



POLITECHNIKA POZNAŃSKA

dr hab. inż. Mieczysław Słowik, prof. PP

WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ I TRANSPORTU
INSTYTUT INŻYNIERII LĄDOWEJ
ul. Piotrowo 5, 61-138 Poznań, tel.: +48 61 665 2478
e-mail: mieczyslaw.slowik@put.poznan.pl, www.put.poznan.pl



Zachodniopomorski Uniwersytet
Technologiczny w Szczecinie
dnia 24. 01. 2025
Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska
W P Ł Y N Ę Ł O

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Oliwii Merskiej

pt. *Wpływ rodzaju i ilości lepiszcza w mieszankach typu „anti-fatigue” na parametry zmęzeniowe w teście rozciągania prostego*

1. Podstawa opracowania recenzji

Recenzja została opracowana na wniosek Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie (pismo z dnia 28.10.2024 r.), realizującej uchwałę ww. Rady Dyscypliny nr 15 z dnia 23 października 2024 r.

Podstawę prawną opracowania recenzji rozprawy doktorskiej stanowią:

- USTAWA z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018 poz. 1668 z późn. zm.)
- 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. Ogólna charakterystyka rozprawy

Opiniowana rozprawa doktorska na temat *Wpływ rodzaju i ilości lepiszcza w mieszankach typu „anti-fatigue” na parametry zmęzeniowe w teście rozciągania prostego* została przygotowana przez mgr inż. Oliwię Merską pod kierunkiem promotora w osobie dr. hab. inż. Pawła Mieczkowskiego, profesora ZUT w Szczecinie, promotora pomocniczego w osobie dr. inż. Bartosza Budzińskiego oraz opiekuna pomocniczego wyznaczonego przez podmiot współpracujący (przedsiębiorstwo zatrudniające Doktorantkę) w osobie dr. inż. Wojciecha Sorociaka (rozprawa została zrealizowana w ramach programu pn. „Doktorat wdrożeniowy”).

Tematyka ocenianej rozprawy jest związana z bardzo aktualnym i ważnym dla rozwoju budownictwa drogowego zagadnieniem odporności asfaltowych nawierzchni drogowych na powstawanie spękań, zarówno będących następstwem wystąpienia zjawiska zmęczenia, jak i znacznych zmian temperatury otoczenia, której gradient w całym okresie eksploatacji nawierzchni może przekraczać 60°C. Autorka swoje dociekania naukowe skupiła na opracowaniu mieszanek mineralno-asfaltowych, które mogą być stosowane w warstwie o funkcji przeciwspekaniowej i przeciwmęczeniowej, zlokalizowanej na spodzie pakietu warstw asfaltowych w konstrukcji nawierzchni drogowej, oraz empirycznej weryfikacji ich właściwości.

Za podjęciem tej tematyki badawczej przemawia również fakt, że projektowanie i budowa nawierzchni drogowych o wydłużonym okresie trwałości i bezawaryjnej eksploatacji jest ważnym elementem polityki zrównoważonego rozwoju w budownictwie drogowym. Zmniejszenie ryzyka powstawania uszkodzeń nawierzchni drogowych w postaci spękań przekłada się m.in. na mniejsze zapotrzebowanie na wykonywanie robót utrzymaniowych, a tym samym oszczędność kosztów, materiałów, a także ograniczenie emisji CO₂ i innych szkodliwych związków do atmosfery.

Stwierdzam, że tematyka dysertacji zdecydowanie mieści się w dziedzinie nauk inżyniersko-technicznych w dyscyplinie *inżynieria lądowa, geodezja i transport*.

Opiniowana rozprawa doktorska została ukończona w 2024 roku, stanowi dzieło niepublikowane, na prawach rękopisu. Napisana została w języku polskim i liczy łącznie 268 stron. Składa się z 6 rozdziałów merytorycznych poprzedzonych spisem treści, streszczeniem opracowanym w języku polskim i angielskim oraz spisem oznaczeń i skrótów użytych w pracy. W końcowej części rozprawy znajduje się bibliografia, spis norm, spis rysunków oraz spis tabel. Te części pracy nie są rozdziałami, dlatego ich numeracja będąca kontynuacją numeracji rozdziałów merytorycznych jest, w mojej opinii, zbędna.

Struktura rozdziałów merytorycznych dysertacji jest następująca. W rozdziale 1 zamieszczono informacje wstępne dotyczące rozprawy doktorskiej. Opisano tematykę pracy, sformułowano problem naukowy, określono tezy badawcze, a także sformułowano cel pracy oraz opisano jej zakres. Rozdział 2 zawiera obszerne studium literatury krajowej i zagranicznej dotyczącej zagadnień analizowanych w rozprawie, w szczególności uszkodzeń nawierzchni drogowych, przeglądu i charakterystyki warstw odpornych na zmęczenie i pękanie w niskich temperaturach, a także oceny mieszanek mineralno-asfaltowych stosowanych do warstw przeciwmęczeniowych i przeciwspekaniowych. W rozdziale 3 opisano metodykę badawczą zastosowaną w dysertacji. Zaplanowane badania podzielono na trzy części dotyczące: doboru materiałów wsadowych (lepiszczy asfaltowych, kruszyw oraz dodatków) i oznaczenia ich właściwości, badań związanych z etapem projektowania mieszanek mineralno-asfaltowych, których próbki zostały wyprodukowane w warunkach

