

Prof. dr hab. inż. Joanna Bzówka
Politechnika Śląska
Wydział Budownictwa
Katedra Geotechniki i Dróg
ul. Akademicka 5
44–100 Gliwice

Gliwice, 26 maja 2026 roku

R E C E N Z J A
rozprawy doktorskiej autorstwa mgr inż. Piotra Wyborskiego
pt. „Zagadnienia nośności granicznej
w spękanym podłożu nienasyconym o cechach losowych”

1. Podstawa opracowania recenzji

Niniejszą recenzję rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Wyborskiego pt. „Zagadnienia nośności granicznej w spękanym podłożu nienasyconym o cechach losowych” wykonano na podstawie pisma Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Wrocławskiej Pana Prof. dr hab. inż. Wojciecha Puły z dnia 24 marca 2026 roku w oparciu o uchwałę Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Wrocławskiej nr 323/26/RDND06/2024-2028 z dnia 18 marca 2026 roku, o wyznaczeniu na recenzenta w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora mgr inż. Piotrowi Wyborskiemu z Politechniki Wrocławskiej.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy doktorskiej

Recenzowana praca doktorska została napisana w języku polskim, liczy 294 strony tekstu wraz z trzema załącznikami oraz 411 pozycjami literatury. Praca doktorska zawiera również streszczenia w języku polskim i angielskim oraz wykaz symboli użytych w pracy.

Praca została podzielona na 6 rozdziałów, a te zostały podzielone na podrozdziały. Załącznik A zawiera 16 wykresów przedstawiających wyniki badań wytrzymałości na ścinanie wszystkich analizowanych materiałów gruntowych, w załączniku B zestawiono 13 tabel przedstawiających podstawowe prawdopodobieństwa m oraz odpowiadające im elementy ogniskowe, które tworzą losowy zbiór zdefiniowany na przestrzeni X , natomiast załącznik C zawiera kod programu *FlexPDE*, który został wykorzystany do obliczeń rozkładu naprężeń rozciągających powstających w wyniku skurczu gruntu.

2.1. Aktualny stan wiedzy w zakresie tematyki rozprawy

Doktorant podjął się badania gruntów w stanie nienasyconym, ze szczególnym uwzględnieniem podatności gruntów na pękanie oraz możliwość ograniczania tego zjawiska poprzez modyfikację gruntu, z uwagi na to, że pęknięcia w gruncie mogą w istotny sposób zmienić jego właściwości mechaniczne, hydrologiczne, fizykochemiczne oraz termiczne.

Z punktu widzenia mechaniki gruntów pęknięcia mogą powodować obniżenie wytrzymałości gruntu oraz zwiększenie jego ścisłości i szybkiej konsolidacji, co w konsekwencji może wpływać negatywnie na posadowione w spękanym gruncie konstrukcje, obniżając ich nośność.

Pęknięcia w gruncie wywierają również negatywny wpływ na budowle ziemne; można zaobserwować, że pęknięcia w górnej części skarp stanowią pierwszą oznakę potencjalnego ryzyka wystąpienia problemów ze statecznością skarpy. Pojawienie się pęknięcia stanowi

dotatkowy czynnik prowadzący do zwiększenia sił destabilizujących, co w konsekwencji prowadzi do utraty stateczności skarpy.

Pęknięcia negatywnie wpływają na stateczność, bowiem skracają długość potencjalnej powierzchni poślizgu, umożliwiają infiltrację wody opadowej do wnętrza gruntu, prowadzą do lokalnego upłynnienia gruntu, a tym samym do pogorszenia jego właściwości mechanicznych.

Obecność pęknięć w wałach przeciwpowodziowych oraz zaporach niesie ze sobą destrukcyjne konsekwencje. Powstanie pęknięć w rdzeniu lub korpusie wałów prowadzi do utworzenia uprzywilejowanej drogi filtracji; woda może wtedy przedostać się na przeciwną stronę konstrukcji ziemnej, wówczas wał nie zapewnia ochrony przed wodą powodziową, a w przypadku zapór nie umożliwia piętrzenia wody.

Do budowy barier środowiskowych i warstw przeciwfiltracyjnych są stosowane grunty spoiste, takie jak gliny czy ropy ze względu na swoją małą przepuszczalność. Powstanie pęknięcia prowadzi do utraty izolacyjnych właściwości hydraulicznych takich barier i warstw. W przypadku warstwy okrywającej składowisko odpadów, gdy obecność pęknięć powoduje powstanie uprzywilejowanych dróg filtracji, skutkuje to zwiększeniem ilości odcieków ze składowiska, a następnie do skażenia gleby oraz wód gruntowych.

W odpadach poftotacyjnych pęknięcia powodują istotne zmiany przepuszczalności, co może prowadzić do negatywnych skutków środowiskowych, w postaci uwalniania zanieczyszczeń do gruntu i wód podziemnych.

Pęknięcia mają negatywny wpływ również na grunty rolne, ponieważ zwiększone przewodnictwo hydrauliczne wierzchnich warstw powoduje wymywanie składników mineralnych ze strefy korzeniowej, a następnie ich transport wraz z wodą opadową w głąb gruntu. Pęknięcia spowodowane wysychaniem (pęknięcia desykacyjne) prowadzą do pogorszenia retencji wody w gruncie i są niewątpliwie prekursorem powstawania erozji wąwozowej.

