

Autoreferat (w języku polskim)

Załącznik nr 2a

Piotr Mackiewicz

Spis treści

1. Imię i Nazwisko.....	3
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/ artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.....	3
3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/ artystycznych	3
4. Wskazanie osiągnięcia* wynikającego z art. 16 ust. 2 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 ze zm.):	3
5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych (artystycznych).....	13
5.1. Aktywność naukowa	13
5.2. Aktywność dotycząca zrealizowanych osiągnięć projektowych, konstrukcyjnych i technologicznych, prac badawczych, ekspertyz, projektów badawczych	23
6. Informacje o osiągnięciach dydaktycznych, współpracy naukowej, odbytych stażach krajowych lub zagranicznych i działalności popularyzującej naukę.....	25
7. Parametryczne podsumowanie dorobku naukowego	26
8. Podsumowanie dorobku dydaktycznego i popularyzatorskiego	27

Piotr Mackiewicz

Wrocław, 24.03.2016

Autoreferat

1. Imię i Nazwisko

Piotr Mackiewicz

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/ artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej

- 1995** **Tytuł magistra inżyniera**
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej
Tytuł pracy magisterskiej: „Projekt dróg dla osiedla domów jednorodzinnych we wsi Bielany Wrocławskie”
- 2001** **Stopień doktora nauk technicznych**
Instytut Inżynierii Lądowej, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej
Tytuł pracy doktorskiej: „Wpływ właściwości reologicznych mieszanek mineralno-asfaltowych na deformacje nawierzchni drogowych”

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/ artystycznych

- 1995–2001** **asystent** w Zakładzie Dróg i Lotnisk w Instytucie Inżynierii Lądowej na Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej.
- od 2001** **adiunkt** w Zakładzie Dróg i Lotnisk w Instytucie Inżynierii Lądowej na Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej.

4. Wskazanie osiągnięcia* wynikającego z art. 16 ust. 2 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 ze zm.):

- a) tytuł osiągnięcia naukowego/artystycznego

„Trwałość zmęczeniowa mieszanek mineralno–asfaltowych stosowanych w nawierzchniach drogowych”.

b) (autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa)

Piotr Mackiewicz, monografia: „Trwałość zmęczeniowa mieszanek mineralno–asfaltowych stosowanych w nawierzchniach drogowych”, 2016, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej ISBN 978-83-7493-932-4.

c) omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

Cel i osiągnięcie naukowe

Podstawowym celem pracy są badania, identyfikacja i analiza parametrów opisujących pęknięcia zmęczeniowe i ich rozwój zachodzący w mieszankach mineralno-asfaltowych. Analizy w zakresie mikropęknięć i makropęknięć przeprowadziłem dla zmiennych temperatur, poziomów obciążenia oraz różnych składów mieszanek mineralno-asfaltowych (MMA). Zrealizowałem badania w laboratorium na próbkach pryzmatycznych poddanych cyklicznemu zginaniu.

Główne cele pracy zrealizowałem wyznaczając równania kinetyki pęknięcia oraz charakterystyki zmęczeniowe: dla kryterium pojawienia się makropęknięć (N_c) oraz zmiany energii ($N_{\Delta wN}$). Następnie wykazałem ich użyteczność przy prognozowaniu trwałości zmęczeniowej. Pokazałem, że zastosowanie elementów mechaniki pęknięcia oraz odpowiedniego modelu numerycznego jest skuteczne w analizie i ocenie propagacji pęknięć mieszanek stosowanych w nawierzchni drogowej, co nie jest możliwe w przypadku posługiwania się klasycznymi metodami.

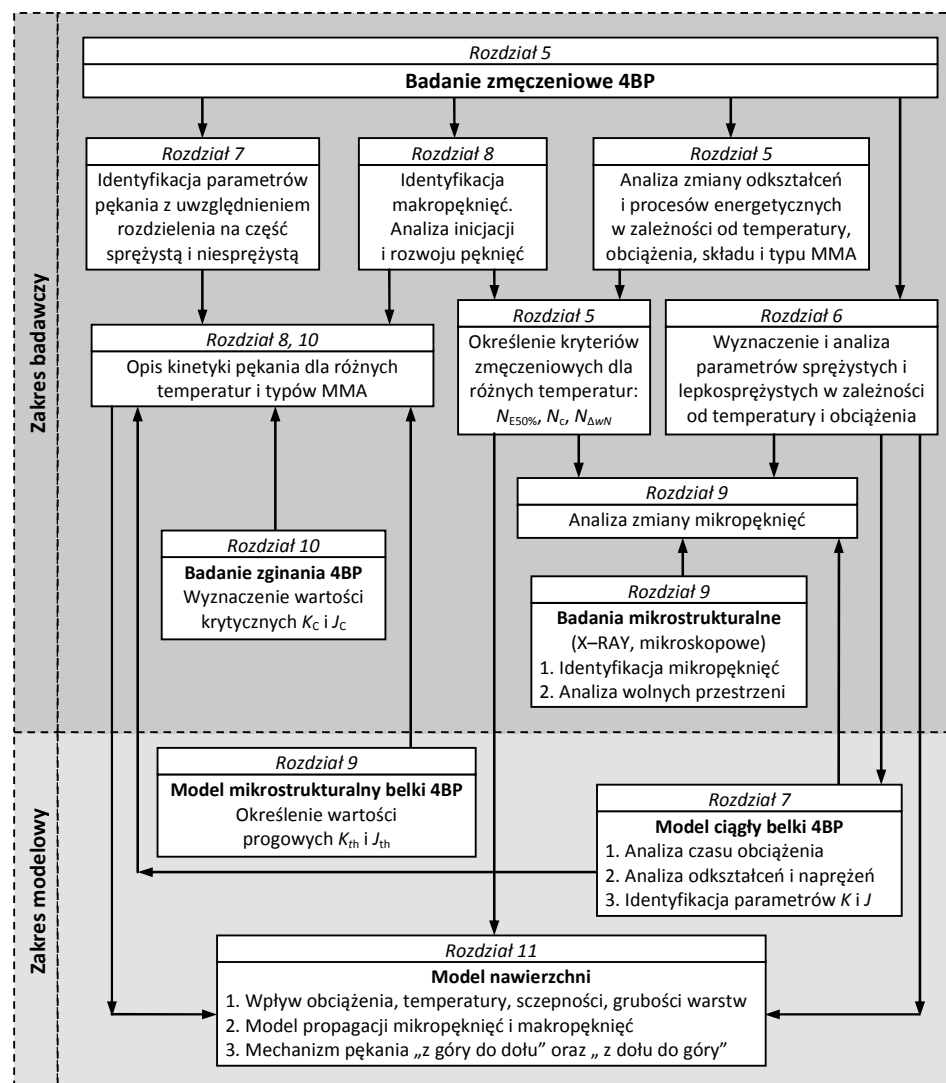
Do osiągnięcia zamierzonego celu zrealizowałem szczegółowe zadania cząstkowe. Do nich należą:

1. Opracowanie procedur badawczych pozwalających na rejestrację prędkości rozwoju i propagacji mikropęknięć i makropęknięć w różnych warunkach temperatury i poziomu obciążenia z uwzględnieniem próbek z karbami.
2. Identyfikacja współczynnika zmiany energii, pozwalającego scharakteryzować zakres pojawienia się mikropęknięć i makropęknięć dla różnych temperatur i poziomu obciążenia.
3. Opracowanie kryteriów zmęczeniowych do prognozowania pęknięć w badanych mieszankach oraz modelach nawierzchni.
4. Identyfikacja parametrów lepkosprężystych i analiza ich zmienności w procesie zmęczenia.
5. Opracowanie modeli numerycznych badania zmęczeniowego pozwalających wyznaczyć parametry pęknięcia, a następnie równania kinetyki propagacji pęknięcia.
6. Przeprowadzenie pomiaru wolnych przestrzeni w mieszance mineralno-asfaltowej z wykorzystaniem badań tomograficznych i mikroskopowych pozwalających na analizę zmian mikrostrukturalnych w procesie zmęczenia.
7. Opracowanie modelu nawierzchni uwzględniającego powstawanie pęknięć i wykorzystującego parametry opisujące propagację pęknięcia i własności materiałowe.

Dotychczasowa praktyka wskazuje, że w zakresie oceny trwałości zmęczeniowej MMA nie stosuje się jednoznacznych kryteriów powiązanych z mikro- i makropęknięciami. Ponadto w badaniach zmęczeniowych nie identyfikuje się miarodajnych parametrów związanych z mechaniką pęknięcia. Dlatego uzasadnione było opracowanie odpowiednich metod i kryteriów opisujących zjawiska pęknięcia w MMA.

Charakterystyka monografii

Monografia obejmuje obszerną tematykę dotyczącą zjawiska zmęczenia występującego w MMA. Jest wynikiem wieloletnich studiów i prac badawczych nad tym zjawiskiem. W związku z rozległą tematyką zmęczenia w pracy rozróżniłem osobno problematykę badawczą oraz zagadnienia związane z modelowaniem. Schemat i zakres pracy pokazałem na rysunku 1.



Rysunek 1. Schemat zakresu i problematyki poruszanej w pracy

Część badawcza obejmuje dynamiczne badania zmęczeniowe i statyczne badania zginania. Na ich podstawie dla wybranych mieszanek na warstwę ścierną, wiążącą oraz podbudowę możliwe było

wyznaczenie kryteriów zmęzeniowych (kryterium klasycznego $N_{E50\%}$, kryterium makropęknięcia N_c , kryterium energetyczne zmiany energii $N_{\Delta wN}$) oraz krytycznych parametrów pęknięcia (krytyczny współczynnik intensywności naprężenia K_C , krytyczna całka Rice'a J_C). Kryterium energetyczne powiązałem z kumulacją i rozwojem mikropęknięć. W zakresie makropęknięć wykonałem identyfikację ich inicjacji i rozwoju stosując metodę rejestracji obrazu. Na tej podstawie określiłem kryterium pojawienia się makropęknięć.

Odrębną tematykę stanowiły badania mikrostrukturalne związane z analizą wolnych przestrzeni. Wykorzystując pomiary tomograficzne oraz mikroskopowe przeprowadziłem rejestrację zmian wolnych przestrzeni w wybranej mieszance w trakcie zmęczenia. Analizując rozkład szkody zmęczeniowej w belce i wiążąc ją ze zmianą wolnych przestrzeni wskazałem na skuteczność zastosowanego kryterium energetycznego.

W części modelowej opisałem modele badania belki czteropunktowo podpartej 4BP (model ciągły i mikrostrukturalny), które zastosowałem m.in. do identyfikacji parametrów służących do opracowania równań kinetyki pęknięcia oraz określenia parametrów progowych (K_{th} , J_{th}). W części modelowej zaprezentowałem także model nawierzchni, uwzględniający zmienne warunki obciążenia i odpowiednie parametry materiałowe zależne od temperatury. Na podstawie wyznaczonego kryterium powstawania pęknięcia oraz równań kinetyki pęknięcia opartych na całce Rice'a J , wyznaczyłem trwałość nawierzchni ze względu na propagację pęknięć.

