

Na prawach rękopisu

Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
Politechniki Wrocławskiej

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

**Raport serii PRE nr 6 /2022
Praca doktorska**

mgr inż. Eryk Mączka

Słowa kluczowe:

mieszanka mineralno-asfaltowa,
zmęczenie,
regeneracja,
oddziaływania środowiskowe

Promotor: dr hab. inż. Piotr Mackiewicz – profesor uczelni
Promotor pomocniczy: dr inż. Bartłomiej Krawczyk

Autor:

mgr inż. Eryk Mączka
tel. 691-459-362
email: eryk.maczka@pwr.edu.pl

Politechnika Wrocławska
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
Katedra Dróg Mostów Kolei i Lotnisk (K77)
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
tel. 71 320 23 45 tel./fax. 71 320 36 45

Raport został złożony w Redakcji Wydawnictw Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej w 05.2022 r.

Lista odbiorców:

Recenzenci	2 egz.
Promotor	1 egz.
Promotor pomocniczy	1 egz.
Autor	1 egz.
Biblioteka Główna Politechniki Wrocławskiej	1 egz.
Archiwum W-2	1 egz.

Razem 7 egz.

SPIS TREŚCI:

1.	Wstęp	5
2.	Teza rozprawy	7
3.	Cel i zakres rozprawy	7
4.	Przegląd stanu wiedzy	9
4.1.	Ogólne informacje o MMA.....	9
4.1.1.	Charakterystyka ogólna	9
4.1.2.	Cechy reologiczne MMA.....	10
4.1.3.	Uszkodzenia warstw bitumicznych.....	14
4.2.	Metody projektowania i technologie produkcji	17
4.3.	Trwałość zmęczeniowa MMA	25
4.3.1.	Obciążenie laboratoryjne w badaniach zmęczeniowych	29
4.3.2.	Charakterystyka testów zmęczeniowych	34
4.3.3.	Analiza procesu zmęczeniowego MMA	36
4.3.4.	Kryteria zmęczeniowe.....	39
4.3.5.	Czynniki wpływające na trwałość zmęczeniową.....	40
4.3.6.	Uszkodzenia indukowane zmęczeniem i niską temperaturą.....	43
4.4.	Zjawisko regeneracji (healing).....	46
4.4.1.	Temperatura w nawierzchni drogowej.....	51
4.4.2.	Badania nad regeneracją MMA	53
4.5.	Podsumowanie obecnego stanu wiedzy	66
5.	Część eksperymentalno-doświadczalna	67
5.1.	Projekt mieszanki typu beton asfaltowy AC 22.....	71
5.1.1.	Zastosowane materiały.....	71
5.1.2.	Recepta robocza	74
5.1.3.	Założenia technologiczne.....	85
5.2.	Badania bloku podstawowego	91
5.2.1.	Zawartość wolnych przestrzeni.....	93
5.2.2.	Odporność na wodę i mróz	101
5.2.3.	Odporność na deformacje trwałe	108
5.2.4.	Podsumowanie badań bloku podstawowego	124
5.3.	Badania bloku zaawansowanego	128
5.3.1.	Aparatura badawcza.....	130
5.3.2.	Założenia badawcze	131
5.3.2.1.	Ogólne warunki badania modułu sztywności i trwałości zmęczeniowej.....	134
5.3.2.2.	Czynnik środowiskowy – woda i mróz.....	135
5.3.2.3.	Czynnik chemiczny – roztwór soli drogowej	137
5.3.3.	Analizy modułu sztywności mieszanek A - D	142
5.3.4.	Analiza trwałości zmęczeniowej mieszanek A – D	153
5.3.5.	Eksperymentalne pomiary temperatury	167
5.3.6.	Analiza regeneracji i wpływu na trwałość zmęczeniową mieszanek A - D	176
5.3.6.1.	Założenia badawcze dotyczące zjawiska regeneracji	176
5.3.6.2.	Sposób oceny zdolności mieszanek do regeneracji	178
5.3.6.3.	Analiza wpływu okresu odpoczynku i podgrzania na zmiany modułu sztywności i trwałość zmęczeniową.	180
5.3.6.4.	Analiza regeneracji mieszanek A - D z uwzględnieniem oddziaływania wody i mrozu oraz soli drogowej.....	186
5.3.6.5.	Analizy wykresów zmian modułu sztywności od liczby cykli.....	198

5.3.7.	Sposoby uwzględnienia analizowanych czynników zewnętrznych w trwałości zmęczeniowej materiału	208
5.3.7.1.	Kontrolne badania autorskich formuł obliczeniowych stanu skumulowanego ...	221
5.3.8.	Podsumowanie badań bloku zaawansowanego	225
6.	Regeneracja w kryterium zmęczeniowym konstrukcji nawierzchni	237
6.1.	Porównanie dwóch podatnych konstrukcji typu B na ruch KR 5	240
6.2.	Trwałość zmęczeniowa konstrukcji nawierzchni z uwzględnieniem regeneracji i innych zmiennych	251
6.2.1.	Uwzględnienie oddziaływań środowiskowych oraz regeneracji w kryterium na przykładzie wybranej konstrukcji	254
6.2.2.	Zmiany trwałości konstrukcji katalogowych wywołane kumulacją oddziaływań, regeneracją i uwzględnionym rodzajem lepiszcza	262
6.3.	Podsumowanie rozważań związanych z konstrukcją nawierzchni	266
7.	Podsumowanie i wnioski końcowe.....	269
8.	Kierunek rozwoju	282
9.	Podziękowania	282
10.	Literatura	283
	Streszczenie	296
	Summary.....	299

WYKAZ SKRÓTÓW i OZNACZEŃ NAJCZĘŚCIEJ STOSOWANYCH w ROZPRAWIE:

MMA	-	mieszanka mineralno-asfaltowa
4-PB	-	belka czteropunktowo zginana
E^*	-	moduł sztywności [MPa]
φ	-	kąt przesunięcia fazowego [°]
MM	-	mieszanka mineralna
KR	-	Kategoria Ruchu
HMA	-	technologia na gorąco
WMA	-	technologia na ciepło
A – D	-	mieszanki mineralno-asfaltowe AC 22P, na KR 5-7 przeanalizowane w rozprawie
„healing”	-	regeneracja zachodząca w MMA
K	-	wskaźnik wypełnienia stosowany w metodzie Durieza (miara określająca poziom zawartości lepiszcza w mieszance)
WT-2	-	Warunki Techniczne cz. 2 dotyczące wymagań MMA

1. Wstęp

Twarde ulepszone nawierzchnie sieci drogowych w Polsce, jako strategiczne obiekty inżynierskie umożliwiające transport towarów i przewóz osób, wykonane są w około 97% z mieszanek mineralno-asfaltowych (MMA), potocznie nazywanych mieszankami bitumicznymi [31, 113, 284]. Nadrzędnym celem ich stosowania do warstw konstrukcji nawierzchni jest zapewnienie odpowiedniego poziomu komfortu i bezpieczeństwa przejazdu uczestników w ustalonym okresie eksploatacyjnym. Do osiągnięcia tego celu stosuje się różne rodzaje mieszanek. Każda mieszanka powinna charakteryzować się odpowiednim składem oraz być odpowiednio wykonana technologicznie tak aby zapewnić wysoką trwałość konstrukcji.

Problematyka MMA jest bardzo złożona. Związana jest bezpośrednio z charakterystyką materiałową oraz czynnikami zewnętrznymi oddziałującymi na konstrukcję. Materiały te są kompozytami złożonymi z mieszanki odpowiednich kruszyw, lepiszcza asfaltowego, wolnej przestrzeni oraz ewentualnych dodatków wpływających na określone właściwości mechaniczne lub modyfikatorów wpływających na określone właściwości reologiczne. Ponadto MMA jako materiał jest reologicznie zmienny w zależności od stosowanego obciążenia i temperatury. w niskich temperaturach zachowuje się quasi-sprężyste (ulega kruchemu pękaniu), w wysokich wykazuje stan lepki (ulega deformacjom trwałym), natomiast w pośrednich jest materiałem lepko-sprężystym (pęka ciągliwie lub/i ulega deformacjom trwałym).

Projektowane MMA, w warunkach in-situ poddawane są oddziaływaniu różnych czynników. Większość z nich negatywnie wpływa na trwałość MMA - degradują materiał oraz są przyczyną powstawania uszkodzeń. Do podstawowych należą: czynniki mechaniczne i środowiskowe. Te pierwsze związane z bezpośrednim, cyklicznym obciążeniem od kół pojazdów. Te drugie wynikają np. z opadów, zmian temperatury (oddziaływanie: wody i mrozu lub wysokiej temperatury) lub/i agresji chlorkowej spowodowanej zimowymi zabiegami utrzymaniowymi.

Najczęstsze i jednocześnie niebezpieczne uszkodzenia występujące na Polskich drogach ograniczające trwałość nawierzchni, to w większości spękania: niskotemperaturowe, i typowo zmęczeniowe (dół-góra oraz góra-dół) [239]. Trudno jest ustalić genezę tych uszkodzeń, gdyż wspomniane wcześniej czynniki wzajemnie nakładają się na siebie [97]. Obserwacje terenowe i praktyka sugerują jednak, iż najczęściej powstające są te wynikające ze zjawiska zmęczenia.

Zmęczenie w warstwach bitumicznych polega na degradacji materiału poddanego zmiennym obciążeniom od kół pojazdów prowadzącym na drodze kumulacji powstałych uszkodzeń do zniszczenia. Pomimo, iż podczas całego roku uszkodzenia w warstwach konstrukcyjnych ulegają kumulacji i rozwojowi, to jednak okresowo obserwuje się ich częściowy lub całkowity zanik (okres letni). Omawiany fenomen związany jest z występowaniem tzw. regeneracji („healingu”) - czyli zamykania się spękań, pod wpływem wysokiej temperatury, powodującej „upłynnienie” lepiszcza w MMA. Efektem tego działania jest częściowe odtworzenie ciągłości struktury materiału i jednoczesne wydłużenie trwałości zmęczeniowej.

W Polsce ważnym elementem projektowania materiałów bitumicznych przeznaczonych na warstwy nośne w ocenie trwałości są badania zmęczeniowe. w MMA skumulowane uszkodzenia powstałe w wyniku zmęczenia utożsamiane są ze spadkiem parametru materiałowego nazywanego modułem sztywności E^* [MPa]. Aby ocenić trwałość mieszanki stosuje się tzw. kryteria zmęczeniowe. Podstawowym, powszechnie stosowanym kryterium do oceny trwałości uznaje się spadek początkowej wartości modułu sztywności o 50.0 %. W przypadku analiz trwałości konstrukcji nawierzchni wykorzystuje się tzw. kryteria

zmęczeniowe używane w mechanistyczno-empirycznych metodach projektowania np. AASHTO 2004.

Pomimo, iż tematyka zjawiska zmęczenia i efektów towarzyszących podlega sukcesywnemu rozwojowi, to jednak nie odniesiono zadowalających rezultatów w uwzględnieniu zjawiska regeneracji w projektowaniu technologicznym i kryteriach zmęczeniowych nawierzchni. Nie analizowano również kompleksowo trwałości MMA z jego udziałem. Ponadto do tej pory nie wzięto pod uwagę oddziaływań środowiskowych (woda i mróz, sól drogowa) w ocenie trwałości zmęczeniowej MMA i projektowanych konstrukcji nawierzchni z użyciem kryterium.

W rozprawie doktorskiej szczegółowo przedstawiono obecny stan wiedzy w zakresie: zjawiska zmęczenia i regeneracji materiałów bitumicznych (uwzględniając technologię produkcji oraz nowe receptury lepiszczy), uszkodzeń nawierzchni, i wpływu czynników zewnętrznych (woda i mróz, sól drogowa) na trwałość.

Aby uzupełnić wykazane braki w obecnym stanie wiedzy przeprowadzono kompleksowe badania i analizy dotyczące oceny trwałości mieszanek w laboratorium. Ponadto rozważania rozszerzono o analizy trwałości konstrukcji podatnych typu B wykonując modelowanie numeryczne i wykorzystując kryterium zmęczeniowe (projektowanie mechanistyczne). Na podstawie przeprowadzonych analiz zaproponowano autorskie metody i modyfikacje (np. kryterium zmęczeniowego), które pozwoliły skutecznie ocenić trwałość mieszanek i konstrukcji nawierzchni z uwzględnieniem zmęczenia, regeneracji i oddziaływań środowiskowych (woda i mróz, sól drogowa).

2. Teza rozprawy

Ze względu na złożoną problematykę zmęczenia nawierzchni drogowych nie opracowano dotychczas skutecznej metody prognozowania jej trwałości. w szczególności nie uwzględniono istotnych, dodatkowych procesów zwiększających lub zmniejszających trwałość. Uwzględnienie oddziaływań termicznych i środowiskowych może zapobiec przedwczesnej degradacji nawierzchni i zoptymalizować jej parametry na etapie projektu.

W świetle powyższych stwierdzeń sformułowano następującą tezę rozprawy:

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

3. Cel i zakres rozprawy

Podstawowym celem rozprawy są badania oraz analiza zjawisk zmęczeniowych zachodzący w mieszankach mineralno-asfaltowych w warunkach healingu oraz oddziaływania soli i mrozu. Analizy w zakresie badań zmęczeniowych przeprowadzono dla zróżnicowanych typów mieszank w zmiennych warunkach środowiskowych. Zrealizowano badania w laboratorium na próbkach pryzmatycznych poddanych cyklicznemu zginaniu oraz wykonano analizy numeryczne w modelu konstrukcji nawierzchni.

Do osiągnięcia zamierzonego celu niezbędne było zrealizowanie sześciu zadań cząstkowych.

1. Studium literatury krajowej i zagranicznej w zakresie m.in. trwałości mieszank mineralno-asfaltowych z uwzględnieniem zjawisk zmęczenia i regeneracji oraz wpływu czynników środowiskowych na trwałość zmęczeniową.
2. Opracowanie metodyki badawczej wykorzystującej symulującą procesy regeneracji oraz oddziaływania zróżnicowanych warunków środowiskowych.
3. Przeprowadzenie badań zmęczeniowych (oraz analizy wyników) z uwzględnieniem regeneracji i oddziaływań środowiskowych.
4. Opracowanie metod oceny i uwzględniania procesów regeneracji oraz różnych warunków środowiskowych w trwałości zmęczeniowej mieszank badanych laboratoryjnie ze względu na skład.
5. Opracowanie kryterium zmęczeniowego do prognozowania trwałości nawierzchni z uwzględnieniem procesów regeneracji oraz różnych warunków środowiskowych.
6. Jakościowa ocena mieszank na bazie asfaltów: zwykłego 35/50, modyfikowanego 25/55-60 (z polimerem SBS), wysokomodyfikowanego 25/55-80 HIMA (SBS) i w różnej technologii produkcji (35/50 WMA – na ciepło, 35/50 – na gorąco) oraz zamodelowanych konstrukcji uwzględniając oddziaływania środowiskowe, regenerację oraz rodzaj lepiszcza ze względu na trwałość zmęczeniową.

Analizy przeprowadzono dla czterech mieszank przeznaczonych na ruch ciężki (AC 22P, KR 5-7). Ponadto rozważania poszerzono o analizy MMA na warstwę wiążącą (AC 22W, KR 5-7), gdyż zaprojektowane recepty również spełniały wymogi przeznaczenia tej warstwy. Badane mieszanki charakteryzowały się tym samym składem granulometrycznym i zawartością lepiszcza. Różniły się natomiast rodzajem zastosowanego asfaltu – 35/50 WMA, 35/50, 25/55-60 i 25/55-80 HIMA. Rozważania przeprowadzono przy trzech poziomach

zawartości lepiszcza wyrażonych przez bezwymiarowy wskaźnik wypełnienia K (zawartość procentowa lepiszcza umieszczona jest w nawiasie): 2.95 (4.24 %), 2.80 (4.03%), 2.65 (3.82%). Badania laboratoryjne zrealizowano na próbkach pryzmatycznych poddanych cyklicznemu zginaniu. Opracowano model konstrukcji nawierzchni, w którym przeprowadzono analizy numeryczne, wykorzystane do oceny trwałości zmęczeniowej mieszanek z uwzględnieniem regeneracji i oddziaływań środowiskowych. Sformułowano wnioski i zalecenia oraz wskazano kierunki dalszych prac badawczych.

4. Przegląd stanu wiedzy

Trwałość materiałów bitumicznych z uwzględnieniem zmęczenia i regeneracji - „healingu” jest zagadnieniem złożonym, powiązaniem bezpośrednio ze składem materiałowym, jak również z technologią produkcji i warunkami pracy materiału. Zróżnicowane czynniki zewnętrzne (np. temperatura, obciążenie), mogą powodować wzajemnie procesy przyspieszające lub spowalniające degradację nawierzchni.

W przeglądzie stanu wiedzy omówiono aktualne prace badawcze z zakresu identyfikacji cech materiałowych mieszanek, aktualnych technologii ich wytwarzania, a następnie zjawisk zmęczeniowych zachodzących w materiałach bitumicznych. Zwrócono uwagę na procesy regeneracji MMA (zjawiska wydłużającego trwałość zmęczeniową mieszanek poprzez częściowe odtworzenie struktury materiału – zamknięcie powstałych spękań wynikające np. z oddziaływania wysokiej temperatury), które w świetle aktualnych badań nie są dokładnie rozpoznane. Ponadto w przeglądzie omówiono aktualny stan wiedzy w zakresie badań i analiz związanych z wpływem oddziaływań środowiskowych (woda i mróz, sól drogowa) na trwałość MMA.

4.1. Ogólne informacje o MMA

4.1.1. Charakterystyka ogólna

Uogólniając definicję omawianego materiału wg [28, 31, 305] mieszanka mineralno-asfaltowa (MMA) to kompozyt, który składa się z: odpowiednio uziarnionych frakcji kruszywa mineralnego i wypełniacza, lepiszcza asfaltowego, dopuszczonych zamkniętych pustek powietrznych oraz ewentualnych dodatków (wpływających na określone właściwości mechaniczne) lub modyfikatorów (modyfikatorów wpływających na określone właściwości reologiczne) [290, 291]. Każdy składnik wpływa na trwałość materiału i jego zdolność do regeneracji.

Skład materiałowy - wzajemne proporcje poszczególnych składników mieszanki ustalane są w zależności od jej przeznaczenia w taki sposób, aby zostały spełnione wymagania warunków technicznych [80, 82] nawiązujące do kryteriów i skali oceny podanej w odpowiednich normach.

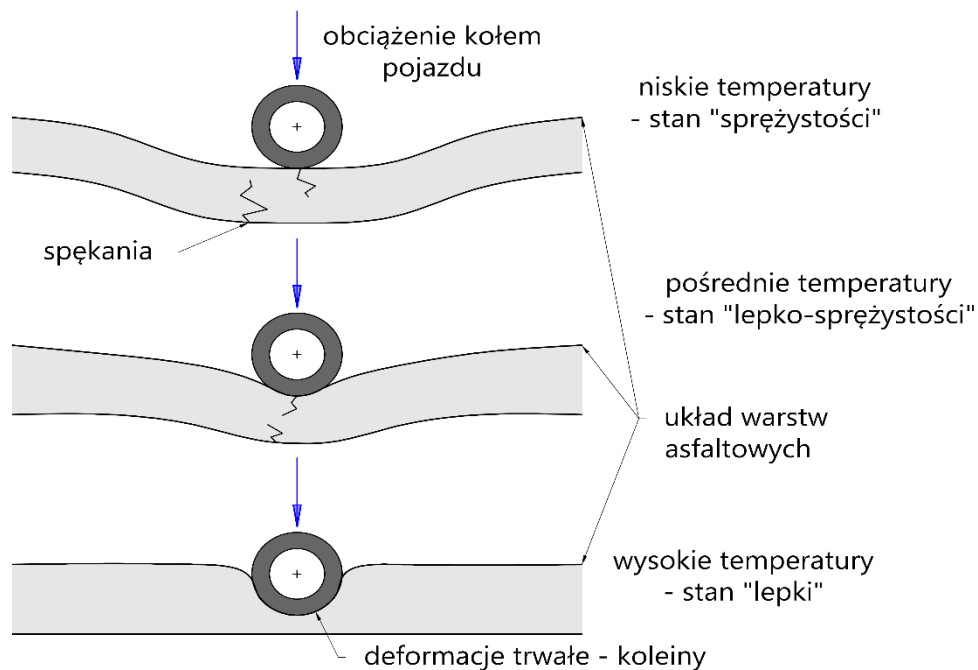
W Polsce wyróżnia się kilka podstawowych typów MMA powszechnie stosowanych do warstw konstrukcji nawierzchni. Należą do nich:

- beton asfaltowy (AC) - stosowany do podbudowy, warstwy wiążącej i ścieralnej,
- beton asfaltowy o wysokim module sztywności (AC WMS) - stosowany do podbudowy i warstwy wiążącej,
- beton asfaltowy do bardzo cienkich warstw (BBTM) - stosowany do warstwy ścieralnej,
- mieszanka mastyksowo-grysowa (SMA) - stosowana do warstwy ścieralnej,
- asfalt lany (MA) - stosowana do warstwy ścieralnej i ochronnej mostowej,
- asfalt porowaty (PA) - stosowany do warstwy ścieralnej.

Warto wspomnieć, iż poza przeznaczeniem wymienione powyżej typy mieszanek różnią się względem siebie głównie proporcjami składników, uziarnieniem, rodzajem dopuszczanego do stosowania lepiszcza oraz technologią produkcji.

4.1.2. Cechy reologiczne MMA

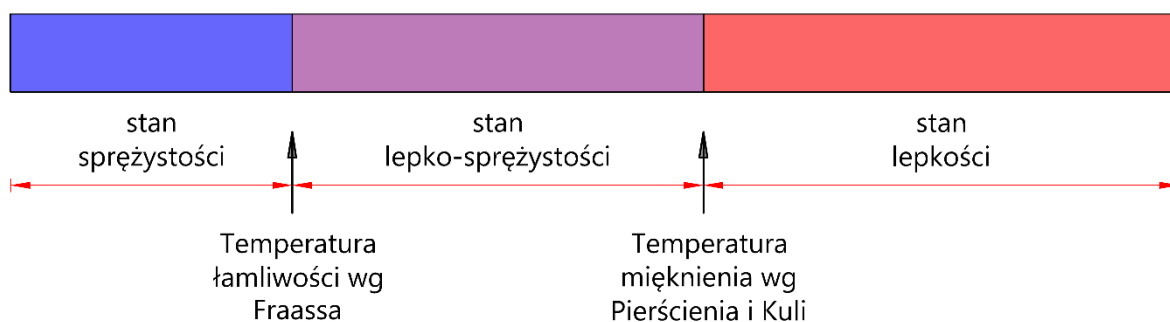
Mieszanka mineralno-asfaltowa wykazuje zmienne cechy w zależności od temperatury i czasu obciążenia. w niskich temperaturach wykazuje cechy sprężyste (materiał liniowo-sprężysty Hooke'a). w warunkach dużego obciążenia jest podatna na kruche pękanie. w wysokich temperaturach cechuje się zwiększoną lepkością (materiał lepki Newtona). w wyniku długiego czasu oddziaływania obciążenia ulega płynięciu wykazując podatność na deformacje trwałe (np. koleiny). w temperaturach pośrednich posiada cechy lepko-sprężyste (materiał lepko-sprężysty opisywany skutecznie czteroparametrowym modelem reologicznym Burgersa). w tych warunkach obserwuje się w mieszankach zjawiska zarówno kruchego pęknięcia jak i powstawania deformacji trwałych [31, 130, 183, 303]. Ogólny schemat deformacji przy zmiennej temperaturze zobrazowano na Rys. 1.



Rys. 1: Schemat pracy i deformacji MMA w różnych temperaturach

Zmienność zachowania się MMA związana jest ze składnikami całego kompozytu. Według przeprowadzonych analiz [19, 177] właściwości lepkie materiałów bitumicznych zależą od rodzaju, cech i ilości użytego lepiszcza, natomiast właściwości sprężyste większościowo nadawane są przez mieszankę mineralną (kruszywo). Chcąc ustalić wcześniej wspomniany charakter pracy MMA ze względu na temperaturę otoczenia, można umownie przyjąć, iż jest on cechowany bezpośrednio przez asfalt, określany na podstawie badań łamliwości Fraassa oraz mięknięcia metodą Pierścienia i Kuli [31]. Schemat przedstawiono na Rys. 2.

Schematyczny zakres temperatury pracy asfaltów [°C]



Rys. 2: Zmienność reologiczna asfaltu (MMA) ze względu na temperaturę

Mieszanka mineralno-asfaltowa stosowana do warstw konstrukcji nawierzchni poddawana jest zakresowi temperatur eksploatacyjnych wynoszących w Polsce [100] pomiędzy $-40.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+80.0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pomimo tak rozległej rozpiętości przez większą część roku mieszanki bitumiczne znajdują się w stanie lepko-sprężystym.

W warunkach eksploatacji, związanych z bezpośrednim, szybkim przejazdem pojazdu, mieszanki mineralno-asfaltowe nie poddawane są działaniu statycznego obciążenia. Warunki in-situ oddziaływania samochód-nawierzchnia analizuje się z użyciem obciążenia dynamicznego - zmiennie ustalonego w postaci funkcji sinus. Taki rodzaj impulsu jest powszechnie stosowany w badaniach MMA, ponieważ dobrze aproksymuje warunki powstające w materiale pod wpływem przejazdu koła.

Aby przeanalizować lepko-sprężyste zachowanie materiałów bitumicznych pod takim rodzajem obciążenia wykorzystuje się „zespolony moduł sztywności E^* ” lub skrótowo - „moduł sztywności E^* ”.

C. Van Der Poel [300] w 1954 roku bazując na doświadczeniach Lethersicha i Erikssona [67, 140] związanych z lepiszczem asfaltowym po raz pierwszy w historii wprowadził pojęcie „Modułu Sztywności E^* ” uwzględniając w module Younga (1) jego zależność od temperatury, czasu obciążenia.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \rightarrow E^*(T, t) = \frac{\sigma}{\varepsilon}(T, t), \quad (1)$$

gdzie:

E - moduł Younga [MPa],

σ - naprężenie [MPa],

ε - odkształcenie [-],

$E^*(T, t)$ - moduł sztywności zależny od temperatury i czasu obciążenia [MPa],

T - temperatura [°C],

t - czas [s].

Badania Poela zaaplikowane do materiałów bitumicznych pozwoliły zidentyfikować i wyselekcjonować wpływ cech sprężystych i lepkich MMA korzystając z rachunku liczb zespolonych. Moduł sztywności rozdzielono na dwie składowe: część rzeczywistą (opisującą zachowanie sprężyste materiału) oraz urojoną (opisującą zachowania lepkie), których zależności matematyczne przedstawiono we wzorach (2), (3), (4), (5):

$$|E^*| = E_1 + i \cdot E_2 = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}, \quad (2)$$

$$E_1 = |E^*| \cdot \cos\varphi, \quad (3)$$

$$E_2 = |E^*| \cdot \sin\varphi, \quad (4)$$

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{E_2}{E_1}, \quad (5)$$

gdzie:

$|E^*|$ - moduł zespolony - moduł sztywności [MPa],

E_1 - część rzeczywista (sprężysta) modułu zespolonego [MPa],

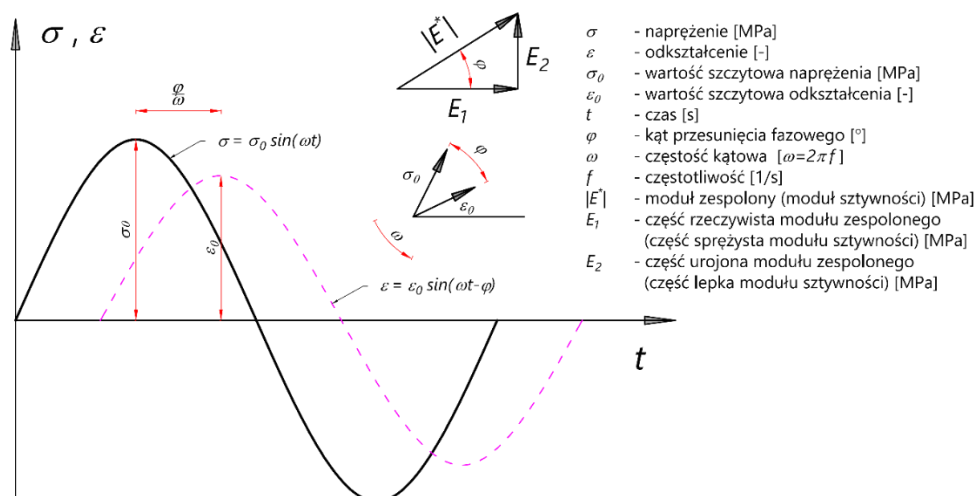
E_2 - część urojona (lepka) modułu zespolonego [MPa],

φ - kąt przesunięcia fazowego [°].

Podział na składowe części modułu sztywności jest ściśle związany z czynnikiem lepkiem (lepiszczem asfaltowym) nadającym MMA cechy lepko-sprężyste. Powoduje on, iż odpowiedź materiału jest opóźniona w stosunku do aplikowanego obciążenia, a samo opóźnienie definiuje się jako „kąt przesunięcia fazowego φ ” (lub „kąt fazowy” - skrótowo). Badania związane z analizami modułu zespolonego i fazy początkowo prowadzone przez Franckena [74], a następnie przez Pellinen i Witczaka [196, 198], pozwoliły określić na podstawie nałożonych wykresów naprężenia i odkształcenia informację o dominacji właściwości sprężystych i lepkich całej mieszanki, determinowanych jako „tangens kąta przesunięcia fazowego - $\operatorname{tg}\varphi$ ”. Wyraża on stosunek składowych wartości modułów E_2 do E_1 zgodnie z równaniem (5). w zależności od tego jaka jest wartość kąta fazy φ wyróżnia się następujące zakresy opisujące stan badanego materiału:

1. wartości bliskie lub równe $\varphi = 90^\circ$ opisują stan lepki,
2. wartości pomiędzy $90^\circ > \varphi > 0^\circ$ opisują stan lepko-sprężysty,
3. wartości bliskie lub równe $\varphi = 0^\circ$ opisują stan sprężysty.

Schemat interpretacji modułu sztywności, składowych modułu oraz kąta fazowego przy obciążeniu dynamicznym zaprezentowano na Rys. 3.

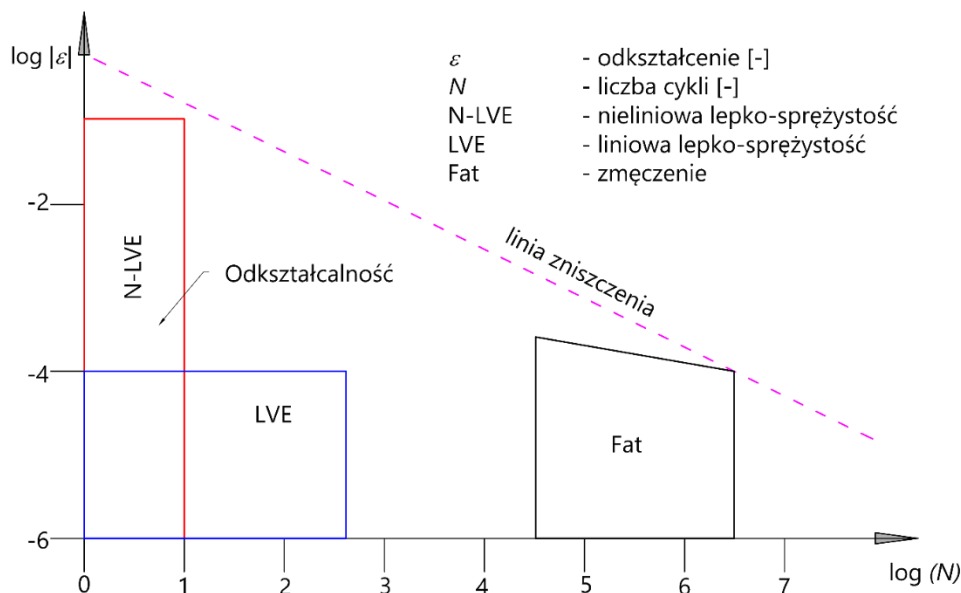


Rys. 3: Moduł zespolony (sztywności) i kąt przesunięcia fazowego

Moduł sztywności jest zatem parametrem materiałowym, umożliwiającym ustalenie wzajemnej relacji pomiędzy naprężeniem a odkształceniem, charakterystycznym dla materiałów lepkosprężystych. Uwzględniana on temperaturę i czas oddziaływania impulsu, a jego wartość jest od nich zależna. [109, 267, 317].

Pomimo, iż moduł sztywności mieszanek jest zależny od temperatury i czasu trwania impulsu obciążenia jego wartość (lub kąta fazy) może być wzajemnie transponowany pomiędzy temperaturą a częstotliwością przy stałej wartości obciążenia. Oznacza to, iż stan obciążenia w niskiej temperaturze i częstotliwości odpowiada stanowi obciążenia w wysokiej temperaturze i częstotliwości. Transponowanie jest możliwe zarówno dla mieszanek na bazie asfaltów zwykłych jak również modyfikowanych. [15, 18, 309], [25, 102, 311], [320], [307], [308].

Istotnym elementem związanym z badaniem mieszanek są zjawiska zachodzące w materiale w zależności od poziomu obciążenia poddanego badaniu w stałej temperaturze i częstotliwości. Pionierem analiz prowadzonych na materiałach bitumicznych był Di Benedetto, który w 1990r [60] po raz pierwszy przedstawił orientacyjne zakresy zachowania się materiału bitumicznego w zależności od poziomu odkształcenia (obciążenia) oraz liczby cykli (powtórzeń obciążenia w testach dynamicznych) zamieszczonych schematycznie na Rys. 4.



Rys. 4: Orientacyjne zakresy zachowań lepiszcza i MMA (odkształcenie - liczba cykli)

Ustalono, iż w przypadku:

- odkształceń powyżej $100 \mu\epsilon$ [-] oraz małej liczbie powtórzeń (poniżej 10 cykli) MMA zachowują się nieliniowo lepko-sprężystość,
- odkształceń poniżej $100 \mu\epsilon$ [-] oraz średniej liczbie powtórzeń (poniżej 1000 cykli) MMA zachowują się liniowo lepko-sprężystość. (zakres potwierdzony niezależnymi badaniami przez Aireya w 2003r [6]),
- odkształceń małych (na poziomie $100 \mu\epsilon$) oraz dużej liczbie powtórzeń (powyżej 10000 w materiale bitumicznym obserwuje się zjawisko zmęczenia).

Kolejnymi badaniami wykonanymi w 2000 roku [58] nawiązującymi do tych z 1990 r. Di Benedetto, udowodnił na podstawie różnych schematów obciążenia (wywołujących

homogeniczne lub niehomogeniczne stany naprężenia) iż, aby zbadać moduł sztywności nie niszcząc próbki w zakresie liniowo lepko-sprężystym amplituda odkształcenia nie powinna przekroczyć $100 \mu\epsilon$, sugerując bezpieczną wartość rzędu $40 \div 50 \mu\epsilon$. Ponadto podkreślono, iż zaobserwowane zjawisko zmęczenia (wyższe poziomy obciążenia, duża liczba cykli badania) należy wziąć pod uwagę w przypadku oceny trwałości materiału.

Analiza trwałości zmęczeniowej MMA należy do istotnych, ponieważ materiał stosowany do warstw konstrukcji nawierzchni poddawany jest cyklicznym, długotrwałym obciążeniom od kół pojazdów.

4.1.3. Uszkodzenia warstw bitumicznych

Warstwy konstrukcji nawierzchni wykonane z MMA spełniają kilka fundamentalnych funkcji, aby umożliwić bezpieczny i komfortowy przejazd pojazdów:

1. funkcja toczna - zapewnia powierzchnię odpowiednią do przyłożenia obciążenia od gumowego koła pojazdu,
2. nośna - odbieranie i przekazywanie na konstrukcję gruntową obciążenia od kół pojazdów,
3. zapewniająca odpowiednią trwałość - odporność na różne czynniki - mechaniczne, środowiskowe i chemiczne w czasie eksploatacji.

Materiały bitumiczne w zależności od ich lokalizacji w warstwach konstrukcji nawierzchni podlegają stopniowej degradacji. Wywołana jest ona przez oddziaływania „mechaniczne” i „środowiskowe”.

Do mechanicznych zalicza się bezpośredni wpływ kół pojazdów połączony z intensywnością ich oddziaływania. Intensywność związana jest z natężeniem ruchu panującym na drodze, obciążeniem pojazdów, ciśnieniem w oponie, prędkością ruchu. Im jest ona większa, tym nawierzchnia częściej poddawana jest obciążeniom od kół, co skutkuje krótszym okresem odpoczynku pomiędzy przejeżdżającymi pojazdami. Zjawisko to niekorzystnie wpływa na trwałość konstrukcji, ponieważ np. nawrót sprężysty (stopniowy zanik odkształceń w czasie spowodowany odciążeniem) nie ma możliwości zaistnieć lub jest stosunkowo mały. To zaś prowadzi np. do kumulacji odkształcenia, które może być przyczyną powstania różnych uszkodzeń np. powstaniem spękań. Zwiększenie natężenia ruchu oraz przeładowanie pojazdów, posiadających zbyt duże ciśnienie w oponach obserwuje się w Polsce od lat, co skłoniło Judyckiego i innych [115] do wykonania analiz ruchowych oraz zaproponowania nowego katalogu poświęconego konstrukcjom podatnym i półsztywnym uwzględniającego wyższe (w stosunku do przeszłości) poziomy obciążenia. w projektowaniu konstrukcji nawierzchni występuje pojęcie równoważnej osi standardowej - „*Standard Equivalent Axle Load (SEAL)*” oraz współczynnika równoważności obciążenia - „*Load Equivalency Factor (LEF)*” omówiony w pracach [41, 90, 142]. Wymienione parametry pozwalają przeliczyć ruch rejestrowany (pomierzony) na obliczeniowy o ustalonej wartości nacisku osi (SEAL). Ponadto możliwe jest ustalenie szkody zmęczeniowej rozpatrywanej konstrukcji lub samej warstwy wywołanej przez pojedynczy przejazd osi pojazdu o ustalonym nacisku. Obecnie w Polsce przechodzi się na większy dopuszczalny nacisk osi z 100 kN na 115 kN - zatem pojawia się potrzeba przebadania i zaproponowania nowych MMA, które pozwolą zapewnić trwałość całej konstrukcji nawierzchni a w szczególności jej warstw nośnych.

Do środowiskowych oddziaływań, które przyczyniają się do degradacji MMA należą temperatura, wilgotność, promieniowanie UV, powietrze (starzenie eksploatacyjne) i zimowe zabiegi utrzymaniowe (np. posypywanie solą drogową). Czynniki te, a w zasadzie zmiana

intensywności i czasu ich oddziaływania spowodowana niejednorodnymi warunkami klimatycznymi stwarza ryzyko powstawania uszkodzeń w nawierzchni.

MMA w zależności od zmian temperatury jest podatny w niskich na spękania warstw szczególnie nośnych (podbudowa, wiążąca), natomiast w wysokich na deformacje trwałe (plastyczne) warstwy wierzchnie (ścieralna, wiążąca).

Zbyt duża wilgotność (opady deszczu) negatywnie wpływa na parametry nośne (obniża moduł sztywności), a w połączeniu z niską temperaturą (okres zimowy) staje się przyczyną powstawania spękań w warstwach konstrukcji wykonanych z MMA. Istnieje wiele opracowań nawiązujących do odporności mieszanek na tzw. czynnik wody i mrozu np. [14, 83, 220] jednak nie odnotowuje się opracowań poświęconych uwzględnieniu tego czynnika w trwałości zmęczeniowej materiału i projektowanej konstrukcji.

Jeszcze przed 1993 rokiem za granicą, a w Polsce od 2005 roku zaczęto zwracać uwagę na znaczący wpływ oddziaływania promieniowania UV i powietrza, które wywołują tzw. starzenie eksploatacyjne warstw asfaltowych. w opracowaniach IBDiM (Instytutu Badawczego Dróg i Mostów) [282], pracach Judyckiego [112] i Owieckiej [189] pochyłano się nad tym problemem wskazując, iż starzenie wywołane utlenianiem się asfaltu (zwiększenia związków polarnych w lepiszczu) powoduje twardnienie MMA, a w konsekwencji pogorszenie właściwości mechanicznych i reologicznych. Efektem jest powstanie np. spękań - głównie niskotemperaturowych. Autorzy prac podkreślają, iż tematyka starzenia nie jest do końca poznana i wymaga gruntowniejszych badań.

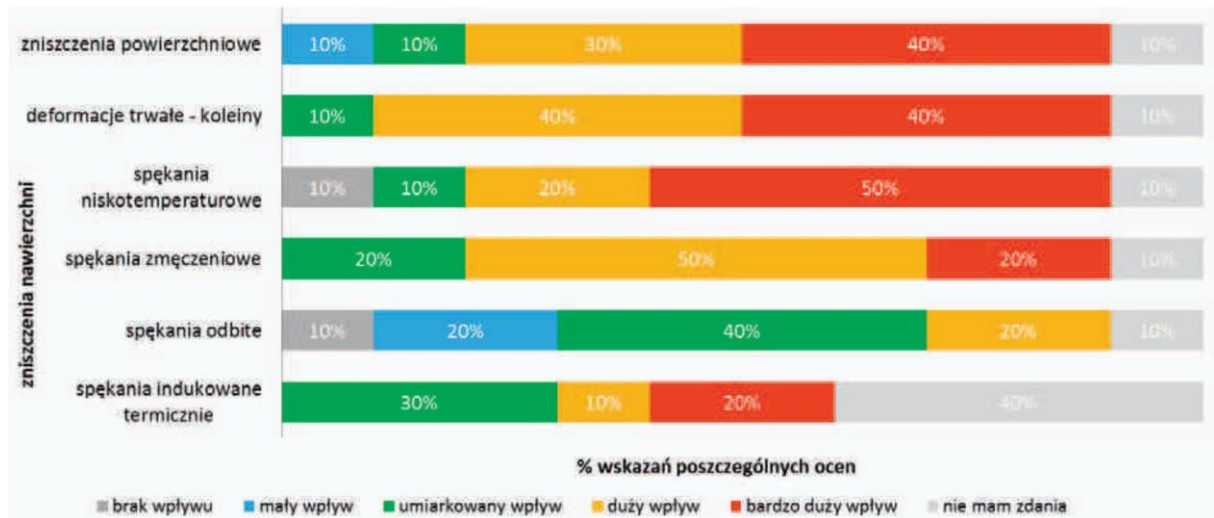
Do ostatnich oddziaływań środowiskowych, które negatywnie wpływają na MMA zalicza się te związane z wykorzystywanymi środkami utrzymaniowymi stosowanymi w okresie zimowym np. sole drogowe. z jednej strony jest to temat nowy wymagający uwagi, ponieważ nie wykonano dotąd gruntownych analiz związanych z wpływem takich środków na parametry mechaniczne i trwałość MMA (jest zaledwie kilka publikacji). Brak jest również analiz związanych z trwałością konstrukcji. z drugiej strony stary – temat ograniczał się do sygnalizacji problemu wyrażonego obserwacjami terenowymi sięgającymi końca XX w.

Identyfikacja uszkodzeń i ich geneza nie należy do tematów najłatwiejszych, jednak w 2013 roku opracowano przez GDDKiA „Katalog Przebudów i Remontów” [76] (kiedyś funkcjonujący jako „System Oceny Stanu Nawierzchni - SOSN”), w którym to kompleksowo sklasyfikowano szereg uszkodzeń, powstających w wyniku oddziaływań mechanicznych, środowiskowych lub materiałowych (skład lub technologia). Podobne klasyfikacje znaleźć można w pracy Szurby [285] oraz w opracowaniach internetowych i raportach NCHRP [187, 195]. Należy podkreślić, iż najistotniejszym składnikiem mieszanki bitumicznej, jest lepiszcze asfaltowe jako element „najsłabszy”. w pracy Radziszewskiego [239] przedstawiono wyniki badań ankietowych, w których określono wpływ lepiszcza na powstanie najczęstszych uszkodzeń. z badań wynika, iż zły dobór lepiszcza do MMA jest przyczyną nawet 90% powstałych spękań zmęczeniowych. Ponadto spękania zmęczeniowe mogą być wywołane albo przez warunki klimatyczne lub ruch pojazdów. Problem zaprojektowania trwałej jakościowo MMA i konstrukcji nawierzchni w trudnych warunkach środowiskowo-ruchowych należy do zagadnień trudnych i nierozwiązanych.

Rysunek zestawczy wszystkich uszkodzeń z katalogu przedstawiono na Rys. 5, a wpływ lepiszcza na ich pojawienie się ukazano na Rys. 6.

Rodzaj uszkodzenia		Czynnik generujący		
		Klimat	Ruch pojazdów	Materiał
Deformacje trwałe	Lekkoelastyczne		✓	
	Strukturalne		✓	
Spękania	Zmęczeniowe		✓	
	Zmęczeniowe termiczne	✓		
	Termiczne	✓		
Uszkodzenia powierzchniowe	Odbite			✓
	Ubytki lepiscza	✓		
	Ubytki ziaren kruszywa	✓	✓	✓
	Ubytki warstwy ścieralnej	✓	✓	
	Wypolerowanie ziaren kruszywa		✓	
	Wyptyw (plamy) lepiscza	✓	✓	

Rys. 5: Uszkodzenia nawierzchni bitumicznych w zależności od czynników wywołujących [285]



Rys. 6: Wpływ lepiscza na powstawanie uszkodzeń [239]

4.2. Metody projektowania i technologie produkcji

Typowa wykonana mieszanka mineralno-asfaltowa składa się z: mieszanki mineralnej - MM (kruszywa o odpowiednim uziarnieniu), asfaltu dodanego do kruszywa oraz wolnej przestrzeni znajdującej się w asfalcie i kruszywie (pustki powietrzne). Wzajemne proporcje składników ustala się na drodze projektu.

Projekt składu mieszanki mineralno-asfaltowej, polega na oszacowaniu w oparciu o metody teoretyczne lub empiryczne procentowych zawartości poszczególnych materiałów składowych tworząc w ten sposób „*receptę roboczą*”. Następnie wykonując technologicznie określoną ilość MMA (w postaci odpowiednio zagęszczonych próbek), poddaje się ją badaniom by sprawdzić deklarowane cechy i stwierdzić, czy korespondują one z obowiązującymi wymogami (W Polsce jest to dokument skrótowo zwany „WT-2” [78]). Skład mieszanki bitumicznej jest bazą wejściową do nadania materiałowi określonych cech wpływających na jego trwałość. Drugim nierozłącznym elementem jest technologia wykonania, od której w podobnym stopniu zależy, czy materiał nabędzie odpowiednią odporność na czynniki oddziaływujące w warunkach in-situ.

Projekt składu mieszanki, a w zasadzie odpowiednie proporcje składników bazowych, pozwalają ograniczyć lub wyeliminować problemy występujące podczas wykonania i eksploatacji nawierzchni. Skład mieszanki mineralno-asfaltowej wpływa bezpośrednio na siedem cech.

1. **Odporność na deformacje trwałe** - dobrze zaprojektowana mieszanka nie powinna ulegać rozsegregowaniu lub przemieszczać się pod ruchem samochodowym, szczególnie w wysokich temperaturach. Za poprawne zachowanie MMA odpowiadają w tym zakresie: właściwości kruszywa, jego uziarnienie, rodzaj asfaltu, jego zawartość.
2. **Odporność na spękania zmęczeniowe i odbite** - mieszanki sztywniejsze zmniejszają ryzyko wystąpienia kolein, lecz mogą być powodować spękania zmęczeniowe lub odbite w niższych temperaturach. Aby załagodzić powstawanie tego rodzaju uszkodzeń należy rozważyć operować zawartością asfaltu w mieszance lub zastosować dodatkową warstwę konstrukcji nawierzchni zapewniającą stosowną ochronę.
3. **Odporność na spękania niskotemperaturowe** - podatność na powstawanie tego rodzaju uszkodzeń (szczególnie w zimnych miejscach, gdzie wahania temperatury są duże) jest jednym z najczęstszych problemów obecnie projektowanych dróg. Nadanie odporności lub załagodzenie tego zjawiska wiąże się bezpośrednio z rodzajem użytego do projektu składu MMA lepiszcza.
4. **Nośność i trwałość** - Mieszanka musi zawierać odpowiednią ilość lepiszcza asfaltowego, aby zapewnić właściwe zespolenie ziaren kruszyw oraz zminimalizować wpływ twardnienia i starzenia mieszanki zarówno podczas produkcji jak i eksploatacji. Właściwa zawartość lepiszcza pozwala również zapewnić odpowiedni poziom zagęszczenia i utrzymać odpowiednią zawartość wolnych przestrzeni - te zaś nadają szczelność mieszanki i chronią przed nadmiernym starzeniem.
5. **Odporność na wilgoć i efekty wahań temperatury** (odpadanie asfaltu od ziarna kruszywa) - chroni mieszankę przed utratą właściwości adhezyjnych pomiędzy powierzchnią kruszywa, a lepiszczem asfaltowym. Zapewnienie właściwego powinowactwa kruszywo-asfalt jest ważnym elementem projektu i nie może zostać pominięte. Aby to zapewnić należy: - wybrać odpowiednie lepiszcze asfaltowe, kruszywo (np. ze skał zasadowych) lub/i zastosować dodatki w postaci środków adhezyjnych (np. Wet-fix)
6. **Urabialność** - cecha odnosząca się do łatwości zagęszczenia mieszanki w warunkach docelowych bez utraty swoich właściwości badanych przy zagęszczeniu

laboratoryjnym. Laboratoryjne sposoby przygotowania materiału są różne i nie zawsze użyta w nich procedura może być zrealizowana w warunkach in-situ. Projektując skład mieszanki powinno się zapewnić w niej takie materiały wsadowe, które bez trudu mogą być zastosowane i obrobione przez odpowiednie maszyny na budowach.

7. **Właściwości antypoślizgowe** - dobra mieszanka jest w stanie zapewnić odpowiedni poziom odporności na poślizg (szczególnie podczas deszczu). w składzie mieszanki odpowiada za to głównie kruszywo, które powinno cechować się odpowiednią teksturą, kształtem, wymiarem ziarna czy odpornością na polerowanie. Dobór właściwego kruszywa (najlepiej łamanego mechanicznie) pozwala zapewnić dobrą antypoślizgowość.

Metody projektowania MMA są rozwijane na świecie od początków XX wieku. Do podstawowych, stosowanych do technologii na gorąco należą: polowa metoda Hubbarda, Hveem, Marshalla, Superpave szczegółowo opisane w [12, 245, 275, 322]. Poza wzmiankowanymi, utworzono wiele modyfikacji tych metod np. „Ulepszona metoda Hveem” opisana w pracy Vallergera [295] lub „Zmodyfikowana metoda Marshalla” pomysłu Khlify [125].

W Polsce stosuje się mieszaną metodę projektowania MMA, która w dużej mierze wzoruje się na metodzie Superpave. Podstawą jest ustalenie składników wejściowych, których parametry techniczne nie mogą być gorsze niż ściśle określone w odpowiednich dokumentach - lepiszcze zgodnie z wymaganiami zamieszczonymi w normach PN-EN 12591:2010 (asfalty drogowe) i PN-EN 14023:2011 (asfalty modyfikowane) [208, 210] oraz kruszywa na bazie dokumentu skrótowo zwanego „WT-1” (Warunki Techniczne 1 cz. 1) [77]. Następnie wykonuje się projekt składu mieszanki mineralnej – najczęściej według punktów kontrolnych najlepszego uziarnienia [120, 203]. w dalszej kolejności ustala się zawartość lepiszcza asfaltowego w MMA – np. metodą Durieza [120, 203]. w ten sposób realizuje się receptę, którą w dalszym etapie należy technologicznie wykonać i przeanalizować odpowiednimi badaniami celem stwierdzenia czy materiał jest jakościowo właściwy. w Polsce kontrolne badania MMA wykonuje się zgodnie z „WT-2” (Warunki Techniczne 2 cz.1 [78]).

Głównymi różnicami pomiędzy Superpave, a Polskim stylem mieszanym jest: sposób realizowania zagęszczenia (używane 3 sposoby - ubijak Marshalla, prasa żyratorowa, zagęszczarka płytowa), system klasyfikacji asfaltów, wykorzystywane metody projektowania, zestaw kryteriów związany z oczekiwanymi cechami jakościowymi MMA [199]. Należy jednak podkreślić, iż mieszana metoda stosowana w Polsce jest ściśle dopasowana do warunków klimatycznych i realiów ruchowych, czyniąc ją równie efektywną jakościowo w stosunku do stosowanego w USA Superpave.

Technologia wykonania MMA jest drugim kluczowym elementem wpływającym na cechy jakościowe mieszanek. Temperatura przygotowania materiału, czas mieszania składników, sposób i długość zagęszczenia, wpływa znacząco na trwałość materiału. Jeżeli tę samą (ze względu na skład) MMA wykona się w różnych warunkach - temperaturze mieszania lub/i zagęszczenia to na drodze dalszych weryfikacji zaobserwuje się znaczne rozbieżności np. w zawartości wolnej przestrzeni, module sztywności itp. – ważnych parametrach opisujących MMA. Przykładem badań ukazujących wpływ technologii jest np. praca Mrugały [179]. Artykuł opisuje wpływ temperatury zagęszczenia na zawartość wolnych przestrzeni oraz odporność na wodę i mróz (ITSR). Analizy wykazały, iż na zbadanych mieszankach wykonanych w technologii na ciepło, mieszanki zagęszczane w temperaturze o 20 °C niższej niż referencyjne skutkowały przyrostem wolnej przestrzeni o ponad 1% oraz spadkiem odporności na wodę i mróz średnio o 6%. Kolejnym przykładem wskazującym znaczący wpływ technologii produkcji jest artykuł Yanga [315]. Autor wykazał na podstawie analizy porównawczej zmiany odporności betonu asfaltowego na pęknięcie w niskich temperaturach, ze

względem na różne czasy jej podgrzewania. Autor przedstawił, iż starzenie technologiczne mieszanek wytwarzanych na gorąco może obniżyć odporność na pękanie w temperaturze badania (-12.0) [°C] nawet o 25% (zmiany energii pękania).

W obszernej pracy zbiorowej o nazwie „*Poradnik Asfaltowy 2018*” [33] również można znaleźć informacje o wpływie technologii produkcji na cechy końcowe mieszanek. Autorzy publikacji wskazują, iż przyjęcie za dużej temperatury przy zagęszczeniu w laboratorium w stosunku do warunków termicznych wykonania warstw na budowie prowadzi do zawyżenia gęstości objętościowej projektowanej recepty i jednocześnie do zaniżenia wolnych przestrzeni. w takich przypadkach istnieje wysokie ryzyko niespełnienia wymogów związanych z odpornością np. na wodę i mróz MMA. z drugiej strony, gdy temperatury laboratoryjne będą za małe, a na budowie za duże, to będzie skutkowało „przegęszczeniem warstwy” - wymagane wskaźniki zagęszczenia będą wyższe od jedności, a sam materiał będzie posiadał za mało wolnych przestrzeni (mniejsza odporność na koleinowanie). Ponadto niewłaściwa temperatura mieszania i zagęszczenia połączona z wydłużonym czasem ich trwania wymusza przyspieszone starzenie technologiczne lepiszcza ograniczając trwałość całego MMA.

Temat technologii produkcji jest obszerny i zmienny. Nieprzerwalnie rozwija się rynek lepiszczy asfaltowych, posiadających coraz to nowe wzbogacone formuły. Dużym wyzwaniem jest ustalenie właściwych warunków produkcyjnych MMA, w taki sposób, aby pozyskać mieszanki charakteryzujące się odpowiednią trwałością. Aby uzyskać zadowalające rezultaty MMA należy wykonywać w oparciu o standard PN-EN 12697-35 (mieszanie laboratoryjne) [217], a temperatury wytwarzania i zagęszczania ustalać posiłkując się zaleceniami producentów lepiszczy asfaltowych dostępnych na rynku.

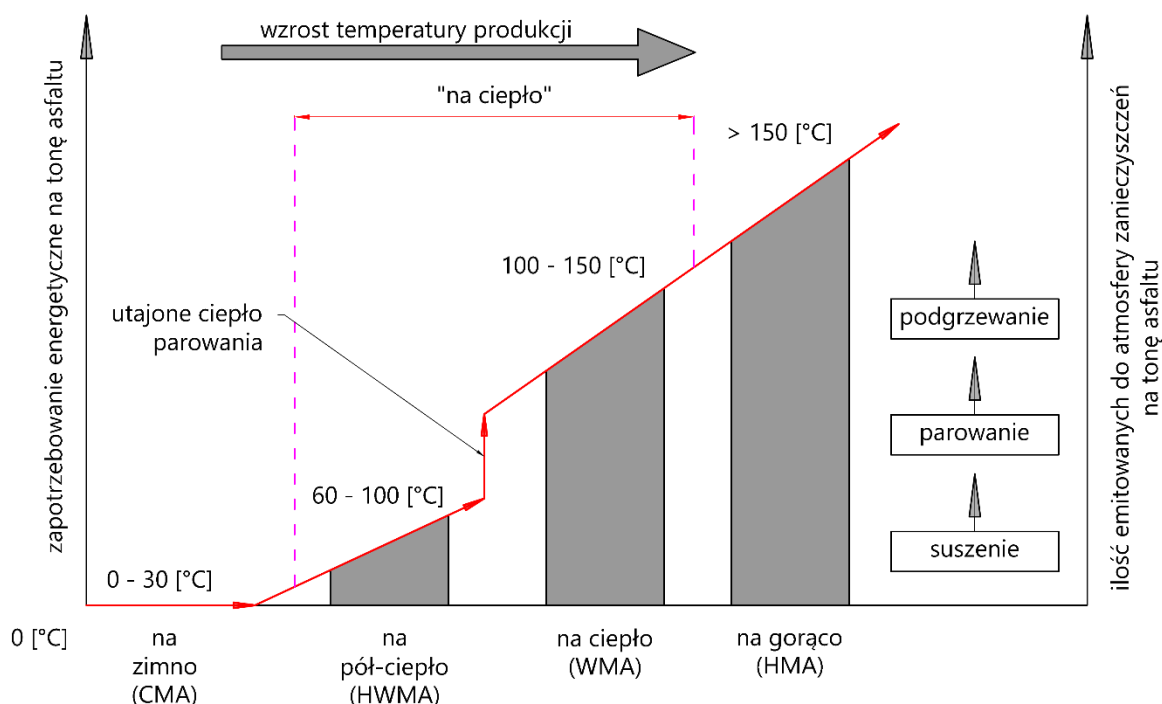
Omawiając temat wpływu technologii na trwałość MMA przedstawia się cztery podstawowe technologie wytwarzania. Powszechnie stosowaną jest na gorąco – HMA. Ostatnimi czasy pojawiło się kilka nowych – na ciepło - WMA, na pół-ciepło - HMWA, na zimno – CMA, które umożliwiają produkcję mieszanek w niższych temperaturach [48, 138, 269, 279]. Krótką charakterystykę czterech technologii zamieszczono poniżej.

1. **Na zimno (CMA)** - technologia pozwala na wytworzenie w niskich temperaturach (0 - 30 °C) mieszanek produkowanych głównie na bazie emulsji asfaltowych (ze znaczną ilością destruktu pochodzącego z recyklingu). Zaliczana do przyjaznych środowisku z uwagi na praktyczny brak emisji szkodliwych gazów produkcyjnych do atmosfery. Metoda polega na dodaniu emulsji asfaltowej do zimnego, wilgotnego kruszywa. w momencie styku emulsja-ziarno, ulega ona rozproszeniu tworząc wiązania pomiędzy materiałem kamiennym. Technologia ta jest teoretycznie nowością na rynku, która wymaga gruntownych analiz i udoskonaleń z uwagi na problemy techniczne i pozyskiwane właściwości mechaniczne - wysoka zawartość wolnych przestrzeni, niska sztywność, podatność na pękanie (kruchość). z uwagi na swoją specyfikę mieszanki wytworzone w tej technologii znajdują zastosowanie głównie przy naprawach powierzchniowych lub przy konstrukcjach dróg o niskim znaczeniu (bardzo mały ruch lub sektor prywatny) [103, 138, 281, 296].
2. **Na pół-ciepło (HWMA)** - Druga konkurencyjna środowiskowo przyjazna technologia wynaleziona w 1999 r przez Jenkinsa. Zaliczana do ogólnej grupy technologii „na ciepło” (gdyż podział uzależniony jest od stosowanej techniki spieniania asfaltu). Umożliwia wbudowanie mieszanek w temperaturach 60 - 100 °C, dzięki wykorzystaniu odpowiednich technologii spieniania np. „*Evotherm ET*”. Polega ona na podgrzaniu kruszywa (lub mieszaniny destruktu i kruszywa) do 125-130 °C. Następnie w specjalnej komorze włącza się do rozgrzanego materiału niewielką ilość emulsji (1-3% zawartości mieszanki) zawierającej ok. 70% asfaltu i polimeru „*Styrene-Butadiene-Rubber*”

wymuszając w ten sposób proces spieniania asfaltu. Mieszanka wyjściowa cechująca się temperaturą rzędu 90 - 100 °C może być wbudowana w nawierzchnię, a następnie zagęszczana w temperaturach 60 - 100 °C. Ta obiecująca technologia również należy do nowych, wymaga jednak produkcyjnych udoskonaleń i dalszych badań związanych z cechami jakościowymi [62, 116, 296].

3. **Na ciepło (WMA)** - technologia rozwijająca się od początku lat 90-tych XX wieku. Powszechnie stosowana w USA. Stopniowo implementowana na rynek europejski jako równoważny zamiennik MMA wykonywanego „na gorąco”. Zaliczana do przyjaznych środowisku. Technologia opiera się głównie na uzyskaniu stosunkowo niskiej lepkości lepiszcza asfaltowego bez konieczności podgrzewania go do temperatur powszechnie stosowanych „na gorąco”. Istnieją również sposoby, które nie ingerują w właściwości reologiczne, zwiększając jedynie zwilżalność kruszywa przez asfalt. Obniżenie wymaganej temperatury produkcji, wbudowania i zagęszczenia realizuje się przez zastosowanie modyfikacji lepiszcza w postaci odpowiednich dodatków organicznych (np. woski, amidy kwasów tłuszczowych - Sasobit, Asphaltan, Rediset WMX, Licomont BS 100) lub chemicznych (np. Rediset LQ, CECA Base RT, Interflow) dozowanych przeważnie w ilości 0.1 - 3% wagi lepiszcza. Inną możliwością jest użycie właściwej technologii spienienia asfaltu, jednak efekt trwa od 6-7 godzin lub gdy temperatura materiału spadnie poniżej 100 °C. Generalnie temperatura produkcji, wbudowania i zagęszczenia różni się w zależności od zastosowanego dodatku lub odpowiedniej technologii spieniania. Można przyjąć, iż docelowo technologia „na ciepło” umożliwi obniżenie temperatur o 10-50 °C, w stosunku do mieszanek „na gorąco”, a docelowe warunki produkcyjne i konstrukcyjne klasują się w granicach 100 - 150 [°C] [68, 116, 279].
4. **Na gorąco (HMA)** - najstarsza, powszechnie stosowana na całym świecie technologia produkcji MMA. w porównaniu do nowo ewoluujących metod, zaliczana jest do niesprzyjających środowisku z powodu ilości emitowanych gazów i zapotrzebowania energetycznego niezbędnego do wytworzenia materiału. Technologia polega na oddzielnym podgrzaniu do wysokiej temperatury: lepiszcza asfaltowego (upłynnienie - zmniejszenie lepkości) oraz kruszywa (ułatwienie we właściwym obtaczaniu ziaren asfaltem), a następnie dodanie do lepiszcza środków adhezyjnych i ostatecznie mieszanki mineralnej, która musi zostać odpowiednio wymieszana w specjalnym mieszalniku. Mieszankę w technologii na gorąco zazwyczaj produkuje się w temperaturze nie większej niż 30 °C od docelowej temperatury zagęszczenia w aparacie Marshalla wskazanej w zaleceniach producenta lepiszcza asfaltowego. w zależności od wykonywanej w tej technologii mieszanki temperatury produkcyjne klasują się w zakresie 150 - 230 °C, natomiast wykonawcze (zagęszczenie na placu budowy) 140-190 °C. Generalnie istnieje niepisana zależność związana z temperaturami przygotowania mieszanek HMA - im twardsze lepiszcze asfaltowe i większa grubość docelowej warstwy tym wyższą temperaturę przygotowania należy zastosować. [245, 275].

Schemat ukazujący orientacyjne temperatury wytwarzania mieszanek w poszczególnych technologiach, trend zapotrzebowania energetycznego i emisję gazów produkcyjnych przedstawiono na Rys. 7. Warto nadmienić, by zdefiniować stan termiczny przygotowania mieszanek oraz określić ilość emitowanych gazów w omawianych technologiach (jako czynnik ekologiczny) za odniesienie przyjęto wodę, która zaczyna parować po przekroczeniu 100 °C.



Rys. 7: Temperatury produkcji różnych technologii MMA

Materiał wyprodukowany z użyciem poszczególnych technologii różni się między sobą nie tylko mechanizmem przetwarzania materiału i potrzebnym sprzętem, lecz przede wszystkim: składem (rodzaj lepiszcza/spoiwa i kruszywa), który definiuje cechy jakościowe MMA. Choć obecne technologie (CMA, HWMA, WMA) posiadają dużo zalet, głównie środowiskowych i wykonawczych w stosunku do HMA jak np.:

1. niższa temperatura produkcji - niższe zapotrzebowanie energetyczne do wytworzenia oraz niższa emisja oparów produkcyjnych,
2. mniejsze starzenie technologiczne mieszanki i sztywnienie w trakcie eksploatacji,
3. możliwość stosowania większych ilości destruktu asfaltowego (nawet do 50% składu),
4. krótszy czas oczekiwania na dopuszczenie ruchu samochodowego lub budowania kolejnej warstwy,
5. możliwość wydłużenia czasu transportu mieszanki z wytwórni na miejsce wbudowania (osiąganie wymaganych wskaźników zagęszczenia) - niskie zagrożenie przechłodzeniem się mieszanki,
6. możliwość zagęszczania mieszanek w trudnych warunkach środowiskowych,
7. możliwość zagęszczania mieszanek na budowie z użyciem mniejszej ilości przejazdów walca.

Pomimo wielu superlatyw, obecny poziom wiedzy i możliwości sprzętowych nie pozwala w równym stopniu dorównać lub przewyższyć jakościowo mieszanek wykonywanych w technologii HMA (uwzględniając wiele cech jednocześnie – trwałość zmęczeniowa, odporność na wodę i mróz etc.). Aby zobrazować różnorodność jakościową produkowanych mieszanek, w Tab. 1 zestawiono omawiane technologie wykazując wzajemne różnice. w ocenie zastosowano trójstopniową skalę porównywanych parametrów: mniejsza, większa, porównywalna wartość. Odniesieniem jest technologia „na gorąco” (HMA). Podkreśla się, iż przedstawione porównanie jest formą uogólnienia całej technologii. Każdy dodatek, modyfikator, uziarnienie MM, urządzenie i mechanizm (np. spieniania) indywidualnie definiuje cechy materiału. Te zaś wahają się między sobą w obrębie tej samej technologii - niekiedy znacząco [46, 103, 279].

Tab. 1: Różnice cech jakościowych wyprodukowanych mieszanek w odpowiednich technologiach produkcji względem technologii na gorąco

Rodzaj technologii	Cecha					
	Zawartość wolnych przestrzeni	Odporność na koleinowanie	Trwałość zmęczeniowa	Odporność na wodę i mróz (ITSR)	Odporność na spękania zmęczeniowe	Odporność na spękania niskotemperaturowe
WMA	Porównywalna: Sukhija - [279] Cheraghian - [48] Shiva - [269] Vaitkus - [294] Capitao - [38]	Mniejsza: Sukhija - [279] Cheraghian - [48] Shiva - [269]	Porównywalna: Sukhija - [279] Cheraghian - [48] Shiva - [269] Capitao - [38]	Porównywalna: Sukhija - [279] Cheraghian - [48] Shiva - [269] Vaitkus - [294] Capitao - [38]	Mniejsza: Cheraghian - [48] Capitao - [38]	Mniejsza: Cheraghian - [48] Vaitkus - [294] Capitao - [38] Yoo (porównywalna) - [316]
HWMA	Większa: Dinis-Almeida - [62] Al-Kafaji - [9]	Porównywalna: Ven - [296] Al-Kafaji - [9]	Mniejsza: Capitao - [38] Ven - [296]	Porównywalna: Capitao - [38] Ven - [296]	Mniejsza: Ven - [296] Ahmad - [8]	Porównywalna: Yoo - [316] Ahmad - [8]
CMA	Większa: Al-Kafaji - [9] Nassar - [185] Cheng L. - [143] Dulaimi - [65]	Większa: Lesueur - [138] Al-Kafaji - [9] Nassar - [185] Dulaimi - [65]	Porównywalna: Lesueur - [138] Cheng - [45] Cheng - [44] Dulaimi - [65]	Mniejsza: Cheng - [45] Nassar - [185] Cheng L. - [143] Dulaimi - [65]	Mniejsza: Lesueur - [138] Nassar - [185]	Mniejsza: Nassar - [185] Hussain - [123]

Warto również podkreślić, iż do tej pory naukowcy koncentrowali się na porównywaniu nowych technologii (dodatki, sposobu przetwarzania składników umożliwiającymi obniżenie temperatury produkcji) względem HMA (technologie na gorąco) ukazując ich wpływ na cechy jakościowe materiałów. Nie wyszczególniono opracowań związanych z trwałością zmęczeniową i regeneracją w odniesieniu do różnych technologii np. HMA vs WMA ani analiz porównawczych z związanych z tą tematyką.

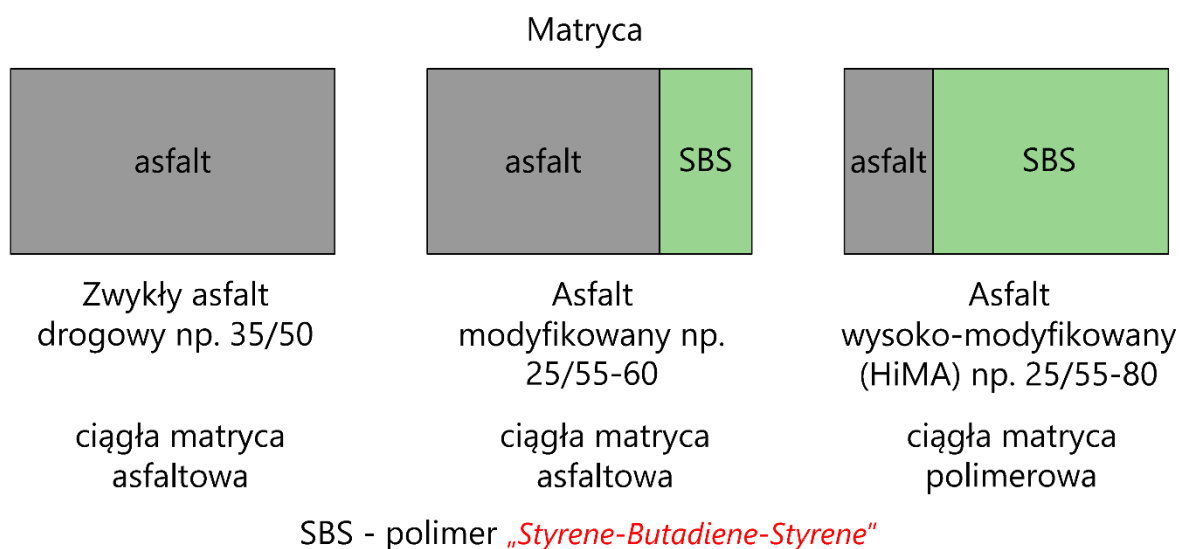
Różnice cech jakościowych w porównywanych technologiach większościowo wynikają z zastosowania dodatków, wdrożenia spienienia asfaltu lub efektu temperatury przetwarzania składników. Nie oznacza to jednak, iż należy zaniechać stosowania i rozwoju technologii WMA, HWMA i CMA. Wręcz przeciwnie, zasadnym jest ich rozwój z uwagi na szereg zalet środowiskowych i produkcyjnych, dążąc do rezygnacji w przyszłości z technologii HMA (lub ograniczenia jej stosowalności). Dopóki jednak technicznie jest ona lepsza, zaleca się ją stosować głównie do nowobudowanych odcinków drogowych.

Analizując mieszanki produkowane w technologii HMA do istotnych zagadnień należy rodzaj asfaltu stosowany do MMA. Wyszczególnia się różne lepiszcza: asfalty drogowe, miękkie drogowe, modyfikowane, modyfikowane z dodatkiem gumy. Do coraz częściej

badanych i stosowanych należą modyfikowane, które charakteryzują się zawartością polimeru w matrycy asfaltowej. Temat wzbogacania MMA polimerami jest analizowany od 40 lat, jednak cały czas ulegają rozwojowi receptury tych asfaltów. Istnieje kilka jego rodzajów, które można zastosować – SBS, SIS, SBR, SEBS, PE, EVA, EBA, PP, PVC i inne. Każdy z nich charakteryzuje się innymi właściwościami, które odpowiednio wpływają na MMA – np. aplikacja asfaltu z polimerem SIS (Styrene-Isoprene-Styrene) pozwala podnieść odporność mieszanki na koleinowanie się.

Do istotnych problemów związanych ze stosowaniem MMA zawierających asfalt modyfikowany jest bardzo wysoka temperatura ich produkcji (170 – 200°C). Zastosowanie tego typu asfaltów w technologiach innych niż „na gorąco” obecnie jest niemożliwe lub trudne (nieliczna ilość produktów tego typu na rynku), ponieważ występując w matrycy polimer potrzebuje wyższych temperatur, aby się upłynnić i w poprawny sposób obtoczyć ziarna kruszywa.

Pomimo trudności, obecnie na rynku istnieje duży popyt na analizy mieszanek zawierających lepiszcza asfaltowe z wysoką zawartością polimeru „Styrene-Butadiene-Styrene” (SBS). Są to tzw. lepiszcza modyfikowane lub wysokomodyfikowane (potocznie nazywane HiMA). Schemat ilustrujący rodzaj asfaltu ze względu na modyfikację matrycy tym polimerem zaprezentowano na Rys. 8.



Rys. 8: Schemat modyfikacji asfaltu polimerem SBS

Obecnie udowodniono, iż stosowanie tego modyfikatora poprawia np. odporność na deformacje trwałe lub na pękanie w niskich temperaturach. Wielu autorów podkreśla jednak, iż temat wpływu stosowania asfaltów modyfikowanych/wysokomodyfikowanych w MMA na jej cechy jakościowe (np. trwałość zmęczeniową, odporność na warunki środowiskowe, trwałość mieszanki) nie został wyczerpany i wymaga przeprowadzenia gruntowniejszych analiz [27, 157, 321]. Ponadto, obserwuje się istnienie wyraźnego problemu związanego z oceną trwałości mieszanek na bazie tego typu lepiszczy względem tych na bazie tradycyjnych asfaltów drogowych – o ile są lepsze, jaki jest faktyczny zysk z ich aplikacji do mieszanki i konstrukcji nawierzchni [32, 33]. Nie odnotowano obecnie opracowań rozwiązujących ten problem.

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu stanu wiedzy (odnoszącego się do technologii, lepiszczy i składu MMA), stwierdzono, iż skład MMA istotnie wpływa na trwałość materiału i jest powiązany z technologią produkcji. Temat stosowania odpowiednich

technologii produkcji MMA na jej trwałość również nie został wyczerpany. Nie odnotowano analiz mieszanek wykonanych w różnych technologiach ze względu na trwałość zmęczeniową i regenerację. Inne rozwijające się obecnie technologie: WMA, HWMA, CMA nie przewyższają jakościowo HMA. Stanowią jednak dla niej interesującą alternatywę, która powinna zostać przeanalizowana ze względu na trwałość MMA i porównana do technologii na gorąco. z przeglądu wynika również, iż nie wyszczególnia się kompleksowych porównań jakościowych w zakresie dwóch technologii – np. HMA i WMA. Zestawiane i porównywane ze sobą mieszanki w przeanalizowanej literaturze najczęściej różnią się między sobą MM lub rodzajem użytego lepiszcza. Należy zatem dokonać analizy z taką samą mieszanką mineralną i zawartością asfaltu uwzględniając odpowiednie założenia technologiczne.

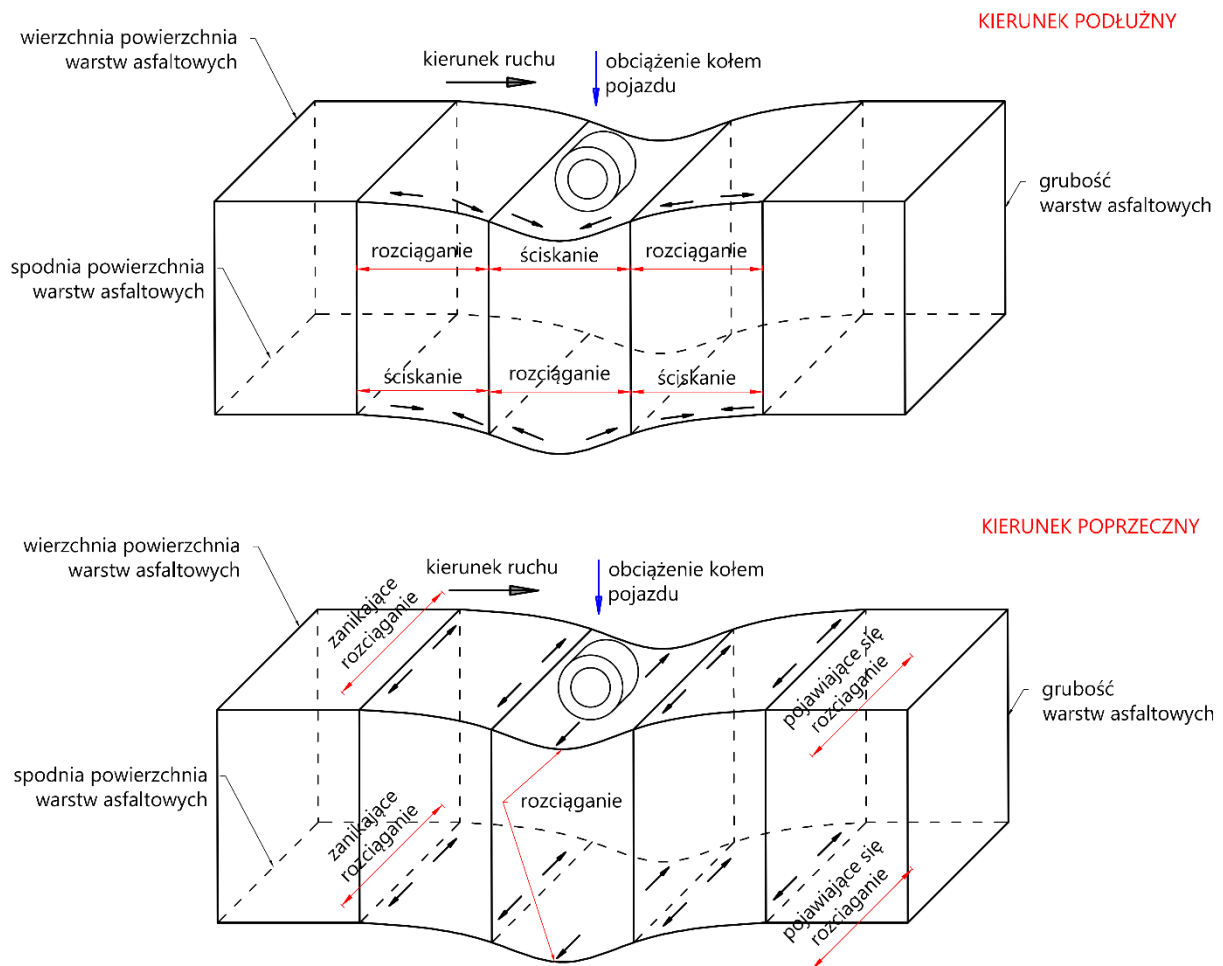
Technologia HMA jest w dalszym ciągu naukowo rozwojowa z uwagi np. na nowe receptury asfaltów charakteryzujących się wysoką zawartością polimeru SBS. Mieszanki z ich udziałem należy przeanalizować i odpowiednio odnieść do tych wykonywanych na bazie asfaltów drogowych (zwykłych). Dostrzega się również istotny problem związany z oceną i porównaniem mieszanek na bazie asfaltów zwykłych, modyfikowanych oraz tych w różnej technologii wykonania. Do tej pory nie opracowano sposobów, które pozwoliłyby określić o ile odpowiednie mieszanki są lepsze/gorsze od innych w odniesieniu do materiału i konstrukcji nawierzchni.

W tym celu zostaną wykonane kompleksowe analizy mieszanek na bazie asfaltów: zwykłych, modyfikowanych i wysokomodyfikowanych pozwalające skutecznie ocenić ich trwałość. Ponadto zostaną przeprowadzone badania porównawcze mieszanek wykonanych w dwóch technologiach produkcji – HMA (na gorąco) i WMA (na ciepło) ze względu na trwałość.

4.3. Trwałość zmęczeniowa MMA

Zmęczenie jest procesem, zachodzącym praktycznie we wszystkich materiałach konstrukcyjnych. Ulegają one stopniowej degradacji pod wpływem wielu powtarzalnych obciążeń (poniżej granicy wytrzymałości materiału), w konsekwencji prowadząc do zniszczenia [105]. Zjawisko to należy do podstawowych, które uwzględnia się w kryteriach wymiarowania elementów, by zapewnić ich trwałość w określonym czasie eksploatacyjnym.

W nawierzchniach drogowych wykonanych z mieszank mineralno-asfaltowych również występuje zjawisko zmęczenia. Spowodowane ono jest przez nieustanne cykliczne obciążanie i odciążanie warstw konstrukcji kołami przejeżdżających pojazdów. Samochody poruszające się w jednym kierunku wywołują swoim obciążeniem w układzie warstwowym konstrukcji przypadek zginania, który w zależności od usytuowania koła (obciążenia) względem rozpatrywanego punktu powoduje zamiennie ściskanie i rozciąganie materiału [163, 164]. Schematyczne zobrazowanie zachowania się układu warstwowego nawierzchni w kierunku ruchu (podłużnie) i prostopadłym do niego (poprzecznie) przedstawiono na Rys. 9



Rys. 9: Schematyczne zachowanie konstrukcji pod wpływem przejeżdżającego koła pojazdu

Należy dodać, iż obciążenie od kół pojazdu jest przeważnie niższe od wytrzymałości materiału na rozciąganie i ściskanie, jednak w zależności od warunków in-situ granica odporności na oddziaływanie mechaniczne ulega zmianie. Ponadto, gdy konstrukcja nawierzchni poddawana jest obciążeniu, maksymalne naprężenia i odkształcenia rozciągające powstają bezpośrednio pod jego kołami w najniższej warstwie całego układu, a ścisające

w najwyższej. Te charakterystyczne punkty przekroju mają fundamentalne znaczenie w wymiarowaniu i analizach trwałościowych, ponieważ są najczęstszym miejscem wystąpienia poważnych uszkodzeń - spękań zmęczeniowych [113, 197].

W analizach MMA wyróżnia się dwie główne definicje trwałości zmęczeniowej [4, 111, 113, 114, 223, 310]. Pierwsza z nich odnosi się do badań laboratoryjnych. Druga - do konstrukcji nawierzchni.

1. **Trwałość zmęczeniowa ustalana w laboratorium** – łączna liczba cykli obciążenia spełniająca wybrane kryterium zmęczeniowe określające moment zniszczenia badanego materiału (najczęściej wyrażane przez spadek początkowej wartości modułu sztywności MMA o 50%).
2. **Trwałość zmęczeniowa konstrukcji (obliczeniowa)** – łączna liczba powtarzalnych obciążeń (najczęściej o wartości przyjętej w danym kraju osi standardowej) jaką może przenieść projektowana konstrukcja warstw asfaltowych do wystąpienia określonej ilości spękań powierzchni nawierzchni na podstawie użytego kryterium zmęczeniowego uwzględniającego: skład mieszanek, badania laboratoryjne, oczekiwany % powierzchni spękanej nawierzchni, warunki klimatyczne. Termin ściśle powiązany z oceną szkody zmęczeniowej w rozpatrywanym przedziale czasowym.

Należy nadmienić, iż trwałość zmęczeniowa w laboratorium należy do istotnych. Pozwala ona ocenić konkretną receptę MMA i wskazać, czy mieszanka może być wbudowana w warunkach in-situ. Do oceny trwałości zmęczeniowej MMA często wykorzystuje się pojęcie „ ϵ_6 ” [54, 286] oznaczające poziom odkształcenia, przy którym mieszanka osiągnie wartość min. 1 milion cykli. Na podstawie badań in-situ z wykorzystaniem aparatury LCPC (*circular pavement fatigue test track*) [95, 286] ustalono, iż ten min. poziom liczby cykli jest równoznaczny z osiągnięciem 50% spękań powierzchni nawierzchni. Te zaś są miarą wyczerpania trwałości konstrukcji.

W powszechnie stosowanej ocenie zjawiska zmęczenia w nawierzchni stosuje się tzw. hipotezę skumulowania uszkodzeń wywołanych powtarzalnym obciążeniem od kół pojazdów. Zakłada ona, iż każdy pojazd powoduje miarę uszkodzenia (spękania), które powiększa się (kumuluje/propaguje) wraz z ilością przyłożonych do materiału obciążeń. Rozwijające się spękanie w konsekwencji prowadzi do zniszczenia układu warstw asfaltowych (stopniowy proces rozłożony w czasie).

Powszechnie stosowana hipoteza kumulacji zakłada również, iż laboratoryjne wyniki testów zmęczeniowych (przeprowadzonych np. przy różnych poziomach obciążenia i temperatury dla rozpatrywanej MMA – krzywe Wöhlera) bezpośrednio korelują z powstawaniem i rozwojem pęknięć w nawierzchni, którą uważa się za zniszczoną przy wystąpieniu 20% lub 50% spękań jej powierzchni [42, 89, 240]. Ogólną zależność matematyczną pozwalającą wyznaczyć trwałość konstrukcji zaprezentowano w równaniu (6), natomiast schemat obrazujący trwałość konstrukcji i mieszanki badanej w laboratorium zaprezentowano na Rys. 10.

$$N_f = k_1 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{k_2} \cdot \left(\frac{1}{E}\right)^{k_3}, \quad (6)$$

gdzie:

N_f – łączna liczba powtarzalnych obciążeń (cykli) określająca moment zniszczenia materiału przy zmęczeniu [-],

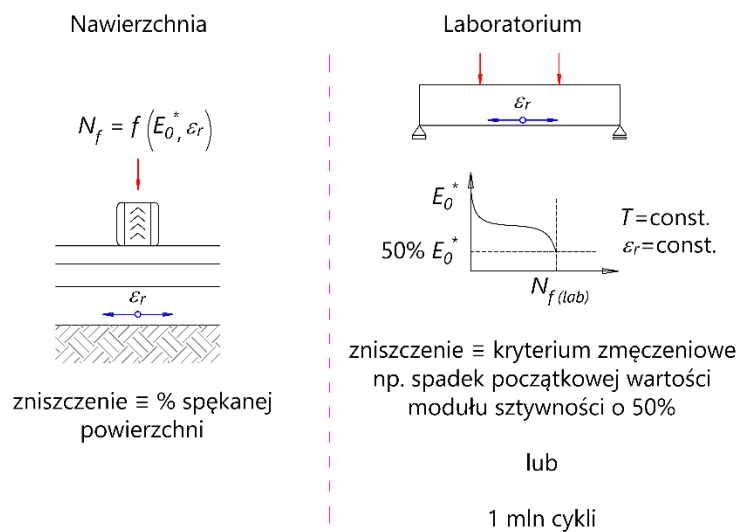
k_1 – terenowy współczynnik kalibracyjny [-],

k_2 – laboratoryjny współczynnik kalibracyjny w testach zmęczeniowych [-],

k_3 – laboratoryjny współczynnik kalibracyjny w testach zmęczeniowych [-],

ε_t – odkształcenie rozciągające na spodzie warstw asfaltowych [-],

E – moduł sztywności mieszanki mineralno-asfaltowej w warstwie [MPa].



Rys. 10: Schemat ustalania trwałości konstrukcji nawierzchni i mieszanek badanych w laboratorium

Wspomniana wcześniej zależność opisuje ogólny model zmęczeniowy znajdujący zastosowanie przy projektowaniu układów warstwowych konstrukcji nawierzchni. Nazywany jest on kryterium zmęczeniowym wykorzystywanym w mechanistyczno-empirycznym projektowaniu konstrukcji wykonanych z warstw asfaltowych (MEPDG). Jego wykorzystanie pozwala ocenić hipotetyczną „trwałość zmęczeniową” wyrażoną w cyklach, jaką cechować się będzie zaprojektowana konstrukcja bitumiczna w zadanych warunkach.

Wyróżnia się wiele kryteriów zmęczeniowych nawiązujących do równania (6), które można zastosować w ocenie zmęczenia konstrukcji np. model: Instytutu Asfaltowego, Shella, IRC (*Indian Road Congress*), AASHTO (2004). Zestawienie niektórych używanych modeli i ustalonych ich współczynników zaprezentowano w Tab. 2 na podstawie przeglądu Gupty [89] i obszernej pracy Huang [98].

Tab. 2: Matematyczne modele zmęczeniowe i współczynniki kalibracyjne do ogólnego równania (6)

Lp.	Nazwa modelu	Rok powstania	k_1	k_2	k_3
1	Indian Road Congress (IRC)	2012	2.21×10^{-4}	3.89	0.854
2	Instytut Asfaltowy	1982	1.133×10^{-3}	3.291	0.854
3	Shell	1978	5.35×10^{-7}	5.671	2.363
4	US army corps	1994	8.533×10^{-4}	5	2.66
5	AASHTO (2004)	2004	7.358×10^{-6}	3.949	1.281
6	Hajj	2005	2.911×10^{-2}	4.305	1.16
7	Belgian Road Research Center (BRRC)	1977	4.92×10^{-14}	4.76	0
8	Transport and Road Research Laboratory (TRRL)	1984	1.66×10^{-10}	4.32	0
9	Illinois Department of Transportation	1987	5×10^{-6}	3	0
10	Federal Highway Administration	1983	7.56	4.68	0
11	Austin Research Engineers (ARE)	2005	0.4875	3.0312	0.06529

Każdy z kryteriów różni się konstrukcją formuły. Niektóre z nich jak np. AASHTO 2004 dodatkowo umożliwiają wziąć pod uwagę właściwości objętościowe MMA oraz uwzględnić charakter pracy warstw w zależności od ich grubości i rodzaju analizowanych spękań zmęczeniowych [111]. Należy jednak nadmienić, iż omawiane kryteria zmęczeniowe zostały skalibrowane z badaniami polowymi konstrukcji nawierzchni, do których stosowano mieszanki mineralno-asfaltowe zawierające asfalt zwykły. Informacja jest istotna, ponieważ w przypadku zastosowania mieszanek z asfaltami modyfikowanymi lub innymi (w innej technologii wykonania) obliczeniowa trwałość konstrukcji jest niemiarodajna (niedoszacowana lub przeszacowana). Jest to problem, który dotąd nie został odpowiednio wyjaśniony.

Spośród wskazanych kryterium w tabeli modeli największą popularnością w Polsce cieszy się Instytut Asfaltowy oraz AASHTO 2004.

Ważnym terminem związanym z hipotezą kumulacji uszkodzeń jest tzw. „szkoda zmęczeniowa” – czyli ocena trwałości zmęczeniowej stanu faktycznego (od początku eksploatacji) względem obliczeniowej wynikającej z zastosowanego modelu w określonych warunkach. Aby ustalić stopień zniszczenia konstrukcji wywołanego zmęczeniem stosuje się liniową hipotezę kumulacji uszkodzeń Minera przedstawioną w równaniu (7). [64, 176, 190, 193, 261]

$$D = \sum_{i=1}^T \frac{n_i}{N_i}, \quad (7)$$

gdzie:

D – sumaryczna szkoda zmęczeniowa, jaką doznała nawierzchnia $\langle 0|1 \rangle$ [-],

T – całkowita liczba okresów obliczeniowych poddawanych ocenie [-],

i – numer kolejnego okresu obliczeniowego [-],

n_i – rzeczywista liczba powtarzalnych obciążeń w okresie i [-],

N_i – łączna liczba powtarzalnych obciążeń określająca moment zniszczenia materiału przy zmęczeniu w występujących warunkach dla okresu i [-].

Hipoteza Minera zakłada, iż nawierzchnia ulegnie zniszczeniu przez zmęczenie, jeżeli suma szkód wyznaczonych w badanych okresach przy określonych warunkach osiągnie

wartość jedności. Wykorzystywana zależność jest jedną z wielu istniejących liniowych hipotez kumulacji uszkodzeń [70], którą powszechnie stosuje się w drogownictwie. Termin szkody zmęczeniowej jest często wykorzystywany w kryteriach zmęczeniowych konstrukcji – np. do określenia % spękań aligatorowych w AASHTO 2004.

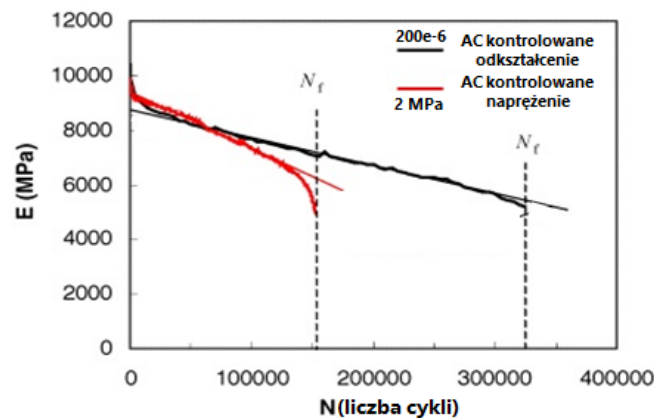
4.3.1. Obciążenie laboratoryjne w badaniach zmęczeniowych

Nawierzchnie drogowe podlegają bardzo zróżnicowanym obciążeniom od kół pojazdów. Ich oddziaływanie jest zależne głównie od charakterystyki pojazdu – impulsu przekazywanego przez oś, ciśnienia w oponie, rodzaju osi, materiału opony oraz wielu innych. z uwagi na zbyt dużą ilość zmiennych, praktycznie niemożliwym jest w badaniach laboratoryjnych odzwierciedlenie obciążenia jakie występuje in-situ. Częściowym rozwiązaniem problemu staje się wdrożenie pewnych uproszczeń, umożliwiających przeprowadzenie badań.

Istnieje wiele rodzajów dynamicznych programów, które mogą zostać zastosowane w testach zmęczeniowych. Pierwszym elementem rozróżniającym mechanizm badania jest tzw. warunek aplikowanego obciążenia laboratoryjnego. Wyróżnia się dwa podstawowe rodzaje:

1. **warunek kontrolowanego odkształcenia** – stała wartość amplitudy odkształcenia (czasem stosuje się skrót myślowy mówiąc o stałej zadanej wartości przemieszczenia, która wymusza stały poziom odkształcenia w próbce),
2. **warunek kontrolowanego naprężenia** – stała wartość amplitudy naprężenia.

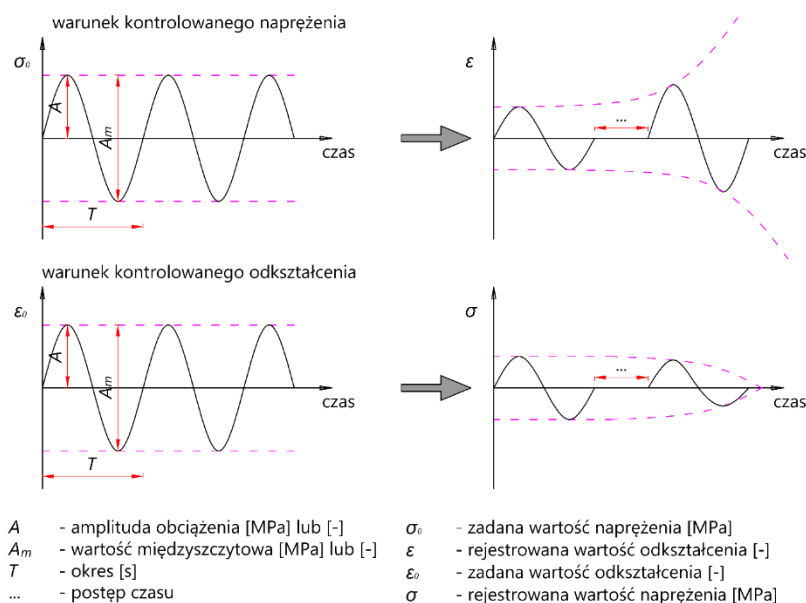
Analizy przeprowadzone na MMA przez Lundstorma i Artamendiego [20, 160, 161] w omawianych warunkach wykazały, iż rezultat w pozyskanej trwałości zmęczeniowej badanej mieszanki jest różny. Przykładowy wynik badania zamieszczono na Rys. 11.



Rys. 11: Różnice pozyskanej trwałości zmęczeniowej pomiędzy warunkami kontrolowanego odkształcenia a naprężenia [20]

W przypadku warunków kontrolowanego odkształcenia aplikacja stałej jego wartości prowadzi do spadku naprężeń w czasie. Trwałość w takich warunkach może być nawet kilka razy większa niż w przypadku warunków kontrolowanego naprężenia (dla tego samego poziomu obciążenia w chwili startu badania). Efekt pierwszego obciążenia materiału jest kluczowy z punktu widzenia powstania spękania i jego rozwoju, które rzutuje na trwałość zmęczeniową - inicjacja spękania. Powstałe uszkodzenie w kolejnych cyklach ulega gwałtownemu rozwojowi, ponieważ siła wytężająca przekrój nie uwzględnia osłabienia, które

jest przyczyną gwałtownego przyrostu amplitudy odkształcenia, dlatego też trwałość zmęczeniowa w warunkach kontrolowanego naprężenia jest mniejsza. w przypadku warunków kontrolowanego odkształcenia przekrój poddawany obciążeniu początkowo doznaje uszkodzenia, lecz spadająca z czasem wartość naprężenia skutkuje zatrzymaniem lub znacznym spowolnieniem propagacji uszkodzenia wywołanego pierwszym cyklem. Obserwacje wykazały, iż w tych warunkach, badana MMA często przystosowuje się do obciążenia - doznaje „ułożenia w prasie”. Omawiane przypadki zaprezentowano graficznie na Rys. 12.



Rys. 12: Schemat obciążania i reakcja materiału w warunkach kontrolowanego naprężenia i odkształcenia

Zadane warunki testu powinny odzwierciedlać zachowanie MMA w odniesieniu do miejsca przeznaczenia – odpowiedniej warstwy konstrukcji nawierzchni. Na przestrzeni kilkudziesięciu lat naukowcy jak: Doan [63], Myre [182], La Roche [135], Soltani [21], Collopa [49] oraz Perraton [201] usiłowali ustalić charakter pracy warstw konstrukcji. Dowiedziono, iż:

1. **warstwy cienkie** - o grubości mniejszej niż 6.0 cm pracują w warunkach kontrolowanego odkształcenia (odkształcenie dolnej, mniej sztywnej warstwy wpływa na odkształcenie warstwy wyżej położonej),
2. **warstwy pośrednie** – o grubości od 6.0 do 15.0 cm pracują w warunkach mieszanych (kontrolowane odkształcenie + naprężenie),
3. **warstwy grube** – o grubości ponad 15.0 cm pracują w warunkach kontrolowanego naprężenia.

Obecnie nie wykonuje się badań w ocenie trwałości zmęczeniowej z zastosowaniem warunków kontrolowanego naprężenia. Tego typu testy należą do technicznie trudniejszych z uwagi na wymagany zaawansowany sprzęt pozwalający zapewnić stały poziom naprężenia. Dodatkowo wyszczególnia się brak kryteriów pozwalających interpretować wynik.

Obecne metody projektowania konstrukcji nawierzchni (MEPDG) na bazie kryteriów zmęczeniowych uwzględniają: maksymalne odkształcenie rozciągające, jakie może wystąpić na spodzie warstw asfaltowych (rozdział 4.3) oraz wartość modułu sztywności mieszanki, którą ustala się w warunkach kontrolowanego odkształcenia [221]. Ponadto kryteria zostały skalibrowane z badaniami laboratoryjnymi wykorzystującymi ten warunek tak, aby

z zadowalającym przybliżeniem korelować trwałość zmęczeniową konstrukcji z laboratoryjną MMA. Te elementy sprawiają, iż powszechnie do badań zmęczeniowych stosuje się warunek kontrolowanego odkształcenia.

Drugim elementem charakteryzującym mechanizm obciążania w programie laboratoryjnym jest jego schemat. Wyróżnia się:

1. cykliczny **ustalony** (o ściśle określonym impulsie i kształcie obciążenia, cechującym się powtarzalnością),
2. cykliczny **nieustalony** (zmienny, losowy, nieregularny – brak powtarzalności, każde obciążenie (impuls) jest inne co do wartości i kształtu).

W warunkach laboratoryjnych jak, również w projektowaniu nawierzchni drogowej stosuje się schemat cyklicznie ustalony [163].

Do kolejnego elementu charakteryzującego dynamiczny program badania (spośród cyklicznie ustalonych schematów) należy rodzaj cyklu. W literaturze [104, 105, 134, 163] wyróżnić można cztery powszechnie stosowane rodzaje.

1. Cykl **jednostronny** – materiał poddawany jest nieustannemu rozciąganiu lub ścisaniu. Brak elementu odciążenia. Rodzaj ten powoduje występowanie zjawiska pełzania dla warunków kontrolowanego naprężenia lub relaksacji przy kontrolowanym odkształceniu.
2. Cykl **odzerowo tętniący** – materiał poddawany jest rozciąganiu lub ścisaniu. Występuje element chwilowego odciążenia w miejscu wygaszenia impulsu obciążenia. Ten rodzaj również powoduje występowanie zjawiska pełzania dla warunków kontrolowanego naprężenia lub relaksacji przy kontrolowanym odkształceniu.
3. Cykl **dwustronny (niesymetryczny)** – materiał poddawany jest naprzemiennemu rozciąganiu i ścisaniu z wyraźną dominacją wybranego zachowania. Rodzaj ten powoduje występowanie zjawiska pełzania (dominacja) ze zmęczeniem dla warunków kontrolowanego naprężenia lub relaksacji (dominacja) ze zmęczeniem przy kontrolowanym odkształceniu.
4. Cykl **wahadłowy** – materiał poddawany jest symetrycznemu (względem punktu wychylenia) rozciąganiu i ścisaniu. Rodzaj ten powoduje występowanie zjawiska zmęczenia (dominacja) z pełzaniem (znikome) dla warunków kontrolowanego naprężenia lub zmęczenia (dominacja) z relaksacją (znikoma) przy kontrolowanym odkształceniu.

Badania zmęczeniowe przeważnie w ocenie trwałości MMA wykorzystują w swoim programie cykl wahadłowy (np. badanie czteropunktowego zginania 4-PB-PR), tak by jak najlepiej oddać charakter tego zjawiska. Mimo wszystko w ostatnim czasie rozpowszechnia się stosowność testu AASHTO TP-107 (znany jako SVEDC), w którym aplikuje się cykl odzerowo tętniący z uwagi na możliwość dokonania dodatkowej oceny parametrów lepko-sprężystych mieszanki.

Kształt zadawanego obciążenia również należy do ważnych elementów dynamicznego programu obciążenia. Obecne możliwości techniczne pozwalają zastosować następujące kształty [184, 253]:

1. prostokątny,
2. sinusoidalny,
3. funkcja Haversine-a,
4. trójkątny (piła: symetryczna, z pozytywnym zębem, z negatywnym zębem),
5. zadana funkcja ustalona.

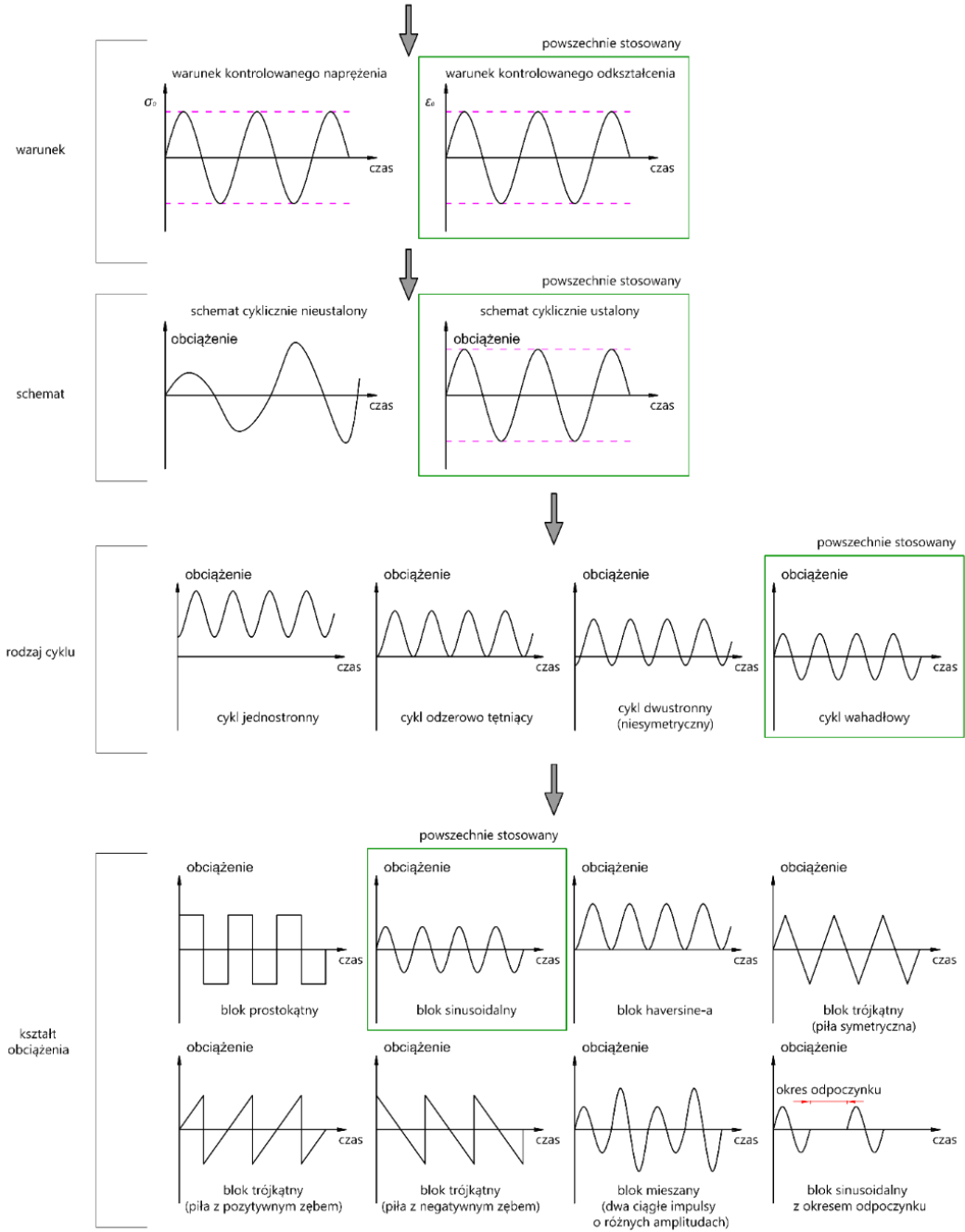
Ponadto, wymienione bloki można dowolnie konfigurować i mieszać wprowadzając nawet okresy odpoczynku (chwilowe odciążenie).

Uwzględniany w programie badawczym kształt zadawanego obciążenia należy dostosować do warunków in-situ - rozchodzenia się impulsu obciążenia w konstrukcji oraz sposobu powstawania uszkodzenia w badanym materiale. Kim [129] oraz Myers [181] zajmowali się pomiarami in-situ wpływu opon na zmęczenie i powstawanie spękań analizowanych odcinków doświadczalnych. Autorzy wykazali, iż odpowiedź sensorów zamontowanych wewnątrz układu warstwowego przypomina kształt sinusoidy, potwierdzając zastosowanie tego typu funkcji (kształtu) obciążenia w walidacji laboratoryjnej.

W artykule Di Benedetta [59], książce Paisa [40] i zbiorczego opracowania RILEMU [243] autorzy również stosują sinusoidalny kształt impulsu, podkreślając łatwość jego implementacji oraz przede wszystkim skuteczność w ocenie cech zmęczeniowych MMA.

Zbiorcze podsumowanie różnych przedstawionych możliwości programów dynamicznego obciążenia i te typowo skierowane do oceny trwałości zmęczeniowej MMA zamieszczono na Rys. 13.

obciążenie laboratoryjne do badania
trwałości zmęczeniowej MMA
(opcje programu dynamicznego)



Rys. 13: Dynamiczne obciążenie w testach zmęczeniowych

4.3.2. Charakterystyka testów zmęczeniowych

Obecnie można zastosować wiele metod badawczych umożliwiających ocenę trwałości zmęczeniowej MMA. Wspólnym ich aspektem jest:

1. aplikowany schemat obciążenia cyklicznie ustalonego,
2. cykl wahadłowy (wywołanie zmęczenia),
3. sinusoidalny blok obciążenia (kształt).

Powszechnie stosowane elementy programu obciążenia wyszczególniono zieloną ramką w poprzednim rozdziale na Rys. 13. Pomimo podobieństw w wykorzystywanym programie obciążania, badania różnią się między sobą m.in.:

1. kształtem i wymiarami próbek rozpatrywanego MMA,
2. oszlifowaniem materiału (pełne oszlifowanie – gładka powierzchnia, częściowe oszlifowanie – przygotowanie wybranych płaszczyzn, bez szlifowania – próbka o surowej strukturze powierzchni),
3. schematem statycznym,
4. warunkiem obciążenia,
5. mocowaniem materiału (np. z zastosowaniem specjalnych klejów mocujących lub szcęk),
6. warunkami badania (np. temperatura, częstotliwość, punkt pomiaru),
7. kwestiami technicznymi (np. sposób mocowania czujników pomiarowych).

Omawiane parametry badania zróżnicowanie odzwierciedlają warunki in-situ (w nawierzchni), natomiast sama realizacja testu jest mniej lub bardziej złożona będąc jednocześnie kosztowna (wymaga się maszyn wytrzymałościowych nowej generacji).

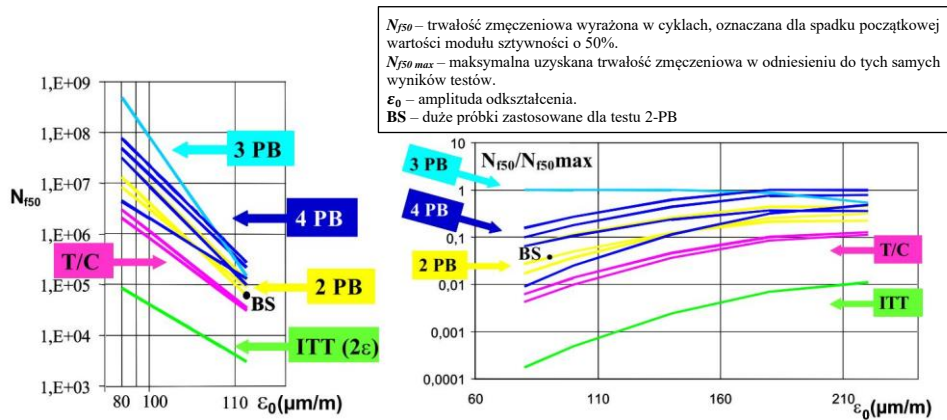
Celem ujednoczenia, w literaturze związanej z analizami trwałościowymi MMA – prace: Di Benedetto [58], Franckena [73], Lefevre’a [136] wprowadzają jeden spójny podział zmęczeniowych metod badawczych na:

1. testy **homogeniczne** – rozkład naprężeń i odkształceń przy zmęczeniu jest jednorodny w całym materiale (np. T/C – rozciąganie-ściskanie, ścinanie, ścinanie mechaniczne),
2. testy **niehomogeniczne** - rozkład naprężeń i odkształceń przy zmęczeniu nie jest jednorodny w całym materiale (dwu-(2PB), trój- (3PB), cztero-(4PB) punktowe zginanie, rozciąganie pośrednie - ITT).

Dokonując przeglądu aplikowanych badań w ocenie trwałości zmęczeniowej najczęściej stosuje się testy: T/C, 3PB, 4PB, 2PB, ITT. Pozostałe metody związane z wykorzystaniem np. ścinania MMA praktycznie zostały wykluczone z użycia lub stosuje się je relatywnie rzadko.

Pomimo wielu możliwości realizacji badań zmęczeniowych, do głównych problemów testów należy rozbieżność otrzymywanych rezultatów korzystając z różnych metod. Di Benedetto wraz z zespołem w projekcie badawczym prowadzonym dla RILEM-u („*International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures*”) [54, 56, 58] przeanalizowali stosując najczęściej wybierane testy (T/C, 3-PB, 4-PB, 2-PB, ITT) zmienność trwałości zmęczeniowej wyrażonej w cyklach od poziomu obciążenia (badania wykonano w jednakowych warunkach termicznych – 10.0 °C i przy tej samej częstotliwości 10.0 Hz). w swojej pracy wykazali, iż testy wykorzystujące przypadek zginania (2-PB, 3-PB, 4-PB) cechują się wyższą trwałością niż pozostałe wspomniane. Ponadto

udowodniono, iż badania są bardzo wrażliwe na warunek i rodzaj stosowanego obciążenia oraz użyty schemat, a możliwości wzajemnej korelacji wyników testów są zagadnieniem trudnym i obecnie nierozwiązanym (szczególnie pomiędzy warunkiem kontrolowanego odkształcenia, a naprężenia). Omawiany rezultat pracy autorów, ukazany w skali logarytmicznej zamieszcza się na Rys. 14.



Rys. 14: Wyniki trwałości zmęczeniowych wybranych testów przy zastosowaniu różnych poziomów obciążenia [54]

Warto dodać, iż różnice pozyskanej trwałości zależą nie tylko od rodzajów testów, lecz również np. od wymiarów próbki, zastosowanej maszyny, ułożenia materiału w prasie lub innych czynników, które w efekcie prowadzą nawet do rozbieżności wewnątrz danej metody.

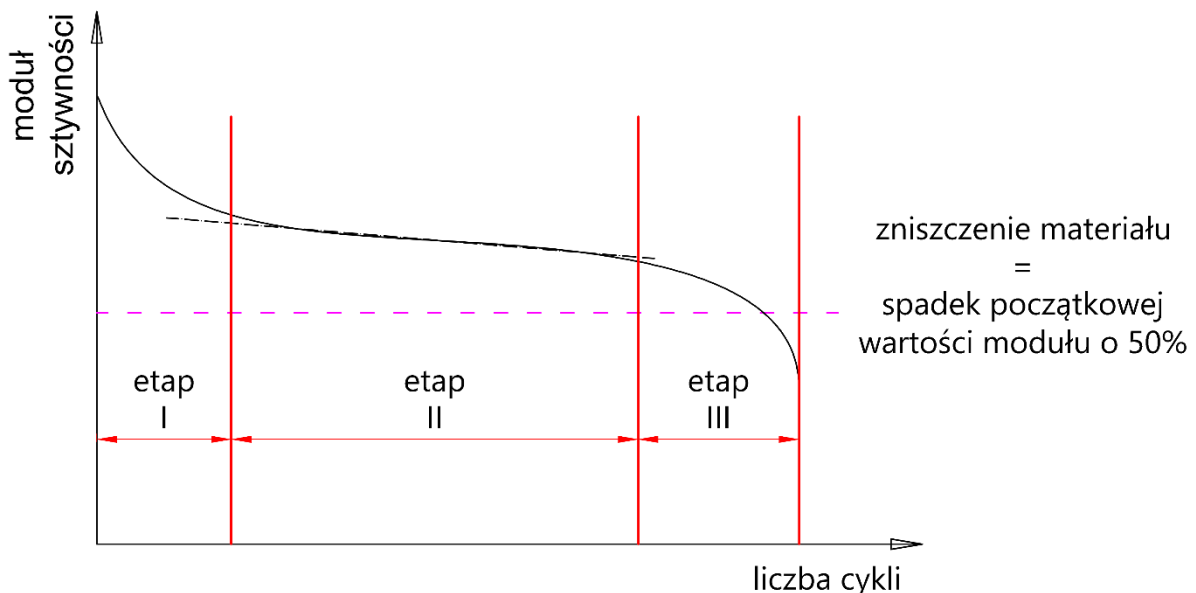
Kolejnym ważnym problemem poruszonym przez naukowców był dobór właściwego testu (spośród najczęściej wybieralnych - T/C, 3-PB, 4-PB, 2-PB, ITT) do oceny trwałości zmęczeniowej, tak aby dobrze odwzorowywać warunki panujące w nawierzchni. w obszernym programie badawczym SHRP prowadzonym pod kierownictwem Harrigana [92] wykazano, iż metody wykorzystujące przypadek zginania (dla asfaltów zwykłych w MMA) mogą być uznane za reprezentatywne. Badania kontynuowane przez Di Benedetta [56], Maggiore [166] i Prowella [237] (pod egidą programu NCHRP – „*National Cooperative Highway Research Program*”) wskazały, iż spośród metod zginania, test czteropunktowego zginania (4-PB) najlepiej symuluje warunki in-situ. Późniejsza praca Mackiewicza [163], również podkreśla zasadność używania tej metody w ocenie trwałości z uwagi na jej dokładność. Warto nadmienić, iż przypadek czteropunktowego zginania cechuje się występowaniem stałej wartości momentu zginającego pomiędzy punktami przyłożenia obciążenia. Ponadto omawiany czynnik umożliwia wykonanie dokładniejszej oceny wyniku badania ze względu na stabilność warunków panujących w miejscu pomiaru (jednorodny rozkład naprężeń i odkształceń pomiędzy punktami przyłożenia siły). Ta zaś przekłada się na zadowalającą powtarzalność wyników analizowanych próbek w stosunku do pozostałych schematów podparcia. Późniejsze analizy wykonane przez Soulimana [172] wykazały, iż metody wykorzystujące zginanie (w szczególności 4-PB) można efektywnie zastosować do oceny trwałości zmęczeniowej w przypadku MMA z użytym lepiszczem modyfikowanym lub dodatkiem gumy.

4.3.3. Analiza procesu zmęczeniowego MMA

W przypadku analiz badań zmęczeniowych obserwuje się dwa problemy widoczne podczas przebiegu testu, które mogą wpływać na trwałość MMA:

1. fenomen wewnętrznego ogrzania próbki i zjawisk pokrewnych,
2. odpowiedź materiału wyrażana zmianą modułu sztywności MMA od liczby cykli.

W badaniu zmęczeniowym podstawowym wykresem wykorzystywanym do analiz jest przebieg (zmiana) modułu sztywności (omawianego w rozdziale 4.1) od liczby cykli, aż do osiągnięcia punktu zniszczenia (najczęściej spadek początkowej wartości tego modułu o 50.0 %). Na podstawie jego obserwacji można śledzić degradację badanego materiału wywołaną działającym obciążeniem oraz pozyskać inne cenne informacje. Krzywa zmiany modułu sztywności MMA od chwili rozpoczęcia, aż do punktu zniszczenia jest nieregularna, przypominająca obróconą funkcję sigmoid. Wyszczególnia się trzy podstawowe jej etapy zobrazowane na Rys. 15.



Rys. 15: Typowy wykres zmiany modułu sztywności z wyszczególnionymi etapami badania

1. **Etap I** - moduł sztywności gwałtownie spada w krótkim czasie. Zmiana ta spowodowana jest przez: powstanie mikro-pęknięć wywołane przyłożonym obciążeniem do „świeżej” próbki [163], zjawiska tiksotropowe (zmiana lepkości lepiszcza asfaltowego w czasie działania sił stycznych) – przedstawione w pracy Di Benedetto [54, 56, 57] i Mangiafica [168] oraz fenomen wewnętrznego ogrzania próbki opisany w publikacjach: La Roche’a [53], Di Benedetto [55] i Pronka [233, 234].
2. **Etap II** – moduł sztywności spada ze stałą szybkością. Zjawiska uwidocznione w pierwszym etapie stabilizują się, zmniejszając swój wpływ na degradację materiału. Zmęczenie staje się dominujące.
3. **Etap III** – dochodzi do zniszczenia próbki. Materiał jest osłabiony powstałymi uszkodzeniami, tak iż nie jest w stanie przenosić aplikowanego obciążenia. Zniszczenie należy utożsamiać z gwałtownym pęknięciem materiału w tym etapie. Taka sytuacja

może zaistnieć, ale częstszym przypadkiem jest osiągnięcie wartości modułu wynikającego z przyjętego kryterium zmęczeniowego bez przełamania próbki.

Problemem, który może wpływać na poprawną interpretację trwałości zmęczeniowej jest fenomen wewnętrznego ogrzania dominujący w etapie I. Pojawia się niezależnie od stosowanej metodologii badawczej. Związany jest on z przemianą energii rozproszonej obciążenia w termiczną (cieplną). Przemiana energetyczna powoduje podgrzanie badanego elementu (nawet o 1.3 °C - badania Pronka [234]), a następnie dyssypację ciepła z całej objętości materiału. Warto podkreślić, iż znacząca część energii rozproszonej koncentruje się najpierw w asfalcie zanim przeniknie przez ziarna kruszywa MMA (być może ze względu na jego zdolności absorpcyjne ciepła), efektem czego jest gwałtowny spadek wartości modułu. Ponadto omawiane zmiany energetyczne mogą spowodować jego spadek w etapie I i nawet o kilkanaście %. Di Benedetto [55] w swojej pracy wspominał, iż fenomen wewnętrznego ogrzania może zaburzać wyniki trwałości zmęczeniowej. Sugestią autora było wprowadzanie korekty do procedury oceny w taki sposób, aby wyeliminować dane zarejestrowane w Etapie I (w których dominują omówione zjawiska) skupiając się na etapie II (gdzie dominuje zmęczenie). Późniejsze badania Di Benedetto [54, 56] ukazały, iż zmiany modułu sztywności i zjawiska zachodzące w etapie I należą do całkowicie odwracalnych poprzez zastosowanie np. okresu odpoczynku, jednak stosowanie przerwy podczas trwania badania może być trudne technicznie do wykonania. Pereira [200] korelując badania trwałości zmęczeniowej laboratorium-nawierzchnia nawiązał do badań Di Benedetto proponując dla testu 4-PB modyfikację pozyskanej wartości zmęczeniowej o 10% otrzymując zadowalające rezultaty.

Pomimo, iż fenomen ogrzania próbki we wczesnej fazie badania wydaje się mieć znaczenie, to jednak obecnie nie ma ścisłej regulacji dotyczącej korekty interpretacji wyniku trwałości zmęczeniowej w materiale.

Drugim ważnym problemem, związanym z interpretacją wyniku jest odpowiedź materiału wyrażana zmianą modułu sztywności MMA od liczby cykli na wykresie w zależności od warunku obciążenia testu lub zastosowanej amplitudy wymuszenia. Lundstrom [159] w swoim artykule (wykorzystując testy homogeniczne i aplikując sinusoidalny impuls wymuszenia) wskazał, iż wyniki testów zmęczeniowych mogą różnić się nie tylko od warunków obciążenia (kontrolowane odkształcenie, naprężenie), lecz również od geometrii próbki i wysokości amplitudy obciążenia. Ponadto przeprowadzone analizy potwierdziły, iż mieszanki mineralno-asfaltowe poniżej ściśle nieustalonego poziomu amplitudy (zależnego od składu mieszanki i technologii wykonania) nie kumulują uszkodzeń, potwierdzając istnienie granicy wytrzymałości materiału (poziomu obciążenia poniżej, którego degradacja materiału wyrażona spadkiem wartości modułu nie postępuje – moduł stabilizuje się).

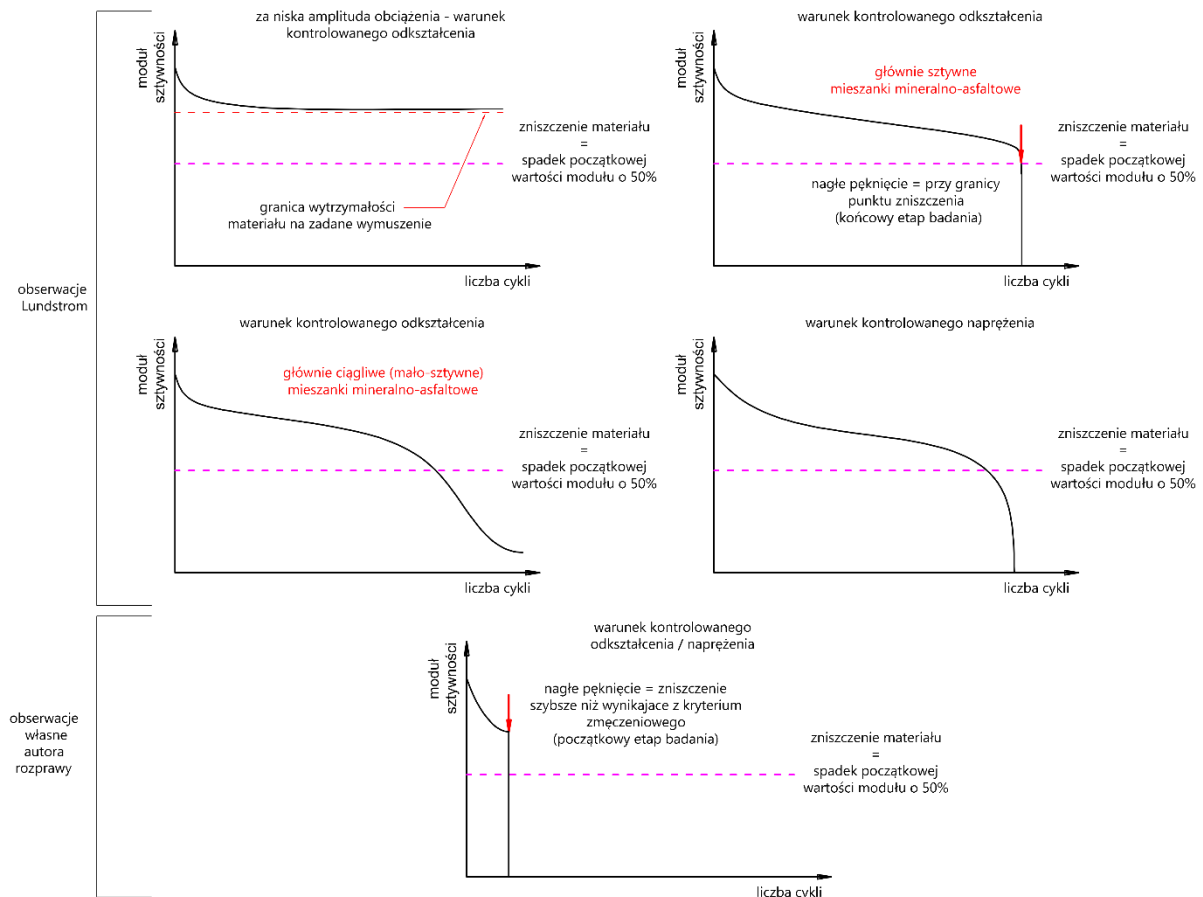
Kolejna obserwacja Lundstrom-a [159] wskazuje, iż sztywniejsze (i bardziej kruche) MMA charakteryzują się stosunkowo niewielkimi zmianami wartości modułu – etap II badania trwa aż do punktu zniszczenia (spadek wartości początkowego modułu o 50%), a etap III jest chwilowy/natychmiastowy (próbka pęka). Natomiast, gdy amplituda obciążenia znajduje się poniżej wspomnianej granicy wytrzymałości materiału, sztywniejsze MMA są w stanie wytrzymać nieokreśloną ilość cykli w badaniu zmęczeniowym.

Mieszanki bardziej ciągliwe - o niskich wartościach modułu charakteryzują się krótszym etapem II. Etap III jest mocno krzywoliniowy, zaczyna się znacznie wcześniej przed punktem zniszczenia i może trwać (bez przełamania próbki) dostatecznie długi okres czasu. Te obserwacje potwierdzają, iż osiągnięcie zniszczenia nie jest równoznaczne z przełamaniem materiału.

Lundstrom podsumował swoje analizy stwierdzeniem, iż amplituda obciążenia bliższa granicy wytrzymałości materiału na wprowadzone wymuszenie jest niezbędna do wywołania uszkodzenia w materiale (szczególnie sztywnej MMA). Jej ustalenie nie należy do zadań

łatwych i rozwiązanych. Dobór poziomu obciążenia zależy od sztywności mieszanki i nie ma algorytmu, który bez badań pozwalałby wskazać amplitudę, którą trzeba zadać. w konsekwencji testy zmęczeniowe mogą zakłamywać rzeczywistość w ocenie trwałości – sztywna mieszanka o dużej zawartości wolnych przestrzeni, może być trwała zmęczeniowo w cyklach, ale jednocześnie być bardzo podatna na pęknięcia.

Omówione obserwacje zawarte w badaniu Lunstrom-a przedstawione są w postaci czterech typowych wykresów zmiany modułu sztywności zaprezentowanych na Rys. 16.



Rys. 16: Interpretacje graficzne testów zmęczeniowych w ocenie trwałości

Spośród czterech typowych możliwości interpretacji poruszonych w pracy Lunstroma [159], wyszczególnić można jeszcze jedną ukazaną na Rys. 16. z doświadczenia własnego autora rozprawy, pęknięcie próbki (niezależnie od sztywności MMA) może wystąpić w początkowym etapie (I lub II) badania. Do najczęstszych przyczyn należą: wewnętrzne imperfekcje materiału, złe mocowanie materiału w prasie, temperatura prowadzonych badań (im niższa, tym większe prawdopodobieństwo wystąpienia gwałtownego, szybszego pęknięcia), za wysoka amplituda obciążenia, technologiczne mikropęknięcia powstałe na drodze produkcji lub transportu. Wszystkie czynniki wywołujące ten efekt powodują, iż badania powinny być realizowane na większej ilości próbek lub w przypadku powtarzającego się problemu należałoby zastosować inne podejście np. związane z trwałością zmęczeniową przy pękaniu (zdolność materiału do pęknięcia dominuje).

4.3.4. Kryteria zmęczeniowe

Zdefiniowanie momentu zniszczenia badanego materiału (zwane kryterium zmęczeniowym), należy do podstawowych czynności, które ustala się w celu zidentyfikowania trwałości wyrażonej w cyklach pod zadaniem programem obciążenia. Obecnie istnieje wiele kryteriów różniących się między sobą sposobem interpretacji. Spośród nich wyróżnić można trzy grupy:

1. kryteria zmęczeniowe opierające się na zmianie modułu sztywności,
2. kryteria zmęczeniowe bazujące na zmianach energetycznych (energia dyssypacji),
3. inne np. opierające się na zmianie wartości kąta przesunięcia fazowego.

Do pierwszej grupy należą kryteria skupiające się na zmianach modułu sztywności (parametru materiałowego opisanego w rozdziale 4.1). Nieustannie są one rozwijane od późnych lat 60-tych XX wieku znajdując powszechne zastosowanie w badaniach laboratoryjnych, ze względu na swoją dokładność, prostotę oraz wykorzystanie w kalibracji modeli zmęczeniowych stosowanych do projektowania konstrukcji. Wyszczególnia się cztery kryteria w tej grupie, do których należą:

1. **kryterium spadku początkowej wartości modułu sztywności o 50%** (potocznie zwane arbitralnym lub konwencjonalnym) - [178] ,[50] (należy ono do powszechnie stosowanych),
2. **kryterium Franckena** – [72, 73],
3. **kryterium Rowe’a** – [167], [247], [274],
4. **kryterium Abojaradeh’a (znane jako ASU)** – [1, 272].

Drugą grupę stanowią tzw. kryteria energetyczne, opierające się na dyssypacji – rozpraszaniu energii, które zostało opisane w pracach Dijk’a [297–299], Rowe’a [252], Shen’a [263] i Soulimana [272]. Wielu badaczy wdrożyło koncepcję energii rozproszonej w definiowaniu uszkodzeń zmęczeniowych oraz punktu zniszczenia proponując następujące kryteria:

1. **kryterium Hopeman’a** – [236],
2. **kryterium Pronk’a** – [235],
3. **kryterium Carpentera** – [39].

Do trzeciej i ostatniej grupy kryteriów zmęczeniowych można zakwalifikować wszystkie „inne”, nie bazujące na zmianach modułu lub energii. Przykładem jest **kryterium zmiany kąta przesunięcia fazowego** stosowane w amerykańskim badaniu zmęczeniowym AASHTO TP-107 [16] potocznie zwanym S-VECD (*eng. Simplified Viscoelastic Continuum Damage*).

Głównym problemem właściwej oceny trwałości zmęczeniowej jest dobór odpowiedniego kryterium. Naukowcy jak np. Khodary [126], Pasetto [194], Reyes [241], Rowe [251], Abojaradeh [1], Souliman [273] i inni [110, 158] zajmowali się w swoich badaniach porównywaniem wyników z użyciem wyszczególnionych kryteriów zmęczeniowych, tak by jak najlepiej oszacować trwałość i zrozumieć zmiany strukturalne badanego materiału. Badania prowadzono na mieszankach mineralno-asfaltowych z asfaltem zwykłym i dodatkiem gumy. Rezultaty były niejednoznaczne – jedne kryteria doprowadzały do zaniżenia wyników, inne do zawyżenia. Ponadto te rozbieżności uniemożliwiały znalezienie wzajemnych korelacji – szczególnie z powszechnie stosowanym kryterium konwencjonalnym, budzącym jednocześnie

wiele wątpliwości. Dopiero w 2006 roku Abojaradeh [1] – twórca kryterium ASU, udowodnił zasadność stosowania kryterium konwencjonalnego, w oparciu o swoje własne w teście 4-PB. Wyniki w ocenie trwałości były niemal identyczne, niezależnie od warunku zastosowanego obciążenia. Badania Soulimana [272–274] również potwierdziły zasadność używania kryterium konwencjonalnego oraz ASU do oceny trwałości.

Do badań w rozprawie wybrano kryterium konwencjonalne - spadku początkowej wartości modułu sztywności o 50%.

4.3.5. Czynniki wpływające na trwałość zmęczeniową

Oceniając zmiany prawne związane z wymogami materiałowymi oraz trendami rynkowymi, można zauważyć, iż ocena trwałości zmęczeniowej jest coraz częściej brana pod uwagę. Istnieje również wiele procedur normowych, które pozwalają zbadać wpływ różnych czynników na trwałość, jednak niewiele z nich jest uwzględniana co stanowi problem. Istnieją również takie, którym nie poświęcano do tej pory odpowiedniej uwagi.

W przypadku trwałości zmęczeniowej wyróżnić można inne zmienne, które wpływają na jej właściwą ocenę. Należą do nich m.in.:

1. temperatura badania,
2. wilgotność badania,
3. częstotliwość obciążania,
4. proces starzeniowy – starzenie oksydacyjne,
5. proces regeneracji (np. czas odpoczynku),
6. czynniki środowiskowe – oddziaływanie wody i mrozu,
7. czynniki środowiskowe – oddziaływanie zimowych środków utrzymaniowych stosowanych do zwalczania śliskości – sól drogowa (chlorek sodu),
8. cech mechanicznych zaprojektowanej mieszanki (moduł sztywności),
9. skład mieszanki (w tym wolna przestrzeń),
10. temperatura produkcji i zagęszczenia,
11. zagęszczenie (jego poziom).

Na przełomie ostatnich 30-lat powstało kilka kluczowych prac, wskazujących trend zmian trwałości zmęczeniowej MMA. Dotyczyły one głównie mieszanek na bazie asfaltów drogowych - zwykłych). Celem zsyntetyzowania obecnej wiedzy, trend wpływu poszczególnych zmiennych zaprezentowano w dwóch tabelach - Tab. 3 i Tab. 4.

Wykonując przegląd literatury dostrzeżono istotny problem związany z oddziaływaniem wody i mrozu oraz soli drogowej. Istnieje niewiele lub jest brak opracowań związanych z analizami tych czynników na trwałość zmęczeniową MMA. Ponadto nie znaleziono opracowań, które omawiałyby ten temat w sposób wyczerpujący. Wykonane dotąd badania koncentrują się głównie na ocenie wpływu tych czynników na materiał w testach statycznych lub związane są z procesami starzeniowymi. Dodatkowo nie odnotowano uwzględnienia tego typu oddziaływań w trwałości zmęczeniowej mieszanek i niezależnie konstrukcji nawierzchni. Jest to temat nowy. Wymaga poświęcenia szczególnej uwagi, ponieważ omawiane czynniki należą do powszechnie występujących w warunkach in-situ. Prowadzą one do degradacji MMA i całej konstrukcji nawierzchni. w Tab. 4 oznaczono problem i przytoczono literaturę.

