

Wpłynęło
do Biura Wydziału WILiŚ
dn. 5.01.2026
L.dz. 3 odpis b/wan

Dr hab. inż. Zenon Szypcio, Prof. PB

Białystok, 22.12.2025 r.

Politechnika Białostocka

Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku

ul. Wiejska 45E

15-351 Białystok



RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Katarzyny Lisewskiej

nt. „*Modelling anisotropic mechanical properties of stiff soils*”

1. Podstawa formalna

Recenzja została opracowana na prośbę Pani prof. dr hab. inż. Ewy Wojciechowskiej, Dziekan Wydziału Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej zawartej w piśmie I.dz.813/WILiŚ/2025 z dn. 23.10.2025 r. Podstawę formalną recenzji stanowi uchwała Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa Geodezja i Transport Politechniki Gdańskiej nr 86/2025 z dnia 8 października 2025 r. o powołaniu mnie na recenzenta rozprawy doktorskiej mgr inż. Katarzyny Lisewskiej nt. „*Modelling anisotropic mechanical properties of stiff soils*”.

2. Problematyka rozprawy

Problematyka rozprawy dotyczy modelowania mechanicznych właściwości gruntów anizotropowych o dużej sztywności. Procesy geologiczne którym podlegały grunty w swojej historii, w szczególności historii obciążenia i odkształcenia z reguły generują ich anizotropię. Bardzo rzadko spotykane są izotropowe grunty drobnoziarniste w stanie naturalnym. Nawet grunty gruboziarniste, w wielu przypadkach, wykazują naturalną anizotropię. Grunty spoiste, drobnoziarniste, prawie zawsze w stanie naturalnym są anizotropowe. Rozwój metod eksperymentalnych w ostatnich dziesięcioleciach umożliwia wyznaczanie parametrów mechanicznych gruntów anizotropowych w badaniach laboratoryjnych na próbkach o nienaruszonej strukturze i w badaniach polowych. Główną trudnością jest opis zależności naprężenie - odkształcenie dla tych gruntów za pomocą modeli konstytutywnych. W modelowaniu gruntów dąży się do minimalizacji liczby parametrów modelu, które mają prostą interpretację fizyczną i mogą być wyznaczone w niezbyt skomplikowanych badaniach laboratoryjnych.

2

W ostatnich latach zaproponowano wiele modeli opisujących realistycznie zależności naprężenie-odkształcenie gruntów przy różnych ścieżkach naprężenia i odkształcenia. Ciekawym przykładem takich modeli o małej liczbie parametrów jest model AHEBrick wykorzystany do opisu gruntów drobnoziarnistych o dużej sztywności w recenzowanej rozprawie. Zwykle poprawność modelu weryfikuje się na zagadnieniach elementarnych i wykorzystuje później do rozwiązywania rzeczywistych, często skomplikowanych zagadnień inżynierskich. Przy rozwiązywaniu tych zagadnień konieczne jest użycie profesjonalnych, sprawdzonych, programów komputerowych. Program PLAXIS jest najczęściej wykorzystywany do rozwiązywania skomplikowanych zagadnień geotechnicznych. Klasyczne przykłady skomplikowanych zagadnień geotechnicznych to: stateczność i odkształcenia głębokich wykopów z uwzględnieniem generowanego wykopem przepływu wody gruntowej, podparcie ścian głębokiego wykopu, współpraca konstrukcji zagłębionej w gruncie np. tunelu z otaczającym go gruntem. Konieczność optymalizacji kosztów, zagadnienia bezpieczeństwa budowli na etapie jej budowy i eksploatacji są nadal wyzwaniem nie tylko z inżynierskiego ale również naukowego punktu widzenia.

Zatem problematyka rozprawy jest bardzo aktualna z naukowego i inżynierskiego punktu widzenia.

