

Prof. dr hab. inż. Antoni Szydło
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
Politechniki Wrocławskiej
ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław
e-mail: antoni.szydlo@pwr.wroc.pl

Wrocław, 2025-01-03



Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Oliwii Merskiej pt: **”Wpływ rodzaju i ilości lepiszcza w mieszankach typu anti-fatigue na parametry zmęczeniowe w teście rozciągania prostego”**.

1. Uwagi formalne

Recenzja rozprawy doktorskiej została opracowana na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie z dnia 23 października 2024 roku oraz pisma zlecającego nr WBiIŚ – PRD/A/11/2024 z dnia 28.10.2024 r. podpisanego przez Przewodniczącą Rady Dyscypliny Dr hab. inż. Teresę Rucińską, prof. ZUT.

Promotorem rozprawy jest: Dr hab. inż. Paweł Mieczkowski, prof. ZUT.

Promotorem pomocniczym: Dr inż. Bartosz Budziński, ZUT.

Opiekunem pomocniczym: Dr inż. Wojciech Sorociak.

Praca doktorska jest wynikiem badań prowadzonych w ramach programu „Doktorat wdrożeniowy” przy wsparciu Ministerstwa Edukacji i Nauki.

2. Tematyka rozprawy

Tematyka rozprawy dotyczy zagadnień związanych z badaniem i doborem składu mieszanek mineralno-asfaltowych odpornych na spękania zmęczeniowe („anti-fatigue”), które mogą pełnić funkcję warstw przeciwmęczeniowych i przeciwspekaniowych w konstrukcjach nawierzchni drogowych. Jest to tematyka ważna, ponieważ dotyczy problemów budowy i utrzymania infrastruktury transportowej w tym przypadku drogowej podczas okresu eksploatacji. Praca ma charakter aplikacyjny i jest umiejscowiona w dyscyplinie Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport. Doktorantka sformułowała trzy tezy. Teza 1 – *Rodzaj zastosowanego lepiszcza (asfalt drogowy i wysokomodyfikowany polimerami – HiMA)*

decyduje o odporności mieszank mineralno-asfaltowych na pękanie i zmęczenie, szczególnie w niskich temperaturach. Teza 2 – Mieszanka mastyksowo-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 mieszank typu AC AF przy poprawionych parametrach związanych z jej urabialnością i zagęszczalnością. Cel pracy określony jest jednoznacznie. Celem pracy jest określenie wpływu ilości, a przede wszystkim rodzaju lepiszcza na parametry zmęczeniowe mieszank mineralno-asfaltowych do warstw anti-fatigue”, w tym odporność na spękania wywołane cyklicznymi naprężeniami rozciągającymi od skurczu warstw konstrukcji nawierzchni drogowej. Badaniom poddano innowacyjne mieszanki mastyksowo – grysowe o zwiększonej zawartości mastyksu (SMA-MA) oraz betonu asfaltowego typu AC-AF na bazie dwóch różnych lepiszcz asfaltowych (wysokomodyfikowanego polimerami i drogowego). Dla zrealizowania celu pracy Doktorantka wykonała szereg badań materiałów i mieszank mineralno-asfaltowych w laboratorium tj. zaprojektowała mieszanki typu: AC AF 8 50/70; AC AF 8 PmB 65/105-80; SMA – MA 8 50/70; SMA – MA 8 PmB 65/105 – 80. Wykonała badania skurczu niskotemperaturowego – temperatury pękania (TSRST); badania odporności na spękania niskotemperaturowe mma w schemacie rozciągania prostego (UTST); testy pelzania TCT i relaksacji naprężeń RT w trzech temperaturach: - 10⁰ C, - 15⁰ C, -20⁰C; moduły sztywności w schemacie obciążenia: IT-CY oraz 4PB-PR; zmęczenie w schemacie belki czteropunktowo zginanej; badania odporności na spękania odbite metodą Texas Overlay w schemacie prostego rozciągania i ściskania powtarzalnego; testy urabialności. Jedna z mieszank została wbudowana na odcinku próbnym *in situ* w celu sprawdzenia jej w warunkach rzeczywistej pracy konstrukcji nawierzchni. Problematyka prezentowana przez Doktorantkę jest interesująca dotąd w kraju nie studiowana w takim zakresie. Temat pracy moim zdaniem został określony trafnie i jest aktualny. Zaproponowana technologia mieszank mineralno-asfaltowych może być stosowana w polskich warunkach ruchowych oraz środowiskowych.

