcji na fundamencie płytowo-palowym.*

Dysertacja Doktoranta dotyczy przemieszczeń cyklicznie obciążanego silosu przy wykorzystaniu metody analizy wstecznej, wpisuje się we współczesny i potrzebny nurt badań w praktycznej inżynierii geotechnicznej. Obejmuje niestandardowe problemy gruntów wielofazowych o anizotropii genetycznej nienasyconego ośrodka porowatego. W krajowej geotechnice zagadnienia zaawansowanego modelowania numerycznego odkształceń ekspansywnego podłoża budowlanego po cyklicznym obciążaniu – odciążaniu odniesione do cech fizycznych wrażliwych na zmiany warunków wodnych utworów geologicznych stanowi jedną z cenniejszych i pionierskich dysertacji doktorskich.

Zgadając się generalnie z wywodem przedstawionym w tej części rozprawy i wnioskami Doktoranta widzę jednak potrzebę uzupełnienia myśli badawczej o wyraźną tezę, która uzasadnia cele Autora odnośnie do modelowania i analizy numerycznej istnienia konstytutywnych związków fizycznych, w tym roli ekspansywności.

Podsumowując ogólną ocenę rozprawy uważam, że zastosowane przez Doktoranta **metody badań są właściwe, a główne cele badawcze jednoznacznie precyzyjnie określone**. Wskazują na opanowanie zasad metody naukowej w analizie fizycznej odkształcalności ekspansywnego podłoża, wyborze i uzasadnieniu celu, metodyk roboczych a także ich modeli numerycznych. Opracowany algorytm jest uniwersalny, powstał w oparciu o program *Midas GTSNX*, do analiz obiektów kubaturowych i nie ogranicza się tylko do silosów. Elementy algorytmu oraz metodyka postępowania są wspólne z większością programów.

Podjęty temat dysertacji mieści się w badawczo-aplikacyjnym kierunku, stanowiąc istotną część współczesnej analizy problemów fizyko-mechanicznych identyfikacji podłoża ekspansywnych metodą wsteczną o wysokiej wartości naukowej i projektowej w geoinżynierii.

Zagadnienie naukowe zostało rozwiązane w nowoczesny sposób na aktualnym poziomie wiedzy, z wykorzystaniem szerokiej znajomości literatury (cytowano 159 najistotniejszych i najnowszych pozycji), w tym z zakresu geologii, modelowania geotechnicznego, analizy wstecznej, posadowienia i identyfikacji procesów deformacji, mechaniki gruntów, podatności podłoża przy wymiarowaniu płyt fundamentowych i problem obciążenia i odciążenia podłoża ekspansywnego.

### 3. Ocena rozprawy doktorskiej

#### 3.1. Uwagi formalne

W zasadzie nie zauważa się w rozprawie błędów formalnych. Do nieistotnych uchybień zaliczam: pojedyncze uchybienia redakcyjne i pisarskie. Bez trudu mogą być one skorygowane podczas przygotowania publikacji.

Widoczna jest duża dbałość o stronę edycyjną rozprawy, rysunki są czytelne i wyraźne, dobrze wpisane w tekst wywodu.

Ogólnie tekst rozprawy napisanym komunikatywnym językiem.

#### 3.2. Uwagi merytoryczne

Rozprawę doktorską mgr Miłosza Justa pt.: „*Ocena odkształceń wybranych gruntów spoistych wyznaczonych metodą analizy wstecznej z zastosowaniem metody elementów skończonych*”, można podzielić na trzy zasadnicze części. Rozdziały 2, 3 i 4, które stanowią formę teoretycznej analizy stanu aktualnego wykazują **bardzo dobry poziom znajomości literatury** z zakresu modelowania i analizy numerycznej środowiska gruntowego.

Pierwsza część obejmuje rozdział 2, łącznie 35 stron, i stanowi odniesienie do literatury przedmiotu oraz podstaw modelowania podłoża, sprężyste właściwości materiału, teorię plastyczności w ujęciu mechaniki gruntów. W rozprawie każde odniesienie do cykliczności jest w domyśle quasi cyklem. Grunt spoisty, jest skomplikowanym materiałem, zachowujący się pod obciążeniem w sposób nieliniowy, anizotropowy oraz zmienny w czasie. Gryczmański (1995) podzielił modele konstytutywne na trzy generacje. Przy posadowieniu obiektów na gruntach spoistych istotnym czynnikiem jest przedział czasowy. Stąd, w analizie całkowitego osiadania podłoża gruntowego dany ośrodek lub obiekt jest poddawane naprzemiennie cykлом obciążania i odciążania, co w przypadku gruntów ma kolosalne znaczenie w analizie przemieszczeń silosu. Obciążając silos dochodzi do deformacji trwałych (plastycznych), zaś przy odciążaniu (opróżnianiu silosu), powraca do pierwotnego stanu w

niepełnym wymiarze, realizując część odkształceń odwracalnych (sprężystych). Relacja opisująca zachowanie materiału podczas obciążania oraz odciążania musi być odmienna.