Tab. 3: Czynniki wpływające na trwałość zmęczeniową w odpowiednich warunkach obciążania

Czynnik	Warunki obciążania		Literatura
	Kontrolowane naprężenie	Kontrolowane odkształcenie	
wzrost temperatury badania	spadek trwałości	przyrost trwałości	Said - [253] Tangella - [286] Judycki - [110] Di Benedetto - [59]
wdrożenie regeneracji np. okres odpoczynku (cykle obciążające rozsunięte chwilowym odciążeniem)	duży przyrost trwałości	niewielki przyrost trwałości	Said - [253] Tangella - [286] Judycki - [110] Di Benedetto - [59]
wzrost częstotliwości obciążania	przyrost trwałości	spadek trwałości	Said - [253] Tangella - [286] Judycki - [110] Di Benedetto - [59]
wzrost modułu sztywności MMA	przyrost trwałości	spadek trwałości	Said - [253] Tangella - [286] Judycki - [110] Di Benedetto - [59]
Skład mieszanki (uziarnienie) – przewaga frakcji grubych	wzrost trwałości	spadek trwałości	Said - [253] Tangella - [286]

Tab. 4: Czynniki wpływające na trwałość zmęczeniową niezależnie od warunków obciążania

Czynnik	Trwałość Zmęczeniowa trend	Komentarz	Literatura
wzrost wilgotności badania	spadek	-	Said - [253] Kim - [133] Sebaaly - [260]
Środowiskowy - agresja zimowych środków utrzymaniowych np. soli drogowych	spadek	Wyraźny wpływ, niewielka liczba publikacji związana z zagadnieniem trwałości zmęczeniowej . Badania wykonywane głównie z użyciem statycznego testu ITT (analogia testów - ITSR) lub inne nawiązujące do oceny starzenia MMA. Skrajnie niewielka liczba badań związanych ze zmęczeniem wykorzystujących schemat czteropunktowego zginania (4-PB) – dobrze odwzorowującego warunki in-situ. Wykonane oceny związane przeważnie z analizami zmian modułu sztywności. Nie odnotowano opracowań oceniających i uwzględniających wpływ oddziaływania soli drogowych na trwałość zmęczeniową mieszanki oraz konstrukcji nawierzchni. Nie zaobserwowano przeprowadzonych badań i analiz zmęczeniowych poddanych temu oddziaływaniu dla mieszanek na bazie asfaltów; zwykłych, modyfikowanych i wysokomodyfikowanych oraz mieszanek w różnej technologii wykonania – np. WMA i HMA.	Tehrani - [17] Hosseini - [96] Tsang - [292] Seyed - [11] Igor - [118] Rodions - [255] Juli-Gandara - [117] Zamanillo - [301] Mączka - [165] Zhigang - [319] Baozhu - [71]
Środowiskowy – oddziaływanie wody i mrozu	spadek	Wyraźny wpływ, niewielka liczba publikacji związana z zagadnieniem trwałości zmęczeniowej . Badania wykonywane głównie z użyciem statycznego testu ITT lub dynamicznego - zmęczeniowego ITFT (testy niskocyklowe). Brak badań wykorzystujących schemat czteropunktowego zginania (4-PB) – dobrze odwzorowującego warunki in-situ. Brak skutecznej oceny i uwzględnienia wpływu oddziaływania wody i mrozu na trwałość zmęczeniową mieszanki oraz konstrukcji nawierzchni.	Lottman - [244] Jaskula - [106] Cai - [318] Hamzah - [119] Judycki - [107] Faisal - [287] Falchetto - [46] Li - [108] Wang - [88]

		Nie zaobserwowano przeprowadzonych badania i analiz zmęzeniowych poddanych temu oddziaływaniu dla mieszanek na bazie asfaltów; zwykłych, modyfikowanych i wysokomodyfikowanych oraz mieszanek w różnej technologii wykonania – np. WMA i HMA.	
wzrost temperatury produkcyjnej - przegrzanie mieszanki	spadek	za niska temperatura również powoduje spadek	Błażejowski - [32] Błażejowski - [34] Piłat - [203]
spadek temperatury zagęszczenia – przechłodzenie mieszanki	spadek	za wysoka temperatura również powoduje spadek	Błażejowski - [32] Błażejowski - [34] Piłat - [203]
za mała energia zagęszczenia wykonanej mieszanki	spadek	-	Harvey - [93]
procesy starzeniowe (wywołane przez) – promieniowanie UV, powietrze, wahania temperatury	spadek	powinno być uwzględniane przy technologicznym wykonaniu MMA – aby uwzględnić czynnik starzeniowy w warunkach in-situ	Raad - [238] Islam - [101] Roque - [249] Pan - [191] Liu - [147]
skład mieszanki: wzrost zawartości lepiszcza asfaltowego	wzrost	do osiągnięcia optimum, później trwałość spada – wyznaczone empirycznie	Said - [253] Tangella - [286]
skład mieszanki: wzrost zawartości wolnej przestrzeni	spadek	-	Harvey - [93] Said - [253] Tangella - [286]
skład mieszanki: wzrost zawartości wypełniacza	wzrost	do osiągnięcia optimum, później trwałość spada – wyznaczone empirycznie	Said - [253] Tangella - [286] Lesueur - [137]
skład mieszanki: stosowanie lepiszczy modyfikowanych	wzrost	-	Błażejowski - [32] Błażejowski - [34]
skład mieszanki: stosowanie dodatków lub modyfikatorów do wykonywanej technologicznie mieszanki	różny	zależne od użytej substancji	Zhu - [321] Behnood - [27] Falchetto - [47]

Podkreśla się, iż rynek proponuje nowości materiałowe - lepiszcza modyfikowane lub wysokomodyfikowane (rozdział 4.2), których receptura od ostatnich lat uległa zmianie. Obecnie promowane są te zawierające polimer SBS. Mieszanki na bazie tych asfaltów różnią się odpornością na różne czynniki (np. deformacje trwałe) oraz wykazują (zależy od polimeru) wyższą trwałość zmęczeniową względem powszechnie stosowanych z asfaltem zwykłym – istotne prace Błażejowskiego [32, 34] opublikowane na przełomie 2020 i 2021 roku. To sprawia, iż zagadnienie zmęczenia MMA mieszanek zawierających asfalty o nowych recepturach należy do ważnych i wymaga poświęcenia uwagi. **w szczególności ze względu na wpływ oddziaływań środowiskowych (woda i mróz, sól drogowa), ich oceny i uwzględnienia w trwałości MMA oraz konstrukcji - co do tej pory nie zostało uczynione.**

4.3.6. Uszkodzenia indukowane zmęczeniem i niską temperaturą

Głównym problemem związanym ze zjawiskiem zmęczenia w zmiennych warunkach ruchowych i środowiskowych jest pojawienie się uszkodzeń warstw konstrukcyjnych, które najczęściej są objawem wyczerpania trwałości. Stanowią one poważne zagrożenie dla warstw nawierzchni uniemożliwiając przenoszenie obciążeń od kół pojazdów – spełniania swojej funkcji. w rozdziale 4.1.3 ogólnie przedstawiono zagrożenia, które mogą wystąpić, wskazując na podstawie badań ankietowych, iż najczęściej występujące są te, związane ze zmęczeniem i niską temperaturą. Wyszczególnia się trzy ich rodzaje.

1. **Spękania dół-góra** „*eng. bottom-up*” – pierwszy najczęstszy rodzaj spękań zmęczeniowych, związany z oddziaływaniem mechanicznym od kół pojazdów. Spękania powstają na spodzie warstw asfaltowych w miejscu występowania ekstremalnych naprężeń rozciągających wywołanych przypadkiem zginania, które przekroczy nośność warstwy. Po inicjacji spękania propaguje ono w górę przechodząc przez cały przekrój konstrukcyjny.
2. **Spękania góra-dół** „*eng. top-down*” – drugi typowy rodzaj spękań zmęczeniowych, związany z bezpośrednim oddziaływaniem: koło pojazdu-nawierzchnia (wierzchnia warstwa konstrukcji nawierzchni) oraz wpływem starzenia oksydacyjnego. w wyniku przejazdu np. przeciążonego pojazdu za cienka lub/i zdegradowana powietrzem (stwardniała) warstwa ścieralna nie jest w stanie przejąć od kół pojazdu sił ścinających. Wynikiem takiego zjawiska jest pojawienie się spękania tuż przy oponie, które propaguje wewnątrz układu warstwowego konstrukcji.
3. **Spękania termiczne (niskotemperaturowe)** „*eng. thermal cracking*” – rodzaj uszkodzeń związany z działaniem niskiej temperatury, wywołującej powstanie skurczu termicznego w warstwach asfaltowych. Ten zaś jest przyczyną wystąpienia naprężeń termicznych ulegających kumulacji z powodu niskiej zdolności MMA do ich rozpraszania (lepiszcze asfaltowe w niskich temperaturach usztywnia MMA i całość staje się krucha). Gdy wytrzymałość materiału na rozciąganie (zmniejszająca się wraz ze spadkiem temperatury) zostanie przekroczona następuje powstanie charakterystycznego spękania usytuowanego najczęściej ortogonalnie do kierunku jazdy.

Trudno jest oddzielić spękania niskotemperaturowe od zmęczeniowych, ponieważ są one również wywołane szkodą zmęczeniową. Niska temperatura obniża wytrzymałość lepiszcza (i całej MMA) na rozciąganie. Następuje koncentracja naprężeń. Materiał staje się kruchy co stwarza warunek zaistnienia takiego uszkodzenia, jednak czynnikiem kluczowym może być moment przyłożenia obciążenia przyspieszającego skutek, zatem ustalenie genezy powstania takiego uszkodzenia w nawierzchni pod ruchem samochodowym jest praktycznie niemożliwe [163]. z tego też powodu zaprezentowanie wyżej wymienionych uszkodzeń razem należy do zasadnych.

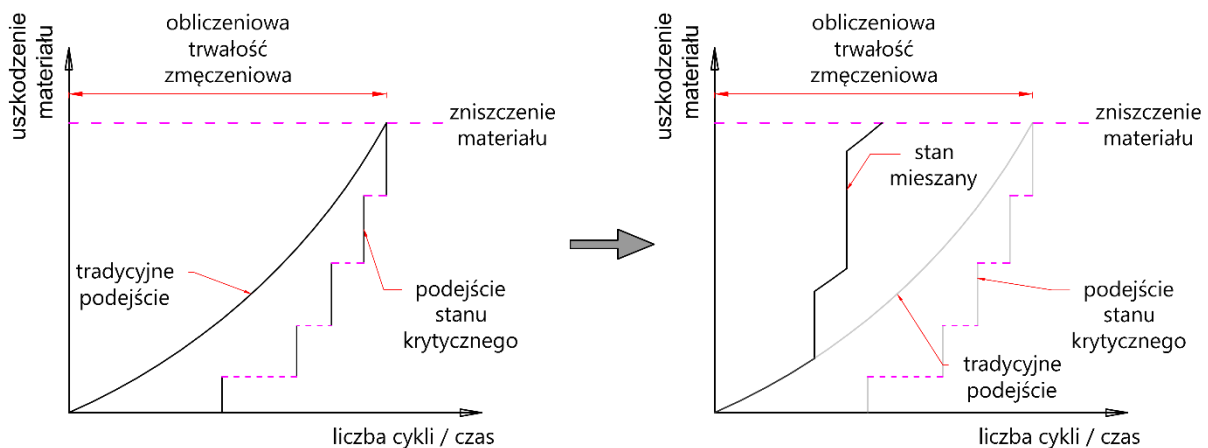
Zrozumienie mechanizmu powstawania spękań w nawierzchni jest kamieniem milowym do efektywnej eliminacji przedwczesnego zniszczenia nawierzchni, skutecznej oceny trwałości zmęczeniowej (szczególnie w niskich temperaturach) i analizowaniu nowych materiałów oraz technologii.

Oceniając trwałość zmęczeniową MMA powszechnie stosuje się podejście związane z kumulacją szkody (4.3), aż do osiągnięcia punktu zniszczenia – określonej procentowej powierzchni spękań nawierzchni, które jest tożsame z np. spadkiem wartości modułu sztywności w badaniach laboratoryjnych o 50%. Omawiany sposób zakłada, iż proces

powstawania i rozwoju spękań postępuje sukcesywnie wraz z upływem czasu. Istnieją jednak inne sposoby, które pozwalają ocenić trwałość konstrukcji wykonanych z MMA.

W 2010 roku na podstawie obszernych badań opublikowano raport NCHRP [188], w którym naukowcy podnieśli problem pęknięcia mieszanek – jako m.in. skutku wyczerpania trwałości zmęczeniowej. w pracy zwrócono uwagę, iż pęknięcia w nawierzchni zaczynają pojawiać się dopiero w późniejszym czasie eksploatacji. Autorzy raportu nadmienili, iż przyczyną powstania uszkodzeń, może być nie sama kumulacja, lecz przekroczenie stanów krytycznych dla mieszanki wywołane obciążeniem oraz warunkami środowiskowymi (np. wpływ niskiej temperatury). Te mogą spowodować, iż punkt zniszczenia nawierzchni (wyczerpanie trwałości zmęczeniowej) zostanie osiągnięty nie przez kumulację, lecz przez gwałtowny proces pojawiania się pęknięć, którego nie ma możliwości (lub jest bardzo trudno) monitorować. w nadmienionym raporcie zaproponowano również ocenę trwałości zmęczeniowej na podstawie osiągania stanów krytycznych (pęknięcie) z użyciem testu pośredniego rozciągania i obserwacji zmian energii. Obszerne badania poświęcone zmęczeniu i pękaniu: Scarpassa (zbiór artykułów siódmej konferencji RILEM) (2012) [258], Huang i Di Benedetto (2015) [97], Mackiewicz (2016) [163] oraz Chabota (zbiór artykułów ósmej konferencji RILEM) (2016) [43] potwierdzają spostrzeżenia z raportu NCHRP. w wyszczególnionych pracach dodatkowo zwrócono uwagę, iż spękania powstałe np. w niskich temperaturach oraz ciągły proces kumulacji (stan mieszany) może przedwcześnie doprowadzić do wyczerpania trwałości zmęczeniowej nawierzchni niż wynika to z założeń mechanistycznych kryteriów zmęczeniowych (opartych na powszechnym podejściu, w których stosuje się przeważnie dodatnie średnioroczne temperatury [113]) lub podejścia stanów krytycznych (raport NCHRP). Graficzne przedstawienie omawianych podejść zamieszczono na Rys. 17.

Pomimo różnych podejść związanych z analizą trwałości konstrukcji, powszechny sposób związany z kumulacją szkody należy do rozwiązań skutecznych i zostanie wykorzystany w niniejszej rozprawie.



Rys. 17: Różne podejścia oceny trwałości zmęczeniowej

Istotnym problemem związanym z opisanymi podejściami jest uwzględnienie jedynie czynnika mechanicznego. w stanie in-situ mieszanki zastosowane w konstrukcji poddane są złożonym oddziaływaniom, które negatywnie (środowiskowe) lub pozytywnie (regeneracja) wpływają na jej trwałość. Brak ich uwzględnienia jest przyczyną niedokładnego prognozowania trwałości projektowanych konstrukcji.

Na podstawie przytoczonych prac można wyszczególnić sześć problemów, którymi dotąd się nie zajmowano lub nie zostały w sposób skuteczny rozwiązane (luka w obecnym stanie wiedzy).

1. Analiza procesu inicjacji i propagacji pęknięć w ujęciu trwałości zmęczeniowej jest skomplikowana. Moment wystąpienia spękania w MMA można zaobserwować lub wyznaczyć korzystając z badań laboratoryjnych opierając się na wykresach np. zmian modułu sztywności lub zmian energii, jednak monitoring rozwoju uszkodzeń jest technicznie trudny. Dotąd jednak nie przeanalizowano zmian strukturalnych na poziomie makro w mieszankach poddanych mieszanym oddziaływaniom – mechanicznym i środowiskowym.
2. Regeneracja jako zjawisko pozytywnie wpływające na trwałość zmęczeniową MMA umożliwiające uleczenie powstałych spękań dotąd nie zostało uwzględnione w trwałości zmęczeniowej MMA oraz kryteriach zmęczeniowych stosowanych do konstrukcji.
3. Nie uwzględniono wpływu negatywnych czynników środowiskowych – wody i mrozu oraz soli drogowej w trwałości zmęczeniowej MMA.
4. Nie uwzględniono negatywnych oddziaływań środowiskowych w trwałości konstrukcji wykonanych z MMA (kryteria zmęczeniowe).
5. Nie uwzględniono rodzaju asfaltu stosowanego do MMA w trwałości zmęczeniowej konstrukcji (obecne kryteria skalibrowano do mieszanek na bazie asfaltów zwykłych).
6. Istnieje niewiele analiz poświęconych trwałości mieszanek i konstrukcji (kryteria zmęczeniowe) wykonanych na bazie lepiszczy zwykłych, modyfikowanych, wysokomodyfikowanych oraz wykonywanych w różnych technologiach (WMA, HMA) w sposób kompleksowy.

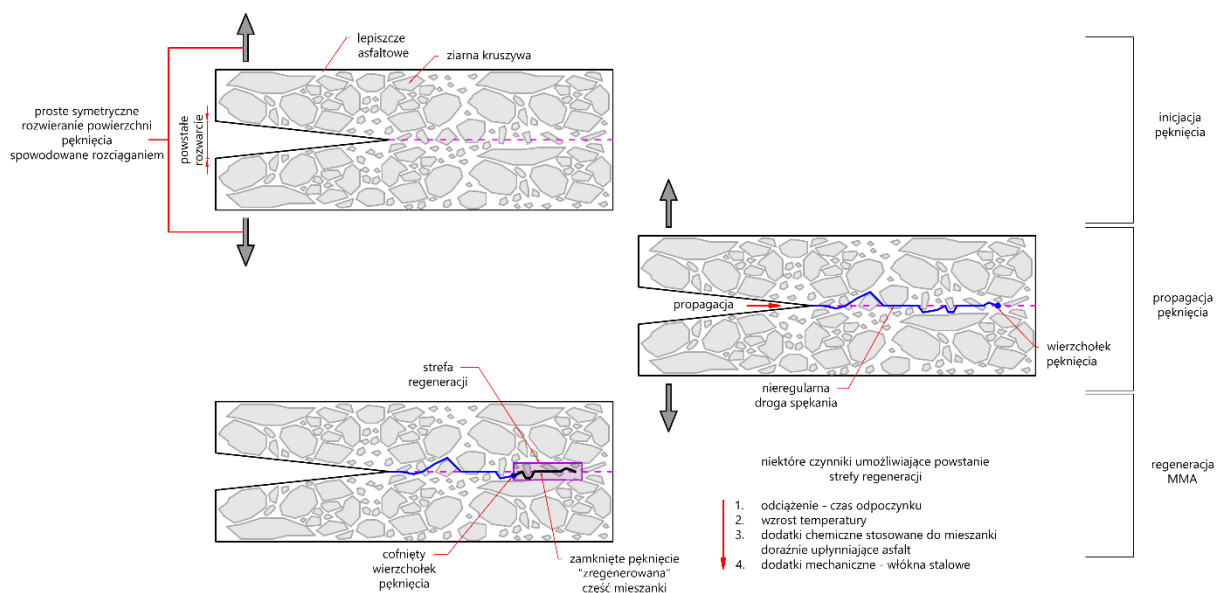
W celu dokładniejszego rozpoznania zjawiska zmęczenia MMA zostaną przeprowadzone odpowiednie badania w ujęciu kompleksowym (również z zastosowaniem optymalizacji składu) na mieszance AC 22 P (gabro) przeznaczonej na ruch ciężki (KR 5-7) pozwalające ocenić trwałość zmęczeniową mieszanek na bazie asfaltu: zwykłego, modyfikowanego i wysokomodyfikowanego (zawierające polimer SBS), w technologiach: na gorąco oraz na ciepło. Poczynione zostaną również zabiegi umożliwiające ocenić i uwzględnić wpływ oddziaływania wody i mrozu, soli drogowej w trwałości mieszanek oraz dodatkowo rodzaju asfaltu w kryterium zmęczeniowym konstrukcji.

Podkreśla się, iż istotnym elementem trwałości MMA jest zjawisko regeneracji, które również zostanie przeanalizowane i uwzględnione w ramach badań rozprawy. Tematyka regeneracji, należy do obszernej, dlatego też postanowiono omówić ją w sposób niezależny – osobny rozdział w dalszej części przeglądu.

4.4. Zjawisko regeneracji (healing)

Od ponad 30 lat naukowcy zajmują się zjawiskiem pozytywnie wpływającym na trwałość zmęczeniową MMA - tzw. regeneracją/autoregeneracją (*eng. healing, self-healing*). Pierwotnie usiłowano analizować je na lepiszczu asfaltowym, dopiero kilka-kilkanaście lat później skoncentrowano się na mieszankach [97].

Proces self-healingu polega na odzyskiwaniu zdolności materiału do przenoszenia obciążeń bez niszczenia jego struktury. Regeneracja MMA jest możliwa dzięki lepiszczu, który jako materiał wykazujący cechy lepko-sprężyste w odpowiednich warunkach charakteryzuje się: zdolnością upłynniania (zmiany lepkości) i wysoką dyfuzją cząsteczek [141]. Cechy te pozwalają wytworzyć tzw. strefę regeneracji, która umożliwia zamknięcie powstałych uszkodzeń (spękań) i tym samym wydłużenie trwałości materiału wbudowanego w nawierzchnię przywracając jego „pierwotne” właściwości. Ideologiczny mechanizm tego procesu zaprezentowano na Rys. 18.



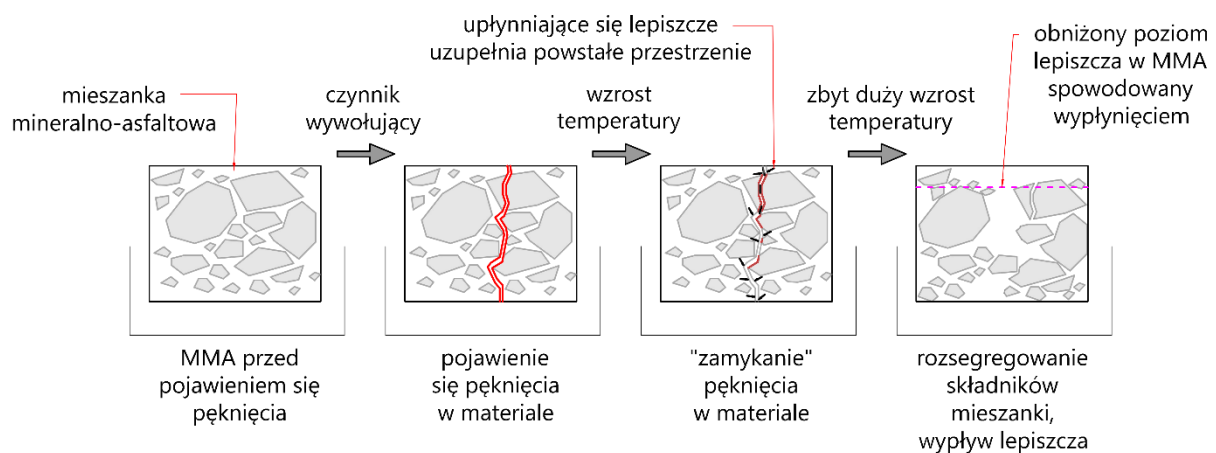
Rys. 18: Schematyczny mechanizm autoregeneracji MMA

Self-healing jest zjawiskiem zależnym od kilku czynników, które mogą mniej lub bardziej wpływać na zaistnienie i wysokość regeneracji. w obszernym przeglądzie Lianga i innych [141] (2021) oraz pracy Huanga [97] (2015) wyszczególniono, iż do podstawowych należą:

1. czas odpoczynku (*eng. rest period*) – brak lub stosunkowo małe (rozsunięte w czasie) oddziaływanie na materiał sił mechanicznych,
2. wielkość i sposób obciążania materiału – powstałe uszkodzenie (przy zmęczeniu), może być na tyle duże, iż regeneracja materiału nie będzie zupełna lub możliwa,
3. temperatura – jej wzrost i oddziaływanie na materiał w czasie. Umożliwia upłynnienie lepiszcza i zasklepienie spękań,
4. zastosowanie chemicznych środków do składu MMA np. mikrokapsuł – poprawienie dyfuzji cząsteczek w momencie rozerwania przez pęknięcie kapsuły ze środkiem (działanie jednorazowe),

5. zastosowanie dodatków mechanicznych – np. włókien stalowych, które podnoszą wytrzymałość materiału na rozciąganie, ale przede wszystkim umożliwiają zastosowanie indukacji do sztucznego podgrzania nawierzchni i uaktywnienia healingu.

Kluczowym i zarazem naturalnym czynnikiem wywołującym regenerację jest dodatnia, wysoka temperatura. Obserwacje in-situ zdają się potwierdzać ważność tego oddziaływania – w nawierzchni po okresie zimowym (niska temperatura) można zauważyć pojawienie się pęknięć, natomiast po upalnym lecie ich zanikanie. Salih (2018) [254] opublikował pracę, w której analizował wpływ podgrzewania światłem podczerwonym na regenerację wybranych MMA. Autor wykazał, iż podgrzanie przyczynia się do upłynniania lepiszcza i znaczącego zregenerowania materiału. Zauważył również, iż zastosowanie zbyt wysokiej temperatury stwarza ryzyko zniszczenia materiału poprzez rozsegregowanie składników (restrukturyzacja) i wypłynięcie lepiszcza z mieszanki. Schemat regeneracji wywołanej podgrzaniem zaprezentowano na Rys. 19.



Rys. 19: Mechanizm regeneracji wywołanej podgrzaniem

Poważnym problemem, który nieustannie stanowi wyzwanie dla wielu naukowców jest sposób badania i uwzględniania zjawiska regeneracji. Pierwsze próby podjął Lytton w 1993 roku [162]. Zaproponował on wprowadzenie współczynnika korekcyjnego do badań laboratoryjnych, które uwzględniały wystąpienie czasów odpoczynku umożliwiając w ten sposób wyznaczenie trwałości zmęczeniowej nawierzchni (równanie (8) i (9)). z uwagi na liczne rozbieżności wartości tego parametru wyznaczanego empirycznie podejścia nie wdrożono.

$$N_{naw} = N_{lab} \cdot SF, \quad (8)$$

gdzie:

N_{naw} – trwałość zmęczeniowa nawierzchni.

N_{lab} – trwałość zmęczeniowa - laboratorium.

SF – współczynnik korekcyjny (regeneracja).

$$SF = 1 + a \cdot (t_r)^b, \quad (9)$$

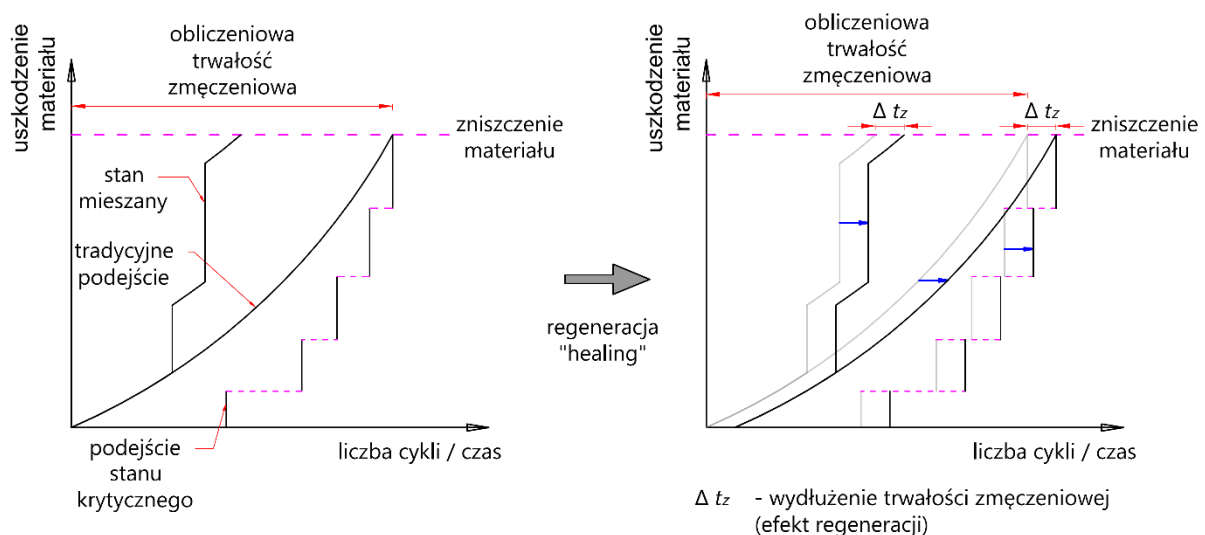
gdzie:

t_r – czas odpoczynku [s],

a, b – współczynniki regresji [-].

W 2013 roku opublikowano raport NCHRP [310], w którym zaproponowano algorytm uwzględniania healingu w mechanistycznym kryterium zmęczeniowym AASHTO. Mechanizm metody polega na wyznaczeniu trwałości zmęczeniowej z zastosowaniem okresów odpoczynku dla różnych poziomów obciążenia (krzywe Wöhlera), a następnie ustalenie za pomocą funkcji regresji współczynników umożliwiających kalibrację modelu. Porównanie wyników przewidywanych (algorytm) w stosunku do wartości zmierzonych z użyciem testów laboratoryjnych wykazało niską korelację – najlepsza pozyskana zależność cechowała się współczynnikiem determinacji na poziomie $R^2 \sim 0.63$. Autorzy podkreślają jednak, iż zaproponowaną metodologię należy rozwijać oraz wzbogacić o analizy regeneracji związane z zastosowaniem mieszanek w technologii np. na ciepło WMA lub/i na gorąco z asfaltami modyfikowanymi i wysokomodyfikowanymi.

Obecne podejścia (omówione w rozdziale 4.3.6), które można zastosować do oceny trwałości zmęczeniowej: tradycyjne, stanów krytycznych lub mieszane w dalszym ciągu pomijają regenerację zarówno w przypadku badań laboratoryjnych jak również kryteriów zmęczeniowych używanych w projektowaniu mechanistycznym co zostało podkreślone w pracach [97, 163]. Skuteczna ocena regeneracji niewątpliwie pozwoliłaby przyczynić się do np. optymalizacji składu MMA. Jest to problem w dalszym ciągu nie rozwiązany. Ideologiczny mechanizm wpływu regeneracji na trwałość zmęczeniową w różnych podejściach zaprezentowano na Rys. 20.



Rys. 20: Wpływ regeneracji na trwałość zmęczeniową w różnych podejściach

Self-healing MMA jest złożonym zjawiskiem, zależnym od wielu wcześniej wymienionych czynników (np. okresy odpoczynku, podgrzanie, dodatki). W przeglądzie Lianga (2021) [141] zebrano i zaprezentowano różne proponowane metody (na bazie wskaźników), które pozwalają ocenić zdolność regeneracji mieszanek niezależnie od wybranego do analizy czynnika. Celem uporządkowania przekazu dane łącznie z formułami zestawiono w Tab. 5.

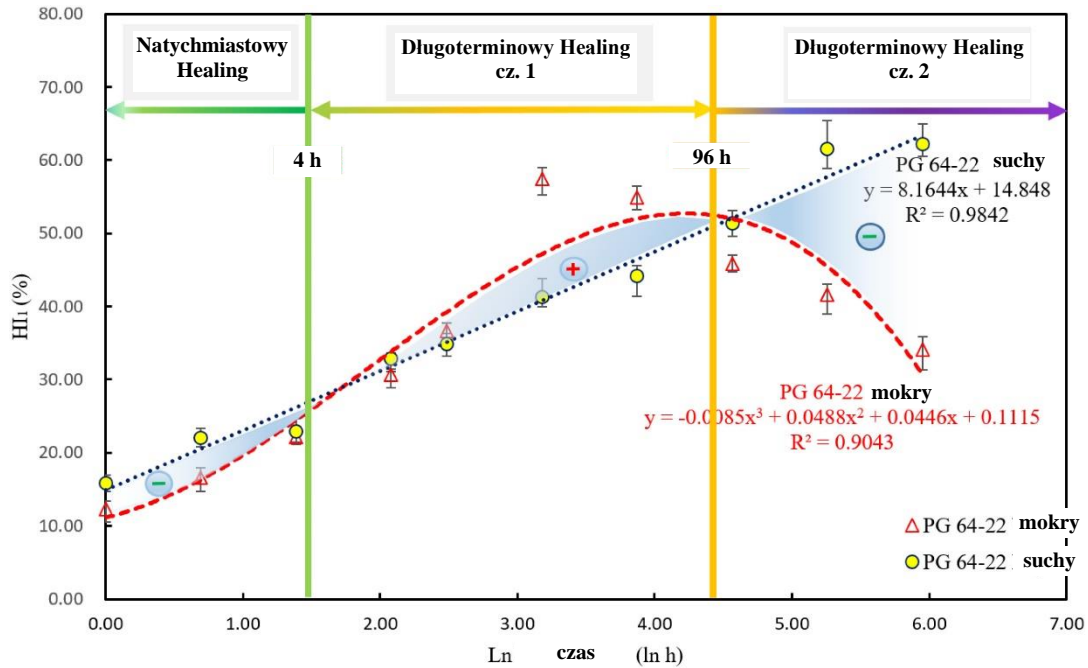
Tab. 5: Ocena wydajności self-healingu z użyciem różnych metod

Nazwa metody	Wzór	Opis zależności	Rodzaj badania
Trwałość zmęczeniowa	$HI = \frac{N_p - N_{50\%}}{N_{50\%}}$	HI – Indeks regeneracji. N_p – Trwałość zmęczeniowa po zastosowaniu wybranego czynnika. $N_{50\%}$ – Trwałość zmęczeniowa ustalana dla spadku wartości modułu sztywności o 50%.	ITFT (zmęczeniowe badanie pośredniego rozciągania)
Wytrzymałość na rozciąganie	$HI_i = \frac{POTS_{Ai}}{POTS_i}$	HI_i – Indeks regeneracji. $POTS_{Ai}$ – Wytrzymałość lepiszcza na rozciąganie po zastosowaniu regeneracji. $POTS_i$ – Wytrzymałość lepiszcza na rozciąganie przed zastosowaniem regeneracji.	3-PB, BBS (wytrzymałość lepiszcza)
Moduł sztywności przy ścinaniu	$HI_G = \frac{ G^* _{hea} - 0.7 \cdot G^* _{ini}}{ G^* _{ini} - 0.7 \cdot G^* _{ini}}$	HI_G – Indeks regeneracji. $ G^* _{hea}$ – Początkowy moduł zespolony lepiszcza (przy ścinaniu) po zastosowaniu regeneracji. $ G^* _{ini}$ – Początkowy moduł zespolony lepiszcza (przy ścinaniu) przed zastosowaniem regeneracji.	DSR (reometr dynamicznego ścinania – lepiszcze)
Siła	$h = \frac{F_{hea}}{F_0}$	h – Indeks regeneracji. F_{hea} – Siła niszcząca po zastosowaniu regeneracji. F_0 – Siła niszcząca przed zastosowaniem regeneracji.	3-PB
Energia dyssypacji	$RDEC_n = \frac{DE_n - DE_m}{DE_m \cdot (n - m)}$	$RDEC_n$ – Wskaźnik energii dyssypowanej do n -tego cyklu badania. DE_n – Energia dyssypacji w n cyklu. DE_m – Energia dyssypacji w m cyklu. Warunek: $n > m$	DSR
Moduł sztywności	$SRR = \frac{E_{1 \text{ or } 6 \text{ days}}^*}{E_0^*}$	SRR – Wskaźnik regeneracji sztywności. E_0^* – Początkowy moduł sztywności, przed wdrożeniem regeneracji. $E_{1 \text{ or } 6 \text{ days}}^*$ – Początkowy moduł sztywności po zastosowaniu regeneracji (czas trwania czynnika regenerującego – 1 dzień lub 6 dni).	3-PB
Szerokość rozwarcia spękania	$HI = \frac{width_i - width_c}{width_i}$	HI – Indeks regeneracji. $width_i$ – Szerokość rozwarcia przed zastosowaniem regeneracji. $width_c$ – Szerokość rozwarcia po zastosowaniu regeneracji.	Obrazowanie mikroskopowe, analiza fotograficzna

Warto podkreślić, iż spośród przedstawionych w przeglądzie metod nie odnotowano użycia testu zmęczeniowego 4-PB, który dobrze odwzorowuje warunki in-situ. Dodatkowo autor w swojej pracy nadmienia, iż na przestrzeni ostatnich kilku lat, badania naukowców zostały ukierunkowane na analizy wpływu stosowania różnych dodatków (np. mikrokapsuły) na regenerację.

W artykule Lianga [141] poruszono również ważną kwestię związaną z czasem działania regeneracji i wpływem wilgotności. Na podstawie wykonanego badania wytrzymałości na rozciąganie (Tab. 5) HI_i przeprowadzonym na lepiszczu asfaltowym w stanie suchym i mokrym wykazano, iż proces self-healingu można podzielić na trzy okresy – natychmiastowe leczenie (do 4 godzin), długoterminowe leczenie cz. 1 (od 4 do 96 godzin),

długoterminowe leczenie cz. 2 (od 96h). Ponadto wskazano, iż w pierwszym okresie suchy materiał cechuje się wyższym wskaźnikiem regeneracji od mokrego. w drugim sytuacja odwraca się. w trzecim suchy materiał ponownie cechuje się wyższą zdolnością self-healingu – wskaźnik mokrego lepszycza gwałtownie spada. Należy dodać, iż wysuszony asfalt niezależnie od wyszczególnionych okresów ulega proporcjonalnej regeneracji natomiast w przypadku stanu mokrego jest to zależność krzywoliniowa. Omawiany schemat zaprezentowano na Rys. 21.



Rys. 21: Wpływ wilgotności lepszycza na self-healing [141]

4.4.1. Temperatura w nawierzchni drogowej

Mieszanki bitumiczne należą do materiałów, których zdolność absorpcji ciepła jest wysoka. w okresie letnim temperatura warstwy ścierniczej wykonanej z MMA jest znacznie wyższa niż powietrza – różnice sięgają nawet kilkudziesięciu stopni [94, 121] w zależności od stopnia nasłonecznienia i czasu jego trwania oraz lepiszcza użytego do mieszanki. Ponadto podczas dziennego nasłonecznienia nawierzchnia kumuluje ciepło przewodząc je do niższych warstw konstrukcji, natomiast podczas nocy cała zmagazynowana energia jest rozpraszana (zwracana) od warstw spodnich w kierunku wierzchnich [5]. Na podstawie tych obserwacji można stwierdzić, iż regeneracja MMA wywołana wyższą dodatnią temperaturą (podgrzaniem) zachodzi i ma kluczowy wpływ na trwałość konstrukcji.

Głównym problemem związanym z wydajnością self-healingu jest wysokość temperatury wewnątrz układu warstw asfaltowych – szczególnie nośnych (podbudowa / wiążąca), w których powstają uszkodzenia spowodowane np. szkodą zmęczeniową (pęknięcie dół-góra). w przeglądzie Adwana (2021) [5] zebrano i przedstawiono matematyczne modele temperaturowe, które umożliwiają ustalenie jej poziomu wewnątrz układu warstwowego uwzględniając np. temperaturę powietrza lub nawierzchni oraz głębokość. Przykład liniowej zależności opracowanej przez Al-Hameda zaprezentowano w równaniu (10).

$$T_{pave} = 3.175 + 0.04866 \cdot Z + 0.946 \cdot T_{air}, \quad (10)$$

gdzie:

T_{pave} – temperatura warstwy konstrukcyjnej na szukanej głębokości [°C],

Z – głębokość poniżej powierzchni nawierzchni [cm],

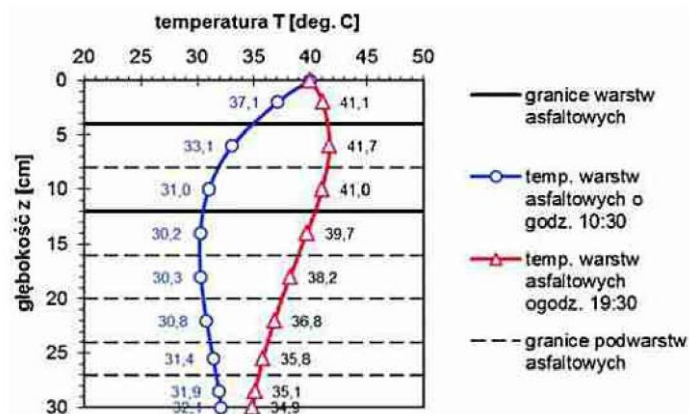
T_{air} – temperatura powietrza [°C].

Modele temperaturowe są użytecznym narzędziem, które pozwala przewidywać temperaturę w danej warstwie, jednak posiadają one wiele ograniczeń prowadzących do rozbieżności z pomiarami in-situ:

1. często opisywane są za pomocą regresji liniowej, która odnosi się do konkretnego analizowanego przypadku (pomijając inne czynniki np. zastosowanego lepiszcza, przewodności cieplnej lub czasu nasłonecznienia),
2. określa się je dla danej strefy klimatycznej lub lokalizacji,
3. nie dotyczą konkretnej pory roku np. lata – regresja całoroczna (złe dopasowanie może nie doszacować temperaturę),
4. nie uwzględniają odnotowanych ekstremalnych temperatur lub możliwości ich wystąpienia,
5. ustalane dla pomiaru wykonanego w zadanym okresie.

W pracy Górszczyk [87] zajmowano się analizami termicznymi asfaltowych nawierzchni drogowych, w których wykazano za pomocą modelowania MES, iż temperatura wewnątrz konstrukcji zależna jest od przewodności cieplnej MMA, jej ciepła właściwego, gęstości, czasu nasłonecznienia, strumienia ciepła i głębokości usytuowania. Przedstawione analizy termiczne (dla danej chwili) wykazały, iż średnia różnica temperatury badanej konstrukcji podatnej i półsztywnej na kategorię ruchu KR6 pomiędzy powierzchnią, a warstwą podbudowy (na głębokości 31cm) waha się od kilku do kilkunastu °C. Sudyk i inni [278] zajmowali się pomiarami temperatury wewnątrz układu nawierzchni wykonanej z MMA w okresie jednego roku. Wykazano, iż odnotowana temperatura w lecie (lipiec) pomiędzy

powierzchnią, a warstwą zlokalizowaną na głębokości 22 cm różni się o 2 °C – widoczna jest zgodność z analizami MES zawartymi w poprzedniej wymienionej pracy. w pracy Mejłuna i Judyckiego (2015) [171] zajmowano się analizami lepko-sprężystymi warstw konstrukcji nawierzchni (odcinek S6 Redzików) uwzględniając temperaturę i warunki obciążenia. Do badań wykorzystano meteorologiczne dane pomiarowe pozyskane ze stacji Redzików. Na potrzeby wykonywanych analiz w artykule wykonano i przedstawiono rozkład temperaturowy występujący w warstwach nawierzchni wykonanych z mieszanki SMA 8 45-80/55 oraz betonu asfaltowego AC 16W 35/50 i AC22P 35/50. Pod uwagę wzięto 2 części dnia poranek o godzinie 10:30 oraz zmierzch o godzinie 19:30. Autorzy na podstawie badań in-situ i modelowania wykazali, iż różnica temperatur pomiędzy powierzchnią nawierzchni, a warstwą zlokalizowaną na głębokości 30cm (podbudowa) wynosi 9 °C poranek, natomiast 6.2 °C wieczór. Należy dodać, iż p w pracy pominięto środkową część dnia, w której występowała największa temperatura i nasłonecznienie. Przykładowy wynik zaprezentowano na Rys. 22.



Rys. 22: Rozkład temperatury w analizowanej nawierzchni - przed południem i po południu [171]

Na podstawie wykonanego przeglądu dotyczącego rozkładu temperatur wewnątrz konstrukcji nawierzchni można wyraźnie stwierdzić, iż regeneracja wywołana podgrzaniem (osiąganiem wysokich temperatur i czasu ich trwania) w nośnych warstwach dla wysokich kategorii ruchu (np. KR6) jest jak najbardziej możliwa i zachodzi. w krajach znajdujących się w klimacie umiarkowanym np. Polska zakres temperatur eksploatacyjnych dla MMA przyjmuje się pomiędzy $-40.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, a $+80.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ [100], zatem przy wystąpieniu skrajnie upalnego dnia, w którym nawierzchnia nagrzej się do $70\div 80.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ proces self-healingu zaistnieje nawet w podbudowie w zakresie temperatur od kilku do kilkunastu stopni mniejszych w stosunku do powierzchni – np. ($50\div 70.0\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Obserwacje te pozwalają zastosować podgrzanie laboratoryjne w celu oszacowania zdolności regeneracji badanych MMA i uwzględnić to zjawisko przy ocenie trwałości zmęczeniowej MMA.

4.4.2. Badania nad regeneracją MMA

Pierwsze kluczowe badania nad regeneracją prowadził Little wraz z zespołem badawczym (1987) [145]. W pracy analizowano trwałość zmęczeniową zwykłych asfaltów drogowych i z dodatkiem włókien polimerowych stosowanych do MMA w nawierzchni i laboratorium. Autorzy wykazali, iż istnieje wyraźna różnica w trwałości nawierzchni względem badań laboratoryjnych spowodowana występowaniem czasu odpoczynku. Udowodniono, iż badane asfalty rozpoczynają regenerować się, gdy materiał nie jest obciążany. w pracy zaproponowano wprowadzenie współczynnika skalującego uwzględniającego okres odpoczynku. Podkreślono również, iż jego wartość jest bardzo wrażliwa na przyjęty w analizach czas odciążenia.

Następnie Kim i inni (1989) [131] zajmowali się badaniami zmęczeniowymi drobnoziarnistego betonu asfaltowego wykonanego na w technologii na gorąco z użyciem zwykłych asfaltów drogowych i dodatkiem polimeru LDPE (*eng. low density polyethylene*). w testach sprawdzano oddziaływanie czasów odpoczynku wprowadzanych losowo na trwałość zmęczeniową w celu zidentyfikowania mechanizmu self-healingu. Badania prowadzono stosując warunek kontrolowanego odkształcenia. Temperatura testu wynosiła 25.0 °C. Autorzy udowodnili, iż wprowadzenie czasów odpoczynku pozwala wydłużyć trwałość zmęczeniową mieszanek, a przyrost uszkodzeń (spękań i ich rozwoju) w badaniu postępuje wolniej. Ponadto naukowcy zaproponowali podział na dwa współzależące czynniki wpływające na regenerację – czynnik chemiczny umożliwiający self-healing oraz zjawisko relaksacji lepko-sprężystej (które utrudnia identyfikację stopnia regeneracji).

Kolejno Little i inni (1993) [146] opublikowali obszerny raport, w którym również analizowano wpływ okresów odpoczynku na trwałość zmęczeniową. Do badań przygotowano 4 MMA po dwie AC5 i AC20 w technologii na gorąco z zastosowaniem bardzo miękkich asfaltów drogowych oraz z dodatkiem polimeru LDPE. Prace prowadzono wykorzystując próbki pryzmatyczne również z wykonanymi nacięciami (do analiz pęknięcia i healingu). Badania wykonano z zastosowaniem warunku kontrolowanego odkształcenia. Temperatura testu wynosiła 25.0 °C oraz 31.0 °C. Do programu obciążania zaaplikowano kształt piły symetrycznej oraz wdrożono czasy odpoczynku: 5 min, 10 min, 20 min oraz 40 min. Autorom z powodzeniem udało się ustalić poziom regeneracji poprzez zastosowanie współczynnika self-healingu HI opartego na analizach pseudo-energii. Wykazano również, iż im większy czas odpoczynku zostanie wdrożony, tym większa będzie regeneracja MMA zarówno stosując zwykły asfalt jak modyfikowany (polimer LDPE). Ponadto potwierdzono, iż czas odpoczynku pozytywnie wpływa na trwałość zmęczeniową, a powstałe spękania wolniej się rozwijają w próbkach z nacięciem.

Lytton (1993) współautor raportu SHRP [162] w tym samym roku po raz pierwszy zaprezentował na podstawie wcześniejszych badań Littlea sposób uwzględnienia czasu odpoczynku w projektowaniu mechanistycznym (trwałość zmęczeniowa) na podstawie badań laboratoryjnych. Autor wprowadził pojęcie współczynnika korekcyjnego, który był wyznaczany empirycznie z regresji. Duża zmienność tego parametru spowodowała, iż dalszych analiz zaniechano.

Następnie Daniel i inni (2001) [52] opublikowali ważną pracę, w której analizowano wpływ regeneracji na trwałość zmęczeniową (w teście 3-PB) stosując czas odpoczynku (czas każdego 6 godzin) oraz podgrzanie do temperatury 60.0 °C i natychmiastowe 6 godzinne kondycjonowanie do temperatury badania wynoszącej 20.0 °C. Do testu przygotowano dwie mieszanki AC20 wykonane w technologii na gorąco z zastosowaniem zwykłych asfaltów drogowych o penetracji 64mm i 135mm. Badania wykonywano przy częstotliwości obciążania 1.7 Hz powtarzając kilkakrotnie plan badawczy z zabiegami regeneracyjnymi. Udowodniono, iż zastosowanie czasów odpoczynku w analizowanych MMA, pozwala wydłużyć trwałość

zmęczeniową nawet dwukrotnie. w przypadku podgrzania badanych próbek trwałość zmęczeniowa jest jeszcze większa. Ponadto zaobserwowano, iż wdrożenie czynników wywołujących regenerację wywołuje częściowy przyrost (odzyskanie) modułu sztywności MMA. w pracy dodatkowo zaproponowano wprowadzenie wskaźnika tzw. „poziomego przyrostu” self-healingu, który pozwalałby oceniać zdolność regeneracji MMA w przypadku zaaplikowania kilku powtórzeń tego samego programu badawczego z zabiegami wydłużającymi trwałość zmęczeniową.

W tym samym roku pojawił się obszerny raport SHRP, którego współautorem był Little (2001) [144]. Omówiono w nim eksperymentalne sposoby analizy regeneracji asfaltów i MMA z użyciem zmęczeniowych badań zginania (3-PB) lub bezpośredniego rozciągania (DT) oraz podjęto próby oceny regeneracji w nawierzchniach. Nawiązano do poprzednich badań Daniela [52] potwierdzając omówione tam spostrzeżenia. Ponadto przedstawiono podejście wspomagające zrozumienie zjawiska powstawania mikropęknięć i ich zaniku w wyniku regeneracji. Trudności polowe związane z ustaleniem czasu odpoczynków oraz rozbieżności pozyskanych wyników uniemożliwiły znalezienie korelacji trwałości zmęczeniowej z self-healingiem pomiędzy laboratorium, a nawierzchnią. Autorzy raportu zasugerowali, iż badania związane ze zmęczeniem MMA, pękaniem i regeneracją powinny być kontynuowane w celu lepszego zrozumienia mechanizmu tych zjawisk.

Następnie Roque i inni (2002) [248] na konferencji AAPT w Colorado (USA), przedstawili na podstawie badań laboratoryjnych i terenowych sposób oceny stanu uszkodzeń w MMA, w którym zaproponowano prawo wzrostu pęknięć (z uwzględnieniem czasu odpoczynku) umożliwiające opisanie zarówno inicjacji, jak i propagacji pęknięć dla dowolnego obciążenia i temperatury. Do wykonania analiz autorzy wykorzystali badanie pośredniego rozciągania (IDT), w którym na podstawie wykresu obciążenie - odkształcenie w ustalonych warunkach temperaturowych oraz znając moduł sprężystości (część sprężysta modułu sztywności w teście IDT) można wskazać poziom energii powyżej, którego regeneracja mieszanek nie jest zupełna lub nie zachodzi.

Kolejno Li (2002) [270] zajmował się badaniami powstawania i propagacji pęknięć ciągłych (stan lepko-sprężysty) oraz regeneracji MMA (czasy odpoczynku). Autor nawiązując do badań Roquego [248] zaproponował korektę w prawie Parisa, w której zamiast współczynnika intensywności naprężeń zastosowano całąkę Rice'a. Li opierając się na analizach energetycznych wykazał, iż przyrost mikropęknięć przyczynia się w sposób dominujący do powstawania uszkodzeń w materiale podczas stosowania badań zmęczeniowych w warunkach kontrolowanego odkształcenia, natomiast zaaplikowane okresy odpoczynku wyraźnie wpływają na regenerację (gojenie się) powstałych mikropęknięć. Ponadto Autor zauważył, iż badane przez niego drobnoziarniste MMA wykonane w technologii na gorąco z użyciem zwykłych miękkich asfaltów drogowych cechują się różną zdolnością regeneracji. Ich poziom w dużej mierze związany jest z właściwościami zastosowanego lepiszcza do MMA.

Następnie Kim i inni (2003) [132] analizowali zjawisko zmęczenia, pęknięcia i regeneracji (okres odpoczynku) z użyciem asfaltów piaskowych stosując test DMA (eng. Dynamic Mechanical Analysis) – wykorzystywany do badania lepko-sprężystych zachowań materiałów (głównie polimerów). Test przeprowadzono z zastosowaniem warunku kontrolowanego odkształcenia. Częstotliwość obciążania wynosiła 10.0 Hz. Temperatura 25.0 °C. Podczas badania obserwowano zmiany: dynamicznego modułu ścinania, pseudo-sztywności oraz energii dyssypowanej. Autorzy porównując dwa analizowane lepiszcza wykazali, iż regeneracja (okres odpoczynku) w materiałach lepko-sprężystych przy tych samych zadanych poziomach obciążenia różni się, natomiast podkreślili, iż jest znacząca i przyczynia się do przyrostu trwałości zmęczeniowej (nawet o 23.9% w przypadku miększego lepiszcza).

W 2006 roku Kim i Roque [128] opublikowali artykuł, w którym zajmowano się badaniem wpływu okresu odpoczynku na regenerację, jej wysokość i zmianę przy wielokrotnym powtarzaniu sekwencji badania (z dodatkowym zastosowaniem przerw odpowiednio: 4 min, 8 min, 12 min, 16 min, 20 min). Do badań przygotowano 4 MMA: AC 19 wykonane w technologii na gorąco z zastosowaniem asfaltu zwykłego drogowego (PG 67-22) i modyfikowanego (PG 76-22 polimer SBS). Analizy wykonano przy użyciu testu pośredniego rozciągania (IDT) oraz (IDTF – badanie zmęczeniowe) stosując impuls obciążenia typu haversine o czasie trwania 0.1 s. Wymuszenie przegrodzono okresem odpoczynku wynoszącym 0.9 s. MMA badano w temperaturach 20.0 °C, 10.0 °C i 0.0 °C. Autorzy do oceny self-healingu i stopnia uszkodzenia MMA wykorzystali wskaźnik regeneracji i podejście energetyczne DCSE (*eng. Dissipated Creep Strain Energy*) proponowane w pracy Roquego [248]. Na podstawie wykonanych badań w artykule zaprezentowano znormalizowany współczynnik regeneracji charakteryzujący zdolność self-healingu analizowanych MMA (wyrażaną poprzez prędkość). Wykazano, iż prędkość regeneracji jest zależna od stanu uszkodzenia MMA (poziomu degradacji). Przebadane mieszanki z asfaltem modyfikowanym cechowały się mniejszą podatnością na powstawanie uszkodzeń, a modyfikacja matrycy asfaltowej polimerem nie wpływa negatywnie na regenerację. Ponadto wykazano, iż szybkość regeneracji jest wysoce nieliniowa przy analizowanych poziomach temperatury i zwiększała się przy mieszankach, w których zaaplikowano większą zawartość asfaltu. Autorzy dodali, iż w przypadku wykonanych analiz zdolność regeneracji badanych MMA może również zależeć od charakterystyki materiałowej (zastosowanego kruszywa, wolnych przestrzeni).

Następnie Shen (2006) [262] i (2007) [264] zajmowała się badaniem asfaltów zwykłych (PG 64-22) oraz modyfikowanych (PG64-22 polimer SBS, PG70-22 SBS) i mieszanek AC 10, AC20 wykonanych na tym samym lepiszczu w technologii na gorąco. Autorka przeanalizowała zmiany energii dyssypowanej w celu określenia korelacji asfalt-mieszanka i wpływu okresu odpoczynku na trwałość zmęczeniową. Do testów zmęczeniowych MMA zastosowano badanie 4-PB. Temperatura badania wynosiła 20.0 °C i 30.0 °C. Częstotliwość obciążania 10 Hz. Impuls wymuszenia: zaaplikowano kilka poziomów od 70 $\mu\epsilon$ do 1000 $\mu\epsilon$. Kształt obciążenia: funkcja haversine. Badania pozwoliły opracować czteroparametrowy energetyczny, zmęczeniowy model (uwzględniający poziom odkształcenia, sztywność MMA, zawartość wolnych przestrzeni/ asfaltu i gradacja MM) - PV (*eng. Plateau Value*) opierający się na wprowadzonym wskaźniku energii dyssypowanej (RDEC). Autorka wykazała możliwe współzależności asfalt-mieszanka. Ponadto nawiązując do czynnika regeneracji zaproponowano sposób uwzględnienia okresów odpoczynku w formie ogólnego parametru wyznaczanego empirycznie.

Kolejno Bhasin i inni (2008) [29] opublikował pracę, w której to zajmował się badaniem asfaltów z użyciem reometru dynamicznego ścinania. Do analiz autor zastosował zmęczeniowy test oscylacyjny z wdrożeniem okresu odpoczynku wynoszącym 4 min po przekroczeniu ustalonych poziomów spadku modułu zespolonego ścinania. Na podstawie badań autor wykorzystując model regeneracji Schaperego i O'Connora przedstawił funkcję regeneracji lepiszcza z okresem odpoczynku opierającą się na dwóch elementach: odzyskiwaniem zdolności do przenoszenia obciążeń w wyniku natychmiastowej kohezji pomiędzy zmiękczoną (od pęknięcia – energia uwalniana) powierzchnią lepiszcza i procesem dyfuzji wewnętrznych molekuł w otoczenia wierzchołka pęknięcia.

W 2009 roku Bhasin i inni [30] opublikowali eksperymentalną pracę, w której analizowano trwałość zmęczeniową z zastosowaniem okresu odpoczynku i chwilowego podgrzania. Do badań wykonano 4 mieszanki w technologii na gorąco – AC 19 z zastosowaniem 4 różnych lepiszczy: AAB-1, AAD-1, AAF-1, AAM-1. w analizach zastosowano test bezpośredniego jedno-osowego rozciągania VECD. Badanie prowadzono w warunkach kontrolowanego naprężenia z wykorzystaniem kształtu impulsu obciążenia

haversine. Częstotliwość badania wynosiła 10 Hz. Temperatura prowadzenia eksperymentu: 22 °C. Do badań trzykrotnie co 30000 cykli zaaplikowano okres odpoczynku trwający 1h. Jednorazowo po okresach odpoczynku MMA podgrzano do temperatury 50°C. Czas ogrzewania wynosił 20 min. Autor wykazał, iż regeneracja MMA jest znacząca. Trwałość zmęczeniowa analizowanych MMA wzrosła średnio 1.5 raza w przypadku samego okresu odpoczynku, natomiast prawie 2.5-3.0 razy w przypadku okresu odpoczynku i krótkotrwałego podgrzania! w artykule podkreślono również, iż self-healing jest zależny od rodzaju zastosowanego lepiszcza.

Liu i inni (2010) [152] opublikowali pracę, w której po raz pierwszy do MMA zastosowano zbrojenie rozproszone w postaci stalowych mikrowłókien umożliwiających zaaplikowanie podgrzania indukcyjnego – czynnika regenerującego. Do badań przygotowano 3 MMA: asfalt porowaty PA 16 wykonany w technologii na gorąco z zastosowaniem bardzo miękkiego zwykłego asfaltu drogowego 70/100. Mieszanki różniły się między sobą zawartością stalowych mikrowłókien oraz ich geometrią. Do badania wykorzystano zmęczeniowy test pośredniego rozciągania (IDTF). Ponadto wdrożono okres odpoczynku pomiędzy impulsami obciążenia o kształcie fali haversine. Jego długość wynosiła 0.3 s. MMA zostały poddane indukcyjnemu podgrzaniu w czasie 2 min następnie przez kolejne 24h ulegały kondycjonowaniu do temperatury badania. Temperatura podgrzania wynosiła odpowiednio: 137 °C, 169 °C, i 207 °C. Autorzy wykazali, iż ogrzewanie z użyciem indukcji w badanych MMA pozwala zupełnie zregenerować materiał wydłużając trwałość zmęczeniową dwukrotnie (jednorazowe podgrzanie). Udowodniono również, iż dłuższe włókna stalowe o mniejszej średnicy umożliwiają wydajniejszą regenerację w stosunku do włókien krótszych, ale o większej średnicy.

W 2010 roku opublikowano również raport NCHRP [188], w którym zaproponowano na podstawie wcześniejszych badań sposób uwzględnienia okresu odpoczynku w podejściu stanów krytycznych (trwałość zmęczeniowa). Na podstawie analiz z użyciem testu SVECD wyprowadzono nową funkcję self-healingu zawierającą informację o czasie trwania okresu odpoczynku. Metodologia wymagała jednak dalszych weryfikacji.

W tym samym roku Shen i inni (2010) [265] zaprezentowali pracę, w której zajmowano się analizami zmęczeniowymi asfaltów z zastosowaniem okresu odpoczynku (PG 64-28 i PG 70-28 – z dodatkiem polimeru). Do badania wykorzystano reometr dynamicznego ścinania. Zastosowano test oscylacyjny prowadzony w warunkach kontrolowanego naprężenia, którego częstotliwość wynosiła 10 Hz. Temperatura badania: 15 °C i 25 °C. w teście wdrożono 6 s okres odpoczynku co 10 cykli obciążenia. Do oceny trwałościowej wykorzystano analizę energii dyssypowanej i wskaźnik energetyczny RDEC zaproponowany we wcześniejszej pracy [262]. Na podstawie pozyskanych wyników autorzy podkreślili, iż zaproponowany przez nich program badawczy może z powodzeniem symulować warunki in-situ. Podniesiono również, iż okres odpoczynku przyczynia się do wydłużenia trwałości zmęczeniowej badanych asfaltów. Ponadto przebadany asfalt modyfikowany charakteryzuje się większą zdolnością regeneracji z użyciem czasów odpoczynku niż zwykły. Wykazano również, iż wyższa temperatura umożliwia sprawniejszą dyfuzję cząsteczek niż niższa.

Następnie Shen i inni (2011) [266] opublikowali artykuł, będący kontynuacją poprzednich badań z 2010 roku. Autorzy przeanalizowali inne poziomy temperatury: 20 °C, 30 °C i częstotliwości 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz oraz dodatkowo wdrożyli starzenie oksydacyjne (długoterminowe i krótkoterminowe). w artykule zaproponowano kryterium zmęczeniowe uwzględniające okres odpoczynku oraz wskaźnik regeneracji. Autorzy wykazali, iż częstotliwość badania, poziom obciążenia, temperatura i efekty starzeniowe wpływają na trwałość zmęczeniową i regenerację wywołaną okresem odpoczynku. w przypadku asfaltów postarzonych zaobserwowano wyraźny spadek wskaźnika regeneracji (zdolność materiału do self healingu) w skrajnych przypadkach nawet o połowę.

W 2012 roku Liu i inni [150] opublikowali pracę, w której analizowano wpływ zawartości stalowych mikro-włókien i czasu podgrzewania na trwałość zmęczeniową MMA i regenerację (okres odpoczynku i podgrzanie). Do badań przygotowano asfalt porowaty PA 16 z bardzo miękkim asfaltem 70/100 w technologii na gorąco. Oceniając trwałość zmęczeniową i regenerację zastosowano test pośredniego rozciągania IDTF oraz czteropunktowego zginania 4-PB. Temperatura badania wynosiła 5 °C. Częstotliwość 10 Hz. Czas odpoczynku wynosił 18h bez podgrzania indukcyjnego jak i z nim. Rozpatrywany okres podgrzania wynosił 30 s, 60 s, 90 s, 120 s, 150 s, 180 s. w artykule analizowano również wpływ temperatury podgrzania: 20 °C, 70 °C, 85 °C, 100 °C na regenerację. Autorzy udowodnili, iż istnieje optimum zawartości włókien stalowych (dla badanej MMA wynosił 2.5% masy asfaltu) powyżej którego efekt stosowania indukcji pogarsza się. Ponadto wykazano, iż im dłużej stosuje się proces ogrzewania (zjawisko indukcji) tym większą osiąga się zdolność MMA do regeneracji. Udowodniono również, iż w przypadku stosowania różnych temperatur podgrzewania istnieje wartość optymalna (dla badanego asfaltu porowatego wynosiło 85 °C) powyżej, której efekt regeneracji zaczyna spadać. Ponadto w pracy wskazano, iż zaaplikowanie powtarzalnych zabiegów regeneracji pozwala wydłużyć trwałość zmęczeniową badanych MMA nawet 5-cio krotnie.

W tym samym roku (2012) Liu i inni [153] opublikowali jeszcze jedną pracę nawiązującą do trwałości zmęczeniowej i regeneracji w asfalcie porowatym (PA 16 70/100) z zastosowaniem włókien stalowych i indukcyjnego podgrzania. Autorzy stosując badanie zmęczeniowe 4-PB (temperatura badania 5 °C) przy poziomie obciążenia 200 $\mu\epsilon$, 250 $\mu\epsilon$, 300 $\mu\epsilon$ i 400 $\mu\epsilon$ w warunkach kontrolowanego odkształcenia określili (dla badanej MMA) wskaźnik regeneracji, trwałość zmęczeniową i ich zmianę w zależności od zastosowanej temperatury podgrzania 20 °C, 70 °C, 85 °C, 100 °C. Wykazano, iż wartość wskaźnika self-healingu mieszanki z włóknami osiąga najwyższą wartość - 60 % dla temperatury 85 °C. Ponadto autorzy udowodnili, iż stosując badanie zmęczeniowe, regeneracja (podgrzanie i okres odpoczynku) i ponowne badanie zmęczeniowe można wydłużyć trwałość analizowanej MMA od 20% do 60% w zależności od zastosowanego poziomu obciążenia (im wyższy jego poziom tym większy efekt regeneracji).

Souliman (2012) [272] w swojej pracy analizował trwałość zmęczeniową i wpływ czasu odpoczynku na regenerację. Do badań wykonano 3 MMA w technologii na gorąco z zastosowaniem asfaltów PG 58-28, PG 64-22 i PG 76-16. w teście zmęczeniowym bezpośredniego rozciągania VECD autor zastosował okres odpoczynku trwający 5 s pomiędzy cyklami. Autor wykazał, iż zaimplementowanie dłuższego okresu odpoczynku (5 s) przyczynia się do pozyskania wyższej trwałości zmęczeniowej badanych MMA w stosunku do krótszych okresów zaaplikowanych w innych pracach. Ponadto zaproponował sposób uwzględnienia czasu w kryterium zmęczeniowym. metoda wymaga jednak dalszych weryfikacji.

W 2013 roku Liu i inni [151] zaprezentowali pracę, w której analizowano trwałość zmęczeniową i regenerację (okres odpoczynku i indukcyjne podgrzanie) mieszanki PA 16 z asfaltem 70/100 (z dodatkiem włókien stalowych) wbudowanej w nawierzchnię. Wyniki porównano względem wcześniejszych badań laboratoryjnych prowadzonych z użyciem zmęczeniowego testu pośredniego rozciągania IDTF. Temperatura badania wynosiła 15 °C. Autorzy wykazali, iż okres odpoczynku (nawierzchnia) wynoszący od 3h do 18h bez podgrzania indukcyjnego pozwala wydłużyć trwałość zmęczeniową badanej MMA o 10-20 %, natomiast dodatkowe zastosowanie ogrzewania indukcyjnego (2 min czas trwania do temperatury 85 °C) umożliwił zwiększenie trwałości o 50-60 %.

Kolejno Schlangen i inni (2013) [259] przedstawili koncepcję stosowania mikrokapsuł zawierających środek przyspieszający dyfuzję asfaltu w MMA (asfalt porowaty PA z dodatkiem włókien stalowych), który dodatkowo wspomagałby regenerację wywołaną indukcją. Autorzy nawiązując do zjawisk pojawiania się spękań nadmienili, iż dodany do mieszanki środek zostałby uwalniany, w przypadku propagacji pęknięcia rozrywającej kapsułę.

Pierwsze eksperymentalne badania z użyciem testu pośredniego rozciągania IDT wykazały potencjał stosowania tego preparatu umożliwiający wydłużenie trwałości. Autorzy podkreślają, iż badania będą kontynuowane.

Następnie Canestrari i inni (2014) [37] prowadzili badania asfaltów miękkich (penetracja 68, 59, 52, 54) z dodatkiem polimeru SBS (różne proporcje) w zakresie trwałości zmęczeniowej i regeneracji (okres odpoczynku). Do przeprowadzenia eksperymentu wykorzystano reometr dynamicznego ścinania. Zastosowano test oscylacyjny w warunkach kontrolowanego odkształcenia. Ponadto przygotowano odrębne próbki asfaltów, które zostały poddane procesom starzeniowym. Temperatura badania wynosiła 19.5 °C. Autorzy wykazali, iż podczas badań zmęczeniowych obserwuje się zjawiska tiksotropowe, które negatywnie wpływają na trwałość zmęczeniową i regenerację (okres odpoczynku). Zasygnalizowali, iż powinno się je odpowiednio uwzględnić. Ponadto udowodniono, iż większa zawartość polimeru SBS w asfalcie zwiększa zdolność regeneracji, natomiast wdrożone procesy starzeniowe spowodowały wyraźny spadek trwałości zmęczeniowej i nieznaczne zmniejszenie się zdolności regeneracyjnych badanych asfaltów z dodatkiem polimeru SBS.

W tym samym roku (2014) Maggiore [166] opublikowała pracę, w której zajmowała się oceną trwałości zmęczeniowej MMA i self-healingiem (okres odpoczynku) stosując badanie pośredniego rozciągania IDTF, czteropunktowego i dwupunktowego zginania (4-PB i 2-PB). Do testów przygotowano 2 reprezentatywne mieszanki AC 20 (zwykły asfalt drogowy o penetracji 40 mm i 100mm) wykonane w technologii na gorąco. Badania przeprowadzono w temperaturze 10 °C z zastosowaniem warunków kontrolowanego odkształcenia i częstotliwości impulsu obciążenia równym 25 Hz. Poziom obciążenia wynosił 160 $\mu\epsilon$. Autor zastosował program obciążania, w którym materiał został obciążony przez 10000 cykli, następnie wdrożono okres odpoczynku o takim samym czasie trwania. Program zapętłano do osiągnięcia spadku wartości modułu sztywności o 50%. w pracy wykazano, iż tak wdrożona regeneracja w testach zmęczeniowych może wydłużyć trwałość zmęczeniową badanych MMA o nawet 20%. Ponadto udowodniono, iż okres odpoczynku jest kluczowy podczas pierwszego odciążenia (zdolność regeneracji wyrażona wskaźnikiem self-healingu jest pięciokrotna). Kolejne zabiegi regeneracyjne wywołują spadek wartości wskaźnika.

Następnie Garcia i inni (2015) [75] zajmowali się wpływem zawartości mikrokapsuł olejowych (zmodyfikowany olej słonecznikowy) ze środkiem przyspieszającym procesy dyfuzyjne asfaltu na zjawisko self-healingu (podgrzewania w temperaturze 55 °C przez okres 4 h). Do testów przygotowano mieszankę AC 14 w technologii na gorąco z użyciem zwykłego asfaltu drogowego 40/60. Celem zweryfikowania zdolności regeneracyjnych autorzy zastosowali badanie zmęczeniowe w aparaturze pomiarowej NAT (*eng. Nottingham Asphalt Tester*). Temperatura badania wynosiła 20 °C. Częstotliwość obciążania 0.5 Hz. Dodatkowo celem zrozumienia mechanizmu pęknięcia materiału i działania środka zawartego w mikrokapsule na regenerację zaaplikowano obrazowanie tomograficzne – przed badaniem i po. Autorzy z powodzeniem zarejestrowali moment uwolnienia oleju i zamknięciem pęknięcia. Ponadto w artykule wykazano, iż zastosowany zabieg regeneracyjny (kapsuły + podgrzanie) pozwalają wydłużyć trwałość zmęczeniową od 5% do 100% zależnie od ilości zaaplikowanego środka.

W tym samym roku (2015) Sarsam [257] opublikował artykuł, w którym analizował wpływ zastosowania dodatków (popioły lotne w ilości 0, 2, 4, 6 % masy asfaltu, wapna hydratyzowanego oraz pyłu krzemionkowego) na trwałość i regenerację (okres odpoczynku i podgrzanie). Do badań przygotowano mieszankę AC 12.5 w technologii na gorąco z zastosowaniem zwykłego asfaltu 40-50. Trwałość zmęczeniową i regenerację oceniono stosując badanie 4-PB prowadzone w warunkach kontrolowanego odkształcenia (poziomy obciążenia 750 $\mu\epsilon$ i 900 $\mu\epsilon$). Temperatura badania wynosiła 20 °C, natomiast częstotliwość impulsu 5 Hz. Regenerację wdrożono po wykonanym badaniu zmęczeniowym (punkt

zniszczenia przyjęto kryterium spadku wartości modułu sztywności o 50 %) ogrzewając próbkę do temperatury 85 °C. Czas trwania regeneracji wynosił 2h. Następnie w ciągu kolejnych 3h próbkę kondycjonowano do temperatury badania i wykonywano ponownie test. Autor udowodnił, iż w przypadku wszystkich zastosowanych dodatków po wdrożeniu podgrzania moduł sztywności zregenerował się. Najmniejszy przyrost odnotowano w przypadku zastosowania popiołu lotnego natomiast największy dla wapna. w swojej pracy Sarsam wykazał, iż zdolność regeneracji dla badanych MMA jest tym większa im wyższy zastosowany poziom obciążenia. Ponadto autor udowodnił, iż dla analizowanego zarobu MMA gruboziarniste cechują się wyższą zdolnością regeneracji (nawet do 93.7 % wyższa trwałość zmęczeniowa) niż drobnoziarniste (45 %).

Kolejno Ajam i inni (2016) [7] podjęli próby zbadania wpływu promieniowania światła podczerwonego i indukcji na zdolność regeneracji wybranego MMA. Do badania przygotowano mieszankę AC 11 wykonaną w technologii na gorąco z zastosowaniem zwykłego asfaltu 40/60 oraz dodatkiem włókien stalowych. Ocenę zdolności regeneracji wykonano stosując test 3-PB i wykorzystując wskaźnik regeneracji. Badanie przeprowadzono aplikując stałą prędkość deformacji wynoszącą 50mm/min. Przygotowane próbki zostały uprzednio osłabione nacięciem o głębokości 1 cm. Na podstawie eksperymentu wykazano, iż indukcja lepiej wpływa na regenerację badanej MMA niż promieniowanie podczerwone. Autorzy podkreślają jednak, iż zależy to od wysokości zastosowanej temperatury podgrzania i czasu trwania. Wskaźnik regeneracji zarówno dla światła podczerwonego jak i indukcji osiągnął maksymalną wartość 90% - potwierdzając skuteczność obydwu czynników.

W 2016 roku Bueno i inni [36] zajmowali się analizą zdolności regeneracji spękań wybranych MMA z zastosowaniem indukcyjnego podgrzania. Do badania wykorzystano autorską eksperymentalną metodę umożliwiającą symulację warunków in-situ za pomocą przenośnego symulatora obciążenia. Na potrzeby testu wykonano płyty z asfaltu porowatego w technologii na gorąco z zastosowaniem asfaltu 50/70 oraz dodatkiem włókien stalowych o średnicy od 0.6 do 1mm. Płyty nacięto celem symulacji pęknięcia występującego w nawierzchni. Autor wykazał w swoim eksperymencie, iż zdolność self-healingu badanych przez niego mieszanek z użyciem podgrzania indukcyjnego jest zróżnicowana – od 25 % do 53 % wskaźnika regeneracji.

Następnie Micaelo i inni (2016) [174] przedstawili eksperymentalną pracę, w której to zajmowano się analizami wpływu kapsuł zawierających alginian wapnia na zdolność regeneracji. Na potrzeby badań wykonano mieszankę AC 20 (na wapieniu) w technologii na gorąco z użyciem zwykłego asfaltu 40/60. Kapsuły z preparatem w ilości 3% w stosunku do masy lepiszcza dodano do rozgrzanego asfaltu podczas procesu produkcyjnego. Do oceny zdolności regeneracji z użyciem kapsuł zastosowano test jednoosiowego ściskania i rozciągania T-C. Badania wykonano w temperaturze 20 °C. Częstotliwość obciążania wynosiła 1 Hz. w eksperymencie autorzy wykazali, iż stosowany środek poprawia (od 10-30%) zdolność regeneracji badanego MMA w odniesieniu do mieszanki bez dodatków. Ponadto podniesiono problem, iż zastosowane kapsuły powodują zmniejszenie się ilości wolnych przestrzeni w mieszance. Zjawisko to spowodowane jest specyfiką samego odczynnika, który pęcznieje po wycieku z kapsuły.

W 2017 roku Liu i inni [149] opublikowali artykuł, w którym zajmowano się zbadaniem wpływu różnej zawartości odpadków stalowych i włókien na zdolność regeneracji przy wywołanej podgrzaniem indukcyjnym. Do badań przygotowano 4 mieszanki typu AC13.2 wykonane w technologii na gorąco z zastosowaniem zwykłego asfaltu drogowego 60-80 (o różnej zawartości 4.8 %, 4.9 % 5.0 % i 5.1%) oraz dodatków - włókien stalowych. Zdolność regeneracji (podgrzanie indukcyjne) zbadano za pomocą zginania próbki półwalcowej SCB. Autorzy udowodnili na podstawie przeprowadzonego eksperymentu, iż regeneracja indukowana termicznie jest znacznie wyższa w przypadku badanych mieszanek z wyższą

zawartością asfaltu. Ponadto wykazali, iż analizowane MMA osiągają najwyższy możliwy do osiągnięcia wskaźnik regeneracji (wynoszący od 50% do 70%) w temperaturze podgrzania równej 90 °C.

Kolejno Al-Mansoori i inni (2017) [10] opublikowali artykuł, w którym analizowano wpływ dodatku alganianu wapnia dodawanego do mieszanki w postaci mikrokapsuł na jej zdolność regeneracji, sztywność i wolną przestrzeń. Do badań wykonano beton asfaltowy AC20 na wapieniu w technologii na gorąco z zastosowaniem lepiszcza zwykłego 40/60. Podczas procesu technologicznego dodawano dla zaprojektowanej mieszanki różne zawartości dodatku w ilościach: 1.1 %, 2.8 %, 5.5 % masy aplikowanego lepiszcza. Do oceny zmian mechanicznych przyjęto za metodę reprezentatywną test pośredniego rozciągania (ITT). Temperatura badania wynosiła 20 °C. Autorzy wykazali, iż stosowanie dodatku powoduje uelastycznienie badanej mieszanki – moduł sztywności AC20 z kapsułami spada średnio o 27 %. Aplikacja środka powoduje również zmniejszenie się zawartości wolnych przestrzeni średnio o 15 %. w pracy udowodniono również, iż spękana mieszanka poddana działaniu kapsuł może zostać zregenerowana jednorazowo o 52.9 % – wskaźnik regeneracji.

W tym samym roku Khiavi i inni [124] zaprezentowali bardzo ciekawą pracę związaną z wpływem regeneracji (interpretacja wykresu) na trwałość zmęczeniową. Do badania przygotowano mieszankę AC 25 na wapieniu wykonaną w technologii na gorąco z zastosowaniem miękkiego asfaltu 60/70. Badania zmęczeniowe wykonano z użyciem testu 4-PB w warunkach kontrolowanego odkształcenia przy poziomach obciążenia: 70 $\mu\epsilon$, 200 $\mu\epsilon$, 250 $\mu\epsilon$, 400 $\mu\epsilon$, 700 $\mu\epsilon$, 1000 $\mu\epsilon$. Temperatura badania wynosiła 20 °C. Częstotliwość obciążania: 10 Hz i 25 Hz. Na podstawie otrzymanych wyników autor udowodnił, iż badania w częstotliwości 25 Hz pozwalają wykluczyć zjawisko regeneracji (zawarte w częstotliwości impulsu przykładanego na próbkę). w pracy zaproponowano metodę obliczania zdolności self-healingu badanej MMA pomiędzy wykresami o częstotliwości 10 Hz (jest regeneracja) i 25 Hz (jej brak). Autor udowodnił, iż dla wykonanych analiz trwałość zmęczeniowa uwzględniająca regenerację mieszanki (autorska metoda) jest od 2.5 do 9.45 razy większa w zależności od zaaplikowanego poziomu obciążenia.

Sung i inni (2017) [280] opublikowali pracę, w której zajmowano się analizami wpływu mikrokapsuł zawierających formaldehyd dodawanych do asfaltu zwykłego 60/70 na zdolność regeneracji lepiszcza. Badania przeprowadzono korzystając z reometru dynamicznego ścinania (DSR). Autorzy wykazali, wzrost wskaźnika regeneracji asfaltu. Najwyższa jego wartość wynosiła 60% przy zaaplikowaniu 5 % mikrokapsuł względem asfaltu użytego do przygotowania próbki. Ponadto wykonano kontrolną MMA - AC 10 (wapień) w technologii na gorąco z zastosowaniem tego samego asfaltu i środka. Mieszankę zbadano ustalając jej moduł sztywności stosując test bezpośredniego rozciągania (DT). Temperatura badań w DSR i DT wynosiła 20 °C. Analizując wykonane MMA wykazano, iż wartość modułu sztywności jest o 7 % mniejszy z kapsułami niż bez – AC 10 stała się elastyczniejsza.

W tym samym roku Liu i inni [154] (2017) po raz pierwszy odnotowano badania poświęcone zdolności regeneracji wybranych MMA (dodanie włókien stalowych + podgrzanie indukcyjne) i trwałości zmęczeniowej zestawiając ze sobą dwie technologie wykonania – na gorąco (HMA) i na ciepło (WMA). Do badań wykonano mieszanki AC 16 (wapień) z zastosowaniem zwykłego asfaltu 50/60 oraz dodatku w postaci 6 % włókien stalowych (masa lepiszcza). Aby uzyskać mieszankę w technologii WMA zastosowano 6 % dodatku również dodawanego w stosunku do masy asfaltu umożliwiającego obniżenie temperatury produkcji (brak wymienienia jego nazwy). w celu ustalenia zdolności regeneracyjnych wykonanych mieszanek wyrażonych przez wskaźnik regeneracji oraz trwałość zmęczeniową zastosowano test 4-PB. Temperatura badania wynosiła 15 °C. Częstotliwość obciążania 10 Hz. Badanie prowadzono w warunkach kontrolowanego odkształcenia. Poziom obciążenia wynosił 400 $\mu\epsilon$. Regenerację materiału wywołano podgrzaniem indukcyjnym do temperatury 80 °C w czasie 2

min, następnie próbki chłodzono do temperatury badania zmęczeniowego. Ponadto analizowano inne temperatury podgrzania: 75 °C, 85°C, 90 °C, 95 °C usiłując ustalić jej wpływ na zdolność regeneracji. Autorzy udowodnili, iż optymalna temperatura podgrzania indukcyjnego badanych mieszanek z dodatkiem włókien stalowych waha się pomiędzy 75 °C (WMA), a 85 °C (HMA). Wykazano również, iż przy zaaplikowanym obciążeniu 400 $\mu\epsilon$ wydłużenie trwałości zmęczeniowej jest o około 10 % większe AC 16 w technologii HMA niż WMA. Ponadto udowodniono, iż dla analizowanych mieszanek z włóknami stalowymi wskaźnik regeneracji określony po podgrzaniu indukcyjnym w temperaturze 75 °C wynosi odpowiednio: 65 % technologia HMA, 63 % technologia WMA.

Następnie Ayar i inni (2018) [22] zajmowali się analizą wpływu okresów odpoczynku na trwałość zmęczeniową i regenerację. Do badań wykonano mieszanekę BBTM 11 w technologii na gorąco z zastosowaniem zwykłego asfaltu 50/70. Analizy przeprowadzono wykorzystując test zmęczeniowy 3-PB. Temperatura badania wynosiła 20 °C. Częstotliwość obciążania: 5 Hz. Test prowadzono w warunkach kontrolowanego naprężenia. Poziom obciążenia wynosił 0.3 MPa. w ramach zastosowania do badania regeneracji zaaplikowano okres odpoczynku, którego czas trwania wynosił odpowiednio: 1 min co każde 800 cykli, 10 min co 800 cykli, 1 min co 400 cykli i 5 min co 100 cykli. Na podstawie wykorzystanego w pracy podejścia energetycznego autorzy wykazali, iż częstsza aplikacja okresów odpoczynku (5 min co 100 cykli) pozwala wydłużyć trwałość zmęczeniową nawet dwukrotnie.

Kolejno Dinh i inni (2018) [61] zajmowali się badaniem wpływu dodania włókien stalowych i indukcyjnego podgrzania na zdolność regeneracji wybranej MMA. Do badania wykonano mieszanekę AC 12 na granicie w technologii na gorąco z zastosowaniem asfaltu PG 64-22 i włóknami stalowymi w ilości 4 %, 6% i 8 % masy dodawanego asfaltu. Autorzy zastosowali test pośredniego rozciągania (IDT) do ustalenia wskaźnika regeneracji. Temperatura badania wynosiła z (-)18 °C, natomiast podgrzania indukcyjnego 90 °C (czas podgrzania wynosił średnio 6 min, kondycjonowanie do temperatury badania 3h). Naukowcy wykazali, iż badana AC 12 z 6 % dodatkiem włókien stalowych wykazuje znacznie wyższą zdolność regeneracji (wartość wskaźnika równa 97%) niż ta sama mieszanka z zawartością 4 % (85%) czy 8% (92%).

W tym samym roku Mączka (2018) [170] opublikował pracę poświęconą analizie wpływu regeneracji (okresów odpoczynku oraz okres odpoczynku + podgrzanie) na trwałość zmęczeniową wybranej MMA. Do badań przygotowano mieszanekę AC 16 WMS (na sjenicie) w technologii na gorąco z zastosowaniem lepiszcza 20/30. w procesie technologicznym nie zaaplikowano żadnych dodatków. Analizę trwałości zmęczeniowej wykonano z zastosowaniem testu 4-PB. Temperatura badania wynosiła 5 °C. Częstotliwość obciążenia 15 Hz. Test wykonano w warunkach kontrolowanego odkształcenia. Przyjęto dwa poziomy obciążenia: 150 $\mu\epsilon$ i 300 $\mu\epsilon$. Zabieg regeneracji w mieszance zastosowano po pierwszym badaniu zmęczeniowym, a kolejno powtarzano test. Self-healing aplikowano na dwa sposoby – część próbek została poddana okresowi odpoczynku o długości trwania równej 12h, natomiast druga część została poddana 3 h ogrzewaniu w temperaturze 80 °C stosując suszarkę laboratoryjną, a następnie pozostałą część czasu (12h) próbki kondycjonowano do temperatury badania. Autor udowodnił, iż stosowanie ogrzania i okresu odpoczynku przyczynia się do wydłużenia trwałości zmęczeniowej mieszanki o ponad 89% w przypadku poziomego obciążenia 150 $\mu\epsilon$, a 69% dla 300 $\mu\epsilon$. Sam okres odpoczynku nie jest tak skuteczny jak dodatkowe połączenie z podgrzaniem – analizy wykazały, iż poziomego obciążenia 150 $\mu\epsilon$ wydłużenie trwałości wynosiło 21 %, natomiast dla 300 $\mu\epsilon$ 56 %. Dodatkowo na podstawie przedstawionych wykresów histerezy autor wykazał, iż zastosowane zabiegi regeneracyjne skutecznie eliminują powstałe uszkodzenia - kształt pętli próbki zmęczonej po wdrożeniu zabiegów self-helingu wraca do pierwotnego kształtu – przed wykonaniem badania zmęczeniowego.

Riara i inni (2018) [242] zajmowali się analizami wpływu zastosowanych środków (*eng healing agents* – nie przedstawiono szczegółowych danych o substancji) na zdolność regeneracji wybranej MMA namoczonej w wodzie. Do badań przygotowano mieszankę AC 13 na wapieniu w technologii na gorąco z zastosowaniem lepiszcza 70/70 z dodatkiem polimeru SBS w ilości 7.8% (masa asfaltu). Zdolność regeneracji (wskaźnik) został wyznaczony na podstawie testu zginania próbki półwalcowej (SCB). Temperatura badania wynosiła (-)10 °C. Autorzy wykazali, iż próbki namoczone w wodzie (mokre) charakteryzują się o połowę mniejszym wskaźnikiem regeneracji, niż próbki suche.

Następnie Liu i inni (2019) [155] opublikowali pracę, w której analizowano wpływ zastosowania włókien stalowych w ilościach 2%, 3%, 5% masy asfaltu i indukcyjnego podgrzania na zdolność regeneracji. Do badań przygotowano mieszankę AC 13.2 w technologii na gorąco z zastosowaniem zwykłego miękkiego asfaltu 80/100. Zdolność regeneracji ustalono za pomocą wskaźnika regeneracji opierając się na wynikach testu zmęczeniowego 4-PB prowadzonego w temperaturze 15 °C. częstotliwość obciążania wynosiła 10 Hz. Poziomu wymuszenia i warunek prowadzenia obciążenia w pracy nie wyszczególniono. Zabieg regeneracyjny został wdrożono po spadku wartości modułu sztywności o 50%, następnie materiał ponownie zbadano. w ramach przyspieszenia self-healingu zaaplikowano podgrzanie indukcyjne do temperatury 80 °C (czasu trwania nie podano). Kolejną próbkę poddano kondycjonowaniu przez 12h. Na podstawie pozyskanych wyników badania autorzy wykazali, iż największą zdolność regeneracji stosując ogrzanie indukcyjne (wskaźnik na poziomie 60%) posiada mieszanka zawierająca 4 % włókien stalowych. Ponadto twórcy przedstawili metodę określania prędkości ogrzewania indukcyjnego próbki z zastosowaniem obrazowania termowizyjnego.

W (2020) roku Botella i inni [35] zajmowali się badaniem wpływu czasu odpoczynku stosując przemiatanie impulsem obciążenia w teście SVECD (próbki pryzmatyczne) na trwałość zmęczeniową. Do badań przygotowano mieszankę w technologii na gorąco z użyciem zwykłego lepiszcza 50/70. Test prowadzono w temperaturze 20 [°C]. Częstotliwość obciążania wynosiła 10 [Hz]. Badanie prowadzono w warunkach kontrolowanego odkształcenia. Program obciążenia składał się z kilku bloków o poziomach amplitudy ułożonych w następującej kolejności: 25 $\mu\epsilon$, 50 $\mu\epsilon$, 25 $\mu\epsilon$, 75 $\mu\epsilon$, 25 $\mu\epsilon$, 100 $\mu\epsilon$, 25 $\mu\epsilon$, i 112.5 $\mu\epsilon$. Długość każdego interwału wynosiła 5000 cykli. w każdym z bloków co 200 cykli wprowadzono 10 min oraz 5 min okres odpoczynku. Autorzy wykazali, iż zastosowanie tak zdefiniowanego zabiegu regeneracji pozwala wydłużyć trwałość zmęczeniową trzykrotnie (okres odpoczynku 10 min), a dwukrotnie przy okresie 5 min.

W tym samym roku Mullapudi i inni (2020) [180] zajmowali się wpływem stosowania destruktu (w ilości 0%, 15%, 25 %, i 35%) na regenerację (okres odpoczynku) i trwałość zmęczeniową. Do badań przygotowano mieszankę AC 13 (z destruktem) w technologii na gorąco stosując lepiszcze 50/70. Trwałość zmęczeniową i regenerację (wskaźnik) zweryfikowano za pomocą testu pośredniego rozciągania (IDTF). Temperatura badania wynosiła 20 °C. Impuls obciążenia rozsunięto okresem odpoczynku o czasie trwania: 0.4s, 0.6s, 0.8s i 1.4s. Autor wykazał, iż badana mieszanka z zawartości 25% destruktu wykazuje nawet 2.5 razy wyższą trwałość zmęczeniową (okres odpoczynku 1.5s) niż wyprodukowana mieszanka referencyjna. Pozostałe okresy odpoczynku również wydłużają trwałość, lecz nie są to zmiany aż tak znaczące (średnio 0.5 – 1.4 razy) w stosunku do czasu trwania 1.5s.

Następnie Santos i inni [256] opublikowali pracę, w której analizowano wpływ regeneracji (podgrzania – 90 °C, 110 °C, 130 °C i 150 °C, czas jego trwania 4h) na zmiany wartości modułu sztywności i trwałości zmęczeniowej. Do badań przygotowano mieszankę AC 14 (na wapieniu) w technologii na gorąco z zastosowaniem asfaltu zwykłego 35/50 w ilościach: 3.7%, 4.0%, 4.3%, 4.6%. Trwałość zmęczeniową przeanalizowano stosując test 4-PB (warunek kontrolowanego odkształcenia, poziom obciążenia 850 $\mu\epsilon$). Temperatura badania wynosiła 20

°C. Częstotliwość obciążania: 10 Hz. Autorzy wykazali, iż mieszanka z zawartością lepiszcza na poziomie (4.6%) charakteryzuje się najwyższą zdolnością regeneracji (trwałość zmęczeniowa została wydłużona o 75% dla podgrzania w 90 °C). Ponadto nadmieniono, iż wyższe temperatury podgrzewania wpływają niekorzystnie na regenerację – wskaźnik self-healingu jest znacząco mniejszy i wynosi od 5% - 15%.

Kolejno Su i inni (2020) [277] prowadzili badania z użyciem testu VECD oceniając wpływ okresu odpoczynków (rozsunięty impuls obciążenia o odpowiednio: 0.1 s, 0.2 s, 0.3 s, 0.5 s) na trwałość zmęczeniową, spękania (krzywa uszkodzeń) i regenerację. Do badania przygotowano mieszankę AC 10 w technologii na gorąco (rodzaju lepiszcza nie wyszczególniono). Temperatura badania wynosiła 20 °C. Częstotliwość obciążania 10 Hz. Poziom wymuszenia – przyjęto 200 $\mu\epsilon$. Autorzy udowodnili, iż trwałość zmęczeniowa z zastosowaniem w programie obciążenia okresu odpoczynku zwiększa się dla badanej mieszanki odpowiednio o: 0.1s – 35%, 0.2s – 40%, 0.3s – 47%, 0.5s – 55%. Ponadto wykazano, iż przyrost uszkodzeń (wykres pseudo-sztywności – uszkodzenie) jest wolniejszy (nawet do dwóch razy) im dłuższy wprowadzony jest okres odpoczynku pomiędzy poszczególnymi cyklami.

Następnie Xiang i inni (2020) [312] zajmowali się zbadaniem wpływu podgrzania (40 °C, 50 °C, 60 °C i 70 °C - czas oddziaływania temperatury 30 min) asfaltu zwykłego 70/100 i modyfikowanego 45-65/55 na trwałość zmęczeniową lepiszcza. Badania zmęczeniowe prowadzono stosując oscylacyjny test w reometrze dynamicznego ścinania. Przyjęto temperaturę badania równą 15 °C oraz częstotliwość oscylacji 10 Hz. Autorzy wykazali w pracy, iż wybrany asfalt modyfikowany charakteryzuje się porównywalną zdolnością regeneracji w stosunku do asfaltu zwykłego wynosząc średnio 90%. Ponadto w pracy udowodniono, iż dla analizowanych asfaltów optymalną temperaturą podgrzania w zadanym czasie (30min) są wartości z zakres 50-60 °C.

W tym samym roku Xiang i inni (2020) [313] opublikowali jeszcze jedną pracę nawiązującą do poprzednich badań. Analizowano wpływ podgrzania w temperaturze 40 °C, 50 °C, 60 °C [°C] i 70 °C (czas oddziaływania temperatury wynosił odpowiednio: 3h, 6h, 12h, 24h) na regenerację i trwałość zmęczeniową wybranych MMA. Do badań przygotowano mieszankę AC 13 (wapień) w technologii na gorąco zastosowaniem asfaltów: zwykłego 70/100 i modyfikowanego 45-65/55 (te same co poprzednio). Testy zmęczeniowe przeprowadzono stosując badanie 4-PB (warunek kontrolowanego odkształcenia, poziom obciążenia 600 $\mu\epsilon$, 800 $\mu\epsilon$, 1000 $\mu\epsilon$, 1200 $\mu\epsilon$, 1400 $\mu\epsilon$). Temperatura badania wynosiła 15 °C. Częstotliwość obciążania - nie podano. Autorzy potwierdzili, iż dla badanych MMA optymalna temperatura podgrzania również wynosi od 50-60 °C niezależnie od poziomu zaaplikowanego obciążenia. Ponadto wykazano, iż stosując dłuższy czas ogrzewania wskaźnik regeneracji badanych mieszanek wzrasta i osiąga najwyższą wartość odpowiednio: 75 % MMA z asfaltem modyfikowanym, 79% asfalt zwykły dla czasu ogrzewania 24h.

Następnie Fakri i inni (2020) [69] przedstawili pracę (drugą odnotowaną), w której analizowano wpływ włókien i ściniek stalowych (dozowano 1%, 2%, 4% masy asfaltu) oraz podgrzania mikrofalowego (czas trwania 20s, 30s, 40s) na zdolność regeneracji mieszanek wykonanych w technologii na gorąco (HMA) i na ciepło (WMA). Do badania przygotowano mieszankę AC 12.5 z użyciem zwykłego lepiszcza 60/70 oraz dodatków (Sasobit 2% masy asfaltu) umożliwiających wykonanie próbek w technologii na ciepło. Do oceny zdolności regeneracyjnych mieszanek (wskaźnik wytrzymałości na rozciąganie) w dwóch technologiach zaaplikowano test SCB. Temperatura badania wynosiła 20 °C. Autorzy wykazali, iż najlepsze zdolności regeneracji wykazują badane MMA (w technologii HMA i WMA) zawierające 2% włókien i odpadków stalowych – wskaźnik osiągał wartość odpowiednio: 80 % HMA i 60 % WMA. Ponadto wykazano, iż optymalny czas ogrzewania w mikrofalach wynosi 20 s.

W tym samym roku Badroodi i inni (2020) [127] opublikowali eksperymentalną pracę, w której analizowano wpływ dodawania destruktu (0 %, 70 % i 100 %) i pyłu krzemionkowego (3 % i 5%) na regenerację (zastosowano 24h okres odpoczynku) i trwałość zmęczeniową mieszanki w technologii na ciepło. Do badań wykonano mieszankę AC 12 aplikując zwykły asfalt 85/100 oraz zastosowano dodatek – Sasobit w ilości 3% masy lepiszcza (umożliwienie produkcji w technologii WMA). Trwałość zmęczeniową przanalizowano stosując badanie 4-PB przeprowadzone w 25 °C. Częstotliwości obciążania nie wyszczególniono. w teście zastosowano warunek kontrolowanego odkształcenia. Poziom obciążenia wynosił 800 $\mu\epsilon$. Autorzy wykazali, iż zastosowany okres odpoczynku (pomiędzy pierwszym badaniem a drugim) pozwolił wydłużyć trwałość zmęczeniową testowanej mieszanki bez destruktu średnio o 70 % (niezależnie od zawartości dodawanego pyłu krzemionkowego). Ponadto udowodniono, iż im wyższa zawartość stosowanego destruktu tym zdolność regeneracji dla tych mieszanek jest mniejsza - poziom wskaźnika wynosi średnio 50%.

Na podstawie wykonanego przeglądu stanu wiedzy (regeneracja) można wyraźnie stwierdzić, iż istnieje wyraźna luka związana z analizami trwałości zmęczeniowej i regeneracji MMA z zastosowaniem jednoczesnego podgrzania i okresu odpoczynku, który mógłby symulować skrajnie upalny dzień (dziennie nagrzewanie) – oddziaływanie wysokiej temperatury oraz okres odpoczynku w konstrukcji nawierzchni. Większość przedstawionych badań nawiązywała do ustalenia wskaźnika regeneracji opartego na wytrzymałości na rozciąganie w teście pośredniego rozciągania (IDT), próbki pół-walcowo zginanej SCB lub bezpośredniego jednoosiowego rozciągania VECD. Ponadto istnieje niewiele testów poświęconych analizom zmęczeniowym i regeneracji z użyciem badania 4-PB, który dobrze odwzorowuje warunki in-situ. Należy również podkreślić, iż stosowane temperatury w testach wynosiły przeważnie 15 °C lub więcej – pomijano niższe poziomy, które nawiązywałyby do warunków średniorocznych w klimacie np. umiarkowanym (używanym w projektowaniu mechanicznym lub zawartych w wymogach technicznych). Podobnie zaobserwowano, iż istnieje niewiele opracowań związanych z aplikacją obciążenia rzędu 130 – 280 $\mu\epsilon$, korespondującego z warunkami panującymi w warstwach nośnych nawierzchni, gdzie regeneracja również zachodzi.

Od kilku lat można zaobserwować, iż naukowcy skupiają się na stosowaniu dodatków jak np. włókna stalowe (+ podgrzanie indukcyjne), mikrokapsuły (lub inne) oceniając ich wpływ na zdolność regeneracji mieszanki pomijając tym samym podstawowe podejście badawcze – większość budowanych (lub istniejących) dróg wykonywana jest z MMA bez dodatków. Analiz takich mieszanek jest niewiele, co stanowi wyraźny problem i lukę w stanie wiedzy. Ponadto należy dodać, iż badania ukazujące zdolność regeneracji mieszanek z dodatkami zostały przeprowadzone z pominięciem innych ważnych testów umożliwiających określenie np. odporności mieszanki na działanie wody i mrozu (ISTR), czy inne - których wyniki mogą wykluczyć stosowalność takiego MMA do warstw konstrukcji.

Z przeglądu wynika również, iż zdolność regeneracji MMA i jej wpływ na trwałość zmęczeniową została analizowana w większości prac na mieszankach drobnoziarnistych np. AC 13 (przeznaczonych na warstwę ścieralną lub wiążącą) wykonanych na kruszywie wapiennym, z zastosowaniem zwykłych miękkich lub bardzo miękkich asfaltów w technologii na gorąco – wyróżnić można brak lub niewielką ilość badań z użyciem zwykłych asfaltów twardych i twardych modyfikowanych czy nawet wysokomodyfikowanych. Wyszczególnić można również wyraźny brak analiz trwałości zmęczeniowej i regeneracji (ogrzewanie i czas odpoczynku) na mieszankach np. AC 22 (na gabrze) stosowanych do podbudowy. Ponadto nie wyszczególnia się kompleksowych analiz z uwzględnieniem stosowania różnych lepiszczy asfaltowych: asfalt zwykły 35/50, asfalt modyfikowany 25/55-60 (SBS) i wysokomodyfikowany 25/55-80 (SBS) (HiMA) w technologii na gorąco (HMA). Ponadto nie wykonano dotąd kompleksowych analiz trwałościowych z uwzględnieniem regeneracji

w zakresie dwóch różnych mieszanek wykonanych w technologii np. HMA i WMA. Nie odnotowano prac zajmujących się optymalizacją składu (np. różne zawartości lepiszcza) i zestawienie jej wpływu na trwałość zmęczeniową i regenerację.

Analizując obecny stan wiedzy można wyraźnie stwierdzić, iż badania nad regeneracją prowadzono przeważnie w wysokich temperaturach – powyżej 70 °C (stosując podgrzanie indukcyjne lub światłem podczerwonym). Istnieje niewiele odnotowanych artykułów nawiązujących do zmiany temperatury stosując standardowy proces podgrzania (który dobrze aproksymuje naturalny proces nagrzewania nawierzchni). Ponadto, warto zauważyć, iż analizowane w pracach autorów poziomy temperatury (powyżej 70 °C) są nieosiągalne dla warstw nośnych nawet w przypadku zaistnienia skrajnego upalnego dnia dla np. klimatu umiarkowanego. Zastosowanie zabiegów regeneracji w niższych temperaturach np. 50 °C lub 60 °C pozwoliłoby na dokładniejsze oddanie warunków in-situ i bardziej miarodajne określenie wpływu regeneracji na trwałość zmęczeniową MMA stosowanych w istniejących jak również i nowobudowanych drogach.

Z przeglądu wynika również, iż do tej pory nie wykonano żadnych analiz związanych z trwałością zmęczeniową i regeneracją mieszanek poddanych wcześniejszemu działaniu wody i mrozu lub/i agresji chemicznej (zimowe środki utrzymaniowe) - wypadkowy wpływ ujmujący regenerację w lecie oraz degradację środowiskową w zimie). Nie uwzględniono tych oddziaływań w trwałości MMA i konstrukcji (kryteria zmęczeniowe).

Warto również podkreślić, iż obecnie regeneracja dotąd nie została uwzględniona zarówno w laboratoryjnych kryteriach oceny MMA jak i w mechanistycznym projektowaniu, pomimo, iż mieszanka musi spełniać kryteria np. na odporność na wodę i mróz (ISTR). Problem ten poruszono w pracy wielu autorów.

W celu dokładniejszego rozpoznania zjawiska zmęczenia i regeneracji MMA zostaną przeprowadzone odpowiednie badania w ujęciu kompleksowym (również z zastosowaniem optymalizacji składu) na mieszance AC 22 P (gabro) pozwalające ocenić trwałość zmęczeniową MMA z uwzględnieniem regeneracji oraz oddziaływań środowiskowych które wpływają na konstrukcje w warunkach in-situ. Badania zostaną przeprowadzone z wykorzystaniem mieszanek na bazie asfaltów: zwykłego, modyfikowanego i wysokomodyfikowanego (technologia na gorąco) oraz zwykłych w technologii na gorąco i na ciepło.

4.5. Podsumowanie obecnego stanu wiedzy

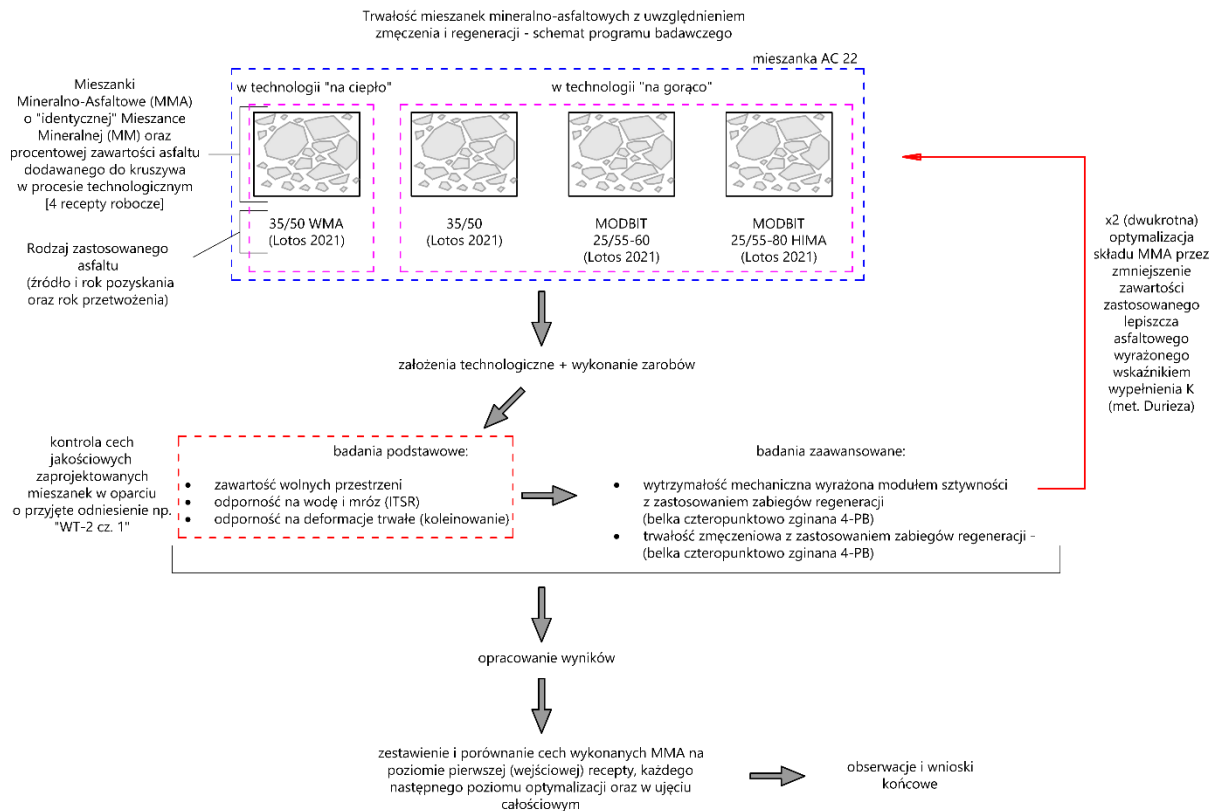
Na podstawie omówionej tematyki trwałości MMA z uwzględnieniem zjawisk: zmęczenia, i regeneracji wyszczególnia się 11 punktów, które wymagają wdrożenia szczegółowych analiz.

1. Nie analizowano w sposób skuteczny zjawiska regeneracji zachodzącego w MMA, w szczególności uwzględniając: niższe poziomy temperatury (50-70 °C), przeznaczenie mieszank (warstwy nośne) lub ze względu na rodzaj lepiszcza czy technologię wykonania.
2. Nie uwzględniono zjawiska regeneracji w trwałości zmęczeniowej MMA (laboratorium) oraz niezależnie konstrukcji (kryterium zmęczeniowe).
3. Nie odnotowano również prób poświęconych optymalizacji składu MMA ze względu na regenerację.
4. Nie analizowano zjawiska regeneracji w mieszankach poddanych wcześniejszym oddziaływaniom środowiskowym – woda i mróz, sól drogowa ze względu na trwałość zmęczeniową.
5. Nie określono zdolności regeneracji MMA poddanych wcześniejszym oddziaływaniom środowiskowym – woda i mróz, sól drogowa ze względu na trwałość zmęczeniową.
6. Nie uwzględniono wpływu regeneracji, oddziaływań środowiskowych (woda i mróz, sól drogowa) w trwałości zmęczeniowej MMA i konstrukcji nawierzchni (kryterium zmęczeniowe). Ponadto w kryteriach zmęczeniowych nie uwzględniono dotąd rodzaju lepiszcza stosowanego do mieszanki.
7. Nie przeanalizowano i nie oceniono (względem asfaltów zwykłych) w sposób skuteczny trwałości zmęczeniowej mieszank: zawierających nowe receptury lepiszczy - asfalty modyfikowane i wysokomodyfikowane z polimerem SBS oraz MMA wykonywanych w różnych technologiach produkcji.
8. Nie przeanalizowano wpływu stosowania mieszank wykonanych w różnych technologia produkcji (WMA i HMA) na trwałość konstrukcji.
9. Nie odnotowano prac, poświęconych kompleksowym (jednoczesnym) analizom wpływu optymalizacji składu MMA (zawartość lepiszcza) na trwałość zmęczeniową - mieszank wykonanych na bazie lepiszczy: zwykłych, modyfikowanych (SBS), wysokomodyfikowanych (SBS) oraz różnej technologii produkcji (WMA i HMA).
10. Nie analizowano wpływu oddziaływań środowiskowych – wody i mrozu, soli drogowej na trwałość zmęczeniową mieszank.
11. Nie analizowano zmian zachodzących na poziomie struktury materiału korzystając z oceny makroskopowej (wykres zmian modułu od liczby cykli) mieszank poddanych wpływom środowiskowym.

Celem uzupełnienia dotychczasowego stanu wiedzy zostaną przeprowadzone odpowiednie badania, obliczenia i analizy, pozwalające ocenić trwałość MMA i konstrukcji nawierzchni z uwzględnieniem zjawisk zmęczenia i regeneracji. Analizy zostaną przeprowadzone w ujęciu kompleksowym – cztery mieszanki różniące się rodzajem asfaltu i technologią produkcji. Ponadto zostanie wdrożona optymalizacja składu (zawartość lepiszcza). Rozważania powiązane z trwałością MMA i konstrukcji uwzględniać będą również oddziaływanie czynników środowiskowych (woda i mróz, sól drogowa, ich kumulacja – woda i mróz + sól drogowa).

5. Część eksperymentalno-doświadczalna

W związku z obszerną tematyką zawartą w pracy opracowano ideowy plan badawczy, który został przedstawiony na Rys. 23. Schemat ten pozwolił w sposób uporządkowany przedstawić zakres pracy i etapy postępowania w zakresie kompleksowych badań mieszank mineralno-asfaltowej.



Rys. 23: Ideowy plan badawczy

Na potrzeby niniejszej rozprawy, do analiz wybrano mieszankę typu beton asfaltowy o największym wymiarze ziarna 22.4 mm – AC 22, znajdującej powszechne zastosowanie w warstwie wiążącej lub podbudowie. Spodnia część warstw jest szczególnie narażona na występowanie zjawiska zmęczenia, które przyczynia się do powstawania uszkodzeń np. pęknięć dół-góra z uwagi na wysokie, naprzemienne oddziaływania naprężeń rozciągających i ściskających od kół pojazdów. Pomimo, iż warstwy te znajdują się wewnątrz projektowanych i wykonywanych konstrukcji to jednak zachodzi w nich „healing”, który pozytywnie wpływa na trwałość zmęczeniową. Jest on zależny od wielu czynników m.in. temperatury i czasu jej oddziaływania.

W ramach wykonania kompleksowych analiz mieszanki AC 22 zaprojektowano cztery receptury robocze o identycznym składzie ziarnowym, wykorzystanym kruszywie oraz procentowej zawartości lepiszczca. Receptury różnią się między sobą jedynie rodzajem zastosowanego lepiszczca. Zabieg ten pozwolił efektywnie porównać wpływ zastosowanych nowych receptur asfaltów na mieszankę mineralno-asfaltową (MMA) poprzez eliminację dodatkowych zmiennych takich jak np. różne uziarnienie czy ilość dozowanego asfaltu. Do zaprojektowanych mieszank wykorzystano następujące lepiszczca:

1. **asfalt zwykły 35/50 WMA** (Lotos) pobrany i przetworzony w 2021 roku – umożliwiający wykonanie MMA w technologii „na ciepło”,
2. **asfalt zwykły 35/50** (Lotos) pobrany i przetworzony w 2021 roku – umożliwiający wykonanie MMA w technologii „na gorąco”,
3. **asfalt modyfikowany Modbit 25/55-60** (Lotos) pobrany i przetworzony w 2021 roku – umożliwiający wykonanie MMA w technologii „na gorąco”,
4. **asfalt wysokomodyfikowany Modbit 25/55-80 HIMA** (Lotos) pobrany i przetworzony w 2021 roku – umożliwiający wykonanie MMA w technologii „na gorąco”.

Zastosowanie takiego układu lepiszczy umożliwiło porównanie cech jakościowych (w tym wysokości regeneracji i wpływu na trwałość zmęczeniową) mieszanek z włączeniem zabiegów optymalizacyjnych tych recept zarówno wewnątrz technologii produkcji „na gorąco”, „na ciepło” (dla asfaltów zwykłych) oraz globalnie (zestawiane MMA).

Wspomniane działania optymalizacyjne polegały na zmniejszeniu ilości dozowanego w recepcie asfaltu, operując współczynnikiem wypełnienia K stosowanym w metodzie Durieza, bez zmiany składu ziarnowego - recept optymalizowanych względem pierwotnych). Należy ponownie wyraźnie podkreślić, iż w każdej recepcie poziom zawartości asfaltu był jednakowy – zmienną był jedynie jego rodzaj. Szczegółowe informacje o receptach, założeniach technologicznych i projektowanej mieszance (np. ze względu na kategorie ruchu i przeznaczenie) zostaną poruszone w dalszych podrozdziałach rozprawy.

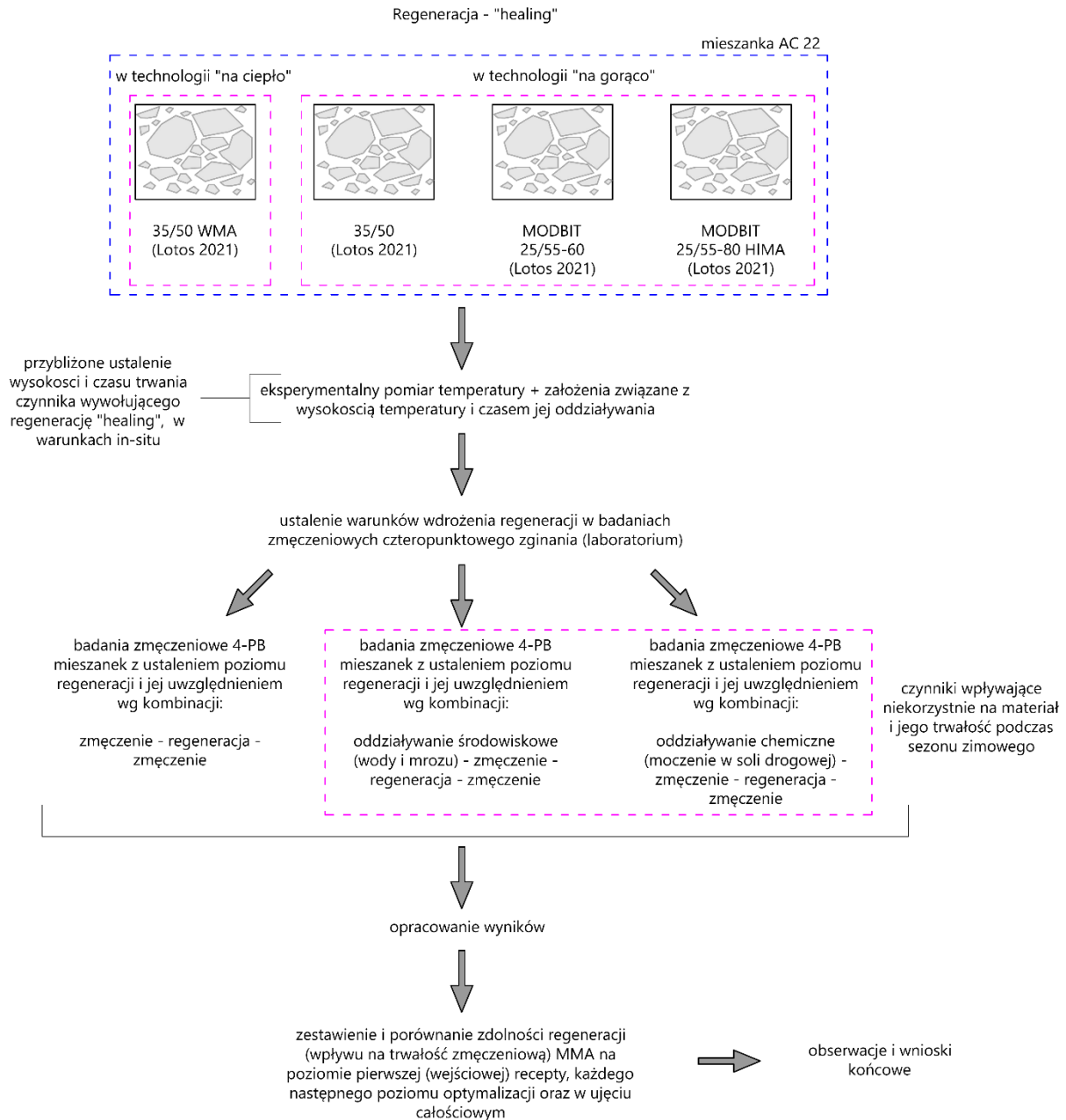
Celem uzyskania miarodajnych informacji o wpływie zastosowanych asfaltów na cechy jakościowe MMA wykonanych w różnych technologiach, blok badawczy podzielono na dwie części.

1. Blok podstawowy – badania niezbędne z punktu widzenia zatwierdzenia/dopuszczenia recepty roboczej do stosowania/wbudowania mieszanki w konstrukcje. Stanowią one podstawową informację o jakości materiału (pośrednio jego trwałości) względem dokumentu odniesienia (zastosowano wymagania Warunków Technicznych - 2 cz.1 - [78]).
2. Blok zaawansowany – badania związane ze sztywnością MMA (parametr powiązany z wytrzymałością materiału) oraz trwałością zmęczeniową. w obydwu przypadkach zastosowano zabiegi regeneracyjne - wprowadzono „healing”.

Analizy bloku zaawansowanego związane z regeneracją umożliwiły zróżnicowanie zdolności mieszanek do healingu w przyjętych warunkach – co jest istotne z perspektywy ustalania trwałości zmęczeniowej. Ponadto pozwoliły zaproponować sposób jego uwzględnienia w badaniach laboratoryjnych i kryterium zmęczeniowym (projektowanie mechanistyczne).

Następnie wyniki wykonanych badań każdej z recept (i ich etapów optymalizacji) przeanalizowano, rozpatrując różnice we wspomnianym wcześniej zakresie (asfalt, technologia, ujęcie globalne). Całość podsumowano. Postawiono odpowiednie wnioski.

Kluczowym elementem tematyki całej rozprawy (zawartym w bloku zaawansowanym), jest zjawisko regeneracji i aplikacja w badaniach. Tą część przedstawionego wcześniej planu wykazano jako osobny pod-element w postaci ideowego schematu analizy healingu zamieszczonego na Rys. 24.



Rys. 24: Ideowy schemat badań związanych z regeneracją

Regeneracja w MMA zależna jest przede wszystkim od nasłonecznienia, czasu jego trwania oraz wysokości temperatury. Celem symulacji warunków panujących in-situ wykonano eksperyment, który pozwolił poprzez pomiar ciągle ocenić wysokość temperatury i czas jej oddziaływania na mieszanki w przypadku bezchmurnego letniego dnia. Badania przeprowadzono dla pojedynczej płyty mieszanki oraz układu warstwowego (z podziałem na głębokość). Następnie na podstawie pomiarów, opinii synoptyków oraz odnotowanych temperatur maksymalnych (odczuwalnych w cieniu) w Polsce (urząd meteorologii) przyjęto

założenia związane z poziomem temperatury i czasem jej trwania. Następnie na podstawie przygotowanych informacji wdrożono sposób zastosowania regeneracji w badaniach laboratoryjnych bloku zaawansowanego – analiza modułu sztywności oraz trwałości zmęczeniowej. Do osiągnięcia tego celu wybrano badanie czteropunktowego zginania (4-PB).

Z uwagi na charakterystyczne oddziaływania środowiskowe pojawiające się szczególnie w sezonie zimowym – działanie wody i mrozu oraz czynników chemicznych (soli drogowej) analiza regeneracji, zmian modułu sztywności i trwałości zmęczeniowej została rozszerzona. Zastosowano podział na trzy główne kierunki badawcze:

1. stosując zabiegi regeneracyjne według kombinacji: **zmęczenie – regeneracja - zmęczenie** – oddziaływanie czysto mechaniczne (podstawowy sposób),
2. stosując zabiegi regeneracyjne na próbkach, które uprzednio zostały poddane oddziaływaniu wody i mrozu: **woda i mróz - zmęczenie – regeneracja - zmęczenie** – wpływ środowiskowy i mechaniczny,
3. stosując zabiegi regeneracyjne na próbkach, które uprzednio zostały poddane oddziaływaniu chemicznemu (soli drogowej): **moczenie w soli - zmęczenie – regeneracja - zmęczenie** – wpływ chemiczny i mechaniczny.

Kombinacje badawcze pozwoliły ocenić regenerację w zależności od innych oddziaływań, które przyczyniają się do degradacji mieszanek w warunkach in-situ. Zebrane wyniki badań zestawiono. Wykazano różnice w stosunku do analizowanych mieszanek i poziomów ich optymalizacji. Rozważania wzbogacono o analizę zmian wartości modułu sztywności od liczby cykli umożliwiając ocenę makroskopową mieszanek. Wykonane badania umożliwiły opracować autorską metodę uwzględniania regeneracji w przypadku wpływu mechanicznego oraz wystąpienia innych oddziaływań zewnętrznych. Istotnym osiągnięciem, które przedstawionym w rozprawie jest o opracowanie autorskiej formuły pozwalającej prognozować trwałość z uwzględnieniem regeneracji w przypadku stanu skumulowanego – oddziaływanie wody i mrozu i soli drogowej. Formuła została sprawdzona i wykazała skuteczność. Całość podsumowano. Postawiono wnioski.

Szczegółowe założenia oraz kroki postępowania całego programu i pod-elementu (regeneracji) zostały omówione w dalszych podrozdziałach niniejszej rozprawy.

5.1. Projekt mieszanki typu beton asfaltowy AC 22

Największe natężenia ruchowe, wywołane przez tranzyt występują w większości na drogach wyższych klas – autostrady, drogi ekspresowe, główne ruchu przyspieszonego lub główne - w szczególności tych, które należą do tzw. sieci połączeń międzynarodowych. Konstrukcje nawierzchni w drogach tego przeznaczenia są bardzo często poddawane impulsom ponadnormatywnym, z uwagi na np. przeciążenie ładunkiem lub przez niewłaściwe ciśnienie opon w kołach pojazdu. Ponadto na przestrzeni ostatnich lat obserwuje się rosnący trend natężenia ruchowego [84, 250, 271]. Obserwacje te wymusiły opracowanie nowych standardów związanych z dopuszczalnym naciskiem wyrażonym przez równoważną oś standardową *N*. Do tej pory wynosiła ona 100 kN, natomiast obecnie jest to 115 kN. w związku z tym, do wykonania kompleksowych analiz związanych z trwałością mieszanek (również zmęczeniową uwzględniającą procesy regeneracji + optymalizacja) ze względu na zastosowany asfalt i technologię produkcji wybrano mieszankę typu beton asfaltowy o maksymalnym wymiarze ziarna 22.4 mm przeznaczony na warstwę podbudowy dla zakresu kategorii ruchu KR 3-7 - AC 22 P.

Warto dodać, iż ważnym czynnikiem wyboru tego typu mieszanki było przeznaczenie zastosowania - drogi wyższych klas. Drogi te w zdecydowanej większości są usytuowane na terenach otwartych – nasłonecznienie nawierzchni i czas jego trwania nie są zakłócone przez istniejący drzewostan lub inne przeszkody naturalne bądź sztuczne. Ten stan pozwala oszacować maksymalny potencjał zjawiska regeneracji, które wystąpi w przypadku skrajnie upalnego dnia lata lub w formie kumulacji wpływów upalnych dni w okresach letnich podczas czasu eksploatacji projektowanej konstrukcji. Wspomniane spostrzeżenia pozwalają przyjąć odpowiednie kroki postępowania związane z uwzględnieniem regeneracji w badaniach laboratoryjnych tak, aby jak najlepiej odwzorować warunki in-situ.

5.1.1. Zastosowane materiały

Projekt recept roboczych oraz przygotowanie odpowiednich zestawów próbek do badań mieszanki AC 22 P wymagał pozyskania niezbędnych materiałów, które na potrzeby badawcze zostały odpowiednio: wyselekcjonowane, przygotowane (workowane), przytransportowane oraz ostatecznie przetworzone. w zakresie sporządzenia mieszanki mineralnej pobrano łącznie około 2.0 t następujących składników:

1. grys gabro 16.0 – 22.4 mm - kruszywo łamane (kopalnia Bartnica, Dolnyśląsk),
2. grys gabro 11.2 – 16.0 mm - kruszywo łamane (kopalnia Bartnica, Dolnyśląsk),
3. grys gabro 8.0 – 11.2 mm - kruszywo łamane (kopalnia Bartnica, Dolnyśląsk),
4. grys gabro 4.0 – 8.0 mm - kruszywo łamane (kopalnia Bartnica, Dolnyśląsk),
5. grys gabro 2.0 – 5.6 mm - kruszywo łamane (kopalnia Bartnica, Dolnyśląsk),
6. piasek gabro 0.0 – 2.0 mm – kruszywo łamane (kopalnia Bartnica, Dolnyśląsk),
7. wypełniacz 0.0 – 2.0 mm - mączka kamienna (Lhoist, Tarnów Opolski).

Przykładowe zdjęcie materiałów przetransportowanych do miejsca docelowego usytuowanych w miejscu tymczasowego składowania (obszar zewnętrzny laboratorium drogowego Politechniki Wrocławskiej) zamieszczono na Rys. 25.



Rys. 25: Pozyskane kruszywo w miejscu tymczasowego składowania

Pozyskane kruszywo spełniało wymogi dokumentów odniesienia, za które przyjęto Warunki Techniczne 1 (kruszywa wymagania techniczne) GDDKiA skrótowo: WT -1 [81] oraz WT -2 [83] w zakresie mieszanki mineralnej AC 22 P na KR 3-7. Ponadto cechy jakościowe pobranego materiału kamiennego również pozwalały na zastosowanie go do betonu asfaltowego AC 22 przeznaczonego na warstwę wiążącą o KR 3-7.

Celem przeprowadzenia kompleksowych analiz MMA AC 22 P na KR 3-7 z zastosowaniem różnych rodzajów lepiszcza oraz technologii produkcji, pozyskano łącznie około 0.6 t asfaltów. Zostały one odpowiednio przygotowane i doręczone w specjalnych szczelnie zamkniętych metalowych pojemnikach o objętości ok. 5l, umożliwiającym swobodne użycie w warunkach laboratoryjnych. Do prac technologicznych wykorzystano m.in:

1. asfalt zwykły 35/50 WMA (Lotos, 2021, Gdańsk) – przeznaczony do produkcji MMA w technologii na ciepło (brak informacji o dodatku i jego ilości dodawanym do asfaltu w celu umożliwienia produkcji MMA w tej technologii – informacja zastrzeżona przez producenta),
2. asfalt zwykły 35/50 (Lotos, 2021, Gdańsk) – przeznaczony do produkcji MMA w technologii na gorąco,
3. asfalt modyfikowany Modbit 25/55-60 (Lotos, 2021, Gdańsk) – przeznaczony do produkcji MMA w technologii na ciepło,
4. asfalt wysokomodyfikowany Modbit 25/55-80 HIMA (Lotos, 2021, Gdańsk) – przeznaczony do produkcji MMA w technologii na ciepło.

Przykładowe zdjęcie asfaltów zamkniętych w specjalnych metalowych pojemnikach zamieszczono na Rys. 26.



Rys. 26: Asfalty zastosowane do produkcji MMA użytych w rozprawie

Przy wyborze asfaltów sugerowano się ich dostępnością na rynku, zastosowaniem w powszechnych inwestycjach krajowych (przeprowadzono dialog z producentami/dystrybutorami i lokalnymi wytwórniami mas bitumicznych), nowością tematu – jakościowo nowe receptury asfaltów (szczególnie WMA oraz modyfikowanych i wysokomodyfikowanych HIMA), które są promowane przez koncerny naftowe, wytycznymi – prawnym dokumentem odniesienia (wybrano Warunki Techniczne 2 – WT-2 [83] Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad GDDKiA) oraz przede wszystkim ich penetracją (miarodajne porównanie – asfalt „twardy”).

Asfalty spełniały wymogi norm oraz WT-2 [83] w zakresie asfaltów zwykłych: PN-EN 12591:2010 [207] modyfikowanych oraz wysokomodyfikowanych: PN-EN 14023:2011 [209], PN-EN 14023:2011/Ap1:2014-04 [215] i PN-EN 14023:2011/Ap2:2020-02 [229]. Producent asfaltu 35/50 WMA zadeklarował spełnienie wymogów normy [207].

Ostatnim składnikiem użytym do projektu i wykonania próbek AC 22P był środek adhezyjny Wetfix AP-17, polepszający zdolność powinowactwa kruszywo-asfalt. Zastosowane w MMA grysy i piasek pochodziły od skały „gabro” – zasadowej skały głębinowej, charakteryzującej się wysoką zdolnością obtaczania ziarna przez asfalt. Mimo wszystko zdecydowano się na wdrożenie tego czynnika z dwóch powodów:

1. aby wykluczyć ewentualne rozbieżności, które mogły powstać podczas procesu technologicznego (wahania temperaturowe),
2. celem podniesienia trwałości materiału na etapie projektowania - analizy przeprowadzone przez Instytut Badawczy Dróg i Mostów [24], wykazały iż stosowanie Wetfixa AP17 korzystnie wpływa na podniesienie odporności wyprodukowanej mieszanki na wodę i mróz – badanie ITSR.

5.1.2. Recepta robocza

W pierwszej kolejności zanim przystąpiono do wykonania projektu mieszanki mineralnej wykonano kontrolne przesiewy „na sucho” dla każdego z pozyskanych grysów, piasku wg PN-EN 933-1 [211] oraz wypełniacza wg PN-EN 933-10 [206]. Badania według procedur normowych wzbogacono, celem pozyskania jak najdokładniejszej informacji o uziarnieniu. Wdrożono następujące modyfikacje:

1. każdy grys, piasek oraz wypełniacz przepuszczono przez pełen zakres sit normowych o wymiarach kwadratowych oczek: 45.0; 31.5; 22.4; 16.0; 11.2; 8.0; 5.6; 4.0; 2.0; 1.0; 0.5; 0.25; 0.125 i 0.063 mm,
2. wykonano sześciokrotny przesiew każdego użytego materiału kamiennego, a wyniki uśredniono i zaaplikowano do projektu MM,
3. do zbadania uziarnienia zastosowano przynajmniej o 1.5 razy więcej materiału niż wynosi minimalne założenie normowe zależne od wymiaru największego ziarna D analizowanej frakcji,
4. wykorzystano przesiewarkę mechaniczną z dogęszczeniem wibracyjnym – z sitami o średnicy 300 mm (Morek, model: LPzE-3e).

Wyniki przesiewów oraz wykonaną podstawową analizę statystyczną zamieszczono w Tab. 6-12, natomiast przykładowe zdjęcie stanowiska pomiarowego zamieszczono na Rys. 27.



Rys. 27: Stanowisko pomiarowe do analizy uziarnienia

Tab. 6: Przesiew grys gabro 16.0 – 22.4

Sito [mm]	Zakres badanych frakcji [mm]						Suma przesianego materiału [g]	Średnia przesiewu [g]	Średnia [%] zawartość przesiewu	Wariancja	Odchylenie standardowe [g]	Współczynnik zmienności [%]	Mediana
	16.0 - 22.4 (Gabro)	16.0 - 22.4 (Gabro)	16.0 - 22.4 (Gabro)	16.0 - 22.4 (Gabro)	16.0 - 22.4 (Gabro)	16.0 - 22.4 (Gabro)							
	Nr przesiewu												
45.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0%	0.0	0.0	0.0%	0.0	
31.50	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0%	0.0	0.0	0.0%	0.0	
22.40	650.8	417.4	375.2	590.1	513.4	531.3	3078.2	513.0	7.6%	10679.3	103.3	20.1%	522.4
16.00	5410.7	5492.6	5584.8	5563.8	5752.5	5755.2	33559.6	5593.3	82.4%	19196.4	138.6	2.5%	5574.3
11.20	513.9	824.2	623.0	535.8	657.3	685.4	3839.6	639.9	9.4%	12667.6	112.6	17.6%	640.2
8.00	0.0	21.2	10.2	4.2	11.8	20.4	67.8	11.3	0.2%	72.1	8.5	75.1%	11.0
5.60	0.5	0.8	0.0	0.7	3.9	3.6	9.5	1.6	0.0%	2.9	1.7	107.6%	0.8
4.00	0.5	0.2	0.3	0.4	1.7	2.2	5.3	0.9	0.0%	0.7	0.8	95.9%	0.5
2.00	0.3	0.2	0.1	0.1	1.2	1.7	3.6	0.6	0.0%	0.5	0.7	113.5%	0.3
1.00	0.4	0.3	0.3	0.1	0.8	1.9	3.8	0.6	0.0%	0.4	0.7	104.6%	0.4
0.500	0.5	0.2	0.1	0.1	1.0	1.2	3.1	0.5	0.0%	0.2	0.5	92.8%	0.4
0.250	0.4	0.9	0.6	0.2	1.8	2.3	6.2	1.0	0.0%	0.7	0.8	80.9%	0.8
0.125	1.4	3.4	1.3	1.5	3.6	3.5	14.7	2.5	0.0%	1.3	1.2	47.1%	2.5
0.063	13.3	13.6	11.7	9.1	26.4	23.6	97.7	16.3	0.2%	48.9	7.0	43.0%	13.5
< 0,063	8.9	9.8	10.0	10.8	7.9	9.3	56.7	9.5	0.1%	1.0	1.0	10.6%	9.6
Suma przesianej próbki [g]	6601.6	6784.8	6617.6	6716.9	6983.3	7041.6		6791.0	100.00%				

Tab. 7: Przesiew grysgabro 11.2 – 16.0

Zakres badanych frakcji [mm]													
	11.2 - 16.0 (Gabro)	11.2 - 16.0 (Gabro)	11.2 - 16.0 (Gabro)	11.2 - 16.0 (Gabro)	11.2 - 16.0 (Gabro)	11.2 - 16.0 (Gabro)							
Nr przesiewu													
Sito [mm]	1	2	3	4	5	6	Suma przesianego materiału [g]	Średnia przesiewu [g]	Średnia [%] zawartość przesiewu	Wariancja	Odchylenie standardowe [g]	Współczynnik zmienności [%]	Mediana
45.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0%	0.0	0.0	0.0%	0.0
31.50	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0%	0.0	0.0	0.0%	0.0
22.40	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0%	0.0	0.0	0.0%	0.0
16.00	593.5	462.7	463.3	363.6	369.9	390.1	2643.1	440.5	11.0%	7572.0	87.0	19.8%	426.4
11.20	2833.5	2946.9	2983.3	3132.3	2935.5	2992.0	17823.5	2970.6	74.1%	9471.2	97.3	3.3%	2965.1
8.00	564.4	550.7	546.2	546.3	636.6	568.0	3412.2	568.7	14.2%	1192.3	34.5	6.1%	557.6
5.60	16.4	17.4	13.3	16.3	20.1	19.1	102.6	17.1	0.4%	5.7	2.4	14.0%	16.9
4.00	1.4	2.9	0.6	0.5	1.8	1.2	8.4	1.4	0.0%	0.8	0.9	63.1%	1.3
2.00	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.1	0.0%	0.0	0.1	38.7%	0.1
1.00	0.1	0.3	0.2	0.3	0.1	0.1	1.1	0.2	0.0%	0.0	0.1	53.6%	0.2
0.500	0.1	0.5	0.2	0.3	0.1	0.1	1.3	0.2	0.0%	0.0	0.2	73.9%	0.2
0.250	0.7	0.8	0.5	0.7	1.2	0.8	4.7	0.8	0.0%	0.1	0.2	29.6%	0.8
0.125	1.9	1.1	1.1	1.2	2.2	1.6	9.1	1.5	0.0%	0.2	0.5	30.5%	1.4
0.063	3.9	3.7	3.7	4.9	3.8	3.9	23.9	4.0	0.1%	0.2	0.5	11.5%	3.9
< 0,063	5.6	6.2	4.1	4.6	7.2	5.7	33.4	5.6	0.1%	1.2	1.1	20.0%	5.7
Suma przesianej próbki [g]	4021.7	3993.4	4016.6	4071.1	3978.6	3982.7		4010.7	100.00%				

Tab. 8: Przesiew grysgabro 8.0 – 11.2

Zakres badanych frakcji [mm]													
	8.0 - 11.2 (Gabro)	8.0 - 11.2 (Gabro)	8.0 - 11.2 (Gabro)	8.0 - 11.2 (Gabro)	8.0 - 11.2 (Gabro)	8.0 - 11.2 (Gabro)							
Nr przesiewu													
Sito [mm]	1	2	3	4	5	6	Suma przesianego materiału [g]	Średnia przesiewu [g]	Średnia [%] zawartość przesiewu	Wariancja	Odchylenie standardowe [g]	Współczynnik zmienności [%]	Mediana
45.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0%	0.0	0.0	0.0%	0.0
31.50	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0%	0.0	0.0	0.0%	0.0
22.40	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0%	0.0	0.0	0.0%	0.0
16.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0%	0.0	0.0	0.0%	0.0
11.20	229.7	251.7	187.3	241.7	251.7	210.0	1372.1	228.7	7.9%	658.3	25.7	11.2%	235.7
8.00	2394.9	2392.1	2425.1	2366.5	2376.0	2393.6	14348.2	2391.4	82.6%	402.1	20.1	0.8%	2392.9
5.60	242.3	234.7	247.2	252.3	265.2	255.1	1496.8	249.5	8.6%	112.4	10.6	4.2%	249.8
4.00	16.8	14.3	18.0	8.4	9.8	12.3	79.6	13.3	0.5%	14.5	3.8	28.7%	13.3
2.00	3.5	2.7	4.5	2.3	2.0	2.9	17.9	3.0	0.1%	0.8	0.9	30.3%	2.8
1.00	0.6	0.6	0.5	0.7	0.5	1.2	4.1	0.7	0.0%	0.1	0.3	38.6%	0.6
0.500	0.2	0.1	0.6	0.7	0.4	0.9	2.9	0.5	0.0%	0.1	0.3	63.3%	0.5
0.250	0.7	0.8	0.8	1.0	0.6	1.2	5.1	0.9	0.0%	0.0	0.2	25.5%	0.8
0.125	2.8	2.1	2.1	1.5	2.1	1.8	12.4	2.1	0.1%	0.2	0.4	20.9%	2.1
0.063	3.2	4.3	2.5	4.5	3.7	4.0	22.2	3.7	0.1%	0.6	0.7	20.2%	3.9
< 0,063	0.2	0.7	0.7	1.6	1.0	0.8	5.0	0.8	0.0%	0.2	0.5	55.1%	0.8
Suma przesianej próbki [g]	2894.9	2904.1	2889.3	2881.2	2913.0	2883.8		2894.4	100.00%				

Tab. 9: Przesiew grys gabro 4.0 – 8.0

Zakres badanych frakcji [mm]													
	4.0 - 8.0 (Gabro)	4.0 - 8.0 (Gabro)	4.0 - 8.0 (Gabro)	4.0 - 8.0 (Gabro)	4.0 - 8.0 (Gabro)	4.0 - 8.0 (Gabro)							
Nr przesiewu													
Sito [mm]	1	2	3	4	5	6	Suma przesianego materiału [g]	Średnia przesiewu [g]	Średnia [%] zawartość przesiewu	Wariancja	Odchylenie standardowe [g]	Współczynnik zmienności [%]	Mediana
45.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0%	0.0	0.0	0.0%	0.0
31.50	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0%	0.0	0.0	0.0%	0.0
22.40	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0%	0.0	0.0	0.0%	0.0
16.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0%	0.0	0.0	0.0%	0.0
11.20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0%	0.0	0.0	0.0%	0.0
8.00	61.8	63.7	75.8	81.8	79.4	63.0	425.5	70.9	6.6%	82.4	9.1	12.8%	69.8
5.60	647.7	665.4	689.7	666.5	684.6	667.7	4021.6	670.3	62.8%	227.4	15.1	2.2%	667.1
4.00	310.1	318.8	282.1	293.7	291.4	301.6	1797.7	299.6	28.1%	178.2	13.4	4.5%	297.7
2.00	25.1	17.2	12.0	20.8	13.1	17.3	105.5	17.6	1.6%	23.7	4.9	27.7%	17.3
1.00	4.0	1.7	1.6	3.9	1.1	3.3	15.6	2.6	0.2%	1.6	1.3	49.3%	2.5
0.500	1.8	0.7	0.8	1.1	0.7	1.3	6.4	1.1	0.1%	0.2	0.4	40.5%	1.0
0.250	1.0	0.6	0.5	0.9	0.7	0.8	4.5	0.8	0.1%	0.0	0.2	24.9%	0.8
0.125	0.5	0.8	0.8	0.8	0.9	1.8	5.6	0.9	0.1%	0.2	0.4	47.8%	0.8
0.063	2.5	2.5	1.7	2.3	1.7	2.4	13.1	2.2	0.2%	0.1	0.4	17.5%	2.4
< 0,063	0.7	0.7	0.7	0.5	0.6	0.6	3.8	0.6	0.1%	0.0	0.1	12.9%	0.7
Suma przesianej próbki [g]	1055.2	1072.1	1065.7	1072.3	1074.2	1059.8		1066.6	100.00%				

Tab. 10: Przesiew grys gabro 2.0 – 5.6

Zakres badanych frakcji [mm]													
	2.0 - 5.6 (Gabro)	2.0 - 5.6 (Gabro)	2.0 - 5.6 (Gabro)	2.0 - 5.6 (Gabro)	2.0 - 5.6 (Gabro)	2.0 - 5.6 (Gabro)							
Nr przesiewu													
Sito [mm]	1	2	3	4	5	6	Suma przesianego materiału [g]	Średnia przesiewu [g]	Średnia [%] zawartość przesiewu	Wariancja	Odchylenie standardowe [g]	Współczynnik zmienności [%]	Mediana
45.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0%	0.0	0.0	0.0%	0.0
31.50	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0%	0.0	0.0	0.0%	0.0
22.40	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0%	0.0	0.0	0.0%	0.0
16.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0%	0.0	0.0	0.0%	0.0
11.20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0%	0.0	0.0	0.0%	0.0
8.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0%	0.0	0.0	0.0%	0.0
5.60	7.2	6.8	9.7	7.2	12.5	12.0	55.4	9.2	1.3%	6.5	2.6	27.7%	8.5
4.00	200.1	207.5	213.0	200.9	243.2	263.5	1328.2	221.4	31.8%	677.1	26.0	11.8%	210.3
2.00	412.2	412.9	406.5	418.6	395.8	381.3	2427.3	404.6	58.2%	189.3	13.8	3.4%	409.4
1.00	61.6	57.0	54.9	63.6	42.5	38.8	318.4	53.1	7.6%	103.6	10.2	19.2%	56.0
0.500	3.4	2.6	2.2	3.0	1.7	1.6	14.5	2.4	0.3%	0.5	0.7	29.7%	2.4
0.250	1.4	1.1	0.6	1.3	0.8	0.9	6.1	1.0	0.1%	0.1	0.3	30.1%	1.0
0.125	0.8	0.9	0.6	0.9	0.4	0.5	4.1	0.7	0.1%	0.0	0.2	31.3%	0.7
0.063	3.0	2.0	2.0	1.6	2.1	2.0	12.7	2.1	0.3%	0.2	0.5	22.0%	2.0
< 0,063	0.8	1.5	0.1	1.5	0.9	0.7	5.5	0.9	0.1%	0.3	0.5	57.9%	0.9
Suma przesianej próbki [g]	690.5	692.3	689.6	698.6	699.9	701.3		695.4	100.00%				

Tab. 11: Przesiew piasek łamany gabro 0.0 – 2.0

Zakres badanych frakcji [mm]													
	0.0 - 2.0 (Piasek łamany)	0.0 - 2.0 (Piasek łamany)	0.0 - 2.0 (Piasek łamany)	0.0 - 2.0 (Piasek łamany)	0.0 - 2.0 (Piasek łamany)	0.0 - 2.0 (Piasek łamany)	Nr przesiewu						
Sito [mm]	1	2	3	4	5	6	Suma przesianego materiału [g]	Średnia przesiewu [g]	Średnia [%] zawartość przesiewu	Wariancja	Odchylenie standardowe [g]	Współczynnik zmienności [%]	Mediana
45.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0%	0.0	0.0	0.0%	0.0
31.50	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0%	0.0	0.0	0.0%	0.0
22.40	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0%	0.0	0.0	0.0%	0.0
16.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0%	0.0	0.0	0.0%	0.0
11.20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0%	0.0	0.0	0.0%	0.0
8.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0%	0.0	0.0	0.0%	0.0
5.60	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0%	0.0	0.0	0.0%	0.0
4.00	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.2	0.0	0.0%	0.0	0.1	154.9%	0.0
2.00	19.6	18.8	23.1	21.7	25.8	23.0	132.0	22.0	3.7%	6.5	2.6	11.6%	22.4
1.00	269.9	260.7	278.3	270.4	295.7	271.5	1646.5	274.4	45.7%	140.2	11.8	4.3%	271.0
0.500	145.0	144.9	138.3	137.7	147.1	139.0	852.0	142.0	23.6%	16.9	4.1	2.9%	142.0
0.250	74.1	74.9	75.1	77.6	80.6	74.3	456.6	76.1	12.7%	6.4	2.5	3.3%	75.0
0.125	42.4	42.9	39.6	38.7	42.4	39.8	245.8	41.0	6.8%	3.2	1.8	4.4%	41.1
0.063	28.6	24.7	27.9	29.0	28.6	29.2	168.0	28.0	4.7%	2.8	1.7	6.0%	28.6
< 0,063	18.8	20.2	14.9	14.5	18.2	15.0	101.6	16.9	2.8%	5.9	2.4	14.4%	16.6
Suma przesianej próbki [g]	598.4	587.1	597.2	589.7	638.5	591.8		600.5	100.00%				

Tab. 12: Przesiew wypełniacz 0.0 – 2.0

Zakres badanych frakcji [mm]													
	0.0 - 2.0 (Wypełniacz)	0.0 - 2.0 (Wypełniacz)	0.0 - 2.0 (Wypełniacz)	0.0 - 2.0 (Wypełniacz)	0.0 - 2.0 (Wypełniacz)	0.0 - 2.0 (Wypełniacz)	Nr przesiewu						
Sito [mm]	1	2	3	4	5	6	Suma przesianego materiału [g]	Średnia przesiewu [g]	Średnia [%] zawartość przesiewu	Wariancja	Odchylenie standardowe [g]	Współczynnik zmienności [%]	Mediana
45.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0%	0.0	0.0	0.0%	0.0
31.50	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0%	0.0	0.0	0.0%	0.0
22.40	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0%	0.0	0.0	0.0%	0.0
16.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0%	0.0	0.0	0.0%	0.0
11.20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0%	0.0	0.0	0.0%	0.0
8.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0%	0.0	0.0	0.0%	0.0
5.60	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0%	0.0	0.0	0.0%	0.0
4.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0%	0.0	0.0	0.0%	0.0
2.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0%	0.0	0.0	0.0%	0.0
1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0%	0.0	0.0	0.0%	0.0
0.500	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0%	0.0	0.0	0.0%	0.0
0.250	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0%	0.0	0.0	0.0%	0.0
0.125	18.0	21.0	21.0	21.0	22.3	18.3	121.5	20.3	1.0%	3.0	1.7	8.5%	21.0
0.063	227.0	172.0	182.0	217.0	201.5	197.5	1197.0	199.5	9.7%	426.6	20.7	10.4%	199.5
< 0,063	1805.0	1856.0	1842.0	1810.0	1830.3	1826.3	10969.5	1828.3	89.3%	368.2	19.2	1.0%	1828.3
Suma przesianej próbki [g]	2050.0	2049.0	2045.0	2048.0	2054.0	2042.0		2048.0	100.00%				

Na podstawie wykonanych przesiewów określono zgodność uziarnienia z deklaracjami właściwości użytkowych pozyskanych od producenta. Ponadto w zakresie sześciokrotnych przesiewów każdy z materiałów wykazywał powtarzalność (podobne uziarnienie). Zaobserwowano również, iż każde z kruszyw charakteryzowało się występowaniem dużej zawartości poszczególnych frakcji z deklarowanego zakresu, ale odnotowano również występowanie pozostałych frakcji mniejszych. Postanowiono uwzględnić pełne dane o uziarnieniu w projekcie recept roboczych celem zminimalizowania rozbieżności jakościowych przy procesie produkcji próbek.

