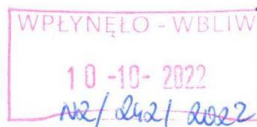


Dr hab. inż. Marek Pszczoła, prof. PG
Katedra Inżynierii Transportowej
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Politechnika Gdańska
ul. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk

Gdańsk, 30.09.2022 r.



RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Eryka Mączki pt.:

*„Trwałość mieszanek mineralno-asfaltowych z uwzględnieniem
zmęczenia i regeneracji”*

Promotor pracy: dr hab. inż. Piotr Mackiewicz - prof. uczelni

Promotor pomocniczy: dr inż. Bartłomiej Krawczyk

1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawą opracowania recenzji jest uchwała Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Wrocławskiej nr 170/25/RDND06/2021-2024, która została podjęta na posiedzeniu w dniu 15 czerwca 2022 r. w sprawie wyznaczenia recenzentów rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Eryka Mączki. Podstawą formalną wykonania recenzji jest ustawa z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U.2018 poz. 1669, z późn. zm.).

2. Przedmiot recenzji

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska w formie Raportu serii PRE nr 6/2022 pt. „Trwałość mieszanek mineralno-asfaltowych z uwzględnieniem zmęczenia i regeneracji” przygotowana przez Pana mgr inż. Eryka Mączkę na Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej w ramach dyscypliny naukowej: inżynieria lądowa i transport, dziedzina nauk: nauki inżynierijno-techniczne. Praca została przygotowana pod kierunkiem promotora dr hab. inż. Piotra Mackiewicza, prof. PWr oraz promotora pomocniczego dr inż. Bartłomieja Krawczyka.

3. Ogólna charakterystyka rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska mgr inż. Eryka Mączki dotyczy problematyki zmęczenia mieszanek mineralno-asfaltowych i konstrukcji nawierzchni drogowych w kontekście oceny ich trwałości zmęczeniowej z uwzględnieniem zjawiska regeneracji (ang. healing) oraz oddziaływania wody

A handwritten blue mark or signature in the bottom right corner of the page.

i mrozu. Recenzowana rozprawa, wydana drukiem w formie monografii (raport serii PRE nr 6/2022) składa się z 8 zasadniczych rozdziałów, poprzedzonych stroną tytułową, spisem treści oraz wykazem skrótów i oznaczeń najczęściej stosowanych w rozprawie. Praca kończy się spisem literatury (łącznie 322 pozycje literatury) i streszczeniem w języku polskim oraz angielskim. W rozdziale 9 Autor zawarł podziękowania. Łącznie recenzowana praca zawiera 301 stron tekstu.

W rozdziale pierwszym zatytułowanym „Wstęp” Autor rozpoczął rozprawę od wprowadzenia w tematykę pracy oraz uzasadnienia zainteresowania się problemem trwałości mieszanek mineralno-asfaltowych z uwzględnieniem zmęczenia i regeneracji.

Rozdział drugi zawiera tezę rozprawy doktorskiej, którą sformułowano w sposób następujący: „Uwzględnienie procesów regeneracji (healingu) oraz oddziaływania wody i mrozu i soli drogowej pozwala lepiej prognozować zjawiska zmęczeniowe zachodzące w mieszankach mineralno-asfaltowych oraz w nawierzchniach drogowych”.

W rozdziale trzecim przedstawiono cel i zakres rozprawy. Jako podstawowy cel Autor wymienił badania oraz analizę zjawisk zmęczeniowych zachodzących w mieszankach mineralno-asfaltowych w warunkach regeneracji oraz oddziaływania soli i mrozu. W opinii recenzenta Autor miał na myśli oddziaływanie wody i mrozu w warunkach obecności soli (solanki). Do osiągnięcia zamierzonego celu sformułowane zostało 6 zadań cząstkowych obejmujących zakres przygotowanej rozprawy.

W rozdziale 4 zawarty został przegląd stanu wiedzy i pozycji literaturowych w zakresie zagadnień związanych z tematyką pracy doktorskiej: Rozdział ten został podzielony na pięć podrozdziałów, spośród których pierwszy opisuje ogólne informacje w zakresie mieszanek mineralno-asfaltowych, ich cech reologicznych oraz uszkodzeń warstw asfaltowych nawierzchni. Drugi podrozdział opisuje metody projektowania mieszanek mineralno-asfaltowych i technologie ich produkcji. Trzeci podrozdział przedstawia zagadnienie trwałości zmęczeniowej, natomiast czwarty zjawisko regeneracji (ang. healing) warstw asfaltowych nawierzchni drogowych. Na końcu rozdziału 4 przedstawiono podsumowanie obecnego stanu wiedzy, które w rzeczywistości nie jest sensu stricto podsumowaniem rozdziału ale sformułowaniem 11 zagadnień, które wymagają według Autora wdrożenia szczegółowych analiz.