3. Treść i zakres rozprawy

Praca składa się z 6 rozdziałów, streszczenia w języku polskim i angielskim, bibliografii (331 pozycji), spisu norm (20 pozycji) oraz spisu rysunków (113) i tabel (86) używanych w

pracy. Praca liczy w sumie 268 stron formatu A4. Za spisem treści zamieszczony jest wykaz oznaczeń i skrótów używanych w pracy.

W rozdziale 1 wstępie, Doktorantka oprócz sformułowania tez, celów pracy, naświetliła genezę i problem naukowy jakim będzie się zajmować w pracy. Tezy i cele pracy wraz z problemem naukowym omówiłem w p. 2 niniejszej recenzji.

W rozdziale 2, przeglądzie literatury, zamieściła informacje na temat uszkodzeń warstw nawierzchni, podając również ich przyczyny. Dokonała przeglądu stosowania warstw odpornych na zmęczenie i pękanie w niskich temperaturach oraz stosowanych rodzajów mieszanek mineralno-asfaltowych w administracjach drogowych na świecie zapobiegających pękaniom niskotemperaturowym. Zaprezentowała modele reologiczne mieszanek mineralno-asfaltowych wykorzystywane w pracy. Do oceny czasu relaksacji zaproponowała model Maxwella do oceny pełzania model Burgersa.

W rozdziale 3 przedstawia metodykę badawczą oraz badania materiałów wsadowych (kruszywa oraz asfaltu). Badano 4 mieszanki mineralno-asfaltowe: AC AF 8 50/70, AC AF 8 PMB 65/105-80, SMA-MA 8 50/70, SMA – MA 8 PMB 65/105 – 80 HiMA. Wszystkie mieszanki miały maksymalne uziarnienie do 8 mm. Mieszanki AC AF miały uziarnienie ciągłe, mieszanki SMA – MA uziarnienie nieciągłe. Kruszywo dla mieszanek AC AF było bazaltowe i pochodziło z kopalni Księginki. Natomiast do mieszanki SMA – MA zastosowano jako grube kruszywo bazaltowe z Księginki a jako drobne amfibolit z kopalni Ogorzelec. Zawartość asfaltu w mieszankach AC AF 8 50/70 oraz AC AF 8 PMB 65/105-80 wynosiła odpowiednio 7,8 i 7,9 a mieszanki SMA – MA 8 50/70 i SMA – MA 8 PMB 65/105 – 80 odpowiednio: 9,1 i 9,2. Przeprowadzono następujące badania: badania skurczu termicznego niskotemperaturowego – temperatury pęknięcia (TSRST), wytrzymałości na rozciąganie jednoosiowe w określonej temperaturze (UTST), badania czasu relaksacji naprężeń (RT), badania pełzania przy rozciąganiu (TCT), badania modułu sztywności IT-CY (rozciąganie pośrednie) oraz modułu wg schematu 4PB-PR (zginanie), badania odporności na zmęczenie 4PB-PR (zginanie), badania odporności na spękania wg Tex-248 F powtarzalne ściskanie i rozciąganie osiowe, badania urabialności i zagęszczalności mieszanek w prasie zyratorowej.

W rozdziale 4 Doktorantka przedstawiła wyniki badań i ich analizę. Na początku rozdziału podała przegląd zastosowanych hipotez statystycznych jakie wykorzystywała w pracy. Analizując wyniki badań w teście TSRST (pomiar temperatury pęknięcia i naprężeń przy skrępowanej odkształcalności próbki) Autorka stwierdza, że istnieje wpływ zawartości lepiszcza na temperaturę zniszczenia (pomimo niskich współczynników determinacji R^2),

wpływ rodzaju mieszanki na temperaturę pęknięcia, i na poziom naprężenia przy zniszczeniu. Brak jest wpływu lepkości na temperaturę pęknięcia oraz na poziom naprężenia. Dalsze badania w teście TSRST wykazały wpływ zawartości wolnych przestrzeni na poziom temperatury pęknięcia jak również na poziom naprężeń rozciągających przy zniszczeniu oraz wpływ frakcji powyżej 2 mm na poziom naprężeń przy zniszczeniu.

