

Gliwice, 29 lipca 2021 r.

Dr hab. inż. Małgorzata Jastrzębska, prof. PŚ  
Politechnika Śląska  
Wydział Budownictwa  
Katedra Geotechniki i Dróg  
Ul. Akademicka 5  
44-100 Gliwice

Przyjęte  
olmo 09/08/2021 r.

DZIEKAN  
Wydziału Inżynierii Lądowej  
prof. dr hab. inż. Andrzej Garbacz

WPEŁNYŁO  
Dnia 02.08.2021  
L. dz. IL. PW / 416 / 2021

## Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Kazimierza Józefiaka pt.:  
„Modelowanie konstytutywnych właściwości gruntów  
jako podłoża betonowych nawierzchni drogowych.”

### 1. Podstawa opracowania recenzji

Niniejszą recenzję pracy doktorskiej mgr. inż. Kazimierza Józefiaka pt. „Modelowanie konstytutywnych właściwości gruntów jako podłoża betonowych nawierzchni drogowych.” wykonałam na zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Warszawskiej w Warszawie, dra hab. inż. Konrada Lewczuka, prof. nzw. PW, z dnia 20 maja 2021 r., zgodnie z uchwałą nr 186/2021 z dnia 11 maja 2021 r. Promotorem pracy doktorskiej jest prof. dr. hab. inż. Artur Zbiciak.

### 2. Ogólna charakterystyka rozprawy

#### 2.1. Uwagi wstępne

Przedstawiona mi do oceny praca liczy ogółem 209 stron (w tym 142 stron tekstu, 19 stron uzupełniających w postaci Spisów ważniejszych oznaczeń, rysunków i tabel, oraz 31 stron załączników dokumentujących przeprowadzone analizy) oraz 116 pozycji literatury, w większości zagranicznej (71 pozycji), z czego 52 pozycje pochodzą z okresu ostatnich 10 lat (w tym 19 pozycji z okresu ostatnich 5 lat). Pracę podzielono na 4 rozdziały, a każdy z nich na szereg podrozdziałów i pod-podrozdziałów. Do pracy dołączono również 4 załączniki (A, B, C, D) oraz spisy rysunków, tabel i stosowanych oznaczeń oraz indeks pojęć.

#### 2.2. Aktualność tematyki badawczej

Rozprawa doktorska przygotowana przez mgr. inż. Kazimierza Józefiaka, pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Artura Zbiciaka, przede wszystkim jest pracą interdyscyplinarną, w zdecydowanej większości o charakterze numerycznym. Łączy zagadnienia związane z projektowaniem i zachowaniem płyt betonowych pełniących funkcje nawierzchni drogowych lub lotniskowych, oraz z mechaniką gruntów, poprzez podbudowę i podłoża tychże nawierzchni. Złożoność problematyki zwłaszcza w kontekście zarówno obciążeń cyklicznych generowanych

przez ruch pojazdów czy samolotów, jak i teorii konsolidacji i struktur reologicznych sprawia, że jest ona wciąż jak najbardziej aktualna.

Prawidłowe określenie stanu odkształcenia i naprężenia, wywołanego czynnikami zewnętrznymi w nawierzchni, podbudowie i podłożu gruntowym, ma kluczowe znaczenie w całym procesie projektowania i diagnostyce nawierzchni drogowych i lotniskowych. Uwzględnia się tu szereg czynników w tym m.in. trwałość zmęczeniową w stosunku do której dwa powszechnie znane podejścia: empiryczne i mechanistyczno-empiryczne, nie są jak dotąd znormalizowane. Bez względu na wybór metody projektowania szczególnie istotnym elementem jest fakt całościowego traktowania nawierzchni drogowych i lotniskowych z gruntem, mimo warstwowej budowy całego układu. W modelowaniu metodą elementów skończonych (MES) uwzględnia się różne modele konstytutywne do opisu warstw nawierzchni i warstw podłoża gruntowego. Znaczenie mają tu: rodzaj nawierzchni – sztywne (betonowe), podatne (mineralno-asfaltowe) i mieszane; charakter obciążenia – dynamiczne, cykliczne, temperaturą; rodzaj i stan naturalnego podłoża gruntowego; wpływ wody – w podłożu i opadowej.