Zasadniczym dla rozprawy doktorskiej, a jednocześnie najbardziej rozbudowanym rozdziałem jest rozdział 5 zawierający część eksperymentalno-doświadczalną. Rozdział ten obejmuje 159 stron i stanowi ponad 50% objętości całej pracy. Składa się on z trzech głównych części: z projektu analizowanej mieszanki mineralno-asfaltowej AC 22, badań w ramach tzw. bloku podstawowego oraz badań i analiz w ramach tzw. bloku zaawansowanego. Rozdział 5 rozpoczyna się schematycznym przedstawieniem ideowego planu prac badawczych. Ze względu na obszerną tematykę, jaka została przedstawiona w tym rozdziale, a także ilość

przeprowadzonych eksperymentów, ideowy plan badawczy jest cennym wprowadzeniem w zakres przeprowadzonych prac. Do badań zastosowano 4 rodzaje lepiszczy asfaltowych: asfalt drogowy 35/50 WMA (w technologii na ciepło), asfalt drogowy 35/50 (w technologii na gorąco) oraz 2 asfalty modyfikowane elastomerem SBS 25/55-60 oraz wysokomodyfikowany 25/55-80 HiMA. Do mieszanki mineralnej zastosowano kruszywa ze skały gabra, charakteryzujące się stosunkowo dobrymi właściwościami adhezyjnymi do asfaltu (zbliżonymi do właściwości skał bazaltowych). W ramach badań bloku podstawowego wykonano oznaczenia zawartości wolnych przestrzeni, badania odporności na działanie wody i mrozu oraz badania odporności na deformacje trwałe. Każda z tych cech analizowana była także statystycznie w odniesieniu do wskaźnika wypełnienia K (zawartości lepiszcza asfaltowego) oraz wzajemnych korelacji poszczególnych właściwości uzyskanych z badań. Badania bloku podstawowego Autor zakończył podsumowaniem i wnioskami, które w opinii recenzenta są dyskusyjne. Zostanie to omówione w dalszej części niniejszej recenzji. Podrozdział zawierający badania bloku zaawansowanego (punkt 5.3) również rozpoczyna się schematem przeprowadzonych badań, co znacznie ułatwia orientację czytelnika w tej części pracy. W ramach tego rozdziału wykonane zostały kompleksowe badania modułu sztywności i trwałości zmęczeniowej metodą belki czteropunktowo zginanej. W kolejnej części wykonano analizę wpływu czynnika środowiskowego – wody i mrozu oraz czynnika chemicznego – obecności roztworu soli drogowej na moduł sztywności, kąt przesunięcia fazowego oraz trwałość zmęczeniową wyrażoną liczbą cykli obciążenia do uzyskania 50% spadku początkowej wartości modułu sztywności. W celu wykonania eksperymentu z udziałem solanki opracowano autorskie stanowisko badawcze. Ciekawym elementem rozdziału 5 jest eksperymentalne stanowisko do pomiaru temperatury opisane w punkcie 5.3.5. Pomiar temperatury przeprowadzony został z wykorzystaniem płyt z mieszanki mineralno-asfaltowej o wymiarach 30x25 cm w okresie od 18 do 19 czerwca 2021. Stanowisko badawcze zlokalizowane było na terenie kampusu Politechniki Wrocławskiej. Celem przeprowadzonego eksperymentu było potwierdzenie rozkładu wysokiej (letniej) temperatury na grubości warstw asfaltowych. W opinii recenzenta skonstruowane stanowisko badawcze ma pewne mankamenty merytoryczne, które w istotny sposób mogły wpłynąć na uzyskane wartości temperatury. Zostanie to szerzej omówione w dalszej części niniejszej recenzji. W kolejnej części rozdziału eksperymentalno-badawczego przedstawiona została analiza regeneracji i jej wpływ na trwałość zmęczeniową analizowanych mieszanek przy uwzględnieniu wody i mrozu oraz solanki. W ramach przeprowadzonych analiz rozpatrywano różne kombinacje oddziaływań, tzn. oddziaływanie zmęczenie – zmęczenie; zmęczenie – okres odpoczynku – zmęczenie; zmęczenie – wygrzewanie (wygrzewanie + okres odpoczynku) – zmęczenie; woda i mróz – zmęczenie – wygrzewanie – zmęczenie; sól drogowa – zmęczenie – wygrzewanie – zmęczenie oraz woda i mróz – sól drogowa – zmęczenie – wygrzewanie – zmęczenie. Dla zadanych oddziaływań

szczegółowo przeanalizowano zależności modułu sztywności od liczby cykli z badania zmęczeniowego. Ostatnim elementem rozdziału 5 było opracowanie autorskich formuł obliczeniowych w celu uwzględnienia analizowanych czynników na trwałość zmęczeniową analizowanych mieszanek mineralno-asfaltowych.

W rozdziale szóstym Autor podjął próbę uwzględnienia zjawiska regeneracji materiału w kryterium zmęczeniowym konstrukcji nawierzchni. W tym celu wykorzystane zostało kryterium spękań zmęczeniowych AASHTO 2004 oraz modelowanie wykorzystujące metodę elementów skończonych z użyciem specjalistycznego programu Abaqus. Zastosowany model MES skalibrowano z rozwiązaniem analitycznym przeliczonym z użyciem oprogramowania ALIZE-LCPC do projektowania konstrukcji nawierzchni. Wynikiem tych analiz było opracowanie autorskich współczynników kalibracyjnych, które pozwalają na uwzględnienie analizowanego zjawiska w projektowaniu trwałości zmęczeniowej nowych konstrukcji nawierzchni.