Autor rozprawy, na podstawie studium literatury, stwierdził, że w publikacjach można znaleźć rozbieżności w opisie charakterystyk pęknięć, jak również w interpretacji czynników odpowiedzialnych za ich powstawanie i rozwój. Zjawisko pęknięcia desykacyjnego dotyczy około jednej trzeciej powierzchni lądów Ziemi, dlatego w okresie obserwowanych zmian klimatycznych oraz częstych okresów suszy w Europie Środkowej, zasadnym i ważnym staje się poznanie mechanizmów prowadzących do powstawania i rozwoju pęknięć w gruntach, a następnie rozpoznanie, w jaki sposób procesy wysychania wpływają na zachowanie podłoża gruntowego, czego konsekwencją jest bezpieczeństwo i trwałość konstrukcji inżynierskich.

Obliczanie pól naprężeń w gruntach w ujęciu mechaniki pęknięcia stanowi zagadnienie złożone; dokładne oszacowanie wartości wymaga szczegółowego poznania charakterystyki badanego materiału, w tym wyznaczenie jego stałych materiałowych. Ponieważ grunty cechują się dużą zmiennością naturalną, porowatą strukturą oraz silną zależnością właściwości od wilgotności i od ssania, precyzyjne określenie stałych materiałowych gruntu jest zadaniem trudnym i obciążonym znaczną niepewnością. Skomplikowane jest również definiowanie związków konstytutywnych gruntu w zależności od jego wilgotności. Z tych właśnie powodów, analityczne podejścia do pęknięcia gruntu nie są popularne; analiza pęknięć opiera się głównie na badaniach doświadczalnych.

2.2. Struktura rozprawy doktorskiej

Recenzowana rozprawa doktorska składa się z sześciu rozdziałów głównych, spisu literatury oraz trzech załączników.

Praca doktorska została poświęcona zagadnieniom gruntów w stanie nienasyconym, z uwzględnieniem ich potencjału do pęknięcia oraz możliwości ograniczenia pęknięcia poprzez modyfikację składu gruntu. Praca obejmuje część laboratoryjną oraz analityczną; wyniki

badzeń laboratoryjnych stanowią podstawę dalszych analiz i modelowania zachowania gruntów nienasyconych.

W Rozdziale 1 zostały omówione cele pracy, przedstawione tezy badawcze wraz z uzasadnieniem podjęcia tematu rozprawy.

Dyplomant wymienia pięć głównych celów rozprawy, oraz trzy dodatkowe cele, które dotyczą materiałów stosowanych do modyfikacji gruntu. Jako cele główne rozprawy Doktorant wylicza:

- cel 1 – zbadanie wpływu dodatków modyfikujących oraz wilgotności na wybrane parametry mechaniczne pyłu: wytrzymałość na ścinanie oraz wytrzymałość na ściskanie w jednoosiowym stanie naprężenia,
- cel 2 – zbadanie przebiegu procesu wysychania gruntów spoistych oraz ocena wpływu dodatku włókien na intensywność pęknięć, z wykorzystaniem fotografii i pomiarów tomograficznych,
- cel 3 – opracowanie i walidacja modelu prognostycznego intensywności pęknięć z wykorzystaniem metod uczenia maszynowego,
- cel 4 – analiza niezawodności nośności granicznej posadowienia fundamentowego w gruncie nienasyconym z zastosowaniem metody zbiorów losowych,
- cel 5 – opracowanie i weryfikacja numerycznego modelu rozwoju pęknięć w wysychającym podłożu nienasyconym,
- cel 6 dodatkowy – (a) ocena potencjału wzmacniającego włókien pochodzenia naturalnego i recyklingowego w porównaniu do powszechnie stosowanych w budownictwie włókien polipropylenowych; (b) zbadanie wpływu częściowego zastąpienia cementu pyłem granodiorytowym na właściwości mechaniczne gruntu; (c) określenie w jaki sposób włókna wpływają na zachowanie gruntów poddanych jednoosiowemu ściskaniu.

W Rozdziale 1 zostały również przedstawione tezy badawcze, które są następujące:

- teza 1 – modyfikacja składu gruntów spoistych poprzez dodatek włókien i/lub dodatków chemicznych może ograniczyć potencjał do pęknięcia w warunkach wysychania,
- teza 2 – wprowadzenie do gruntu włókien i/lub dodatków stabilizujących prowadzi do poprawy jego parametrów mechanicznych,
- teza 3 – wartości parametrów wytrzymałościowych gruntu w stanie nienasyconym są zależne od ssania matrycowego,
- teza 4 – włókna naturalne lub pochodzące z recyklingu mogą wzmacniać grunty spoiste w stopniu porównywalnym, a nawet wyższym niż stosowane w budownictwie włókna syntetyczne oraz skutecznie ograniczać pękanie, wpisując się tym samym w zasady zrównoważonego rozwoju,
- teza 5 – częściowe zastąpienie cementu w mieszankach cemento-gruntowych pyłem odpadowym bogatym w krzemionkę pozytywnie wpływa na parametry wytrzymałościowe gruntu oraz stabilizuje zmienność parametrów mechanicznych, wspierając jednocześnie zrównoważone podejście do stabilizacji gruntu,
- teza 6 – istnieje związek pomiędzy cechami gruntu a występowaniem pęknięć powierzchniowych,
- teza 7 – złożone zjawisko pęknięcia gruntów w wyniku wysychania może być prognozowane za pomocą metod uczenia maszynowego,
- teza 8 – zastosowanie metody zbiorów losowych stanowi efektywne narzędzie do analizy niezawodności posadowienia fundamentowego,
- teza 9 – modelowanie numeryczne procesu pęknięcia gruntów spoistych, oparte na danych eksperymentalnych i wykonane metodą elementów skończonych, umożliwia ilościowe odwzorowanie zjawisk inicjacji i rozwoju pęknięć. Pozwala również na poprawne

oszacowanie rozstawu i głębokości pęknięć desykacyjnych w wysychającym gruncie nienasyconym.