W pracy sztywnych nawierzchni betonowych większe znaczenie odgrywiają naprężenia, a nie odkształcenia. W metodach analitycznych naprężenia te szacowane są na podstawie teorii Westergaarda, ale z racji jej ograniczeń często sięga się po metody numeryczne, co do których nie ma jednoznacznych wytycznych. To stwarza szereg możliwości interpretacyjnych, bez możliwości wiarygodnej weryfikacji. Ogólnie rzecz biorąc naprężenia w płycie betonowej wywołane są „od góry” obciążeniem od kół pojazdów, „od środka” gradientem temperatury, „od dołu” osiadaniem podłoża na skutek konsolidacji pierwotnej i wtórnej oraz odkształceniem podłoża pod wpływem działania obciążenia cyklicznego, wywołującego dodatkowo zmienne przyrosty ciśnienia wody w porach gruntu. Czynniki sprawcze związane z podłożem gruntowym obejmują zagadnienia tzw. małych ( $10^{-5} - 10^{-3}$ ) i bardzo małych odkształceń ( $< 10^{-5}$ ), naprężeń efektywnych oraz tzw. struktur reologicznych, które nie zawsze są poprawnie lub nie są w ogóle zaimplementowane w komercyjnie dostępnych programach obliczeniowych bazujących na metodzie elementów skończonych. Tak więc kompleksowe podejście do projektowania nawierzchni betonowych wymaga szerokiej wiedzy z zakresu zaawansowanych modeli konstytutywnych gruntów. Rozwój w tym temacie obserwuje się od lat 80-tych ubiegłego wieku i z różną intensywnością trwa on do dziś. W miarę coraz pełniejszego opisu skomplikowanych procesów zachodzących w gruntach, można coraz bardziej wiarygodnie projektować i przewidywać zachowanie się sztywnych nawierzchni betonowych.

I to właśnie stanowi punkt wyjścia do zadań realizowanych przez mgr inż. Kazimierza Józefiaka. Kompleksowe ujęcie zagadnień konsolidacji gruntu i rozwoju pętli histerezy w gruntach w świetle struktur reologicznych, z wykorzystaniem komercyjnego oprogramowania Abaqus, zaawansowanych modeli ośrodka gruntowego oraz autorskich skryptów w języku Python ma ostatecznie przyczynić się do bardziej rzeczywistego sposobu odzwierciedlenia pracy sztywnej nawierzchni drogowej.

### 2.3. Struktura rozprawy

Struktura pracy została przez Doktoranta przedstawiona we **Wstępie**, w części poświęconej **Celowi i zakresowi pracy**.

Dla przygotowania oceny, całość dysertacji można podzielić na 5 podstawowych części, a mianowicie:

- **Wstęp** wprowadzający do przedmiotu rozważań poprzez krótkie naświetlenie istoty prawidłowego określenia stanu odkształcenia i naprężenia sztywnych nawierzchni betonowych dróg i lotnisk, a kończący się sformułowaniem ogólnego głównego celu pracy i 12 celów szczegółowych. Tym samym Autor wprowadził istotne z punktu widzenia całej rozprawy pojęcia: trwałości zmęczeniowej, konsolidacji pierwotnej i wtórnej, pętli histerezy oraz małych i bardzo małych odkształceń, omówionych później szczegółowo odpowiednio w **rozdziałach 1.3.4, 3.2 – 3.4, 2.5** oraz **2.4**. Ponadto zwięźle przybliżył modele konstytutywne gruntów oraz modelowanie za pomocą struktur reologicznych, które następnie rozwinął w **rozdziałach 2** i **3**. Wszystkie te zagadnienia przedstawiono na tle przeglądu literatury stanowiącego ok 41% całej Bibliografii. Jednocześnie, w ramach realizacji celu pracy, Doktorant uzasadnił w ten sposób wybór autorskiego podejścia do projektowania nawierzchni betonowych w kontekście złożonych, nieliniowych właściwości gruntów, charakteryzujących się zmienną sztywnością w zależności od zakresu odkształceń realizujących się w podłożu pod wpływem obciążenia cyklicznego bądź konsolidacji pierwotnej i wtórnej.
- Drugą grupę problematyczną (**rozd. 1**) stanowią wybrane metody wymiarowania powierzchni betonowych wraz z definicjami i równaniami ((**1.1**) – (**1.69**)), wprowadzone przez formuły Westergaarda (**rozd. 1.2.1**), współczynnik podatności podłoża (**rozd. 1.2.3**) oraz kryterium zmęczeniowe (**rozd. 1.2.8**). Wszystkie zagadnienia przedstawiono na tle przeglądu literatury stanowiącego ok 21% całej Bibliografii. Zaprezentowany aktualny stan wymiarowania sztywnych nawierzchni pozwolił Doktorantowi wyspecyfikować parametry modelu MES dla wybranych wariantów konstrukcyjnych oraz schematów ułożenia przykładowych płyt nawierzchni autostrady i przeprowadzić w **rozd. 1.3** obliczenia naprężeń (**załącznik A**) z wykorzystaniem powszechnie dostępnego programu Abaqus z zaimplementowanym autorskim skrypcem w języku Python (**załącznik B**). Równocześnie Autor zwrócił uwagę na możliwość wykorzystania do obliczeń amerykańskiej metody AASHTO w warunkach krajowych, mimo iż metoda ta opiera się na danych klimatycznych z terenu USA (**rozd. 1.4**).
- Trzecią, obszerną grupę zagadnień, którym został poświęcony **rozd. 2** (ok. 35% całości) stanowi przegląd modeli konstytutywnych gruntów począwszy od liniowo sprężystych z podejściem homogenizacyjnym (**rozd. 2.2**), przez stopniowo coraz bardziej zaawansowane modele sprężysto – plastyczne (**rozd. 2.3**), a skończywszy na zaawansowanym modelu HSSMALL, uwzględniającym silną nieliniowość gruntów w zakresie małych i bardzo małych odkształceń (**rozd. 2.4**). Wszystkie zagadnienia przedstawiono na tle przeglądu literatury stanowiącego ok 34% całej Bibliografii. W tekście przytoczono aż 160 równań. Powyższy przegląd pozwolił Autorowi na przedstawienie możliwości modelowania gruntu z wykorzystaniem struktur reologicznych (**rozd. 2.5**) oraz na autorską modyfikację uogólnionego modelu Prandtla do opisu zachowania gruntu w warunkach trójosiowego ściskania z odciążeniem po monotonicznym ściskaniu i powtórny obciążeniu, z uwzględnieniem teorii małych odkształceń (**rozdziały 2.5.3** i **2.5.4**). Odniesienie rozważań do

przestrzeni badań trójosiowych było możliwe dzięki wykorzystaniu wyników badań doświadczalnych, udostępnionych Doktorantowi przez mgr. inż. Sebastiana Wilomskiego.

- Czwartą grupę problemów (18% całości) reprezentuje **rozdz. 3** oraz **załącznik C**, w których Autor przedstawił zagadnienia związane z konsolidacją gruntów z uwzględnieniem efektów reologicznych, na potrzeby czego przytoczył 57 równań. Wszystkie zagadnienia przedstawiono na tle przeglądu literatury stanowiącego ok 16% całej Bibliografii. Po dokonaniu podziału procesu konsolidacji na 3 fazy: (1) - początkową (tzw. natychmiastową), (2) - pierwotną, związaną z dyssypacją nadwyżki ciśnienia wody w porach gruntu, oraz (3) - wtórną, wywołaną pełzaniem, Doktorant wyprowadził dodatkowe równania konsolidacji pierwotnej (**rozdz. 3.2** i **załącznik C**), uzasadniając tym samym zgodność rozwiązań numerycznego i analitycznego. W dalszej kolejności (**rozdz. 3.5**) mgr inż. K. Józefiak rozbudował omawiane wcześniej struktury reologiczne o dodatkowe elementy, pozwalające na modelowanie zachowania się gruntu w stanie wszechstronnego ściskania oraz uwzględniające efekty pełzania podczas konsolidacji wtórnej, a także odnoszące się do szkieletu gruntowego poprzez naprężenia efektywne (**rozdz. 3.5.3**). Na potrzeby powyższego kroku Doktorant zrealizował długotrwałe badania edometryczne na dwóch gruntach o niewielkiej zawartości części organicznych ( $I_{om} = 6.5 - 6.7\%$ ) (**rozdz. 3.4**).
- Piąta grupa, którą reprezentują **rozdział 4** oraz **załącznik D** jest podsumowaniem poprzednich rozważań (zwłaszcza w zakresie konsolidacji wtórnej) i rozwiązaniem złożonego zadania sprzężonego, łączącego zagadnienia z zakresu geotechniki oraz projektowania nawierzchni drogowych. Doktorant zbudował trójwymiarowy model układu „nawierzchnia betonowa – podbudowa - nasyp budowlany – podłoże gruntowe” o standardowej geometrii oraz podłożu uwarstwionym w dwóch wariantach: słabym - z warstwą gruntu organicznego oraz mocnym – również z warstwą gruntu organicznego, ale wzmocnionym kolumnami DSM. Przeprowadzone zaawansowane analizy MES potwierdziły w okresie 3-letniej eksploatacji istotny wpływ osiadania podłoża gruntowego na naprężenia w konstrukcji nawierzchni i bezpośredni związek z jej trwałością zmęczeniową. W nienumerowanym rozdziale końcowym podsumowującym całość Doktorant zawarł własne sformułowania osiągnięć rozprawy oraz perspektywicznego, dalszego rozwoju tematyki badań, którą zainicjowano w omawianej pracy. Jednocześnie wykazał, że zaprezentowane procedury i algorytmy obliczeniowe (również współautorskie) z powodzeniem wykorzystywane są w ostatnich latach przez zespoły, reprezentujące Instytut Dróg i Mostów WIL PW oraz Instytut Badawczy Dróg i Mostów w Warszawie, do wymiarowania konstrukcji nawierzchni betonowych dróg krajowych i autostrad w Polsce.