rzeczywistych (w skali przemysłowej, a nie laboratoryjnej) oraz badań zasadniczych (zaawansowanych), które pozwoliły na dokonanie oceny właściwości przeciwmęczeniowych i przeciwspekaniowych mieszanek mineralno-asfaltowych wybranych do badań. Rozdział 4 jest najobszerniejszym rozdziałem w całej dysertacji i obejmuje łącznie 99 stron. W rozdziale tym zestawiono rezultaty wykonanych badań i dokonano ich analizy. Scharakteryzowano wybrane testy statystyczne, które zostały wykorzystane w wykonanych analizach. Następnie przedstawiono i omówiono wyniki oznaczeń właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych badanych w niskich temperaturach z zastosowaniem testów laboratoryjnych: TSRST, UTST, RT oraz TCT. W dalszej kolejności zestawiono i omówiono wyniki oznaczenia modułu sztywności mieszanek mineralno-asfaltowych badanych dwiema metodami laboratoryjnymi: IT-CY oraz 4PB-PR, a także rezultaty badań trwałości zmęczeniowej metodą belki zginanej (4PB-PR) oraz odporności na powstawanie spękań metodą Texas Overlay. Ostatnia część analizowanych wyników dotyczyła zagęszczalności (zdolności do zagęszczania) badanych mieszanek mineralno-asfaltowych. W rozdziale 5 opisano studium przypadku dotyczącego wdrożenia mieszanki mineralno-asfaltowej typu AC AF w warstwie przeciwspekaniowej w konstrukcji nawierzchni wbudowanej na odcinku drogi wojewódzkiej nr 265 Brześć Kujawski – Gostynin. Zwieńczenie tej części dysertacji stanowi rozdział 6, w którym zostały sformułowane wnioski oraz wskazane zostały możliwości kontynuowania badań opisanych w rozprawie doktorskiej. W kolejnej części dysertacji zamieszczono bibliografię obejmującą ogółem 331 pozycji, zarówno krajowych jak i zagranicznych, w znacznej części bardzo aktualnych, opublikowanych po 2014 roku. Pozostałe pozycje literaturowe stanowią normy z serii PN-EN w liczbie 20. W końcowej części rozprawy zamieszczono spis rysunków oraz spis tabel.

3. Ocena merytoryczna rozprawy

Problemem badawczym podjętym przez Doktorantkę było zagadnienie utraty nośności drogowych nawierzchni asfaltowych w wyniku wystąpienia zjawiska zmęczenia (w efekcie wielokrotnie powtarzających się obciążeń od kół pojazdów – wymuszenie odkształceń o charakterze dynamicznym) oraz spękań wywołanych gwałtownymi zmianami temperatury otoczenia (wymuszenie odkształceń o charakterze fizycznym). Rozwiązanie podjętego problemu naukowego zaproponowane przez Doktorantkę polegało na zastosowaniu warstwy o właściwościach przeciwspekaniowych i przeciwmęczeniowych w dolnej części pakietu warstw asfaltowych konstrukcji nawierzchni drogowej. Do wykonania tej warstwy Doktorantka zaproponowała dwa typy mieszanek mineralno-asfaltowych o bardzo dużej zawartości lepiszcza asfaltowego, tj. AC AF 8 (beton asfaltowy typu *anti-fatigue*) oraz SMA MA 8 (mieszanka mastykowo-grysowa o zwiększonej zawartości mastyksu). Każda z analizowanych mieszanek została sporządzona w dwóch wariantach: z udziałem asfaltu

drogowego 50/70 oraz wysokomodyfikowanego PmB 65/105-80. Do rozwiązania podjętego problemu naukowego Doktorantka zastosowała oryginalną metodykę polegającą na kompleksowej analizie właściwości badanych mieszanek mineralno-asfaltowych obejmującej: odporność na pękanie w niskich temperaturach z zastosowaniem testów laboratoryjnych TSRST, UTST, RT oraz TCT, moduł sztywności oznaczony z zastosowaniem dwóch metod laboratoryjnych, tj. IT-CY oraz 4PB-PR, odporność na zmęczenie wyznaczona z zastosowaniem metody belki zginanej (4PB-PR) oraz odporność na pękanie metodą Texas Overlay. Jako badanie uzupełniające wykonany został test zagęszczalności (zdolności do zagęszczania) wszystkich analizowanych mieszanek mineralno-asfaltowych z zastosowaniem prasy żyratorowej. Większość zastosowanych przez Doktorantkę metod pomiarowych, mimo że są to metody znormalizowane, nie jest w Polsce powszechnie stosowana do badania zachowania mieszanek mineralno-asfaltowych. Kompleksowe podejście zastosowane przez Doktorantkę w dysertacji świadczy o oryginalnym rozwiązaniu podjętego problemu naukowego. Analizy uzyskanych rezultatów zostały wykonane z zastosowaniem zaawansowanych narzędzi statystycznych. Bardzo ważnym elementem opiniowanej rozprawy było studium przypadku dotyczącego wdrożenia mieszanki mineralno-asfaltowej typu AC AF w warstwie przeciwspekaniowej w konstrukcji nawierzchni wbudowanej na odcinku drogi wojewódzkiej nr 265 Brześć Kujawski – Gostynin, opisane w rozdziale 5. Ta część pracy ma bardzo ważne znaczenie w kontekście realizacji opiniowanej rozprawy doktorskiej w ramach programu *Doktorat wdrożeniowy*.

Uważam, że tytuł dysertacji w brzmieniu *Wpływ rodzaju i ilości lepiszcza w mieszankach typu „anti-fatigue” na parametry zmęczeniowe w teście rozciągania prostego* nie został sformułowany precyzyjnie. W zastosowanych testach rozciągania prostego (TSRST, UTST, RT, TCT) nie wyznaczano parametrów zmęczeniowych badanych mieszanek mineralno-asfaltowych, lecz parametry będące miarą ich odporności na powstawanie spękań w niskiej temperaturze. W testach tych nie dochodzi do wielokrotnie powtarzających się cyklicznych obciążeń próbek, więc nie można mówić o wystąpieniu zjawiska zmęczenia. Występuje ono jedynie w teście 4PB-PR (gdzie wykonano od 417 500 do 3 389 125 cykli obciążenia), ale to nie jest test rozciągania prostego tylko test belki zginanej, oraz ewentualnie w teście Texas Overlay (gdzie wykonywano 2000 cykli obciążenia). Moim zdaniem, program badań wykonanych przez Doktorantkę był bardziej obszerny niż wynika to z tytułu rozprawy.