Pracę podzieliłem na 12 rozdziałów. W początkowej części pracy (rozdział drugi) dokonałem przeglądu stanu wiedzy na temat zmęczenia. Wskazałem na obszerną tematykę jaką jest zjawisko zmęczenia w nawierzchni drogowej. W przeglądzie metod badania zmęczenia MMA, opisałem istotny wpływ warunków badawczych na wyniki badań, w tym typu obciążenia. Na podstawie przeglądu różnych kryteriów stosowanych w ocenie zmęczenia MMA, stwierdziłem, że nie ma zgodności co do jednoznacznego punktu krytycznego, przy którym mieszanka ulega zniszczeniu. Ponadto scharakteryzowałem metody energetyczne pozwalające opisywać procesy mikrostrukturalne podczas zmęczenia. Stwierdziłem, że zbudowanie odpowiednich modeli wykorzystujących mechanikę pęknięcia powinno pomóc w opisie zjawisk zmęczeniowych zachodzących w MMA. Opisując problematykę zmęczenia w nawierzchni wskazałem m.in. na istotny problem rozkładu odkształceń oraz kontaktu opony z nawierzchnią. Przegląd dotychczasowego stanu wiedzy pozwolił sformułować cel pracy i zadania cząstkowe scharakteryzowane powyżej na wstępie autoreferatu.

W dalszej części pracy (rozdział czwarty), opisując różne rodzaje uszkodzeń występujących w nawierzchni drogowej skupiłem uwagę na spękaniach zmęczeniowych i wskazałem na ich powiązanie z innymi rodzajami spękań. Celem rozdziału było omówienie sposobów powstawania spękań oraz problematyki ich identyfikacji w nawierzchni. Pokazałem, że nie ma jednolitych metod opisu stanu spękań zmęczeniowych. Spośród wielu metod identyfikacji stanu nawierzchni, skuteczna jest dotychczas stosowana dynamiczna metoda pomiaru ugięć. Wskazałem, że wraz z procedurą identyfikacji modułów sztywności powinna być ona rozszerzona o dodatkowe parametry związane z rozpraszaniem energii podczas pęknięcia.

Rozdział piąty zawiera oryginalne, zmodyfikowane badania zmęczeniowe w czteropunktowym zginaniu belki w warunkach kontrolowanego odkształcenia. Analizy te przeprowadziłem w różnorodnym zakresie temperatur, obciążenia i składu. Uwzględniłem próbki z karbami i rejestrowałem dla nich przebieg pęknięcia. Stosowanie karbów w przypadku badania zmęczeniowego MMA jest niezbędne w celu wyznaczenia parametrów pęknięcia (współczynnika intensywności naprężenia K oraz całki J). Dotyczy to zarówno opisu stabilnej propagacji pęknięcia oraz parametrów krytycznych odpowiadającym odporności na pęknięcie przy niestabilnym wzroście pęknięcia. Karby pozwalają zamodelować nieciągłość materiałową, stwarzają dogodne warunki do skoncentrowania naprężeń w wierzchołku oraz pozwalają na kontrolowanie miejsca inicjacji pęknięcia.

Analizując zmiany odkształceniowe i energetyczne związane z procesami zmęczenia, zaproponowałem sposób określenia punktu kumulacji pęknięć na podstawie własnego współczynnika zmiany energii względem cykli zmęczeniowych. Stosując ten współczynnik mogłem określić moment krytycznego skumulowania się mikropęknięć oraz wyznaczyć granicę pomiędzy powstawaniem mikro- i makropęknięć. Stwierdziłem, że obszar graniczny uzależniony jest istotnie od wartości zadanego odkształcenia odpowiadającego odpowiednim przedziałom temperatury. Zmiana energii względem cykli pozwala dokładniej wskazać moment krytycznego skumulowania się mikropęknięć w próbce, w porównaniu do innych sposobów wyznaczenia punktu krytycznego. Współczynnik ten wykorzystałem do wyznaczenia kryterium zmiany energii.

Aktualnie stosowane klasyczne kryterium zmęczeniowe dotyczące zmiany modułu sztywności nie pozwala jednoznacznie wskazać momentu pojawienia się zmian strukturalnych, a głównie makropęknięcia w procesie zmęczenia mieszanek. Na podstawie badań stwierdziłem, że może być ono przydatne we wstępnym szacowaniu trwałości, głównie w zakresie temperatur od 0°C do 10°C. Także inne kryteria oparte na współczynnikach energetycznych (wg ASU i Hopmana) nie charakteryzują dobrze badanych mieszanek pod względem temperatury oraz długości karbu i mogą być trudne w wyznaczeniu. Dlatego zaistniała konieczność opracowania nowych kryteriów.

W ocenie trwałości zmęczeniowej MMA proponuję stosować kryterium zmiany energii. Obrazuje ono zmiany energetyczne w trakcie zmęczenia co jest powiązane ze zmianami w strukturze mieszanki (z cechami lepкими i sprężystymi). Kryterium to jest bardziej obiektywne niż kryterium klasyczne. Wg kryterium zmiany energii, w wyższych temperaturach (25°C) uzyskałem trwałości prawie dwukrotnie większe w stosunku do kryterium klasycznego. Natomiast w niższych temperaturach (-5°C), kryterium zmiany energii wskazuje na kumulację mikrouszkodzeń jeszcze przed spadkiem modułu do 50%. W tym przypadku trwałości względem kryterium klasycznego są około 1,5 razy mniejsze. Opis trwałości zmęczeniowej na drodze rozważań energetycznych jest skuteczny ze względu na specyfikę MMA.

Zaprezentowałem także drugie kryterium wyznaczone na podstawie obserwacji makropęknięcia. Kryterium pojawienia się makropęknięcia może być przydatne do oceny trwałości mieszanek dla skrajnych warunków, w których rozwija się makropęknięcia, a mikropęknięcia są ustabilizowane. Zapewnia ono trwałości kilkadziesiąt razy większe niż klasyczne kryterium. Jednak w skrajnych przypadkach, w niskich temperaturach (-5°C) i dla próbek o długich karbach (20 mm), trwałości te są

mniejsze, a pęknięcia pojawiają się jeszcze przed momentem, gdy moduł sztywności osiągnie zmianę 50% (podobnie jak dla kryterium zmiany energii).

W dalszej części rozdziału piątego przeanalizowałem zmianę składu mieszanki na warstwę ścieralną (AC11S), wiążącą (AC16W) i podbudowę (AC22P) na trwałość zmęczeniową. W przypadku zwiększenia zawartości asfaltu w zakresie od 4,0% do 5,3% trwałość zmęczeniowa zwiększa się od kilkunastu razy (dla -5°C) do kilkudziesięciu razy (dla 25°C). W przypadku wzrostu o 1% zawartości wolnych przestrzeni obniża się trwałość od kilku do kilkunastu razy. W zakresie badania trwałości dla wybranej mieszanki na warstwę ścieralną i podbudowę stwierdziłem większe trwałości mieszanek o drobniejszym uziarnieniu. Badanie zmęczeniowe jest przydatne przy doborze składu mieszanki, należy jednak zwrócić uwagę także na inne cechy i zapewnić właściwe zagęszczenie i odporność na deformacje.

Pod koniec rozdziału piątego porównałem wyznaczone zależności zmęczeniowe w badaniach laboratoryjnych z kryterium zmęczeniowym stosowanym w nawierzchni drogowej AASHTO 2004. Bez ich kalibracji występują około 10–cio krotne różnice w trwałościach. Większym błędem obarczone jest kryterium klasyczne. Zastosowałem do równań zmęczeniowych współczynniki przesunięcia, uzależnione od temperatury i zawartości asfaltu, które pozwoliły zminimalizować błąd wyznaczania odkształceń w kryteriach laboratoryjnych poniżej 5×10^{-6} . Wyznaczone zależności z zastosowaniem współczynników przesunięcia mogą być przydatne do szacowania trwałości w nawierzchni w zależności od zawartości asfaltu i temperatury.

Istotnym osiągnięciem pracy są charakterystyki zmęczeniowe z rozdzieleniem na część sprężystą i niesprężystą. Takie podejście dostarcza informacji, w jakich warunkach dany typ odkształcenia decyduje o zmęczeniu. Na tej podstawie określiłem charakter pęknięcia MMA: kruchy lub ciągliwy. Dla wyższych temperatur 10°C i 25°C dominuje zmiana energii niesprężystej. Stan pośredni występuje pomiędzy temperaturą 10°C a 25°C . Natomiast dla temperatury -5°C i 0°C energia dyssypowana na odkształcenia niesprężyste jest wyraźnie mniejsza od sprężystej. Dla tego zakresu wystarczające jest stosowanie modelu sprężystego i zasad liniowej mechaniki pęknięcia. W pozostałych przypadkach o charakterze ciągliwego pęknięcia należy stosować modele nieliniowe uwzględniające strefy odkształceń plastycznych i lepkich w wierzchołku szczeliny.

W rozdziale szóstym przeprowadziłem identyfikację parametrów reologicznych w warunkach dynamicznych. Wskazałem na istotny udział cech lepkich MMA i opracowałem zależności zmiany parametrów lepkosprężystego modelu Burgersa podczas zmęczenia. Na podstawie znanych histerez uzyskanych w badaniu zmęczeniowym oraz warunków zgodności kąta fazowego i modułu zespolonego pokazałem, jak można skutecznie wyznaczać parametry reologiczne modelu Burgersa. W zakresie stosowanych cykli, temperatur i obciążeń uzyskałem dobre zgodności pomiędzy badaniami i modelem, a maksymalny błąd identyfikacji nie przekraczał 4,5%. Na dokładność wyznaczania parametrów wpływa obecność karbu, temperatura i wartość obciążenia.

Dynamika zmian parametrów reologicznych odzwierciedla zmiany zmęczeniowe zachodzące w mieszanke. Te parametry nadają się, jednak lepiej do opisu zmian w całym zakresie temperatur niż sam

moduł sztywności. Stwierdziłem, że dobra korelacja zmiany parametrów reologicznych ze zmianą modułu sztywności w procesie zmęczenia jest zauważalna tylko w niskich temperaturach (poniżej 0°C) i dotyczy parametrów Burgersa E_1 , E_2 , η_1 . Stwierdziłem, że przy konstruowaniu modeli numerycznych dla temperatur dodatnich oraz przy dłuższych czasach obciążenia (poniżej 10 Hz) należy uwzględnić do opisu materiału właściwości lepkosprężyste.

Wyznaczone parametry reologiczne uwzględniłem w modelach numerycznych opisanych w rozdziale siódmym. Przeprowadziłem w nim analizy naprężeń i odkształceń w belkach z karbami i bez karbów. Wykorzystując metodę elementów skończonych (MES) opisałem algorytm do wyznaczenia parametrów pęknięcia: współczynnika K oraz całki J .