3. Treść rozprawy

Recenzowana rozprawa napisana jest języku angielskim, liczy 169 stron łącznie z streszczeniami w języku angielskim i polskim, spisem treści, listą symboli wykorzystanych w rozprawie i spisem literatury. Spis literatury liczy 180 pozycji literaturowych. Doktorantka jest współautorem trzech artykułów. W jednym z artykułów jest autorem głównym a w pozostałych współautorem. Dwa artykuły są już opublikowane zaś jeden jest przesłany do Acta Geotechnica do publikacji.

W rozdziale 1 przedstawiono motywację podjęcia tematyki rozprawy, cel, zakres i krótko omówiono treść poszczególnych rozdziałów rozprawy. Celem rozprawy jest wykazanie, że model AHEBrick, uwzględniający wpływ poziomego naprężenia i krzyżowej anizotropii gruntu może być wykorzystany do opisu zależności naprężenie-odkształcenie anizotropowych gruntów o dużej sztywności. Dla małych odkształceń grunt zachowuje się jak materiał hipersprężysty zaś dla średnich odkształceń moduł sztywności maleje wraz z odkształceniem. Po osiągnięciu stanu granicznego do opisu

zachowania się gruntu wykorzystany jest model Coulomba-Mohra. Użycie tego modelu z wykorzystaniem programu PLAXIS daje możliwość realnego opisu naprężeń i odkształceń gruntu w zagadnieniach elementarnych i bardzo skomplikowanych zagadnieniach brzegowych geotechniki.

W rozdziale 2 szczegółowo opisano różne możliwości opisu nieliniowego zachowania się gruntów, w szczególności gruntów anizotropowych, w zakresie małych odkształceń. Zwrócono uwagę na degradację sztywności wraz ze wzrostem odkształceń oraz wpływ poziomego naprężenia na sztywność.

W rozdziale 3 szeroko opisano anizotropię gruntów drobnoziarnistych oraz jej źródła. Przedstawiono zwięzłe laboratoryjne i polowe możliwości identyfikacji i opisu anizotropii.

W rozdziale 4 przedstawiając krótko różne modele konstytutywne pokazano jak poszczególne parametry modeli wpływają na odkształcenia jednostkowego elementu. Rysunki w tym rozdziale są bardzo czytelne ułatwiające czytelnikowi poznanie możliwości poszczególnych modeli.

W rozdziale 5 opisano model AHEBrick. Szczegółowo opisano założenia modelu w zakresie małych, średnich i dużych odkształceń oraz podstawową implementację tego modelu do PLAXISa opracowaną przez Brinkgreve i innych w 2019 roku. Ta implementacja wykorzystana była przez Doktorantkę do rozwiązania wybranych zagadnień geotechnicznych. W zakresie małych odkształceń model AHEBrick opisany jest pięcioma parametrami: G_0^{ref} , β , p_{ref} , c_1 i c_2 . Degradacja sztywności gruntu wraz ze wzrostem odkształceń jest opisana krzywą typu S, której kształt i nachylenie zależy od parametru modelu $\|\epsilon\|_{sh}$. Aktualna sztywność zależy od całkowitego uogólnionego odkształcenia reprezentowanego przez liczbę aktywnych „cegiełek”. Warunek stanu granicznego Coulomba-Mohra przyjęty jest jako ograniczenie hipersprężystych właściwości gruntów. Moduł sztywności dla takiego stanu naprężenia ma minimalną wartość G_{min}^{ref} . W rozdziale 5 zestawiono wszystkie parametry modelu (Table 5.1) oraz algorytm implementacji tego modelu do PLAXISa (Box 5.1).

W rozdziale 6, zdaniem recenzenta najważniejszym, pokazano możliwości modelu do opisu zagadnień elementarnych i wybranych zagadnień inżynierskich. Dla badań trójosiowego ściskania walcowej próbki w warunkach z drenażem i bez drenażu pokazano wpływ podstawowych parametrów modelu (α_G , β , $\|\epsilon\|_{sh}$) na naprężenia i odkształcenia w próbce gruntu o krzyżowej anizotropii. Dla izotropowo i anizotropowo