W p. 1.3 rozprawy Doktorantka sformułowała trzy tezy badawcze o następującym brzmieniu.

TEZA 1: Rodzaj zastosowanego lepiszcza (asfalt drogowy i wysokomodyfikowany polimerami – HiMA) decyduje o odporności mieszanek mineralno-asfaltowych na pękanie i zmęczenie, szczególnie w niskich temperaturach.

TEZA 2: Mieszanka mastykowo-grysowa o zwiększonej zawartości mastyksu SMA-MA, stosowana do tej pory jako warstwa ochronna na obiektach mostowych, może pełnić funkcję warstwy przeciwmęczeniowej / przeciwspekaniowej w konstrukcji nawierzchni drogowej.

TEZA 3: Mieszanka SMA-MA może osiągnąć parametry mechaniczne typowych mieszanek typu AC AF przy poprawionych parametrach związanych z jej urabialnością i zagęszczalnością.

Nie zgłaszam zastrzeżeń dotyczących poprawności sformułowania ww. tez badawczych. Natomiast w podsumowaniu rozprawy nie znalazłem jednoznacznego stwierdzenia, czy sformułowane tezy zostały udowodnione (w całości, a może częściowo?). Proszę Doktorantkę o odniesienie się do powyższej uwagi.

Zasadniczy cel dysertacji został sformułowany w p. 1.4 w następującym brzmieniu.

Celem rozprawy doktorskiej jest określenie wpływu ilości, a przede wszystkim rodzaju lepiszcza na parametry zmęczeniowe mieszanek mineralno-asfaltowych do warstw „anti-fatigue”, w tym odporność na spękania wywołane cyklicznymi naprężeniami rozciągającymi od skurczu warstw konstrukcji nawierzchni drogowej. Badaniom poddaje się innowacyjne mieszanki mastykowo-grysowe o zwiększonej zawartości mastyksu (SMA-MA) oraz betonu asfaltowego typu AC AF na bazie dwóch różnych lepiszczy asfaltowych (wysokomodyfikowanego polimerami i drogowego). Uzyskane wyniki badań pozwolą na porównanie dwóch różnych typów mieszanek w kontekście trwałości zmęczeniowej, odporności na działanie niskich temperatur i spękania oraz podatności na zagęszczenie.

W mojej opinii doszło w tym przypadku do nadużycia pojęcia „wpływu ilości” (a dokładniej: zawartości) lepiszcza asfaltowego na właściwości badanych mieszanek mineralno-asfaltowych. Jego użycie byłoby zasadne, gdyby badaniom poddano poszczególne mieszanki wykonane z udziałem lepiszcza przy kilku różnych jego zawartościach. Tymczasem każda z analizowanych mieszanek była badana jedynie przy jednej (zoptymalizowanej) zawartości danego lepiszcza. Natomiast różna zawartość lepiszcza wynika z faktu, że do badań wybrano mieszanki mineralno-asfaltowe różnych typów, o dużym zróżnicowaniu w zakresie składu granulometrycznego (zawartości poszczególnych frakcji kruszywa i wypełniacza), co miało decydujący wpływ na optymalną zawartość lepiszcza asfaltowego. Jeśli chodzi o sformułowane cele poboczne, nie mam zastrzeżeń i uważam, że zostały one osiągnięte.

W p. 1.5 został opisany szczegółowy zakres rozprawy doktorskiej. Moje wątpliwości w tym punkcie budzi dobór lepiszczy asfaltowych zastosowanych w badanych mieszankach mineralno-asfaltowych. Asfalt typu HiMA (PmB 65/105-80) charakteryzuje się znacznie większą wartością penetracji w 25°C niż asfalt drogowy (87 mm/10 vs. 60 mm/10 w przypadku asfaltu 50/70), czyli mniejszą sztywnością, a to daje mu już na starcie istotny handicap w aspekcie przeciwspekaniowych/przeciwmęczeniowych właściwości badanych mieszanek mineralno-asfaltowych. Tym bardziej, że asfalt drogowy 50/70 nie jest asfaltem

bazowym do produkcji asfaltu modyfikowanego PmB 65/105-80 (do jego produkcji użyto prawdopodobnie asfaltu drogowego 100/160 lub nawet 160/220, a modyfikacja dodatkiem kopolimeru SBS spowodowała zmniejszenie wartości penetracji w 25°C do 87 mm/10). Dla zapewnienia właściwych warunków analizy porównawczej wszystkie zastosowane lepiszcza powinny mieć zbliżoną wartość penetracji oznaczonej w 25°C. Pewien niedosyt budzi również ograniczenie zakresu modyfikacji lepiszczy zastosowanych w analizowanych mieszankach mineralno-asfaltowych do dwóch skrajnych rozwiązań, tj. asfaltu niemodyfikowanego (z założenia najmniej kosztownego, ale oferującego najmniejszą trwałość) oraz wysokomodyfikowanego (najdroższego, ale pozwalającego na osiągnięcie dużej trwałości). Pomiędzy tymi skrajnymi rozwiązaniami znajduje się wiele pośrednich, z których chociaż jedno warto byłoby włączyć do programu badań (lub przynajmniej jego części). Uważam, że uzasadnione byłoby zastosowanie zestawu asfaltów o średniej twardości, tj. 50/70, PmB 45/80-55 (lub PmB 45/80-65) i PmB 45/80-80, albo alternatywnie bardziej miękkich: 70/100, PmB 65/105-60 i PmB 65/105-80. Wówczas asfalt drogowy (odpowiednio 50/70 lub 70/100) mógłby faktycznie być uznany jako lepiszcze referencyjne (punkt odniesienia) wobec lepiszczy modyfikowanych. Proszę Doktorantkę o komentarz.