W rozdziale siódmym Autor przedstawił podsumowanie przeprowadzonych studiów literatury, badań laboratoryjnych oraz zaawansowanych analiz obliczeniowych, a także sformułował 20 wniosków końcowych.

Rozdział ósmy natomiast zawiera rozważania dotyczące możliwych kierunków dalszych prac badawczych. Po tym rozdziale w pracy zawarto podziękowania, spis literatury oraz streszczenie w języku polskim i angielskim. Brak jest natomiast w pracy spisu rysunków i tablic.

4. Ocena doboru tematu, celów i tezy rozprawy doktorskiej

Dobór tematu pracy jest właściwy i bardzo potrzebny ze względu na konieczność uwzględniania w projektowaniu nawierzchni zarówno dodatkowych czynników, takich jak regeneracja, jak i nowych materiałów, np. asfaltów wysokomodyfikowanych HiMA. Tytuł pracy doktorskiej odpowiada treści rozprawy. Układ pracy jest właściwy i dobrze przedstawia rozwiązanie problemu naukowego. Przedstawiony cel rozprawy znalazł odniesienie w sześciu zadaniach częściowych, które można by również nazwać celami częściowymi. Zarówno cel główny, jak i zadania częściowe zostały zrealizowane w sposób skuteczny i pełny, przy zastosowaniu narzędzi i metod badawczych oraz analitycznych. Postawiona teza rozprawy doktorskiej o następującym brzmieniu: „*Uwzględnienie procesów regeneracji (healingu) oraz oddziaływania wody i mrozu i soli drogowej pozwala lepiej prognozować zjawiska zmęczeniowe zachodzące w mieszankach mineralno-asfaltowych oraz w nawierzchniach drogowych*” została sformułowana w sposób zrozumiały. Dodatkowo należy wyraźnie podkreślić, że posiada ona duży walor aplikacyjny, który stwarza możliwość szerszego stosowania zaproponowanej metodyki w projektowaniu indywidualnym konstrukcji nawierzchni w Polsce przy wykorzystaniu nowych i innowacyjnych materiałów drogowych (w tym przypadku asfaltów wysokomodyfikowanych) o właściwościach istotnie różniących się od

właściwości materiałów stosowanych standardowo oraz przy uwzględnieniu zjawiska regeneracji.

5. Ocena wkładu rozprawy do aktualnego stanu wiedzy w dziedzinie nauk technicznych

Recenzowana praca doktorska dotyczy aktualnego i ważnego zagadnienia związanego z trwałością mieszanek mineralno-asfaltowych i w konsekwencji trwałością projektowanych asfaltowych nawierzchni drogowych. Zagadnienie to jest szczegółowo analizowane i rozwijane w literaturze światowej. Podobnie analiza zjawiska regeneracji (healingu) stanowi aktualny temat prac badawczych na świecie. Prowadzone prace skupiają się na wypracowaniu odpowiedniej metody zwiększenia trwałości nawierzchni poprzez zastosowanie różnych dodatków np. mikrokapsulek lub włókien stalowych do mieszanek mineralno-asfaltowych, a także zastosowanie różnych technik nagrzewania nawierzchni, co prowadzi do zasklepienia (regeneracji) powstałych spękań w nawierzchni asfaltowej. Autor niniejszej rozprawy doktorskiej w rozdziale 4.4.2 bardzo szczegółowo rozpoznał i zestawiał aktualne badania nad regeneracją mieszanek mineralno-asfaltowych. Jest to bardzo istotny i cenny element pracy, który pozwolił na sformułowanie właściwych wniosków podsumowujących obecny stan wiedzy i zaproponowanie nowych autorskich rozwiązań. Spośród najważniejszych, zdaniem recenzenta, elementów rozprawy stanowiących istotny wkład Doktoranta do aktualnego stanu wiedzy w dziedzinie nauk technicznych należy zaliczyć:

1. Analiza zjawiska regeneracji i wpływ tego zjawiska na trwałość zmęczeniową nawierzchni przy uwzględnieniu warstwy podbudowy asfaltowej oraz warstwy wiążącej.
2. Analiza zjawiska regeneracji w mieszankach mineralno-asfaltowych poddanych wcześniejszym oddziaływaniom środowiskowym – wody i mrozu oraz soli drogowej w odniesieniu do trwałości zmęczeniowej.
3. Uwzględnienie zjawiska regeneracji warstw asfaltowych poddanych oddziaływaniom środowiskowym w kryterium zmęczeniowym.
4. Analiza trwałości zmęczeniowej oraz ocena wpływu healingu w odniesieniu do asfaltów wysokomodyfikowanych (HiMA) oraz różnej technologii produkcji i wbudowywania mieszanek mineralno-asfaltowych (mieszanki na ciepło w technologii WMA).

