Warszawa, dnia 09.04.2024 r.

Prof. dr hab. inż. Andrzej Garbacz
Politechnika Warszawska
Wydział Inżynierii Lądowej
Armii Ludowej 16
00-637 Warszawa

RECENZJA
rozprawy doktorskiej pt.
„ZASTOSOWANIE BETONU POROWATEGO Z KRUSZYWEM Z RECYKLINGU DO WYKONYWANIA PALI FUNDAMENTOWYCH”
autorstwa mgr. inż. Oskara Mitrosza

1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawę opracowania recenzji stanowi Uchwała nr 11/2026 Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Gdańskiej z dnia 04.02.2026 roku informujące o powierzeniu mi funkcji recenzenta rozprawy doktorskiej.

2. Przedmiot recenzji

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Oskara Mitrosza pt. „Zastosowanie betonu porowatego z kruszywem z recyklingu do wykonywania pali fundamentowych” przygotowana na Politechnice Gdańskiej w ramach szkoły doktorskiej wdrożeniowej. Promotorem rozprawy doktorskiej jest dr hab. inż. Mikołaj Miśkiewicz, prof. PG, a promotorem pomocniczym dr inż. Marzena Kurpińska.

Rozprawa liczy 200 stron wydruku komputerowego, zawiera 85 rysunków oraz 32 tabele. Spis literatury zawiera 247 pozycji, w większości angielskojęzyczne, w tym normy, wytyczne i akty prawne, które zostały wykorzystane przy przygotowywaniu rozprawy.

3. Ogólna charakterystyka rozprawy

Praca ma typowy układ rozprawy doktorskiej. Treść rozprawy została ujęta w 5 rozdziałach.

Rozdział 1 pt. „Wstęp” zawiera 4 punkty: 1.1.„Motywacja”, 1.2 „Cel pracy”, 1.3. „Teza pracy” i 1.4. „Struktura pracy”. Geneza podjętych badań została jasno określona jako „….dążenie do opracowania i wdrożenia nowego typu pali fundamentowych – ekologicznych, technologicznie

zaawansowanych i konkurencyjnych kosztowo…". W punkcie 1.2. został określony cel nadrzędny oraz 5 celów szczegółowych, a następnie w p.1.3 została sformułowana teza, a w punkcie 1.4 syntetycznie scharakteryzowano zawartość poszczególnych rozdziałów pracy.

W rozdziale 2 przedstawiono syntetyczny przegląd aktualnego stan wiedzy dotyczącego zastosowania betonu porowatego w budownictwie, ze szczególnym uwzględnieniem zastosowań geotechnicznych, w tym pali fundamentowych. Biorąc pod uwagę motywację podjętych badań Doktorant przedstawił na podstawie dostępnych danych literaturowych, również w sposób syntetyczny, podstawowe właściwości fizyczne i mechaniczne betonu porowatego, w tym wykorzystanie kruszyw i dodatków z recyklingu, a także technologie służące wzmacnianiu gruntów oraz podejścia do modelowania numerycznego pracy pali z betonu porowatego oraz ich reprezentacji w środowisku MES.

Rozdział 3 zawiera zestawienie wyników badań laboratoryjnych i terenowych dotyczących betonu porowatego przeznaczonego do wykonywania pali. Dotyczą one 2 programów badawczych. W pierwszym do ich wykonania stosowano cement CEM I oraz zamienniki kruszyw naturalnych w postaci gruzu betonowego, granulatu gumowego. Dodatkowo zastosowano włókna polimerowe. Pomimo pozytywnych wyników uzyskanych w warunkach laboratoryjnych, badania terenowe wykazały trudności podczas próby pompowania opracowanych mieszanek. Wymusiło to zmianę technologii wykonywania pali z betonu porowatego i w konsekwencji konieczność przeprowadzenie kolejnego programu badań laboratoryjnych i terenowych ze zmienionym składem mieszanki. Do ich przygotowania zastosowano oprócz cementu portlandzkiego CEMI (P1 i P3) również cementy wieloskładnikowe CEM II/B, co spowodowało dodatkowe obniżenie śladu węglowego. Zastosowanie opracowanych mieszanek w warunkach terenowych metodą wibrowymiany potwierdziło praktyczną przydatność tej technologii wbudowywania mieszanki betonowej w pale, a także możliwość sformułowania rekomendacji technologicznych oraz wskazanie kierunków dalszych prac związanych z wdrożeniem.