W Rozdziale 2 rozprawy przedstawiono stan wiedzy i podstawy teoretyczne dotyczące mechaniki pękania. Autor rozprawy opisał mechanizmy i koncepcje inicjacji pęknięć, m.in. następujące teorie:

- przekroczenia wytrzymałości na rozciąganie,
- nieregularnego frontu wysychania,
- naprężenia obwodowego,
- wejścia powietrza w pory,
- zapadania się struktury.

Doktorant przedstawił również oddziaływania występujące w gruntach, modele wytrzymałości na rozciąganie, wytrzymałość na ścinanie gruntów nienasyconych, kolejne etapy procesu pękania, w tym klasyfikację typów pęknięć, jak również wskaźniki geometryczne służące do opisu pęknięć.

W Rozdziale 2.3. można znaleźć informacje dotyczące czynników, które wpływają na powstawanie pęknięć. Doktorant podzielił je na cztery główne grupy:

- właściwości wewnętrzne gruntu – m.in. skurcz objętościowy, rodzaj materiału ilastego, powierzchnia właściwa cząstek, gęstość gruntu,
- ograniczenia brzegowe – m.in. wpływ brzegów formy, w której jest wysuszana badana próbka, geometria bryły gruntu, tarcie na styku z podłożem, obecność pokrywy roślinnej, rodzaj podłoża, grubość próbek gruntu,
- warunki środowiskowe – m.in. temperatura, wilgotność powietrza,
- niejednorodności i defekty strukturalne – m.in. punkty styku ziaren, anomalie w rozmiarach ziaren, pory gruntu, obce wtrącenia, mikro wgłębienia na powierzchni, nieregularności topograficzne.

W Rozdziale 2.4 zostały przedstawione zabiegi, które mają za zadanie ograniczyć powstawanie pęknięć, w tym stosowanie dodatków chemicznych (np. cementu, pyłu krzemionkowego, pyłu granodiorytowego) oraz różnych rodzajów włókien (np. stalowych, polipropylenowych, szklanych, węglowych, jutowych).

Autor rozprawy w Rozdziałach 2.4 i 2.5 przedstawił wpływ dodatków na nośność graniczną podłoża oraz numeryczne modelowanie pęknięć gruntu, dokonując klasyfikacji technik modelowania na dwie główne grupy: metody siatkowe oraz metody bezsiatkowe. Dodatkowo, Doktorant przedstawił metody hybrydowe, które łączą techniki oparte na siatce z metodami bezsiatkowymi, np. metody elementów skończonych i metody elementów dyskretnych (FEM-DEM).

Autor rozprawy, po analizie literatury przedmiotu, stwierdził, że pomimo, iż problematyka pękania gruntów była dotychczas badana z różnych perspektyw, wciąż jednak występują luki badawcze, które zostały zidentyfikowane w sposób następujący:

- niedostateczna identyfikacja i brak klasyfikacji czynników decydujących o intensywności pęknięć,
- brak szerokiej analizy porównawczej parametrów wytrzymałościowych gruntu oraz cemento-gruntu wzmocnionego różnym typem włókien,
- niedostateczne rozpoznanie problematyki niezawodnościowej analizy nośności granicznej podłoża gruntowego zbrojonego włóknami,
- ograniczony zakres badań nad modelami numerycznymi umożliwiającymi określenie rozstawu i głębokości pęknięć.

Badania laboratoryjne parametrów wytrzymałościowych oraz intensywność pęknięć gruntów nienasyconych zostały zawarte **w Rozdziale 3** rozprawy. W rozdziale tym zostały scharakteryzowane materiały gruntowe (podstawowy i niespoisty) oraz dodatki (cement, pył

granodiorytowy, włókna polipropylenowe, włókna jutowe, włókna PET). Doktorant opisał sposób przygotowania próbek do badań wytrzymałości na ścinanie oraz wytrzymałości na ściskanie w stanie jednoosiowego naprężenia, jak również sposób przygotowania próbek do badań intensywności pęknięcia powierzchniowego, podając receptury badanych próbek gruntowych oraz sposób przygotowania próbek do pęknięć za pomocą tomografii komputerowej.

Rozdział 3.3 zawiera opis zastosowanych metod badawczych i pomiarowych dla przygotowanych próbek, w tym m.in. metody oznaczania wartości ssania oraz opis wyznaczania ssania metodą bibuły filtracyjnej dla wybranych próbek gruntu poddanych badaniu ścinania.