**W kontekście wyżej przedstawionej argumentacji, strukturę i układ pracy należy uznać za logiczny.**

### **3. Ocena dorobku rozprawy**

Recenzowana rozprawa stanowi oryginalną propozycję rozwiązania problemu naukowego jakim jest kompleksowe ujęcie zagadnień projektowania sztywnych nawierzchni betonowych dróg i lotnisk z uwzględnieniem złożonych, nieliniowych właściwości gruntów, w tym konsolidacji pierwotnej i wtórnej.

Na podstawie własnych doświadczeń w wymiarowaniu konstrukcji nawierzchni betonowych oraz wnikliwej analizy istniejącego w tym zakresie stanu wiedzy Autor stwierdził, że prawidłowe określenie stanu odkształcenia i naprężenia, wywołanego czynnikami zewnętrznymi, jest kluczowe w poprawnym przewidywaniu tzw. trwałości zmęczeniowej materiału. Nie w pełni znormalizowany proces projektowania powinien w związku z tym uwzględniać własności wszystkich materiałów, z jakich zbudowana jest droga, uznając, że ta definicja obejmuje nie tylko materiały konstrukcyjne, ale również podłoże gruntowe: naturalne lub wzmocnione. W kontekście rozpatrywanych sztywnych nawierzchni betonowych, osiadania podłoża gruntowego, nawet niewielkie, mają istotny wpływ na wystąpienie naprężeń w płytach drogowych, a tym samym na ich trwałość w okresie eksploatacji.

Grunt, jako ośrodek porowaty, wielofazowy i ziarnisty jest materiałem trudnym do jednoznacznego opisu, czego dowodzi wnikliwy przegląd modeli konstytutywnych gruntów zamieszczony w **rozd. 2**. Zagadnienia związane z odkształceniami podłoża wymagają stosowania zaawansowanych modeli, które uwzględniają takie zjawiska jak: silną nieliniowość gruntów (spadek sztywności) w przedziałach małych i bardzo małych odkształceń, rozwój pętli histerezy (akumulację odkształceń plastycznych) przy długotrwałym obciążeniu cyklicznym oraz konsolidację pierwotną i wtórną (dyssypację nadwyżki ciśnienia wody w porach gruntu, wpływ naprężeń efektywnych działających na szkielet gruntowy oraz pelzanie gruntu).

Na podstawie ww. przesłanek Doktorant zrealizował odpowiedni program badawczy, obejmujący w większości analizy numeryczne oraz weryfikację doświadczalną w edometrze (badania własne) i aparacie trójosiowego ściskania (udostępnione wyniki badań). Dzięki temu zaproponował autorskie i współautorskie procedury wymiarowania nawierzchni betonowych uwzględniające specyficzne własności gruntu. **Udział własny w prezentowanej rozprawie wraz z załącznikami wynosi ponad 60% całości.**

Cele naukowe pracy zostały opisowo, w jasny sposób sformułowane we **Wstępie**. Do ich realizacji niezbędna była rozległa wiedza z zakresu projektowania i wymiarowania nawierzchni drogowych, mechaniki gruntów, modelowania obserwowanych zjawisk, biegłość w programowaniu oraz w prowadzeniu analiz zarówno teoretycznych, jak i otrzymanych wyników doświadczalnych. Według mojej opinii Doktorant wykazał się wszystkimi tymi cechami, a przedstawiona przez Niego praca w sposób zwięzły i konsekwentny realizuje zawarte w niej cele.