W badaniach w teście UTST (rozciągania prostego) Autorka wykazała wpływ temperatury na odkształcenia przy zniszczeniu i brak wpływu temperatury na naprężenia, również stwierdziła brak wpływu rodzaju mieszanki na poziom odkształcenia, ale stwierdziła wpływ rodzaju mieszanki na poziom naprężenia.

W badaniu testu relaksacji naprężeń RT (na rozciąganej próbce poddanej stałemu odkształceniu mierzy się zmianę naprężeń) Doktorantka stwierdziła wpływ rodzaju mieszanki na czas relaksacji.

W badaniu testu TCT (pełzanie przy rozciąganiu i ściskaniu) oznaczano czas relaksacji, Doktorantka stwierdziła wpływ rodzaju mieszanki na czas relaksacji. Ponadto Doktorantka wykonała analizę porównawczą czasów relaksacji otrzymywanych wg metody RT i TCT i stwierdziła istnienie zależności pomiędzy tymi czasami. W analizie wyników badań w/w Autorka przedstawiła ranking mieszanek od najlepszej pod względem odporności niskotemperaturowej do najgorszej. Ranking wygląda następująco w kolejności od najlepszej: AC AF 8 PmB 65/105-80, AC AF 8 50/70, SMA – MA 8 PmB 65/105 – 80, SMA – MA 8 50/70.

Doktorantka wykonała również badania modułów mieszanek metodą IT-CY (rozciąganie pośrednie) w różnych temperaturach i stwierdziła zależność liniową modułów od temperatury w zakresie badanych temperatur tj. -5°C do $+20^{\circ}\text{C}$. Największe moduły w temperaturze 10°C wykazywały w kolejności mieszanki AC AF 8 50/70, AC AF 8 PMB 65/105-80, SMA – MA 8 50/70, SMA – MA 8 PmB 65/106 – 80. Autorka wykonała również badania modułów metodą 4PB-PR w temperaturze 10°C oraz siedmiu różnych częstotliwościach w zakresie 1 do 20 Hz (1,2,3,5,8,10,20 Hz) oraz odkształceniu $50\ \mu\text{m/m}$ i stwierdziła zależność liniową modułów od częstotliwości. Największe moduły uzyskały mieszanki AC AF nieco mniejsze mieszanki SMA – MA. Doktorantka dokonała porównania modułów otrzymanych z metod IT-CY oraz 4PB-PR dla temperatur 10°C i częstotliwości ok. 8 Hz i stwierdziła, że moduły wg metody 4PB-PR są o ok. 30% większe. W obu metodach najwyższe moduły uzyskała mieszanka AC AF 8 50/70 a najniższe AC AF 8 PmB 65/105 – 80.

W zakresie badań odporności na zmęczenie 4PB-PR badania mieszanek były prowadzone do osiągnięcia kryterium tj. 50% zmiany modułów. W wyniku tych badań opracowano