W Rozdziale 4 zostały zamieszczone wyniki przeprowadzonych badań laboratoryjnych, w tym wyniki badania wytrzymałości na ścinanie, wyniki badań ssania wybranych próbek poddanych ścinaniu, wyniki badania wytrzymałości na ściskanie w jednoosiowym stanie naprężenia, jak również wyniki obserwacji intensywności pęknięć powierzchniowych oraz wyniki badań pęknięć za pomocą tomografii komputerowej. Dodatkowo, Rozdział 4.3 zawiera wnioski z wszystkich rodzajów badań laboratoryjnych.

Rozdział 5 został poświęcony analizie i modelowaniu zachowania gruntów nienasyconych. Autor rozprawy zajął się prognozowaniem intensywności pęknięć i oceną cech gruntu wpływających na pęknięcie, wykorzystując do tego uczenie maszynowe. Do budowy modelu predykcyjnego została wykorzystana metoda lasu losowego. W ramach badania Doktorant przeanalizował trzy różne spoiste materiały gruntowe, zróżnicowane między innymi pod względem uziarnienia oraz składu mineralogicznego, co bezpośrednio wpływa na właściwości fizyczne i mechaniczne gruntu.

W Rozdziale 5.1.2 rozprawy zostały przedstawione korelacje cech gruntu z intensywnością pęknięć; Doktorant przygotował macierz korelacji cech gruntu, warunków wysuszania oraz wskaźnika intensywności pęknięć. Pokazał również, na podstawie macierzy korelacji, wpływ wybranych cech gruntu na intensywność pęknięć (zmniejszenie lub zwiększenie intensywności pęknięć).

Autor rozprawy w Rozdziale 5.2 przedstawił probabilistyczne podejście do oceny nośności podłoża pod fundamentem obciążonym siłą pionową, przyłożoną centralnie. W analizie Doktorant wykorzystał metodę zbiorów losowych, która pozwala uwzględnić zmienność parametrów poprzez przedstawienie zakresów ich wartości w postaci dyskretnych rozkładów prawdopodobieństwa. Zbiory losowe zostały wykorzystane do opisu zmienności parametrów podłoża.

W Rozdziale 5.3 Doktorant przedstawił modelowanie numeryczne rozwoju pęknięć. Celem badań było oszacowanie rozstawu i głębokości pęknięć dla wybranych rodzajów gruntów z wykorzystaniem programu *FlexPDE*, opartego na metodzie elementów skończonych. W Rozdziale 5.3.4 Autor rozprawy porównał wartości rozstawu pęknięć uzyskane w wyniku symulacji numerycznych wykonanych w programie *FlexPDE* z wynikami badań doświadczalnych, przeprowadzonych na cylindrycznych próbkach gruntu o średnicy 15 cm, poddanych procesowi kontrolowanego wysychania. Wnioski z analiz numerycznych i probabilistycznych zostały zamieszczone w Rozdziale 5.4.

Podsumowanie i wnioski końcowe, jak również kierunki dalszych badań znalazły się na kartach **Rozdziału 6**.

Należy zaznaczyć, że rozprawa doktorska zawiera bogaty spis wykorzystanej literatury, norm oraz materiałów źródłowych. Dodatkowo w rozprawie doktorskiej można znaleźć listę stosowanych w pracy symboli.

Strukturę i zawartość rozprawy doktorskiej oceniam pozytywnie.

3. Ocena dorobku rozprawy

Doktorant, na podstawie przeprowadzonej analizy literatury stwierdził, że pomimo, iż problematyka pękania gruntów była do tej pory badania w różnych ujęciach, wciąż występują luki badawcze, które zostały przez Niego zdefiniowane. Stąd potrzeba rozwiązania tego zagadnienia w ujęciu naukowym i inżynierskim, gdyż problem pękania gruntów dotyczy znacznej części obszarów lądowych Ziemi.

W celu określenia wpływu stanu nasycenia gruntu oraz dodatków w postaci różnych włókien i cementu na wytrzymałość mechaniczną podłoża, jak również na ograniczenie powstawania pęknięć, mgr inż. Piotr Wyborski przeprowadził badania laboratoryjne parametrów wytrzymałościowych oraz intensywności pęknięć gruntów nienasyconych. Na podstawie otrzymanych wyników badań Doktorant stwierdził, że wraz ze wzrostem wilgotności znacząco obniżają się parametry wytrzymałości gruntu na ścinanie. Obecność włókien w gruncie wpływa korzystnie na jego właściwości mechaniczne, zwłaszcza poprzez zwiększenie spójności. Im większa wilgotność gruntu, tym słabszy efekt wzmocnienia włóknami, co jest spowodowane działaniem wody pełniącej rolę smaru na styku „grunt – włókno”.

W grupie próbek bez dodatku spoiwa najwyższą spójność osiągnęła próbka z włóknami jutowymi, natomiast najwyższą wartość kąta tarcia wewnętrznego odnotowano dla próbki z włóknami polipropylenowymi. Najlepsze rezultaty uzyskuje się przy połączeniu włókien ze spoiwem hydraulicznym – cementem. Dodatek cementu w próbkach z włóknami prowadzi do znacznego wzrostu spójności, jak i kąta tarcia wewnętrznego.

Dodatek cementu istotnie poprawia parametry wytrzymałościowe gruntu. W porównaniu z próbką bez cementu, przy 4% zawartości cementu, Doktorant uzyskał wzrost spójności o ok. 1500% oraz wzrost kąta tarcia wewnętrznego o ok. 110%. Największy względny przyrost wytrzymałości uzyskano dla próbek z 2% dodatkiem cementu. Zastosowanie pyłu granodiorytowego w ilości 2% w próbkach z 2% zawartością cementu spowodowało spadek spójności w porównaniu z próbką zawierającą tylko cement, ale jednocześnie wywołało wyraźny wzrost kąta tarcia wewnętrznego (ponad 110%).