Oba programy zostały omówione w podobny sposób dzieląc je na dwa etapy: badania laboratoryjne oraz badania terenowe. W każdym przypadku badań laboratoryjnych omówiono syntetycznie zastosowane materiały, receptury mieszanek, metody badań oraz sformułowano wnioski z badań. Omówienie badań terenowych podzielono na opis badań polowych oraz podsumowanie doświadczeń wdrożeniowych.

W rozdziale 4 Doktorant przedstawił wyniki modelowania numerycznego MES referencyjnego typu nasypu drogowego na podłożu wzmocnionym przy zastosowaniu trzech technologii wzmocnienia z zastosowaniem: pali z betonu porowatego, kolumn z betonu konwencjonalnego, kolumn żwirowych w osłonie geotekstylnej oraz podłoża niewzmocnionego. Wielowariantowe eksperymenty numeryczne przeprowadzono przy zastosowaniu dwóch modeli MES: w układzie osiowo-symetrycznym i przestrzennym.

Posłużyły one do przeanalizowania wpływu filtracji na tempo konsolidacji podłoża oraz osiadanie nasypu. Na podstawie analizy porównawczej modeli 2D i 3D Doktorant sformułował rekomendacje dotyczące modelowania wzmacniania gruntu palami z betonu porowatego. Ostatni punkt tego rozdziału zawiera ocenę śladu węglowego i analizę emisyjności wybranych wariantów wzmacniania podłoża. Pozwoliły one na wskazanie rozwiązania materiałowego o najniższym wpływie środowiskowym.

Rozdział 5 zatytułowany „Wnioski końcowe" został podzielony na 3 punkty: 5.1. „Podsumowanie i wnioski", 5.2. „Weryfikacja tezy rozprawy", 5.3. „Kierunki dalszych badań". Punkt 5.1. stanowi obszerne podsumowanie wyników badań laboratoryjnych, terenowych i analiz numerycznych w rozdziałach 3 i 4. Na ich podstawie Doktorant w punkcie 5.2 uzasadnia udowodnienie postawionej tezy kierunków dalszych badań i analiz (p.5.3).

Podsumowując stwierdzam, że struktura rozprawy doktorskiej mgr. inż. Oskara Mitrosza nie budzi zastrzeżeń, układ rozprawy jest uporządkowany i logiczny, odpowiada typowym opracowaniom naukowym jakim są rozprawy doktorskie.

4. Ocena merytoryczna rozprawy

4.1. 0cena doboru tematu

Rozprawa doktorska mgr. inż. Oskara Mitrosza zdecydowanie wpisuje się w aktualne trendy rozwojowe inżynierii lądowej, w tym przypadku w problematykę innowacyjnych i przyjaznych środowisku rozwiązań materiałowo-konstrukcyjnych jakim jest wykorzystania pali wykonanych z betonu porowatego do wzmacniania podłoży z gruntów samonośnych.

Pomimo rosnącego zainteresowania betonem porowatym, analiza dostępnej literatury wskazuje na ograniczoną liczbę badań aplikacyjnych dotyczących jego wykorzystania w zastosowania geotechnicznych, a w technologii pali fundamentowych w szczególności. Beton porowaty z kruszywem z recyklingu wpisuje się w aktualne trendy wynikające z polityki klimatycznej i dążenia do wdrażania gospodarki cyrkularnej. Jednym z nich jest wykorzystywanie kruszywa z recyklingu. Z powyższych względów nie mam żadnej wątpliwości co do trafności wyboru tematu rozprawy.

Postawione zadanie badawcze nie jest proste. Wymaga bowiem opracowania właściwej receptury mieszanki betonowej, która umożliwi jej aplikację, a beton porowaty z niej otrzymany będzie miał właściwą struktury porów i jednocześnie odpowiednie właściwości wytrzymałościowe. Przedstawiony w pracy obszerny program badań laboratoryjnych i terenowych oraz symulacji MES jednoznacznie wskazuje na możliwość praktycznego wdrożenia opracowanych mieszanek do wzmacniania gruntów słabonośnych palami fundamentowymi z betonu porowatego zawierającego kruszywo z recyklingu.