Metodę Elementów Skończonych (*MES*) w dysertacji przyjęto właściwie, jako metodę badawczą analizy wstecznej, rys. 2.27. Analizy wykonano na dwóch modelach – trójwymiarowym, w których przeprowadzono szereg wariantowych, nieliniowych analiz naprężenia oraz osiowo symetrycznym. Potwierdzono skuteczność zastosowania modelu konstytutywnego *SCLAY-1S*, w kontekście analiz właściwości geotechnicznych. Uzyskano istotność modelowania nadziemnej części wysokiego obiektu budowlanego, a także opis modelu pracy pali za pomocą funkcji transformacyjnych.

Na podstawie w pełni sprężonej, analizy naprężenia i przepływu określono przemieszczenia silosu w czasie oraz zweryfikowano ich zbieżność z wynikami monitoringu geodezyjnego, przy opisie podłoża gruntowego różnymi modelami konstytutywnymi.

Z analizy literatury wynika zaskakujący fakt, że mimo zaawansowania postępu w odkrywaniu problematyki dotyczących małych odkształceń, nie przekłada się na przypadek obciążeń cyklicznych, (Jastrzębska, 2010). *Czy wysunięta teza, że pominięcie w teorii małych odkształceń, pozbawia ją kompletności i oczekiwanej ogólności, mając na uwadze przypadek modelowania cyklicznego obciążenia silosu posadowionego na łożach ekspansywnych?*

Omawianą część rozprawy uważam za właściwie i dobrze napisaną, nie wnoszę uwag odnoszących się do merytorycznej narracji Doktoranta, przedstawionej w rozdziale 2.5.

Część doktoratu (rozdział 3) przedstawia opisowo współpracę fundamentu płytowo-palowego z podłożem gruntowym. Wymienia Doktorant metody badań, z rozdzieleniem na badania terenowe i badania laboratoryjne, dane eksperymentalne metody i wyniki analiz szczegółowych. Spełnia wymogi dotyczące parametryzacji gruntu w modelu *S-CLAYIS*, określając np.:

- zmienne stanu początkowego, naprężenie prekonsolidacyjne, stopień prekonsolidacji,
- parametry izotropii sztywności gruntu,
- parametry pełzania, zmodyfikowany wskaźnik pełzania oraz czas referencyjny,
- parametry stanu krytycznego, opór gruntu jest idealnie tarcowy i może być scharakteryzowany kątem tarcia wewnętrznego w stanie krytycznym  $\varphi'_{cs}$  lub  $\varphi'_{cv}$ ,
- anizotropia gruntów istnieje kilka rodzajów anizotropii, jednak najczęściej uwzględnianym rodzajem w sytuacji obliczeniowej jest anizotropia naprężenia, lub inaczej - anizotropia indukowana naprężeniem,
- anizotropia mikrostruktury – destrukcja gruntu, związana jest ze zniszczeniem mikrostruktury i powrotem do stanu, gdzie dominuje anizotropia naprężenia.

Zasadniczą częścią dysertacji jest zestawienie opracowanych wyników badań laboratoryjnych oraz identyfikacja parametryczna podłoża łożów mio-pliocenów serii poznańskiej, (podpunkty 4.3.2., ekspansywność, 4.3.3., 4.5.1., parametry geotechniczne). Dzięki możliwości dostępu do bogatych archiwum zgromadzonych w firmach, wyników analiz wykonanych na łożach serii poznańskiej oraz związkom korelacyjnym parametrów fizycznych i mechanicznych, zostały przez Doktoranta sprecyzowane wartości liczbowe wiodących parametrów. Wprowadzono je następnie do programu *GTS NX*, w którym przeprowadzono wariantowe analizy numeryczne silosu w celu weryfikacji skuteczności modelu konstytutywnego, podpunkt 4.5.3.