W rozdziale 2 Doktorantka dokonała obszernego przeglądu aktualnego stanu wiedzy w zakresie zagadnień będących przedmiotem dysertacji. W p. 2.1 scharakteryzowała najczęściej występujące zjawiska prowadzące do powstawania uszkodzeń nawierzchni drogowych. W p. 2.2 opisała koncepcje warstw nawierzchni charakteryzujących się dużą odpornością na zmęczenie i pękanie w niskiej temperaturze, w aspekcie projektowania nawierzchni długowiecznych. Natomiast w p. 2.3 została dokonana ocena mieszanek mineralno-asfaltowych przydatnych do stosowania w warstwach przeciwmęczeniowych i przeciwspekaniowych, z uwzględnieniem mieszanek typu AC AF oraz SMA-MA, które były obiektem badań i analiz opisanych w dysertacji. Dokonano również przeglądu modeli reologicznych ośrodków lepkosprężystych, które Doktorantka wykorzystała do opisu zjawisk reologicznych zaobserwowanych podczas badań mieszanek mineralno-asfaltowych. Podstawą wykonania studium literatury było 331 publikacji naukowych obejmujących osiągnięcia zarówno o zasięgu krajowym, jak i międzynarodowym. Ich uzupełnieniem było 20 norm z serii PN-EN zawierających opis standardowych procedur badawczych zastosowanych przez Doktorantkę. Znaczną część analizowanych źródeł stanowiły publikacje ogłoszone po 2014 roku. Dobór cytowanych pozycji literaturowych, w tym ich tematyka i aktualność, świadczy o bardzo dobrym rozeznaniu Doktorantki dotyczącym osiągnięć badawczych i stanu aktualnej wiedzy w zakresie zagadnień poruszanych w rozprawie doktorskiej.

Rozdział 3 zawiera szczegółowy opis metodyki badawczej zastosowanej w części eksperymentalnej rozprawy doktorskiej. W p. 3.1 został określony plan badań. W punkcie 3.2 opisane zostały badania materiałów wsadowych tj. kruszywa grubego, kruszywa drobnego, wypełniacza, dodatków i lepiszczy asfaltowych. Wyniki tych badań wykorzystano do

zaprojektowania mieszanek mineralno-asfaltowych będących obiektem wykonanych badań i analiz (p. 3.3). W p. 3.4 została opisana procedura przygotowania mieszanek mineralno-asfaltowych w warunkach przemysłowych (w wytwórni mieszanek mineralno-asfaltowych) oraz plan pobierania mieszanek, z których sporządzane były próbki do badań. W p. 3.5 zostały opisane, z dużą dbałością o szczegóły, procedury przygotowania próbek z mieszanek mineralno-asfaltowych oraz metody badań laboratoryjnych, zastosowane w zasadniczej części dysertacji (Doktorantka nazwała je „badaniami zaawansowanymi”), w szczególności badania zachowania w niskiej temperaturze (metodami TSRST, UTST, RT oraz TCT), oznaczanie modułu sztywności (metodami IT-CY oraz 4PB-PR), badanie trwałości zmęczeniowej (metodą 4PB-PR), badania odporności na pękanie (metodą Texas Overlay) oraz badania zagęszczalności (metodą prasy żyratorowej). Rozdział 3 został opracowany bardzo starannie. Opisano szczegółowo aparaturę pomiarową użytą do badań oraz warunki pomiarowe zastosowane w poszczególnych testach, co znacząco ułatwia zrozumienie i śledzenie wykonanych przez Doktorantkę prac badawczych.

Rozdział 4, obejmujący łącznie 99 stron, jest najobszerniejszym i najważniejszym, z merytorycznego punktu widzenia, rozdziałem w całej rozprawie doktorskiej. Rozpoczyna się opisaniem testów statystycznych wykorzystanych do analizy uzyskanych wyników badań (p. 4.1), m.in. testu Shapiro-Wilka, testu t Welcha, testu rang Wilcozona oraz analizy Blanda-Altmana. Analiza rezultatów badań sprowadzała się do poszukiwania istotności wpływu różnych czynników (zmiennych niezależnych, tj. zawartości i rodzaju lepiszcza, rodzaju mieszanki, zawartości wolnych przestrzeni, zawartości frakcji powyżej 2 mm) na poszczególne właściwości badanych mieszanek mineralno-asfaltowych. Dla każdej analizowanej cechy badanych mieszanek sformułowano hipotezy badawcze, które następnie poddawane były weryfikacji z użyciem wybranych testów statystycznych.

Analizę wyników rozpoczęto od właściwości niskotemperaturowych badanych mieszanek mineralno-asfaltowych (p. 4.2). Na podstawie dokonanych analiz, Doktorantka sformułowała w tej części aż 48 wniosków szczegółowych, co jest moim zdaniem liczbą znacznie przesadzoną. Wśród wielu banalnych wniosków (np. 1.7. *Mieszanki AC AF 8 50/70 i SMA-MA 8 PmB 65/105-80 charakteryzowały się wartościami pośrednimi temperatury pęknięcia*), potrzeba dużej koncentracji, aby wyłowić te o najważniejszym znaczeniu (uważam, że zadaniem Doktorantki było uszeregowanie wniosków według ich ważności). Do takich można zaliczyć m.in. wniosek nr 1.8 informujący, że nie wykazano istotnych statystycznie różnic między średnią temperaturą pęknięcia mieszanek wykonanych z udziałem asfaltu drogowego 50/70, w odniesieniu do tych z udziałem asfaltu wysokomodyfikowanego HiMA. Podobne przesłanie wynika z wniosku nr 1.23. Stwierdzenia te w istotny sposób podważają głoszoną powszechnie w literaturze prawidłowość, że właściwości lepiszcza asfaltowego mają największy wpływ (szacowany na ok. 90%) właśnie na zachowanie mieszanek mineralno-asfaltowych w niskiej temperaturze, w tym na ich odporność na