4.2. Ocena strony naukowej rozprawy

Praca doktorska ma charakter eksperymentalno-analityczny. W pracy postawiono tezę badawczą, co nie jest częste w ostatnio przygotowanych rozprawach doktorskich. Doktorant postawił tezę, że *„Zastosowanie betonu porowatego do wykonywania pali fundamentowych umożliwia skuteczne wzmacnianie gruntów słabonośnych przy jednoczesnym pełnieniu funkcji drenażowej*". Teza jest jasna, ale sformułowana ogólnie i ma charakter jakościowy, aczkolwiek nosi znamiona oryginalnej. Nie ma określonych parametrów wskazujących co oznacza „skuteczne wzmocnienie". Wydaje się, że korzystniejsze byłoby najpierw sformułowanie tezy, a następnie określenie celu/celów pracy, które pozwolą udowodnić postawioną tezę. Byłby to też logiczne nawiązanie do motywacji pracy przedstawionej na początku rozdział pt. „Wstęp".

Rozdział 2 miał za zadanie wprowadzić do tematyki pracy i przybliżyć zarówno przyjęte rozwiązanie materiałowe betonu porowatego, jak i technologie wzmacniania gruntów, ze szczególnym uwzględnieniem pali z betonu porowatego. Krótko omówiono również i metody symulacji komputerowych wykorzystane w inżynierii geotechnicznej. Można uznać, że przedstawione w rozdziale informacje są wystarczające do zrozumienia podejścia badawczego omawianego w późniejszych rozdziałach. Pewien niedosyt budzi treść punktów 2.1 i 2.2., które zostały przygotowane dość powierzchownie. Biorąc pod uwagę przedmiot rozprawy, tj. beton porowaty, w punktach tych można by spodziewać się głębszych rozważań dotyczących wpływu doboru kruszywa na kształtowanie struktury porów, a w mniejszym stopniu wpływu dodatków mineralnych, takich jak mikrokrzemionka, które najczęściej stosowane są w innym celu. Wartościowym fragmentem tego punktu jest tabela 2.1, w której zestawiono wartości stosunków woda/cement i kruszywo/cement oraz właściwości fizyczne i mechaniczne betonu porowatego i parametru wykonanego z różnego rodzaju kruszywa, w tym również RCA, a także domieszek zarówno polimerowych, jak i mineralnych. W dalszej części przedstawiono na podstawie danych literaturowych kolejne wyniki omawiające wpływ wielkości kruszywa, dodatków mineralnych i polimerowych, włókien polimerowych na wybrane cechy betonów porowatych. Korzystne byłoby na koniec rozdziału podsumować przedstawione wyniki i uzasadnić dobór składu mieszanki betonowej wybranej do realizacji badań laboratoryjnych i terenowych opisanych w rozdziale 3. Natomiast opis wykorzystania betonu porowatego w zastosowaniach geotechnicznych przedstawiony w p.2.3 uważam za wystarczające wprowadzenie do zaplanowanych badań laboratoryjnych, terenowych oraz symulacji MES.
W rozdziale 3 Doktorant przedstawił obszerne i kompleksowe programy badań eksperymentalnych i terenowych, które miały na celu opracowanie mieszanek betonu porowatego z 50% substytucją kruszywa naturalnego kruszywem z recyklingu, które byłyby przydatne do wbudowania w pale wzmacniające grunty słabonośne. Stanowi to Jego oryginalne osiągnięcie badawcze. Dobór badanych właściwości mieszanki jak i stwardniałego betonu oraz zastosowane metody badawcze są odpowiednie z punktu widzenia przewidywane zastosowania. W badaniach właściwości oparto się na normach europejskich lub wytycznych ACI. Na podkreślenie zasługuje to, że Doktorant zaprojektował i wykonał autorskie stanowisko do pomiaru przepuszczalności betonu porowatego w oparciu o zalecenia

ACI. Świadczy to o Jego dojrzałości badawczej i umiejętności twórczego rozwiązywania wyzwań eksperymentalnych. Na wyróżnieni zasługuje również zastosowanie metody mikrotomografii komputerowej do charakteryzowania rozkładu porów w badanych betonach. Daje ona lepsze zobrazowanie rozkładu porów (rozkłady 3D) w porównaniu do klasycznej metody analizy obrazu, której wyniki są wrażliwe na jakość przygotowania próbek mikroskopowych tak kłopotliwego kompozytu jakim jest beton porowaty.