Do najważniejszych elementów oryginalnych rozprawy doktorskiej zaliczam:

- Wnikliwy przegląd aktualnego stanu modelowania zachowania się gruntów zwłaszcza w kontekście silnej nieliniowości w przedziale odkształceń  $< 10^{-3}$  oraz konsolidacji z efektami reologicznymi.
- Obszerny przegląd metod projektowania nawierzchni betonowych zarówno analitycznych, empirycznych, jak i uwzględniających metodę elementów skończonych.
- Wydzielenie (od strony gruntu) kluczowych czynników warunkujących powstanie naprężeń w płycie betonowej: zmiana sztywności, rozwój pętli histerezy, konsolidacja pierwotna i wtórna.

- Propozycję automatyzacji procesu wyznaczania naprężeń w sztywnej płycie za pomocą autorskiego skryptu w języku Python zaimplementowanego w komercyjnym oprogramowaniu Abaqus.
- Rozwinięcie zagadnień homogenizacji oraz szeroko rozumianej jednowymiarowej konsolidacji gruntu w kontekście struktur reologicznych.
- Weryfikację doświadczalną (na podstawie długotrwałych badań edometrycznych gruntów organicznych) zaproponowanych autorskich modeli reologicznych konsolidacji gruntów, ze szczególnym naciskiem na konsolidację wtórną.
- Weryfikację numeryczną wyspecyfikowanych równań i przyjętych modeli na podstawie analizy złożonego zadania geotechniczno-drogowego.
- Biegłe opanowanie metodyki rozwiązywania złożonych zagadnień geotechniczno-drogowych za pomocą metody elementów skończonych.

#### 4. Uwagi szczegółowe i dyskusyjne

Zasadniczo układ pracy, za wyjątkiem **Wstępu**, odpowiada następującej konwencji: rozdział, jako grupa zagadnień – rozpoznanie literaturowe – analiza i dyskusja funkcjonujących uproszczeń i założeń – propozycja autorska wprowadzenia uzupełnień i modyfikacji wraz z przykładem. Kulminację stanowi **rozdział 4**, gdzie na przykładzie złożonego zadania geotechniczno-drogowego uwzględniono większość omawianej problematyki.

##### 4.1 Grupa pierwsza zagadnień: Wstęp

Biorąc pod uwagę interdyscyplinarny charakter rozprawy, Wstęp spełnił swoją podstawową rolę, a mianowicie naświetlił w sposób przekonujący i wystarczający wszystkie istotne zagadnienia poruszane w pracy. W tej kwestii Recenzent nie ma żadnych uwag.

##### 4.2 Grupa druga zagadnień: rozdział 1

Zaprezentowane metody wymiarowania sztywnych nawierzchni betonowych wykazały trudności w wyznaczeniu trwałości zmęczeniowej materiału m.in. z uwagi na nieprecyzyjne oszacowanie naprężeń występujących w płytach betonowych przy braku uwzględnienia odkształceń podłoża gruntowego. W tej części pracy Doktorant wielokrotnie nawiązuje do amerykańskiej metody AASHTO i właśnie tej metody dotyczą poniższe uwagi.

- **rozd. 1.2.4** – Ze względu na to, że metody wymiarowania nawierzchni drogowych nie należą do głównego nurtu wiedzy recenzenta, który jest geotechnikiem, to zderzenie z parametrami podawanymi w jednostkach imperialnych ([kip], [psi], [mph]) było dość „stresujące” mimo znajomości samych parametrów, jak np. modułu Younga. Jednocześnie recenzent nie ma pewności czy metoda AASHTO jest powszechnie znana polskim inżynierom drogownictwa. Z tego względu brak podania na wstępie przeliczników jednostek imperialnych na jednostki układu SI jest drobnym niedopatrzeniem ze strony Doktoranta.
- str. 59 - W **rozd. 1.4.2** dotyczącym zastosowania metody AASHTO w warunkach krajowych, Autor stwierdza, że: „Metody opracowane w Stanach Zjednoczonych są często



odrzuć jako nieprzydatne w warunkach krajowych z powodu faktu, że zostały sformułowane przy wykorzystaniu danych klimatycznych z terenu USA.”. Recenzent nie do końca może zgodzić się z takim poglądem. Biorąc pod uwagę ogromny obszar Stanów Zjednoczonych można założyć, że na pewno znajdzie się taki obszar, który klimatycznie odpowiadałby klimatowi panującemu w Polsce.

