

Dr hab. inż. Mirosław Graczyk, prof. IBDiM

Warszawa, 01.06.2023 r.

Instytut Badawczy Dróg i Mostów

Ul. Instytutowa 1

03-302 Warszawa

*Prof. dr hab. inż. Andrzej Garbacz*  
23/06/2023

WPEŁYNIŁO  
Dnia 22.06.2023  
L. nr IL.PW / 364 / 2023

## Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Tutki

DZIEKAN  
Wydziału Inżynierii Lądowej

pt.

prof. dr hab. inż. Andrzej Garbacz

# OCENA WPŁYWU WYBRANYCH EFEKTÓW DYNAMICZNYCH NA KLUCZOWE CHARAKTERYSTYKI MECHANICZNE NAWIERZCHNI DROGOWEJ PODATNEJ I PÓLSZTYWNEJ

## 1. PODSTAWA FORMALNA WYKONANIA RECENZJI

Podstawą recenzji jest zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Warszawskiej: dr hab. inż. Konrada Lewczuka, profesora uczelni (pismo WTBD.521.DR.30.2023 z dnia 14.04.2023 r.).

## 2. PODSTAWA MERYTORYCZNA RECENZJI

Recenzja dotyczy rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Tutki pt. „Ocena wpływu wybranych efektów dynamicznych na kluczowe charakterystyki mechaniczne nawierzchni drogowej podatnej i półsztywnej”, wydanej w 2023 roku na Politechnice Warszawskiej.

Promotorem rozprawy jest: prof. dr hab. inż. Roman Nagórski.

Mgr inż. Paweł Tutka pracuje na stanowisku asystenta w Instytucie Dróg i Mostów w Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej.

Według przedstawionego sprawozdania opublikował ponad 20 różnych publikacji i uzyskał następujące wartości parametrów bibliometrycznych:

h-index: 3

- liczba cytowań: 13 - Źródło: Web of Science

- liczba cytowań: 35 - Źródło: Google Scholar

- liczba cytowań: 19 - Źródło: Scopus

$\Sigma$  Impact Factor - 3,748

### 3. CHARAKTERYSTYKA OGÓLNA ROZPRAWY

Rozprawa doktorska mgr inż. mgr inż. Pawła Tutki dotyczy analiz wpływu sił bezwładności przy obciążeniach konstrukcji nawierzchni podatnej i półsztywnej w modelach mechanicznych na wyniki stanu odkształceń i ugięć nawierzchni drogowej.

Głównym celem pracy było zbadanie wpływu uwzględnienia sił bezwładności na wyniki modelu obliczeniowego w przypadku projektowania konstrukcji nawierzchni drogowej z uwzględnieniem nierówności obciążonej nawierzchni oraz w przypadku badań nieniszczących FWD.

Dodatkowym celem pracy było znalezienie zależności trwałości nawierzchni w przypadku projektowania nawierzchni a także analiza ugięcia nawierzchni w badaniu FWD od prędkości lub czasu obciążenia.

Kolejny cel to opracowanie i uwzględnienie procedur obliczeń pól odwrotnych z siłą bezwładności i bez niej.

Cele Doktorant realizował w kolejnych etapach dysertacji:

- Analiza i ocena wpływu uwzględnienia sił bezwładności, w równiach równowagi dla konstrukcji nawierzchni, na ugięcie i kluczowe odkształcenia nawierzchni drogowej podatnej lub półsztywnej, w przypadku obciążenia od koła pojazdu ciężkiego. (Rozdział 4).
- Analiza i ocena wpływu uwzględnienia sił bezwładności, w równiach równowagi dla pojazdu poruszającego się po nawierzchni, na ugięcie i kluczowe odkształcenia nawierzchni drogowej, w przypadku obciążenia od koła pojazdu ciężkiego. Sposób obciążenia właściwy dla projektowania nawierzchni drogowej z uwzględnieniem nierówności drogi (powodującej drgania pojazdu). (Rozdział 5).
- Analiza i ocena wpływu uwzględnienia sił bezwładności w równiach równowagi dla nawierzchni drogowej na ugięcia w przypadku badania nawierzchni, w którym obciążenie nawierzchni jest szybkoszmiennie w czasie np. badanie FWD (Rozdział 6).

Rozprawa jest obszerna i obejmuje 285 stron, zawiera 7 rozdziałów i można ją podzielić na cztery części tj.: wstęp, przegląd stanu wiedzy, część zasadnicza merytoryczna oraz podsumowanie.

Część pierwsza obejmuje streszczenia i wstęp. Część druga to przegląd literatury. Część trzecia, główna, merytoryczna, dysertacyjna przedstawiona została w rozdziałach od 3 do 6, w niej przedstawiono realizację celów. Czwartą, ostatnią część pracy, stanowi podsumowanie całości dysertacji, tj. rozdział 7, bibliografia oraz wykaz rysunków i tablic.