W dokonanych przesiewach nie odnotowano istotnych odchyłeń od średniej lub zmienności wyrażonych przez współczynnik zmienności. Pomimo, iż dla niektórych grysów np. 11.2-16.0 jego wartość dla poszczególnego ziarna pozostającego na sicie np. 0.5 mm wynosiła 73.9% to w stosunku do ilości tego materiału są to zmiany nieistotne. Wahania tego typu są zupełnie normalne, ponieważ zależą od procesu technologicznego przekruszania skał i losowości pobierania materiału do przeprowadzenia analizy sitowej.

Pozyskane dane uśredniono wykorzystując bezpośrednio w projekcie mieszanki mineralnej.

Mieszanka mineralna zaprojektowanych recept składa się z: pięciu grysów, piasku łamanego oraz wypełniacza. Każdy z materiałów oznaczono według przyjętej konwencji:

1. wypełniacz kamienny 0.0 – 2.0 mm,
2. piasek łamany gabro 0.0 – 2.0 mm,
3. grys gabro 2.0 – 5.6 mm,
4. grys gabro 4.0 – 8.0 mm,
5. grys gabro 8.0 – 11.2 mm,
6. grys gabro 11.2 – 16.0 mm,
7. grys gabro 16.0 – 22.4 mm.

Następnie uśrednione dane z przesiewów zamieszczono w zbiorczej tabeli, uwzględniającej: próg odpylenia kruszywa, zastosowane procentowe zawartości poszczególnych materiałów kamiennych wg przyjętych oznaczeń, informacje o procentowej zawartości ziaren kruszywa pozostających na poszczególnych sitach (kruszywo 1-7) przemnoży się tą informację przez procentowy udział tego kruszywa oraz zaprojektowanej, docelowej MM. w Tab. 13 zaprezentowano omawiany układ danych.

Tab. 13: Procentowe zawartości poszczególnych materiałów kamiennych w zaprojektowanej MM

Oznaczenie materiału (nr)	1		2		3		4		5		6		7		1	2	3	4	5	6	7	Mieszanka Mineralna	Ilość MM, która przechodzi przez sito	Ilość MM, która zostaje na sicie	
	Sito [mm]	[g]	[%]	[g]	[%]	[g]	[%]	[g]	[%]	[g]	[%]	[g]	[%]	[g]											[%]
45.00	0.0	0.00%	0.0	0.00%	0.0	0.00%	0.0	0.00%	0.0	0.00%	0.0	0.00%	0.0	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%
31.50	0.0	0.00%	0.0	0.00%	0.0	0.00%	0.0	0.00%	0.0	0.00%	0.0	0.00%	0.0	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%
22.40	0.0	0.00%	0.0	0.00%	0.0	0.00%	0.0	0.00%	0.0	0.00%	0.0	0.00%	513.0	7.55%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	2.34%	2.34%	97.66%	2.34%
16.00	0.0	0.00%	0.0	0.00%	0.0	0.00%	0.0	0.00%	0.0	0.00%	440.5	10.98%	5593.3	82.36%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.77%	25.53%	26.30%	71.36%	28.64%	
11.20	0.0	0.00%	0.0	0.00%	0.0	0.00%	0.0	0.00%	228.7	7.90%	2970.6	74.07%	639.9	9.42%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.79%	5.18%	2.92%	8.90%	62.46%	37.54%	
8.00	0.0	0.00%	0.0	0.00%	0.0	0.00%	70.9	6.65%	2391.4	82.62%	568.7	14.18%	11.3	0.17%	0.00%	0.00%	0.00%	0.66%	8.26%	0.99%	0.05%	9.97%	52.49%	47.51%	
5.60	0.0	0.00%	0.0	0.00%	9.2	1.33%	670.3	62.84%	249.5	8.62%	17.1	0.43%	1.6	0.02%	0.00%	0.00%	0.21%	6.28%	0.86%	0.03%	0.01%	7.40%	45.09%	54.91%	
4.00	0.0	0.00%	0.0	0.01%	221.4	31.83%	299.6	28.09%	13.3	0.46%	1.4	0.03%	0.9	0.01%	0.00%	0.00%	5.09%	2.81%	0.05%	0.00%	0.00%	7.96%	37.14%	62.86%	
2.00	0.0	0.00%	22.0	3.66%	404.6	58.18%	17.6	1.65%	3.0	0.10%	0.1	0.00%	0.6	0.01%	0.00%	0.66%	9.31%	0.16%	0.01%	0.00%	0.00%	10.15%	26.99%	73.01%	
1.00	0.0	0.00%	274.4	45.70%	53.1	7.63%	2.6	0.24%	0.7	0.02%	0.2	0.00%	0.6	0.01%	0.00%	8.23%	1.22%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	9.48%	17.51%	82.49%	
0.500	0.0	0.00%	142.0	23.65%	2.4	0.35%	1.1	0.10%	0.5	0.02%	0.2	0.01%	0.5	0.01%	0.00%	4.26%	0.06%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	4.33%	13.19%	86.81%	
0.250	0.0	0.00%	76.1	12.67%	1.0	0.15%	0.8	0.07%	0.9	0.03%	0.8	0.02%	1.0	0.02%	0.00%	2.28%	0.02%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	2.32%	10.87%	89.13%	
0.125	20.3	0.99%	41.0	6.82%	0.7	0.10%	0.9	0.09%	2.1	0.07%	1.5	0.04%	2.5	0.04%	0.08%	1.23%	0.02%	0.01%	0.01%	0.00%	0.01%	1.35%	9.51%	90.49%	
0.063	199.5	9.74%	28.0	4.66%	2.1	0.30%	2.2	0.20%	3.7	0.13%	4.0	0.10%	16.3	0.24%	0.78%	0.84%	0.05%	0.02%	0.01%	0.01%	0.07%	1.78%	7.73%	92.27%	
< 0.063	1828.3	89.27%	16.9	2.82%	0.9	0.13%	0.6	0.06%	0.8	0.03%	5.6	0.14%	9.5	0.14%	7.14%	0.51%	0.02%	0.01%	0.00%	0.01%	0.04%	7.73%	0.00%	100.00%	
Suma	2048.0	100.00%	600.5	100.00%	695.4	100.00%	1066.6	100.00%	2894.4	100.00%	4010.7	100.00%	6791.0	100.00%	8.00%	18.00%	16.00%	10.00%	10.00%	7.00%	31.00%	100.00%			
Próg odpylenia kruszywa [%]	0%		0%		0%		0%		0%		0%		0%		Suma										
Iteracja - [%] przesiewu do projektu MM	8.00%		18.00%		16.00%		10.00%		10.00%		7.00%		31.00%		100.00%										

Projektując mieszankę mineralną kruszywa (materiał 3-7) nie odpylono (standardową praktyką na wytwórni mas jest próg odpylenia 50%). Postanowiono wykorzystać pył zawarty w grysach. Zanim zastosowano pył sprawdzono jego jakość. Każdy z grysów przebadano pobierając reprezentatywną próbkę pyłu – 100g, a następnie przeprowadzono próbę jakości pyłów – „błękitu metylenowego” zgodnie z normą PN-EN 933-9 [212]. Każdy z materiałów wsadowych nie osiągnął klasy jakości pyłu większej niż MB_F10 – warunek zawarty w WT-1 [81] został spełniony. Warto podkreślić, iż zarówno piasek łamany gabro jak i pozostałe przebadane błękitem grysy pochodziły z jednego urobku skalnego - dodatkowe potwierdzenie zasadności powyższych założeń zastosowanych do projektu recepty.

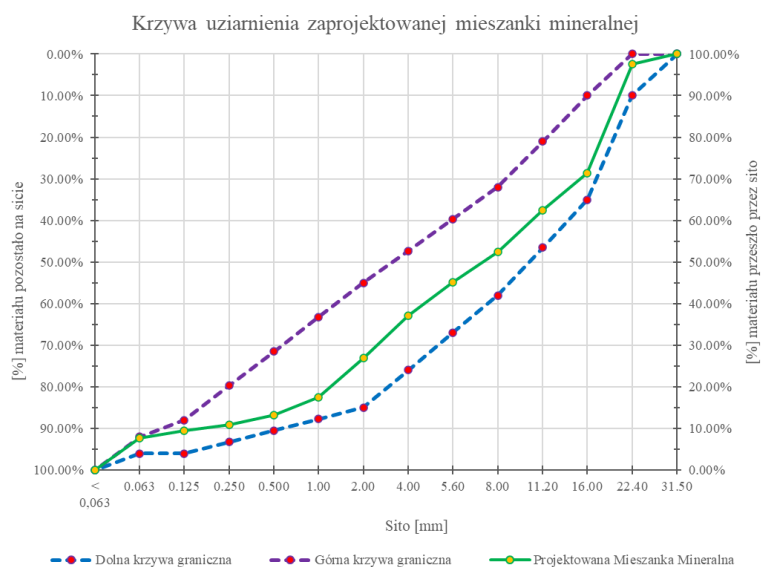
Uziarnienie zaprojektowanej mieszanki mineralnej na AC 22P KR3-7 spełniło wymagania krzywych granicznych podanych w WT-2 [83]. Wymogi graniczne oraz wartości osiągnięte na podstawie przesiewów w procesie iteracyjnym zamieszczono w Tab. 14.

Tab. 14: Procentowe wymogi krzywych granicznych uziarnienia

Sito [mm]	Graniczne krzywe uziarnienia WT-2					
	Dolna krzywa graniczna		Górna krzywa graniczna		Projektowana Mieszanka Mineralna	
	Przechodzi przez sito [%]	Zostaje na sicie [%]	Przechodzi przez sito [%]	Zostaje na sicie [%]	Przechodzi przez sito [%]	Zostaje na sicie [%]
45.00	100.00%	0.00%	100.00%	0.00%	100.00%	0.00%
31.50	100.00%	0.00%	100.00%	0.00%	100.00%	0.00%
22.40	90.00%	10.00%	100.00%	0.00%	97.66%	2.34%
16.00	65.00%	35.00%	90.00%	10.00%	71.36%	28.64%
11.20	53.50%	46.50%	79.00%	21.00%	62.46%	37.54%
8.00	42.00%	58.00%	68.00%	32.00%	52.49%	47.51%
5.60	33.00%	67.00%	60.33%	39.67%	45.09%	54.91%
4.00	24.00%	76.00%	52.67%	47.33%	37.14%	62.86%
2.00	15.00%	85.00%	45.00%	55.00%	26.99%	73.01%
1.00	12.25%	87.75%	36.75%	63.25%	17.51%	82.49%
0.500	9.50%	90.50%	28.50%	71.50%	13.19%	86.81%
0.250	6.75%	93.25%	20.25%	79.75%	10.87%	89.13%
0.125	4.00%	96.00%	12.00%	88.00%	9.51%	90.49%
0.063	4.00%	96.00%	8.00%	92.00%	7.73%	92.27%
< 0,063	0.00%	100.00%	0.00%	100.00%	0.00%	100.00%

Należy dodać, iż punkty graniczne podane w przyjętym odniesieniu nie wyszczególniają wymogów odnoszących się do wszystkich wymiarów standardowych sit drogowych. w rozprawie, aby te luki skutecznie wyeliminować (w stosunku do projektowanej krzywej) brakujące przedziały interpolowano liniowo zaznaczając je w tabeli kolorem różowym.

Graficzna interpretacja zaprojektowanej mieszanki mineralnej z uwzględnieniem krzywych granicznych: górnej i dolnej została zaprezentowana na Rys. 28.



Rys. 28: Graficzna interpretacja zaprojektowanej mieszanki mineralnej

Warto podkreślić, iż celowo krzywą uziarnienia zaprojektowano tak, aby przebiegała przez „środek” zakresu - pomiędzy pkt. granicznymi. Opierając się na literaturze fachowej [120, 203] oraz własnym doświadczeniu wdrożone proporcje kruszywa pozwoliły uzyskać optymalne cechy jakościowe MMA (trwałość zmęczeniową oraz deformacyjną (koleinowanie)) ze względu na uziarnienie.

Kolejno, sześciokrotnie wykonano metodą piknometryczną kontrolne badania gęstości objętościowej ziaren (ρ_a) pozyskanego kruszywa zgodnie z normą PN-EN 1097-6 [213] (piaski i grysy) oraz PN-EN 1097-7 [205] (wypełniacz). Wyniki uśredniono i wykorzystano do projektu MMA. Zestawienie danych – procentowy udział materiału 1-7 zastosowanego do MM oraz wyznaczone gęstości zaprezentowano w Tab. 15.

Tab. 15: Gęstość objętościowa ziaren pozyskanych materiałów

Oznaczenie materiału (nr)	1	2	3	4	5	6	7
[%] użytego materiału do Mieszanki Mineralnej	8.00%	18.00%	16.00%	10.00%	10.00%	7.00%	31.00%
ρ_a frakcji [g/cm ³]	2.704	2.974	2.960	2.974	2.965	2.984	2.979

Należy podkreślić, iż zbliżone wartości gęstości objętościowej ziaren (nieznaczące odchylenia) są potwierdzeniem, iż materiały 2-7 zostały wydobyte z jednego miejsca i skały (Gabro).

Do projektu MMA, w oparciu o przygotowane dane wykorzystano opisywano w części studialnej metodę Durieza – znajdującą aprobatę WT-2 [83] oraz [203] jako skutecznej.

W pracach projektowych nad receptą ustalono procentowy udział poszczególnych frakcji zaprojektowanej MM. Następnie obliczono jej powierzchnię właściwą wg formuły (11).

$$\Sigma = 0.01 \cdot (0.24 \cdot G + 2.4 \cdot S + 12 \cdot s + 150 \cdot f), \quad (11)$$

gdzie:

Σ – powierzchnia właściwa mieszanki mineralnej [m²/kg],

G – procent zawartości kruszywa większego od 5.6 mm (obliczane przez interpolację liniową),

S – procent zawartości kruszywa zawartego między sitami 5.6 mm i 0.25 mm (obliczane przez interpolację liniową),

s – procent zawartości kruszywa zawartego między sitami 0.25 mm i 0.063 mm (obliczane przez interpolację liniową),

f – procent zawartości kruszywa mniejszego od 0.063 mm (obliczane przez interpolację liniową).

Kolejno stosując matematyczną metodę C zgodnie z PN-EN 12697-5:2019-01 [226] wyznaczono gęstość mieszanki mineralnej ρ_a i współczynnik korekcyjny α (odnoszący się do gęstości kruszywa referencyjnego) [83]. Stosując zależności (12), (13) wyznaczono zawartość lepiszcza dodanego do MM oraz jego procentową ilość w stosunku do MMA.

$$A_k = K \cdot \alpha \cdot \sqrt[5]{\Sigma} , \quad (12)$$

gdzie:

A_k – zawartość lepiszcza w stosunku do mieszanki mineralnej [%],

K – współczynnik wypełnienia (zawartości lepiszcza) [-],

α – współczynnik korekcyjny ze względu na gęstość mieszanki mineralnej [-],

Σ – powierzchnia właściwa mieszanki mineralnej [m²/kg].

$$A_m = \frac{A_k}{100 + A_k} \cdot 100 , \quad (13)$$

gdzie:

A_m – zawartość lepiszcza w stosunku do mieszanki mineralno-asfaltowej (inaczej określane jako B - [218]) [%],

A_k – zawartość lepiszcza w stosunku do mieszanki mineralnej [%].

Procentową zawartość lepiszcza w odniesieniu do MMA wyznaczoną analitycznie B (%) porównano z wymaganiami mieszanki AC 22 P, KR 3-7 zawartymi w WT-2. Warunek spełniono dla recepty wejściowej i optymalizowanych. w Tab. 16 przedstawiono przykładowy układ danych umożliwiający poprawne zaprojektowanie recepty roboczej.

Tab. 16: Układ danych projektowanej recepty roboczej

Określanie zawartości lepiszcza - Metoda DURIEZA	Mieszanka Mineralna	Pozostałość na sicie [mm]	45.00	31.50	22.40	16.00	11.20	8.00	5.60	4.00	2.00	1.00	0.500	0.250	0.125	0.063	< 0,063	KONTROLA		
		[%] udział frakcji w projektowanej Mieszance Mineralnej	0.00%	0.00%	2.34%	26.30%	8.90%	9.97%	7.40%	7.96%	10.15%	9.48%	4.33%	2.32%	1.35%	1.78%	7.73%	100.00%		
		Zawartość kruszywa	G					S					s	f						
		[%] zaw. całej MM	54.91%					34.23%					3.13%	7.73%						
		Σ [m ² /kg]	12.927																	
		ρ_a MM [g/cm ³]	2.950																	
		α	0.898																	
		Rodzaj i przeznaczenie	ACP																	
		K (wskaznik wypełnienia)	2.95																	
		A_k [%]	4.422%																	
	Mieszanka Mineralno-Asfaltowa	A_m [%] (B)	4.235%																	
		Współczynnik do kontroli	0.958																	KONTROLA
		[%] zaw. całej MMA	0.00%	0.00%	2.24%	25.19%	8.52%	9.55%	7.08%	7.62%	9.72%	9.08%	4.14%	2.22%	1.30%	1.71%	7.40%	100.00%	1.	
		[%] zaw. całej MMA	0.00%	0.00%	2.24%	25.19%	8.52%	9.55%	7.08%	7.62%	9.72%	9.08%	4.14%	2.22%	1.30%	1.71%	7.40%	100.00%	2.	
		B_{min} (WT-2)	4.00%																	
		$B_{min} \cdot \alpha$	3.59%																	
		Czy warunek spełniony? $B \geq B_{min} \cdot \alpha$?	TAK WARUNEK ZOSTAŁ SPEŁNIONY																	

Przykładową receptę roboczą AC 22 P KR 3-7 dla asfaltu 35/50 WMA w układzie tabelarycznym ukazano w Tab. 17.

Tab. 17: Przykładowa recepta robocza AC 22 P KR 3-7 w ujęciu tabelarycznym

Recepta robocza MMA	Oznaczenie materiału (nr)	1	2	3	4	5	6	7	Lepiszczce	
	[%] użytego materiału do Mieszanki Mineralnej	8.00%	18.00%	16.00%	10.00%	10.00%	7.00%	31.00%	35/50 WMA	
	ρ_a składników [g/cm ³]	2.704	2.974	2.960	2.974	2.965	2.984	2.979	1.023	
	Skorygowana [%] zawartość poszczególnych materiałów w projektowanej Mieszance Mineralno-Asfaltowej									KONTROLA
	[%] użytego materiału do Mieszanki Mineralno-Asfaltowej	7.66%	17.24%	15.32%	9.58%	9.58%	6.70%	29.69%	4.23%	100.00%

Wykorzystana metoda Durieza pozwoliła skutecznie wyznaczyć zawartość lepiszcza jaką należy dodać do kruszywa projektowanej mieszanki oraz umożliwiła w łatwy sposób zoptymalizowanie recepty regulując wskaźnikiem wypełnienia K , wpływającym jedynie na ilość lepiszcza (bez zmiany składu ziarnowego). Ponadto wytworzone technologicznie materiały dzięki zastosowanej operacji mogły być skutecznie porównane pomiędzy sobą ujęciu cech jakościowych – usunięcie rozbieżności, które mogłyby wypłynąć ze względu na skład MMA.

Wartość tego parametru pierwszej recepty AC 22 P wynosiła 3.10 - została założona bazując na typowych wartościach wynoszących dla warstwy podbudowy 2.80 – 3.10 [203]. z uwagi na zbyt niską wolną przestrzeń w MMA zmieniono parametr na 2.95 od niego rozpoczynając optymalizację kolejnych recept. Temat zostanie szerzej omówiony w części badawczej bloku podstawowego. Zestawienie zastosowanych wartości współczynnika wypełnienia projektowanych i optymalizowanych mieszanek oraz zawartość asfaltu dodawanego do kruszywa i w odniesieniu do MMA zamieszczono w Tab. 18.

Tab. 18: Wskaźnik wypełnienia K zastosowany w zaprojektowanych receptach

Asfalty		Nr recepty	1	2	3	4
35/50 WMA, 35/50, M 25/55-60, M 25/55-80 HIMA	K	[-]	3.10	2.95	2.80	2.65
	A_k	[%]	4.65	4.42	4.20	3.97
	A_m	[%]	4.44	4.24	4.03	3.82
	$B_{min} \cdot \alpha$	[%]	3.59			

5.1.3. Założenia technologiczne

Na podstawie przygotowanych recept roboczych opracowano szczegółowe założenia technologiczne, umożliwiające wykonanie zarobów MMA niezbędnych do badań i dalszych analiz. Kluczowe elementy stabelaryzowano i przedstawiono w Tab. 19.

Tab. 19: Założenia technologiczne realizowane podczas prac laboratoryjnych

Technologia	Na ciepło - WMA	Na gorąco - HMA			
	35/50 WMA (Lotos)	35/50 (Lotos)	Modbit 25/55-60 (Lotos)	Modbit 25/55-80 HIMA (Lotos)	
Temperatura suszarki laboratoryjnej (kruszywo)	155	165	175	175	[°C]
Nawiew	80%	80%	80%	80%	[%]
Kominek	80%	80%	80%	80%	[%]
Temperatura kotła (produkcji MMA)	155	165	175	175	[°C]
Moc kotła	8.5	8.5	8.5	8.5	[kWh]
Cykl mieszania (planetarnie, kocioł + mieszadło)	15	15	15	15	[s]
Przerwa w cyklu	3	3	3	3	[s]
Czas mieszania	4	4	4	4	[min]
Temperatura suszarki laboratoryjnej - krótkoterminowe starzenie technologiczne (STOA)	135	135	135	135	[°C]
Czas krótkoterminowego starzenia (STOA)	120	120	120	120	[min]
Temperatura końca zagęszczenia MMA - ubijak marshalla / zagęszczarka płytowa	> 130 (130 - 135)	> 140 (140 - 145)	> 150 (150 - 155)	> 150 (150 - 155)	[°C]

Posiłkując się zaleceniami producenta (Iepiszce) [156] oraz normą PN-EN 12697-35 (mieszanie laboratoryjne, kruszywo) [216], ustalono, iż temperatura materiałów (przed obróbką) będzie o 25°C większa, niż minimalna wymagana temperatura zagęszczenia MMA. Ponadto wynosić ona będzie tyle samo co przyjęta temperatura produkcji MMA – założenia te pozwoliły zaaplikować odpowiednie warunki termiczne tak, aby skutecznie dokonać obróbki składników.

Do kondycjonowania materiałów użyto suszarkę laboratoryjną Pol-Eko SLW 750, w której nawiew i kominek został ustawiony na 80% mocy suszarki. Pozwoliło to na utrzymanie stałej temperatury wewnątrz całej jej komory oraz zabezpieczyło urządzenie przed przegrzaniem (zabezpieczenia wewnętrzne), które mogłoby spowodować jego wyłączenie - ostudzenie kruszywa lub MMA przed jej zagęszczeniem (zniszczenie). Zdjęcie maszyny przedstawiono Rys. 29.



Rys. 29: Suszarka laboratoryjna zastosowana w pracach technologicznych

Do przetworzenia składników MMA wykorzystano specjalistyczny mieszalnik laboratoryjny (kocioł) Baustoff-Prufsysteme Wennigsen GmbH D-30974 do 100 kg wsadu. Urządzenie posiadało podgrzewaną misę oraz mieszadło – utrzymanie stałej temperatury (proces mieszania) z możliwością jej bezpośredniego monitorowania - wbudowane termopary (jedna w misie, druga bezpośrednio wewnątrz pojemnika. Ponadto maszyna umożliwiła zaaplikowanie planetarnego mieszania (3D), dzięki ruchomemu mieszadłu i kotłowi wzbogaconym o ruch przeciwbieżny oraz nachyleniu względem siebie tych elementów konstrukcyjnych – jednorodność struktury pozyskanych MMA. Moc kotła została ustawiona na 8.5 kWh – wysoka wydajność urządzenia grzewczego pozwoliła na skuteczne utrzymanie zadanej temperatury i eliminację odchyłek. Czas cyklu mieszania wynosił 15.0 s, przerwa pomiędzy cyklami 3.0 s, a łączny czas mieszania 4.0 min – zadane parametry umożliwiły dokładnie wymieszać wszystkie składniki (brak widocznego rozsegregowania składników). Zdjęcie mieszalnika użytego do procesu technologicznego zaprezentowano na Rys. 30.



Rys. 30: Mieszalnik laboratoryjny Baustoff

Podczas realizacji prac technologicznych związanych z produkcją MMA uwzględniono starzenie materiału, będące ważnym zjawiskiem (poruszonym np. przez [97]). Starzenie technologiczne związane jest z oddziaływaniem promieni UV i powietrza lub transportem gorącej MMA z wytwórni mas na budowę do miejsca przeznaczenia. Czas i zbyt wysoka temperatura negatywnie oddziałują na MMA. Czynniki te degradują jakościowo lepiszcze i mieszankę poprzez jej np. usztywnienie.

Aby sztucznie obciążyć tym czynnikiem produkowane mieszanki zastosowano procedurę starzenia krótkoterminowego „STOA” – eng. „*Short Term Oven Ageing*” opisaną w WT-2 [83]. Do osiągnięcia tego celu ponownie wykorzystano suszarkę laboratoryjną.

Po wdrożeniu kondycjonowania termicznego MMA zagęszczono używając dwóch rodzajów maszyn – automatycznego ubijaka Marshalla zgodnie z normą PN-EN 12697-30:2019-01 [225] oraz automatycznej zagęszczarki płytowej (spełniającej standardy PN-EN 12697-33:2019-03 [228]) wywołującej efekt wałowania – analogia do warunków zagęszczenia in-situ. Do wykonywanych próbek zastosowano odpowiednie energie zagęszczenia.

1. Ubijak Marshalla – poprzez uderzenia: badanie wolnej przestrzeni 2x75 uderzeń, badanie ITSR (odporność woda i mróz – pośrednie rozciąganie) 2x35 uderzeń. Stanowisko technologiczne zaprezentowano na Rys. 31.



Rys. 31: Zastosowany automatyczny ubijak Marshalla

2. Zagęszczarka płytowa – poprzez przejazdy urządzeniem wałującym. Zakres dojścia do pozyskania odpowiedniej grubości płyty wynosił od 20-34 przejazdów walcem (norma umożliwia od 10-50 przejazdów) – badanie koleinowania, belki do analiz zmęczeniowych. Stanowisko technologiczne zaprezentowano na Rys. 32.



Rys. 32: Zastosowana automatyczna zagęszczarka płytowa

Należy wyraźnie podkreślić, iż prace technologiczne były rozłożone w czasie. Przygotowano i badano materiał w odpowiedniej kolejności, tak aby w najpierw spełnić wymogi przyjętego dokumentu odniesienia (WT-2 [83]) wszystkich analizowanych recept (w tym zoptymalizowanych) - badania bloku podstawowego. Dopiero gdy ten warunek został spełniony przechodzono do badań bloku zaawansowanego.

Ważnym elementem, który pozwolił zminimalizować straty termiczne podczas prac technologicznych (transportu MMA) należał dystans pomiędzy sprzętami. Wyszczególnione wcześniej urządzenia usytuowano bardzo blisko siebie – w odległości nie większej niż 7.0 m. Odległość ta pozwoliła prowadzić w sposób swobodny prace, bez konieczności stosowania zewnętrznych środków ochronnych w zakresie izolacji termicznej (np. termos, maty piankowe odporne na wysoką temperaturę) chroniącej materiał przed wyziębieniem.

Docinka płyt – obróbka mechaniczna to ostatni wykonany krok w pracach przygotowawczo-technologicznych. Umożliwił on przygotowanie próbek do badania koleinowania (blok podstawowy) o wymiarach: 260.0 x 300.0 x 60.0 mm (zgodnie z PN-EN 12697-22:2020:07 [231] i WT-2 [83]). Do analiz modułu sztywności (PN-EN 12697-26:2018-08 [224]) i trwałości zmęczeniowej (PN-EN 12697-24:2018-08 [222]) (blok zaawansowany), przygotowano belki pryzmatyczne każdostronnie oszlifowane (eliminacja nierówności wpływających np. na wyniki lub zdolność zaciskania szczęk maszyny wytrzymałościowej) o wymiarach 65.0 x 65.0 x 390.0 mm. Pomimo, iż w zaprojektowanych MMA największy wymiar ziarna przekraczał 22.4 mm (norma zaleca wykonywanie belek o wymiarach: szerokość B i wysokość H – $3.0 \cdot D_{max}$ w mm oraz długość L – $6.0 \cdot B$ lub H w mm) to jednak zdecydowano się zastosować inny wymiar belek. Decyzję podjęto kierując się występowaniem nieznaczącej zawartości ziaren większych niż 22.4 mm (2.34%) w mieszance mineralnej. Ich ilość była tak mała, iż nie wywarła wpływu na przeprowadzone analizy. w rezultacie wyniki okazały się powtarzalne. Dodatkowo nie stwierdzono odchyłeń pomiarów z tytułu zastosowanej geometrii.

Do wykonania próbek wykorzystano specjalną piłę mechaniczną o podwójnych ostrzach, które pozwalały na wykonanie dwóch równoległych cięć jednocześnie. Dzięki zastosowaniu tego urządzenia, wymiary belek były powtarzalne, szlify precyzyjne, a próbka cechowała się kształtem regularnego (niezdeformowanego) prostopadłościanu. Urządzenie wyeksponowano na Rys. 33.



Rys. 33: Zastosowana piła mechaniczna umożliwiająca podwójne cięcie równoległe

Warto nadmienić, iż aby usprawnić cały proces produkcji MMA zaprojektowano i przygotowano specjalne stanowisko do poboru kruszywa, pozwalające odmierzać i ładować materiał w jednym miejscu aplikując oszczędność czasu. Materiał kamienny znajdujący się wewnątrz kastr został uprzednio wysuszony do stałej masy. Zdjęcie tego miejsca zaprezentowano na Rys. 34.



Rys. 34: Autorskie stanowisko do poboru kruszywa

Dzięki tak zaaplikowanym parametrom i zintensyfikowanym działaniom w sposób skuteczny i powtarzalny wykonano wszystkie operacje związane z produkcją mieszanek i przygotowaniem próbek do badań.

5.2. Badania bloku podstawowego

Zaprojektowane recepty i wykonane zaroby dotyczą mieszanek gruboziarnistych przeznaczonych na podbudowę – AC 22 P na KR 3-7. Na tym etapie należy uszczegółwić docelową kategorię ruchu projektowanego materiału, ponieważ w zależności od natężenia pojazdów wymogi dokumentu odniesienia w zakresie badań bloku podstawowego (WT-2 [83]) ulegają zmianie. Dalsza część rozprawy dotyczy mieszanki AC 22P przeznaczoną na ruch ciężki – KR 5-7.

Warunki Techniczne cz. 2 [83] „umożliwiają” zastosowanie tej samej mieszanki (AC 22 P, KR 5-7) na warstwę wiążącą pod warunkiem spełnienia wymogów obydwu tych warstw (wyżej usytuowane warstwy konstrukcji cechują się bardziej restrykcyjnymi wymogami – również w zakresie składu). w szerszym ujęciu projektowanie mieszanek tak, aby można je wbudować np. we dwóch warstwach projektowanej konstrukcji jest zasadniejsze, ponieważ:

1. na placu budowy można wykonać dwie warstwy za jednym razem – oszczędność czasu i pieniędzy (aspekt ekonomiczny) – zmniejszenie przestojów technologicznych, oszczędność materiału na odsadzkach, większe możliwości produkcyjne dla otaczarni (brak przestojów potrzebnych na przeprogramowanie układu do nowej recepty),
2. brak potrzeby projektowania i walidacji kolejnej recepty na kolejną warstwę – oszczędność czasu i środków,
3. konstrukcja jest bardziej jednorodna – lepsza praca materiału, brak potrzeby uwzględniania dodatkowej współpracy między warstwową przy modelowaniu,
4. mniejsze ryzyko wystąpienia uszkodzeń np. spękań zmęczeniowych lub odbitych,
5. mniejsze ryzyko wystąpienia imperfekcji materiałowych przy wykonaniu na placu budowy – praca z jedną konfiguracją.

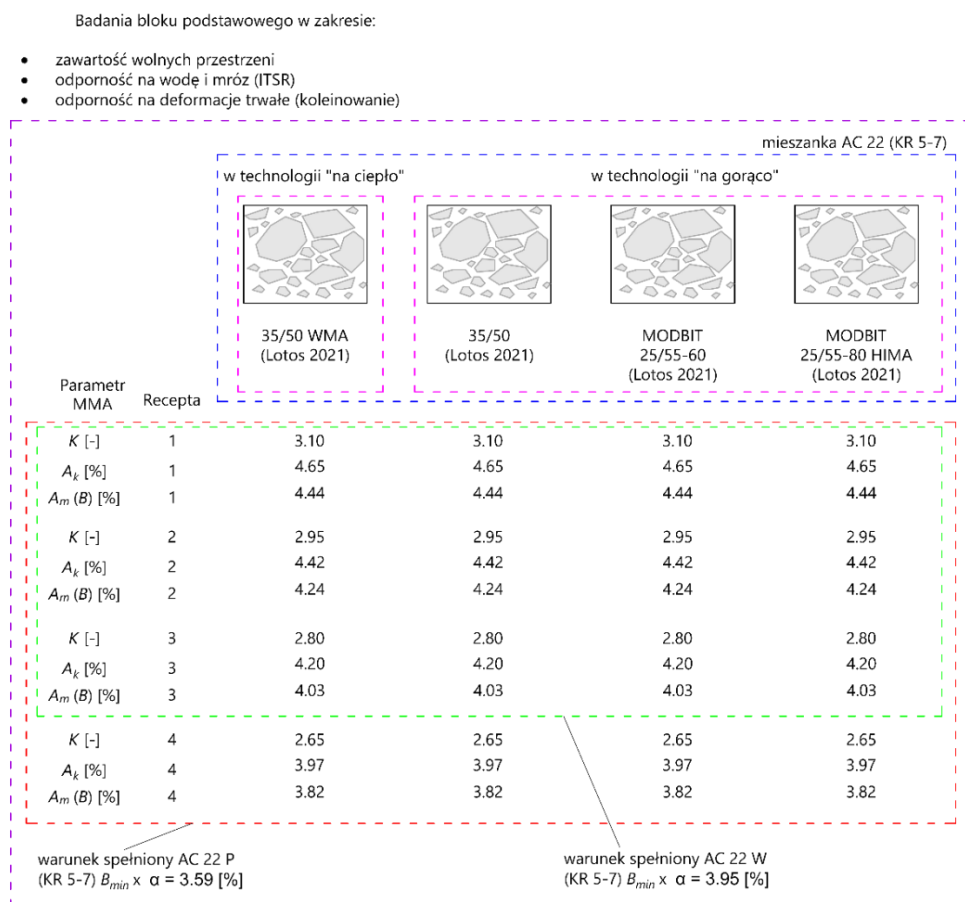
W nawiązaniu do powyższych podpunktów uniwersalność wykorzystania zaprojektowanych MMA (do dwóch warstw jednocześnie), również będzie obiektem analiz bloku podstawowego niniejszej rozprawy.

Wymogi cech jakościowych przygotowanych recept zarówno mieszanki AC 22 P KR 5-7 oraz AC 22 w KR 5-7 zaprezentowano w Tab. 20. Należy wyraźnie podkreślić, iż zaprojektowana i ukazana w poprzednich podrozdziałach krzywa uziarnienia spełnia założenia WT-2 [83] również dla warstwy wiążącej tej samej kategorii ruchu. Podobnie w przypadku wymogu minimalnej zawartości asfaltu B_{min} (Recepta wejściowa (nr 1) oraz 1-szy (nr 2) i 2-gi (nr 3) poziom optymalizacji). Trzeci poziom (nr 4) posiada niewiele mniejszą zawartość niż wymagana z dokumentu odniesienia. Pomimo tego faktu zostanie on również wzięty pod uwagę, gdyż cechy jakościowe mogą spełniać założenia przeznaczenia warstwy.

Tab. 20: Obligatoryjne wymagania mieszank AC 22 P i w (KR 5-7) wg WT-2

			Mieszanka Mineralno Asfaltowa KR 5-7	
Właściwość	Warunki zagęszczenia	Metoda i warunki badania	AC 22 P	AC 22 W
zawartość wolnych przestrzeni	ubijanie, 2x75	PN-EN 12697-8	$V_{min} = 4.0 \%$ $V_{max} = 7.0 \%$	$V_{min} = 4.0 \%$ $V_{max} = 7.0 \%$
odporność na deformacje trwałe	wałowanie, P ₉₈ -P ₁₀₀	PN-EN 12697-22, met. B powietrze, 60 st. C, 10000 cykli	$WTS_{AIR} = 0.15$ $PRD_{AIR} = 7.0$	$WTS_{AIR} = 0.10$ $PRD_{AIR} = 5.0$
wrażliwość na działanie wody (ITSR)	ubijanie, 2x35	PN-EN 12697-12, przechowanie w 40 st. C z 1 cyklem zamrażania, badanie w 25 st. C	$ITSR = 70$	$ITSR = 80$

Ujmując kompleksowe podejście badawcze w zakresie różnych technologii wykonania (WMA i HMA) oraz przy zastosowaniu nowych receptur asfaltów wewnątrz technologii na gorąco (HMA) wykonano w sumie 16 „niezależnych” recept i zarobów – 4 lepszycza z 4 poziomami zawartości asfaltu do badań bloku podstawowego, które zostaną dalej porównane. z uwagi na powszechność stosowania zwykłego asfaltu 35/50 (tech. na gorąco) do MMA ustalono, iż w rozważaniach tej rozprawy mieszanki z aplikacją tego lepszycza przyjęto za referencyjne. Ponadto wyniki badań odniesiono względem wymagań WT-2 [83] mieszank AC 22 P i w (KR 5-7). Ideowy schemat zaprezentowano na Rys. 35.



Rys. 35: Ideowy schemat kompleksowych badań bloku podstawowego

5.2.1. Zawartość wolnych przestrzeni

W ramach analiz związanych z zawartością wolnych przestrzeni wykonano zgodnie z przyjętymi założeniami pierwszą serię zarobów recepty nr 1. Do oceny każdej z recept przygotowano po sześć próbek Marshallowskich (o średnicy $D = 101.6 \pm 0.1$ mm i wysokości $H = 63.5 \pm 2.5$ mm). Przyjęto następujące oznaczenia pozwalające rozróżnić odpowiednie zaroby, recepty i numer próbki (sposób nazewnictwa zastosowano do całej rozprawy):

1. A i j – zarób zawierający asfalt 35/50 WMA (na ciepło), i - ta recepta, j - ta próbka,
2. B i j – zarób zawierający asfalt 35/50, i - ta recepta, j - ta próbka,
3. C i j – zarób zawierający asfalt 25/55-60, i - ta recepta, j - ta próbka,
4. D i j – zarób zawierający asfalt 25/55-80 HIMA, i - ta recepta, j - ta próbka.

Przykładową fotografię wykonanych próbek do zbadania wolnej przestrzeni zaprezentowano na Rys. 36.



Rys. 36: Przygotowane próbki Marshallowskie do analizy zawartości wolnych przestrzeni; recepta nr 1

Każdą próbkę pomierzono, zważono. Następnie przeprowadzono pomiary dwóch rodzajów gęstości, niezbędnych do ustalenia zawartości wolnej przestrzeni w MMA.

1. Gęstość mieszanki mineralno-asfaltowej ustalono metodą matematyczną C wg. PN -EN 12697-5:2019-01 [226]. Gęstość kruszywa - materiał 1-7 zamieszczono uprzednio w Tab. 17, natomiast informacje o gęstości lepiszczy pozyskano od producenta. Zaaplikowaną do obliczeń gęstość asfaltów zaprezentowano w Tab. 21. Należy podkreślić, iż przeprowadzono kontrolną walidację gęstości wybranych produkowanych zarobów MMA inną metodą - a (objętościowa) zgodnie z zaleceniami PN-EN 13108-20:2016-7 [219]. Wyniki pomiarów były „identyczne”. Pominięto każdorazowe sprawdzanie tego parametru z uwagi na skuteczność metody C w odniesieniu do wykorzystywanych materiałów.

Tab. 21: Gęstości asfaltów wykorzystanych w rozprawie

Lepiszczce asfaltowe				
	35/50 WMA	35/50	25/55-60	25/55-80 HIMA
[g/cm ³]	1.023	1.023	1.020	1.018

- Gęstości objętościowej mieszanki mineralno-asfaltowej ustalono metodą B (w stanie nasączonym, powierzchniowo osuszonym SSD) wg. PN-EN 12697-6:2020-07 [232] i PN-EN 13108-20:2016-7 [219] uznaną za skuteczną oceny mieszanek typu beton asfaltowy do 7% zawartości wolnych przestrzeni.

Z uwagi na zbyt dużą ilość danych, w dalszej części tego podrozdziału wyniki przedstawiono i omówiono zbiorczo, w formie średniej arytmetycznej na zarób/receptę. w ten sposób czytelnie ukazano cechy fizyczne poszczególnych materiałów. Przedstawiono ich wzajemne podobieństwa i różnice oraz usprawniono proces skomentowania wyników. Przykładowy pełny pomiar gęstości objętościowej recepty A2 mieszanki AC 22 P, KR 5-7 metodą B zaprezentowano w Tab. 22. Obliczenia wykonano z użyciem Microsoft Excel. Stanowisko badawcze do pomiaru gęstości objętościowej ukazano na Rys. 37.

Tab. 22: Przykładowe dane i obliczenia zarobu A2 (35/50 WMA)

	1	2	3	4	5	6		
Oznaczenie próbki	A21	A22	A23	A24	A25	A26		
m ₁ [g] (B)	1294.5	1310.3	1300.6	1305.1	1294.2	1298.9		
m ₂ [g] (B) nasączenie 30 min	804.7	815.9	807.0	809.8	808.6	809.3		
m ₃ [g] (B)	1297.2	1314.5	1303.5	1308.6	1299.8	1302.3		
$\rho_{b,SSD}$ (B) [g/cm ³]	2.621	2.621	2.612	2.609	2.628	2.628	2.620	$\rho_{b,SSD}$ (B) [g/cm ³] (średnia)
Wysokość próbki H [mm]	63.20	65.04	63.51	63.99	64.95	63.79	64.08	wysokość próbek H [mm] (średnia)



Rys. 37: Stanowisko do pomiaru gęstości objętościowej MMA

Zawartość wolnych przestrzeni wyznaczono stosując procedurę opisaną w normie PN-EN 12697-8 [227]. Ponadto określono procentową zawartość wolnej przestrzeni w mieszance mineralnej wypełnionej lepiszczem (*VFB*) oraz zawartość wolnej przestrzeni w MM (*VMA*). Do obliczeń wykorzystano formuły (14), (15) i (16):

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \cdot 100, \quad (14)$$

gdzie:

V_m – procentowa zawartość wolnej przestrzeni w MMA [%],
 ρ_m – gęstość (maksymalna) mieszanki mineralno-asfaltowej [g/cm^3],
 ρ_b – gęstość objętościowa mieszanki mineralno-asfaltowej [g/cm^3].

$$VMA = V_m + B \cdot \frac{\rho_b}{\rho_B}, \quad (15)$$

gdzie:

VMA – procentowa zawartość wolnej przestrzeni w MM [%],
 V_m – procentowa zawartość wolnej przestrzeni w MMA [%],
 B – procentowa zawartość lepiszcza w MMA [%],
 ρ_b – gęstość objętościowa mieszanki mineralno-asfaltowej [g/cm^3],
 ρ_B – gęstość lepiszcza asfaltowego [g/cm^3].

$$VFB = \frac{B \cdot \rho_b}{VMA \cdot \rho_B} \cdot 100, \quad (16)$$

gdzie:

VFB – procentowa zawartość wolnej przestrzeni w MM wypełnionej lepiszczem asfaltowym [%],

B – procentowa zawartość lepiszcza w MMA [%],

ρ_b – gęstość objętościowa mieszanki mineralno-asfaltowej [g/cm³],

ρ_B – gęstość lepiszcza asfaltowego [g/cm³],

VMA – procentowa zawartość wolnej przestrzeni w MM [%].

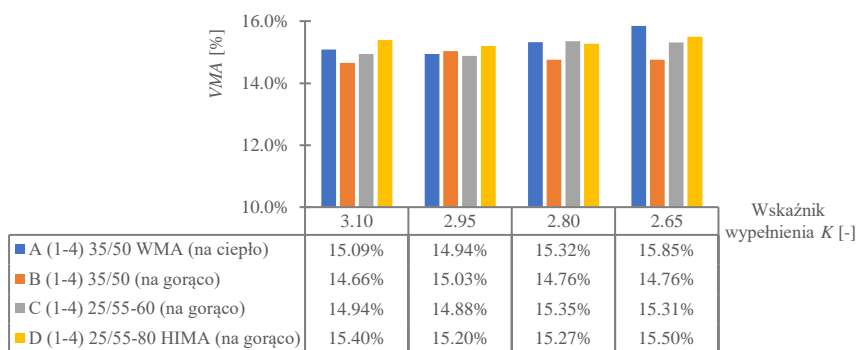
Uśrednione wyniki przeprowadzonych badań wszystkich 16 recept w zakresie ustalenia: gęstości MMA (met. C), objętościowej (met. B), zawartości wolnych przestrzeni, VMA , VFB oraz wymagań WT-2 zaprezentowano zbiorczo w Tab. 23.

Tab. 23: Zbiorcze rezultaty pomiarów i obliczeń wszystkich recept w zakresie zawartości wolnych przestrzeni i wymogów WT-2

parametr / recepta	K [-]	A _k [%]	A _m (B) [%]	ρ _{mc} [g/cm ³]	ρ _{b,SSD} [g/cm ³]	V _m [%]	VMA [%]	VFB [%]	Wymagania WT-2 V _m ∈ (4.0 ÷ 7.0) [%]	
									AC 22 P	AC 22 W
A1	3.10	4.647%	4.440%	2.722	2.621	3.71%	15.09%	75.41%	nie spełnione	nie spełnione
A2	2.95	4.422%	4.235%	2.732	2.620	4.10%	14.94%	72.59%	spełnione	spełnione
A3	2.80	4.197%	4.028%	2.742	2.603	5.08%	15.32%	66.88%	spełnione	spełnione
A4	2.65	3.972%	3.820%	2.752	2.581	6.22%	15.85%	60.79%	spełnione	spełnione
B1	3.10	4.647%	4.440%	2.722	2.634	3.22%	14.66%	78.00%	nie spełnione	nie spełnione
B2	2.95	4.422%	4.235%	2.732	2.617	4.20%	15.03%	72.07%	spełnione	spełnione
B3	2.80	4.197%	4.028%	2.742	2.620	4.44%	14.76%	69.89%	spełnione	spełnione
B4	2.65	3.972%	3.820%	2.752	2.614	5.00%	14.76%	66.15%	spełnione	spełnione
C1	3.10	4.647%	4.440%	2.721	2.625	3.52%	14.94%	76.48%	nie spełnione	nie spełnione
C2	2.95	4.422%	4.235%	2.731	2.622	4.00%	14.88%	73.12%	spełnione	spełnione
C3	2.80	4.197%	4.028%	2.741	2.602	5.08%	15.35%	66.91%	spełnione	spełnione
C4	2.65	3.972%	3.820%	2.751	2.597	5.59%	15.31%	63.52%	spełnione	spełnione
D1	3.10	4.647%	4.440%	2.720	2.611	4.01%	15.40%	73.97%	spełnione	spełnione
D2	2.95	4.422%	4.235%	2.730	2.612	4.34%	15.20%	71.45%	spełnione	spełnione
D3	2.80	4.197%	4.028%	2.740	2.604	4.97%	15.27%	67.47%	spełnione	spełnione
D4	2.65	3.972%	3.820%	2.750	2.591	5.77%	15.50%	62.74%	spełnione	spełnione

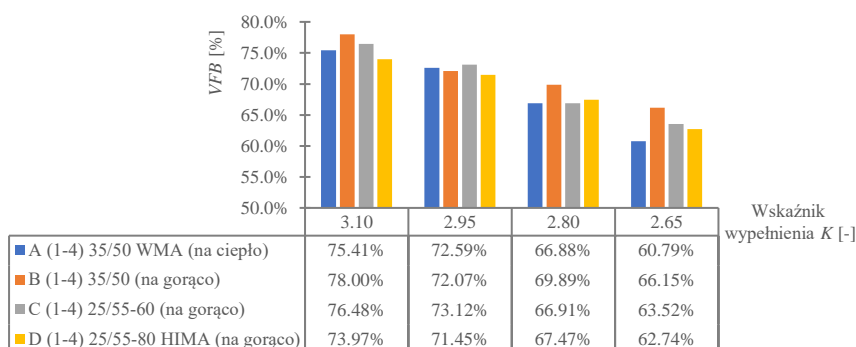
W Tab. 23 ukazano wyniki szesnastu recept, różniących się względem siebie rodzajem asfaltu zaaplikowanego do recepty (symbol A-D) oraz poziomem jego zawartości w recepcie (optymalizacja) regulowanym przez wskaźnik wypełnienia K . Skok wartości wskaźnika wynosił $\Delta K = 0.15$. Do rozważań za mieszankę referencyjną wybrano B - zawierającą powszechnie stosowany asfalt 35/50. Analizując wyniki wyszczególniono osiem obserwacji.

1. Gęstość maksymalna MMA wzrasta średnio o 0.01 g/cm^3 wraz ze spadkiem wskaźnika wypełnienia K o 0.15 na wszystkich rozpatrywanych poziomach optymalizacji wewnątrz wybranego lepiszcza (A - 35/50 WMA). Analogicznie dostrzega się ten sam trend patrząc na pozostałe zastosowane asfalty. Obserwacja potwierdza, iż operowano tylko jedną zmienną – zawartością asfaltu (ta sama proporcja MM w każdej z recept). Dostrzeżony trend może również sugerować, iż zawartość wolnych przestrzeni będzie zmieniać się w rozpatrywanym zakresie wskaźnika K liniowo.
2. W zdecydowanej większości analizowanych recept gęstość objętościowa wyznaczona met. B spada w sposób nieregularny wraz ze zmniejszającym się wskaźnikiem wypełnienia K . Obserwacja wskazuje, iż zawartość lepiszcza w mieszance zmniejsza się, natomiast wolna przestrzeń wzrasta. Na tym etapie nie można stwierdzić, w jaki sposób (proporcjonalnie, czy nieliniowo) zmienia się zawartość wolnej przestrzeni w poszczególnych receptach (na poziomach ich optymalizacji).
3. Obliczona zawartość wolnych przestrzeni wewnątrz recept (1-4) zmniejsza się dla każdego lepiszcza wraz ze spadkiem wskaźnika wypełnienia K . w ujęciu wszystkich czterech mieszanek zmiany nie są jednakowe – rodzaj asfaltu wyraźnie wpływa na zdolność zagęszczenia MMA w zadanych warunkach technologicznych przy tej samej MM.
4. Z tabeli wyszczególnia się, iż mieszanka referencyjna B – 35/50 oraz mieszanka z asfaltem wysokomodyfikowanym 25/55-80 HIMA (technologia na gorąco) w warunkach laboratoryjnych wykazuje najmniejszą wrażliwość (przyrost wolnych przestrzeni) na zmiany zawartości lepiszcza w stosunku do pozostałych – najlepiej się zagęszcza, nadając jej szczelność. Zmiany pomiędzy $K = 3.10$ a 2.65 wynosiły kolejno 1.78% i 1.76% . Największe fluktuacje związane ze zmianami zawartości wolnej przestrzeni wykazała mieszanka A - 35/50 WMA wykonana w technologii na ciepło – aż o 2.51% . Mieszanka zawierająca asfalt modyfikowany 25/55-60 znajdowała się wewnątrz omówionego przedziału – C - 2.07% .
5. Zawartość wolnych przestrzeni w mieszance mineralnej VMA wszystkich wykonanych zarobów niezależnie od lepiszcza i technologii wykonania oscyluje wokół jednego poziomu wynoszącego około 15% . Ponadto dostrzega się dwie skrajne odchyłki pierwsza – recepta A poziom $K=2.65$, $VMA = 15.85\%$ i druga B poziom $K=3.10$, $VMA = 14.66\%$, które rozpatrując w kontekście wszystkich 16 wartości nie są znaczące. Na podstawie analizy danych można stwierdzić, iż każdorazowo skomponowana mieszanka mineralna była „homogeniczna” pod kątem uziarnienia. Dodatkowo można założyć, iż MM cechowała się jednorodną strukturą ze względu na podobną zawartość wolnej przestrzeni. Aby poprawić widoczność tych obserwacji na Rys. 38 zamieszcza się wykres kolumnowy z podziałem na lepiszcze asfaltowe i wskaźnik wypełnienia K .



Rys. 38: Poziom wolnych przestrzeni w mieszance mineralnej wykonanych zarobów

6. Na podstawie danych o procentowej zawartości wolnej przestrzeni w MM wypełnionej lepiszczem VFB, dostrzega się spadek poziomu wypełnienia wraz ze zmniejszeniem się wskaźnika K we wszystkich analizowanych lepiszczach i technologiach produkcji. Największą skuteczność w eliminacji wolnych przestrzeni wewnątrz MM porównując lepiszcza na odpowiednich poziomach K (z wykluczeniem poziomu 2.95) wykazywała mieszanka z asfaltem referencyjnym - B 35/50. Można stwierdzić, iż lepiszcze 35/50 w mieszance najlepiej uszczelnia mieszankę jednocześnie wykazuje najlepszą zdolność zagęszczania się co potwierdziło stwierdzenie punktu 6. Podczas prac technologicznych również odnoszono wrażenie, iż mieszanka z tym rodzajem lepiszcza najłatwiej ulegała przygotowaniu – zbieżność z wynikami. Najgorzej wypadła mieszanka A - 35/50 WMA wykonana w technologii na ciepło, dla której zaobserwowano, iż wraz ze zmniejszaniem się K (lepiszcza w MMA) zdolność wypełniania wolnej przestrzeni ulegała gwałtowniejszemu spadkowi. Asfalt w mieszance C skuteczniej wypełniał wolne przestrzenie względem asfaltu D niezależnie od poziomu K (z wykluczeniem poziomu 2.80). Zaobserwowano, iż różnice pomiędzy asfaltami C i D zanikały, gdy zmniejszano zawartość lepiszcza w recepcie. Dla poziomu K równego 2.65 widać Praktycznie największe dysproporcje pomiędzy zastosowanymi lepiszczami w kontekście wypełnienia pustek lepiszczem – najlepiej wypada mieszanka B i następnie C, D i A. Wzmiankowane spostrzeżenia najłatwiej obserwuje się na wykresie kolumnowym, który celem wprowadzenia lepszej czytelności zaprezentowano na Rys. 39.



Rys. 39: Zmienność VFB od wskaźnika wypełnienia wykonanych zarobów

7. Odnosząc zawartość wolnych przestrzeni do wymagań WT-2 można wyraźnie stwierdzić, iż zaprojektowane mieszanki A-D na poziomie wypełnienia $K = 2.95, 2.80$

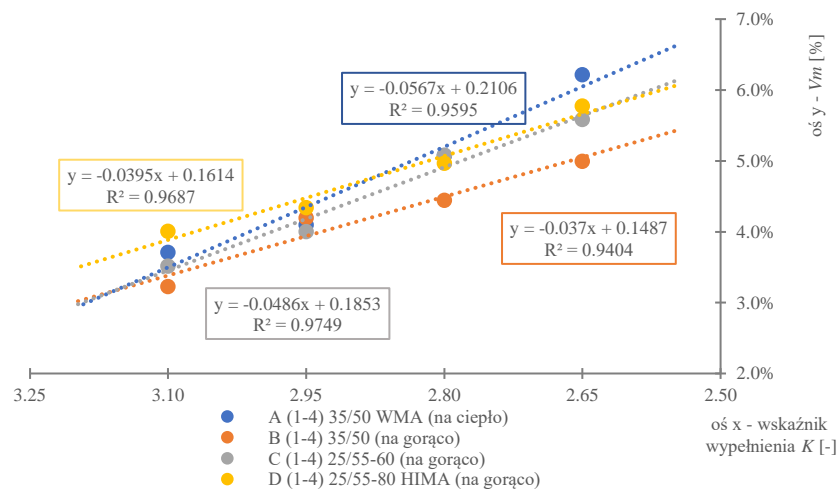
i 2.65 spełniają założenia dokumentu zarówno dla warstwy podbudowy jak i wiążącej. Przy poziomie K równym 3.10 mieszanki A, B i C są za szczelne, niespełniające kryterium minimalnej zawartości wolnych przestrzeni dla obydwu warstw – podbudowy i wiążącej. Mieszanka D jest na granicy tego wymogu.

8. Obserwuje się, iż największy zapas zawartości wolnej przestrzeni w stosunku do granicznej wartości 7% wykazuje mieszanka referencyjna B, która może być dalej swobodnie optymalizowana poniżej poziomu K równego 2.65. Podobnie mieszanki C i D. w przypadku mieszanki A (na ciepło) kolejna iteracja parametru K o 0.15 prawdopodobnie spowodowałaby, iż wyniki badań wykażą przekroczoną dopuszczalną zawartość wolnej przestrzeni.

Analizując dane w Tab. 23 zauważono, iż pomiędzy zawartością wolnych przestrzeni, a wskaźnikiem wypełnienia poszczególnych asfaltach dostrzega się istniejące współzależności. Na podstawie zastosowanej regresji liniowej (linia trendu) wykorzystującej metodę najmniejszych kwadratów ustalono poziom korelacji opierając się na współczynniku determinacji R^2 . Przyjęto następujące zakresy dopasowania modelu rekomendowane wg: [26, 202, 276]:

1. 0.0 – 0.5 – dopasowanie niezadowalające,
2. 0.5 – 0.6 – dopasowanie słabe,
3. 0.6 – 0.8 – dopasowanie zadowalające,
4. 0.8 – 0.9 – dopasowanie dobre,
5. 0.9 – 1.0 – dopasowanie bardzo dobre.

Wykres zmiany omawianych parametrów i zastosowany liniowy model regresji przedstawiono na Rys. 40.



Rys. 40: Zmiana zawartości wolnych przestrzeni w MMA od wskaźnika wypełnienia K dla poszczególnych mieszanek A-D

Wszystkie zbadane mieszanki wykazują wysoki współczynnik determinacji powyżej 0.94 (model jest bardzo dobrze dopasowany) – zastosowana jednakowa mieszanka mineralna oraz identyczna zawartość procentowa poszczególnych lepiszczy umożliwiła uzyskanie liniowej zależności pomiędzy współczynnikiem K (zawartością asfaltu) stosowanym w metodzie Durieza, a zawartością wolnych przestrzeni. Postawione w poprzednim podrozdziale założenia (ta sama MM i zawartość lepiszcza) w zakresie wzajemnego porównania MMA z użyciem różnych lepiszczy i technologii wykonania wydają się być

słuszne. Aplikacja tych założeń pozwala skutecznie wyłapać różnice wynikające jedynie z zastosowanego asfaltu np. zdolność mieszanki do zagęszczania (pustki powietrzne). Ponadto zgodnie z poprzednimi obserwacjami dostrzega się, iż linia trendu mieszanki A jest najbardziej nachylona sugerując największy przyrost pustek w MMA wraz ze spadkiem zawartości lepiszcza – najgorzej zagęszcza się i wypełnia pustki powietrzne w MM. Najmniejsze nachylenie wykazuje mieszanka B – najmniej podatna na spadek zawartości asfaltu (utrzymująca szczelność), dobrze zagęszczająca się oraz wypełniająca pustki w MM. w tym zestawieniu mieszanka C (asfalt 25/55-60) klasyfikuje się na drugim miejscu, natomiast D (25/55-80 HIMA) na trzecim.

Zawartość wolnych przestrzeni jest przeważnie pierwszym badaniem, które realizuje się w przypadku walidacji recept z wytycznymi WT-2. w związku z tym, iż na poziomie wskaźnika wypełnienia 3.10 większość mieszanek (A - 35/50 WMA, B – 35/50 i C – 25/55-60) wykazywała zbyt dużą szczelność (poniżej $V_m < 4.0$ %), do dalszych analiz badań bloku podstawowego oraz zaawansowanego wybrano mieszanki A-D o wartościach wskaźnika K kolejno: 2.95, 2.80 i 2.65. Badania dla poziomu K wynoszącego 3.10 nie będą dalej kontynuowane.

5.2.2. Odporność na wodę i mróz

Odporność na wodę i mróz (ITSR) mieszanek mineralno-asfaltowych należy do podstawowych badań, które realizuje się szczególnie w krajach o klimacie zimnym lub umiarkowanym jak np. Polska. Zbyt duża podatność MMA na skrajnie niskie temperatury prowadzi do przyspieszonej degradacji materiału i całej konstrukcji. Wywołane jest to poprzez zamrażanie wody w miejscach, do których może ona dotrzeć. Efektem tego powstają wysadziny, niszcząca ciągłość i strukturę wbudowanego materiału. Zapewnienie odpowiedniego poziomu odporności MMA na wodę i mróz jest fundamentalne. Cechę tę analizuje się wykonując badanie wytrzymałości na rozciąganie pośrednie odpowiednich zestawów - mokrym (poddanym odpowietrzeniu w stanie nasycenia wodą demineralizowaną, ogrzaniu w łaźni wodnej do 40 °C, i jednocyklowemu zamrożeniu do -18 °C) oraz suchym (przygotowuje się po 5 próbek walcowych Marshallowskich na zestaw). Docelowa temperatura badania wynosi 25 °C, natomiast test wykonuje się w czasie do 1 min od wyciągnięcia z zewnętrznej komory termicznej (jeżeli prasa nie posiada własnej). Wyznaczoną wytrzymałość na rozciąganie ITS (formuła (17) każdego z zestawów uśrednia się, a następnie odporność na wodę i mróz wyraża się przez wskaźnik procentowy ITSR według formuły (18). Należy pamiętać, iż zestaw mokry musi zostać odpowiednio nasycony wodą – od 55 % do 80%, natomiast próbki obydwu zestawów powinno się selekcjonować w oparciu o gęstość objętościową. Dokładna procedura wdrożona w ramach badań bloku podstawowego została opisana w: WT-2 [83] (mechanizm + ITSR), PN-EN 12697-23:2017-12 [220] (wyznaczanie ITS) oraz amerykańskim standardzie AASHTO T 283 [14] (mechanizm).

$$ITS = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot D \cdot H}, \quad (17)$$

gdzie:

ITS – wytrzymałość na rozciąganie pośrednie [GPa],

P – maksymalna wartość obciążenia [kN],

D – średnica próbki [mm],

H – wysokość próbki [mm].

$$ITSR = \frac{ITS_{av,wet}}{ITS_{av,dry}} \cdot 100, \quad (18)$$

gdzie:

$ITSR$ – wskaźnik wytrzymałości na rozciąganie pośrednie [%],

$ITS_{av,wet}$ – średnia wytrzymałość na rozciąganie oznaczona na próbkach zestawu mokrego [GPa],

$ITS_{av,dry}$ – średnia wytrzymałość na rozciąganie oznaczona na próbkach zestawu suchego [GPa].

Do analiz mieszanki AC 22 P KR 5-7 z użyciem różnych asfaltów (35/50 WMA tech. na ciepło, 35/50 tech. na gorąco, 25/55-60 tech. na gorąco, 25/55-80 HIMA) włączając optymalizację zawartości poziomu lepiszcza wyrażonego przez wskaźnik wypełnienia K według nazewnictwa podanego pod koniec podrozdziału 5.2.1 przygotowano w sumie 120 (+ 10% zapasu) próbek marshallowskich o średnicy $D = 101.6 \pm 0.1$ [mm] i wysokości $H = 63.5 \pm 2.5$ [mm]. Energia zagęszczania ubijakiem wynosiła 2 x 35 uderzeń. Przyjęto

następujące oznaczenia pozwalające rozróżnić odpowiednie zaroby i próbki (analogiczne jakie użyto w podrozdziale 5.2.1– wolna przestrzeń):

1. A i j – zarób zawierający asfalt 35/50 WMA (na ciepło), i - ta recepta, j - ta próbka,
2. B i j – zarób zawierający asfalt 35/50, i - ta recepta, j - ta próbka,
3. C i j – zarób zawierający asfalt 25/55-60, i - ta recepta, j - ta próbka,
4. D i j – zarób zawierający asfalt 25/55-80 HIMA, i - ta recepta, j - ta próbka.

Ponadto wdrożono nowe nazewnictwo wyprodukowanych MMA w odniesieniu do recept według poniższego wzoru (sposób oznaczenia asfaltu, recepty, próbki pozostaje bez zmian):

1. mieszanki A-D, recepta 2 – $K = 2.95$ - recepta podstawowa/wejściowa,
2. mieszanki A-D, recepta 3 – $K = 2.80$ – pierwszy poziom optymalizacji,
3. mieszanki A-D, recepta 4 – $K = 2.60$ – drugi poziom optymalizacji.

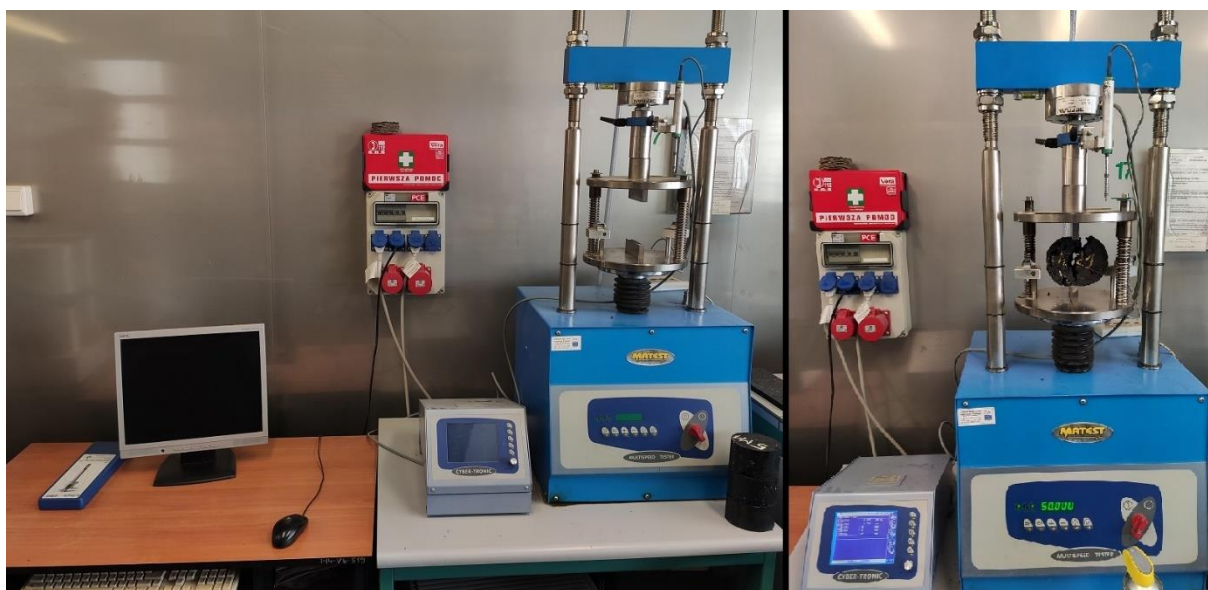
Obydwa sposoby nazewnictwa wykorzystuje się w dalszych częściach rozprawy.

Po zbadaniu gęstości objętościowej z każdego zarobu wyselekcjonowano po 10 próbek – 5 zestaw suchy i mokry. Poziom nasączenia zestawu mokrego spełniał założenia WT-2. Zgodnie z instrukcją próbki poddano odpowiedniemu kondycjonowaniu, a następnie przeprowadzono test pośredniego rozciągania w temperaturze docelowej wynoszącej 25°C.

Badania przeprowadzono stosując prasę wytrzymałościową firmy Matest o dopuszczalnym nacisku $\pm 50 \text{ kN}$ umożliwiającą zastosowanie stałej prędkości deformacji wynoszącej $50 \pm 2 \text{ mm}$. Ponadto w teście użyto bardzo dokładny czujnik przemieszczenia LVDT o zakresie pomiarowym $\pm 5 \text{ mm}$, pozwalający na odczyt do tysięcznej części milimetra z częstotliwością do 120 Hz. Pomieszczenie, którym znajdowała się prasa z kondycjonowano w taki sposób, aby temperatura wewnątrz niego podczas testu wynosiła 25°C. Wykorzystaną komorę termiczną, stanowisko pomiarowe oraz zamocowaną próbkę ukazano na Rys. 41 i Rys. 42.



Rys. 41: Komora termiczna wykorzystana do utrzymania docelowej temperatury badania tuż przed testem



Rys. 42: Stanowisko pomiarowe do badania ITSR z ujęciem zniszczonej próbki

Z uwagi na zbyt dużą ilość danych, w dalszej części tego podrozdziału wyniki przedstawiono i omówiono zbiorczo na zarób/receptę. w ten sposób poprawiono czytelność pozyskanych w wyniku pomiaru danych, usprawniono proces komentowania wyników oraz znajdowania wzajemnych korelacji. Przykładowy pełny pomiar i obliczenia wskaźnika ITSR recepty 2 (asfalty A-D) mieszanki AC 22 P, KR 5-7 zaprezentowano w Tab. 24. Obliczenia wykonano z użyciem Microsoft Excel.

Tab. 24: Przykładowe dane i obliczenia recepty nr 2 (asfalty A-D)

recepta / parametr	K [-]	zestaw: mokry - m / suchy - s	D [mm]	H [mm]	P [kN]	ITS [MPa]	ITS _{av} [MPa]	ITSR [%]	recepta / parametr	K [-]	zestaw: mokry - m / suchy - s	D [mm]	H [mm]	P [kN]	ITS [MPa]	ITS _{av} [MPa]	ITSR [%]
A21	2.95	s	101.6	63.56	10.940	1.078	1.042	87%	C21	2.95	s	101.6	64.71	11.690	1.132	1.150	92%
A22	2.95	s	101.6	65.04	10.319	0.994			C22	2.95	s	101.6	63.04	11.895	1.182		
A23	2.95	s	101.6	63.51	10.721	1.058			C23	2.95	s	101.6	64.06	11.626	1.137		
A24	2.95	s	101.6	63.02	10.502	1.044			C24	2.95	s	101.6	62.66	11.987	1.199		
A25	2.95	s	101.6	62.80	10.389	1.037			C25	2.95	s	101.6	64.55	11.342	1.101		
A26	2.95	m	101.6	63.99	9.509	0.931			C26	2.95	m	101.6	63.80	10.989	1.079		
A27	2.95	m	101.6	64.95	9.172	0.885			C27	2.95	m	101.6	63.89	10.898	1.069		
A28	2.95	m	101.6	63.79	9.287	0.912			C28	2.95	m	101.6	64.48	10.664	1.036		
A29	2.95	m	101.6	63.98	9.174	0.898			C29	2.95	m	101.6	65.20	10.741	1.032		
A210	2.95	m	101.6	63.52	9.298	0.917			C210	2.95	m	101.6	63.11	10.966	1.089		
B21	2.95	s	101.6	64.25	11.638	1.135	1.111	90%	D21	2.95	s	101.6	63.66	13.467	1.326	1.322	95%
B22	2.95	s	101.6	63.49	11.007	1.086			D22	2.95	s	101.6	64.70	13.387	1.296		
B23	2.95	s	101.6	63.81	11.334	1.113			D23	2.95	s	101.6	64.11	13.743	1.343		
B24	2.95	s	101.6	64.99	11.488	1.108			D24	2.95	s	101.6	63.64	13.422	1.322		
B25	2.95	s	101.6	63.30	11.262	1.115			D25	2.95	s	101.6	63.99	13.501	1.322		
B26	2.95	m	101.6	62.63	10.245	1.025			D26	2.95	m	101.6	63.85	12.393	1.216		
B27	2.95	m	101.6	64.96	9.977	0.962			D27	2.95	m	101.6	64.30	12.510	1.219		
B28	2.95	m	101.6	63.09	10.303	1.023			D28	2.95	m	101.6	62.02	13.025	1.316		
B29	2.95	m	101.6	63.22	10.531	1.044			D29	2.95	m	101.6	64.06	12.534	1.226		
B210	2.95	m	101.6	64.85	9.998	0.966			D210	2.95	m	101.6	63.19	12.825	1.272		

Zdecydowana większość (85%) zbadanych próbek uległa zniszczeniu przez „wyraźne pęknięcie przy rozciąganiu” (1-szy sposób). 15% (głównie próbki z zarobów na bazie asfaltu WMA i zwykłego – A i B dla recepty 4 – 2-gi poziom optymalizacji) wykazało zniszczenie poprzez kombinację (3-ci sposób). Nie odnotowano stanu deformacji (2-gi sposób zniszczenia). Około 20 % ze wszystkich badanych próbek (linia zniszczenia) przeszło przez kruszywo. Przykładowy obraz zniszczenia próbki zaprezentowano na Rys. 43.



Rys. 43: Próbką walcowa D31 (25/55-80 HIMA) po badaniu ITSR

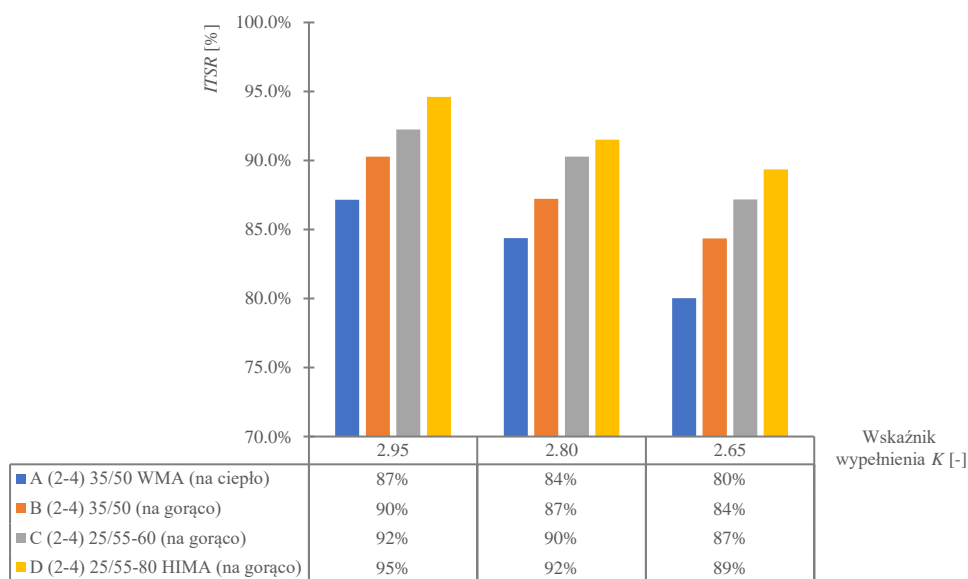
Uśrednione wyniki przeprowadzonych badań ITSR dwunastu recept oraz wymagań WT-2 zaprezentowano w Tab. 25. Ponadto w tabeli zamieszczono zawartości wolnej przestrzeni (z poprzedniego podrozdziału), gdyż te parametry są ze sobą ściśle powiązane – im jest on większa, tym mniejsza odporność na wodę i mróz.

Tab. 25: Zbiorcze rezultaty pomiarów i obliczeń recept (2-4) w zakresie ITSR i wymagań WT-2

recepta / parametr	K [-]	A _k [%]	A _m (B) [%]	V _m [%]	ITSR [%]	Wymagania WT-2	
						ITSR ≥ 70%	ITSR ≥ 80%
						AC 22 P	AC 22 W
A2	2.95	4.42%	4.23%	4.10%	87%	spełnione	spełnione
A3	2.80	4.20%	4.03%	5.08%	84%	spełnione	spełnione
A4	2.65	3.97%	3.82%	6.22%	80%	spełnione	spełnione
B2	2.95	4.42%	4.23%	4.20%	90%	spełnione	spełnione
B3	2.80	4.20%	4.03%	4.44%	87%	spełnione	spełnione
B4	2.65	3.97%	3.82%	5.00%	84%	spełnione	spełnione
C2	2.95	4.42%	4.23%	4.00%	92%	spełnione	spełnione
C3	2.80	4.20%	4.03%	5.08%	90%	spełnione	spełnione
C4	2.65	3.97%	3.82%	5.59%	87%	spełnione	spełnione
D2	2.95	4.42%	4.23%	4.34%	95%	spełnione	spełnione
D3	2.80	4.20%	4.03%	4.97%	92%	spełnione	spełnione
D4	2.65	3.97%	3.82%	5.77%	89%	spełnione	spełnione

W Tab. 25 ukazano wyniki wszystkich analizowanych materiałów, różniących się względem siebie rodzajem asfaltu zaaplikowanego do recepty symbol A-D oraz poziomem jego zawartości w recepcie (optymalizacja) regulowanym przez wskaźnik wypełnienia K . Skok wartości wskaźnika wynosił $\Delta K = 0.15$ [-]. Celem przypomnienia - za mieszankę referencyjną wybrano tę zawierającą powszechnie stosowany asfalt 35/50 (symbol B). Analizując wyniki wyszczególniono siedem obserwacji.

1. Najwyższą odporność na działanie wody i mrozu, niezależnie od poziomu zawartości asfaltu wyrażonym poprzez wskaźnik wypełnienia K wykazuje mieszanka D, zawierająca asfalt wysokomodyfikowany HIMA wykonana w technologii na gorąco. Następną w kolejności jest mieszanka C (asfalt modyfikowany, w tech. na gorąco), B (asfalt zwykły, w tech. gorąco). Najniższą MMA o symbolu A wykonana w technologii na ciepło. Modyfikacja matrycy asfaltowej polimerem SBS oraz wysoka temperatura przetworzenia składników zapewniają skuteczną ochronę całej MMA przed działalnością wody i mrozu.
2. Największa widoczna różnica pomiędzy skrajnymi wartościami wskaźnika ITSR badanych mieszanek widoczna jest na poziomie $K=2.65$ – wynosi aż 9% (D – 89%, A – 80%). Stosowane lepiszcze, jego zawartość oraz technologia produkcji mają olbrzymi wpływ na odporność MMA na wodę i mróz. w przypadku zestawienia samej technologii wykonania różnica również nie jest bez znaczenia -wynosi aż 4% (A vs B). Aby lepiej dostrzec te dysproporcje dodatkowo na Rys. 44 zaprezentowano wykres zmiany wskaźnika wypełnienia K od ITSR.

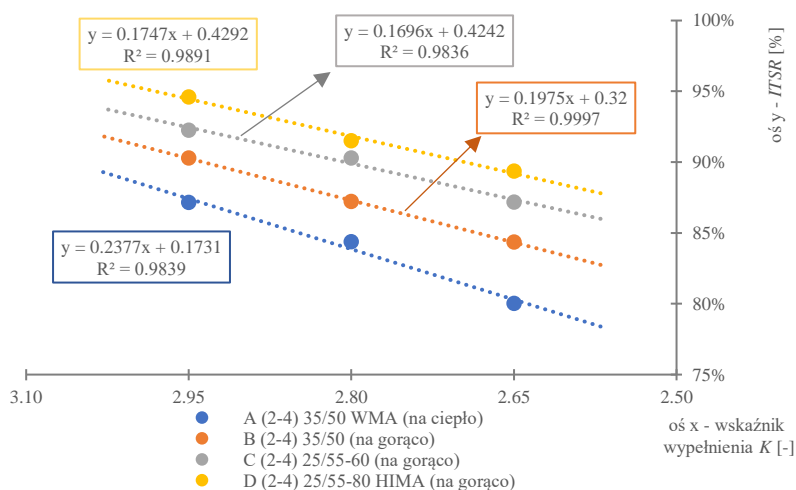


Rys. 44: Wykres zmian wskaźnika $ITSR$ w zależności od wskaźnika wypełnienia K badanych asfaltów

Podobne obserwacje dostrzega się na wyższych poziomach współczynnika K , jednakże wraz z jego zmniejszeniem różnice pomiędzy asfaltami i technologiami są bardziej wyraziste. Warto zaznaczyć, iż w obrębie technologii na gorąco mieszanki C i D zawierające zmodyfikowaną matrycę asfaltową polimerem, niezależnie od poziomu wskaźnika wypełnienia również cechują się wysoką wartością wskaźnika $ITSR$ – powyżej 87%(C) w porównaniu do mieszanki B zawierającej zwykłe lepiszcze 35/50 – 84 % poziom $K = 2.65$. Ta obserwacja potwierdza ponownie, iż asfalt jest głównym generatorem odporności MMA na wodę i mróz.

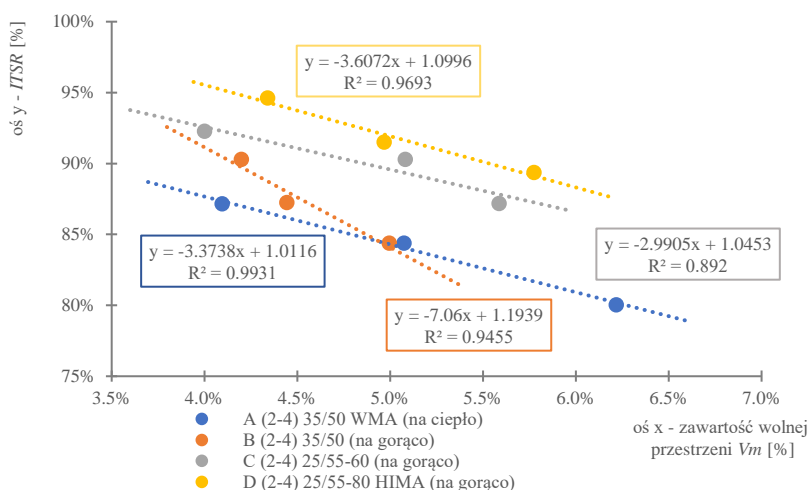
3. Mieszanki wykonane w technologii na gorąco przy najniższej zawartości lepiszcza ($K=2.65$) cechują się wysokim poziomem wskaźnika *ITSR* – znacznie powyżej 80%. Ze względu na ten parametr możliwa jest dalsza optymalizacja ilości asfaltu w receptach B – D (przeznaczenie AC 22 na warstwę wiążącą + podbudowę). w przypadku mieszanki A na ciepło, nie ma takiej możliwości.
4. Spadek zawartości asfaltu skutkuje zmniejszeniem odporności na oddziaływanie wody i mrozu. przy jednoczesnym wzroście wolnej przestrzeni. Największe zmiany obserwuje się w mieszance A na ciepło – z poziomu $K=2.80$ na $K=2.65$ wolna przestrzeń zwiększyła się o 1.14%, a *ITSR* spadł aż o 4%. Mieszanka A na ciepło wykazuje największe fluktuacje tych parametrów, zwiększając trudność optymalizowania recept i przewidywania wyników w kontekście spełnienia wymogów.
5. W zależności od rodzaju asfaltu i poziomu wskaźnika K , spadek *ITSR* różni się. w przypadku mieszanek B i D spadek średnio wyniósł 3%, natomiast dla A i C z początku był mały (3% - A, 2% - C), a następnie wzrósł (4% - A, 3% - C). Mieszanka z asfaltem zwykłym 35/50 i wysokomodyfikowanym 25/55-80 HIMA wykazała najmniejszą wrażliwość na spadek zawartości lepiszcza (stały poziom spadku *ITSR* na poziom optymalizacji). Druga w kolejności C (pomimo, iż cechuje się wysoką wartością wskaźnika *ITSR*). Najgorzej wypadła mieszanka A – 35/50 WMA. Prawdopodobnie w przypadku kolejnych optymalizacji spadki wskaźnika będą jeszcze większe.
6. Porównując technologie wykonania (na bazie asfaltu 35/50) znacznie wyższe wartości wskaźnika *ITSR* umożliwiające dalszą pracę nad receptą wykazuje technologia na gorąco, w której dodatkowo mieszanka referencyjna B posiada niezależnie od poziomu wskaźnika wypełnienia K niską, niezmienną się skokowo (jak w przypadku MMA A) zawartość wolnych przestrzeni. Ta cecha pośrednio również ma wpływ na trwałość materiału.
7. Wszystkie mieszanki A-D i poziomy ich optymalizacji spełniają warunki WT-2 zarówno w przypadku warstwy podbudowy, jak również wiążącej. Pomimo, iż drugi poziom optymalizacji recept A-D ($K=2.65$) nie spełnia założeń minimalnej zawartości asfaltu, jaką należy zastosować w MMA dla warstwy wiążącej, to jednak ze względów jakościowych (wyniki badania *ITSR*) mieszanki można dopuścić do powszechnego zastosowania (odnosząc się tylko do tego parametru).

Analizując dane w Tab. 25 zauważono, iż pomiędzy: wskaźnikiem wypełnienia zawartością wolnych przestrzeni i wskaźnikiem *ITSR* w mieszankach A-D dostrzega się istniejące współzależności. Na podstawie zastosowanej regresji liniowej (linia trendu) wykorzystującej metodę najmniejszych kwadratów ustalono poziom korelacji korzystając z współczynnika determinacji R^2 . Przyjęto analogiczne poziomy dopasowania modelu jak w poprzednim podrozdziale. Wykres zmian i wykonaną analizę statystyczną: wskaźnika K od *ITSR* omawianych parametrów przedstawiono na Rys. 45, natomiast zawartość wolnej przestrzeni V_m od wskaźnika *ITSR* zaprezentowano na Rys. 46.



Rys. 45: Wzajemna korelacja wskaźników K i $ITSR$ badanych MMA (A-D)

Zbadane mieszanki A-D opisane wskaźnikiem wypełnienia K wykazują bardzo wysoką korelację ze wskaźnikiem $ITSR$ – współczynnik determinacji powyżej 98%. Na podstawie wykresu można wyraźnie stwierdzić, iż poziom zawartości lepiszcza bezpośrednio jest powiązany z odpornością MMA na wodę i mróz. Różnice wynikające ze zastosowanego asfaltu i technologii wykonania wpływają jedynie na poziom tej odporności. Na podstawie zastosowanego modelu regresji mieszanka A (tech. na ciepło) charakteryzuje się największym kątem nachylenia – największy spadek odporności na wodę i mróz przy zmniejszaniu się wskaźnika wypełnienia K . Kolejno wypadają mieszanki (w tech. na gorąco): B, D i C.



Rys. 46: Zmienność odporności na wodę i mróz od zawartości wolnej przestrzeni w mieszankach A-D

Analizując wzajemne współzależności pomiędzy zawartością wolnej przestrzeni w mieszankach A-D, a odpornością na wodę i mróz z Rys. 46 dostrzega się bardzo dobrą korelację - powyżej 94% (A, B, D) oraz wysoką więcej niż 89% (C). Na podstawie sporządzonej funkcji regresji wyróżnia się bezpośredni związek pomiędzy porównywanymi parametrami – wraz ze wzrostem wolnej przestrzeni we wszystkich mieszankach odporność na wodę i mróz spada. Ponadto funkcje opisywanych MMA ze względu na lepiszcze i pustki powietrzne wykazują między sobą wyraźne różnice odporności na wodę i mróz zobrazowane

przez wzajemne rozsuniecie prostych – najbardziej odporna mieszanka wg. kolejności $D > C > B > A$. Obserwując trend mieszanki B (kąt nachylenia funkcji) na tle innych stwierdza się, iż im wrażliwość na przyrost wolnych przestrzeni przy zmniejszaniu zawartości lepischerza wyrażonej wskaźnikiem wypełnienia K jest mniejsza (inaczej mówiąc, im mieszanka przy zastosowaniu danego asfaltu lepiej się zagęszcza) tym spadek odporności na wodę i mróz jest bardziej gwałtowny. Przykładowo: różnice zmian nachylenia pomiędzy mieszanką referencyjną B (tech. na gorąco), a A (tech. na ciepło) wynoszą ok. 2.09 razy – prędkość zmian $ITSR$ jest 2.09 razy większa dla mieszanki B w stosunku do A. Na poziomie $V_m \sim 5.0\%$ obydwie funkcje przecinają się osiągając $ITSR$ na poziomie 85%. w przypadku mieszanek A, C i D kąt nachylenia funkcji jest mniejszy i bardziej do siebie zbliżony – niska prędkość zmian.

Wszystkie przebadane mieszanki A-D, na każdym poziomie wskaźnika wypełnienia K : 2.95, 2.80 i 2.65 spełniają wymogi jakościowe WT-2 w zakresie odporności na wodę i mróz $ITSR$ (w. wiążąca i podbudowy). w dalszym kroku wykonano testy związane z odpornością na deformacje trwałe (koleinowanie) mieszanek.

5.2.3. Odporność na deformacje trwałe

Zapewnienie właściwej odporności MMA na koleinowanie wywołane ruchem kołowym pojazdów w wysokich temperaturach występujących w okresie letnim jest niezbędne. Powstanie deformacji trwałych niekorzystnie wpływa na bezpieczeństwo ruchu samochodowego jak również tworzenie się miejsc gromadzenia się wód opadowych. Zarówno warstwa ścieralna jak i pozostałe tworzące konstrukcję muszą wykazywać odpowiedni poziom odporności ustalany na podstawie dwóch parametrów – proporcjonalnej głębokości koleiny PRD_{Air} oraz nachylenia wykresu koleinowania WTS_{Air} . Badanie odporności na deformacje trwałe wykonuje się stosując procedurę opisaną w normie PN-EN 12697-22:2020-07 [230]. w Polsce test realizuje się w małym aparacie – metoda B w powietrzu. Badanie polega na powtarzalnym (określona liczba cykli – 10000 lub do osiągnięcia głębokości uszkodzenia równej 20 mm) przejeździe opony (wywierającej określony nacisk – $700 \pm 10 N$) wywołanym ruchem posuwisto-zwrotnym po płycie analizowanej mieszanki o określonych wymiarach wewnątrz komory termicznej umożliwiającej zaaplikowanie stałych warunków temperaturowych. Podczas trwania testu aparatura pomiarowa zintegrowana wewnątrz koleiniarki dokonuje systematycznych odczytów głębokości powstałego uszkodzenia na odcinku przejazdu koła równym 230 mm, te zaś umożliwiają stworzenie tzw. „profilu próbki w śladzie koła”. Informacja o koleinie jest przetwarzana i przesyłana do komputera. Następnie na podstawie: głębokości koleiny ustalonej po 5000 cyklu i 10000 cyklu badania oraz jej średniej wartości ustalonej z tzw. „profilu średniego” (długości ± 50 mm w strefie środkowej obciążenia próbki kołem wykonanego po 10000 cyklu podzielonego na min. 25 równe odcinki, pomiędzy którymi mierzona jest rzędna koleiny) ustala się wspomniane wcześniej parametry korzystając z zależności: (19), (20) i (21). Ponadto, podczas testu ścisłej kontroli podlega: częstotliwość cykli obciążeniowych (wartość stała wynosząca 26.5 cykli na 60s), liczba przejeżdż koła oraz temperatura ($60 \pm 1^\circ C$).

$$WTS_{Air} = \frac{d_{10000} - d_{5000}}{5}, \quad (19)$$

gdzie:

WTS_{Air} – nachylenie wykresu koleinowania [mm/1000 cykli],

d_{10000} – głębokość koleiny po 10000 cykli badania [mm],

d_{5000} – głębokość koleiny po 5000 cykli badania [mm].

$$RD_{Air} = \frac{m_1 + m_2 + \dots + m_n}{n}, \quad (20)$$

gdzie:

RD_{Air} – głębokość koleiny po 10000 cykli [mm],

$m_{1,2,\dots,n}$ – rzędna profilu średniego próbki mierzona co ustalony interwał w centralnej części profilu koleiny [mm],

n – liczba odczytów profilu średniego [-].

$$PRD_{Air} = \frac{m_1 + m_2 + \dots + m_n}{n \cdot h} \cdot 100, \quad (21)$$

gdzie:

PRD_{Air} – proporcjonalna głębokość koleiny po 10000 cykli [%],

$m_{1,2,\dots,n}$ – rzędna profilu średniego próbki mierzona co ustalony interwał w centralnej części profilu koleiny [mm],

n – liczba odczytów profilu średniego [-],

h – wysokość badanej płyty [mm].

Do analiz mieszanki AC 22 P KR 5-7 z użyciem różnych asfaltów (35/50 WMA tech. na ciepło, 35/50 tech. na gorąco, 25/55-60 tech. na gorąco, 25/55-80 HIMA tech. na gorąco) włączając optymalizacje zawartości poziomu lepiszcza wyrażonego przez wskaźnik wypełnienia K przygotowano w sumie 24 płyty (po dwie na badaną MMA zgodnie z zaleceniami normy [230]) o wymiarach 260.0 x 320.0 mm. Wysokość płyt wynosiła 61.0 mm – min. 60mm dla ziarna $D = 22.4$ mm według WT-2 [83]. Zastosowano identyczne nazewnictwo jak w poprzednich podrozdziałach.

Badania odporności na deformacje trwałe wykonano stosując koleinomierz 2 stanowiskowy Baustoff-Prufsysteme Wennigsen GmbH model SBG 2008. Urządzenie umożliwiło przeprowadzenie dwóch testów jednocześnie (powietrze) z udziałem dwóch współzależnie pracujących kół gumowych, w identycznych warunkach temperaturowych (wspólna komora pracy). Każde koło posiadało zintegrowany czujnik przemieszczenia LVDT rejestrujący dane w zakresie ± 30 mm z dokładnością pomiaru wynoszącą aż ± 0.01 mm i częstością odświeżania do 50 Hz. Dodatkowo wewnątrz komory znajdowały się wbudowane 3 czujniki rezystancyjne (komora, próbka 1 i próbka 2) Pt100 klasy AA (bardzo dokładne) umożliwiające bezpośrednią kontrolę temperatury. Celem uzyskania jak najdokładniejszego pomiaru do przeprowadzenia badania z udziałem tej aparatury, wdrożono następujące warunki testu:

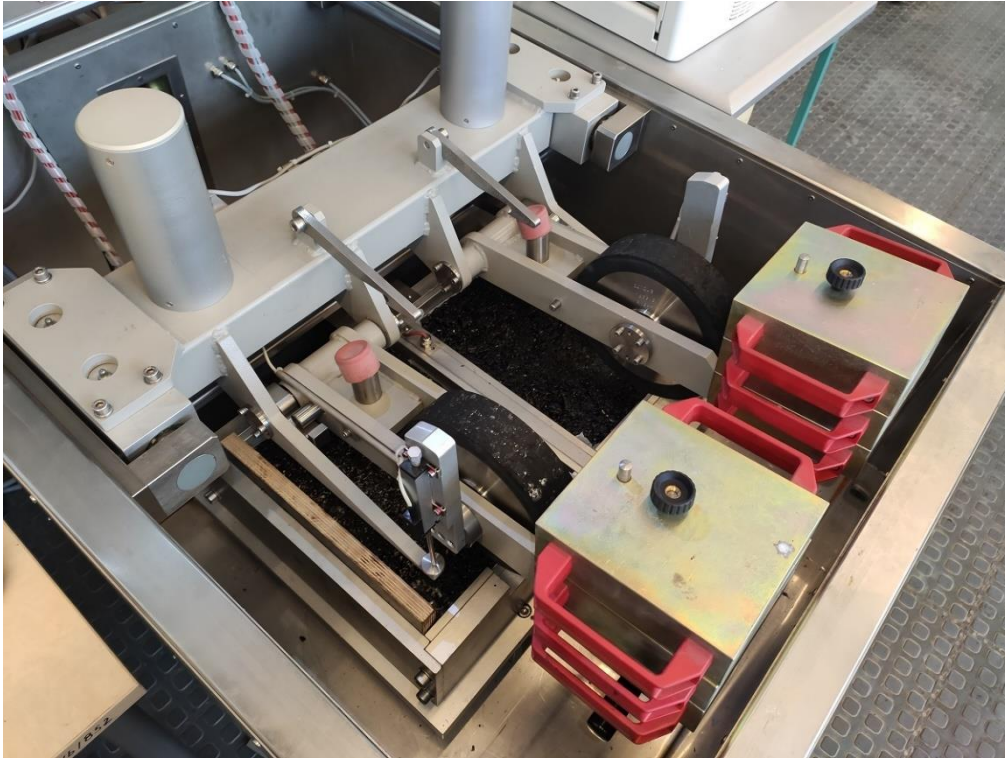
1. Każda MMA (A-D) na każdym poziomie wskaźnika wypełnienia została zbadana parami (dwie płyty na mieszankę, jednoczesne podwójne oznaczenie),
2. Kondycjonowanie termiczne w temperaturze 60.0°C wynosiło 8h (min. 6h) – uzyskanie tej samej temperatury na całym przekroju,
3. Po kondycjonowaniu płyt zaprogramowano w urządzeniu automatyczny start badania – maszyna umożliwiła samoistne opuszczenie kół z obciążeniem normowym oraz podniesienie ich po teście,
4. Obciążenie każdego koła wynosiło 700 ± 10 N,
5. Częstotliwość obciążenia wynosiła 26.5 cykli na 60 s,

6. Zastosowano 10 cykli kondycjonujących zanim rozpoczęła się właściwa część trwająca 10000 cykli,
7. Zagłębienie koleiny na odcinku pomiarowym zostało mierzone co 1 mm,
8. Aparatura dokonała pomiaru zagłębienia koleiny potrzebnego do stworzenia profilu średniego w oparciu o podział na 101 punktów pomiarowych na dystansie ± 50 mm (co 1mm) w strefie środkowej obciążenia próbki kołem – uzyskano w ten sposób bardzo dokładny wykres powstałej koleiny, zwiększający precyzję wyznaczanych wielkości,
9. Każda montowana płyta wewnątrz ramy maszyny była wyścielona papierem do pieczenia – skuteczna ochrona ramy przed przywieraniem MMA,
10. Opona niebezpiecznikowana koła o średnicy 203 mm nie została pokryta środkiem antyadhezyjnym – brak potrzeby ochrony przed sklejeniem się gumy koła z próbką,
11. Każda płyta posiadała oznaczenie wykonane markerem olejowym z boku próbki (niewidoczne na zdjęciach) z ustalonym kierunkiem zagęszczenia w zagęszczarce płytowej, który był zgodny z ruchem posuwisto-zwrotnym koleiniarki,
12. Zastosowano płyty których wskaźnik zagęszczenia określany za pomocą gęstości objętościowej [218, 219] wykazywał wartości w zakresie 99.8% - 100.0% (wymogi WT-2 98.0 – 100.0 %) – próbki były bardzo dobrze zagęszczone.

Wykorzystaną aparaturę oraz próbki na stanowisku badawczym przed i po badaniu zaprezentowano na Rys. 47, Rys. 48 i Rys. 49.



Rys. 47: Stanowisko pomiarowe - podwójna koleiniarka Baustoff



Rys. 48: Próbkki na stanowisku pomiarowym wewnątrz podwójnej kolejniarki Baustoff



Rys. 49: Próbkki mieszanki C2 po badaniu

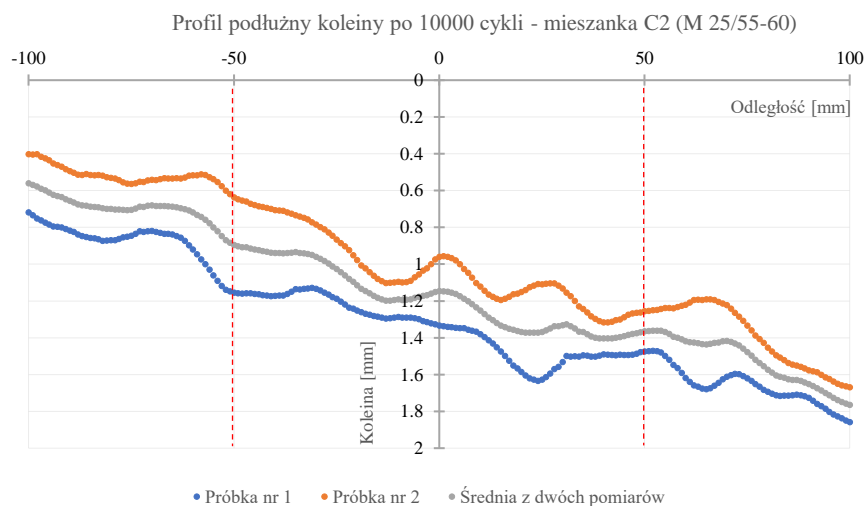
Z uwagi na zbyt dużą ilość danych, w dalszej części tego podrozdziału wyniki przedstawiono i omówiono zbiorczo na zarób/receptę. w ten sposób poprawiono czytelność pozyskanych w wyniku pomiaru danych, usprawniono proces komentowania wyników oraz znajdowania wzajemnych korelacji. Przykładowy fragment pomiaru, obliczenia: WTS_{Air} , RD_{Air} , PRD_{Air} mieszanki C2 (AC 22 P, KR 5-7) zaprezentowano w Tab. 27 i Tab. 28 natomiast wykresy ukazana na Rys. 50 i Rys. 51. Obliczenia wykonano z użyciem Microsoft Excel.

Tab. 26: Fragment pomiaru głębokości koleiny – mieszanka C2

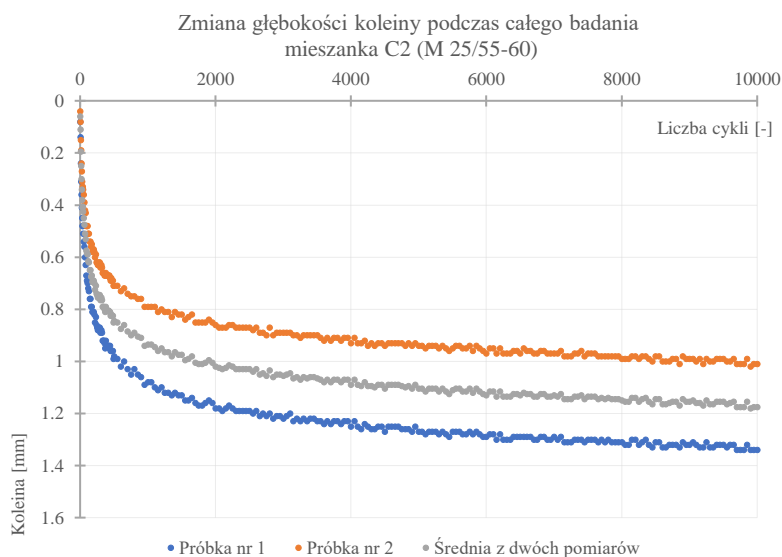
C2	Temperatura	D [mm]	S [mm]	W [mm]	WTS_{Air} [mm/1000]		
25/55-60	60.12°C	320	260	61	0.014		
Cykle [-]	Próbka 1 [mm]	Próbka 2 [mm]	Średnia [mm]	Cykle [-]	Próbka 1 [mm]	Próbka 2 [mm]	Średnia [mm]
1	0.08	0.04	0.06	460	0.96	0.68	0.82
5	0.14	0.08	0.11	470	0.96	0.69	0.83
10	0.24	0.15	0.20	480	0.96	0.69	0.83
15	0.31	0.19	0.25	490	0.99	0.71	0.85
20	0.36	0.24	0.30	500	0.98	0.71	0.85
25	0.41	0.27	0.34	550	0.99	0.71	0.85
30	0.45	0.31	0.38	600	1.02	0.73	0.88
35	0.48	0.34	0.41	650	1.00	0.72	0.86
40	0.48	0.33	0.41	700	1.03	0.74	0.89
45	0.51	0.34	0.43	750	1.05	0.75	0.90
50	0.54	0.36	0.45	800	1.03	0.75	0.89
60	0.56	0.39	0.48	850	1.05	0.76	0.91
70	0.60	0.42	0.51	900	1.06	0.76	0.91
80	0.63	0.43	0.53	950	1.09	0.79	0.94
90	0.67	0.48	0.58	1000	1.08	0.79	0.94
100	0.69	0.48	0.59	1050	1.08	0.79	0.94
110	0.70	0.48	0.59	1100	1.10	0.79	0.95
120	0.72	0.51	0.62	1150	1.11	0.81	0.96
130	0.73	0.51	0.62	1200	1.10	0.80	0.95
140	0.76	0.54	0.65	1250	1.12	0.81	0.97
150	0.76	0.54	0.65	1300	1.12	0.81	0.97
160	0.79	0.56	0.68	1350	1.13	0.83	0.98
170	0.79	0.55	0.67	1400	1.12	0.81	0.97
180	0.81	0.58	0.70	1450	1.13	0.82	0.98
190	0.81	0.57	0.69	1500	1.13	0.82	0.98
200	0.81	0.57	0.69	1550	1.15	0.84	1.00
210	0.82	0.58	0.70	1600	1.15	0.83	0.99
220	0.85	0.60	0.73	1650	1.14	0.82	0.98
230	0.83	0.59	0.71	1700	1.16	0.85	1.01
240	0.86	0.62	0.74	1750	1.17	0.85	1.01
250	0.87	0.62	0.75	1800	1.17	0.85	1.01
260	0.88	0.63	0.76	1850	1.16	0.85	1.01
270	0.88	0.63	0.76	1900	1.15	0.84	1.00
280	0.87	0.62	0.75	1950	1.16	0.85	1.01
290	0.87	0.62	0.75	2000	1.18	0.86	1.02
300	0.89	0.64	0.77	2050	1.18	0.87	1.03
310	0.88	0.63	0.76	2100	1.19	0.87	1.03
320	0.89	0.64	0.77	2150	1.18	0.87	1.03
330	0.92	0.66	0.79	2200	1.17	0.86	1.02
340	0.92	0.66	0.79	2250	1.18	0.86	1.02
350	0.92	0.66	0.79	2300	1.19	0.87	1.03
360	0.93	0.67	0.80	2350	1.19	0.87	1.03
370	0.95	0.67	0.81	2400	1.19	0.87	1.03
380	0.92	0.66	0.79	2450	1.19	0.87	1.03
390	0.94	0.67	0.81	2500	1.19	0.87	1.03
400	0.94	0.67	0.81	2550	1.20	0.88	1.04
410	0.94	0.67	0.81
420	0.94	0.67	0.81	5000	1.27	0.94	1.11
430	0.95	0.67	0.81
440	0.94	0.68	0.81	10000	1.34	1.01	1.18
450	0.96	0.69	0.83				

Tab. 27: Pomiar głębokości koleiny profilu środkowego po 10000 cyklach– mieszanka C2

Cykle [-]	Ilość odczytów [-]	Suma odczytów na miarodajnym odcinku [mm]	RD_{Air} [mm]	PRD_{Air} [%]			
10000	101	119.7	1.185	1.94%			
Profil podłużny położenie odczytu [mm]	Próbka 1 [mm]	Próbka 2 [mm]	Średnia [mm]	Profil podłużny położenie odczytu [mm]	Próbka 1 [mm]	Próbka 2 [mm]	Średnia [mm]
-50	1.154	0.636	0.895	0	1.332	0.959	1.146
-49	1.158	0.647	0.903	1	1.336	0.956	1.146
-48	1.159	0.654	0.907	2	1.339	0.959	1.149
-47	1.157	0.658	0.908	3	1.342	0.966	1.154
-46	1.158	0.671	0.915	4	1.344	0.978	1.161
-45	1.160	0.678	0.919	5	1.346	0.999	1.173
-44	1.162	0.685	0.924	6	1.347	1.026	1.187
-43	1.167	0.688	0.928	7	1.355	1.046	1.201
-42	1.170	0.694	0.932	8	1.361	1.072	1.217
-41	1.173	0.699	0.936	9	1.366	1.102	1.234
-40	1.171	0.705	0.938	10	1.380	1.121	1.251
-39	1.170	0.708	0.939	11	1.396	1.143	1.270
-38	1.170	0.709	0.940	12	1.413	1.165	1.289
-37	1.161	0.717	0.939	13	1.430	1.176	1.303
-36	1.149	0.725	0.937	14	1.451	1.186	1.319
-35	1.134	0.734	0.934	15	1.474	1.193	1.334
-34	1.136	0.740	0.938	16	1.497	1.187	1.342
-33	1.133	0.748	0.941	17	1.523	1.177	1.350
-32	1.131	0.756	0.944	18	1.550	1.162	1.356
-31	1.127	0.771	0.949	19	1.566	1.159	1.363
-30	1.133	0.784	0.959	20	1.585	1.151	1.368
-29	1.142	0.797	0.970	21	1.603	1.140	1.372
-28	1.154	0.810	0.982	22	1.619	1.124	1.372
-27	1.165	0.827	0.996	23	1.627	1.115	1.371
-26	1.178	0.845	1.012	24	1.634	1.107	1.371
-25	1.187	0.865	1.026	25	1.626	1.109	1.368
-24	1.202	0.884	1.043	26	1.612	1.106	1.359
-23	1.218	0.902	1.060	27	1.594	1.104	1.349
-22	1.235	0.922	1.079	28	1.569	1.104	1.337
-21	1.241	0.950	1.096	29	1.557	1.116	1.337
-20	1.251	0.977	1.114	30	1.530	1.132	1.331
-19	1.259	1.007	1.133	31	1.498	1.153	1.326
-18	1.268	1.021	1.145	32	1.501	1.173	1.337
-17	1.274	1.042	1.158	33	1.499	1.199	1.349
-16	1.280	1.062	1.171	34	1.502	1.228	1.365
-15	1.284	1.079	1.182	35	1.494	1.242	1.368
-14	1.290	1.091	1.191	36	1.496	1.262	1.379
-13	1.295	1.101	1.198	37	1.502	1.282	1.392
-12	1.293	1.100	1.197	38	1.501	1.297	1.399
-11	1.289	1.099	1.194	39	1.496	1.308	1.402
-10	1.285	1.094	1.190	40	1.489	1.316	1.403
-9	1.289	1.098	1.194	41	1.491	1.315	1.403
-8	1.289	1.096	1.193	42	1.492	1.311	1.402
-7	1.290	1.090	1.190	43	1.494	1.303	1.399
-6	1.292	1.070	1.181	44	1.491	1.299	1.395
-5	1.298	1.054	1.176	45	1.492	1.288	1.390
-4	1.308	1.034	1.171	46	1.492	1.274	1.383
-3	1.314	1.022	1.168	47	1.491	1.266	1.379
-2	1.320	0.999	1.160	48	1.485	1.263	1.374
-1	1.325	0.974	1.150	49	1.476	1.262	1.369
				50	1.473	1.255	1.364



Rys. 50: Profil podłużny zarejestrowany podczas badania mieszanki C2



Rys. 51: Zmiana głębokości koleiny mieszanki C2

Uśrednione wyniki przeprowadzonych badań odporności na deformacje trwałe dwunastu recept oraz wymagań WT-2 zaprezentowano w Tab. 28. Ponadto w tabeli zamieszczono zawartość wolnej przestrzeni i wskaźnik *ITSR*, celem określenia współzależności analizowanych recept.

Tab. 28: Zbiorcze wyniki badania odporności na deformacje trwałe mieszanek A-D

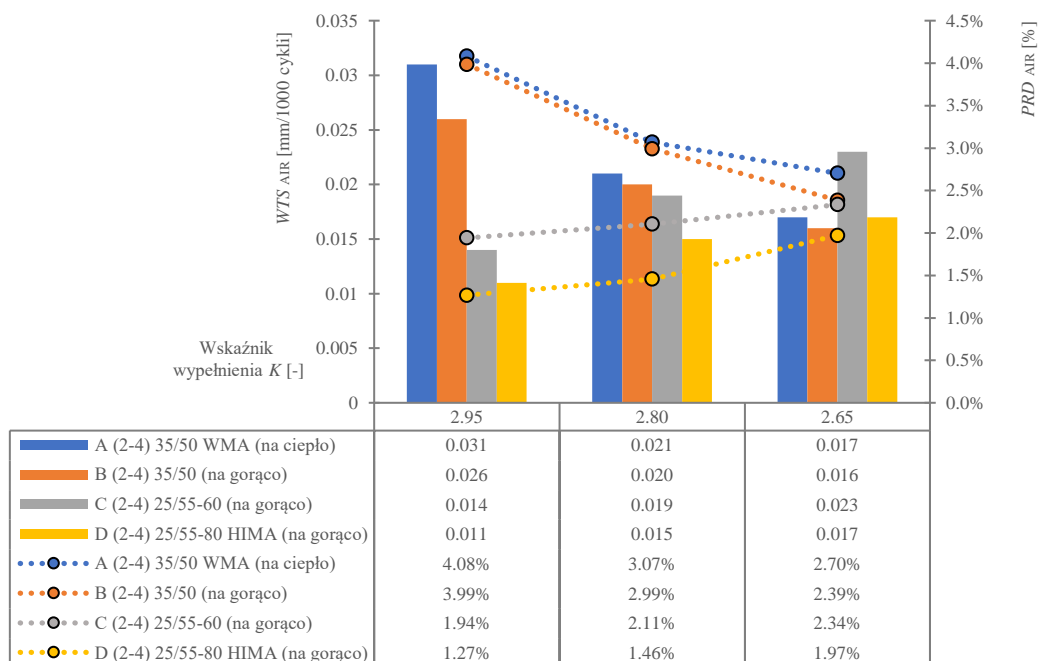
recepta / parametr	K [-]	A _k [%]	A _m (B) [%]	V _m [%]	ITSR [%]	WTS _{Air} [mm/1000]	Zmiana względem recepty 2 WTS _{Air} [mm/1000]	% zmiana względem recepty 2 WTS _{Air} [%]	RD _{Air} [mm]	PRD _{Air} [%]	Zmiana względem recepty 2 PRD _{Air} [%]	% zmiana względem recepty 2 PRD _{Air} [%]	Wymagania WT-2	
													WTS _{Air} ≤ 0.15 PRD _{Air} ≤ 7 %	WTS _{Air} ≤ 0.10 PRD _{Air} ≤ 5 %
													AC 22 P	AC 22 W
A2	2.95	4.42%	4.23%	4.10%	87%	0.031	0.000	0.00%	2.69	4.08%	0.00%	0.0%	spełnione	spełnione
A3	2.80	4.20%	4.03%	5.08%	84%	0.021	0.010	32.3%	1.87	3.07%	1.01%	24.8%	spełnione	spełnione
A4	2.65	3.97%	3.82%	6.22%	80%	0.017	0.014	45.2%	1.65	2.70%	1.38%	33.8%	spełnione	spełnione
B2	2.95	4.42%	4.23%	4.20%	90%	0.026	0.000	0.00%	2.47	3.99%	0.00%	0.0%	spełnione	spełnione
B3	2.80	4.20%	4.03%	4.44%	87%	0.020	0.006	23.1%	1.83	2.99%	0.99%	24.9%	spełnione	spełnione
B4	2.65	3.97%	3.82%	5.00%	84%	0.016	0.010	38.5%	1.46	2.39%	1.60%	40.2%	spełnione	spełnione
C2	2.95	4.42%	4.23%	4.00%	92%	0.014	0.000	0.00%	1.18	1.94%	0.00%	0.0%	spełnione	spełnione
C3	2.80	4.20%	4.03%	5.08%	90%	0.019	-0.005	-35.7%	1.28	2.11%	-0.16%	-8.4%	spełnione	spełnione
C4	2.65	3.97%	3.82%	5.59%	87%	0.023	-0.009	-64.3%	1.42	2.34%	-0.39%	-20.2%	spełnione	spełnione
D2	2.95	4.42%	4.23%	4.34%	95%	0.011	0.000	0.00%	0.76	1.27%	0.00%	0.0%	spełnione	spełnione
D3	2.80	4.20%	4.03%	4.97%	92%	0.015	-0.004	-36.4%	0.89	1.46%	-0.19%	-15.0%	spełnione	spełnione
D4	2.65	3.97%	3.82%	5.77%	89%	0.017	-0.006	-54.5%	1.20	1.97%	-0.70%	-55.5%	spełnione	spełnione

W Tab. 28 ukazano wyniki wszystkich analizowanych materiałów, różniących się względem siebie rodzajem asfaltu zaaplikowanego do recepty symbol A-D oraz poziomem jego zawartości w recepcie (optymalizacja) regulowanym przez wskaźnik wypełnienia K . Skok wartości wskaźnika wynosił $\Delta K = 0.15$. Celem przypomnienia - za mieszankę referencyjną wybrano tę zawierającą powszechnie stosowany asfalt 35/50 (symbol B). Analizując wyszczególniono dziewięć obserwacji:

1. Mieszanki A (asfalt zwykły 35/50 na ciepło) i B (asfalt zwykły 35/50) niezależnie od stopnia zawartości asfaltu wyrażonego przez wskaźnik wypełnienia K cechują się większą proporcjonalną głębokością koleiny PRD_{Air} względem mieszanek C (asfalt modyfikowany 25/55-60) i D (asfalt wysokomodyfikowany 25/55-80 HIMA). Oznacza to, iż MMA na bazie zwykłego lepiszcza są zdecydowanie mniej odporne na deformacje trwałe w porównaniu do tych z modyfikacją matrycy polimerem SBS.
2. W mieszankach A i B na bazie asfaltu zwykłego 35/50 wraz ze spadkiem zawartości lepiszcza obserwuje się widoczne zmniejszenie nachylenia wykresu koleinowania wyrażonego poprzez parametr WTS_{Air} – większa odporność na przyrost deformacji trwałych w czasie (mniejsza podatność zmian struktury MMA na panujące warunki). Odmienny trend dostrzega się w mieszankach na bazie asfaltów modyfikowanych C i D, w których to parametr ten wzrasta. Możliwe, iż jest to spowodowane zmęczeniem matrycy asfaltowej, która dopiero po określonej liczbie cykli łatwiej ulega deformacji – asfalt zwykły pod wpływem obciążenia i wysokiej temperatury „od razu” ulega płynięciu potrafiąc „upakować się”/uzupełnić wolne przestrzenie w MMA (zmieniając

tym samym strukturę całego materiału), ponadto im go więcej tym efekt większy, natomiast asfalt modyfikowany polimerem stawia opór tym czynnikom przez dłuższy czas, a opór tym większy im zawartość asfaltu jest większa. Pomimo zaobserwowanych trendów mieszanki C i D wykazują największą odporność (wyrażoną przez WTS_{Air}) na przyrost deformacji trwałych w czasie.

- Porównując dane poszczególnych MMA w tabeli można dostrzec, iż istnieje taki poziom wskaźnika wypełnienia K , dla którego wystąpi wzajemne przecięcie się trendów mieszanek A i B z C i D: WTS_{Air} oraz niezależnie PRD_{Air} – informacja ta pozwala na skuteczniej dobierać lepszycze do MMA ze względu na koleinowanie pod kątem jego zawartości i wymogów, które należy spełnić. Pomimo, iż opisywane trendy zmieniają się (A i B spadają, a C i D rosną) to jednak dla każdej mieszanki istnieje możliwość prowadzenia optymalizacji asfaltu ze względu na omawianą cechę. Ponadto obserwuje się widoczne korelacje z innymi wcześniej analizowanymi cechami jakościowymi MMA (wolna przestrzeń i wskaźnika $ITSR$).
- Zestawiając globalnie mieszanki A-D (WTS_{Air} oraz PRD_{Air}) największą odporność na koleinowanie się wykazuje niezależnie od poziomu wskaźnika wypełnienia K MMA w kolejności: D – C – B – A. Aby lepiej zobrazować wnioski wyciągnięte z tabeli, zamieszczono na Rys. 52 wykres zmian wskaźnika K od wyżej wzmiankowanych parametrów. Dostrzega się nawet 3-krotnie większą trwałość deformacyjną dla mieszanki D względem A ($K=2.95$), zmniejszającą się do około 1.4 razy ($K=2.65$) – PRD_{Air} . Rodzaj zastosowanego asfaltu wyraźnie wpływa na tę cechę jakościową mieszanki, wskazując, iż im modyfikacja matrycy polimerem jest większa tym bardziej odporną mieszankę się pozyska.



Rys. 52: Zmiany WTS_{Air} i PRD_{Air} od wskaźnika wypełnienia K badanych mieszanek

- W przypadku zestawienia dwóch technologii na bazie mieszanek A (na ciepło) i B (na gorąco) większą odporność na deformacje trwałe wykazuje mieszanka B – na każdym poziomie wskaźnika wypełnienia K . Największe dysproporcje ($0.005 - \Delta WTS_{Air}$) nachylenia wykresu koleinowania pomiędzy MMA a i B dostrzega się na poziomie

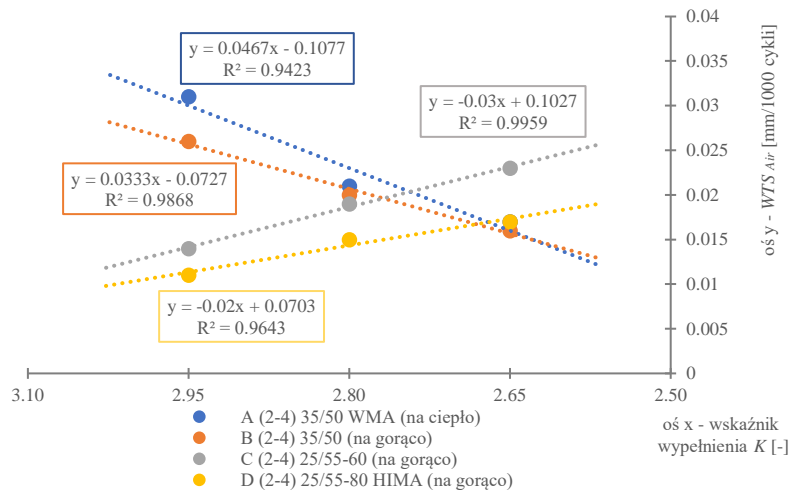
$K=2.95$. Wraz ze spadkiem K różnice zanikają – nachylenia zbliżają się do siebie. Odmienne przedstawia się proporcjonalna głębokość koleiny, której różnice między MMA wzrastają wraz ze spadkiem K – z 0.09% $A > B$ ($K=2.95$), aż do 0.31% $A > B$ ($K=2.65$). Prawdopodobnie przy kolejnych poziomach optymalizacji dysproporcje PRD_{Air} będą większe. Technologia wykonania na ciepło (A) wypada niewiele gorzej względem na gorąco (B), lecz mimo wszystko zapewnia skuteczną ochronę na deformacje trwałe.

6. Największe procentowe zmiany nachylenia wykresu koleinowania w odniesieniu do zmiany wskaźnika wypełnienia z $K = 2.95$ na 2.65 obserwuje się w mieszance a (na ciepło) - spadek o 45.2% i mieszance C - wzrost o 64.3%. Oznacza to, iż te MMA spośród wszystkich analizowanych najbardziej narażone są na wpływ zmiany zawartości lepiszcza – duże fluktuacje cechy, trudniej będzie przywidywać ich zachowanie ze względu na ten parametr (dalsza optymalizacja). Ponadto dostrzega się, iż zmieniając poziom K , te zmiany nie są jednakowe – największy skok jest widoczny przy zmianie $K = 2.95$ na 2.80 a – spadek o 32.3%, C – wzrost o 35.7%. Pozostałe mieszanki nie odbiegają znacząco od omawianych MMA, chociaż zmiana zawartości lepiszcza pomiędzy poziomami optymalizacji jest bardziej „liniowa”: B – skrajny spadek o 38.5 %, pośrednio o 23.1 % natomiast D – skrajny wzrost o 54.5%, pośrednio o 36.4%.
7. Największe fluktuacje proporcjonalnej głębokości koleiny w odniesieniu do zmiany wskaźnika wypełnienia z $K = 2.95$ na 2.65 obserwuje się w materiale B – spadek o 40.2% i D – wzrost o 55.5% - odwrotny trend (względem MMA) w stosunku do WTS_{Air} . Zauważa się, iż spadek zawartości asfaltu znacząco wpływa na zdolność MMA do koleinowania się, lecz głównym czynnikiem wywołującym odpowiedni rodzaj fluktuacji jest rodzaj zastosowanego lepiszcza (wcześniejsze obserwacje potwierdzają się). Pomimo, iż procentowe zmiany są duże, to jednak mieszanka D (asfalt wysokomodyfikowany 25/55-80 HIMA) jest zdecydowanie najtrwalsza (ze względu na PRD_{Air}). Podobnie tak jak w obserwacji nr 6 zmieniając poziom K (optymalizując), zmiany procentowe z poziomu na poziom nie są jednakowe i nieliniowe – największy skok jest widoczny przy zmianie $K = 2.95$ na 2.80 - B – spadek o 24.9% (D – wzrost tylko o 15.0%), natomiast przy zmianie $K = 2.80$ na 2.65 dla D – wzrost wyniósł aż 40.5%! Analogicznie trend kształtuje się w pozostałych mieszankach A – skrajny spadek wyniósł 33.8%, pośredni 24.8%, C – skrajny wzrost wyniósł 20.2%, pośredni 8.4%.
8. Niezależnie od trendu zmian WTS_{Air} lub PRD_{Air} przy zmniejszaniu wskaźnika wypełnienia K mieszanek A-D, w każdej z nich możliwa jest dalsza optymalizacja recepty ze względu na odporność na deformacje trwałe. Przy kolejnych krokach należy jednak pamiętać o ścisłym powiązaniu tej cechy jakościowej MMA z pozostałymi (wolna przestrzeń i ITSR).
9. Wszystkie mieszanki A-D na każdym poziomie K spełniły wymogi dokumentu odniesienia WT-2 mieszanki AC 22 zarówno odnosząc się do warstwy podbudowy (P) jak i wiążącej (W), dla której wymogi są bardziej restrykcyjne. Po raz kolejny należy podkreślić, iż dla wskaźnika wypełnienia K na poziomie 2.65 MMA, który nie spełniał wymogu minimalnej zawartości asfaltu (warstwa wiążąca) mieszanki A-D wykazują jednoznacznie bardzo wysoką odporność na deformacje trwałe (znacznie powyżej ustalonych limitów) - ze względów jakościowych mieszanki można dopuścić do powszechnego zastosowania (odnosząc się tylko do tej cechy). Obserwacje nasuwają wniosek, iż wymogi zawarte w WT-2 należałoby dostosować do: różnych technologii wykonania oraz rodzajów asfaltów (szczególnie modyfikowanych i wysokomodyfikowanych), które umożliwiają uzyskanie wystarczającej odporności

na badane cechy jakościowe MMA przy niższych (niż w WT-2) poziomach zawartości lepiszcza.

Analizując dane w Tab. 28 zauważono, iż pomiędzy: wskaźnikiem wypełnienia K zawartością wolnych przestrzeni V_m , wskaźnikiem $ITSR$, WTS_{Air} i PRD_{Air} w mieszankach A-D dostrzega się istniejące współzależności. Na podstawie zastosowanej regresji liniowej (linia trendu) wykorzystującej metodę najmniejszych kwadratów ustalono poziom korelacji korzystając z współczynnika determinacji R^2 . Przyjęto analogiczne poziomy dopasowania modelu jak w poprzednich podrozdziałach. Wykres zmian i wykonaną analizę statystyczną przedstawiono na odpowiednich rysunkach w odpowiedniej kolejności:

1. wykres zmian wskaźnika wypełnienia K od WTS_{Air} – Rys. 53,
2. wykres zmian wskaźnika wypełnienia K od PRD_{Air} – Rys. 54,
3. wykres zmian zawartości wolnej przestrzeni V_m od WTS_{Air} – Rys. 55,
4. wykres zmian zawartości wolnej przestrzeni V_m od PRD_{Air} – Rys. 56,
5. wykres zmian odporności na wodę i mróz (wskaźnik $ITSR$) od WTS_{Air} – Rys. 57,
6. wykres zmian odporności na wodę i mróz (wskaźnik $ITSR$) od PRD_{Air} – Rys. 58.



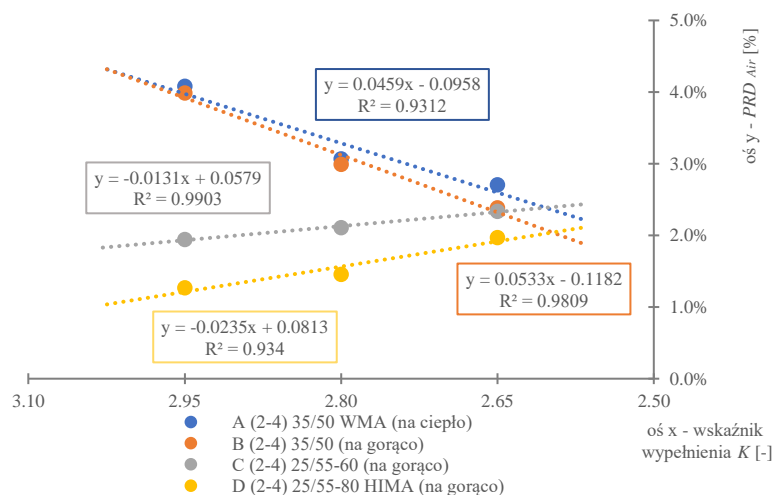
Rys. 53: Zmiana nachylenia wykresu koleinowania względem wskaźnika wypełnienia K mieszanek A-D

Zbadane mieszanki A - D wykazują bardzo wysoką korelację zmian wskaźnika wypełnienia K względem nachylenia wykresu koleinowania – współczynnik determinacji jest nie mniejszy niż 0.94. Zarówno MMA: A (na ciepło) i B (na gorąco) na bazie asfaltu zwykłego jak również C i D z użyciem asfaltu modyfikowanego i wysokomodyfikowanego (obydwie na gorąco) są zależne od zmiany zawartości lepiszcza (wręcz idealne dopasowanie modelu liniowego). Ponadto w każdej z mieszanek widoczne różnice (kąty nachylenia modeli), wynikają jedynie z rodzaju zastosowanego asfaltu – kolejny raz potwierdza się słuszność założeń recepty (ta sama krzywa uziarnienia, materiał, procentowa zawartość asfaltu) i technologii (przyjęte temperatury, czas mieszania, osprzęt itd.), które umożliwiają skuteczne porównanie MMA na bazie różnych lepiszczy.

Zestawiając mieszanki A i B można stwierdzić, iż rodzaj zastosowanej technologii nie wpływa na fluktuacje parametru WTS_{Air} w takim stopniu jak zmiana wskaźnika wypełnienia K , chociaż obserwuje się w technologii na ciepło większy rozrzut wyników niż na gorąco - współczynnik R^2 : A – 0.9423, B – 0.9868. Warto nadmienić, iż mieszanka A (na ciepło) wykazuje większą wrażliwość na zmiany zawartości lepiszcza względem B (na gorąco) – kąt

nachylenia modelu jest większy o około 40% (wysoka procentowa zawartość lepiszcza stwarza ryzyko niespełnienia wymogów związanych z nachyleniem wykresu koleinowania). Krzywe modelowe a i B z uwagi na różne kąty nachylenia (trend spadkowy) umożliwiają znalezienie wspólnego punktu przecięcia – wyznaczenie wartości wskaźnika wypełnienia K dla którego nachylenie wykresu koleinowania jest identyczne – informację można wykorzystać do analizy kosztów produkcji i wbudowania MMA w tech. na ciepło i gorąco ze względu na tę cechę.

Analizując mieszanki C i D dostrzega się wraz ze spadkiem wskaźnika wypełnienia K trend wzrostowy. Obydwa modele tych mieszanek są bardzo dobrze dopasowane jednak większą fluktuację wyników wykazuje materiał D (HIMA) - współczynnik R^2 : C – 0.9959, D – 0.9643. Pomimo tej różnicy mieszanka z asfaltem wysokomodyfikowanym cechuje się zdecydowanie mniejszym kątem nachylenia w stosunku do zestawianego oponenta o około 33%. Obserwacja sugeruje, iż zwiększenie modyfikacji matrycy asfaltowej polimerem pozwala skutecznie obniżyć prędkość przyrostu koleiny przy zmniejszaniu wskaźnika wypełnienia K . Warto nadmienić, iż krzywe modelowe są względem siebie rozsunięte i quasi-równoległe. Im mniejsza wartość wskaźnika K , tym dysproporcje pomiędzy mieszankami C i D są bardziej widoczne.



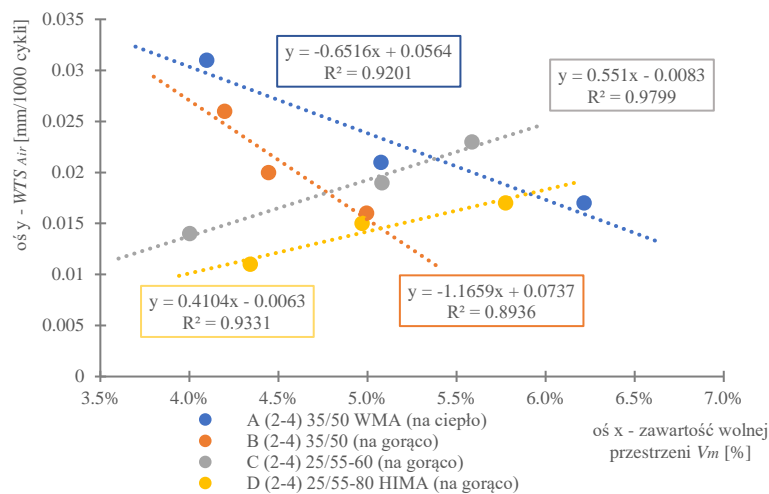
Rys. 54: Zmiana wskaźnika wypełnienia K względem proporcjonalnej głębokości koleiny analizowanych mieszanek A-D

Analizując mieszanki A-D dostrzega się bardzo dobrą korelację w zakresie zmian wskaźnika wypełnienia K , a proporcjonalną głębokością koleiny – współczynnik determinacji jest nie mniejszy niż 0.93. Zarówno MMA: A (na ciepło) i B (na gorąco) na bazie asfaltu zwykłego jak również C i D z użyciem asfaltu modyfikowanego i wysokomodyfikowanego (obydwe na gorąco) są zależne od zmiany zawartości lepiszcza (niemal idealne dopasowanie modelu liniowego). Ponadto w każdej z mieszanek widoczne różnice (kąty nachylenia modeli), wynikają jedynie z rodzaju zastosowanego asfaltu. Obserwacje są zbieżne z poprzednimi również dla tego parametru – PRD_{Air} .