Rozdział ósmy opisuje metody rejestracji makropęknięć, na podstawie których wyznaczyłem parametry K i J dla różnych warunków, a następnie kinetykę pęknięcia MMA. Dla zróżnicowanych warunków obciążenia i temperatury pokazałem, że badanie zmęczeniowe z rejestracją makropęknięcia jest przydatne w wyznaczeniu prędkości propagacji pęknięcia w MMA. Dla niskich wartości temperatur (-5°C i 0°C) wystarczy zastosować niskie poziomy obciążenia ($\Delta\varepsilon = 130 \times 10^{-6}$) by zainicjować pęknięcie. Dla wyższych temperatur (25°C) wymagany jest nawet 10–cio krotnie wyższy poziom obciążenia, aby rozwijało się pęknięcie. Moment pojawienia się makropęknięcia dla małych poziomów obciążenia ($\Delta\varepsilon < 300 \times 10^{-6}$) odpowiada zmianie modułu sztywności w zakresie od 26% do 44%. Natomiast dla wysokich poziomów obciążenia pojawia się jeszcze przed spadkiem modułu do 50%.

Rozdział dziewiąty przedstawia procedurę badawczą wykorzystującą badania tomograficzne X-Ray i mikroskopowe. Przeprowadziłem je w celu analizy zmian strukturalnych zachodzących w badaniu zmęczenia. Powiązałem je ze szkodą zmęczeniową, zmianą modułu sztywności i parametrami reologicznymi. Metoda pomiaru wolnych przestrzeni w MMA z wykorzystaniem badań tomograficznych jest skuteczna w ocenie mikrospekna. Istnieje pewna korelacja (dla analizowanych temperatur 0°C i 10°C) między zmianą wolnych przestrzeni i zmianą modułu sztywności, jednak lepsza jest ona dla wybranych parametrów reologicznych (E_2 , η_1 , η_2). Wyznaczona szkoda zmęczeniowa w modelu numerycznym belki z zastosowaniem parametrów reologicznych oraz kryterium energetycznego dobrze koreluje ze zmianą wolnych przestrzeni. Powiększające się pustki powietrzne stanowią potencjalne koncentratory naprężeń sprzyjające kumulacji mikrospekna. Proces zmian wolnych przestrzeni podczas zmęczenia nie jest liniowy względem cykli i największe zróżnicowanie zachodzi, gdy moduł sztywności zmienia się od 65% do 50%. W tym etapie zwiększa się liczebność większych wolnych przestrzeni o objętości powyżej 6,0 mm³. Nie dochodzi jednak do inicjacji nowych mikropęknięć, które odpowiadają tworzeniu się dodatkowych wolnych przestrzeni o małych objętościach (0,5 – 5,0 mm³), lecz rozwijają się lub łączą już istniejące, większe mikropęknięcia. Można uznać, że badania tomograficzne są skuteczne w monitoringu zmian strukturalnych mieszanek w wyniku zmęczenia i powinny być rozwijane. Przeprowadziłem także powierzchniowe badania mikroskopowe. Jednak ta metoda pomiarowa daje mniej dokładne wyniki i gorzej rozróżnia mieszanki ze względu na temperaturę i długość karbu. Pomiary mikrostruktury MMA w trakcie badań zmęczeniowych powinny stanowić dalszy etap prac i mogą być przydatne do opracowania kryteriów zmęczeniowych z wykorzystaniem zmian zawartości wolnych przestrzeni.

W dalszym etapie analiz mikrostrukturalnych wykorzystując numeryczny model mikrostrukturalny oraz MES wyznaczyłem parametry progowe stosowane w mechanice pękania: współczynnik K_{th} i całkę J_{th} . Natomiast w rozdziale dziesiątym w badaniu zginania czteropunktowego wyznaczyłem parametry krytyczne: współczynnik K_C i całkę J_C . Te parametry pozwoliły uzupełnić opracowaną zależność prędkości pękania oparte na współczynniku intensywności naprężenia K oraz całce J .

Charakterystyka propagacji pęknięć z wykorzystaniem współczynnika K istotnie zależy od poziomu zadanego odkształcenia międzyszczytowego, natomiast opis propagacji z wykorzystaniem całki J jest bardziej niezależny od obciążenia. Równania z wykorzystaniem całki J stanowią lepszą charakterystykę zmęczenia materiałową i nadają się do opisu mieszanek w zakresie pękania w warunkach nieliniowosprężystych i plastycznych, tj. w zakresie temperatur dodatnich.

Kolejny rozdział, jedenasty, dotyczy pękania zachodzącego w nawierzchniach drogowych. Zwróciłem uwagę, że istotnym elementem w analizie propagacji pękania jest sposób przekazywania obciążenia na nawierzchnię. W celu przeprowadzenia skutecznych metod modelowania zachowania się nawierzchni w warunkach zmęczeniowych zastosowałem w modelu oddziaływanie dynamiczne, oddziaływanie kontaktowe opony z nawierzchnią, równania opisujące prędkość pękania oraz kryteria wyznaczające punkty krytyczne pojawiania się makropęknięć. Stwierdziłem, że w zakresie stosowania temperatur dodatnich i częstotliwości poniżej 10 Hz celowe jest stosowanie modelowania z uwzględnieniem parametrów reologicznych.

Zaprezentowałem przydatność opracowanego modelu zmęczeniowego w mechanistycznym projektowaniu nawierzchni z występowaniem zjawiska pękania. W różnych wariantach modelu nawierzchni ze szczeliną, przeprowadziłem analizy numeryczne MES z uwzględnieniem różnej szczepności, grubości warstw i warunków temperaturowych. Kryteria zmęczeniowe, parametry pękania oraz wyznaczone równania propagacji pozwoliły zamodelować rozwój mikropęknięć i makropęknięć w nawierzchni. Przeanalizowałem wartości odkształceń i naprężeń pojawiających się w różnych miejscach warstw nawierzchni. Istotnymi miejscami w nawierzchni ze względu na zmęczenie są dolne obszary warstw asfaltowych oraz przy krawędzi obciążenia, które są związane z pęknięciami „z góry do dołu”. Te pęknięcia w początkowym etapie inicjacji i rozwoju uwarunkowane są zjawiskami rozciągania. W dalszym etapie decydujący jest proces propagacji pękania w wyniku ścinania. Na podstawie obliczeń numerycznych stwierdziłem, że pęknięcie na krawędziach strefy obciążenia intensywniej zachodzi w grubszych warstwach asfaltowych.

Pracę kończą wnioski podsumowujące analizy teoretyczne i badawcze. We wnioskach pracy wskazałem także dalszy zakres prac badawczych nawiązujący do potrzeby analiz procesów samoleczenia (*healing*), odpoczynku (*rest*), zamykania się pęknięć oraz wewnętrznych efektów termicznych zachodzących w procesie zmęczenia.

Podsumowanie monografii

Głównym osiągnięciem i wkładem w dyscyplinę budownictwo prezentowanej monografii, jest opracowanie metody identyfikacji parametrów związanych z mechaniką pękania na poziomie mikrostrukturalnym oraz w zakresie propagacji makropęknięć zachodzących w mieszankach mineralno-asfaltowych.

Monografia stanowiąca osiągnięcie naukowe zawiera oryginalne równania kinetyki pękania oraz charakterystyki zmęczeniowe stanowiące istotny praktyczny aspekt pracy. Na ich podstawie można lepiej dobrać skład mieszanek ze względu na zmęczenie oraz prognozować rozwój i propagację mikro- i makropęknięć w nawierzchni drogowej. Aktualne doświadczalne badania zmęczeniowe MMA wydają się bardzo obiecujące i należy je dalej rozwijać. Dzięki procedurom badawczym, które opracowałem możliwa była rejestracja prędkości rozwoju i propagacji pęknięć w różnych warunkach temperaturowych i obciążeniowych. Stosując metodę czteropunktowego zginania w warunkach kontrolowanego odkształcenia pokazałem na przykładzie wybranych mieszanek z zastosowaniem próbek karbami, że jest możliwa identyfikacja procesów zmęczeniowych. W celu wyznaczenia prędkości wzrostu pęknięć zmęczeniowych należy badanie zmodyfikować stosując zróżnicowane warunki badawcze. Proponuję prowadzić badania zmęczeniowe w schemacie czteropunktowym na próbkach z karbami (5 mm – 20 mm) w zakresie temperatur ujemnych i dodatnich (od -5°C do 25°C).

Do identyfikacji rozwoju makropęknięć należy stosować metodę rejestracji obrazu, a do wyznaczania dla nich równań propagacji podejście energetyczne z wykorzystaniem całki J , które jest obiecujące dla materiałów wykazujących cechy niesprężyste, a do nich należą MMA. Do opisu etapu stabilnej propagacji, parametry pękania można wyznaczać numerycznie lub na podstawie histerez uzyskanych w badaniu. W celu uzupełnienia metodyki w analizie zmęczeniowej, powinno się wyznaczać parametry odporności na pęknięcie. Służy temu statyczne badanie zginania na próbkach z przynajmniej dwoma długościami karbów (np. 10 mm i 20 mm).

Proponuję w opisach modelowych dla temperatur dodatnich uwzględniać parametry reologiczne, które dobrze odzwierciedlają zmiany strukturalne i energetyczne zachodzące w mieszankach w trakcie zmęczenia i są możliwe do zidentyfikowania w badaniach zmęczeniowych. W zakresie identyfikacji zmian mikrostrukturalnych oraz oceny trwałości mieszanek uważam, że należy stosować kryterium zmiany energii.

W zakresie analiz mikrostrukturalnych oryginalnym wkładem w pracy jest zastosowanie unikalnych metod pomiarowych z wykorzystaniem tomografii komputerowej oraz mikroskopii. Pokazałem, że możliwa jest ocena procesów zmęczeniowych na podstawie zmian wolnych przestrzeni w MMA. Te badania dostarczają istotnych informacji o momencie i warunkach kiedy dochodzi do rozwoju mikrospękań w mieszance. W celu pozyskania miarodajnych pomiarów wymagane jest wykorzystanie minimum trzech próbek z różnych etapów zmęczenia oraz z różnych temperatur. Należy także analizować skrajne obszary zginane w belce oraz zmiany różnych zakresów objętościowych wolnych przestrzeni.

Choć mechanizm pęknięcia MMA jest procesem złożonym, w pracy udało się przeprowadzić odpowiednie modelowanie procesów zachodzący zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i w nawierzchni drogowej. Stwierdziłem, że pęknięcie uwarunkowane jest zależnymi od temperatury i obciążenia cechami reologicznymi charakteryzującymi materiały asfaltowe. Nowością było uwzględnienie w opisie modelowym zmiany parametrów reologicznych w trakcie zmęczenia uzyskanych na podstawie histerez zmęczeniowych.

Pokazałem, że zaprezentowany w pracy model numeryczny badania czteropunktowego (także na poziomie mikrostrukturalnym) wykorzystujący MES jest przydatny do wyznaczania parametrów pęknięcia oraz do opracowania równań kinetyki propagacji dla MMA. Z kolei opracowany autorski model nawierzchni drogowej nadaje się do przewidywania trwałości zmęczeniowej w zakresie mikro- i makropęknięć. Jest to możliwe na podstawie znajomości równań kinetyki oraz kryteriów zmęczeniowych uzyskiwanych w testach laboratoryjnych. Pokazałem, że model nawierzchni uwzględniający obciążenie dynamiczne oraz właściwy sposób przekazywania obciążenia na nawierzchnię, umożliwia przeprowadzenie prognozy rozwoju pęknięć „z góry do dołu”, które dotychczas nie były szczegółowo rozpatrywane. Dodatkowo model pozwala uwzględnić wpływ szczepności, grubości warstw asfaltowych i prędkości obciążenia także na inicjację i rozwój pęknięć „z dołu do góry”.

