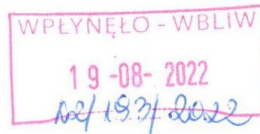


Dr hab. inż. Grzegorz Mazurek, prof. PŚk
Politechnika Świętokrzyska
Wydział Budownictwa i Architektury



Kielce, 16.08.2022

RECENZJA

pracy doktorskiej mgr inż. Eryka Mączki

pt.: „Trwałość mieszanek mineralno-asfaltowych z uwzględnieniem zmęczenia i regeneracji”

1. Podstawa opracowania

Podstawę opracowania stanowiło pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynierii Lądowej i Transportu Politechniki Wrocławskiej prof. dr hab. inż. Wojciecha Puły z dnia 20.06.2022 o nr W2746/2022.

Recenzję przygotowano uwzględniając zapisy Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. 2014 poz. 1789) oraz Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 22 września 2011 r. w sprawie szczegółowego trybu przeprowadzenia czynności w przewodach doktorskich oraz w postępowaniu o nadanie tytułu (Dz.U. Nr 204 poz. 1200).

2. Ogólna charakterystyka pracy

Recenzowana praca doktorska została przygotowana pod kierunkiem dr hab. inż. Piotra Mackiewicza, profesora uczelni Politechniki Wrocławskiej. Na osobę promotora pomocniczego został wyznaczony dr. inż. Bartłomiej Krawczyk. Rozprawa została przedstawiona na 301 stronach formatu A4, łącznie z częścią załącznikową. Praca składa się z dwóch głównych części: teoretycznej i doświadczalno-analitycznej. Część zasadnicza obejmuje: spis treści, wykaz skrótów, streszczenia, wstęp, 6 rozdziałów i bibliografię. W pracy zamieszczono streszczenie w języku angielskim. Spis literatury obejmuje 322 pozycje.

W rozdziałach 1., 2. i 3. Autor wprowadza odbiorcę w tematykę poruszanego zagadnienia. Została tu sprecyzowana teza pracy oraz cel, który został rozwinięty w formie sześciu celów szczegółowych.

W rozdziale 4. (*Przegląd stanu wiedzy*) dokonano gruntownego przeglądu literatury, który był pomocny przy realizacji postawionego celu pracy. W tej części przybliżono tematykę związaną z genezą powstawania zjawiska regeneracji (healingu), wobec którego były podporządkowane dalsze działania badawcze i analityczne. Zestawienie różnych ocen wydajności „self-healingu” bardzo dobrze zostało przedstawione w tablicy 5. w podrozdziale 4.4. Treść rozdziału 4. zawiera informacje o czynnikach wpływających na trwałość zmęczeniową, co zostało czytelnie

przedstawione w formie tabelarycznej. Duża część tego rozdziału obejmowała również dane na temat: istoty zjawiska zmęczenia warstw nawierzchni podatnej, metod jego badania oraz kryteriów stawianych trwałości zmęczeniowej nawierzchni asfaltowych obowiązujących w Polsce. Uwzględniono również zagadnienia związane ze sposobami projektowania składu mieszanek mineralno-asfaltowych oraz technologii ich produkcji. Ostatnim elementem poruszonym w tej części był opis rozkładu temperatury w przekroju nawierzchni. Była to ważna kwestia mająca dwojakie znaczenie. Po pierwsze sztywność mma zależy od temperatury, a po drugie zjawisko „healingu” jest intensyfikowane przez wysoką temperaturę.

Rozdział 5. (*Część eksperymentalno-doświadczalna*) stanowił najważniejszą część pracy. W związku z tym był to najbardziej obszerny rozdział, mający na celu poprawne oszacowanie efektu regeneracji w projektowanych warstwach mineralno-asfaltowych. W pierwszej części tego rozdziału opisano działania mające na celu dobór materiałów, określono receptę laboratoryjną mieszanki mineralnej wyłącznie ze skał gąbro. W pracy zastosowano mieszanki mineralne typu AC22P i AC22W, mające tę samą krzywą uziarnienia. Czynnikiem poddanym modyfikacji były ilość oraz rodzaj asfaltu. Wprowadzono następujące asfalty: drogowy 35/50, drogowy 35/50 do technologii WMA, asfalt modyfikowany polimerem PmB 25/55-60 oraz wysokomodyfikowany PmB 25/55-80 HiMa. Proces wstępnego doboru optymalnej ilości lepiszcza oparto o metodę doświadczalną Durieza.

Kolejną część rozdziału 5. podzielono logicznie na dwa bloki. Blok podstawowy obejmował badania wpływu ilości asfaltu na podstawowe cechy fizyczne i mechaniczne mieszanek mineralno-asfaltowych zgodnie z zapisami WT-2/2014 oraz serią norm zharmonizowanych PN-EN 13108-x, PN-EN 12697-xx oraz PN-EN 933-xx. Wykonano liczne korelacje pomiędzy parametrami V_a , ITSR, WTS_{air} , RD_{air} względem współczynnika wypełnienia K (metoda Durieza). Opracowano dodatkowe modele korelacji liniowej pomiędzy ITSR, WTS_{air} , RD_{air} a zawartością wolnych przestrzeni V_a .

Blok zaawansowany stanowił rozwinięcie poprzednich badań i obejmował zaawansowane badania reologiczne modułu dynamicznego oraz kąta przesunięcia fazowego z wykorzystaniem metody belki czteropunktowo podpartej (4PB-PR). Były to badania kluczowe do sformułowania dalszych wniosków oraz opracowania metody szacowania zjawiska „healingu”. Na podstawie badań dynamicznych wykonanych przy różnym poziomie kontrolowanego odkształcenia ($130\mu\epsilon$ i $200\mu\epsilon$) oszacowano trwałość zmęczeniową badanych próbek mieszanek mineralno-asfaltowych dla różnych wariantów ilości asfaltu oraz jego rodzaju. Aby lepiej odwzorować zjawisko regeneracji, kluczowym było poszukiwanie właściwej temperatury w przekroju nawierzchni.