Zestawiając mieszanki A i B można stwierdzić, iż rodzaj zastosowanej technologii nie wpływa na fluktuacje proporcjonalnej głębokości koleiny w takim stopniu jak zmiana wskaźnika wypełnienia K , chociaż obserwuje się w technologii na ciepło większy rozrzut wyników niż na gorąco - współczynnik R^2 : A – 0.9312 (niewiele mniejszy niż przy WTS_{Air}), B – 0.9809 (podobny). w obydwu przypadkach trend jest spadkowy – mniej asfaltu, mniejsza głębokość koleiny. Warto nadmienić, iż mieszanka A (na ciepło) wykazuje mniejszą wrażliwość na zmiany zawartości lepiszcza względem B (na gorąco) – kąt nachylenia modelu jest mniejszy o około 14% - zależność odmienna w stosunku do WTS_{Air} . Pomimo, iż wzajemne

kąty nachylenia krzywych modelowych A i B różnią się to jednak wraz ze spadkiem wskaźnika wypełnienia K , nie ma możliwości odnalezienia wzajemnego przecięcia się – analizy ekonomiczne. Jednak możliwym jest zauważenie rozbieżności pomiędzy materiałami w zakresie zmian PRD_{Air} , które stają się tym wyraźniejsze im niższe jest K . Względem zestawianych technologii (A i B) technologia na gorąco wypada zdecydowanie lepiej osiągając niższe % wartości PRD_{Air} na każdym poziomie zawartości lepiszcza (mieszanka mniej się koleinuje).

Interpretując wyniki mieszanek C i D dostrzega się, że wraz ze spadkiem wskaźnika wypełnienia K krzywe modelowe wykazują trend wzrostowy. Obydwa modele tych mieszanek są bardzo dobrze dopasowane jednak większą fluktuację wyników wykazuje materiał D (HIMA) - współczynnik R^2 : C – 0.9903, D – 0.934. Pomimo tej różnicy mieszanka z asfaltem wysokomodyfikowanym (odmiennie w stosunku do poprzednich obserwacji dla WTS_{Air}) cechuje się większym kątem nachylenia w stosunku do zestawianego oponenta aż o ~ 79%! Obserwacja sugeruje, iż zwiększenie modyfikacji matrycy asfaltowej polimerem pozwala skutecznie obniżyć głębokość powstającej koleiny jednak przy zmniejszaniu wskaźnika wypełnienia K (dalszej optymalizacji) istnieje ryzyko wzajemnego przecięcia się krzywych modelowych – poniżej pewnego poziomu K mieszanka D będzie się bardziej deformować niż C - im mniejsza zawartość lepiszcza, a większa polimerów w matrycy, tym prędkość przyrostu głębokości koleiny jest większa. Podobnie jak poprzednio (WTS_{Air}) informację można wykorzystać do analizy kosztów produkcji i wbudowania MMA (np. C vs D) ze względu na tę cechę (proporcjonalna głębokość koleiny).



Rys. 55: Zmiana zawartości wolnej przestrzeni w MMA (A-D) względem nachylenia wykresu koleinowania

Rozważając wzajemne korelacje wskaźnika wypełnienia K od zawartości wolnych przestrzeni mieszanek A - D (Rys. 40 podrozdział 5.2.1) ustalono, iż badane materiały są liniowo zależne od zmian zawartości asfaltu. Zastosowany model bardzo dobrze opisywał współzależności cechując się bardzo wysokim współczynnikiem determinacji R^2 w kolejności: B – 0.94, A – 0.95, D – 0.96, C – 0.97. Pomimo, iż rodzaj i zawartość asfaltu jest głównym czynnikiem powiązaniem z odpornością na deformacje trwałe (wykazane wcześniej), postanowiono niezależnie przeanalizować wzajemne korelacje WTS_{Air} i wolnej przestrzeni jako cechy jakościowej charakteryzującej strukturę / „skład” materiału – część szkieletu MMA (co może wnieść dodatkową informację np. o zachowaniu się mieszanki). Ponadto wolna przestrzeń jest pośrednio powiązana ze wskaźnikiem $ITSR$ – mieszankę należy rozpatrywać

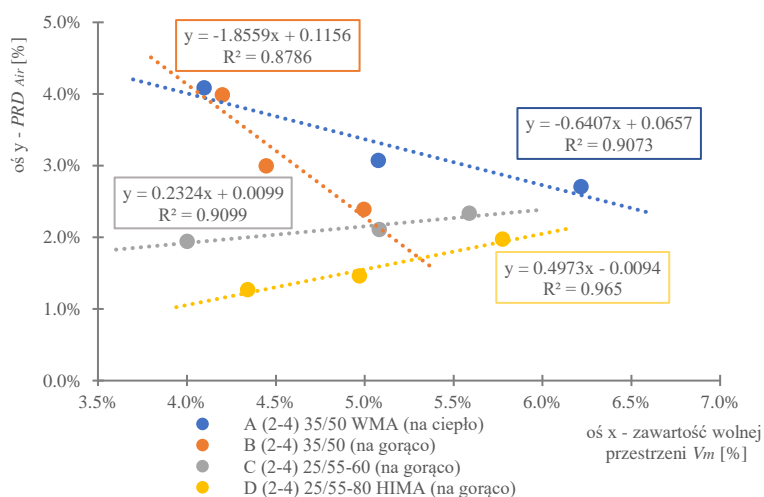
globalnie (ze względu na wszystkie wymagane cechy jakościowe, które należy spełnić by materiał mógł być zastosowany).

Z obserwacji Rys. 55 również dostrzega się dobre dopasowanie modelu liniowego zmian wolnej przestrzeni od nachylenia wykresu koleinowania mieszanki B (0.8936) oraz bardzo dobre A (0.9201), D (0.9331) i C (0.9799). Warto nadmienić, iż w tym przypadku kolejność dopasowania MMA (z uwagi na współczynnik R^2) jest analogiczna w stosunku do wcześniej przytaczanej korelacji z podrozdziału 5.2.1. Spostrzeżenie sugeruje, iż nachylenie wykresu koleinowania zależne jest tylko i wyłącznie od K – co może być prawdą w przypadku liniowej zależności zmian K od V_m (w analizowanych MMA taka korelacja występuje).

Z oględzin samego wykresu (Rys. 55) materiał B wyróżniający się najmniejszą wrażliwością przyrostu wolnych przestrzeni i ich zawartością przy zmianie K (najlepiej zagęszczający się) wykazuje największą prędkość zmian przyrostu koleiny opisaną kątem nachylenia wykresu koleinowania – bezwzględny (pominięcie kierunku nachylenia) procentowy stosunek kątów wykazuje, iż trend B jest większy o 78% od A, 211% większy od C i 284% większy od D. Na podstawie tej obserwacji można stwierdzić, iż im lepiej układająca się mieszanka, tym dynamika zmian przy optymalizacji zawartości asfaltu w mieszance jest większa. Należy ponownie podkreślić, iż w tym wypadku jest to zależne od rodzaju zastosowanego asfaltu i technologii wytworzenia.

Mieszanki A i B wykazują podobnie jak poprzednio trend spadkowy – zwiększająca się wolna przestrzeń w MMA pozytywnie wpływa na zmniejszenie prędkości przyrostu koleiny (kąt WTS_{Air}). Tego rodzaju efekt dostrzega się jedynie w przypadku asfaltów zwykłych A (na ciepło) i B (na gorąco). Odmienny trend (wzrostowy) wykazują lepiszcza z modyfikowaną matrycą polimerem SBS. Mieszanka D wyróżnia się o 26% mniejszą wartością kąta nachylenia niż C co oznacza, iż im większa jest modyfikacja matrycy (zawartość polimeru) tym prędkość przyrostu WTS_{Air} w stosunku do zmian wolnej przestrzeni jest mniejsza.

Zestawiając technologie – na ciepło (A) i na gorąco (B) zdecydowanie odporniejszą jest na gorąco – niższe wartości WTS_{Air} , większa prędkość spadkowa przy optymalizacji, mniejsze skoki przyrostu wolnej przestrzeni.



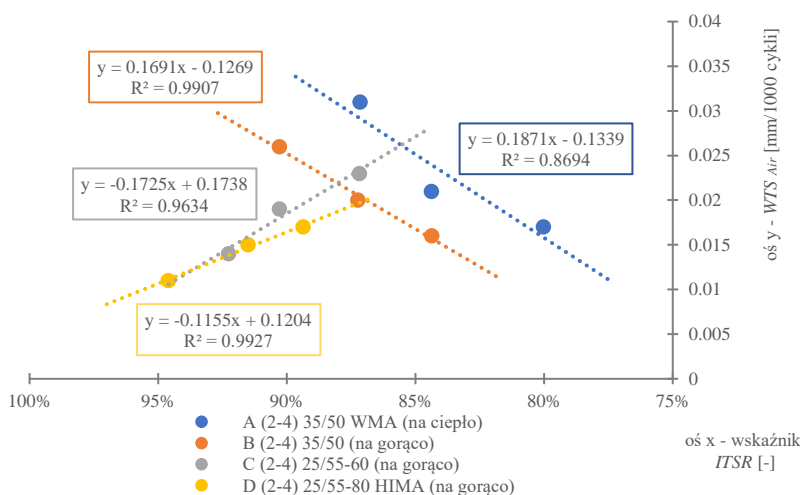
Rys. 56: Zmiany proporcjonalnej głębokości koleiny od wolnej przestrzeni w mieszankach A-D

Wszystkie liniowe modele (z regresji) pomiędzy proporcjonalną głębokością koleiny PRD_{Air} , a zawartością wolnej przestrzeni V_m mieszanek A-D cechują się wysokim współczynnikiem determinacji R^2 – powyżej 0.87. Informacja ta ponownie potwierdza, iż

w tym wypadku głównym czynnikiem wpływającym na pozyskiwane wyniki dla badanych MMA jest rodzaj zastosowanego asfaltu i jego ilość opisana poprzez wskaźnik wypełnienia K .

Podobnie jak w przypadku analiz nachylenia wykresu koleinowania, mieszanka B wykazuje duży kąt nachylenia prostej w stosunku do pozostałych. Na podstawie tej obserwacji, można stwierdzić, iż im badane MMA jest mniej podatne na przyrost wolnej przestrzeni (przy zachowaniu niskich wartości) tym prędkość zmian PRD_{Air} zwiększa się. Materiały A i B wykazują trend spadkowy – proporcjonalna głębokość koleiny zmniejsza się wraz przyrostem wolnej przestrzeni w mieszanki, natomiast materiały C i D wzrostowy. Ponadto obserwując wzajemne ułożenie krzywych modelu C i D można wyraźnie stwierdzić, iż im większa modyfikacja matrycy asfaltowej polimerem SBS, tym proporcjonalna głębokość koleiny jest niższa, lecz kąt nachylenia obrazujący jej przyrost przy wzrastającej wolnej przestrzeni jest większy – potwierdza się zasadność spostrzeżenia nr 2 zamieszczonego pod Tab. 28. Kąt mieszanki C jest mniejszy od D o ok. 64%.

W przypadku zestawiania technologii na ciepło (A) i na gorąco (B) proporcjonalna głębokość koleiny jest tym niższa, im mieszanka jest bardziej szczelna – materiał B porównując kąt nachylenia zależności PRD_{Air} i V_m jest lepszy o 289% niż A ze względu na zdolności zagęszczania się.



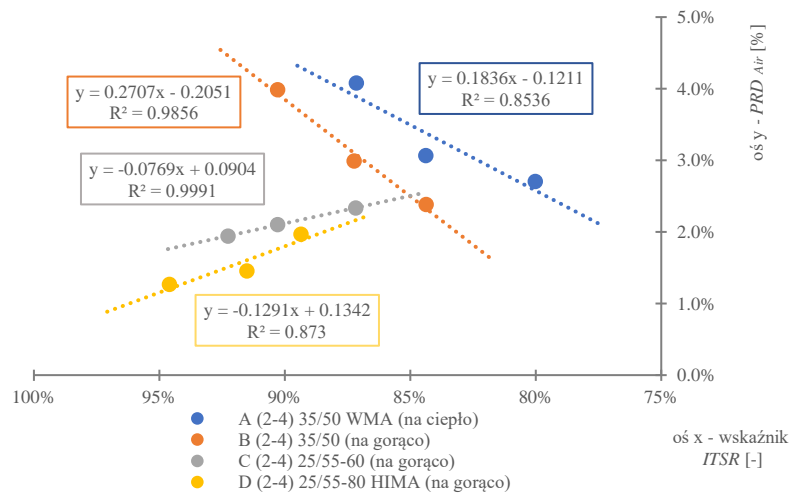
Rys. 57: Zmiany wskaźnika ITSR względem nachylenia wykresu koleinowania (mieszanki A-D)

Na Rys. 57 przedstawiono wykres zmian wskaźnika $ITSR$ od WTS_{Air} mieszanek A-D. Dla każdej z MMA zaaplikowano liniowy model regresji. Najmniejszy współczynnik determinacji R^2 wynosił 0.86 (dobre dopasowanie) dla mieszanki A na ciepło, która charakteryzowała się największymi fluktuacjami zmian wolnej przestrzeni przy zmniejszaniu się wartości wskaźnika wypełnienia K . Pozostałe mieszanki cechują się dopasowaniem bliskim jedności – bardzo dobre, wręcz „idealne”. Oznacza, to iż nachylenie wykresu koleinowania, jak również poziom odporności na wodę i mróz wyrażone wskaźnikami są zależne od rodzaju asfaltu oraz jego zawartości. Ponadto analizując kąty nachylenia pozyskanych linii trendu dla mieszanek A i B są one praktycznie jednakowe, a linie pozostają rozsunięte pomiędzy sobą – rodzaj asfaltu ma największe znaczenie. Warto nadmienić, iż w obydwu przypadkach dostrzega się trend spadkowy – zmniejszanie się K skutkuje spadkiem odporności na wodę i mróz oraz WTS_{Air} (mniej = lepiej). Mieszanki C i D wypadają „podobnie” z tą różnicą, iż występuje trend wzrostowy – zmniejszanie się K skutkuje spadkiem odporności na wodę i mróz oraz wzrostem WTS_{Air} (więcej = gorzej). Mieszanka D wykazuje korzystniejszą relację zestawianych zmiennych niż C o około 33% (stosunek kątów nachylenia modelu liniowego),

co oznacza, iż stosowanie asfaltów wysokomodyfikowanych umożliwia stworzenie bardzo odpornej MMA.

Porównując technologię na ciepło i na gorąco w stosunku do zmian prędkości koleinowania wyrażonej przez WTS_{Air} , a $ITSR$ zdecydowanie odporniejszą jest mieszanka B (na gorąco) – o około 10% (stosunek kątów nachylenia modelu liniowego). Ponadto umożliwia ona większą swobodę operacji doboru zawartości lepiszcza ze względu na spełnienie wymogów jakościowych.

Analizując globalnie mieszanki A-D na zmiany $ITSR$ i WTS_{Air} od optymalizowanej zawartości asfaltu najlepiej wypada: D, natomiast później w kolejności: C – B – A.



Rys. 58: Zmiany wskaźnika odporności na wodę i mróz względem proporcjonalnej głębokości koleiny (mieszanki A-D)

Rys. 58 przedstawia wykres zmian wskaźnika $ITSR$ od PRD_{Air} mieszanek A-D. Podobnie jak poprzednio zaaplikowano liniowy model regresji, który okazał się wystarczający. Najmniejszy współczynnik determinacji R^2 wynosił 0.8536 (dobre dopasowanie) dla mieszanki A na ciepło oraz D (0.873) z asfaltem 25/55-80 HIMA (na gorąco). Pozostałe mieszanki (C i B) cechują się dopasowaniem bliskim jedności – bardzo dobre. Obserwacja wskazuje, iż proporcjonalna głębokość koleiny, jak również poziom odporności na wodę i mróz wyrażone wskaźnikami są zależne od rodzaju asfaltu oraz jego zawartości (co znajduje potwierdzenie również w tym przypadku).

Analizując kąty nachylenia pozyskanych linii trendu mieszanek A i B nie są one do siebie zbliżone. Mieszanka B wyróżnia się znacznie większą jego wartością względem A o około 47%. Prawdopodobnie obserwacje są pośrednio związane z zawartością wolnych przestrzeni patrz zmiany $ITSR$ od V_m - Rys. 46. Im lepiej zagęszczająca się mieszanka (bardziej szczelna i mniej wrażliwa na zmiany zawartości lepiszcza – ze względu na rodzaj asfaltu) tym większy kąt nachylenia zmian PRD_{Air} i $ITSR$. Im jest on większy tym MMA bardziej odporne). Ponadto obydwie MMA wykazują trend spadkowy – optymalizacja zawartości lepiszcza (zmiana K) skutkuje obniżeniem się odporności na wodę i mróz (mniej = gorzej) oraz proporcjonalnej głębokości koleiny (mniej = lepiej). Spośród dwóch zestawianych mieszanek A i B ze względu na technologię wykonania (ciepło vs na gorąco), po raz kolejny technologia na gorąco wypada lepiej – o około 32 % (stosunek kątów nachylenia linii trendu).

Mieszanki C i D wypadają „podobnie” z tą różnicą, iż występuje trend wzrostowy – zmniejszanie się K skutkuje spadkiem odporności na wodę i mróz oraz wzrostem PRD_{Air} (więcej = gorzej). Mieszanka C wykazuje korzystniejszą relację zestawianych zmiennych niż D o około 40.5% (stosunek kątów nachylenia modelu liniowego - mniejszy = lepszy). Pomimo

tej obserwacji, materiał D cechuje się niższymi wartościami proporcjonalnej głębokości koleiny i większym wskaźnikiem *ITSR* (z poziomu na poziom) - co oznacza, iż stosowanie asfaltów wysokomodyfikowanych umożliwi stworzenie bardziej odpornej MMA ze względu na kilka rozpatrywanych cech jakościowych.

Analizując globalnie mieszanki A-D na zmiany *ITSR* i *PRD_{Air}* od optymalizowanej zawartości asfaltu najlepiej wypada: D, natomiast później w kolejności: C – B – A.

5.2.4. Podsumowanie badań bloku podstawowego

Na podstawie obserwacji i wykonanych analiz, zmiany: zawartości lepiszcza *K* od zawartości wolnej przestrzeni, odporności na wodę i mróz lub deformacje trwałe mieszanek A – D można z powodzeniem opisać modelem regresji liniowej. Modele charakteryzują się bardzo dobrym dopasowaniem – współczynnik determinacji R^2 jest bliski jedności. Regresja liniowa okazała się również skuteczna w zakresie ustalenia korelacji pośrednich – np. zawartość wolnych przestrzeni i *ITSR* umożliwiających zrozumienie innych zachowań materiału – np. dynamiki zmian zależnej od zagęszczania się MMA (wpływ szczelności mieszanki i jej wrażliwości związanej ze zmianami zawartości lepiszcza na cechę - wyrażone przez fluktuacje V_m). Pozyskanie wzajemnych relacji tego rodzaju dla każdej z mieszanek było możliwe m.in. dzięki zastosowaniu: tej samej MM (krzywa uziarnienia), zawartości lepiszcza oraz wdrożeniu innych założeń, czynności technologicznych oraz zastosowanej aparatury opisanych w tym rozdziale rozprawy (badania bloku podstawowego). Ponadto liniowość relacji pomiędzy wskaźnikiem wypełnienia *K*, a zawartością wolnych przestrzeni lub innymi parametrami wykazały, iż dysproporcje jakościowe w badanych materiałach A-D wynikają tylko i wyłącznie z rodzaju zastosowanego lepiszcza i jego ilości. w ten sposób skutecznie zestawiono i porównano między sobą 4 mieszanki różniące się lepiszczem, technologią (gorąco, ciepło) i modyfikacją matrycy polimerem osiągając jeden z celów rozprawy.

Zwracając uwagę na cechy jakościowe zbadanych mieszanek (wolna przestrzeń, *ITSR*, odporność na deformacje trwałe) porównując wszystkie 4 - MMA na bazie asfaltu wysokomodyfikowanego HiMA (D) osiąga najkorzystniejsze rezultaty (jakość) praktycznie na każdym poziomie optymalizacji odstając znacząco od reszty. Modyfikacja matrycy asfaltowej umożliwia zapewnienie dużego zapasu odporności np. na działanie wody i mrozu, koleinowania lub zawartości wolnej przestrzeni (wynik badań) w stosunku do wymogów dokumentu odniesienia umożliwiając tym samym wdrożenie dalszej optymalizacji zawartości lepiszcza. Następna w kolejności jest mieszanka C z asfaltem modyfikowanym (mniejsza zawartość polimeru SBS), która dorównuje/ zbliżona jest jakościowo do mieszanki D. z obserwacji prowadzonych podczas badań dostrzega się, iż mieszanki z asfaltami modyfikowanymi są zdecydowanie mniej podatne na czynniki mechaniczne i środowiskowe w stosunku do MMA na bazie asfaltów zwykłych. Jedynym problemem w stosowalności asfaltów modyfikowanych jest wysoka temperatura produkcji i zagęszczenia.

Kolejno, w klasyfikacji wyróżnia się mieszankę referencyjną B na asfalcie zwykłym w technologii na gorąco, która to została wykonana w niższej temperaturze (zaleta tego asfaltu w stosunku do modyfikowanych). Wyróżniała się ona średnią odpornością na wodę i mróz oraz deformacje trwałe. Mimo wszystko jako jedyna wyróżniała się najmniejszym przyrostem zawartości wolnych przestrzeni z poziomu na poziom wskaźnika wypełnienia *K* - dobrze się układała i zagęszczała. Ostatnią w kolejności jest mieszanka A na asfalcie 35/50 w technologii na ciepło. Zdecydowaną zaletą tej mieszanki okazała się temperatura produkcji i zagęszczenia – znacznie niższa niż mieszanki B, C, D. Materiał A wykazał duży przyrost zawartości wolnych przestrzeni przy optymalizacji zawartości lepiszcza. Ponadto mieszanka wypadała jakościowo najgorzej w każdej przeprowadzonym badaniu – w szczególności *ITSR*. z uwagi na specyfikę

tego asfaltu poza zbadanymi poziomami K , nie ma możliwości dalszej optymalizacji tej mieszanki (zmniejszanie zawartości lepiszcza). Wymagania jakościowe nie zostaną spełnione dla niższych zawartości lepiszcza w stosunku do dokumentu odniesienia. Obserwacje potwierdzono modelem regresji, który charakteryzował się bardzo dobrym dopasowaniem.

Stwierdzono, iż mieszanki na bazie asfaltów zwykłych – A (35/50 WMA) oraz B (35/50) stanowią ekonomiczną alternatywę dla jakościowo lepszych – C (25/55-60) i D (25/55-80 HiMA). Wszystkie MMA spełniły wymogi WT-2, jednak A i B charakteryzują się niższą odpornością na czynniki zewnętrzne (woda i mróz) oraz wysokie temperatury (deformacje trwałe). Rozbieżności są tym większe im wyższa zawartość asfaltu w MMA. Na podstawie przeprowadzonych analiz zaleca się stosowanie mieszanek A i B do dróg niższych klas, o mniejszym obciążeniu ruchowym. Do dróg wyższych klas zaleca się stosowanie asfaltów modyfikowanych i wysokomodyfikowanych. Mieszanki wykazały wysoką odporność na czynniki środowiskowe i temperaturę ponadto rezultaty wykazały, iż mieszanki mogą być z powodzeniem dalej optymalizowane ze względu na zawartość lepiszcza (K poniżej 2.65).

W przypadku zestawiania mieszanek wykonanych w odmiennych technologiach produkcji (A vs B) materiały „na ciepło (WMA)” wypadły jakościowo słabiej względem tych „na gorąco (HMA)”. Mieszanki WMA wykazały zdecydowanie niższą odporność na wodę i mróz oraz deformacje trwałe względem referencyjnej. Ponadto udowodniono, iż optymalizacja zawartości lepiszcza skutkuje większymi przyrostami zawartości wolnej przestrzeni z poziomu na poziom K w stosunku do MMA na gorąco (B) (im mniejsze K tym dysproporcje pomiędzy MMA większe). w przypadku prób dalszej (poniżej $K=2.65$) optymalizacji dla materiału B istnieje jakościowy zapas umożliwiający optymalizację składu co nie występuje w mieszance A – wartości na granicy np. przy odporności na wodę i mróz lub zawartości wolnej przestrzeni. Podczas produkcji próbek dostrzeżono również, iż MMA w technologii WMA znacznie gorzej układały się i zagęszczały pomimo zapewnienia odpowiednich warunków w stosunku do technologii HMA. Obserwacje te odnotowano w analizach wykresu zmian wolnej przestrzeni V_m od zawartości lepiszcza wyrażonym przez K . Stwierdzono, iż jakościowe dysproporcje MMA w technologii WMA są znaczące od HMA. Zaleca się stosowanie mieszanek na ciepło do dróg o małym obciążeniu ruchowym. z rezultatów badań wynika, iż zachodzi duże prawdopodobieństwo wystąpienia przedwczesnych uszkodzeń i potrzeb napraw konstrukcji spowodowanych różnymi czynnikami degradującymi mieszankę WMA szybciej niż HMA.

Zestawiając mieszanki wykonane w technologii na gorąco B - referencyjna (35/50 asfalt zwykły bez modyfikacji) oraz C (modyfikowany 25/55-60) i D (25/55-80 HiMA), dostrzeżono istotne rozbieżności jakościowe. MMA na bazie polimero-asfaltów (C i D) wykazały zdecydowanie wyższą odporność na wodę i mróz oraz deformacje trwałe niż referencyjna (B) – wg kolejności: D – C - B. Zaobserwowano, iż im większa modyfikacja matrycy polimerem SBS tym wyższa odporność MMA na: wodę i mróz, deformacje trwałe. Dostrzeżono również, iż zwiększanie zawartości polimeru polepsza niektóre cechy mieszanki tylko do pewnego poziomu. w przypadku niskich zawartości lepiszcza w MMA oraz stosowania asfaltów o wyższej modyfikacji mieszanka może bardziej się koleinować niż ta o mniejszej zawartości polimeru. Stwierdza się, iż MMA na bazie polimero-asfaltów mogą być z powodzeniem dalej optymalizowane ze względu na zawartość lepiszcza w stosunku do tych na bazie asfaltu zwykłego.

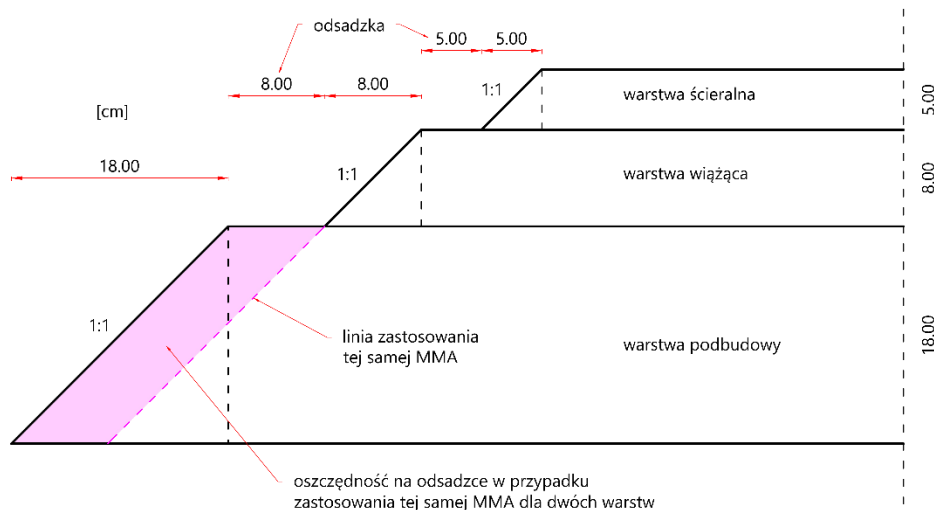
Przeprowadzone badania i analizy mieszanek A - D wykazały, iż wymogi jakościowe MMA dokumentu odniesienia WT-2 [83] zostały spełnione zarówno dla betonu asfaltowego przeznaczonego na warstwę podbudowy (AC 22 P; KR 5-7 – domyślnie wybrana mieszanka) jak i warstwy wiążącej (AC 22 W; KR 5-7) na każdym poziomie optymalizacji zawartości lepiszcza wyrażonego przez wskaźnik wypełnienia K (2.95, 2.80, 2.65). Pomimo, iż poziom $K = 2.65$ nie spełniał wymogu B_{min} mieszanki AC 22 W; KR 5-7 (wymagane przy

zaprojektowanej MM $B_{min} = 3.95\%$, a wynosił $B = 3.82\%$), to jednak jakościowo każda mieszanka wykazała wymagany poziom odporności na analizowane cechy MMA. Mieszanka A (35/50 WMA) wypadła w ogólnej klasyfikacji najgorzej, wykazując np. odporność na wodę i mróz (*ITSR*) na granicy (80% - warstwa wiążąca). Pozostałe (B – C – D) wykazały zapas w stosunku do progów minimalnych, umożliwiającą dalszą optymalizację zawartości lepiszcza. Podobnie wyciągnięto dla pozostałych analizowanych cech: wolna przestrzeń, odporność na deformacje trwałe.

Zasugerowano, iż obecne wymogi dla MMA (WT-2) należałoby dostosować do nowych receptur produkowanych asfaltów i technologii produkcji (niezależnie), które pozwalają na dalszą optymalizację składu (asfalty modyfikowane / wysokomodyfikowane). Innym sugerowanym rozwiązaniem jest stworzenie ogólniejszych wymogów MMA, które byłyby na tyle elastyczne by ocenić i zatwierdzić w sposób indywidualny rozpatrywaną mieszankę po wykonaniu określonych badań jakościowych.

Mieszanki A – D przeanalizowano również pod kątem zastosowania do dwóch warstw konstrukcji jednocześnie – np. warstwa podbudowy i wiążącej. Wykonane badania wykazały, iż wszystkie zaprojektowane MMA na każdym poziomie K mogą być z powodzeniem zastosowane do dwóch warstw. Zastosowanie takiego podejścia projektowego mieszanek według autora rozprawy jest korzystniejsze, ponieważ:

1. można wprowadzić oszczędność czasu – na placu budowy warstwy mogą być wykonywane jedna po drugiej w sposób ciągły,
2. można zaoszczędzić materiał (ekonomia) – eliminacja odsadzek technologicznych pomiędzy warstwami co zostało schematycznie przedstawione na Rys. 59,
3. większe możliwości produkcyjne dla otaczarni - brak przestojów potrzebnych na przeprogramowanie układu do nowej recepty,
4. brak potrzeby projektowania i walidacji kolejnej recepty na kolejną warstwę – oszczędność czasu i środków,
5. wykonana konstrukcja jest bardziej jednorodna – lepsza praca materiału, brak potrzeby uwzględniania dodatkowej współpracy międzywarstwowej (pomiędzy w. wiążącą a podbudowy) przy modelowaniu,
6. mniejsze ryzyko wystąpienia uszkodzeń np. spękań zmęczeniowych lub odbitych.
7. mniejsze ryzyko wystąpienia imperfekcji materiałowych przy wykonaniu na placu budowy – praca z jedną konfiguracją.



Rys. 59: Schemat redukcji przykładowej odsadzki poprzez zastosowanie jednolitej warstwy

Aby ocenić, czy proponowane rozwiązanie – „stosowanie mieszanki z podbudowy również do warstwy wiążącej w konstrukcji” jest bezpieczne (zapewnia odpowiednią trwałość konstrukcji) należy wykonać dodatkowe analizy. Autor rozprawy w rozdziale 6.1 przeanalizował to zagadnienie na przykładzie wybranej konstrukcji podatnej wykorzystując kryterium zmęczeniowe i modelowanie wykorzystujące metodę elementów skończonych.

5.3. Badania bloku zaawansowanego

Zgodnie z przedstawionym na str. 67 zakresem badawczym, w niniejszym rozdziale zaprezentowano wyniki analiz czterech MMA (AC 22 P; KR 5-7) na bazie różnych asfaltów – A (35/50 WMA), B (35/50), C (25/55-60) i D (25/55-80 HiMA) związane z:

1. wartością modułu sztywności – parametr materiałowy charakteryzujący wytrzymałość mechaniczną mieszanki w zadanej temperaturze,
2. trwałością zmęczeniową w zadanej temperaturze,
3. regeneracją (*healing-iem*) - jej wpływem na zmiany wartości modułu sztywności i trwałość zmęczeniową w zadanej temperaturze.

W ramach testów laboratoryjnych i potrzeb ustalenia założeń związanych z regeneracją w badaniach bloku zaawansowanego przeprowadzono eksperymentalny pomiar temperatury, pozwalający ustalić warunki wdrożenia healingu. Badania nad wartością modułu sztywności, trwałością zmęczeniową i regeneracją poszerzono o dodatkowe analizy związane z czynnikiem przyczyniającym się do degradacji materiału podczas sezonu zimowego - wpływem oddziaływania wody i mrozu oraz niezależnie soli drogowej. Dodatkowo przeprowadzono analizę makroskopową mieszanek wykorzystując wykres zmian modułu sztywności od liczby cykli w badaniu zmęczeniowym. Pozyskane rezultaty wykorzystano do uwzględnienia regeneracji i innych oddziaływań w trwałości zmęczeniowej MMA. Dokładna metodyka badawcza i wprowadzone założenia zostały szczegółowo opisane w dalszych podrozdziałach.

Mieszanki wykorzystane do testów bloku zaawansowanego były analogiczne (ze względu na skład, założenia technologiczne, itd.) jak dla badań bloku podstawowego, włączając poziomy ich optymalizacji wyrażone za pomocą wskaźnika wypełnienia K (2.95, 2.80, 2.65). Nazewnictwo analizowanych materiałów pozostaje bez zmian – według ustalonego wcześniej porządku:

W odniesieniu do mieszanki i recepty:

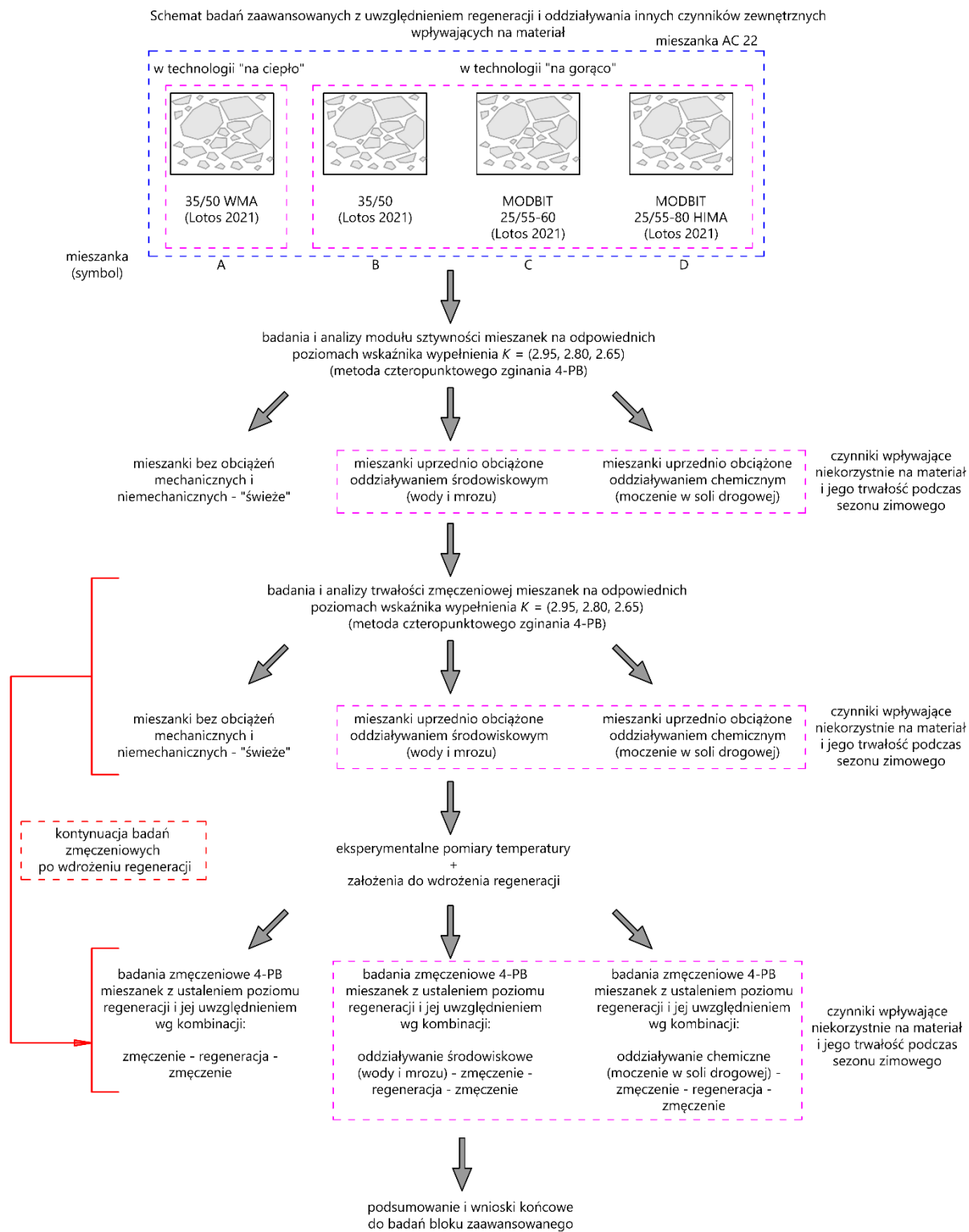
1. A i – zarób zawierający asfalt 35/50 WMA (na ciepło), i - ta recepta,
2. B i – zarób zawierający asfalt 35/50 (na gorąco), i - ta recepta,
3. C i – zarób zawierający asfalt 25/55-60 (na gorąco), i - ta recepta,
4. D i – zarób zawierający asfalt 25/55-80 HIMA (na gorąco), i - ta recepta.

W odniesieniu do recept i poziomów optymalizacji:

1. mieszanki A-D, recepta 2 – $K = 2.95$ [-] - recepta podstawowa/wejściowa,
2. mieszanki A-D, recepta 3 – $K = 2.80$ [-] – pierwszy poziom optymalizacji,
3. mieszanki A-D, recepta 4 – $K = 2.60$ [-] – drugi poziom optymalizacji.

Na podstawie wcześniejszych badań podkreśla się, iż mieszanki A - D (AC 22 P; KR 5-7), spełniają wymogi jakościowe MMA [83] również dla warstwy wiążącej na każdym poziomie zawartości lepiszcza wyrażonego przez wskaźnik wypełnienia K – przeprowadzone w tej części badania uwzględniają analizy zmęczeniowe mieszanek stosowanych do dwóch warstw jednocześnie (wiązącej i podbudowy).

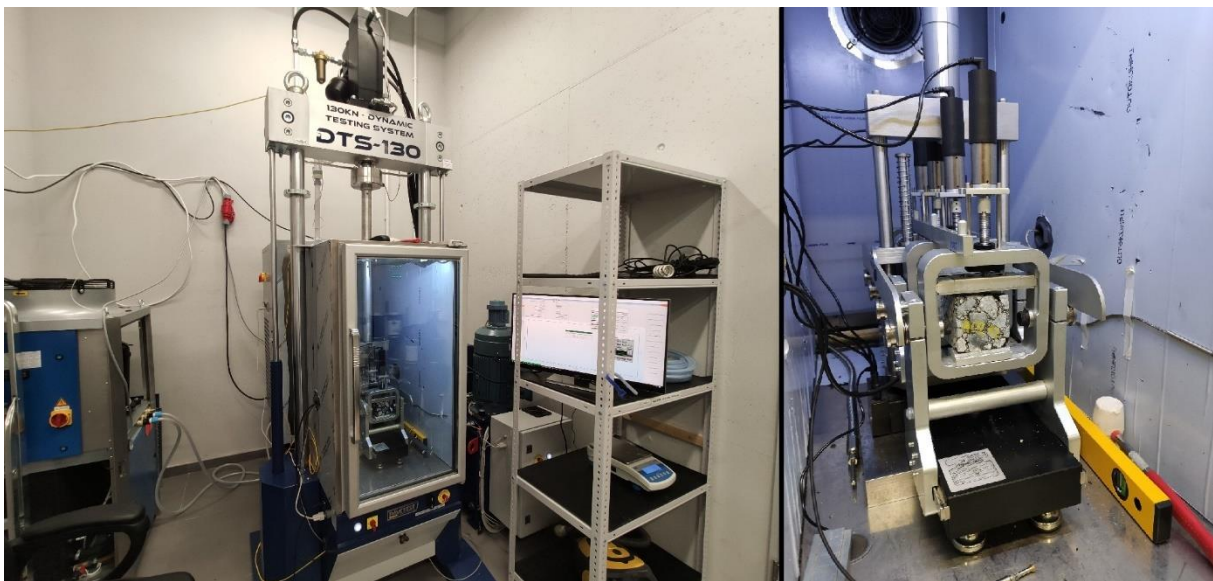
Schemat badań bloku zaawansowanego przedstawiono na Rys. 60.



Rys. 60: Schemat kompleksowych badań bloku zaawansowanego.

5.3.1. Aparatura badawcza

Kompleksowe badania mieszanek A - D związane z modułem sztywności i trwałością zmęczeniową wykonano z użyciem skomplikowanej aparatury pomiarowej umożliwiającej zapewnienie: odpowiednich warunków obciążenia i temperatury oraz bezpośredniej akwizycji, monitorowania i rekonstrukcji danych stosując metodę czteropunktowego zginania (4-PB). Testy przeprowadzono wykorzystując nowoczesną, uniwersalną serwohydrauliczną prasę wytrzymałościową dedykowaną do badań MMA o nazwie handlowej: „*Dynamic Testing System 130 kN (DTS 130 kN)*” firmy Pavetest pozwalającą zadać obciążenie w trybie statycznym do 130 kN (13.0 ton) oraz dynamicznym do 100 kN (10.0 t). Urządzenie w pełnym osprzęcie znajduje się na wyposażeniu pracowni drogowej Katedry Dróg Mostów Kolei i Lotnisk (K77) Wydziału Budownictwa (W2) Politechniki Wrocławskiej w nowym kompleksie badawczym pod nazwą Geo-3EM. Zdjęcie stanowiska pomiarowego oraz zamocowaną próbkę zaprezentowano na Rys. 61.



Rys. 61: Prasa wytrzymałościowa DTS 130 kN na stanowisku badawczym

Omawiana aparatura pomiarowa składa się z dziewięciu kluczowych elementów.

1. Rama mocująca – z zainstalowanymi czujnikami przemieszczenia i siły prasy.
2. Moduł pompy hydraulicznej ze zbiornikiem oleju (obieg zamknięty) umożliwiający wywieranie określonego nacisku przez trzpień prasy za pomocą ciśnienia regulowanego przez sterownik „PID”.
3. Komora termiczna pozwalająca na przeprowadzenie badań w zakresie temperaturowym $T \in (-) 40.0 \div + 80.0 \text{ } ^\circ\text{C}$ z zastosowaniem rampy lub bez.
4. Moduł chłodzący z medium (woda) pracujący w obiegu zamkniętym – obniżający temperaturę rozgrzewającego się oleju wewnątrz wężów prasy przez płytowy wymiennik ciepła.
5. Trójparametrowy sterownik cyfrowy PID umożliwiający zainstalowanie nawet do 20 niezależnych czujników.
6. Czujniki i wyłączniki bezpieczeństwa ochraniające prasę i jej elementy przed zniszczeniem np. w wyniku przegrzania układu.

7. Komputer z możliwością podłączenia prasy poprzez USB lub ethernet pozwalający na bezpośrednie sterowanie urządzeniem pomiarowym i komorą termiczną.
8. Oprogramowanie sterujące (komputer). Domyślnie do obsługi prasy wykorzystuje się program o nazwie Testlab” umożliwiający zaprojektowanie własnego testu i jego personalizacji – np. wdrożenia sekwencji obciążania, kształtu fali wymuszanego impulsu, zadania odpowiednich zmiennych i utworzenia formuł, które będą w czasie rzeczywistym obliczane. Po badaniu wszelkie wyniki są eksportowane do wskazanego pliku np. excel jako „post processing data”. Możliwości programu są praktycznie nieograniczone.
9. Wyposażenie zewnętrzne - czujniki, moduły (np. belki czteropunktowo zginanej 4-PB), uchwyty, poziomice, podkładki, komory próżniowe itp. pozwalające przeprowadzić badania różnego typu i przeznaczenia.

Warto dodać, iż fabryczne czujniki stosowane do niniejszej prasy charakteryzują się bardzo wysoką dokładnością pomiarową umożliwiającą na pozyskanie wyników aż do ósmego miejsca po przecinku. Ponadto trójparametrowy sterownik PID, umożliwia kalibrowanie całej maszyny w taki sposób, aby błąd zadanego impulsu obciążenia ograniczyć do dopuszczalnego minimum zarówno na początku badania jak również podczas całego jego trwania.

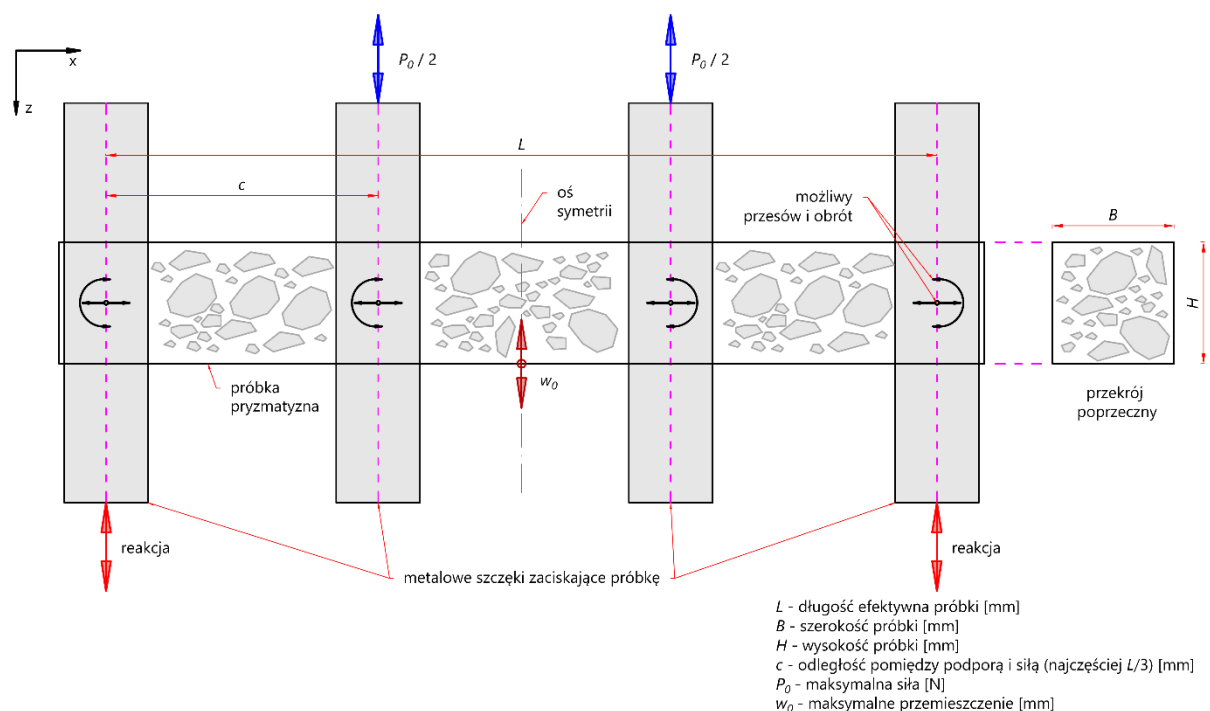
5.3.2. Założenia badawcze

Badania bloku zaawansowanego w zakresie ustalenia modułu sztywności oraz trwałości zmęczeniowej z uwzględnieniem regeneracji i innych czynników wpływających na materiał przeprowadzono aplikując metodę dynamicznego czteropunktowego zginania (4 - PB), która dobrze odwzorowuje warunki in-situ [163]. Metoda ta jest również aprobowana przez normy: PN-EN 13108-01:2016-07 [218] i PN-EN 13108-20:2016-07 [219] jako „zalecana” do testów mieszanek typu beton asfaltowy. Badanie modułu sztywności i trwałości zmęczeniowej jest do siebie bardzo podobne. w obydwu testach występuje ten sam schemat podparcia, warunki badania – np. kształt fali obciążenia, częstotliwość, temperatura badania, sposób wyznaczenia wartości modułu (wzory). Główne różnice, które kontrastują obydwa testy to:

1. badanie modułu sztywności wykonuje się jako pierwsze w kolejności, na próbce bez historii obciążenia, dopiero później realizuje się badanie zmęczeniowe – jest to spowodowane różnymi amplitudami obciążenia. w przypadku modułu sztywności jest ona bardzo mała, tak by badanie nie wpłynęło na materiał,
2. czas trwania – moduł sztywności określa się po 100 cyklach, natomiast badanie zmęczeniowe prowadzi się, aż do osiągnięcia warunku przyjętego kryterium zmęczeniowego,
3. monitorowane parametry – w przypadku badania modułu sztywności przeważnie ustala się tylko ten parametr, natomiast przy badaniu zmęczeniowym najczęściej śledzi się zmiany wartości modułu, kąta przesunięcia fazowego, liczby cykli i innych w zależności od możliwości używanej aparatury.

Z uwagi na podobieństwo mechanizmu badania modułu sztywności i trwałości zmęczeniowej belki czteropunktowo zginanej poniżej krótko scharakteryzowano ogólny jego przebieg. Szczegółowa procedura testów opisana jest w normie: PN-EN 12697-26:2018-08 (sztywność) [224] oraz PN-EN 12697-24:2018-08 (odporność na zmęczenie) [222]. Ponadto realizując badania tego bloku skorzystano również z „równoległych” standardów AASHTO TP 321 [13] i ASTM D7460-08 [51].

Każdostronnie oszlifowane belki MMA o ustalonych wymiarach i wadze mocuje się w specjalnym aparacie za pomocą czterech uchwytów, sterowanych niezależnie za pomocą sterownika umożliwiającego automatyczne zaciskanie i zwalnianie materiału. Całość znajduje się wewnątrz komory termicznej, która jest zintegrowana z prasą wytrzymałościową. Oznaczenie przeprowadza się stosując obciążenie dynamiczne (cykliczne) o sinusoidalnym kształcie fali aplikowanego impulsu wywołujące przypadek czteropunktowego zginania w warunkach swobodnego obrotu i przesuwu podłużnego (w stosunku do osi próbki). Trzpień prasy, który połączony jest z ramą 4-PB umożliwia bezpośrednią aplikację ustalonej wartości siły na próbkę przez parę uchwytów wewnętrznych. Dwie pozostałe szczęki stanowią podpory. Taka konfiguracja umożliwia wywołanie stałej wartości momentu zginającego pomiędzy punktami przyłożenia siły. To miejsce nazywa się powszechnie strefą środkową, w której mocowany jest czujnik przemieszczenia LVDT. Podczas oznaczenia sterownik prasy odbiera informacje od podłączonych kanałów (zainstalowane czujniki), rejestruje m.in. siłę obciążającą, przemieszczenie belki w strefie środkowej, kąt przesunięcia fazowego oraz temperaturę wysyłając dane do programu zainstalowanego na komputerze. Pozyskane informacje na podstawie znanych zależności pozwalają na wyznaczenie odpowiednich parametrów np. modułu sztywności. Schemat przedstawiający umocowanie próbki wewnątrz modułu 4-PB zamieszczono na Rys. 62. Podstawowe, uproszczone zależności umożliwiające wyznaczenie naprężeń, odkształceń omawianego przypadku zaprezentowano w formule (22) i (23).



Rys. 62: Schemat modułu czteropunktowego zginania

$$\sigma_i = \frac{3 \cdot P_0 \cdot c}{b \cdot h^2}, \quad (22)$$

gdzie:

σ_i – amplituda naprężenia w i-tym cyklu badania [MPa],

P_0 – maksymalna siła [N],

c – odległość między podporą i siłą [mm],

b – szerokość próbki [mm],

h – wysokość próbki [mm].

$$\varepsilon_i = \frac{12 \cdot w_0 \cdot h}{3 \cdot L^2 - 4 \cdot c^2}, \quad (23)$$

gdzie:

ε_i – amplituda odkształcenia w i-tym cyklu badania [-],

w_0 – maksymalne przemieszczenie [mm],

h – wysokość próbki [mm],

L – długość efektywna próbki [mm],

c – odległość między podporą i siłą [mm].

Na podstawie znanej amplitudy naprężenia i odkształcenia w rozpatrywanym cyklu oraz odczytów kąta przesunięcia fazowego pozyskanego przez algorytm prasy porównujący opóźnienie impulsu naprężenia względem odkształcenia można ustalić np. moduł sztywności, który zależy od warunków temperaturowych i częstotliwości badania - ogólny wzór przedstawiono we formule (24).

$$|E_i^*| (T, f) = \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}, \quad (24)$$

gdzie:

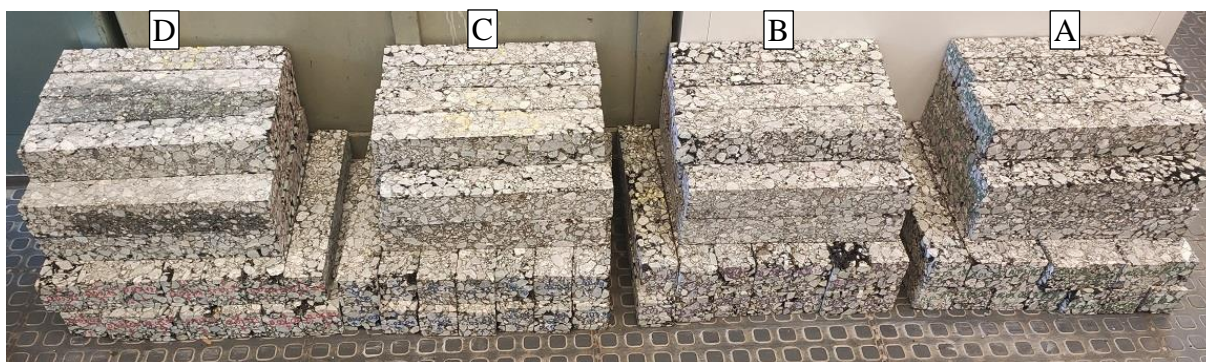
$|E_i^*| (T, f)$ – moduł sztywności ustalony w stałej temperaturze badania i częstotliwości obciążenia [MPa],

σ_i – amplituda naprężenia w i-tym cyklu badania [MPa],

ε_i – amplituda odkształcenia w i-tym cyklu badania [-].

5.3.2.1. Ogólne warunki badania modułu sztywności i trwałości zmęczeniowej

Do badań czteropunktowego zginania w zakresie modułu sztywności i trwałości zmęczeniowej według ogólnych warunków podanych powyżej przygotowano w sumie ok. 280 każdostronnie oszlifowanych belek pryzmatycznych. Wymiary wynosiły w przybliżeniu 65.0 mm x 65.0 mm x 385 mm. Próbki oczyszczono z osadu (proces cięcia) za pomocą wody i ściereczki z mikrofibry (chłonność), a następnie zaroby odpowiednio oznaczono i wysuszono do stałej masy. Kolejno belki wyselekcjonowano do odpowiednich frontów badawczych – „referencyjne”, z czynnikiem środowiskowym „woda i mróz” oraz chemicznym „badania solankowe”. Obraz ukazujący pierwszą partię przygotowanych próbek z podziałem na mieszanki przedstawiono na Rys. 63.



Rys. 63: Pierwszy zestaw próbek wykorzystany w badaniach bloku zaawansowanego

Celem przeprowadzenia pomiarów modułu sztywności i trwałości zmęczeniowej z uwzględnieniem regeneracji i oddziaływania innych czynników wpływających na materiał, wdrożono odpowiednie warunki badania zaprezentowane w Tab. 29.

Tab. 29: Ogólne założenia zaaplikowane w przeprowadzonych testach

Lp	Warunek badania	Właściwość	Odniesienie
1	schemat statyczny	4 – PB - PR	PN-EN 13108-1:2016-07 [218] PN-EN 13108-20:2016-07 [219] WT-2 (analogia do mieszanki AC WMS) [83] Mackiewicz [163]
2	schemat obciążenia	cyklicznie ustalony	
3	rodzaj cyklu obciążenia	cykl wahadłowy	
4	kształt zastosowanego impulsu obciążenia	sinusoidalny	
5	warunek obciążania	warunek kontrolowanego odkształcenia	
6	częstotliwość obciążania	stała, 10.0 Hz	
7	temperatura badania	stała, 10.0 °C	PN-EN 13108-1:2016-07 [218] PN-EN 13108-20:2016-07 [219] WT-2 (analogia do mieszanki AC WMS) [83] Sybilski [283] Judycki [113] Pszczola [169] Leszczyńska [139] Haponiuk [91]

Zaznacza się, iż tabela przedstawia ogólne założenia. Uszczegółowienie warunków ze względu np. na wysokość zadanej amplitudy obciążenia, wdrożonego kryterium zmęczenia itd. bezpośrednio opisano w podrozdziałach przedstawiających omawiany rodzaj testu.

5.3.2.2. Czynniki środowiskowe – woda i mróz

Zmiana stanu skupienia wody z ciekłego na stały jest przyczyną powstawania wysadzin, ale również spękań w warstwach konstrukcji nawierzchni. Nieszczelna mieszanka (np. niedogęszczona) lub częściowo uszkodzona konstrukcja (mikro/makro spękania) np. ruchem kołowym (czynnik mechaniczny) umożliwia przedostawanie się wody do wnętrza warstw asfaltowych. w sezonie zimowym, gdy następuje gwałtowne ochłodzenie, układ warstw jest narażony na działanie mrozu. Zastosowany w nich materiał degraduje się, a trwałość zmniejsza. Przeprowadzając badania bloku zaawansowanego pochyłono się nad czynnikiem środowiskowym związanym z oddziaływaniem wody i mrozu, aby zbadać jego wpływ na zmiany modułu sztywności i trwałość zmęczeniową poszerzoną dodatkowo o regenerację „healing”. Zastosowano autorskie rozwiązanie badawcze oraz wykonano analizy wpływu tego czynnika wykorzystując pozyskane rezultaty.

Autorska metoda opiera się na procedurze badania ITSR opisanego w WT-2 [83] i amerykańskim standardzie AASHTO T-283 2021 [14] wykonanego w ramach badań bloku podstawowego. Do testów w aparacie 4 - PB na belkach każdostronnie oszlifowanych, wprowadzono modyfikacje, które pozwoliły skutecznie wykazać wpływ oddziaływania wody i mrozu. Należą do nich m. in.:

1. zaaplikowano pełne moczenie belek w wodzie, pomijając procedurę odsysania próżniowego – próbki Marshallowskie wymagały takiego zabiegu z uwagi na powierzchnię zewnętrzną i liczne pory,
2. pojemnik z wodą i próbkami (belkami) znajdował się bezpośrednio w komorze termicznej, która umożliwiała zaprogramowanie rampy temperaturowej – pełna automatyzacja badania. Początkowo przez 72.0 h próbki kondycjonowano w temperaturze $40.0 \pm 1^{\circ}\text{C}$, a następnie przez 24.0 h mrożono $-18.0 \pm 3^{\circ}\text{C}$ - uwzględniając czas osiągnięcia tej temperatury,
3. wpływ czynnika oceniono na podstawie zmian modułu sztywności – zbadano jego wartość przed moczeniem i po oraz dodatkowo trwałości zmęczeniowej – zestawu „referencyjnego” względem moczonego,
4. temperatura badania docelowego wynosiła 10.0°C zamiast 25.0°C ,
5. z uwagi na oszlifowane powierzchnie belek, do ustalenia gęstości objętościowej próbek wykorzystano metodę D (pomiar geometryczny) uznaną za skuteczną [203],
6. po rozmrożeniu i osiągnięciu temperatury badania próbki wyciągano z pojemnika, kolejno z stosując suchą ściereczkę z mikrofibry (chłonność) „ściągnano” wierzchnią warstwę wody (częściowo osuszano) i przeprowadzono badanie (założono, iż proces przygotowawczy nie przekraczał minuty).

Obraz prezentujący zastosowaną komorę termiczną oraz moczone w wodzie próbki zamieszczono na: Rys. 64 oraz Rys. 65.



Rys. 64: Zastosowana komora termiczna firmy FDM



Rys. 65: Belki mieszank a - D ($K = 2.95$) na różnych etapach kondycjonowania (woda i mróz).

5.3.2.3. Czynniki chemiczne – roztwór soli drogowej

W okresie zimowym warstwy nawierzchni narażone są na działanie różnych czynników środowiskowych: silne opady deszczu, śniegu, gwałtowna zamiana temperatury (zmieniająca stan skupienia wody opadowej). Niekorzystne warunki mobilizują służby drogowe do zapewnienia bezpieczeństwa ruchu pojazdów na drodze przez zastosowanie różnych czynników chemicznych, a w szczególności soli drogowej (chlorek sodu NaCl). Sól drogowa jest środkiem powszechnie wykorzystywanym do usuwania śniegu i lodu na drogach [85]. Pierwsze skuteczne stosowanie soli do odładzania jezdni miało miejsce w USA na drogach New Hampshire zimą 1938 roku. Od tego czasu chlorek sodu jest szeroko stosowany w północno-wschodniej Europie oraz Ameryce Północnej [122]. Od pierwszego użycia soli nastąpił znaczny wzrost jej stosowania, np. do około 20 milionów ton soli rocznie na drogach w Ameryce Północnej [86, 289, 302]. Fotografia ukazująca funkcjonującą solarkę podczas opadów śniegu zaprezentowano na Rys. 66.



Rys. 66: Solarka posypująca nawierzchnię chlorkiem sodu

Solanka do celów zimowego utrzymania dróg powinna mieć stężenie 20-25%, natomiast nawilżona (zwilżona) sól do posypywania nawierzchni powinna zawierać 30% solanki (roztworu NaCl lub CaCl₂) o stężeniu 20-25% oraz 70% suchej soli NaCl [99]. Taka postać charakteryzuje się szybkim oraz skutecznym topnieniem lodu i śniegu do temperatury (-) 9.0°C [246]. w wielu krajach europejskich, w tym w Polsce powszechnie stosowana jest sól drogowa, która jest mieszaniną chlorku sodu (96% NaCl), chlorku wapnia (2,5% CaCl₂) oraz 0.2% środka antyzbrylającego (żelazocyjanek potasu C₆FeK₄N₆). Dodatek zapobiega tworzeniu się grudek soli na skutek niewłaściwych warunków przechowywania lub nadmiernego oddziaływania wilgoci ochrania przed spadkiem higroskopijności soli.

Oddziaływanie soli mimo, iż zapewnia warunki bezpieczeństwa na nawierzchni, w sposób znaczący wpływa na materiał zastosowany do warstw konstrukcji nawierzchni. Problem dotyczy to nie tylko górnej powierzchni - warstwy ścieralnej, ale także warstw głębiej położonych. Woda opadowa jak również roztwór solankowy, który powstaje po zmieszaniu ze śniegiem lub wodą dostaje się na powierzchnię jezdni i w głąb konstrukcji na cztery możliwe sposoby.

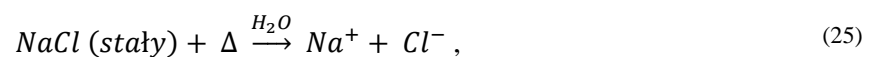
1. Poprzez uszkodzenia powierzchniowe nawierzchni np. spękania zmęczeniowe powstałe w wyniku eksploatacji (głównie top-down) (lub niedostrzegalne mikrospękania) - mieszanina przemieszcza się grawitacyjnie oraz włączana jest pod ciśnieniem od koła pojazdu do wnętrza spękania.
2. Podczas przebudowy nawierzchni w zimie, gdy dopuszczony jest ruch pojazdów na sfrezowanej warstwie ścieralnej. Dochodzi do bezpośredniego wnikania roztworu w górną część warstw wiążących lub podbudowy, także, dodatkowo w wyniku oddziaływania ciśnienia i tarcia od kół pojazdów.
3. W wyniku nieszczelności między warstwowej i złych warunków ukształtowania pobocza gruntowego.
4. W wyniku rozpraszania się aerozolu kropeł zasolonej wody w powietrzu poprzez przejeżdżające z dużą prędkością pojazdy i osadzania się na inne obszary jezdni, także te które nie były pokryte solą.

Warto nadmienić, iż działanie wody i soli wpływając na zmianę wytrzymałości materiału i cech materiałowych prowadzi również do kluczowych zmian w trwałości zmęczeniowej. Ponadto może wpływać negatywnie na samo środowisko (efekty przekwaszenia gruntu w otoczeniu pasa drogowego), powodować korozję obiektów mostowych, pojazdów, elementów infrastruktury drogowej, zieleni przydrożnej. Mimo, iż oddziaływania są sezonowe to zakłada się, iż nadmiar i kumulacja jonów chlorkowych, poprzez zabiegi utrzymaniowe w sposób cykliczny przyspiesza degradację materiału. Wrażliwość oddziaływania może być tym większa im gorszy jest stan nawierzchni (różne inne uszkodzenia) i natężenia ruchu.

Sól drogowa z dodatkiem antyzbrylającym to w większości chlorek sodu. Jest ona związkiem silnego kwasu i silnej zasady. Dobrze rozpuszcza się w wodzie. Jej rozpuszczalność zmienia się w zależności od temperatury wynosząc dla $T = 0.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ około $R = 35.8\%$. w ujemnych temperaturach rozpuszczalność ulega stabilizacji - jest stała.

Aby właściwie przedstawić problem oddziaływania soli na MMA, skrótowo omawia się zachodzącą reakcję chemiczną. Woda jako ciecz (np. stopiony śnieg na nawierzchni) jest zbiorem wzajemnie odpowiednio poukładanych względem siebie cząsteczek wody H_2O , które połączone są ze sobą wiązaniami wodorowymi (słaby typ wiązania). Podczas dodania soli (soli drogowej - $NaCl$) do wody zachodzi reakcja chemiczna. Wiązania wodorowe zrywają się, a cząsteczka wody układa się odpowiednimi ładunkami względem rozpuszczonego kationu sodu Na^+ i anionu chlorkowego Cl^- .

Ważnym zjawiskiem, związanym ze zmianami energetycznymi, jest zmiana entalpii reakcji rozpuszczania soli. Proces chemiczny zobrazowano równaniem (25):



gdzie:

$NaCl(\text{stały})$ – chlorek sodu,

Δ – energia, ciepło, entalpia,

Na^+ – kation sodu,

Cl^- - anion chlorku.

Na podstawie przedstawionej reakcji oraz obserwacji polowych stwierdza się, iż po dodaniu materiału sypkiego (np. posypaniu wilgotnej nawierzchni solą) układ potrzebuje energii z zewnątrz, aby cały proces rozpuszczania mógł się odbyć - zachodzi reakcja endotermiczna. Gdy dochodzi do „pobrania” ciepła ze stanu istniejącego - temperatura obniża

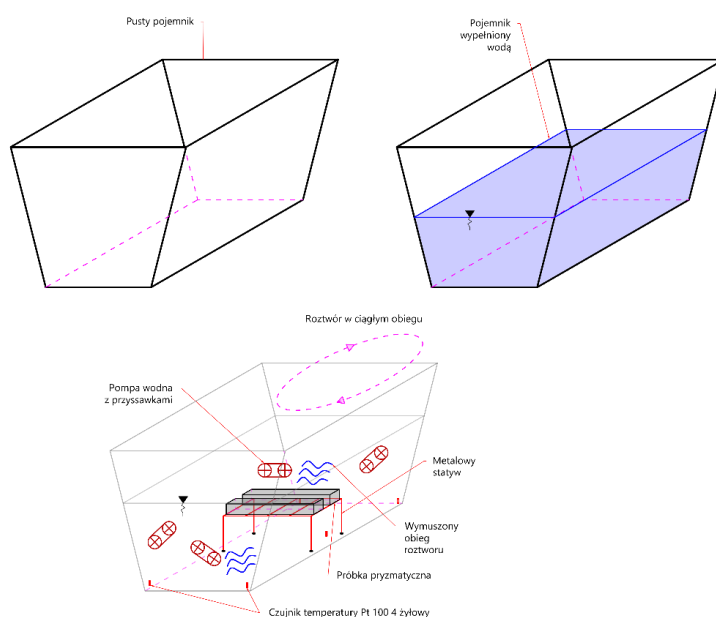
się (materiały drogowe narażone są na skurcz aktywujący proces pęknięcia (zachodzący w efekcie zmian energetycznych układu). Skutkiem obniżenia temperatury (pobierania ciepła na potrzeby zajścia reakcji) zmienia się temperatura zamarzania wody. Należy jednak pamiętać, iż cały proces jest chwilowy - po rozpuszczeniu soli, temperatura układu stabilizuje się. Obserwacje zostały wykazane m.in w pracy Mączki [165].

Obecnie nie ma opracowanych procedur badawczych związanych z wpływem soli drogowej na MMA i jej trwałość. Temat jest nowy. Autor zaproponował i wykonał badania o charakterze eksperymentalnym opisując w dalszej części główne jego założenia i mechanizm działania.

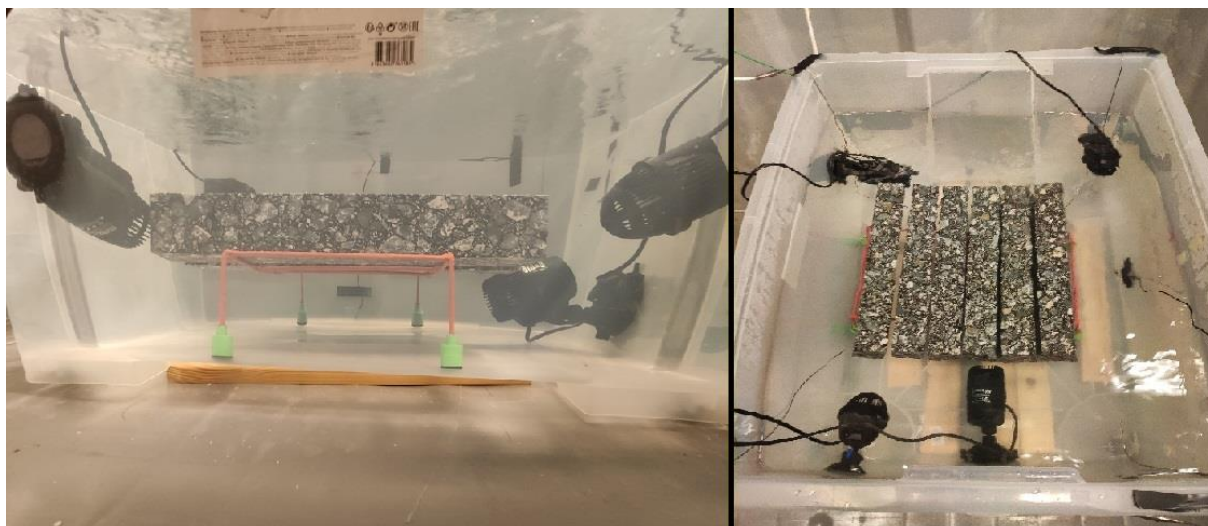
Mieszanki A - D uformowane do belek pryzmatycznych (wymiały rozdział 5.3.2.1) przeznaczone do tego rodzaju analiz odpowiednio wyselekcjonowano, a następnie umieszczono w zamykanym pojemniku o maksymalnej pojemności 130 l. Wewnątrz pojemnika na jego ściankach zamontowano cztery niezależne pompki (odporne na działanie wody i soli o średniej wydajności tłoczenia 7500 l/h wymuszające ustalony obieg roztworu. Wprowadzenie tych urządzeń miało na celu dwa aspekty:

1. stężenie solanki ma być stałe i dobrze rozprowadzane w każdym miejscu pojemnika (bez lokalnych miejsc koncentracji),
2. wymuszony obieg powoduje cykliczne napieranie roztworu na materiał - aproksymacja warunków in-situ, w których to koło pojazdu „wtłacza” pod ciśnieniem mieszaninę w materiał drogowy.

W pięciu miejscach pojemnika tuż przy dnie zainstalowano czujniki do pomiaru temperatury, odporne na działanie wody i soli, które pozwoliły śledzić zmiany temperatury podczas trwania badania oraz w momentach dodania ustalonej ilości soli drogowej do wody. Cały zestaw włożono do komory termicznej. Pojemnik napełniono wodą w taki sposób, aby znać jej ilość, gęstość w temperaturze badania oraz aby moczone próbki były zanurzone na głębokość około 18 cm. Schemat eksperymentu oraz stanowisko badawcze na etapie moczenia próbek zamieszczono na Rys. 67 oraz Rys. 68.



Rys. 67: Schemat eksperymentu solankowego



Rys. 68: w pełni uzbrojone stanowisko badawcze bezpośrednio przed dodaniem soli

Do wykonania kondycjonowania w solance wybrano ogólnodostępną sól drogową z antyzbrylaczem firmy BIO – WAY, powszechnie stosowaną do zwalczania śliskości. Wyznaczono potrzebną masę preparatu tak, aby docelowe stężenie procentowe roztworu soli wynosiło 20.0 %. Do tego celu wykorzystano formułę nr (26).

$$C_p \rightarrow m_s = \frac{C_p \cdot m_w}{100\% - C_p}, \quad (26)$$

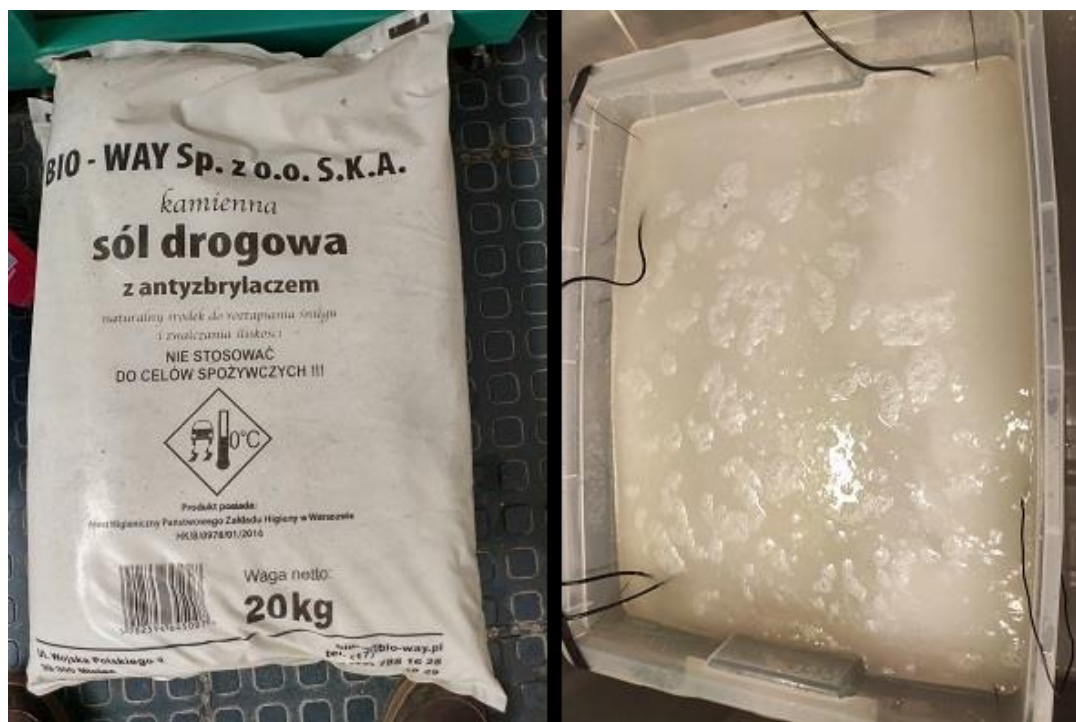
gdzie:

C_p – stężenie procentowe [%],

m_s – masa substancji [g],

m_w – masa wody [g].

Wyznaczając masę wody uwzględniono jej gęstość zależną od temperatury. Sól zaaplikowano do pojemnika, w którym znajdowały się pryzmatyczne próbki. Odnotowano gwałtowny spadek temperatury o ok. 2.5 °C. Ostateczna temperatura, kondycjonowania próbek po stabilizacji warunków wynosiła 10.0 ± 0.2 °C. Belki pryzmatyczne wyselekcjonowane do badań moczone przez okres 2 tygodni. Po moczeniu, próbki częściowo osuszono ścierką z mikrofibry i natychmiast przebadano. Proces przygotowania mieszanek do testów po moczeniu w solance powtarzano kilka razy, ponieważ pojemnik nie był w stanie pomieścić wszystkich wyselekcjonowanych do badań próbek. Podkreśla się, iż każda moczona próbka została poddana badaniu modułu sztywności w warunkach „na świeżo” (przed kondycjonowaniem w roztworze). Na Rys. 69 zaprezentowano zastosowany środek i widok po zasoleniu układu.



Rys. 69: Wykorzystany środek zaaplikowany do przygotowanego stanowiska pomiarowego

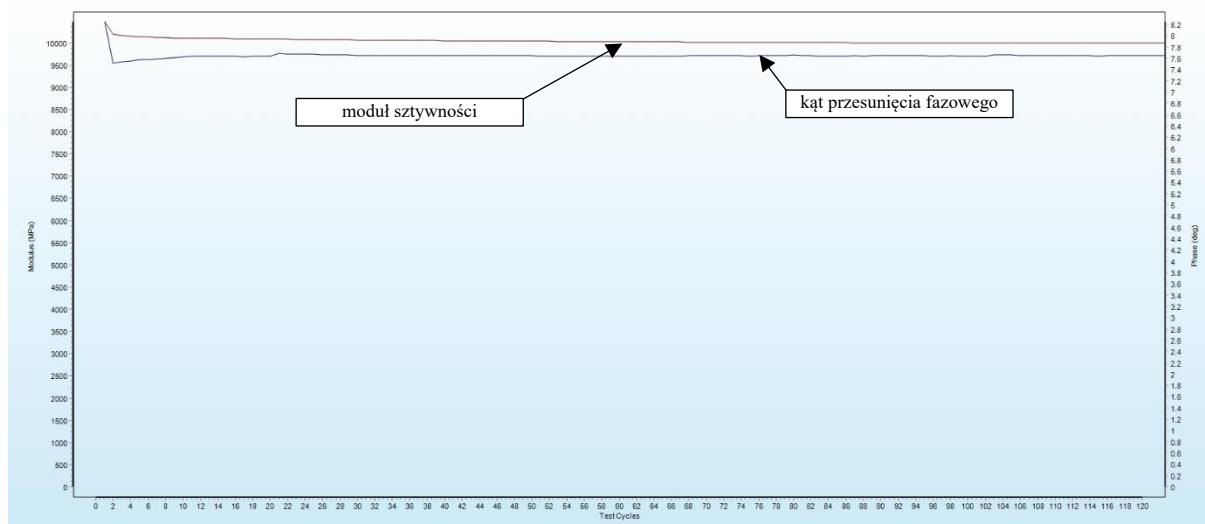
Przyjęte zasady w metodzie badawczej zostały ustalone na podstawie zjawisk zachodzących w okresie zimowym i podstawowych praktyk technologicznych stosowanych w Polsce. Do pielęgnacji w roztworze solanki przyjęto temperaturę równą 10 °C. Jest ona wg IBDiM temperaturą ekwiwalentną [113], zalecaną do projektowania warstw konstrukcji nawierzchni metodami katalogowymi. Ponadto aplikuje się ją w badaniach sztywności / trwałości zmęczeniowej większości mieszanek [218, 219, 222, 224]. Zastosowane stężenie procentowe solanki 20% jest kompromisem pomiędzy roztworem nasyconym, a nienasyconym. w rzeczywistości podczas jednej zimy nigdy nie dochodzi do sytuacji, w której uzyskamy nasycenie lub przesycenie roztworu. Do takiej sytuacji dochodziłoby przy cienkiej warstwie śniegu/łodu i zbyt częstym posypywaniu solą nawierzchni. Zaaplikowane stężenie może być również zinterpretowane jako kumulacja soli, oddziałującej na materiał przez cały okres projektowy np. 20 lat (założenie, które warunkami jest podobne do zastosowania pojedynczego cyklu zamrażania i rozmrażania w badaniu *ITSR*). Zadaniem pomp wodnych o przepływie 7500 l/h była symulacja oddziaływania zmiennych warunków środowiskowych śnieg/łód-sól powiązanych z oddziaływaniem kół pojazdów. Zaaplikowane rozwiązanie eksperymentalne pozwoliło skutecznie wykazać wpływ czynnika chemicznego stosowanego w zimie na zmiany wartości moduły sztywności, trwałości zmęczeniowej oraz healingu.

5.3.3. Analizy modułu sztywności mieszanek A - D

Badania bloku zaawansowanego rozpoczęto od testu modułu sztywności mieszanek A – D, przeprowadzonego w oparciu o normę PN-EN 12697-26:2018-08 [224]. Zastosowano założenia opisane w poprzednich rozdziałach. Zaaplikowana amplituda odkształcenia wynosiła $50 \mu\epsilon$. Wartość międzyszczytowa odpowiadała $100 \mu\epsilon$. Dane wyjściowe (pomierzone) zostały ustalone w 100 cyklu badania.

Na podstawie przeprowadzonych badań ustalono wartość modułu sztywności każdej próbki mieszanek A – D na wszystkich poziomach zawartości asfaltu wyrażonych przez wskaźnik wypełnienia K (2.95, 2.80 i 2.65). Próbki wzajemnie posegregowano względem zmierzonej wartości modułu sztywności celem poddania oddziaływaniom środowiskowym. Po okresie odpowiedniego kondycjonowania wyselekcjonowanych belek ponownie przeprowadzono badanie. w ten sposób ustalono wpływ obciążenia środowiskowego (woda i mróz) oraz niezależnie chemicznego (sól drogowa) przez procentową zmianę wartości modułu – poziom degradacji materiału. Niezależnie wyznaczono wartość kąta przesunięcia fazowego, umożliwiające zidentyfikowanie zachowania materiału w zadanej temperaturze (przewaga cech sprężystych/lepkich). Przeanalizowano również oddziaływanie wyżej wymienionych czynników na jego zmiany.

Z uwagi na zbyt dużą ilość danych, w dalszej części tego podrozdziału wyniki przedstawiono i omówiono zbiorczo na zarób/receptę jako średnią z min. 5 oznaczeń (niezależnie zbadanych belek). Przyjęto, iż w tym badaniu dopuszczalny rozrzut wyników z uwagi na specyfikę zastosowanej metody (czteropunktowego zginania (4-PB)) nie powinien przekraczać 10%. w ten sposób poprawiono czytelność pozyskanych w wyniku pomiaru danych, usprawniono proces komentowania wyników oraz znajdowania wzajemnych korelacji. Przykładową grafikę pozyskaną z programu „Testlab” ukazującą zmianę modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego próbki D_02_14 w omawianym teście zaprezentowano na Rys. 70.



Rys. 70: Przykładowy obraz rejestrowanego modułu sztywności - próbka z serii D_04 (program Testlab)

Tabełę ze zbiorczymi wynikami w zakresie wartości modułu sztywności, kąta przesunięcia fazowego i ich zmian wzbogaconej o informacje związane z zawartością wolnej przestrzeni i wskaźnika $ITSR$ (niezbędnych do analiz wzajemnych korelacji) przedstawiono w Tab. 30.

Tab. 30: Kompleksowe wyniki badania modułu sztywności mieszanek A-D na różnych poziomach zawartości asfaltu

recepta / parametr	K [-]	A_k [%]	$A_m(B)$ [%]	V_m [%]	$ITSR$ [%]	wariant	E_p^* [MPa]	E_k^* [MPa]	$\Delta E_{\%}^*$ [%]	φ_p^* [deg]	φ_k^* [deg]	$\Delta\varphi_{\%}^*$ [%]
A2	2.95	4.42%	4.23%	4.10%	87%	referencyjny	10040	10040		8.15	8.15	
						woda i mróz	10343	9638	-6.82%	7.35	8.94	21.68%
						sól drogowa	9909	9419	-4.94%	8.25	8.19	-0.67%
A3	2.80	4.20%	4.03%	5.08%	84%	referencyjny	10657	10657		9.32	9.32	
						woda i mróz	10142	9316	-8.14%	8.26	9.47	14.62%
						sól drogowa	10271	9516	-7.35%	8.67	8.95	3.15%
A4	2.65	3.97%	3.82%	6.22%	80%	referencyjny	9987	9987		7.35	7.35	
						woda i mróz	9948	8468	-14.87%	7.84	8.67	10.65%
						sól drogowa	9400	8274	-11.99%	7.67	8.26	7.70%
B2	2.95	4.42%	4.23%	4.20%	90%	referencyjny	10138	10138		8.40	8.40	
						woda i mróz	9993	9448	-5.45%	8.30	9.95	19.90%
						sól drogowa	10312	9934	-3.66%	8.34	7.52	-9.78%
B3	2.80	4.20%	4.03%	4.44%	87%	referencyjny	10405	10405		7.83	7.83	
						woda i mróz	10385	9605	-7.51%	7.76	8.87	14.32%
						sól drogowa	10972	10540	-3.94%	7.66	7.68	0.21%
B4	2.65	3.97%	3.82%	5.00%	84%	referencyjny	10136	10136		7.42	7.42	
						woda i mróz	10096	8684	-13.99%	7.96	8.78	10.25%
						sól drogowa	10614	10099	-4.85%	7.20	7.61	5.75%
C2	2.95	4.42%	4.23%	4.00%	92%	referencyjny	9673	9673		9.09	9.09	
						woda i mróz	9947	9859	-0.88%	9.25	9.01	-2.56%
						sól drogowa	9912	9857	-0.55%	9.02	8.84	-1.99%
C3	2.80	4.20%	4.03%	5.08%	90%	referencyjny	10291	10291		8.25	8.25	
						woda i mróz	10100	9684	-4.11%	8.61	7.97	-7.47%
						sól drogowa	9879	9593	-2.89%	8.67	8.40	-3.11%
C4	2.65	3.97%	3.82%	5.59%	87%	referencyjny	9927	9927		8.39	8.39	
						woda i mróz	9016	8137	-9.74%	7.77	6.91	-11.14%
						sól drogowa	9535	9007	-5.54%	8.06	7.66	-4.97%
D2	2.95	4.42%	4.23%	4.34%	95%	referencyjny	9520	9520		8.26	8.26	
						woda i mróz	9990	9966	-0.24%	8.50	8.42	-0.99%
						sól drogowa	9926	9907	-0.19%	8.28	8.25	-0.31%
D3	2.80	4.20%	4.03%	4.97%	92%	referencyjny	10284	10284		7.17	7.17	
						woda i mróz	9709	9418	-3.00%	7.44	7.13	-4.18%
						sól drogowa	9901	9681	-2.22%	8.00	7.78	-2.71%
D4	2.65	3.97%	3.82%	5.77%	89%	referencyjny	9836	9836		7.81	7.81	
						woda i mróz	10166	9438	-7.16%	7.73	7.32	-5.31%
						sól drogowa	10141	9720	-4.15%	8.12	7.82	-3.66%

W Tab. 30 zastosowano następujące oznaczenia:

K – wskaźnik wypełnienia [-],

A_k – procentowa zawartość lepiszcza dodawanego do mieszanki mineralnej [%],

A_m – procentowa zawartość lepiszcza dodawanego do MMA [%],

V_m – zawartość wolnych przestrzeni w MMA [%],

$ITSR$ – wskaźnik odporności materiału na działanie wody i mrozu w badaniu pośredniego rozciągania [%],

E_p^* – wartość modułu sztywności przed zastosowaniem czynników środowiskowych [MPa],

E_k^* – wartość modułu sztywności po zastosowaniu czynników środowiskowych [MPa],

$\Delta E_{\%}^*$ – procentowa zmiana wartości modułu sztywności po oddziaływaniu czynnika środowiskowego względem wartości przed [%],

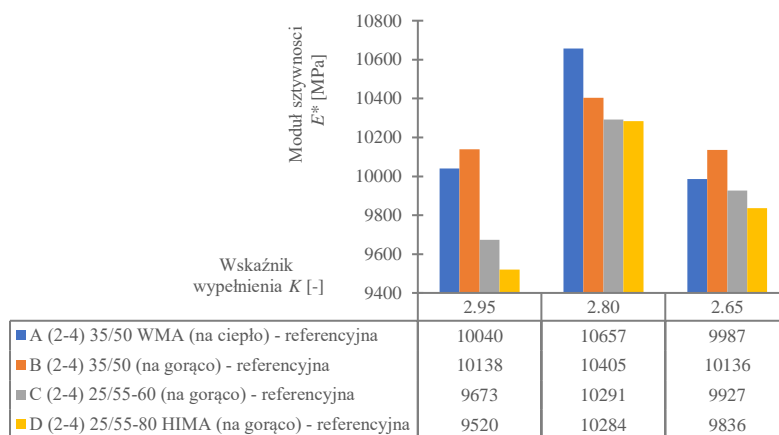
φ_p^* – wartość kąta przesunięcia fazowego przed zastosowaniem czynników środowiskowych [deg],

φ_k^* – wartość kąta przesunięcia fazowego po zastosowaniu czynników środowiskowych [deg],

$\Delta\varphi_{\%}^*$ – procentowa zmiana wartości kąta przesunięcia fazowego po oddziaływaniu czynnika środowiskowego względem wartości przed [%].

Nawiązując do wartości przedstawionych w Tab. 30 wyszczególniono 22 obserwacje.

1. Wartość średnia modułów sztywności mieszanek A – D zarówno próbek referencyjnych oraz tych przeznaczonych do kondycjonowania czynnikami środowiskowymi / chemicznymi zawiera się w przedziale 9000 – 11000 MPa. Różnice te prawdopodobnie wynikają z: zastosowanego rodzaju lepiszcza (włączając modyfikacje składu matrycy asfaltowej polimerem SBS (mieszanki C - D) oraz dodatkami WMA (mieszanka A)), ułożenia się poszczególnych składników MMA i stopniu zagęszczenia (98-100%).
2. Zestawiając względem siebie wartości modułów mieszanek C i D przy różnych poziomach lepiszcza materiał D wykazuje niższą sztywność niż C – modyfikacja polimerem znacząco „uelastycznia” MMA skutkując niższymi wartościami modułu – stosowalność tych lepiszczy do mieszanek typu wysoki moduł sztywności, może być ograniczona (co zostało również zasygnalizowane w [32]). Podobne obserwacje wynikają z porównania mieszanek C i D z A i B (wykonanych na bazie asfaltu zwykłego) – pomimo, iż materiały A i B zawierają niewiele „miększy” (ze względu na indeks penetracji) asfalt ich sztywność jest większa niż tych modyfikowanych i wysokomodyfikowanych. Należy podkreślić, iż niska wartość modułu sztywności w kontekście mieszanek na bazie asfaltów modyfikowanych nie jest równoznaczna z np. mniejszą zdolnością do przenoszenia obciążeń lub koleinowaniem się w wysokich temperaturach.
3. Identyfikując wartości modułów sztywności wszystkich mieszanek A – D zarobu referencyjnego (tylko czynnik mechaniczny) dostrzega się nieliniowe zachowania mieszanek. Celem przejrzystego ukazania tego trendu na Rys. 71 przedstawia się wykres kolumnowy zmian wartości modułów.



Rys. 71 Wartości modułów sztywności poszczególnych mieszanek a -D (referencyjne)

Przy zmniejszeniu się K z 2.95 na 2.80 moduły we wszystkich mieszankach wzrastają, natomiast przy kolejnej zmianie zaczynają spadać. Stwierdzono, iż do pewnego momentu zmniejszanie zawartości asfaltu w recepcie skutkuje polepszeniem parametrów mechanicznych mieszanki (ulega ona usztywnieniu). Jednak z uwagi na towarzyszący temu zjawisku wzrost zawartości wolnych przestrzeni w mieszance (które są miejscami nieciągłości materiału - osłabieniem) dostrzega się istnienie takiego progu zawartości lepiszcza, poniżej którego materiał zaczyna gwałtownie tracić swą

- wytrzymałość objawiającą się przez spadek modułu sztywności. w przypadku omawianych mieszanek optimum wynosi $K = 2.80$.
- Zmniejszanie się zawartości lepiszcza w mieszankach A – D (w większości, lecz istnieją przypadki, wynikające z innej koncentracji lepiszcza w obrębie bazy pomiarowej - np. A2 i A3 – zestaw referencyjny) wywołuje spadek wartości kąta przesunięcia fazowego – wzrost zachowań sprężystych materiału, kosztem lepkich.
 - Niezależnie od modyfikacji matrycy asfaltowej polimerem SBS w mieszankach C i D oraz dodatków obniżających temperaturę technologiczną - materiał A, wszystkie mieszanki A – D charakteryzują się stosunkowo niską wartością kąta przesunięcia fazowego $\ll 10.0^\circ$ (zdecydowana przewaga zachowań sprężystych). Przy wskaźniku wypełnienia $K = 2.95$, spośród wszystkich najlepiej wypada mieszanka A, która to charakteryzuje się najniższą wartością kąta fazy. Następnie C, D i B.
 - Obserwując moduły sztywności mieszanek wykonanych w technologii na gorąco B, C i D dostrzega się ich podobną wartość – modyfikacja matrycy polimerem, nie wpływa znacząco na nośność oraz sposób zachowania się materiału (w przypadku kąta fazy zmiany nie obserwuje się znaczących rozbieżności).
 - Porównując ze sobą technologię produkcji HMA i WMA (mieszanki B i A) wyższe wartości modułu sztywności są osiągane w przypadku „na ciepło”. Podobnie i kąt fazy jest niższy niż dla technologii HMA. Różnice nie są znaczące przy dużych zawartościach asfaltu ($K = 2.95$) - wynoszą mniej niż 5% (WMA wypada lepiej). Należy jednak podkreślić, iż opisany trend zmienia się wraz z redukcją ilości lepiszcza w kierunku jakościowej przewagi mieszanek w technologii HMA.
 - Wszystkie mieszanki niezależnie od poziomu wskaźnika wypełnienia K po obciążeniu czynnikiem środowiskowym (woda i mróz) wykazały spadek wartości modułu – materiał uległ degradacji. Zmiany są tym większe, im mniejsza jest zawartość asfaltu w mieszance i większa wolnej przestrzeni.
 - Mieszanka na bazie asfaltu wysokomodyfikowanego D wykazała najmniejszą wrażliwość na zastosowane oddziaływanie (działalność wody i mrozu) – najbardziej odporna spośród wszystkich, co jest zbieżne z wcześniejszymi badaniami *ITSR*. Na poziomie $K = 2.95$ spadek wartości modułu wynosił zaledwie 0.24 % natomiast przy $K = 2.65$ sztywność spadła o 7.16%. Kolejno klasyfikuje się materiał C wykazując podobną odporność - $K = 2.95$ spadek o 0.88%, $K = 2.65$ spadek o 9.74%. w przypadku asfaltów zwykłych obserwuje się znaczący spadek wartości modułu. Mieszanka B wypada gorzej od C jednak mimo wszystko lepiej od A. MMA (B) - $K = 2.95$ spadek o 5.45%, $K = 2.65$ spadek o 13.99%, a (A) - $K = 2.95$ spadek o 6.82%, $K = 2.65$ spadek o 14.87%.
 - W przypadku porównania mieszanek B - D (ze względu na oddziaływanie wody i mrozu) wewnątrz technologii na gorąco bezkonkurencyjnie wypadają te z modyfikacją matrycy polimerem SBS. Stopień degradacji materiału (wyrażony poprzez stosunek spadków wartości modułu pomiędzy mieszankami) jest nawet 16 krotnie mniejszy ($K = 2.95$ dla D z HIMA) i 2 krotnie mniejszy ($K = 2.65$ dla D z HIMA) w stosunku do MMA na bazie asfaltów zwykłych (B). Mieszanki C i D są wyraźnie trwalsze niż B.
 - Porównując ze sobą mieszanki wykonane w technologii na ciepło WMA (A) oraz na gorąco (B) ze względu na oddziaływanie wody i mrozu odporniejszą jest „na gorąco”. w przypadku poziomu $K = 2.95$ mieszanka B jest o 25% mniej wrażliwsza na wodę i mróz od A oraz przy $K = 2.65$ około 6.2% (spadek zawartości lepiszcza zmniejsza różnicę pomiędzy technologiami). Wcześniejsze wyniki badań *ITSR* również potwierdzają te obserwacje. w przypadku niskich zawartości asfaltu technologia WMA może być alternatywną w stosunku do HMA (ze względu na moduł sztywności).

12. Zmniejszenie się zawartości asfaltu w mieszankach A-D poddanych wodzie i mrozowi wywołuje spadek wartości kąta fazy. w przypadku mieszanki A - B kąt fazy z poziomu $K = 2.95$ do poziomu $K = 2.65$ zmniejsza się prawie 2 krotnie – w ujęciu procentowym (np. z 21.68% do 10.65%) jest to bardzo znacząca zmiana. Podobnie materiały C i D zmiana jest nawet 5 krotna jednak, spoglądając na różnice procentowe są one zdecydowanie mniejsze (np. z (-)0.99% na (-)5.31%).
13. Obciążenie wodą i mrozem mieszanki wykonanych w różnych technologiach - A i B wywołuje przyrost kąta fazy. Ten zaś zmniejsza się wraz z zawartością lepiszcza. Mieszanki stają się bardziej „sprężyste” – początkowy przyrost dla poziomu $K = 2.95$ wyniósł aż 21.68% (A) i 19.90% (B). w przypadku zmian zawartości lepiszcza w obydwu przypadkach spadł do ok. 10% dla $K = 2.65$. Odmienne zachowania wykazują mieszanki C i D – niezależnie od poziomu zawartości asfaltu zachowują się sprężystej. Zaobserwowano dla nich trend: im więcej asfaltu w MMA tym mniejsza zmiana kąta fazy po oddziaływaniu wody i mrozu (mniejsza wrażliwość) – spadek dla poziomu $K = 2.95$ wyniósł aż 2.56% (C) i 0.99% (D)!
14. Oceniając efekt modyfikacji matrycy asfaltowej polimerem SBS wewnątrz technologii na gorąco dostrzega się, iż im jest ona większa tym odporniejszą mieszankę (na działanie czynnika wody i mrozu) na zmianę sposobu pracy pozyska się – nawet do 15 razy bardziej dla $K = 2.95$ (B względem D).
15. Zmiany kąta fazy dla MMA A i B (różne technologie) wywołane oddziaływaniem wody i mrozu należą do porównywalnych - różnice są niewielkie np. ok. 8% przy poziomie $K = 2.95$ i ok. 4% przy $K = 2.65$. Materiał nie wykazuje znaczących zmian zachowań (np. przyrostu cech lepkich).
16. Oddziaływanie soli drogowej negatywnie wpływa na sztywność mieszanki A-D – wartość modułu spada. Zmiany są tym większe, im mniejsza jest zawartość asfaltu w mieszance (skutkująca przyrostem zawartości wolnej przestrzeni).
17. Mieszanka na bazie asfaltu wysokomodyfikowanego D wykazała najmniejszą wrażliwość na oddziaływanie soli drogowej – jest najtrwalsza. Na poziomie $K = 2.95$ spadek wartości modułu wynosił zaledwie 0.19 % natomiast przy $K = 2.65$ sztywność spadła o 4.15%. Kolejno klasyfikuje się materiał C wykazując podobną odporność - $K = 2.95$ spadek o 0.55%, $K = 2.65$ spadek o 5.54%. w przypadku asfaltów zwykłych obserwuje się większy ubytek wartości modułu. Mieszanka B wypada gorzej (poza poziomem $K = 2.65$) od C jednak zdecydowanie lepiej od A. MMA (B) - $K = 2.95$ spadek o 3.36%, $K = 2.65$ spadek o 4.85%, a (A) - $K = 2.95$ spadek o 4.94%, $K = 2.65$ spadek o 11.99%. Zaobserwowano, iż oddziaływanie solą wywołało podobną degradację jak woda i mróz.
18. W przypadku porównania mieszanki B - D (ze względu na oddziaływanie soli drogowej) wewnątrz technologii na gorąco bezkonkurencyjnie wypadają te z modyfikacją matrycy polimerem SBS w przypadku wysokich zawartości lepiszcza w MMA (np. $K = 2.95$ lub 2.80). Dopiero przy poziomie $K = 2.65$ mieszanka B wypadła lepiej od C – jest to bezpośrednio związane z jej niższą zawartością wolnych przestrzeni na tym samym poziomie wskaźnika K . Stopień degradacji materiału (wyrażony poprzez stosunek spadków wartości modułu pomiędzy mieszankami) jest nawet 19 krotnie mniejszy ($K = 2.95$ dla D z HIMA) i 0.16 krotnie mniejszy ($K = 2.65$ dla D z HIMA) w stosunku do MMA na bazie asfaltów zwykłych (B). Jakościowo (oceniając wpływ czynnika na spadek modułu wewnątrz technologii HMA) D wypada najlepiej, najgorzej B, natomiast C znajduje się pośrodku.
19. Porównując ze sobą mieszanki wykonane w technologii na ciepło WMA (A) oraz na gorąco (B) (ze względu na oddziaływanie soli drogowej) zdecydowanie odporniejszą jest ta „na gorąco”. w przypadku poziomu $K = 2.95$ mieszanka B jest o 35% mniej

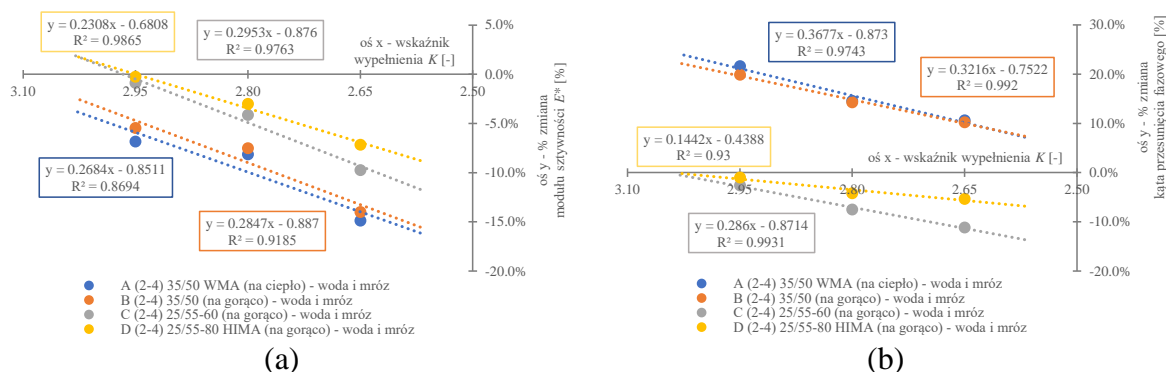
wrażliwa na sól drogową od A natomiast przy $K = 2.65$ procentowy stosunek spadku modułów sztywności wynosi aż 147%! Stwierdzono, iż zawartość lepiszcza wpływa na degradację wywołaną solą. Zauważono również, iż wzrost zawartości wolnej przestrzeni mieszanki oraz stosowane dodatki do asfaltu WMA umożliwiające obniżenie temperatury produkcji zwiększają degradację wywołaną solą.

20. Analizując zmiany kąta fazowego wynikające z zastosowania oddziaływania chemicznego (sól drogową) mieszanki A – B wykazują trend przyrostowy (sól wiąże się z lepiszczem powodując przyrost cech lepkich – taka mieszanka prawdopodobnie bardziej się koleinuje – należy sprawdzić), natomiast C – D spadkowy. Polimer w matrycy łącząc się z solą wywołuje uelastycznianie się mieszanki usztywniając ją oraz prawdopodobnie zwiększając podatność na pękanie. w przypadku mieszanki A kąt fazy z poziomu $K = 2.95$ do poziomu $K = 2.65$ wzrósł prawie 11 razy – w ujęciu procentowym (z (-)0.67% do 7.70%) jest to bardzo znacząca zmiana. Materiał B - kąt fazy z poziomu $K = 2.95$ do poziomu $K = 2.65$ zwiększa się z wyraźnym przejściem przez 0% – w ujęciu procentowym (z (-)9.78% do 5.75%). Dla $K = 2.80$ wpływ soli drogowej na zmiany kąta fazy jest prawie znikomy. MMA C i D charakteryzują się podobnymi różnicami kąta pomiędzy skrajnymi poziomami K – np. C z (-1.99%) na (-4.97%) – ponad dwukrotny spadek kąta fazy oraz mieszanki D, w której zmiana w przybliżeniu jest 12 krotna z (-)0.31% na (-)3.66%. Spoglądając na różnice procentowe mieszanek C i D są one mało znaczące. Mieszanki te nie wykazują istotnych zmian cech materiału (np. przyrost cech lepkich) wywołanych oddziaływaniem soli.
21. Sól drogową wywołuje w mieszankach na bazie asfaltów zwykłych A i B przyrost kąta fazy. Jego wartość zwiększa się wraz z malejącą zawartością lepiszcza – mieszanka staje się bardziej „lepka”. Odmienne zachowania wykazują mieszanki C i D – niezależnie od poziomu zawartości asfaltu zachowują się sprężystiej – faza spada. Zaobserwowano trend - im więcej asfaltu w MMA tym mniejsza zmiana kąta fazy po oddziaływaniu soli drogowej (mniejsza wrażliwość).
22. Oceniając wpływ modyfikacji matrycy asfaltowej polimerem SBS na działanie czynnika soli drogowej dostrzega się, iż im polimeru jest więcej tym odporniejszą mieszankę pozyska się – nawet do 31 razy mniejsze zmiany wartości kąta fazy dla $K = 2.95$ (B - bez modyfikacji względem D - HIMA).

Analizując dane w Tab. 30 zauważono, iż pomiędzy: wskaźnikiem wypełnienia K zawartością wolnych przestrzeni V_m , wskaźnikiem $ITSR$, a $\Delta E_{\%}^*$ i $\Delta \varphi_{\%}^*$ (zarówno dla oddziaływania środowiskowego i chemicznego) w mieszankach A - D dostrzega się istniejące współzależności. Na podstawie zastosowanej regresji liniowej (linia trendu) wykorzystującej metodę najmniejszych kwadratów ustalono poziom korelacji korzystając z współczynnika determinacji R^2 . Przyjęto analogiczne poziomy dopasowania modelu jak w poprzednich podrozdziałach (podrozdział 5.3.2.2). Wykres zmian omawianych zmiennych przedstawiono na rysunkach w następującej kolejności:

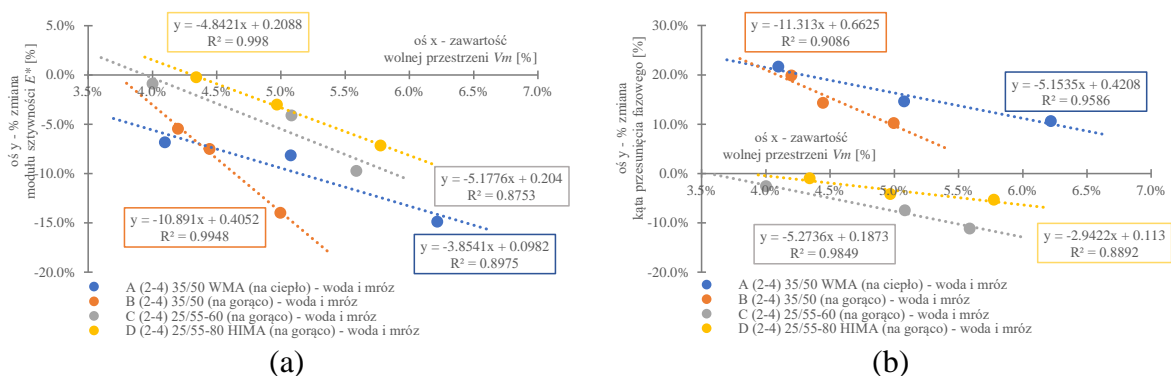
1. wykres zmian wskaźnika wypełnienia K od $\Delta E_{\%}^*$ i $\Delta \varphi_{\%}^*$ (woda i mróz) – Rys. 72,
2. wykres zmian zawartości wolnej przestrzeni V_m od $\Delta E_{\%}^*$ i $\Delta \varphi_{\%}^*$ (woda i mróz) – Rys. 73,
3. wykres zmian odporności na wodę i mróz (wskaźnik $ITSR$) od $\Delta E_{\%}^*$ i $\Delta \varphi_{\%}^*$ (woda i mróz) – Rys. 74,
4. wykres zmian wskaźnika wypełnienia K od $\Delta E_{\%}^*$ i $\Delta \varphi_{\%}^*$ (sól drogową) – Rys. 75,
5. wykres zmian zawartości wolnej przestrzeni V_m od $\Delta E_{\%}^*$ i $\Delta \varphi_{\%}^*$ (sól drogową) – Rys. 76,
6. wykres zmian odporności na wodę i mróz (wskaźnik $ITSR$) od $\Delta E_{\%}^*$ i $\Delta \varphi_{\%}^*$ (sól drogową) – Rys. 77.

Celem uzyskania przejrzystości przekazu, ukazuje się dwa wykresy jeden obok drugiego.



Rys. 72: Wykres zmian wskaźnika wypełnienia K od procentowych zmian modułu sztywności (a) i kąta przesunięcia fazowego (b) - woda i mróz

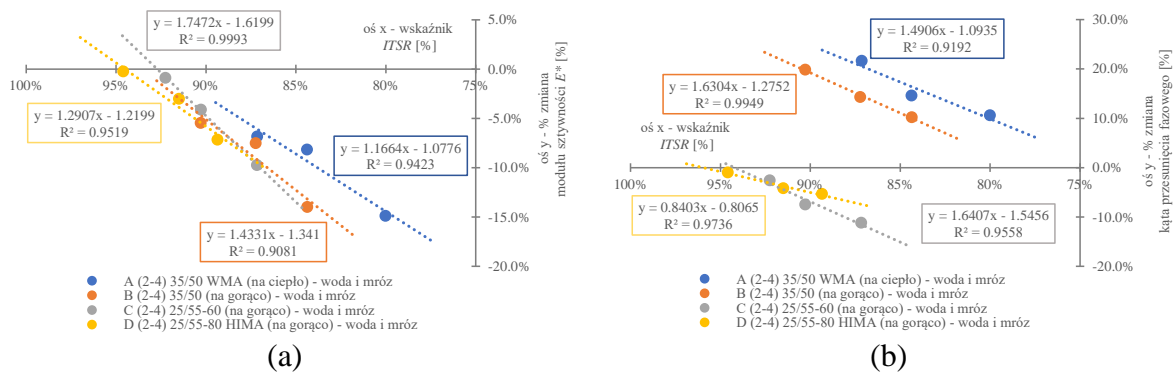
Analizując Rys. 72, wszystkie mieszanki A – D dla których zastosowano modele regresji liniowej zarówno w przypadku zmian wartości modułu (a) jak i zmian kąta fazy (b) charakteryzują się dobrym (mieszanka A (a) – $R^2 = 0.8694$) oraz bardzo dobrym (reszta) $R^2 > 0.90$ dopasowaniem. Na podstawie obserwacji można stwierdzić, iż główną cechą wpływającą na wrażliwość MMA i degradację pod wpływem działalności czynnika środowiskowego jest zawartość lepiszcza. Kąty nachylenia linii trendu są praktycznie jednakowe, a linie do siebie równoległe. Spoglądając na wykresy dostrzega się, iż rodzaj lepiszcza zastosowanego w MMA charakteryzuje wysokość podatności na wodę i mróz poprzez wzajemne rozsuniecie funkcji regresji.



Rys. 73: Wykres zmian zawartości wolnej przestrzeni V_m od procentowych zmian modułu sztywności (a) i kąta przesunięcia fazowego (b) - woda i mróz

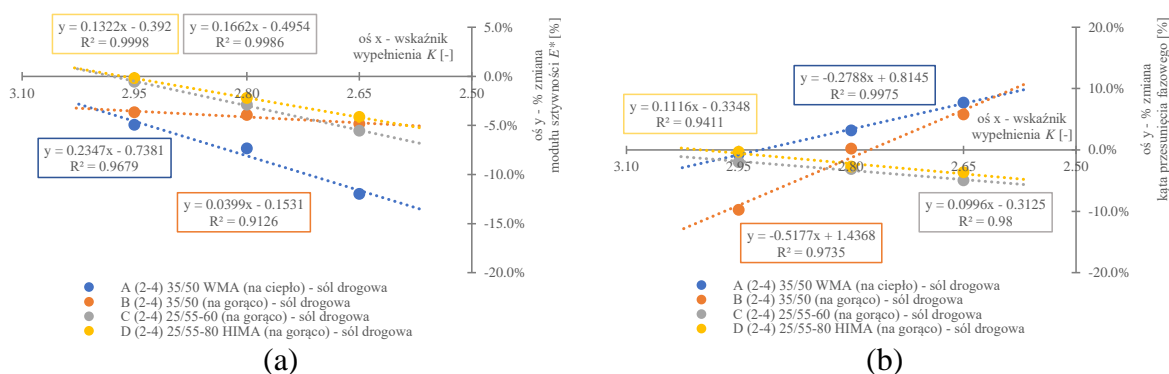
Analizując Rys. 73, podobnie jak w przypadku zmian wskaźnika wypełnienia K , wszystkie mieszanki A – D dla których zastosowano modele regresji liniowej zarówno w przypadku zmian wartości modułu (a) jak i zmian kąta fazy (b) charakteryzują się dobrym (mieszanka A (a) – $R^2 = 0.8975$, C (a) – $R^2 = 0.8753$) oraz bardzo dobrym (reszta) $R^2 > 0.90$ dopasowaniem. Na podstawie obserwacji można stwierdzić, iż główną cechą wpływającą na wrażliwość MMA i degradację pod wpływem działalności czynnika środowiskowego jest zawartość wolnej przestrzeni, która jest spowinowana z zawartością lepiszcza (zależna od niej). Obserwacje są zbieżne ze wcześniejszą liniową zmiennością K od V_m wszystkich

badanych MMA, wykazaną w badaniach bloku podstawowego. Do istotnych elementów obydwu wykresów (a i b) należą kąty nachylenia linii trendu. w przypadku mieszanek A, C i D są praktycznie jednakowe, a linie do siebie równoległe i rozsunięte względem siebie - rodzaj zastosowanego lepiszcza w MMA charakteryzuje wysokość podatności na wodę i mróz. Kluczowym spostrzeżeniem, na które warto zwrócić uwagę jest kąt nachylenia mieszanki referencyjnej B (35/50 HMA), który jest zdecydowanie większy. Na podstawie wcześniejszych obserwacji i obecnych trendów, można powiedzieć, że im mieszanka lepiej się układa i zagęszcza (mały przyrost V_m z poziomu na poziom K) tym prędkość zmian ukazujących podatność danego MMA na oddziaływanie wody i mrozu jest większa.



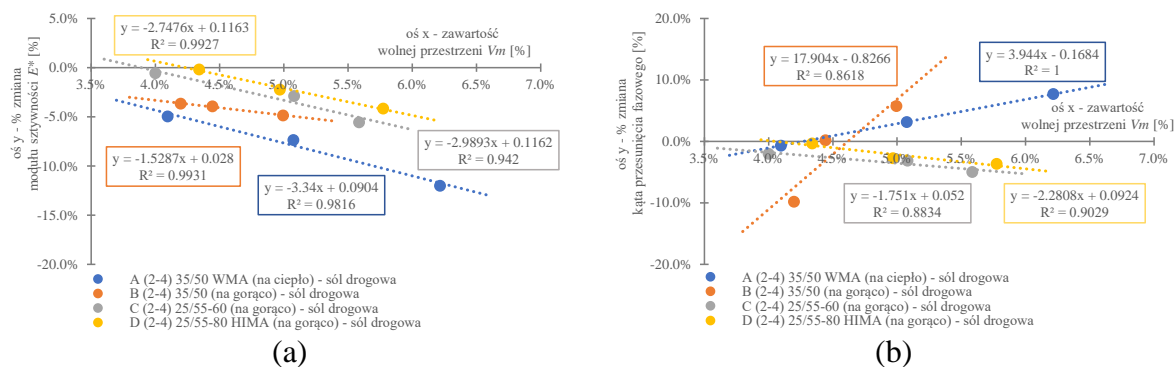
Rys. 74: Wykres zmian wskaźnika $ITSr$ od procentowych zmian modułu sztywności (a) i kąta przesunięcia fazowego (b) - woda i mróz

Spoglądając Rys. 74, wszystkie mieszanki A – D dla których zastosowano modele regresji liniowej zarówno w przypadku zmian wartości modułu (a) jak i zmian kąta fazy (b) charakteryzują się bardzo dobrym $R^2 > 0.90$ dopasowaniem. Na podstawie wykonanych badań dla wszystkich 4 mieszanek dostrzega się bardzo dobrą korelację wyników pochodzących z metody pośredniego rozciągania z czteropunktowego zginania 4-PB w odniesieniu do oceny wrażliwości MMA na działanie wody i mrozu. Można zatem stwierdzić, iż wszystkie zastosowane dotąd założenia (oraz urządzenia) w kontekście przygotowania materiałów, wykonania mieszanki, zagęszczenia, przygotowania próbek kondycjonowania (np. bez próżni) i docelowych badań były słuszne, umożliwiając pozyskanie szczególnego przypadku, w którym wykonując badanie 4-PB można z powodzeniem uzyskać odporność MMA na działanie wody i mrozu opierając się na np. zmianach modułu sztywności. Do istotnych elementów obydwu wykresów (a i b) należą kąty nachylenia linii trendu. w przypadku mieszanek A – D są praktycznie jednakowe, a linie do siebie równoległe i rozsunięte względem siebie - rodzaj zastosowanego lepiszcza w MMA charakteryzuje wysokość podatności na wodę i mróz.



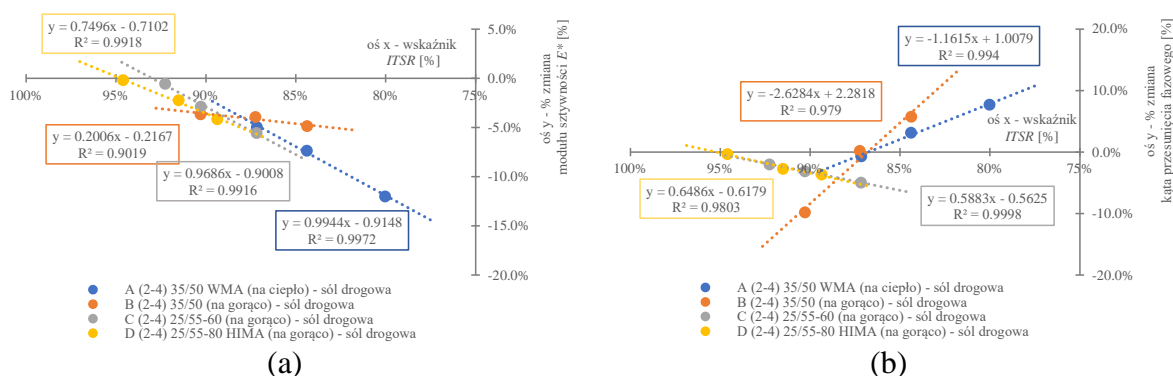
Rys. 75 Wykres zmian wskaźnika wypełnienia K od procentowych zmian modułu sztywności (a) i kąta przesunięcia fazowego (b) – sól drogowa

Analizując Rys. 75, wszystkie mieszanki A – D dla których zastosowano modele regresji liniowej zarówno w przypadku zmian wartości modułu (a) jak i zmian kąta fazy (b) bardzo dobrym $R^2 > 0.90$ dopasowaniem. Na podstawie obserwacji można stwierdzić, iż główną cechą wpływającą na wrażliwość MMA i degradację pod wpływem działalności czynnika chemicznego jest zawartość lepiszcza. Kąty nachylenia linii trendu wykresu (a) są praktycznie jednakowe (poza mieszanką B, która to wykazywała najniższą zawartość wolnych przestrzeni z poziomu na poziom wskaźnika wypełnienia K), a linie do siebie równoległe. Spoglądając na wykresy dostrzega się, iż rodzaj lepiszcza zastosowanego w MMA określa podatność na oddziaływanie soli drogowej poprzez wzajemne rozsuniecie funkcji regresji. w przypadku wykresu (b) mieszanki A i B wykazują, iż działanie czynnika chemicznego zwiększa zachowania lepkie mieszanki – prawdopodobnie bardziej by się ona koleinowała (celem udowodnienia tego twierdzenia należałoby wykonać badania odporności na deformacje trwałe po kondycjonowaniu płyt w solance). Mieszanki C i D wykazują, iż działanie czynnika chemicznego zwiększa zachowania sprężyste mieszanki – co może zwiększyć ryzyko pęknięcia MMA (czyli mniejszą trwałością zmęczeniową w przypadku stosowania zmęczeniowego kryterium spadku modułu sztywności początkowej dla zadanego poziomu obciążenia o 50%).



Rys. 76: Wykres zmian zawartości wolnej przestrzeni V_m od procentowych zmian modułu sztywności (a) i kąta przesunięcia fazowego (b) - woda i mróz

Analizując Rys. 76, podobnie jak w przypadku zmian wskaźnika wypełnienia K , wszystkie mieszanki A – D dla których zastosowano modele regresji liniowej zarówno w przypadku zmian wartości modułu (a) jak i zmian kąta fazy (b) charakteryzują się dobrym (mieszanka B (b) – $R^2 = 0.8618$, C (b) – $R^2 = 0.8834$) oraz bardzo dobrym (reszta) $R^2 > 0.90$ dopasowaniem. Na podstawie obserwacji można stwierdzić, iż główną cechą wpływającą na wrażliwość MMA i degradację pod wpływem działalności czynnika chemicznego jest zawartość wolnej przestrzeni, która jest spowinowacana z zawartością lepiszcza (zależna od niej). Obserwacje są zbieżne ze wcześniejszą liniową zmiennością K od V_m wszystkich badanych MMA, wykazaną w badaniach bloku podstawowego. Do istotnych elementów wykresu (a) należy kąt nachylenia linii trendu. w przypadku mieszanek A, C i D są praktycznie jednakowe, a linie do siebie równoległe i rozsunięte względem siebie - rodzaj zastosowanego lepiszcza w MMA charakteryzuje wysokość podatności na sól drogową. Kluczowym spostrzeżeniem, na które warto zwrócić uwagę jest kąt nachylenia mieszanki referencyjnej B (35/50 HMA), który jest zdecydowanie mniejszy. Na podstawie wcześniejszych obserwacji i obecnych trendów, można powiedzieć, że im mieszanka lepiej się układa i zagęszcza (mały przyrost V_m z poziomu na poziom K) tym prędkość zmian (zmienność modułu sztywności - degradacja) ukazujących podatność danego MMA na oddziaływanie soli drogowej jest mniejsza. Odwrotne wnioski można wyciągnąć z wykresu (b) w kontekście prędkości przyrostu cech lepkich spowodowanych uprzednim obciążeniem chemicznym.



Rys. 77: Wykres zmian wskaźnika ITSR od procentowych zmian modułu sztywności (a) i kąta przesunięcia fazowego (b) - woda i mróz

Spoglądając Rys. 77, wszystkie mieszanki A – D dla których zastosowano modele regresji liniowej zarówno w przypadku zmian wartości modułu (a) jak i zmian kąta fazy (b) charakteryzują się bardzo dobrym $R^2 > 0.90$ dopasowaniem. Na podstawie wykonanych badań dla wszystkich 4 mieszanek dostrzega się bardzo dobrą korelację wyników pochodzących z metody pośredniego rozciągania z czteropunktowego zginania 4-PB w odniesieniu do oceny wrażliwości MMA na działanie soli drogowej (możliwość prób ustalania oddziaływania soli przez oddziaływanie wody i mrozu i na odwrót w celu uwzględniania obydwu cech lub wybrania szybszej i łatwiejszej metody wykonania oznaczenia). Ponownie można stwierdzić, iż wszystkie zastosowane dotąd założenia (oraz urządzenia) w kontekście przygotowania materiałów, wykonania mieszanki, zagęszczenia, przygotowania próbek kondycjonowania i docelowych badań były słuszne, umożliwiając pozyskanie szczególnego liniowego przypadku, dla badania 4-PB. Do istotnych elementów obydwu wykresów (a i b) należą kąty nachylenia linii trendu. w przypadku mieszanek A – D (bez B) dla (a) kąty nachylenia są praktycznie jednakowe, a linie do siebie równoległe i rozsunięte względem osi poziomej - rodzaj zastosowanego lepiszcza w MMA charakteryzuje wysokość podatności na sól drogową przy odporności na wodę i mróz. w przypadku mieszanki B krzywa jest prawie pozioma – prędkość degradacji z uwagi na oddziaływanie soli drogowej jest niska – im szczelniejsza i bardziej odporna mieszanka na wodę i mróz mieszanka tym wyższa odporność na oddziaływanie chemiczne. Do odwrotnych wniosków można dojść przy analizie wykresu (b) w kontekście przyrostu cech lepkich w materiale (zmiany sposobu zachowania się) – im szczelniejsza, lepiej urabiająca się i bardziej odporna na wodę i mróz mieszanka tym prędkość zmian kąta fazy wywołanego oddziaływaniem chemicznym jest większa.

5.3.4. Analiza trwałości zmęczeniowej mieszanek A – D

Badania zmęczeniowe nad mieszankami należą do coraz częściej realizowanych w celu ustalenia trwałości materiału na oddziaływanie czynnika mechanicznego (koło pojazdu, ilość przejazdów). Stosując powszechne podejście, rozpatruje się jedynie czynnik mechaniczny (uproszczenie) pomijając wpływ zróżnicowanych oddziaływań środowiskowych (środowiskowych) – np. wody i mrozu, soli drogowej co stanowi istotny, nierozwiązany dotąd problem. Każdy z tych czynników w sposób zróżnicowany degraduje mieszanki usytuowane w warstwach konstrukcji nawierzchni. Proces degradacji uzależniony jest od intensywności oddziaływań zewnętrznych. Każde z nich pojawia się corocznie (szczególnie w zimie) – ich wpływ można potraktować jako kumulacje w całym okresie eksploatacyjnym drogi. Degradacja wywołana oddziaływaniem środowiskowym skraca trwałość zmęczeniową materiału i w efekcie całej konstrukcji. Ponadto wpływ negatywnych czynników zewnętrznych na trwałość uzależniony jest również od rodzaju lepiszcza zastosowanego do mieszanki. Aplikując założenia symulujące stan in-situ (omówione w poprzednich podrozdziałach) przeanalizowano trwałość MMA z uwzględnieniem zróżnicowanych oddziaływań środowiskowych (woda i mróz oraz sól drogowa). Rozważania przeprowadzono na mieszankach A-D zawierających asfalt zwykły (w technologii WMA (A) **35/50 WMA** i HMA (B) **35/50**), modyfikowany (HMA, C, **25/55-60**) oraz wysokomodyfikowany (HMA, D, **25-55/80 HIMA**) celem wykazania wzajemnych różnic. Badania wzbogacono o analizę trzech poziomów zawartości lepiszcza wyrażone przez wskaźnik wypełnienia $K = 2.95, 2.80, 2.65$. Za odniesienie (zestaw referencyjny) przyjęto powszechne podejście – tylko czynnik mechaniczny.

W pierwszej kolejności rozwiązano problem związany z wartością obciążenia laboratoryjnego w $\mu\epsilon$, które należało zaaplikować do testów (przyjęto warunki kontrolowanego odkształcenia). Poziom odkształceń, który występuje pod wpływem obciążenia na spodzie warstw asfaltowych w konstrukcji nawierzchni jest zróżnicowany. Autorzy publikacji [97, 148, 163] wskazują, iż domyślny zakres odkształcenia występującego na spodzie warstw asfaltowych nawierzchni zawiera się w przedziale 70 – 90 $\mu\epsilon$. Jest to oczywiście znaczące uproszczenie, ponieważ wartość odkształcenia rozciągającego, które wystąpi na spodzie warstwy nośnej – podbudowy lub wiążącej, szczególnie w przypadku konstrukcji nawierzchni przeznaczonej na ruch ciężki zależy od wielu czynników – koło pojazdu, ciśnienie w oponach, układ warstw konstrukcji, grubości warstw, rodzaj zastosowanych mieszanek mineralno-asfaltowych, ich skład, parametry mechaniczne tych warstw, współpraca warstw, rozpatrywana pora roku i inne. Analizy tego zagadnienia prowadzone są od ponad 50 lat. Pierwsze próby jego rozwiązania przez zaimplementowanie metody elementów skończonych wykonał Duncan [66]. Nie uwzględniały one jednak pomiarów in-situ. Dopiero w 2017 roku Liu i inni [148] przeprowadzili eksperymenty związane z pomiarem odkształcenia w założonej przez nich konstrukcji nawierzchni (zbudowanej z bardzo sztywnych MMA) w różnych porach roku z uwzględnieniem oddziaływania „typowego” pojazdu ciężkiego z przyczepą. Głębokość konstrukcji, na której dokonywano pomiarów wynosiła 41 cm. Wyniki empiryczne zestawili z modelami (wykorzystujących – *eng. finite element method - FEM*) wykonanymi w 3-ech różnych programach. Na podstawie badań wskazano, iż dla rozpatrywanego przypadku w zimie poziom obciążenia zawierał się w przedziale w przybliżeniu 30 – 40 $\mu\epsilon$, natomiast w lecie 110 – 130 $\mu\epsilon$. Autorzy podkreślili, iż z uwagi na duże fluktuacje panujących warunków błąd oceny może sięgać $\pm 20\%$. Wayessa i inni [268] w 2017 również zajmowali się analizą odkształceń w wybranym układzie warstw konstrukcji na głębokości 5-25 cm (warstwy asfaltowe) wykorzystując modelowanie FEM oraz pomiary polowe. Autorzy wykazali, iż poziom odkształcenia pod zadanym obciążeniem na spodzie warstwy podbudowy może sięgać, aż 237 $\mu\epsilon$ i ok. 190 $\mu\epsilon$ w przypadku warstwy wiążącej. Yaghoubi i inni [314] w 2021 roku

w swojej pracy wykorzystując modelowanie oraz pomiary wykazali, iż poziom odkształceń może wynosić $299 \mu\epsilon$ na grubości - 10 cm oraz $386 \mu\epsilon$ na grubości - 25.4cm. Ustalenie zatem właściwych warunków obciążenia należy do zagadnień trudnych.

Odnosząc się do Polskich warunków technicznych WT-2 [83] nie wyszczególnia się wymagań w zakresie poziomu odkształcenia, które należałoby zastosować do mieszanek typu beton asfaltowy AC. Pomocne odniesienie stanowi wymóg dla innego rodzaju MMA - AC WMS, który narzuca minimalny poziom obciążenia równy $\epsilon_6 = 130 \mu\epsilon$ (dla którego mieszanka musi wykazać min. 1 mln cykli). Dokument nie zawiera informacji o zróżnicowaniu obciążenia w stosunku do rodzaju aplikowanego w MMA asfaltu co stanowi kolejne wyzwanie. Należy wspomnieć, iż w zależności od zastosowanego do mieszanki lepiszcza trwałość zmęczeniowa wyrażona w cyklach jest zróżnicowana. Przyjmując min. wymóg trwałości - 1 mln dla asfaltów zwykłych zadowalający rezultat można osiągnąć dla wartości obciążenia w zakresie $110 - 130 \mu\epsilon$, natomiast w przypadku asfaltów modyfikowanych i wysokomodyfikowanych $190 - 300 \mu\epsilon$ [32, 163]. Trwałość zmęczeniowa MMA na bazie różnych asfaltów wynika m.in. z modyfikacji matrycy polimerem SBS, który „uelastycznia” całą mieszankę. Powoduje ona, iż w procesie zmęczeniowym, głównym odbiorcą impulsu jest nie asfalt, lecz polimer. Ten zaś potrzebuje znacznie więcej czasu, aby ulegnąć procesowi zmęczenia (a następnie zniszczeniu).

Do badań zmęczeniowych zastosowano dwa poziomy odkształcenia. Pierwszy równy $130 \mu\epsilon$ jako pewna analogia do wymagań stosowanych w przypadku mieszanki AC WMS. Poziom ten użyto kontrolnie. Pozwolił on sprawdzić:

1. czy zaprojektowane mieszanki A – D na poziomie $K = 2.95$ (kolejne poziomy optymalizacji K nie były analizowane) będą trwałe zmęczeniowo przekraczając minimalną liczbę cykli wynoszącą milion (ϵ_6) (korelacja badań laboratoryjnych ze stanem spękań nawierzchni - badania LCPC [95, 286]),
2. czy w przypadku asfaltów modyfikowanych i wysokomodyfikowanych (HIMA) istnieje wrażliwość na ten poziom obciążenia (czy po prostu będą ulegać zmęczeniu).

Drugi wynosił $200 \mu\epsilon$. Został on zaimplementowany do kompleksowych rozważań nad trwałością zmęczeniową zgodnie z wcześniej opisanym planem badawczym. Docelowe zaaplikowanie tej wartości umożliwiło:

1. przedstawienie mechanizmu badawczego uwzględniającego regenerację oraz oddziaływania środowiskowe w ocenie trwałości zmęczeniowej mieszanki (dalsze rozdziały),
2. przyspieszenie badań (pojedyncza próbka była testowana nawet kilka dni),
3. uwzględnienie przeznaczenia (dwie warstwy wiążąca i podbudowa),
4. uwzględnienie wystąpienia w nawierzchni ekstremalnych warunków wywołanych ponadnormatywnym obciążeniem/ami i wpływami środowiskowymi (woda i mróz, sól drogowa),
5. przełamanie poziomu obciążenia, dla którego asfalty z modyfikacją matrycy nie ulegały zmęczeniu.

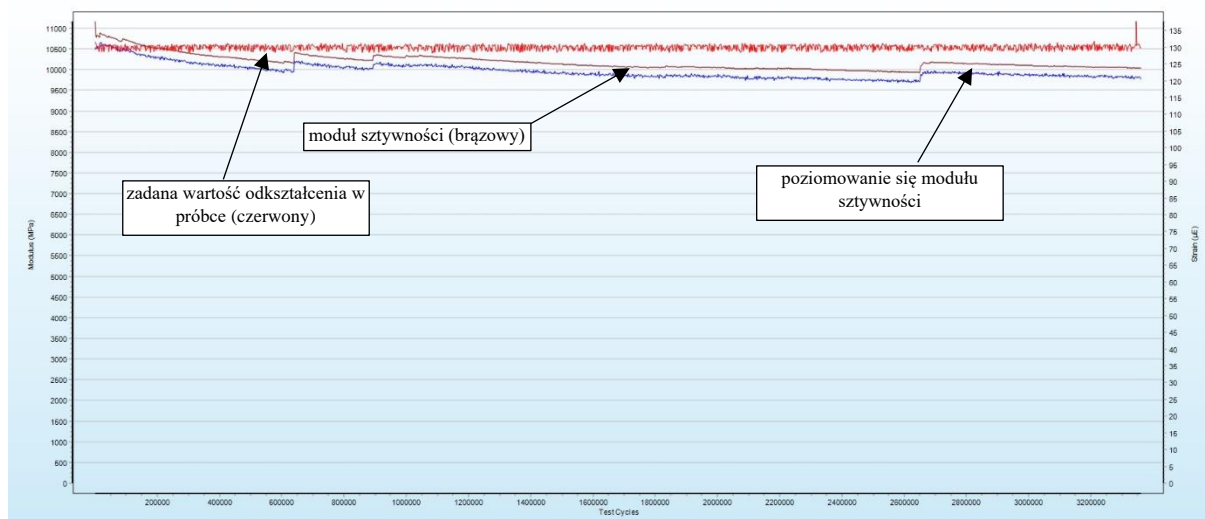
Badania zmęczeniowe mieszanek A – D na trzech poziomach zawartości lepiszcza wyrażonych przez wskaźnik wypełnienia K (2.95, 2.80 i 2.65), przeprowadzono w oparciu o normę PN-EN 12697-24:2018-08 [222]. Początkowe wartości jak np. początkowy moduł sztywności zostały ustalone w 100 cyklu badania.

Na podstawie przeprowadzonych badań wyznaczono m.in:

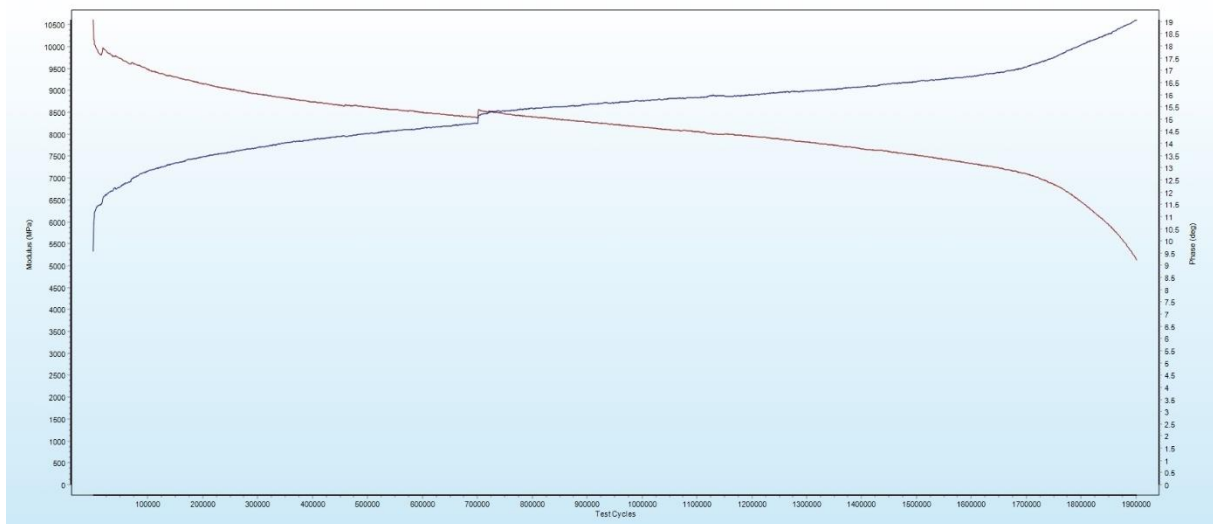
1. początkową i końcową wartość modułu sztywności,
2. trwałość zmęczeniową według kryterium $E_{0.50}^*$,
3. wpływ czynników środowiskowych na trwałość wyrażonych przez procentową jej zmianę odniesioną do zestawu referencyjnego,
4. wzajemne korelacje stosując model regresji liniowej.

Do testów wykorzystano próbki z wcześniej omówionego rozdziału. Przyjęto dopuszczalny rozrzut wyników trwałości zmęczeniowej wyrażonej w cyklach wynoszący max. $\pm 10\%$ od wartości średniej trzech podobnych co do wyniku próbek. Próg rozrzutu przyjęto na podstawie doświadczeń własnych związanych ze stosowalnością tej metody (czteropunktowego zginania (4-PB)). Badane zaroby mieszanek A-D wykazały wysoką powtarzalność oznaczeń na przypadek/mieszanekę. Zrezygnowano z analiz statystycznych. Skoncentrowano się na zbadaniu omawianych zjawisk i wpływów.

Z uwagi na zbyt dużą ilość danych, w dalszej części tego podrozdziału wyniki przedstawiono i omówiono zbiorczo na zarób/receptę jako średnią z 5 wiążących oznaczeń. w ten sposób poprawiono czytelność pozyskanych danych, usprawniono proces komentowania oraz znajdowania wzajemnych korelacji. Przykładową grafikę pozyskaną z programu „Testlab” ukazującą wynik badania zmęczeniowego przy poziomie obciążenia $130 \mu\epsilon$ próbki z serii D2 (D_02_01) (z brakiem wrażliwości na to obciążenie) w omawianym teście zaprezentowano na Rys. 78 natomiast przykładowy wynik zmian wartości modułu i kąta fazy przy poziomie obciążenia $200 \mu\epsilon$ próbki z serii C2 (C_02_05) przedstawiono na Rys. 79.



Rys. 78: Przykładowy rezultat serii D2 na poziomie obciążenia $130 \mu\epsilon$



Rys. 79: Przykładowy rezultat serii C2 na poziomie obciążenia $200 \mu\epsilon$

Pierwsze badania zmęczeniowe mieszanek A - D wykonano tylko dla wskaźnika wypełnienia $K = 2.95$ stosując poziom obciążenia $130 \mu\epsilon$. Zaaplikowano kryterium spadku początkowej wartości modułu sztywności o 50% - $E_{0\ 50\%}^*$ oraz przyjęto wartość minimalną 1.0 mln cykli jako warunek konieczny do spełnienia, by wykonać docelowe badania na poziomie wymuszenia $200 \mu\epsilon$. Rezultaty badań zaprezentowano w Tab. 31.