zależności liczby cykli od odkształcenia. Największą trwałością wykazała się mieszanka SMA – MA 8 PmB 65/105 – 80 a najmniejszą mieszanka AC AF 8 50/70. Wykorzystując badania zmęczeniowe Doktorantka określiła ϵ_6 tj. poziom odkształceń przy 1 mln obciążeń. Mieszanki z asfaltem drogowym osiągnęły ϵ_6 w zakresie 250 i 290 $\mu\text{m}/\text{m}$ a mieszanki z polimeroasfaltem 350 i 380 $\mu\text{m}/\text{m}$. Autorka przeprowadziła również badania w urządzeniu nie wykorzystywanym w polskiej praktyce laboratoryjnej Texas Overlay wg normy Tex – 248 – F. Badanie polega na cyklicznym rozciąganiu i ściskaniu próbki przy kontrolowanym odkształceniu w temperaturze $+25^{\circ}\text{C}$. W metodzie tej podane są kryteria oceny mieszanek na odporność na spękania. Doktorantka skorzystała z kryterium odporności przy 750 cyklach w temperaturze $+25^{\circ}\text{C}$. Wszystkie mieszanki spełniały to kryterium a drugie kryterium odnosiło się do oceny wskaźnika propagacji spękania (Doktorantka błędnie podała - indeksu odporności na pęknięcie) określonego z równania zależności liczby cykli i siły obciążającej. Wszystkie mieszanki spełniały te kryteria. W tym rozdziale Doktorantka zajęła się problematyką zagęszczalności badanych mieszanek mineralno-asfaltowych. Zagęszczalność była badana w prasie żyratorowej. Badany był wpływ temperatury i ciśnienia na poziom wolnych przestrzeni. Stwierdzono, że ciśnienie przekazywane podczas procedury zagęszczania i temperatura wpływają na zagęszczalność mma. Jednakże energia zagęszczania ma decydujący wpływ. Stwierdzono, że mieszanki SMA – MA lepiej się zagęszczają niż mieszanki AC AF. Pokazano, że rodzaj lepiszcza ma wpływ na podatność na zagęszczanie. Do zagęszczenia mieszanek mma na bazie asfaltów modyfikowanych niezbędna jest większa energia zagęszczania niż przy zagęszczaniu mieszanek ze zwykłymi asfaltami. Najlepiej zagęszczała się mieszanka SMA – MA 8 50/70.

W rozdziale 5 Doktorantka zaprezentowała przypadek *in situ* wdrożenia mieszanek typu AC AF do remontu konstrukcji nawierzchni na której pojawiły się spękania odbite w warstwach z mieszanek mineralno-asfaltowych, pochodzące z warstwy MCE wbudowanej do podbudowy. Remont konstrukcji nawierzchni polegał na sfrezowaniu istniejących warstw: ścieralnej i wiążącej, oczyszczeniu podłoża, naprawieniu pęknięć, ułożeniu warstwy antyspękaniowej AC AF 8 PmB 65/105 – 80 o grubości 2 cm, następnie wbudowaniu warstwy wiążącej i ścieralnej. Po 4 latach eksploatacji brak jest pęknięć odbitych.

W rozdziale 6 Doktorantka zamieściła wnioski, które są uogólnieniem wniosków wynikających z prezentowanych metod badawczych.

4. Ocena rozprawy

Recenzowana rozprawa mgr inż. Oliwii Merskiej dotyczy problemu poszukiwania innowacyjnych rozwiązań technologicznych warstw z mieszanek mineralno-asfaltowych przeciwspekaniowych w konstrukcjach nawierzchni drogowych. Poszukiwania Doktorantki idą w kierunku oceny składu mieszanek pod względem ilości i rodzaju lepiszcza. Jest to problematyka istotna z punktu widzenia warunków środowiskowych oraz również kosztów budowy jak i ewentualnego utrzymania nawierzchni drogowych. Problemy te są studiowane w jednostkach badawczych w kraju jak również w Europie i na świecie. Doktorantka podjęła się trudnego i ambitnego zadania badawczego. Praca ta moim zdaniem ma ważne znaczenie poznawcze i techniczne dla rozwoju technologii budowy i utrzymania nawierzchni drogowych. Problem ma również aspekt ekonomiczny i środowiskowy. Jest to istotne zwłaszcza w aspekcie proaktywnego zarządzania siecią drogową w zakresie utrzymania nawierzchni drogowych.