W tym celu Autor zbudował stanowisko badawcze, które pozwalało na ciągły pomiar temperatury w przekroju nawierzchni w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. Doktorant dokonał analizy regeneracji mieszank A-D poprzez określenie wpływu okresu odpoczynku i podgrzania oraz wpływu soli i mrozu na zmiany modułu sztywności.

Opierając się na poprzednich doświadczeniach z badań uzyskanych w trakcie realizacji bloków podstawowego i zaawansowanego doktorant zaproponował, co jest warte uwagi, dwie metody obliczeniowe do określenia trwałości zmęczeniowej mieszank mineralno-asfaltowych. Należy zaznaczyć, że owe metody uwzględniały czynniki regeneracji oraz czynniki środowiskowe. Następnie wykonał badania kontrolne z pozytywnym wynikiem, stosując niezależne kontrolne badania laboratoryjne. Po realizacji tego bloku, zdaniem doktoranta, udało się uwzględnić w sposób ilościowy efekt regeneracji oraz efekt środowiskowy w trwałości zmęczeniowej, obliczyć wskaźniki degradacji DI, regeneracji HI. Tym samym Autor skłonił się ku konstatacji, że istnieje możliwość prognozowania trwałości konstrukcji poddanej wpływom ujętym w rozprawie.

W rozdziale 6. (*Regeneracja w kryterium zmęczeniowym konstrukcji nawierzchni*) doktorant zamieścił wartościowe i ciekawe rezultaty wynikające z implementacji wyników badań z rozdziału 5. Do obowiązującego modelu szacowania trwałości zmęczeniowej wprowadził efekty regeneracji, efekty środowiskowe oraz zmienność, wynikającą z ilości asfaltu oraz jego rodzaju w postaci dodatkowego autorskiego współczynnika kalibracyjnego „n”. Słusznie zaznaczył jego pewne ograniczenia. Wskazał, że można go wykorzystać wyłącznie do mieszanki, jaka była zastosowana w pracy, bez możliwości ekstrapolacji. Nie mniej jednak jego propozycja pozwala na skuteczną dyskryminację trwałości zmęczeniowej konstrukcji ze względu na rodzaj asfaltu użyty w mieszance. W oparciu o ustalony wypadkowy wskaźnik RI oraz współczynnik „n”, doktorant zwiększył skuteczność prognozowania trwałości zmęczeniowej zaprojektowanych warstw. Propozycję weryfikacji trwałości zmęczeniowej rozszerzył o układy warstw konstrukcji zawarte w polskim katalogu, wykorzystując do obliczeń, co zasługuje na podkreślenie, metodę MES (ABAQUS). W ciekawym zbiorczym tabelarycznym podsumowaniu Autor wskazał, że oddziaływanie regeneracji oraz oddziaływanie czynników środowiskowych sprawia, że rzeczywista trwałość zmęczeniowa mieszank wykonanych z asfaltu drogowego czy też wykorzystywanego do technologii WMA może być zawyżona dla wyższych kategorii ruchu o co najmniej jedną kategorię. W przypadku asfaltów modyfikowanych efekt regeneracji może przyczynić się do wzrostu trwałości zmęczeniowej, co świadczy o niedoszacowaniu rzeczywistej trwałości zmęczeniowej mieszank z asfaltem modyfikowanym, ale i również o dużym zapasie bezpieczeństwa w przypadku ich zastosowania do warstwy podbudowy lub wiążącej.

W rozdziale 7. (*Podsumowanie i wnioski*) Autor dość obszernie podsumował cały zakres badań oraz uzyskane rezultaty. W istocie rzeczy dokonał syntezy wykonanych działań oraz motywacji,

które skłoniły go do sformowania autorskich wielkości związanych określeniem wypadkowego wskaźnika RI oraz współczynnika kalibracyjnego „n”. Całość podsumował syntetycznie na końcu rozdziału w 20 punktach.

W rozdziale 8. (*Dalsze kierunki rozwoju*) Autor wskazał ambitne dalsze kierunki badań. Będą one dotyczyły przede wszystkim uwzględnienia: innych składów mieszanek mineralnych, innych kruszyw (np.: granulaty asfaltowy) oraz asfaltów. Doktorant planuje również wykorzystać badania z wykorzystaniem reometru DSR oraz fotografii X-RAY dla lepszego zrozumienia zjawiska „healingu”.

W ostatnim rozdziale (*Bibliografia*) przedstawiono dość liczny zbiór 322 pozycji literaturowych. Większość wykazanych pozycji literaturowych jest opracowana w języku angielskim oraz kilka z nich ma charakter linku odnoszącego do strony internetowej. W zakres bibliografii wchodzi duża liczba norm zharmonizowanych. Literatura posortowana jest alfabetycznie wg nazwisk. Aczkolwiek w przypadku prof. Marka Pszczoły jego miejsce w literaturze definiuje klucz imienia.

Podsumowując układ przedłożonej do oceny pracy doktorskiej stwierdzam, że stanowi ona cenne opracowanie naukowe obejmujące postawiony cel, wyniki badań, ich analizę i podsumowanie. Prezentacja wyników badań w formie tabelarycznej czy też w postaci wykresów pozwala na szczegółowe sprawdzenie zapisów w zasadniczej części rozprawy. Schemat pracy jest logiczny, czytelny i zgodny z ogólnie przyjętym schematem prezentacji wyników i analiz.