Doktorant sformułował także obiecujące kierunki dalszych badań wykorzystujące opracowane autorsko metody poprzez:

1. Uwzględnienie w oddziaływaniach środowiskowych oprócz wody i mrozu oraz soli drogowej także promieniowania UV.



2. Uwzględnienie innych rodzajów skał, mieszanek mineralno-asfaltowych oraz stosowanych lepiszczy asfaltowych.
3. Wykorzystanie obrazowania tomograficznego (X-RAY) oraz reometru dynamicznego ścinania (DSR) w celu lepszego zrozumienia zjawiska zmęczenia i regeneracji mieszanek mineralno-asfaltowych oraz konstrukcji nawierzchni.

6. Ocena rozprawy doktorskiej

Ocena rozprawy doktorskiej została przedstawiona w dwóch częściach. Część pierwsza stanowi ocenę merytoryczną w odniesieniu do szczegółowych uwag wraz z ich uzasadnieniem. Z kolei w części drugiej przedstawiono uwagi redakcyjne, stylistyczne oraz formalne.

6.1. Uwagi merytoryczne

- 1) Str. 11: Autor powołując się na pozycję literatury [100] podaje, że mieszanka mineralno-asfaltowa stosowana do warstw konstrukcji nawierzchni poddawana jest zakresowi temperatur eksploatacyjnych wynoszących w Polsce pomiędzy -40°C , a $+80^{\circ}\text{C}$. Podany zakres temperatur nie jest prawdziwy. Jeśli chodzi o najniższą stwierdzoną w Polsce temperaturę powietrza (czyli standardowo 2 m nad poziomem terenu), to rzeczywiście przywołuje się wartość -40°C , jaka wystąpiła podczas ostrej zimy w roku 1929 (czyli prawie 100 lat temu). Współcześnie najniższe występujące w Polsce temperatury nawierzchni stwierdzono w roku 2012 i dochodziły one do -34°C na powierzchni warstwy ścieralnej. Jeśli chodzi natomiast o wysokie wartości temperatur, to również w tym przypadku w pracy znalazło się pewne przekłamanie ponieważ temperatury w warstwie ścieralnej dochodzą do $+65^{\circ}\text{C}$. Potwierdzają to autorskie, eksperymentalne pomiary temperatury przedstawione w punkcie 5.3.5 rozprawy.
- 2) Str. 15, akapit 1: Autor podał następujące stwierdzenie, które jest nie do końca prawdziwe: „MMA w zależności od zmian temperatury jest podatny w niskich na spękania warstw szczególnie nośnych (podbudowa, wiążąca), natomiast w wysokich na deformacje trwałe (plastyczne) warstwy wierzchnie (ścieralna, wiążąca).” Na jakiej podstawie Autor sformułował takie stwierdzenie? Niskie, zimowe temperatury powodują powstanie naprężeń termicznych głównie w warstwie ścieralnej, a dopiero potem w zależności od czasu trwania i wartości niskich temperatur również w warstwach niżej leżących. Ponieważ standardowo do warstw ścieralnych stosowane są bardziej miękkie asfalty i/lub asfalty modyfikowane elastomerem SBS, natomiast do warstw niżej leżących stosowane są twardsze asfalty drogowe to rzeczywiście wydawałoby się, że te warstwy są bardziej

- podatne na spękania niskotemperaturowe. Jednak prowadzone badania terenowe pokazują, że spękania termiczne głównie występują w warstwie ścieralnej.
- 3) Str. 28, akapit 2: „Spośród wskazanych kryterium w tabeli modeli największą popularnością w Polsce cieszy się Instytut Asfaltowy oraz AASHTO 2004”. Użyte stwierdzenie jest niepoprawne merytorycznie i stylistycznie. Bo co to znaczy zdaniem Autora, że dane kryterium „cieszy się popularnością”? W obecnym katalogu KTKNPIP rekomendowanym kryterium spękań zmęczeniowych warstw asfaltowych jest kryterium AASHTO 2004.
 - 4) Str. 43, akapit 2: Autor przedstawił następujące stwierdzenie: „Trudno jest oddzielić spękania niskotemperaturowe od zmęczeniowych, ponieważ są one również wywołane szkodą zmęczeniową. Niska temperatura obniża wytrzymałość lepiszcza (i całej MMA) na rozciąganie.” Stwierdzenie to nie jest prawdziwe. Po pierwsze dlatego, że mechanizm powstawania spękań niskotemperaturowych (także termicznych zmęczeniowych) powstających na skutek spadku temperatury podczas mroźnej zimy lub cyklicznym zmianom niskiej zimowej temperatury jest zupełnie inny niż mechanizm powstawania typowych spękań zmęczeniowych powodowanych przez ruch pojazdów. Po drugie dlatego, że spękania te zupełnie inaczej objawiają się na drodze. Spękania niskotemperaturowe to spękania poprzeczne inicjowane na powierzchni warstwy ścieralnej, natomiast spękania zmęczeniowe to spękania występujące w śladach kół pojazdów najczęściej jako spękania siatkowe i inicjowane na spodzie pakietu warstw asfaltowych. Jeśli chodzi natomiast o wytrzymałość mieszanki mineralno-asfaltowej na rozciąganie, to wraz z obniżaniem się temperatury wytrzymałość wzrasta. Materiał staje się sztywny i kruchy. Po przekroczeniu tej charakterystycznej wartości temperatury wytrzymałość mieszanki zaczyna maleć. W przypadku lepiszcza asfaltowego ta graniczna wartość temperatury, w której wytrzymałość lepiszcza zaczyna się obniżać nazywana jest „glass transition temperature”, co można tłumaczyć jako temperatura przejścia w stan szklisty lepiszcza asfaltowego.
 - 5) Str. 44, akapit 1: Przywołany został raport NCHRP, pozycja [188] w spisie literatury, który dotyczy spękań typu „TOP – DOWN”, których mechanizm powstawania jest inny niż typowych spękań zmęczeniowych. Spękania tego typu są równoległe do osi jezdni i są inicjowane na powierzchni warstwy ścieralnej, najczęściej na granicy oddziaływania śladu kół pojazdów. To jest kolejny przykład, który wskazywałby, że Autor pracy nie w pełni rozróżnia poszczególne mechanizmy powstawania spękań w nawierzchniach asfaltowych. Przecież nie wszystkie spękania, które obserwujemy na drogach to spękania zmęczeniowe. Proszę Doktoranta o ustosunkowanie się do tej uwagi.
 - 6) Str. 52, akapit 2: uwaga analogiczna jak w punkcie 1).