Tab. 31: Zbiorne wyniki trwałości zmęczeniowej mieszanek A - D poziom $K = 2.95$

recepta / parametr	poziom odkształcenia $\mu\epsilon$ [-]	E_p^* [MPa]	E_k^* [MPa]	$E_{0\ 50\%}^*$ [cykle]	Czy mln cykli przekroczone?	komentarz
A2	$130 \mu\epsilon$	9182	4591	3428353	TAK	
B2	$130 \mu\epsilon$	9531	4765	3512117	TAK	
C2	$130 \mu\epsilon$	9743	8201	3294226	TAK	brak spadku wartości modułu, badanie przerwane
D2	$130 \mu\epsilon$	10024	9606	3320440	TAK	brak spadku wartości modułu, badanie przerwane

Na podstawie przedstawionych danych z powyższej tabeli wynika, iż każda mieszanka na poziomie wskaźnika wypełnienia $K = 2.95$ zapewnia wysoką trwałość zmęczeniową w zadanych warunkach badania. Materiały A i B na bazie asfaltów zwykłych osiągnęły kryterium zmęczeniowe uzyskując wynik ponad 3 milionów cykli, natomiast dla C i D poziom obciążenia był za niski, aby zmęczyć badane próbki skutkując zatrzymaniem się modułu na określonym poziomie. Jeżeli ta sytuacja trwała dłużej niż 0.5 mln cykli badanie zakańczano. Spoglądając na pozyskane rezultaty Zadany poziom odkształcenia $130 \mu\epsilon$ zapewniał znaczący – ponad 3-krotny zapas trwałości zmęczeniowej w stosunku do minimalnego progu 1.0 mln cykli tożsamego z wystąpieniem 50% spękań w nawierzchni. Oznacza to, iż pierwotnie obrany poziom K okazał się słuszny w kontekście optymalizacji zawartości lepiszcza w zaprojektowanych MMA. Warto również podkreślić, iż dla przedstawionych oznaczeń trwałościowo najlepiej wypadła mieszanka D, następnie C, B i na końcu A (WMA). w przypadku zestawiania technologii HMA wypadła ona o ok. 4% lepiej niż WMA (mieszanki niemal identycznie trwałościowo na tym poziomie obciążenia). Należy wspomnieć, iż te badania należały do „pilotażowych”. Pełna ocena i właściwe trendy zostały przedstawione dalej dla poziomu wymuszenia $200 \mu\epsilon$.

Następnie przeprowadzono kompleksowe badania zmęczeniowe. Amplituda obciążenia wynosiła $200 \mu\epsilon$. Poziom okazał się skuteczny w przypadku mieszanek C – D (z asfaltami o zmodyfikowanej matrycy asfaltowej polimerem SBS). Tabelę ze zbiorczymi wynikami w zakresie wartości modułu sztywności, trwałości zmęczeniowej i zmian uwzględniających oddziaływanie środowiskowe (woda i mróz) oraz chemiczne (sól drogowa) wzbogaconą o informacje związane z zawartością wolnej przestrzeni i wskaźnika *ITSR* (niezbędnych do analiz wzajemnych korelacji) przedstawiono w Tab. 32.

Tab. 32: Zbiorcze wyniki testów zmęczeniowych ($200 \mu\epsilon$) mieszanek A - D dla trzech poziomów wskaźnika wypełnienia *K*

recepta / parametr	<i>K</i> [-]	<i>A_k</i> [%]	<i>A_m</i> (B) [%]	<i>V_m</i> [%]	<i>ITSR</i> [%]	wariant	<i>E_p</i> * [MPa]	<i>E_k</i> * [MPa]	<i>E_{0.50%}</i> * [cykle]	% $\Delta E_{0.50\%}$ [%]
A2	2.95	4.42%	4.23%	4.10%	87%	ref	9811	4906	311340	
						wim	8194	4097	239465	-23.09%
						sd	8638	4319	256645	-17.57%
A3	2.80	4.20%	4.03%	5.08%	84%	ref	10959	5480	217004	
						wim	9707	4853	165402	-23.78%
						sd	9793	4897	176493	-18.67%
A4	2.65	3.97%	3.82%	6.22%	80%	ref	10759	5380	149994	
						wim	8311	4156	107053	-28.63%
						sd	8882	4441	117192	-21.87%
B2	2.95	4.42%	4.23%	4.20%	90%	ref	9900	4950	411640	
						wim	8655	4327	322025	-21.77%
						sd	9027	4513	395943	-3.81%
B3	2.80	4.20%	4.03%	4.44%	87%	ref	10870	5435	296816	
						wim	9054	4527	224923	-24.22%
						sd	10156	5078	279894	-5.70%
B4	2.65	3.97%	3.82%	5.00%	84%	ref	10653	5326	161401	
						wim	7974	3987	115563	-28.40%
						sd	9887	4944	145906	-9.60%
C2	2.95	4.42%	4.23%	4.00%	92%	ref	9935	4968	1456839	
						wim	9677	4838	1398566	-4.00%
						sd	9756	4878	1436444	-1.40%
C3	2.80	4.20%	4.03%	5.08%	90%	ref	10015	5007	928584	
						wim	9274	4637	810726	-12.69%
						sd	9594	4797	879084	-5.33%
C4	2.65	3.97%	3.82%	5.59%	87%	ref	9985	4993	497310	
						wim	8425	4213	399351	-19.70%
						sd	9173	4587	455498	-8.41%
D2	2.95	4.42%	4.23%	4.34%	95%	ref	9310	4655	1958796	
						wim	9129	4565	1928239	-1.56%
						sd	9194	4597	1938425	-1.04%
D3	2.80	4.20%	4.03%	4.97%	92%	ref	10460	5230	1032285	
						wim	10100	5050	972412	-5.80%
						sd	10021	5010	1009574	-2.20%
D4	2.65	3.97%	3.82%	5.77%	89%	ref	10208	5104	543505	
						wim	9089	4545	505364	-7.02%
						sd	9511	4756	506251	-6.85%

W Tab. 32 zastosowano następujące oznaczenia:

K – wskaźnik wypełnienia [-],

A_k – procentowa zawartość lepiszcza dodawanego do mieszanki mineralnej (wagowo) [%],

A_m – procentowa zawartość lepiszcza dodawanego do MMA (wagowo) [%],

V_m – zawartość wolnych przestrzeni w MMA (objętościowo) [%],

ITSR – wskaźnik odporności materiału na działanie wody i mrozu w badaniu pośredniego rozciągania [%],

ref – zestaw referencyjny,

wim – zestaw uprzednio obciążony wodą i mrozem,

sd – zestaw uprzednio obciążony solą drogową (roztworem solanki),

E_p^* – początkowa wartość modułu sztywności wyznaczona w 100-cyklu badania [MPa],

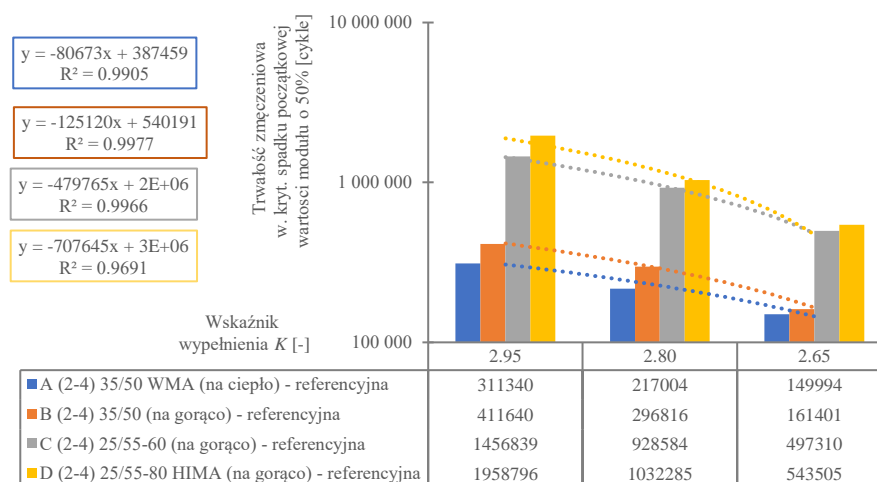
E_k^* – wartość modułu sztywności po osiągnięciu kryterium zmęczeniowego (spadku początkowej wartości modułu o 50%) [MPa],

$E_{0\ 50\%}^*$ – trwałość zmęczeniowa wyrażona w cyklach uzyskana po spadku początkowej wartości modułu sztywności ustalonego w 100-cyklu badania o 50% [cykle],

$\% \Delta E_{0\ 50\%}^*$ – degradacja mieszanki wyrażona jako procentowa zmiana trwałości zmęczeniowej wywołana wcześniejszym obciążeniem próbek wpływami środowiskowymi (woda i mróz) lub chemicznymi (sól drogową) w stosunku do zestawu „referencyjnego” (obciążonego tylko i wyłącznie wpływem mechanicznym) [%].

Nawiązując do wartości przedstawionych w Tab. 32 wyszczególniono 17 obserwacji.

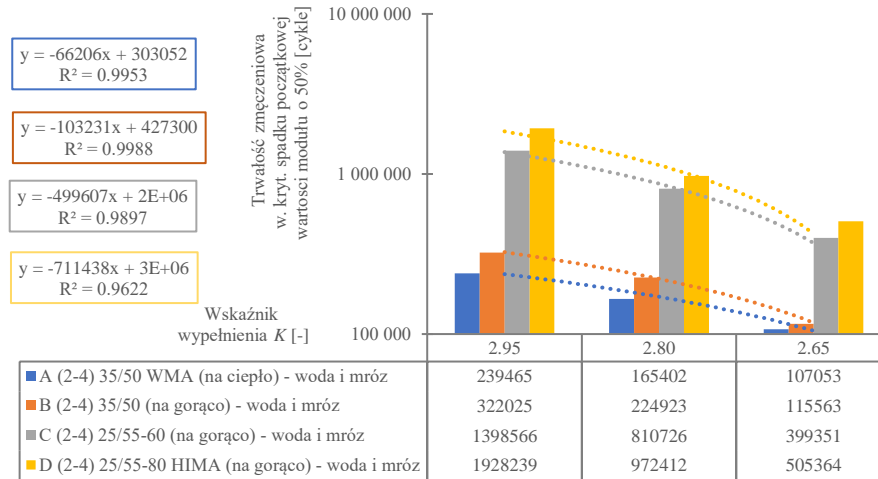
- Oceniając mieszanki A – D z zestawu referencyjnego, niezależnie od poziomu wskaźnika wypełnienia K **najwyższą trwałość zmęczeniową** w cyklach osiąga **D (asfalt 25/55-80 HIMA)**, następnie C (25/55-60), B (35/50) i A (35/50 WMA). Różnice są znaczące – dochodzą nawet **do 6 razy** (materiał D vs A, $K = 2.95$) i zmniejszają się ze spadkiem zawartości lepiszcza w mieszance - **do 3.6 razy** (porównanie D i A, $K = 2.65$). Na podstawie obserwacji dostrzega się, iż **modyfikacja matrycy asfaltowej** polimerem SBS, **znacząco zwiększa trwałość zmęczeniową** testowanych MMA. Ponadto im, modyfikacja jest wyższa tym lepsze rezultaty wyrażone przyrostem trwałości zmęczeniowej otrzymuje się. Porównując mieszankę D względem C, przyrost trwałości wyniósł **ponad 35%** w przypadku $K = 2.95$, natomiast dla najniższej badanej zawartości lepiszcza w MMA $K = 2.65$ spadł do **około 9 %**.
- We wszystkich mieszankach A – D **zmniejszanie zawartości lepiszcza** wywołuje **spadek trwałości zmęczeniowej**. Różnice w cyklach z poziomu na poziom K są istotne – **spadek** pomiędzy badanymi poziomami lepiszcza dochodzi nawet **do 53%**. Ponadto **największą wrażliwość na zmianę zawartości asfaltu** wykazała MMA D – z **asfaltem wysokomodyfikowanym** (D z $K = 2.95$ na 2.80). Graficzna ilustracja zmian trwałości zmęczeniowej zestawu referencyjnego od wskaźnika K (zawartość lepiszcza) w skali logarytmicznej została zaprezentowana na Rys. 80.



Rys. 80: Zmiana trwałości zmęczeniowej zestawu referencyjnego mieszanek A - D przy różnych poziomach K

Z rysunku wynika, iż pomimo istotnych zmian trwałości wywołanych redukcją zawartości asfaltu o stałą wartość wskaźnika wypełnienia $\Delta K = 0.15$ zbadane mieszanki można z powodzeniem opisać liniowym modelem regresji, charakteryzującym się bardzo dobrym - współczynnik determinacji R^2 wynosi $R^2 > 0.96$. Pozyskany model pozwala skutecznie przewidywać trwałość zmęczeniową dla innych wartości K mieszanek A-D (poziom obc. $200 \mu\epsilon$). Stwierdza się, iż poprawny dobór składu mieszanki oraz właściwe założenia technologiczne pozwalają pozyskać mieszanki, które zachowują się liniowo ze względu na trwałość zmęczeniową.

3. Uwzględniając wysoki poziom obciążenia ($200 \mu\epsilon$) mieszanki na bazie asfaltów modyfikowanych i wysokomodyfikowanych w odpowiedniej konfiguracji parametrów objętościowych pozwalają uzyskać zadowalającą trwałość zmęczeniową (min. 1 mln cykli). Pozostałe materiały (MMA, asfalty zwykłe) nie są w stanie osiągnąć nawet połowy wymaganego limitu przy tym poziomie wymuszenia. Na podstawie tych obserwacji sugeruje się stosowanie mieszanek z polimerem na drogi o wyższych kategoriach ruchowych KR 5-7 z uwagi na ich wysoką trwałość. Pozostałe mieszanki z asfaltami zwykłymi zaleca się stosować do dróg o niskim natężeniu ruchowym.
4. Zestawiając ze sobą mieszanki (B, C, D) zestawu referencyjnego wewnątrz technologii HMA (na gorąco) najgorzej wypada **mieszanka referencyjna B** (asfalty zwykły 35/50). Osiąga ona **znaczaco niższą trwałość zmęczeniową** w cyklach. **Różnice MMA B** względem mieszanek na bazie asfaltu modyfikowanego C i wysokomodyfikowanego D wahają się **od 4.75 razy (D) do 3.53 razy (C) mniej** ($K = 2.95$) oraz **od 3.36 razy (D) do 3.08 razy (C) mniej** ($K = 2.65$). Stwierdza się, iż w przy niższych poziomach zawartości lepiszcza rozbieżności zmniejszają się, jednak nie w sposób znaczący. - asfalty modyfikowane są bezkonkurencyjne względem zwykłych, jeżeli chodzi o trwałość.
5. Trwałość mieszanek wykonanych w technologii **na gorąco B** (HMA) **jest wyższa** względem tych **na ciepło A** (WMA) (zestaw referencyjny). Różnice są **istotne i zależą od zawartości lepiszcza**. Trwałość MMA B jest wyższa od A o **8%** ($K = 2.65$) i zwiększając się **do 25%** przy $K = 2.95$ – **im większa zawartość lepiszcza tym rozbieżności stają się większe**.
6. **Oddziaływanie wody i mrozu wyraźnie obniża trwałość zmęczeniową wszystkich mieszanek A – D**. Zmiany są tym **większe im, zawartość lepiszcza w mieszance jest mniejsza**. Graficzną ilustrację zmian trwałości w cyklach mieszanek A-D przedstawiono na Rys. 81.



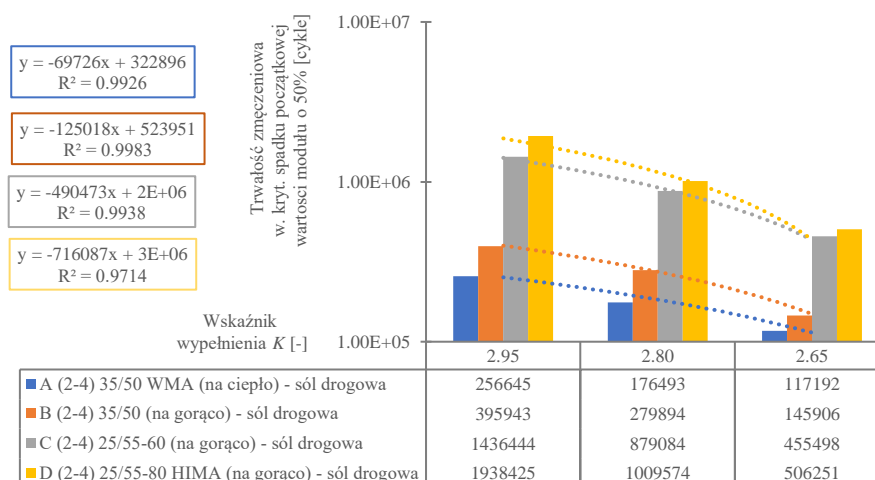
Rys. 81: Zmiany trwałości zmęczeniowej mieszanek A-D w cyklach poddanych oddziaływaniu wody i mrozu

Na podstawie tabeli, Rys. 81 i zastosowanego w nim modelu regresji charakteryzującego się bardzo dobrym dopasowaniem ($R^2 \sim 1$) stwierdza się, iż **degradacja** mieszanek wywołana **oddziaływaniem wody i mrozu** zmienia się **liniowo**, a jej wartość zależy od rodzaju i zawartości asfaltu w MMA. Trwałość zmęczeniową MMA A - D na innych poziomach zawartości asfaltu w dalszym ciągu można skutecznie wyznaczyć liniowym modelem regresji.

7. Spośród wszystkich zbadanych materiałów **najmniejszą wrażliwość na działanie wody i mrozu** wykazała mieszanka **D z HIMA** – spadek trwałości o około **1.56%** przy $K = 2.95$ i **7.02%** przy $K = 2.65$. Następną w kolejności jest **C**, dla której zmniejszenie się trwałości wyniosło około **4.00%** przy $K = 2.95$ i aż **19.70%** przy $K = 2.65$. Kolejno wypadła mieszanka **B** spadek trwałości o około **21.77%** przy $K = 2.95$ i **28.40%** przy $K = 2.65$. Na końcu uklasyfikowała się mieszanka **A** spadek trwałości o około **23.09%** przy $K = 2.95$ i **28.63%** przy $K = 2.65$. Stwierdza się, iż te MMA na bazie asfaltów zwykłych wykazują znaczącą podatność na działanie wody i mrozu. Odradza się stosowania tego typu mieszanek do konstrukcji budowanych w klimacie zimnym lub o niskich wahań temperatury.
8. **Modyfikacja matrycy asfaltowej** polimerem SBS pozwala **skutecznie obniżyć wpływ degradacji** wywołanej oddziaływaniem **wody i mrozu** na mieszanki. Analiza porównawcza MMA C i D wykazała, iż mieszanki z asfaltem wysokomodyfikowanym charakteryzują się **od 2.56 do 2.81** razy wyższą odpornością na działanie wody i mrozu niż te z modyfikowanym. Stwierdza się, iż **im wyższy poziom zawartości polimeru w matrycy tym większą odporność na wodę i mróz będzie wykazywać mieszanka**.
9. Spadek **trwałości** w MMA A – D wywołany **oddziaływaniem wody i mrozu nie jest bez znaczenia**. Waha się **od 1.56% (D2) do 28.63% (A4)**! Należy dołożyć starań, aby **uwzględnić** ten czynnik w laboratoryjnych **badaniach zmęczeniowych** i odpowiednich **kryteriach zmęczeniowych** stosowanych w projektowaniu konstrukcji. Porównując wyniki % spadku trwałości i rezultatami *ITSR* dostrzega się współzależności. Wzajemne korelacje pomiędzy wynikami zostaną przeanalizowane w dalszej części tego podrozdziału.
10. **Wewnątrz technologii na gorąco (HMA)** – B, C i D, mieszanka **D** (asfalt wysokomodyfikowany) wykazuje **około 14** krotnie ($K = 2.95$) i **około 4** krotnie ($K = 2.65$) oraz **C** (asfalt modyfikowany) - **około 5** krotnie ($K = 2.95$) i **około 1.44** krotnie

($K = 2.65$) **mniejszy** spadek trwałości zmęczeniowej wywołany oddziaływaniem wody i mrozu względem referencyjnej – **B** asfalt zwykły. Mieszanki **C** i **D** są zdecydowanie trwalsze względem referencyjnej **B**, czyniąc je uniwersalnymi do stosowania praktycznie na każdej co do natężenia drodze, szczególnie w miejscach o trudnych warunkach gruntowo-wodnych narażonych na niską temperaturę.

11. **Porównując** materiał wykonany w **różnych technologiach** - mieszanki w **technologii WMA (A)** charakteryzują się **nieznacznie mniejszą trwałością zmęczeniową** oraz **większą degradacją** w warunkach **obciążenia wody i mrozu** względem mieszanki referencyjnej **B** (na gorąco). Zaobserwowano podobne trendy na każdym poziomie zbadanej zawartości lepiszcza. Mieszanka referencyjna jest średnio o 9% trwalsza od tej wykonanej na ciepło (WMA). Stwierdza się, iż technologia WMA może być alternatywą dla HMA przy drogach o niskim natężeniu ruchowym i trudniejszych warunkach środowiskowych. Ponadto podkreśla się, iż zbadany spadek trwałości wywołanej wodą i mrozem zawiera się w przedziale **21.77% (B2) a 28.63% (A4)**, co stanowi średnio **ok. 25 % trwałości zmęczeniowej**. Wpływ wody i mrozu należy do znaczących i wymaga uwzględnienia trwałości zmęczeniowej mieszanek, szczególnie tych na bazie asfaltów zwykłych.
12. Oddziaływanie soli drogowej **zmniejsza trwałość zmęczeniową** mieszanek A-D. Zmiany są tym **większe im, zawartość lepiszcza** w mieszance jest **mniejsza**. Graficzną ilustrację zmian trwałości w cyklach mieszanek A-D przedstawiono na Rys. 82



Rys. 82: Zmiany trwałości zmęczeniowej mieszanek A-D w cyklach pododdziaływaniu soli drogowej

Na podstawie tabeli, Rys. 82 i zastosowanego w nim modelu regresji charakteryzującego się bardzo dobrym dopasowaniem ($R^2 \sim 1$) stwierdza się, iż **degradacja** mieszanek wywołana **oddziaływaniem soli drogowej** zmienia się **liniowo**, a jej wartość zależna jest **od rodzaju i zawartości asfaltu w MMA**. Trwałość zmęczeniową MMA a - D na innych poziomach zawartości asfaltu w dalszym ciągu można skutecznie wyznaczyć liniowym modelem regresji.

13. Z tabeli oraz Rys. 82 odczytano, iż **największą odporność na degradację** wywołaną **solą drogową** wykazała mieszanka **D** na bazie asfaltu wysokomodyfikowanego (25/55-80 HIMA) – **spadek o 6.85% (D4)**. Następnie wypadła mieszanka **C** (asfalt modyfikowany) – **spadek o 8.41% (C4)** (22% mniejszą od D). Kolejno **B** (referencyjna, asfalt zwykły) – **spadek o 9.60% (B4)** (40% mniejszą od D) i na końcu **A** (asfalt zwykły do technologii na ciepło) - **spadek aż o 21.87% (A4)** (319% mniejszą od D). Stwierdza się, iż gwałtowny spadek trwałości mieszanki **A** względem **B** wynika z **zawartości**

dodatków wykorzystywanych do produkcji MMA w technologii na ciepło (WMA). Zakłada się, iż lepiszczsze wzbogacone takimi substancjami łatwiej wchodzi w reakcje z solą drogową doprowadzając do nadmiernej degradacji mieszanki. Na podstawie obserwacji nie zaleca się aplikacji mieszanek WMA do środowisk szczególnie narażonych na stosowanie środków odladzających.

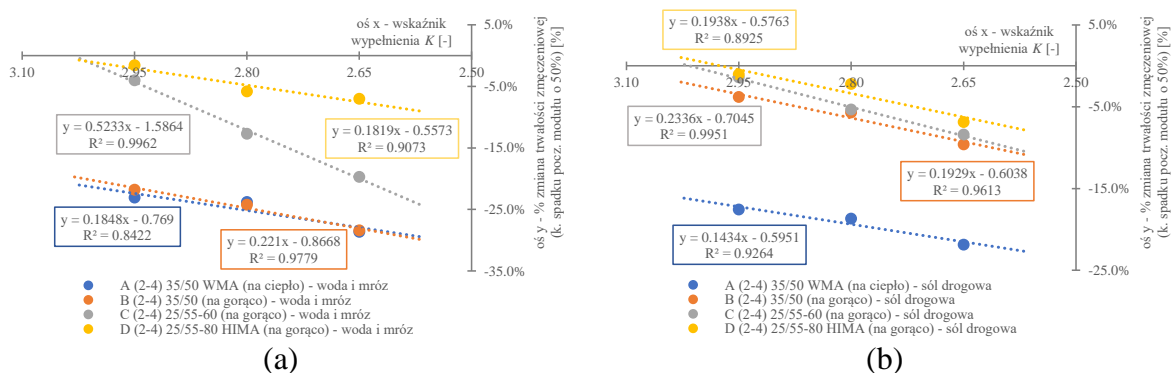
14. Negatywne **oddziaływanie soli drogowej** na trwałość zmęczeniową MMA **należy do istotnych. Spadek trwałości** wyniósł **od 1.04% (D2) do 21.87% (A4)**. Stwierdza się, iż oddziaływanie należy uwzględnić w projektowaniu technologicznym mieszanek i mechanistyczno-empirycznym konstrukcji nawierzchni.
15. Zaobserwowano, iż **wpływ soli drogowej** na zbadane MMA **jest słabszy** względem **oddziaływania wody i mrozu**. Rozbieżności wynikają m.in. z rodzaju i zawartości asfaltu. **Degradacja** wywołana **solą** względem **wody i mrozu** w skrajnych przypadkach: A (WMA) – jest około **25% słabsza (A4)**, B - jest **około 33% słabsza (B4)**, C - jest **około 42% słabsza (C4)** i D - jest **około 3% słabsza (D4)** (porównywalna). Analizowane asfalty zwykle zastosowane w mieszankach wykazują większą wrażliwość na negatywne oddziaływanie wody i mrozu niż na sól drogową, podobnie modyfikowane, natomiast wysokomodyfikowane - zbliżoną.
16. Zestawiając ze sobą **mieszanki** wykonane w **technologii na gorąco (B, C i D)**, na podstawie pozyskanych wyników zaobserwowano, iż **mieszanki ze zmodyfikowaną matrycą asfaltową polimerem SBS** cechują się znacznie **wyższą odpornością** na oddziaływanie **soli drogowej niż mieszanka referencyjna** - prawie **4-krotną** przy $K = 2.95$ (D2 względem B2) i około **1.5 krotną** przy $K = 2.65$ (D4 względem B4). Ponadto, stwierdzono, iż **im wyższy stopień modyfikacji matrycy polimerem** tym **degradacja mieszanki** wywołana czynnikiem soli jest **mniejsza**. Nawet o **około 34% mniejsza** (D2 względem C2) i **ok. 22% mniejsza** (D4 względem C4). Różnice zanikają wraz ze spadkiem zawartości lepiszcza w MMA. Na podstawie wyników stwierdzono, iż **zastosowanie** mieszanek z **asfaltem wysokomodyfikowanym** pozwala zabezpieczyć mieszankę i całą konstrukcję przed negatywnymi skutkami oddziaływania soli drogowej. Zaleca się aplikację tego typu mieszanek do np. dróg wyższych klas, dróg w terenach górzystych, w których podczas zimy prowadzone są częste zabiegi utrzymaniowe (posypywanie nawierzchni solą).
17. Zestawiając ze sobą **mieszanki** wykonane w **różnych technologiach na ciepło (A) i na gorąco (B)**, MMA w **technologii na gorąco B (35/50)** charakteryzuje się **wyższą odpornością** na degradację wywołaną solą niż ta **na ciepło A (35/50 WMA)**. Różnice dochodzą nawet do **ok. 4.6 razy** ($K = 2.95$) i zmniejszają się do około **2.27 razy** ($K = 2.65$). w przypadku w technologii WMA spadek trwałości zmęczeniowej **mieszanki A** poddanej oddziaływaniu soli stanowi prawie **25% referencyjnej trwałości tej MMA**. Stwierdzono, że stosowanie mieszanki WMA do konstrukcji narażonych na nadmierne oddziaływanie środków odladzających (np. w górach lub drogach o dużym natężeniu ruchowym) jest mocno ograniczone. w takich przypadkach zaleca się aplikację asfaltu zwykłego, którego degradacja wywołana solą jest o połowę mniejsza.

Analizując dane w Tab. 32 zauważono, iż pomiędzy: wskaźnikiem wypełnienia K zawartością wolnych przestrzeni V_m , wskaźnikiem $ITSR$, a degradacją opisaną przez $\% \Delta E_{0.50}^*$ (zarówno dla oddziaływania środowiskowego i chemicznego) w mieszankach A - D dostrzega się istniejące współzależności. Na podstawie zastosowanego modelu regresji liniowej ustalono poziom korelacji korzystając z współczynnika determinacji R^2 . Przyjęto analogiczne poziomy dopasowania linii trendu jak w poprzednich podrozdziałach (podrozdział 5.2.1).

Wykres zmian parametrów przedstawiono na rysunkach w następującej kolejności:

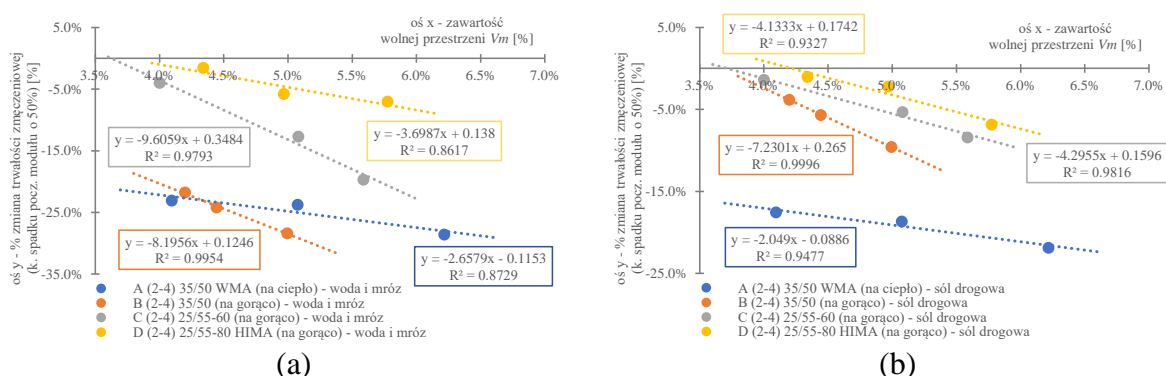
1. wykres zmian wskaźnika wypełnienia K od $\% \Delta E_{0.50}^*$ (% zmiany trwałości wywołanej określonym czynnikiem – Rys. 83,
2. wykres zmian zawartości wolnej przestrzeni V_m od $\% \Delta E_{0.50}^*$ (% zmiany trwałości wywołanej określonym czynnikiem – Rys. 84,
3. wykres zmian odporności na wodę i mróz (wskaźnik $ITSR$) od $\% \Delta E_{0.50}^*$ (% zmiany trwałości wywołanej określonym czynnikiem – Rys. 85,
4. wykres zmian modułu sztywności (rozdział 5.3.3) $\Delta E_{\%}^*$ od $\% \Delta E_{0.50}^*$ (% zmiany trwałości wywołanej określonym czynnikiem – Rys. 86.

Celem uzyskania przejrzystości przekazu, wykres zależności czynnika środowiskowego i chemicznego, przedstawia się jeden obok drugiego.



Rys. 83: Wykres zmian wskaźnika wypełnienia K od procentowych zmian trwałości zmęczeniowej czynnika: (a) środowiskowego (woda i mróz) (b) chemicznego (sól drogową)

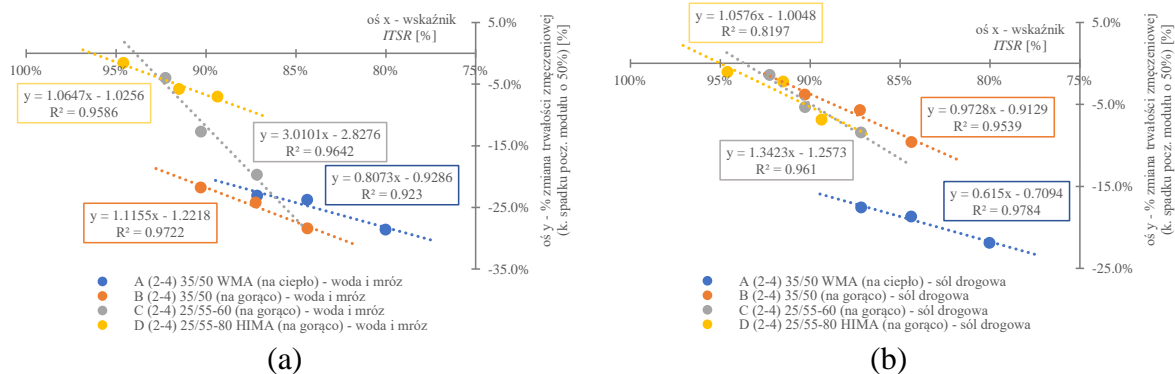
Analizując Rys. 83, wszystkie mieszanki A – D dla których zastosowano modele regresji liniowej zarówno w przypadku oddziaływania czynnika środowiskowego (a) jak i chemicznego (b) charakteryzują się dobrym (mieszanka A (a) – $R^2 = 0.8422$ i (b) – $R^2 = 0.825$) oraz bardzo dobrym (reszta) $R^2 > 0.90$ dopasowaniem. Na podstawie obserwacji można stwierdzić, iż główną cechą wpływającą na spadek trwałości zmęczeniowej MMA pod wpływem badanych oddziaływań jest rodzaj i zawartość lepiszcza. Kąty nachylenia linii trendu wykresu (a) mieszanek A, B i D są do siebie zbliżone, a krzywe rozsunęte – na tej podstawie można wskazać najtrwalszą mieszankę (lepiszcze) - D. Wyjątkiem jest materiał C, charakteryzujący się około 2.5 większym nachyleniem – prędkość spadku trwałości przy oddziaływaniu woda i mróz jest większa – przy innych mniejszych poziomach wskaźnika wypełnienia K prognozuje się, iż mieszanka C okaże się mniej trwała niż np. A i B przecięcie prostych modelu. Podobne wnioski wyciągnięto w stosunku do oddziaływania chemicznego (b). Linie trendu wszystkich mieszanek (A – D) są do siebie równoległe – prędkość spadku wyrażona przez wartość kąta nachylenia wykresu jest podobna, natomiast rozsunięcie określa jakościową odporność materiału na oddziaływanie soli drogowej (trwałość zmęczeniowa).



Rys. 84: Wykres zmian zawartości wolnej przestrzeni V_m od procentowych zmian trwałości zmęczeniowej czynnika: (a) środowiskowego (woda i mróz) (b) chemicznego (sól drogową)

Oceniając zmiany zawartości wolnej przestrzeni mieszanek od spadku trwałości zmęczeniowej Rys. 84, wszystkie mieszanki A – D dla których zastosowano modele regresji liniowej zarówno w przypadku oddziaływania czynnika wody i mrozu (a) oraz soli drogowej (b) charakteryzują się dobrym (mieszanka A (a) – $R^2 = 0.8729$, D (a) – $R^2 = 0.8617$) oraz bardzo dobrym (reszta) $R^2 > 0.90$ dopasowaniem. Na podstawie obserwacji można stwierdzić, iż główną cechą wpływającą na degradację MMA pod wpływem działalności czynnika środowiskowego i chemicznego jest zawartość wolnej przestrzeni spowinowacana z zawartością lepiszcza (zależna od niej). Do istotnych elementów obydwu wykresów (a i b) należą kąty nachylenia linii trendu. w przypadku mieszanek B, C (wykres (a)) są one podobne, a linie do siebie równoległe i rozsunięte - prędkość spadku trwałości od omawianych czynników jest w przybliżeniu jednakowa, a rozsuniecie linii wskazuje na mieszankę cechującą się większą odpornością na te oddziaływanie. Podobne wnioski wyciąga się dla mieszanek A i D, których kąt nachylenia jest bardzo mały, a krzywa niemal równoległa do osi poziomej (brak prędkości zmian). Stwierdzono, iż w przypadku oddziaływania wody i mrozu niezależnie od wskaźnika wypełnienia K spadek trwałości jest w przybliżeniu stały.

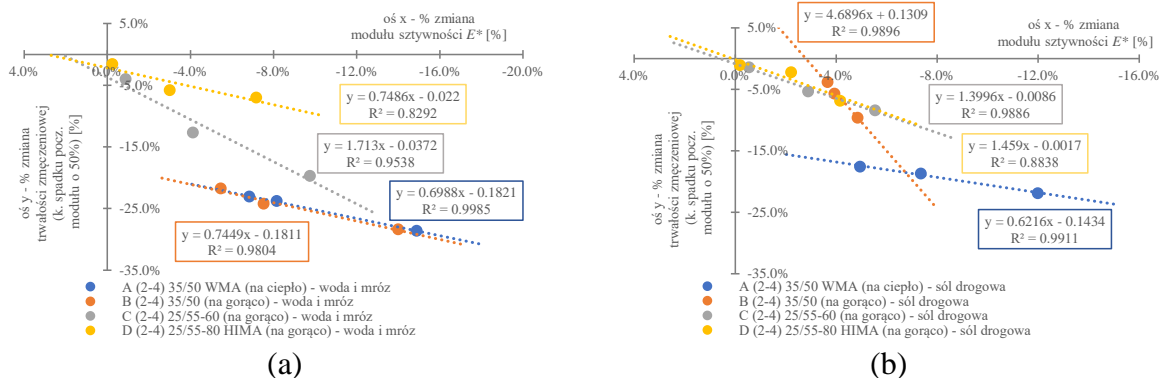
W przypadku oddziaływania czynnika chemicznego trend zmian wszystkich MMA jest podobny jak dla wody i mrozu. Linie modelu są względem siebie rozsunięte – jakościowe określenie bardziej odpornej mieszanki na spadek trwałości wywołanej działaniem soli. Mieszanki C i D charakteryzują się niemal identycznym kątem nachylenia (ta sama prędkość zmian) i rozsunięciem (mieszanka D odporniejsza), który jest o około 75% mniejszy od kąta nachylenia mieszanki B i 50% większy od A. Ponadto zauważono, iż 3 mieszanki (B, C i D) wykazały degradację na poziomie nie przekraczającym 10%. Mieszanka A – dla niej poziom przekroczył aż 20% - mieszanki na ciepło wykazują wrażliwość na działanie soli. Na podstawie wcześniejszych obserwacji i obecnych trendów, stwierdza się, że im mieszanka lepiej się układa i zagęszcza (mały przyrost V_m z poziomu na poziom K) tym wysokość degradacji na oddziaływanie soli jest większa.



Rys. 85: Wykres zmian wskaźnika *ITSR* od procentowych zmian trwałości zmęczeniowej czynnika: (a) środowiskowego (woda i mróz) (b) chemicznego (sól drogowa)

Spoglądając Rys. 85, wszystkie modele regresji liniowej mieszanek A – D w odniesieniu do spadku trwałości zmęczeniowej wywołanej oddziaływaniem wody i mrozu (a) i soli drogowej (b) charakteryzują się dobrym (mieszanka D (b) – $R^2 = 0.8197$) oraz bardzo dobrym (reszta) $R^2 > 0.90$ dopasowaniem. Na podstawie wykonanych badań dla wszystkich 4 mieszanek na wykresie (a) dostrzega się bardzo dobrą korelację wyników pochodzących z metody pośredniego rozciągania w stosunku do czteropunktowego zginania 4-PB (degradacja wywołana wodą i mrozem). Stwierdzono, iż wykonując badanie 4-PB z powodzeniem można prognozować odporność MMA na działanie wody i mrozu opierając się na np. zmianach trwałości zmęczeniowej oraz odwrotnie – przewidywać spadek trwałości zmęczeniowej po wykonaniu badania *ITSR*.

Podobne obserwacje dostrzeżono na podstawie analizy wykresu (b). Widać wyraźne współzależności, które umożliwiają przewidywać odporność MMA na wodę i mróz przy znanej degradacji wywołanej solą drogową. Jedyńm zastrzeżeniem jest krzywa mieszanki D, która charakteryzuje się dobrym (a nie bardzo dobrym) w tym wypadku może dochodzić do niewielkich rozbieżności.



Rys. 86 Wykres % zmian modułu sztywności od procentowych zmian trwałości zmęczeniowej czynnika: (a) środowiskowego (woda i mróz) (b) chemicznego (sól drogowa)

Analizując wykres Rys. 86 przeanalizowano współzależności pomiędzy % zmianami modułu sztywności opisywanymi w rozdziale 5.3.3 wywołanymi czynnikami środowiskowymi (woda i mróz) (a) oraz chemicznymi (sól drogowa) (b), a degradacją ze względu na trwałość zmęczeniową. Mieszanki A – D dla których zastosowano modele regresji liniowej zarówno w przypadku oddziaływania wody i mrozu (a) i soli drogowej (b) charakteryzują się dobrym

(D (a) $R^2 = 0.8292$ i D (b) $R^2 = 0.8838$) oraz bardzo dobrym (reszta) $R^2 > 0.90$ dopasowaniem. Na podstawie obserwacji można stwierdzić, iż spadek trwałości zmęczeniowej wywołanej czynnikami (a) i (b) bardzo dobrze koreluje ze zmianami modułu sztywności. Dobre dopasowanie liniowego modelu pozwala prognozować wpływ omawianych oddziaływań dla innych rozpatrywanych poziomów wskaźnika wypełnienia K . Ponadto znając korelację zmian % wartości modułu względem % spadku trwałości można z powodzeniem, bez potrzeby wykonywania niekiedy długoterminowych badań przeliczać degradację, a następnie uwzględnić ją w ocenie trwałości mieszanki.

Kąty nachylenia linii trendu wykresu (a) mieszanek A, B i D są praktycznie jednakowe (poza mieszanką C, która wykazała ponad 2-krotnie większą wartość w stosunku do pozostałych). Modele regresji są do siebie „równoległe”, a mieszanki wzajemnie rozsunięte. w przypadku analiz wykresu (b) związanych z oddziaływaniem soli drogowej dostrzeżono podobieństwo kątów nachylenia modelu liniowego mieszanek A, C i D – stosunkowo niska prędkość zmian. MMA B charakteryzuje się prawie 3-krotnie większym kątem od pozostałych. Na podstawie wcześniejszych obserwacji, stwierdzono, iż dla lepiej zagęszczających się MMA (B), wykazujących mały przyrost zawartości wolnej przestrzeni przy spadku zawartości asfaltu degradacja postępuje 3-krotnie szybciej w stosunku do pozostałych MMA (A, C i D).

5.3.5. Eksperymentalne pomiary temperatury

Zjawisko regeneracji zależne jest od wielu czynników – wysokości temperatury, poziomu nasłonecznienia, wiatru, zachmurzenia, czasu oddziaływania temperatury. w przypadku MMA stosowanych wewnątrz konstrukcji nawierzchni dodatkowymi zmiennymi są: zastosowane lepiszcze, jego ilość w MMA, skała (kruszywo) o różnej pojemności cieplnej i współczynniku przenikania ciepła. Grubość warstwy i jej usytuowanie w układzie konstrukcji (głębokość posadowienia) również ma znaczenie. Ustalenie właściwych warunków regeneracji w laboratorium względem stanu in-situ należy zatem do zagadnień trudnych. w niniejszym podrozdziale przedstawiono rezultaty autorskiego eksperymentu, związanego z pomiarami temperatury przygotowanej konstrukcji nawierzchni celem określenia warunków wdrażania regeneracji w laboratorium.

Warstwy wierzchnie konstrukcji wykonane z MMA, podlegające bezpośrednio oddziaływaniu słońca nagrzewają się - absorbują ciepło. Ciepło poprzez przenikanie dociera do niżej położonych warstw. w ten sposób zjawisko regeneracji wywołane wysoką temperaturą, zachodzi również wewnątrz konstrukcji, jednak jego intensywność jest mniejsza, a maksymalny efekt przesunięty w czasie względem powierzchni.

W pracy udowodniono, iż zaprojektowane mieszanki A – D (AC 22, KR5-7) mogą zostać zastosowane do dwóch warstw – podbudowy i wiążącej jednocześnie. Autor rozprawy przyjął, iż w dalszej części rozważań zjawisko regeneracji w MMA – warunki termiczne, czas trwania i sposób aplikacji do rozwiązań laboratoryjnych zostanie omówiony dla spodu warstwy podbudowy. Warstwa ta należy do istotnych, ponieważ pełni funkcję nośną oraz to jej parametry wykorzystuje się w modelowaniu i obliczeniach trwałości zmęczeniowej konstrukcji nawierzchni z użyciem kryteriów. Jest ona również miejscem inicjacji niebezpiecznych uszkodzeń – spękań dół-góra, powstających na drodze kumulacje w czasie eksploatacji drogi.

W ramach zasymulowania i określenia warunków, wywołujących regenerację w stanie in-situ zaprojektowano i przeprowadzono eksperyment naukowy, składający się z dwóch etapów:

1. pomiarów temperatury na powierzchni płyty MMA (wymiary pow. 30x25cm),
2. pomiarów temperatury na różnym poziomie zagłębienia „konstrukcji” wykonanej z nałożonych na siebie płyt o określonych grubościach (wymiary pow. 30x25cm).

Na potrzeby przeprowadzenia eksperymentu przyjęto następujące założenia:

1. wybrano typową katalogową konstrukcję podatną złożoną z warstw asfaltowych [79] na ruch KR 5, Typ B (ciężki) o ustalonych grubościach warstw zgodnie z Rys. 87,
2. przyjmuje się brak występujących zacienień ograniczających nasłonecznienie drogi - drzew i krzewów w pasie drogowym (warunki jak na drogach wyższych klas, gdzie występuje ruch np. KR 5),
3. przyjmuje się brak zachmurzenia – bezchmurne niebo,
4. okres pogodowy – lato,
5. pełne nasłonecznienie, przez cały dzień od wschodu do zachodu słońca,
6. brak wiatru, sporadyczne podmuchy.

Kategoria ruchu	KR1	KR2	KR3	KR4	KR5	KR6	KR7
Ruch projektowy (min osi 100kN)	0,03 - 0,09	0,09 - 0,5	0,5 - 2,5	2,5 - 7,4	7,4 - 22,0	22,0 - 52,0	> 52,0
TYP B							
LEGENDA:	warstwa ścierna z mieszanki mineralno-asfaltowej; warstwa wiążąca z betonu asfaltowego; warstwa podbudowy zasadniczej z betonu asfaltowego; wymagany wtórny moduł odkształcenia E_2			UWAGA: W przypadku zastosowania podbudowy pomocniczej związanej spoiwem hydraulicznym należy zastosować zabiegi minimalizujące ryzyko powstania spękań odbitych zgodnie z punktami 7.43 - 7.55 dobrane w zależności od wytrzymałości podbudowy na ściskanie.			

Rys. 87: Podatne konstrukcje nawierzchni TYP B - układ warstw i grubości [79]

Do istotnych informacji związanych z wykonanymi pomiarami w ramach przeprowadzonego eksperymentu (etap 1 i 2) spełniającymi powyższe założenia, należą:

1. badania zrealizowano w ramach pomiaru ciągłego w lecie w okresie od 18.06.2021 – 19.06.2021, we Wrocławiu. Okres ten charakteryzował się dniami bezchmurnymi, ciepłymi i bezwietrznymi,
2. jednocześnie, w sposób niezależny prowadzono pomiar dla powierzchni i całej „konstrukcji” z użyciem specjalistycznych mierników temperatury,
3. eksperyment przeprowadzono na placu zlokalizowanym na terenie Politechniki Wrocławskiej – przestrzeń otwarta o pełnej zdolności nasłonecznienia od wschodu do zachodu słońca,
4. dnia 17.06.2021 wykonano kondycjonowanie próbek i „konstrukcji” w temperaturze otoczenia, celem przystosowania materiału do sytuacji bieżącej, zanim rozpoczęto pomiar właściwy – symulacja serii dni upalnych w lecie,
5. pomiar właściwy rozpoczęto rejestrować od 08:24 dnia 18.06.2021 i zakończono około godziny 04:00 19.06.2021.

W pomiarach wykorzystano specjalistyczną aparaturę HBM QuantumX 840B, która umożliwiła ciągłą rejestrację temperatury przez podłączone mierniki. Zastosowano termopary płaszczowe typu J, 1 klasy dokładności pomiaru (najlepsza dostępna jakościowo klasa cechująca się najniższą odchyłką do max. $\pm 1.5^\circ\text{C}$) zgodnie z normą PN-EN 60584-1:2014-04 [214] oraz specyfikacją producenta [2]. Ustalona, częstotliwość rejestracji wynosiła 1.0 Hz. Dokładność pomiaru - 2 cyfry po przecinku. Średnica drutu czujnika wynosiła 1.0mm (bardzo smukły), natomiast jego długość 30 cm. Wymiary termopary umożliwiły na swobodne jej zaginanie i montaż. Niezależnie przeprowadzono kontrolę zarejestrowanych odczytów wykorzystując inne urządzenie (thermometer TM-2000 – uniwersalny przenośny, akredytowany miernik będący na wyposażeniu pracowni drogowej) poprzez funkcję: pirometru (współczynnik emisyjności na poziomie 0.95), podłączonego czujnika rezystancyjnego Pt100 (klasa AA, max. odchyłka $\pm 0.15^\circ\text{C}$ [3]) oraz termopary typu J (klasa 1 [2]).

Poza pomiarami powierzchni, w momencie osiągnięcia jej maksymalnej wartości zmierzono za pomocą tradycyjnego termometru temperaturę powietrza w cieniu – istotne

w korelacji warunków regeneracji (przeliczenie bieżących odczytów mierzonych punktów nawierzchni dla takich samych warunków pogodowych (brak wiatru, dostęp słońca, czas trwania, itd.) przy wyższej temperaturze otoczenia). Stanowisko do pomiaru ciągłego (etap1 - powierzchnia) oraz zastosowane inne urządzenia pomiarowe z przykładowymi odczytami zaprezentowano na Rys. 88 i Rys. 89



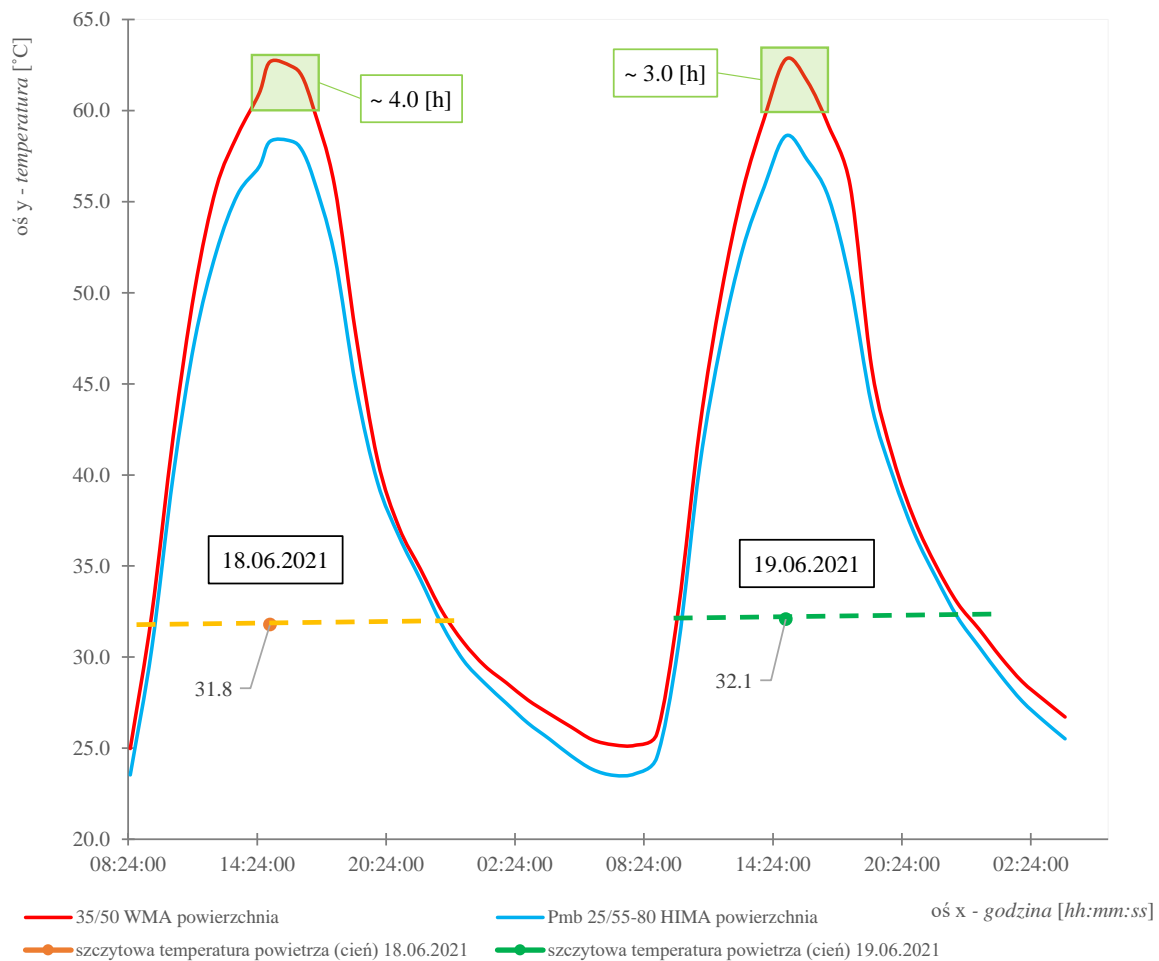
Rys. 88: Eksperymentalne stanowisko do pomiarów temperatury na powierzchni płyt wykonanych z różnych asfaltów - 35/50 WMA i 25/55-80 HIMA



Rys. 89: Pomiary kontrolne z wykorzystaniem różnych mierników i mieszanek (asfalt 35/50 WMA i 25/55-80 HIMA)

Etap 1 eksperymentu (pomiar temperatury powierzchni płyt) przeprowadzono na płytach wykonanych z MMA o grubości 61mm każda, które posadowiono na kostce brukowej otaczając dookoła belkami drewna (zminimalizowanie możliwych oddziaływań bocznych). Do testów wybrano A (35/50 WMA) i D (25/55-80 HIMA) ($K = 2.95$) – asfalt zwykły i wysokomodyfikowany, charakteryzującym się znaczącym stopniem modyfikacji matrycy asfaltowej polimerem SBS, obniżającym zdolność nagrzewania się MMA (wykazane dalej).

Biorąc pod uwagę liczbę pozyskanych odczytów, wyniki pomiaru ciągłego dwóch testowanych płyt zaprezentowano na wykresie sporządzonym w programie MsExcel. Dane graficznie przedstawiono na Rys. 90. Na rysunku zaznaczono również odczyt temperatury powietrza w cieniu dla max. osiągniętej wartości temperatury powietrza w ciągu dnia. Temperaturę przedstawiono z dokładnością do jednego miejsca po przecinku °C.



Rys. 90: Pomiar temperatury powierzchni płyt wykonanych z mieszanek - A i D ($K = 2.95$)

Na podstawie wykonanego pomiaru ciągłego w dniach 18-19.06.2021, dla którego próbki uprzednio podlegały kondycjonowaniu w temperaturze otoczenia (24h, 17.06.2021) odnotowano, iż szczytowa temperatura została zarejestrowana ok. godziny 15:00 zarówno dnia 18.06 i 19.06. Wynosiła ona kolejno:

1. 31.8 °C i 32.1 °C - temperatura powietrza w cieniu,
2. 62.8 °C i 62.8 °C - temperatura na powierzchni płyty z mieszanką A (35/50 WMA),
3. 58.3 °C i 58.6 °C - temperatura na powierzchni płyty z mieszanką D (25/55-80 HIMA).

Na podstawie wykonanego pomiaru stwierdzono, iż powierzchnia badanej MMA wykazuje znacznie wyższą temperaturę niż powietrza w cieniu (w tym samym czasie). Ponadto mieszanka uległa szybkiemu nagrzananiu.

Zaobserwowano również, iż zarejestrowany wykres przypomina kształtem sinusoidę – nie występują fluktuacje temperatury, które uniemożliwiałyby ocenę regularnego czasu oddziaływania ciepła na MMA. Taki kształt wykresu pozwala dobrać odpowiednio rampę termiczną, do wywołania regeneracji w laboratorium. Ponadto zanotowano długi okres oddziaływania wysokiej temperatury trwający od 14:00 do około 18:00 pierwszego i drugiego 14:00 -17:00 dnia. Odczytane temperatury w tym czasie przekraczały dla mieszanki a poziom 60.0 °C. D – 57.5 °C. Informacja pozwala sprecyzować czas oddziaływania wysokiej temperatury w laboratorium jaki można wdrożyć do badań nad regeneracją – np. poziom 60.0 °C, czas trwania 4.0 h.

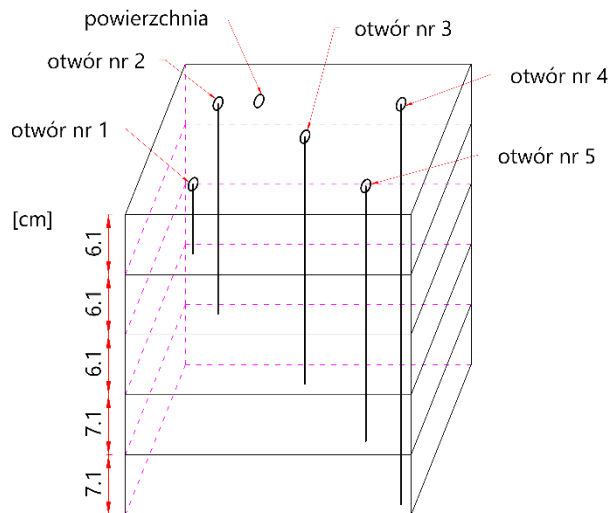
Z pomiarów wynika również, iż mieszanka A na bazie asfaltu zwykłego wykazała większą zdolność nagrzewania się od D (z asfaltem wysokomodyfikowanym). Dla drugiego dnia pomiarów różnica w szczytowej temperaturze dochodziła nawet do 4.2 °C - ok. 7 %. Stwierdzono, iż do uwzględnienia warunków kondycjonowania MMA np. w komorze termicznej należy również wziąć pod uwagę asfalt zastosowany do mieszanki. Należy jednak zauważyć, iż w typowych konstrukcjach nawierzchni warstwa ścieralna (wierzchnia) zbudowana jest z mieszanki, charakteryzującej się występowaniem znacznie miększych asfaltów. Te, wykazują zdolność większego nagrzewania się w tych samych warunkach temperaturowych (wiedza własna). Oznacza to, iż efekt regeneracji wywołany przenikaniem ciepła w niższych warstwach może być większy.

Prowadząc rejestrację temperatury powierzchni płyt, równocześnie przeprowadzono drugi etap pomiarów pozwalający wskazać jej wartości (w tych samych warunkach) na zbudowanym zestawie „konstrukcji” nawierzchni złożonej z zestawu pięciu płyt. Wykonano go z jednej mieszanki (wybrano A na lepiszczu 35/50 WMA).

W zestawie płyt ustalono lokalizację 5-ciu otworów przeznaczonych na termopary płaszczowe (typ J, klasa 1, średnica płaszczka 3.0 mm, długość od 15 – 30 cm w zależności od głębokości otworu). Następnie każdy punkt przewiercono wiertłem o średnicy 4.0 mm w taki sposób, aby przewiert zatrzymał się na 1.0 cm przed spodem płyty uwzględniając poziom lokalizacji czujnika w układzie konstrukcji. Następnie otwory oczyszczono usuwając pył i pozostałości po nawiertach. Kolejno, przygotowane płyty położono w odpowiedniej kolejności jedna na drugą na podstawie OSB.

Następnie na wymiar skręcono na sztywno do zestawu płyt obudowę wykonaną z płyt OSB o grubości 1.8 cm w taki sposób, aby wierzchnia warstwa wystawała nie więcej niż 2 cm. Całość podgrzano w suszarce laboratoryjnej do 150 stopni. w miejsce nawierconych otworów włożono zbrojone pręty gładkie o średnicy 4 mm w taki sposób by nie wystawały poza konstrukcją. Podgrzany układ warstwowy wyciągnięto z suszarki i dodatkowo zagęszczono małą 50kg zagęszczarką (Kaltmann K-ZG50 PRO EU5 50kg), aby poprawić szczepność warstw. w kolejnym kroku obudowę zdjęto, zestaw płyt posadowiono na kostce brukowej (bez podstawki OSB, aby uwzględnić zimno pochodzące od „niższych warstw (konstrukcji gruntowej)” typowego rozwiązania) i otoczono je sześciokrotnie folią aluminiową o grubości 12.5 mikronów. Zabieg ten wykonano specjalnie, aby odwzorować myślowe wycięcie fragmentu konstrukcji, która jest podczas słonecznego dnia równomiernie nagrzewana (redukcja strat ciepła wywołanych nieciągłością). Założono ponownie obudowę z płyt OSB i skręcono całość na sztywno - eliminacja nadmiernych bocznych wpływów zewnętrznych na konstrukcję. Szczypcami wyciągnięto pręty zbrojeniowe, a w miejsce otworów włożono termopary. Luz pomiędzy mieszanką, a miernikiem uzupełniono asfaltem 35/50 WMA poprzez rozgrzewanie lepiszcza stosując opalarkę. Tak przygotowany zestaw poddano całodniowemu

kondycjonowaniu (17.06.2021), a następnie rozpoczęto rejestrację danych. Do pomiarów wykorzystano drugi QuantumX 840B będący na wyposażeniu pracowni drogowej. Dokładny schemat grubości wykonanej konstrukcji, głębokości nawierć, lokalizacja czujników została zaprezentowana na Rys. 91. Natomiast faza robocza przygotowania zestawu płyt i drugie stanowisko pomiarowe zamieszczono na Rys. 92 oraz Rys. 93.



każdy otwór wykonano wiertłem ϕ 4 mm

zasięg otworów = suma grubości danych płyt pomniejszona o 1 cm (brak przewiertu "na wylot")

po włożeniu termopar otwory uzupełniono lepiszczem

Rys. 91: Schemat rozłożenia czujników temperatury w przeprowadzonym eksperymencie

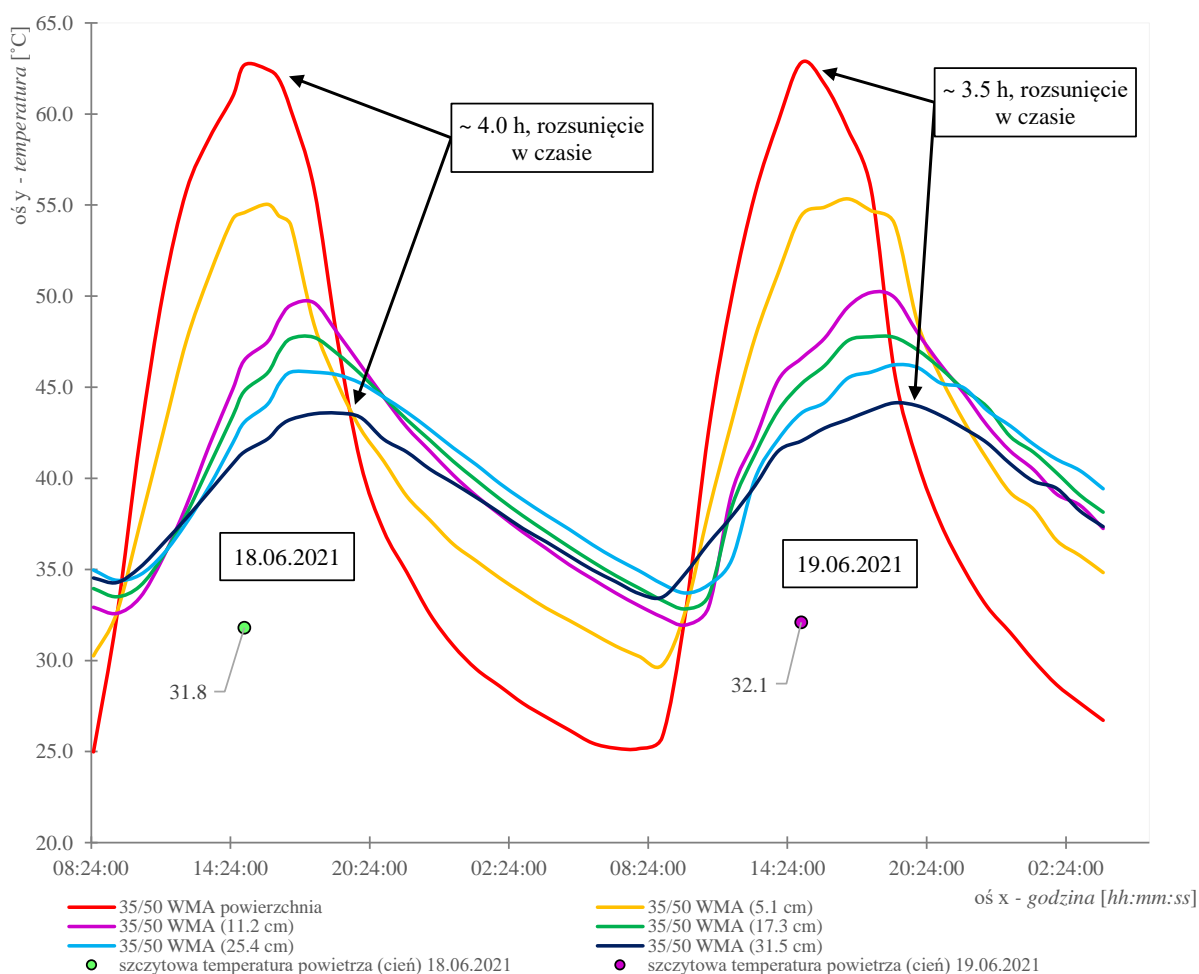


Rys. 92: Budowa eksperymentalnej konstrukcji nawierzchni do pomiarów temperatury z przewiertami o różnej głębokości



Rys. 93: Eksperymentalny pomiar temperatury na różnych poziomach zagłębienia w układzie warstwowym wykonanym z jednego rodzaju MMA

Biorąc pod uwagę liczbę pozyskanych odczytów, wyniki pomiaru ciągłego dwóch testowanych płyt zaprezentowano na wykresie sporządzonym w programie MsExcel. Dane graficznie przedstawiono na Rys. 94. Na rysunku zaznaczono odczyt temperatury powietrza w cieniu dla max. osiągniętej wartości temperatury powietrza w ciągu dnia. Temperaturę przedstawiono z dokładnością do jednego miejsca po przecinku °C.



Rys. 94: Pomiar ciągły wykonanej konstrukcji z mieszanki A (35/50 WMA) w dniach 18-19.06.2021

Na podstawie wykonanego pomiaru ciągłego stworzonej konstrukcji podatnej w dniach 18-19.06.2021, zarejestrowano następujące szczytowe temperatury:

1. 31.8 °C i 32.1 °C - temperatura powietrza w cieniu (godzina 14:00, obydwie dni),
2. 62.8 °C i 62.8 °C - temperatura na powierzchni, mieszanka A (35/50 WMA) (godzina 14:00, obydwie dni),
3. 55.0 °C i 55.3 °C - temperatura na gł. 5.1 cm, mieszanka A (35/50 WMA) (rozsunięcie czasowe względem temperatury powierzchni o ok. 1.5h,
4. 49.6 °C i 50.2 °C - temperatura na gł. 11.2 cm, mieszanka A (35/50 WMA) (rozsunięcie czasowe względem temperatury powierzchni o ok. 3.0h,
5. 47.7 °C i 47.8 °C - temperatura na gł. 17.3 cm, mieszanka A (35/50 WMA) (rozsunięcie czasowe względem temperatury powierzchni o ok. 3.0h,
6. 45.8 °C i 46.2 °C - temperatura na gł. 25.4 cm, mieszanka A (35/50 WMA) (rozsunięcie czasowe względem temperatury powierzchni o ok. 3.5h,
7. 43.5 °C i 44.1 °C - temperatura na gł. 31.5 cm, mieszanka A (35/50 WMA) (rozsunięcie czasowe względem temperatury powierzchni o ok. 4.0h.

Z obserwacji zaprezentowanego pomiaru wynika, iż temperatura w konstrukcji zmniejsza się wraz z zagłębieniem, a wykres przypomina kształtem sinusoidę. Ulega ona spłaszczeniu wraz z zagłębieniem punktów pomiarowych. Dostrzeżono również, iż wewnątrz konstrukcji ciepło jest dłużej kumulowane – układ warstw działa jak termos im niżej tym dłużej widoczny jest efekt nagrzania (straty ciepła są mniejsze). Należy również podkreślić, iż krzywa temperatury i jej maksymalna wartość jest rozsunęta w czasie względem zagłębienia.

Na podstawie wyników obliczono, iż różnica temperatury powierzchni względem poziomu zagłębienia 31.5 cm nie jest, aż tak duża – wynosi 18.7 °C przy temperaturze powietrza w cieniu równej 32.1 °C. Rozsunięcie krzywych dla tego poziomu względem powierzchni wyniosło około 4.0 h, natomiast temperatura powyżej poziomu 40.0 °C utrzymywała się przez około 10 h. Jest to bardzo obiecujący rezultat. Pozwala on zaproponować program symulacji warunków zachodzących w konstrukcji do laboratoryjnego programu badania mieszanek z udziałem regeneracji – w szczególności tych przeznaczonych do warstw niżej położonych jak np. podbudowa. Ponadto obserwacje umożliwiają również prognozować temperaturę i czas jej oddziaływania wewnątrz konstrukcji w przypadku wystąpienia skrajnego upalnego dnia/serii.

Odnotowane pomiary, poddano kontroli z wybranymi modelami temperaturowymi (Omana i Ariawana) znajdującymi zastosowanie do konstrukcji nawierzchni [5]. Stwierdzono, iż zarejestrowane (eksperyment) wartości szczytowe wykazują zgodność z modelami analitycznymi. Stwierdzono, iż wyniki eksperymentu mogą zostać wykorzystane do laboratoryjnych metod wywoływania i badania zjawiska regeneracji.

Na podstawie wykonanych **pomiarów temperatury powierzchni**, stwierdzono, że mieszanki ulegają **szybkemu nagrzaniu**. Osiągane temperatury należą do wysokich (znacznie wyższych niż powietrza). Wykres rozkładu temperatury przypomina **sinusoidę**, co **pozwala z przybliżeniem określać kształt i okres działania rampy temperaturowej w laboratorium** celem aproksymacji warunków in-situ. **Udowodniono** również, iż **rodzaj zastosowanego do MMA lepiszcza**, również **wpływa na nagrzewanie się mieszanek**. Stwierdzono, iż należy go odpowiednio uwzględniać.

W wyniku przeprowadzonego pomiaru eksperymentalnego **konstrukcji udowodniono**, iż **oddziaływanie wysokich temperatur** (wyższych niż temperatura powietrza w cieniu) w **czasie** jest możliwe **dla warstw niżej zagłębionych wykonanych z MMA**. Ponadto nagrzanie warstwy wierzchniej wywołuje mniejszy, opóźniony, ale za to długotrwały i bardziej

regularny efekt oddziaływania temperatury w warstwach niższych. Stwierdzono, iż **pozyskane dane** mogą zostać **wykorzystane do określenia warunków badania regeneracji mieszanek w laboratorium.**

Dane eksperymentalne zostaną uwzględnione w badaniach laboratoryjnych poświęconych wpływowi regeneracji na trwałość zmęczeniową MMA.

5.3.6. Analiza regeneracji i wpływu na trwałość zmęczeniową mieszanek A - D

Uwzględniając przegląd literaturowy, założenia i wyniki badań poprzednich podrozdziałów, zaproponowano i wdrożono procedurę laboratoryjną, która umożliwiła wywołanie zjawiska regeneracji (healing) oraz pozwoliła skutecznie ustalić jej wpływ na trwałość zmęczeniową mieszanek A – D w warunkach laboratoryjnych symulujących stan in-situ. Rozważania dotyczące tematu regeneracji mieszanek podzielono na pięć podrozdziałów.

1. Założeń badawczych związanych z wdrożeniem regeneracji w warunkach laboratoryjnych.
2. Sposobu oceny zdolności regeneracji mieszanek.
3. Analizę wpływu okresu odpoczynku i podgrzania na zmiany modułu sztywności i trwałość zmęczeniową.
4. Analizę wpływu okresu odpoczynku + podgrzania na zmiany modułu sztywności i trwałość zmęczeniową z uwzględnieniem oddziaływania wody i mrozu oraz soli drogowej.
5. Analizę wykresu zmiany modułu sztywności względem liczby cykli wybranej mieszanki.

5.3.6.1. Założenia badawcze dotyczące zjawiska regeneracji

Regeneracja w MMA zachodzi w nawierzchni dla dwóch podstawowych przypadków. Pierwszy związany jest z chwilowym odprężeniem (okres odpoczynku pomiędzy impulsem obciążenia) dostrzegalnym np. podczas pory nocnej (mniejsze natężenie ruchu na drodze) lub pomiędzy przejazdami pojazdów (chwilowy odstęp czasowy). Drugi - z podgrzaniem materiału (oddziaływanie wysokich temperatur w okresie letnim). Obydwa te przypadki oddziałują (często jednocześnie) na materiał zastosowany wewnątrz nawierzchni, pozytywnie wpływając na jego trwałość zmęczeniową. Zwraca się jednak uwagę, iż oddziaływanie wysokiej temperatury jest istotniejsze, gdyż związane jest z upłynnieniem lepiszcza (zmniejszeniem się jego lepkości) w mieszance. Skutkiem „upłynnienia lepiszcza” powstają strefy regeneracji, które efektywniej zamykają (częściowo lub w całości) powstałe wewnątrz warstw nawierzchni pęknięcia zmęczeniowe wywołane jej eksploatacją. Celem przeprowadzenia badań „healingowych” symulujących stan in-situ w laboratorium wprowadzono założenia umożliwiające opracowanie procedury wdrażania regeneracji i jej oceny w kontekście trwałości zmęczeniowej. Należą do nich:

1. warunki healingu ustalono dla głębokości 30cm konstrukcji KR5, typ B odpowiadającej spodowi warstwy podbudowy – pomiar eksperymentalny zosał wykonany dla takiej grubości konstrukcji. Mieszanki A – D spełniają wymogi zastosowania do tej warstwy na ruch KR 5-7,
2. okres odpoczynku, wysoka temperatura i ich czas oddziaływania wywołują analogiczną regenerację w MMA w ujęciu laboratoryjnym jak w stanie in-situ,
3. do wywołania healingu w laboratorium wystarczy wykorzystanie komory termicznej z możliwością zastosowania rampy termicznej,
4. wzorując się badaniem wody i mrozu (*ITSR*) (1 cykl zamrażania rozmrażania dla badania recepty), przybliżającym zabiegiem uwzględniającym regenerację w ciągu całego okresu zastosowania mieszanki wewnątrz konstrukcji (poprzez kumulację) przyjmuje się jeden cykl: rozgrzania belki MMA do ustalonej wartości temperatury,

następnie kondycjonowanie w stałej temperaturze mieszanki przy określonym czasie trwania (np. na podstawie pomiarów) oraz ochłodzenie do temperatury badania zmęczeniowego,

5. warunki wdrożenia regeneracji ustala się na podstawie pomiarów temperaturowych na odpowiednim poziomie zagłębienia,
6. wpływ regeneracji w konstrukcji wykonanej z warstw asfaltowych można analizować poprzez wystąpienie jednego skrajnie upalnego letniego dnia (poprzedzonego upalnymi dniami) lub jako kumulację ciepłych letnich dni, których efekt jest równorzędny z wystąpieniem skrajnego upalnego dnia w całym rozważanym okresie projektowym konstrukcji,
7. badania zmęczeniowe muszą być przeprowadzone w sposób ciągły bez przerwy – nie dopuszcza się leżakowania próbek w temperaturze pokojowej,
8. temperaturę, która może oddziaływać na MMA w przypadku skrajnie upalnego dnia wewnątrz konstrukcji nawierzchni, można oszacować stosując interpolację liniową na podstawie:
 - danych i trendów meteorologicznych (najwyższe odnotowane temperatury (cień) dla analizowanego regionu w przyjętym okresie np. okres: 30 lat (okres projektowy dróg wyższych klas), region: Polska),
 - pomiarów temperatury: powietrza w cieniu oraz na odpowiedniej głębokości warstwy konstrukcji nawierzchni (warunki dodatkowe: upalny, bezwietrzny, bezchmurny letni dzień poprzedzony podobnym ciepłym dniem).

Celem ustalenia prawdopodobnych warunków temperaturowych (powietrza w cieniu) skrajnie upalnego dnia na potrzeby wdrożenia regeneracji w laboratorium dokonano przeglądu informacji związanych z sytuacją klimatyczną Polski. Polska należy do klimatu umiarkowanego. Najwyższa odnotowana temperatura wynosiła 40.2 °C (Pruszków). Została ona zarejestrowana tylko raz w ciągu ostatnich stu lat (29.07.1921). Pomimo, iż więcej nie osiągnięto tak ekstremalnej temperatury, to na przestrzeni ostatnich 30 lat wielokrotnie odnotowano wartość bliską lub przekraczającą 39.0 °C - np.: 38.3 °C - Ceber (26.06.2019 oraz 30.06.2019), 38.3 °C - Radzyń (26.06.2019), 39.5 °C - Słubice (30.07.1994), 39.0 °C - Ceber (08.08.2015) lub 38.9 °C Silniczka (08.08.2013) [204, 306]. Powtarzalność występowania upalnych okresów w lecie zwiększa się. Trend jest spowodowany wystąpieniem zjawiska globalnego ocieplenia, które charakteryzuje się również przyrostem średniej rocznej temperatury. Przewiduje się, iż w okresie 2030 - 2050 wzrośnie ona o 1.5 °C [192, 288]. w efekcie przewidywanych zmian okresy letnie zgodnie z opiniami meteorologów (wykorzystujących prognozę EMS - *Environmental Modeling System*) i synoptyków będą coraz cieplejsze (nawet o kilka stopni), a częstotliwość występowania upałów wzrośnie [173, 293, 304]. Obserwacje zostały potwierdzone niezależnymi analizami wykonanymi przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej opublikowanymi w raporcie „klimat Polski 2020”, wykazującymi znaczny przyrost temperatury powietrza w okresie zimowym i letnim (nawet o kilka stopni) oraz ujęciu średniorocznym mierzonym w 30 letnich okresach od 1951 roku [175].

Warto wspomnieć, iż częstą obserwacją klimatyczną, jest występowanie serii (kilka dni pod rząd) upalnych dni w warunkach braku zachmurzenia i wiatru pośród których, jeden z nich charakteryzuje się ekstremalną temperaturą powietrza w cieniu.

Na podstawie przeprowadzonego rozeznania klimatycznego, stwierdzono, iż skrajnie wysokie temperatury powietrza w cieniu (ok. 39.0 °C) dla następnych 30 lat (lub 30-letnich okresów) są prawdopodobne i możliwe do zaistnienia w Polskich warunkach klimatycznych. Warunki te umożliwiają poprzez nagrzanie wierzchniej powierzchni konstrukcji nawierzchni

(z złożonej z warstw asfaltowych) osiągnięcie znacznie wyższej temperatury w jej wnętrzu. Ta zwiększa wewnątrz niej zdolność regeneracji mieszanek mineralno-asfaltowych. Do analiz na regenerację przyjęto skrajną wartość temperatury powietrza w cieniu równą 39.0 °C, która wystąpi w okresie 30 lat (tożsamy z okresem projektowym dróg wyższych klas).

Uwzględniając pomiar eksperymentalny, celem wdrożenia regeneracji w warunkach laboratoryjnych do badań przyjęto następujące warunki kondycjonowania próbek w komorze klimatycznej:

1. za docelową temperaturę kondycjonowania przyjęto 55.0 °C - przeliczono i zaokrąglono wartość uzyskaną z interpolacji liniowej (53.6 °C): wartość temperatury w cieniu 19.06.2021 (32.1 °C) i warstwy na głębokości 31.5 cm (44.1 °C), przy skrajnej możliwej w cieniu (39.0 °C),
2. docelowy okres oddziaływania powyżej przyjętej temperatury na MMA wynosił 4.0 h. Został on poprzedzony i zakończony 3.0 h liniową rampą, z i do temperatury równej 10.0 °C,
3. kondycjonowanie wykonano od razu po pierwszym badaniu zmęczeniowym i następnie zbadano (próbki nie leżakowały).

Podkreśla się, iż podczas kondycjonowania MMA w zdefiniowanej temperaturze jednocześnie uwzględniony jest okres odpoczynku. Próby rozdzielania oddziaływań i ich wpływ na regenerację – przeanalizowano w podrozdziale 5.3.6.3.

5.3.6.2. Sposób oceny zdolności mieszanek do regeneracji

Na podstawie literatury [141, 254] zaproponowano i wykorzystano w badaniach autorskie wskaźniki *HI* (*healing index*). Wyrażają one zdolność regeneracji materiału. Wskaźniki odnoszą się do zmian modułu sztywności i trwałości zmęczeniowej mieszanek A - D. Wzory na wskaźnik zaprezentowano w formułach (27),(28) i (29):

$$HI_{E_0^*} = \frac{E_{pH}^* - E_k^*}{E_k^*} \cdot 100\% , \quad (27)$$

gdzie:

$HI_{E_0^*}$ – procentowa zdolność regeneracji mieszanki wyrażająca przyrost modułu sztywności [%],

E_{pH}^* – początkowa wartość modułu sztywności badania zmęczeniowego po zaaplikowaniu regeneracji [MPa],

E_k^* – końcowa wartość modułu sztywności pierwszego badania zmęczeniowego [MPa].

$$HI_{E_{0\ 50\%}^*} = \frac{E_{0\ 50\%H}^*}{E_{0\ 50\%}^*} \cdot 100\% , \quad (28)$$

gdzie:

$HI_{E_{0\ 50\%}^*}$ – procentowa zdolność regeneracji mieszanki wyrażająca przyrost trwałości zmęczeniowej w cyklach (kryterium spadku początkowej wartości modułu o 50%) [%],

$E_{0\ 50\%H}^*$ – liczba cykli uzyskana po zastosowaniu zabiegów regeneracji, stosując kryterium spadku początkowej wartości modułu o 50% [cykle],

$E_{0\ 50\%}^*$ – liczba cykli uzyskana w wyniku pierwszego badania zmęczeniowego, stosując kryterium spadku początkowej wartości modułu o 50% [cykle].

$$HI_{E_{k(1)H}^*} = \frac{E_{k(1)H}^*}{E_{0\ 50\%}^*} \cdot 100\% , \quad (29)$$

gdzie:

$HI_{E_{k(1)H}^*}$ – procentowa zdolność regeneracji mieszanki wyrażająca przyrost trwałości zmęczeniowej w cyklach (kryterium autora – patrz niżej) [%],

$E_{k(1)H}^*$ – liczba cykli uzyskana po zastosowaniu zabiegów regeneracji, która odpowiada spadkowi zregenerowanej wartości modułu sztywności do końcowej jego wartości wynikającej z pierwszego badania [cykle],

$E_{0\ 50\%}^*$ – liczba cykli uzyskana w wyniku pierwszego badania zmęczeniowego, stosując kryterium spadku początkowej wartości modułu o 50% [cykle].

Parametr $E_{k(1)H}^*$ opisany we wzorze (29) wyraża nowe, autorskie kryterium zmęczeniowe znajdujące zastosowanie tylko i wyłącznie w przypadku badań związanych z regeneracją (druga seria badań zmęczeniowych). Autor rozprawy uważa, że proponowane kryterium koresponduje z pierwszym badaniem zmęczeniowym – końcową wartością modułu sztywności interpretowaną jako punkt zniszczenia - wystąpieniu 50% powierzchni spękań w nawierzchni (spadek początkowej wartości modułu sztywności w laboratorium o 50% dla ustalonej wartości obciążenia, która pozwala otrzymać trwałość zmęczeniową nie mniejszą niż milion cykli = wystąpienie 50% spękań nawierzchni – badania LCPC [95, 286]).

Podkreśla się, iż zmęczony, spękany materiał (MMA) nigdy nie odzyska pełnej zdolności przenoszenia obciążenia w wyniku podgrzania (chyba, że dla bardzo niskich poziomów obciążenia). Nawet gdy w wyniku podgrzania materiał ulegnie regeneracji to powstałe spękania nie ulegną pełnemu zamknięciu. Należy dodatkowo pamiętać, iż powstałe uszkodzenie bardzo często przechodzi przez materiał (ziarno kruszywa) powodując nieciągłość obniżającą trwale nośność mieszanki – regeneracja wynikająca z aktywności lepiscza nie jest wstanie naprawić ziarna. Dlatego też, gdy do drugiego badania zmęczeniowego zastosuje się ponownie kryterium $E_{0\ 50\%}^*$, wówczas zregenerowany moduł spada poniżej końcowej wartości wynikającej z badania pierwszego, czyli w efekcie dopuszcza się większy poziom zniszczenia materiału - przesuwa się „granicę” z 50% powierzchni spękań występujących w nawierzchni np. na 60% co nie znajduje uzasadnienia.

Warto również zasygnalizować, iż temat regeneracji i sposobu jego oceny w materiale jest analizowany od 30 lat. Do tej pory nie opracowano właściwego kryterium zmęczeniowego - wskazania punktu zniszczenia materiału po regeneracji. w większości opracowań wykorzystywano ponownie kryterium $E_{0\ 50\%}^*$, bez uzasadnienia jego poprawności stosowania w przypadku drugiej serii badań zmęczeniowych (ocena regeneracji).

W ramach badań nad regeneracją przeanalizowano trwałość zmęczeniową z zastosowaniem dwóch kryteriów. Kryteria porównano i wykazano rozbieżności. Do głównych analiz związanych z regeneracją (druga seria badań zmęczeniowych) zaaplikowano kryterium autora – $E_{k(1)H}^*$.

5.3.6.3. Analiza wpływu okresu odpoczynku i podgrzania na zmiany modułu sztywności i trwałość zmęczeniową.

Regeneracja w MMA zachodzi w przypadku – wystąpienia okresu odpoczynku i/lub oddziaływania wysokiej temperatury. Obydwa pozytywnie wpływają na materiał wydłużając jego trwałość zmęczeniową. Zaistnienie samego okresu odpoczynku jest możliwe pomiędzy przejazdami kół pojazdów przez rozpatrywany punkt nawierzchni szczególnie dla okresu zimowego w porze nocnej (brak wpływu wysokiej temperatury, niskie natężenie pojazdów). Oddziaływanie wysokiej temperatury na MMA wewnątrz konstrukcji nawierzchni zachodzi w okresie letnim – upalne, słoneczne dni. Ponadto występuje ono w sposób łączony z okresem odpoczynku (niskie natężenie pojazdów na drogach spowodowane sezonem wakacyjnym).

W ramach badań rozprawy sprawdzono, wpływ omawianych przypadków na regenerację. Do osiągnięcia celu zastosowano trzy konfiguracje obciążenia badania laboratoryjnego.

1. **Zmęczenie – zmęczenie** (pomijalnie mały odstęp czasowy pomiędzy sekwencjami badania). Wykonano dodatkowe, niezależne badania na nowych próbkach pochodzących z tego samego zarobu.
2. **Zmęczenie – okres odpoczynku – zmęczenie** (długość trwania okresu odpoczynku wynosił 4.0 h – czas odpowiadający wygrzewaniu w przyjętej temperaturze równej 55.0 °C). Wykonano dodatkowe, niezależne badania na nowych próbkach pochodzących z tego samego zarobu.
3. **Zmęczenie – wygrzewanie (wygrzewanie + okres odpoczynku) - zmęczenie** (wygrzewanie MMA w 55.0 °C z liniową rampą - okres oddziaływania przyjętej temperatury na materiał wynosił 4.0 h. Został on poprzedzony i zakończony 3.0 h liniową rampą, z i do temperatury równej 10.0 °C. Wykorzystano próbki z poprzednich badań zmęczeniowych (rozdział 5.3.4).

Badania wykonano dla wybranego poziomu zawartości asfaltu ($K = 2.95$) mieszanek A – D. Próbki poddano wyłącznie obciążeniu mechanicznemu. Wyniki analiz umożliwiły wybór właściwego sposobu przeprowadzania badania zmęczeniowego w ocenie trwałości uwzględniającego proces regeneracji.

Po wdrożeniu healingu na próbkach mieszanek A – D w laboratorium, wykonano ponownie badania zmęczeniowe, stosując kryterium spadku początkowej wartości zregenerowanego modułu o 50%. Zaaplikowano identyczne warunki badania jak w rozdziale 5.3.4 (pierwsze badanie zmęczeniowe).

Z uwagi na zbyt dużą ilość danych, w dalszej części tego podrozdziału wyniki pozyskane na podstawie testów mieszanek A - D przedstawiono i omówiono zbiorczo na receptę jako średnią z 5 oznaczeń (podobnych wyników, rozrzut nie przekraczał 15%). w ten sposób poprawiono czytelność pozyskanych danych usprawniając proces komentowania korelacji. Rezultaty badań mieszanek A – D zaprezentowano w Tab. 33.

Tab. 33: Zdolność regeneracji mieszanek A - D w zależności od wdrożonego czynnika regenerującego

recepta	K [-]	$A_m (B)$ [%]	V_m [%]	wariant	Pierwsze badanie zmęczeniowe			Drugie badanie zmęczeniowe				Zdolność regeneracji wyrażona wskaźnikiem HI		
					E_p^* [MPa]	E_k^* [MPa]	$E_{0\ 50\%}^*$ [cykle]	$E_{p\ H}^*$ [MPa]	$E_{k\ H}^*$ [MPa]	$E_{0\ 50\% \ H}^*$ [cykle]	$E_{k\ (1)\ H}^*$ [cykle]	$HI_{E_0^*}$ [%]	$HI_{E_{0\ 50\%}^*}$ [%]	$HI_{E_{k\ (1)\ H}^*}$ [%]
A2	2.95	4.23%	4.10%	zm-zm	10114	5057	314598	5096	2548	2998	188	0.77%	0.95%	0.06%
A2	2.95	4.23%	4.10%	odp	9799	4900	309877	5898	2949	18974	778	20.38%	6.12%	0.25%
A2	2.95	4.23%	4.10%	wygrz+odp	9811	4906	311340	9718	4859	163851	162778	98.10%	52.63%	52.28%
B2	2.95	4.23%	4.20%	zm-zm	9940	4970	410058	5102	2560	3520	213	2.66%	0.86%	0.05%
B2	2.95	4.23%	4.20%	odp	9932	4966	415665	6250	3125	21874	902	25.86%	5.26%	0.22%
B2	2.95	4.23%	4.20%	wygrz+odp	9900	4950	411640	9488	4744	215361	215001	91.67%	52.32%	52.23%
C2	2.95	4.23%	4.00%	zm-zm	9801	4901	1425599	5325	2663	26583	641	8.66%	1.86%	0.04%
C2	2.95	4.23%	4.00%	odp	9788	4894	1445596	6552	3276	69878	2345	33.88%	4.83%	0.16%
C2	2.95	4.23%	4.00%	wygrz+odp	9935	4968	1456839	9901	4951	270148	269560	99.31%	18.54%	18.50%
D2	2.95	4.23%	4.34%	zm-zm	9266	4633	1999875	4985	2493	40258	699	7.60%	2.01%	0.03%
D2	2.95	4.23%	4.34%	odp	9403	4702	1949959	6407	3204	80998	4698	36.28%	4.15%	0.24%
D2	2.95	4.23%	4.34%	wygrz+odp	9310	4655	1958796	9289	4645	264513	263020	99.55%	13.50%	13.43%

W Tab. 33 zastosowano następujące oznaczenia:

zm-zm – kombinacja badania według schematu zmęczenie – zmęczenie,

odp – kombinacja badania według schematu zmęczenie – okres odpoczynku – zmęczenie,

wygrz+odp - kombinacja badania według schematu zmęczenie – wygrzewanie + okres odpoczynku – zmęczenie,

K – wskaźnik wypełnienia [-],

A_m – procentowa zawartość lepiszcza dodawanego do MMA [%],

V_m – zawartość wolnych przestrzeni w MMA [%],

E_p^* – początkowa wartość modułu sztywności wyznaczona w 100-cyklu badania [MPa],

E_k^* – wartość modułu sztywności po osiągnięciu kryterium zmęczeniowego (spadku początkowej wartości modułu o 50%) [MPa],

$E_{0\ 50\%}^*$ – trwałość zmęczeniowa wyrażona w cyklach uzyskana po spadku początkowej wartości modułu sztywności ustalanego w 100-cyklu badania o 50% [cykle],

$E_{p\ H}^*$ – początkowa wartość modułu sztywności wyznaczona w 100-cyklu badania (po zabiegu regeneracji) [MPa],

$E_{k\ H}^*$ – wartość modułu sztywności po osiągnięciu kryterium zmęczeniowego (spadku początkowej wartości modułu o 50%) po zabiegu regeneracji [MPa],

$E_{0\ 50\% \ H}^*$ – trwałość zmęczeniowa wyrażona w cyklach uzyskana po spadku początkowej wartości modułu sztywności ustalanego w 100-cyklu badania o 50% po zabiegu regeneracji [cykle],

$E_{k\ (1)\ H}^*$ – trwałość zmęczeniowa wyrażona w cyklach uzyskana po spadku początkowej wartości modułu sztywności ustalanego w 100-cyklu badania (zmierzonej po zabiegu regeneracji) do uzyskania końcowej wartości modułu sztywności pierwszego badania zmęczeniowego [cykle],

$HI_{E_0^*}$ – procentowa zdolność regeneracji mieszanki wyrażająca przyrost modułu sztywności [%],

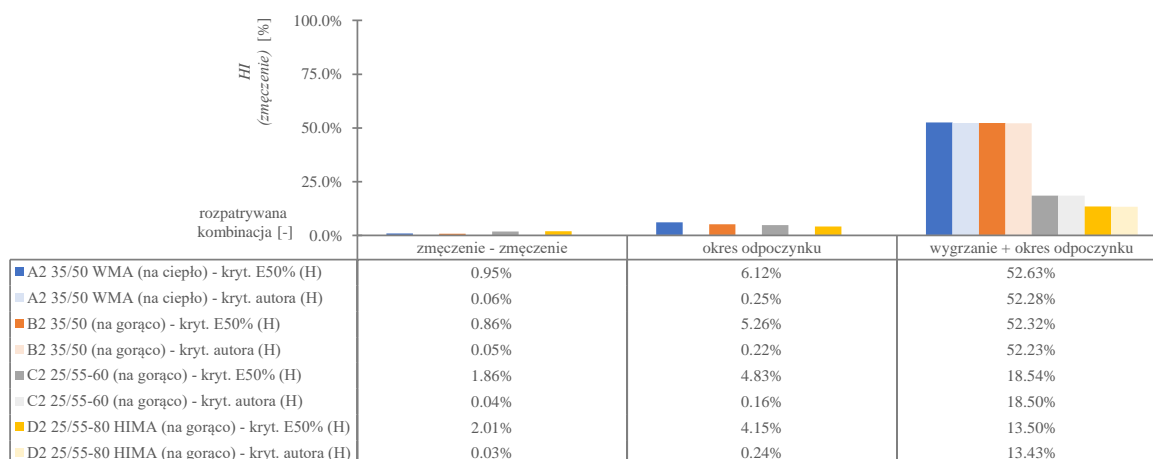
$HI_{E_{0\ 50\%}^*}$ – procentowa zdolność regeneracji mieszanki wyrażająca przyrost trwałości zmęczeniowej (cykle) dla kryterium $E_{0\ 50\%}^*$ [%],

$HI_{E_{k\ (1)\ H}^*}$ – procentowa zdolność regeneracji mieszanki wyrażająca przyrost trwałości zmęczeniowej (cykle) dla kryterium $E_{k\ (1)\ H}^*$ [%].

Analizę nad regeneracją w MMA rozpoczęto od porównania dwóch kryteriów zmęczeniowych wykorzystanych w drugim badaniu – $E_{0\ 50\% H}^*$ oraz $E_{k(1)H}^*$ (autorskiego). Do tego celu wykorzystano rezultaty badań oraz wyznaczone wskaźniki regeneracji HI (Tab. 33) odnoszące się do trwałości zmęczeniowej (omówione w podrozdziale 5.3.6.2). Punkt zniszczenia w przypadku omawianych kryteriów został zdefiniowany w następujący sposób:

1. kryterium $E_{0\ 50\% H}^*$ - materiał uznaje się za zniszczony, w momencie spadku początkowej wartości zregenerowanego modułu sztywności o 50%,
2. kryterium $E_{k(1)H}^*$ - materiał uznaje się za zniszczony, w momencie spadku początkowej wartości zregenerowanego modułu sztywności do uzyskania końcowej wartości ustalonej dla pierwszego badania zmęczeniowego.

Analiza danych wykazała, iż niezależnie od rozpatrywanego wariantu (zm-zm, odp, wygrz+odp) obydwie kryteria pozwalają ocenić efekt zaistniałej regeneracji wyrażony przyrostem liczby cykli. Nie odnotowano przypadku, w którym wystąpiłby regres trwałości zmęczeniowej. Na podstawie wyników zauważono, iż wysokość healingu uzależniona jest od rozpatrywanej mieszanki (lepiszcza), wariantu oraz przyjętego punktu zniszczenia. Analizując wszystkie przypadki (zm-zm, odp, wygrz+odp) kryterium $E_{0\ 50\% H}^*$ dla każdej mieszanki (A-D) wykazuje wyższy przyrost trwałości zmęczeniowej niż kryterium $E_{k(1)H}^*$. Graficzną ilustrację przyrostu trwałości opisanego wskaźnikiem regeneracji HI zestawianych kryteriów przedstawiono na Rys. 95.



Rys. 95: Porównanie wskaźników regeneracji odnoszących się do przyrostu trwałości zmęczeniowej omawianych kryteriów

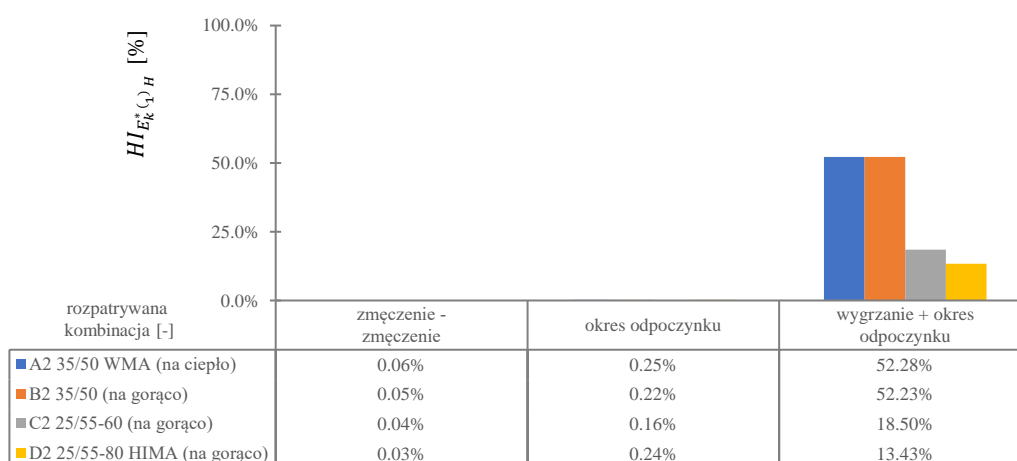
Z wykresu wynika również, że największe rozbieżności dostrzeżono w przypadku kombinacji: zmęczenie-zmęczenie (do 2% - ok. 39559 cykli (mieszanka D2)) oraz okres odpoczynku (do 5.9% - ok. 18196 cykli (mieszanka A2)). Zauważono, że dla wariantu wygrz+odp wyniki obydwu kryteriów zbliżają się do siebie – największa względna procentowa różnica wynosi zaledwie 0.34% (ok. 1073 cykli, mieszanka A2) - rezultaty są porównywalne. Obserwacja sugeruje, iż kryterium $E_{0\ 50\% H}^*$ dopuszcza wyższy poziom zniszczeń w materiale niż ten wynikający z kryterium $E_{k(1)H}^*$ korespondującego z punktem zniszczenia badania pierwszego.

Zwracając uwagę na wartości ustalonych modułów sztywności (Tab. 33) analizowanych mieszanek po regeneracji względem punktu zniszczenia badania pierwszego (identycznego dla kryterium autora – $E_{k(1)H}^*$) (przypadki zm-zm i odp) zauważa się, iż zregenerowana ich

wartość, jest bardzo niska (od 39 MPa (A2, zm-zm) do 1706 MPa (D2, odp). Ponadto wartość modułu szybko (gwałtownie) – osiąga punkt zniszczenia badania pierwszego (wystarczy zaledwie od 188 (A2, zm-zm) do 4798 (D2, odp) cykli). w przypadku zastosowania kryterium $E_{0.50\%H}^*$ wartość modułu sztywności dalej spada, liczba cykli wzrasta, jednak materiał ulega degradacji zwiększając poziom uszkodzeń w materiale wyrażony bardzo niskimi końcowymi wartościami modułu sztywności.

Odmienny trend obserwuje się dla wariantu wygrzewanie + okres odpoczynku, w którym wartość zregenerowanego modułu osiąga poziom początkowego modułu sztywności badania pierwszego, a liczba cykli do zniszczenia jest wysoka i prawie jednakowa dla obydwu kryteriów zmęczeniowych zastosowanych do oceny regeneracji. Na tej podstawie stwierdza się, iż regeneracja z udziałem oddziaływania temperatury i okresu odpoczynku wprowadza znaczące, pozytywne zmiany zachodzące na poziomie mikrostruktury mieszanki. Powstałe spękania ulegają zamknięciu, co wyraża się poprzez duży przyrost modułu sztywności i liczby cykli. z uwagi na pozyskane rezultaty wszystkich przypadków regeneracji stwierdza się, iż kryterium autora $E_{k(1)H}^*$ dokładniej opisuje właściwy punkt zniszczenia pozwalając skuteczniej ustalić poziom regeneracji materiału dla dowolnego sposobu. Dodatkowo autorskie kryterium koresponduje z przyjętym punktem zniszczenia określonym dla pierwszego badania zmęczeniowego. Podkreśla się, iż, kryterium $E_{0.50\%H}^*$ jest wrażliwe na rozpatrywany sposób regeneracji doprowadzając do zawyżenia wyników przez dopuszczenie większego stopnia degradacji materiału np. w przypadku regeneracji z okresem odpoczynku. Do analiz regeneracji wybrano ostatecznie kryterium autora $E_{k(1)H}^*$. Kryterium $E_{0.50\%H}^*$ nie będzie przedmiotem dalszej dyskusji.

W ramach analiz zbadanych trzech przypadków (zm-zm, odp, wygrz+odp) ustalono, że rodzaj asfaltu zaaplikowanego do mieszanki wpływa na jej zdolność regeneracji. Mieszanki na bazie asfaltu zwykłego B - 35/50 (HMA) i A - 35/50 (WMA) wykazały wyższy procentowy przyrost trwałości zmęczeniowej wyrażony wskaźnikiem $HI_{E_{k(1)H}^*}$ niż te na bazie asfaltów wysokomodyfikowanych C – 25/55-60 (HMA) oraz D – 25/55-80 HIMA (HMA). Wykres zmian wartości wskaźnika przedstawiono na Rys. 96.



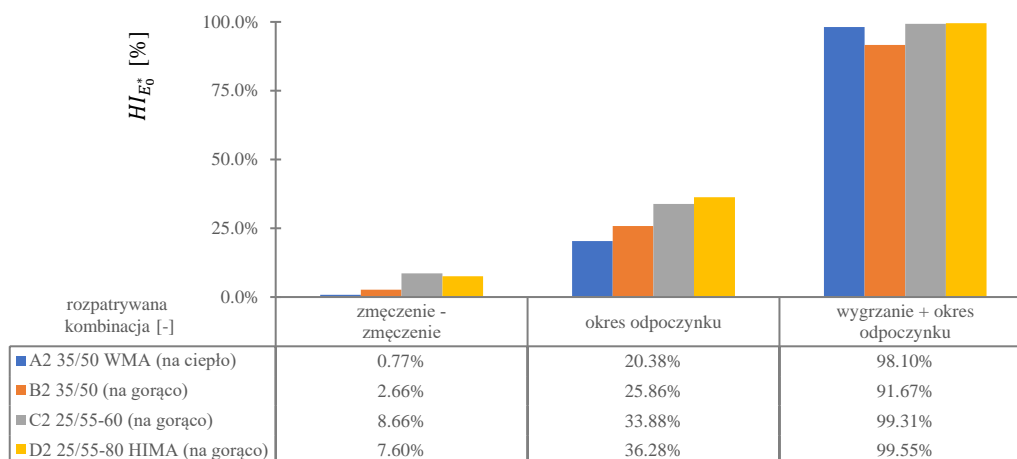
Rys. 96: Wartość wskaźnika regeneracji ustalony dla omawianych kombinacji badania - zm-zm, odp, wygrz+odp

Istotne różnice dostrzega się dla przypadku wygrz+odp dla którego mieszanki A i B wykazują do około 3.89 razy wyższą zdolność regeneracji w ujęciu trwałości zmęczeniowej niż C i D. Stwierdza się, iż rozbieżność wynika bezpośrednio z modyfikacji matrycy asfaltowej polimerem SBS. Wzrost zawartości tego polimeru, skutkuje wzrostem temperatury mięknienia

– potrzebna jest wyższa temperatura do wywołania takiego samego efektu regeneracji jak dla asfaltów zwykłych przy niższej temperaturze. Ponadto w przypadku mieszanki C modyfikacja matrycy jest mniejsza niż D, zatem regeneracja (trwałość zmęczeniowa) w zadanych warunkach powinna być efektywniejsza. Stwierdzenie jest prawdziwe i zostało poparte wynikami badań przedstawionymi na Rys. 96.

Z Rys. 96 wynika również, iż niezależnie od rodzaju zastosowanego do mieszanki asfaltu dla przypadku zm-zm oraz odp, regeneracja (trwałość) praktycznie nie zachodzi. Przyrost trwałości zmęczeniowej jest pomijalnie mały - wartości wskaźnika są bliskie 0%. Odmienny trend obserwuje się w przypadku wygrz+odp, w którym wartości wskaźnika są wysokie (A i B poziom ok. 52%, C - 18.50%, D – 13.43%) – dostrzega się znaczący przyrost trwałości zmęczeniowej spowodowanej oddziaływaniem wysokiej temperatury. Na podstawie pozyskanych rezultatów stwierdza się, iż wysoka temperatura ma kluczowy wpływ na zdolność regeneracji materiału w ujęciu trwałości zmęczeniowej, a wpływ okresu odpoczynku może zostać pominięty.

Przeanalizowano również przyrost wartości modułu sztywności (jako parametru materiałowego) wyrażonego poprzez wskaźnik regeneracji $HI_{E_0}^*$, dla 3 omawianych przypadków - zm-zm, odp, wygrz+odp. Wykres ilustrujący omawiane zależności przedstawiono na Rys. 97.



Rys. 97: Przyrost modułu sztywności wywołanego zestawianymi przypadkami mieszanek A-D

Na podstawie Rys. 97 dostrzeżono, iż przyrost wartości modułu (przypadek zm-zm) jest niewielki i nie przekracza 8%. Efekt chwilowego odprężenia pomiędzy badaniami skutkuje przyrostem wartości modułu. Podobne wnioski wyciąga się dla przypadku odp, jednak wdrożony dłuższy okres odpoczynku pomiędzy badaniami skutkuje zdecydowanie większym przyrostem wartości modułu sztywności (nawet do 36.28%). Ponadto obserwuje się, iż dla mieszanek z asfaltem modyfikowanym odprężenie jest bardziej znaczące niż dla tych na bazie asfaltów zwykłych – wartość zregenerowanego modułu sztywności jest większa nawet o ok. 16% (odp, D vs A). Trzeci przypadek (wygrz+odp) charakteryzuje się niemal pełnym przyrostem wartości modułu (w stosunku do początkowej jego wartości sprzed pierwszego badania zmęczeniowego). Obserwacja potwierdza poprzednie spostrzeżenia, iż oddziaływanie wysokiej temperatury połączonej z okresem odpoczynku najefektywniej regeneruje mieszankę niezależnie od rodzaju zastosowanego asfaltu.

Zestawiając ze sobą dane przedstawione na Rys. 96 i Rys. 97 stwierdza się, iż przyrost wartości modułu dla przypadków zm-zm i odp w odniesieniu do trwałości zmęczeniowej jest

nieistotny – jego wartość podnosi się, lecz gwałtownie spada, szybko osiągając punkt zniszczenia – brak istotnej regeneracji materiału wpływającej na trwałość zmęczeniową. Istotne współzależności moduł - trwałość dostrzega się w przypadku jednoczesnego oddziaływania wysokiej temperatury połączonej z okresem odpoczynku. Wartości modułu oraz trwałość zmęczeniowa ulegają znaczącemu przyrostowi – zachodzi efektywna regeneracja materiału, redukująca uszkodzenia powstałe wewnątrz materiału jednocześnie zwiększając jego zdolność do przenoszenia obciążeń.

Podsumowując, na podstawie przeprowadzonych rozważań **udowodniono**:

1. w przypadku analiz zjawiska regeneracji kryterium zmęczeniowe autora $E_{k(1)H}^*$ dokładniej opisuje punkt zniszczenia niż $E_{0.50\%H}^*$ pozwalając ocenić przyrost trwałości zmęczeniowej wynikającej z healingu,
2. chwilowe odprężenie lub dłuższy okres odpoczynku przyczyniają się do przyrostu wartości modułu sztywności mieszanek jednak nie powodują znaczącego przyrostu ich trwałości zmęczeniowej – są marginalne i mogą zostać pominięte,
3. oddziaływanie wysokiej temperatury na MMA, jest kluczowe - wywołuje ono skuteczną regenerację materiału, wpływającą na przyrost wartości modułu sztywności i trwałości zmęczeniowej,
4. zdolność mieszanek do regeneracji jest zależna od rodzaju zastosowanego asfaltu oraz sposobu wdrażania regeneracji,
5. mieszanki na bazie asfaltów modyfikowanych i wysokomodyfikowanych zawierających polimer SBS wykazują mniejszą zdolność regeneracji niż zwykłe – efekt zastosowania modyfikatora, który podnosi temperaturę mięknięcia asfaltu.

Na podstawie przeprowadzonych badań, do dalszych analiz związanych z regeneracją uwzględniających oddziaływania: mechaniczne, woda i mróz oraz sól drogowa zastosowano następujący przypadek wdrażania healingu:

zmęczenie – wygrzewanie (wygrzewanie + okres odpoczynku) - zmęczenie
(skrótowo - wygrz+odp)

5.3.6.4. Analiza regeneracji mieszanek A - D z uwzględnieniem oddziaływania wody i mrozu oraz soli drogowej

Po sezonie zimowym, mieszanki zlokalizowane w warstwach konstrukcji nawierzchni posiadają historię obciążenia wynikającą z oddziaływania czynników środowiskowych - niskiej temperatury (zmiany stanu skupienia wody) lub stosowanych zabiegów utrzymaniowych (roztapianie lodu solą drogową). w przypadku gdy nawierzchnia jest uszkodzona, dolne warstwy konstrukcji – podbudowa również narażone są na degradację wynikającą z omawianych oddziaływań. Istotnym problemem, który został przeanalizowany w tym podrozdziale jest ocena zdolności mieszanek do regeneracji, uprzednio obciążonych oddziaływaniem środowiskowym i chemicznym.

Regenerację mieszanek przeprowadzono według schematu: **zmęczenie – wygrzewanie (wygrzewanie + okres odpoczynku) - zmęczenie**. Efekt zjawiska przeanalizowano na wszystkich przetestowanych dotąd poziomach zawartości lepiszcza *K* (2.95, 2.80, 2.65) materiałów A - D. Wykorzystano poprzednio zbadane zestawy próbek (rozdział 5.3.4) uwzględniając jednocześnie odpowiednie oddziaływania środowiskowe. Należą do nich:

1. zestaw **referencyjny** (tylko obciążenie mechaniczne) - skrótowo **ref**,
2. zestaw **uprzednio obciążony wodą i mrozem** (czynnik środowiskowy + mechaniczny) – skrótowo **wim**,
3. zestaw **uprzednio obciążony solą drogową** (czynnik chemiczny + mechaniczny) - skrótowo **sd**.

Po wdrożeniu healingu na próbkach, wykonano ponownie badania zmęczeniowe, stosując kryterium autora. Zaaplikowano identyczne warunki badania jak w rozdziale 5.3.4.

Z uwagi na zbyt dużą ilość danych, w dalszej części tego podrozdziału wyniki pozyskane na podstawie przeprowadzonych powtórnych badań zmęczeniowych mieszanek A - D na wszystkich poziomach zawartości lepiszcza *K* uwzględniając zestaw: referencyjny, po oddziaływaniu czynnika środowiskowego oraz chemicznego przedstawiono i omówiono zbiorczo na zarób/receptę jako średnią z 5 oznaczeń. w ten sposób poprawiono czytelność pozyskanych danych, usprawniono proces komentowania oraz znajdowania wzajemnych korelacji. Zbiorcze wyniki badań mieszanek A – D zaprezentowano w Tab. 34.

Tab. 34: Zbiornicze wyniki ponownych testów zmęczeniowych (200 $\mu\epsilon$) mieszanek A - D dla trzech poziomów wskaźnika wypełnienia K

rec. MMA	K [-]	wariant	Pierwsze badanie zmęczeniowe			Drugie badanie zmęczeniowe			Zdolność regeneracji wyrażona wskaźnikiem HI				Trwałość zmęczeniowa
			E_p^* [MPa]	E_k^* [MPa]	$E_{0.50}^*$ [cykle]	E_{pH}^* [MPa]	E_{kH}^* [MPa]	$E_{(1)H}^*$ [cykle]	$HI_{E_0^*}$ [%]	$\Delta HI_{E_0^*}$ [%]	$HI_{E_{(1)H}^*}$ [%]	$\Delta HI_{E_{(1)H}^*}$ [%]	
A2	2.95	ref	9811	4906	311340	9718	4859	162778	98.10%		52.28%		474118
		wim	8194	4097	239465	7501	3751	41588	83.08%	-15.32%	17.37%	-66.78%	281053
		sd	8638	4319	256645	7955	3978	26875	84.19%	-14.18%	10.47%	-79.97%	283520
A3	2.80	ref	10959	5480	217004	9318	4659	44556	70.04%		20.53%		261560
		wim	9707	4853	165402	8012	4006	15878	65.08%	-7.08%	9.60%	-53.25%	181280
		sd	9793	4897	176493	8225	4113	11987	67.97%	-2.96%	6.79%	-66.92%	188480
A4	2.65	ref	10759	5380	149994	8444	4222	19089	56.96%		12.73%		169083
		wim	8311	4156	107053	5899	2950	5513	41.95%	-26.34%	5.15%	-59.54%	112566
		sd	8882	4441	117192	6014	3007	3874	35.42%	-37.82%	3.31%	-74.03%	121066
B2	2.95	ref	9900	4950	411640	9488	4744	215001	91.67%		52.23%		626641
		wim	8655	4327	322025	8239	4120	98913	90.40%	-1.38%	30.72%	-41.19%	420938
		sd	9027	4513	395943	8602	4301	57216	90.59%	-1.18%	14.45%	-72.33%	453158
B3	2.80	ref	10870	5435	296816	9537	4769	66241	75.48%		22.32%		363057
		wim	9054	4527	224923	7581	3791	37991	67.46%	-10.63%	16.89%	-24.32%	262914
		sd	10156	5078	279894	8215	4108	26584	61.77%	-18.17%	9.50%	-57.44%	306478
B4	2.65	ref	10653	5326	161401	9000	4500	28744	68.96%		17.81%		190145
		wim	7974	3987	115563	5998	2999	11210	50.43%	-26.87%	9.70%	-45.53%	126773
		sd	9887	4944	145906	7481	3741	6121	51.32%	-25.58%	4.20%	-76.44%	152027
C2	2.95	ref	9935	4968	1456839	9901	4951	269560	99.31%		18.50%		1726399
		wim	9677	4838	1398566	9411	4706	246875	94.51%	-4.84%	17.65%	-4.60%	1645441
		sd	9756	4878	1436444	9258	4629	237889	89.78%	-9.59%	16.56%	-10.50%	1674333
C3	2.80	ref	10015	5007	928584	9787	4894	133589	95.45%		14.39%		1062173
		wim	9274	4637	810726	8779	4390	106781	89.33%	-6.41%	13.17%	-8.45%	917507
		sd	9594	4797	879084	8676	4338	103557	80.86%	-15.29%	11.78%	-18.12%	982641
C4	2.65	ref	9985	4993	497310	8954	4477	44147	79.35%		8.88%		541457
		wim	8425	4213	399351	7015	3508	28477	66.53%	-16.16%	7.13%	-19.67%	427828
		sd	9173	4587	455498	7356	3678	30111	60.38%	-23.90%	6.61%	-25.53%	485609
D2	2.95	ref	9310	4655	1958796	9289	4645	263020	99.55%		13.43%		2221816
		wim	9129	4565	1928239	8789	4395	230259	92.55%	-7.04%	11.94%	-11.07%	2158498
		sd	9194	4597	1938425	8897	4449	212571	93.53%	-6.05%	10.97%	-18.33%	2150996
D3	2.80	ref	10460	5230	1032285	10193	5097	107895	94.90%		10.45%		1140180
		wim	10100	5050	972412	9265	4633	86575	83.46%	-12.05%	8.90%	-14.82%	1058987
		sd	10021	5010	1009574	9311	4656	87518	85.84%	-9.55%	8.67%	-17.06%	1097092
D4	2.65	ref	10208	5104	543505	9055	4528	34327	77.40%		6.32%		577832
		wim	9089	4545	505364	7742	3871	19874	70.36%	-9.10%	3.93%	-37.73%	525238
		sd	9511	4756	506251	7751	3876	17857	62.98%	-18.63%	3.53%	-44.15%	524108

W Tab. 34 zastosowano następujące oznaczenia:

ref – tylko oddziaływanie mechaniczne,

wim – woda i mróz + oddziaływanie mechaniczne,

sd – sól drogowa + oddziaływanie mechaniczne,

K – wskaźnik wypełnienia [-],

E_p^* – początkowa wartość modułu sztywności wyznaczona w 100-cyklu badania [MPa],

E_k^* – wartość modułu sztywności po osiągnięciu kryterium zmęczeniowego (spadku początkowej wartości modułu o 50%) [MPa],

$E_{0\ 50\%}^*$ – trwałość zmęczeniowa wyrażona w cyklach uzyskana po spadku początkowej wartości modułu sztywności ustalanego w 100-cyklu badania o 50% [cykle],

$E_{p\ H}^*$ – początkowa wartość modułu sztywności wyznaczona w 100-cyklu badania (po zabiegu regeneracji) [MPa],

$E_{k\ H}^*$ – wartość modułu sztywności po osiągnięciu kryterium zmęczeniowego spadku początkowej wartości modułu o 50% badania pierwszego (po zabiegu regeneracji) [MPa],

$E_{k\ (1)H}^*$ – trwałość zmęczeniowa wyrażona w cyklach uzyskana po spadku początkowej wartości modułu sztywności ustalanego w 100-cyklu badania (zmierzonej po zabiegu regeneracji) do uzyskania końcowej wartości modułu sztywności pierwszego badania zmęczeniowego (kryterium autora) [cykle],

$HI_{E_0^*}$ – procentowa zdolność regeneracji mieszanki wyrażająca przyrost modułu sztywności [%],

$\Delta HI_{E_0^*}$ – procentowy spadek zdolności regeneracji mieszanki zestawu poddanego oddziaływaniu czynnika wody i mrozu lub soli drogowej względem zdolności regeneracji mieszanki zestawu referencyjnego ustalany na podstawie wskaźnika $HI_{E_0^*}$ [%],

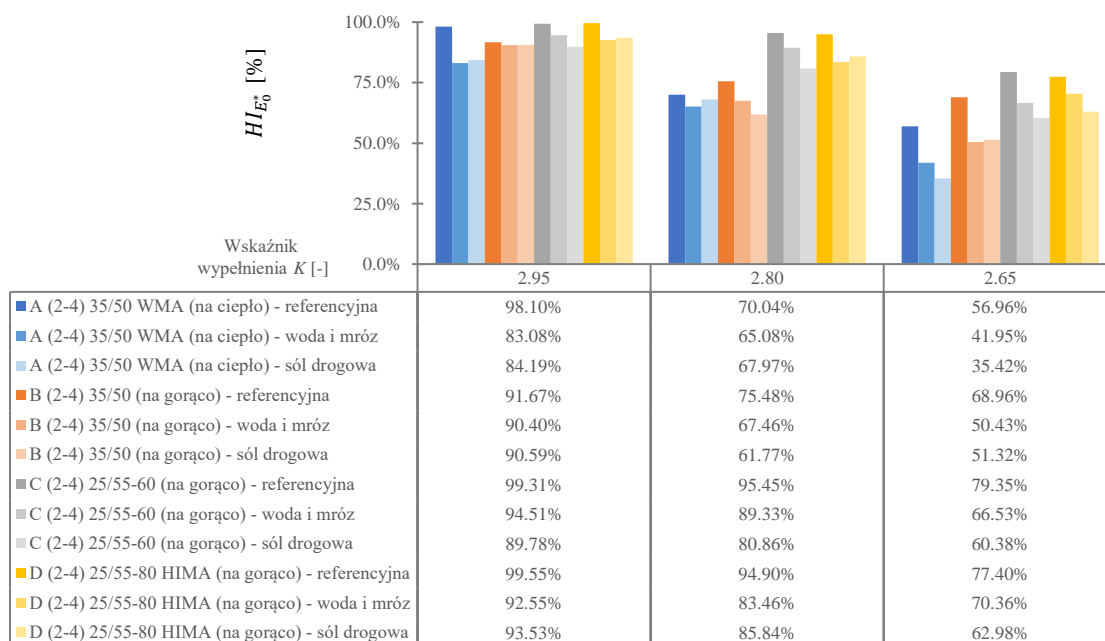
$HI_{E_{k\ (1)H}^*}$ – procentowa zdolność regeneracji mieszanki wyrażająca przyrost trwałości zmęczeniowej (cykle) dla kryterium $E_{k\ (1)H}^*$ [%],

$\Delta HI_{E_{k\ (1)H}^*}$ – procentowy spadek zdolności regeneracji mieszanki zestawu poddanego oddziaływaniu czynnika wody i mrozu lub soli drogowej względem zdolności regeneracji mieszanki zestawu referencyjnego ustalany na podstawie wskaźnika $HI_{E_{k\ (1)H}^*}$ [%],

$E_{0\ 50\%}^* + E_{k\ (1)H}^*$ - wypadkowa trwałość zmęczeniowa mieszanek wyrażona w cyklach jako suma dwóch badań zmęczeniowych przed i po regeneracji – kryterium $E_{0\ 50\%}^*$ (1) i $E_{k\ (1)H}^*$ (2).

Nawiązując do wartości przedstawionych w Tab. 34 wyszczególniono 12 obserwacji.

1. Mieszanki A – D wykazały widoczny przyrost modułu sztywności względem wartości zarejestrowanej na końcu badania pierwszego. Jego poziom jest zróżnicowany i zależy od rodzaju i zawartości lepiszcza (wyrażonego wskaźnikiem wypełnienia K) oraz rozpatrywanego oddziaływania. Podobne trendy obserwuje się w przypadku trwałości zmęczeniowej wyrażonej w cyklach.
2. W przypadku zmian zawartości lepiszcza mieszanki zestawu referencyjnego wykazują największą zdolność regeneracji wyrażoną przez $HI_{E_0}^*$ (zmiany modułu) względem próbek obciążonych wodą i mrozem lub solą drogową. W najlepiej wypadła mieszanka D i C na bazie asfaltów modyfikowanych. Rezultaty są do siebie zbliżone. Wartości wskaźników tych mieszanek są największe i cechują się małymi fluktuacjami przy obniżaniu poziomu zawartości lepiszcza wyrażonym przez K – (np. D – $K = 2.95$, 99.55% , $K = 2.80$, 94.90% , $K = 2.65$, 77.40%). w przypadku mieszanek a i B na bazie asfaltów zwykłych wartości wskaźnika są znacznie mniejsze od C i D (poza poziomem $K = 2.95$). Znaczące rozbieżności dostrzeżono na najniższym rozpatrywanym poziomie $K = 2.65$, dla którego zdolność regeneracji modułu wynosi: B około 68.96% i A około 56.96% - Mieszanka B jest zatem około 1.21 razy lepsza od A na tym poziomie K . Natomiast obydwie są średnio gorsze od C i D o około 25% . Stwierdza się, iż modyfikacja matrycy polimerem SBS znacząco podwyższa zdolność regeneracji mieszanki (moduł sztywności).
3. Oddziaływanie wody i mrozu oraz soli drogowej znacząco obniża zdolność mieszanek A - D do regeneracji wyrażoną przez $HI_{E_0}^*$ (zmiany modułu). Wartości wskaźników są niższe od tych ustalonych dla zestawu referencyjnego. Trend jest obserwowalny na każdym poziomie wskaźnika wypełnienia K . Stwierdza się, iż zmniejszenie zawartości asfaltu w MMA zwiększa negatywny wpływ oddziaływania wody i mrozu lub soli drogowej na regenerację modułu sztywności. Wartości wskaźnika ulegają zmniejszeniu nawet aż o 40% (A4)! Omawiane zależności przedstawiono na Rys. 98. Na ilustracji zaprezentowano zmiany wskaźnika $HI_{E_0}^*$ względem zmian K uwzględniając zestawy: referencyjny, woda i mróz oraz sól drogową.

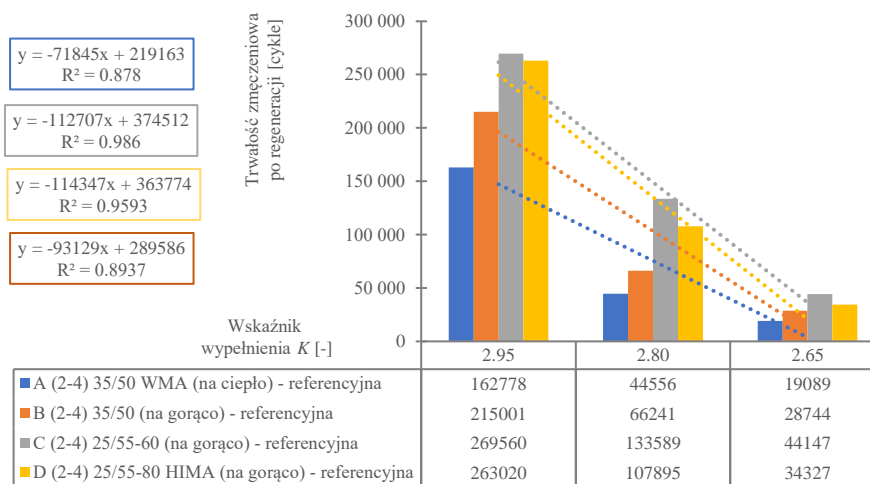


Rys. 98: Zmiany zdolności regeneracji mieszanek A - D wyrażone poprzez zmiany modułu sztywności - zestaw referencyjny, woda i mróz, sól drogowa

- Analizując dane z tabeli oraz Rys. 98, dostrzega się, iż modyfikacja matrycy polimerem SBS mieszanek C i D skutecznie zabezpiecza mieszanekę przed osłabieniem zdolności regeneracji w wyniku oddziaływania wody i mrozu lub soli drogowej. Skuteczność dochodzi nawet do 2-óch razy – mieszanka A4 względem D4 (sól drogowa, $K = 2.65$). Obserwuje się również, iż w przypadku materiałów A i B na bazie lepiszczy zwykłych, większy wpływ na ograniczenie zdolności regeneracji wywiera sól drogowa niż czynnik wody i mrozu – nawet do 32% większy (A4) przy niskich poziomach zawartości asfaltu. Podobną zależność dostrzega się dla mieszanek C i D – nawet do 10% większy (D4). Trend zmienia się przy wyższych zawartościach asfaltu (wyjątek mieszanka C) – dominujący wpływ wody i mrozu nad solą dochodzący nawet do 2.5 razy (A3 woda i mróz vs sól). Na podstawie wcześniejszych obserwacji i prezentowanych wyników, stwierdza się, iż pomiędzy mieszankami A – D (ich lepiszczem), a solą drogową dochodzi do reakcji chemicznej, której efektem jest znaczący spadek zdolności regeneracji modułu sztywności. w przypadku oddziaływania wody i mrozu, spowodował on wystąpienie uszkodzeń wewnątrz materiału, które nie mogły zostać zregenerowane – materiał nie odzyskał pełnej nośności wyrażonej modułem sztywności.
- Zestawiając ze sobą mieszanki wykonane w technologii WMA (A) i HMA (B), większą odporność na fluktuacje zdolności regeneracji wyrażonej przez $HI_{E_0^*}$ (zmiany modułu) wykazuje mieszanka wykonana w technologii HMA. Niezależnie od oddziaływań lub ich braku (zestaw referencyjny) technologia na gorąco wypada do 32% lepiej (B4 vs A4, sól drogowa).
- Analizując zdolność regeneracji mieszanek A – D (zestaw referencyjny) wyrażoną przez wskaźnik $HI_{E_k^*(1)H}$ największy procentowy przyrost trwałości zmęczeniowej odnotowano dla mieszanki A2 (zestaw referencyjny) i wynosił aż 52.28%! Podobnie zachowała się mieszanka B2 – 52.23%. w przypadku mieszanek C2 i D2 zdolność healingowa wyniosła kolejno: 18.50% oraz 13.43%. Stwierdzono, iż zwiększanie stopnia modyfikacji matrycy asfaltowej polimerem SBS znacząco (nawet do 4 razy! A2

względem D2) pogarsza zdolność regeneracji ze względu na trwałość zmęczeniową. Jest to efekt podwyższonej temperatury mięknięcia asfaltu uzyskanej poprzez zmianę jego składu – przy temperaturze ogrzania 55°C mieszanka D z asfaltem 25/55-80 HIMA, którego temperatura mięknięcia wynosi 80°C nie ma możliwości makroskopowego upłynnienia się. Regeneracja zachodzi jedynie na poziomie mikrostruktury w otoczeniu powstałych mikrouszkodzeń. Obserwacje potwierdza rezultat mieszanki C2, cechującej się mniejszym poziomem modyfikacji matrycy (temperatura mięknięcia 60°C), której zdolność jest o ok. 37% większa niż D2. w przypadku mieszanek A i B temperatura mięknięcia jest jeszcze niższa. Wynosi ona 50 – 58°C, dlatego też zaobserwowany % przyrost trwałości wynikłej z regeneracji materiału jest większy.

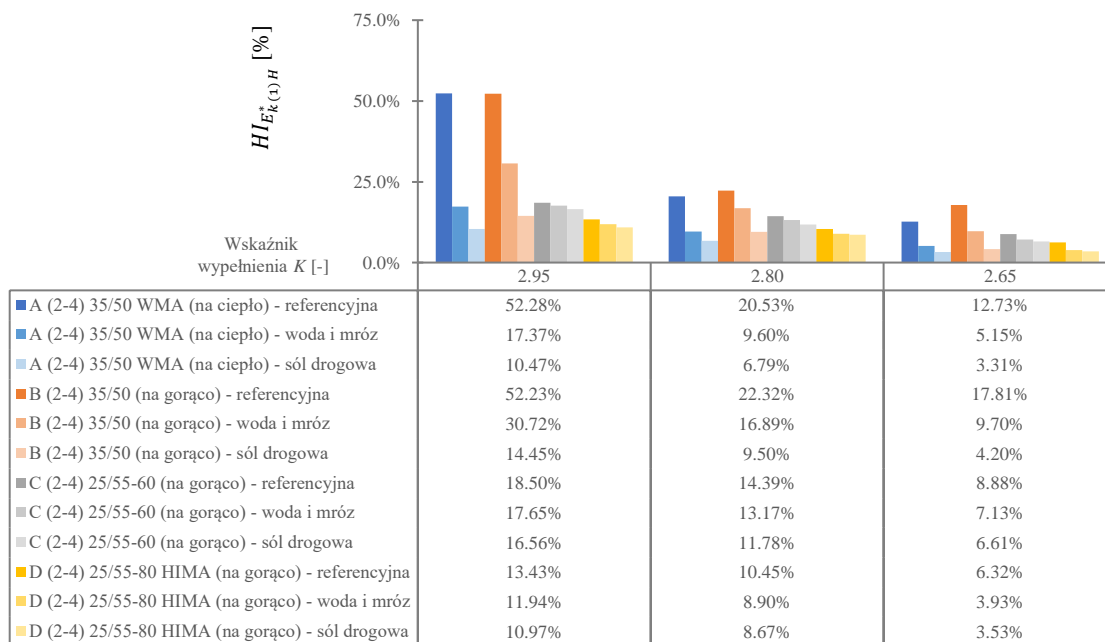
7. Obniżanie wartości wskaźnika wypełnienia K w mieszankach A – D (zestaw referencyjny) skutkuje gwałtownym, dochodzący nawet do 4.10 razy (np. dla mieszanki A2 względem A4) regresem zdolności regeneracji mieszanek A – D wyrażonej przez wskaźnik $HI_{E_k^*(1)H}$ (zmiana trwałości zmęczeniowej w cyklach) stwierdza się, iż zmniejszanie zawartości lepiszcza znacząco obniża przyrost trwałości. Rozbieżności są tym większe im niższy poziom K jest brany pod uwagę. Na podstawie rezultatów badań wskazujących przyrost trwałości w cyklach przedstawionych na Rys. 99, omawiany spadek nie jest bez znaczenia i w skrajnych przypadkach przekracza 220 tys.



Rys. 99: Przyrost trwałości zmęczeniowej w cyklach mieszanek A - D (zestaw referencyjny)

Na wykresie (Rys. 99) zaprezentowano również zastosowany model regresji liniowej charakteryzujący się wysokim współczynnikiem determinacji R^2 - powyżej 0.878. Zauważa się, iż trend zmian zdolności regeneracji przy zmniejszającej się zawartości asfaltu jest liniowy.

8. Istotnymi czynnikami ograniczającymi zdolność regeneracji mieszanek A – D w ujęciu zmian trwałości zmęczeniowej wyrażonej przez wskaźnik $HI_{E_k^*(1)H}$ są woda i mróz oraz sól drogowa. Na Rys. 100 zaprezentowano wykres zmian wskaźnika regeneracji od omawianych wpływów.



Rys. 100: Zmiany zdolności regeneracji mieszank A - D wyrażone poprzez przyrost trwałości zmęczeniowej w cyklach - zestaw referencyjny, woda i mróz, sól drogowa

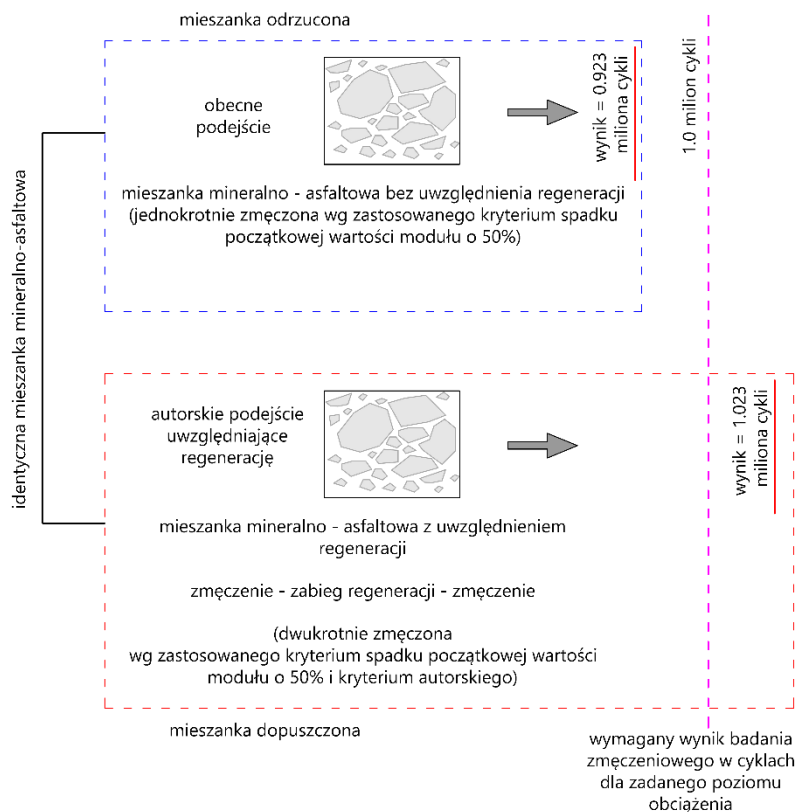
Na podstawie danych Tab. 34 i Rys. 100 zauważono, iż oddziaływanie wody i mrozu oraz soli drogowej obniża zdolność regeneracji mieszank A – D wyrażonej wskaźnikiem $HI_{E_k^*(1)H}$ od 4.60% (C2, woda i mróz) aż do 79.97%! (A2, sól drogowa).

Obserwowane zmiany należą do bardzo znaczących. w przypadku MMA na bazie asfaltu zwykłego A i B spadek zdolności regeneracji jest wysoki. Wynosi on od 1.32 razy (B3, woda i mróz), aż do ok. 5 razy (A2, sól drogowa) względem zestawu referencyjnego. Mieszanki C i D charakteryzują się większą odpornością na destrukcyjne oddziaływania wody i mrozu lub soli. Zdolność regeneracji spadła jedynie od 1.04 razy (C2, woda i mróz) do 1.79 razy (D4, sól drogowa) w stosunku do odniesienia (ref), czyli nawet do 2.5 razy mniej w przypadku asfaltów zwykłych. Stwierdza się, iż polimer SBS zawarty w mieszankach na bazie asfaltów modyfikowanych zapewnia wysoką odporność na wodę i mróz oraz sól drogową (regeneracja nie jest znacząco osłabiana przez omawiane oddziaływania).

- Na podstawie danych - Tab. 34 i Rys. 100 zaobserwowano, iż we wszystkich mieszankach A – D, na każdym poziomie K, sól drogowa najbardziej ogranicza zdolności healingowe wyrażone przez wskaźnik $HI_{E_k^*(1)H}$. Wpływ działalności wody i mrozu na regenerację jest mniejszy. Największe różnice w redukcji healingu pomiędzy solą drogową a wodą i mrozem dochodzą do 2.3 razy (C2). Na podstawie wcześniejszych obserwacji i prezentowanych wyników, stwierdza się, iż sól drogowa reaguje z mieszankami A – D (lepiszczem). Efektem reakcji jest zmiana właściwości przereagowanego lepiszcza ograniczająca jego zdolność regeneracji w wysokiej temperaturze (przyrost trwałości zmęczeniowej). Podkreśla się, iż oddziaływanie omawianych czynników znacząco ogranicza healing (przyrost trwałości zmęczeniowej) badanych MMA. Uwzględniając zjawisko regeneracji w MMA należy wziąć pod uwagę spadek zdolności healingowych wywołanych działalnością wody i mrozu oraz soli drogowej.
- Zestawiając ze sobą mieszanki wykonane w technologii WMA (A) i HMA (B) większą odporność na fluktuacje zdolności regeneracji wyrażonej przez $HI_{E_k^*(1)H}$ (trwałość

zmęczeniowa) wykazuje mieszanka wykonana w technologii HMA. Niezależnie od rozpatrywanych oddziaływań (zestaw referencyjny, woda i mróz lub sól drogowa) technologia na gorąco wypada nawet do 2-razy lepiej (np. B3 vs A3, woda i mróz). Podkreśla się, iż, pomimo że mieszanka B wypadła lepiej, zdolność healingu w obrębie omawianych technologii jest mimo wszystko porównywalna.