Przedmiotem pracy było zbadanie wpływu uwzględnienia sił bezwładności w modelach mechanicznych na wyniki stanu odkształceń i ugięć nawierzchni drogowej. Rozważono przypadki obciążenia istotne przy projektowaniu i eksploatacji nawierzchni drogowej podatnej i półsztywnej oraz w czasie badań nieniszczących polegających na pomiarze ugięć pod znanym zmiennym w czasie obciążeniem.

Doktorant w rozdziale pierwszym pt. „Wstęp” (str. 15-26, 12 stron) przedstawił cele pracy, opisał szczegółowo zakres dysertacji oraz uzasadnił podstawy podjęcia zakresu problemu badawczo - naukowego.

W rozdziale drugim pt. „Przegląd literatury” (str. 27-37, 10 stron) omówiono literaturę przedmiotu w podziale na poszczególne zagadnienia podejmowane w pracy: trwałości nawierzchni z uwzględnieniem zjawiska dynamicznych od poruszających się pojazdów i wpływu nierówności nawierzchni oraz wpływu zjawisk dynamicznych na wyniki badań FWD. W obszernym rozdziale trzecim pt. „Modele mechaniczne nawierzchni drogowej podatnej i półsztywnej” (str. 38-94, 57 stron) Autor omówił zastosowane w pracy modele nawierzchni drogowej oraz przedstawił narzędzia stosowane w pracy, takie jak modele elementów skończonych wykonane w programie ABAQUS (w tym z zastosowaniem elementów specjalnych o nieskończonym wymiarze), program VEROAD, rozwiązanie Burmistera oraz samodzielnie zaimplementowane rozwiązania znanych w literaturze zadań, uwzględniających siły bezwładności przy zastosowaniu transformacji całkowych. Szczególną uwagę zwrócono na modelowanie lepkosprężystych własności warstw asfaltowych oraz weryfikację poprawności stworzonych modeli numerycznych.

W rozdziale czwartym, merytorycznym (pierwszym z trzech) pt. „Wpływ uwzględnienia efektów dynamicznych na ocenę trwałości nawierzchni drogowej” (str. 95-155, 61 stron) Doktorant analizuje obciążenie konstrukcji nawierzchni od koła pojazdu ciężkiego (100 kN na oś pojazdu), poruszającego się z różnymi prędkościami: 5 km/h, 30 km/h, 60 km/h, 90 km/h, 120 km/h. Autor przedstawił dyskusję na temat rozbieżności otrzymanych wyników ekstremalnych ugięć i odkształceń między modelami lepkosprężystymi i liniowo sprężystymi. Siły bezwładności w rozważanym przypadku były pomijalne, natomiast zmienność od prędkości obciążenia wyników krytycznych ugięć i odkształceń oraz trwałości obliczeniowych nawierzchni spowodowane było lepkosprężystymi własnościami warstw asfaltowych. Na podstawie zależności wyników od prędkości dla rozważanej konstrukcji nawierzchni, obliczono trwałość zmęczeniową, wykorzystując rozkład prędkości ruchu

pojazdów ciężkich. Zaproponowano metodę obliczania prędkości efektywnej oraz rozważono wyniki dla występujących realnie rozkładów prędkości pojazdów ciężkich.

Autor w rozdziale piątym pt. „Wpływ nierówności nawierzchni drogowej na trwałość obliczeniową” (str. 156-212, 57 stron) prezentuje sposób modelowania obciążenia z uwzględnieniem wpływu nierówności nawierzchni. W standardowym przypadku zakłada się stałe obciążenie, w rzeczywistości pojazd porusza się po nierównej drodze, co powoduje jego drgania, a zatem siła jest zmienna w czasie. Wykonano obliczenia dla przykładowej nierówności. Przy szybszym ruchu pojazdu siła oddziaływania na nawierzchnię była większa. W rozważanym przypadku decydujące były ciągle własności lepkosprężyste warstw asfaltowych. Największe ugięcia i odkształcenia uzyskano dla prędkości 5 km/h. Natomiast w sposób zauważalny różniły się one od rozwiązań z założeniem stałej wartości siły. W kolejnym kroku rozważono większy zakres nierówności, pochodzący z realnych pomiarów na sieci drogowej. Posiadane dane podzielono na 20 metrowe odcinki drogowe, dla których policzono wskaźniki IRI (International Roughness Index) oraz odchylenie standardowe siły od koła pojazdu. W ten sposób przy pomocy regresji znaleziono zależność odchylenia standardowego od IRI dla poszczególnych prędkości. Na podstawie odchylenia standardowego zbudowano przedział ufności dla siły obciążającej nawierzchnię, 95% kwantyl siły posłużył jako obciążenie, które dla wybranej wartości prędkości i IRI użyto do obliczenia krytycznych ugięć i odkształceń, a następnie trwałości. Dla dużych nierówności krytycznym przypadkiem było obciążenie nawierzchni z wysokimi prędkościami. Autor z uzyskanych wyników analiz wysuwa wniosek, że wpływ sił bezwładności w nawierzchni jest pomijalny.