Wykonano niezależnie badania geotechniczne i dokumentację geologiczno-inżynierską, Opinię Geotechniczną do posadowienia silosu, badając podłoże gruntowe do 25 m głębokości. Wykonany kompleks badań określił wartości liczbowe parametrów geotechnicznych. Sporządzono szereg specjalistycznych map i przekrojów geotechnicznych,

jakie wymagane są pod posadowienie silosu w Gostyniu (GT Projekt Poznań). Ustalono warunki gruntowo-wodne jako skomplikowane i odpowiednią kategorię geotechniczną.

Doktorant zestawiał określone zbiory wyników badań, na podstawie zależności korelacyjnych np.: prof. J. Przysańskiego (1990) oraz sondowania statycznego SPTU. Opory graniczne podstawy pali wyznaczono z sondowania statycznego CPT i CPTu, wg propozycji prof. K. Gwizdały (2011), podpunkt 3.3.3.

Można zatem uznać, że do budowy modelu numerycznego **Doktorant dysponował pełną pulą wyników wysokiej jakości** o stanie i wartościach liczbowych parametrów geotechnicznych podłoża niezbędnych do określenia *odpowiedzi* gruntu, opisanego modelem *SCLAYIS*.

Podsumowując uważam, że rozprawa stanowi **nowoczesne i oryginalne opracowanie problemu badawczego** dotyczącego opisu istoty empirycznie kształtowanych odkształceń trójfazowego ekspansywnego podłoża gruntowego wraz z rozwiązaniem analitycznym metodą analizy wstecznej.

Jest jedną z pierwszych propozycji rozwojowych, zbudowana niemal podręcznikowo, możliwa do stosowania, wykonana na bazie krajowych warunków geotechnicznych.

#### 4. Ocena rozprawy

Inspiracja podjętego tematu rozprawy doktorskiej mgr inż. Miłosza Just pt.: „*Ocena odkształceń wybranych gruntów spoistych wyznaczonych metodą analizy wstecznej z zastosowaniem metody elementów skończonych*”; wynika z dobrej znajomości problemów metody elementów skończonych, metody analizy wstecznej oraz wiedzy o problemach geologii osadów ekspansywnych serii poznańskiej, i własnych zainteresowań badawczych oraz współpracy ze specjalistami o uznanym w kraju dorobku, a także pozycji środowiska naukowego Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Poznańskiej i wiodących firm geotechnicznych z Poznania.

Analizy silosu wykonano na podstawie dwóch modeli numerycznych stworzonych z użyciem *Metody Elementów Skończonych* w programie *Midas GTS NX 2019*, który służy do analizowania i rozwiązywania skomplikowanych zagadnień geotechnicznych. Analizy numeryczne przeprowadzono na trójwymiarowym modelu, nieliniowe analizy naprężenia, z podziałem na poszczególne fazy budowy oraz na modelu osiowosymetrycznym, zrealizowano w pełni sprzężone analizy przepływu i naprężenia (*fully coupled stress seepage*) w czasie.

Na etapie projektowania silosu założono system monitoringu geodezyjnego osiadania płyty fundamentowej oraz podłoża w bezpośrednim sąsiedztwie silosu, na czas budowy i eksploatacji. Monitoring rozpoczął się w sierpniu 2013 roku i obejmował 12 reperów – 6 na słupach kondygnacji technologicznej. Najważniejsze odczyty, z punktu widzenia analizy wstecznej, były wykonywane w trakcie normalnej eksploatacji. Wykonanie odczytów obejmowało minimum pięć pierwszych cykli napełniania i opróżniania, a następnie przy opróżnianiu silosu, tj. przy napełnieniu i po opróżnieniu i przy napełnieniu 0,5; 0,25, 0,75 i po opróżnieniu, rys. 5.4. i 5.7.

Na wykresie można zauważyć bardzo dynamiczny wzrost osiadania w początkowym etapie pracy silosu, zaraz po wybudowaniu i pierwszym jego napełnieniu.

Celem numerycznej analizy wstecznej było uzyskanie jak największej zbieżności z wartościami przemieszczeń pionowych oraz wpasowaniu map przemieszczeń pionowych z izoliniami, przedstawionymi za pomocą wykresu na rysunku 5.7.

Trójwymiarowy model numeryczny zawierał 225627 elementów, elementy skończone posiadały 223229 węzłów. Geometria silosu została odwzorowana zgodnie z projektem posadowienia silosu oraz części nadziemnej.