pękanie. Na zakończenie p. 4.2, w tab. 4-46 zestawiono ranking badanych mieszanek pod względem ich właściwości niskotemperaturowych, tj. 1 m (najkorzystniejsze właściwości) AC AF 8 PmB 65/105-80, 2 m AC AF 8 50/70, 3 m SMA-MA 8 PmB 65/105-80, 4 m (właściwości najbardziej niekorzystne) SMA-MA 8 50/70. To kolejny bardzo dyskusyjny wniosek. Ze względu na znacznie większą zawartość lepiszcza asfaltowego w mieszankach typu SMA-MA (9,1% lub 9,2%) należałoby spodziewać się, że te mieszanki będą miały znacznie korzystniejsze właściwości niskotemperaturowe niż mieszanki typu AC AF (o zawartości lepiszcza 7,8% lub 7,9%). A najtrudniej zrozumieć fakt, że mieszanka AC AF 8 50/70 (czyli o mniejszej zawartości twardszego asfaltu niepoddanego modyfikacji) wykazuje korzystniejsze właściwości niskotemperaturowe niż mieszanka SMA-MA 8 PmB 65/105-80 (o większej zawartości miększego asfaltu wysokomodyfikowanego). Wymienione powyżej wnioski w sposób radykalny podważają aktualny stan wiedzy na temat wpływu zawartości i właściwości lepiszcza asfaltowego na zachowanie mieszanek mineralno-asfaltowych w niskiej temperaturze. Brakuje mi komentarza Doktorantki dotyczącego opisanych powyżej prawidłowości i choćby podjęcia próby wyjaśnienia przyczyn wystąpienia zaobserwowanych zjawisk, o co uprzejmie proszę.

W p. 4.3 analizie poddano wyniki oznaczenia modułu sztywności z użyciem dwóch metod laboratoryjnych, tj. IT-CY (test rozciągania pośredniego próbek walcowych) oraz 4PB-PR (test zginania belek prostopadłościennych). Badania zaplanowano w interesujący sposób, tj. w testach wykonanych metodą IT-CY zastosowano zróżnicowaną temperaturę pomiaru (-5°C , 0°C , 10°C , 15°C oraz 20°C), natomiast testy metodą 4PB-PR wykonano przy stałej temperaturze 10°C , ale przy zmiennej częstotliwości obciążenia (1 Hz, 2 Hz, 3 Hz, 5 Hz, 8 Hz, 10 Hz i 20 Hz). Wykonanie badań obydwiema metodami przy jednakowej temperaturze (10°C) pozwoliło na dokonanie interesującego porównania wyników oznaczenia modułu sztywności. Doktorantka porównała średnie wartości uzyskane metodą IT-CY i metodą 4PB-PR przy częstotliwości 8 Hz, zakładając, że wartość ta odpowiada czasowi 125 ms zastosowanemu w teście IT-CY. Uzyskała w ten sposób różnice procentowe zawierające się w przedziale od 29% do 33% (większe wartości uzyskano metodą 4PB-PR). Uważam, że w tym przypadku nie można zastosować takiego prostego przeliczenia. W metodzie 4PB-PR przy częstotliwości 8 Hz, 125 ms to czas całego cyklu obciążenia (pełen obieg sinusoidy od 0° do 360°), a w metodzie IT-CY 124 ms jest to czas przyrostu siły od zera do wartości wymuszającej przemieszczenie poziome próbki o wartości 5 μm . Zatem realizowana jest tylko jedna ćwiartka pełnej sinusoidy (tj. od 0° do 90°). Dlatego bardziej zasadne byłoby odniesienie wyników uzyskanych w teście IT-CY do tych uzyskanych metodą 4PB-PR, ale przy częstotliwości czterokrotnie mniejszej, czyli 2 Hz. W takim przypadku różnice procentowe pomiędzy wynikami wynoszą odpowiednio (w układzie zgodnym z tab. 4-56): 4,2%; -3,6%; 4,8%; -4,5%, co daje średnią różnicę o wartości 0,2%. Można stwierdzić, że jest to dowód na niemal pełną zbieżność wyników uzyskiwanych dwiema wykorzystanymi

w badaniach metodami. Biorąc jednak pod uwagę, że moduł sztywności metodą 4PB-PR oznacza się najczęściej (standardowo) przy częstotliwości 10 Hz, trudno się dziwić, że uzyskane wyniki mogą się różnić nawet powyżej 30% w stosunku do tych otrzymanych metodą IT-CY. Uważam, że badania i analiza wyników oznaczenia modułu sztywności z użyciem obydwu metod, z uwzględnieniem różnych częstotliwości obciążenia w metodzie 4PB-PR, stanowią ważny wkład praktyczny Doktorantki w zakresie interpretacji wartości modułu sztywności mieszanek mineralno-asfaltowych. Mam natomiast wątpliwości dotyczące oceny kryterialnej średnich wartości modułu sztywności badanych mieszanek (tab. 4-57), z której wywnioskowałem, że najkorzystniejsze w aspekcie przydatności do warstw przeciwmęczeniowych/przeciwspekaniowych są mieszanki najbardziej sztywne. Dotąd sądziłem, że jest odwrotnie. Proszę Doktorantkę o wyjaśnienie moich wątpliwości.