Doktorant w rozdziale szóstym, ostatnim merytorycznym ) pt. „Wpływ efektów dynamicznych na wyniki badań nieniszczących FWD” (str. 213-248, 36 stron) rozważa zagadnienie obciążenia w badaniu Falling Weight Deflectometer (FWD), gdzie wartość obciążenia była szybkozmienna w czasie. Uwzględnienie sił bezwładności było w tym przypadku istotne. Wyniki analizy statycznej i dynamicznej znacznie się różniły. Zbadano wpływ tych różnic na obliczenia pół odwrotne. Wnioskiem podstawowym z analiz jest, że efekty dynamiczne nie powinny być ignorowane. Dodatkowo zwrócono też uwagę na kwestię wrażliwości wyników obliczeń w badaniach pół odwrotnych FWD.

Doktorant w ostatnim rozdziale, siódmym pt. „Podsumowanie” (str. 249 - 255, 7 stron) prezentuje całościowe podsumowanie pracy i przedstawia wnioski z wykonanych analiz i obliczeń z uwzględniania sił bezwładności w badanych przypadkach.

Pracę kończy zestawienie bibliograficzne z 133 pozycjami literaturowymi, spis rysunków i wykaz tablic.

W pracy zamieszczono 182 rysunki i 86 tablic.

Podsumowując:

- Tytuł pracy doktorskiej odpowiada treści rozprawy i jest zgodny z zakresem Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport.
- Układ pracy jest właściwy i dobrze przedstawia rozwiązanie problemu naukowego.
- Praca edytorsko przygotowana właściwie, układ tekstu jest przejrzysty, a rysunki i tablice wykonane poprawnie.
- Zastosowane piśmiennictwo odpowiada zakresowi merytorycznemu rozprawy doktorskiej.

#### **4. OCENA MERYTORYCZNA ROZPRAWY**

Recenzowana rozprawa dotyczy ważnego problemu związanego z projektowaniem i eksploatacją nawierzchni w zakresie wpływu wybranych efektów dynamicznych na kluczowe charakterystyki mechaniczne nawierzchni drogowej podatnej i półsztywnej.

Tematyka pracy doktorskiej wpisuje się w oczekiwania, które związane są z projektowaniem i utrzymaniem nawierzchni drogowej podatnej i półsztywnej o dużej trwałości typu „long-life pavement” czy „perpetual pavement”.

Temat pracy został dobrany trafnie i jest zgodny z dyscypliną naukową Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport.

Rozpoczynając pracę Doktorant określił cele oraz zakres i strukturę całości rozprawy. Do zakreślonych celów dysertacji Autor nie przedstawił explicite tez badawczych.

Następnie Autor przedstawił, bazując na 133 pozycjach literaturowych, obszerny, dogłębny i kompleksowy przegląd stanu wiedzy w zakresie: trwałości nawierzchni z uwzględnieniem zjawiska dynamicznych od poruszających się pojazdów i wpływu nierówności nawierzchni oraz wpływu zjawisk dynamicznych na wyniki badań FWD.

W rozdziale trzecim zestawiono i przeanalizowano zastosowane w dysertacji modele nawierzchni drogowej. Godne podkreślenia jest, że Autor zauważył istotność oddziaływania falowego na konstrukcję nawierzchni.

Doktorant w trzech kolejnych rozdziałach dysertacyjnych (rozdziały 4 – 6) rozważa zagadnienia, w których efekty dynamiczne zostały uwzględnione ze względu na fundamentalne znaczenie rozpatrywanego przypadku obliczeniowego lub ze względu na znaczny wpływ sił bezwładności na uzyskiwanie rezultaty. W każdym z tych obszernych rozdziałów wykonano obliczenia dla przypadku uwzględniającego siły bezwładności oraz gdy siły bezwładności w równaniach równowagi były pomijane. Analizowano w każdym z przypadków obliczenia przy wykorzystaniu modelu lepkosprężystego dla warstw asfaltowych lub modelu liniowo sprężystego przy przyjęciu jako moduł sprężystości warstw asfaltowych modułu dynamicznego dla danej częstotliwości obciążenia. Rozważono pięć różnych częstotliwości obciążenia nawierzchni. Obliczenia wykonano dla jednej przykładowej konstrukcji nawierzchni. Wykonane analizy i obliczenia są obszerne i przekonujące, ważne jest też, że Autor zauważa istotność oddziaływania falowego.