11. Na podstawie wykonanych badań dokonano sumy trwałości zmęczeniowej 1 i 2 badania. Zauważono, iż wypadkowa trwałość zmęczeniowa wyrażona w cyklach mieszanek A - D niezależnie od rozpatrywanego oddziaływania (woda i mróz, sól drogowa) lub poziomu *K* różni się od tej wynikającej z powszechnie stosowanego podejścia (jedno badanie zmęczeniowe, tylko czynnik mechaniczny). Suma wyników dwóch badań zmęczeniowych (cykli) jest jedną z autorskich propozycji zamieszczonych w rozprawie, które pozwalają uwzględnić zjawisko regeneracji oraz działanie czynników środowiskowych lub chemicznych w trwałości zmęczeniowej, aby lepiej prognozować trwałość zmęczeniową materiału i konstrukcji. nawierzchni.
12. Wykonując analizę sumy cykli dwóch badań zmęczeniowych mieszanek A – D zwraca się wyraźną uwagę na materiały: (C3, referencyjny), (D3, woda i mróz), w których po pierwszym badaniu na zadanym poziomie obciążenia MMA uzyskały trwałość niewiele mniejszą niż wymagany 1.0 milion cykli (korelacja ze spękaniami w nawierzchni badania LCPC) – ok. 900 tys. cykli. Wynik ten dyskwalifikowałby mieszanki w ocenie trwałości - (200ε6). Natomiast po uwzględnionej regeneracji wywołanej zbliżonymi warunkami in-situ i ponownym badaniu, próg 1.0 milion cykli w obydwu przypadkach został osiągnięty co pozwala zmienić status użyteczności mieszanek dla tego poziomu obciążenia - można je uznać za trwałe zmęczeniowo. Ukazana sytuacja pozwala wykorzystać potencjał regeneracji w kontekście optymalizacji zawartości lepiszcza asfaltowego w recepcie. Gdyby zastosować obecne podejście mieszanka np. (C3, referencyjny) musiałaby zostać odrzucona, i należałoby przyjąć receptę C2, która różni się od C3 o 0.21% większą zawartością asfaltu – aspekt ekonomiczny. **Stwierdza się, iż uwzględnienie regeneracji w projektowaniu technologicznym pozwala na optymalizację składu (zawartość lepiszcza asfaltowego) ze względu na trwałość zmęczeniową.** Ideologiczny schemat przedstawionej myśli zaprezentowano na Rys. 101.



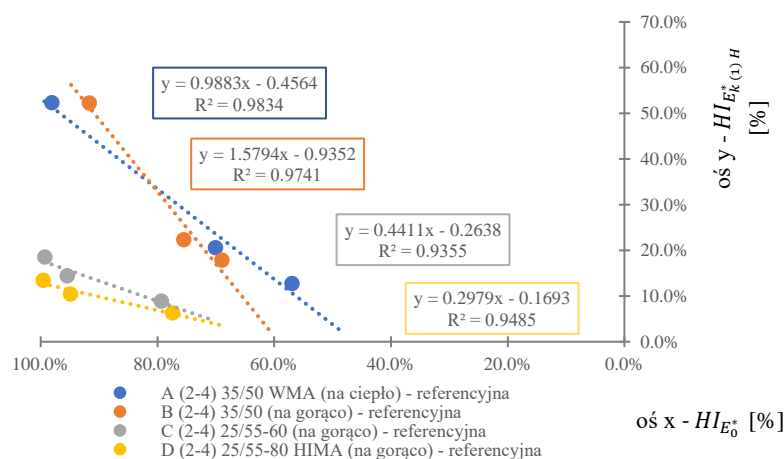
Rys. 101: Ideologiczny schemat autorskiego sposobu uwzględnienia zjawiska regeneracji w laboratoryjnych badaniach zmęczeniowych

Nawiązując do analizowanych w Tab. 34 wskaźników regeneracji, w ocenie autora spośród: $HI_{E_0^*}$ (zmiany modułu sztywności) oraz $HI_{E_k^*(1)H}$ (trwałość zmęczeniowa) $HI_{E_k^*(1)H}$ jest najistotniejszy, ponieważ umożliwi ocenić rzeczywisty przyrost trwałości zmęczeniowej. Informacja ta dla projektowanych nawierzchni jest istotniejsza dlatego, że pozwala ustalić, ile obciążeń więcej będzie ona mogła przenieść. Podkreśla się, iż $HI_{E_0^*}$ opiera się na zmianach modułu sztywności, które odnoszą się w pierwszej kolejności do nośności materiału. Wskaźnik, nie wyraża w sposób bezpośredni przyrostu trwałości zmęczeniowej w cyklach.

W ramach analiz nad regeneracją sprawdzono, czy istnieją wzajemne korelacje wskaźników $HI_{E_0^*}$ (moduł sztywności) i $HI_{E_k^*(1)H}$ (trwałość zmęczeniowa). Moduł sztywności można szybciej określić w stosunku do badania zmęczeniowego (przeliczenie zmian modułu na trwałość znając trend – brak potrzeby wykonania drugiego badania zmęczeniowego, wystarczy ocenić jego moduł początkowy po regeneracji).

Na podstawie zastosowanej regresji liniowej (linia trendu) wykorzystującej metodę najmniejszych kwadratów ustalono poziom korelacji pomiędzy $HI_{E_0^*}$ (moduł sztywności), a $HI_{E_{k(1)H}^*}$ (trwałość zmęczeniowa) korzystając z wartości współczynnika determinacji R^2 . Przyjęto analogiczne poziomy dopasowania modelu jak w poprzednich podrozdziałach (patrz podrozdział 5.2.193). Wykres zmian i wykonaną analizę statystyczną (którą wykonano korzystając z programu Microsoft Excel) przedstawiono na odpowiednich rysunkach w następującej kolejności:

1. wykres zmian wskaźnika $HI_{E_0^*}$ (moduł sztywności) od wskaźnika $HI_{E_{k(1)H}^*}$ (trwałość zmęczeniowa) dla zestawu referencyjnego – Rys. 102,
2. wykres zmian wskaźnika $HI_{E_0^*}$ (moduł sztywności) od wskaźnika $HI_{E_{k(1)H}^*}$ (trwałość zmęczeniowa) dla zestawu obciążonego czynnikiem środowiskowym (woda i mróz) – Rys. 103,
3. wykres zmian wskaźnika $HI_{E_0^*}$ (moduł sztywności) od wskaźnika $HI_{E_{k(1)H}^*}$ (trwałość zmęczeniowa) dla zestawu obciążonego czynnikiem chemicznym (sól drogowa) – Rys. 104.

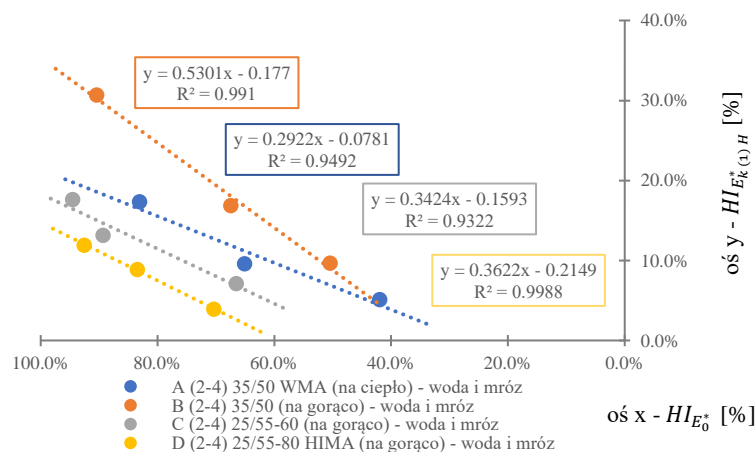


Rys. 102: Wykres zmian wskaźnika $HI_{E_0^*}$ (moduł sztywności) od wskaźnika $HI_{E_{k(1)H}^*}$ (trwałość zmęczeniowa) dla zestawu referencyjnego

Analizując Rys. 102, wszystkie mieszanki A – D (zestaw referencyjny) dla których zastosowano modele regresji liniowej wyróżniają się one bardzo dobrym ($R^2 \gg 0.90$) dopasowaniem. Na podstawie obserwacji można stwierdzić, iż istnieje ścisłe powiązanie pomiędzy regeneracją modułu sztywności, a przyrostem trwałości zmęczeniowej w cyklach. Stopień regeneracji może zatem być wyznaczany z udziałem modułu sztywności i skutecznie przeliczany na trwałość zmęczeniową przy rozpatrywanym poziomie obciążenia. Obserwacje mogą być również pomocne w zastosowaniach optymalizacyjnych (operowanie zawartością lepiszcza) ponieważ pozwalają przewidywać zachowanie się mieszanek przy innych poziomach wskaźnika wypełnienia K (ten sam skład ziarnowy i założenia technologiczne).

Materiały C i D charakteryzują się niską, zbliżoną wartością kąta nachylenia linii trendu. Proste modelowe są do siebie w przybliżeniu równoległe i rozsunęte – mieszanka D charakteryzuje się mniejszą prędkością przyrost wskaźników (gorzej poddaje się zabiegom regeneracji) niż C. Ponownie potwierdzono wcześniejsze obserwacje związane z modyfikacją matrycy asfaltowej polimerem SBS i jej wpływem na healing.

Mieszanki A i B wyszczególniają się znacznie większą wartością kąta nachylenia linii trendu - nawet do 5.5 razy większą (D vs B) niż odniesieniu do mieszanek C i D. Prędkość zmian jest wyższa i wynika bezpośrednio z rodzaju asfaltu zastosowanego (bez polimeru) do tych mieszanek oraz pośrednio niższej temperatury mięknięcia (właściwość lepiszcza). Efektem uaktywnienia cech lepkich (zmniejszenie się lepkości lepiszcza wywołane wysoką temperaturą) w tych MMA jest znaczny przyrost trwałości zmęczeniowej i modułu sztywności. Linie trendu mieszanek A i B przecinają się wzajemnie pomiędzy poziomem wskaźnika $K = 2.95$ a 2.80 – oznacza to, iż wrażliwszą na zmiany zawartości lepiszcza mieszanką w ujęciu zdolności regeneracji jest B – nawet do 1.5 razy bardziej (stosunek kątów nachylenia linii trendu).

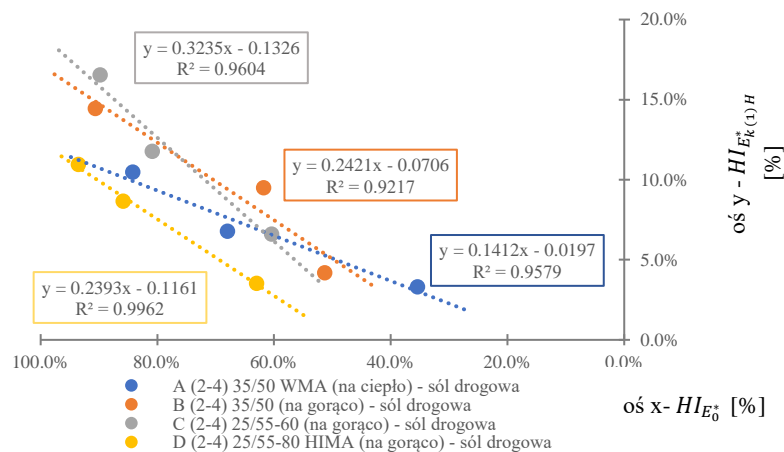


Rys. 103: Wykres zmian wskaźnika $HI_{E_0}^*$ (moduł sztywności) od wskaźnika $HI_{E_k(1)H}^*$ (trwałość zmęczeniowa) dla zestawu obciążonego wodą i mrozem

Biorąc pod uwagę Rys. 103, wszystkie mieszanki A – D (zestaw obciążony czynnikiem środowiskowym – woda i mróz) dla których zastosowano modele regresji liniowej wyróżniają się one również bardzo dobrym ($R^2 \gg 0.90$) dopasowaniem. Na podstawie obserwacji można stwierdzić, iż istnieje ściśle powiązanie pomiędzy regeneracją modułu sztywności, a przyrostem trwałości zmęczeniowej w cyklach nawet w przypadku mieszanek obciążonych czynnikiem wody i mrozu. w dalszym ciągu została zachowana liniowość zaaplikowanych modeli.

Zdolność regeneracji tego zestawu mieszanek jest niższa (destrukcyjny wpływ oddziaływania na regenerację) niż zestawu referencyjnego, jednak w dalszym ciągu może być wyznaczana z udziałem modułu sztywności i skutecznie przeliczana na trwałość zmęczeniową przy rozpatrywanym poziomie obciążenia. Obserwacje mogą być również przydatne w zastosowaniach optymalizacyjnych (operowanie zawartością lepiszcza) ponieważ pozwalają przewidywać zachowanie się mieszanek na innych poziomach wskaźnika wypełnienia K (ten sam skład ziarnowy i założenia technologiczne).

Mieszanki A – D charakteryzują się podobnym kątem nachylenia (wyjątek stanowi B – ok. 0.5 raza większy kat niż A, C i D), są do siebie równoległe i rozsunięte względem osi pionowej i poziomej. Obserwacje wskazują, iż oddziaływanie wody i mrozu obniża zdolność regeneracji badanych MMA jednak powstałe różnice wynikają z rodzaju zastosowanego lepiszcza. Mieszanka D wyróżnia się najmniejszą zdolnością regeneracji, następnie C, A i B (która wypadła najlepiej).



Rys. 104: Wykres zmian wskaźnika $HI_{E_0^*}$ (moduł sztywności) od wskaźnika $HI_{E_{k(1)H}^*}$ (trwałość zmęczeniowa) dla zestawu obciążonego solą drogową

Analizując Rys. 104, mieszanki a – D (zestaw obciążony czynnikiem chemiczny – sól drogowa) dla których zastosowano modele regresji liniowej wyróżniają się również bardzo dobrym ($R^2 \gg 0.90$) dopasowaniem. Na podstawie obserwacji można stwierdzić, iż istnieje ściśle powiązanie pomiędzy regeneracją modułu sztywności, a przyrostem trwałości zmęczeniowej w cyklach nawet w przypadku mieszanek uprzednio obciążonych czynnikiem chemicznym. w dalszym ciągu została zachowana liniowość zaaplikowanych modeli. Zdolność regeneracji tego zestawu mieszanek jest znacząco niższa (destrukcyjny wpływ oddziaływania na regenerację) niż zestawu referencyjnego, jednak w dalszym ciągu może być wyznaczana z udziałem modułu sztywności i skutecznie przeliczana na trwałość zmęczeniową przy rozpatrywanym poziomie obciążenia. Obserwacje mogą być również przydatne w zastosowaniach optymalizacyjnych (operowanie zawartością lepiszcza) ponieważ pozwalają przewidywać zachowanie się mieszanek na innych poziomach wskaźnika wypełnienia K (ten sam skład ziarnowy i założenia technologiczne).

Mieszanki A – D charakteryzują się podobnym kątem nachylenia (mieszanki: A – ok. 0.3 razy mniejszy i C – ok. 0.4 razy wykazują nieznaczną zmienność względem kąta nachylenia MMA B i D), są do siebie równoległe i rozsunięte względem osi pionowej i poziomej. Obserwacje wskazują, iż oddziaływanie soli drogowej obniża zdolność regeneracji badanych MMA jednak powstałe różnice wynikają z rodzaju zastosowanego lepiszcza. Mieszanka D wyróżnia się najmniejszą zdolnością regeneracji, następnie A. C i B są porównywalne - wypadły najlepiej.

5.3.6.5. Analizy wykresów zmian modułu sztywności od liczby cykli

Zbadane mieszanki poddano analizie zmian modułu sztywności będącego parametrem materiałowym od liczby cykli. Zagadnienie omówiono na wybranej mieszance - B (asfalt 35/50) na poziomie zawartości lepiszcza $K = 2.95$. Pozostałe MMA (A, C, D) niezależnie od poziomu K (uwzględniając rozpatrywane oddziaływania) charakteryzowały się podobnym kształtem wykresu.

W ramach analiz rozpatrzono następujące kombinacje oddziaływań oraz:

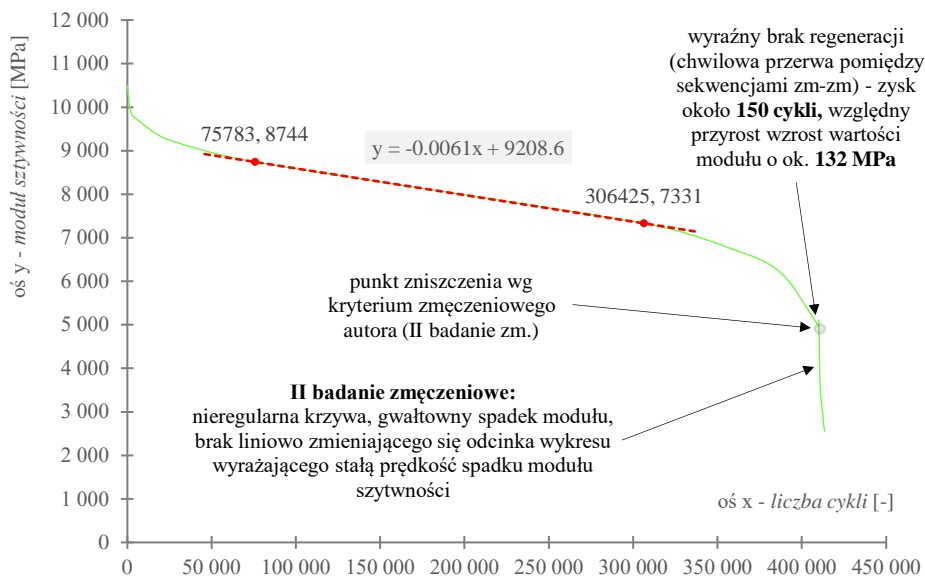
1. zmęczenie – zmęczenie – skrótowo **zm-zm**,
2. zmęczenie – okres odpoczynku – zmęczenie – skrótowo **odp**,
3. zmęczenie – wygrzewanie (wygrzewanie + okres odpoczynku) - zmęczenie – skrótowo **wygrz+odp** (przypadki wdrażania healingu) lub **ref** (zestaw obciążony tylko czynnikiem mechanicznym stanowiący odniesienie, który został wykorzystany w analizach regeneracji mieszanek poddanych oddziaływaniu środowiskowemu),
4. woda i mróz – zmęczenie – wygrzewanie – zmęczenie – skrótowo **wim**,
5. sól drogowa – zmęczenie – wygrzewanie – zmęczenie – skrótowo **sd**,
6. woda i mróz – sól drogowa – zmęczenie – wygrzewanie – zmęczenie (kombinacja została wykonana kontrolnie celem udowodnienia słuszności opracowanej metody i matematycznej formuły umożliwiającej ocenę stanu skumulowanego (woda i mróz + sól drogowa) na podstawie niezależnych badań wody i mrozu oraz soli drogowej – patrz rozdział 5.3.7) – skrótowo **wim+sd**.

Poniższe rozważania, podzielono na dwie części:

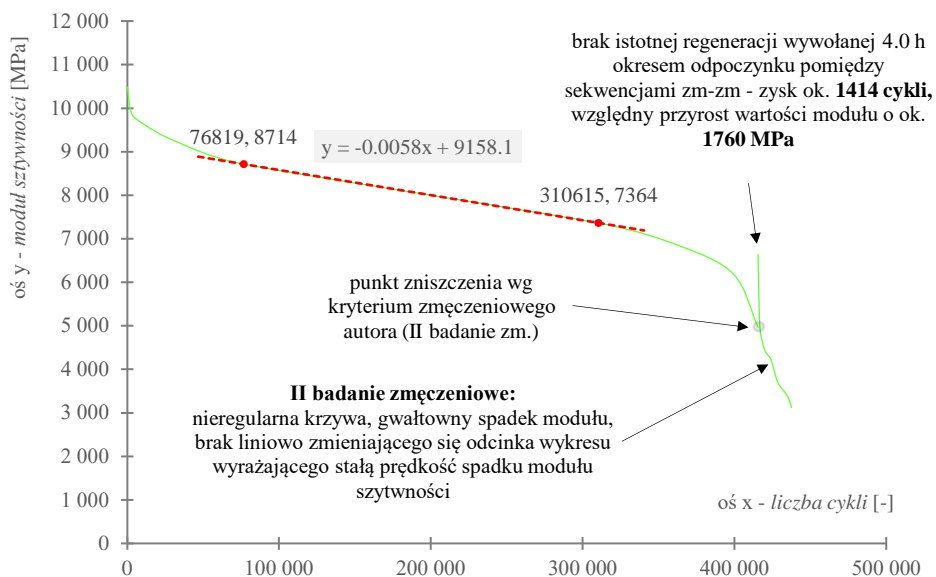
1. związane z przypadkami wdrażania regeneracji (**zm-zm**, **odp**, **wygrz+odp**) omówionymi w podrozdziale 5.3.6.3,
2. związane z wpływem oddziaływań: wyłącznie mechanicznych (**ref**) i środowiskowych (**wim**, **sd**, **wim+sd**) na zdolność regeneracji MMA omówionych w podrozdziale 5.3.6.4.

Omówione poniżej wykresy przedstawiono w formie łączonej. Ukazują one jednocześnie przebieg pierwszego i drugiego badania zmęczeniowego. Zabieg ten umożliwił zwizualizować wpływ regeneracji na trwałość zmęczeniową oraz niezależnie pozwolił zaobserwować zjawiska zachodzące na poziomie struktury materiału. Przebieg zmiany modułu sztywności względem liczby cykli zaprezentowano stosując kryterium spadku początkowej wartości modułu sztywności o 50%. Na wykresach zaznaczono również punkt zniszczenia wynikający z kryterium autora, które zostało uznane za właściwe i zastosowane do analiz regeneracji MMA (podrozdział 5.3.6.2 i 5.3.6.3).

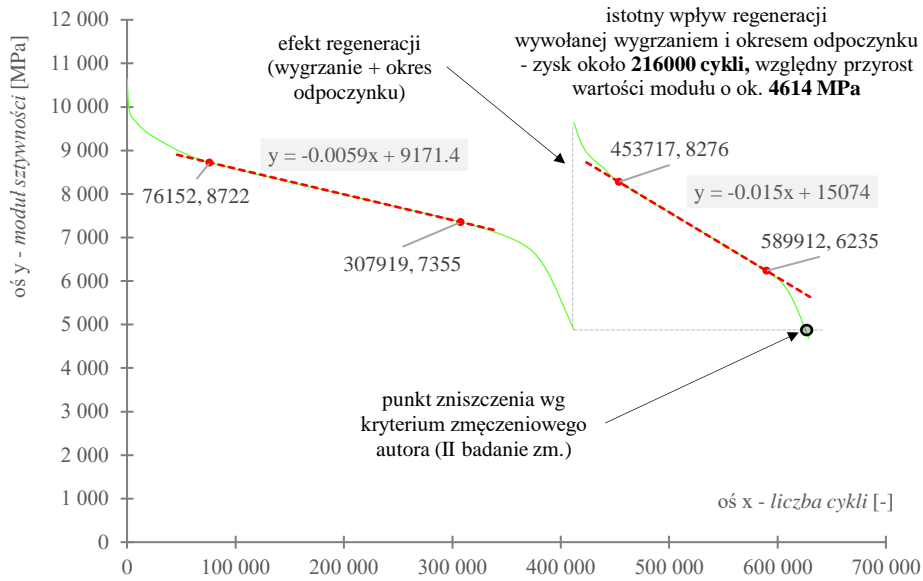
Na poniższych rysunkach przedstawiono wykresy zmian: **moduł sztywności - liczba cykli** mieszanki B w zależności od wdrożonego przypadku regeneracji (zm-zm - Rys. 105, odp - Rys. 106, wygrz+odp - Rys. 107).



Rys. 105: Wykres zmiany modułu sztywności od liczby cykli przypadku zm-zm, mieszanka B



Rys. 106: Wykres zmiany modułu sztywności od liczby cykli przypadku odp (okres odpoczynku), mieszanka B



Rys. 107: Wykres zmiany modułu sztywności od liczby cykli przypadku wygrz+odp (wyrz+odp), mieszanka B

Na podstawie analizy porównawczej wykresów - Rys. 105, Rys. 106 oraz Rys. 107 wyszczególniono 4 obserwacje.

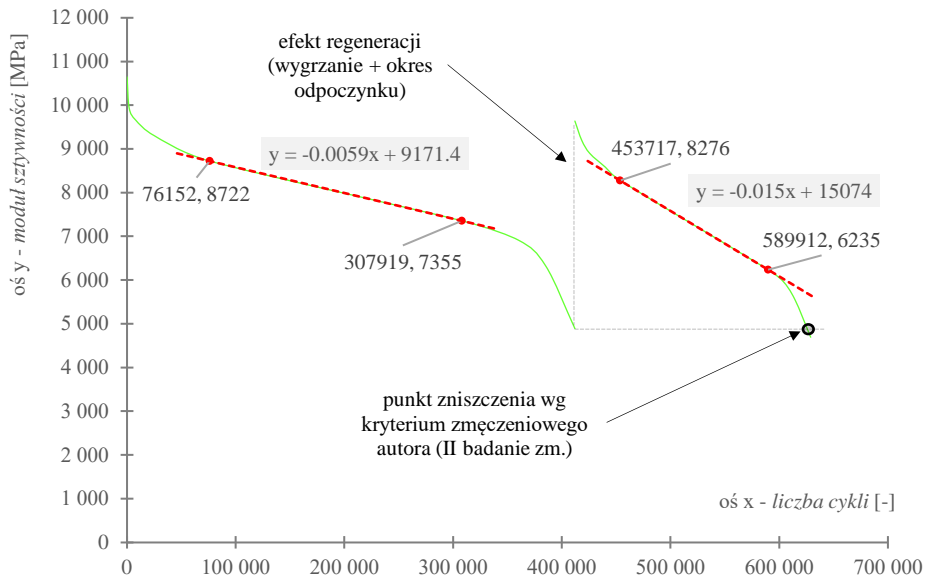
1. Kształt krzywej pierwszego badania zmęczeniowego wszystkich rozpatrywanych przypadków jest podobny – na początku badania moduł gwałtownie spada, następnie prędkość zmian stabilizuje się, a pod koniec wzrasta skutkując ponownym gwałtownym obniżeniem się jego wartości. Kąt nachylenia liniowego odcinka wyrażającego stałą prędkość spadku modułu sztywności oraz jego zakres trwania (cykle) również. Trwałość zmęczeniowa wynikająca z pierwszego badania jest porównywalna – na poziomie ok. 415 tys. cykli. Na tej podstawie uważa się, iż zbadane próbki są jednorodne. Mogą one zostać zastosowane do analiz przypadków wdrażania regeneracji.
2. Wdrożenie przypadku chwilowego odprężenia (zm-zm, Rys. 105) wywołuje pomijalnie mały przyrost: modułu sztywności – zaledwie 132 MPa i trwałości zmęczeniowej o 150 cykli. Zaobserwowano, iż moduł sztywności mieszanki od początku drugiego badania gwałtownie spada. Krzywa przypomina linię pionową – bardzo wysoka prędkość spadku modułu. Kształt wykresu jest nieregularny. Nie wyróżniono liniowego odcinka charakteryzującego się stałym kątem nachylenia. Na podstawie analiz wykresu potwierdza się wnioski wyciągnięte w podrozdziale 5.3.6.3 – np. chwilowe odprężenie nie wywołuje istotnej regeneracji i może zostać pominięte. Ponadto podkreśla się, iż zastosowanie kryterium spadku początkowej wartości modułu sztywności o 50% w drugim badaniu powoduje większy poziom zniszczeń dopuszczonych w materiale materiału. Na poziomie struktury następuje gwałtowny przyrost uszkodzeń wyrażony wysoką prędkością zmian modułu sztywności – krzywa wykresu jest prawie pionowa (przy niewielkiej liczbie cykli), a końcowa jego wartość bardzo niska.
3. Wdrożenie przypadku z okresem odpoczynku (odp, Rys. 106) wywołuje niewiele większy przyrost modułu sztywności i trwałości zmęczeniowej w stosunku do chwilowego odprężenia – wyniósł on ok. 1760 MPa, 1414 cykli. Zaobserwowano, iż moduł sztywności mieszanki od początku drugiego badania również ulega

gwałtownemu spadkowi. Krzywa również przypomina linię pionową, która jest przesunięta w kierunku wyższych wartości modułu – bardzo wysoka prędkość spadku. Kształt wykresu jest nieregularny, szczególnie w końcowym jego fragmencie. Nie wyróżniono również liniowego odcinka charakteryzującego się stałym kątem nachylenia. Na podstawie analiz wykresu potwierdza się wnioski wyciągnięte w podrozdziale 5.3.6.3 – przypadek zastosowanego okresu odpoczynku nie wywołuje istotnej regeneracji i może zostać pominięty. Podkreśla się również, iż zastosowanie kryterium spadku początkowej wartości modułu sztywności o 50% w drugim badaniu (podobnie jak dla przypadku zm-zm) skutkuje dopuszczeniem większej degradacji mieszanki. Na poziomie struktury następuje gwałtowny przyrost uszkodzeń wyrażony wysoką prędkością zmian modułu sztywności – krzywa wykresu jest prawie pionowa (przy niewielkiej liczbie cykli), a końcowa jego wartość bardzo niska.

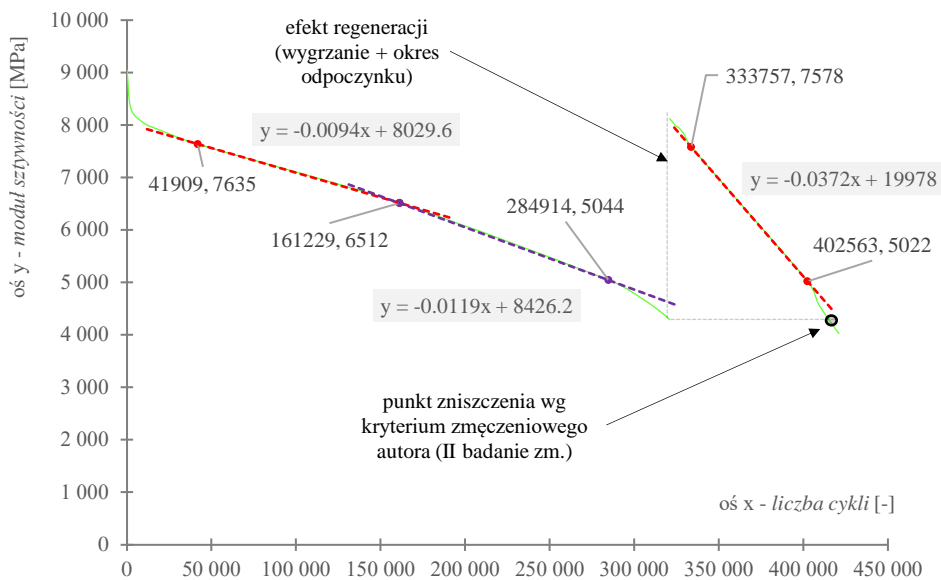
4. Zaaplikowanie przypadku wygrzewania z okresem odpoczynku (wygrz+odp, Rys. 107) wywołuje niemal pełną regenerację wartości modułu sztywności (o 4614 MPa) w stosunku do badania pierwszego oraz charakteryzuje się bardzo dużym przyrostem trwałości zmęczeniowej wyrażonej w cyklach – ok. 216 000 cykli. Na wykresie wyszczególnić można 3 fazy prędkości zmian modułu – skrótowo: gwałtowny spadek, stabilizacja, gwałtowny spadek. Ponadto jest on podobny do tego z badania pierwszego. Wyszczególnia się liniowy odcinek charakteryzujący się stałą prędkością spadku wartości modułu sztywności, o bardzo długim okresie jego trwania – 136 195 cykli (stanowi on 58% odcinka z pierwszego badania zmęczeniowego). Kąt nachylenia jest większy niż w badaniu pierwszym – o około 2.5 razy. Ponadto zaobserwowano, iż punkt zniszczenia wynikający z kryterium autora oraz kryterium spadku początkowej wartości modułu sztywności o 50% w drugim badaniu pokrywa się (różnica wynosi około 1.0 tys. cykli). Stwierdza się, iż zaaplikowany przypadek regeneracji skutecznie zaleczył część (ok. 52% - wyrażonych przez przyrost trwałości zmęczeniowej) uszkodzeń powstałych na poziomie strukturalnym.

Na podstawie przeprowadzonych analiz wykresów stwierdza się, iż spośród zestawianych sposobów jej realizowania regeneracja zachodząca pod wpływem oddziaływania wysokiej temperatury i okresu odpoczynku jest najefektywniejsza. Przypadek stanowi fundamentalne znaczenie dla omawianego materiału wykorzystywanego do warstw konstrukcji nawierzchni. Wpływa korzystnie na materiał i jego strukturę skutecznie: przywracając zdolność materiału do przenoszenia obciążeń - przyrost wartości modułu sztywności oraz trwałości zmęczeniowej w cyklach. Omawiany sposób wdrażania healingu uznaje się za odpowiedni do uwzględnienia zjawiska regeneracji w trwałości zmęczeniowej mieszanek mineralno-asfaltowych badanych laboratoryjnie.

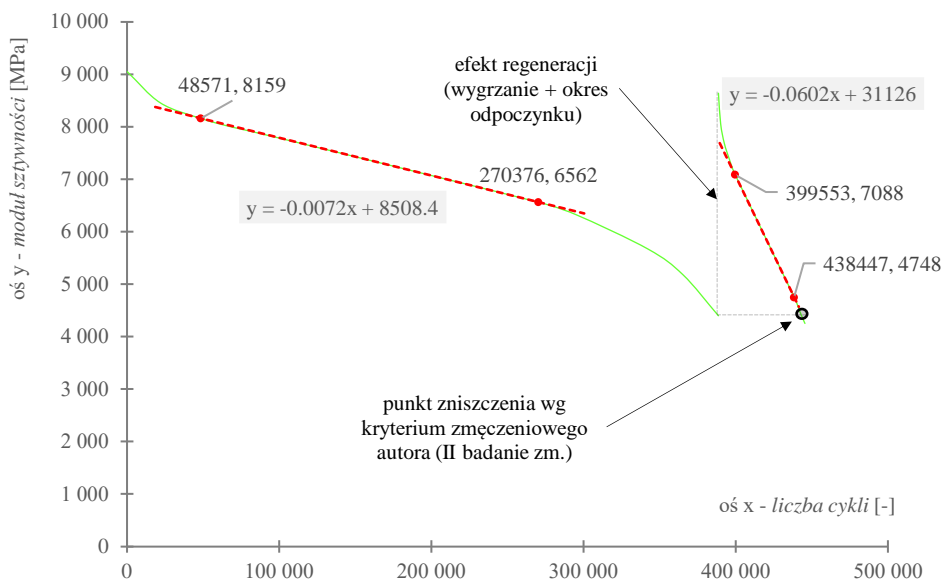
W kolejnej części tego podrozdziału rozprawy autor przeanalizował wykres zmian moduł sztywności – liczba cykli zbadanych mieszanek uwzględniając oddziaływanie mechaniczne (ref) i dodatkowo środowiskowe (wim, sd, wim+sd). Wykres dla próbki referencyjnej (tylko czynnik mechaniczny) zaprezentowano na Rys. 108, uprzednio obciążonej wodą i mrozem - Rys. 109, solą drogową - Rys. 110, kombinacją woda i mróz + sól drogową - Rys. 111.



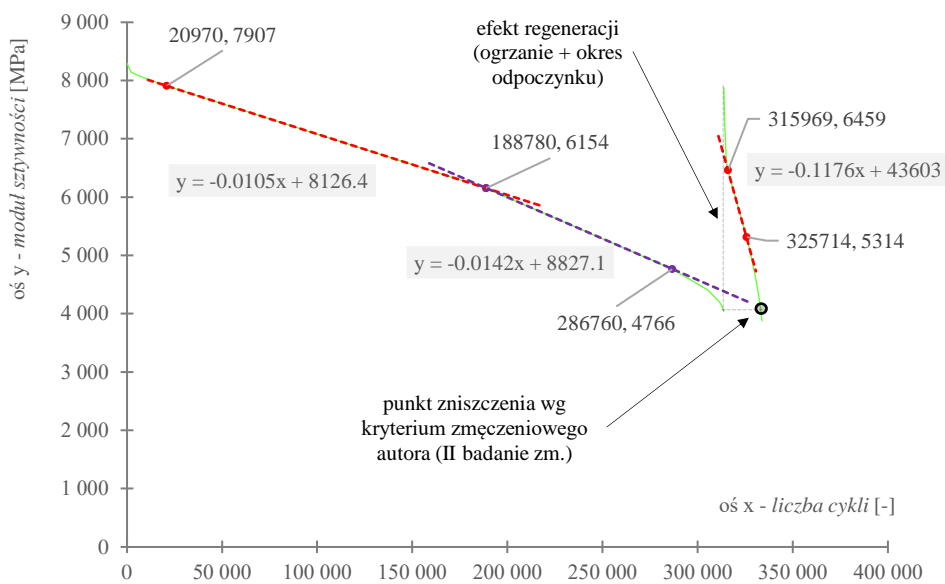
Rys. 108: Wykres próbki pochodzącej z zestawu referencyjnego (ref), mieszanka B



Rys. 109: Wykres próbki pochodzącej z zestawu uprzednio obciążonego wodą i mrozem (wim), mieszanka B



Rys. 110: Wykres próbki pochodzącej z zestawu uprzednio obciążonego solą drogową (sd), mieszanka B



Rys. 111: Wykres próbki pochodzącej z zestawu uprzednio obciążonego wodą i mrozem, a następnie solą drogową (wim+sd), mieszanka B

Na podstawie analizy porównawczej wykresów - Rys. 108, Rys. 109, Rys. 110 oraz Rys. 111 wyszczególniono 13 obserwacji.

1. Czynniki: woda i mróz, sól drogowa oraz ich kombinacja (wim+sd) negatywnie wpływają na zbadaną mieszankę. Dostrzega się istotną degradację materiału wyrażoną przez spadek początkowej wartości modułu sztywności oraz trwałości zmęczeniowej ustalonej dla pierwszego testu – odniesionego względem próbki referencyjnej, której wartość modułu sztywności wynosiła 10 201 MPa, a trwałość 412 058 cykli. Największy regres (wartość modułu, trwałość w cyklach) zaobserwowano dla kombinacji czynników - wim+sd (2011 MPa, 98 261 cykli), a następnie wim (1497 MPa, 91 057 cykli) i sd (1207 MPa, 23 494 cykli).
2. Krzywe ilustrujące zmianę modułu sztywności pierwszego badania zmęczeniowego są zróżnicowane. Ich kształt zależy od wpływu działania czynników na strukturę mieszanki. w przypadku mieszanki obciążonej wodą i mrozem występują 4 fazy prędkości zmian modułu sztywności: gwałtowny spadek (1), liniowy spadek nr 1 (2.1), liniowy spadek nr 2 (o większym kącie nachylenia) (2.2), gwałtowny spadek (3). Mieszanka poddana działaniu soli drogowej wykazuje 3 fazy: gwałtowny spadek (1), liniowy spadek (2), gwałtowny spadek (analogicznie jak wykres referencyjny) (3). Krzywa dla stanu kumulacji (wim+sd) przypomina złożenie obydwu wykresów oddziaływań (4 fazy). Ponadto zaobserwowano różnice w przebiegu faz 1 i 3 omawianych oddziaływań względem próbki ref. Próbka wim wykazuje krótkotrwały, gwałtowny spadek wartości modułu na początku badania i długotrwały, łagodniejszy pod jego koniec. Oznaczenie wykonane z użyciem soli drogowej (sd) – spadek na początku jest długotrwały i łagodny, natomiast długotrwały i gwałtowny przy końcu. Stan łączony (wim+sd) charakteryzuje się krótkotrwałym i gwałtownym początkiem oraz końcem.
3. Oddziaływanie czynników środowiskowych przyspiesza degradację mechaniczną materiału (zmęczenie). Zmianę prędkości można wyznaczyć jako: stosunek kątów nachylenia odcinków prostoliniowych (faza 2). Jej przyrost względem zestawu ref wyniósł odpowiednio: wim – 59%, sd – 22%, wim+sd – 78%.
4. Pomiedzy solą drogową, a lepszczem mieszanki dochodzi do reakcji, która skutkuje pogorszeniem parametrów jakościowych materiału (asfalt pogarsza swoje właściwości przez połączenie z kryształkami soli). Efekt reakcji można monitorować makroskopowo przez obserwację wykresu zmian modułu sztywności - spadek jego początkowej wartości, zmianę kształtu krzywej w fazie 1 i 3 (mieszanka zachowuje się inaczej pod działaniem obciążenia cyklicznego względem referencyjnej) oraz kąta nachylenia odcinka fazy 2.
5. Woda i mróz spowodowała większą degradację materiału i zmiany strukturalne niż sól drogowa wyrażoną przez:
 - gwałtowniejszy skok wartości modułu sztywności w pierwszej fazie badania zmęczeniowego oraz krótszy czas jego trwania – następuje szybsza stabilizacja prędkości spadku modułu (wim – 41 909 cykli vs sd – 48 571 cykli),
 - Dwa liniowe odcinki o stałej (innej co do wartości) prędkości spadku modułu sztywności charakteryzujące się większym kątem nachylenia,
 - Niższą wartość początkowego modułu sztywności (ok. 290 MPa) oraz mniejszą trwałość zmęczeniową pierwszego badania – o 67563 cykli.
6. Oddziaływanie wody i mrozu osłabia materiał, powodując powstanie spękań w materiale. Ich rozwój można z powodzeniem śledzić na wykresie zmian wartości

modułu – liniowy odcinek obrazuje kumulację uszkodzeń, natomiast punkt przełamania prostej oznacza propagację. Zmiana wartości kąta na większą przedstawia przyrost prędkości ich rozwoju na poziomie struktury. w przypadku wody i mrozu stan spękań po przełamaniu prostej rozwijał się o 27% szybciej, natomiast dla oddziaływań łączonych aż o 35%. Obserwacja potwierdza również, iż działalność soli drogowej przyspiesza rozwój uszkodzeń – w tym wypadku względnie o 7%.

7. Regeneracja zachodzi i wywiera istotny wpływ na zbadane mieszanki niezależnie od rozpatrywanego oddziaływania środowiskowego. We wszystkich przypadkach wywołuje pozytywne zmiany w strukturze mieszanki skutecznie zamykając część powstałych uszkodzeń (stan zdegradowania ulega cofnięciu) wyrażonych poprzez: przyrost modułu sztywności i trwałości zmęczeniowej w cyklach – ref (4614 MPa, 216 000 cykli), wim (3713 MPa, 94057 cykli), sd – (4103 MPa, 55557 cykli), wim+sd (3348 MPa, 19216 cykli).
8. Zdolność regeneracji mieszanki jest zależna od rozważanego oddziaływania środowiskowego (każdy zbadany ogranicza healing w MMA). Degradacja wywołana wodą i mrozem, solą drogową oraz połączeniem tych dwóch powoduje przyrost uszkodzeń wewnątrz materiału, który nie może zostać zregenerowany w przyjętych warunkach kondycjonowania. Największe osłabienie zdolności healigowych mieszanki wyrażonych jako procentowy stosunek przyrostu trwałości zaobserwowano dla stanu złożonego (wim+sd) – aż o 91% względem próbki ref (tylko oddziaływanie mechaniczne), sd - 75% i wim - 56%.
9. Wykresy drugiego badania zmęczeniowego we wszystkich analizowanych przypadkach są do siebie podobne (kształt). Wyszczególniono 3 fazy prędkości zmian modułu sztywności: gwałtowny spadek (1), liniowy spadek (2), gwałtowny spadek (3). Nie zarejestrowano punktu załamania prostej (dwa liniowe odcinki), sygnalizującej propagację spękania.
10. Efekt wdrożonej regeneracji i jej zróżnicowanie może być śledzone za pomocą kąta nachylenia liniowego odcinka charakteryzującego stałą prędkość zmian wartości modułu (2 badanie zmęczeniowe). Największe nachylenie zarejestrowano dla stanu łączonego (wim+sd) – 0.1176 [-], sd – 0.0602 [-], wim – 0.0372 [-], ref – 0.015 [-]. Im wartość jest mniejsza (prosta bardziej pozioma) tym regeneracja wynikała z podgrzania i okresu odpoczynku jest większa.
11. Oddziaływania środowiskowe przyspieszają degradację mechaniczną mieszanki po regeneracji. Wpływ na prędkość można wyrazić przez stosunek kątów linowego odcinka (faza (2)) drugiego badania zmęczeniowego: wykresu danego czynnika względem ref. Degradacja w drugim badaniu przyspieszyła o: wim – 248%, sd – 401%, wim+sd – 784% względem ref.
12. Sól drogowa reaguje z lepiszczem, zmieniając jego właściwości. Podgrzanie wysoką temperaturą sprzyja zjawisku „upłynnia się” asfaltu, który absorbuje otaczające go kryształki soli, te zaś wnikają głębiej w strukturę MMA. w efekcie regeneracja materiału jest mniejsza – nastąpiło ograniczenie zdolności do healingu MMA. Można je wyrazić przez mniejszy (aż o 75%!) przyrost trwałości zmęczeniowej oraz większą prędkość spadku wartości modułu sztywności (kąt nachylenia liniowego odcinka). Sól zmniejszyła efekt regeneracji o: 401% (ref) i 161% (wim).
13. Oddziaływania środowiskowe znacząco obniżają trwałość zmęczeniową materiału. Wpływ degradacji może zostać skutecznie zrównoważony przez uwzględnienie zjawiska regeneracji jako sumę liczby cykli badania pierwszego + drugiego ustalonych zgodnie z zaprezentowaną metodyką. Zmiana trwałości zmęczeniowej mieszanki może być skutecznie porównywana względem powszechnie stosowanego podejścia – 1 badanie zmęczeniowe, tylko czynnik mechaniczny. Na podstawie analiz powyższych

wykresów - w przypadku stanu łączonego (wim+sd) nastąpił regres trwałości (79045 cykli – ok. 19%) a w pozostałych przypadkach przyrost: wim – (3000 cykli – 0.8%), sd – (32063 cykli - 8%), ref – (216000 cykli – 52%).

Na podstawie przeprowadzonych analiz wykresów wybranej mieszanki stwierdza się, iż zaproponowana metodyka badań okazała się, skuteczna. Jej zastosowanie pozwoliło przeanalizować wpływ poszczególnych oddziaływań (wim, sd, wim+sd) na degradację materiału i jej prędkość zmian. Jednocześnie umożliwiła ona ustalić zdolność regeneracji materiału oraz jej trendy wywołane czynnikami środowiskowymi. Autor rozprawy wykazał również, iż wpływ poszczególnych oddziaływań: niekorzystnych (woda i mróz, sól drogowa, woda i mróz + sól drogowa) oraz korzystnych (wysoka temperatura + okres odpoczynku) na trwałość jest znaczący. Ponadto wykazano, iż **uwzględnienie czynników środowiskowych połączonych ze zjawiskiem regeneracji pozwala dokładniej szacować trwałość zmęczeniową materiału oraz śledzić zmiany zachodzące w mieszanke na poziomie strukturalnym**. Podkreśla się, iż obecnie regeneracja lub/i wpływy środowiskowe nie są brane pod uwagę zarówno w projektowaniu technologicznym (materiał) oraz mechanistycznym (nawierzchnia). Autorskie sposoby uwzględniania zostaną przedstawione w kolejnych rozdziałach rozprawy.

Analizy przeprowadzone przez autora rozprawy na mieszankach A – D (charakteryzujących się różnymi asfaltami, ich zawartością oraz technologią wykonania) w niniejszym podrozdziale (5.3.6) pozwoliły skutecznie:

1. ocenić jakościowo przypadki wdrażania regeneracji (chwilowe odprężenie, okres odpoczynku i wysoka temperatura z okresem odpoczynku) - wykazano, iż oddziaływanie wysokiej temperatury oraz okresu odpoczynku (jednocześnie) jest najistotniejsze, a pozostałe pomijalne,
2. wykazać, iż regeneracja dla warunków symulujących stan in-situ zachodzi w sposób znaczący i należy ją uwzględnić,
3. opracować i zastosować autorskie kryterium zmęczeniowe znajdujące zastosowanie w przypadku ponownych badań zmęczeniowych (regeneracja), umożliwiające poprawnie identyfikować punkt zniszczenia drugiego badania zmęczeniowego niezależnie od przypadków wdrażania regeneracji mieszanki,
4. ocenić zdolność regeneracji mieszanek (przyrost wartości modułu sztywności – parametr materiałowy oraz trwałości zmęczeniowej) poddanych oddziaływaniu mechanicznemu oraz środowiskowemu – woda i mróz, sól drogowa,
5. zaproponować autorskie wskaźniki, wyrażające w prostszy sposób zdolność regeneracji zbadanych materiałów (niezależnie dla: modułu sztywności i trwałości zmęczeniowej),
6. wykazać, iż czynniki środowiskowe znacząco obniżają zdolność regeneracji mieszanek i muszą w sposób łączony z regeneracją zostać uwzględniane w trwałości zmęczeniowej materiału,
7. wykazać, iż zdolność regeneracji mieszanki jest zależna od rodzaju lepiszcza i jego ilości w recepcie. Ponadto ustalono, iż im stopień modyfikacji matrycy asfaltowej polimerem SBS jest większy tym zdolność mniejsza (modyfikacja podnosi temperaturę mięknięcia),
8. ocenić zjawiska zachodzące na poziomie struktury materiału wykorzystując ocenę makroskopową – analiza wykresu modułu sztywności względem liczby cykli umożliwia identyfikację pojawiających się pęknięć w materiale oraz ich rozwój – szczególnie w przypadku rozważań czynników środowiskowych np. oddziaływanie wody i mrozu,

9. wykazać, iż oddziaływanie środowiskowe (woda i mróz oraz sól drogowa) zwiększają prędkość zmian zachodzących na poziomie struktury materiału (przyrost uszkodzeń).
10. udowodnić, iż oddziaływania: woda i mróz, sól drogowa doprowadzają do znacznej degradacji mieszanek, zmniejszając ich trwałość zmęczeniową oraz nośność (moduł sztywności),
11. wykazać, iż sól drogowa reaguje z lepiszczem, hamując regenerację bardziej niż oddziaływanie wody i mrozu,
12. udowodnić, iż oddziaływanie wody i mrozu powoduje przyrost wewnętrznych uszkodzeń w materiale, natomiast oddziaływanie soli reaguje z materiałem osłabiając jego jakościowe właściwości,
13. wykazać, iż jednoczesne uwzględnienie oddziaływań środowiskowych oraz regeneracji pozwala dokładniej prognozować trwałość zmęczeniową mieszanek stosowanych do warstw konstrukcji nawierzchni.

Ponadto autor rozprawy na podstawie obserwacji wyników mieszanek A - D przedstawił mechanizm jednego ze sposobów uwzględnienia regeneracji w trwałości zmęczeniowej w przypadku składu recept (zawartość asfaltu) uwzględniając wymaganą trwałość zmęczeniową (warunek 1.0 mln cykli przy określonym poziomie obciążenia).

Autorskie metody uwzględniania regeneracji oraz oddziaływań środowiskowych w stosunku do wymogów mieszanki (projektowanie technologiczne, materiał) oraz konstrukcji nawierzchni zostaną przedstawione w kolejnych rozdziałach rozprawy.

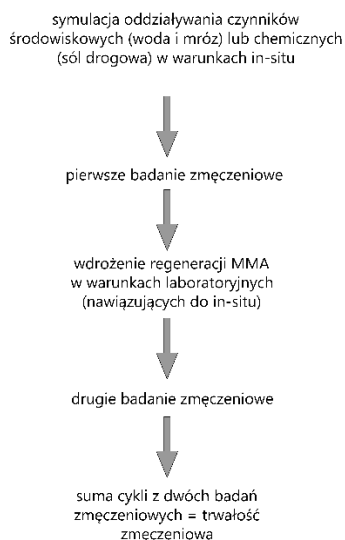
5.3.7. Sposoby uwzględnienia analizowanych czynników zewnętrznych w trwałości zmęczeniowej materiału

Analizując wyniki badań bloku zaawansowanego w zakresie:

1. zmęczenia i wpływu oddziaływania środowiskowego (woda i mróz, sól drogowa) na degradację mieszanek A – D (spadek trwałości zmęczeniowej),
2. zjawiska regeneracji i jego wpływu na trwałość zmęczeniową,
3. wpływu oddziaływania środowiskowego (woda i mróz, sól drogowa) na zdolność healingu mieszanek A – D,

zaproponowano **2 metody obliczeniowe** uwzględniające zjawisko regeneracji oraz czynniki zewnętrzne (woda i mróz, sól drogowa) w trwałości zmęczeniowej mieszanek mineralno-asfaltowych.

Pierwsza z nich (nazwana autorsko – „**iteracyjna Mączki**”). Metoda opiera się na bezpośrednim wykorzystaniu wyników dwóch badań zmęczeniowych przeprowadzonych na próbkach według omawianych wcześniej kombinacji – np. sól drogowa – zmęczenie – regeneracja – zmęczenie. Suma liczby cykli uzyskanych w testach, wyznaczonych według kryterium spadku początkowej wartości modułu o 50% - pierwsze badanie oraz kryterium autora – drugie badanie jest tożsame z trwałością zmęczeniową badanego materiału. Ogólne schemat kroków postępowania przedstawiono na Rys. 112. Natomiast schematyczny wzór ukazano w formule (30).



Rys. 112: Kroki postępowania pierwszej metody uwzględnienia regeneracji i ewentualnych czynników zewnętrznych

$$tr_{zm} = zm_1 + zm_{2,r} , \quad (30)$$

gdzie:

zm_1 – wynik pierwszego badania zmęczeniowego [cykle],

$zm_{2,r}$ – wynik drugiego badania zmęczeniowego (po regeneracji) [cykle],

tr_{zm} – trwałość zmęczeniowa rozpatrywanej MMA [cykle].

Zaletą tej metody jest jej prostota i użyteczność w kontekście optymalizacji recept (zawartość asfaltu, przy tej samej mieszance mineralnej). Pozwala ona precyzyjnie ustalić sumaryczną trwałość zmęczeniową projektowanej mieszanki (wyrażoną w liczbie cykli) uwzględniając healing i wybrany czynnik środowiskowy (np. woda i mróz, sól drogowa). Pożądanym skutkiem wynikającym z wykorzystania tego sposobu jest dopuszczenie analizowanej recepty do użycia, pomimo niespełnienia wymogu min. 1.0 mln cykli dla zadanego poziomu obciążenia po pierwszym badaniu zmęczeniowym (obecne podejście). Warunkiem koniecznym jest osiągnięcie wymaganej minimalnej liczby cykli wynikającej z sumy cykli dwóch badań zmęczeniowych. Jeżeli na podstawie sumy wymóg zostanie osiągnięty, taki materiał uznaje się za trwały zmęczeniowo. Zastosowanie metody do wyników mieszanek A-D zaprezentowano w Tab. 35.

W Tab. 35 zastosowano następujące oznaczenia:

ref – tylko oddziaływanie mechaniczne,

wim – woda i mróz + oddziaływanie mechaniczne,

sd – sól drogowa + oddziaływanie mechaniczne,

K – wskaźnik wypełnienia [-],

E_p^* – początkowa wartość modułu sztywności wyznaczona w 100-cykle badania [MPa],

E_k^* – wartość modułu sztywności po osiągnięciu kryterium zmęczeniowego (spadku początkowej wartości modułu o 50%) [MPa],

$E_{0.50\%}^*$ – trwałość zmęczeniowa wyrażona w cyklach uzyskana po spadku początkowej wartości modułu sztywności ustalanego w 100-cykle badania o 50% [cykle],

E_{pH}^* – początkowa wartość modułu sztywności wyznaczona w 100-cykle badania (po zabiegu regeneracji) [MPa],

E_{kH}^* – wartość modułu sztywności po osiągnięciu kryterium zmęczeniowego spadku początkowej wartości modułu o 50% (po zabiegu regeneracji) [MPa],

$E_{k(1)H}^*$ – trwałość zmęczeniowa wyrażona w cyklach uzyskana po spadku początkowej wartości modułu sztywności ustalanego w 100-cykle badania (zmierzonej po zabiegu regeneracji) do uzyskania końcowej wartości modułu sztywności pierwszego badania zmęczeniowego (wg kryterium autora) [cykle].

Tab. 35: Trwałość zmęczeniowa mieszanek A - D po zastosowaniu metody nr 1

rec. MMA	K [-]	wariant	Pierwsze badanie zmęczeniowe				Drugie badanie zmęczeniowe			Wypadkowa trwałość zmęczeniowa [cykle]	Czy po zastosowaniu regeneracji warunek min. 1.0 mln jest spełniony?	Czy recepta osiągnęła kwalifikację po regeneracji „+”?
			E_p^* [MPa]	E_k^* [MPa]	$E_{0.50\%}^*$ [cykle]	Czy warunek min. 1.0 mln jest spełniony?	E_{pH}^* [MPa]	E_{kH}^* [MPa]	$E_{k(1)H}^*$ [cykle]			
A2	2.95	ref	9811	4906	311340	NIE	9718	4906	162778	474118	NIE	
		wim	8194	4097	239465	NIE	7501	4097	41588	281053	NIE	
		sd	8638	4319	256645	NIE	7955	4319	26875	283520	NIE	
A3	2.80	ref	10959	5480	217004	NIE	9318	5480	44556	261560	NIE	
		wim	9707	4853	165402	NIE	8012	4853	15878	181280	NIE	
		sd	9793	4897	176493	NIE	8225	4897	11987	188480	NIE	
A4	2.65	ref	10759	5380	149994	NIE	8444	5380	19089	169083	NIE	
		wim	8311	4156	107053	NIE	5899	4156	5513	112566	NIE	
		sd	8882	4441	117192	NIE	6014	4441	3874	121066	NIE	
B2	2.95	ref	9900	4950	411640	NIE	9488	4950	215001	626641	NIE	
		wim	8655	4327	322025	NIE	8239	4327	98913	420938	NIE	
		sd	9027	4513	395943	NIE	8602	4513	57216	453158	NIE	
B3	2.80	ref	10870	5435	296816	NIE	9537	5435	66241	363057	NIE	
		wim	9054	4527	224923	NIE	7581	4527	37991	262914	NIE	
		sd	10156	5078	279894	NIE	8215	5078	26584	306478	NIE	
B4	2.65	ref	10653	5326	161401	NIE	9000	5326	28744	190145	NIE	
		wim	7974	3987	115563	NIE	5998	3987	11210	126773	NIE	
		sd	9887	4944	145906	NIE	7481	4944	6121	152027	NIE	
C2	2.95	ref	9935	4968	1456839	TAK	9901	4968	269560	1726399	TAK	
		wim	9677	4838	1398566	TAK	9411	4838	246875	1645441	TAK	
		sd	9756	4878	1436444	TAK	9258	4878	237889	1674333	TAK	
C3	2.80	ref	10015	5007	928584	NIE	9787	5007	133589	1062173	TAK	+
		wim	9274	4637	810726	NIE	8779	4637	106781	917507	NIE	
		sd	9594	4797	879084	NIE	8676	4797	103557	982641	NIE	
C4	2.65	ref	9985	4993	497310	NIE	8954	4993	44147	541457	NIE	
		wim	8425	4213	399351	NIE	7015	4213	28477	427828	NIE	
		sd	9173	4587	455498	NIE	7356	4587	30111	485609	NIE	
D2	2.95	ref	9310	4655	1958796	TAK	9289	4655	263020	2221816	TAK	
		wim	9129	4565	1928239	TAK	8789	4565	230259	2158498	TAK	
		sd	9194	4597	1938425	TAK	8897	4597	212571	2150996	TAK	
D3	2.80	ref	10460	5230	1032285	TAK	10193	5230	107895	1140180	TAK	
		wim	10100	5050	972412	NIE	9265	5050	86575	1058987	TAK	+
		sd	10021	5010	1009574	TAK	9311	5010	87518	1097092	TAK	
D4	2.65	ref	10208	5104	543505	NIE	9055	5104	34327	577832	NIE	
		wim	9089	4545	505364	NIE	7742	4545	19874	525238	NIE	
		sd	9511	4756	506251	NIE	7751	4756	17857	524108	NIE	

Sytuacja umożliwiająca dopuszczenie recepty wystąpiła dwukrotnie - C3, zestaw referencyjny z regeneracją (tylko czynnik mechaniczny) i D3, woda i mróz. Po zastosowaniu metody obydwie te mieszanki można pozostawić na bieżącym poziomie zawartości lepiszcza K – oszczędność jego ilości o 0.203% w ujęciu wagowym względem wyższego omawianego wskaźnika wypełnienia K . W przypadku asfaltów, a szczególności modyfikowanych oraz wysokomodyfikowanych (C i D), wykorzystanie autorskiej metody jest ekonomicznie uzasadnione.

Istnieje jednak wada opisanego sposobu, o której należy pamiętać - brak bezpośredniej możliwości uwzględniania regeneracji oraz oddziaływań środowiskowych w wymiarowaniu konstrukcji nawierzchni. Podkreśla się ponownie, iż jej stosowalność ogranicza się do **projektowania technologicznego**, w którym istotne jest uzyskanie warunku min. 1.0 mln cykli dla zadanego poziomu obciążenia.

Druga z nich została autorsko nazwana jako „**wskaźnikowa Mączki**”. Metoda obliczeniowa polega na wyznaczeniu **wskaźników procentowych** w oparciu o wyniki badań. Do omawianych należą: **degradacji** (DI), **regeneracji** (HI), **wypadkowy** (RI). Ich ogólne formuły przedstawiono w równaniach (31), (32) i (33).

Wskaźniki pozwalają ocenić i uwzględnić wpływ jednego lub więcej (kombinacji) oddziaływań (woda i mróz, sól drogowa, kumulacja – woda i mróz + sól drogowa, regeneracja) w **trwałości zmęczeniowej: mieszanki** lub/i **konstrukcji nawierzchni** (projektowanie mechaniczno-empiryczne z wykorzystaniem kryterium zmęczeniowego, patrz rozdział - 6.2.1). Ponadto umożliwiają one **prognozować wypadkowy efekt oddziaływań środowiskowych** (woda i mróz, sól drogowa, kumulacja – woda i mróz + sól drogowa) i **regeneracji** na mieszankę ustalany względem powszechnego podejścia (tylko czynnik mechaniczny, jedno badanie zmęczeniowe, brak regeneracji) – określenie czy nastąpi przyrost lub spadek trwałości zmęczeniowej. Nadmieniam, iż w warunkach in-situ, podczas cyklu rocznego omawiane czynniki i zjawiska wpływają na materiał w sposób łączony, dlatego też ich uwzględnienie jest istotne, aby dokładniej określać trwałość zmęczeniową.

Należy również podkreślić, iż zaletą tej metody jest jej funkcjonalność - **działa bez zastrzeżeń** zarówno dla **mieszanek na bazie asfaltów zwykłych** (35/50 WMA - A, 35/50 - B) oraz **modyfikowanych i wysokomodyfikowanych** (25/55-60 - C oraz 25/55-80 HIMA - D) niezależnie od poziomu zawartości lepiszcza ($K = 2.95, 2.80, 2.65$).

$$DI_i = \left(\frac{tz_{1i}}{tz_{1,ref}} - 1 \right) \cdot 100\% , \quad (31)$$

gdzie:

DI_i – wskaźnik degradacji wyrażający spadek trwałości zmęczeniowej badanej mieszanki wywołanej i -tym oddziaływaniem środowiskowym (np. woda i mróz, sól drogowa), w przypadku analiz czynnika wyłącznie mechanicznego wartość $DI_i = 0$ [%],

tz_{1i} – trwałość zmęczeniowa wyznaczona według kryterium spadku początkowej wartości modułu o 50% po pierwszym badaniu, mieszanki uprzednio obciążonej i -tym oddziaływaniem środowiskowym (np. woda i mróz, sól drogowa) [cykle],

$tz_{1,ref}$ – trwałość zmęczeniowa wyznaczona według kryterium spadku początkowej wartości modułu o 50% po pierwszym badaniu, mieszanki referencyjnej (ref) (tylko czynnik mechaniczny) [cykle].

$$HI_i = \left(\frac{tz_{2i}}{tz_{1i}} \right) \cdot 100\% , \quad (32)$$

gdzie:

HI_i – wskaźnik regeneracji wyrażający przyrost trwałości zmęczeniowej badanej mieszanki poddanej i -temu oddziaływaniu: mechanicznemu lub środowiskowemu (np. woda i mróz, sól drogowa) + mechanicznemu [%],

tz_{2i} – trwałość zmęczeniowa wyznaczona według autorskiego kryterium zmęczeniowego po drugim badaniu mieszanki obciążonej i -tym oddziaływaniem: mechanicznym lub środowiskowym (np. woda i mróz, sól drogowa) i mechanicznym [cykle],

tz_{1i} – trwałość zmęczeniowa wyznaczona według kryterium spadku początkowej wartości modułu o 50% po pierwszym badaniu mieszanki uprzednio obciążonej i -tym oddziaływaniem: mechanicznym lub środowiskowym (np. woda i mróz, sól drogowa) i mechanicznym [cykle].

$$RI_i = \left(\frac{tz_{1i} + tz_{2i}}{tz_{1,ref}} - 1 \right) \cdot 100\% , \quad (33)$$

gdzie:

RI_i – wskaźnik wypadkowy wyrażający przyrost lub spadek trwałości zmęczeniowej badanej mieszanki (względem referencyjnej) wywołanej i -tym oddziaływaniem: mechanicznym lub środowiskowym (np. woda i mróz, sól drogowa) i mechanicznym uwzględniającym jednocześnie zjawisko regeneracji materiału [%],

tz_{1i} – trwałość zmęczeniowa wyznaczona według kryterium spadku początkowej wartości modułu o 50% po pierwszym badaniu mieszanki uprzednio obciążonej i -tym oddziaływaniem: mechanicznym lub środowiskowym (np. woda i mróz, sól drogowa) i mechanicznym [cykle],

tz_{2i} – trwałość zmęczeniowa wyznaczona według autorskiego kryterium zmęczeniowego po drugim badaniu mieszanki obciążonej i -tym oddziaływaniem: mechanicznym lub środowiskowym (np. woda i mróz, sól drogowa) i mechanicznym [cykle],

$tz_{1,ref}$ – trwałość zmęczeniowa wyznaczona według kryterium spadku początkowej wartości modułu o 50% po pierwszym badaniu, mieszanki referencyjnej (*ref*) (tylko czynnik mechaniczny) [cykle].

Metoda umożliwia również, **obliczenie** za pomocą **autorskiej formuły** wpływu kombinacji czynników: woda i mróz + sól drogowa + regeneracja **bez wykonywania dodatkowych badań**. Wystarczy wykorzystać rezultaty pozyskane dla poszczególnych oddziaływań, aby z powodzeniem wyznaczyć przybliżony wpływ stanu skumulowanego. w ten sposób, można zaoszczędzić czas i środki wynikające z całego procesu - przygotowywania i badania próbek. Omawiana kombinacja należy do istotnych, ponieważ uwzględnia odpowiednią kolejność oddziaływań w cyklu rocznym: (1) zima: woda i mróz (zamarzanie wody, wywołane niską temperaturą), sól drogowa (zabieg utrzymawczy, redukcja śliskości), (2) lato: (regeneracja) wpływających na mieszanki zlokalizowane w warstwach konstrukcji nawierzchni.

Autorskie formuły zaprezentowano w równaniach (34), (35) oraz (36)

$$DI_{wim+sd(k)} = DI_{wim} + \frac{(DI_{sd})^2}{DI_{wim}} , \quad (34)$$

gdzie:

$DI_{wim+sd(k)}$ – wskaźnik degradacji wyrażający spadek trwałości zmęczeniowej badanej mieszanki wywołanej oddziaływaniem: wody i mrozu oraz soli drogowej [%],

DI_{wim} – wskaźnik degradacji wyrażający spadek trwałości zmęczeniowej badanej mieszanki wywołanej oddziaływaniem: wody i mrozu [%],

DI_{sd} – wskaźnik degradacji wyrażający spadek trwałości zmęczeniowej badanej mieszanki wywołanej oddziaływaniem: soli drogowej [%].

$$HI_{wim+sd(k)} = \frac{(HI_{sd})^2}{HI_{wim}} , \quad (35)$$

gdzie:

$HI_{wim+sd(k)}$ – wskaźnik regeneracji wyrażający przyrost trwałości zmęczeniowej badanej mieszanki poddanej oddziaływaniu: wody i mrozu oraz soli drogowej [%],

HI_{sd} – wskaźnik regeneracji wyrażający przyrost trwałości zmęczeniowej badanej mieszanki poddanej oddziaływaniu: soli drogowej [%],

HI_{wim} – wskaźnik regeneracji wyrażający przyrost trwałości zmęczeniowej badanej mieszanki poddanej oddziaływaniu: wody i mrozu [%].

$$RI_{wim+sd}(k) = (DI_{wim+sd}(k) + HI_{wim+sd}(k)) - 0.016, \quad (36)$$

gdzie:

$RI_{wim+sd}(k)$ – wskaźnik wypadkowy wyrażający przyrost lub spadek trwałości zmęczeniowej badanej mieszanki wywołanej kumulacją oddziaływań: wody i mrozu oraz soli drogowej (regeneracja materiału jest uwzględniona) [%],

$DI_{wim+sd}(k)$ – wskaźnik degradacji wyrażający spadek trwałości zmęczeniowej badanej mieszanki wywołanej oddziaływaniem: wody i mrozu oraz soli drogowej [%],

$HI_{wim+sd}(k)$ – wskaźnik regeneracji wyrażający przyrost trwałości zmęczeniowej badanej mieszanki poddanej oddziaływaniu: wody i mrozu oraz soli drogowej [%].

Wskaźnik $RI_{wim+sd}(k)$ [%] oraz $tz_{1,ref}$ [cykle] umożliwia również **obliczenie wypadkowej trwałości zmęczeniowej** według autorskiej formuły (41). Znając wartość wskaźnika RI w analogiczny sposób można ustalić trwałość zmęczeniową innych dowolnych kombinacji oddziaływań.

$$tz_{wim+sd}(k) = tz_{1,ref} + RI_{wim+sd}(k) \cdot tz_{1,ref}, \quad (37)$$

gdzie:

$tz_{wim+sd}(k)$ – „wypadkowa” trwałość zmęczeniowa mieszanki z uwzględnieniem regeneracji obciążonej uprzednio kombinacją czynników środowiskowych (kolejność): woda i mróz (1) oraz sól drogowa (2) [cykle],

$tz_{1,ref}$ – trwałość zmęczeniowa wyznaczona według kryterium spadku początkowej wartości modułu o 50% po pierwszym badaniu, mieszanki referencyjnej (*ref*) (tylko czynnik mechaniczny, brak regeneracji – powszechne podejście) [cykle],

$RI_{wim+sd}(k)$ – wskaźnik wypadkowy wyrażający przyrost lub spadek trwałości zmęczeniowej badanej mieszanki wywołanej kumulacją oddziaływań: wody i mrozu oraz soli drogowej (regeneracja materiału jest uwzględniona) [%].

Prawidłowe funkcjonowanie autorskich wzorów obliczeniowych stanu skumulowanego – $wim+sd(k)$ omówiono w podrozdziale 5.3.7.1.

Przykład zastosowania metody obliczeniowej autora z wykorzystaniem wyników laboratoryjnych mieszanek A – D na każdym poziomie zawartości lepiszcza wyrażonym przez wskaźnik wypełnienia K zaprezentowano w Tab. 36.

Tab. 36: Uwzględnienie oddziaływań środowiskowych i regeneracji w trwałości zmęczeniowej MMA za pomocą metody drugiej

rec. MMA	K [-]	wariant	Pierwsze badanie zmęczeniowe			Drugie badanie zmęczeniowe			Wskaźnik wypadkowy		tzi [cykle]	Trend zmian trwałości	tzi _{wim+sd} [cykle]	Trend zmian trwałości
			E* _{0.50%} [cykle]	DI _i [%]	DI _{wim+sd} [%]	E* _{k(1)H} [cykle]	HI _i [%]	HI _{wim+sd} [%]	RI _i [%]	RI _{wim+sd} [%]				
A2	2.95	ref	311340			162778	52.28%		52.28%		474118	przyrost	212535	spadek
		wim	239465	-23.09%	-36.45%	41588	17.37%	6.31%	-9.73%	-31.74%	281053	spadek		
		sd	256645	-17.57%		26875	10.47%		-8.94%		283520	spadek		
A3	2.80	ref	217004			44556	20.53%		20.53%		261560	przyrost	140564	spadek
		wim	165402	-23.78%	-38.44%	15878	9.60%	4.81%	-16.46%	-35.23%	181280	spadek		
		sd	176493	-18.67%		11987	6.79%		-13.14%		188480	spadek		
A4	2.65	ref	149994			19089	12.73%		12.73%		169083	przyrost	82786	spadek
		wim	107053	-28.63%	-45.33%	5513	5.15%	2.12%	-24.95%	-44.81%	112566	spadek		
		sd	117192	-21.87%		3874	3.31%		-19.29%		121066	spadek		
B2	2.95	ref	411640			215001	52.23%		52.23%		626641	przyrost	340694	spadek
		wim	322025	-21.77%	-22.44%	98913	30.72%	6.80%	2.26%	-17.23%	420938	przyrost		
		sd	395943	-3.81%		57216	14.45%		10.09%		453158	przyrost		
B3	2.80	ref	296816			66241	22.32%		22.32%		363057	przyrost	232057	spadek
		wim	224923	-24.22%	-25.56%	37991	16.89%	5.34%	-11.42%	-21.82%	262914	spadek		
		sd	279894	-5.70%		26584	9.50%		3.26%		306478	przyrost		
B4	2.65	ref	161401			28744	17.81%		17.81%		190145	przyrost	110679	spadek
		wim	115563	-28.40%	-31.65%	11210	9.70%	1.81%	-21.45%	-31.43%	126773	spadek		
		sd	145906	-9.60%		6121	4.20%		-5.81%		152027	spadek		
C2	2.95	ref	1456839			269560	18.50%		18.50%		1726399	przyrost	1594541	przyrost
		wim	1398566	-4.00%	-4.49%	246875	17.65%	15.54%	12.95%	9.45%	1645441	przyrost		
		sd	1436444	-1.40%		237889	16.56%		14.93%		1674333	przyrost		
C3	2.80	ref	928584			133589	14.39%		14.39%		1062173	przyrost	872958	spadek
		wim	810726	-12.69%	-14.93%	106781	13.17%	10.54%	-1.19%	-5.99%	917507	spadek		
		sd	879084	-5.33%		103557	11.78%		5.82%		982641	przyrost		
C4	2.65	ref	497310			44147	8.88%		8.88%		541457	przyrost	404048	spadek
		wim	399351	-19.70%	-23.29%	28477	7.13%	6.13%	-13.97%	-18.75%	427828	spadek		
		sd	455498	-8.41%		30111	6.61%		-2.35%		485609	spadek		
D2	2.95	ref	1958796			263020	13.43%		13.43%		2221816	przyrost	2080672	przyrost
		wim	1928239	-1.56%	-2.25%	230259	11.94%	10.07%	10.20%	6.22%	2158498	przyrost		
		sd	1938425	-1.04%		212571	10.97%		9.81%		2150996	przyrost		
D3	2.80	ref	1032285			107895	10.45%		10.45%		1140180	przyrost	1034462	przyrost
		wim	972412	-5.80%	-6.63%	86575	8.90%	8.44%	2.59%	0.21%	1058987	przyrost		
		sd	1009574	-2.20%		87518	8.67%		6.28%		1097092	przyrost		
D4	2.65	ref	543505			34327	6.32%		6.32%		577832	przyrost	477500	spadek
		wim	505364	-7.02%	-13.71%	19874	3.93%	3.16%	-3.36%	-12.14%	525238	spadek		
		sd	506251	-6.85%		17857	3.53%		-3.57%		524108	spadek		

W Tab. 36 zastosowano następujące oznaczenia:

ref – tylko oddziaływanie mechaniczne,
wim – woda i mróz + oddziaływanie mechaniczne,
sd – sól drogowa + oddziaływanie mechaniczne,
K – wskaźnik wypełnienia [-],

$E_{0\ 50\%}^*$ – trwałość zmęczeniowa wyrażona w cyklach uzyskana po spadku początkowej wartości modułu sztywności ustalanego w 100-cyklu badania o 50% (pierwsze badanie zmęczeniowe) [cykle],

$E_{k(1)H}^*$ – trwałość zmęczeniowa wyrażona w cyklach uzyskana po spadku początkowej wartości modułu sztywności ustalanego w 100-cyklu badania (zmierzonej po zabiegu regeneracji) do uzyskania końcowej wartości modułu sztywności pierwszego badania zmęczeniowego (wg kryterium autora) – (drugie badanie zmęczeniowe) [cykle],

DI_i – wskaźnik degradacji wyrażający spadek trwałości zmęczeniowej badanej mieszanki wywołanej i -tym oddziaływaniem środowiskowym (np. woda i mróz, sól drogowa). w przypadku analiz czynnika wyłącznie mechanicznego wartość $DI_i = 0$ [%],

$DI_{wim+sd(k)}$ – wskaźnik degradacji wyrażający spadek trwałości zmęczeniowej badanej mieszanki wywołanej oddziaływaniem: wody i mrozu oraz soli drogowej [%],

HI_i – wskaźnik regeneracji wyrażający przyrost trwałości zmęczeniowej badanej mieszanki poddanej i -temu oddziaływaniu: mechanicznemu lub środowiskowemu (np. woda i mróz, sól drogowa) + mechanicznemu [%],

$HI_{wim+sd(k)}$ – wskaźnik regeneracji wyrażający przyrost trwałości zmęczeniowej badanej mieszanki poddanej oddziaływaniu: wody i mrozu oraz soli drogowej [%],

RI_i – wskaźnik wypadkowy wyrażający przyrost lub spadek trwałości zmęczeniowej badanej mieszanki (względem referencyjnej) wywołanej i -tym oddziaływaniem: mechanicznym lub środowiskowym (np. woda i mróz, sól drogowa) i mechanicznym uwzględniającym zjawisko regeneracji materiału [%],

$RI_{wim+sd(k)}$ – wskaźnik wypadkowy wyrażający przyrost lub spadek trwałości zmęczeniowej badanej mieszanki wywołanej kumulacją oddziaływań: wody i mrozu oraz soli drogowej (regeneracja jest uwzględniona) [%],

i – rozpatrywane oddziaływanie (ref, wim, sd) [-],

tz_i – wypadkowa trwałość zmęczeniowa wyznaczona jako suma trwałości zmęczeniowej w cyklach pierwszego i drugiego badania [cykle],

$tz_{wim+sd(k)}$ – „wypadkowa” trwałość zmęczeniowa mieszanki z uwzględnieniem regeneracji obciążonej uprzednio kombinacją czynników środowiskowych (kolejność): woda i mróz (1) oraz sól drogowa (2) [cykle].

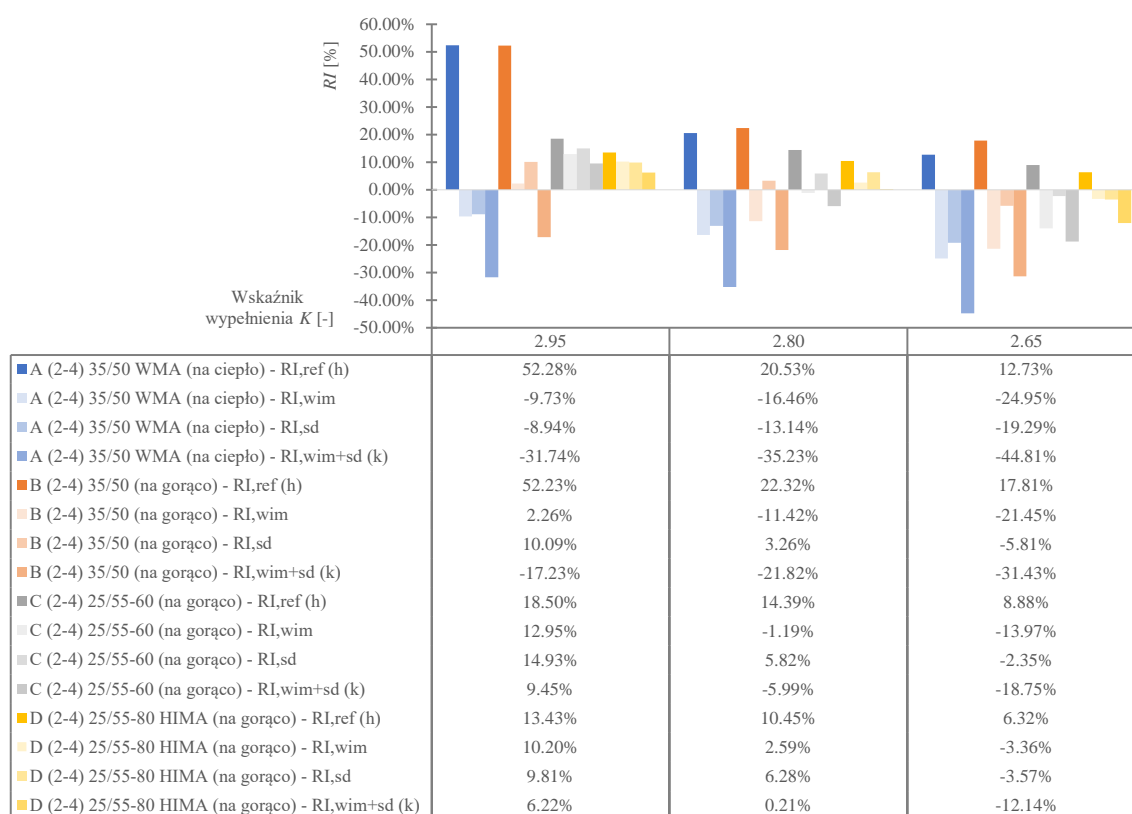
Analizując dane zestawione w Tab. 36, uwagę skupiono na:

1. wskaźniku wypadkowym RI uwzględniającym wszystkie czynniki,
2. trendach zmian trwałości zmęczeniowej względem mieszanki referencyjnej (wynik pierwszego badania zmęczeniowego, brak regeneracji, tylko czynnik mechaniczny).

Degradacja (DI) oraz regeneracja (HI) MMA ze względu na trwałość zmęczeniową została szczegółowo omówiona w podrozdziałach: 5.3.4, 5.3.6 i nie będzie przedmiotem ponownych rozważań. Na podstawie wyników wyszczególniono 9 obserwacji.

1. Największy (względem pozostałych przypadków) przyrost trwałości mieszanek A – D (niezależnie od zawartości lepiszcza) osiągnięto dla mieszanki referencyjnej – (ref). Została ona poddana zabiegowi regeneracji i ponownemu badaniu (ref, h). Degradacja materiału wywołana obciążeniem wyłącznie mechanicznym jest skutecznie „niwelowana” oddziaływaniem wysokiej temperatury i okresem odpoczynku. Poziom regeneracji zależny jest od zawartości asfaltu (więcej lepiszcza = większy healing). w omawianym przypadku uzyskany przyrost trwałości zmęczeniowej wynosi nawet do 52.28% (A2, $K = 2.95$).

- Negatywny wpływ oddziaływań środowiskowych na trwałość zmęczeniową mieszank jest znaczący i w większości zbadanych przypadków nie jest skompensowany zaistniałą regeneracją (głównie niskie poziomy zawartości lepiszcza) - 14 pozytywnych vs 23 negatywnych zmian.
- Wypadkowy trend (przyrost lub spadek) trwałości zmęczeniowej jest zależny od: **analizowanego oddziaływania** (tylko mechaniczne, woda i mróz, sól drogowa kumulacja – woda i mróz + sól drogowa) oraz **rodzaju lepiszcza i poziomu jego zawartości w mieszance**. Celem zwiększenia przejrzystości - ilustrację zmian wskaźnika *RI* przedstawiającego trend trwałości po uwzględnieniu omawianych kombinacji oddziaływań zaprezentowano na Rys. 113 (dane Tab. 36).



Rys. 113: Trend zmian trwałości zmęczeniowej mieszank A-D w zależności od rozpatrywanego oddziaływania

- Z Rys. 113 wynika, iż MMA wykonane na bazie asfaltów zwykłych w technologii WMA (A) i HMA (B) są mniej odporne na oddziaływanie czynników środowiskowych w stosunku do (C, HMA) – asfalt modyfikowany, oraz (D, HMA) wysokomodyfikowany. Dla mieszank C i D wskaźnik *RI* dłużej utrzymuje się po stronie wartości dodatnich (przyrost trwałości), natomiast w przypadku A i B w większości jest ujemny (spadek trwałości). Stwierdza się, iż modyfikacja matrycy asfaltowej polimerem SBS (polimero-asfalty) skutecznie ochrania mieszankę przed oddziaływaniami środowiskowymi.
- Mieszanki na bazie asfaltu zwykłego (A i B) wykazały większą wrażliwość (mniejsza trwałość zmęczeniowa) na oddziaływanie wody i mrozu niż soli drogowej np. (A) wim – (-)9.73%, sd – (-)8.94%, (B) wim - 2.26%, sd - 10.09%. Odmienny trend

zaobserwowano dla mieszanek C i D – sól drogowa bardziej degraduje MMA niż woda i mróz np. (D) wim - 10.20%, sd – 9.81% ($K = 2.95$).

6. Skumulowanie oddziaływań wody i mrozu oraz soli drogowej (wim+sd (k)) wywołało gwałtowniejsze zmiany na poziomie struktury mieszanki, niż dla oddziaływań pojedynczych. Omawianym efektem jest skok wartości wskaźnika *RI* np. mieszanki B2 z: **wim** (+) 2.26, **sd** (+) 10.09% na **wim+sd (k)** (-)17.23%!

Ponadto kumulacja bardziej ograniczyła zdolność regeneracji MMA (1.81% (B4) - 15.54% (C2)) - stała się ona marginalnego znaczenia. Kombinacja czynników jest zatem bardzo niebezpieczna dla materiału stosowanego w konstrukcji. Należy wziąć ją pod uwagę w momencie doboru asfaltu do mieszanki uwzględniając jej: przeznaczenie (warstwa, klasa drogi) i środowisko zastosowania (ukształtowanie terenu, warunki gruntowo-wodne).

7. W przypadku wyższych zawartości lepiszcza w MMA mieszanki C ($K = 2.95$) i D ($K = 2.95, 2.80$) wykazują przyrost trwałości zmęczeniowej niezależnie od zbadanego oddziaływania środowiskowego (nawet skumulowanego) – przewaga regeneracji nad degradacją.
8. Zmniejszanie zawartości asfaltu skutkuje obniżeniem wpływu regeneracji (która jest dodatkowo osłabiona przez oddziaływania środowiskowe), natomiast sprzyja większej degradacji materiału. Wypadkową jest **regres trwałości zmęczeniowej** (w stosunku do mieszanki referencyjnej) szczególnie widoczny dla każdej z analizowanych mieszanek a – D na poziomie wskaźnika wypełnienia $K = 2.65$. Jego wartość niezależnie od zbadanego oddziaływania (lub kombinacji) jest **znacząca** i dochodzi nawet do 44.81% (A4, wim+sd (k)).
9. Zbadane mieszanki na bazie asfaltów zwykłych (A – WMA i B - HMA) jako materiał nie nadają się do warstwy wiążącej lub nośnej (podbudowy) konstrukcji nawierzchni w inwestycjach szczególnie narażonych na oddziaływanie wody i mrozu oraz soli drogowej (kumulacji). Do przykładowych należą:

- drogi wyższych klas (duże natężenia ruchowe, częste zabiegi utrzymaniowe),
- drogi w górach (trudne warunki terenowe, częste zabiegi utrzymaniowe, niższe ujemne temperatury),
- drogi, których usytuowanie wiąże się z występowaniem niekorzystnych warunków gruntowo-wodnych,
- drogi zlokalizowane wewnątrz obiektów inżynierskich (tuneli) (niższe ujemne temperatury, brak wpływu regeneracji, ze względu na zaciemnienie).

Regres trwałości zmęczeniowej w stosunku do powszechnego podejścia przekracza w najlepszym przypadku 17% (najgorszy 44.81%) stanowiąc olbrzymie niedoszacowanie. Znakomitą alternatywą są mieszanki na bazie lepiszczy modyfikowanych i wysokomodyfikowanych, cechujące się wysoką odpornością na kombinacje oddziaływań środowiskowych. Ponadto ich zastosowanie umożliwia również optymalizować zawartość lepiszcza w mieszance. w przypadku dopuszczenia mieszanek na bazie asfaltu zwykłego do dróg wymienionych wyżej należy zastanowić się, nad **skróceniem projektowanego okresu eksploatacyjnego** takiej konstrukcji. Przykład propozycji jego modyfikacji na podstawie danych – wskaźnika *RI* zamieszczono na następnej stronie.

Przykład:

mieszanka A4, $RI = (-)44.81\%$, zastosowanie: podbudowa + warstwa wiążąca
konstrukcja podatna, KR5 (typ B) - droga wyższej klasy

okres projektowy: 30 lat (katalogowo)

okres zmodyfikowany: $(100\% + (-)44.8\%) \cdot 30 = 16.6$ lat

Proponowane podejście (modyfikacja okresu projektowego konstrukcji podatnych typ B, ze względu na materiał) zakłada, iż przybliżone warunki in-situ ustalone dla mieszanki projektowanej na podbudowę dotyczą również pozostałych warstw wyżej położonych. Uproszczenie jest prawdziwe, gdyż warstwy wierzchnie (w. ścieralna, w. wiążąca) bezpośrednio są narażone na wodę i mróz, sól, a regeneracja w nich zachodzi efektywniej (wyższe temperatury). Należy również podkreślić, iż z perspektywy trwałości zmęczeniowej konstrukcji najistotniejsza jest podbudowa pełniąca funkcję nośną. Uogólnioną propozycję modyfikacji okresu projektowego konstrukcji podatnych (typ B, wszystkie warstwy asfaltowe) w oparciu o wskaźnik RI mieszanek A-D (recepty 2-4) przedstawiono w Tab. 37. Uwzględniono wszystkie omawiane oddziaływania oraz katalogowe okresy projektowe.

W Tab. 37 podkreślono kumulację oddziaływań wim+sd (k), która jest wypadkową wszystkich oddziaływań włączając efekt regeneracji. Pozycja ref, (h) oznacza iż próbka referencyjna została zregenerowana i ponownie zbadana – tylko czynnik mechaniczny+regeneracja.

Zaznacza się, iż zaproponowane uogólnienie, podobnie jak katalog [79] nie uwzględnia rodzaju aplikowanego lepiszcza ze względu na jego np. trwałość zmęczeniową, wodę i mróz itp. w rzeczywistości mieszanki na bazie asfaltów modyfikowanych (np. C) i wysokomodyfikowanych (np. D) charakteryzują się znacząco wyższymi parametrami jakościowymi niż te wykorzystujące asfalty zwykłe (np. A i B) - co zostało udowodnione w rozprawie. Problem ten rozwiązano autorską propozycją zaprezentowaną w – rozdziale 6.1 .

Tab. 37: Propozycja wykorzystania wskaźnika RI do modyfikacji okresu projektowego konstrukcji

rec. MMA	K [-]	wariant	RI [%]	katalogowy okres projektowy			
				drogi wyższych klas		pozostałe drogi	
				katalog	skorygowany	katalog	skorygowany
			[lat]	[lat]	[lat]	[lat]	
A2	2.95	ref, (h)	52.3%	30.0	45.7	20.0	30.5
		wim	-9.7%	30.0	27.1	20.0	18.1
		sd	-8.9%	30.0	27.3	20.0	18.2
		wim+sd (k)	-31.7%	30.0	20.5	20.0	13.7
A3	2.80	ref, (h)	20.5%	30.0	36.2	20.0	24.1
		wim	-16.5%	30.0	25.1	20.0	16.7
		sd	-13.1%	30.0	26.1	20.0	17.4
		wim+sd (k)	-35.2%	30.0	19.4	20.0	13.0
A4	2.65	ref, (h)	12.7%	30.0	33.8	20.0	22.5
		wim	-25.0%	30.0	22.5	20.0	15.0
		sd	-19.3%	30.0	24.2	20.0	16.1
		wim+sd (k)	-44.8%	30.0	16.6	20.0	11.0
B2	2.95	ref, (h)	52.2%	30.0	45.7	20.0	30.4
		wim	2.3%	30.0	30.7	20.0	20.5
		sd	10.1%	30.0	33.0	20.0	22.0
		wim+sd (k)	-17.2%	30.0	24.8	20.0	16.6
B3	2.80	ref, (h)	22.3%	30.0	36.7	20.0	24.5
		wim	-11.4%	30.0	26.6	20.0	17.7
		sd	3.3%	30.0	31.0	20.0	20.7
		wim+sd (k)	-21.8%	30.0	23.5	20.0	15.6
B4	2.65	ref, (h)	17.8%	30.0	35.3	20.0	23.6
		wim	-21.5%	30.0	23.6	20.0	15.7
		sd	-5.8%	30.0	28.3	20.0	18.8
		wim+sd (k)	-31.4%	30.0	20.6	20.0	13.7
C2	2.95	ref, (h)	18.5%	30.0	35.6	20.0	23.7
		wim	12.9%	30.0	33.9	20.0	22.6
		sd	14.9%	30.0	34.5	20.0	23.0
		wim+sd (k)	9.5%	30.0	32.8	20.0	21.9
C3	2.80	ref, (h)	14.4%	30.0	34.3	20.0	22.9
		wim	-1.2%	30.0	29.6	20.0	19.8
		sd	5.8%	30.0	31.7	20.0	21.2
		wim+sd (k)	-6.0%	30.0	28.2	20.0	18.8
C4	2.65	ref, (h)	8.9%	30.0	32.7	20.0	21.8
		wim	-14.0%	30.0	25.8	20.0	17.2
		sd	-2.4%	30.0	29.3	20.0	19.5
		wim+sd (k)	-18.8%	30.0	24.4	20.0	16.2
D2	2.95	ref, (h)	13.4%	30.0	34.0	20.0	22.7
		wim	10.2%	30.0	33.1	20.0	22.0
		sd	9.8%	30.0	32.9	20.0	22.0
		wim+sd (k)	6.2%	30.0	31.9	20.0	21.2
D3	2.80	ref, (h)	10.5%	30.0	33.1	20.0	22.1
		wim	2.6%	30.0	30.8	20.0	20.5
		sd	6.3%	30.0	31.9	20.0	21.3
		wim+sd (k)	0.2%	30.0	30.1	20.0	20.0
D4	2.65	ref, (h)	6.3%	30.0	31.9	20.0	21.3
		wim	-3.4%	30.0	29.0	20.0	19.3
		sd	-3.6%	30.0	28.9	20.0	19.3
		wim+sd (k)	-12.1%	30.0	26.4	20.0	17.6

Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdza się, iż uwzględnienie oddziaływań środowiskowych i regeneracji umożliwia **dokładniej szacować trwałość zmęczenia materiału**, oraz **przewidywać jej zmiany** (w stosunku do powszechnego podejścia). Ponadto wykorzystując wskaźniki zawarte w metodzie na etapie projektu recepty, **łatwiej** jest dobierać asfalt do mieszanek ze względu na przeznaczenie MMA (klasa drogi, warunki środowiskowe w miejscu usytuowania) uwzględniając oddziaływania środowiskowe (szczególnie ich kumulację). Posiadając wartość wskaźnika wypadkowego *RI* można również podejmować próby wyznaczenia projektowego okresu eksploatacyjnego konstrukcji uwzględniającego omówione wpływy środowiskowe i regenerację w sposób jednoczesny.

5.3.7.1. Kontrolne badania autorskich formuł obliczeniowych stanu skumulowanego

Autorskie formuły umożliwiające matematyczne wyznaczenie wskaźników stanu skumulowanego $DI_{wim+sd(k)}$, $HI_{wim+sd(k)}$, $RI_{wim+sd(k)}$ oraz wypadkowej trwałości zmęczeniowej $tz_{wim+sd(k)}$ wykorzystując wyniki pojedynczych badań zostały sprawdzone w oparciu o niezależne kontrolne badania laboratoryjne. Zadowalające rezultaty uzyskano po wykonaniu zaledwie dwóch badań (na każdy przypadek) przeprowadzonych dla wszystkich mieszanek (A-D) i poziomów ich zawartości asfaltu. Zaaplikowano identyczne warunki testu. Uwzględniono odpowiednią kolejność przygotowania i testowania:

(1) woda i mróz, (2) sól drogowa, (3) badanie zmęczeniowe nr 1, (4) regeneracja, (5) badanie zmęczeniowe nr 2.

Każdy przypadek przeanalizowano. Na podstawie pozyskanych wyników wyznaczono średnią arytmetyczną i przyrównano ją do rezultatów obliczeniowych - autorskie formuły przedstawione w poprzednim podrozdziale. Oszacowano o ile % obliczenia trwałość zmęczeniowa wyrażonej w cyklach różni się od tej wyznaczonej na podstawie badań. Wyniki badań zaprezentowano w Tab. 38 i Tab. 39. Oznaczenia zastosowane w tabelach przedstawiono poniżej:

ref – tylko oddziaływanie mechaniczne,

wim+sd (k) – kumulacja oddziaływań woda i mróz, sól drogowa,

K – wskaźnik wypełnienia [-],

DI – wskaźnik degradacji (trwałość zmęczeniowa) [-],

HI – wskaźnik regeneracji (trwałość zmęczeniowa) [-],

RI – wskaźnik wypadkowy (trwałość zmęczeniowa) [-],

tz_1 – trwałość zmęczeniowa wyznaczona według kryterium spadku początkowej wartości modułu o 50% po pierwszym badaniu [cykle],

tz_2 – trwałość zmęczeniowa wyznaczona według autorskiego kryterium zmęczeniowego po drugim badaniu [cykle],

\bar{s}_r – wartość średnia (z wyników badań),

m_a – według autorskiej metody.

Tab. 38: Porównanie wyników badań z autorską metodą (mieszanki A-B)

rec. MMA	K [-]	wariant	Pierwsze badanie zmęczenia			Drugie badanie zmęczenia			Badania				Autorska metoda wskaźnikowa (obliczeniowa)				O ile cykli różni się metoda autora od badań (trwałość zmęczenia) [cykle]	O ile % metoda autora odbiega od badań (trwałość zmęczenia) [%]	
			t_{z1} [cykle]	DI [%]	DI_{sr} [%]	t_{z2} [cykle]	HI [%]	HI_{sr} [%]	t_{z1+2} [cykle]	RI [%]	$t_{z1+2,5r}$ [cykle]	RI_{5r} [%]	DI_{ma} [%]	HI_{ma} [%]	RI_{ma} [%]	$t_{z1+2,ma}$ [cykle]			
A2	2.95	ref	311340			162778													
		wim+sd (k)	200123	-35.72%	-36.18%	13378	6.69%	6.39%	213501	-31.43%	211384	-32.11%	-36.45%	6.31%	-31.74%	212535	1151	0.54%	
		wim+sd (k)	197248	-36.65%		12018	6.09%		209267	-32.79%									
A3	2.80	ref	217004			44556													
		wim+sd (k)	136203	-37.23%	-38.48%	7624	5.60%	4.87%	143826	-33.72%	140028	-35.47%	-38.44%	4.81%	-35.23%	140564	536	0.38%	
		wim+sd (k)	130821	-39.72%		5409	4.13%		136229	-37.22%									
A4	2.65	ref	149994			19089													
		wim+sd (k)	84026	-43.98%	-45.36%	2125	2.53%	2.27%	86151	-42.56%	83817	-44.12%	-45.33%	2.12%	-44.81%	82786	-1031	-1.23%	
		wim+sd (k)	79877	-46.75%		1607	2.01%		81483	-45.68%									
B2	2.95	ref	411640			215001													
		wim+sd (k)	321379	-21.93%	-22.85%	24230	7.54%	6.97%	345609	-16.04%	339744	-17.47%	-22.44%	6.80%	-17.23%	340694	949	0.28%	
		wim+sd (k)	313797	-23.77%		20083	6.40%		333880	-18.89%									
B3	2.80	ref	296816			66241													
		wim+sd (k)	221451	-25.39%	-25.96%	12809	5.78%	5.18%	234260	-21.08%	231144	-22.13%	-25.56%	5.34%	-21.82%	232057	913	0.39%	
		wim+sd (k)	218072	-26.53%		9957	4.57%		228029	-23.18%									
B4	2.65	ref	161401			28744													
		wim+sd (k)	112601	-30.24%	-31.74%	2797	2.48%	1.79%	115398	-28.50%	112158	-30.51%	-31.65%	1.81%	-31.43%	110679	-1479	-1.32%	
		wim+sd (k)	107740	-33.25%		1178	1.09%		108918	-32.52%									

Tab. 39: Porównanie wyników badań z autorską metodą (mieszanki C-D)

rec. MMA	K [-]	wariant	Pierwsze badanie zmęczeniowe			Drugie badanie zmęczeniowe			Badania				Autorska metoda wskaźnikowa (obliczeniowa)				O ile cykli różni się metoda autora od badań (trwałość zmęczeniowa) [cykle]	O ile % metoda autora odbiega od badań (trwałość zmęczeniowa) [%]	
			tz ₁ [cykle]	DI [%]	DI _{sr} [%]	tz ₂ [cykle]	HI [%]	HI _{sr} [%]	tz ₁₊₂ [cykle]	RI [%]	tz _{1+2,sr} [cykle]	RI _{sr} [%]	DI _{ma} [%]	HI _{ma} [%]	RI _{ma} [%]	tz _{1+2,ma} [cykle]			
C2	2.95	ref	1456839			269560													
		wim+sd (k)	1393352	-4.36%	-4.89%	220545	15.83%	15.47%	1613897	10.78%	1599951	9.82%	-4.49%	15.54%	9.45%	1594541	-5410	-0.34%	
		wim+sd (k)	1377718	-5.43%		208287	15.12%		1586005	8.87%									
C3	2.80	ref	928584			133589													
		wim+sd (k)	798488	-14.01%	-14.90%	88272	11.05%	10.73%	886760	-4.50%	875111	-5.76%	-14.93%	10.54%	-5.99%	872958	-2152	-0.25%	
		wim+sd (k)	782032	-15.78%		81430	10.41%		863462	-7.01%									
C4	2.65	ref	497310			44147													
		wim+sd (k)	387577	-22.07%	-23.40%	25500	6.58%	6.17%	413077	-16.94%	404464	-18.67%	-23.29%	6.13%	-18.75%	404048	-416	-0.10%	
		wim+sd (k)	374283	-24.74%		21567	5.76%		395850	-20.40%									
D2	2.95	ref	1958796			263020													
		wim+sd (k)	1927954	-1.57%	-2.32%	210100	10.90%	10.19%	2138054	9.15%	2108351	7.64%	-2.25%	10.07%	6.22%	2080672	-27679	-1.31%	
		wim+sd (k)	1898640	-3.07%		180008	9.48%		2078648	6.12%									
D3	2.80	ref	1032285			107895													
		wim+sd (k)	972038	-5.84%	-6.69%	83563	8.60%	8.20%	1055601	2.26%	1042191	0.96%	-6.63%	8.44%	0.21%	1034462	-7729	-0.74%	
		wim+sd (k)	954358	-7.55%		74423	7.80%		1028780	-0.34%									
D4	2.65	ref	543505			34327													
		wim+sd (k)	476856	-12.26%	-13.84%	16639	3.49%	3.08%	493496	-9.20%	482747	-11.18%	-13.71%	3.16%	-12.14%	477500	-5247	-1.09%	
		wim+sd (k)	459747	-15.41%		12252	2.66%		471999	-13.16%									

Stosując analizę porównawczą danych przedstawionych - Tab. 38 oraz Tab. 39 stwierdza się, iż na podstawie wykonanych niezależnych badań laboratoryjnych opracowane przez autora formuły omówione w podrozdziale 5.3.7 **skutecznie przybliżają** wynik stanu skumulowanego. Największe odchylenia (co do wartości bezwzględnej) obliczeniowej trwałości zmęczeniowej względem wyników badań **wyniosły zaledwie:** 1.32% B4 – asfalty zwykłe (niedoszacowanie o 1479 cykli), oraz D2 – asfalty modyfikowane i wysokomodyfikowane (niedoszacowanie o 27679 cykli).

Poprzednie rozważania wykazały, iż asfalty zwykłe charakteryzują się (przy tym samym poziomie obciążenia – $200\mu\epsilon$) znacznie mniejszą trwałością w cyklach (80-420 tysięcy cykli) w stosunku do polimero-asfaltów (370 tys. - 1.9 mln). Różnice (obliczenia-badania) wyrażone w cyklach są zatem bardziej znaczące – każde ich dziesięć-tysięcy ma znaczenie. Dla lepiszczy modyfikowanych każde sto-tysięcy. w tym przypadku odchylenia metody od obliczeń mieszanek A-D uwzględniając ich rodzaj asfaltu można zaliczyć do marginalnych (do pominięcia). Ponadto zaobserwowano, iż wskaźniki *DI*, *HI*, *RI* co do ich wartości są **porównywalne**. Maksymalna różnica (obliczenia-badania) nie przekracza 1.0%.

Stwierdza się, iż **wskaźniki degradacji, regeneracji, wypadkowy oraz trwałość zmęczeniowa** stanu skumulowanego (niezależnie od rodzaju asfaltu i jego zawartości) mogą być z **powodzeniem** obliczane autorskimi formułami bez konieczności wykonywania złożonych badań wymagających dodatkowego nakładu czasowego.

Zaprezentowane w niniejszym rozdziale autorskie metody, pozwalają skutecznie:

1. **uwzględnić** wpływ oddziaływań **środowiskowych** oraz **regeneracji** w trwałości zmęczeniowej MMA,
2. **optymalizować** skład recepty (zawartość lepiszcza) ze względu na trwałość zmęczeniową z uwzględnieniem oddziaływań środowiskowych i regeneracji,
3. **ocenić** wpływ poszczególnych oddziaływań lub stanu skumulowanego na trwałość względem powszechnie stosowanego podejścia,
4. **obliczać** wskaźnik degradacji *DI*, regeneracji *HI*, wypadkowy *RI* oraz trwałość zmęczeniową (wyrażoną w cyklach) stanu skumulowanego (woda i mróz + sól drogowa) mieszanek na podstawie autorskich formuł,
5. **prognozować** trwałość konstrukcji (okres projektowy) poddanej wpływom oddziaływań środowiskowych i regeneracji.

Na podstawie wykonanych analiz Autor **osiągnął cel rozprawy**, związany z uwzględnieniem zróżnicowanych oddziaływań środowiskowych oraz zjawiska regeneracji, które dotąd nie zostały brane pod uwagę w trwałości zmęczeniowej MMA. Przedstawiono własne rozwiązania tego problemu, które można z powodzeniem wykorzystać do mieszanek na bazie asfaltów zwykłych lub modyfikowanych (i wysokomodyfikowanych) zarówno w technologii na gorąco i na ciepło.

5.3.8. Podsumowanie badań bloku zaawansowanego

Przeprowadzone w podrozdziale 5.3 analizy dotyczyły 4 głównych tematów - badań modułu sztywności (i kąta fazy), zmęczenia, eksperymentalnych pomiarów temperatury i zjawiska regeneracji w MMA (mieszkankach mineralno-asfaltowych). Wszystkie wymienione, umożliwiły skutecznie porównać i ocenić mieszanki na bazie asfaltów: A – 35/50 WMA, B – 35/50 (referencyjna), C – 25/55-60 i D - 25/55-80 HIMA, które charakteryzowały się odmienną technologią produkcji (na gorąco HMA – B, C, D i na ciepło WMA - A) oraz modyfikacją matrycy - polimerem SBS (C, D). Oceniane MMA przeanalizowano na trzech poziomach zawartości asfaltu wyrażonych poprzez wskaźnik wypełnienia (met. Durieza) K (2.95, 2.80 i 2.65). w badaniach pod rozważenie poddano wpływ oddziaływań mechanicznych (powszechny sposób realizacji badań) oraz wody i mrozu, soli drogowej, kumulacji (woda i mróz + sól drogowa) i zjawiska regeneracji (rzeczy nowe, wkład autora) na trwałość mieszanek. Warunki wdrożenia regeneracji w laboratorium ustalono na podstawie przeprowadzonych eksperymentalnych pomiarów temperatury jako aproksymacja do stanu in-situ (konstrukcja). Badania związane z wpływem wody i mrozu i soli drogowej na MMA również – proponowana autorska metodyka badawcza. Rozprawę wzbogacono o analizy zjawisk zachodzących na poziomie makrostruktury korzystając z wykresu zmiany modułu sztywności od liczby cykli. Udowodniono, iż istotnym oddziaływaniem wywołującym regenerację jest wysoka temperatura i okres odpoczynku. Wykazano, iż oddziaływania wody i mrozu, soli drogowej, ich kumulacji znacząco wpływają na materiał doprowadzając do jego degradacji. Ponadto udowodniono pozytywny wpływ regeneracji na mieszanki również w zakresie makrostruktury. Dodatkowo potwierdzono skuteczność autorskiego kryterium zmęczeniowego zaproponowanego do badań zmęczeniowych związanych z regeneracją. Autor opracował również formułę umożliwiającą obliczenie trwałości mieszanek stanu skumulowanego (woda i mróz + sól drogowa + regeneracja) na podstawie informacji o wynikach MMA poddanych pojedynczym oddziaływaniom. Udowodniono skuteczność formuły oraz jej wszechstronne zastosowanie – do oceny mieszanek w technologii na ciepło i gorąco oraz asfaltów modyfikowanych. Na podstawie pozyskanych rezultatów skutecznie uwzględniono oddziaływanie wody i mrozu, soli drogowej, ich kumulację oraz regenerację w trwałości zmęczeniowej mieszanek. Przeprowadzone analizy umożliwiły również opracować dwie metody, które pozwalają optymalizować recepty MMA (np. zawartość lepiszcza) ze względu na trwałość zmęczeniową.

Skład mieszanek oraz zastosowane założenia technologiczne pozostały bez zmian w stosunku do badań bloku podstawowego. Do przeprowadzenia testów wdrożono metodę belki czteropunktowo zginanej, stosując warunek kontrolowanego odkształcenia dla przykładanego impulsu obciążenia na próbkę. Zadano sinusoidalny kształt impulsu. Temperatura badania wynosiła 10.0°C. Częstotliwość 10.0 Hz. w sumie przebadano ok. 280 próbek o kształcie pryzmatycznym, każdostronnie oszlifowanych. Zastosowana metoda pomiarowa i wprowadzone założenia okazały się być skuteczne, umożliwiając osiągnięcie postawionych celów w ramach tematu rozprawy.

Na podstawie przeprowadzonych analiz zmian modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego, ustalono, iż mieszanki A - D opisane liniowym modelem regresji charakteryzują się dobrym dopasowaniem $R^2 \gg 0.85$ względem wskaźnika wypełnienia K oraz pośrednio - zawartością wolnej przestrzeni V_m i wskaźnikiem $ITSR$ niezależnie od rozpatrywanego oddziaływania (woda i mróz, sól drogowa). Zbadanie wzajemnych korelacji umożliwiło określić wrażliwość MMA i prędkość zmian (kąta nachylenia linii trendu) wywołane wodą i mrozem oraz solą drogową. w pracy wykazano istniejące współzależności pomiędzy badaniem $ITSR$ (pośrednie rozciąganie) a modułu sztywności (4-PB) pozwalającego wzajemnie przeliczać wskaźnik $ITSR$ względem zmian wartości modułu/kąta fazy zarówno dla

oddziaływania wody i mrozu jak i nawet soli drogowej. Ponadto zaaplikowane modele regresji pozwoliły oszacować dysproporcje jakościowe w badanych materiałach A - D poprzez dostrzegalne wzajemne rozsuniecie linii trendu mieszanek.

Zwracając uwagę na cechy jakościowe zbadanych mieszanek (modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego, zestaw referencyjny), materiał D (na bazie asfaltu wysoko modyfikowanego 25/55-80 HIMA) charakteryzował się najniższą (niezależnie od poziomu K) wartością modułu sztywności spośród wszystkich badanych MMA, następnie C (modyfikowany 25/55-60) oraz B (35/50) i A (35/50 WMA). Ustalono, iż modyfikacja matrycy asfaltowej polimerem SBS wraz z jej wzrostem doprowadza do „uelastyczniania” się mieszanki, efektem czego jest niższa wartość modułu sztywności (o ok. 5% $K = 2.95$ względem mieszanki referencyjnej B). Stwierdzono, iż stosowalność tych lepiszczy do mieszanek typu wysoki moduł sztywności, może być ograniczona. Ponadto wyraźnie podkreślono, iż niższa wartość modułu sztywności dla tych mieszanek (na bazie asfaltów modyfikowanych / wysokomodyfikowanych) nie jest równoznaczna z np. niezdolnością do przenoszenia przez nich obciążeń lub koleinowaniem się w wysokich temperaturach. Zaobserwowano również zmienny trend wartości modułu sztywności od zawartości lepiszcza wszystkich mieszanek A – D. w przypadku pierwszej redukcji o $\Delta K = 0.15$, nastąpił jego przyrost, natomiast po drugiej o $\Delta K = 0.15$ gwałtowny spadek. Udowodniono, iż istnieje pewne optimum zawartości lepiszcza (dla zbadanych MMA $K = 2.80$) po przekroczeniu, którego, mieszanka ulega osłabieniu. Jest to efekt przyrostu pustek powietrznych wywołanych zmniejszającą się zawartością lepiszcza. Obserwacja została również potwierdzona dla pozostałych rozpatrywanych oddziaływań – woda i mróz, sól drogowa.

W przypadku kąta przesunięcia fazowego, wszystkie zbadane mieszanki wykazały zdecydowaną przewagę zachowań sprężystych opisaną poprzez wartość kąta przesunięcia fazowego $\ll 10.0^\circ$. Najniższą wartość dla poziomu $K = 2.95$ wykazała mieszanka A (8.15°), następnie D (8.26°) B (8.40°) i C (9.09°). Redukcja zawartości asfaltu wywołała spadek wartości kąta fazy wszystkich analizowanych mieszanek. Wyniki są porównywalne na każdy analizowanym poziomie. Porównując zmiany kąta fazy mieszanek C i D względem B stwierdzono, iż modyfikacja matrycy polimerem nie wpłynęła niekorzystnie na MMA.

W przypadku zestawiania ze sobą mieszanek wykonanych w technologii HMA i WMA (mieszanki B i A) wyższe wartości modułu sztywności są osiąmane w przypadku „na ciepło”. Kąt fazy jest niższy niż dla mieszanek technologii HMA. Różnice nie są znaczące przy dużych zawartościach asfaltu ($K = 2.95$) - wynoszą mniej niż 5% na korzyść technologii WMA (bardziej nośna i sprężystsza mieszanka). Podkreślono, iż trend zmienia się wraz z redukcją ilości lepiszcza w kierunku jakościowej przewagi technologii HMA.

Wykonując analizę porównawczą wpływu oddziaływań: woda i mróz oraz sól drogowa na zmiany modułu sztywności A – D stwierdzono, iż wywołują one degradację materiału opisaną przez spadek wartości modułu (w skrajnych wypadkach dochodzący nawet do ok. 15% - A4). Odnotowano, iż zmniejszenie zawartości lepiszcza w mieszance powoduje zwiększenie wrażliwości badanych mieszanek na oddziaływanie omawianych czynników. Spośród wszystkich mieszanek najodporniejszą okazała się mieszanka D oraz następnie C. Modyfikacja matrycy asfaltowej polimerem SBS skutecznie zabezpiecza materiał przed wodą i mrozem oraz solą drogową – niezależnie od rozpatrywanego poziomu zawartości asfaltu (wysokość degradacji wynosiła od 0.19 – 9.74% w zależności od poziomu K i rozpatrywanego czynnika). Należy dodać, iż obserwacje wpływu analizowanego czynnika środowiskowego (woda i mróz) na MMA są zbieżne z wykonanym wcześniej badaniem *ITSR*. Na podstawie wyników stwierdzono również, iż oddziaływanie wody i mrozu oraz soli drogowej w podobnym stopniu degraduje mieszanki na bazie asfaltów zwykłych.

Zestawiając mieszanki na bazie asfaltu zwykłego (35/50) wykonane w technologiach WMA (A) oraz HMA (B) niezależnie od rozpatrywanego oddziaływania mieszanka

w technologii na gorąco wykazała mniejszą (nawet 3-krotnie) wrażliwość na spadek wartości modułu względem na ciepło. Technologia na gorąco pozwala wykonać odporniejszą mieszankę.

W przypadku analiz zmian kąta przesunięcia fazowego mieszanek wywołanym oddziaływaniem wody i morzu oraz soli drogowej zauważono mniejsze fluktuacje jego wartości - mieszanka D (nawet 20 krotnie mniejsze) i C (nawet 10 krotnie mniejsze) w stosunku do pozostałych na bazie lepiszczy zwykłych (których wartości zmian są na porównywalnym poziomie). Mieszanki z modyfikacją matrycy polimerem wykazały zdecydowanie większą odporność na zmianę charakteru pracy materiału - efektów „zesztywnienia” – spadku wartości kąta i „upłynnienia” – wzrostu wartości kąta. Ponadto zaobserwowano ogólne trend zmian – dla oddziaływania wody i mrozu - wszystkie mieszanki wykazują spadek wartości kąta fazy, a soli – mieszanki A i B (asfalty zwykłe) przyrost, C i D spadek.

Badania zmęczeniowe mieszanek A – D wykonano na dwóch poziomach obciążenia – $130 \mu\epsilon$ ($K = 2.95$ tylko oddziaływanie mechaniczne) i $200 \mu\epsilon$ (wszystkie poziomy K i oddziaływania – mechaniczne, środowiskowe i chemiczne). Niższy poziom potraktowano jako „pilotażowy” z udziałem, którego sprawdzono, czy testowane mieszanki uzyskają w zadanych warunkach min. 1.0 mln cykli (miara trwałości korespondująca z wystąpieniem 50% spękań na powierzchni nawierzchni). Wszystkie mieszanki wykazały znacznie wyższą trwałość – powyżej 3.0 mln cykli. w przypadku mieszanek na bazie asfaltów modyfikowanych C i wysoko modyfikowanych D, wartość modułu ustabilizowała się średnio po spadku jego początkowej wartości o 15 % - C i 4% D – nie zostało osiągnięte kryterium zmęczeniowe. Badania przerwano. Mieszanki A i B osiągnęły kryterium zmęczeniowe (spadek początkowej wartości modułu o 50%). Na podstawie wstępnych badań zmęczeniowych ustalono, iż mieszanki ze zmodyfikowaną matrycą asfaltową polimerem SBS wyróżniają się znacząco wyższą trwałością zmęczeniową (praktycznie nieskończoną dla małych wartości obciążenia) względem asfaltów zwykłych. Zaobserwowano również, iż aby wywołać zmęczenie celem osiągnięcia kryterium należy zadać odpowiednio większą wartość impulsu wymuszenia. Do przeprowadzenia docelowych badań dla wszystkich mieszanek przyjęto jednakowy poziom obciążenia równy $200 \mu\epsilon$, który okazał się skuteczny w przypadku mieszanek C i D (uzyskano osiągnięcie kryterium).

Przeprowadzając analizę porównawczą wyników zestawu referencyjnego ustalono, iż na zadanym poziomie obciążenia, wraz ze spadkiem zawartości asfaltu, trwałość zmęczeniowa mieszanek wyraźnie spada. Niezależnie od rozpatrywanego jego poziomu najtrwalszą mieszanką była D, która charakteryzowała się nawet 6 krotnie większą trwałością względem A, 4.5 krotnie względem B i 1.35 krotnie względem C (dla $K = 2.95$). Dla niższych K stosunek ulegał zmniejszeniu. Na podstawie pozyskanych wyników ustalono, iż modyfikacja matrycy asfaltowej polimerem SBS pozwala skutecznie (nawet kilkakrotnie) zwiększyć trwałość zmęczeniową MMA.

Biorąc pod uwagę rodzaj zastosowanej technologii HMA (B) i WMA (A) ze względu na trwałość zmęczeniową ustalono, iż zdecydowanie lepszą jest na gorąco – pozwala wytworzyć bardziej odporny zmęczeniowo materiał. Różnice w liczbie cykli zmieniały się od 8% ($K = 2.65$) do max. 25% ($K = 2.95$) – im większa zawartość lepiszcza tym rozbieżności stają się większe.

W ramach badań ustalono również wpływ oddziaływania wody i mrozu na trwałość zmęczeniową mieszanek A – D stosując autorską metodykę. Degradację mieszanek ze względu na trwałość przedstawiono jako procentowy spadek trwałości zestawu woda i mróz odniesionym do zestawu referencyjnego (tylko obciążenie mechaniczne). Udowodniono, iż oddziaływanie wody i morzu znacząco wpływa na spadek trwałości zmęczeniowej. Zmiany są tym większe, im zawartość lepiszcza w MMA niższa. Zasygnalizowano, iż trend spadku trwałości wywołany wodą i mrozem wszystkich mieszanek jest zbieżny z rezultatami wcześniej

wykonanych badań *ITSR*. Spośród wszystkich mieszanek najmniejszą wrażliwość na działanie wody i mrozu wykazała mieszanka D z HIMA – spadek trwałości o około 1.56% przy $K = 2.95$ i 7.02% przy $K = 2.65$. Następną w kolejności była C, dla której (z uwagi na mniejszy stopień modyfikacji matrycy polimerem SBS) zmniejszenie się trwałości wyniosło około 4.00% przy $K = 2.95$ i aż 19.70% przy $K = 2.65$ (mieszanka D jest od 2.56 do 2.81 bardziej odporna względem C na wodę i mróz). w przypadku MMA na bardziej asfaltów zwykłych, mieszanka B wykazała spadek trwałości o około 21.77% przy $K = 2.95$ i 28.40% przy $K = 2.65$. Podobnie A - spadek trwałości o około 23.09% przy $K = 2.95$ i 28.63% przy $K = 2.65$. Stwierdzono, iż modyfikacja matrycy polimerem SBS skutecznie zabezpiecza mieszankę przed degradacją wynikającą z oddziaływania wody i mrozu, a odporność zależna jest od zawartości lepiszcza w MMA. Ponadto udowodniono, że im bardziej zmodyfikowana jest matryca polimerem tym lepszy efekt – nawet do 2.81 razy bardziej zestawiając mieszanki D i C. w pracy również podkreślono, iż degradacja wywołana wodą i mrozem należy do znaczących – spadek trwałości nawet do 28.63%. Wskazano, iż trzeba ją uwzględnić w łącznej ocenie trwałości materiału.

Analizując mieszanki różniące się technologią wykonania (WMA – A i HMA - B) - stwierdzono, iż wpływ oddziaływania wody i mrozu na trwałość jest porównywalny na każdym poziomie badanej zawartości lepiszcza. Nieznacznie lepiej wypadła mieszanka w technologii na gorąco o około 9%.

Badania zmęczeniowe umożliwiły również ocenić wpływ oddziaływania soli drogowej na mieszanki A – D. Do badań zastosowano autorską metodykę moczenia próbek w roztworze soli. w pracy wykazano, iż sól drogowa negatywnie wpływa na trwałość niezależnie od poziomu wskaźnika wypełnienia K . Im zawartość lepiszcza w MMA jest mniejsza tym degradacja (spadek trwałości) większy. Największą odporność na działanie tego czynnika przy najniższej badanej zawartości asfaltu wykazała mieszanka D – spadek o 6.85% (D4), następnie C – spadek o 8.41% (C4) (22% mniejszą od D), później B - spadek o 9.60% (B4) (40% mniejszą od D) i na końcu A - spadek aż o 21.87% (A4) (319% mniejszą od D). Stwierdzono, iż dodatki stosowane celem uzyskania niższych technologicznych temperatur (WMA) reagują z solą drogową, degradując asfalt, dlatego też spadek trwałości był największy. Ponadto wykazano, iż mieszanki ze zmodyfikowaną matrycą asfaltową polimerem SBS charakteryzują się znacznie wyższą odpornością na sól – prawie 4-krotną przy $K = 2.95$ (D2 względem B2) i około 1.5-krotną przy $K = 2.65$ (D4 względem B4). Zaobserwowano również, że im wyższy stopień modyfikacji tym degradacja mieszanek (ze względu na trwałość) jest mniejsza – około 34% mniejsza (D2 względem C2) i ok. 22% mniejsza (D4 względem C4). Stwierdzono, iż modyfikacja matrycy polimerem skutecznie podnosi odporność MMA na oddziaływanie soli drogowej. w rozprawie podkreślono, że wpływ soli drogowej na trwałość MMA nie jest bez znaczenia i należy go uwzględnić. Na podstawie pozyskanych rezultatów zestawiono ze sobą technologie wykonania MMA - WMA (A) i HMA (B). Stwierdzono, iż mieszanki wykonane w technologii na gorąco są na każdym poziomie zawartości lepiszcza odporniejsze na działanie soli – około 4.6 razy na poziomie $K = 2.95$ i około 2.27 razy na poziomie $K = 2.65$. Podkreślono, iż % spadek trwałości wywołany działaniem soli w przypadku zastosowanego asfaltu w technologii WMA stanowi prawie 25% wartości referencyjnej. Podkreślono, iż zastosowanie mieszanki z omawianym asfaltem w tej technologii wewnątrz konstrukcji narażonej na nadmierne oddziaływanie środków odładzających (np. w górach lub drogach o dużym natężeniu ruchowym) powinno być ograniczone.

W badaniach przanalizowano również korelacje pomiędzy wskaźnikiem wypełnienia K , zawartością wolnej przestrzeni V_m i wskaźnikiem *ITSR*, a % spadkiem trwałości zmęczeniowej wywołanym czynnikami środowiskowym oraz chemicznym. Ustalono, iż mieszanki A - D opisane liniowym modelem regresji charakteryzują się dobrym dopasowaniem $R^2 \gg 0.80$ niezależnie od rozpatrywanego czynnika (woda i mróz, sól drogowa). Zbadanie wzajemnych korelacji umożliwiło ustalić wrażliwość MMA - poziom i prędkość zmian (ką

nachylenia linii trendu) wywołanych oddziaływaniami wody i mrozu oraz soli drogowej. w analizach wykazano istniejącą współzależność pomiędzy wynikami badania *ITSR* (pośrednie rozciąganie), a degradacją - spadek trwałości, 4-PB. Na podstawie rezultatów stwierdzono, iż z powodzeniem można prognozować wartość wskaźnika *ITSR* lub degradację wywołaną wodą i mrozem lub solą drogową stosując odpowiednią metodę badawczą. Ponadto zaaplikowane modele regresji pozwoliły oszacować dysproporcje jakościowe mieszanek A - D, wynikające z rodzaju zastosowanego lepiszcza i jego zawartości – wzajemne rozsuniecie linii trendu.

Następnie w rozprawie uwagę poświęcono eksperymentalnym pomiarom temperatury. Umożliwiły one ustalić warunki wdrożenia zjawiska regeneracji w laboratorium dla mieszanek A - D przeznaczonych na warstwę podbudowy i wiążącą ruchu KR 5-7. Wykonano pomiary:

1. temperatury powietrza w cieniu (tylko wartość szczytowa),
2. powierzchni dwóch płyt mieszanek A i D ($K = 2.95$),
3. przygotowanej konstrukcji (wykonanej tylko z jednego rodzaju mieszanki A) (wybrano typową konstrukcję katalogową na KR 5 o łącznej grubości warstw 32.5cm).

Autor rozprawy szczegółowo przedstawił metodykę badań oraz założenia własnego eksperymentu. Wykonano pomiar ciągły, prowadzony przez dwa dni. Badania temperatury wykonano w okresie letnim (czerwiec 2021 r.) – z uwagi na wysoką jej wartość, która zwiększa intensywność regeneracji. Zbadana szczytowa temperatura powietrza w cieniu wyniosła 31.8°C (pierwszy dzień) oraz 32.1°C (dzień drugi). Na podstawie pomiarów temperatury powierzchni w tych samych warunkach zewnętrznych (miejsce, pełne nasłonecznienie, brak wiatru i zacienienia przez cały dzień) wykazano, iż mieszanka na bazie asfaltu zwykłego (35/50 WMA - A) szybciej ulega nagrzananiu od tej z asfaltem wysokomodyfikowanym. Różnica zarejestrowanej szczytowej temperatury wynosiła 4.2°C. Analizując krzywe pomiaru A i D, stwierdzono, iż są one do siebie podobne – brak istotnych różnic. Obie przypominały sinusoidę. Zaobserwowano również, iż okres, w którym temperatura utrzymywała się powyżej 60.0°C wynosił 4.0 h podczas pierwszego dnia i 3.0 h drugiego – mieszanka A. D podobnie jednak z nieznacznie niższą temperaturą 57.5°C. Na podstawie otrzymanych rezultatów stwierdzono, iż krzywą przedstawiającą zmianę temperatury w czasie można z powodzeniem wykorzystać do ustalania ramy temperaturowej związanej z badaniami nad regeneracją w laboratorium.

W sposób jednoczesny przeprowadzono pomiar w przygotowanej konstrukcji na różnym poziomie zagłębienia czujników. z badań ustalono, iż na głębokości 31.5 cm temperatura osiągnęła szczytową wartość równą 43.5°C (pierwszy dzień) oraz 44.1°C (dzień drugi). Analizując wykresy odnotowano, iż pomiędzy szczytową temperaturą powierzchni, a tą na głębokości 31.5cm występuje rozsuniecie czasowe wykresów, które wynosiło około 4.0 h (pierwszy dzień) oraz 3.5 h (dzień drugi). Ponadto zauważono, iż wewnątrz konstrukcji po nagrzananiu (osiągnięcie szczytowej temperatury na powierzchni), temperatura jest niższa jednak dłużej utrzymuje się w stosunku do powierzchni. Ponadto krzywa jest spłaszczona – mniejsza prędkość zmian. Stwierdzono, iż pozyskane dane są istotne i pozwalają określić warunki badania regeneracji mieszanek w laboratorium. Dane uwzględniono w rozważaniach poświęconych zjawisku regeneracji.

Następnie w rozprawie omówiono temat regeneracji i jej wpływu na trwałość zmęczeniową (z dodatkowym uwzględnieniem oddziaływania wody i mrozu oraz soli drogowej) mieszanek A – D. Rozważania podzielono na 5 podtematów:

1. ustalenie założeń badawczych,
2. przyjęcie sposobu oceny regeneracji w MMA,
3. analizy regeneracji wywołanej: okresem odpoczynku lub/i wysoka temperaturą,

4. analizy podgrzania (okres odpoczynku + podgrzanie) na trwałość zmęczeniową mieszanek,
5. analizy wykresu: zmian modułu sztywności od liczby cykli wybranej mieszanki - analiza makroskopowa materiału omawianych przypadków.

Na podstawie uzyskanych pomiarów, danych meteorologicznych (najwyższych rejestrowanych temperatur), prognoz i opinii synoptyków w zakresie globalnego ocieplenia (przyrostowego trendu temperatury dla okresów letnich) przyjęto skrajną temperaturę powietrza w cieniu (39.0°C) poprzedzoną serią ciepłych dni, która wystąpi w okresie najbliższych 30 lat w Polsce. Ustalono również warunki zewnętrzne (brak zacielenia i wiatru, pełne nasłonecznienie) towarzyszące upalnym dniom. Uwzględniając skrajną temperaturę, eksperymentalne dane pomiarowe oraz stosując liniową proporcję wyznaczono jej wartość wewnątrz konstrukcji na głębokości 31.5cm. Wyniosła ona po zaokrągleniu 55.0 °C. Następnie przedstawiono założenia, autorską metodykę badań i opracowania wyników poświęconych regeneracji w laboratorium, korespondującą warunkami in-situ w nawierzchni. Przyjęto, iż regeneracja w założonych warunkach wyraża kumulację oddziaływań ciepłych dni lata w założonym okresie lub jest tożsama z efektem wystąpienia jednego skrajnie upalnego dnia poprzedzonego ciepłymi dniami. Do wywołania regeneracji z udziałem wysokiej temperatury zaproponowano ogrzanie termiczne w komorze klimatycznej uwzględniającej jednoczesny okres odpoczynku, który wystąpi podczas kondycjonowania materiału.

W ramach przeprowadzonych badań mieszanek A-D do oceny wpływu regeneracji na zmiany wartości modułu i trwałość zmęczeniową opracowano trzy wskaźniki regeneracji wyrażające procentowe zmiany: 1 - modułu sztywności, 2 – przyrostu liczby cykli ustalanych względem kryterium spadku początkowej wartości zregenerowanego modułu o 50% ($E_{0\ 50\% H}^*$) oraz 3 – przyrostu liczby cykli dla kryterium autora- $E_{k(1)H}^*$ (do momentu spadku zregenerowanej wartości modułu do poziomu wartości wynikającego z końca badania pierwszego). Wprowadzone kryterium autora zostało szczegółowo przedstawione i zbadane (kolejne rozdziały rozprawy). Podkreślono, iż znajduje ono zastosowanie do badań zmęczeniowych poświęconych regeneracji umożliwiając poprawne ustalenie punktu zniszczenia zregenerowanego materiału.

Po określeniu sposobu oceny regeneracji przeprowadzono analizę trzech kombinacji czynników regenerujących MMA A-D na wybranym poziomie zawartości asfaltu, zestawu referencyjnego (tylko czynnik mechaniczny). Należały do nich:

1. zmęczenie - zmęczenie (brak lub bardzo mały okres odpoczynku) – skrótowo **zm-zm**,
2. zmęczenie – okres odpoczynku – zmęczenie (długi okres odpoczynku) – skrótowo **odp**,
3. zmęczenie – wygrzewanie (wygrzewanie + okres odpoczynku) – zmęczenie – skrótowo **wygrz+odp**.

Podkreślono, iż materiał badawczy nie ulegał „leżakowaniu” pomiędzy pierwszym a drugim badaniem zmęczeniowym. Badania były wykonywane jedno po drugim.

W pierwszej kolejności oceniono dwa kryteria zmęczeniowe zastosowane do drugiego badania zmęczeniowego – autorskie $E_{k(1)H}^*$ oraz $E_{0\ 50\% H}^*$. Na podstawie otrzymanych rezultatów wykazano, iż kryterium $E_{0\ 50\% H}^*$ doprowadza do zawyżenia trwałości względem autorskiego w szczególności nawet do 6.12% - przypadki regeneracji zm-zm i odp. Dla wygrz+odp wyniki przyrostu trwałości zbliżają się do siebie. Trend jest podobny dla wszystkich badanych MMA niezależnie od rodzaju zawartego asfaltu. Ponadto w przypadku kryterium $E_{0\ 50\% H}^*$ wartość zregenerowanego modułu gwałtownie spadała do wartości wynikającej z końca pierwszego badania zmęczeniowego, a następnie ostatecznie osiągała bardzo niskie jego wartości. Wykazano w ten sposób, iż, spadek wartości modułu poniżej poziomu

wynikającego z pierwszego badania zmęczeniowego doprowadza do większej degradacji materiału niż to wynika z powszechnie przyjętych standardów (badania LCPC, spadek wartości o 50% dla materiału bez historii obciążenia). Na podstawie analizy porównawczej wyników badań zmęczeniowych trzech czynników wywołujących regenerację stwierdzono, iż kryterium autora dokładniej opisuje właściwy punkt zniszczenia. Pozwala ono skuteczniej ustalić poziom regeneracji materiału dla dowolnego ocenianego sposobu. Ponadto, podkreślono, iż autorskie kryterium koresponduje z przyjętym punktem zniszczenia określonym dla pierwszego badania zmęczeniowego. Kryterium autora zastosowano do dalszych analiz zjawiska regeneracji.

Następnie zestawiono ze sobą trzy kombinacje wdrażania healingu. Udowodniono, iż w przypadku zastosowania okresu odpoczynku (krótkiego lub długiego) regeneracja zachodzi, wartość modułu sztywności wzrasta (nawet o 36%), lecz efekt przyrostu trwałości zmęczeniowej jest pomijalnie mały (max. 0.24%). w przypadku wygrzewania połączonego z okresem odpoczynku mieszanki wykazały istotną regenerację objawiającą się niemal pełnym przyrostem wartości modułu oraz istotnym – wynoszącym nawet do 52% przyrostem trwałości zmęczeniowej. Ponadto ustalono, iż regeneracja wartości modułu oraz trwałości w cyklach jest zależna od rodzaju zastosowanego asfaltu. Badania wykazały, iż mieszanki na bazie polimeroasfaltów charakteryzują się nawet 3.89 razy niższą zdolnością regeneracji (trwałość zmęczeniowa) względem zwykłych. Stwierdzono, iż jest to wpływ modyfikacji matrycy asfaltowej polimerem SBS, którego wzrost ilości w matrycy podnosi temperaturę mięknięcia. Skutkiem jest spadek zdolności regeneracji mieszanek ustalonych w warunkach temperaturowych. Na podstawie przeprowadzonych analiz do rozważań nad regeneracją z uwzględnieniem oddziaływań środowiskowych (woda i mróz, sól drogowa) przyjęto trzeci przypadek kondycjonowania próbek - (zmęczenie – wygrzewanie (wygrzewanie + okres odpoczynku) – zmęczenie).

Badania healingowe przeprowadzono dla wszystkich uprzednio męczonych próbek – uwzględniając poziomy zawartości lepiszcza oraz oddziaływania zewnętrzne – woda i mróz oraz sól drogowa. Na podstawie badań ustalono wpływ regeneracji na moduł sztywności oraz trwałość zmęczeniową stosując autorskie wskaźniki HI określające zdolność mieszanki do healingu.

Na podstawie wyników zestawu referencyjnego (tylko oddziaływanie mechaniczne), stwierdzono, iż mieszanki A - D wykazały zróżnicowaną zdolność regeneracji (wskaźnik $HI_{E_0^*}$) wyrażoną przez przyrost modułu sztywności. Zauważono, iż jest ona zależna od zawartości i rodzaju lepiszcza zastosowanego w materiale oraz oddziaływania zewnętrznego.

Spośród zbadanych MMA najlepiej wypada mieszanka D i C na bazie asfaltów modyfikowanych. Rezultaty są do siebie zbliżone. Wartości wskaźników tych mieszanek są największe i cechują się małymi fluktuacjami przy obniżaniu poziomu zawartości lepiszcza wyrażonym przez K – (np. D – $K = 2.95$, 99.55%, $K = 2.80$, 94.90%, $K = 2.65$, 77.40%). w przypadku mieszanek A i B na bazie asfaltów zwykłych wartości wskaźnika są znacznie mniejsze od C i D (poza poziomem $K = 2.95$). Znaczące rozbieżności dostrzeżono na najniższym rozpatrywanym poziomie $K = 2.65$, dla którego zdolność regeneracji modułu wynosi: B około 68.96% i A około 56.96%. w pracy wykazano, iż modyfikacja matrycy polimerem SBS znacząco podwyższa zdolność regeneracji mieszanki (moduł sztywności).

Oceniono również zdolność regeneracji mieszanek A – D ze względu na trwałość zmęczeniową - wskaźnik $HI_{E_k^*(1)H}$). Stwierdzono, iż największy przyrost liczby cykli do osiągnięcia kryterium zmęczeniowego drugiego badania wykazała mieszanka A i wynosił ona 52.28%! Podobnie zachowała się mieszanka B – do 52.23%. w przypadku mieszanek C i D (na bazie asfaltów modyfikowanych i wysokomodyfikowanych) zdolność regeneracji wyniosła kolejno: 18.50% oraz 13.43%. Zauważono, iż zwiększanie stopnia modyfikacji matrycy asfaltowej polimerem SBS znacząco (nawet do 4 razy!) pogarsza zdolność regeneracji ze względu na trwałość zmęczeniową. w rozprawie wskazano, iż jest to efekt podwyższonej

temperatury mięknięcia asfaltu uzyskanej poprzez zmianę jego składu – przy temperaturze ogrzania 55°C mieszanka D z asfaltem 25/55-80 HIMA, którego temperatura mięknięcia wynosi 80°C nie ma możliwości makroskopowego upłynnienia się. Regeneracja zachodzi jedynie na poziomie mikrostruktury w otoczeniu powstałych mikrouszkodzeń. Obserwacje udowodniono rezultatem mieszanki C, cechującej się mniejszym poziomem zmodyfikowanej matrycy (temperatura mięknięcia 60°C), której zdolność jest o ok. 37% (C2 vs D2) większa niż D. w przypadku mieszanek A i B temperatura mięknięcia jest jeszcze niższa. Wynosi ona 50-58°C, dlatego też zaobserwowany przyrost trwałości jest większy.

W rozprawie przeanalizowano znaczący wpływ oddziaływania wody i mrozu oraz soli drogowej na spadek zdolności regeneracji mieszanek A - D wyrażony przez $HI_{E_0}^*$ (zmiany modułu). Zaobserwowano, iż im asfaltu w mieszance jest mniej tym wpływ oddziaływania wody i mrozu lub soli drogowej jest większy. Spadek wartości wskaźnika wynosi dochodzi nawet do 40%!