Doktorantka w celu zrealizowania postawionych celów wykonała obszerny program badań w laboratorium oraz *in situ*. Metodycznie i systematycznie realizowała cele pracy. Wykonała szereg badań i analiz, poszukując optymalnego składu betonu asfaltowego oraz innowacyjnej mieszanki mineralno-asfaltowej typu SMA - MA w warstwach konstrukcji nawierzchni drogowych a w szczególności jako warstwy przeciwmęczeniowe pozwalające na wydłużenie okresu eksploatacji nawierzchni w dążeniu do uzyskania długowiecznych konstrukcji nawierzchni. Jak również wykorzystania jako warstwy przeciwspekaniowe tj. warstwy zapobiegające propagacji spękań z dolnych warstw konstrukcji do górnych. Doktorantka wykonała badania w laboratorium stosując wiele metod badawczych do oceny odporności badanych mieszanek na spękania skurczowe jak i zmęczeniowe. Zastosowała m.in. metodę i aparaturę wykorzystywaną w USA Texas Overlay, która wydaje się być interesującą i możliwą do zastosowania w polskich warunkach środowiskowych. Oczywiście po opracowaniu kryteriów i warunków badań w dostosowaniu do krajowych materiałów i lepiszcz. Interesującym wątkiem w pracy dotąd nie analizowanym w polskiej praktyce są badania zagęszczalności mieszanek mineralno-asfaltowych w prasie żyrotorowej. Jest to istotne z punktu widzenia uzyskiwania optymalnych zawartości wolnych przestrzeni i wskaźników zagęszczenia w mieszankach w kontekście zagęszczania wbudowywanych mieszanek za pomocą maszyn układających jak również walców dogęszczających te mieszanki na drodze. Ważnym elementem w pracy jest zastosowanie wybranej mieszanki na jednej z dróg podczas jej remontu.

Doktorantka wnioski formułowała wykorzystując własne zbiory wyników badań oraz weryfikując hipotezy statystyczne dotyczące wpływu różnych parametrów na badaną cechę. Przedstawione w zakończeniu pracy wnioski opierają się o rezultaty badań i studiów teoretycznych, stanowiąc ich uogólnienie. Prezentowana w rozprawie bibliografia jest aktualna i odnosząca się do zagadnień studiowanych w pracy.

5. Uwagi merytoryczne i pytania do Doktorantki

Po zapoznaniu się z treścią rozprawy nasuwają się następujące uwagi i pytania do Doktorantki:

- 1) W pracy zastosowano wiele metod badań mieszanek mineralno-asfaltowych. Nie wszystkie laboratoria dysponują takim sprzętem. Proszę podać jakie jest w ocenie Pani najbardziej wiarygodne badanie do oceny mieszanek mineralno-asfaltowych w zakresie odporności na spękania zmęczeniowe i skurczowe i dlaczego?
- 2) Jakie kryteria są najważniejsze do oceny mieszanek mineralno-asfaltowych w kontekście odporności na spękania skurczowe?
- 3) Czy Doktorantka analizowała jakie mogą się pojawiać stany naprężeń bądź odkształceń w warstwach przeciwspekaniowych lub przeciwmęczeniowych wbudowanych w konstrukcje nawierzchni.
- 4) Proszę wyjaśnić w metodzie TxOT w tabeli 4-61 (lub rys. 4.29) jaki zidentyfikowano parametr: indeks odporności na pękanie - β czy wskaźnik propagacji spękania - b ?
- 5) Proszę podać interpretację fizyczną wskaźników β lub b otrzymywanych w metodzie TxOT. Czy istnieje zależność pomiędzy tymi wskaźnikami?
- 6) Czy prawidłowo zastosowano model Burgersa w metodzie TCT skoro badania były prowadzone w temperaturach od -10°C do -20°C . Model Burgersa jest cieczą i ma 4 parametry do wyznaczenia co może być przyczyną zmniejszenia dokładności. W niskich temperaturach mma są raczej ciałami. Czy nie lepszy byłby model o dwóch parametrach i będący ciałem. Porównanie czasów relaksacji z modeli Maxwella i Burgersa wskazuje, że jest korelacja pomiędzy tymi czasami. Przy obliczaniu czasu relaksacji w modelu Burgersa wykorzystane były tylko dwa parametry modelu E_1 oraz η_1 .

- 7) W badaniach otrzymywano różne czasy relaksacji. Jakie czasy byłyby najlepsze gdybyśmy chcieli zapisać w wymaganiach jako kryterium oceny warstw antyspękaniaowych?