W p. 4.4. dokonano analizy rezultatów badań trwałości zmęczeniowej wykonanych na próbkach mieszanek mineralno-asfaltowych metodą belki zginanej 4PB-PR. Ze względu dużą odporność na zmęczenie badanych mieszanek badania realizowano przy relatywnie dużych (i zróżnicowanych ze względu na rodzaj lepiszcza użytego w mieszance) wartościach amplitudy wymuszanego odkształcenia, które zawierały się w przedziale 250-380 $\mu\text{m/m}$. Uważam, że słusznie przyjęto wspólny poziom odniesienia dla wszystkich badanych mieszanek mineralno-asfaltowych, czyli odkształcenie o amplitudzie 300 $\mu\text{m/m}$, co pozwoliło dokonać porównania ich trwałości zmęczeniowej przy identycznych warunkach pomiarowych. Niewątpliwym mankamentem uzyskanych wyników badania trwałości zmęczeniowej jest ich słaba powtarzalność. Ponad połowa otrzymanych wyników wykazuje się wartością współczynnika zmienności przekraczającą 15%, na największa wartość przekracza 40%. Są to wyniki obarczone bardzo dużą niepewnością i formułowanie wniosków na ich podstawie jest obarczone dużym ryzykiem popełnienia błędu. W celu zawężenia przedziałów niepewności wartości średniej niezbędne byłoby znaczne (minimum dwukrotne) zwiększenie liczby dokonanych obserwacji (pomiarów). Można jednak stwierdzić, że uzyskane wyniki wykazały, że mieszanki wykonane z udziałem lepiszcza wysokomodyfikowanego HiMA charakteryzują się znacznie większą trwałością zmęczeniową (reprezentowaną wartością odkształcenia, przy której kryterium zmęczeniowe zostaje osiągnięte po 10^6 cykli obciążenia $\epsilon_6 = 275\text{--}285 \mu\text{m/m}$) niż wykonane z udziałem asfaltu drogowego 50/70 ($\epsilon_6 = 355\text{--}365 \mu\text{m/m}$). Uzyskane wartości charakteryzujące trwałość zmęczeniową badanych mieszanek są zgodne z podobnymi przypadkami opisanymi w literaturze.

Ostatnim wykonanym badaniem dotyczącym właściwości przeciwspekaniowych analizowanych mieszanek był test Texas Overlay (p. 4.5). Badanie przeprowadzono w trybie kontrolowanego odkształcenia w temperaturze $25^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$ z wykorzystaniem metodyki opisanej w normie Tex-248-F, zmodyfikowanej przez Doktorantkę. Rezultaty badań wykazały większą odporność mieszanek wykonanych z udziałem asfaltu

wysokomodyfikowanego, przy czym w przypadku każdego z zastosowanych lepiszczy bardziej korzystne wyniki uzyskano dla mieszanki typu AC AF.

Na zakończenie rozdziału 4, dokonano analizy zagęszczalności badanych mieszanek (p. 4.6). Cecha ta nie ma bezpośredniego związku z odpornością na pękanie i zmęczenie badanych mieszanek, jednak uzyskanie prawidłowego zagęszczenia i wymaganej zawartości wolnych przestrzeni w ułożonej warstwie jest ważne w aspekcie spełnienia wszystkich zakładanych właściwości zastosowanych mieszanek mineralno-asfaltowych. Wykonane badania i analizy wykazały, że mieszanki typu SMA-MA są bardziej podatne na zagęszczanie niż mieszanki typu AC AF, przy czym mniejsza energia zagęszczania jest potrzebna w przypadku mieszanek z udziałem asfaltu drogowego 50/70 niż z udziałem asfaltu wysokomodyfikowanego PmB 65/105-80.

W rozdziale 5 opisano studium przypadku dotyczącego wdrożenia mieszanki mineralno-asfaltowej typu AC AF w warstwie przeciwspekaniowej w konstrukcji nawierzchni wbudowanej na odcinku drogi wojewódzkiej nr 265 Brześć Kujawski – Gostynin, ważne w kontekście realizacji dysertacji w ramach programu *Doktorat wdrożeniowy*. Ze względu na zaobserwowanie licznych spękań nawierzchni w okresie objętym gwarancją zdecydowano się na sfrezowanie warstw asfaltowych i ułożenie warstwy przeciwspekaniowej z mieszanki AC AF 8 PmB 65/105-80 o grubości 2,0 cm. Niestety, nie znalazłem informacji, jakie warstwy zostały ułożone na warstwie przeciwspekaniowej. Odcinek testowy nawierzchni DW 265 od km 3+135 do km 4+460 str. P został wykonany 24.07.2020 r. i od tego czasu jest regularnie monitorowany przez Doktorantkę. Po czterech latach eksploatacji nie zaobserwowano uszkodzeń nawierzchni, a droga jest w bardzo dobrym stanie technicznym, co Doktorantka potwierdziła przedstawioną w dysertacji dokumentacją fotograficzną.

W rozdziale 6 zamieszczono wnioski sformułowane na podstawie analiz dokonanych w dysertacji oraz kierunki dalszych badań. Generalnie, oceniam je pozytywnie. Zabrakło mi jednak bezpośredniego odniesienia dotyczącego weryfikacji tez badawczych oraz spełnienia celu rozprawy.

Układ opiniowanej rozprawy doktorskiej jest spójny i nie ma większych problemów ze zrozumieniem wywodów naukowych Doktorantki.

Podsumowując uważam, że Doktorantka rozwiązała w sposób oryginalny problem naukowy, którego dotyczyła oceniana rozprawa doktorska. Zakres przeprowadzonych prac badawczych jest imponujący i stanowi o kompleksowym podejściu do rozwiązania podjętego problemu naukowego. Na uznanie zasługuje również bardzo sprawne wykorzystanie metod statystycznych do analizy uzyskanych rezultatów. Wdrożenie jednej z mieszanek mineralno-asfaltowych analizowanych w dysertacji na odcinku testowym o długości 1325 m wykonanym na drodze wojewódzkiej nr 265 Brześć Kujawski – Gostynin spełnia, w mojej opinii, wymagania związane z założeniami programu *Doktorat wdrożeniowy*.