Zastosowana w pracy metodologia jest przydatna do projektowania MMA z defektami strukturalnymi wpływającymi na pęknięcie mieszanek. Zaproponowane analizy i wyniki powinny przyczynić się do rozwoju zagadnień zmęczeniowych dotyczących nawierzchni drogowych i MMA. Opracowane w monografii modele, kryteria i algorytmy mogą być przydatne przy prognozowaniu pęknięć zachodzących w nawierzchniach drogowych zawierających MMA, co w konsekwencji może zwiększyć niezawodność konstrukcji.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych (artystycznych)

5.1. Aktywność naukowa

Pozostałą aktywność naukową omawiam w dalszej części autoreferatu powołując się na publikacje z wykazu opublikowanych prac naukowych – załącznik 3. Wyróżniam następujące grupy tematyczne:

- *Badania i modelowanie zjawisk reologicznych zachodzących w mieszankach mineralno-asfaltowych oraz w nawierzchni drogowej*
- *Badania i modelowanie numeryczne betonowej nawierzchni drogowej z uwzględnieniem obciążeń statycznych i dynamicznych*
- *Badania i modelowanie numeryczne betonowej nawierzchni drogowej z uwzględnieniem oddziaływania temperatury*
- *Badania i modelowanie zjawisk zachodzących w podłożu gruntowym pod nawierzchnią drogową*
- *Wpływ obciążenia na nośność nawierzchni drogowej*
- *Wpływ obciążenia na zmęczenie mieszank mineralno-asfaltowych*
- *Zagadnienia związane z infrastrukturą transportu zbiorowego, modelowaniem i optymalizacją w sieciach transportowych*

Badania i modelowanie zjawisk reologicznych zachodzących w mieszankach mineralno-asfaltowych oraz w nawierzchni drogowej

Problematyką dotyczącą reologii w mieszankach mineralno-asfaltowych (MMA) zainteresowałem się przed uzyskaniem stopnia doktora nauk technicznych [L19]. Tą tematykę następnie rozwijałem, a zwięźczeniem prac badawczych i rozważań naukowych była rozprawa doktorska: „Wpływ właściwości reologicznych mieszank mineralno - asfaltowych na deformacje nawierzchni drogowych”. Raporty Inst. Inż. Łąd. PWroc. 2001 Ser. PRE nr 1. (25.04.2001) Politechnika Wrocławska, Instytut Inżynierii Łądowej, Wrocław, której promotorem był Prof. dr hab. inż. Antoni Szydło. Najważniejszym dokonaniem pracy było opracowanie modelu badania MMA w urządzeniu zwanym koleinomierzem oraz identyfikacja parametrów reologicznych.

Model zbudowałem wykorzystując algorytmy metody elementów skończonych (MES) [E24], [L17]. Właściwości MMA w tym modelu opisałem parametrami reologicznymi charakterystycznymi dla liniowych modeli lepkosprężystych: Maxwella, Zenera oraz Bürgersa. Identyfikację parametrów reologicznych przeprowadziłem w badaniu pełzania przy ściskaniu dla trzeciego cyklu obciążenia [L16], [L13]. Wykazałem, że najmniejszy błąd aproksymacji przy określaniu parametrów uzyskuje się dla modelu Bürgersa, a największy dla modelu Zenera. Wykorzystując opracowany model i zidentyfikowane parametry reologiczne zaprognozowałem, głębokości kolein, które następnie porównałem z wartościami głębokości kolein otrzymanymi podczas badania w koleinomierzu [E28], [L15], [L12], [L11]. Ostatecznie stwierdziłem, że modele Bürgersa i Maxwella dają dobre zgodności obliczeń z wynikami badań w koleinomierzu [E25], [L14]. Stwierdziłem, że do celów praktycznych, ze względu na małą liczbę parametrów, możliwe jest stosowanie modelu Maxwella.

Szczególną uwagę zwróciłem na fakt, że skuteczność prognozowania kolein jest dobra, gdy parametry reologiczne określa się w trzecim cyklu obciążenia w zakresie temperatury do 50°C pod obciążeniem od 0.1 MPa do 0.5 MPa. Ustaliłem także, że czas obciążenia 1400 s w badaniu pełzania jest miarodajny do określania parametrów. Dla tego czasu obserwuje się pełzanie ustalone, które koreluje z ustalonym koleinowaniem. W dalszym etapie prac opracowałem zależności empiryczne głębokości koleiny w funkcji składu mieszanek i liczby cykli obciążenia [A7]. Analiza wyników badań pozwoliła określić decydujące parametry reologiczne mieszanek oraz czynniki wpływające na powstawanie kolein (temperatura, czas i wartość obciążenia). Wykorzystując parametry reologiczne opracowałem model lepkosprężysty nawierzchni, za pomocą którego prognozowałem głębokości kolein w różnych warunkach klimatycznych i okresach eksploatacji [A6].

Badania i modelowanie numeryczne betonowej nawierzchni drogowej z uwzględnieniem obciążeń statycznych i dynamicznych

W zakresie mechaniki pracy nawierzchni drogowych zajmowałem się analizą stanu naprężeń w zależności od warunków obciążenia [L22]. W dalszym etapie rozwoju naukowego zainteresowałem się aplikacjami komputerowymi służącymi do obliczeń numerycznych głównie MES [L20], które następnie stosowałem w modelach nawierzchni. Szczególną uwagę poświęciłem nawierzchniom betonowym zajmując się najpierw zagadnieniami technologicznymi i wymaganiami stawianym nawierzchniom betonowym dla niskich kategorii ruchu [E26], [E14], a następnie nawierzchniami dla innych kategorii. Znaczny udział badawczy i naukowy miałem w etapowym opracowaniu „Katalogu typowych konstrukcji nawierzchni sztywnych” [B1], [E8], [E6]. Wcześniej w tym zakresie, wraz ze współautorami, prowadziłem prace dotyczące różnych rozwiązań katalogowych [B10] oraz nowych technologii wykonywania nawierzchni betonowych, dostosowania konstrukcji katalogowych do zwiększonego obciążenia ruchem [B7]. W dalszym etapie wykorzystując zaawansowane modele numeryczne nawierzchni i oddziaływanie temperatury brałem udział w określaniu trwałości zmęczeniowej dla nawierzchni betonowych [B5]. Zajmowałem się szczegółowymi zagadnieniami technologicznymi dotyczącymi m.in. szczelin dylatacyjnych [B22], [B21] oraz uszkodzeń powstających w konstrukcji w wyniku różnych oddziaływań zewnętrznych. W publikacji [L7] wraz ze współautorami opisałem klasyczne technologie stosowane przy wzmacnianiu nawierzchni oraz nową skuteczną metodę wykorzystującą warstwę SAMI, zapobiegającą spękanom odbitym.

Istotną aktywność naukową poświęciłem zagadnieniu koncentracji naprężeń w betonie wokół dybli stalowych stosowanych w nawierzchni betonowej [A2]. Szczeliny poprzeczne w nawierzchniach betonowych stanowią istotne miejsce, w których dochodzi do najczęstszych uszkodzeń konstrukcji dyblowanych. Szczególnym miejscem jest obszar betonu wokół dybli. Koncentracja naprężeń w tych obszarach jest najczęstszą przyczyną uszkodzeń szczelin i ograniczenia współpracy płyt betonowych. Na potrzeby niniejszej tematyki opracowałem specjalny model numeryczny uwzględniający współpracę dybla z betonem w postaci elementów kontaktowych GAP. Wykorzystując ten model przeprowadziłem analizę rozkładu naprężeń wokół dybla. Wskazałem na niebezpieczne naprężenia rozciągające i ściskające. Z wykorzystaniem MES wykonałem obliczenia dla różnych średnic, rozstawów i długości dybli w nawierzchni. Wykazałem skuteczność modelowania trójwymiarowego w ocenie współpracy pomiędzy dyblem i betonem. W analizach stosowałem typowe obciążenie nawierzchni drogowej

odpowiadające obciążeniu stosowanemu w badaniu dynamicznym FWD (*falling weight deflectometer*). To badanie wykorzystałem do weryfikacji opracowanego modelu dla wybranej nawierzchni betonowej autostrady w Polsce. Na podstawie analiz określiłem praktyczne zależności funkcyjne pozwalające określać wartości maksymalnych naprężeń w betonie wokół dybla od zmiennych parametrów dybli.

Potwierdzeniem tych analiz były badania laboratoryjne, które przeprowadziłem we współpracy z Andreą Zuzulovą (Department of Transport Construction and Traffic (FCE) Bratislava) (zał. 4 [F1]). W zakresie badań dokonałem pomiarów odkształceń w charakterystycznych miejscach wokół dybli, a następnie analizy naprężeń kontaktowych oraz weryfikacji numerycznych z wykorzystaniem MES. Przeanalizowałem różne poziomy obciążenia oraz średnice dybli. Wyniki wskazały, że symulacja z wykorzystaniem modelu liniowo-sprężystego jest skuteczna w obliczaniu naprężeń i zgodna z badaniami dla wybranych przedziałów obciążenia. Podczas analiz zwróciłem uwagę nie tylko na naprężenia ściskające pod dyblem, ale także na naprężenia rozciągające, których koncentracja i wysokie wartości mogą być przyczyną rozwoju pęknięć w betonie. Stwierdziłem, że dla dybli o małych średnicach zniszczenie pod wpływem dużego obciążenia następuje w postaci przekroczenia dopuszczalnego przemieszczenia dybla, natomiast dla dybli o dużych średnicach następuje destrukcja w betonie na skutek przekroczenia dopuszczalnych naprężeń rozciągających. Przedstawione analizy dla różnych poziomów obciążenia mogą być przydatne przy doborze rozstawów i średnic dybli w nawierzchni. Z tego zakresu opracowana jest publikacja i przygotowywana do druku.

Zjawiska mechaniczne zachodzące wokół dybli mają wpływ na zagadnienia technologiczne w wykonywaniu i utrzymywaniu szczelin w nawierzchni betonowych. Znajomość rozkładu naprężenia stykowego między dyblem i betonem mają istotne znaczenie dla poprawy skuteczności przenoszenia obciążenia LTE (*load transfer efficiency*). Tą tematykę rozwinąłem w pracy [A1]. W tej publikacji wskazałem, że przenoszenie obciążenia pomiędzy sąsiednimi płytami betonowymi w szczelinach poprzecznych zależy jest od różnych parametrów dybli. Przeanalizowałem wpływ różnych średnic i rozstawów dybli na współpracę płyt. Aktualnie nie ma nowych metod pozwalających na odpowiedni dobór dybli zapewniających współpracę płyt. Zaprezentowałem oryginalne podejście z zastosowaniem 3DMES. Weryfikację modelu wykonałem dla badań dynamicznych FWD na wybranych nawierzchniach. Zaprezentowałem obszerny zakres obliczeń i wyznaczyłem zależności skoncentrowanych naprężeń wokół dybli od różnych parametrów dybli oraz skuteczności przenoszenia obciążenia. Pokazałem jak stosowanie dybli o małych średnicach może powodować wzrost koncentracji naprężeń ściskających oraz ograniczoną współpracę (poniżej 80%). Opracowana autorska zależność funkcyjna umożliwia wyznaczenie naprężeń w betonie pod dyblem w zależności od jego średnicy i skuteczność przenoszenia obciążenia.