- 7) Str. 71, rozdział 5.1.1: Na jakiej podstawie doktorant dobierał rodzaj kruszywa do badanych mieszanek mineralno-asfaltowych? Czy wybór grysów i piasku ze skały gabro był podyktowany wcześniejszymi analizami? Skała gabro posiada właściwości zbliżone do bazaltu, a więc o stosunkowo dobrym powinowactwie z asfaltem (dobrej adhezji). Jednak w Polsce często stosowane są również skały o istotnie większej zawartości krzemionki np. skały granitowe i w związku z tym konieczne staje się stosowanie środka adhezyjnego. W rozprawie doktorskiej poruszony jest aspekt wpływu czynników środowiskowych, czyli wody, mrozu oraz solanki dlatego rodzaj zastosowanego kruszywa jest bardzo istotny. Czy Doktorant mógłby skomentować ten aspekt pracy w kontekście możliwego wpływu doboru kruszywa na uzyskane wyniki trwałości zmęczeniowej i zjawiska regeneracji?
- 8) Str. 75 – 78, tablice 6-12: proszę wyjaśnić powód, dla którego dla każdej analizowanej frakcji kruszywa np. frakcji 16/22,4 (Tab. 6) wykonywano 6 przesiewów i opracowano analizę statystyczną? Czy związane to było także z dużą niejednorodnością poszczególnych frakcji kruszyw stosowanych do badań?
- 9) Rozdział 5.1 Projekt mieszanki: Niektóre opisy w tym rozdziale są zbyt detaliczne. Przykładowo str. 85, akapit 3 i opis dotyczący pracy suszarki laboratoryjnej.
- 10) Str. 91, rozdział 5.2 Badania bloku podstawowego: Podane przez Doktoranta uzasadnienie stosowania tej samej recepty (AC 22) również do warstwy podbudowy nie budzi zastrzeżeń recenzenta. Jest to możliwe zgodnie z WT-2 i bywa stosowane na budowach. Natomiast stwierdzenie wyrażone w punkcie 1 budzi obawy recenzenta czy Doktorant kiedykolwiek był obecny podczas wbudowywania warstw asfaltowych na budowie. Cytuję: „ponieważ na placu budowy można wykonać dwie warstwy za jednym razem - oszczędność czasu i pieniędzy (aspekt ekonomiczny) – zmniejszenie przestojów technologicznych, oszczędność materiału na odsadzkach, większe możliwości produkcyjne dla otaczarni (brak przestojów potrzebnych na przeprogramowanie układu do nowej recepty”. Pomijając technologię „Compact asphalt” pozwalającą na jednoczesne wbudowywanie na gorąco 2 warstw technologicznych z możliwością ich skutecznego zagęszczenia jak Doktorant wyobraża sobie układanie jednocześnie warstwy wiążącej i podbudowy o uziarnieniu 0/22 mm i skuteczne zagęszczenie tych warstw?
- 11) Str. 126 i 127: Na rys. 29 przedstawiono sytuację z jednoczesnym układaniem warstwy podbudowy AC 22 gr. 18 cm i warstwy wiążącej o tym samym uziarnieniu i gr. 8 cm. Uwaga ta nawiązuje do uwagi przedstawionej powyżej. Technologicznie jest to niemożliwe do wykonania bez narażenia układanych warstw na: a) niedogęszczenie związane z koniecznością zagęszczenia pakietu warstw asfaltowych o gr. 26 cm jednocześnie; b) nierówności, które powstaną na powierzchni warstwy wiążącej i będą skutkiem oprócz nierównomiernego zagęszczenia także gruboziarnistością mieszanek.

Do warstwy wiążącej jednak zalecana jest mieszanka o drobniejszym uziarnieniu AC 16 W, co pozwala na skuteczniejszą zagęszczalność (większa zawartość optymalna lepiszcza asfaltowego). W tym kontekście argumenty przedstawione przez Doktoranta na str. 126 pracy uzasadniające proponowane rozwiązanie są mocno dyskusyjne lub nieprawdziwe.