Wyniki badań wytrzymałościowych próbek gruntu w jednoosiowym stanie naprężenia z różnymi zawartościami pyłu, cementu i włókien pokazały, że zastosowanie mineralnego pyłu może mieć pozytywny wpływ dla stabilizacji gruntów, a poza tym umożliwia ograniczenie udziału cementu w mieszance. Z kolei, dodatek 0,5% włókien polipropylenowych do mieszanek cemento-gruntowych powoduje wyraźną zmianę zachowania próbek poddanych ścisaniu w porównaniu z próbkami o tej samej zawartości cementu lecz bez włókien. Zastosowanie dodatku w postaci włókien w gruntach stabilizowanych chemicznie, jak przekonuje mgr inż. Piotr Wyborski, może być szczególnie korzystne w podłożach narażonych na duże odkształcenia przy stosunkowo dużych wartościach naprężeń.

Próbki cemento-gruntów zbrojone włóknami polipropylenowymi wykazywały niższą wartość wytrzymałości na ściskanie w porównaniu z próbkami o tej samej zawartości cementu, lecz bez zbrojenia. Jedną z przyczyn tego zjawiska jest mniejsza gęstość próbek z włóknami polipropylenowymi, co również negatywnie może oddziaływać na jednorodność struktury materiału.

Autor rozprawy po obserwacjach intensywności pęknięć powierzchniowych stwierdził, że im większy udział montmorylonitu, tym wyższy potencjał intensywności pęknięć oraz większa pojemność wodna gruntu. Dodatek montmorylonitu wpływa również na geometrię siatki pęknięć. Doktorant zaobserwował również, że dodatek włókien do gruntu wyraźnie redukuje intensywność pęknięć na jego powierzchni. Najskuteczniejsze okazały się włókna polipropylenowe. Dodatek włókien zmienia też charakter siatki pęknięć, zaś dodatek cementu do pyłu istotnie zmniejsza intensywność pęknięć.

W celu uzyskania przestrzennego obrazu struktury pęknięć, Autor rozprawy wykorzystał nieniszczącą metodę obrazowania tomografii komputerowej. Na podstawie analiz morfometrycznych próbek gruntu sformułował kilka ważnych wniosków. Stwierdził, że dla próbek bez dodatku włókien o niższej wartości wilgotności uzyskano mniejszy wskaźnik pęknięć niż w próbkach o wyższej wilgotności. Ponadto, próbka z dodatkiem włókien polipropylenowych, charakteryzowała się najwyższą wartością wskaźnika pęknięć, co zostało uzasadnione tym, że włókna pełnią funkcję wtrąceń zaburzających lokalny stan naprężenia i powodują koncentrację naprężeń rozciągających w ich otoczeniu. Naprężenia te mogą przekraczać lokalną wytrzymałość gruntu na rozciąganie, inicjując rozwój pęknięć.

Jednocześnie należy dodać, że dodatek włókien polipropylenowych ogranicza możliwość skurczowego odkształcania się gruntu. Włókna polipropylenowe skutecznie redukują średnią szerokość pęknięć; zmniejszają zróżnicowanie szerokości pęknięć.

Wykorzystując uczenie maszynowe, Autor rozprawy przedstawił w swojej pracy prognozowanie intensywności pęknięć wraz z analizą wpływu cech gruntu na pękanie. W pierwszym etapie opracował zbiór danych, a następnie dokonał wyboru metody pozwalającej na realizację założonych celów badawczych. Doktorant analizował wyniki otrzymane przy użyciu współczynnika korelacji Pearsona oraz wybranych algorytmów uczenia maszynowego, takich jak drzewo decyzyjne i las losowy. Najlepsze wyniki uzyskał przy zastosowaniu lasu losowego, dlatego tę metodę wykorzystał do budowy modelu predykcyjnego.

Mgr inż. Piotr Wyborski analizował trzy spoiste materiały gruntowe:

- pył,
- pył z iłem – mieszanina pyłu z montmorylonitem o zawartości 15%,
- ił – mieszanina pyłu z montmorylonitem o zawartości 35%.

Badane grunty są zróżnicowane między innymi pod względem uziarnienia oraz składu mineralogicznego, co wpływa bezpośrednio na ich właściwości fizyczne i mechaniczne.

Doktorant szacował intensywności pęknięć z wykorzystaniem modelu lasu losowego. Celem było stworzenie modelu predykcyjnego, który na podstawie wartości cech wejściowych przewiduje wartość zmiennej odpowiedzi, w tym przypadku wskaźnika intensywności pęknięć *CIF*.

Dla Doktoranta zestaw predyktorów obejmował cechy gruntu i warunki suszenia zawarte w zbiorze danych, a zmienną prognozowaną był wskaźnik opisujący podatność gruntu na powstawanie pęknięć, czyli wskaźnik intensywności pęknięć *CIF*.