Badania i modelowanie numeryczne betonowej nawierzchni drogowej z uwzględnieniem oddziaływania temperatury

Niewątpliwie znaczącym przedmiotem moich badań było zagadnienie oddziaływania temperatury na nawierzchnię betonową. W pracy [E18] przeanalizowałem wpływ klimatu na zjawiska związane z odkształcaniem się płyt betonowych. Podałem zmiany gradientu temperatury w płytach betonowych dla warunków krajowych w oparciu o dane meteorologiczne i własne pomiary rozkładu temperatur w

nawierzchniach betonowych. Wykorzystując MES przeprowadziłem obliczenia naprężeń termicznych w zależności od wymiarów płyt w planie i grubości. W efekcie przeprowadzonych studiów stwierdziłem, że maksymalne naprężenia w płytach betonowych w polskich warunkach klimatycznych dla jednakowego gradientu temperatury (niezależnego od grubości płyty) w płytach o długościach większych od 5 m nie zależą od grubości i praktycznie oscylują wokół wartości 1 MPa. Natomiast w płytach, dla których uzależnia się gradient od grubości, naprężenia termiczne w płytach grubszych są większe od naprężeń w płytach cieńszych, ale dla długości większych od 3,5 m. Wartości takich naprężeń również oscylują wokół wartości 1 MPa. Zaletą płyt grubych jest to, że mniej się odkształcają w płaszczyźnie pionowej i w związku z tym mniejsze w nich powstają naprężenia od obciążeń. Tematykę tą zreferowałem na konferencji [L5].

Zagadnienia zachowania się płyty betonowej pod wpływem temperatury zostały rozszerzone o oddziaływanie jej na podbudowę i podłoże. W związku z rozszerzalnością termiczną oraz nierównomiernym oddziaływaniem temperatury, płyta betonowa odkształca się w ciągu doby wywołując deformacje w warstwach niżej leżących. Dodatkowo w zależności od różnych typów warstw i podłoża, na którym spoczywa powstają w niej zróżnicowane naprężenia, które powinny być uwzględniane w wymiarowaniu nawierzchni. W Polsce z uwagi na częste, zmienne cyrkulacje powietrza nawierzchnie betonowe poddawane są cyklicznym oraz zróżnicowanym oddziaływaniom termicznym w ciągu roku i doby. W artykule [E12] przeanalizowałem wpływ różnych typów podbudów i podłoża na stan przemieszczeń i naprężeń w wybranym układzie warstwowym. Obliczenia numeryczne przeprowadziłem w zależności od zmiennej temperatury dobowej z wykorzystaniem MES. Z obliczeń wynika, że na skutek dobowych zmian termicznych, w obszarze szczelin poprzecznych w podbudowie mogą pojawić się skumulowane przemieszczenia pionowe oraz naprężenia rozciągające prowadzące do uszkodzenia podbudowy. Wykazałem, że stosowanie sztywnych podbudów prowadzi do powstawania większych naprężeń rozciągających w płycie niż dla podbudów podatnych. Natomiast w podbudowach podatnych o małym module sztywności i dodatkowo o małej grubości będą pojawiać się skumulowane przemieszczenia. Ponadto pokazałem wpływ zmiany wartości modułów i podłoża na wartości termicznych naprężeń rozciągających w płycie betonowej. Przeprowadzone analizy mogą być pomocne przy projektowaniu nowych nawierzchni betonowych jak również ocenie nośności nawierzchni istniejących spoczywających na różnorodnych podłożach.

Mimo iż w niniejszym artykule uwzględniłem sprężyste parametry materiałowe, analiza obciążenia termicznego przyjęta dla wybranego dnia lipca, pozwoliła wskazać słabe punkty konstrukcji nawierzchni jakie mogą pojawić się zarówno przy oddziaływaniu ujemnej i dodatniej różnicy temperatur między górną i dolną powierzchnią płyty. Wspólnie ze współautorem w dalszych opracowaniach zostaną przeprowadzone analizy numeryczne z uwzględnieniem cech lepkosprężystych oraz plastycznych w wybranych podbudowach.

Tematykę oddziaływania zmiennego klimatu rozwinąłem w kolejnej publikacji [A8], która aktualnie jest po recenzjach. W tym artykule uwzględniłem zróżnicowane warunki klimatyczne występujące w Polsce związane ze zmiennymi cyrkulacjami powietrza w ciągu roku i doby. Pokazałem zależność wahań dobowych temperatury od różnicy temperatur występujących w płycie betonowej oraz przedstawiłem analizę naprężeń termicznych w płytach betonowych w zależności od ich długości oraz zmiennej

różnicy temperatur odpowiadającej odpowiednim porom roku. Wykorzystując szczegółowy model 3DMES dokonałem obliczeń numerycznych. Wynika z nich, że w przypadku płyt długich, powyżej 5 m oraz dodatkowo różnicy temperatury charakterystycznej dla lata (10°C) powstają naprężenia ok. 1 MPa. W przypadku oddziaływań incydentalnych (20°C) naprężenia dla płyt dłuższych od 5 m mogą wynieść ponad 1.5 MPa. Porównałem także wartości naprężeń dla dwóch grubości płyty 25 cm i 30 cm. Stwierdziłem, że w płycie o grubości 25 cm i długości mniejszej niż 4.5 m powstają większe naprężenia niż w płycie grubości 30 cm o około 5 %. W niniejszym modelu uwzględniłem także odpowiednie właściwości współpracy między płytą i podłożem uwzględniając tarcie płyty z podłożem.

Oryginalną i dość szczegółową analizę przeprowadziłem w publikacji [A3]. Tutaj uwagę skupiłem na naprężeniach wokół dybli wywołanych odkształcalnością płyty betonowej pod wpływem temperatury. Dzienna zmiana temperatury powoduje znaczne cykliczne odkształcenia w płycie co ma swoje niekorzystne odzwierciedlenie w szczelinach dyblowanych. W tym artykule, analizowałem naprężenia termiczne w zależności do różnych średnic dybli oraz gradientów termicznych. Analizy prowadziłem przy użyciu MES. Wyniki obliczeń wykazały, że stosowanie dybli o małej średnicy powoduje zwiększenie naprężeń w betonie. Szczególnie szkodliwa jest koncentracja naprężeń rozciągających w betonie na dwóch stronach dybli. Naprężenia te mogą przekraczać wartości dopuszczalne w przypadku przypadkowych silnych gradientów termicznych. Dodatkowo mogą być one zwiększone w wyniku oddziaływania obciążeń od pojazdów. Uzyskane wyniki w tej publikacji mogą być pomocne w projektowaniu nowych nawierzchni betonowych i oceny trwałości istniejących w krajach o dużych amplitudach temperatury jakie mają miejsce w Europie Środkowej.

Badania i modelowanie zjawisk zachodzących w podłożu gruntowym pod nawierzchnią drogową

Kolejną tematyką jaką zajmuję się w trakcie mojej kariery naukowej jest badanie zjawisk zachodzących w podbudowie i podłożu gruntowym pod wpływem obciążenia statycznego i dynamicznego. W publikacji [E15] przeprowadziłem analizy numeryczne z wykorzystaniem MES w celu oceny wpływu wzmocnienia podłoża na trwałość nawierzchni drogowej. Do obliczeń wybrałem nawierzchnię miejsc postojowych przeznaczoną dla ruchu pojazdów ciężarowych. Właściwości materiałowe podłoża gruntowego opisałem modelami sprężystymi i sprężysto-plastycznymi. Następnie przeprowadziłem ocenę trwałości nawierzchni wykorzystując wybrane kryteria deformacji podłoża gruntowego, analizując wartości odkształceń strukturalnych. Stwierdziłem istotny wpływ grubości wybranego wzmocnienia (stabilizacji) na trwałość oraz znaczną różnorodność wyników w zależności od zastosowanego kryterium. Przeprowadzone obliczenia wskazują, że wyliczone z kryteriów wartości osi obliczeniowych odzwierciedlających trwałość nawierzchni mogą różnie klasyfikować konstrukcje w zależności od kategorii ruchu. Wzmocnienia jakie uwzględniłem klasyfikują analizowaną konstrukcję do kategorii KR1 (dla grupy nośności G2 i G3) oraz do KR2 (w przypadku wzmocnienia podłoża G4). Największe rozbieżności zauważyłem przy stosowaniu kryterium Francuskiego i Shell'a, natomiast najmniejsze dla kryterium Instytutu Asfaltowego i Uniwersytetu w Nottingham. Zarówno model sprężysty podłoża jaki sprężysto-plastyczny podobnie klasyfikuje analizowane konstrukcje pod względem kategorii ruchu. Jednak dla najslabszego podłoża zarejestrowałem znaczny udział odkształceń plastycznych, dlatego też stwierdziłem, że przy trudniejszych i zróżnicowanych warunkach gruntowych na głębokości (zmienny stopień zagęszczenia, stopień plastyczności, wilgotność itd.) oraz przy

szczegółowych analizach należy uwzględniać charakter „nieliniowy” podłoża stosując model sprężysto-plastyczny, który uwzględnia dodatkowe parametry gruntu.

W dalszym etapie rozwoju naukowego w zakresie tej tematyki, zainteresowałem się analizą kumulacji obciążeń powtarzalnych z uwzględnieniem trwałych odkształceń plastycznych i lepkich. W powszechnie stosowanych metodach oceny nośności podłoża, przy użyciu lekkiej płyty dynamicznej (LPD), zakłada się liniowo-sprężyste zachowanie materiału. Przy identyfikacji parametrów podłoża brane są pod uwagę wyłącznie początkowe cykle obciążenia. Nie uwzględnia się zmiany parametrów materiału pod wpływem cyklicznych obciążeń. Celem publikacji [E10] było przeprowadzenie cyklicznych pomiarów przemieszczeń podłoża za pomocą LPD i skonfrontowanie uzyskanych wyników z identyfikacją numeryczną modułów warstw. Pokazałem zmienność identyfikowanych parametrów warstw podłoża w zależności od liczby cykli obciążeń w badaniu LPD. Do identyfikacji parametrów podłoża zastosowałem 3DMES. Przeprowadzone pomiary wskazują na ograniczenia i błędy w powszechnie stosowanej procedurze identyfikacji parametrów podłoża z użyciem LPD, polegającej na niewłaściwym przyjmowaniu przemieszczeń pionowych (ugięć) zarejestrowanych w 4., 5. i 6. cyklu obciążenia jako podstawy identyfikacji parametrów (modułów) podłoża w obliczeniach odwrotnych. W przypadku warstwy kruszywa łamanego na podłożu rodzimym różnica między modułami równoważnymi takiego układu, identyfikowanymi na podstawie 4., 5. i 6. cyklu oraz 30. cyklu obciążenia wynosi około 30 %, co skutkuje przynajmniej dwukrotnym niedoszacowaniem trwałości zmęczeniowej. W przypadku podłoża nieulepszono różnice te wynoszą od 20 % do 60 % w zależności od wartości obciążenia. W przypadku warstwy stabilizacji cementowej na podłożu rodzimym (z uwagi na bardzo dużą sztywność samej stabilizacji) obserwuje się mniejsze zmiany modułu równoważnego. Na tej podstawie sformułowałem wniosek, że podłoże wzmocnione kruszywem stabilizowanym cementem w większym stopniu realizuje założenia modelu liniowo-sprężystego, natomiast dla innych typów wzmocnienia kolejne cykle istotnie wpływają na moduł równoważny i powinny być opisywane modelami plastycznymi i lepkimi. Te cechy materiałowe uwydatniłem w pracy [E9] analizując wpływ czasu obciążenia i odciążenia w badaniu VSS na rejestrowane przemieszczenia pionowe oraz szacowaną nośność badanego podłoża. W obliczeniach uwzględniłem lepko-plastyczną składową przemieszczeń, a następnie wykazałem istotne różnice w wynikach przemieszczeń i wartościach modułów pierwotnych oraz wtórnych w zależności od czasu badania.