Uważam jednak, że niektóre podsumowania np.: rozdziałów: 5.2.4, 5.3.8 oraz 6.3 są zbyt długie i trudno szybko zorientować się co jest kwintesencją lub osiągnięciem danego etapu badań. Ponadto treści w nich zawarte są pewnym powieleniem informacji, które można odczytać w poprzedzających podpunktach.

3. Ocena merytoryczna rozprawy

3.1. Tytuł rozprawy i aktualność tematu

Tytuł rozprawy w ocenie recenzenta został dobrany adekwatnie. Po zapoznaniu się z całą pracą należy stwierdzić, że działania oscylowały wokół zapisu treści tematu pracy. Wszystkie narzędzia i metody badawcze oraz analityczne skutecznie i konsekwentnie pozwalały Autorowi na osiągnięcie założonych celów i weryfikację tez pracy.

Tematyka pracy doktorskiej jest aktualna. Z faktu braku dostępnej literatury na temat poprawnej implementacji zjawiska regeneracji, wyniki zawarte w pracy stanowią wartościowe źródło informacji do dalszych badań.

3.2. Program oraz zakres wykonanych badań i ich analiz

W pracy doktorskiej o programie i zakresie badań jest mowa głównie w rozdziale 5. Natomiast bardziej szczegółowe analizy zostały zamieszczone w rozdziale 6. Każdy z etapów badań został dobrany w sposób właściwy, aby doprowadzić do założonego celu badawczego rozprawy. Generalnie można wyróżnić trzy etapy projektowania optymalnego składu mieszanki i formułowania wniosków wynikających z zastosowania różnej ilości asfaltu.

Pierwszy dotyczył wyznaczenia właściwej ilości asfaltu. Proces doboru ilości asfaltu został przedstawiony dość szczegółowo i opierał się wstępnie o teorię Durieza, spójną z minimalną ilością asfaltu B_{min} uwzględnioną w dokumencie WT-2/2014. Intencją Autora było znalezienie kompromisu takiej ilości asfaltu i uziarnienia, aby stworzyć mieszankę mineralno- asfaltową, która może być wykorzystana jednocześnie w warstwie wiążącej i podbudowy. Wstępnie przyjęte stałe ilości asfaltu przedstawione jako „warianty zawartości asfaltu” na podstawie metody obliczeniowej Durieza zostały zweryfikowane w podstawowym bloku badań. Szkoda, że Doktorant nie skorzystał z informacji zawartej w kartach BTDC i nie określił temperatury mieszania tak, aby każdy asfalt miał identyczną lepkość w czasie procesu otaczania. To zagwarantowałoby podobną wolną przestrzeń i tym samym pozwoliłoby na porównanie mieszanek o podobnej strukturze rozkładów pustek powietrza. Dlatego też w AC z asfaltem modyfikowanym powstała prawdopodobnie najmniejsza ilość wolnych przestrzeni z faktu wysokiej lepkości asfaltu w danej temperaturze. Nie mniej jednak skorzystał z innych informacji (zalecenia producenta, zalecenia WT-2) i dość poprawnie zróżnicował temperaturę mieszania, aby uzyskać podobną urabialność mieszanek mineralnych.

W kolejnym etapie wyniki mieszanek mineralno-asfaltowych zawierające różne ilości asfaltu zostały poddane weryfikacji również względem innych badań takich jak: odporność mieszanki mineralno-asfaltowej na działanie czynników klimatycznych (ITSR) i odporność na deformacje trwale (WTS_{air}). Jest to właściwe postępowanie w ujęciu projektowania empirycznego kompozytów mineralno-asfaltowych.

Trzeci etap stanowił dalszą weryfikację ilości asfaltu z uwzględnieniem metod funkcjonalnych takich jak zmęczenie, uwzględniając przy tym regenerację mma. Tak przedstawiany plan badań w opinii recenzenta jest właściwy i skuteczny. Ponadto świadczy o wiedzy doktoranta o procesie projektowania mieszanek mineralno-asfaltowych i właściwym doborze metod pomiarowych. Ponadto stwierdzony niski wynik wodoodporności mma z asfaltem z dodatkiem obniżającym lekkość jest wnioskiem często pojawiającym się w artykułach i opracowaniach anglojęzycznych autorów z Europy Zachodniej.

Na wyróżnienie zasługuje sposób uwzględnienia różnych kombinacji czynników związanych z regeneracją oraz efektami środowiskowymi i ich implementacja do szacowania trwałości

zmęczeniowej. Ponadto ciekawy jest zaproponowanie dwóch metod takich jak: metoda „iteracyjna” i metoda „wskaźnikowa”, których celem jest możliwość uwzględniania badanych zjawisk w obliczaniu trwałości zmęczeniowej mieszanki mineralno-asfaltowej. Jednak nie podano na jakiej podstawie podane wzory zamieszczone we wspomnianych metodach zostały sformułowane i czy nie występują związane z ich stosowaniem pewne osobliwości. Ich charakter jest nieliniowy, co może (lecz nie musi) być przyczyną problemu z interpretacją wyniku przy pewnej kombinacji wartości zmiennych umieszczonych we wzorze.