- 12) Str. 128: W opinii recenzenta brak głębszego uzasadnienia w części bloku zaawansowanego odnośnie badania wpływu wody i mrozu oraz soli drogowej na mieszankę mineralno-asfaltową w warstwie podbudowy. Dostęp tych dwóch analizowanych czynników do warstwy podbudowy asfaltowej (zwłaszcza jej dolnej części, w której zjawisko zmęczenia jest najbardziej istotne) jest bardzo ograniczony. Przecież standardowo do warstwy ścieralnej stosowane są mieszanki drobnoziarniste, najczęściej mieszanki typu SMA o uziarnieniu 0/8 mm – 0/11 mm i o strukturze zamkniętej (około 2% wolnych przestrzeni w warstwie). Uzasadnienie przedstawione na str. 138 w czterech punktach nie jest do końca prawdziwe ponieważ:

Ad.1: dostęp poprzez uszkodzenia powierzchniowe (np. zdaniem Doktoranta spękania top-down lub niedostrzegalne mikrospękania) wskazywałby, że warstwy górne nawierzchni są już w dużej mierze zdegradowane a celem niniejszej pracy jest analiza regeneracji głównie warstwy podbudowy. Co z tego, że wykażemy, iż podbudowa ulega regeneracji zmęczeniowej skoro i tak nie wyeliminujemy przyczyny powstawania uszkodzeń czyli konieczności naprawy/wymiany warstwy ścieralnej lub ścieralnej i wiążącej?

Ad.2: Jako drugie uzasadnienie Autor wskazał sytuację przebudowy nawierzchni podczas zimy i ruchu pojazdów po sfrezowanej warstwie ścieralnej. Zdaniem recenzenta jest to założenie czysto hipotetyczne i nie powinno do niego dochodzić w normalnych warunkach kontraktowych, właśnie z uwagi na konieczność ochrony warstwy wiążącej i podbudowy.

Ad.3: Przedstawiony przypadek możliwej nieszczelności w wyniku zerwania szczepności międzywarstwowej oraz wnikania wody z pobocza jest uzasadniony.

Ad.4: Przypadek wpływu aerozolu w postaci rozproszonych kropeł zasolonej wody na podbudowę asfaltową wymaga szczegółowego wytłumaczenia przez Doktoranta. Zdaniem recenzenta wpływ ten jest znikomy, ale być może nie w pełni zrozumiałem istotę tego zjawiska.

- 13) Str. 134, rys. 63: Sposób składowania i kondycjonowania próbek przed właściwymi badaniami budzi duże zastrzeżenia recenzenta. Przedstawiona na fotografii sytuacja wskazuje, że próbki po docięciu składowane były w temperaturze pokojowej w pryzmach do wysokości około 5 warstw próbek. Czy Doktorant nie obawiał się powstania deformacji w próbkach zlokalizowanych na spodzie pokazanych pryzm? Ze swojego doświadczenia wiem, że sposób składowania próbek może istotnie wpływać na uzyskane wyniki badań

- (choćby zjawisko wzrostu sztywności próbek wraz z długością czasu ich przechowywania). Proszę o komentarz w tej sprawie.
- 14) Str. 135, punkt 5.3.2.2: Cytuję: „Zmiana stanu skupienia wody z ciekłego na stały jest przyczyną powstawania wysadzin ale również spękań w warstwach konstrukcji nawierzchni.” Pytanie recenzenta jest następujące: czy rzeczywiście to zamarzająca woda powoduje powstanie spękania czy też bardziej chodzi o wnikanie wody i zamarzanie w powstałym wcześniej spękaniu? Standardowe badania oceniające wpływ wody i mrozu na trwałość projektowanej mieszanki mineralno-asfaltowej polegają na porównaniu wytrzymałości na pośrednie rozciąganie próbek poddanych oddziaływaniu wody i mrozu do wytrzymałości tzw. świadków, czyli próbek referencyjnych.
- 15) Str. 141: Cytuję: „Do pielęgnacji w roztworze solanki przyjęto temperaturę równą 10°C. Jest ona według IBDiM temperaturą ekwiwalentną [113], zalecaną do projektowania warstw konstrukcji nawierzchni metodami katalogowymi.” Przywołana pozycja literatury [113] to książka prof. Judyckiego wraz z zespołem, którego recenzent był członkiem. Przyjęcie temperatury ekwiwalentnej +10°C nie było i nie jest wartością zalecaną do projektowania warstw konstrukcji nawierzchni. Dodatkowo warta przywołania byłaby pozycja literatury z roku 2021 autorstwa Wioletty Leśniewskiej i recenzenta, która wyraźnie wskazuje, że wartość temperatury ekwiwalentnej zalecanej dla Polski jest wyraźnie wyższa niż +10°C. (Leszczyńska W., Pszczoła M. „Analiza temperatury ekwiwalentnej do projektowania nawierzchni asfaltowych w Polsce z wykorzystaniem metody AASHTO 2004”, Przegląd Komunikacyjny, 2021).
- 16) Punkt 5.3.3 Analizy modułu sztywności mieszanek A-D. Recenzent pragnie wyrazić swoje uznanie dla przeprowadzonych analiz statystycznych, poprzez które Autor pracy poszukiwał zależności korelacyjnych. Próba poszukiwania korelacji pomiędzy badanymi cechami na moduł sztywności, trwałość zmęczeniową, ilość cykli itp. bardzo dobrze pokazuje zachowanie poszczególnych mieszanek z różnymi rodzajami asfaltów. Jest to na pewno mocne punkty w pracy.
- 17) Rozdział 5.3.5. Eksperymentalne pomiary temperatury. Bardzo ciekawy rozdział eksperymentalny. Zdaniem recenzenta wątpliwości może budzić przygotowane stanowisko do pomiaru temperatury oraz bardzo krótki czas pomiaru. Stworzenie takiego stanowiska zapewne było bardzo pracochłonne i czasochłonne. Stąd pytanie recenzenta dlaczego w pracy zaprezentowano tylko wyniki pomiarów dla okresu 18-19 czerwca 2021? Czy był to najcieplejszy okres wybrany z dłuższego cyklu pomiarowego? Jeśli chodzi o samo stanowisko pomiarowe to jest ono nietypowe o tyle, że modeluje temperaturę w połączonych płytach o wymiarach 30x25 cm i grubości każdej płyty 6-7 cm. Z rys. 92 na str. 172 wynika, że płyty nie były ze sobą połączone tzn. brak jest szczepności międzywarstwowej, która występuje tradycyjnie w rzeczywistej nawierzchni. Oprócz tego