Opracowany model 3D, wykorzystujący MES, zweryfikowałem w rzeczywistych badaniach terenowych. Przeprowadzone analizy wskazują na ograniczenia powszechnie stosowanej procedury identyfikacji parametrów podłoża w badaniu VSS. Pokazałem jak istotnym parametrem podczas badania podłoża, zwłaszcza o ograniczonej nośności, jest odstęp czasu pomiędzy poszczególnymi stopniami obciążenia i odciążenia. Wskazuję, że przy bardzo słabym podłożu dowolnie długi czas oczekiwania może nie zapewnić ustabilizowania się osiadań. Zatem zastosowanie „nieliniowego” modelu, uwzględniającego dodatkowo cechy plastyczne oraz pełzanie materiału w takich warunkach jest uzasadnione, a wyznaczone w takich warunkach moduły odkształcenia nie są miarodajne, jak jest to powszechnie przyjęte, przy ocenie sprężystych cech materiału. Dodatkowo nie mogą być utożsamiane z modułem sprężystości podłużnej Younga, będącym jednym z parametrów w stosowanych liniowo-sprężystych modelach konstrukcji nawierzchni.

Tematykę badania VSS wraz ze współautorami rozwinąłem w kolejnej publikacji z tego cyklu [E7]. Na podstawie pomiarów terenowych zwróciłem uwagę na istotny wpływ zastosowanego ciężaru i rodzaju przeciwwagi stosowanej w tym badaniu na wartości wtórnych modułów odkształcenia. Dodatkowo, na podstawie obliczeń numerycznych w założonym wstępnie ośrodku sprężystym, przeanalizowałem czasy przemieszeń, pozwalające wyjaśnić przyczynę tych różnic. Rozróżniłem trzy różne układy warstwowe podbudowy oraz podłoża nawierzchni. Pokazałem różnicę w wartościach modułów wtórnych wyznaczonych w badaniu VSS przy zastosowaniu jako przeciwwagi typowego pojazdu ciężarowego oraz łyżki koparki. Analiza kształtu czasz przemieszczeń na różnych układach warstwowych, w dwóch przypadkach obciążenia, wyjaśniła mechanizm nakładania się czasz przemieszczeń, który wpływa na zawyżanie uzyskiwanych wyników modułów warstw podczas badania VSS z wykorzystaniem pojazdu ciężarowego. Różnice między modułami wyznaczonymi w badaniach przy użyciu koparki i pojazdu ciężarowego rosną wraz ze sztywnością badanego układu warstw i wahają się od 14% na podłożu do 54% na sztywnej konstrukcji z warstwą stabilizacji cementowej. Różnica ta wpływa niekorzystnie na ocenę nośności konstrukcji nawierzchni. Sugeruje się ażeby w badaniach in situ koła pojazdu jako przeciwwagi były zlokalizowane od płyty w odległości ok. 1,20 m w przypadku badania podłoża, a dla kruszywa na podłożu w odległości min. 1,5 m, natomiast dla układów o dużej sztywności min. 2,2 m. Niewątpliwie pewniejszym sposobem na uzyskanie poprawnych wyników jest stosowanie jako przeciwwagi łyżki koparki.

Aktualnie w zakresie tej tematyki przygotowałem wspólnie ze współautorami kolejny artykuł (aktualnie wysyłany do czasopisma), który dotyczy wpływu ciężaru przeciwwagi (pojazdu) oraz czasu obciążenia na identyfikowane parametry w badaniu płytą statyczną, ze względu na zachodzące zjawiska lepkoplastyczne. Przeprowadziłem rozszerzone badania, polegające na rejestracji przemieszczeń pionowych przy trzech cyklach obciążenia i odciążenia płyty statycznej. Przy wykorzystaniu modelu Druckera-Pragera oraz Klasycznego Prawa Pełzania Baileya-Nortona wykazałem różnicę w wartościach wtórnych modułów odkształcenia wyznaczonych, w zależności od warunków obciążenia w badaniu VSS. Dalsze prace dotyczą analizy wpływu grubości warstw na identyfikowane parametry w badaniu VSS i LPD.

Wpływ obciążenia na nośność nawierzchni drogowej

Pierwsze zainteresowanie nośnością konstrukcji drogowej wykazałem przed doktoratem. We współautorskiej pracy [L18] analizowałem problemy pojawiające się przy ocenie nośności oraz wymiarowaniu wzmocnień konstrukcji nawierzchni na podstawie zarejestrowanych pomiarów przemieszczeń w badaniach dynamicznych. Przeprowadzone studia wykazały, że pomiar przemieszczeń (maksymalnych) w jednym punkcie nie pozwala na jednoznaczną ocenę nośności konstrukcji nawierzchni. Pomiar tzw. „czaszy przemieszczeń” umożliwia pełną identyfikację modułów warstw i podłoża a tym samym możliwe jest określenie nośności wyrażonej dopuszczalną liczbą obciążeń. Tematykę obciążeń dynamicznych z wykorzystaniem FWD rozwinąłem wraz ze współautorami w cyklu publikacji związanych z projektem badawczym Innowacyjna Gospodarka [J3]. Opracowałem kilka raportów oraz publikacje [L8], [L6], [L4], [E4] dla zadania: „Diagnostyka nawierzchni drogowych i lotniskowych z wykorzystaniem zaawansowanych badań dynamicznych”. Jego głównym celem było opracowanie metody identyfikacji parametrów modeli nawierzchni drogowych i lotniskowych z wykorzystaniem ugięciomierza dynamicznego FWD. Pomiar przemieszczeń pionowych konstrukcji

nawierzchni za pomocą ugięciomierza FWD jest aktualnie najefektywniejszym badaniem z grupy badań nieniszczących. We współczesnej praktyce nie jest jednak zwykle uwzględniany jego dynamiczny charakter obciążenia. Obciążenia wywierane przez FWD mają krótkotrwały charakter dynamiczny (udarowy) a rejestrowane przemieszczenia nawierzchni są wynikiem działań tych obciążeń. Stosowanymi najczęściej modelami nawierzchni są natomiast modele statyczne w postaci warstwowych półprzestrzeni sprężystych. Identyfikacji podlegają więc parametry modelu statycznego (moduły) na podstawie przemieszczeń uzyskanych pod obciążeniem dynamicznym (w postaci impulsu siłowego), co powoduje niewątpliwy konflikt metodologiczny. Dlatego też wspólnie ze współautorami opracowano algorytm przejścia (transformacji) z testu dynamicznego na test statyczny w taki sposób aby możliwe było zastosowanie przemieszczeń rejestrowanych w teście dynamicznym do identyfikacji parametrów w modelach statycznych, jakimi są stosowane obecnie wielowarstwowe półprzestrzenie sprężyste. Przeprowadzono serię badań FWD na istniejących nawierzchniach drogowych (zarówno podatnych, jak i sztywnych) o zróżnicowanych konstrukcjach.

Końcowy etap prac tego projektu istotnie wzbogacił stan obecnej wiedzy w temacie pomiarów dynamicznych i modeli nawierzchni drogowych i lotniskowych. Za najważniejsze osiągnięcie realizowanego projektu uznać można opracowanie współczynników korygujących, dla typowych konstrukcji nawierzchni, pozwalających na stosowanie pomiarów dynamicznych do identyfikacji parametrów statycznych modeli konstrukcji nawierzchni (poprzez transformację ugięć nawierzchni uzyskanych w pomiarach dynamicznych na ich quasi-statyczny odpowiednik). Wykazano również, że w przypadku stosowania pomiarów dynamicznych, przyjęcie modeli uwarstwionych półprzestrzeni sprężystych jest jak najbardziej zasadne, z uwagi na krótki impuls obciążenia – występuje liniowa zależność między przemieszczeniem i obciążeniem, a zjawiska lepko-plastyczne (trwałe odkształcenia), inaczej niż w przypadku pomiarów statycznych, praktycznie nie występują.

W dalszym etapie aktywności w tym temacie zajmowałem się bezpośrednim oddziaływaniem koła pojazdu na nawierzchnię. Znaczny rozwój wiedzy osiągnąłem przy współautorskim opracowaniu etapowym dla zadania: „Sprawdzenie możliwości ważenia pojazdów w ruchu przy użyciu pracujących na sieci wag firmy PAT” [F55], [F57]. Na wybranych miejscach pomiarowych wykorzystując pojazdy testowe, przeprowadziłem analizy dotyczące dokładności pomiarów wag dla różnych nacisków i prędkości. W celu odpowiedniej obróbki danych brałem udział w opracowaniu oprogramowania zbierającego i archiwizującego wyniki pomiarów oraz wspomagającego analizę statystyczną uzyskanych danych. Aplikacja *TruckStatistic* wykorzystującą bazę danych *SQLExpress* pracowała pod kontrolą systemu. Opracowana baza danych pozwalała na gromadzenie danych takich jak: data i czas pomiaru oraz dokonywała automatycznej klasyfikacji pojazdów z uwzględnieniem masy całkowitej pojazdów, nacisków osi (osi pojedynczych, grupy osi, osi składowych w grupie), rozstawów poszczególnych osi oraz prędkości pojazdów. Możliwa była również prezentacja graficzna widm (rozkładów nacisków osi) dla różnych okresów pomiarowych (i dla różnych typów osi). Po przeprowadzeniu serii pomiarów stwierdziłem, że w oparciu o wyniki pomiarów uzyskane przy pomocy wag firmy PAT pracujących na sieci dróg możliwe jest precyzyjne określenie agresywności ruchu w Polsce. Zamknięciem tych badań jest publikacja [E23], w której stwierdzono, że współczynniki przeliczeniowe wyznaczone w manualnych pomiarach poszczególnych sylwetek danej kategorii, bez analizy występujących obciążeń, mogą zaniżać stopień szkodliwego oddziaływania przejeżdżających

pojazdów na nawierzchnie drogowe. Najbardziej widoczne jest to w grupie samochodów ciężarowych bez przyczep dwuosiowych. Końcowe wnioski wskazują na to, że aby móc określić współczynniki przeliczeniowe grup pojazdów na osie obliczeniowe (standardowe) w możliwie dokładny sposób, konieczne jest instalowanie wag pomiarowych na innych reprezentatywnych drogach i zbieranie danych dla całego kraju, co w konsekwencji pozwoli dokładniej wyznaczać trwałości nawierzchni.