W analizie numerycznej posłużono się modelami konstytutywnymi i wyznaczono parametry pięciu modeli:

1. *Modelu Modified Mohr Coulomb (Hardening Soil)*;
2. *Modelu Hardening Soil - Small strain stiffness*;
3. *Modelu Modified Cam-Clay*;
4. *Modelu Soft Soil Creep*;
5. *Modelu SCLAYISIS*.

1. **Nieliniowe modele zasadnicze drugiej generacji** - *Modified Mohr Coulomb (MMC)* oraz *Hardening Soil Small Strain Stiffness (HSs)*. Modele opisujące nieliniowe zachowanie sprężyste oraz plastyczne z eliptycznym ograniczeniem powierzchni plastyczności (*cap*), z opcjonalnym wzmocnieniem (*hardening*). Model *Hardening Soil*.
2. **Nieliniowy model stanu krytycznego (drugiej generacji)** - *Modified Cam-Clay*, będący jednym z najstarszych i najszerzej stosowanych modeli do opisu gruntów spoistych. Model bazuje na teorii stanu krytycznego, odwzorowując w sposób przestrzenny zachowanie gruntu podczas jednoosiowego testu edometrycznego. Model uwzględnia "pamięć" gruntu w historii obciążenia.
3. **Zaawansowany model do opisu ilu SCLAYIS**, opisany w rozdziale 2 i 4. Model posiadający 3 wzmocnienia - wzmocnienie związane z plastycznymi odkształceniami objętościowymi tożsamy z modelem *Modified Mohr Coulomb*, wzmocnienie opisujące zmianę nachylenia krzywej plastyczności określonej przez odkształcenia plastyczne (objętościowe i ścinania), a także wzmocnienie związane z restrukturyzacją, czyli degradacją wiązań, wynikających z odkształceń plastycznych. Model również uwzględnia pełzanie, co w gruntach o bardzo powolnym czasie reakcji, gdzie udział odkształceń reologicznych ma duże znaczenie, jest niezwykle istotne.
4. **Model będący zbliżoną, starszą wersją modelu SCLAYISa** opartą na tych samych założeniach - *Soft Soil Creep*. Jest to model uwzględniający część wzmocnień *SCLAYIS*, jak również anizotropię gruntu oraz lepko-plastyczne odwzorowanie zjawiska pełzania.

Warianty analizy wstecznej ujmowały pomiary monitoringu geodezyjnego przemieszczeń reperów, których odczyty były wykonywane na przestrzeni blisko dziesięciu lat.

Za główne osiągnięcia naukowe Rozprawy mgr inż. Miłosza Just należy uznać:

• **Algorytm wiarygodnej analizy numerycznej posadowienia silosów.**

Jest to propozycja Doktoranta pozwalająca na bezpieczne oszacowanie osiadania, optymalizację posadowienia, w oparciu o wyniki analizy oraz predykcję zachowania konstrukcji silosów w czasie.

Algorytm podzielono na trzy części. **Część pierwsza**, związana jest z opracowaniem danych wyjściowych oraz budową modelu do każdego typu analizy w modelu przestrzennym. **Część druga**, dotyczy modelowania materiałów, warunków brzegowych oraz obciążeń. **Część trzecia**, dotyczy modelowania ustawienia warunków kontrolnych analizy i jest podzielona według typów analizy na nieliniową analizę naprężenia oraz w pełni sprzężoną analizę naprężenia i przepływu. *Część pierwsza algorytmu silosu przedstawiona jest na rysunku 5.45, część druga na rysunku 5.46, część trzecia na rysunku 5.47.*

Jak wskazuje analiza Rozprawy, założone cele zostały zrealizowane, a problematyka badań i zastosowanych metod badawczych pozwoliły na sformułowanie **oryginalnych i ważnych praktycznie** wniosków szczegółowych przedstawionych wg kolejności znaczenia:

1. *Wpływ ilów serii poznańskiej pomimo znacznej głębokości ich stropu, na osiadania silosu jest znaczący i istotny, co potwierdzono wynikami wszystkich analiz, zarówno na modelu przestrzennym, jak i osiowosymetrycznym.*