konsolidowanych próbek gruntu ściskanych w warunkach pełnego drenażu pokazano wpływ ścieżki obciążenia na zmiany sztywności jako funkcje α_G . Sztywność obrazowana jest odległością pomiędzy izoliniami całkowitego uogólnionego odkształcenia. Ponadto, badano wpływ historii naprężenia na degradację modułu sztywności gruntu o krzyżowej anizotropii. Analizując zagadnienia elementarne pokazano, że model AHEBrick dobrze opisuje zachowanie się różnych, szeroko opisanych w literaturze, glin przy trójosiowym ściskaniu w warunkach bez drenażu. Pokazano, że parametry modelu można stosunkowo łatwo wyznaczyć analizując wyniki badań próbek gliny o różnej orientacji kierunków anizotropii. W dalszej części rozdziału 6 przedstawiono rozwiązania skomplikowanych zagadnień geotechniki wykorzystując model AHEBrick i jego implementację do PLAXISa. Analizując współpracę płytkiego i głębokiego tunelu z otaczającym gruntem jako zagadnienie płaskie pokazano, że parametr α_G ma istotny wpływ na przemieszczenia pionowe i poziome w gruncie. Wpływ ten zależy od odległości od konstrukcji tunelu. Zagadnienie współpracy konstrukcji tunelu z gruntem rozwiązano jako zagadnienie przestrzenne 3D badając wpływ czoła tunelu. Poza tym analizowano odkształcenia dna i skarp głębokiego wykopu oraz przemieszczenia gruntu w jego sąsiedztwie. Następnym, ciekawym zagadnieniem analizowanym w tym rozdziale rozprawy jest współpraca konstrukcji podpierającej pionową ścianę wykopu w różnych fazach jego wykonania. Pokazano istotny wpływ anizotropii gruntu i stanu początkowego naprężeń na przemieszczenia i momenty zginające w konstrukcji.

W rozdziale 7 przedstawiono weryfikację modelu AHEBrick rozwiązując opisane w literaturze rzeczywiste zagadnienia współczesnej geotechniki (*case study*). Wykazano, że dla wszystkich analizowanych przypadków otrzymane z obliczeń wielkości przemieszczeń są zgodne z rzeczywistymi. Dowodzi to, że model AHEBrick może być stosowany do rozwiązywania skomplikowanych zagadnień współczesnej geotechniki.

4. Ocena merytoryczna

4.1 Uwagi krytyczne

- W zaproponowanej przez Brikgreve i innych (2019) implementacji modelu AHEBrick do programu komputerowego PLAXIS w zakresie małych odkształceń wymaganych jest 5 parametrów (G_0^{ref} , β , p_{ref} , c_1 , c_2 ; Tab. 5.1), zaś

w rozprawie dla tego zakresu odkształceń przyjęto 4 parametry (G_{vh}^{ref} , β , α_G , p_{ref} ; Tab.6.1). Zatem na początku rozdziału 6 należało pokazać jakie są zależności pomiędzy tymi parametrami.

- Zbyt mało uwagi poświęcono modelowaniu gruntów po osiągnięciu stanu granicznego. W pracy podano parametry modelu Coulomba-Mohra (ϕ , c , ψ , p_{te}). Moim zdaniem należało nieco szerzej omówić ten problem.
- Gliny o dużej sztywności wykazują zwykle pewną wytrzymałość przy izotropowym rozciąganiu a w analizach prezentowanych w rozprawie przyjęto $p_{te} = 0$ lub 1 kPa.
- Dla różnych gruntów o G_{vh}^{ref} od 50 do 157,3 MPa przyjęto $p_{ref} = p_a = 100$ kPa. To sugeruje, że możliwa jest redukcja parametrów modelu w zakresie małych odkształceń.
- Prezentując wyniki analiz przedstawiano liczbę aktywnych „cegiełek” jako sumaryczne uogólnione odkształcenie. Moim zdaniem, prezentacja kierunków naprężeń głównych lub odkształceń głównych byłaby bardziej wskazana. Bezpośrednie sąsiedztwo elementów o dużej różnicy aktywnych „cegiełek” (np. Fig. 6.17, 6.18) może budzić pewien niepokój.
- Wyniki obliczeń numerycznych zależą nie tylko od wybranego modelu i jego parametrów ale również elementów kontaktowych, typu wybranego elementu, gęstości przyjętej siatki i wielkości analizowanego obszaru.