**Proszę Doktoranta o komentarz w tej sprawie.**

#### 4.3 Grupa trzecia zagadnień: rozdział 2

Wymieniony rozdział jest kluczowym rozdziałem rozprawy biorąc pod uwagę jej tytuł, czyli „Modelowanie konstytutywnych właściwości gruntów jako podłoża betonowych nawierzchni”. W nim to właśnie Autor dokonuje przeglądu wybranych modeli konstytutywnych gruntów poczynawszy od najprostszych, a skończywszy na złożonych. Ponadto wprowadza pojęcia małych i bardzo małych odkształceń oraz pętli histerezy.

- **rozd. 2** – Podstawowa uwaga całościowa związana jest z doborem literatury. Absolutnie nie negując i nie umniejszając znaczenia autorów, przytoczonych w tym rozdziale publikacji, recenzent nie może przymknąć oka na fakt, że Doktorant nie zapoznał się i nie wykorzystał podstawowej i ze wszech miar istotnej z punktu widzenia poruszanej tematyki publikacji prof. Macieja Gryczmańskiego pt. „Wprowadzenie do opisu sprężysto-plastycznych modeli gruntów” (Gryczmański M. 1995 Wprowadzenie do opisu sprężysto-plastycznych modeli gruntów, PAN Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej, Instytut Podstawowych Problemów Techniki, Warszawa). Ewentualnie nowszej pozycji, jaką jest „State of the art in modelling of soil behaviour at small strains” (Gryczmański M. 2009 State of the art in modelling of soil behaviour at small strains, Architecture Civil Engineering Environment, Vol. 2, No. 1, 61-80). Na pierwszej z przytoczonych publikacji, tzw. „żółtej książeczce” wychowały się (i nadal wychowują się) całe rzesze geotechników.
- str. 93 – Doktorant napisał, że: „(...) w teście trójosiowym (z konsolidacją i z odpływem: TXICD lub TXICU), gdy (...)”

**Proszę Doktoranta o precyzyjne wyjaśnienie zastosowanych skrótów TXICD oraz TXICU, gdyż poprzedzający je opis nie jest zgodny z prawdą, a przynajmniej w większości nie jest poprawny.**

- str. 105 – Doktorant napisał, że: „Wyniki dopasowania krzywej  $\omega(\varepsilon)$  do rezultatów badania przy ciśnieniu efektywnym  $p = 600 \text{ kPa}$  (...)”.

**Proszę Doktoranta o wyjaśnienie, co miał na myśli pisząc „ciśnienie efektywne”: ciśnienie w kłoszu, średnie naprężenie, a może coś innego?** Jednocześnie recenzent zwraca uwagę na fakt, że w geotechnice wartości efektywne (z małymi wyjątkami) zaznacza się „primem” (powinno być „p”, a nie „p”).

#### 4.4 Grupa czwarta zagadnień: rozdział 3

Rozdział 3 w całości poświęcony jest zagadnieniom konsolidacji. Zawiera zarówno część eksperymentalną (autorskie badania edometryczne), jak i analityczno-numeryczną. Doktorant

operuje pojęciami konsolidacji pierwotnej i wtórnej oraz przypisanym im strukturom reologicznym, które odpowiednio rozwija.

- **rozd. 3** – Uwaga ogólna dotycząca stosowanego nazewnictwa. Autor posługuje się sformułowaniem „nadcisnienie porowe”, przy czym recenzent uważa, że bardziej właściwe jest „nadwyżka ciśnienia w porach”.
- **rozd. 3.4** – Rozdział w całości poświęcony badaniom edometrycznym. Z punktu widzenia recenzenta Doktorant pominął w opisie wiele istotnych szczegółów, które wymagają uzupełnienia. Są to:
  - 1) Według jakiej normy realizowano badania?
  - 2) Czy badane grunty organiczne pochodziły z dwóch różnych lokalizacji i tylko przypadkowo miały zbliżoną zawartość części organicznych?
  - 3) Czy i w jaki sposób wyznaczono czas konsolidacji, aby móc oszacować czas trwania konsolidacji pierwotnej?
  - 4) Dlaczego zastosowano różne kroki obciążenia dla obu próbek?
- str. 117 – Doktorant napisał, że: „*Wyniki badań konsolidacji w edometrze przedstawiono na rysunkach (...)*.” Właściwsze sformułowanie powinno brzmieć: „*Wybrane wyniki badań konsolidacji w edometrze przedstawiono na rysunkach (...)*.”
- str. 119, **Rysunki 3.8 – 3.10** – W tytułach rysunków zabrakło informacji czy dany krok obciążenia dotyczy obciążenia pierwotnego czy wtórnego. O ile w przypadku próbki nr 2 nie ma to znaczenia, gdyż z Rys. 3.7 wynika, że było realizowane tylko obciążenie pierwotne, o tyle dla próbki nr 1 nie jest to takie oczywiste.