Kolejnym elementem badań i analiz, które są w opinii recenzenta cenne, jest duża ilość czytelnych korelacji liniowych pomiędzy współczynnikiem wypełnienia K lub V_a a zmianami modułu sztywności w trakcie różnych konfiguracji ustawień (odkształcenia, liczba cykli, regeneracja, czynniki środowiskowe) czy też cech podstawowych m_{ma} . Nie mniej jednak współczynnik determinacji podlega ocenie istotności. Obserwując rezultaty nasuwają się pewne wątpliwości, które zostaną sprecyzowane w dalszej części recenzji. Ponadto, zdaniem recenzenta, aby kompleksowo spojrzeć na efekt oddziaływania rodzaju asfaltu (zmienna jakościowa) oraz np.: współczynnika wypełnienia na szereg przytoczonych zmiennych zależnych (np.: V_a) o wiele bardziej zasadnym byłoby zastosowanie ogólnego modelu liniowego. Wówczas, rozważając: model kowariancji, model linii równoległych lub model linii nierównoległych można byłoby w sposób kompleksowy ująć oddziaływanie wszystkich asfaltów, a przy tym stwierdzić, który asfalt - w jaki sposób i z jaką siłą - wpływa na daną zmienną zależną. Bez tego narzędzia statystycznego można wyłącznie wizualnie ocenić dany efekt.

Jako godne uwagi należy wskazać analizy, również numeryczne, w szóstym rozdziale. Są one cennym źródłem wiedzy na temat wpływu zjawiska regeneracji. Rezultaty poprzednich analiz zostały rzutowane na inne rodzaje konstrukcji o różnym obciążeniu ruchem. Sprawnie ujęta preliminarzowa analiza pozwala odwzorować rzeczywiste warunki i być podstawą do wprowadzenia pewnej kalibracji przyjętego obecnie modelu szacowania trwałości zmęczeniowej wg AASHTO 2004 (za pomocą współczynnika n , R_I uzyskanego w opracowanej metodzie). Rezultaty, jakie uzyskał doktorant w kwestii wzrostu lub spadku szacowanej trwałości zmęczeniowej przy obecnie obowiązującej metody są zdaniem recenzenta realne i zgodne z obserwacjami recenzenta. Zaproponowane wielkości nie tylko pozwalają na określenie ilościowej rzeczywistej trwałości zmęczeniowej, ale i również umożliwiają lepszą dyskryminację z punktu widzenia rodzaju asfaltu.

Pomimo pewnych niedociągnięć lub kwestii spornych program badawczy i prezentację wyników oceniam bardzo wysoko, biorąc pod uwagę dużą liczbę badań, poprawnie wykonanych i umotywowanych modyfikacji klasycznych programów badawczych oraz uwzględnienie serii czynników środowiskowych i temperaturowych w szacowaniu trwałości zmęczeniowej

z uwzględnieniem regeneracji. Podsumowując, należy uznać program badań jako właściwy, a uzyskane wyniki oznaczeń jako zapewniające realizację postawionego w pracy celu.

3.3. Tezy i cel pracy

Postawiona w rozprawie teza pracy została zapisana w następujący sposób:

Uwzględnienie procesów regeneracji (healingu) oraz oddziaływania wody i mrozu i soli drogowej pozwala lepiej prognozować zjawiska zmęczeniowe zachodzące w mieszankach mineralno-asfaltowych oraz w nawierzchni drogowych.

Zdaniem recenzenta, sformułowana teza jest racjonalna i zrozumiała. Jej słuszność została udowodniona w pracy poprzez dobrze zaprojektowany program badań. Podążając za celem pracy, który dotyczył wprowadzenia do szacowania trwałości zmęczeniowej zjawiska regeneracji, stwierdzam, że został on skutecznie zrealizowany.

3.4. Najważniejsze osiągnięcia naukowe i ocena dalszych badań

Do najważniejszych osiągnięć pracy należy zaliczyć:

- zjawisko regeneracji oraz oddziaływanie środowiskowe istotnie wpływają na trwałość zmęczeniową mieszanek mineralno-asfaltowych w konstrukcji nawierzchni. Dlatego zasadnym jest prowadzenie dalszych badań nad zrozumieniem tego zjawiska,
- zjawisko regeneracji powinno być uwzględniane w procesie optymalizacji ilości i rodzaju lepiszcza,
- możliwość powiązania regeneracji i czynników środowiskowych w postaci ilościowej. Tym samym możliwość wprowadzenia tych efektów do obowiązującego modelu szacowania trwałości zmęczeniowej w postaci uogólnianej miary jako współczynnika kalibracyjnego,
- obecne szacowanie trwałości zmęczeniowej mma z asfaltem zwykłym może być zawyżone w obliczu wykonanych badań. Zastosowanie asfaltu modyfikowanego sugeruje z kolei niedoszacowanie rzeczywistej trwałości zmęczeniowej w mma. Jest to podstawa do wykonania dalszych badań pozwalających na poprawę jakości realizowanych inwestycji drogowych,
- opracowanie obiecujących autorskich metod szacowania wpływu efektu regeneracji na trwałość zmęczeniową,
- rezultaty rozprawy pozwalają wstępnie określić wpływ iteracji czynników środowiskowych oraz regeneracji bez konieczności wykonywania długotrwałych badań.

Doktorant sformułował dalsze kierunki badań, które obejmują:

- uwzględnienie w szacowaniu regeneracji dodatkowego czynnika takiego jak: promieniowanie UV,

- uwzględnienie w badaniach większej liczby typów asfaltów, rodzajów kruszywa, jego pochodzenia,
- wykorzystanie asfaltów stosowanych w technologii WMA, HWMA i CMA,
- badania z wykorzystaniem tomografu i reometru DSR w celu uwzględnienia efektów reologicznych.