4.2. Uwagi szczegółowe i dyskusyjne

- W streszczeniu w języku polskim użyto sformułowania „testy elementowe”. Zdaniem recenzenta powinno się być „zagadnienia elementarne”.
- Z treści rozprawy i podpisów niektórych rysunków nie jest możliwe określenie ich autorstwa (np. Fig. 4.3, 4.8).
- Niefortunnie użyto litery K do oznaczenia modułu sprężystości objętościowej i stosunku naprężeń poziomych do pionowych ($K = \sigma_h / \sigma_v$).
- Analizując rzeczywiste zagadnienia (case study) należało jaśniej przedstawić, które parametry modelu wyznaczono z badań danego gruntu, a które z analizy wstecznej.

25

- W analizach przyjęto maksymalną liczbę 10 „cegiełek” do opisu degradacji modułu sztywności. Sądzę, że dla zagadnień elementarnych można było analizować wpływ ilości „cegiełek” na wynik obliczeń.
- Przedstawienie algorytmu obliczeń i rysunków obrazujących wpływ parametrów modelu na odkształcenia próbki ściskanej trójosiowo w warunkach bez drenażu i z drenażem byłoby pomocne w zrozumieniu zalet tego modelu.
- W rozprawie nie zasygnalizowano kierunków dalszych badań dotyczących potrzeby modyfikacji modelu i ograniczeń jego stosowania dla gruntów o mniejszej sztywności.

5. Podsumowanie

Pomimo pewnych uwag, recenzowaną rozprawę mgr inż. Katarzyny Lisewskiej nt. „*Modelling anisotropic mechanical properties of stiff soils*” oceniam bardzo pozytywnie. Uważam, że rozprawa stanowi cenny wkład w zakresie modelowania anizotropowych gruntów o dużej sztywności. W szczególności doceniam wykazaną znajomość najnowszych trendów modelowania i opisu anizotropowych właściwości gruntów oraz wykorzystanie modelu AHEBrick do analizy zagadnień elementarnych i skomplikowanych zagadnień współpracy gruntu z konstrukcją. Wszystkie analizowane zagadnienia poprawnie sformułowano, a otrzymane rozwiązania prawidłowo omówiono.

Rozprawa jest oryginalnym osiągnięciem naukowym Doktorantki spełniającym wymagania stawiane w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.

Wnoszę o dopuszczenie Pani mgr inż. Katarzyny Lisewskiej do publicznej obrony recenzowanej rozprawy doktorskiej.

Jednocześnie wnoszę o wyróżnienie rozprawy. O wysokim poziomie naukowym rozprawy świadczy fakt opublikowania częściowych osiągnięć w renomowanych czasopismach naukowych. Doktorantka jest głównym autorem artykułu „Influence of soil anisotropic stiffness on the deformation induced by open pit excavation” w *Archives of Civil Engineering*, 2023 (100 pkt, IF(2024)=1,0). Jest współautorem artykułu “Modelling tunnelling-induced deformation in stiff soils with a hyperelastic-plastic anisotropic model”, 2024, *Acta Geotechnica* (140 pkt, IF(2024)=5,7). Ponadto, jest współautorem artykułu “Incorporation of cross-anisotropic small-strain stiffness into

Hardening Soil model” przesłanym do publikacji w Acta Geotechnica. Doktorantka nie tylko dobrze zna zagadnienia modelowania anizotropowych gruntów, ale również potrafi rozwiązywać skomplikowane zagadnienia współczesnej geotechniki. Uważam, że spełnione są warunki wyróżniania rozpraw doktorskich sformułowane w „Regulaminie wyróżniania rozpraw doktorskich, Politechnika Gdańska. Dyscyplina Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport”.

.....
Lenon Szypcio