Na podstawie wyników wykazano również, iż modyfikacja matrycy polimerem SBS mieszanek C i D skutecznie zabezpiecza mieszankę przed osłabieniem zdolności regeneracji w wyniku oddziaływania wody i mrozu lub soli drogowej – nawet do 2-óch razy – mieszanka A4 względem D4 (sól drogowa, $K = 2.65$).

Zestawiając ze sobą mieszanki w technologiach WMA (A) i HMA (B) większą odporność na spadek zdolności regeneracji wyrażonej przez $HI_{E_0}^*$ (zmiany modułu) wykazuje mieszanka wykonana w technologii HMA. Niezależnie od oddziaływań mieszanka B na gorąco wypadła do 32% lepiej.

Przeanalizowano również zdolność regeneracji mieszanek A – D ze względu na trwałość w przypadku oddziaływań środowiskowych. w pracy wykazano, iż wpływ oddziaływania wody i mrozu lub soli drogowej obniża zdolność regeneracji wyrażonej wskaźnikiem $HI_{E_k(1)H}^*$ od 4.60% (C2, woda i mróz) aż do 79.97%! (A2, sól drogowa). w przypadku MMA na bazie asfaltu zwykłego A i B spadek trwałości jest bardzo wysoki (wynosi od ok. 1.32 do ok. 5 razy). Zaobserwowano, iż dla mieszanek C i D jest on zdecydowanie mniejszy (wynosi od 1.04 do 1.79 razu). Na podstawie pozyskanych wyników, w rozprawie wykazano, iż pomimo negatywnych trendów (niski poziom wskaźnika regeneracji) dla mieszanek C i D, modyfikacja matrycy asfaltowej polimerem SBS zapewnia skuteczną odporność na oddziaływanie wody i mrozu lub soli drogowej – niski poziom regeneracji (przyrost trwałości), ale również niska wrażliwość na spadek zdolności healingu czynnikami środowiskowymi.

W przypadku mieszanek WMA (A) i HMA (B). Większą odporność na spadek zdolności regeneracji $HI_{E_k(1)H}^*$ (trwałość zmęczeniowa) wywołanej wodą i mrozem lub solą drogową wykazała mieszanka wykonana w technologii HMA. Niezależnie od czynników technologia na gorąco wypadła nawet do 2-razy lepiej.

Na podstawie otrzymanych rezultatów opisano sposób w jaki można by uwzględnić regenerację i inne oddziaływania środowiskowe w trwałości zmęczeniowej mieszanek. Zauważono, iż suma liczby cykli pierwszego i drugiego badania zmęczeniowego określającego ten sam punkt zniszczenia pozwala z optymalizować receptę ze względu na zawartość lepiszcza (konkretne metody opisano w kolejnych podrozdziałach).

W badaniach healingowych przeanalizowano również korelacje pomiędzy wskaźnikiem regeneracji $HI_{E_0}^*$ (moduł sztywności), a $HI_{E_k(1)H}^*$ (trwałość zmęczeniowa). Ustalono, iż mieszanki A - D opisane liniowym modelem regresji charakteryzują się bardzo dobrym dopasowaniem $R^2 \gg 0.92$ niezależnie od rozpatrywanego czynnika (czysto mechaniczny, woda i mróz lub sól drogowa). Na podstawie sporządzonych modeli wykazano powiązanie pomiędzy regeneracją modułu sztywności, a przyrostem trwałości zmęczeniowej w cyklach. Analizy wykazały, iż zdolność regeneracji materiału ustalana z pomocą wskaźników może być

wzajemnie przeliczana (znając kąt nachylenia modelu) bez względu na rodzaj oddziaływań. Podkreślono, iż wykorzystanie korelacji znajduje zastosowanie w pracach optymalizacyjnych (operowanie zawartością lepiszcza) pozwalając prognozować zmiany np. trwałości mieszanek na innych jego poziomach (ten sam skład ziarnowy i założenia technologiczne).

Zanotowane dotąd obserwacje pozwoliły opracować tabelę (Tab. 40) opisującą trendy i wrażliwość MMA A - D na oddziaływanie czynników środowiskowych oraz spadku zawartości lepiszcza. Wewnątrz tabeli przyjęto 3 stopnie wrażliwości na oddziaływanie czynnika: duża, średnia, mała oraz 2 trendy zmian odnoszące się do opisywanego parametru: przyrost, spadek.

Tab. 40: Ogólne zachowania mieszanek poddanych różnemu oddziaływaniu

Technologia	Mieszanka	Czynnik	Moduł sztywności	Kąt przesunięcia fazowego	Trwałość zmęczenia	Zdolność regeneracji
WMA	A (35/50 WMA)	woda i mróz	średnia, spadek	duża, przyrost	duża, spadek	duża, spadek
		sól drogowa	średnia, spadek	średnia, przyrost	duża, spadek	duża, spadek
		spadek zawartości asfaltu	mała, spadek	średnia, spadek	duża, spadek	duża, spadek
HMA	B (35/50)	woda i mróz	średnia, spadek	duża, przyrost	duża, spadek	duża, spadek
		sól drogowa	mała, spadek	średnia, przyrost	mała, spadek	duża, spadek
		spadek zawartości asfaltu	mała, spadek	średnia, spadek	duża, spadek	duża, spadek
	C (25/55-60)	woda i mróz	średnia, spadek	średnia, spadek	średnia, spadek	średnia, spadek
		sól drogowa	mała, spadek	mała, spadek	średnia, spadek	średnia, spadek
		spadek zawartości asfaltu	mała, spadek	mała, spadek	duża, spadek	średnia, spadek
	D (25/55-80 HIMA)	woda i mróz	mała, spadek	mała, spadek	mała, spadek	mała, spadek
		sól drogowa	mała, spadek	mała, spadek	mała, spadek	mała, spadek
		spadek zawartości asfaltu	mała, spadek	mała, spadek	średnia, spadek	mała, spadek

W ramach badań nad zjawiskiem regeneracji i wpływem jej oraz oddziaływań środowiskowych na MMA przeprowadzono analizy zmiany wartości modułu sztywności od liczby cykli wybranej mieszanki – B. Zasygnalizowano, iż w pozostałych przypadkach obserwacje były analogiczne. Rozważono sposób wdrażania regeneracji (**zm-zm, odp, wygrz+odp**) oraz wpływ oddziaływania środowiskowego (woda i mróz, sól drogowa) i ich kumulacji (**wim, sd, wim+sd**) na mieszankę.

W przypadku różnych metod aplikacji regeneracji potwierdzono obserwacje opisane wcześniej. Ponadto wykazano, iż prędkość zmian wartości modułu sztywności (kąt nachylenia odcinka prostoliniowego) jest najniższa po zastosowaniu wygrzewania z okresem odpoczynku. w pozostałych przypadkach kąt jest bardzo duży – krzywa przypomina linię pionową. Stwierdzono również, iż regeneracja wywołana wygrzaniem częściowo odtwarza makrostrukturę zdegradowanej mieszanki – kąt liniowego odcinka w badaniu drugim jest 2.5 razy większy niż pierwszym.

Na podstawie analizy wykresu mieszanki poddanej oddziaływaniom środowiskowym zaobserwowano, iż, czynniki: woda i mróz, sól drogowa oraz ich kombinacja (wim+sd) negatywnie wpływają na zbadaną mieszankę. Dostrzega się istotną degradację materiału.

Ponadto stwierdzono, iż krzywe ilustrujące zmianę modułu sztywności pierwszego badania zmęczeniowego są zróżnicowane, a kształt zależy od wpływu działania czynników na strukturę mieszanki. Stwierdzono również, iż oddziaływanie czynników środowiskowych przyspiesza degradację mechaniczną materiału (zmęczenie) - przyrost prędkości zmian (kąty nachylenia) względem zestawu ref wyniósł odpowiednio: wim – 59%, sd – 22%, wim+sd – 78%. Udowodniono, że pomiędzy solą drogową, a lepiszczem mieszanki dochodzi do reakcji, która skutkuje pogorszeniem parametrów jakościowych materiału (asfalt pogarsza swoje właściwości przez połączenie z kryształkami soli). Stwierdzono, że woda i mróz spowodowała większą degradację materiału i zmiany strukturalne niż sól drogowa. Ponadto oddziaływanie wody i mrozu osłabia materiał, powodując powstanie spękań w materiale. Ich rozwój można z powodzeniem śledzić na wykresie zmian wartości modułu – widoczne są przełamania liniowego odcinka spadku wartości modułu sztywności. w przypadku wody i mrozu stan spękań po przełamaniu prostej rozwijał się o 27% szybciej, natomiast dla oddziaływań łączonych aż o 35%. Analizując cały wykres (1 i 2 badanie zmęczeniowe) wykazano, iż regeneracja zachodzi i wywiera istotny wpływ na zbadane mieszanki niezależnie od rozpatrywanego oddziaływania środowiskowego. We wszystkich przypadkach wywołuje pozytywne zmiany w strukturze mieszanki skutecznie zamykając część powstałych uszkodzeń (stan zdegradowania ulega cofnięciu) wyrażonych poprzez: przyrost modułu sztywności i trwałości zmęczeniowej w cyklach. Ponadto wykazano, iż zdolność regeneracji mieszanki jest zależna od rozważanego oddziaływania środowiskowego. Degradacja wywołana wodą i mrozem, solą drogową oraz połączeniem tych dwóch powoduje przyrost uszkodzeń wewnątrz materiału, który nie może zostać zregenerowany w przyjętych warunkach kondycjonowania. Największe osłabienie zdolności regeneracji mieszanki wyrażonej jako procentowy stosunek przyrostu trwałości zaobserwowano dla stanu złożonego (wim+sd) – aż o 91% względem próbki ref. Zaobserwowano również, iż oddziaływania środowiskowe znacząco obniżają trwałość zmęczeniową materiału, jednak wpływ degradacji może zostać skutecznie zrównoważony przez uwzględnienie zjawiska regeneracji

Z przeprowadzonych analiz wykresów stwierdzono, iż uwzględnienie czynników środowiskowych połączonych ze zjawiskiem regeneracji pozwala dokładniej szacować trwałość zmęczeniową materiału, natomiast obserwacje zmian modułu sztywności od trwałości w cyklach umożliwiają śledzić zmiany zachodzące w mieszance na poziomie strukturalnym.

Pozyskane rezultaty badań zmęczeniowych umożliwiły opracowanie przez autora rozprawy dwóch autorskich metod uwzględniania oddziaływań środowiskowych (woda i mróz, sól drogowa) oraz regeneracji w trwałości zmęczeniowej

Pierwsza z nich nazwana autorsko – „iteracyjna Mączki” pozwala określić trwałość mieszanki jako sumę cykli wynikającą z dwóch badań zmęczeniowych (przed i po regeneracji), dla których punkt zniszczenia jest spójny. Znajduje ona szczególne zastosowanie w przypadku optymalizacji recept MMA.

Druga nazwana jako „wskaźnikowa Mączki”. Metoda polega na wyznaczeniu wskaźników procentowych - degradacji (*DI*), regeneracji (*HI*), wypadkowy (*RI*) pozwalających ocenić wpływ danego oddziaływania na mieszankę ze względu na trwałość. Ponadto autor opracował formuły, umożliwiające obliczanie wskaźników i trwałości zmęczeniowej stanu skumulowanego (woda i mróz + sól drogowa + regeneracja) na podstawie wyników pojedynczych oddziaływań. Wskazano, iż kombinacja oddziaływań wpływa na konstrukcję nawierzchni podczas całego roku, zatem jej analizy są zasadne. Wykazano skuteczność opracowanych formuł w stosunku do wykonanych niezależnych badań. Podkreślono, iż znajdują one zastosowanie do wszystkich zbadanych mieszanek na bazie asfaltów zwykłych (w technologii na gorąco/ciepło) i modyfikowanych/wysokomodyfikowanych. w rozdziale wyszczególniono, iż metoda

wskaźnikowa znajduje również zastosowanie do analizy trwałości konstrukcji z użyciem kryterium – co jest przedmiotem kolejnych rozważań zamieszczonych w rozprawie.

W rozprawie przeprowadzono również analizę wyników mieszanek A -D wszystkich kombinacji oddziaływań w tym skumulowanych korzystając z opracowanej metody wskaźnikowej. Na podstawie wyników stwierdzono, iż największy procentowy przyrost trwałości zmęczeniowej odnotowano dla mieszanek tylko regenerowanych (bez oddziaływań środowiskowych). Wyniósł on aż 52.28% - Mieszanka A2 na bazie asfaltu zwykłego w technologii na ciepło. Udowodniono, iż regeneracja mieszanek zależy od rodzaju, zawartości lepiszcza (więcej = większa) oraz rozpatrywanego oddziaływania. Ponadto wykazano, że oddziaływania środowiskowe (woda i mróz, sól drogowa, ich kumulacja) ograniczają zdolność regeneracji MMA. Przedstawiono, iż wpływ degradacji (na trwałość) w niektórych przypadkach jest na tyle wysoki, iż regeneracja nie jest w stanie go skompensować.

Spośród analizowanych mieszanek najwyższą odpornością na degradacje wywołaną czynnikiem mechanicznym i środowiskowym charakteryzowały się C i D – na bazie asfaltów modyfikowanych. w większości przypadków wpływ wypadkowy był dodatni – przyrost trwałości. Stwierdzono, iż modyfikacja polimerem SBS skutecznie ochrania MMA przed negatywnym oddziaływaniem wody i mrozu, soli drogowej i ich kumulacji nie ograniczając jednocześnie pozytywnego wpływu regeneracji na trwałość.

Udowodniono również, iż kumulacja negatywnych oddziaływań – woda i mróz + sól drogowa najbardziej degradowuje mieszankę spośród wszystkich analizowanych przypadków. Trwałość zmęczeniowa mieszanek z uwzględnioną regeneracją może spaść nawet o 44.81% względem referencyjnej! Najbardziej podatnymi MMA były te na bazie asfaltów zwykłych A i B. Zaobserwowano, iż regres trwałości zmęczeniowej w stosunku do powszechnego podejścia przekracza waha się w najlepszym przypadku 17%, a najgorszym 44.81%. Stwierdzono, iż mieszanki na bazie asfaltów zwykłych (A – WMA i B - HMA) jako materiał nie nadają się do warstwy wiążącej lub nośnej (podbudowy) konstrukcji nawierzchni w inwestycjach szczególnie narażonych na oddziaływanie wody i mrozu oraz soli drogowej (kumulacji). Znakomitą alternatywą są te na bazie asfaltów modyfikowanych a w szczególności wysokomodyfikowane charakteryzujące się wysoką trwałością i odpornością na czynniki zewnętrzne.

W rozważaniach zaproponowano również uwzględnienie wskaźników wypadkowych *RI* mieszanek A-D w katalogowym, projektowym okresie eksploatacyjnym konstrukcji [79]. Sposób pozwolił wykazać i uwzględnić wpływ analizowanych oddziaływań i regeneracji na trwałość całej konstrukcji względem obecnego podejścia. Wykazano, iż w zależności od wartości wskaźnika wypadkowego okres może być wydłużony lub skrócony – np. dla mieszanki na ciepło A (najniższa rozpatrywana zawartość asfaltu), udowodniono, iż w okresie projektowym nie doszacowano jej trwałość o 9 lat (20 lat – katalogowo, 11 lat – po uwzględnieniu oddziaływań). Są to zmiany istotne. Stwierdzono również, iż proponowany sposób zawiera informację, o odporności mieszanki na oddziaływania jednak nie uwzględnia rodzaju stosowanego lepiszcza ze względu na trwałość konstrukcji (czynnik mechaniczny – np. asfalty modyfikowane pozwalają przenieść mieszankę i konstrukcji zdecydowanie więcej powtarzalnych obciążeń w stosunku do zwykłych). Jest on zatem skutecznym uproszczeniem biorącym pod uwagę czynniki środowiskowe i healing. Kompletnie analizy trwałości konstrukcji związane z uwzględnieniem oddziaływań środowiskowych, regeneracji i rodzaju asfaltu wykonanych w kolejnych podrozdziałach rozprawy wykorzystując kryterium zmęczeniowe oraz przeprowadzone modelowanie w środowisku Abaqus (metoda elementów skończonych).

Na podstawie przeprowadzonych analiz bloku zaawansowanego stwierdzono, iż uwzględnienie oddziaływań środowiskowych (woda i mróz, sól drogowa, ich kumulacja) i regeneracji umożliwia dokładniej szacować trwałość zmęczeniową mieszanek, oraz

prognozować jej zmiany (w stosunku do powszechnego podejścia). Wykorzystanie autorskich metod, pozwala łatwiej dobierać asfalt do mieszanek ze względu na przeznaczenie MMA (klasa drogi, warunki środowiskowe w miejscu usytuowania) uwzględniając oddziaływania środowiskowe. Ponadto możliwe jest wdrożenie wydajniejszej optymalizacji składu (zawartość lepiszcza) w projekcie recepty. Za pomocą opracowanej metody wykorzystującej wskaźnik wypadkowy *RI* można z powodzeniem podejmować próby wyznaczenia projektowego okresu eksploatacyjnego konstrukcji uwzględniającego omówione wpływy środowiskowe i regenerację w sposób jednoczesny.

Wszystkie wykonane działania umożliwiły autorowi osiągnąć główny cel rozprawy związany z uwzględnieniem zmęczenia i regeneracji w trwałości MMA. Poruszane zagadnienie zostało wzbogacone o oddziaływania środowiskowe występujące w stanie in-situ. Ponadto podkreśla się, iż rozważania pozwoliły omówić w temat w sposób kompleksowy – odnosił się on zarówno do mieszanek na bazie asfaltów zwykłych, modyfikowanych jak również tych różniących się technologią wykonania (na ciepło/gorąco).

6. Regeneracja w kryterium zmęczeniowym konstrukcji nawierzchni

Obecnie stosowane kryteria zmęczeniowe wykorzystywane w mechaniczno-empirycznym projektowaniu konstrukcji nawierzchni (podatnych i półsztywnych) uwzględniają jedynie oddziaływanie mechaniczne (od kół pojazdu), informacje o składzie mieszanki (zawartość asfaltu i wolnej przestrzeni) oraz jej parametry materiałowe. Jest to pewne uproszczenie. W rzeczywistości konstrukcja nawierzchni poddawana jest oddziaływaniu: negatywnemu woda i mróz, sól drogowa (głównie ich kumulacja) oraz pozytywnemu – regeneracji wywołanej wysoką temperaturą i okresem odpoczynku, podczas całego okresu jej eksploatacji. Pominięcie wspomnianych oddziaływań doprowadza do niedoszacowania lub przeszacowania trwałości zmęczeniowej konstrukcji. Ponadto wykorzystywane kryteria jak np. Instytut Asfaltowy lub AASHTO 2004 zostały skalibrowane pod mieszanki na bazie zwykłych asfaltów drogowych. Nie uwzględniono w nich do tej pory, coraz częściej stosowanych asfaltów modyfikowanych (i wysokomodyfikowanych) lub tych do wykonania MMA w innej technologii. To również prowadzi do znaczących rozbieżności w wymiarowaniu konstrukcji z użyciem kryteriów ze względu na jej trwałość [23, 113, 186].

W niniejszym rozdziale Autor wzbogacił rozważania rozprawy o dwa dodatkowe tematy rozszerzające zagadnienie trwałości zmęczeniowej odnosząc się do konstrukcji nawierzchni z wykorzystaniem wybranego kryterium, rezultatów badań i wykonanych analiz mieszanek A-D (AC 22 P, KR 5-7).

1. Analiza porównawcza dwóch konstrukcji na ruch KR 5 z zastosowaniem parametrów zbadanych mieszanek. Pierwsza o układzie **warstw zgodnych z katalogiem** (podatna, Typ B, KR 5). Druga nazwana jako „**łączona warstwa W+P**” związana z zastosowaniem tej samej mieszanki do dwóch warstw jednocześnie (podbudowa i wiążąca). Badania wykazały, iż zaprojektowane mieszanki mogą z powodzeniem zostać zastosowane również do warstwy wiążącej – nawiązanie do tematyki rozdziału 5.2. w rozważaniach zaproponowano sposób **uwzględnienia rodzaju asfaltu w kryterium** zmęczeniowym.
2. Analiza trwałości zmęczeniowej katalogowych konstrukcji nawierzchni (podatna, Typ B, KR 1-7) z **uwzględnieniem oddziaływań środowiskowych** (woda i mróz, sól drogowa), ich **kumulacji wim+sd (k)**, **regeneracji i rodzaju asfaltu** aplikowanego do mieszanki. Wykorzystano drugą metodę opisaną w podrozdziale 5.3.7 opartą na wynikach badań mieszanek A-D, która również może z powodzeniem zostać zastosowana do kryterium.

Do analiz zaaplikowano kryterium zmęczeniowe AASHTO 2004 [186] dla spękań zmęczeniowych dół-góra zarodkujących w podbudowie (największe odkształcenia rozciągające, warstwa nośna). Za domyślny próg zniszczenia konstrukcji przyjęto: wystąpienie 5% spękań aligatorowych pasa ruchu. Wartość wykorzystuje się m.in. do weryfikacji rozwiązań katalogowych [79, 113]. Formuły obliczeniowe kryterium przedstawiono w równaniach (38), (39), (40), (41), (42), (43).

$$N_f = D_{FC} \cdot 7.3557 \cdot 10^{-6} \cdot C \cdot k' \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{3.9492} \cdot \left(\frac{1}{E_0^*}\right)^{1.281}, \quad (38)$$

gdzie:

D_{FC} – szkoda zmęczeniowa uwzględniająca grubość warstw asfaltowych oraz założony % spękań aligatorowych [-],

N_f – liczba powtarzalnych obciążeń do wystąpienia spękań zmęczeniowych [pow. obc.],

C – współczynnik zależny od właściwości objętościowych MMA [-],

k' – współczynnik kalibracyjny, zależny od grubości warstw asfaltowych konstrukcji i rodzaju omawianych spękań (dół-góra) [-],

ε_t – odkształcenie rozciągające w krytycznym punkcie, przekroju pionowego nawierzchni [-],

E_0^* – moduł sztywności warstwy asfaltowej [MPa].

$$D_{FC} = \frac{1}{100} \cdot 10^{\ln\left(\frac{100}{FC}-1\right) \cdot \frac{1}{C_2'} + 2}, \quad (39)$$

gdzie:

D_{FC} – szkoda zmęczeniowa uwzględniająca grubość warstw asfaltowych oraz założony % spękań aligatorowych [-],

FC – założony % spękań aligatorowych [-],

C_2' - współczynnik kalibracyjny zależny od grubości warstw asfaltowych [-].

$$C_2' = -2.40874 - 39.748 \cdot \left(1 + \frac{h_{ac}}{2.54}\right)^{2.856}, \quad (40)$$

gdzie:

C_2' – współczynnik kalibracyjny zależny od grubości warstw asfaltowych [-],

h_{ac} – całkowita grubość wszystkich warstw asfaltowych konstrukcji nawierzchni [cm].

$$C = 10^M, \quad (41)$$

gdzie:

C – współczynnik zależny od właściwości objętościowych MMA [-],

M – współczynnik mieszanki [-].

$$M = 4.84 \cdot \left(\frac{V_b}{V_a + V_b} - 0.69\right), \quad (42)$$

gdzie:

M – współczynnik mieszanki [-],

V_a – zawartość wolnych przestrzeni [% objętościowo],

V_b – efektywna zawartość asfaltu [% objętościowo].

$$k' = \frac{1}{0.000398 + \frac{0.003602}{1 + e^{(11.02 - 1.374 \cdot h_{ac})}}}, \quad (43)$$

gdzie:

k' – współczynnik kalibracyjny, zależny od grubości warstw asfaltowych konstrukcji i spękań dół-góra [-],

h_{ac} – całkowita grubość wszystkich warstw asfaltowych konstrukcji nawierzchni [cm].

Celem przeprowadzenia analiz, w ramach rozprawy wykonano modelowanie wykorzystujące metodę elementów skończonych z użyciem specjalistycznego programu Abaqus. Pozwoliło ono ustalić wartość odkształcenia na spodzie warstwy podbudowy. Zaprojektowany model MES skalibrowano z rozwiązaniem analitycznym przeliczonym z użyciem programu Alize LCPC uwzględniając optymalny czas obliczeń komputerowych wynikający z zagęszczenia siatki elementów skończonych - dla 7 min pozyskano zadowalające rezultaty.

Do modelowania przyjęto ogólne założenia związane z: poziomem obciążenia (57.5 kN na koło – 115 kN na oś (obecny standard unijny)), kształtem i powierzchnią przyłożenia, szczepnością posilkując się danymi katalogowymi [79]. Przedstawia się je w Tab. 41. Ponadto, zastosowano model sprężysty półprzestrzeni warstwowej powszechnie stosowany do wymiarowania konstrukcji podatnych i półsztywnych.

Tab. 41: Ogólne założenia przyjęte do modelowania

	wartość
kształt obciążenia	koło
promień koła [m]	0.1368
powierzchnia kontaktowa [m ²]	0.0588
ciśnienie kontaktowe [kPa]	977.5
szczepność międzywarstwowa	pełna

6.1. Porównanie dwóch podatnych konstrukcji typu B na ruch KR 5

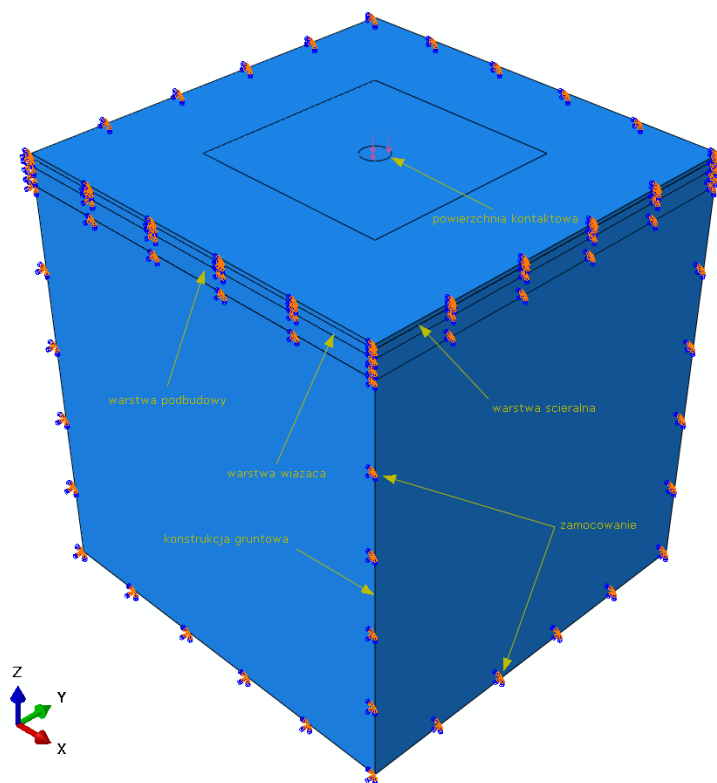
W tym podrozdziale przeanalizowano trwałość zmęczeniową dwóch konstrukcji podatnych (KR 5, typ B) różniących się układem warstw i mieszankami (A – D) przy niezmięnionej ich łącznej grubości. Założenia szczegółowe związane z parametrami materiałowymi wykorzystanymi w modelowaniu przedstawiono w Tab. 42. Za reprezentatywną powierzchnię modelu w płaszczyźnie X-Y przyjęto kwadrat o długości boku równym 4.0 m. Katalogowy układ warstw został przyjęty za odniesienie (ref).

Tab. 42: Parametry materiałowe zaaplikowane w modelowaniu

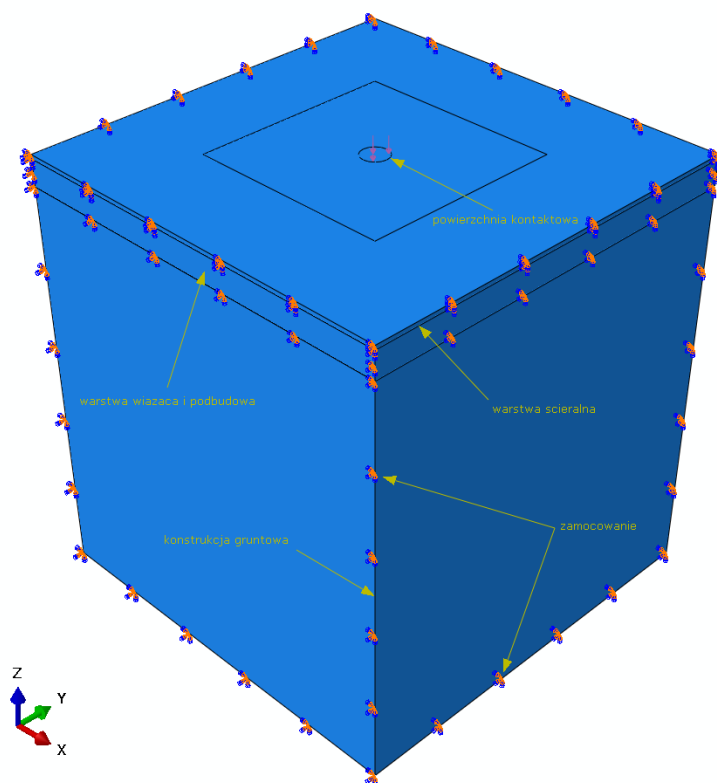
warstwa	podatna konstrukcja katalogowa KR 5, TYP B			warstwa	podatna konstrukcja "łączona warstwa W+P" KR 5, TYP B		
	grubość [m]	moduł sprężystości (sztywności dla MMA) [MPa]	współczynnik. poissona [-]		grubość [m]	moduł sprężystości (sztywności dla MMA) [MPa]	współczynnik. poissona [-]
ścieralna	0.04	8100	0.30	ścieralna	0.04	8100	0.30
wiążąca	0.08	11000	0.30	wiążąca + podbudowa	0.26 (ciągła warstwa z jednej mieszanki)	jak mieszanka A - D	0.30
podbudowa	0.18	jak mieszanka a - D	0.30				
grunt	4.00	120	0.35	grunt	4.00	120	0.35

Aby skutecznie porównać konstrukcje zachowując spójność uwzględnianych danych, do kryterium i analiz modelowych przyjęto wyniki badań zmęczeniowych mieszanek A – D przeprowadzonych dla poziomu obciążenia $200 \mu\epsilon$ w 10.0°C . Parametry materiałowe MMA na: warstwę ścieralną, wiążącą oraz podłoże gruntowe założono posiłkując się wartościami katalogowymi [79]. Zaznacza się również, iż poziom np. początkowego modułu sztywności (badanie zmęczeniowe) nie różnił się w sposób znaczący w stosunku do standardowych badań modułu wykonanych przed pierwszym badaniem zmęczeniowym na niższym poziomie obciążenia (typowym dla tego rodzaju testu) – $50 \mu\epsilon$.

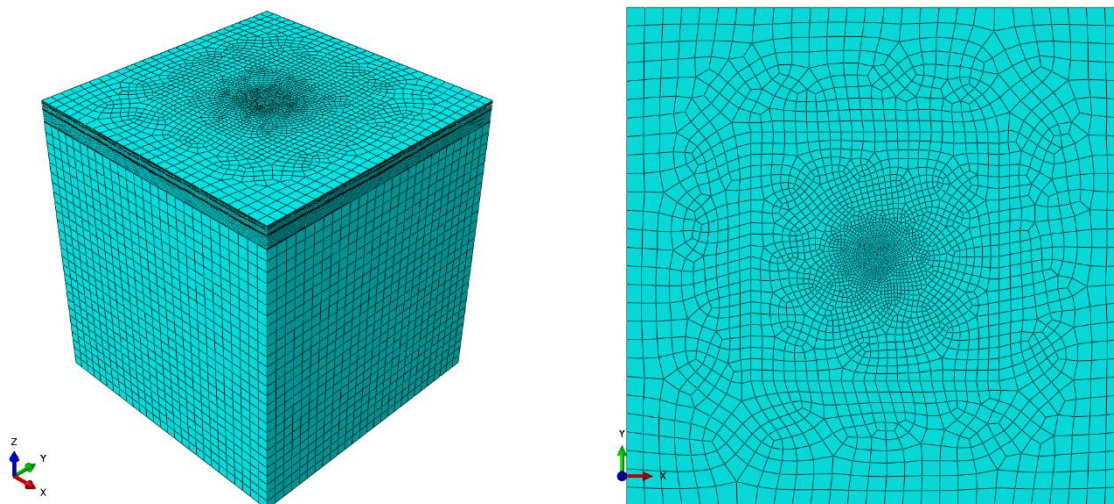
Układ warstwowy obydwu konstrukcji oraz siatkę elementów skończonych w programie Abaqus zaprezentowano na Rys. 114, Rys. 115, Rys. 116 i Rys. 117.



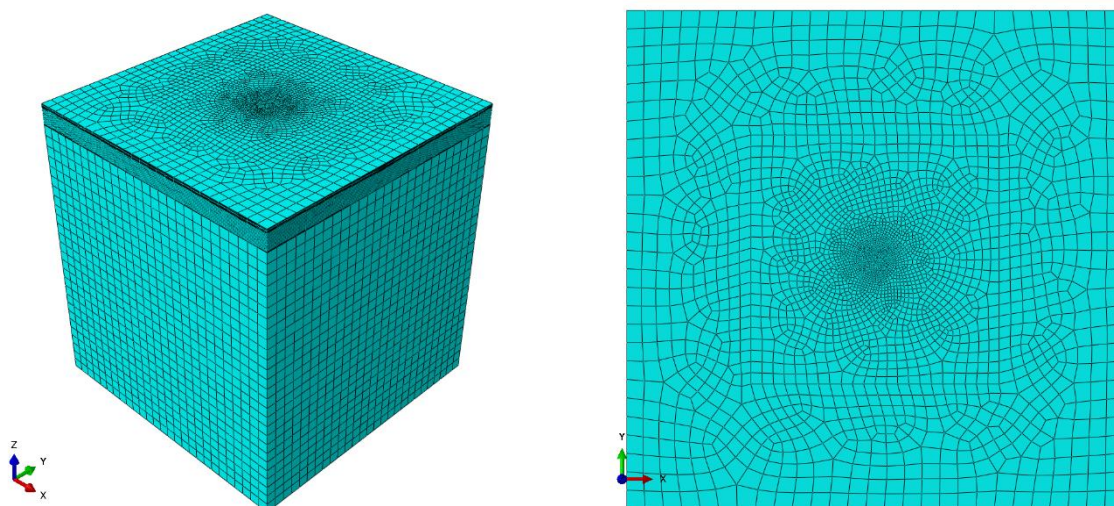
Rys. 114: Model typowej konstrukcji KR 5 (TYP B)



Rys. 115: Model konstrukcja „łączona warstwa W+P” KR 5 (TYP B)

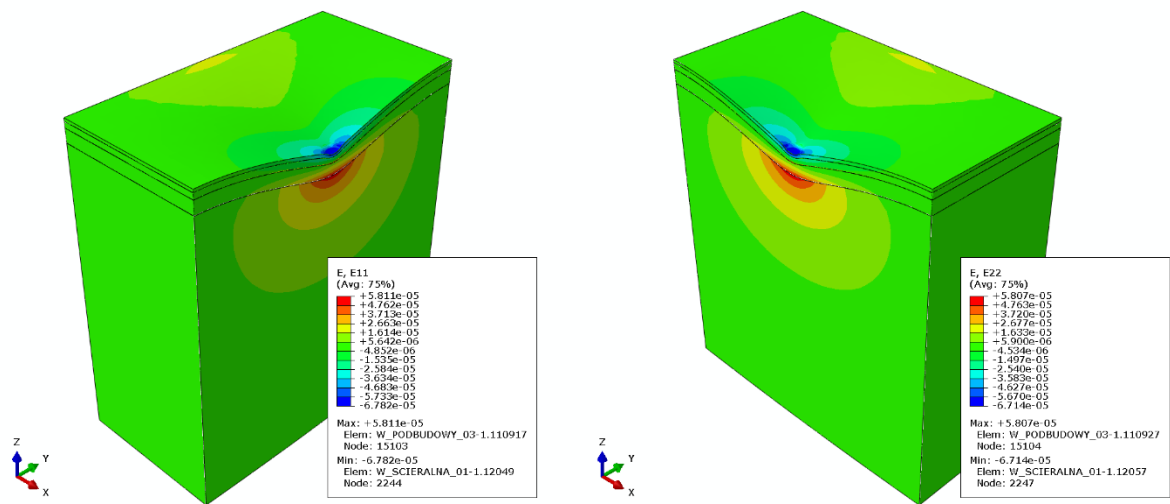


Rys. 116: Zagęszczenie siatki elementów skończonych - konstrukcja typowa KR 5 (TYP B)

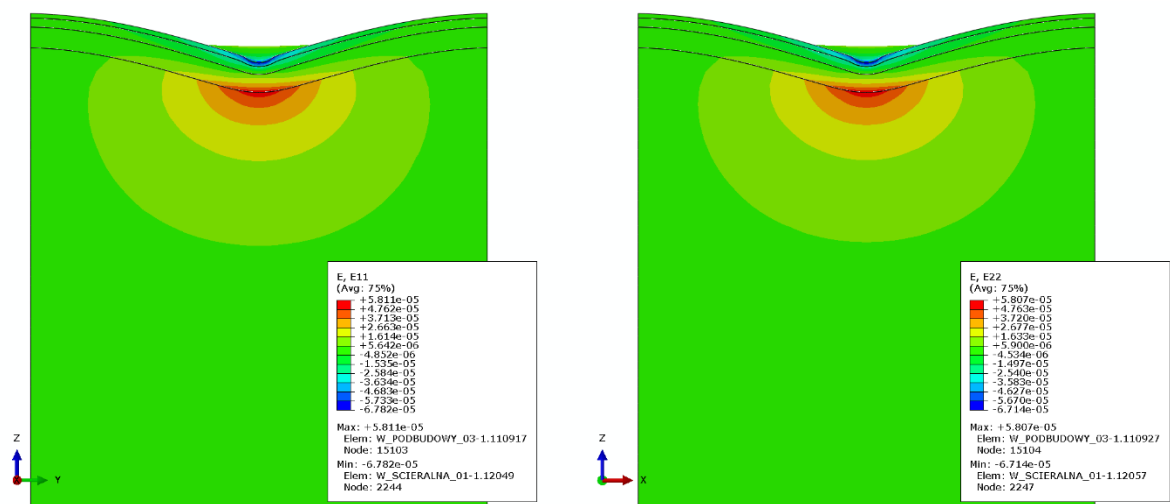


Rys. 117: Zagęszczenie siatki elementów skończonych - konstrukcja "łączona warstwa W+P" KR 5 (TYP B)

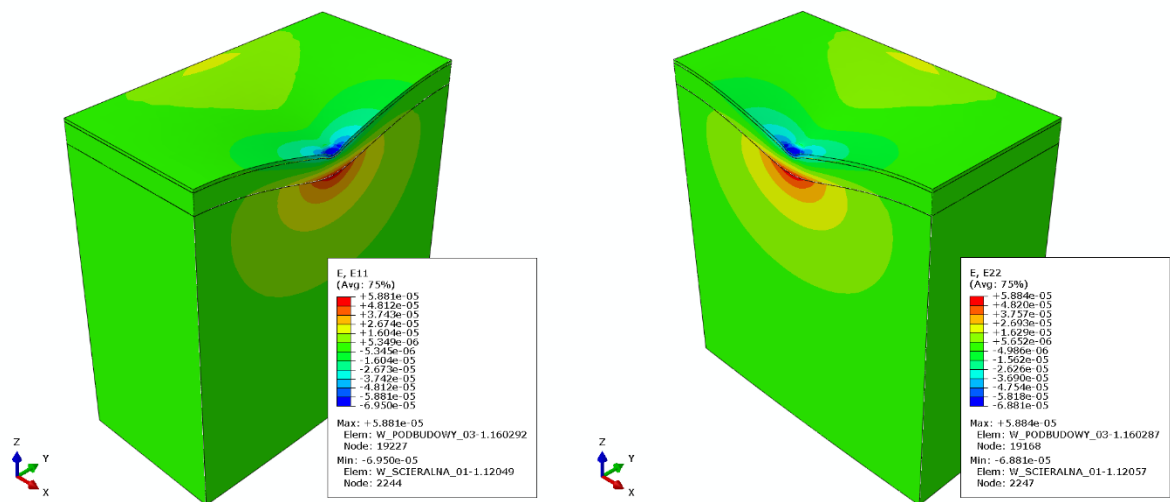
Na podstawie przeprowadzonych obliczeń modelowych (wszystkie mieszanki A - D na każdym poziomie zawartości asfaltu) ustalono ekstremalne wartości odkształceń poziomych ε_{11} i ε_{22} na spodzie warstw asfaltowych. Do obliczeń zastosowano wartość maksymalną (dla każdej mieszanki osobno). Informacje zaaplikowano bezpośrednio do kryterium AASHTO. Przykładowe mapy odkształceń dla wybranego modelu konstrukcji: typowej i uniwersalnej w układzie 3D i 2D przedstawiono na Rys. 118, Rys. 119, Rys. 120 i Rys. 121.



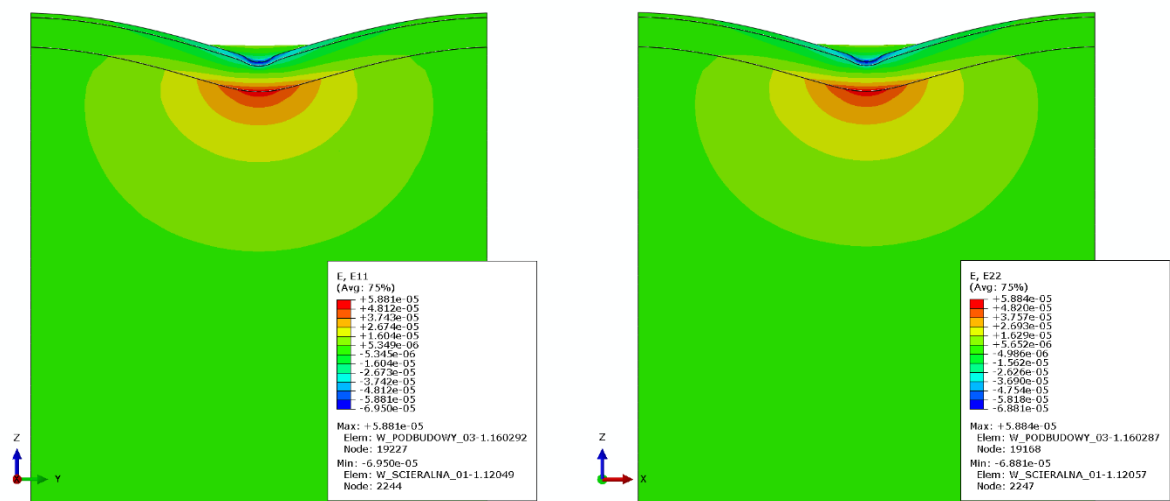
Rys. 118: Trójwymiarowa mapa poziomych odkształceń objętościowych poziomych typowej konstrukcji KR 5 (TYP B)



Rys. 119: Dwuwymiarowa mapa poziomych odkształceń objętościowych poziomych typowej konstrukcji KR 5 (TYP B)



Rys. 120: Trójwymiarowa mapa poziomych odkształceń objętościowych poziomych „łączona warstwa W+P” konstrukcji KR 5 (TYP B)



Rys. 121: Dwuwymiarowa mapa poziomych odkształceń objętościowych poziomych „łączona warstwa W+P” konstrukcji KR 5 (TYP B)

Przeprowadzone analizy zmęczeniowe mieszanek A-D wykazały, iż ich trwałość jest zróżnicowana. MMA na bazie asfaltów zwykłych (A - WMA, B - HMA) charakteryzowały się nawet **kilkukrotnie** mniejszą liczbą osiągniętych do zniszczenia cykli w stosunku do tych na bazie asfaltów modyfikowanych (C - HMA) i wysokomodyfikowanych (D - HMA). Wybrane kryterium AASHTO 2004, nie wprowadza zróżnicowania materiału ze względu na rodzaj lepiszcza (kalibracja na asfalty zwykłe). Powszechne podejście doprowadza zatem do niedoszacowania lub przeszacowania trwałości zmęczeniowej całej konstrukcji. Aby skutecznie **uwzględnić rodzaj asfaltu** w mieszance ze względu na trwałość zmęczeniową, zaproponowano wprowadzenie autorskiego **współczynnika kalibracyjnego „n”** wyznaczanego empirycznie. Wyraża on stosunek trwałości zmęczeniowej (tylko czynnik mechaniczny) uzyskanej w badaniu laboratoryjnym: mieszanki rozpatrywanej względem referencyjnej, za którą przyjęto B (na bazie asfaltu zwykłego 35/50). Autor rozprawy podkreśla, iż mieszanki muszą cechować się **identycznym składem ziarnowym oraz zawartością**

lepiszcza, tak aby rozbieżności trwałości laboratoryjnej wyrażonej w cyklach wynikały jedynie z rodzaju zaaplikowanego lepiszcza w MMA. Ponadto rozpatrywany materiał musi być zgodny z warstwą przeznaczenia – podbudowy (nośna), która jest brana pod uwagę przy wymiarowaniu. w przypadku badań zawartych w rozprawie ten warunek **został spełniony**. Formuła współczynnika kalibracyjnego oraz proponowany sposób jego uwzględnienia w kryterium AASHTO zamieszczono w równaniach (44) i (45), natomiast dane umożliwiające jego ustalenie i jego wartość przedstawiono w Tab. 43.

$$n = \frac{E_{0\ 50\%,\ i}^*}{E_{0\ 50\%,\ ref}^*}, \quad (44)$$

gdzie:

n - współczynnik kalibracyjny uwzględniający rodzaj zastosowanego w MMA lepiszcza w ujęciu trwałości zmęczeniowej [-],

$E_{0\ 50\%,\ i}^*$ – trwałość zmęczeniowa wyrażona w cyklach uzyskana po spadku początkowej wartości modułu sztywności ustalanego w 100-cyklu badania o 50% i – tej mieszanki [cykle],

$E_{0\ 50\%,\ ref}^*$ – trwałość zmęczeniowa wyrażona w cyklach uzyskana po spadku początkowej wartości modułu sztywności ustalanego w 100-cyklu badania o 50% mieszanki referencyjnej [cykle].

$$N_{f,n} = n \cdot D_{FC} \cdot 7.3557 \cdot 10^{-6} \cdot C \cdot k' \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{3.9492} \cdot \left(\frac{1}{E_0^*}\right)^{1.281}, \quad (45)$$

gdzie:

$N_{f,n}$ – liczba powtarzalnych obciążeń do wystąpienia spękań zmęczeniowych z uwzględnieniem rodzaju zastosowanego w mieszance asfaltu [pow. obc.],

n – współczynnik kalibracyjny uwzględniający rodzaj zastosowanego w MMA lepiszcza [-],

D_{FC} – szkoda zmęczeniowa uwzględniająca grubość warstw asfaltowych oraz założony % spękań aligatorowych [-],

C – współczynnik zależny od właściwości objętościowych MMA [-],

k' – współczynnik kalibracyjny, zależny od grubości warstw asfaltowych konstrukcji i rodzaju omawianych spękań (dół-góra) [-],

ε_t – odkształcenie rozciągające w krytycznym punkcie, przekroju pionowego nawierzchni [-],

E_0^* – moduł sztywności warstwy asfaltowej [MPa].

Tab. 43: Wartości współczynnika n zdefiniowanego na podstawie wyników trwałości zmęczeniowej mieszanek A - D

recepta / parametr	K [-]	$A_m(B)$ [%]	V_b [%]	V_m [%]	$E_{0.50\%}^*$ [cykle]	n [-]
A2	2.95	4.23%	10.8%	4.1%	311340	0.76
A3	2.80	4.03%	10.2%	5.1%	217004	0.73
A4	2.65	3.82%	9.6%	6.2%	149994	0.93
B2	2.95	4.23%	10.8%	4.2%	411640	1.00
B3	2.80	4.03%	10.3%	4.4%	296816	1.00
B4	2.65	3.82%	9.8%	5.0%	161401	1.00
C2	2.95	4.23%	10.9%	4.0%	1456839	3.54
C3	2.80	4.03%	10.3%	5.1%	928584	3.13
C4	2.65	3.82%	9.7%	5.6%	497310	3.08
D2	2.95	4.23%	10.9%	4.3%	1958796	4.76
D3	2.80	4.03%	10.3%	5.0%	1032285	3.48
D4	2.65	3.82%	9.7%	5.8%	543505	3.37

W Tab. 43 zastosowano następujące oznaczenia:

K – wskaźnik wypełnienia [-],

$A_m(B)$ – procentowa zawartość lepiszcza dodawanego do MMA [%] (wagowo),

V_b – zawartość lepiszcza w MMA [%] (objętościowo),

V_m – zawartość wolnych przestrzeni w MMA [%] (objętościowo),

$E_{0.50\%}^*$ – trwałość zmęczeniowa wyrażona w cyklach uzyskana po spadku początkowej wartości modułu sztywności ustalanego w 100-cyklu badania o 50% [cykle],

n – współczynnik kalibracyjny uwzględniający rodzaj zastosowanego w MMA lepiszcza [-].

Na podstawie przyjętych założeń, wyników badań, przeprowadzonego modelowania, zastosowanego kryterium oraz autorskiej propozycji w Tab. 44 zbiorczo przedstawiono pozyskane rezultaty analizowanych konstrukcji.

Tab. 44: Zbiorcze wyniki trwałości zmęczeniowej porównywanych podatnych konstrukcji, KR 5, typ B

rec. MMA	K [-]	$A_m(B)$ [%]	V_b [%]	V_m [%]	E_p^* [MPa]	Abaqus odkształcenia - typowa			Abaqus odkształcenia - "łączona warstwa W+P"			typowa	"łączona warstwa W+P"	$\Delta \frac{N_f(uni)}{N_f(typ)}$ [%]	n [-]	typowa	"łączona warstwa W+P"
						max. ϵ_{11} [-]	max. ϵ_{22} [-]	max. ϵ [-]	max. ϵ_{11} [-]	max. ϵ_{22} [-]	max. ϵ [-]						
A2	2.95	4.23%	10.8%	4.1%	9811	58.1	58.1	58.1	58.8	58.8	58.8	69.8	66.4	-4.8%	0.76	52.8	50.3
A3	2.80	4.03%	10.2%	5.1%	10959	54.3	54.2	54.3	54.3	54.3	54.3	42.0	41.8	-0.4%	0.73	30.7	30.6
A4	2.65	3.82%	9.6%	6.2%	10759	54.9	54.8	54.9	55.0	55.1	55.1	20.9	20.6	-1.1%	0.93	19.4	19.2
B2	2.95	4.23%	10.8%	4.2%	9900	57.8	57.7	57.8	58.4	58.6	58.6	66.6	63.2	-5.1%	1.00	66.6	63.2
B3	2.80	4.03%	10.3%	4.4%	10870	54.5	54.5	54.5	54.6	54.7	54.7	58.2	57.8	-0.8%	1.00	58.2	57.8
B4	2.65	3.82%	9.8%	5.0%	10653	55.2	55.2	55.2	55.4	55.5	55.5	37.5	36.9	-1.6%	1.00	37.5	36.9
C2	2.95	4.23%	10.9%	4.0%	9935	57.7	57.6	57.7	58.3	58.3	58.3	75.1	71.9	-4.3%	3.54	265.9	254.6
C3	2.80	4.03%	10.3%	5.1%	10015	57.4	57.3	57.4	58.0	58.0	58.0	38.0	36.4	-4.0%	3.13	118.7	114.0
C4	2.65	3.82%	9.7%	5.6%	9985	57.5	57.4	57.5	58.1	58.1	58.1	25.9	24.9	-4.1%	3.08	79.9	76.6
D2	2.95	4.23%	10.9%	4.3%	9310	60.0	60.0	60.0	61.1	61.1	61.1	57.9	54.0	-6.7%	4.76	275.4	257.0
D3	2.80	4.03%	10.3%	5.0%	10460	55.9	55.8	55.9	56.2	56.2	56.2	42.5	41.5	-2.3%	3.48	147.7	144.3
D4	2.65	3.82%	9.7%	5.8%	10208	56.7	56.7	56.7	57.2	57.2	57.2	24.4	23.6	-3.3%	3.37	82.1	79.4

W Tab. 44 zastosowano następujące oznaczenia:

rec. MMA – oznaczenie recepty [-],

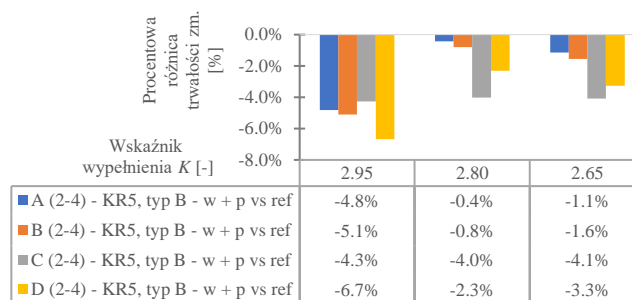
K – wskaźnik wypełnienia [-],

$A_m(B)$ – procentowa zawartość lepiszcza dodawanego do MMA [%],

V_b – zawartość lepiszcza w MMA [%] (objętościowo),
 V_m – zawartość wolnych przestrzeni w MMA [%],
 E_p^* – początkowa wartość modułu sztywności ustalona w 100-cyklu badania [MPa],
 ε_{11} – odkształcenia objętościowe wyznaczone w kierunku osi x [-],
 ε_{22} – odkształcenia objętościowe wyznaczone w kierunku osi y [-],
 ε – maksymalne poziome odkształcenia objętościowe (płaszczyzna X-Y) [-],
 N_f – liczba powtarzalnych obciążeń (w milionach) do wystąpienia spękań zmęczeniowych [mln pow. obc.],
 $\% \Delta \frac{N_f(uni)}{N_f(typ)}$ – procentowa różnica trwałości zmęczeniowej konstrukcji „łączona W+P” względem typowej [%],
 n – współczynnik kalibracyjny uwzględniający rodzaj zastosowanego w MMA lepiszcza [-],
 $N_{f,n}$ – liczba powtarzalnych obciążeń (w milionach) do wystąpienia spękań zmęczeniowych z uwzględnieniem rodzaju zastosowanego w mieszance asfaltu [mln pow. obc.].

Analizując dane umieszczone w Tab. 44 wyszczególniono 11 obserwacji.

1. Aplikacja mieszanki AC 22P (A - D) do warstwy wiążącej, skutkuje nieznacznym zwiększeniem odkształceń poziomych ($0.1 - 1.1 \mu\varepsilon$) na spodzie warstw asfaltowych. Jest to efekt mniejszej sztywności, którą cechują się mieszanki względem sztywniejszej warstwy wiążącej.
2. Analizując mapy odkształceń (patrz przykładowe np. Rys. 119 i Rys. 121), korzystniejszy (bardziej „płynny”) ich rozkład zaobserwowano dla konstrukcji: „łączona W+P”. Dostrzega się brak widocznych spięrzeń/koncentracji odkształceń przy granicy warstw pomiędzy wiążącą, a podbudową (w odniesieniu do konstrukcji o katalogowym układzie).
3. Konstrukcja „łączona W+P” charakteryzuje się mniejszą trwałością zmęczeniową w odniesieniu do referencyjnej (katalogowy układ warstw). w zależności od zastosowanej mieszanki różnice wahają się od 0.8% do 6.7% i nie należą do znaczących. Graficzna ilustrację zaprezentowano na Rys. 122.

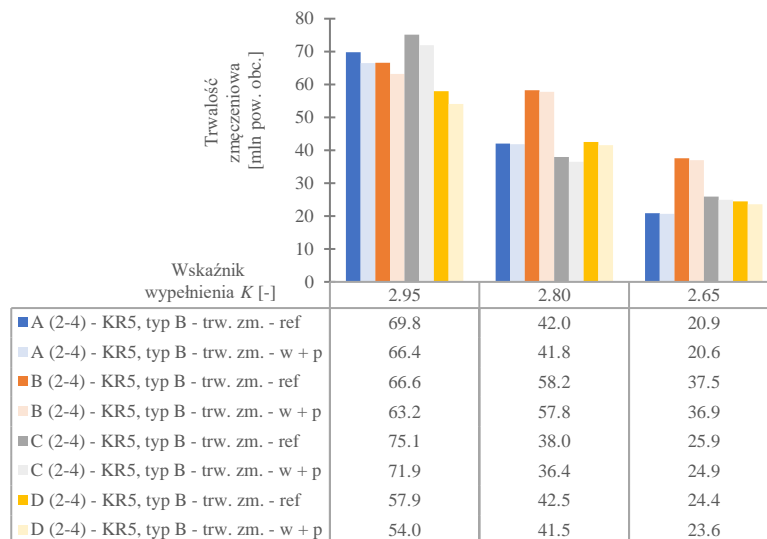


Rys. 122: Względne porównanie konstrukcji "łączona W+P" a referencyjnej

Na podstawie danych oraz powyższego wykresu zaobserwowano również, iż im sztywności MMA pomiędzy: mieszanką z podbudowy, a wiążącą są sobie bliższe, tym rozbieżności w trwałości zmęczeniowej pomiędzy zestawianymi konstrukcjami na tym samym poziomie zawartości lepiszcza stają się mniejsze. Ponadto przy mniejszej zawartości asfaltu wzajemne różnice (trwałość zmęczeniowa konstrukcji) wynikające z układu warstw i parametrów mieszanek zanikają. Stwierdza się, iż z powodzeniem można stosować mieszanki przeznaczone do podbudowy również do warstwy wiążącej,

pod warunkiem spełnienia wymogów prawnych dla obydwu warstw. Podkreśla się, iż rozwiązanie konstrukcji „łączona W+P” jest ekonomicznie uzasadnione – np. oszczędności w produkcji (wytwórnia mas bitumicznych), redukcja niektórych odsadzek w konstrukcji (wspomniane w podrozdziale 5.2.4).

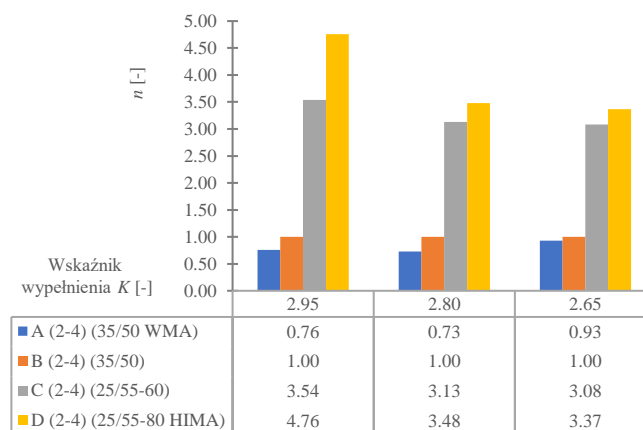
4. Obliczona trwałość zmęczeniowa N_f (spękania dół-góra) wg kryterium AASHTO wszystkich mieszanek i porównywanych konstrukcji przekracza katalogowy zakres powtarzalnych obciążeń wynoszący dla tej kategorii ruchu 7.4 – 22.0 mln osi. Jest to spowodowane: innymi parametrami materiałowymi i objętościowymi mieszanek, $T_{equiv} = 13.0^{\circ}\text{C}$, na które kryterium wykazuje wysoką wrażliwość. Najbliżej wartości w przytoczonym zakresie wykazały mieszanki A4, C4 i D4 charakteryzujące się najmniejszą zawartością asfaltu oraz wysokim poziomem zawartości wolnej przestrzeni.
5. Obliczona trwałość zmęczeniowa N_f (powszechne podejście) obydwu konstrukcji nawierzchni z wykorzystaniem danych mieszanek A – D (na tych samych poziomach zawartości lepiszcza) jest do siebie zbliżona – wyniki graficznie zaprezentowano na Rys. 123. Konstrukcja „łączona W+P” została oznaczona jako - w+p, natomiast o katalogowym układzie warstw - ref.



Rys. 123: Trwałość zmęczeniowa zestawianych konstrukcji wg kryterium AASHTO

Ponadto analizując Rys. 123 oraz formułę (38) zauważono, iż kryterium zmęczeniowe uwzględnia moduł, poziom odkształcenia i parametry objętościowe (wolna przestrzeń i poziom zawartości asfaltu), natomiast nie bierze ono pod uwagę rodzaju aplikowanego do MMA lepiszcza. Wyniki te nie korespondują z badaniami laboratoryjnymi, w których autor wykazał znacząco **wyższą trwałość zmęczeniową** mieszanek na bazie asfaltów modyfikowanych (C) i wysokomodyfikowanych (D) oraz **mniejsze** dla tej wykonanej w technologii WMA (A).

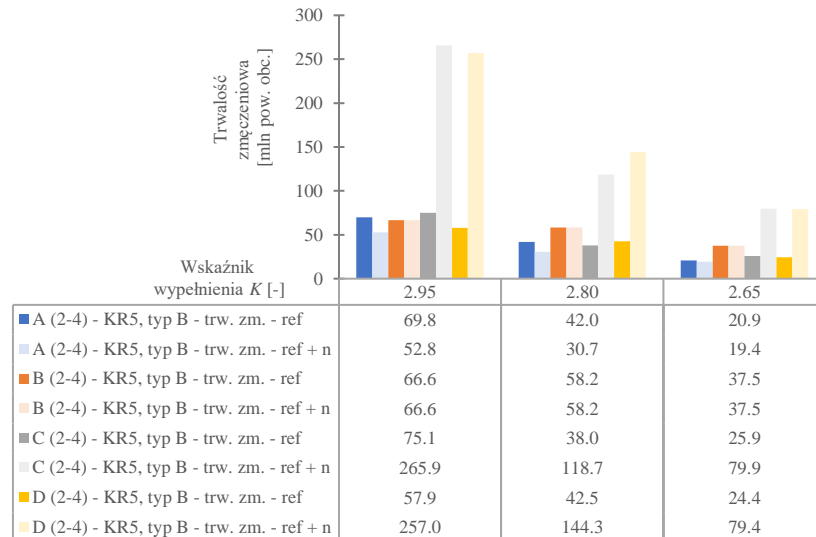
6. Zastosowanie **autorskiego współczynnika n** (badania zmęczeniowe) w kryterium umożliwiło **skutecznie zróżnicować** trwałość zmęczeniową konstrukcji $N_{f,n}$ ze względu na rodzaj asfaltu w mieszance. Graficzna ilustracja wartości parametru mieszanek A-D została przedstawiona na Rys. 124. Mieszanka B jest referencyjną – $n = 1.0$.



Rys. 124: Wartości współczynnika n mieszank A-D

Na podstawie danych i Rys. 124 stwierdza się, iż trwałość zmęczeniowa konstrukcji jest nawet **do 4.76 krotnie większa** (asfalt wysokomodyfikowany HIMA, D2) – asfalty wysokomodyfikowane oraz **do 27% mniejsza** – asfalt WMA (tech. na ciepło, A3) względem mieszanki referencyjnej (B na asfalcie zwykłym).

7. Wartość parametru n jest zależna od zawartości lepiszcza w MMA. Im asfaltu w mieszance jest mniej tym różnice wynikające ze stosowanego asfaltu (względem referencyjnego) stają się mniejsze.
8. Współczynnik **kalibracyjny** n jest parametrem **materiałowym** zależnym od rodzaju asfaltu i składu mieszanki (w tym wypadku zawartości lepiszcza, mieszanka mineralna = const.). Nie wpływa on na trwałość zmęczeniową $N_{f,n}$ porównywanych konstrukcji KR 5, Typ B (ref i w + p, łączna grubość warstw asfaltowych = 30.0 cm) w odniesieniu do układu warstw lub ich grubości. Współczynnik kalibracyjny n dotyczy w tym wypadku mieszank stosowanych w warstwie podbudowy, które charakteryzują trwałość całej konstrukcji.
9. Uwzględnienie w kryterium rodzaju stosowanego do mieszanki asfaltu poprzez **współczynnik kalibracyjny** n pozwala **skuteczniej** prognozować trwałość zmęczeniową konstrukcji umożliwiając **optymalizację** grubości warstw. Podkreśla się, iż obecne rozwiązania katalogowe [79] nie różnicują konstrukcji względem rodzaju lepiszcza stosowanego do MMA (jego odporności zmęczeniowej) - mieszanki z asfaltami zwykłymi lub modyfikowanymi są traktowane jednakowo. Wykres przedstawiający trwałość zmęczeniową konstrukcji **ref** bez i z (ref + n) uwzględnionym współczynnikiem zaprezentowano na Rys. 125.



Rys. 125: Trwałość zmęczeniowa konstrukcji KR 5, Typ B o katalogowym układzie warstw - współczynnik n

Omawiane konstrukcje KR 5, typ B (ref, w+p) w przypadku zastosowania mieszanek C i D mogą zostać skutecznie „odchudzone”. w przypadku mieszanki A (WMA) i B również. Podkreśla się jednak, iż MMA A wykazała mniejszą trwałość konstrukcji względem referencyjnej. Jeżeli wystąpiłby przypadek, iż dla zadanego składu mieszanki obliczona wartość byłaby spoza zakresu katalogowego (poniżej dolnej wartości przedziału), konstrukcje należy pogrubić, szczególnie tę wykonaną z mieszanki na ciepło (A).

10. Modyfikacja matrycy asfaltowej polimerem SBS mieszanek C i D pozytywnie wpływa na trwałość zmęczeniową materiału, ale i również całej konstrukcji nawierzchni – $N_{f,n}$.
11. Obliczona trwałość zmęczeniowa $N_{f,n}$ obydwu porównywanych konstrukcji KR 5, typ B dla mieszanek A-D znajduje się w większości przypadków powyżej górnej wartości przedziału ruchu KR 5 (22.0 mln osi). Należy zastanowić się nad wdrożeniem badań na wielką skalę związanych z wyznaczeniem współczynników kalibracyjnych n dla stosowanych w drogownictwie lepiszczy, aby zmodyfikować bieżące rozwiązania katalogowe pod aplikowane w MMA asfalty.

Na podstawie przeprowadzonych analiz w tej części podrozdziału **udowodniono**, iż z powodzeniem można stosować **mieszankę przeznaczoną do podbudowy** również do warstwy wiążącej, wykonując ciągłą warstwę „w+p” **bez znaczącego pogorszenia trwałości konstrukcji**. Muszą być jednak dla niej spełnione wymagania techniczne (cechy jakościowe MMA – np. zawartość wolnej przestrzeni, odporność na deformacje trwałe, ITSR) warstwy wyższej. Ponadto wykazano, iż **rodzaj asfaltu** istotnie **wpływa na trwałość konstrukcji nawierzchni** wyznaczanej z kryterium. Jego uwzględnienie poprzez **autorski współczynnik kalibracyjny n** , umożliwia: **dokładniej oceniać trwałość konstrukcji** oraz **optymalizować grubość jej warstw**. Dodatkowo potwierdzono, iż wykorzystywanie mieszanek zawierających asfalt o zmodyfikowanej matrycy asfaltowej polimerem SBS znacząco zwiększa trwałość zmęczeniową nie tylko mieszanki (materiału) lecz również całej konstrukcji nawierzchni.

6.2. Trwałość zmęczeniowa konstrukcji nawierzchni z uwzględnieniem regeneracji i innych zmiennych

Oddziaływania środowiskowe (woda i mróz, sól drogowa), ich kumulacja (woda i mróz + sól drogowa), zjawisko regeneracji oraz rodzaj stosowanego do MMA asfaltu istotnie wpływają nie tylko na materiał, ale również na konstrukcje podczas całego jej okresu eksploatacji. w niniejszym podrozdziale przeprowadzono **analizę trwałości zmęczeniowej konstrukcji nawierzchni uwzględniając w kryterium zmęczeniowym wyszczególnione wcześniej zmienne**. Ponadto wykazano **wpływ omawianych oddziaływań na trwałość**.

Analizy podzielono na dwie części:

1. uwzględnienie zmiennych w kryterium i ocena ich wpływu na trwałość wybranej KR konstrukcji w stosunku do powszechnego podejścia,
2. określenie zmian trwałości konstrukcji KR 1-7 wywołanej wpływem: wody i mrozu + soli drogowej, regeneracji oraz uwzględnieniem rodzaju asfaltu w sposób jednoczesny w stosunku do powszechnego podejścia.

Do analiz trwałości zmęczeniowej wybrano konstrukcję podatną Typ B. Rozważania obejmują wszystkie konstrukcje tego typu z zakresu KR: 1-7. Celem ponownego użycia kryterium AASHTO (opisanego w rozdziale 6) wykonano modelowanie wykorzystujące metodę elementów skończonych - program Abaqus. Przyjęto rozwiązania katalogowe [79] – układ warstw i grubości konstrukcji KR 1-7. Do modelowania zaaplikowano parametry materiałowe i założenia zaprezentowane w Tab. 45 i Tab. 46.

Tab. 45: Podstawowe założenia wykorzystane do modelowania

	wartość
Temperatura ekwiwalentna [°C]	13.0
kształt obciążenia	koło
promień koła [m]	0.1368
powierzchnia kontaktowa [m ²]	0.0588
ciśnienie kontaktowe [kPa]	977.5
szczepność międzywarstwowa	pełna

Tab. 46: Przyjęte grubości warstw i parametry materiałowe

	warstwa	grubość [m]	Moduł sprężystości (sztywności dla MMA) [MPa]	współczynnik Poissona [-]
KR 1	ścieralna	0.04	9300	0.30
	wiążąca	-	-	-
	podbudowa	0.10	8400	0.30
	grunt	4.00	80	0.35
KR 2	ścieralna	0.04	9300	0.30
	wiążąca	0.06	8800	0.30
	podbudowa	0.08	8400	0.30
	grunt	4.00	80	0.35
KR 3	ścieralna	0.04	7300	0.30
	wiążąca	0.08	10300	0.30
	podbudowa	0.10	9800	0.30
	grunt	4.00	100	0.35
KR 4	ścieralna	0.04	7300	0.30
	wiążąca	0.08	10300	0.30
	podbudowa	0.14	9800	0.30
	grunt	4.00	100	0.35
KR 5	ścieralna	0.04	7300	0.30
	wiążąca	0.08	10300	0.30
	podbudowa	0.18	9800	0.30
	grunt	4.00	120	0.35
KR 6	ścieralna	0.04	7300	0.30
	wiążąca	0.08	10300	0.30
	podbudowa	0.22	9800	0.30
	grunt	4.00	120	0.35
KR 7	ścieralna	0.04	7300	0.30
	wiążąca	0.08	10300	0.30
	podbudowa	0.24	9800	0.30
	grunt	4.00	120	0.35

Na podstawie przeprowadzonego modelowania pozyskano informację o maksymalnych odkształceniach rozciągających na spodzie podbudowy, które wykorzystano w kryterium. Ponadto przyjęto dla każdej KR ogólny zestaw parametrów objętościowych mieszanki (przeznaczonej na podbudowę) wyeksponowany w Tab. 47.

Do analiz wybrano **trzy kombinacje** zawartości lepiszcza V_b i wolnej przestrzeni V_m mające na celu ukazanie zmienności trwałości zmęczeniowej konstrukcji (z uwzględnionymi zmiennymi – woda i mróz, regeneracja itd.) od fluktuacji parametrów objętościowych. Parametry starano się tak dobrać, aby: spełnić wymagania warunków technicznych cz. 2 [83] oraz aby obliczana trwałość konstrukcji z kryterium według powszechnego podejścia znajdowała się jednocześnie w zakresie trwałości zmęczeniowej dla danej KR (katalog) [79]. Przyjęto również mieszankę mineralną do ustalenia wartości minimalnej zawartości lepiszcza w oparciu o współczynnik korygujący α – ta wykorzystana w rozprawie do mieszanek A-D.

Tab. 47: Zaaplikowane do modelowania parametry objętościowe mieszanek typu beton asfaltowy przeznaczone na podbudowę

		KR 1	KR 2	KR 3	KR 4	KR 5	KR 6	KR 7
Beton asfaltowy AC, przeznaczenie: podbudowa	B_{min} [%]	4.20%	4.20%	4.00%	4.00%	4.00%	4.00%	4.00%
	α [-]	0.898	0.898	0.898	0.898	0.898	0.898	0.898
	B_{min} skorygowane [%]	3.77%	3.77%	3.59%	3.59%	3.59%	3.59%	3.59%
		nr kombinacji						
V_b , wagowo [%]	1	4.17%	4.17%	3.99%	3.99%	3.99%	3.99%	3.99%
	2	3.97%	3.97%	3.79%	3.79%	3.79%	3.79%	3.79%
	3	3.77%	3.77%	3.59%	3.59%	3.59%	3.59%	3.59%
V_b , objętościowo [%]	1	10.66%	10.66%	10.20%	10.20%	10.20%	10.20%	10.20%
	2	10.14%	10.14%	9.69%	9.69%	9.69%	9.69%	9.69%
	3	9.63%	9.63%	9.18%	9.18%	9.18%	9.18%	9.18%
V_m , objętościowo [%]	1	4.5%	4.5%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%	5.0%
	2	5.5%	5.5%	6.0%	6.0%	6.0%	6.0%	6.0%
	3	6.5%	6.5%	7.0%	7.0%	7.0%	7.0%	7.0%

Podkreśla się, iż jednym z celów tego podrozdziału jest przedstawienie wpływu oddziaływań środowiskowych, regeneracji i rodzaju asfaltu na fluktuacje trwałości konstrukcji katalogowych zatem dane materiałowe takie jak np. moduł sztywności, zawartość lepiszcza/wolnych przestrzeni nie odpowiadają bezpośrednio zbadanym mieszankom A-D. Dane są jednak do nich zbliżone.

Spośród przeprowadzonych dotychczas badań nad mieszankami A-D (AC 22 P/W KR 5-7, 3 poziomy zawartości lepiszcza) do obecnych analiz wykorzystano następujące dane:

1. **wskaźniki wypadkowe RI** ustalone na trzech poziomach zawartości asfaltu ($K = 2.95, 2.80, 2.65$ tj. V_b wagowo = 4.23%, 4.03%, 3.82%) dla oddziaływań: **czysta regeneracja – (h) (tylko czynnik mechaniczny), woda i mróz (wim), sól drogowa (sd), kumulacja – wim+sd (k)**,
2. **cztery rodzaje lepiszczy: 35/50 WMA, 35/50, 25/55-60, 25/55-80 HIMA**,
3. **współczynnik kalibracyjny n** (uwzględniający rodzaj asfaltu ze względu na trwałość zmęczeniową) - ustalony dla trzech zawartości asfaltu (35/50 - mieszanka z tym asfaltem należała do referencyjnej).

Należy wyeksponować, iż cztery wybrane lepiszcza są bardzo często stosowane do MMA konstrukcji podatnych. w szczególności do tych przeznaczonych na podbudowę.

Warunki wdrożonej regeneracji zbadano i zastosowano dla konstrukcji KR 5 Typ B o głębokości 30 cm odpowiadającej spodowi podbudowy. Do analiz przyjmuje się, iż te warunki również zostają spełnione dla konstrukcji o kategorii ruchu 1-4 oraz 6-7. Trzeba jednak pamiętać, iż healing jest wyższy dla KR 1-4 (płycej posadowiona podbudowa) i niższy w przypadku KR 6-7. Dokładne zależności należałoby jednak zbadać i odpowiednio dostosować.

6.2.1. Uwzględnienie oddziaływań środowiskowych oraz regeneracji w kryterium na przykładzie wybranej konstrukcji

Aby uwzględnić wpływ oddziaływań środowiskowych, ich kumulacji i regeneracji w konstrukcji wykorzystano opisaną w podrozdziale 5.3.7 drugą metodę - „wskaźnikową”. Pozwoliła ona zastosować w kryterium zmęczeniowym nawierzchni wskaźniki wypadkowe RI biorące pod uwagę różne czynniki np. woda i mróz oraz regenerację ze względu na trwałość. Wpływ rodzaju asfaltu w MMA na trwałość konstrukcji uwzględniono przez zastosowanie wartości współczynnika kalibracyjnego n opisanego w podrozdziale 6.1.

Formuły biorące pod uwagę: oddziaływania środowiskowe, regenerację i rodzaj asfaltu w trwałości zmęczeniowej konstrukcji ustalanej na podstawie kryterium ukazano w równaniach (46) i (47).

$$N_{f,RI} = N_f + N_f \cdot RI_i , \quad (46)$$

$$N_{f,RI,n} = n \cdot N_{f,RI} , \quad (47)$$

gdzie:

$N_{f,RI}$ – liczba powtarzalnych obciążeń do wystąpienia spękań zmęczeniowych z uwzględnionymi oddziaływaniami: środowiskowymi i regeneracją [pow. obc.],

N_f – liczba powtarzalnych obciążeń do wystąpienia spękań zmęczeniowych [pow. obc.] (wyznaczone wg wzoru (38) - powszechne podejście),

RI_i – wskaźnik wypadkowy wyrażający przyrost lub spadek trwałości zmęczeniowej badanej mieszanki (względem referencyjnej) wywołanej i -tym oddziaływaniem: mechanicznym lub środowiskowym (np. woda i mróz, sól drogowa) i mechanicznym uwzględniającym jednocześnie zjawisko regeneracji materiału [%],

n – współczynnik kalibracyjny uwzględniający rodzaj zastosowanego w MMA lepiszcza [-],

$N_{f,RI,n}$ – liczba powtarzalnych obciążeń do wystąpienia spękań zmęczeniowych z uwzględnionymi oddziaływaniami: środowiskowymi, regeneracją oraz rodzajem asfaltu stosowanym do mieszanki [pow. obc.].

Na podstawie przeprowadzonego modelowania i wykorzystanych autorskich formuł obliczono trwałość zmęczeniową konstrukcji KR 5 (7.4-22.0 mln osi równoważnych), typ B bez i z uwzględnieniem rodzaju asfaltu o współczynnik kalibracyjny n . Dane i pozyskane rezultaty przedstawiono zbiorczo w Tab. 48 i Tab. 49.

Tab. 48: Trwałość zmęczeniowa konstrukcji KR 5, typ B – MMA z asfaltami zwykłymi 35/50 WMA i 35/50

Mieszanka na asfalcie	nr kombinacji	V_b wagowo [%]	V_b obj. [%]	V_m obj. [%]	E_0^* [MPa]	n [-]	max. $\mu\epsilon$ [-]	ref.	wariant	bez uwzględnienia rodzaju asfaltu			z uwzględnieniem rodzaju asfaltu			KR_{N_f} (ref) [-]	$KR_{N_f,RI,n}$ [-]	Trend wyjściowy KR [-]
								N_f [mln pow. obc.]		RI [%]	$N_{f,RI}$ [mln pow. obc.]	trend względem ref	$N_{f,RI,n}$ [mln pow. obc.]	$\Delta_{N_f,RI,n}$ [%]	trend względem ref			
35/50 WMA	1	3.99%	10.2%	5.0%	9800	0.76	65.0	24.4	h	52.28%	37.1	przyrost	28.1	15.2%	przyrost	KR 6	KR 6	bez zmian
35/50 WMA	1	3.99%	10.2%	5.0%	9800	0.76	65.0	24.4	wim	-9.73%	22.0	spadek	16.6	-31.7%	spadek	KR 6	KR 5	spadek
35/50 WMA	1	3.99%	10.2%	5.0%	9800	0.76	65.0	24.4	sd	-8.94%	22.2	spadek	16.8	-31.1%	spadek	KR 6	KR 5	spadek
35/50 WMA	1	3.99%	10.2%	5.0%	9800	0.76	65.0	24.4	wim+sd (k)	-31.74%	16.6	spadek	12.6	-48.4%	spadek	KR 6	KR 5	spadek
35/50 WMA	2	3.79%	9.7%	6.0%	9800	0.73	65.0	13.4	h	20.53%	16.2	przyrost	11.8	-11.9%	spadek	KR 5	KR 5	bez zmian
35/50 WMA	2	3.79%	9.7%	6.0%	9800	0.73	65.0	13.4	wim	-16.46%	11.2	spadek	8.2	-38.9%	spadek	KR 5	KR 5	bez zmian
35/50 WMA	2	3.79%	9.7%	6.0%	9800	0.73	65.0	13.4	sd	-13.14%	11.7	spadek	8.5	-36.5%	spadek	KR 5	KR 5	bez zmian
35/50 WMA	2	3.79%	9.7%	6.0%	9800	0.73	65.0	13.4	wim+sd (k)	-35.23%	8.7	spadek	6.4	-52.6%	spadek	KR 5	KR 4	spadek
35/50 WMA	3	3.59%	9.2%	7.0%	9800	0.93	65.0	7.7	h	12.73%	8.6	przyrost	8.0	4.8%	przyrost	KR 5	KR 5	bez zmian
35/50 WMA	3	3.59%	9.2%	7.0%	9800	0.93	65.0	7.7	wim	-24.95%	5.8	spadek	5.3	-30.3%	spadek	KR 5	KR 4	spadek
35/50 WMA	3	3.59%	9.2%	7.0%	9800	0.93	65.0	7.7	sd	-19.29%	6.2	spadek	5.8	-25.0%	spadek	KR 5	KR 4	spadek
35/50 WMA	3	3.59%	9.2%	7.0%	9800	0.93	65.0	7.7	wim+sd (k)	-44.81%	4.2	spadek	3.9	-48.7%	spadek	KR 5	KR 4	spadek
35/50	1	3.99%	10.2%	5.0%	9800	1.00	65.0	24.4	h	52.23%	37.1	przyrost	37.1	52.2%	przyrost	KR 6	KR 6	bez zmian
35/50	1	3.99%	10.2%	5.0%	9800	1.00	65.0	24.4	wim	2.26%	24.9	przyrost	24.9	2.3%	przyrost	KR 6	KR 6	bez zmian
35/50	1	3.99%	10.2%	5.0%	9800	1.00	65.0	24.4	sd	10.09%	26.8	przyrost	26.8	10.1%	przyrost	KR 6	KR 6	bez zmian
35/50	1	3.99%	10.2%	5.0%	9800	1.00	65.0	24.4	wim+sd (k)	-17.23%	20.2	spadek	20.2	-17.2%	spadek	KR 6	KR 5	spadek
35/50	2	3.79%	9.7%	6.0%	9800	1.00	65.0	13.4	h	22.32%	16.4	przyrost	16.4	22.3%	przyrost	KR 5	KR 5	bez zmian
35/50	2	3.79%	9.7%	6.0%	9800	1.00	65.0	13.4	wim	-11.42%	11.9	spadek	11.9	-11.4%	spadek	KR 5	KR 5	bez zmian
35/50	2	3.79%	9.7%	6.0%	9800	1.00	65.0	13.4	sd	3.26%	13.9	przyrost	13.9	3.3%	przyrost	KR 5	KR 5	bez zmian
35/50	2	3.79%	9.7%	6.0%	9800	1.00	65.0	13.4	wim+sd (k)	-21.82%	10.5	spadek	10.5	-21.8%	spadek	KR 5	KR 5	bez zmian
35/50	3	3.59%	9.2%	7.0%	9800	1.00	65.0	7.7	h	17.81%	9.0	przyrost	9.0	17.8%	przyrost	KR 5	KR 5	bez zmian
35/50	3	3.59%	9.2%	7.0%	9800	1.00	65.0	7.7	wim	-21.45%	6.0	spadek	6.0	-21.5%	spadek	KR 5	KR 4	spadek
35/50	3	3.59%	9.2%	7.0%	9800	1.00	65.0	7.7	sd	-5.81%	7.2	spadek	7.2	-5.8%	spadek	KR 5	KR 4	spadek
35/50	3	3.59%	9.2%	7.0%	9800	1.00	65.0	7.7	wim+sd (k)	-31.43%	5.3	spadek	5.3	-31.4%	spadek	KR 5	KR 4	spadek

Tab. 49: Trwałość zmęczeniowa konstrukcji KR 5, typ B – MMA z asfaltami modyfikowanymi 25/55-60 i 25/55-80 HIMA

Mieszanka na asfalcie	nr kombinacji	V_b wagowo [%]	V_b obj. [%]	V_m obj. [%]	E_0^c [MPa]	n [-]	max. $\mu\epsilon$ [-]	ref	wariant	bez uwzględnienia rodzaju asfaltu			z uwzględnieniem rodzaju asfaltu			KR_{N_f} (ref) [-]	$KR_{N_f,RI,n}$ [-]	Trend wyjściowy KR [-]
								N_f [mln pow. obc.]		RI [%]	$N_{f,RI}$ [mln pow. obc.]	trend względem ref	$N_{f,RI,n}$ [mln pow. obc.]	$\Delta_{N_f,RI,n}$ [%]	trend względem ref			
25/55-60	1	3.99%	10.2%	5.0%	9800	3.54	65.0	24.4	h	18.50%	28.9	przyrost	102.2	319.4%	przyrost	KR 6	KR 7	przyrost
25/55-60	1	3.99%	10.2%	5.0%	9800	3.54	65.0	24.4	wim	12.95%	27.5	przyrost	97.4	299.7%	przyrost	KR 6	KR 7	przyrost
25/55-60	1	3.99%	10.2%	5.0%	9800	3.54	65.0	24.4	sd	14.93%	28.0	przyrost	99.1	306.7%	przyrost	KR 6	KR 7	przyrost
25/55-60	1	3.99%	10.2%	5.0%	9800	3.54	65.0	24.4	wim+sd (k)	9.45%	26.7	przyrost	94.4	287.4%	przyrost	KR 6	KR 7	przyrost
25/55-60	2	3.79%	9.7%	6.0%	9800	3.13	65.0	13.4	h	14.39%	15.4	przyrost	48.0	257.9%	przyrost	KR 5	KR 6	przyrost
25/55-60	2	3.79%	9.7%	6.0%	9800	3.13	65.0	13.4	wim	-1.19%	13.3	spadek	41.5	209.1%	przyrost	KR 5	KR 6	przyrost
25/55-60	2	3.79%	9.7%	6.0%	9800	3.13	65.0	13.4	sd	5.82%	14.2	przyrost	44.4	231.1%	przyrost	KR 5	KR 6	przyrost
25/55-60	2	3.79%	9.7%	6.0%	9800	3.13	65.0	13.4	wim+sd (k)	-5.99%	12.6	spadek	39.5	194.1%	przyrost	KR 5	KR 6	przyrost
25/55-60	3	3.59%	9.2%	7.0%	9800	3.08	65.0	7.7	h	8.88%	8.3	przyrost	25.7	235.5%	przyrost	KR 5	KR 6	przyrost
25/55-60	3	3.59%	9.2%	7.0%	9800	3.08	65.0	7.7	wim	-13.97%	6.6	spadek	20.3	165.1%	przyrost	KR 5	KR 5	bez zmian
25/55-60	3	3.59%	9.2%	7.0%	9800	3.08	65.0	7.7	sd	-2.35%	7.5	spadek	23.1	200.9%	przyrost	KR 5	KR 6	przyrost
25/55-60	3	3.59%	9.2%	7.0%	9800	3.08	65.0	7.7	wim+sd (k)	-18.75%	6.2	spadek	19.2	150.3%	przyrost	KR 5	KR 5	bez zmian
25/55-80 HIMA	1	3.99%	10.2%	5.0%	9800	4.76	65.0	24.4	h	13.43%	27.6	przyrost	131.5	439.7%	przyrost	KR 6	KR 7	przyrost
25/55-80 HIMA	1	3.99%	10.2%	5.0%	9800	4.76	65.0	24.4	wim	10.20%	26.8	przyrost	127.7	424.4%	przyrost	KR 6	KR 7	przyrost
25/55-80 HIMA	1	3.99%	10.2%	5.0%	9800	4.76	65.0	24.4	sd	9.81%	26.8	przyrost	127.3	422.5%	przyrost	KR 6	KR 7	przyrost
25/55-80 HIMA	1	3.99%	10.2%	5.0%	9800	4.76	65.0	24.4	wim+sd (k)	6.22%	25.9	przyrost	123.1	405.5%	przyrost	KR 6	KR 7	przyrost
25/55-80 HIMA	2	3.79%	9.7%	6.0%	9800	3.48	65.0	13.4	h	10.45%	14.8	przyrost	51.6	284.1%	przyrost	KR 5	KR 6	przyrost
25/55-80 HIMA	2	3.79%	9.7%	6.0%	9800	3.48	65.0	13.4	wim	2.59%	13.8	przyrost	47.9	256.8%	przyrost	KR 5	KR 6	przyrost
25/55-80 HIMA	2	3.79%	9.7%	6.0%	9800	3.48	65.0	13.4	sd	6.28%	14.3	przyrost	49.6	269.6%	przyrost	KR 5	KR 6	przyrost
25/55-80 HIMA	2	3.79%	9.7%	6.0%	9800	3.48	65.0	13.4	wim+sd (k)	0.21%	13.4	przyrost	46.8	248.5%	przyrost	KR 5	KR 6	przyrost
25/55-80 HIMA	3	3.59%	9.2%	7.0%	9800	3.37	65.0	7.7	h	6.32%	8.2	przyrost	27.4	258.0%	przyrost	KR 5	KR 6	przyrost
25/55-80 HIMA	3	3.59%	9.2%	7.0%	9800	3.37	65.0	7.7	wim	-3.36%	7.4	spadek	24.9	225.4%	przyrost	KR 5	KR 6	przyrost
25/55-80 HIMA	3	3.59%	9.2%	7.0%	9800	3.37	65.0	7.7	sd	-3.57%	7.4	spadek	24.9	224.7%	przyrost	KR 5	KR 6	przyrost
25/55-80 HIMA	3	3.59%	9.2%	7.0%	9800	3.37	65.0	7.7	wim+sd (k)	-12.14%	6.7	spadek	22.7	195.8%	przyrost	KR 5	KR 6	przyrost

W Tab. 48 i Tab. 49 zastosowano następujące oznaczenia:

V_b – zawartość lepiszcza w MMA [%],

obj. – objętościowo,

V_m – zawartość wolnych przestrzeni w MMA [%],

E_0^* – moduł sztywności MMA [MPa],

n – współczynnik kalibracyjny uwzględniający rodzaj zastosowanego w MMA lepiszcza [-].

$\max \mu \varepsilon$ – maksymalne odkształcenia rozciągające na spodzie warstw asfaltowych (podbudowy) [-],

N_f – liczba powtarzalnych obciążeń do wystąpienia spękań zmęczeniowych [mln pow. obc.]

(wyznaczone wg wzoru (38) - powszechne podejście),

RI – wskaźnik wypadkowy wyrażający przyrost lub spadek trwałości zmęczeniowej badanej mieszanki (względem referencyjnej) wywołanej oddziaływaniem: mechanicznym lub środowiskowym (np. woda i mróz, sól drogowa) i mechanicznym uwzględniającym jednocześnie zjawisko regeneracji materiału [%],

ref – wariant referencyjny (powszechne podejście),

h – wariant uwzględniający wyłącznie regenerację (tylko czynnik mechaniczny),

wim – wariant uwzględniający oddziaływanie wody i mrozu oraz regenerację,

sd – wariant uwzględniający oddziaływanie soli drogowej oraz regeneracji,

wim+sd (k) – wariant uwzględniający kumulację oddziaływań: wodę i mróz, sól drogową oraz regenerację,

$N_{f,RI}$ – liczba powtarzalnych obciążeń do wystąpienia spękań zmęczeniowych z uwzględnionymi oddziaływaniami: środowiskowymi i regeneracją [mln pow. obc.],

$N_{f,RI,n}$ – liczba powtarzalnych obciążeń do wystąpienia spękań zmęczeniowych z uwzględnionymi oddziaływaniami: środowiskowymi, regeneracją oraz rodzajem asfaltu stosowanym do mieszanki [mln pow. obc.],

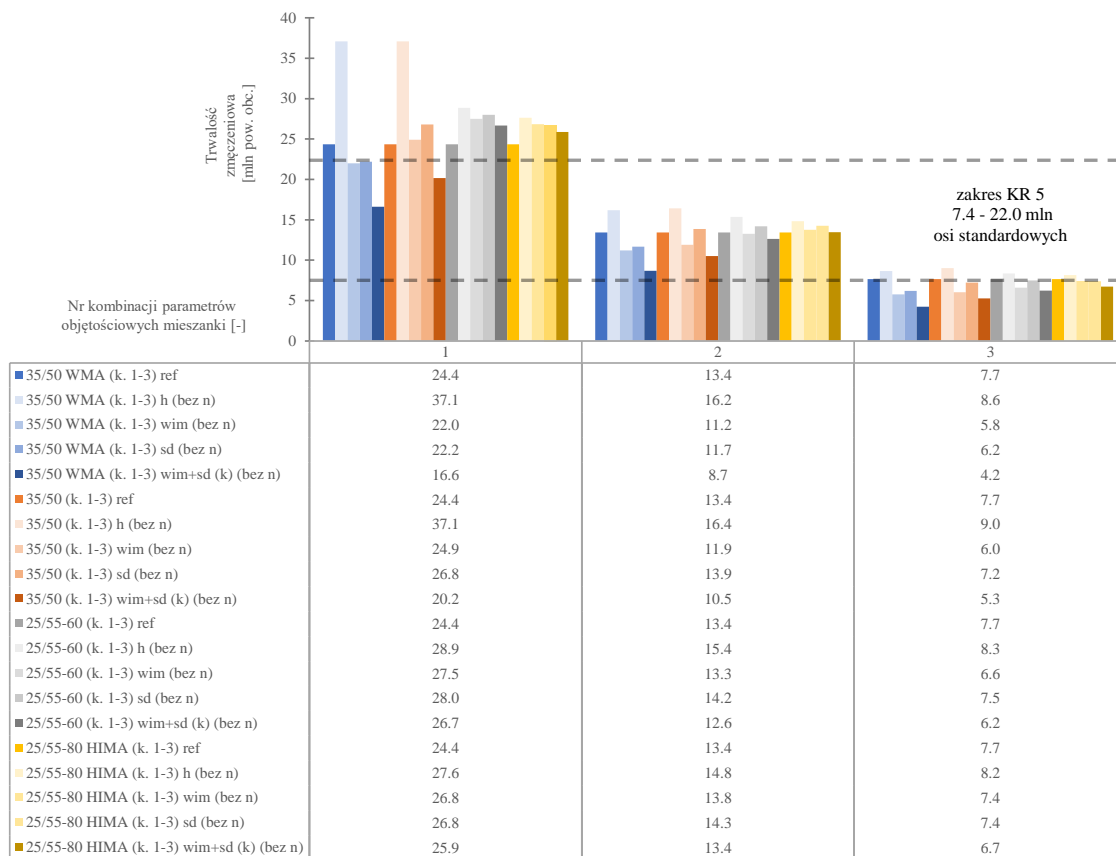
$\Delta_{N_{f,RI,n}}$ – procentowa zmiana trwałości zmęczeniowej $N_{f,RI,n}$ względem referencyjnej N_f wyznaczona według formuły $\left(\frac{N_{f,RI,n}}{N_f} - 1\right)$ [%],

KR_{N_f} – referencyjna kategoria ruchu wyznaczona dla przyjętych parametrów mieszanki [-],

$KR_{N_{f,RI,n}}$ – kategoria ruchu wyznaczona dla przyjętych parametrów mieszanki uwzględniająca rodzaj asfaltu, oddziaływania środowiskowe i regenerację [-].

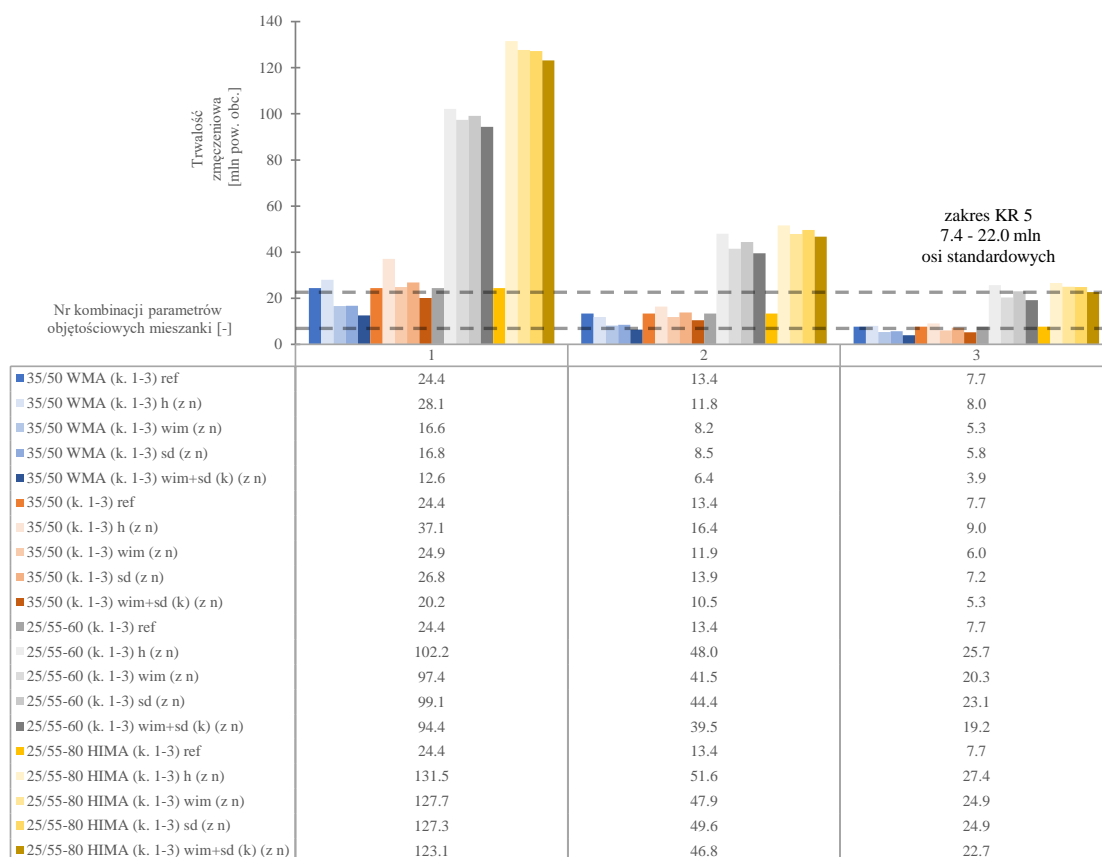
Na podstawie danych zamieszczonych w Tab. 48 oraz Tab. 49 pozyskanych z obliczeń wybranej konstrukcji katalogowej, typ B, KR 5 wyszczególniono 10 obserwacji:

1. Zamodelowane mieszanki o przyjętych parametrach objętościowych (kombinacje 1-3)) znajdują się w katalogowym zakresie trwałości zmęczeniowej KR 5 (7.4 – 22.0 mln osi). Wyjątek stanowi kombinacja nr 1 charakteryzującą się wysoką zawartością asfaltu oraz niską wolnych przestrzeni (24.4 mln).
2. Oddziaływania **środowiskowe i regeneracja** wyrażone przez wskaźnik **RI istotnie wpływają na trwałość konstrukcji** $N_{f,RI}$. Największy przyrost odnotowano dla mieszanki na asfalcie 35/50 WMA, kombinacji nr 1 i wariantu (h) – tylko regeneracja. Wyniósł on aż 52.28% (12.76 mln osi)! Największy regres odnotowano dla mieszanki na asfalcie 35/50 WMA, kombinacji nr 3 i wariantu wim+sd (k) – spadek o 44.81% (3.45 mln osi).
3. **Konstrukcje z mieszanek na bazie asfaltów zwykłych (35/50 WMA, 35/50)** wykazują **wysoką wrażliwość** na oddziaływania wody i mrozu, soli drogowej lub ich kumulacji. Ponadto wpływ regeneracji jest osłabiony („hamowany”) czynnikami zewnętrznymi i najczęściej nie jest w stanie skompensować negatywnego oddziaływania. Trwałość tych konstrukcji wyrażona przez $N_{f,RI}$ **jest niższa lub porównywalna** względem referencyjnej N_f . **Odwrotny trend**, większościowo związany z **przyrostem trwałości** pomimo negatywnych oddziaływań środowiskowych wykazują **konstrukcje z mieszanek na bazie asfaltów modyfikowanych 25/55-60 lub wysokomodyfikowanych 25/55-80 HIMA**. Spektrum zmian trwałości w zależności od analizowanych wariantów przedstawiono w formie graficznej na Rys. 126.



Rys. 126: Trwałość konstrukcji KR 5 w zależności od rozpatrywanego oddziaływania

4. **Wpływ oddziaływań środowiskowych i regeneracji** na trwałość konstrukcji jest uzależniony od **parametrów objętościowych** mieszanki zastosowanej do spodniej warstwy. Im lepsza jest więcej, a wolnej przestrzeni mniej tym **korzystniejsze** otrzymuje się warunki wypadkowe wyrażone przez *RI*.
5. Konstrukcje o **niskiej zawartości asfaltu i wysokiej wolnej przestrzeni** (kombinacja nr 3) z uwzględnionymi oddziaływaniami lub/i regeneracją (*RI*) wykazują **spadek kategorii ruchu** KR 5 na niższą KR4. Należałoby zastanowić się nad ich pogrubieniem przed zastosowaniem na drogę o KR 5.
6. Wskaźnik *RI* **pozwalą skutecznie** zróżnicować i ocenić trwałość konstrukcji w mieszanych warunkach środowiskowo-ruchowych. Nie zawiera jednak on informacji trwałości zmęczeniowej wynikającej z np. modyfikacji matrycy asfaltowej polimerem. Konstrukcje wykonane z mieszanek na bazie polimero-asfaltów wykazują **podobne** wartości trwałości konstrukcji $N_{f,RI}$ w stosunku do tych na bazie asfaltu zwykłego. Nie jest to prawdą (udowodnione rozdział wcześniej). Podobnie w przypadku asfaltu WMA do technologii na ciepło. **Uwzględnienie autorskiego współczynnika *n*** (rodzaj asfaltu) pozwala **dokładniej oceniać trwałość konstrukcji** - $N_{f,RI,n}$. Trwałość konstrukcji z *n* zaprezentowano na Rys. 127.



Rys. 127: Trwałość konstrukcji KR 5 w zależności od rozpatrywanego oddziaływania z uwzględnionym rodzajem lepiszcza

- Konstrukcje z mieszanek na bazie asfaltów zwykłych** wykazują **zdecydowanie niższą** trwałość względem tych z użyciem **polimero-asfaltów** – nawet do **4.67** razy mniejszą w przypadku: kombinacja 1, wariant h, 35/50 WMA vs 25/55-80 HIMA oraz do **5.82** razy mniejszą w przypadku: kombinacja 3, wariant wim+sd (k), 35/50 WMA vs 25/55-80 HIMA.
- Zastosowanie konstrukcji na bazie **asfaltów modyfikowanych** oraz w **szczególności wysokomodyfikowanych (HIMA)** pozwala zapewnić **wysoką trwałość nawet w trudnych warunkach środowiskowo-ruchowych**. Ponadto ich wykorzystanie umożliwi wdrożenie **optymalizację grubości warstw konstrukcji**. Niezależnie od kombinacji parametrów objętościowych i najgorszego przypadku oddziaływania (wim+sd (k)) konstrukcje znajdują się powyżej zakresu dla KR 5 (KR 6/KR7). (wyjątek asfalt 25/55-60, kombinacja 3, wariant: wim i wim+sd (k)) – w KR 5).
- Im większa modyfikacja matrycy asfaltowej **polimerem SBS** tym konstrukcje z mieszanek na bazie z tego rodzaju lepiszczy **są trwalsze względem tych na bazie asfaltów zwykłych**. Różnice dochodzą do: **4.67** razy (wim+sd (k), kombinacja 1, 25/55-60 vs 35/50), **6.5** razy (wim+sd (k), kombinacja 1, 25/55-80 HIMA vs 35/50). Ponadto cechują się one większymi możliwościami optymalizacyjnymi grubości konstrukcji.

10. **Trwałość konstrukcji** $N_{f,RI,n}$ na bazie asfaltów **zwykłych** dla kombinacji parametrów objętościowych mieszank 1 i 2 znajduje się w zakresie KR 5. w przypadku kombinacji 3 w zależności od analizowanych wariantów zaobserwowano **spadek do KR 4**. Szczególnie dla kumulacji oddziaływań wim+sd (k) – najbardziej niekorzystna sytuacja. Zastosowanie asfaltów zwykłych, a przede wszystkim tych przeznaczonych do technologii na ciepło wymaga **przeprojektowania bieżącego rozwiązania katalogowego** tak aby **sprowadzić** ją w złożonych warunkach środowiskowo-ruchowych do **KR 5** (zaleca się zwiększenie jej grubości).

Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, iż **autorska metoda** uwzględnienia oddziaływań środowiskowych, regeneracji oraz rodzaju asfaltu w trwałości zmęczeniowej konstrukcji nawierzchni wyznaczanej z kryterium **pozwała dokładniej** prognozować jej żywotność w skomplikowanych warunkach środowiskowo-ruchowych. Ponadto **umożliwia ocenić**, w jakim przypadku można wdrożyć **optymalizację grubości konstrukcji** (odchudzenie) lub kiedy należy ją **pogrubić** w zależności od zastosowanego do mieszanki asfaltu. w rozważaniach wykazano również, iż oddziaływania **środowiskowe oraz regeneracja są istotne** w ocenie trwałości konstrukcji, a wpływ tych czynników **znaczący**. Do ważnych osiągnięć autora należy również wykazanie, iż **konstrukcja KR 5, typ B** z zastosowaniem asfaltów **modyfikowanych, a szczególnie wysokomodyfikowanych** pozwalają **zapewnić w trudnych warunkach środowiskowo-ruchowych** (kumulacja - wim+sd (k)) nawet do **6.5 razy wyższą trwałość** względem tych na asfaltach **zwykłych** (różnice są zależne od parametrów objętościowych).

Autor rozprawy podkreśla, iż w przypadku projektowania omawianego typu konstrukcji dla konkretnego rozwiązania należy zastanowić się nad miejscem przeznaczenia drogi i oddziaływań, które będą w nim występować. w ten sposób można personalizować przypadek. w **większości sytuacji** warunki są złożone, dlatego też **zaleca się** analizy dla **wariantu z kumulacją: wim+sd (k)**. Jest to najniekorzystniejsza kombinacja (spośród omawianych) jaka może wystąpić w warunkach in-situ (nawet dla warstwy podbudowy) – zarówno woda jak i roztwór soli może przedostawać się do wnętrza konstrukcji np. poprzez wystąpienie niewidzialnych mikro spękań powstających podczas eksploatacji konstrukcji.

Ponownie podkreśla się, iż zastosowanie autorskiej metody do kryterium zmęczeniowego **umożliwia uwzględnianie** istotnych zmiennych tj. – woda i mróz, sól drogowa, regeneracja i rodzaj asfaltów w trwałości zmęczeniowej konstrukcji, które do tej pory **nie zostały wzięte pod uwagę**.

6.2.2. Zmiany trwałości konstrukcji katalogowych wywołane kumulacją oddziaływań, regeneracją i uwzględnionym rodzajem lepiszcza

Omówiony w poprzednim podrozdziale autorski sposób uwzględnienia rodzaju asfaltu, oddziaływań środowiskowych oraz regeneracji w kryterium zmęczeniowym nawierzchni znajduje również zastosowanie do prognozowania trwałości podatnych konstrukcji katalogowych - Typ B w zakresie KR 1-7. Rozprawę wzbogacono o analizy wszystkich poziomów KR rozpatrywanych przypadków oddziaływań. Aby przedstawić zmiany trwałości zmęczeniowej konstrukcji wynikające z uwzględnienia omawianych zmiennych stworzono tabelę (Tab. 50) zawierającą następujące informacje:

1. podstawowe katalogowe zakresy obciążeń (trwałości) dla kategorii ruchu oraz odpowiadająca im KR,
2. wartości referencyjne (ref) KR dla przyjętych parametrów objętościowych MMA,
3. wartości KR wynikające z przeprowadzonych obliczeń i uwzględnień (zgodnie z założeniami opisanymi w podrozdziale 6.2).

W ten sposób poprzez kategorię ruchu (KR) można czytelnie ukazać zmiany trwałości konstrukcji w zależności od odpowiedniego oddziaływania środowiskowego, regeneracji, rodzaju asfaltu oraz kombinacji parametrów objętościowych mieszanki. Ponadto łatwo jest wykazać do jakiej kategorii ruchu można daną konstrukcję zastosować lub czy można ją zoptymalizować.

Celem zwiększenia przejrzystości w Tab. 50 wprowadzono dodatkowo oznaczenia kolorystyczne wskazujące na: **zielony** – przyrost KR, **pomarańczowy** – bez zmian KR, **czerwony** – spadek KR. Zmiany są odnoszone do wartości referencyjnej (ref).

Poniżej zamieszcza się wykaz ważniejszych skrótów zastosowanych w Tab. 50:

ref – wariant referencyjny (powszechne podejście), KR zdefiniowana dla przyjętych parametrów objętościowych mieszanki,

h – wariant uwzględniający wyłącznie regenerację (tylko czynnik mechaniczny),

wim – wariant uwzględniający oddziaływanie wody i mrozu oraz regenerację,

sd – wariant uwzględniający oddziaływanie soli drogowej oraz regeneracji,

wim+sd (k) – wariant uwzględniający kumulację oddziaływań: wodę i mróz, sól drogową oraz regenerację.

Tab. 50: Zmiany KR konstrukcji podatnej typ B w zależności od analizowanego oddziaływania środowiskowego i regeneracji

Mieszanka na asfalcie	nr kombinacji	wariant	KR 1	KR 2	KR 3	KR 4	KR 5	KR 6	KR 7
			0.03 - 0.09	0.09 - 0.5	0.5 - 2.5	2.5 - 7.4	7.4 - 22.0	22.0 - 52.0	> 52.0
35/50 WMA	1	ref	KR 2	KR 3	KR 4	KR 5	KR 6	KR 7	KR 7
35/50 WMA	1	h	KR 2	KR 3	KR 4	KR 5	KR 6	KR 7	KR 7
35/50 WMA	1	wim	KR 2	KR 3	KR 3	KR 4	KR 5	KR 6	KR 7
35/50 WMA	1	sd	KR 2	KR 3	KR 3	KR 4	KR 5	KR 6	KR 7
35/50 WMA	1	wim+sd (k)	KR 2	KR 3	KR 3	KR 4	KR 5	KR 6	KR 6
35/50 WMA	2	ref	KR 2	KR 3	KR 3	KR 4	KR 5	KR 6	KR 6
35/50 WMA	2	h	KR 2	KR 3	KR 3	KR 4	KR 5	KR 6	KR 6
35/50 WMA	2	wim	KR 2	KR 2	KR 3	KR 4	KR 5	KR 5	KR 6
35/50 WMA	2	sd	KR 2	KR 2	KR 3	KR 4	KR 5	KR 5	KR 6
35/50 WMA	2	wim+sd (k)	KR 1	KR 2	KR 3	KR 3	KR 4	KR 5	KR 6
35/50 WMA	3	ref	KR 2	KR 2	KR 3	KR 4	KR 5	KR 5	KR 6
35/50 WMA	3	h	KR 2	KR 2	KR 3	KR 4	KR 5	KR 5	KR 6
35/50 WMA	3	wim	KR 1	KR 2	KR 3	KR 3	KR 4	KR 5	KR 5
35/50 WMA	3	sd	KR 1	KR 2	KR 3	KR 3	KR 4	KR 5	KR 5
35/50 WMA	3	wim+sd (k)	KR 1	KR 2	KR 3	KR 3	KR 4	KR 5	KR 5
35/50	1	ref	KR 2	KR 3	KR 4	KR 5	KR 6	KR 7	KR 7
35/50	1	h	KR 3	KR 3	KR 4	KR 5	KR 6	KR 7	KR 7
35/50	1	wim	KR 2	KR 3	KR 4	KR 5	KR 6	KR 7	KR 7
35/50	1	sd	KR 2	KR 3	KR 4	KR 5	KR 6	KR 7	KR 7
35/50	1	wim+sd (k)	KR 2	KR 3	KR 4	KR 5	KR 5	KR 6	KR 7
35/50	2	ref	KR 2	KR 3	KR 3	KR 4	KR 5	KR 6	KR 6
35/50	2	h	KR 2	KR 3	KR 3	KR 4	KR 5	KR 6	KR 7
35/50	2	wim	KR 2	KR 3	KR 3	KR 4	KR 5	KR 6	KR 6
35/50	2	sd	KR 2	KR 3	KR 3	KR 4	KR 5	KR 6	KR 6
35/50	2	wim+sd (k)	KR 2	KR 3	KR 3	KR 4	KR 5	KR 6	KR 6
35/50	3	ref	KR 2	KR 2	KR 3	KR 4	KR 5	KR 5	KR 6
35/50	3	h	KR 2	KR 2	KR 3	KR 4	KR 5	KR 5	KR 6
35/50	3	wim	KR 1	KR 2	KR 3	KR 3	KR 4	KR 5	KR 5
35/50	3	sd	KR 2	KR 2	KR 3	KR 4	KR 4	KR 5	KR 6
35/50	3	wim+sd (k)	KR 1	KR 2	KR 3	KR 3	KR 4	KR 5	KR 5
25/55-60	1	ref	KR 2	KR 3	KR 4	KR 5	KR 6	KR 7	KR 7
25/55-60	1	h	KR 3	KR 4	KR 5	KR 6	KR 7	KR 7	KR 7
25/55-60	1	wim	KR 3	KR 4	KR 5	KR 6	KR 7	KR 7	KR 7
25/55-60	1	sd	KR 3	KR 4	KR 5	KR 6	KR 7	KR 7	KR 7
25/55-60	1	wim+sd (k)	KR 3	KR 4	KR 5	KR 6	KR 7	KR 7	KR 7
25/55-60	2	ref	KR 2	KR 3	KR 3	KR 4	KR 5	KR 6	KR 6
25/55-60	2	h	KR 3	KR 3	KR 4	KR 5	KR 6	KR 7	KR 7
25/55-60	2	wim	KR 3	KR 3	KR 4	KR 5	KR 6	KR 7	KR 7
25/55-60	2	sd	KR 3	KR 3	KR 4	KR 5	KR 6	KR 7	KR 7
25/55-60	2	wim+sd (k)	KR 3	KR 3	KR 4	KR 5	KR 6	KR 7	KR 7
25/55-60	3	ref	KR 2	KR 2	KR 3	KR 4	KR 5	KR 5	KR 6
25/55-60	3	h	KR 2	KR 3	KR 4	KR 5	KR 6	KR 7	KR 7
25/55-60	3	wim	KR 2	KR 3	KR 4	KR 5	KR 5	KR 6	KR 7
25/55-60	3	sd	KR 2	KR 3	KR 4	KR 5	KR 6	KR 6	KR 7
25/55-60	3	wim+sd (k)	KR 2	KR 3	KR 3	KR 5	KR 5	KR 6	KR 7
25/55-80 HIMA	1	ref	KR 2	KR 3	KR 4	KR 5	KR 6	KR 7	KR 7
25/55-80 HIMA	1	h	KR 3	KR 4	KR 5	KR 6	KR 7	KR 7	KR 7
25/55-80 HIMA	1	wim	KR 3	KR 4	KR 5	KR 6	KR 7	KR 7	KR 7
25/55-80 HIMA	1	sd	KR 3	KR 4	KR 5	KR 6	KR 7	KR 7	KR 7
25/55-80 HIMA	1	wim+sd (k)	KR 3	KR 4	KR 5	KR 6	KR 7	KR 7	KR 7
25/55-80 HIMA	2	ref	KR 2	KR 3	KR 3	KR 4	KR 5	KR 6	KR 6
25/55-80 HIMA	2	h	KR 3	KR 4	KR 4	KR 5	KR 6	KR 7	KR 7
25/55-80 HIMA	2	wim	KR 3	KR 3	KR 4	KR 5	KR 6	KR 7	KR 7
25/55-80 HIMA	2	sd	KR 3	KR 4	KR 4	KR 5	KR 6	KR 7	KR 7
25/55-80 HIMA	2	wim+sd (k)	KR 3	KR 3	KR 4	KR 5	KR 6	KR 7	KR 7
25/55-80 HIMA	3	ref	KR 2	KR 2	KR 3	KR 4	KR 5	KR 5	KR 6
25/55-80 HIMA	3	h	KR 2	KR 3	KR 4	KR 5	KR 6	KR 7	KR 7
25/55-80 HIMA	3	wim	KR 2	KR 3	KR 4	KR 5	KR 6	KR 7	KR 7
25/55-80 HIMA	3	sd	KR 2	KR 3	KR 4	KR 5	KR 6	KR 7	KR 7
25/55-80 HIMA	3	wim+sd (k)	KR 2	KR 3	KR 4	KR 5	KR 6	KR 7	KR 7

Analizując dane dotyczące konstrukcji podatnej, typ B zawarte w Tab. 50, **szczególną uwagę zwrócono na wariant kumulacji – wim+sd (k)**, będący złożeniem wszystkich rozpatrywanych oddziaływań: woda i mróz + sól drogowa + regeneracja. Należy on do najgorszych przypadków, które mogą wystąpić w warunkach in-situ oddziaływujących na całą konstrukcję (nawet dla warstwy podbudowy) – np. wnikanie roztworu soli lub wody do wnętrza poprzez niewidzialne mikro-spękania lub dostrzegalne makro-spękania powstające podczas eksploatacji. Wyszczególniono 4 ważniejsze obserwacje.

1. **Konstrukcje** wykonane z mieszanek na bazie asfaltów **modyfikowanych** (25/55-60) lub **wysokomodyfikowanych** (25/55-80 HIMA) w **zdecydowanej większości**, niezależnie od rozpatrywanej kombinacji parametrów objętościowych lub oddziaływania środowiskowego **zapewniają wyższą kategorię ruchu** (o jeden poziom więcej) niż referencyjna. w przypadku wysokiej zawartości lepiszcza i małej wolnej przestrzeni (kombinacja 1) można osiągnąć zysk **przynajmniej o jedną KR więcej**. Takie konstrukcje mogą być poddane **optymalizacji grubości** warstwy np. podbudowy lub **zastosować chudsza już konstrukcję** na trudniejsze warunki ruchowe (**wyższą KR**).

Przykładowo: konstrukcja podatna, typ B KR4 (2.5-7.4) o zastosowanej mieszance z asfaltem 25/55-80 HIMA (kombinacja parametrów objętościowych nr 1) po uwzględnieniu stanu skumulowanego wim+sd (k) charakteryzuje się trwałością na poziomie KR6 (zysk o 2 KR). Konstrukcja może zatem zostać zastosowana do bardzo niekorzystnych warunków środowiskowo-ruchowych (np. drogi wyższych klas).

2. **Konstrukcje** wykonane z mieszanek na bazie **asfaltu zwykłego** przeznaczonego do **technologii WMA** (na ciepło) (35/50 WMA) charakteryzują się **niską trwałością**. Po uwzględnieniu stanu skumulowanego wim+sd (k) (najgorsza możliwość), dla większości kombinacji parametrów objętościowych **KR jest niższa niż referencyjna** (spadek o 1 KR). Przy kombinacji nr 3 osiąga się **stratę nawet o 2 KR** w stosunku do **katalogowego zakresu!** Konstrukcje wykonane z takich mieszanek **nie nadają się do dróg o trudnych warunkach środowiskowo-ruchowych**. w przypadku stosowania tego typu mieszanki, **konstrukcje należałoby odpowiednio pogrubić lub skorzystać z gotowego rozwiązania o przeznaczaniu na wyższą KR!**

Przykładowo: konstrukcja podatna, typ B KR7 (>52.0) o zastosowanej mieszance z asfaltem 35/50 WMA (kombinacja parametrów objętościowych nr 3) po uwzględnieniu stanu skumulowanego wim+sd (k) charakteryzuje się trwałością na poziomie KR5 (strata 2 KR). Konstrukcja nie może zatem zostać zastosowana do bardzo niekorzystnych warunków środowiskowo-ruchowych (np. drogi wyższych klas).

3. **Konstrukcje** wykonane z mieszanek na bazie **asfaltu zwykłego** (35/50) w **technologii na gorąco** w większości, dla kombinacji parametrów objętościowych 1 i 2 wykazują **neutralność zmian** – przynajmniej w **zakresach KR 1-5**. w przypadku niskich zawartości asfaltu i wysokiej wolnej przestrzeni (kombinacja parametrów nr 3) trwałość konstrukcji w większości sytuacji **jest mniejsza** niż wymagana z zakresu katalogowego o **jedną KR**. Po uwzględnieniu stanu skumulowanego **dla wysokich KR 6-7** obserwuje się spadek **nawet o 2 poziomy KR** w stosunku do katalogowego zakresu. Na tej podstawie stwierdza się, iż mieszanki na bazie tych asfaltów nie powinno stosować się do dróg o trudnych warunkach środowiskowo-ruchowych. w przypadku stosowania

tego typu mieszanki o niskiej zawartości asfaltu, **konstrukcje należałoby odpowiednio pogrubić lub skorzystać z gotowego rozwiązania o przeznaczaniu na wyższą KR!**

Przykładowo: konstrukcja podatna, typ B KR7 (>52.0) o zastosowanej mieszance z asfaltem 35/50 (kombinacja parametrów objętościowych nr 3) po uwzględnieniu stanu skumulowanego wim+sd (k) charakteryzuje się trwałością na poziomie KR5 (strata 2 KR). Konstrukcja nie może zatem zostać zastosowana do bardzo niekorzystnych warunków środowiskowo-ruchowych (np. drogi wyższych klas).

4. **Konstrukcje katalogowe KR 6-7** wykonane z mieszanek na **bazie asfaltów zwykłych** na gorąco lub na ciepło **wymagają wysokiej zawartości asfaltu i niskiej wolnej przestrzeni** (kombinacja parametrów 1), aby w trudnych warunkach środowiskowo-ruchowych **zapewnić trwałość na tym poziomie KR**. w przypadku **polimero-asfaltów, nie wyszczególnia się zastrzeżeń** stosowania ze względu na KR.

Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, iż **autorska metoda** uwzględnienia **oddziaływań środowiskowych, regeneracji oraz rodzaju asfaltu** pozwala **skutecznie** prognozować trwałość konstrukcji katalogowych wyrażonych przez **Kategorię Ruchu (KR)**. Ponadto **umożliwia ocenić**, w oparciu o analizowane oddziaływania, rodzaj asfaltu i znane parametry objętościowe mieszanki **jak zmieni się KR** konstrukcji oraz w jakim przypadku można wdrożyć **optymalizację grubości konstrukcji** (odchudzenie), kiedy należy ją **pogrubić lub zastosować rozwiązanie katalogowe przeznaczone odpowiednio do wyższej / niższej KR**. w rozważaniach wykazano również, iż oddziaływania **środowiskowe oraz regeneracja** wyrażona przez najgorszy możliwy przypadek wim+sd (k) **jest istotna** w ocenie trwałości konstrukcji, a wpływ tych czynników **znaczący** (zmiana KR o jeden lub więcej poziomów).

Do **istotnych osiągnięć autora** należy również wykazanie, iż **konstrukcje** z mieszanek na bazie asfaltów **modyfikowanych**, a w **szczególności wysokomodyfikowanych** wykazują nawet **do 2 KR** więcej wyższą trwałość względem tych na bazie **lepiszczy zwykłych** na gorąco lub na ciepło. Ich **stosowalność nie znajduje ograniczeń**, a konstrukcje mogą być **optymalizowane bez ryzyka spadku trwałości w przypadku ciężkich warunków środowiskowo-ruchowych**. w przypadku **konstrukcji** na bazie **asfaltów zwykłych** w technologii na gorąco lub na ciepło stwierdzono, iż **nie nadają się do stosowania dla dróg o KR 6-7** z uwagi na **niższą trwałość konstrukcji niż wymagana** (przy niskich zawartościach asfaltu i wysokich wolnej przestrzeni). Udowodniono również, iż **konstrukcje** na bazie **asfaltów zwykłych w technologii WMA** są **bardziej podatne** (mniej trwałe) na złożone warunki środowiskowo-ruchowe w stosunku do **zwykłych na gorąco**.

6.3. Podsumowanie rozważań związanych z konstrukcją nawierzchni

Na podstawie przeprowadzonych analiz w rozdziale 6 omówiono dwa bloki tematyczne związane z oceną trwałości zmęczeniowej konstrukcji nawierzchni. Pierwszy dotyczył porównania ze sobą dwóch konstrukcji różniących się ułożeniem warstw (rozwiązania katalogowego – ref oraz łączonej warstwy podbudowy z wiążącą). Zagadnienie przedstawiono na wybranym przykładzie - podatna, typ B, KR 5, korespondującym z wcześniejszymi badaniami laboratoryjnymi (mieszanki A – D, na każdym poziomie K). Ponadto w analizie zaproponowano autorską modyfikację kryterium zmęczeniowego nawierzchni uwzględniającą rodzaj asfaltu stosowany do mieszanki przeznaczonej na podbudowę. Drugi temat dotyczył uwzględnienia oddziaływań środowiskowych (woda i mróz, sól drogowa, kumulacja – woda i mróz + sól drogowa), regeneracji i rodzaju asfaltu w kryterium zmęczeniowym. Rozważania wzbogacono o analizy trwałości konstrukcji katalogowych typ, B (wybranej - KR 5 i pozostałych z zakresu KR 1-7) z wzięciem dodatkowo pod uwagę różnych kombinacji parametrów objętościowych. Na potrzeby rozważań wykonano modelowanie w specjalistycznym programie Abaqus wykorzystującym metodę elementów skończonych.

Pierwszy temat koncentrował się na wzajemnym porównaniu dwóch rodzajów konstrukcji – typowej katalogowej (z podziałem na warstwę wiążącą) oraz „łączonej W+P” (warstwą podbudowy i wiążącą wykonanej z tej samej mieszanki przeznaczonej na podbudowę). Na podstawie modelowania wykazano, iż wartości poziomych odkształceń objętościowych są większe dla konstrukcji „uniwersalnej” niż typowej – mniejsza sztywność warstwy wiążącej zastąpionej mieszanką z podbudowy. Efektem jest spadek trwałości zmęczeniowej konstrukcji „łączonej W+P” od 0.8% do 6.7 % względem katalogowej, który zanika wraz ze wzrostem modułu sztywności MMA stosowanej do podbudowy. Podkreślono, iż nie są to zmiany kluczowe. Ponadto nadmieniono, iż w ujęciu ekonomicznym stosowalność mieszanek do dwóch warstw jednocześnie jest zasadna, ponieważ umożliwia redukcję kosztów inwestycji np. na odsadzkach lub produkcji masy.

W ramach pierwszego tematu omówiono również problem kryteriów zmęczeniowych, które w powszechnym podejściu nie ujmują rodzaju stosowanego lepiszcza z uwagi na trwałość zmęczeniową. Wykazano, iż dla podobnych parametrów materiałowych mieszanek A – D (moduł sztywności) kryteria nie różnicują trwałości konstrukcji z uwzględnieniem odporności zmęczeniowej samych asfaltów aplikowanych do MMA w konstrukcji. Na podstawie wcześniejszych rezultatów autor rozprawy zaproponował wprowadzenie do kryterium nawierzchni współczynnika kalibracyjnego n , wyznaczonego empirycznie. Parametr został określony na podstawie badań zmęczeniowych (będących nośnikiem informacji o odporności materiału na to zjawisko). Autor podkreślił, iż ustalenie różnic pomiędzy MMA ze względu na rodzaj asfaltu jest właściwe, tylko gdy zestawiane mieszanki charakteryzują się identycznym składem ziarnowym oraz zawartością lepiszcza – zbadane mieszanki spełniły ten warunek. w ten sposób zróżnicowano trwałość zmęczeniową całej konstrukcji wykonanych z mieszanek A – D (B referencyjna, asfalt zwykły 35/50) uwzględniając rodzaj asfaltu. Wykazano skuteczność proponowanego rozwiązania.

Na podstawie pozyskanych rezultatów wynikających z wdrożenia autorskiego współczynnika kalibracyjnego n udowodniono, iż trwałość konstrukcji nawierzchni jest nawet do 4.76 razy większa w przypadku zastosowania asfaltów modyfikowanych i wysokomodyfikowanych oraz do 27% mniejsza w stosunku do MMA wykonanych w technologii WMA (na ciepło). w przypadku wykorzystania materiałów C (25/55-60) i D (25/55-80 HIMA) jej grubość może zostać znacząco zredukowana (wymagane kolejne modelowania i analizy). w przypadku konstrukcji z mieszanek na bazie lepiszczy zwykłych A (35/50 WMA) lub B (35/50) optymalizacja dla zbadanych parametrów objętościowych mieszanki jest możliwa, lecz w mniejszym zakresie. Autor udowodnił również, iż modyfikacja

matrycy asfaltowej polimerem SBS w mieszance pozytywnie wpływa na trwałość nie tylko materiału, lecz również całej konstrukcji (przyrost kategorii ruchu – KR określonej zakresem katalogowym).

Drugi temat dotyczył uwzględnienia: oddziaływań środowiskowych (woda i mróz, sól drogowa, kumulacja – woda i mróz + sól drogowa), zjawiska regeneracji oraz rodzaju asfaltu w kryterium zmęczeniowym stosowanym do określania trwałości konstrukcji nawierzchni. Zagadnienie podzielono na dwa podrozdziały, które poprzedzono wstępem związanym z przyjętymi założeniami. Należą do nich: analizy z użyciem propozycji autora na przykładzie wybranej konstrukcji (podatna, typ B, KR 5) oraz zmian trwałości konstrukcji typu B w zakresie KR 1-7 (wszystkie konstrukcje). Do rozważań wzięto pod uwagę trzy kombinacje parametrów objętościowych oraz 4 rodzaje asfaltów stosowane do mieszanki w podbudowie (35/50 WMA, 35/50 (referencyjny), 25/55-60, 25/55-80 HIMA). Wykorzystano dane z poprzednich badań np. rodzaj asfaltu – współczynnik n .

W pierwszym podrozdziale przedstawiono autorską metodykę i formuły pozwalające uwzględnić oddziaływania środowiskowe, regenerację i rodzaj asfaltu w kryterium za pomocą wcześniej zaproponowanego wskaźnika wypadkowego RI i współczynnika n . Na podstawie przeprowadzonych analiz wykazano, iż oddziaływania środowiskowe (środowiskowe + regeneracja) istotnie wpływają na trwałość konstrukcji. Udowodniono, iż dla najgorszej kombinacji oddziaływań (wim+sd (k)) skrajny spadek trwałości dochodził aż do 44.81 % - mieszanki z asfaltem zwykłym WMA. Konstrukcja z MMA na bazie asfaltów modyfikowanych lub wysokomodyfikowanych charakteryzowała się znacząco mniejszym spadkiem (na poziomie kilku procent) wykazując odporność na te oddziaływania. Stwierdzono również, iż wpływ oddziaływań środowiskowych i regeneracji jest uzależniony od kombinacji parametrów objętościowych mieszanki – im lepsza jest więcej, a wolnych przestrzeni mniej tym konstrukcja charakteryzuje się większą odpornością na czynniki środowiskowe. Ponadto podkreślono, iż regeneracja w złożonych warunkach środowiskowych nie jest w stanie skompensować negatywnego wpływu oddziaływania wody i mrozu oraz soli drogowej.

Do istotnych osiągnięć autora należało również wykazanie, iż konstrukcja z mieszanki na bazie asfaltów modyfikowanych i wysokomodyfikowanych cechuje się nawet do: 4.67 razy (25/55-60) i 6.5 razy (25/55-80 HIMA) większą trwałością w trudnych warunkach środowiskowo-ruchowych (wim+sd (k)) względem tych na bazie asfaltów zwykłych (na gorąco lub WMA). Podkreślono, iż konstrukcję z polimero-asfaltami można bez przeszkód poddać optymalizacji grubości warstwy (zapewniają od 0-2 KR większą trwałość), natomiast te ze zwykłymi należy odpowiednio przeprojektować, gdyż wykazują mniejszą trwałość niż wymagana (zakres katalogowy) – 0-1 KR mniej. Stwierdzono, iż autorska metoda należy do skutecznych, pozwalając dokładniej prognozować trwałość konstrukcji z uwzględnieniem oddziaływań środowiskowych (woda i mróz, sól drogowa, kumulacja – woda i mróz + sól drogowa), regeneracji oraz rodzaju asfaltu. Zasugerowano również, iż analizy trwałości konstrukcji należy prowadzić z uwzględnieniem kumulacji oddziaływań (woda i mróz + sól drogowa + regeneracja + rodzaj asfaltu), która może (jako najgorszy przypadek) wystąpić w stanie in-situ. Podkreślono, iż uwzględniając omawiane zmienne w kryterium zmęczeniowym osiągnięto kolejne cele rozprawy.

W drugim podrozdziale zaprezentowano autorską tabelę stworzoną w oparciu o obliczenia i modelowanie konstrukcji katalogowych, typ B na KR 1-7. w tabeli trwałość konstrukcji wyrażono przez KR (kategorie ruchu). Przedstawiono w niej katalogowe zakresy KR zamodelowanych konstrukcji, wartości referencyjne KR odnoszące się do przyjętych kombinacji parametrów objętościowych mieszanki zamodelowanych konstrukcji katalogowych oraz wartości KR wynikające z zastosowanej autorskiej metody uwzględniającej oddziaływania środowiskowe, regenerację i rodzaj asfaltu w kryterium. Na podstawie stworzonej tabeli przeprowadzono jej analizy skupiając szczególną uwagę na oddziaływaniu

skumulowanym (woda i mróz + sól drogowa + regeneracja). Wykazano, iż metoda autora pozwala skutecznie prognozować i oceniać trwałość konstrukcji podatnych typ B w pełnym zakresie KR (1-7), które wykonane są z mieszanek o różnych rodzajach asfaltu uwzględniających czynniki środowiskowe. Udowodniono również, iż kumulacja oddziaływań znacząco wpływa na trwałość konstrukcji.

Do istotnych osiągnięć autora należy wykazanie, iż konstrukcje z mieszanek na bazie asfaltów modyfikowanych oraz w szczególności wysokomodyfikowanych pozwalają zapewnić ich trwałość od 1 do 2 KR większą w trudnych warunkach środowiskowo-ruchowych, co pozwala je optymalizować lub wykorzystywać gotowe rozwiązania katalogowe przeznaczone na niższe KR do wyższych KR. Stwierdzono również, iż konstrukcje z mieszanek na bazie asfaltów zwykłych są wrażliwe na czynniki środowiskowe, a w przypadku niskiej zawartości asfaltu i wysokiej wolnej przestrzeni konstrukcje wykonane z nich nie są w stanie zapewnić wymaganego (względem katalogu) poziomu trwałości opisanego przez KR. Konstrukcje te są mniej trwałe - nawet do 2 KR mniej i nie zaleca się stosowania tych lepiszczy do warstwowych układów katalogowych przeznaczonych na KR 6-7.

Autor rozprawy obszernie omówił temat związany z uwzględnieniem oddziaływań środowiskowych, regeneracji i rodzaju asfaltu w kryterium wykazując skuteczność proponowanych rozwiązań osiągając w ten sposób kolejne cele rozprawy odnosząc się nie tylko do tematu mieszanek, lecz również konstrukcji nawierzchni.

7. Podsumowanie i wnioski końcowe

Część merytoryczna rozprawy składa się z trzech elementów: przeglądu stanu wiedzy, badań laboratoryjnych i analiz oraz przedstawienia autorskich rozwiązań i formuł związanych z uwzględnieniem zjawiska regeneracji oraz oddziaływań środowiskowych (woda i mróz, sól drogowa, ich kumulacji – woda i mróz + sól drogowa) w trwałości zmęczeniowej mieszanek i konstrukcji podatnych typu B.

W przeglądzie stanu wiedzy wyczerpująco omówiono tematykę:

1. mieszanek mineralno-asfaltowych, technologii ich wykonania oraz nowych receptur lepiszczy zawierających polimer SBS),
2. trwałości zmęczeniowej mieszanek i konstrukcji nawierzchni,
3. zjawiska regeneracji mieszanek i innych oddziaływań (woda i mróz, sól drogowa), wpływających na ich trwałość zmęczeniową.

Autor wykazał istotne luki w aktualnym stanie wiedzy, w szczególności w temacie regeneracji (healingu) i jej wpływu na trwałość zmęczeniową MMA.

W części eksperymentalno-badawczej przedstawiono autorski plan badawczy podzielony na „bloki” - badań podstawowych oraz zaawansowanych. Przedstawiono wyniki badań czterech mieszanek betonu asfaltowego AC 22 przeznaczonego dla kategorii ruchu KR 5-7. Badane mieszanki charakteryzowały się tym samym składem granulometrycznym i zawartością lepiszcza. Różniły się natomiast rodzajem zastosowanego asfaltu – 35/50 WMA (mieszanka A), 35/50 (mieszanka B), 25/55-60 (mieszanka C) i 25/55-80 HIMA (mieszanka D), co umożliwiło porównanie mieszanek m. in. w zakresie: wpływu modyfikacji matrycy asfaltowej polimerem SBS na trwałość mieszanek oraz zastosowanej technologii wykonania – WMA (na ciepło) / HMA (na gorąco). Każdą z mieszanek zbadano przy trzech różnych poziomach zawartości asfaltu w mieszance wyrażonych przez bezwymiarowy wskaźnik wypełnienia K (zawartość procentowa lepiszcza umieszczona jest w nawiasie): 2.95 (4.24 %), 2.80 (4.03%), 2.65 (3.82%).

W ramach badań i analiz bloku podstawowego wszystkie zaprojektowane recepty sprawdzono pod kątem wymagań technicznych stawianych warstwie podbudowy i wiążącej dla ruchu ciężkiego KR5-KR7. Przeprowadzono badania zawartości wolnej przestrzeni, odporności na wodę i mróz (ITSR), odporności na deformacje trwałe wg WT-2. Ponadto sprawdzono warunek min. zawartości asfaltu w mieszance. Stwierdzono, iż zaprojektowane mieszanki mogą być z powodzeniem stosowane do dwóch warstw jednocześnie, w tej samej konstrukcji nawierzchni. Autor zasygnalizował zalety takiego projektowania mieszanek, związane np. z oszczędnościami na odsadzkach lub pracą konstrukcji. Ponadto na podstawie przeprowadzonych badań wykazano, iż obecne regulacje związane z projektowaniem mieszanek w kontekście min. zawartości lepiszcza wymagają zmian (bardziej elastycznego podejścia), ponieważ materiał może nie spełniać wymogu teoretycznego np. w zakresie minimalnej zawartości lepiszcza, a jednak może być odpowiedni jakościowo i spełniać wymagania techniczne.

Autor wykonał również analizę porównawczą mieszanek. Stwierdzono, iż najkorzystniejsze wyniki badań, niezależnie od zawartości lepiszcza w mieszance, osiągnęte są dla mieszanek na bazie asfaltu wysokomodyfikowanego. Udowodniono, iż modyfikacja matrycy asfaltowej MMA polimerem SBS umożliwia znacznie większą odporność np. na działanie wody i mrozu, lub na koleinowanie. Ponadto stwierdzono, iż dla mieszanek z asfaltem modyfikowanym możliwe jest wdrożenie dalszej optymalizacji zawartości lepiszcza, gdyż otrzymane rezultaty zapewniają zapas w stosunku do wymogów minimalnych. Autor ponownie podniósł kwestię aktualnych regulacji WT-2, które nie są dostosowane do obecnie

produkowanych receptur lepiszczy stosowanych w MMA. Zaproponowano, iż należałoby je odpowiednio skorygować umożliwiając większą swobodę optymalizacji składu lub grubości warstw konstrukcji w mechanistyczno-empirycznym projektowaniu.

Zestawiając mieszanki wyprodukowane w różnych technologiach produkcji technologia „na ciepło” (WMA) wypadła jakościowo słabiej w stosunku do technologii „na gorąco” (HMA). Udowodniono, iż mieszanki WMA wykazują znacznie niższe wartości zbadanych cech jakościowych (odporność na wodę i mróz, deformacje trwałe), jednocześnie wykazując wysoką wrażliwość zmian przy optymalizacji zawartości lepiszcza np. przyrost zawartości wolnej przestrzeni.

Wyniki badań umożliwiły ustalić wzajemne korelacje pomiędzy zawartością asfaltu, a wolną przestrzenią wszystkich zbadanych MMA. Autor wykazał, iż dla przyjętej metodyki projektowania i wykonania MMA pozyskano mieszanki, w których wzajemne zależności (np. procentowa zawartość lepiszcza od wskaźnika *ITSR* lub inne) można skutecznie opisać liniowym modelem regresji. Modele mieszanek charakteryzowały się pomiędzy sobą wzajemnym rozsunięciem – różnice jakościowe wynikające z zastosowanego lepiszcza oraz kątem nachylenia wyrażającym prędkość zmian. Podkreślono, iż znajomość trendu zmian zestawianych cech MMA umożliwia ocenić wpływ lepiszcza na cechy jakościowe mieszanek (porównanie kilku). Ponadto pozwala łatwiej optymalizować skład (operując np. zawartością lepiszcza) celem zapewnienia wymaganych cech jakościowych w odniesieniu do bieżących regulacji.