Są to bardzo ambitne i bardzo ciekawe kierunki badań nastawione na wysoką aplikowalność. W uzupełnieniu o analizy terenowe program badawczy znajdzie wydzwięk w procesie skuteczniejszego projektowania konstrukcji nawierzchni.

3.5. Uwagi szczegółowe

3.5.1. Uwagi redakcyjne

Strukturę pracy należy uznać za właściwą. Część teoretyczna stanowi około 20% całości rozprawy, natomiast badawcza około 80%. Taki układ jest bardzo racjonalny w tego typu pracach. Najbardziej wartościowe są rozdziały 5. i 6., które odnoszą się do części badawczo-analitycznej. Praca została zredagowana poprawnie, z niewielką liczbą usterek edytorskich i językowych. Praca napisana poprawnym językiem technicznym odpowiada tematyce i poruszonym zagadnieniom.

Praca zawiera streszczenie w języku angielskim.

Błędy redakcyjne miały znikomy wpływ na ogólny ogłąd pracy. Kilka z nich podano poniżej:

- w całej pracy wielokrotnie zdania zaczynają się z małej litery. Jest to szczególnie skorelowane z sytuacją kiedy zdanie zaczyna się do litery „w”. Prawdopodobnie jest to błąd systemowy przy automatycznej korekcie innych wyrazów. Nie mniej jednak wymaga uwagi przy czytaniu zdań, gdyż nie jest to typowe w polskiej ortografii,
- często w pracy pojawiają się nadmiarowe spacje,
- we Wstępie zwykle nie praktykuje się stosowania cytowań, gdyż jest to zapowiedź działań i analiz Autora,
- na końcu zdań pojawiają się pojedyncze znaki (np.: strona 7 litera „i”),
- strona 34 zamiast „testy” powinno być „badania”. Jest to nieco niewłaściwe, lecz czasem obecne zapożyczenie z języka angielskiego,
- w tablicy 4. w drugim wierszu tablicy powinno być „opracowań” a nie „opracować”,
- należy stosować cały zapis dokumentu WT-2/2014 lub WT-2/2016 zamiast WT-2,
- dlaczego stosuje się zapis uziarnienia np.: 4.0-8.0 a nie 4/8?,
- zamiast próbek „Marshalowskich” powinno być „Marshalla”,
- nadmiarowym jest stosowanie zapisów na wykresach np.: oś x, czy oś y,

- dlaczego doktorant stosował separator „.” zamiast „,” przy wyrażaniu ułamków dziesiętnych. Jest to praca napisana w języku polskim. Zatem konsekwentnie należy używać do oddzielania wartości tysięcznych separatora „,” (np.: na rysunku 99).

Część graficzna pracy jest estetyczna, rysunki wykonane są z dużą starannością, w sposób czytelny i przejrzysty. Dodatkowa grafika, zaczerpnięta z innych prac lub książek, szczególnie w rozdziale 4., została wykonana bardzo czytelnie. Przyjęta numeracja tabel i rysunków nie uwzględnia numeru rozdziału głównego. Nie mniej jednak jest spójna i nie powoduje zakłóceń w odbiorze pracy.

3.5.2. Uwagi merytoryczne

1. Na stronie 12 użycie przyporządkowania opisu modułu zespolonego dla wartości $|E^*|$ jest niewłaściwe. Moduł zespolony E^* jest wyrażony z jednostką urojoną „i” i może być przedstawiony na płaszczyźnie zespolonej jako wypadkowa części urojonej i rzeczywistej. Wartość $|E^*|$ podana przez Autora to długość wektora E^* i jest w istocie wartością bezwzględną liczby rzeczywistej. Czyli jest wartością bezwzględną modułu zespolonego lub też poprawnie wg R. Kim „*Modelling of Asphalt Concrete*” modułem dynamicznym. Taka nazwa, czyli moduł dynamiczny (lub absolute value of complex modulus) powinna być poprawnie zastosowana.
2. Na stronie 15 określenie „parametry nośne” jest niewłaściwe. O wiele bardziej trafnym byłoby określenie „parametry mechaniczne”.
3. Na stronie 15 nie jest zrozumiała fraza „...asfaltowe jako element „najstabszy””. Uważam, że takie stwierdzenie nie znajduje uzasadnienia w technicznym języku stosowanym w drogownictwie.
4. Na stronie 18 uważam, że na temat technologii zagęszczania bardziej trafnymi były publikacje prof. Pawła Mieczkowskiego niż praca dr J. Mrugały.
5. Na stronie 20 w ostatnim zdaniu nie zgadzam się, że grubość nawierzchni wymaga większej temperatury. Efektywność zagęszczania grubej warstwy, przy zalecanej temperaturze, zależy od ilości energii wymaganej do zagęszczania, wydajności sprzętu oraz utrzymującej się przez długi czas minimalnej temperatury mma (czas ten zależy od grubości warstwy). To urabialność mma jest funkcją temperatury. Takie stwierdzenie byłoby zaprzeczeniem słuszności technologii „Compactasphalt”.
6. Na stronie 23 zawarto informacje, które należy sprostować. Poprawnym stwierdzeniem powinno być to, że powszechnie są stosowane elastomery np.: SBS, natomiast plastomery np.: PP już nie. Obecnie na świecie, jako sposób na utylizację pewnych odpadów, trwają

badania nad aplikacją plastomerów. Nie mniej jednak ich efektywność nie będzie taka jak stosowanie elastomerów z faktu braku możliwości zapewnienia pełnego usieciowania matrycy asfaltu.