6. Uwagi redakcyjne

Praca napisana jest poprawnie. Czyta się z zainteresowaniem. Podczas czytania pracy zauważyłem następujące usterki redakcyjne:

- a) Doktorantka w tekście modele Maxwella i Burgersa nazywa ciałami, te modele są cieczami.
- b) Przy opisie modelu Burgersa na str. 83 w. 7 od góry winno być odcinek C – D a nie D –E.
- c) Rys. 4.30 str. 205 brak opisu osi pionowej.
- d) Rys. 4.30 str. 205 podpis pod rysunkiem winien odnosić się do wskaźnika propagacji spękań.
- e) Tab. 4-61 opis nagłówek kolumny 4 winien być SMA – MA 8 50/70 oraz w wierszu 15 tej tabeli wskaźnik propagacji spękania „b” a nie indeks odporności na spękanie β .
- f) Na rys. 4.29 parametr b należy wyznaczyć z zależności $y=ax^{(b)}$ gdzie: $a = 1$.

7. Osiągnięcia zawarte w rozprawie

Biorąc pod uwagę całość przedstawionej rozprawy stwierdzam, że dotyczy ona ważnego zagadnienia związanego z wdrażaniem nowych innowacyjnych technologii w zakresie nawierzchni drogowych. Badania Doktorantki pozwoliły na określenie warunków technologicznych zastosowania mieszanek mineralno-asfaltowych jako warstw przeciwmęczeniowych i przeciwskurczowych. Warstwy przeciwmęczeniowe pozwalają na wydłużenie okresu trwałości zmęczeniowej konstrukcji nawierzchni drogowych. Natomiast warstwy przeciwskurczowe zabezpieczają nawierzchnię przed spękaniami skurczowymi i rozpraszają naprężenia i odkształcenia od skurczu termicznego tym samym też przyczyniają się do zwiększenia okresu eksploatacji nawierzchni drogowych. Doktorantka zaproponowała na warstwy przeciwspekaniowe i przeciwmęczeniowe innowacyjną mieszankę SMA – MA. Ponadto jako osiągnięcie należy zaliczyć przeprowadzenie badań urabialności i zagęszczalności badanych mieszanek co jest istotne z praktycznego punktu widzenia przy

wbudowywaniu tych mieszanek a co za tym idzie uzyskanie wymaganego zagęszczenia. Aplikacyjny charakter badań został potwierdzony zastosowaniem jednej z badanych mieszanek *in situ* do remontu jednej z dróg.

Autorka do realizacji celów pracy wykonała obszerny program badań, zbierając dane empiryczne w warunkach badań laboratoryjnych oraz *in situ*.

W sposób czytelny metodami naukowymi to jest na podstawie badań i analiz wyników obserwacji zebranych w badaniach laboratoryjnych oraz *in situ* Doktorantka rozwiązała zadanie naukowe wykorzystując przy tym weryfikację hipotez statystycznych co uwiarygodnia przeprowadzone badania. Zaproponowała rozwiązanie technologiczne oraz przeprowadziła szereg badań pozwalających na zastosowanie w warstwach nawierzchni drogowych warstw przeciwmęczeniowych i przeciwskurczowych. Wskazała jakie należy wykonać badania i wymagania w zakresie tworzenia recept. Doktorantka wykazała się umiejętnością samodzielnego prowadzenia prac badawczych i rozwiązywania problemów naukowych.

Podane powyżej uwagi nie umniejszają wartości rozprawy jako całości i mam nadzieję, że zostaną wyjaśnione podczas obrony pracy.

8. Wniosek końcowy

Stwierdzam, że opiniowana rozprawa doktorska mgr inż. Oliwii Mrskiej pt: „Wpływ rodzaju i ilości lepiszcza w mieszankach typu anti-fatigue na parametry zmęczeniowe w teście rozciągania prostego”, zawiera rozwiązanie problemu naukowego i wskazuje na dobry poziom wiedzy Doktorantki z dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport, a także na umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Kandydatkę. Stwierdzam, że opiniowana rozprawa spełnia wszystkie wymagania określone przez ustawę wg której procedowany jest przewód doktorski.

Przedkładam Radzie Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport ZUT w Szczecinie niniejszą recenzję z wnioskiem o przyjęcie pracy jako rozprawy doktorskiej oraz dopuszczenie jej do publicznej obrony.