W drugim bloku badawczym – „badania bloku zaawansowanego” przeanalizowano mieszanki A – D stosując identyczne (jak poprzednio) poziomy wskaźnika wypełnienia ($K = 2.95, 2.80$ i 2.65). Rozważania podzielono na pięć ogólnych tematów dotyczących:

1. analizy modułu sztywności i kąta fazy mieszanek A-D,
2. analizy trwałości zmęczeniowej mieszanek A-D,
3. eksperymentalnych pomiarów temperatury,
4. analizy regeneracji mieszanek A-D,
5. uwzględnienia wyników mieszanek A-D w trwałości MMA.

Dodatkowo rozprawę wzbogacono o rozważania wpływu oddziaływań środowiskowych – woda i mróz oraz sól drogowa na zmiany modułu i kąta fazy, trwałość i regenerację. Badania przeprowadzono według autorskiej metodyki. Podkreślono, iż oddziaływania te oraz regeneracja nie są uwzględniane np. w powszechnej ocenie trwałości zmęczeniowej MMA co stanowi poważny problem związany z jej niedoszacowaniem.

Do testów zastosowano metodę belki czteropunktowo zginanej dobrze aproksymującą warunki in-situ. Zaaplikowano warunek kontrolowanego odkształcenia. Temperatura badania wynosiła $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Częstotliwość obciążania wynosiła 10 Hz .

W ramach badań modułu sztywności stwierdzono, iż mieszanki na bazie asfaltu modyfikowanego charakteryzowały się najniższą (niezależnie od poziomu K) wartością modułu sztywności. Stwierdzono, iż modyfikacja matrycy asfaltowej polimerem SBS wraz wzrostem stopnia jej modyfikacji doprowadza do „uelastyczniania” się mieszanki, efektem czego jest niższa wartość modułu sztywności. Autor podkreślił, iż stosowalność tego typu lepiszczy do mieszanek typu wysoki moduł sztywności, może być ograniczona.

Wykonując analizę porównawczą wpływu oddziaływań: woda i mróz oraz sól drogowa na zmiany modułu sztywności mieszanek stwierdzono, iż wywołują one degradację materiału opisaną przez spadek wartości modułu (w skrajnych wypadkach dochodzący nawet do ok. 15%). Odnotowano, iż zmniejszenie zawartości lepiszcza w mieszance powoduje zwiększenie wrażliwości badanych mieszanek na oddziaływanie danego czynnika. Najmniejszą wrażliwość (spadek) wykazywały mieszanki na bazie asfaltów modyfikowanych (D i C). Autor wykazał,

iz modyfikacja matrycy asfaltowej polimerem SBS skutecznie podnosi odporność materiału przed wodą i mrozem oraz solą drogową – niezależnie od rozpatrywanego poziomu zawartości asfaltu (wysokość degradacji wynosiła od 0.19 – 9.74% w zależności od poziomu K i rozpatrywanego czynnika). Ponadto zestawiając ze sobą mieszanki w technologiach WMA i HMA oceniono, iż technologia na gorąco pozwala wykonać nawet 3 krotnie bardziej odporne MMA na spadek modułu sztywności wywołany oddziaływaniami wody i morzu lub soli drogowej.

Badania zmęczeniowe mieszanek wykonano na dwóch poziomach obciążenia - $130 \mu\epsilon$ ($K = 2.95$, tylko oddziaływanie mechaniczne) i $200 \mu\epsilon$ (wszystkie poziomy K i oddziaływania – mechaniczne, środowiskowe). Niższy poziom obciążenia potraktowano jako „pilotażowy” z udziałem, którego sprawdzono, czy testowane mieszanki uzyskają w zadanych warunkach min. 1.0 mln cykli (miara trwałości korespondująca z wystąpieniem 50% spękań na powierzchni nawierzchni w przypadku tej wartości wymuszenia). Wszystkie mieszanki wykazały znacznie wyższy próg trwałości – powyżej 3.0 mln cykli. w przypadku mieszanek na bazie asfaltów modyfikowanych C i wysoko modyfikowanych D, wartość modułu ustabilizowała się średnio po spadku jego wartości o 15 % - C i 4% D – nie zostało osiągnięte kryterium zmęczeniowe (spadek początkowej wartości modułu o 50%). Badania przerwano. Mieszanki A i B osiągnęły kryterium zmęczeniowe. Na podstawie wstępnych badań zmęczeniowych autor wykazał, iż modyfikacja matrycy asfaltowej polimerem SBS pozwala skutecznie zwiększyć trwałość zmęczeniową względem asfaltów zwykłych. Stwierdzono również, iż aby wywołać zmęczenie celem osiągnięcia kryterium należy zadać odpowiednio większą wartość impulsu wymuszenia. Do przeprowadzenia docelowych badań dla wszystkich mieszanek zastosowano jednakowy poziom obciążenia równy $200 \mu\epsilon$, który okazał się skuteczny w przypadku mieszanek C i D (osiągnięto kryterium).

Niezależnie od rozpatrywanego poziomu K dla impulsu obciążenia wynoszącego $200 \mu\epsilon$ najtrwalszą mieszanką była D, która charakteryzowała się nawet 6 krotnie większą trwałością względem A, 4.5 krotnie względem B i 1.35 krotnie względem C (dla $K = 2.95$). Dla niższych K stosunek ulegał zmniejszeniu. Na podstawie pozyskanych wyników wykazano, iż modyfikacja matrycy asfaltowej polimerem SBS pozwala skutecznie (nawet kilkukrotnie) zwiększyć trwałość zmęczeniową MMA.

Porównując mieszanki wykonane w technologii HMA (B) i WMA (A) ze względu na trwałość zmęczeniową ustalono, iż zdecydowanie lepszą jest na gorąco – pozwala wytworzyć bardziej odporny zmęczeniowo materiał. Różnice w cyklach zmieniały się od 8% ($K = 2.65$) do max. 25% ($K = 2.95$) – im większa zawartość lepiszcza tym rozbieżności stają się większe.

W ramach badań ustalono również wpływ oddziaływania wody i mrozu oraz soli drogowej na trwałość zmęczeniową mieszanek. Degradację mieszanek (w ujęciu trwałości) wyrażono jako procentowy spadek trwałości zmęczeniowej (w cyklach) zestawu poddanego oddziaływaniu woda i mróz lub sól drogową, a zestawowi referencyjnemu (tylko wpływ mechaniczny). Spośród wszystkich, najmniejszą wrażliwość na działanie wody i mrozu lub soli drogowej wykazała mieszanka D z HIMA. Udowodniono, iż bardzo wysoki stopień modyfikacji matrycy polimerem SBS skutecznie zabezpiecza mieszankę przed spadkiem trwałości zmęczeniowej wynikającej z oddziaływania wody i mrozu (im bardziej zmodyfikowana matryca tym lepszy efekt). Autor na podstawie badań wykazał, iż degradacja mieszanek wywołana oddziaływaniem wody i mrozu lub soli drogowej (zmiany trwałości zmęczeniowej) jest znacząca (przekraczająca nawet kilkanaście %) i zależna od zawartości lepiszcza, dlatego należy ją uwzględnić w wypadkowej ocenie materiału.

Po zestawieniu ze sobą mieszanek w technologii WMA (A) i HMA (B) stwierdzono, iż wykonanie MMA w technologii na gorąco umożliwia wyprodukowanie nawet do 4.6 krotnie odporniejszej (trwałość zmęczeniowa) mieszanki na oddziaływania środowiskowe względem tej technologii na ciepło.

W kolejnych częściach rozprawy uwagę poświęcono eksperymentalnym pomiarom temperatury. Umożliwiły one ustalić warunki wdrożenia zjawiska regeneracji w laboratorium. Eksperymentalne badania przeprowadzono wykonując pomiary:

1. temperatury powietrza w cieniu (tylko wartość szczytowa),
2. powierzchni dwóch płyt mieszanek A i D ($K = 2.95$),
3. przygotowanej konstrukcji (wykonanej tylko z jednego rodzaju mieszanki A) - wybrano typową konstrukcję katalogową na KR 5 o łącznej grubości warstw 32.5cm.

Na podstawie badań temperatury powierzchni wykazano, iż mieszanka na bazie asfaltu zwykłego (35/50 WMA - A) szybciej ulega nagraniu od tej z asfaltem wysokomodyfikowanym. Różnica zarejestrowanej szczytowej temperatury wynosiła 4.2°C. Stwierdzono również, iż krzywe badania są do siebie podobne - obydwie przypominały sinusoidę. Zaobserwowano również, iż w wyniku nagrzania powierzchni mieszanki wysoka temperatura utrzymywała się przez długi okres czasu, co pozwoliło wykorzystać informacje do zaprojektowania rampy temperaturowej związanej z badaniami poświęconymi regeneracji w laboratorium.

W sposób jednoczesny wykonano pomiar w przygotowanej konstrukcji podatnej (KR 5) na różnym poziomie zagłębienia czujników. z badań ustalono, iż pomiędzy szczytową temperaturą powierzchni, a tą na głębokości 31.5cm występuje rozsuniecie czasowe wykresów, które wynosiło około 4.0 h (pierwszy dzień) oraz 3.5 h (dzień drugi). Ponadto stwierdzono, iż wewnątrz konstrukcji po nagraniu, temperatura jest niższa jednak dłużej utrzymuje się w stosunku do powierzchni. Ustalono również, iż krzywa pomiaru jest spłaszczona – mniejsza prędkość zmian temperatury. Stwierdzono, iż pozyskane dane są istotne i pozwalają określić warunki badania regeneracji mieszanek w laboratorium, szczególnie tych przeznaczonych do wewnętrznych warstw konstrukcji. Dane uwzględniono dalej w rozważaniach poświęconych zjawisku regeneracji.

Następnie w rozprawie omówiono temat regeneracji i jej wpływu na trwałość zmęczeniową (z dodatkowym uwzględnieniem oddziaływania wody i mrozu oraz soli drogowej) mieszanek. Rozważania podzielono na 5 podtematów.

1. Ustalenie założeń badawczych.
2. Przyjęcie sposobu oceny regeneracji w MMA.
3. Analizy regeneracji wywołanej: okresem odpoczynku lub/i wysoką temperaturą.
4. Analizy podgrzania (okres odpoczynku + podgrzanie) na trwałość zmęczeniową mieszanek.
5. Analizy wykresu: zmian modułu sztywności od liczby cykli wybranej mieszanki - analiza makroskopowa materiału omawianych przypadków.

W pierwszej kolejności na podstawie uzyskanych pomiarów, danych meteorologicznych (najwyższych rejestrowanych temperatur), prognoz i opinii synoptyków w zakresie globalnego ocieplenia (przyrostowego trendu temperatury dla okresów letnich) określono temperaturę i czas pielęgnacji mieszanek do badań związanych z regeneracją. Przedstawiono założenia, autorską metodykę badań i opracowania wyników poświęconych regeneracji w laboratorium, korespondującą warunkami in-situ w nawierzchni.

W ramach przeprowadzonych badań mieszanek do oceny wpływu regeneracji na zmiany wartości modułu i trwałość zmęczeniową opracowano trzy wskaźniki regeneracji wyrażające procentowe zmiany: 1 - modułu sztywności, 2 – przyrostu liczby cykli ustalanych względem kryterium spadku początkowej wartości zregenerowanego modułu o 50% ($E_{0\ 50\% H}^*$)

oraz 3 – przyrostu liczby cykli dla kryterium autora- $E_{k(1)H}^*$. Wprowadzone kryterium autora zostało szczegółowo omówione.

Po określeniu sposobu oceny regeneracji przeprowadzono analizę trzech kombinacji czynników regenerujących MMA. Należały do nich:

1. zmęczenie - zmęczenie (brak lub bardzo mały okres odpoczynku) – skrótowo **zm-zm**,
2. zmęczenie – okres odpoczynku – zmęczenie (długi okres odpoczynku) – skrótowo **odp**,
3. zmęczenie – wygrzewanie (wygrzewanie + okres odpoczynku) – zmęczenie – skrótowo **wygrz+odp**.

W pierwszej kolejności oceniono dwa kryteria zmęczeniowe zastosowane do drugiego badania zmęczeniowego – autorskie $E_{k(1)H}^*$ oraz $E_{0\ 50\%H}^*$. Na podstawie otrzymanych rezultatów wykazano, iż kryterium $E_{0\ 50\%H}^*$ doprowadza do zawyżenia trwałości względem autorskiego w szczególności nawet do 6.12% - przypadki regeneracji zm-zm i odp. Dla wygrz+odp wyniki przyrostu trwałości zbliżają się do siebie. Trend był podobny dla wszystkich zbadanych MMA niezależnie od rodzaju zawartego asfaltu. Na podstawie analizy porównawczej wyników badań zmęczeniowych trzech czynników wywołujących regenerację stwierdzono, iż kryterium autora dokładniej opisuje właściwy punkt zniszczenia – zgodny z wartością modułu pierwszego badania zmęczeniowego. Pozwala ono skuteczniej ustalić poziom regeneracji materiału dla dowolnego ocenianego sposobu.

Następnie zestawiono ze sobą trzy kombinacje wdrażania healingu. Udowodniono, iż w przypadku zastosowania okresu odpoczynku (krótkiego lub długiego) regeneracja zachodzi, wartość modułu sztywności wzrasta (nawet o 36%), lecz efekt przyrostu trwałości zmęczeniowej jest pomijalnie mały (max. 0.24%). w przypadku wygrzewania połączonego z okresem odpoczynku mieszanki wykazały istotną regenerację objawiającą się niemal pełnym przyrostem wartości modułu oraz istotnym – wynoszącym nawet do 52% przyrostem trwałości zmęczeniowej. Ponadto ustalono, iż regeneracja wartości modułu oraz trwałości w cyklach jest zależna od rodzaju zastosowanego asfaltu. Badania wykazały, iż mieszanki na bazie polimero-asfaltów charakteryzują się nawet 3.89 razy niższą zdolnością regeneracji (trwałość zmęczeniowa) względem zwykłych. Stwierdzono, iż jest to wpływ modyfikacji matrycy asfaltowej polimerem SBS, którego wzrost ilości w matrycy podnosi temperaturę mięknienia. Na podstawie przeprowadzonych analiz do rozważań nad regeneracją przyjęto trzeci przypadek kondycjonowania próbek - (zmęczenie – wygrzewanie (wygrzewanie + okres odpoczynku) – zmęczenie).

Badania healingowe mieszanek A-D przeprowadzono uwzględniając poziomy zawartości lepiszcza oraz oddziaływania środowiskowe – woda i mróz oraz sól drogowa. Na podstawie badań ustalono wpływ regeneracji na moduł sztywności oraz trwałość zmęczeniową stosując autorskie wskaźniki HI określające zdolność mieszanki do regeneracji.

Na podstawie wyników zestawu referencyjnego (tylko oddziaływanie mechaniczne), stwierdzono, iż mieszanki A - D wykazały zróżnicowaną zdolność regeneracji (wskaźnik $HI_{E_0}^*$) wyrażoną przez przyrost modułu sztywności. Zauważono, iż jest ona zależna od zawartości i rodzaju lepiszcza zastosowanego w materiale oraz oddziaływania zewnętrznego. Spośród zbadanych MMA najlepiej wypadła mieszanka D na bazie asfaltów wysokomodyfikowanych. Wartości wskaźników tych mieszanek są największe i cechują się małymi fluktuacjami przy obniżaniu poziomu zawartości lepiszcza wyrażonym przez K . w przypadku mieszanek A i B na bazie asfaltów zwykłych stwierdzono, iż wartości wskaźnika są znacznie mniejsze od C i D. w pracy wykazano, iż modyfikacja matrycy polimerem SBS znacząco podwyższa zdolność regeneracji mieszanki (moduł sztywności).

Oceniono również zdolność regeneracji mieszanek A – D ze względu na trwałość zmęczeniową - wskaźnik $HI_{E_k(1)H}^*$. Stwierdzono, iż największy przyrost liczby cykli do osiągnięcia kryterium zmęczeniowego drugiego badania wykazała mieszanka na ciepło A i wynosił nawet do 52.28%! Podobnie mieszanka B – do 52.23%. w przypadku mieszanek C i D zdolność regeneracji wyniosła kolejno: do 18.50% oraz do 13.43%. Zauważono, iż zwiększanie stopnia modyfikacji matrycy asfaltowej polimerem SBS znacząco (nawet do 4 razy!) pogarsza zdolność regeneracji ze względu na trwałość zmęczeniową. w rozprawie wskazano, iż jest to efekt podwyższonej temperatury mięknięcia asfaltu uzyskanej poprzez zmianę jego składu – przy temperaturze ogrzania 55°C mieszanka D z asfaltem 25/55-80 HIMA, którego temperatura mięknięcia wynosi 80°C nie ma możliwości makroskopowego upłynnienia się. Regeneracja zachodzi jedynie na poziomie mikrostruktury w otoczeniu powstałych mikrouszkodzeń. Obserwacje potwierdzono rezultatem mieszanki C, cechującej się mniejszym poziomem zmodyfikowanej matrycy (temperatura mięknięcia 60°C), której zdolność jest o ok. 37% większa niż D. w przypadku mieszanek A i B temperatura mięknięcia jest jeszcze niższa. Wynosi ona 50-58°C, dlatego też zaobserwowany przyrost trwałości jest większy.

W rozprawie przeanalizowano znaczący wpływ oddziaływania wody i mrozu oraz soli drogowej na spadek zdolności regeneracji mieszanek A - D wyrażony przez $HI_{E_0}^*$ (zmiany modułu). Zaobserwowano, iż im asfaltu w mieszance jest mniej tym wpływ oddziaływania wody i mrozu lub soli drogowej jest większy. Spadek wartości wskaźnika dochodzi nawet do 40%!

Na podstawie wyników wykazano również, iż modyfikacja matrycy polimerem SBS mieszanek C i D skutecznie zabezpiecza mieszankę przed osłabieniem zdolności regeneracji w wyniku oddziaływania wody i mrozu lub soli drogowej – nawet do 2-óch razy.

Zestawiając ze sobą mieszanki w technologiach WMA (A) i HMA (B) większą odporność na spadek zdolności regeneracji wyrażonej przez $HI_{E_0}^*$ (zmiany modułu) wykazuje mieszanka wykonana w technologii HMA. Niezależnie od oddziaływań mieszanka B na gorąco wypadła do 32% lepiej.

Przeanalizowano również zdolność regeneracji mieszanek A – D ze względu na trwałość w przypadku oddziaływań środowiskowych. w pracy wykazano, iż wpływ oddziaływania wody i mrozu lub soli drogowej obniża zdolność regeneracji wyrażonej wskaźnikiem $HI_{E_k(1)H}^*$ od 4.60% aż do 79.97%! w przypadku MMA na bazie asfaltu zwykłego A i B spadek trwałości jest bardzo wysoki (wynosi od ok. 1.32 do ok. 5 razy). Zaobserwowano, iż dla mieszanek C i D jest on zdecydowanie mniejszy (wynosi od 1.04 do 1.79 razy). Na podstawie pozyskanych wyników, w rozprawie wykazano, iż pomimo negatywnych trendów dla mieszanek C i D, modyfikacja matrycy asfaltowej polimerem SBS zapewnia skuteczną odporność: na degradację wywołaną oddziaływaniem wody i mrozu lub soli drogowej oraz na obniżenie się zdolności regeneracji MMA ze względu na trwałość.

W przypadku mieszanek WMA (A) i HMA (B). Większą odporność na spadek zdolności regeneracji $HI_{E_k(1)H}^*$ (trwałość zmęczeniowa) wywołanej wodą i mrozem lub solą drogową wykazała mieszanka wykonana w technologii HMA. Niezależnie od czynników technologia na gorąco wypadła nawet do 2-razy lepiej.

Na podstawie otrzymanych rezultatów zaproponowano w sposób ideologiczny jak można by uwzględnić regenerację i inne oddziaływania środowiskowe w trwałości zmęczeniowej mieszanek. Zauważono, iż suma liczby cykli pierwszego i drugiego badania zmęczeniowego określającego ten sam punkt zniszczenia pozwala z optymalizować receptę ze względu na zawartość lepiszcza.

W badaniach healingowych przeanalizowano również korelacje pomiędzy wskaźnikiem regeneracji $HI_{E_0}^*$ (moduł sztywności), a $HI_{E_k(1)H}^*$ (trwałość zmęczeniowa). Ustalono, iż dla

mieszanek A - D dostrzega się korelacje omawianych zależności. Zastosowany liniowy model regresji charakteryzował się bardzo dobrym dopasowaniem $R^2 \gg 0.92$ niezależnie od rozpatrywanego czynnika (mechaniczny, woda i mróz oraz sól drogowa). Podkreślono, iż wykorzystanie korelacji znajduje zastosowanie w pracach optymalizacyjnych (operowanie zawartością lepiszcza) pozwalając prognozować zmiany np. trwałości mieszanek na innych jego poziomach.

W ramach badań nad zjawiskiem regeneracji i wpływem jej oraz oddziaływań środowiskowych na MMA przeprowadzono również analizy zmiany wartości modułu sztywności od liczby cykli wybranej mieszanki. Rozważono sposób wdrażania regeneracji (**zm-zm, odp, wygrz+odp**) oraz wpływ oddziaływania środowiskowego (woda i mróz, sól drogowa) i ich kumulacji (**wim, sd, wim+sd**) na mieszankę.

W przypadku różnych metod aplikacji regeneracji potwierdzono obserwacje opisane wcześniej. Ponadto wykazano, iż prędkość zmian wartości modułu sztywności (kąąt nachylenia odcinka prostoliniowego) jest najniższa po zastosowaniu wygrzewania z okresem odpoczynku. w pozostałych przypadkach kąąt jest bardzo duży – krzywa przypomina linię pionową. Stwierdzono również, iż regeneracja wywołana wygrzaniem częściowo odtwarza makrostrukturę zdegradowanej mieszanki.

Na podstawie analizy wykresu mieszanki poddanej oddziaływaniom środowiskowym zaobserwowano, iż, czynniki: woda i mróz, sól drogowa oraz ich kombinacja (wim+sd) negatywnie wpływają na zbadaną mieszankę. Dostrzega się istotną degradację materiału. Ponadto stwierdzono, iż krzywe ilustrujące zmianę modułu sztywności pierwszego badania zmęczeniowego są zróżnicowane. Stwierdzono również, iż oddziaływanie czynników środowiskowych przyspiesza degradację mechaniczną materiału (zmęczenie) - przyrost prędkości zmian względem zestawu ref wyniósł odpowiednio: wim – 59%, sd – 22%, wim+sd – 78%. w rozprawie udowodniono, iż pomiędzy solą drogową, a lepiszczem mieszanki dochodzi do reakcji, która skutkuje pogorszeniem parametrów jakościowych materiału (asfalt pogarsza swoje właściwości przez połączenie się z kryształkami soli). Stwierdzono, że woda i mróz spowodowała większą degradację materiału i zmiany strukturalne niż sól drogowa. Ponadto oddziaływanie wody i mrozu osłabia materiał, powodując spękania. Ich rozwój można z powodzeniem śledzić na wykresie zmian wartości modułu – widoczne są przełamania liniowego odcinka spadku wartości modułu sztywności. w przypadku wody i mrozu stan spękań po przełamaniu prostej rozwijał się o 27% szybciej, natomiast dla oddziaływań łączonych (kombinacja wody i mrozu + soli drogowej) aż o 35%. Analizując cały wykres (1 i 2 badanie zmęczeniowe) wykazano, iż regeneracja zachodzi i wywiera istotny wpływ na zbadane mieszanki niezależnie od rozpatrywanego oddziaływania środowiskowego. We wszystkich przypadkach wywołuje pozytywne zmiany w strukturze mieszanki skutecznie zamykając część powstałych uszkodzeń - przyrost modułu sztywności i trwałości zmęczeniowej w cyklach. Ponadto wykazano, iż zdolność regeneracji mieszanki jest zależna od rozważanego oddziaływania środowiskowego. Degradacja wywołana wodą i mrozem, solą drogową oraz połączeniem tych dwóch powoduje przyrost uszkodzeń wewnątrz materiału, który nie może zostać zregenerowany w przyjętych warunkach kondycjonowania. Największe osłabienie zdolności healigowych mieszanki wyrażonych jako procentowy stosunek przyrostu trwałości zaobserwowano dla stanu złożonego (wim+sd) – aż o 91% względem próbki ref. Zaobserwowano również, iż oddziaływania środowiskowe znacząco obniżają trwałość zmęczeniową materiału, jednak wpływ degradacji może zostać skutecznie zmniejszony poprzez uwzględnienie zjawiska regeneracji.

Z przeprowadzonych analiz wykresów stwierdzono, iż uwzględnienie czynników środowiskowych połączonych ze zjawiskiem regeneracji pozwala dokładniej szacować trwałość zmęczeniową materiału, natomiast obserwacje zmian modułu sztywności od trwałości

w cyklach umożliwiają śledzić zmiany zachodzące w mieszance na poziomie strukturalnym – również dla omawianych kombinacji oddziaływań.

Pozyskane rezultaty badań zmęczeniowych umożliwiły opracowanie przez autora rozprawy dwóch metod uwzględniania oddziaływań środowiskowych (woda i mróz, sól drogowa) oraz regeneracji w trwałości zmęczeniowej

Pierwsza z nich nazwana autorsko – „iteracyjna Mączki” pozwala określić trwałość mieszanki jako sumę cykli wynikającą z dwóch badań zmęczeniowych (przed i po regeneracji), dla których punkt zniszczenia jest spójny. Znajduje ona szczególne zastosowanie w przypadku optymalizacji recept MMA.

Druga nazwana jako „wskaźnikowa Mączki”. Metoda polega na wyznaczeniu wskaźników procentowych - degradacji (*DI*), regeneracji (*HI*), wypadkowy (*RI*) pozwalających ocenić wpływ danego oddziaływania na mieszankę ze względu na trwałość. Ponadto istotnym wkładem autora jest opracowanie formuł, umożliwiających obliczanie wskaźników i trwałości zmęczeniowej stanu skumulowanego (woda i mróz + sól drogowa) z uwzględnieniem regeneracji na podstawie wyników pojedynczych oddziaływań. Uzasadniono znaczenie tej kombinacji w stosunku do oddziaływań wpływających na trwałość konstrukcji. Wykazano skuteczność opracowanych formuł w stosunku do wykonanych niezależnych badań. Podkreślono, iż znajdują one zastosowanie do wszystkich zbadanych mieszanek na bazie asfaltów zwykłych (w technologii na gorąco/ciepło) i modyfikowanych/wysokomodyfikowanych. w rozdziale wyszczególniono, iż metoda wskaźnikowa znajduje również zastosowanie do analizy trwałości konstrukcji z użyciem kryterium.

W rozprawie przeprowadzono również analizę wyników mieszanek A - D wszystkich kombinacji oddziaływań w tym skumulowanych korzystając z opracowanej metody wskaźnikowej. Na podstawie wyników stwierdzono, iż największy procentowy przyrost trwałości zmęczeniowej odnotowano dla mieszanek tylko regenerowanych (bez oddziaływań środowiskowych). Wyniósł on aż 52.28% - mieszanka A2 na bazie asfaltu zwykłego w technologii na ciepło. Udowodniono, iż regeneracja mieszanek zależy od rodzaju, zawartości lepiszcza (więcej = większa) oraz rozpatrywanego oddziaływania. Ponadto wykazano, że oddziaływania środowiskowe (woda i mróz, sól drogowa, ich kumulacja) ograniczają zdolność regeneracji MMA. Przedstawiono, iż wpływ degradacji (na trwałość) w niektórych przypadkach jest na tyle wysoki, iż regeneracja nie jest w stanie go skompensować.

Spośród analizowanych mieszanek najwyższą odpornością na degradacje wywołaną czynnikiem mechanicznym i środowiskowym charakteryzowały się C i D – na bazie asfaltów modyfikowanych. w większości przypadków wpływ wypadkowy (uwzględniający regenerację) był dodatni – przyrost trwałości. Stwierdzono, iż modyfikacja polimerem SBS skutecznie ochrania MMA przed negatywnym oddziaływaniem wody i mrozu, soli drogowej i ich kumulacji nie ograniczając jednocześnie pozytywnego wpływu regeneracji na trwałość. Udowodniono również, iż kumulacja negatywnych oddziaływań – woda i mróz + sól drogowa najbardziej degradowuje mieszankę spośród wszystkich analizowanych przypadków. Trwałość zmęczeniowa mieszanek z uwzględnioną regeneracją może spaść nawet o 44.81% względem referencyjnej! Najbardziej podatnymi MMA były te na bazie asfaltów zwykłych A i B. Zaobserwowano, iż regres trwałości zmęczeniowej w stosunku do powszechnego podejścia przekracza w najlepszym przypadku 17%, a najgorszym 44.81%. Stwierdzono, iż mieszanki na bazie asfaltów zwykłych (A – WMA i B - HMA) jako materiał nie nadają się do warstwy wiążącej lub nośnej (podbudowy) konstrukcji nawierzchni w inwestycjach szczególnie narażonych na oddziaływanie wody i mrozu oraz soli drogowej (kumulacji) – np. drogi wyższych klas. Znakomitą alternatywą są te na bazie asfaltów modyfikowanych, a w szczególności wysokomodyfikowanych charakteryzujące się wysoką trwałością i odpornością na czynniki zewnętrzne.

W rozważaniach zaproponowano również uwzględnienie wskaźników wypadkowych *RI* mieszanek A-D w katalogowym, projektowym okresie eksploatacyjnym konstrukcji [79]. Sposób pozwolił wykazać i uwzględnić wpływ analizowanych oddziaływań i regeneracji na trwałość całej konstrukcji względem obecnego podejścia. Wykazano, iż w zależności od wartości wskaźnika wypadkowego okres może być wydłużony lub skrócony – np. dla mieszanki na ciepło A (najniższa rozpatrywana zawartość asfaltu), udowodniono, iż w okresie projektowym nie doszacowano jej trwałość o 9 lat (20 lat – katalogowo, 11 lat – po uwzględnieniu oddziaływań). Stwierdzono również, iż proponowany sposób zawiera informację, o odporności mieszanki na oddziaływania jednak nie uwzględnia rodzaju stosowanego lepiszcza ze względu na trwałość konstrukcji (czynnik mechaniczny – np. asfalty modyfikowane pozwalają przenieść mieszance i konstrukcji zdecydowanie więcej powtarzalnych obciążeń w stosunku do zwykłych). Jest on zatem skutecznym uproszczeniem biorącym pod uwagę czynniki środowiskowe i regenerację.

Na podstawie przeprowadzonych analiz udowodniono, iż uwzględnienie oddziaływań środowiskowych (woda i mróz, sól drogowa, ich kumulacja) i regeneracji umożliwia dokładniej szacować trwałość zmęczeniową mieszanek, oraz prognozować jej zmiany (w stosunku do powszechnego podejścia). Ponadto wykorzystanie autorskich metod, pozwala łatwiej dobierać asfalt do mieszanek ze względu na przeznaczenie MMA uwzględniając oddziaływania środowiskowe. Opracowany sposób pozwala wdrożyć wydajniejszą optymalizację składu (zawartość lepiszcza). Za pomocą wskaźników wypadkowych *RI* można z powodzeniem podejmować próby wyznaczenia projektowego okresu eksploatacyjnego konstrukcji uwzględniającego omówione wpływy środowiskowe i regenerację w sposób jednoczesny.

Wszystkie wykonane działania umożliwiły autorowi osiągnąć główny cel rozprawy związany z uwzględnieniem zmęczenia i regeneracji w trwałości MMA. Poruszone zagadnienie zostało wzbogacone o oddziaływania środowiskowe występujące w stanie in-situ. Ponadto podkreślono, iż rozważania pozwoliły omówić w temat w sposób kompleksowy – odnosił się on zarówno do mieszanek na bazie asfaltów zwykłych, modyfikowanych jak również tych różniących się technologią wykonania (na ciepło/gorąco).

W dalszej części rozprawy uwagę poświęcono trwałości konstrukcji. Omówiono dwa bloki tematyczne wykorzystując dane z poprzednich badań mieszanek A-D.

Pierwszy temat koncentrował się na wzajemnym porównaniu dwóch rodzajów konstrukcji – typowej katalogowej (z podziałem na warstwę wiążącą) oraz „łączonej W+P” (warstwą podbudowy i wiążącą wykonanej z tej samej mieszanki przeznaczonej na podbudowę). Na podstawie modelowania wykazano, iż wartości poziomych odkształceń objętościowych są większe dla konstrukcji „W+P” niż katalogowej – mniejsza sztywność warstwy wiążącej zastąpionej mieszanką z podbudowy. Efektem jest spadek trwałości zmęczeniowej konstrukcji „łączonej W+P” od 0.8% do 6.7 % względem katalogowej, który zanika wraz ze wzrostem modułu sztywności MMA stosowanej do podbudowy. Podkreślono, iż nie są to zmiany kluczowe. Ponadto nadmieniono, iż w ujęciu ekonomicznym stosowanie mieszanek do dwóch warstw jednocześnie jest zasadne, ponieważ umożliwia redukcję kosztów inwestycji np. na odsadzkach lub produkcji masy.

W ramach pierwszego tematu omówiono również problem kryteriów zmęczeniowych, które w powszechnym podejściu nie ujmują rodzaju stosowanego lepiszcza z uwagi na trwałość zmęczeniową. Wykazano, iż dla podobnych parametrów materiałowych mieszanek A – D (moduł sztywności) kryteria nie różnicują trwałości konstrukcji z uwzględnieniem odporności zmęczeniowej samych asfaltów aplikowanych do MMA w konstrukcji. Na podstawie wcześniejszych rezultatów autor rozprawy zaproponował wprowadzenie do kryterium nawierzchni współczynnika kalibracyjnego n , wyznaczonego empirycznie. Parametr został

określony na podstawie badań zmęczeniowych (będących nośnikiem informacji o odporności materiału na to zjawisko). Wykazano skuteczność proponowanego rozwiązania.

Na podstawie pozyskanych rezultatów wynikających z wdrożenia autorskiego współczynnika kalibracyjnego n udowodniono, iż trwałość konstrukcji nawierzchni jest nawet do 4.76 razy większa w przypadku zastosowania asfaltów modyfikowanych i wysokomodyfikowanych oraz do 27% mniejsza w stosunku do MMA wykonanych w technologii WMA (na ciepło). w przypadku wykorzystania materiałów C (25/55-60) i D (25/55-80 HIMA) jej grubość może zostać znacząco zredukowana (wymagane są kolejne modelowania i analizy). w przypadku konstrukcji z mieszanek na bazie lepiszczy zwykłych A (35/50 WMA) lub B (35/50) optymalizacja dla zbadanych parametrów objętościowych mieszanki jest możliwa, lecz w mniejszym zakresie. Autor udowodnił również, iż modyfikacja matrycy asfaltowej polimerem SBS w mieszance pozytywnie wpływa na trwałość nie tylko materiału, lecz również całej konstrukcji (przyrost kategorii ruchu – KR określonej zakresem katalogowym).

Drugi temat dotyczył uwzględnienia: oddziaływań środowiskowych (woda i mróz, sól drogowa, kumulacja – woda i mróz + sól drogowa), zjawiska regeneracji oraz rodzaju asfaltu w kryterium zmęczeniowym stosowanym do określania trwałości konstrukcji nawierzchni. Zagadnienie podzielono na dwa podrozdziały, które poprzedzono wstępem związanym z przyjętymi założeniami. Należą do nich: analiza trwałości z użyciem propozycji autora na przykładzie wybranej konstrukcji (podatna, typ B, KR 5) oraz zmian trwałości konstrukcji typu B w zakresie KR 1-7 (wszystkie konstrukcje). Do rozważań wzięto pod uwagę trzy kombinacje parametrów objętościowych oraz 4 rodzaje asfaltów stosowane do mieszanki w podbudowie (35/50 WMA, 35/50 (referencyjny), 25/55-60, 25/55-80 HIMA). Wykorzystano poprzednio scharakteryzowany współczynnik n .

W pierwszym podrozdziale przedstawiono autorską metodykę i formuły pozwalające uwzględnić oddziaływania środowiskowe, regenerację i rodzaj asfaltu w kryterium za pomocą wcześniej zaproponowanego wskaźnika wypadkowego RI i współczynnika n . Na podstawie przeprowadzonych analiz wykazano, iż oddziaływania środowiskowe i regeneracja istotnie wpływają na trwałość konstrukcji. Udowodniono, iż dla najgorszej kombinacji oddziaływań (wim+sd (k)) skrajny spadek trwałości dochodził aż do 44.81 % - mieszanki z asfaltem zwykłym WMA. Konstrukcja z MMA na bazie asfaltów modyfikowanych lub wysokomodyfikowanych charakteryzowała się znacząco mniejszym spadkiem (na poziomie kilku procent) wykazując odporność na te oddziaływania. Stwierdzono również, iż wpływ oddziaływań środowiskowych i regeneracji jest uzależniony od kombinacji parametrów objętościowych mieszanki – im lepszsza jest więcej, a wolnych przestrzeni mniej tym konstrukcja charakteryzuje się większą odpornością na czynniki środowiskowe. Ponadto podkreślono, iż regeneracja w złożonych warunkach środowiskowych nie jest w stanie skompensować negatywnego wpływu oddziaływania wody i mrozu oraz soli drogowej.

Do istotnych osiągnięć autora należało również wykazanie, iż konstrukcja z mieszanki na bazie asfaltów modyfikowanych i wysokomodyfikowanych cechuje się nawet do: 4.67 razy (25/55-60) i 6.5 razy (25/55-80 HIMA) większą trwałością w trudnych warunkach środowiskowo-ruchowych (wim+sd (k)) względem tych na bazie asfaltów zwykłych (na gorąco lub WMA). Podkreślono, iż konstrukcję z polimero-asfaltami można bez przeszkód poddać optymalizacji grubości warstwy (zapewniają od 0-2 KR większą trwałość), natomiast te ze zwykłymi należy odpowiednio przeprojektować, gdyż wykazują mniejszą trwałość niż wymagana (zakres katalogowy) – 0-1 KR mniej. Stwierdzono, iż autorska metoda należy do skutecznych, pozwalając dokładniej prognozować trwałość konstrukcji z uwzględnieniem oddziaływań środowiskowych (woda i mróz, sól drogowa, kumulacja – woda i mróz + sól drogowa), regeneracji oraz rodzaju asfaltu. Zaproponowano również, iż analizy trwałości konstrukcji należy prowadzić z uwzględnieniem kumulacji oddziaływań (woda i mróz + sól

drogowa + regeneracja + rodzaj asfaltu), która może wystąpić jako najgorszy możliwy przypadek w stanie in-situ. Podkreślono, iż uwzględniając omawiane zmienne w kryterium zmęczeniowym osiągnięto kolejne cele rozprawy.

W drugim podrozdziale zaprezentowano autorską tabelę stworzoną w oparciu o obliczenia i modelowanie konstrukcji katalogowych, typ B na KR 1-7. w tabeli trwałość konstrukcji wyrażono przez KR (kategorie ruchu). Przedstawiono w niej katalogowe zakresy KR zamodelowanych konstrukcji, wartości referencyjne KR odnoszące się do przyjętych kombinacji parametrów objętościowych mieszanek zamodelowanych konstrukcji katalogowych oraz wartości KR wynikające z zastosowanej autorskiej metody uwzględniającej oddziaływania środowiskowe, regenerację i rodzaj asfaltu w kryterium. Na podstawie stworzonej tabeli przeprowadzono jej analizę skupiając szczególną uwagę na oddziaływaniu skumulowanym (woda i mróz + sól drogowa + regeneracja) (najgorszy przypadek jaki może zaistnieć). Wykazano, iż metoda autora pozwala skutecznie prognozować i oceniać trwałość konstrukcji podatnych typ B w pełnym zakresie KR (1-7). Udowodniono również, iż kumulacja oddziaływań znacząco wpływa na trwałość konstrukcji.

Do istotnych osiągnięć autora należy wykazanie, iż konstrukcje z mieszanek na bazie asfaltów modyfikowanych oraz w szczególności wysokomodyfikowanych pozwalają zapewnić ich trwałość od 1 do 2 KR większą w trudnych warunkach środowiskowo-ruchowych, co pozwala je optymalizować lub wykorzystywać gotowe rozwiązania katalogowe przeznaczone na niższe KR do wyższych KR. Stwierdzono również, iż konstrukcje z mieszanek na bazie asfaltów zwykłych są wrażliwe na czynniki środowiskowe, a w przypadku niskiej zawartości asfaltu i wysokiej wolnej przestrzeni konstrukcje wykonane z nich nie są w stanie zapewnić wymaganego (względem katalogu) poziomu trwałości opisanego przez KR. Konstrukcje te są mniej trwałe - nawet do 2 KR mniej i nie zaleca się stosowania tych lepszych do warstwowych układów katalogowych przeznaczonych na KR 6-7.

Autor rozprawy wykazał istotność zjawiska regeneracji oraz wpływu oddziaływań środowiskowych. Ponadto udowodnił skuteczność proponowanych rozwiązań osiągając w ten sposób kolejne cele rozprawy odnosząc się nie tylko do tematu mieszanek, lecz również konstrukcji nawierzchni.

Na podstawie omówionych zagadnień – przeglądu literaturowego, badań laboratoryjnych, obserwacji i wykonanych analiz wyników postawiono 20 wniosków końcowych.

1. Autorska metodyka badawcza oparta na eksperymentalnych pomiarach temperatury konstrukcji umożliwiła przybliżyć warunki in-situ, opracować warunki wdrażania regeneracji w laboratorium i ocenić jej wpływ na trwałość mieszanek.
2. Zjawisko regeneracji MMA występuje nawet w głęboko położonych warstwach konstrukcji nawierzchni. Zależy ono jest m.in. od czasu nasłonecznienia, temperatury powietrza wierzchniej warstwy, która poprzez przenikanie przekazuje ciepło do warstw niższych umożliwiając ich healing.
3. Istotnym czynnikiem wywołującym regenerację w MMA jest oddziaływanie wysokiej temperatury połączone z okresem odpoczynku. Okres odpoczynku (krótki lub długi) nie wpływa istotnie na trwałość MMA.
4. Zjawisko regeneracji oraz oddziaływania środowiskowe – (woda i mróz, sól drogowa, ich kumulacja) istotnie wpływają na trwałość zmęczeniową mieszanek i konstrukcji nawierzchni. Należy dołożyć starań, aby uwzględniać te czynniki w projektowaniu technologicznym i wymiarowaniu konstrukcji nawierzchni.
5. Autorskie formuły pozwalają skutecznie prognozować wpływ oddziaływań środowiskowych (woda i mróz + sól drogowa) i regeneracji na trwałość zmęczeniową MMA oraz projektowanych konstrukcji.
6. Uwzględnienie regeneracji i oddziaływań środowiskowych pozwala optymalizować skład MMA oraz grubość warstw konstrukcji.
7. Intensywność regeneracji i oddziaływań środowiskowych na mieszankę uzależniony jest m.in. od: rodzaju zastosowanego lepiszcza, jego zawartości w MMA oraz kombinacji czynników (woda i mróz, sól, itd.) w aspekcie trwałości zmęczeniowej. Znajomość tych czynników pozwala zindywidualizować skład mieszanki i grubość konstrukcji ze względu na: obciążenie, lokalizację inwestycji, warunki środowiskowe, itp.
8. Zastosowanie współczynnika n w zmodyfikowanym kryterium zmęczeniowym pozwala skutecznie oceniać trwałość projektowanych konstrukcji ze względu na rodzaj zastosowanego do mieszanki asfaltu.
9. W trudnych warunkach środowiskowych i obciążenia ruchem degradacja (spadek trwałości) mieszanek i konstrukcji wywołana oddziaływaniami środowiskowymi często „przewyższa” wpływ regeneracji. w takich przypadkach zaleca się stosować mieszanki z lepiszczami modyfikowanymi lub wysokomodyfikowanym.
10. Proponowane autorskie rozwiązania pozwalają skutecznie oceniać jakościowo mieszanki i konstrukcje pod względem trwałości zmęczeniowej.
11. Autorskie kryterium zmęczeniowe wykorzystane do badań zmęczeniowych po regeneracji umożliwia dokładniejsze ustalenie punktu zniszczenia materiału poddanego healingowi w stosunku do ponownego wykorzystania kryterium spadku początkowej wartości zregenerowanego modułu o 50%.
12. Autorskie formuły wykorzystujące wyniki badań dla oddziaływań wody i mrozu oraz soli drogowej pozwalają obliczać wpływ wypadkowy i trwałość zmęczeniową stanu skumulowanego - woda i mróz + sól drogowej + regeneracja bez konieczności wykonania długotrwałych badań.
13. Konstrukcje wykonane z mieszanek na bazie asfaltów modyfikowanych (25/55-60) lub wysokomodyfikowanych (25/55-80 HIMA), niezależnie od rozpatrywanej kombinacji parametrów objętościowych lub złożenia oddziaływań zapewniają wyższą kategorię ruchu (przynajmniej o jeden poziom więcej) w stosunku do zakresu katalogowego.

Takie konstrukcje mogą być poddane optymalizacji grubości warstwy np. podbudowy lub można zastosować chudszą już konstrukcję katalogową na trudniejsze warunki ruchowe (wyższą KR).

14. Konstrukcje wykonane z mieszanek na bazie asfaltów zwykłych (35/50 HMA lub 35/50 WMA) w większości charakteryzują się niższą trwałością niż wynika to z zakresu katalogowego (nawet o 2 poziomy KR). Konstrukcje wykonane z takich mieszanek nie nadają się do dróg poddanych trudnym warunkom środowiskowo-ruchowym. w przypadku stosowania tego typu mieszanki, konstrukcje należałoby odpowiednio pogrubić lub skorzystać z gotowego rozwiązania o przeznaczaniu na wyższą KR. Alternatywnie można zwiększyć zawartość lepiszcza w projektowanych MMA, aby zwiększyć trwałość takich konstrukcji do wymaganej KR.
15. Modyfikacja matrycy asfaltowej polimerem SBS w mieszankach zwiększa ich odporność na oddziaływania środowiskowe - woda i mróz, sól drogowa, ich kumulacja.
16. Modyfikacja matrycy asfaltowej polimerem SBS w mieszankach skutecznie podnosi ich trwałość zmęczeniową oraz zapewnia wysoką odporność na deformacje trwałe.
17. Stosowanie autorskich metod: „iteracyjnej” lub „wskaźnikowej” umożliwia skutecznie ocenić trwałość zmęczeniową mieszanek mineralno-asfaltowych uwzględniając zjawisko regeneracji oraz oddziaływania środowiskowe (woda i mróz, sól drogowa). Ponadto umożliwiają one optymalizować skład recepty. Metoda wskaźnikowa pozwala też przewidywać trwałość (okres projektowy) konstrukcji ze względu na wpływ oddziaływań środowiskowych i regeneracji.
18. Odpowiednie zaprojektowanie MMA oraz ustalenie założeń technologicznych umożliwia pozyskanie mieszanek znajdujących zastosowanie do kilku warstw konstrukcji jednocześnie. Takie mieszanki pozwalają ograniczyć zużycie materiału w konstrukcji nawierzchni oraz stworzyć bardziej jednorodną konstrukcję bez znaczącego obniżenia jej trwałości.
19. Obecne regulacje prawne (WT-2) związane z projektowaniem należałoby uelastyczyć aby lepiej optymalizować skład mieszanek na bazie asfaltów np. modyfikowanych i wysokomodyfikowanych - niezastosowanie minimalnej wymaganej zawartości asfaltu w mieszance (określanej w WT-2) nie jest równoznaczne z niespełnieniem wymogów jakościowych MMA. Pomimo zastosowania niższej zawartości lepiszcza dla tych rodzajów asfaltów można otrzymać trwałą MMA spełniającą kryteria WT-2 w zakresie cech jakościowych.
20. Modyfikacja matrycy asfaltowej polimerem SBS sprzyja uelastycznianiu się mieszanki, skutkując obniżeniem się wartości modułu sztywności mieszanki. Stosowalność tego typu lepiszczy do mieszanek typu wysoki moduł sztywności, może być ograniczona. Podkreśla się, iż spadek jego wartości nie jest równoznaczny z podatnością na koleinowanie się lub obniżeniem właściwości nośnych mieszanki.

8. Kierunek rozwoju

W dalszych pracach autor rozprawy planuje kontynuować obecne badania i rozbudować program badawczy dotyczący wpływu zjawiska regeneracji, czynników zewnętrznych (woda i mróz, sól drogowa, promieniowanie UV) i rodzaju asfaltów na trwałość zmęczeniową mieszanek i konstrukcji nawierzchni o inne gatunki skał kruszywa, mieszanki (drobnoziarniste oraz z destruktem) i lepiszcza (w tym inne technologie np. HWMA (pół-ciepło), CMA (na zimno)) wykorzystując autorsko opracowane metody. Planuje się również wzbogacić przyszłe analizy materiałowe wykorzystując obrazowanie tomograficzne (X-RAY) oraz przeprowadzić badania asfaltu z użyciem reometru dynamicznego ścinania (DSR) w celu znalezienia wzajemnych korelacji, które pozwoliłyby lepiej zrozumieć zjawisko zmęczenia, degradacji i regeneracji MMA w laboratorium oraz konstrukcji nawierzchni w przypadku złożonego stanu oddziaływań.

9. Podziękowania

Pragnę wyrazić wdzięczność Panu Profesorowi Piotrowi Mackiewiczowi i prof. Antoniemu Szydło, za okazane zaufanie, wsparcie, udzielone porady merytoryczne oraz możliwości sprzętowe do realizacji niezbędnych badań. Jednocześnie dziękuję całej pracowni drogowej Politechniki Wrocławskiej Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego, a w szczególności Panu Piotrowi Święteczakowi i Władysławowi Czyryńskiemu, za liczne porady techniczne w zakresie obsługi sprzętu.

Składam również podziękowania koncernowi Lotos oraz firmie Budosprzęt, za pomoc w pozyskaniu materiałów badawczych do realizacji niniejszej rozprawy.

10. Literatura

- [1] Abojaradeh, M. 2013. Development of fatigue failure criterion for hot-mix asphalt based on dissipated energy and stiffness ratio. *Jordan Journal of Civil Engineering* 7, 7, 54–69.
- [2] Acse.pl. 2021. *Termopary / Termoelektryczne Czujniki Temperatury J, K, N, Si B / ACSE.pl*. <https://acse.pl/termopary/>. Dostęp: 13/01/2022.
- [3] Acse.pl. 2022. *Rezystancyjne Czujniki Temperatury oraz sensory do pomiaru (RTD: Pt100, Pt1000) / ACSE.pl*. <https://acse.pl/czujniki-temperatury/>. Dostęp: 13/01/2022.
- [4] Adhikari, S., Shen, S., and You, Z. 2009. Evaluation of Fatigue Models of Hot-Mix Asphalt through Laboratory Testing. *Transportation Research Record* 2127, 1, 36–42.
- [5] Adwan, I., Milad, A., Memon, Z. A., Widyatmoko, I., Ahmat Zanuri, N., Memon, N. A., and Yusoff, N. I. M. 2021. Asphalt Pavement Temperature Prediction Models: A Review. *Applied Sciences* 11, 9, 3794.
- [6] Airey, G. D., Rahimzadeh, B., and Collop, A. C. 2003. Viscoelastic linearity limits for bituminous materials. *Mat. Struct.* 36, 10, 643–647.
- [7] Ajam, H., Lastra-González, P., Gómez-Meijide, B., and García, Á. 2016. Self-Healing of Dense Asphalt Concrete by Two Different Approaches: Electromagnetic Induction and Infrared Radiation. In *8th RILEM international conference on mechanisms of cracking and debonding in pavements*, A. Chabot, Ed. RILEM Bookseries volume 13. Springer, Dordrecht, 241–246. DOI=10.1007/978-94-024-0867-6_34.
- [8] Alhasan, A. A., Abbas, A. R., Nazzal, M., Dessouky, S., Ali, A., Kim, S.-S., and Powers, D. 2014. Low-Temperature Characterization of Foamed Warm-Mix Asphalt Produced by Water Injection. *Transportation Research Record* 2445, 1, 1–11.
- [9] AL-Kafaji, M., Al-Busaltan, S., and Ewadh, H. A. 2020. Evaluating the rutting resistance for half warm bituminous emulsion mixtures comprising ordinary portland cement and polymer. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 737, 12138.
- [10] Al-Mansoori, T., Micaelo, R., ARTAMENDI, I., Norambuena-Contreras, J., and Garcia, A. 2017. Microcapsules for self-healing of asphalt mixture without compromising mechanical performance. *Construction and Building Materials* 155, 1091–1100.
- [11] Almasi, S. A. and Khabir, M. M. 2019. Experimental evaluation of calcium chloride powder effect on the reduction of the pavement surface layer performance. *CEJ* 28, 1, 61–72.
- [12] Alshamsi K. 2006. *Development of a mix design methodology for asphalt mixtures with analytically formulated aggregate structures*. PhD, Louisiana State University.
- [13] American Association of State Highway and Transportation. 2021. *Standard Method of Test for Determining the Fatigue Life of Compacted Asphalt Mixtures Subjected to Repeated Flexural Bending. AASHTO T 321*. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), U.S.A., 321. https://global.ihc.com/doc_detail.cfm?document_name=AASHTO%20T%20321&item_s_key=00489228. Dostęp: 29/11/2021.
- [14] American Association of State Highway and Transportation. 2021. *Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage*. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), T 283. Dostęp: 23/10/2021.
- [15] American Association of State Highway and Transportation Officials. 2003. *Standard method of test for determining dynamic modulus of hot-mix asphalt concrete mixtures*.
- [16] American Association of State Highway and Transportation Officials. 2019. *Determining the Damage Characteristic Curve and Failure Criterion Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT) Cyclic Fatigue Test. AASHTO TP-107-18*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., TP-107-18. Dostęp: 04/05/2021.
- [17] Amini, B. and Tehrani, S. S. 2014. Simultaneous effects of salted water and water flow on asphalt concrete pavement deterioration under freeze–thaw cycles. *International Journal of Pavement Engineering* 15, 5, 383–391.
- [18] Andrei, D., Witczak, M. W., and Mirza, M. W. 1999. *Development of a revised predictive model for the dynamic (complex) modulus of asphalt mixtures*. Inter Team Technical Report Prepared for the NCHRP 1-37A Project. University of Maryland, College Park.
- [19] Army Corps of Engineers. 2000. *Hot-mix asphalt paving handbook 2000*. US Army Corps of engineers, [S.l.].
- [20] ARTAMENDI, I. and Khalid, H. 2005. Characterization of fatigue damage for paving asphaltic materials*. *Fatigue Fracture of Engineering Materials and Structures* 28, 12, 1113–1118.
- [21] Ashayer-Soltani, M. A. 1998. *Comportement en fatigue des enrobés bitumeux*, Lyon, INSA.
- [22] Ayar, P., Moreno-Navarro, F., Sol-Sánchez, M., and Rubio-Gámez, M. C. 2018. Exploring the recovery of fatigue damage in bituminous mixtures: the role of rest periods. *Mater Struct* 51, 1, 28.
- [23] Bańkowski, W. 2006. *Analiza trwałości zmęczeniowej kompozytów mineralno-asfaltowych metodą konwencjonalną oraz metodą energii rozproszonej*. PhD, Politechnika Warszawska.

- [24] Bańkowski, W. 2019. *Określenie wpływu środka adhezyjnego Wetfix AP17 na właściwości asfaltu i mieszanki mineralno-asfaltowej MMA TN/4345/19*. Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa.
- [25] Bari, J., Witczak, M. W., You, Z., Solamanian, M., Huang, B., Mohseni, A., Dukatz, E., Chehab, G., Williams, C., and Christiansen, D. 2006. Development of a new revised version of the Witczak E Predictive Model for hot mix asphalt mixtures, 381–424.
- [26] Bartuś T. 2021. *Analiza regresji i korelacji dwóch zmiennych*. http://home.agh.edu.pl/~bartus/index.php?action=dydaktyka&subaction=statystyka&item=regresja_i_korelacja. Dostęp: 27/10/2021.
- [27] Behnood, A. and Modiri Gharehveran, M. 2019. Morphology, rheology, and physical properties of polymer-modified asphalt binders. *European Polymer Journal* 112, 766–791.
- [28] Bhasin, A., Desai, C. S., Monismith, C. L., Schwartz, C. W., Little, D. N., Hiltunen, D. R., Olard, F., Maupin, G. W., Chehab, G. R., Lee, H. J., Di Benedetto, H., Bahia, H. U., Daniel, J. S., Harvey, J. T., Kaloush, K. E., Momen, M., Lytton, R. L., Roque, R., Weissman, S. L., Hesp, S. A. M., Underwood, S., Pellinen, T. K., Yun, T. Y., Buttlar, W. G., Kim, Y. R., and Seo, Y. 2009. *Modeling of asphalt concrete*. McGraw-Hill construction. McGraw-Hill, New York.
- [29] Bhasin, A., Little, D. N., Bommavaram, R., and Vasconcelos, K. 2008. A Framework to Quantify the Effect of Healing in Bituminous Materials using Material Properties. *Road Materials and Pavement Design* 9, sup1, 219–242.
- [30] Bhasin, A., Narayan, A., and Little, D. N. 2009. *Laboratory Investigation of a Novel Method to Accelerate Healing in Asphalt Mixtures Using Thermal Treatment* SWUTC/09/476660-00005-1.
- [31] Błażejowski, K. and Styk, S. 2011. *Technologia warstw asfaltowych*. Nawierzchnie Drogowe. Poradnik. WKiL, Warszawa.
- [32] Błażejowski K., Ostrowski P., Wójcik-Wiśniewska M., and Baranowska W. 2020. *Mieszanki i nawierzchnie z Orbiton HIMA*. Orlen Asfalt Sp. z o.o., Płock.
- [33] Błażejowski K., Wójcik-Wiśniewska M., and Baranowska W. 2018. *Poradnik Asfaltowy*. Orlen Asfalt Sp. z o.o., Płock.
- [34] Błażejowski K., Wójcik-Wiśniewska M., Baranowska W., and Ostrowski P. 2021. *2021 Poradnik Asfaltowy*. Orlen Asfalt Sp. z o.o., Płock.
- [35] Botella, R., Pérez-Jiménez, F. E., López-Montero, T., and Miró, R. 2020. Cyclic testing setups to highlight the importance of heating and other reversible phenomena on asphalt mixtures. *International Journal of Fatigue* 134, 105514.
- [36] Bueno, M., Arraigada, M., and Partl, M. N. 2016. Damage detection and artificial healing of asphalt concrete after trafficking with a load simulator. *Mech Time-Depend Mater* 20, 3, 265–279.
- [37] Canestrari, F., Virgili, A., Graziani, A., and Stimilli, A. 2014. Modeling and assessment of self-healing and thixotropy properties for modified binders. *International Journal of Fatigue* 70, 351–360.
- [38] Capitão, S. D., Picado-Santos, L. G., and Martinho, F. 2012. Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt. *Construction and Building Materials* 36, 1016–1024.
- [39] Carpenter, S. H., Ghuzlan, K. A., and Shen, S. 2003. Fatigue Endurance Limit for Highway and Airport Pavements. *Transportation Research Record* 1832, 1, 131–138.
- [40] Carvalho-Pais, J., Harvey, J. T., and Pais, J. C., Eds. 2012. *Four-point bending. Proceedings of the third conference on four-point bending, Davis, CA, USA, 17-18 September 2012*. CRC Press, Boca Raton, Fla.
- [41] Cebon, D. 2000. *Handbook of vehicle-road interaction*. Advances in engineering 2. Taylor & Francis, London, New York.
- [42] Chabot, A., Ed. 2016. *8th RILEM international conference on mechanisms of cracking and debonding in pavements*. RILEM Bookseries volume 13. Springer, Dordrecht.
- [43] Chabot, A., Buttlar, W. G., Dave, E. V., Petit, C., and Tebaldi, G. 2016. *8th RILEM International Conference on Mechanisms of Cracking and Debonding in Pavements* 13. Springer Netherlands, Dordrecht.
- [44] Cheng, H., Liu, L., and Sun, L. 01182018. Study on the Fatigue Characteristics and Remaining Fatigue Life Prediction of Field Emulsified Asphalt Cold Recycled Mixture. In *CICTP 2017*. American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 1163–1172. DOI=10.1061/9780784480915.121.
- [45] Cheng, H., Sun, L., Liu, L., and Li, H. 2018. Fatigue characteristics of in-service cold recycling mixture with asphalt emulsion and HMA mixture. *Construction and Building Materials* 192, 704–714.
- [46] Cheraghian, G., Cannone Falchetto, A., You, Z., Chen, S., Kim, Y. S., Westerhoff, J., Moon, K. H., and Wistuba, M. P. 2020. Warm mix asphalt technology: An up to date review. *Journal of Cleaner Production* 268, 122128.
- [47] Cheraghian, G., Cannone Falchetto, A., You, Z., Chen, S., Kim, Y. S., Westerhoff, J., Moon, K. H., and Wistuba, M. P. 2020. Warm mix asphalt technology: An up to date review. *Journal of Cleaner Production* 268, 122128.
- [48] Cheraghian, G., Cannone Falchetto, A., You, Z., Chen, S., Kim, Y. S., Westerhoff, J., Moon, K. H., and Wistuba, M. P. 2020. Warm mix asphalt technology: An up to date review. *Journal of Cleaner Production* 268, 122128.

- [49] Collop, A. C. and Cebon, D. 1995. A Theoretical Analysis of Fatigue Cracking in Flexible Pavements. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* 209, 5, 345–361.
- [50] Copper, K. E. and Pell, P. S. 1974/00/00. *THE EFFECT OF MIX VARIABLES ON THE FATIGUE STRENGTH OF BITUMINOUS MATERIALS* TRRL LR 633.
- [51] D04 Committee. *Test Method for Determining Fatigue Failure of Compacted Asphalt Concrete Subjected to Repeated Flexural Bending* 91.100.50. ASTM International, West Conshohocken, PA 91.100.50.
- [52] Daniel, J. S. and Kim, Y. R. 2001. Laboratory Evaluation of Fatigue Damage and Healing of Asphalt Mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering* 13, 6, 434–440.
- [53] de la Roche Ch. 1996. *Module de rigidité et comportement en fatigue des enrobés bitumineux : expérimentations et nouvelles perspectives d'analyse*. de doctorat, Ecole centrale.
- [54] Di Benedetto, H. 2003 - 2003. Fatigue of bituminous mixtures: different approaches and RILEM group contribution. In *Sixth International RILEM Symposium on Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials*. RILEM Publications SARL, 15–38. DOI=10.1617/2912143772.002.
- [55] Di Benedetto, H., Ashayer Soltani, and Chaverot, P. 1996. FATIGUE DAMAGE FOR BITUMINOUS MIXTURES: A PERTINENT APPROACH. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists* 65, 142–158.
- [56] Di Benedetto, H., Baaj, H., Pronk, A., and Lundstroem, R. 2004. Fatigue of bituminous mixtures. *Materials and Structures*, 37, 202–216.
- [57] Di Benedetto, H., Nguyen, Q. T., and Sauzéat, C. 2011. Nonlinearity, Heating, Fatigue and Thixotropy during Cyclic Loading of Asphalt Mixtures. *Road Materials and Pavement Design* 12, 1, 129–158.
- [58] Di Benedetto, H., Partl, M. N., Francken, L., and La Roche Saint André, C. de. 2001. Stiffness testing for bituminous mixtures. *Mat. Struct.* 34, 2, 66–70.
- [59] Di Benedetto, H. and Roche. 1998. *State of the Art of Stiffness Modulus and Fatigue of Bituminous Mixtures*. RILEM Report 17. RILEM, London.
- [60] Di BENEDETTO H. 1990. *Nouvelle approche du comportement des enrobés bitumineux: résultats expérimentaux et formulation rhéologique*. *Proceeding of the 4th International RILEM Symposium MTBM*. RILEM, Budapest.
- [61] Dinh, B. H., Park, D.-W., and Phan, T. M. 2018. Healing Performance of Granite and Steel Slag Asphalt Mixtures Modified with Steel Wool Fibers. *KSCE J Civ Eng* 22, 6, 2064–2072.
- [62] Dinis-Almeida, M., Castro-Gomes, J., and Antunes, M., Eds. 2010. *Mix Design Criteria for Half Warm Asphalt Recycling (HWMR) - Case Study*.
- [63] DOAN, T. H. 1992. LES ETUDES DE FATIGUE DES ENROBES BITUMINEUX AU LCPC. In *Carnaval e outras festas*. El Correo Gallego. Biblioteca 114 76. Compostela, Santiago de Compostela.
- [64] Dolan F., Richard F., Work G. 1949. *The influence of fluctuations in stresses amplitude on the fatigue metals*. ASTM Proc.
- [65] Dulaimi, A., Shanbara, H. K., and Al-Rifaie, A. 2020. The mechanical evaluation of cold asphalt emulsion mixtures using a new cementitious material comprising ground-granulated blast-furnace slag and a calcium carbide residue. *Construction and Building Materials* 250, 118808.
- [66] Duncan, J. M., Monismith, C. L., and Wilson, E. L. 1968. FINITE ELEMENT ANALYSES OF PAVEMENTS. In *Highway Research Record*.
- [67] Eriksson, R. 1951. *Asfalters deformation och hållfasthet vid långsam och snabb belastning. Deformation and strength of asphalts at slow and rapid loading (English)*. Statens Väginstitut.
- [68] European Asphalt Pavement Association. 2014. *The use of Warm Mix Asphalt*. European Asphalt Pavement Association, Brussels.
- [69] Fakhri, M., Bahmai, B. B., Javadi, S., and Sharafi, M. 2020. An evaluation of the mechanical and self-healing properties of warm mix asphalt containing scrap metal additives. *Journal of Cleaner Production* 253, 119963.
- [70] Fatemi, A. and Yang, L. 1998. Cumulative fatigue damage and life prediction theories: a survey of the state of the art for homogeneous materials. *International Journal of Fatigue* 20, 1, 9–34.
- [71] Feng, B., Wang, H., Li, S., Ji, K., Li, L., and Xiong, R. 2022. The durability of asphalt mixture with the action of salt erosion: A review. *Construction and Building Materials* 315, 125749.
- [72] Francken, L. 1979. FATIGUE PERFORMANCE OF A BITUMINOUS ROAD MIX UNDER REALISTIC TEST CONDITIONS. *Transportation Research Record*, 712.
- [73] Francken, L. 1998. *Bituminous Binders and Mixes. Interlaboratory test program on complex modulus and fatigue*. CRC Press, London.
- [74] Francken, L. and Partl, M. 1996. Complex Modulus Testing of Asphaltic Concrete: RILEM Interlaboratory Test Program. *Transportation Research Record* 1545, 1, 133–142.
- [75] Garcia, A., Jelfs, J., and Austin, C. J. 2015. Internal asphalt mixture rejuvenation using capsules. *Construction and Building Materials* 101, 309–316.

- [76] Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad. 2013. *Katalog Przebudów i Remontów Katalog Przebudów i Remontów Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych*. KPRNPP.
- [77] Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad. 2014. *Kruszywa do mieszanek mineralno-asfaltowych i powierzchniowych utrwaleń na drogach krajowych*. WT-1 2014.
- [78] Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad. 2014. *Nawierzchnie asfaltowe na drogach krajowych - Mieszanki mineralno-asfaltowe*. WT-2 cz. 1 2014.
- [79] Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad. 2014. *Katalog Typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych*.
- [80] Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad. 2014. *Kruszywa do mieszanek mineralno-asfaltowych i powierzchniowych utrwaleń na drogach krajowych*. WT-1 2014 - kruszywa - wymagania techniczne. GDDKiA, Warszawa.
- [81] Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad. 2014. *Kruszywa do mieszanek mineralno-asfaltowych i powierzchniowych utrwaleń na drogach krajowych*. WT-1 2014 kruszywa wymagania techniczne.
- [82] Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad. 2014. *Nawierzchnie asfaltowe na drogach krajowych*. WT-2 2014 - część I Mieszanki mineralno-asfaltowe - wymagania techniczne. GDDKiA, Warszawa.
- [83] Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad. 2014. *Nawierzchnie asfaltowe na drogach krajowych*. WT-2 2014 mieszanki mineralno-asfaltowe wymagania techniczne.
- [84] Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad. 2021. *Generalny Pomiar Ruchu*. <https://www.archiwum.gddkia.gov.pl/pl/1231/generalny-pomiar-ruchu>. Dostęp: 06/10/2021.
- [85] Godwin, K. S., Hafner, S. D., and Buff, M. F. 2003. Long-term trends in sodium and chloride in the Mohawk River, New York: the effect of fifty years of road-salt application. *Environmental Pollution* 124, 2, 273–281.
- [86] Government of Canada. 2001. *Priority substances list assessment report - Road salts*. Priority substances list assessment report. Environment Canada, Ottawa, Health Canada.
- [87] Górszczyk, J. and Grzybowska, W. 2011. Analizy termiczne asfaltowej nawierzchni drogowej z wykorzystaniem MES. *Drogi i Mosty* nr 4, 7–30.
- [88] Guo, Z., Wang, L., Feng, L., and Guo, Y. 2022. Research on fatigue performance of composite crumb rubber modified asphalt mixture under freeze thaw cycles. *Construction and Building Materials* 323, 126603.
- [89] Gupta Ankit and Adhikari San. 2016. Review of Mechanistic-Empirical design approach for asphalt pavements. In *Functional Pavement Design IV*, X. Liu, Ed. CRC Press.
- [90] Hajek, J. J. 1995. GENERAL AXLE LOAD EQUIVALENCY FACTORS. In *Transportation Research Record*.
- [91] Haponiuk, B. and Zbiciak, A. 2016. Mechanistic-Empirical Asphalt Pavement Design Considering the Effect of Seasonal Temperature Variations. *Archives of Civil Engineering* 62, 4.
- [92] Harrigan E. 1994. *Fatigue response of asphalt-aggregate mixes*. A 404. National Research Council, Washington, D.C.
- [93] Harvey, J. T. and Tsai, B. 1996. Effects of Asphalt Content and Air Void Content on Mix Fatigue and Stiffness. *Transportation Research Record* 1543, 1, 38–45.
- [94] Higashiyama, H., Sano, M., Nakanishi, F., Takahashi, O., and Tsukuma, S. 2016. Field measurements of road surface temperature of several asphalt pavements with temperature rise reducing function. *Case Studies in Construction Materials* 4, 73–80.
- [95] Hornych, P., Kerzreho, J. P., Chabot, A., Bodin, D., Balay, J. M., and Deloffre L. 2008. *The LCPC's ALT facility contribution to pavement cracking knowledge*. DOI=10.13140/2.1.2361.9529.
- [96] Hossain, S. K., Fu, L., Hosseini, F., Muresan, M., Donnelly, T., and Kabir, S. 2016. Optimum winter road maintenance: effect of pavement types on snow melting performance of road salts. *Can. J. Civ. Eng.* 43, 9, 802–811.
- [97] Huang, S.-C. and Di Benedetto, H. 2015. *Advances in Asphalt Materials. Road and Pavement Construction*. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. Elsevier Reference Monographs, s.l.
- [98] Huang, Y. H. 2009. *Pavement analysis and design*. Prentice Hall; Pearson Education [distributor], Upper Saddle River, N.J., London.
- [99] Industrial experimental department of road and bridge engineering Sp. z o.o. 2004. *General technical specification D - 10.10.01c combating winter slippy on the road (Polish)*, Warsaw 2004.
- [100] Inżynier Budownictwa. 2011. *Nawierzchnie asfaltowe - Inżynier Budownictwa*. <https://inzynierbudownictwa.pl/nawierzchnie-asfaltowe/>. Dostęp: 01/02/2021.
- [101] Islam, M. R. and Tarefder, R. A. 2015. Study of Asphalt Aging through Beam Fatigue Test. *Transportation Research Record* 2505, 1, 115–120.
- [102] Jahromi, S. G. and Khodaii, A. 2009. Master curves for stiffness asphalt concrete. *International Journal of Pavement Research and Technology* 2, 4, 148–153.
- [103] Jain, S. and Singh, B. 2021. Cold mix asphalt: An overview. *Journal of Cleaner Production* 280, 124378.

- [104] Jakowluk, A. 1969. Wpływ poziomego naprężenia i współczynnika amplitudy naprężenia na proces wibropełzania. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics* 4, 6, 485–505.
- [105] Jakowluk, A. 1993. *Procesy pełzania i zmęczenia w materiałach*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne; Wydawnictwa Naukowo-Techniczne., Warszawa.
- [106] Jaskula, P. and Judycki, J. 2014. The Effect of Water and Frost on Fatigue Life of Asphalt Concrete. *Geo-Hubei 2014 International Conference on Sustainable Civil Infrastructure*, 255, 76–83.
- [107] Jaskula, P. and Judycki, J. 2016. Durability of Asphalt Concrete Subjected to Deteriorating Effects of Water and Frost. *J. Perform. Constr. Facil.* 30, 1, C4014004.
- [108] Ji, J., Li, P., Chen, M., Zhang, R., Zhou, W., and You, Z. 2021. Review on the fatigue properties of recycled asphalt concrete containing construction and demolition wastes. *Journal of Cleaner Production* 327, 129478.
- [109] Jing, R., Varveri, A., Liu, X., Scarpas, A., and Erkens, S. 2020. Rheological, fatigue and relaxation properties of aged bitumen. *International Journal of Pavement Engineering* 21, 8, 1024–1033.
- [110] Judycki, J. 1991. *Fatigue of asphalt mixes*. Publications of Road and Transport Laboratory / University of Oulu 11. University of Oulu, Oulu, Finland.
- [111] Judycki, J. 2011. Budowa i kalibracja modeli spekan zmeczeniowych warstw asfaltowych nawierzchni drogowych w mechanistyczno-empirycznej metodzie AASHTO 2004. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, 4, 31–53.
- [112] Judycki, J. 2013. Twardnienie fizyczne asfaltów i mieszanek mineralno-asfaltowych oraz jego wpływ na spękania niskotemperaturowe. *Drogownictwo*, 12, 368–373.
- [113] Judycki, J. 2014. *Analizy i projektowanie konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych*. Praca zbiorowa. WKiŁ, Warszawa.
- [114] Judycki, J., Jaskula, P., Alenowicz, J., Dołycki, Bogdan, Jaczewski, Mariusz, Ryś, D., and Stienss, M. 2014. *Catalog of typical pavement constructions for flexible and semi-rigid pavement (Polish)*. GDDKiA, Warsaw.
- [115] Judycki, J., Jaskuła, P., Pszczoła, M., Ryś, D., Jaczewski, M., Alenowicz, J., Dołycki, B., and Stienss, M. 2017. New polish catalogue of typical flexible and semi-rigid pavements. *MATEC Web Conf.* 122, 4002.
- [116] Judycki, J. and Stienss, M. 2011. *Badania mieszanek mineralno-asfaltowych o obniżonej temperaturze otaczania*. Politechnika Gdańska, Gdańsk.
- [117] Juli-Gándara, L., Vega-Zamanillo, Á., Calzada-Pérez, M. Á., and Teijón-López-Zuazo, E. 2020. Effect of Sodium Chloride on the Modulus and Fatigue Life of Bituminous Mixtures. *Materials (Basel, Switzerland)* 13, 9.
- [118] Kabashkin, I., Yatskiv, I., and Prentkovskis, O., Eds. 2019. *Reliability and Statistics in Transportation and Communication*. Lecture Notes in Networks and Systems. Springer International Publishing, Cham.
- [119] Kakar, M. R., Hamzah, M. O., and Valentin, J. 2015. A review on moisture damages of hot and warm mix asphalt and related investigations. *Journal of Cleaner Production* 99, 39–58.
- [120] Kalabińska, M., Piłat, J., and Radziszewski, P. 2008. *Technologia materiałów i nawierzchni drogowych, Wydanie II*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej; Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej., Warszawa.
- [121] Kallas B. 1965. *Asphalt Pavement Temperatures*. Asphalt Insitute, Maryland.
- [122] Kelly, V. R., Lovett, G. M., Weathers, K. C., Findlay, S. E. G., Strayer, D. L., Burns, D. I., and Likens, G. E. 2008. Long-term sodium chloride retention in a rural watershed: legacy effects of road salt on streamwater concentration. *Environmental science & technology* 42, 2, 410–415.
- [123] Khalid, H. A. and Monney, O. K. 2009. Moisture damage potential of cold asphalt. *International Journal of Pavement Engineering* 10, 5, 311–318.
- [124] Khavandi Khiavi, A. and Rasouli, R. 2017. Laboratory evaluation of loading frequency effects on HMA self-healing. *Construction and Building Materials* 162, 1–8.
- [125] Khelifa El-Atrash. 2020. *Modified Marshall Mix Design Method for Asphalt Roads in Hot and Arid Climate*. PhD, UNIVERSITÉ DU QUÉBEC.
- [126] Khodary F. 2010. *Evaluation of Fatigue Resistance for Modified Asphalt Concrete Mixtures Based on Dissipated Energy Concept*. doctorat, Technische Universität Darmstadt.
- [127] Kie Badroodi, S., Reza Keymanesh, M., and Shafabakhsh, G. 2020. Experimental investigation of the fatigue phenomenon in nano silica-modified warm mix asphalt containing recycled asphalt considering self-healing behavior. *Construction and Building Materials* 246, 117558.
- [128] Kim, B. and Roque, R. 2006. Evaluation of Healing Property of Asphalt Mixtures. *Transportation Research Record* 1970, 84–91.
- [129] Kim, Y. and Kim, Y. R. 1997. In Situ Evaluation of Fatigue Damage Growth and Healing of Asphalt Concrete Pavements Using Stress Wave Method. *Transportation Research Record* 1568, 1, 106–113.
- [130] Kim, Y. R. 2009. *Modeling of asphalt concrete*. McGraw-Hill construction. ASCE Press, Reston, VA.

- [131] Kim, Y. R. and Little, D. N. 1989. Evaluation of healing in asphalt concrete by means of the theory of nonlinear viscoelasticity. *Transportation Research Record*, 1228, 198–210.
- [132] Kim, Y.-R., Little, D. N., and Lytton, R. L. 2003. Fatigue and Healing Characterization of Asphalt Mixtures. *J. Mater. Civ. Eng.* 15, 1, 75–83.
- [133] Kim, Y.-R., Little, D. N., and Lytton, R. L. 2004. Effect of Moisture Damage on Material Properties and Fatigue Resistance of Asphalt Mixtures. *Transportation Research Record* 1891, 1, 48–54.
- [134] Kowalewski Zbigniew. 2011. *Zmęczenie materiałów - podstawy, kierunki badań, ocena stanu uszkodzenia*. Państwowa Akademia Nauk, Zakopane.
- [135] La Roche, C. de. 1996. *Module de rigidité et comportement en fatigue des enrobés bitumineux : expérimentations et nouvelles perspectives d'analyse*, Châtenay-Malabry, Ecole centrale de Paris.
- [136] LEFEUVRE, Y. 2001. *Contribution to the fatigue behaviour study of bituminous material*, Ecole des Ponts.
- [137] Lesueur, D., Lázaro Blázquez, M., Andaluz Garcia, D., and Ruiz Rubio, A. 2018. On the impact of the filler on the complex modulus of asphalt mixtures. *Road Materials and Pavement Design* 19, 5, 1057–1071.
- [138] Lesueur, D. and Potti, J. J. 2004. Cold mix design: A rational approach based on the current understanding of the breaking of bituminous emulsions. *Road Materials and Pavement Design* 5, sup1, 65–87.
- [139] Leszczyńska, W. and Pszczoła, M. 2021. Analiza temperatury ekwiwalentnej do projektowania nawierzchni asfaltowych w Polsce z wykorzystaniem metody AASHTO 2004. *Przegląd Komunikacyjny* R. 76, nr 4.
- [140] Lethersich, W. 1946. Determination of plastic and brittle states of “pool” bitumens. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 65, 7, 190–196.
- [141] Liang, B., Lan, F., Shi, K., Qian, G., Liu, Z., and Zheng, J. 2021. Review on the self-healing of asphalt materials: Mechanism, affecting factors, assessments and improvements. *Construction and Building Materials* 266, 120453.
- [142] Lin, P.-S., Wu, Y.-T., Huang, T.-K., and Juang, C. H. 1996. Equivalent Single-Axle Load Factor for Rigid Pavements. *J. Transp. Eng.* 122, 6, 462–467.
- [143] Ling, C., Hanz, A., and Bahia, H. 2014. Evaluating Moisture Susceptibility of Cold-Mix Asphalt. *Transportation Research Record* 2446, 1, 60–69.
- [144] Little, D. N., Lytton, R. L., Williams, D., and Chen, C. W. 2001. *Microdamage healing in asphalt and asphalt concrete, Volume 1 : microdamage and microdamage healing, project summary report*.
- [145] Little, D. N. and Prapnnachari, D. 1987. *Investigation of the Mechanism of Healing in Asphalt*. National Science Foundation, Texas, U.S.A.
- [146] Little, D. N., Prapnnachari, S., Letton, A., and Kim, Y. R. 1993. Investigation of the Microstructural Mechanism of Relaxation and Fracture Healing in Asphalt. *TEXAS TRANSPORTATION INST COLLEGE STATION*.
- [147] Liu, C., Lv, S., Peng, X., Zheng, J., and Yu, M. 2020. Analysis and Comparison of Different Impacts of Aging and Loading Frequency on Fatigue Characterization of Asphalt Concrete. *J. Mater. Civ. Eng.* 32, 9, 4020240.
- [148] Liu, P., Xing, Q., Dong, Y., Wang, D., Oeser, M., and Yuan, S. 2017. Application of Finite Layer Method in Pavement Structural Analysis. *Applied Sciences* 7, 6, 611.
- [149] Liu, Q., Li, B., Schlangen, E., Sun, Y., and Wu, S. 2017. Research on the Mechanical, Thermal, Induction Heating and Healing Properties of Steel Slag/Steel Fibers Composite Asphalt Mixture. *Applied Sciences* 7, 10, 1088.
- [150] Liu, Q., Schlangen, E., and van de Ven, M. 2012. Induction Healing of Porous Asphalt. *Transportation Research Record* 2305, 1, 95–101.
- [151] Liu, Q., Schlangen, E., and van de Ven, M. 2013. Characterization of the material from the induction healing porous asphalt concrete trial section. *Mat. Struct.* 46, 5, 831–839.
- [152] Liu, Q., Schlangen, E., van de Ven, M., and García, Á. 2010. Healing of Porous Asphalt Concrete via Induction Heating. *Road Materials and Pavement Design* 11, sup1, 527–542.
- [153] Liu, Q., Schlangen, E., van de Ven, M., van Bochove, G., and van Montfort, J. 2012. Evaluation of the induction healing effect of porous asphalt concrete through four point bending fatigue test. *Construction and Building Materials* 29, 403–409.
- [154] Liu, Q., Yu, W., Wu, S., Schlangen, E., and Pan, P. 2017. A comparative study of the induction healing behaviors of hot and warm mix asphalt. *Construction and Building Materials* 144, 663–670.
- [155] Liu, Z., Luo, S., Wang, Y., and Chen, H. 2019. Induction Heating and Fatigue-Damage Induction Healing of Steel Fiber-Reinforced Asphalt Mixture. *J. Mater. Civ. Eng.* 31, 9, 4019180.
- [156] LOTOS Asfalt. 2021. *Produkty - LOTOS Asfalt*. <https://www.lotosasfalt.pl/1769/produkty>. Dostęp: 14/10/2021.
- [157] Lu, X., Isacson, U., and Ekblad, J. 1998. Low-temperature properties of styrene–butadiene–styrene polymer modified bitumens. *Construction and Building Materials* 12, 8, 405–414.

- [158] Lundstroem, R. 2002. RHEOLOGICAL AND FATIGUE CHARACTERISATION OF ASPHALT CONCRETE MIXTURES USING UNIAXIAL TESTING: LICENTIATE THESIS. In *RHEOLOGICAL AND FATIGUE CHARACTERISATION OF ASPHALT CONCRETE MIXTURES USING UNIAXIAL TESTING: LICENTIATE THESIS*, Sweden.
- [159] Lundstrom, R., Di Benedetto, H., and Isacsson, U. 2004. Influence of Asphalt Mixture Stiffness on Fatigue Failure. *J. Mater. Civ. Eng.* 16, 6, 516–525.
- [160] Lundström, R. 2002. *Rheological and fatigue characterisation of asphalt concrete mixtures using uniaxial testing*. Trita-VT 02:02, Stockholm.
- [161] Lundström, R., Isacsson, U., and Ekblad, J. 2003. Investigations of stiffness and fatigue properties of asphalt mixtures. *Journal of Materials Science* 38, 24, 4941–4949.
- [162] Lytton, R. L., Uzan, J., Fernando, E. G., Roque, R., Hiltunen, D., and Stoffels, S. M. 1993. DEVELOPMENT AND VALIDATION OF PERFORMANCE PREDICTION MODELS AND SPECIFICATIONS FOR ASPHALT BINDERS AND PAVING MIXES. 0309056179, SHRP-A-357.
- [163] Mackiewicz, P. 2016. *Trwałość zmęczeniowa mieszanek mineralno-asfaltowych stosowanych w nawierzchniach drogowych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej; Politechnika Wroclawska., Wrocław.
- [164] Mackiewicz, P. 2018. Fatigue cracking in road pavement. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 356, 1–10.
- [165] Mackiewicz, P. and Mączka, E. 2021. The Impact of Water and Road Salt with Anti-Caking Agent on the Stiffness of Select Mixes Used for the Road Surface. *Materials (Basel, Switzerland)* 14, 6.
- [166] Maggiore, C. 2014. *A comparison of different test and analysis methods for asphalt fatigue*. PhD, University of Nottingham.
- [167] Maggiore, C., Airey, G., and Grenfell, J. 2013. *Evaluation of different fatigue failure criteria for asphalt material using laboratory tests*.
- [168] Mangiafico, S., Sauzéat, C., Di Benedetto, H., Pouget, S., Olard, F., and Planque, L. 2015. Quantification of biasing effects during fatigue tests on asphalt mixes: non-linearity, self-heating and thixotropy. *Road Materials and Pavement Design* 16, sup2, 73–99.
- [169] Marek Pszczoła. 2018. *Temperatura ekwiwalentna do projektowania nawierzchni asfaltowych w Polsce*. DOI=10.13140/RG.2.2.17712.00008.
- [170] Mączka, E. 2018. Healing process in Mineral asphalt mixtures. *TO - PK* 2018, 11, 116–127.
- [171] Mejłun Ł., Judycki J., and Dołżycki B. 2015. Analiza lepkosprężysta zachowania się konstrukcji nawierzchni drogowej w zależności od temperatury i warunków obciążenia. *Drogownictwo*, 10, 341–348.
- [172] Mena I. Souliman and Kamil Kaloush. 2011. Assessment of the extended fatigue life for rubber and polymer modified asphalt mixtures using flexural bending beam fatigue test. *Jordan Journal of Civil Engineering* 5, 2, 210–215.
- [173] METEOprognoza. 2019. *prognoza pogody metodą EMS*. <https://meteoprognoza.pl/2019/06/10/wtorek-14/>. Dostęp: 15/01/2022.
- [174] Micaelo, R., Al-Mansoori, T., and Garcia, A. 2016. Study of the mechanical properties and self-healing ability of asphalt mixture containing calcium-alginate capsules. *Construction and Building Materials* 123, 734–744.
- [175] Miętus M. 2020. *Klimat Polski 2020*. <https://www.imgw.pl/badania-nauka/klimat>. Dostęp: 07/03/2022.
- [176] Miner M.A. Cumulative damage in fatigue, 159–164.
- [177] Mitchell, M. R., Link, R. E., Kowalski, K. J., McDaniel, R. S., Olek, J., and Shah, A. 2011. Modified Ignition Oven Test Procedure for Determination of Binder Content in Hot Mix Asphalt Containing Dolomite Aggregate. *J. Test. Eval.* 39, 6, 103312.
- [178] Monismith, C. L. and Deacon, J. A. 1969. Fatigue of Asphalt Paving Mixtures. *Transportation Engineering Journal of ASCE* 95, 2, 317–346.
- [179] Mrugała, J. and Chomicz-Kowalska, A. 2017. Influence of the Production Process on the Selected Properties of Asphalt Concrete. *Procedia Engineering* 172, 754–759.
- [180] Mullapudi, R. S., Aparna Noojilla, S. L., and Reddy, K. S. 2020. Fatigue and Healing Characteristics of RAP Mixtures. *J. Mater. Civ. Eng.* 32, 12, 4020390.
- [181] Myers, L., Roque, R., Ruth, B. E., and Drakos, C. 1999. Measurement of Contact Stresses for Different Truck Tire Types To Evaluate Their Influence on Near-Surface Cracking and Rutting. *Transportation Research Record* 1655, 1, 175–184.
- [182] Myre, J. 1992. *Fatigue of asphalt materials for Norwegian conditions*. Seventh International Conference on Asphalt Pavements 3.
- [183] Nagórski, R. T. and Blazejowski, K. 2014. *Mechanika nawierzchni drogowych w zarysie*. Wydaw.Nauk.PWN, Warszawa.
- [184] Nakasa, K., Takei, H., and Kajiwara, K. 1981. Effect of stress wave shape on the crack propagation velocity in cyclic delayed failure. *Engineering Fracture Mechanics* 14, 3, 507–517.

- [185] Nassar, A. I., Mohammed, M. K., Thom, N., and Parry, T. 2018. Characterisation of high-performance cold bitumen emulsion mixtures for surface courses. *International Journal of Pavement Engineering* 19, 6, 509–518.
- [186] NCHRP. 2004. *Calibration fatigue models for flexible pavements. Appendix II-1*. MEPDG. https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/archive/mepdg/2appendices_II.pdf.
- [187] NCHRP. 2009. *Pre-Overlay Treatment of Existing Pavements. Distresses*. Transportation Research Board, Washington, D.C.
- [188] NCHRP. 2010. *Top-Down Cracking of Hot-Mix Asphalt Layers: Models for Initiation and Propagation*. Transportation Research Board, Washington, D.C.
- [189] Owiecka, B. 2017. Effect of aging on selected properties of bituminous binders Wpływ starzenia na wybrane właściwości lepiszczy asfaltowych. *CHEMICAL REVIEW* 1, 4, 12–15.
- [190] Palmgren A.V. 1924. *Endurance of ball-bearing*. *Zeitschr, Ingenieure*.
- [191] Pan, P., Wu, S., Hu, X., Wang, P., and Liu, Q. 2017. Effect of freezing-thawing and ageing on thermal characteristics and mechanical properties of conductive asphalt concrete. *Construction and Building Materials* 140, 239–247.
- [192] PAN. 2020. *Klimat / Zmiany Klimatu - Polska Akademia Nauk. Zmiany Klimatu* (Jun. 2020).
- [193] Papagiannakis A. T. 2013. Mechanistic-Empirical Pavement Design; A Brief Overview. *Geotechnical Engineering*, 44, 75–82.
- [194] Pasetto, M. and Baldo, N. 2012. Fatigue Behavior Characterization of Bituminous Mixtures Made with Reclaimed Asphalt Pavement and Steel Slag. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 53, 297–306.
- [195] Pavement Interactive. 2019. *Pavement Distresses - Pavement Interactive*. <https://pavementinteractive.org/reference-desk/pavement-management/pavement-distresses/>. Dostęp: 22/02/2021.
- [196] Pellinen, T. K. 2001. *Investigation of the use of dynamic modulus as an indicator of hot-mix asphalt performance*. PhD, Arizona State University.
- [197] Pellinen, T. K., Christensen, D. W., Rowe, G. M., and Sharrock, M. 2004. Fatigue-Transfer Functions: How Do They Compare? *Transportation Research Record* 1896, 1, 77–87.
- [198] Pellinen, T. K. and Witzak, M. W. 2002. Use of Stiffness of Hot-Mix Asphalt as a Simple Performance Test. *Transportation Research Record* 1789, 1, 80–90.
- [199] Pereira, P. and Pais, J. 2017. Main flexible pavement and mix design methods in Europe and challenges for the development of an European method. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)* 4, 4, 316–346.
- [200] Pereira P., Pais J., and Sousa J. 1997. Comparison between laboratorial and field bituminous mixtures 97, 2, 291–301.
- [201] Perraton, D., Baaj, H., Di Benedetto, H., and Paradis, M. 2003. Évaluation de la résistance à la fatigue des enrobés bitumineux fondée sur l'évolution de l'endommagement du matériau en cours d'essai : aspects fondamentaux et application à l'enrobé à matrice de pierre. *Can. J. Civ. Eng.* 30, 5, 902–913.
- [202] Piątkowska K. 2016. *Współczynnik korelacji Pearsona*. <https://www.statystyczny.pl/wspolczynnik-korelacji-pearsona-o-piratach-globalnym-ociepleniu-i-potworze-spaghetti/>. Dostęp: 27/10/2021.
- [203] Piłat, J., Radziszewski, P., and Król, J. 2015. *Technologie materiałów i nawierzchni asfaltowych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej; Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej., Warszawa.
- [204] Pogoda i Klimat. 2021. *Rekordy temperatury w Polsce - Pogoda i Klimat*. <https://meteomodel.pl/rekordy-temperatury/>. Dostęp: 02/12/2021.
- [205] Polski Komitet Normalizacyjny. 2008. *Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw -- Część 7: Oznaczanie gęstości wypełniacza -- Metoda piknometryczna* 91.100.15 - Materiały mineralne i wyroby. PKN 91.100.15 - Materiały mineralne i wyroby, 1097-7:2008. Dostęp: 08/10/2021.
- [206] Polski Komitet Normalizacyjny. 2009. *Badania geometrycznych właściwości kruszyw -- Część 10: Ocena zawartości drobnych cząstek -- Uziarnienie wypełniaczy (przesiewanie w strumieniu powietrza)* 91.100.15 - Materiały mineralne i wyroby. PKN 91.100.15 - Materiały mineralne i wyroby, 933-10:2009. Dostęp: 08/10/2021.
- [207] Polski Komitet Normalizacyjny. 2010. *Asfalty i lepiszcza asfaltowe -- Wymagania dla asfaltów drogowych* 93.080.20 - Materiały do budowy dróg, 91.100.50 - Lepiszczka. Materiały uszczelniające. PKN 93.080.20 - Materiały do budowy dróg, 91.100.50 - Lepiszczka. Materiały uszczelniające, PN-EN 12591:2010. Dostęp: 07/10/2021.
- [208] Polski Komitet Normalizacyjny. 2010. *Asfalty i lepiszcza asfaltowe -- Wymagania dla asfaltów drogowych* 305/2011. PKN, Warszawa 305/2011, 12591:2010. Dostęp: 08/03/2021.
- [209] Polski Komitet Normalizacyjny. 2011. *Asfalty i lepiszcza asfaltowe -- Zasady klasyfikacji asfaltów modyfikowanych polimerami* 93.080.20 - Materiały do budowy dróg. PKN 93.080.20 - Materiały do budowy dróg, PN-EN 14023:2011. Dostęp: 07/10/2021.
- [210] Polski Komitet Normalizacyjny. 2011. *Asfalty i lepiszcza asfaltowe -- Zasady klasyfikacji asfaltów modyfikowanych polimerami* 305/2011. PKN, Warszawa 305/2011, 14023:2011. Dostęp: 08/03/2021.

- [211] Polski Komitet Normalizacyjny. 2012. *Badania geometrycznych właściwości kruszyw -- Część 1: Oznaczanie składu ziarnowego -- Metoda przesiewania* 91.100.15 - Materiały mineralne i wyroby. PKN 91.100.15 - Materiały mineralne i wyroby, 933-1:2012. Dostęp: 08/10/2021.
- [212] Polski Komitet Normalizacyjny. 2013. *Badania geometrycznych właściwości kruszyw -- Część 9: Ocena zawartości drobnych cząstek -- Badanie błękitem metylenowym* 91.100.15 - Materiały mineralne i wyroby. PKN 91.100.15 - Materiały mineralne i wyroby, 933-9+A1:2013-07. Dostęp: 08/10/2021.
- [213] Polski Komitet Normalizacyjny. 2013. *Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw -- Część 6: Oznaczanie gęstości ziarn i nasiąkliwości* 91.100.15 - Materiały mineralne i wyroby. PKN 91.100.15 - Materiały mineralne i wyroby, 1097-6:2013-11. Dostęp: 08/10/2021.
- [214] Polski Komitet Normalizacyjny. 2014. *Termoelementy -- Część 1: Specyfikacje i tolerancje EMF* 17.200.20. PKN, Warszawa 17.200.20, 60584-1:2014-04. <https://sklep.pkn.pl/pn-en-60584-1-2014-04e.html>. Dostęp: 10/01/2022.
- [215] Polski Komitet Normalizacyjny. 2014. *Asfalty i lepiszcza asfaltowe -- Zasady klasyfikacji asfaltów modyfikowanych polimerami. Dodatek Ap1* 93.080.20 - Materiały do budowy dróg. PKN 93.080.20 - Materiały do budowy dróg, PN-EN 14023:2011/Ap1:2014-04. Dostęp: 07/10/2021.
- [216] Polski Komitet Normalizacyjny. 2016. *Mieszanki mineralno-asfaltowe --- Metody badań -- Część 35: Mieszanie laboratoryjne* 93.080.20 - Materiały do budowy dróg. PKN, Warszawa 93.080.20 - Materiały do budowy dróg, 12697-35:2016-05. Dostęp: 10/10/2021.
- [217] Polski Komitet Normalizacyjny. 2016. *Mieszanki mineralno-asfaltowe --- Metody badań -- Część 35: Mieszanie laboratoryjne* PKN/KT 212. PKN, Warszawa PKN/KT 212, 12697-35:2016-05. Dostęp: 10/03/2021.
- [218] Polski Komitet Normalizacyjny. 2016. *Mieszanki mineralno-asfaltowe -- Wymagania -- Część 1: Beton asfaltowy* 93.080.20 - Materiały do budowy dróg. PKN 93.080.20 - Materiały do budowy dróg, 13108-1:2016-07. Dostęp: 08/10/2021.
- [219] Polski Komitet Normalizacyjny. 2016. *Mieszanki mineralno-asfaltowe -- Wymagania -- Część 20: Badanie typu* 93.080.20 - Materiały do budowy dróg. PKN 93.080.20 - Materiały do budowy dróg, 13108-20:2016-07. Dostęp: 08/10/2021.
- [220] Polski Komitet Normalizacyjny. 2017. *Mieszanki mineralno-asfaltowe -- Metody badań -- Część 23: Oznaczanie wytrzymałości mieszanki mineralno-asfaltowej na rozciąganie pośrednie* 93.080.20 - Materiały do budowy dróg. PKN, Warszawa 93.080.20 - Materiały do budowy dróg, 12697-23:2017-12. Dostęp: 23/10/2021.
- [221] Polski Komitet Normalizacyjny. 2018. *Bituminous mixtures -- Test methods -- Part 26: Stiffness. PN-EN 12697-26:2018-08* 2018 2018, PN-EN 12697-26:2018-08, 1–50. Dostęp: 29/01/2021.
- [222] Polski Komitet Normalizacyjny. 2018. *Mieszanki mineralno-asfaltowe -- Metody badań -- Część 24: Odporność na zmęczenie* 93.080.20 - Materiały do budowy dróg. PKN, Warszawa 93.080.20 - Materiały do budowy dróg, 12697-24:2018-08. Dostęp: 10/10/2021.
- [223] Polski Komitet Normalizacyjny. 2018. *Mieszanki mineralno-asfaltowe -- Metody badań -- Część 24: Odporność na zmęczenie* 93.080.20 - Materiały do budowy dróg. PKN, Warszawa 93.080.20 - Materiały do budowy dróg, 12697-24:2018-08. Dostęp: 14/04/2021.
- [224] Polski Komitet Normalizacyjny. 2018. *Mieszanki mineralno-asfaltowe -- Metody badań -- Część 26: Szywność* 93.080.20 - Materiały do budowy dróg. PKN, Warszawa 93.080.20 - Materiały do budowy dróg, 12697-26:2018-08. Dostęp: 10/10/2021.
- [225] Polski Komitet Normalizacyjny. 2019. *Mieszanki mineralno-asfaltowe -- Metody badań -- Część 30: Przygotowanie próbek zagęszczonych przez ubijanie* 93.080.20 - Materiały do budowy dróg. PKN, Warszawa 93.080.20 - Materiały do budowy dróg, 12697-30:2019-01. Dostęp: 10/10/2021.
- [226] Polski Komitet Normalizacyjny. 2019. *Mieszanki mineralno-asfaltowe -- Metody badań -- Część 5: Oznaczanie gęstości* 93.080.20 - Materiały do budowy dróg. PKN 93.080.20 - Materiały do budowy dróg, 12697-5:2019-01. Dostęp: 08/10/2021.
- [227] Polski Komitet Normalizacyjny. 2019. *Mieszanki mineralno-asfaltowe -- Metody badań -- Część 8: Oznaczanie zawartości wolnej przestrzeni próbek mineralno-asfaltowych* 93.080.20 - Materiały do budowy dróg. PKN, Warszawa 93.080.20 - Materiały do budowy dróg, 12697-8:2019-01. Dostęp: 19/10/2021.
- [228] Polski Komitet Normalizacyjny. 2019. *Mieszanki mineralno-asfaltowe -- Metoda badań -- Część 33: Przygotowanie próbek zagęszczanych urządzeniem wahującym* 93.080.20 - Materiały do budowy dróg. PKN, Warszawa 93.080.20 - Materiały do budowy dróg, 12697-33:2019-03. Dostęp: 10/10/2021.
- [229] Polski Komitet Normalizacyjny. 2020. *Asfalty i lepiszcza asfaltowe -- Zasady klasyfikacji asfaltów modyfikowanych polimerami. Dodatek Ap2* 93.080.20 - Materiały do budowy dróg. PKN 93.080.20 - Materiały do budowy dróg, PN-EN 14023:2011/Ap2:2020-02. Dostęp: 07/10/2021.
- [230] Polski Komitet Normalizacyjny. 2020. *Mieszanki mineralno-asfaltowe -- Metody badań -- Część 22: Koleinowanie* 93.080.20 - Materiały do budowy dróg. PKN, Warszawa 93.080.20 - Materiały do budowy dróg, 12697-22:2020-07. Dostęp: 26/10/2021.

- [231] Polski Komitet Normalizacyjny. 2020. *Mieszanki mineralno-asfaltowe -- Metody badań -- Część 22: Koleinowanie* 93.080.20 - Materiały do budowy dróg. PKN, Warszawa 93.080.20 - Materiały do budowy dróg, 12697-22:2020-07. Dostęp: 10/10/2021.
- [232] Polski Komitet Normalizacyjny. 2020. *Mieszanki mineralno-asfaltowe -- Metody badań -- Część 6: Oznaczanie gęstości objętościowej próbek mieszanki mineralno-asfaltowej* 93.080.20 - Materiały do budowy dróg. PKN, Warszawa 93.080.20 - Materiały do budowy dróg, 12697-6:2020-07. Dostęp: 08/10/2021.
- [233] Pronk, A. 1996. *Analytical description of the heat transfer in an asphalt beam, tested in the 4-point bending apparatus*. DWW W-DWW-96-006, Delft, Netherlands.
- [234] Pronk, A. 1996. Temperature increase in an asphalt beam during fatigue; theory and practice. *Wegbouwkundige Werkdagen*.
- [235] Pronk, A. C. 1997. COMPARISON OF 2 AND 4 POINT FATIGUE TESTS AND HEALING IN 4 POINT DYNAMIC BENDING TEST BASED ON THE DISSIPATED ENERGY CONCEPT. *Eighth International Conference on Asphalt Pavements Federal Highway Administration, Volume II*.
- [236] Pronk, A. C. and HOPMAN, P. C. 1990. ENERGY DISSIPATION: THE LEADING FACTOR OF FATIGUE. *Highway Research: Sharing the Benefits. The United States Strategic Highway Research Program Institution of Civil Engineers*, Paper 17.
- [237] Prowell, B. D. 2010. *Validating the fatigue endurance limit for hot mix asphalt*. NCHRP report 646. Transportation Research Board, Washington, D.C.
- [238] Raad, L., Saboundjian, S., and Minassian, G. 2001. Field Aging Effects on Fatigue of Asphalt Concrete and Asphalt-Rubber Concrete. *Transportation Research Record* 1767, 1, 126–134.
- [239] Radziszewski Piotr, Pokorski Piotr, and Gudanowska Alicja. 2017. Ocena lepiszczy asfaltowych stosowanych do nawierzchni drogowych w Polsce - badania ankietowe. *Magazyn Autostrady* 2017, 10, 22–27.
- [240] Rajbongshi, P. and Das, A. 2009. A Systematic Approach of Field Calibration of Fatigue Equation for Asphalt Pavements. *Road Materials and Pavement Design* 10, 1, 109–124.
- [241] Reyes-Otriz O. 2012. EFFECT OF THE FAILURE CRITERION ON THE LABORATORY FATIGUE RESPONSE PREDICTION OF HOT-MIX ASPHALT MIXTURES, 174, 31–39.
- [242] Riara, M., Tang, P., Mo, L., Hong, W., Chen, M., and Wu, S. 2018. Evaluation of moisture and temperature effect on crack healing of asphalt mortar and mixtures using healing agents. *Construction and Building Materials* 177, 388–394.
- [243] RILEM. 2016. *Advances in interlaboratory testing and evaluation of bituminous materials*. Springer.
- [244] Robert P. Lottman, Larry J. White, and Douglas J. Frith. 1988. *Methods of predicting and controlling moisture damage in asphalt concrete*.
- [245] Roberts, F. L., Mohammad, L. N., and Wang, L. B. 2002. History of Hot Mix Asphalt Mixture Design in the United States. *J. Mater. Civ. Eng.* 14, 4, 279–293.
- [246] Rodrigues, P. M., Rodrigues, R. M., Costa, B. H., Tavares Martins, A. A., and Da Esteves Silva, J. C. 2010. Multivariate analysis of the water quality variation in the Serra da Estrela (Portugal) Natural Park as a consequence of road deicing with salt. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 102, 2, 130–135.
- [247] Roque, R., Birgisson, B., Drakos, C., and Dietrich, B. 2004. Development and field evaluation of energy-based criteria for top-down cracking performance of hot mix asphalt. In 73, 229–260.
- [248] Roque, R., Birgisson, B., Sangpetngam, B., and Zhang, Z. 2002. Hot mix asphalt fracture mechanics: A fundamental crack growth law for asphalt mixtures. In 71, 816–827.
- [249] Roque, R., Isola, M., Chun, S., Zou, J., Koh, C., and Lopp, G. 2012. *Effects of laboratory heating, cyclic pore pressure, and cyclic loading on fracture properties of asphalt mixture*.
- [250] Rosik P. and Komornicki T. 2020. *Rozkład ruchu zewnętrznego (tranzytowego i źródłowo-docelowego) samochodów ciężarowych w Polsce w okresie 2005-2010-2015*. Centrum Unijnych Projektów Transportowych.
- [251] Rowe, G., Blankenship, P., and Bennert, T. 2012. Fatigue assessment of conventional and highly modified asphalt materials with ASTM and AASHTO standard specifications. In *Four-point bending. Proceedings of the third conference on four-point bending, Davis, CA, USA, 17-18 September 2012*, J. Carvalho-Pais, J. T. Harvey and J. C. Pais, Eds. CRC Press, Boca Raton, Fla., 113–122. DOI=10.1201/b12767-14.
- [252] Rowe, G. M. 1996. *Application of the dissipated energy concept to fatigue cracking in asphalt pavements*. doctor, University of Nottingham.
- [253] Said, S. F. 1988. *Fatigue characteristics of asphalt concrete mixtures*. VTI meddelande 583A. Statens Väg- och Trafikinstitut, Linköping.
- [254] Salih, S., Gómez-Meijide, B., Aboufoul, M., and Garcia, A. 2018. Effect of porosity on infrared healing of fatigue damage in asphalt. *Construction and Building Materials* 167, 716–725.
- [255] Saltanovs, R., Rubenis, A., and Krainyukov, A. 2019. Influence of Constructive Materials of Road Cover on Magnetic Field Dispersion of Wireless Power Transmission Systems. In *Reliability and Statistics in*

- Transportation and Communication*, I. Kabashkin, I. Yatskiv and O. Prentkovskis, Eds. Lecture Notes in Networks and Systems. Springer International Publishing, Cham, 214–223. DOI=10.1007/978-3-030-12450-2_20.
- [256] Santos, C., Cabette, M., Pais, J., Carvalho, V., and Pereira, P. 2020. Assessing Self-healing Asphalt by the Heating of Asphalt Mixtures. In *Proceedings of the 9th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements—Mairepav9*, C. Raab, Ed. Lecture Notes in Civil Engineering. Springer International Publishing, Cham, 253–261. DOI=10.1007/978-3-030-48679-2_25.
- [257] Sarsam, S. I. 2015. Crack Healing Potential of Asphalt Concrete Pavement. *IJSRK* 3, 1, 1–12.
- [258] Scarpas, A., Kringos, N., Al-Qadi, I., and A., L. 2012. *7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements. Mechanisms, Modeling, Testing, Detection and Prevention Case Histories*. RILEM Bookseries 4. Springer, Dordrecht.
- [259] Schlangen, E. and Sangadji, S. 2013. Addressing Infrastructure Durability and Sustainability by Self Healing Mechanisms - Recent Advances in Self Healing Concrete and Asphalt. *Procedia Engineering* 54, 39–57.
- [260] Sebaaly, P. E., Hajj, E. Y., Sathanathan, T., and Shivakolunthar, S. 2017. A comprehensive evaluation of moisture damage of asphalt concrete mixtures. *International Journal of Pavement Engineering* 18, 2, 169–182.
- [261] Shakhani M., Topal A., Sengoz B., and Almusawi A., Eds. 2019. *Review of the Implementation of the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*.
- [262] Shen, S. 2006. *Dissipated Energy Concepts for HMA Performance: Fatigue and Healing*. *Dissipated Energy Concepts for HMA Performance: Fatigue and Healing*, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- [263] Shen, S., Airey, G. D., Carpenter, S. H., and Huang, H. 2006. A Dissipated Energy Approach to Fatigue Evaluation. *Road Materials and Pavement Design* 7, 1, 47–69.
- [264] Shen, S. and Carpenter, S. H. 2007. Development of an asphalt fatigue model based on energy principles. *Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions* 76, 525–573.
- [265] Shen, S., Chiu, H.-M., and Huang, H. 2010. Characterization of Fatigue and Healing in Asphalt Binders. *J. Mater. Civ. Eng.* 22, 9, 846–852.
- [266] Shen, S. and Sutharsan, T. 2011. Quantification of Cohesive Healing of Asphalt Binder and its Impact Factors Based on Dissipated Energy Analysis. *Road Materials and Pavement Design* 12, 3, 525–546.
- [267] Shenoy, A. and Romero, P. 2002. Standardized Procedure for Analysis of Dynamic Modulus |E*| Data to Predict Asphalt Pavement Distresses. *Transportation Research Record* 1789, 1, 173–182.
- [268] Shiferaw-Garoma W., Emer-Tucay Q., Tarekegn K. 2017. Analysis of Stress- Strain and Deflection of Flexible Pavements Using Finite Element Method Case Study on Bako-Nekemte Road. *Journal of Civil, Construction and Environmental Engineering* 2, 4, 100–111.
- [269] Shiva-Kumar, G. and Suresha, S. N. 2019. State of the art review on mix design and mechanical properties of warm mix asphalt. *Road Materials and Pavement Design* 20, 7, 1501–1524.
- [270] Si, Z., Little, D. N., and Lytton, R. L. 2002. Characterization of Microdamage and Healing of Asphalt Concrete Mixtures. *J. Mater. Civ. Eng.* 14, 6, 461–470.
- [271] 2021. *SISKOM - Generalny Pomiar Ruchu*. <http://www.siskom.waw.pl/nauka-gpr.htm>. Dostęp: 06/10/2021.
- [272] Souliman, M. 2012. *Integrated Predictive Model for Healing and Fatigue Endurance Limit for Asphalt Concrete*. doctorat, Arizona State University.
- [273] Souliman, M., Zeiada, W., Kaloush, K., and Mamlouk, M. 2012. Assessment of different flexure fatigue failure analysis methods to estimate the number of cycles to failure of asphalt mixtures. *Taylor and Francis*, 27–34.
- [274] Souliman M. 2012. *Assessment of different flexure fatigue failure analysis methods to estimate the number of cycles to failure of asphalt mixtures*, California, U.S.A.
- [275] Speight J. 2016. *Asphalt Materials Science and Technology*. Elsevier.
- [276] Statystyka-zadania z rozwiązaniami. 2014. *Współczynniki zbieżności i determinacji*. <https://www.statystyka-zadania.pl/wspolczynniki-zbieznosci-i-determinacji/>. Dostęp: 27/10/2021.
- [277] Su, Y., Asadi, H., and Nikraz, H. 2020. VECD investigation and quantification of rest period healing within pulse-rest loading. *International Journal of Pavement Engineering* 21, 14, 1729–1745.
- [278] Sudyka J., Borucki R., Graczeński A., and Kusiak J. 2005. *Wpływ parametrów termiczno-mechanicznych nawierzchni asfaltowej na trwałość zmęczeniową nawierzchni*. Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa.
- [279] Sukhija, M. and Saboo, N. 2021. A comprehensive review of warm mix asphalt mixtures-laboratory to field. *Construction and Building Materials* 274, 121781.

- [280] Sun, D., Pang, Q., Zhu, X., Tian, Y., Lu, T., and Yang, Y. 2017. Enhanced Self-Healing Process of Sustainable Asphalt Materials Containing Microcapsules. *ACS Sustainable Chem. Eng.* 5, 11, 9881–9893.
- [281] Sybilski, D. 2004. *Zastosowanie asfaltu spienionego w technologii recyklingu nawierzchni na zimno*. Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa.
- [282] Sybilski, D. 2005. *Wyznaczenie charakterystyk starzeniowych mieszanek mineralno-asfaltowych. Sprawozdanie końcowe z tematu TN-235*. TN 235. Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa.
- [283] Sybilski, D. and Bańkowski, W. 2004. Temperatura równoważna nawierzchni asfaltowej ze względu na zmęczenie w polskich warunkach klimatycznych. *Drogownictwo* nr 6, 179–184.
- [284] Szruba M. 2017. Trendy i przyszłość nawierzchni bitumicznych. *Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne* 11-12.2017, 6, 36–40.
- [285] Szurba M. 2015. TECHNOLOGIE NAPRAWY NAWIERZCHNI BITUMICZNYCH. *Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne* 2015, 12.2015, 1–8.
- [286] Tangella R., Craus J., Deacon, J. A., and Monismith, C. L. 1990. *Summary report on fatigue response of asphalt mixtures. SHRP-A-312 TM-UCB-A-003A-89-3*, California, U.S.A.
- [287] Tarefder, R., Faisal, H., and Barlas, G. 2018. Freeze-thaw effects on fatigue LIFE of hot mix asphalt and creep stiffness of asphalt binder. *Cold Regions Science and Technology* 153, 197–204.
- [288] The Intergovernmental Panel on Climate Change. 2020. *Global Warming of 1.5 °C* —. <https://www.ipcc.ch/sr15/>. Dostęp: 07/03/2022.
- [289] Transportation Research Board. 2007. *Guidelines for the Selection of Snow and Ice Control Materials to Mitigate Environmental Impacts*. Transportation Research Board, Washington, D.C.
- [290] Trzaska E. 2014. Asfalty drogowe - produkcja, klasyfikacja oraz właściwości. *Nafta-Gaz*, 5, 325–331.
- [291] Trzaska E. 2015. Dodatki i modyfikatory do asfaltów drogowych. *Nafta-Gaz*, 3, 195–200.
- [292] Tsang, C., Shehata, M. H., and Lotfy, A. 2016. Optimizing a Test Method to Evaluate Resistance of Pervious Concrete to Cycles of Freezing and Thawing in the Presence of Different Deicing Salts. *Materials (Basel, Switzerland)* 9, 11.
- [293] TVN. 2021. *Lipiec 2021 był najcieplejszym miesiącem w historii świata*. <https://tvn24.pl/tvnmeteo/najnowsze/lipiec-2021-byl-najcieplejszym-miesiacem-w-historii-swiata-5193341>. Dostęp: 15/01/2022.
- [294] Vaitkus, A., Čygas, D., Laurinavičius, A., Vorobjovas, V., and Perveneckas, Z. 2016. Influence of warm mix asphalt technology on asphalt physical and mechanical properties. *Construction and Building Materials* 112, 800–806.
- [295] Vallerga, B. A. and Lovering, W. R. 1985. EVOLUTION OF THE HVEEM STABILOMETER METHOD OF DESIGNING ASPHALT PAVING MIXTURES. *Association of Asphalt Paving Technologists Proc* 54, UR - <https://trid.trb.org/view/575951>.
- [296] van de Ven, M. F. C., Jenkins, K. J., Voskuilen, J. L. M., and van den Beemt, R. 2007. Development of (half-) warm foamed bitumen mixes: state of the art. *International Journal of Pavement Engineering* 8, 2, 163–175.
- [297] van Dijk, W. 1975. *Practical Fatigue Characterization of Bituminous Mixes*. Shell International Petroleum Company Limited.
- [298] van Dijk, W., Moreaud, H., Quedeville, A., and Uge, P. THE FATIGUE OF BITUMEN AND BITUMINOUS MIXES. *Presented at the Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Grosvenor House, Park Lane, London, England, Sept. 11-15, 1972*. 1, Proceeding.
- [299] van Dijk, W. and VISSER, W. 1977. ENERGY APPROACH TO FATIGUE FOR PAVEMENT DESIGN. *Association of Asphalt Paving Technologists Proc* 46.
- [300] van Poel, C. D. 1954. A general system describing the visco-elastic properties of bitumens and its relation to routine test data. *J. Appl. Chem.* 4, 5, 221–236.
- [301] Vega-Zamanillo, Á., Juli-Gándara, L., Calzada-Pérez, M. Á., and Teijón-López-Zuazo, E. 2020. Impact of Temperature Changes and Freeze—Thaw Cycles on the Behaviour of Asphalt Concrete Submerged in Water with Sodium Chloride. *Applied Sciences* 10, 4, 1241.
- [302] Victoria R. Kelly, Stuart E.G. Findaly, William H. Schlesinger, Kirsten Menking, Allison Morrill Chatrchyan. 2010. *Road salt - moving toward the solution*. The Cary Institute of Ecosystem Studies.
- [303] Wang, L. 2011. *Mechanics of asphalt. Microstructure and micromechanics*. McGraw-Hill, New York.
- [304] Wiech J. 2022. *Globalne ocieplenie uderza w Polskę. Raport IMGW nie pozostawia złudzeń*. <https://energetyka24.com/klimat/globalne-ocieplenie-uderza-w-polske-raport-imgw-nie-pozostawia-zludzen-analiza>. Dostęp: 07/03/2022.
- [305] Wikipedia. 2018. *Asphalt concrete - Wikipedia*. <https://en.wikipedia.org/w/index.php?oldid=854191152>. Dostęp: 31/10/2018.
- [306] Wikipedia. 2022. *Rekordy klimatyczne w Polsce – Wikipedia, wolna encyklopedia*. https://pl.wikipedia.org/wiki/Rekordy_klimatyczne_w_Polsce. Dostęp: 15/01/2022.

- [307] Williams, M. L., Landel, R. F., and Ferry, J. D. 1955. The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-forming Liquids. *J. Am. Chem. Soc.* 77, 14, 3701–3707.
- [308] Witczak, M. W. and Bari, J. 2004. *Development of a master curve (E^*) database for lime modified asphaltic mixtures*. Arizona State University, Tempe.
- [309] Witczak, M. W., Bari, J., and Sotil, A. 2004. *Dynamic modulus (E^*) test and master curve database. Inter Team Technical Report Prepared for the Superpave Support and Performance Models Management (NCHRP 9-19) Project Department of Civil and Environmental Engineering*. Arizona State University, Tempe.
- [310] Witczak, M. W., Mamlouk, M., Souliman, M., and Zeiada, W. 2013. *NCHRP Project No. NCHRP 9-44 A - Validating an Endurance Limit for Hot-Mix Asphalt (HMA) Pavements: Laboratory Experiment and Algorithm Development*. Transportation Research Board, U.S.A.
- [311] Witczak, M. W. and Sotil, A. 2004. *A recommended methodology for developing dynamic modulus E^* master curves from non-linear optimization. Inter Team Technical Report Prepared for the Superpave Support and Performance Models Management (NCHRP 9-19) Project Department of Civil and Environmental Engineering*. Arizona State University, Tempe.
- [312] Xiang, H., Chen, L., Zhang, W., Liu, P., and He, Z. 2020. Effect of Healing Conditions on Fatigue-Healing of Asphalt Binder and Asphalt Mixture. *J. Mater. Civ. Eng.* 32, 5, 4020074.
- [313] Xiang, H., Zhang, W., Liu, P., and He, Z. 2020. Fatigue–healing performance evaluation of asphalt mixture using four-point bending test. *Mat. Struct.* 53, 3.
- [314] Yaghoubi, E., Sudarsanan, N., and Arulrajah, A. 2021. Stress-strain response analysis of demolition wastes as aggregate base course of pavements. *Transportation Geotechnics* 30, 100599.
- [315] Yang, S., Braham, A., Wang, L., and Wang, Q. 2016. Influence of aging and moisture on laboratory performance of asphalt concrete. *Construction and Building Materials* 115, 527–535.
- [316] Yoo, M.-Y., Jeong, S.-H., Park, J.-Y., Kim, N.-H., and Kim, K.-W. 2011. Low-Temperature Fracture Characteristics of Selected Warm-Mix Asphalt Concretes. *Transportation Research Record* 2208, 1, 40–47.
- [317] You, Z. and Buttlar, W. G. 2004. Discrete Element Modeling to Predict the Modulus of Asphalt Concrete Mixtures. *J. Mater. Civ. Eng.* 16, 2, 140–146.
- [318] Zheng, Y., Cai, Y., Zhang, G., and Fang, H. 2014. Fatigue property of basalt fiber-modified asphalt mixture under complicated environment. *J. Wuhan Univ. Technol.-Mat. Sci. Edit.* 29, 5, 996–1004.
- [319] Zhou, Z., Li, H., Liu, X., and He, W. 2020. Investigation of sea salt erosion effect on the asphalt-aggregate interfacial system. *Int. J. Pavement Res. Technol.* 13, 2, 145–153.
- [320] Zhu, H., Sun, L., Yang, J., Chen, Z., and Gu, W. 2011. Developing Master Curves and Predicting Dynamic Modulus of Polymer-Modified Asphalt Mixtures. *J. Mater. Civ. Eng.* 23, 2, 131–137.
- [321] Zhu, J., Birgisson, B., and Kringos, N. 2014. Polymer modification of bitumen: Advances and challenges. *European Polymer Journal* 54, 18–38.
- [322] Zumrawi, M. M. E. and Edrees, S. A. S. 2016. Comparison of Marshall and Superpave asphalt design methods for Sudan pavement mixes. *International Journal of Scientific and Technical Advancements* 2, 1, 29–35.

Streszczenie

W pracy badano wpływ zjawiska regeneracji oraz oddziaływań środowiskowych (woda i mróz, sól drogowa, kumulacja – woda i mróz + sól drogowa) na trwałość zmęczeniową mieszanek mineralno-asfaltowych charakteryzujących się różnym rodzajem asfaltu, jego zawartością oraz technologią produkcji. Rozważania wzbogacono o tematykę trwałości zamodelowanych konstrukcji podatnych typu B z wykorzystaniem kryterium zmęczeniowego uwzględniając regenerację, oddziaływania środowiskowe oraz rodzaj asfaltu. Analizy przeprowadzono na podstawie autorskiej metodyki badawczej opracowanej m.in. na podstawie wykonanych eksperymentów związanych z: pomiarami temperatury konstrukcji oraz „pielęgnacją” mieszanek aproksymującą oddziaływanie czynników środowiskowych. Rezultaty badań wykorzystano do opracowania autorskiej metody uwzględniania omawianych czynników i jakościowej oceny zbadanych materiałów oraz zamodelowanych konstrukcji. Ponadto zaproponowano odpowiednie rozwiązania optymalizacyjne w zakresie składu mieszanki i grubości warstw konstrukcji.

W prezentowanej rozprawie przedstawiono przegląd literatury krajowej i zagranicznej dotyczący zagadnień związanych z trwałością zmęczeniową mieszanek i konstrukcji nawierzchni (kryteria zmęczeniowe), zjawiskiem regeneracji oraz oddziaływaniem czynników środowiskowych – woda i mróz, sól drogowa. Wykazano istotny problem braku skutecznych metod oceny mieszanek i konstrukcji z nich wykonanych na bazie asfaltów w szczególności modyfikowanych oraz wysokomodyfikowanych zawierających polimer SBS. Ponadto poruszono temat mieszanek wykonywanych w różnych technologiach produkcji. Nie znaleziono opracowań związanych z analizami w zakresie trwałości oraz regeneracji mieszanek wykonywanych na ciepło (WMA) i na gorąco (HMA). Podkreślono, iż do tej pory naukowcy skupiali się przeważnie na analizach porównawczych stosowania różnych dodatków i ich wpływu na podstawowe cechy jakościowe – wolna przestrzeń, ITSR, trwałość zmęczeniowa, odporność na deformacje trwałe. w przeglądzie poświęcono szczególną uwagę tematowi badań związanych z regeneracją. Przeanalizowano sposoby testowania, aplikowane warunki badawcze w laboratorium oraz temperatury panujące w nawierzchni. Dotychczas uwagę skupiano na mieszankach przeznaczonych do górnych warstw konstrukcji, wdrażając regenerację przez okres odpoczynku lub podgrzanie. Niższe temperatury 50 – 60°C, które mogą wystąpić w dolnych warstwach (podbudowa) podatnych konstrukcji nawierzchni również nie zostały analizowane w laboratorium. Ponadto wyszczególniono trend badawczy związany z testowaniem wpływu stosowania różnych dodatków - np. mikrokapsuł olejowych, zbrojenia rozproszonego (regeneracja indukcyjną). Wykazano brak skutecznych rozwiązań oceny i uwzględnienia regeneracji w trwałości zmęczeniowej mieszanek oraz w kryteriach zmęczeniowych stosowanych do projektowania nawierzchni. w ramach analiz zagadnienia trwałości zmęczeniowej MMA dokonano również przeglądu literatury w zakresie oddziaływania wody i mrozu oraz soli drogowej. Nie wyszczególniono do tej pory badań powiązanych z trwałością zmęczeniową obydwu tych czynników z użyciem metody czteropunktowego zginania, która dobrze aproksymuje warunki in-situ. Nie znaleziono również opracowań uwzględniających ten wpływ zarówno w mieszankach (laboratorium) oraz konstrukcji (kryterium zmęczeniowe). Temat należy do nowych.

Na podstawie dokonanego przeglądu stanu wiedzy oraz wykonanych badań, analiz i opracowanych autorskich metod udowodniono w rozprawie następującą tezę:

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

Prace doświadczalne w ramach realizacji niniejszej rozprawy obejmowały m.in. badania zmęczeniowe mieszanek typu beton asfaltowy (AC 22P) przeznaczonych na podbudowę, ruch KR 5-7 na bazie asfaltu: zwykłego 35/50 (na gorąco), 35/50 WMA (na ciepło), modyfikowanego 25/55-60 (na gorąco), wysokomodyfikowanego 25/55-80 HIMA (na gorąco) na trzech poziomach zawartości lepiszcza (element optymalizacji składu). Testy zrealizowano wykorzystując schemat belki czteropunktowo zginanej. Do badań zastosowano próbki pryzmatyczne, każdostronnie oszlifowane. Ponadto wdrożono regenerację mieszanek stosując podgrzanie temperaturowe w zautomatyzowanej komorze termicznej. Wyselekcjonowane próbki poddano również pielęgnacji w warunkach oddziaływania wody i mrozu oraz roztworu soli drogowej. Wdrożone zabiegi umożliwiły ocenę degradacji mieszanek wywołaną czynnikami środowiskowymi wyrażoną przez spadek trwałości zmęczeniowej oraz regenerację – przyrost.

Badania laboratoryjne podzielono na cztery główne części.

1. Podstawowe – związane z zaprojektowaniem recept i sprawdzeniem ich poprawności w odniesieniu do bieżących regulacji (podstawowe badania MMA).
2. Zaawansowane – związane z powszechną oceną trwałości mieszanek (tylko czynnik mechaniczny) oraz uwzględniając uprzednią pielęgnację w zróżnicowanych warunkach środowiskowych. Na ich podstawie ustalono m.in. degradację mieszanek (spadek trwałości zmęczeniowej).
3. Pomiarów eksperymentalne temperatury konstrukcji – umożliwiające opracowanie warunków wdrażania regeneracji w laboratorium.
4. Zaawansowane – związane z ustalonym i wdrożonym programem wymuszania zjawiska regeneracji w badaniach laboratoryjnych – ocena zdolności regeneracji badanych mieszanek również z analizą jej ograniczenia w materiale przez oddziaływania środowiskowe.

Rezultaty umożliwiły opracowanie metod i formuł pozwalających uwzględnić regenerację oraz oddziaływania środowiskowe w trwałości zmęczeniowej MMA np. ze względu na skład. Pozwoliły one również prognozować zmiany trwałości wywołane odpowiednimi czynnikami i ocenić je względem mieszanek zawierających różne rodzaje asfaltu i wykonanych w odmiennych technologiach. Wykazano, iż regeneracja oraz oddziaływania środowiskowe istotnie wpływają na trwałość zmęczeniową. Ustalono, iż efekt wypadkowy jest zależny od wielu czynników – np. rodzaju lepiszcza w MMA, jego ilości, omawianego oddziaływania lub ich kombinacji. Do istotnych osiągnięć autora należy również opracowanie formuł, pozwalających wyznaczenie wpływu: degradacji, regeneracji, wypadkowego oraz trwałości zmęczeniowej stanu skumulowanego (woda i mróz + sól drogowa + regeneracja) bez konieczności wykonywania długoterminowych badań. Zależności są skuteczne niezależnie od rodzaju zaaplikowanego do mieszanki lepiszcza lub jego ilości. w ramach analiz wykazano m.in, iż mieszanki na bazie asfaltów zwykłych (w technologii na ciepło) zaistniały proces degradacji znacząco ograniczył zdolność regeneracji MMA przewyższając wpływ regeneracji. Na podstawie badań zaproponowano również uproszczoną

metodę skracania okresu projektowego podatnych konstrukcji katalogowych (typ B) ze względu na złożone warunki środowiskowe.

Ponadto w ramach dokonanych analiz opracowano nowe kryterium zmęczeniowe znajdujące zastosowanie w badaniach „*healingowych*” pozwalające zidentyfikować punkt zniszczenia. Wskazano również właściwy sposób wdrażania regeneracji. Stwierdzono również, iż zmiany strukturalne w mieszankach można z powodzeniem śledzić wykorzystując wykres zmian modułu sztywności od liczby cykli – w szczególności dla omawianych oddziaływań.

Na podstawie części eksperymentalnej, rozprawę wzbogacono modelowaniem konstrukcji z zastosowaniem programu Abaqus (MES) i kryterium zmęczeniowego AASHTO 2004. Zaproponowano modyfikację wybranego kryterium wzbogacając je o autorski współczynnik kalibracyjny uwzględniający rodzaj zastosowanego asfaltu oraz w sposób niezależny oddziaływania środowiskowe i regenerację. Wykazano, iż uwzględnienie wszystkich zmiennych pozwala skutecznie ocenić trwałość konstrukcji ze względu na rodzaj asfaltu stosowanego do mieszanki przeznaczonej na podbudowę i zróżnicowane warunki środowiskowe (w tym regenerację). Udowodniono, iż wpływ tych zmiennych należy do istotnych. Ponadto wskazano, iż możliwa jest optymalizacja grubości warstw konstrukcji, w szczególności tych wykonanych na bazie mieszanek z asfaltów modyfikowanych i wysokomodyfikowanych. w pracy opracowano i przedstawiono kompleksową tabelę zmian trwałości katalogowych konstrukcji podatnych (KR 1-7, typ B) od omawianych czynników. Oceniono je względem mieszanek charakteryzujących się różnym lepizczem wykorzystując wcześniejsze rezultaty badawcze. Udowodniono, iż konstrukcje na bazie asfaltów zwykłych (na ciepło i na gorąco) w zależności od zawartości lepizcza w MMA i wolnej przestrzeni w trudnych warunkach środowiskowo-ruchowych (KR 5-7, kumulacja – woda i mróz + sól drogowa + regeneracja) charakteryzują się nawet do 2 KR niższą trwałością niż wymagana dla danego zakresu KR. w przypadku modyfikowanych i wysokomodyfikowanych nawet do 2 KR wyższą. Wykazano również, które konstrukcje dla przyjętych kombinacji parametrów objętościowych powinny zostać pogrubione, a które mogą być odchudzone i w jaki sposób (wykorzystanie gotowych konstrukcji katalogowych przypadających na KR wyższą/niższą).

Przeprowadzone badania, analizy, modelowanie, opracowane metody i formuły umożliwiły skutecznie uwzględnić regenerację, oddziaływania środowiskowe (w tym skumulowane), w trwałości MMA i dodatkowo rodzaj lepizcza konstrukcji nawierzchni. Warto podkreślić, iż do tej pory to nie zostało uczynione. Wykonane działania są istotnym wkładem w naukę.

Summary

The study investigated the effect of the regeneration phenomenon and environmental impacts (water and frost, road salt, accumulation - water and frost + road salt) on the fatigue life of asphalt mixtures characterized by different types of asphalt, its content, and production technology. The considerations were enriched with the topic of the durability of modeled B-type flexible structures with the use of the fatigue criterion, taking into account regeneration, environmental impact, and the type of asphalt. The analyzes were carried out on the basis of the original research methodology developed, among others, on the basis of performed experiments related to the measurement of the constructure temperature and care of mixtures approximating the influence of environmental factors. The results of the research were used to develop the proprietary method of taking into account the discussed factors and the qualitative assessment of the tested materials and modeled structures. Moreover, appropriate optimization solutions were proposed in terms of the composition of the mixture and the thickness of the construction layers.

The presented dissertation presents a review of domestic and foreign literature on issues related to the fatigue life of mixtures and pavement structures (fatigue criteria), the phenomenon of regeneration, and the impact of environmental factors - water and frost, road salt. A significant problem of the lack of effective methods of assessing mixtures and structures made based on the different types of asphalt, in particular, modified and highly modified asphalts containing SBS polymer has been demonstrated. In addition, the topic of mixtures made in various production technologies was discussed. No studies related to the analysis of durability and regeneration of hot mixes (WMA) and hot mixes (HMA) were found. It was emphasized that so far scientists have focused mainly on comparative analyzes of the use of various additives and their impact on the basic quality characteristics - free space, ITSR, fatigue life, and resistance to permanent deformation. the topic of research related to regeneration was given particular attention in the review. The methods of testing, the applied test conditions in the laboratory, and the temperatures in the pavement were analyzed. So far, the focus has been on mixtures for the upper layers of the structure, implementing regeneration through a period of rest or/and heating. The lower temperatures of 50-60 °C that may occur in the lower layers (sub-base) of the flexible pavement structures were also not analyzed in the laboratory. In addition, the research trend related to testing the impact of using various additives - e.g. oil microcapsules, and dispersed reinforcement (induction regeneration) was specified. The lack of effective solutions for the assessment and consideration of regeneration in the fatigue life of mixtures and in the fatigue criteria used in the pavement design was demonstrated. As part of the analysis of the MMA fatigue life issue, a review of the literature was also carried out in the field of the impact of water and frost. Road salt impact was also considered in the review. So far, the studies related to the fatigue life of both factors using the four-point bending method, which closely approximates the in-situ conditions, have not been studied. There were also no studies that would take into account this influence both in the mixtures (laboratory) and in the structure (fatigue criterion). The subject is new.

Based on the review of the state of knowledge as well as the research, analysis, and developed original methods, the following thesis was proved in the dissertation:

Considering the regeneration (healing) processes and the impact of water, frost, and road salt allows for better forecasting of fatigue phenomena occurring in asphalt mixtures and road pavements.

Experimental work as part of the implementation of this dissertation included, inter alia, fatigue tests of asphalt concrete mixes (AC 22P) mainly intended for the foundation, KR 5-7 traffic based on asphalt: ordinary 35/50 (hot), 35/50 WMA (warm), modified 25 / 55-60 (hot), highly modified 25 / 55-80 HIMA (hot) at three levels of binder content (a component of composition optimization). The tests were carried out using the four-point bending beam scheme. Prismatic samples polished on each side, were used for the tests. In addition, the regeneration of the mixtures was implemented using temperature heating in an automated thermal chamber. Selected samples were also cured under the influence of water, frost, and road salt solution. The implemented treatments made it possible to evaluate the degradation of mixtures caused by environmental factors, expressed by the decrease in fatigue life and regeneration - increase.

Laboratory tests are divided into four main parts.

1. Basic - connected with designing prescriptions and checking their correctness in relation to current regulations (basic MMA research).
2. Advanced - related to the general assessment of the durability of mixtures (only the mechanical factor) and taking into account the previous care in various environmental conditions. On their basis, it was established, inter alia, degradation of mixtures (decrease in fatigue life).
3. Experimental measurements of the temperature of the structure - enabling the development of conditions for the implementation of regeneration in the laboratory.
4. Advanced - related to the established and implemented a program of forcing the phenomenon of regeneration in laboratory tests - evaluation of the regeneration capacity of the tested mixtures, also with the analysis of its limitations in the material by environmental influences.

The results made it possible to develop methods and formulas to take into account the regeneration and environmental impacts in the fatigue life of MMA, e.g. due to the composition. They also made it possible to forecast changes in durability caused by appropriate factors and to evaluate them in relation to mixtures containing different types of asphalt and made with different technologies. It has been shown that regeneration and environmental impacts significantly affect fatigue life. It was found that the resultant effect depends on many factors - e.g. the type of binder in MMA, its amount, the discussed effect, or their combination. The author's significant achievements also include the development of formulas that allow determining the impact of degradation, regeneration, accident, and fatigue durability of the cumulative state (water and frost + road salt + regeneration) without the need to perform long-term tests. The dependencies are effective regardless of the type of binder applied to the mixture or its amount. The analysis showed, inter alia, that in mixtures based on ordinary asphalts (in warm mixes), the degradation process significantly limited the regeneration capacity of MMA, exceeding the effect of regeneration. Based on the research, a simplified method of shortening the design period of susceptible catalog structures (type B) due to complex environmental conditions has also been proposed.

In addition, as part of the analysis, a new fatigue criterion was developed to be used in healing studies to identify the point of destruction. The correct way to implement regeneration was also indicated. It was also found that the structural changes in the mixtures can be successfully monitored using the graph of changes in the stiffness modulus versus the number of cycles - in particular for the discussed interactions.

Based on the experimental part, the dissertation was enriched with the modeling of the structure using the Abaqus program (FEM) and the AASHTO 2004 fatigue criterion. It was proposed to modify the selected criterion by enriching it with an original calibration factor taking into account the type of asphalt used, as well as independent environmental impact and regeneration. It has been shown that taking into account all the variables allow to effectively assess the durability of the structure in terms of the type of asphalt used for the mixture intended for the foundation and different environmental conditions (including regeneration). It has been proven that the influence of these variables is significant. In addition, it was indicated that it is possible to optimize the thickness of the structure layers, in particular those made on the basis of mixtures of modified and highly modified asphalts. The work presents a comprehensive table of changes in the durability of catalog flexible structures (KR 1-7, type B) due to the factors discussed. They were assessed in relation to mixtures characterized by a different binder, using the previous research results. It has been proven that structures based on ordinary asphalts (warm and hot), depending on the binder content in MMA and free space in difficult environmental and traffic conditions (KR 5-7, accumulation - water and frost + road salt + regeneration), are characterized by even up to 2 KR lower service life than required for a given KR range. in the case of modified and highly modified even up to 2 KR higher. It was also shown which constructions for the assumed combinations of volumetric parameters should be bold, which can be slimmed down, and in what way (use of ready-made catalog constructions for a higher / lower KR).

The conducted research, analyses, modeling, and the developed methods and formulas made it possible to effectively take into account regeneration, environmental impacts (including cumulative ones), durability of MMA, and, additionally, the type of pavement structure binder. It is worth noting that this has not been done so far. The activities performed are an important contribution to the actual stance of knowledge.