ze względu na owinięcie zestawionych płyt folią aluminiową uniemożliwiono przenikanie i rozchodzenie się ciepła do warstw przylegających (stworzono przysłowiowy termos z możliwością zmiany temperatury tylko w kierunku pionowym). Jest to duże uproszczenie, które nakazuje traktować uzyskane wartości temperatury na grubości warstw w sposób przybliżony. Niemniej jednak sam pomysł i realizacja zasługują na docenienie. W związku z wnioskiem Autora przedstawionym na str. 174, cytuję: „Udowodniono również, iż rodzaj zastosowanego do MMA lepiszcza, również wpływa na nagrzewanie się mieszanek. Stwierdzono, że należy go odpowiednio uwzględniać.” Pytanie recenzenta: W jaki sposób udowodniono, że rodzaj zastosowanego do MMA lepiszcza wpływa na nagrzewanie się mieszanek? O ile wpływ rodzaju kruszywa (jego jasności) jest oczywisty, to w jaki sposób wpływa lepiszcze asfaltowe?

- 18) Str. 239, tablica 41: Dlaczego do obliczeń trwałości zmęczeniowej modelowanej konstrukcji nawierzchni przyjęto ciśnienie kontaktowe o wartości 977,5 kPa? Jest to wartość ciśnienia istotnie wyższa od przyjętej w obydwu katalogach typowych konstrukcji nawierzchni. W katalogu dla nawierzchni podatnych i półsztywnych przyjęto obciążenie kołem 50 kN i ciśnienie kontaktowe 850 kPa, natomiast w katalogu nawierzchni sztywnych obciążenie kołem 50 kN i 57,5 kN oraz ciśnienie kontaktowe 720 kPa.
- 19) Problemem, który ujawnił się podczas badań i analiz konstrukcji nawierzchni jest brak wyraźnych różnic pomiędzy asfaltem modyfikowanym a wysokomodyfikowanym HiMA. Recenzent zgadza się z Autorem pracy, że wynika to z właściwości asfaltów z dodatkiem elastomeru SBS, których temperatura mięknięcia jest wyraźnie wyższa niż zastosowanych również badaniach asfaltów drogowych. Element ten wymaga dalszych prac badawczych.

6.2. Uwagi redakcyjne i formalne

Recenzowana rozprawa doktorska została napisana w sposób poprawny. Praca jest czytelna oraz zrozumiała. Pewną trudność stwarzają podsumowania, które zdaniem recenzenta stanowią bardziej komentarz niż rzeczywiste podsumowanie etapu pracy. Styl i język techniczny pracy są poprawne. Występują nieliczne błędy składni i stylu. Autor w wielu miejscach pracy ignoruje zapis zdania od wielkiej litery. Wynika to prawdopodobnie z końcowej redakcji pracy. Szczegółowe ważniejsze uwagi redakcyjne i formalne są następujące:

- 1) W całej pracy stosowane jest określenie „asfalt zwykły” w odniesieniu do asfaltów drogowych. Zgodnie z obowiązującą nomenklaturą powinno się używać określenia „asfalt drogowy”.