#### 4.5 Grupa piąta zagadnień: rozdział 4 + Podsumowanie

**Rozdz. 4** jest kolejnym kluczowym rozdziałem rozprawy, który w sposób numeryczny podsumowuje dotychczasowe rozważania. W analizowanym metodą elementów skończonych zadaniu, Autor szacował wpływ trwającego w czasie osiadania nasypu na naprężenia w płytach betonowych nawierzchni drogowej. Przykład obliczeniowy był złożony i uwzględniał standardową nawierzchnię w postaci płyt betonowych o grub. 30 cm, podbudowę o grub. 20 cm, średnio zagęszczony nasyp budowlany o wys. 2.8 m oraz nawodnione podłoże gruntowe zbudowane z dwóch warstw piasku drobnego (odpowiednio 1.4 m i 4.4 m), przedzielonych warstwą słabego gruntu organicznego o miąższości 2.2 m. Doktorant dobrał właściwe modele obliczeniowe, uwzględnił filtrację oraz proces konsolidacji zarówno pierwotnej, jak i wtórnej. Sytuację rozpatrzył w 2 wariantach pod kątem geotechnicznym: podłoże słabe oraz podłoże wzmocnione kolumnami DSM. Drobne uwagi recenzenta związane są z:

- 1) pewną niekonsekwencją w opisach geotechnicznych z uwagi na „starą” polską normę PN i Eurocod 7. Na przykład symbole gruntów są wg EC7 (FSa), natomiast wartość stopnia zagęszczenia  $I_D = 0.5$  jest wartością wg podziału z PN (wg EC7 byłoby to  $I_D = 50\%$ );
- 2) str. 41 – brakiem uszczegółowienia: „*Parametry nasypu budowlanego odpowiadają podłożu klasy G1.*” – **tnz. jakie parametry?**
- 3) str. 143, Tabela 4.2 – brakiem wyjaśnienia symboli, np. **co Doktorant rozumie przez „ $\rho_{sat}$ ”, „ $\rho_d$ ”?**



Recenzent niezwykle pozytywnie ocenia ten fragment pracy. Wykazane w nim zależności potwierdziły negatywny wpływ odkształcającego się podłoża gruntowego na trwałość zmęczeniową sztywnych nawierzchni betonowych i udowodniły celowość podjętej tematyki badawczej. Do tej grupy zagadnień recenzent nie ma więcej uwag merytorycznych. Podobnie jak Doktorant jest świadom konieczności kompleksowego rozpatrywania zagadnień mechaniki nawierzchni i mechaniki gruntów.

W zakończeniu rozprawy (**rozd. Podsumowanie i kierunki dalszych badań**) Doktorant dość szczegółowo podsumował wyniki pracy, które jednocześnie potwierdzają zasadność przyjętych celów naukowych: głównego i szczegółowych, oraz koncepcji badawczej. Podsumowanie podkreśla także osiągnięcia badawcze i oryginalne elementy rozprawy, za które Autor uznaje:

- Zaprezentowanie współautorskiej procedury projektowania betonowych nawierzchni drogowych, uzupełnionej o autorską metodę wyznaczania naprężeń w płycie (załącznik B).
- Na podstawie wnikliwego przeglądu modeli konstytutywnych gruntów zaproponowanie autorskiej modyfikacji modelu reologicznego Prandtla w celu bardziej wiernego zamodelowania pętli histerezy w przypadku obciążenia cyklicznego. Autorskie podejście do zagadnienia zweryfikowano korzystając z wyników badań trójosiowego ściskania z odciążeniem.
- Rozszerzenie zagadnienia jednowymiarowej konsolidacji gruntu na dowolne struktury reologiczne z weryfikacją eksperymentalną na podstawie badania ściśliwości gruntu organicznego w edometrze i jednoczesnym podaniem wytycznych do uogólnienia przypadku do przestrzeni trójwymiarowej.
- Przeprowadzenie wnikliwej analizy MES złożonego zadania geotechniczno-drogowego udowadniającego potrzebę kompleksowego rozpatrywania zagadnień nawierzchni drogowych i lotniskowych z podłożem gruntowym, zwłaszcza w kontekście doboru technologii i geometrii wzmocnienia gruntu jako metody redukcji naprężeń w płytach nawierzchni.