Liczbę drzew decyzyjnych wchodzących w skład lasu losowego określono według wartości stosowanej w literaturze jako 100. Algorytm lasu losowego został przygotowany przez Autora rozprawy w środowisku *R*, z zastosowaniem pakietu *randomForest*, służącego do budowy modelu lasu losowego. Proces oceny jakości modelu został oparty na błędzie *out-of-bag OOB*, który jest metodą walidacji stosowaną w algorytmach lasu losowego. Błąd *OOB* posłużył Doktorantowi do oceny czy liczba drzew zastosowanych w modelu została dobrana właściwie, a także do zobrazowania wpływu tego parametru na stabilność i jakość prognozowania.

Porównanie rzeczywistych wartości wskaźnika intensywności pęknięć *CIF* z predykcjami dostrojonego lasu losowego pokazało, że model po dostrojeniu charakteryzuje się dobrym dopasowaniem. Analizując wpływ różnych zmiennych na predykcję w modelu lasu losowego, Doktorant zauważył, że największy wpływ na intensywność pęknięć ma wilgotność gruntu, a następnie gęstość właściwa gruntu, wysokość oraz pole powierzchni badanej próbki, temperatura suszenia i zawartość frakcji piaszczystej. Wśród mało istotnych zmiennych wyróżnił klasyfikację USCS, kształt formy, w której suszone były próbki gruntu oraz granicę plastyczności.

Autor rozprawy swoją uwagę poświęcił również zagadnieniu nośności granicznej na rozciąganie w podłożu nienasyconym z wykorzystaniem narzędzi numerycznych. Badania przeprowadził dla trzech rodzajów gruntów: pyłu, pyłu z łem i dla łu. Celem przeprowadzonych badań było oszacowanie rozstawu i głębokości pęknięć dla wybranych rodzajów gruntów z wykorzystaniem programu *FlexPDE*, opartego na metodzie elementów skończonych. W analizach Doktorant uwzględnił zmienność właściwości gruntu wzdłuż wysokości próbki. W modelu założono, że grunt zachowuje się jak materiał idealnie sprężysty, a analiza została przeprowadzona w płaskim stanie odkształcenia, zakładając, że szerokość próbki jest istotnie mniejsza niż jej długość i wysokość. Dla każdego z analizowanych gruntów rozważono 132 scenariusze kombinacji rozstawu i głębokości pęknięcia.

Warunki brzegowe mechaniczne były następujące: dolna krawędź modelu została zablokowana w kierunku poziomym i pionowym, lewa krawędź od dolnej krawędzi do wierzchołka pęknięcia modelu została zablokowana w obu kierunkach. Pozostałe krawędzie nie zostały ograniczone. Warunki brzegowe hydrauliczne obejmowały obecność zwierciadła wody gruntowej wzdłuż dolnej krawędzi modelu oraz swobodny przepływ q wewnątrz modelu, symulujący proces ewaporacji.

Doktorant wyniki obliczeń numerycznych, przeprowadzonych z wykorzystaniem programu *FlexPDE* przedstawił w formie graficznego raportu dla przypadku o rozstawie pęknięć wynoszącym 50 cm oraz głębokości pęknięcia równej 50 cm, dla trzech analizowanych rodzajów gruntów. Rysunki przedstawiają rozkład wartości wytrzymałości na rozciąganie, modułu sprężystości, przemieszczeń oraz naprężeń rozciągających.

W rozprawie doktorskiej można również znaleźć porównanie wartości rozstawu pęknięć uzyskanych w wyniku symulacji numerycznych wykonanych w programie *FlexPDE* z wynikami badań doświadczalnych, które przeprowadzono na cylindrycznych próbkach gruntu o średnicy 15 cm, poddanych procesowi kontrolowanego wysychania.

Na podstawie przeprowadzonych analiz niezawodności posadowienia stopy fundamentowej w gruncie nienasyconym, Autor rozprawy stwierdził, że grunty o niższym stopniu nasycenia (wilgotności) wykazują znacznie wyższą nośność przy zachowaniu tego samego wskaźnika niezawodności. Ponadto, dodatek włókien istotnie poprawia parametry gruntu, przykładowo włókna polipropylenowe dla wskaźnika niezawodności $\beta=3,1$ zwiększyły nośność o ponad 60%, natomiast włókna juty o ponad 75%, zaś największą nośność spośród wszystkich badanych próbek uzyskują mieszanki gruntu z cementem i włóknami, szczególnie włóknami PET. Również 2% dodatek pyłu granodiorytowego do 2% cementu wyraźnie zwiększa nośność gruntu.

Należy zaznaczyć, że mgr inż. Piotr Wyborski opracował model numeryczny, który poprawnie odwzorowuje relację między naprężeniami rozciągającymi w gruncie a jego wytrzymałością na rozciąganie. Na podstawie tego modelu jest możliwe oszacowanie zarówno rozstawu, jak i głębokości potencjalnych pęknięć w danym rodzaju gruntu. W porównaniu z wynikami badań doświadczalnych model wykazał dobrą zgodność w zakresie odwzorowania średnich wartości rozstawu pęknięć dla analizowanych gruntów. Doktorant potwierdził, że dodatek włókien do gruntu powoduje zwiększenie rozstawu pęknięć i prowadzi do wzrostu wytrzymałości gruntu na rozciąganie, co wskazuje na potencjał modyfikacji gruntu za pomocą włókien w celu zwiększenia jego odporności na pękanie w warunkach wysychania. Model może być również wykorzystany w sposób odwrotny; znając podstawowe parametry mechaniczne gruntu oraz rzeczywisty rozstaw pęknięć, można oszacować wytrzymałość na rozciąganie gruntu.