7. W zdaniu na stronie 26 zawierającym frazę „Należy nadmienić....” brakuje dopełnienia.
8. Na stronie 30 stwierdzenie, że mieszanka doznaje „ułożenia w prasie” wymaga powołania na literaturę.
9. Strona 30 - kryteria związane z badaniem zmęczenia w trybie kontrolowanego naprężenia są stabilizowane w pracy doktorskiej prof. Piotra Jaskóły i można się do nich odnieść
10. Na stronie 33 kształt fali haversine w rzeczywistości jest nieco inny.
11. Na stronie 46 słowo „zasklepienie spękań” nie jest technicznym określeniem tego zjawiska.
12. Na stronie 52 zdanie zawierające frazę „...jest jak najbardziej możliwa i zachodzi.” nie jest poprawne stylistycznie.
13. W pracy zabrakło badań podstawowych asfaltów. Jest to o tyle ważne, że został wykorzystany asfalt 35/50 WMA (strona 72). Niestety nie można powoływać się na zastrzeżenie patentowe, ale wykonać własne badania podstawowe i co najmniej badanie lepkości dynamicznej przy różnej temperaturze. Takie porównanie asfaltów byłoby cenne w stosunku do efektu regeneracji mma.
14. Na stronie 68 wskazano, że zastosowano tę samą ilość asfaltu. Natomiast rodzaje asfaltów były inne. W związku tym, aby uzyskać tę samą grubość otoczki asfaltowej należy mieszanki zagęszczać w różnych temperaturach, aby uzyskać tę samą urabialność mając na uwadze różne asfalty. Wówczas istnieje szansa na uzyskanie podobnej zawartości wolnej przestrzeni. W przeciwnym przypadku tracimy kontrolę nad ilością wolnego asfaltu i tym samym, pomimo tej samej ilości asfaltu uzyskujemy beton asfaltowy o innej strukturze i innej trwałości zmęczeniowej. Co przemawiało za takim postępowaniem?
15. Na stronie 74 wskazano, że skała gabro jest skałą zasadową. Najlepszym reprezentantem skały zasadowej jest np.: dolomit o ilości $\text{SiO}_2 < 20\%$. Natomiast gabro zawiera co najmniej 40% krzemionki SiO_2 a najczęściej między 55% a 65% - zależnie ile znajduje się amfibolitu w jej składzie. Jest to skała o właściwościach podobnych do bazaltu co oznacza, że jest skałą obojętną i jej aplikacja wymaga zastosowania środka adhezyjnego. W przypadku skał obojętnych dodanie środka adhezyjnego nie jest fakultatywne i wymaga wstępnych badań.
16. Czy badany został wpływ dodania środka Wetfix na reologię asfaltu 35/50 WMA? Niektóre dodatki do technologii WMA zawierają środki powierzchniowo-czynne w postaci amidów

kwasów tłuszczowych. Wetfix jest jednym z nich. Czy to nie spowoduje na samym początku zbyt dużego upłynnienia asfaltu? Proszę o komentarz.

17. W pracy zastosowano w projektowaniu wyłącznie skały gabra o odczynie obojętnym. To działanie zostało również zastosowane (zrezygnowano z odpylenia) wobec pyłów. Do badania ich przydatności zastosowano wyłącznie badanie błękitem metylenowym. Najważniejszą kwestią, której nie można zignorować to uzyskanie odpowiedniego mastyksu. To on decyduje o trwałości mieszanki mineralno-asfaltowej. Dlatego wypełniacz ze skały wapiennych lub mieszany jest rekomendowany do stosowania. Zapisy w WT-1/2014 dopuszczają możliwość stosowania wypełniacza zastępczego w postaci pyłów z odpylenia, pod warunkiem spełnienia wymagań jak dla wypełniacza zgodnie z punktem 5 PN-EN 13043. W myśl tego proporcja pyłów i wypełniacza wapiennego powinna być tak dobrana, aby kategoria zawartości CaCO_3 w mieszance pyłów i wypełniacza wapiennego była nie niższa niż CC_{70} , ale pod warunkiem spełnienia wymagań co do objętości usztywnienia (aparatury Ridgena Vxx/xx) i zawartości CaO . W przeciwnym przypadku taki mastyks nie będzie miał wystarczającej odporności na działanie czynników klimatycznych, może być go dużo, co wpłynie na stabilność struktury oraz może obniżyć moduł sztywności mma. Jest on również kluczowy z punktu widzenia zachowania dużej trwałości zmęczeniowej. Na podstawie własnej wiedzy, wypełniacz ze skały gabra nie osiągnie minimalnej wartości progowej CC_{70} , gdyż nie zawiera wystarczającej ilości CaCO_3 . Proszę o komentarz, czy był inny podwód - niż cel naukowy - zastosowania takiego wypełniacza? W warunkach rzeczywistych Zarządy Dróg zwykle nie aprobują takich rozwiązań.
18. Jak optymalizowana była krzywa uziarnienia? Czy stworzono algorytm z funkcją celu, czy stosowane było dedykowane oprogramowanie?
19. Na stronie 87 starzenie technologiczne to STOA i jest związane z procesem produkcji i zagęszczania mma. Natomiast interakcja powietrza i UV to starzenie eksploatacyjne LTOA, czyli inaczej niż stwierdził Autor.
20. Na stronie 91 fraza „...dwie warstwy za jednym razem” nie jest określeniem technicznych opisywanego działania.
21. Według Autora można zastosować jeden typ mieszanki AC22W i AC22P do dwóch warstw jednocześnie. Oczywiście z punktu widzenia zachowania parametrów jest to możliwe. Jednak w praktyce to nie jest stosowane. Najdroższym składnikiem mma jest asfalt. Aby użyć jednej mieszanki do obydwu warstw należy znacznie zwiększyć ilość asfaltu w warstwie podbudowy (już ilość 0,1% to jest dużo). W praktyce technolodzy projektują mieszanki tak, aby uzyskać wartość asfaltu bliską B_{\min} , ujętą w WT-2/2014, zachowując

wymagania normowe. Zatem wątpliwym jest szersze upowszechnienie takiego postępowania i nie świadczy o jego ekonomiczności. Proszę o komentarz w tej sprawie.