W pierwszym programie eksperymentalnym analizowano przydatność 8 mieszanek betonu porowatego z kruszywem RCA, granulatem gumowym i włóknami polimerowymi, w których jako spoiwo służył cement portlandzki CEM I. Zastosowanie kruszywa RCA spowodowało obniżenie śladu węglowego. Badania laboratoryjne pozwoliły wybrać 2 mieszanki, z których beton porowaty charakteryzował się obiecującymi właściwościami. Jednakże, badania terenowe wykazały trudności technologiczne podczas pompowania opracowanych mieszanek (J1 i J2). Wymusiło to zmianę technologii wykonywania pali z betonu porowatego i w konsekwencji konieczność przeprowadzenie kolejnego programu badań laboratoryjnych i terenowych ze zmienionym składem mieszanki. Pokazuje to istotność prowadzenia badań weryfikacyjnych w skali co najmniej półtechnicznej. W drugim programie badano 4 mieszanki, w których spoiwem był cement CEM I oraz cement CEM II/B (z kruszywem i dodatkami jak w pierwszym programie), co spowodowało dodatkowe obniżenie śladu węglowego. Do badań w warunkach terenowych metodą wibrowymiany wybrano mieszankę P2 potwierdziło praktyczną przydatność tej technologii wzmacniania gruntów słabonośnych, a także możliwość sformułowania rekomendacji technologicznych oraz wskazanie kierunków dalszych prac związanych z praktycznym wdrożeniem tej technologii.

Niedosyt w prezentacji wyników badań laboratoryjnych budzi sposób prowadzonej analizy - opierały się na średnich wartościach mierzonych cech. Nigdzie nie scharakteryzowano rozrzutu wyników, które musiały występować w przypadku tak niejednorodnego kompozytu jakim jest beton porowaty. Z drugiej strony prowadzono analizy statystyczne, które wymagały kilku wyników na punkt pomiarowy, ale prezentowane na wykresach zależności nie zawierają słupków błędów.

Rozdział 4 stanowi najistotniejszą część pracy, w której przedstawiono wyniki modelowania numerycznego MES referencyjnego typu nasypu drogowego na podłożu wzmocnionym przy zastosowaniu trzech technologii wzmocnienia z zastosowaniem: pali z betonu porowatego, kolumn z betonu konwencjonalnego, kolumn żwirowych w osłonie geotekstylnej oraz podłoża niewzmocnionego. Wielowariantowe eksperymenty numeryczne przeprowadzono przy zastosowaniu dwóch modeli MES: w układzie osiowo-symetrycznym i przestrzennym. Posłużyły one do przeanalizowania wpływu filtracji na tempo konsolidacji podłoża oraz wartość osiadania nasypu. Na podstawie analizy porównawczej modeli 2D i 3D Doktorant sformułował rekomendacje dotyczących modelowania wzmacniania z palami z betonu porowatego.

Analiza porównawcza modeli MES 2D i 3D wykazała możliwość uproszenia modelu 3D do 2D przy przyjęciu odpowiednich założeń co do symetrii rozmieszczenia pali, geometrii nasypu oraz charakteru oddziaływań. Jednocześnie Doktorant sugeruje, że zastosowanie „modeli 3D jest uzasadnione w przypadku obiektów o wysokim stopniu odpowiedzialności oraz układów wykazujących silne cechy przestrzenne."