4. Uwagi o charakterze redakcyjnym i terminologicznym

Niezależnie od pewnych wątpliwości ogólnych zgłoszonych w p. 3 niniejszej recenzji stwierdzam, że opiniowana rozprawa doktorska nie jest wolna od usterek redakcyjnych oraz terminologicznych. W dalszej części niniejszego punktu wskażę ważniejsze przykłady takich niedoskonałości (w kolejności ich wystąpienia w rozprawie po raz pierwszy).

- „**Odkształcenia rozciągające/ściskające**” (str. 8, 15g, 18g i wielokrotnie w dalszej części). Jest to skrót myślowy. Odkształcenie jest skutkiem wystąpienia obciążeń. Ono niczego nie rozciąga ani nie ściska. Można mówić np. o sile rozciągającej czy o naprężeniu rozciągającym. Stosowanie powyższych przymiotników w odniesieniu do odkształcenia jest niepoprawne.
- Stwierdzam, że w całej dysertacji (kilkadziesiąt razy) występują zdania rozpoczynające się przymkiem „w” lub „z” zapisanym małą literą (np. str. 17, 6d). Trudno mi dociec, jaka była przyczyna popełnienia tych systematycznych błędów. Oczywiście nie mają one żadnego wpływu na wartość merytoryczną rozprawy, ale stanowią naruszenie zasad poprawnej polszczyzny.
- „...zapewnia **większą elastyczność, sprężystość** i odporność na zmęczenie” (str. 50, 10d). Jaka jest różnica między sprężystością i elastycznością (ang. *elasticity*)? A ile wynosi wartość liczbowa sprężystości (elastyczności)? Sprężystości (elastyczności) nie można wyrazić za pomocą iloczynu liczby i jednostki. Miarą sprężystości jest moduł sprężystości (ang. *modulus of elasticity*) wyrażany np. w MPa. W rozprawie często elastyczność jest wskazywana jako odwrotność sztywności. Zamiast pojęcia „elastyczność” powinien być w tym przypadku używany termin „podatność (na odkształcenia)” lub odkształcalność.
- „Siatki przeważnie mają **prostokątne lub kwadratowe otwory o średnicy** od 6 do 50 mm” (tab. 2-2, str. 63-64). Czy prostokąty i kwadraty charakteryzuje się wartością ich średnicy?
- W tab. 2-3 (str. 67) podano dwa wnioski w brzmieniu: 1) „w niektórych badaniach wykazano, że istnieje optymalna zawartość asfaltu, dla której uzyskuje się maksymalną trwałość mma”; 2) „grubsza błonka lepiszczka na kruszywie wpływa na wzrost trwałości zmęczeniowej”. Te dwa wnioski się **wykluczają**, a Doktorantka nie skomentowała tego faktu.
- „...**bardziej optymalnych rozwiązań**” (str. 77, 2g). Rozwiązanie optymalne jest tylko jedno – w miejscu, w którym funkcja celu osiąga wartość minimalną lub maksymalną. Dlatego nie mają sensu terminy „bardziej optymalny”, „najbardziej optymalny”, „najmniej optymalny” itd.

- Na rys. 2-22 (str. 79) zastosowano symbole E_2 i η_2 , które nie są zgodne z zapisami w równaniach 2.3 i 2.4. Powinno być odpowiednio: E i η . Podobna uwaga dotyczy rys. 2-23.
- „ E_2 i η_2 służą do opisu **sprężystości opóźnionej**” (str. 81, 4d). "Sprężystość" nie może być opóźniona. W zachowaniu ciała sprężystego nie rozpatruje się czynnika czasu.
- „ E_2 – moduł **sztwności**” (str. 82, 7g). Każdy element sprężysty w modelu Burgersa charakteryzowany jest wartością modułu sprężystości, a nie modułu sztywności.
- „Punkt E: obserwujemy powstanie odkształcenia trwałego tłumika η_1 i nieodprężonego do zera odkształcenia elementu Kelvina-Voigta (E_2 i η_2)” – str. 83, 14-15d. Ten opis jest nieprecyzyjny. Obserwowane zjawisko nie kończy się w chwili odpowiadającej punktowi E. Po odciążeniu, od pkt. D do nieskończoności, krzywa dąży asymptotycznie do wartości $(\sigma_{01})/\eta_1$, która odpowiada odkształceniu trwałemu (nieodwracalnemu).
- Rysunki 3-3 oraz 3-5 są **zbędne**. Wszystkie przedstawione na nich informacje zawiera rys. 3-6 (str. 96).
- „Zakres pomiaru **odkształcenia** próbki od $\pm 2,5$ do $\pm 0,5 \mu\text{m}$ ” (str. 101, 9g). Czy odkształcenie wyraża się w mikrometrach?
- „Jeden cykl, składający się z fazy obciążenia i odciążenia, miał **długość 21600 sekund.**” (str. 105, 4d). Czy długość wyraża się w sekundach? W tym przypadku **okres** wynosi 21600 s.
- „...sugeruje w **miarę wysoki** stopień dopasowania modelu do danych” (str. 139, 13d). To pojęcie może być stosowane w literaturze pięknej, a nie w naukach inżyniersko-technicznych.
- Rys. 4-6 (str. 151), a także rysunki 4-18, 4-19, 4-20, 4-23, 4-25, 4-28. Na wykresach zostały naniesione przedziały (tzw. słupki błędów). Niestety, nie opisano, jaki estymator przedziałowy (przedział ufności, przedział niepewności) te słupki reprezentują. Nie podano również, jaki założono poziom istotności α przy obliczaniu szerokości naniesionych przedziałów. Proszę o wyjaśnienie tej kwestii.
- Tab. 4-29 (str. 153). Ta tabela jest zbędna. Nie wnosi żadnych dodatkowych informacji, których brakowałyby na rys. 4-8.
- „Parametry modelu Burgersa (E_1 , E_2 , η_1 , η_2) wyznaczono na podstawie zmiany odkształcenia **w fazie obciążenia** (str. 160, 1g). Dlaczego tylko w fazie obciążenia, a nie uwzględniono fazy odkształcenia przy obciążeniu i zjawiska nawrotu (pełzania odwrotnego) po odciążeniu? Szkoda, bo wówczas wyznaczenie parametrów byłoby bardziej wiarygodne.