Wpływ obciążenia na zmęczenie mieszanek mineralno-asfaltowych

W temacie zmęczenia MMA opracowałem najpierw publikację [E21]. Dotyczyła ona badań laboratoryjnych, w których można dobrze zasymulować zjawisko zmęczenia. Przedstawiłem model propagacji spękań na podstawie badania zmęczeniowego w warunkach kontrolowanego obciążenia dla belki czteropunktowo zginanej (4BP). Model badania z wykorzystaniem MES pozwolił zweryfikować warunki zachowania się MMA oraz dokonać oceny stanu naprężeń i odkształceń w wierzchołku szczeliny. W badaniach wykorzystałem próbki z karbem. Takie założenie pozwoliło wstępnie zasymulować problem propagacji spękań zmęczeniowych występujących w nawierzchni drogowej. Tematyka zmęczenia została uzupełniona w publikacji [A4] o szerszy zakres badań, co w konsekwencji pozwoliło określić kryterium zmęczeniowe z wykorzystaniem „spękanej” belki w badaniu zmęczeniowym i porównać go z kryterium Instytutu Asfaltowego oraz Shella.

Zaprezentowany program badań stanowił cenną bazę informacji i dobry punkt wyjścia w szerszej ocenie trwałości zmęczeniowej spękanych MMA. Wyniki badań wyraźnie pokazały wpływ szczeliny na spadek wartości modułu sztywności. W przypadku dłuższych pęknięć ma on przebieg nieliniowy. Zaprezentowane kryterium zmęczeniowe z wykorzystaniem belki 4BP ze szczeliną może być przydatne w ocenie trwałości zmęczeniowej spękanej warstwy nawierzchni drogowej. Lepszą korelację laboratoryjnego kryterium zmęczeniowego uzyskałem z kryterium Shella. Stwierdziłem także, że model numeryczny zawierający karb jest obiecujący przy dalszych analizach w innych warunkach temperatury i składu.

Niniejsza tematyka stała się moją główną aktywnością naukową i w nawiązaniu do niej opracowałem wcześniej zaprezentowaną monografię. Aktualnie nadal rozszerzam wiedzę z tej dziedziny. W pracy [E2] rozwinąłem zagadnienia związane z reologią i zmęczeniem przedstawiając procedurę identyfikacji lepkosprężystych cech materiałowych uzależnionych od temperatury oraz warunków obciążenia. Analizie poddałem statyczne badanie pełzania oraz dynamiczne badanie zmęczeniowe (o częstotliwości 10 Hz) oparte na schemacie 4BP. Na podstawie tych badań oraz identyfikacji określiłem parametry lepkosprężyste modelu Burgersa. Uzyskałem dla obu badań podobną zmienność parametrów od temperatury, jednak różne wartości bezwzględne. Wykazałem, że parametry są uzależnione istotnie od czasu trwania obciążenia i temperatury. Stwierdziłem, że dla badań statycznych o długotrwałym obciążeniu parametry należy określać z krzywych pełzania, natomiast dla badań dynamicznych z histerezy. W dalszych publikacjach planuję pokazać weryfikujące przykłady obliczeń z wykorzystaniem MES dla obu badań z uwzględnieniem modelu Burgersa.

Zagadnienia związane z infrastrukturą transportu zbiorowego, modelowaniem i optymalizacją w sieciach transportowych

Prezentowana tematyka odbiega co prawda od moich głównych zainteresowań, ale poświęciłem jej również aktywność naukową, zajmując się głównie analizami numerycznymi, elementami modelowania i pomiarami. W pierwszej publikacji z tego tematu [L21] zwróciłem uwagę na jeden z najistotniejszych problemów jakim jest parkowanie w śródmieściu miasta. Przedstawiłem różne sposoby programowania miejsc postojowych m.in. wykorzystujące stopień zaspokojenia potrzeb związanych z dostępnością oraz komfort osób dojeżdżających. Zaprezentowałem różne wskaźniki (pośrednie i bezpośrednie) pozwalające wyznaczać potrzeby parkingowe. We wnioskach sformułowałem zasady wymagane przy konstruowaniu metody określania zapotrzebowania na parkingi. W kolejnej współautorskiej publikacji [A5] zajmowałem się badaniem ruchu pieszych. Swoją uwagę skupiłem na obliczeniach modeli strat czasu pieszych dochodzących do przejścia. Ze współautorami założyłem, że proces dojścia pieszego do przejścia, ma istotny wpływ na straty czasu pieszych przy przejściu przez jezdnię wyposażonym w sygnalizację. Moim znacznym udziałem były pomiary rejestrujące straty czasu, a następnie obliczenia modelowe. Z porównań obliczeń uzyskano zgodności. Wykazano użyteczność nowych modeli na tle dotychczas stosowanych, nie sprawdzających się we wszystkich warunkach.

W publikacjach [E17] i [E16] zajmowałem się kształtowaniem i optymalizacją infrastruktury w powiązaniu z dostępnością terenową. Zaprezentowałem konkretne rozwiązania na dwóch rozległych obszarach Aglomeracji Sudeckiej oraz Dolnośląskiego Zachodniego Obszaru Integracji analizując powiązania kolejowe. Szczegółowe studia demograficzne i gospodarcze obszarów pozwoliły opracować moim zdaniem skuteczne rozwiązania zapewniające integrację badanych obszarów. Kierowałem się wykorzystaniem w jak największym stopniu istniejącej sieci, uwzględniłem potrzeby demograficzne oraz powiązania transgeniczne. Pomocny w tym zakresie był odpowiedni przegląd literatury, w którym nawiązałem do uwarunkowań społecznych, ekonomicznych oraz strategii rozwoju.

W związku z tym, że aktualnie wiele światowych aglomeracji miejskich boryka się z problemami transportowymi, a także miasto, w którym mieszkam, w publikacjach [E20], [E13], [L3] zaprezentowałem niekonwencjonalny środek transportu zbiorowego – kolej linową. Przeprowadziłem szerokie studia literaturowe w tym temacie i odniosłem się do istniejącej kolei linowej funkcjonującej w kampusie Politechniki Wrocławskiej. Omówiłem klasyfikację, historię oraz przyszłe strategie rozwoju w kraju i na świecie. Na przykładzie kolei we Wrocławiu pokazałem możliwości rozwoju transportu publicznego w dużych miastach. Zwróciłem uwagę na jej parametry techniczne oraz etapy powstawania. Od momentu jej powstania wraz z zespołem z Zakładu Dróg i Lotnisk prowadzę badania ruchu. Pierwsze obliczenia wskazały na istotne zmiany ruchowe w analizowanym obszarze. Wyznaczono ich powiązanie z wielkością podróży i parkowania w zależności od różnych okresów eksploatacji kolei [L2]. Dalsze prace będą związane z opracowaniem modelu ruchu dla badanego obszaru.

Podsumowanie

Aktywność naukowa w zakresie zaprezentowanych grup tematycznych jest dość rozległa. Moje zainteresowania naukowe i główne prace badawcze skupiają się na rozwiązywaniu problemów z

zastosowaniem nowoczesnych technik modelowania numerycznego. W obliczeniach wykorzystuję MES i uwzględniam zróżnicowany charakter obciążenia (statyczny i dynamiczny). Analizy przeprowadzam zarówno dla różnych typów nawierzchni drogowych, jak i jej poszczególnych elementów uwzględniając odpowiednie modelowanie materiałowe i wpływy termiczne. Aktualnie rozwijam technikę modelowania mikrostrukturalnego wykorzystującego elementy reologii i mechaniki pękania. Wkład w rozwój dziedziny budownictwo polega na opracowywaniu modeli, identyfikacji parametrów materiałów drogowych i nawierzchni oraz weryfikacji badawczej.

W zakresie osiągnięć naukowych zrealizowałem: 37 publikacji (1 monografia, 7 artykułów JCR, 29 artykułów w czasopiśmie recenzowanych (w tym 1 rozdział w książce, 1 książka); 22 publikacje i udział w konferencjach. Szczegółowe zestawienie publikacji znajduje się w załączniku 3, natomiast w punkcie 7 autoreferatu (załącznik 2a) zestawienie parametryczne. Liczba prac jednoautorskich z bazy JCR wynosi 4, w pozostałych czasopiśmie recenzowanych zrealizowałem 8 jednoautorskich publikacji naukowych.

5.2. Aktywność dotycząca zrealizowanych osiągnięć projektowych, konstrukcyjnych i technologicznych, prac badawczych, ekspertyz, projektów badawczych

Opracowania dotyczące niniejszej aktywności zostały wyszczególnione w załączniku 3 w punktach: B, C, F, J. Na uwagę zasługują zadania etapowe, które dotyczyły rozległej tematyki i dużego zaangażowania wszystkich współautorów. Mój udział w tych pracach został zaprezentowany w załączniku 3. W niektórych przypadkach mój wkład ogranicza się do jednego lub kilku rozdziałów raportu, w innych jest to trudna do wydzielenia część rozłożona w całym opracowaniu.

Jeden z tematów dotyczył prac nad aktualizacją katalogu typowych konstrukcji nawierzchni sztywnych, dla GDDKiA wykonanych w latach: 2011 – 2014 [B10], [B7], [B5]. Najpierw na podstawie przeprowadzonych studiów literaturowych oraz innych rozwiązań katalogowych przeanalizowano charakterystyki różnych typów nawierzchni, w tym wybranych szczegółów technologicznych. W dalszym etapie wykonano m.in. analizy obliczeniowe z uwzględnieniem agresywności i oddziaływania obciążenia na nawierzchnię betonową oraz wpływów klimatycznych występujące w kraju. Efektem końcowym było opracowanie docelowej wersji katalogowej konstrukcji nawierzchni sztywnych [B1].

Kolejną aktywność wykazałem w opracowaniu etapowym dotyczącym zabezpieczenia skarpy drogowej w ciągu zachodniej obwodnicy miasta Legnicy w latach 2010 – 2011 [B19], [B18], [B14]. W zakresie tego opracowania przeprowadzono szczegółową inwentaryzację stanu istniejącego, która wskazała na problemy stateczności związanej ze złym odwodnieniem. Opracowano projekt sytuacyjno-wysokościowy ze szczegółami konstrukcyjnymi elementów wzmocnienia i odwodnienia.

Duży udział o charakterze projektowym miałem w etapowych pracach projektowych branży drogowej dla wybranych inwestycji Politechniki Wrocławskiej. Do nich należą: parking przy budynku D2 (2004), [B34], rozbudowa terenu i budynku H - 3 (2009, 2011), [B26], [B13], Kompleks Dydaktyczny - Zintegrowane Centrum Studenckie C13 (2004-2008), [B31], [B27], parking przy budynku C7 (2009-

2010), [B25], kolejka linowa nad Odrą, PFU (2013-2014), [F33], projekt (2004-2011), [B4], wizualizacja [F21]. Efektem końcowym prac było zrealizowanie koncepcji, projektów budowlanych lub wykonawczych dla prezentowanych inwestycji. Do niektórych opracowań wykonano szczegółowe pomiary nośności i badania ruchu.