Częścią tego rozdziału jest ocena śladu węglowego i analiza emisyjności wybranych wariantów wzmacniania podłoża, co w konsekwencji pozwoliło na wskazanie rozwiązania materiałowego o najniższym wpływie środowiskowym. Na podkreślenie zasługuje fakt „zrównoważonego" podejścia do szacowaniu oddziaływania środowiskowego. Doktorant zauważa, że wybór technologii powinien być poprzedzony analizą wielokryterialną, uwzględniającą nie tylko emisje, ale również trwałość, dostępność materiałów i czas realizacji.
Moim zdaniem ta część rozdziału powinna stanowić odrębny punkt rozprawy doktorskiej, bowiem idąc za motywacją do podjęcia badań (p.1.1) była chęć nie tylko wdrożenia betonów porowatych jako technologii wzmacniania gruntów słabonośnych, ale zaproponowanie do tego celu betonów porowatych o obniżonej emisyjności.

Rozdział 5 pt. „Wnioski końcowe" to obszerne podsumowanie wyników pracy na poszczególnych etapach jej realizacji, które pozwalają stwierdzić, że postawiona teza została udowodniona. Doktorant sformułował kierunkach dalszych badań, które zwiększą możliwości praktycznego wdrożenia tego innowacyjnego rozwiązania materiałowego z uwzględnień narzędzi inżynierii materiałowej wspomaganej AI. Świadczy to o Jego dojrzałości badawczej i jego otwarcie na nowe techniki badawcze.

Praca stanowi wartościowe i oryginalne osiągnięcie Doktoranta, a do najważniejszych osiągnięć można zaliczyć:

1) Wykazanie, że zastosowanie betonu porowatego z kruszywem z recyklingu do wykonywania pali fundamentowych umożliwia skuteczne wzmacnianie gruntów słabonośnych przy jednoczesnym pełnieniu funkcji drenażowej i stanowi realną alternatywę dla rozwiązań konwencjonalnych.
2) Wykazanie przydatności mikrotomografii komputerowej (Micro-CT) do charakteryzowania struktury porów w betonie i wykazanie silnej korelacji między porowatością określoną tą metodą a porowatością efektywną.
3) Zaprojektowanie i wykonanie autorskiego stanowiska do pomiaru przepuszczalności betonu porowatego metodą zmiennego spadku hydraulicznego w oparciu o zalecenia ACI.
4) Opracowanie modeli MES 2D i 3D dla pali fundamentowych wykonanych z betonu porowatego przydatnych do oceny skuteczności do wzmacniania gruntów słabonośnych.
5) Oszacowanie spadku śladu węglowego w przypadku betonów zawierających komponenty o obniżonym śladzie węglowym.

Oprócz wyżej wymienionych osiągnieć, praca zawiera szereg wartościowych wyników, które zostały ujęte we wnioskach sformułowanych w rozdziale 5.

Podsumowując stwierdzam, że recenzowana praca wyróżnia się wielowątkowym obszernym programem eksperymentalnym obejmującym zarówno badania laboratoryjne, jak również badania w skali naturalnej oraz opracowaniem modeli MES o dużej przydatności praktycznej. Z pełnym przekonaniem wnoszę o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Oskara Mitrosza.

4.3. Ocena strony edytorskiej pracy

Przygotowanie rozprawy pod względem edytorskim zasługuje na wyróżnienie, zwłaszcza starannie przygotowana szata graficzna. Mimo, że przedstawiono w niej olbrzymią ilość wyników, układ pracy jest logiczny, pozwalający śledzić kolejne etapy badań. Do strony edytorskiej rozprawy mam tylko kilka uwag. Najważniejsze jest bardzo często stosowanie zamiennie terminów „mieszanka" i „beton" w przypadku omawiania cech betonu. Sprawia to, że tekst czasami jest niezrozumiały, np. „zbilansowanie właściwości mechanicznych i hydraulicznych, tak aby mieszanka spełniała wymagania w zakresie nośności, przepuszczalności oraz technologicznej wykonalności". Pojawiają się też niewłaściwe tłumaczenia np. „cement paste" jako pasta cementowa, warstwa cementowa.