Godne podkreślenia jest, że Autor przedstawia istotne i wyczerpujące wnioski z dysertacji, które w sposób znaczący rzutują na projektowanie i eksploatację drogowych nawierzchni podatnych i półsztywnych.

Doktorant podjął się trudnego i ambitnego zadania badawczego, którego efekty mają ważne znaczenie naukowe i aplikacyjne w projektowaniu i eksploatacji drogowych nawierzchni podatnych i półsztywnych. W realizacji celów dysertacji Autor wykonał obszerne analizy obliczeniowe. Doktorant w sposób metodyczny i systematyczny dążył do osiągnięcia nakreślonych celów badawczych. W realizacji pracy Autor wykorzystał właściwe metody obliczeniowe oraz przeprowadził odpowiednie analizy, wnosząc własne istotne elementy badawcze.

Wnioski wynikające z pracy w pełni wynikają z analiz wykonanych w trakcie realizacji dysertacji.

Reasumując:

- Cele pracy są oryginalne i adekwatne do podjętej tematyki.
- Zastosowano odpowiednie metody badawcze.
- Cele pracy zostały zrealizowane.
- Wnioski z dysertacji są głębokie i wyczerpujące.
- Godne podkreślenia jest oryginalność i aktualność przedstawionych przez Doktoranta metod badawczych.

## 5. DYSKUSYJNE UWAGI DO ROZPRAWY

Analiza rozprawy wskazuje też na pewne pytania i uwagi dyskusyjne, takie jak:

1. W zakresie efektów dynamicznych podstawową konsekwencją działania sił bezwładności jest generowanie odpowiednich fal w nawierzchni. Szczególnie istotny wpływ występuje w układach warstwowych nawierzchni podatnych i półsztywnych. Należy to zagadnienie uwzględniać mocniej niż same siły bezwładności. Doktorant przedstawił ten problem jedynie w modelach mechanicznych nawierzchni.
2. W ocenie trwałości nawierzchni ważny jest czas oddziaływań obciążenia na konstrukcję. W układzie warstwowym nawierzchni od obciążenia poruszającego się generowane są procesy falowe, które oddziałują na konstrukcję nawierzchni w wydłużonym czasie, ponieważ oddziaływanie to wynika również z odbicia fal od warstw konstrukcyjnych nawierzchni i gruntu podłoża. W związku z tym, w sumie proces oddziaływania obciążenia na nawierzchnie jest dłuższy niż by to wynikało tylko z czasu trwania impulsu na powierzchni od obciążenia kołem pojazdu. Efekt ten jest zależny od prędkości propagacji fal (tj. od własności mechanicznych materiału nawierzchni: moduł Younga, współczynnik Poissona i gęstości) w warstwach oraz ich grubości i dopasowania falowego.
3. Czas impulsu przy obciążeniu FWD mieści się generalnie w przedziale 25 do 35ms, co odpowiada prędkości poruszającego się pojazdu z prędkością średnią ok. 30 km/h.
4. Należy mieć na uwadze w określaniu ugięć powierzchni, że szczególnie w nawierzchniach podatnych, bardzo duży wpływ na ugięcia całkowite konstrukcji ma nośność podłoża gruntowego.
5. Drobną uwagę redakcyjną:
  - na str. 25 użyto określenia moduł sprężysty (Hooke'a), a powinno być moduł sprężysty Younga

Reasumując, uważam, że rozprawa doktorska jest oryginalnym osiągnięciem badawczym Autora, a przedstawione uwagi nie wpływają istotnie na pozytywną ocenę dysertacji.

## 6. WNIOSEK KOŃCOWY

Stwierdzam, że Doktorant zrealizował postawione cele w pracy, a opiniowana dysertacja stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i wskazuje na dobry poziom wiedzy Autora z zakresu dyscypliny Inżynieria Lądowa Geodezja i Transport. Doktorant wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Bardzo ważnym i godnym podkreślenia walorem dysertacji jest jej potencjał aplikacyjny w projektowaniu konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych.

Oceniana przez mnie rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Tutki pt. „Ocena wpływu wybranych efektów dynamicznych na kluczowe charakterystyki mechaniczne nawierzchni drogowej podatnej i półsztywnej” spełnia warunki stawiane pracom doktorskim określone w art. 187 ustawy „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” z 20 lipca 2018 roku (Dz. U z 2021 r. poz. 478 z późniejszymi. zmianami)..

Wnoszę o przyjęcie rozprawy i o dopuszczenie Doktoranta do jej publicznej obrony.

*(Miroslaw Graczyk)*