Oryginalne opracowanie konstrukcyjne wraz ze współautorami dotyczyło projektu technicznego wrocławskiej płyty drogowej dla MPWiK, przeznaczonej do zastosowania w robotach wykopowych w ciągu dróg i ulic. Jej zadaniem było przykrycie wykopów i przeniesienie ruchu drogowego na etapie remontu. Przedmiotową płytę opracowano tak, aby zapewniała odpowiednie warunki bezpieczeństwa ruchu samochodowego bez ograniczeń, a więc również pojazdów ciężkich. Opracowano wstępnie różne koncepcje konstrukcyjne [B9], a w dalszym etapie po wykonaniu prototypu przeprowadzono badania laboratoryjne i terenowe [B8]. Efektem końcowym było ostateczne ukształtowanie projektu płyty w różnych schematach segmentowych [B6]. Projekt zgłoszony do Urzędu Patentowego RP, 2012 – 2015 [C1]. W nawiązaniu do projektu oraz wdrożenia rozwiązania na ulicach Wrocławia opracowano kilka publikacji [E11], [E3], [E1] i zrealizowano wystąpienie konferencyjne [L1].

Inne opracowania, w których brałem udział związane są z projektowaniem nawierzchni betonowych dyblowanych [B22], [B21] oraz o ciągłym zbrojeniu [B20]. W ich zakresie wykonywałem opracowania graficzne i obliczeniowe wybranych elementów konstrukcji nawierzchni betonowej. Natomiast analizą trwałości nawierzchni asfaltowych zajmowałem się wraz ze współautorami w opracowaniu etapowym (2013-2015) dla autostrady A2 [F9], [F6], [F3], autostrady A4 [F10], [F5], [F2] oraz drogi ekspresowej S3 [F11], [F7], [F4].

Aktywność badawczo-projektową z elementami modelowania sieci transportowych wykazałem w opracowaniu etapowym dotyczącym studiów ruchowych dla miasta Radomia w latach 2008-2009. Zrealizowano kilka raportów: obejmujących m.in. szczegółowe pomiary i inwentaryzację elementów transportu publicznego miasta [F43], [F42], opracowanie modelu ruchu dla różnych wariantów przebudowanej sieci [F38] oraz konkretnych rozwiązań projektowych dla wybranych skrzyżowań i ulic miasta [F37].

Warto wyróżnić jeszcze prace nad obszernymi analizami ruchowymi dla wybranych planowanych inwestycji Wrocławia (2008-2009), [F45] - [F51], [F41], [F40]. Dla nich przeprowadzono szczegółowe pomiary ruchu oraz wykonano modelowanie ruchu w różnych horyzontach czasowych wskazując na stopień zyskowności danej inwestycji.

Inne opracowania wymienione w załączniku 3 (pozycje [B] oraz [F]) obejmują prace projektowe infrastruktury branży drogowej (w tym projekty budowlane, wykonawcze, projekty organizacji ruchu (docelowego, zastępczego), kosztorysy, specyfikacje techniczne, pomiary), opinie, analizy i prace badawcze dotyczące oceny nośności nawierzchni, wizualizacje i animacje komputerowe oraz aplikacje i programy komputerowe inwestycji drogowych, a także badania laboratoryjne i terenowe oraz analizy przejezdności. Sumaryczna liczba wszystkich opracowań z zakresu osiągnięć projektowych, konstrukcyjnych, badawczych ([B] i [F]) wynosi 137.

Dotychczas brałem udział w jednym badawczym programie europejskim EUREKA 2004-2006, „Doskonalenie jakości eksploatacyjnej infrastruktury transportu lotniczego”, (zał. 4 [A1]) oraz w jednym zakończonym badawczym projekcie krajowym Innowacyjna Gospodarka 2010-2014 (zał. 3 [J3]). W tym projekcie uczestniczyłem w opracowaniu kilka raportów oraz publikacji zał. 3: [L8], [L6], [L4], [E4] dla zadania: „Diagnostyka nawierzchni drogowych i lotniskowych z wykorzystaniem zaawansowanych badań dynamicznych”. Aktualnie uczestniczę (od 2016) w dwóch projektach krajowych Rozwój Innowacji Drogowych dotyczących ochrony przed hałasem drogowym (zał. 3 [J1]) oraz wykorzystania materiałów pochodzących z recyklingu (zał. 3 [J2]). Powiązane jest to z udziałem w konsorcjach badawczych zaprezentowanych w załączniku 4 [E1]-[E3]. Kierowałem jednym projektem realizowanymi we współpracy z naukowcem z Department of Transport Construction and Traffic (FCE) Bratislava w latach 2013-2014 dotyczącym badań betonowych nawierzchni dyblowanych (zał. 4 [F1]).

6. Informacje o osiągnięciach dydaktycznych, współpracy naukowej, odbytych stażach krajowych lub zagranicznych i działalności popularyzującej naukę

Jako pracownik naukowo-dydaktyczny na wydziale Budownictwa Lądowego i wodnego Politechniki Wrocławskiej realizuję zajęcia dydaktyczne: Drogi, ulice, węzły, Drogi i ulice-podstawy, Drogi szybkiego ruchu, Drogi technologiczne, Infrastruktura. drogowa na terenach zurbanizowanych., Teoria wymiarowania nawierzchni drogowych, Komputerowe wspomaganie projektowania dróg, Lotniska, Seminarium dyplomowe. Zakres godzin dydaktycznych znacząco przekracza wymagane pensum dydaktyczne (corocznie średnio ponad 180%), liczba wypromowanych dyplomantów inżynierskich i magisterskich sięga 200.

W dalszej części charakteryzuję wybrane informacje, które zebrałem w załączniku 4. Udzielałem się w 8 konferencjach krajowych [C1]-[C8] przy ich organizowaniu, zbieraniu i recenzowaniu referatów, raz byłem członkiem-sekretarzem. Uzyskałem 19 nagród i wyróżnień [D1]-[D9] oraz Medal Brązowy Prezydenta RP. Pełnię od 2010 roku funkcję sekretarza w czasopiśmie Przegląd Komunikacyjny (wyd. SITK-RP, na liście B MNiSW – 8 p.) [G1]. Jestem lub byłem członkiem 5 krajowych organizacji naukowych [H1]-[H5]. Pragnę wyróżnić mój udział w zakresie popularyzacji nauki na Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej, głównie na Festiwalu Nauki [I2], targach [I6], ponadto udział w konkursach [I4], [I7] oraz warsztatach i wykładach z zakresu drogownictwa [I1], [I3], [I5]. Udzielałem się także w innych pracach dla macierzystego wydziału i uczelni w zakresie dydaktyki i organizacji co zaprezentowałem w załączniku 4 pozycje [Q].

Sprawuję od 2016 roku opiekę naukową nad doktorantem na Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej jako promotor pomocniczy [K1]. Odbyłem trzy praktyki, staże w zakresie budownictwa drogowego [L1]-[L3]. Jestem członkiem trzech zespołów eksperckich lub konkursowych (PWr, SITK-RP, NCBiR) [N1]-[N3]. Dla Narodowego Centrum Badań i Rozwoju, od 2012, recenzowałem 17 wniosków i projektów z zakresu budownictwa i infrastruktury transportowej [O1]. Udzielałem się jako recenzent w czterech czasopismach: Studia Geotechnica et Mechanica [P1], Drogownictwo [P2], Roads and Bridges - Drogi i Mosty [P3], Przegląd Komunikacyjny [P4] oraz pięciu konferencjach międzynarodowych [Q2]-[Q7]. Do tego czasu recenzowałem 29 artykułów w czasopismach i 19 na konferencjach międzynarodowych.

7. Parametryczne podsumowanie dorobku naukowego

Parametryczne zestawienie dorobku naukowego oraz prac badawczych opracowałem wg zestawienia w załączniku 3 i zestawilem w tabeli 1.

Tabela 1. Parametryczne zestawienie całkowitego dorobku (wg załącznika 3)

Rodzaj osiągnięcia	Oznaczenie zgodnie z załącznikiem 3	Liczba
Monografie habilitacyjne		1
Publikacje naukowe w bazie JCR	[A]	7+1
Pozostałe publikacje naukowe w czasopismach recenzowanych	[E]	29
Osiągnięcia projektowe, konstrukcyjne i technologiczne	[B]	36
Zgłoszenia patentowe	[C]	1
Prace badawcze, ekspertyzy	[F]	101
Udział w projektach krajowych	[J]	3
Publikacje i udział w konferencjach	[L]	22
Liczba publikacji o zasięgu krajowym wg bazy Dona PWr	-	38
Liczba publikacji o zasięgu międzynarodowym wg bazy Dona PWr	-	13
Książki (poradnik), rozdziały w książkach	-	2
Liczba prac ogółem [A]+[E]+[B]+[C]+[F]+[J]+[L]		200
Liczba punktów wg listy MNiSW oraz kryteriów oceny jednostek naukowych (dla monografii, rozdz. książki i zgłoszenia patentowego)		150 (JCR) + 167 = 317
Sumaryczny Impact Factor	[G]	6,273
Liczba cytowań wg bazy Web of Science	[H]	23
Indeks Hirscha według bazy Web of Science	[I]	3
Liczba cytowań wg bazy Scopus		44
Indeks Hirscha według bazy Scopus		3
Liczba cytowań wg bazy Google Scholar		88
Indeks Hirscha według bazy Google Scholar		5

Liczba prac zrealizowanych przed doktoratem wynosi:

- publikacje naukowe w czasopismach międzynarodowych lub krajowych [E]: 1,
- prace badawcze, ekspertyzy [F]: 21,
- publikacje i udział w konferencjach [L]: 5.

8. Podsumowanie dorobku dydaktycznego i popularyzatorskiego

Dorobek dydaktyczny oraz popularyzatorski ująłem w tabeli 2. Opracowałem go na podstawie zestawienia w załączniku 4.

Tabela 2. Zestawienie dorobku dydaktycznego i popularyzatorskiego (wg załącznika 4)

Rodzaj osiągnięcia	Oznaczenie zgodnie z załącznikiem 4	Liczba
Udział w projektach europejskich	[A]	1
Udział w komitetach organizacyjnych konferencji	[C]	8
Otrzymane nagrody i wyróżnienia (w tym Rektora PWr - 11)	[D]	19
Udział w konsorcjach i sieciach badawczych	[E]	3
Kierowanie projektami we współpracy z innymi naukowcami	[F]	1
Udział w komitetach naukowych czasopism	[G]	1
Członkostwo w organizacjach oraz towarzystwach naukowych	[H]	5
Osiągnięcia dydaktyczne i w zakresie popularyzacji nauki	[I]	8
Opieka naukowa nad studentami	[J]	2
Opieka naukowa nad doktorantami (promotor pomocniczy)	[K]	1
Stáže krajowe	[L]	3
Wykonane ekspertyzy lub inne opracowania na zamówienie	[M]	13
Udział w zespołach eksperckich i konkursowych	[N]	3
Recenzowanie projektów krajowych (dla NCBiR)	[O]	17
Recenzowanie publikacji w czasopismach	[P]	29
Recenzowanie publikacji na konferencjach zagranicznych	[Q]	19