Na zakończenie swojej rozprawy doktorskiej, mgr inż. Piotr Wyborski wskazał następujące kierunki dalszych badań i analiz:

- przeprowadzenie szczegółowych badań nad optymalną ilością i długością włókien, aby uzyskać maksymalny efekt w zakresie redukcji pęknięć oraz poprawy właściwości mechanicznych,
- analizę trwałości włókien naturalnych w gruncie, zwłaszcza w kontekście długoterminowej eksploatacji konstrukcji geotechnicznych narażonych na zmienne warunki wilgotnościowe i biologiczne procesy degradacji,
- kontynuację prac nad wykorzystaniem odpadowego pyłu granodiorytowego jako częściowego zamiennika cementu,
- rozwój modelowania numerycznego – rozszerzenie opracowanego modelu rozwoju pęknięć o możliwość uwzględniania uplastycznienia się gruntu z zastosowaniem nieliniowych kryteriów zniszczenia, zwłaszcza w strefach koncentracji naprężeń,
- uzupełnienie danych kalibracyjnych poprzez wykonanie dodatkowych badań modułu sprężystości gruntów w konsystencji płynnej i miękkoplastycznej, co pozwoli zwiększyć dokładność modeli numerycznych,
- weryfikację skali, obejmującą ponowne badania doświadczalne nad rozstawem pęknięć przy użyciu próbek o większych wymiarach,
- zweryfikowanie głębokości pęknięć uzyskanych na podstawie symulacji numerycznych względem wyników pomiarów eksperymentalnych,
- udoskonalenie modeli prognostycznych, w szczególności modelu lasu losowego,
- rozszerzenie i uzupełnienie zbioru danych, zwłaszcza o zmienne o silnym wpływie na wynik, takie jak: gęstość właściwa, wymiary próbki czy temperatura suszenia, co pozwoli zwiększyć ogólną wiarygodność i uniwersalność prognoz.

Biorąc pod uwagę całość pracy można stwierdzić, że postawione na początku rozprawy doktorskiej przez mgr inż. Piotra Wyborskiego cele zostały osiągnięte.

4. Uwagi szczegółowe i dyskusyjne

Rozprawa doktorska została napisana przez mgr inż. Piotra Wyborskiego poprawnym językiem polskim. Wszystkie tabele i rysunki, jak również załączniki zostały przygotowane starannie, z dbałością o szczegóły.

W pracy można jednak znaleźć drobne błędy edytorskie i graficzne, przykładowo:

- mało czytelne opisy na Rys. 4.18 oraz Rys. 5.14÷5.42 i Rys. 5.48÷5.56,
- nieprecyzyjne cytowanie literatury – zamiast Liu i in. [64] jest Liu [64], zamiast Lu i in. [89] jest Lu [89], itd.,
- brak wyjaśnienia dotyczącego użytych symboli w Tabelach 4.3÷4.5 i na Rys. 4.16÷4.18,
- brak objaśnień symboli dla próbek a) PP, b) 0_1, c) 0_2 na Rys. 4.26÷4.32 i w Tabelach 4.8÷4.10),
- brak objaśnień dotyczących użytych symboli w Tabeli 5.5,
- brak tabel C.1-C.12 wymienionych na str. 183 w zdaniu: „Na podstawie wartości parametrów geotechnicznych zawartych w tabelach 5.7 oraz C.1-C.12 ...”.

Należy podkreślić, że powyższe uchybienia nie obniżają w żaden sposób pozytywnej merytorycznej oceny rozprawy doktorskiej.

Po zapoznaniu się z treścią pracy nasuwają się pytania i zalecenia:

- przeprowadzona przez Doktoranta duża liczba badań laboratoryjnych, jak również różnorodność wykonanych analiz, nadaje pracy szerszy zasięg niż wskazuje tytuł rozprawy doktorskiej. Zdaniem recenzenta tytuł rozprawy powinien być nieco zmieniony; jedna z propozycji zmiany: „*Badania i analizy spękanych gruntów w stanie nienasyconym wzmacnianych włóknami i dodatkami stabilizującymi*”,

- w rozprawie nie została przedstawiona szczegółowa metodyka przygotowywania do badań próbek gruntu wzmocnionych różnymi rodzajami włókien i/lub dodatkami stabilizującymi. Nasuwa się pytanie - w jaki sposób była zapewniona jednorodność próbek przeznaczonych do badań?
- badania wytrzymałości gruntów na ścinanie przeprowadzono w aparacie bezpośredniego ścinania, w którym płaszczyzna ścicia jest wymuszona. Zdaniem recenzenta badania wytrzymałości na ścinanie wzmocnionych próbek gruntów włóknami i/lub dodatkami stabilizującymi można było przeprowadzić w aparacie trójosiowego ściskania wraz z konsolidacją, kontrolą warunków odpływu oraz większą strefą ścinania,
- do jakiej głębokości w podłożu gruntowym powstają spękania wywołane wysychaniem? Od czego zależy głębokość występowania spękanych gruntów?
- w jaki sposób zachęcić inżynierów budownictwa do stosowania zaawansowanych modeli lasu losowego do prognozowania intensywności pęknięć?
- czy Doktorant planuje udostępnienie proponowanego modelu lasu losowego do prognozowania intensywności pęknięć?
- czy oznaczenia materiału w Tabeli 5.12 można połączyć z oznaczeniami materiałów gruntowych podanych w rozprawie na str. 178?
- w opisie symboli badanych próbek mieszanek, niektóre z nich nie są intuicyjnie rozpoznawane, co utrudnia czytelnikowi interpretację wyników i ich analizę. W związku z tym Doktorant powinien znaleźć lepszy i czytelniejszy sposób oznaczeń dla badanych próbek.