- Równanie (4.5) – str. 168. W jakim celu powtórzono równanie (4.2) ze str. 152? Należało się do niego odwołać.
- „Na podstawie uzyskanych wyników można wnioskować, że istnieją podstawy do odrzucenia hipotezy zerowej (która zakłada brak zgodności pomiędzy testami badającymi czas relaksacji mieszanki asfaltowej) i przyjęcia hipotezy alternatywnej H10, twierdzącej o **istotnej zgodności** pomiędzy metodami pomiarowymi RT oraz TCT” (str. 177, 11-14g). Trudno zgodzić się z tym wnioskiem, w szczególności w kontekście radykalnego (dotyczącego **wszystkich** analizowanych przypadków) **odwrócenia tendencji** przy obniżeniu temperatury z -15°C do -20°C .
- „Tab. 4-53. Zestawienie wyników **zespolonego** modułu sztywności E” (str. 189). To nie jest zespolony moduł sztywności E* tylko jego wartość bezwzględna $|E^*|$ (zwana również dynamicznym modułem sztywności). Zespolonego modułu sztywności nie można wyrazić za pomocą jednej liczby. $E^*=E'+iE''$, czyli składa się z części rzeczywistej oraz urojonej.
- „**μstrain**” (m.in. w tab. 4-53, str. 189). Jest to niefortunna jednostka odkształcenia zaimplementowana z norm anglojęzycznych, którą Doktorantka zastosowała kilkakrotnie w dysertacji. Rozprawa została przedstawiona w języku polskim, więc nie powinny się pojawiać wtrącenia w innym języku. Poza tym tej jednostki nie znajdziemy w międzynarodowym układzie jednostek SI, którego stosowanie powinno być obligatoryjne. O wiele bardziej czytelne i zrozumiałe dla każdego naukowca jest zastosowanie jednostki w postaci **μm/m**, co w większości przypadków w rozprawie miało miejsce.
- „...mieszanki SMA-MA są znacznie bardziej **kompaktowe**” (str. 217, 3d). Co Doktorantka miała na myśli? Że mają znacznie mniejsze wymiary? Należy posługiwać się ogólnie zrozumiałym językiem zamiast stosować nieudane kalki językowe.
- „[93] Application of the new viscoelastic method of thermal stress calculation to the analysis of low-temperature cracking of asphalt layers. „Roads and Bridges - Drogi i Mosty”, 2020; 1: 27–49” (str. 244). Nie podano autorów tego artykułu w bibliografii.

W treści opiniowanej rozprawy doktorskiej stwierdziłem występowanie drobnych usterek redakcyjnych (tzw. literówek), które nie mają znaczenia dla merytorycznej oceny dysertacji. Dlatego ograniczę się do zapoznania z nimi Doktorantki poprzez przekazanie na Jej ręce wersji elektronicznej rozprawy z zaznaczonymi usterkami i komentarzami.

5. Podsumowanie i wniosek końcowy

Podsumowując stwierdzam, iż opiniowana rozprawa doktorska pt. *Wpływ rodzaju i ilości lepszczu w mieszankach typu „anti-fatigue” na parametry zmęczeniowe w teście rozciągania prostego* ogłoszona przez mgr inż. Oliwię Merską stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego dotyczącego dyscypliny naukowej *inżynieria lądowa, geodezja i transport*. Sformułowanie tez i celu pracy, zaplanowanie i zrealizowanie kompleksowego programu badań laboratoryjnych, wykonanie analizy rezultatów z zastosowaniem zaawansowanych narzędzi statystycznych oraz sformułowanie wniosków, a także nadzór nad wykonaniem oraz wieloletnie obserwacje nawierzchni na odcinku testowym, dowodzą że Doktorantka posiada ogólną wiedzę teoretyczną dotyczącą dyscypliny naukowej *inżynieria lądowa, geodezja i transport*, a także umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

Uwagi oraz wątpliwości wskazane w punktach 3 oraz 4 niniejszej recenzji nie umniejszają w sposób istotny dużej wartości merytorycznej ocenianej dysertacji, która w moim przekonaniu zasługuje na pozytywną ocenę.

Uważam, iż opiniowana rozprawa doktorska mgr inż. Oliwii Merskiej pt. *Wpływ rodzaju i ilości lepszczu w mieszankach typu „anti-fatigue” na parametry zmęczeniowe w teście rozciągania prostego* spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim zawarte w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz.U. 2018 poz. 1668 z późn. zm.) i **rekomenduję Senatowi Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie** lub innemu organowi Uczelni działającemu z upoważnienia Senatu, **przyjęcie rozprawy doktorskiej oraz dopuszczenie jej do publicznej obrony**.

Ponadto zgłaszam wniosek o **wyróżnienie rozprawy doktorskiej** mgr inż. Oliwii Merskiej.

Uzasadnienie: zakres przeprowadzonych przez Doktorantkę prac badawczych jest imponujący, w znacznej części pionierski w skali kraju i dowodzi kompleksowego podejścia do rozwiązania podjętego problemu naukowego. Na uznanie zasługuje również bardzo sprawne wykorzystanie metod statystycznych do analizy uzyskanych rezultatów. Rozprawa ma charakter aplikacyjny i dobrze wpisuje się w ideę programu *Doktorat wdrożeniowy*.

Poznań, dnia 23 stycznia 2025 r.

mieczyslaw.slo
wik@put.pozn
an.pl

Elektronicznie podpisany
przez
mieczyslaw.slowik@put.pozn
an.pl
Data: 2025.01.23 17:29:33
+01'00'