- 2) W pracy w wielu miejscach pod rysunkami brakuje przywołania do literatury. Przykładowo rys.: 1, 2, 3, 7, 8, 9, 10, ... itd. Czy te wszystkie rysunki są autorstwa Doktoranta? Jeśli tak, to warto podać [opracowanie własne], aby nie było wątpliwości.
- 3) Str. 11, akapit 4: Jest: „Badania Poela zaaplikowane....”. Powinno być: „Badania Van der Poela zaaplikowane...”.
- 4) Str. 12: Jest: „Badania związane z analizami modułu zespolonego i fazy ...”. Powinno być: „Badania związane z analizami modułu zespolonego i kąta przesunięcia fazowego...”.
- 5) Str. 15, akapit 5: W pracy znalazło się przywołanie Katalogu Przebudów i Remontów pozycja [76] w spisie literatury. Katalog ten nie został opracowany przez GDDKiA, jak podaje Autor, ale przez Instytut Badawczy Dróg i Mostów w Warszawie. Dodatkowo katalog ten nigdy nie był wdrożony i rekomendowany do stosowania przez GDDKiA dlatego nie powinien być przywoływany w rozprawie naukowej. Natomiast stwierdzenie, że ten roboczy katalog kiedyś funkcjonował jako „System Oceny Stanu Nawierzchni – SOSN” jest stwierdzeniem nieprawdziwym.
- 6) Stosowanie określeń: „za duża temperatura” zamiast „zbyt wysoka temperatura”, „głębokość nawierzchni” zamiast „grubość nawierzchni”.
- 7) Str. 49, akapit 3: Zalecałbym nie stosowania określeń „natychmiastowe leczenie” lub „długoterminowe leczenie” w odniesieniu do materii nieożywionej i zjawiska „healingu” lub „self-healingu”. Dużo lepszym określeniem stosowanym zresztą przez Autora w przeważającej części pracy jest „regeneracja” lub „samo-regeneracja”.
- 8) Str. 58, akapit 2: podano „...Do testów przygotowano 2 reprezentatywne mieszanki AC20 (zwykły asfalt drogowy o penetracji 40 mm i 100 mm) wykonane w technologii na gorąco”. Czy chodziło o asfalty drogowe o penetracji 40 j. pen. i 100 j. pen.?
- 9) Str. 66, rozdział 4.5: Tytuł rozdziału nie do końca odpowiada zawartości ponieważ w rzeczywistości wypunktowuje elementy, które wymagają uzupełnienia /dalszych prac na podstawie analizy obecnego stanu wiedzy. Rozdział ten jest cennym elementem pracy, ponieważ uzasadnia zakres badań i analiz przeprowadzonych w dalszej części pracy.
- 10) Str. 68, i dalej: w pracy często pojawia się określenie np. „wysokość regeneracji” lub też wysokość innej cechy analizowanej przez Autora, np. „wysokość temperatury”. Powinno się stosować określenia np. „wielkość regeneracji”, „wartość temperatury”.
- 11) Str. 93, akapit 1 i w dalszej części rozdziału: Autor stosuje określenie potoczne „próbek Marshalowskich” mając na myśli próbki formowane w prasie Marshalla o średnicy zbliżonej do 100 mm i wysokości 63,5 mm +/- 2,5 mm. Metoda Marshalla, z której wywodzi się wciąż stosowana prasa Marshalla do formowania próbek nie uprawnia do takiego nazywania próbek.
- 12) Str. 108: „koleiniarka”? Może lepiej „koleinomierz” lub „urządzenie do badania koleinowania”?

- 13) Str. 237 ostatni akapit: spękania zarodkujące w podbudowie? Chodzi o inicjację spękania na spodzie warstwy podbudowy.

7. Podsumowanie oceny pracy

Pomimo przedstawionych w niniejszej recenzji uwag krytycznych, czy też niejasności wymienionych powyżej, dobrze oceniam zakres oraz wykonanie rozprawy doktorskiej. Ponadto stwierdzam, że uzyskane przez Doktoranta oryginalne wyniki analiz teoretycznych potwierdzające udowodnienie postawionej tezy badawczej oraz oryginalne rozwiązanie problemu naukowego można uznać za wymierny wkład do stanu wiedzy w dziedzinie nauk technicznych, w dyscyplinie inżynieria lądowa i transport.

8. Wniosek końcowy

Recenzent stwierdza, że recenzowana rozprawa doktorska autorstwa mgr inż. Eryka Mączki pt. „Trwałość mieszanek mineralno-asfaltowych z uwzględnieniem zmęczenia i regeneracji” spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim zgodnie z Ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. *Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz.U. poz. 1669) oraz na podstawie Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. Nr 65, poz. 595 z późn. zm.). Doktorant posiada odpowiednią wiedzę teoretyczną oraz umiejętności prowadzenia samodzielnej pracy naukowej.

Wobec powyższego wnoszę o przyjęcie recenzowanej rozprawy naukowej, jako podstawy do nadania Panu mgr inż. Erykowi Mączce stopnia doktora w dziedzinie nauk technicznych, w dyscyplinie naukowej inżynieria lądowa i transport i dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony przed Komisją powołaną przez Radę Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Wrocławskiej. Jednocześnie, z uwagi na obszerność przeprowadzonych badań oraz analiz numerycznych, a także aspekt aplikacyjny wynikający z możliwości uwzględnienia zjawiska regeneracji w analizach trwałości zmęczeniowej i projektowania konstrukcji nawierzchni, chciałbym zgłosić wniosek o wyróżnienie pracy.



Dr hab. inż. Marek Pszczoła, prof. PG