22. Przy określaniu zawartości wolnej przestrzeni gęstość mma obliczono metodą matematyczną. Niestety takie działanie często daje duże rozbieżności a w sytuacji sporu jest podejściem skazanym na przegraną. Jej zaletą jest łatwość wykonania. Zalecaną metodą określania gęstości mma jest metoda A z wykorzystaniem piknometru. Wówczas można dokładnie określić stopień absorpcji asfaltu. Co prawda autor podał, że wyniki były „identyczne”, zatem dlaczego tych wyników nie wykorzystał. Należy podkreślić, że wiele analiz opierało się na ocenie parametru Va.
23. Ta uwaga odnosi się do serii wykresów w pracy. Autor wskazywał, że uzyskał wysoką zbieżność wyników z modelem liniowym regresji. Pomijam fakt czy wyniki miały rozkład normalny. O wiele większą wątpliwość wzbudzała wartość współczynnika determinacji względem liczebności. Należy pamiętać, że współczynnik determinacji to podniesiony do kwadratu współczynnik korelacji. Natomiast istotność współczynnika korelacji jest uzależniona od liczby poziomów (liczby wyników badań) danego czynnika. Aby jego wartość była z punktu widzenia prawdopodobieństwa różna od zera należy wykonać odpowiedni test t. Po pewnych przekształceniach, aby współczynnik determinacji (R^2) był istotny statystycznie (jego wartość różna od zera przy p-value = 0,05) dla modelu regresji zbudowanego z trzech wartości jego wartość musi być większa niż $>0,994$ a przy 4 próbkach $>0,903$. Zatem spoglądając na wyniki regresji ten warunek nie został spełniony we wszystkich przypadkach w pracy. Może to mieć dwojakie znaczenie. Wyników nie da się odtworzyć oraz wprowadzenie dodatkowych badań skutkować będzie innym rezultatem. Oczywiście testowanie statystyczne ma na celu wykrycie potencjalnych anomalii w zbiorowości. Zatem brak przyjęcia hipotezy zerowej nie oznacza, że wartość R^2 należy przyjąć jako 0, ale wprowadza niepewność. Uważam, że zamiast serii regresji należało wykorzystać, wspomniany wcześniej, algorytm „uogólnionego modelu liniowego”, który pozwala na powiązanie predyktorów jakościowych np.: rodzaj asfaltu i innych ilościowych z daną zmienną objaśnianą. Postanowiłem dokonać poszukiwania liniowego modelu uogólnionego dla wykresu nr 56, gdzie jest wiele wątpliwości co do istotności R^2 . W rezultacie całkowity (zbiorczy) obliczony R^2 okazał się istotny dla całego modelu. Niepewność została „rozrzucana” proporcjonalnie względem wszystkich modeli liniowych, pomimo że niektóre linie trendu były nieistotne. Takie działanie należy rozważyć w poszukiwaniu rozwiązań zdefiniowanych w dalszych celach badawczych Autora.

24. Uważam, że wskazanie oszczędności ilości materiału przedstawione na rysunku 59 nie jest uzasadnione. Zgodnie z WT-2/2016, zapisami w polskim katalogu dedykowanym nawierzchniom podatnym oraz stosowaną praktyką, wykonywanie odsadzek w podbudowach asfaltowych jest nieuzasadnione i nie jest praktykowane. Taki zabieg stosuje się, gdy warstwy asfaltowe są wykonywane na podbudowie o innej technologii np.: chudy beton lub podbudowa niezwiązana. Wówczas, ze względów technologicznych, jest to wskazane (co jest zawsze zawarte w specyfikacjach). Zatem jaka oszczędność z tego wynika?
25. W całej pracy np.: w tabeli 24 czy na wykresie 71 nie podawano informacji na temat rozrzutu wyników. Co prawda nie wykonywano analizy wariancji oraz dedykowanych testów „post-hoc” pozwalających na analizę kontrastów. Nie mniej jednak dla celów porównawczych zasadnym byłoby podawanie zmienności wyników w postaci np.: przedziałów ufności. Wówczas znacznie poprawiłoby to odbiór danych co do zaobserwowanych różnic.
26. Dlaczego zastosowano dwa sposoby symulacji regeneracji w postaci różnych procedur wygrzewania?
27. Dlaczego zdecydowano się na umieszczenie próbki nawierzchni w skrzynce drewnianej? To zdecydowanie zmienia warunki brzegowe i kierunek strumienia ciepła. Drewno ma inną wartość współczynnika przewodzenia ciepła oraz inne ciepło właściwe niż mma zatem może wystąpić przepływ niestacjonarny ciepła (biorąc pod uwagę model Fouriera-Kirchhoffa) i co za tym idzie - zaburzenie poziomu temperatury na danej głębokości.
28. Na stronie 115 interpretacja zawarta w obserwacji 2 jest dyskusyjna. Mechanizm pracy polimeru jest dwustopniowy. Podczas rozciągania lub ścinania asfaltu modyfikowanego w pierwszej kolejności można zauważyć zachowanie podobne do asfaltu drogowego, gdyż taki asfalt ma niższą sztywność niż polimer. Następnie po osiągnięciu pewnego progu odkształcenia, wynikającego z maksymalnego wyciągnięcia łańcuchów elastomeru (wiązania kowalencyjne), następuje gwałtowny wzrost sztywności mma spowodowany pracą polimeru. Zwykle asfalty modyfikowane polimerem są wykonywane z miękkich asfaltów drogowych, aby ułatwić proces homogenizacji z polimerem. Dlatego też pełne możliwości asfaltu modyfikowanego polimerem, podczas badania koleinowania, są dostrzegalne po osiągnięciu dużych odkształceń, gdy wpływ matrycy asfaltu drogowego już nie ma znaczenia.
29. Pytanie do treści na stronie 171: jakim opracowaniem autor się podparł wskazując, że asfalty miękkie wykazują większą zdolność do nagrzewania się? W pracy zasugerował, że jest to jego wiedza „własna”. Uważam, że szybkość zmiany gradientu temperatury w tym