2. *Zastosowanie w pełni sprzężonej analizy naprężenia i przepływu pozwala na uwzględnienie czasu, który jest kluczowy w modelowaniu reakcji gruntu na obciążenia cykliczne, charakteryzujące się długim okresem i znaczną amplitudą. Możliwe jest określenie przemieszczeń związanych z odkształceniami sprężystymi i plastycznymi w każdym cyklu obciążenia i odciążenia w czasie.*
3. *Opis całego podłoża gruntowego modelem konstytutywnym **Hardening Soil Small Strain Stiffness**, uwzględniającym charakterystykę zmian sztywności w zakresie małych odkształceń, w nieliniowych analizach naprężenia daje **wyniki najbardziej zbliżone z rzeczywistymi przemieszczeniami fundamentu budowli.***
4. *W pełni sprzężonych analizach naprężenia i przepływu, czynnik czasu odgrywa zasadniczą rolę, zastosowanie modelu **Hardening Soil Small Strain Stiffness** do opisu wszystkich gruntów za wyjątkiem utworów spoistych, opisanych modelem **SCLAYIS**, pozwala na otrzymanie wyników przemieszczeń najbardziej zbliżonych z rzeczywistymi.*
5. *We wszystkich wariantach analizy wykazano istotnie zawyżone przemieszczenia przy zamodelowaniu podłoża gruntowego za pomocą modelu **Modified Mohr Coulomb**, stwierdzając brak zbieżności z mapą przemieszczeń rzeczywistych silosu.*

Pozostałe wnioski końcowe są dobrze udokumentowane badaniami i analizą wyników - stanowią oryginalne rozwiązanie Doktoranta, które mają walory praktyczno-naukowe i zastosowanie bezpośrednio w zagadnieniach naukowych wyznaczających dalsze obszary poszukiwań oraz w praktyce modelowania geotechnicznej. W budowlach, których geometrię można wyrazić za pomocą bryły obrotowej, analiza oparta na modelu osiowosymetrycznym (zamiast trójwymiarowym) skutecznie ogranicza jego wielkość, przez co również liczbę równań niezbędnych do przeliczenia przez program.

Jednocześnie, na przykładzie rzeczywistego silosu wykazano, iż wyniki uzyskane za pomocą analizy numerycznej na modelu osiowosymetrycznym, przy użyciu odpowiednich modeli konstytutywnych do opisu podłoża, nie wykazały istotnej rozbieżności w porównaniu z wynikami uzyskanymi na modelu przestrzennym.

## **5. Zakończenie podsumowujące**

Osiągnięciem zasadniczym rozprawy doktorskiej w zakresie modelowania numerycznego w geoinżynierii układu: *obiekt – fundament - podłoże gruntowe*, jest oryginalny autorski **algorytm wiarygodnej analizy numerycznej posadowienia silosów.**

Rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata **w dziedzinie nauki inżynierijno-techniczne, w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport** oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Miłosza Just jest wykonana w sposób samodzielny w zakresie zastosowania metod numerycznych i analizy geotechnicznej podłoża ekspansywnego. Jest istotnym rozszerzeniem problemu w odniesieniu do aktualnego stanu wiedzy i zastosowań w zagadnieniach praktycznych.

Uogólniając uważam, że zasadnicze wnioski w rozprawie są oryginalne, właściwe i syntetyzują wyniki analiz numerycznych, podsumowując osiągnięcie **Algorytmem wiarygodnej analizy numerycznej posadowienia silosów**, potwierdzonym w warunkach empirycznego eksperymentu, w sposób przydatny w dziedzinie nauk inżynierijno-technicznych.

Wyniki analiz i badań są przedstawione poprawnie z punktu widzenia teoretyczno-logicznego i twórczej samodzielności Doktoranta.

## 6. Wniosek

Stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Miłosza Just pt.: „*Ocena odkształceń wybranych gruntów spoistych wyznaczonych metodą analizy wstecznej z zastosowaniem metody elementów skończonych*”, w **dziedzinie: nauki inżynierijno-techniczne w dyscyplinie: inżynieria lądowa, geodezja i transport**, napisana pod promotorstwem dr hab. Katarzyny Machowiak profesora uczelni i dr inż. Andrzeja Wojtasika, spełnia wymogi *Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z późn. zm.)*, bowiem jest oryginalnym połączeniem przez Autora interdyscyplinarnych zagadnień naukowych z zakresu geologii i inżynierii geotechnicznej, i modelowania numerycznego odkształceń, potwierdza ogólną wiedzę teoretyczną w **dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport** oraz umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Wniosuję o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.

*Bydgoszcz, 15 czerwca 2023 roku.*