4.4. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Podczas lektury rozprawy doktorskiej nasunęły mi się uwagi krytyczne, z których zdecydowana większość to uwagi dyskusyjne, które mam nadzieję zostaną uwzględnione przez Doktoranta w jej dalszej działalności badawczej, a także działalności publikacyjnej. Poniżej podaję uwagi najbardziej dyskusyjne i o ustosunkowanie się do nich oczekiwałbym podczas publicznej obrony:

1) Badania laboratoryjne oraz terenowe prowadzono dla betonów porowatych, które zawierały 50% kruszywa z recyklingu, 10% granulatu gumowego i włókna polimerowe. Co skłoniło Doktoranta do przyjęcia takiego składu? W pracy znajduje się tylko informacja, że przyjęto taki skład bez uzasadnienia. Brak jest uzasadnienia.
2) W pracy podana została tylko ogólna liczba próbek. Przy analizie wyników poszczególnych oznaczeń Doktorant posługuje się tylko wartością średnią. Nie ma informacji dotyczących rozrzutu wyników. Są prowadzone analizy statystyczne, np. test t-studenta. Z tego wynika, że było kilka pomiarów na jeden punkt pomiarowy, np. prezentowany na rys. 20.
3) Czy Doktorant analizował jak może się zmienić trwałość pali w przypadku ich wykonania z betonu porowatego? Czy fakt porowatej struktury może wpływać istotnie na trwałość? Grunty są mniej lub bardziej agresywne, a porowata struktura umożliwia łatwiejszy dostęp do wnętrza elementu betonowego.
4) „Główną motywacją podjęcia niniejszego problemu badawczego jest zatem dążenie do opracowania i wdrożenia nowego typu pali fundamentowych – ekologicznych, technologicznie zaawansowanych i konkurencyjnych kosztowo…." Czy Doktorant próbował

przeprowadzić analizę porównawczą kosztów proponowanego rozwiązania wzmacniania gruntów palami z betonu porowatego i innych rozwiązań?

Powyższe uwagi mają charakter uwag dyskusyjnych i w żadnym stopniu nie obniżają mojej bardzo wysokiej oceny pracy. Postawiony w pracy cel badań został zrealizowany, a teza udowodniona. Doktorant wskazał wnioski wynikające z przeprowadzonych badań z nich wynikające istotne dla ich praktycznego wdrożenie w budownictwie.

5. Wniosek końcowy

Zgodnie z Ustawą przedmiotem rozprawy doktorskiej jest *oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej albo oryginalne dokonanie artystyczne*. Recenzowana rozprawa mgr. inż. Oskara Mitrosza pt. „Zastosowanie betonu porowatego z kruszywem z recyklingu do wykonywania pali fundamentowych" jednoznacznie potwierdza, że spełnione są warunki ustawowe. Praca wyróżnia się obszernością programu eksperymentalnego, którego wyniki istotnie poszerzają stan wiedzy dotyczącej innowacyjnego rozwiązania pali fundamentowych z betonu porowatego z kruszywem z recyklingu. Należy podkreślić, że to pogłębienie wiedzy opierało się na badaniach prowadzonych w warunkach laboratoryjnych oraz w terenie w pełnej skali, co jest wyzwaniem logistycznym samym w sobie. Tu należy zdecydowanie wyróżnić i pogratulować Doktorantowi bardzo dobrego opanowania technik badawczych, wykorzystania zaawansowanych programów komputerowych, jak również umiejętności wyciągania wniosków na podstawie wyników przeprowadzonych badań. Uwagi dyskusyjne zawarte w poprzednich punktach nie obniżają wartości pracy stanowiącej oryginalne osiągnięcia Doktoranta, które niewątpliwie wnoszą istotny wkład do poszerzenia wiedzy w obszarze projektowania wzmacniania gruntów słabonośnych z uwzględnieniem efektów środowiskowych. Pozwala to na stwierdzenie, że założony cel pracy został osiągnięty, a postawiona teza udowodniona.
Powyższa charakterystyka rozprawy wskazuje jednoznacznie, że Autor spełnia wymagania stawiane przed samodzielnymi badaczami, którymi ma charakteryzować się osoba ze stopniem doktora nauk inżynieryjno-technicznych.

Biorąc powyższe pod uwagę, stwierdzam, że zostały spełnione wymagania Ustawy z dn. 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2023, poz. 742). Wnoszę o dopuszczenie mgr. inż. Oskara Mitrosza do publicznej obrony Jego rozprawy doktorskiej. Jednocześnie wnioskuję o wyróżnienie rozprawy.

Podpisane elektronicznie przez
Andrzej Benedykt Garbacz
(Certyfikat kwalifikowany) w dniu
2026-04-10.