przypadku w asfalcie jest uzależnione od jego ciepła właściwego oraz współczynnika przewodzenia. Uważam również, że obserwacja autora związana z niewielkim zróżnicowaniem temperatury powierzchni wynika z właściwości fotometrycznej (luminancja) odsłoniętego (w większym lub mniejszym stopniu) kruszywa na powierzchni mma.

30. Na stronie 174 stwierdzono zgodność odnotowanych temperatur z pewnymi modelami. Dlaczego tych informacji nie zamieszczono w pracy? Jest to ważne z punktu widzenia zjawiska regeneracji. Stwierdzenie o zgodności pełnej można podjąć po dłuższych obserwacja a nie dniu. Rozkład temperatury definiuje charakter przepływu strumienia ciepła. Może on mieć charakter niestacjonarny (latem) lub stacjonarny (zimą). Ponadto współczynnik przewodzenia ciepła może ulegać chwilowym wahaniom na skutek zmiany gęstości mma.
31. Na stronie 185 punkt 5. Niska zdolność do regeneracji asfaltów modyfikowanych może mieć związek z degradacją struktury usieciowanej. Zjawisko ponownej polimeryzacji może być zainicjowane przez wyższą temperaturą (polikondensacja). Zatem nie można tak szybko deprecjonować roli elastomerów przy regeneracji. Taką konkluzję można wywodzić bardziej zdecydowanie dopiero po wykonaniu badań reologicznych asfaltu, wykorzystując badanie dynamiczne.
32. stronie 225 autor wskazuje na wszechstronność zastosowania formuły we frazie „...udowodniono skuteczność formuły...”. Podczas, gdy w późniejszej części pracy sugeruje, że wyniki mają zastosowanie tylko do danej mieszanki mineralno-asfaltowej o danym składzie (strona 260).
33. Jakie były wymiary elementów geometrycznych w modelach MES (strona 241)? Czy pomiędzy powierzchniami warstw były definiowane warunki szczepności? Należy się zastanowić, aby wprowadzić w przyszłości kryterium propagacji spękania lub kryterium zniszczenia w oparciu o zaproponowane metody obliczania trwałości zmęczeniowej w programie ABAQUS.
34. Co oznacza fraza „trudniejsze warunki” w 13 wniosku na stronie 280?
35. Uważam że 18 wniosek jest dyskusyjny, gdyż duża ilość asfaltu w podbudowie nie jest dobrym rozwiązaniem. Nie mniej jednak jej założenie jest bliskie koncepcji „Compactasphalt”.

4. Ocena końcowa

Przedstawioną do recenzji pracę, pomimo kilku kwestii dyskusyjnych, oceniam bardzo wysoko. Dotyczy to zarówno jej strony naukowej jak i formalnej. Obie nie wzbudzają większych wątpliwości. Na uwagę zasługuje duży nakład pracy Autora, podczas wykonania wielu pracochłonnych badań i analiz. Ponadto zdecydowana większość badań wymagała wykonania długotrwałych doświadczeń, co wiązało się z wieloma replikacjami, w tym również w warunkach poligonowych (pomiar temperatury), co wymagało rozwiązywania licznych problemów logistycznych. Należy również zwrócić uwagę na autorskie opracowanie sposobów uwzględnienia czynników zewnętrznych w trwałości zmęczeniowej. Doktorant zaproponował współczynnik kalibracyjny, pozwalający na szybką implementację rezultatów swoich analiz do szacowania trwałości zmęczeniowej nawierzchni opartej o model potęgowej (AASHTO 2004). Autor część swoich wyników poddał weryfikacji i dokonał wielu symulacji pozwalających na szersze spojrzenie na dotychczas nieuwzględniony aspekt regeneracji w ocenie trwałości zmęczeniowej. Aplikowalność wyników badań to kolejny z mocnych atutów tej pracy.

Praca doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz inżynierskiego dotyczącego dyscypliny inżyniera lądowa i transport. Sformułowana przez Autora teza pracy znalazła potwierdzenie w wynikach badań, popartych szczegółową analizą. Cel pracy, który dotyczył oceny trwałości mieszanek mineralno-asfaltowych z uwzględnieniem zmęczenia i regeneracji, należy uznać za zrealizowany.

W związku z powyższym uważam, że praca doktorska Pana mgr inż. Eryka Mączki spełnia wszystkie warunki określone w art. 13 ust. 1 ustawy z dnia 14.03.2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z 2017 r. poz. 1789) i wnoszę o przyjęcie rozprawy doktorskiej oraz dopuszczenie jej do publicznej obrony.



Dr hab. inż. Grzegorz Mazurek, prof. PŚk