**Kończąc ocenę merytoryczną rozprawy recenzent chciałby podkreślić jej wysoką wartość oraz cenny wkład w rozwój metod wymiarowania sztywnych nawierzchni betonowych poprzez rozwinięcie metod modelowania podłoża gruntowego. Przedstawione powyżej uwagi szczegółowe i dyskusyjne nie pomniejszają wymienionych w recenzji własnych i oryginalnych osiągnięć Autora.**

#### **5. Uwagi natury stylistyczno - redakcyjnej:**

Stronę stylistyczno - redakcyjną rozprawy charakteryzuje wyjątkowa staranność. W treści pracy przywołano wszystkie rysunki i tabele zamieszczone w rozprawie. Spis literatury sporządzono skrupulatnie. Do pracy dołączono Spis ważniejszych oznaczeń oraz Spisy rysunków i tabel. Drobne uchybienia dotyczą:

- niewłaściwego znakowania geotechnicznych wartości efektywnych (bez „prima”);
- niepoprawnego nazywania edometrycznych modułów ściśliwości - modułami odkształcalności. Odniesienie do tych modułów przewija się wielokrotnie przez całą pracę w różnych

konfiguracjach: moduł edometryczny, edometryczny moduł ściśliwości pierwotnej, edometryczny moduł odkształcalności pierwotnej, moduł odkształcalności edometrycznej, itp. Recenzent zwraca uwagę na fakt, że w edometrze badana jest ściśliwość gruntu, której miarą są (edometryczne) moduły ściśliwości pierwotnej i wtórnej. Używanie sformułowania „moduł odkształcalności” zamiast „moduł ściśliwości” nie jest poprawne;

- stosowania „kalki” z jęz. ang. odnośnie „pore pressure”, które w poprawnym tłumaczeniu powinno brzmieć „ciśnienie (wody) w porach gruntu”, a nie „ciśnienie porowe”;
- „nadużywania” numeracji równań. Według recenzenta nie powinno przypisywać się numeracji tym równaniom, w których dokonuje się tylko podstawień do wzoru lub podaje wynik obliczeń, np. równania (1.52), (1.61) czy (1.65) i inne;
- lekkiego chaosu w opisie osi pionowej i w tytułach rysunków (str. 134-135 i Rysunki 3.25 – 3.28). Według opisu Doktoranta oś pionowa reprezentuje wartości „ $\log(\sigma')$ ”, dlaczego więc osie nie zostały tak opisane? Natomiast w tytule Rys. 3.25 zabrakło informacji, że jest to wykres pół-logarytmiczny, co z kolei napisano przy Rys. 3.27 – jednym słowem brak konsekwencji;
- błędnej numeracji załączników. Biorąc pod uwagę kolejność powoływanych w tekście załączników, Zał. B powinien być Zał. A (był powoływany jako pierwszy), a Zał. A powinien być opisany jako Zał. B.

## 6. Wniosek końcowy

Opiniowana rozprawa należy do prac numeryczno-analitycznych z elementami doświadczalnymi, o charakterze interdyscyplinarnym. Biorąc pod uwagę przedstawione w niej rezultaty, a także aplikacyjny zakres poruszanych problemów oraz doceniając jakość zaproponowanych rozwiązań numerycznych, oceniam recenzowaną rozprawę bardzo wysoko. Rozprawa ta stanowi oryginalną propozycję rozwiązania problemu naukowego oraz wykazuje odpowiedni poziom wiedzy teoretycznej kandydata w dziedzinie nauk technicznych, w dyscyplinie Inżynieria Lądowa i Transport. Stwierdzone w rozprawie uchybienia i kwestie dyskusyjne są moim osobistym poglądem na rozważane problemy badawcze i nie obniżają ogólnej oceny rozprawy.

W związku z tym we wniosku końcowym stwierdzam, że rozprawa mgr. inż. Kazimierza Józefiaka pt. „*Modelowanie konstytutywnych właściwości gruntów jako podłoża betonowych nawierzchni drogowych.*” spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim, zgodnie z Ustawą o Stopniach i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule z Zakresu Sztuki, z dnia 14 marca 2003 r. z późniejszymi zmianami, i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.



dr hab. inż. Małgorzata Jastrzębska, prof. PŚ