5. Podsumowanie i wnioski końcowe

W rozprawie doktorskiej Doktorant podjął problematykę zachowania gruntów w stanie nienasyconym, ze szczególnym uwzględnieniem podatności gruntów na pękanie oraz możliwości ograniczania zjawiska pęknięcia poprzez modyfikacje materiałowe. Praca obejmuje zarówno badania doświadczalne, jak i modelowanie zachowania gruntów nienasyconych. Obserwacje laboratoryjne stały się punktem wyjścia do części analitycznej rozprawy. Uzyskane przez Doktoranta dane doświadczalne zostały wykorzystane do budowy i weryfikacji opracowanych modeli. Bez wątpienia rozprawa doktorska poszerza wiedzę o mechanizmach rozwoju pęknięć w gruntach oraz nośności wzmocnionych gruntów nienasyconych, wykorzystując podejście numeryczne, probabilistyczne i metody uczenia maszynowego. Rozprawa wnosi wkład w rozwój badań nad gruntami nienasyconymi poprzez szeroką ocenę dodatków w postaci włókien, pyłu mineralnego oraz cementu, pod kątem ich potencjału do ograniczania pęknięcia gruntów, a także wpływu na parametry wytrzymałościowe i nośność graniczną podłoża. Rozprawa obejmuje również prognozowanie pęknięć w gruntach poddanych wysychaniu oraz numeryczne modelowanie tego zjawiska

O oryginalności rozprawy świadczą następujące osiągnięcia mgr inż. Piotra Wyborskiego:

- opracowanie i walidacja modelu prognostycznego pęknięć opartego na metodzie uczenia maszynowego,
- weryfikacja modelu prognozującego intensywność pęknięć *CIF* z zastosowaniem algorytmu lasu losowego,
- określenie najważniejszych cech gruntu decydujących o jego podatności na pękanie, takich jak: wilgotność, gęstość właściwa, wymiary próbki oraz temperatura suszenia,
- zastosowanie metody zbiorów losowych w analizie niezawodności gruntów nienasyconych; wykazanie, że podejście oparte na funkcjach przekonania (*Belief*) i wiarygodności (*Plausibility*) jest bardziej bezpieczne i ekonomicznie uzasadnione niż tradycyjne metody przedziałowe,

- opracowanie numerycznego modelu rozwoju pęknięć, stworzonego w środowisku *FlexPDE* z zastosowaniem metody elementów skończonych,
- ocena skuteczności dodatków wzmacniających oraz porównanie efektywności włókien pochodzenia naturalnego (włókna jutowe) i recyklingowego (włókna PET, odpadowe włókna szklane laminowane żywicą poliestrową) ze stosowanymi w budownictwie włóknami polipropylenowymi oraz wykazanie, że materiały te mogą w równym stopniu, a niekiedy skuteczniej, wzmacniać podłoże gruntowe.

Autor rozprawy swoimi badaniami i analizami potwierdził również, że włókna naturalne, takie jak juta oraz pochodzące z recyklingu, w tym PET, mogą być stosowane jako skuteczne zbrojenie gruntów. Zastosowanie włókien PET w połączeniu z cementem okazało się szczególnie efektywne, prowadząc do uzyskania najwyższej nośności granicznej posadowienia fundamentu spośród wszystkich badanych mieszanek. Dodatkowo, Doktorant wykazał, że częściowe zastąpienie cementu odpadowym pyłem granodiorytowym poprawia parametry mechaniczne gruntu, dlatego takie podejście może być bardzo przydatne przy projektowaniu podbudów drogowych, dla których występuje duże zużycie cementu, a pyły mineralne powstają jako odpad podczas obróbki kruszywa do produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych.

Mgr inż. Piotr Wyborski wykazał również, że włókna znacząco ograniczają intensywność pęknięć, co ma istotne znaczenie w przypadku wałów przeciwpowodziowych i barier środowiskowych. Zastosowanie włókien w mieszaninach cemento-gruntowych zmienia charakter materiału z kruchego na bardziej plastyczny, co znacząco poprawia jego odporność na odkształcenia i może wydłużyć trwałość konstrukcji ziemnych.

Na podkreślenie zasługuje również opracowany przez Autora rozprawy model lasu losowego, który stanowi praktyczne rozwiązanie umożliwiające szybkie i dokładne prognozowanie intensywności pęknięć na podstawie podstawowych właściwości gruntu oraz warunków suszenia. Jak udowodnił Doktorant, model lasu losowego charakteryzuje się bardzo dużą dokładnością predykcji i może być wykorzystany do oceny potencjału pęknięcia podłoża w praktyce inżynierskiej.

Reasumując, stwierdzam, że praca doktorska Pana mgr inż. Piotra Wyborskiego pt. „Zagadnienia nośności granicznej w spękanym podłożu nienasyconym o cechach losowych” spełnia warunki i wymagania zawarte w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2024 r., poz. 1571 z późn. zm.), stanowiąc oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

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

