



Politechnika Świętokrzyska
Wydział Budownictwa i Architektury

ROZPRAWA DOKTORSKA

*Optymalizacja składu betonu asfaltowego wytwarzanego
w obniżonych temperaturach w technologii asfaltu spienionego
ze zbrojeniem rozproszonym w aspekcie właściwości
wysokotemperaturowych*

mgr inż. Karolina Janus

promotor

dr hab. inż. Anna Chomicz-Kowalska, prof. PŚk

promotor pomocniczy

dr inż. Mateusz Marek Iwański

Kielce, 2024

Pragnę złożyć podziękowania:

*promotorowi, dr hab. inż. Annie Chomicz-Kowalskiej,
za opiekę merytoryczną, wsparcie i pomoc w realizacji
niniejszej rozprawy,*

*promotorowi pomocniczemu, dr inż. Mateuszowi
Iwańskiemu, za poświęcony czas i cenne uwagi,*

*kolegom, dr inż. Krzysztofowi Maciejewskiemu
i Piotrowi Ramiączkowi, za pomoc w realizacji pracy,
wsparcie i okazaną pomoc,*

*kolegom i koleżankom z Katedry Inżynierii
Komunikacyjnej za wsparcie i pomoc w realizacji badań,*

rodzinie, za wiarę we mnie i ciągłą motywację.

Badania mieszanek mineralno-asfaltowych zostały zrealizowane w ramach projektu pt. „Technologia wytwarzania innowacyjnych wysokowytrzymałych kompozytów asfaltowych zbrojonych włóknami, z przeznaczeniem do budowy nowych i modernizacji istniejących dróg o zwiększonej trwałości eksploatacyjnej”(TECHMATSTRATEG2/412159/9/NCBR/2019) w ramach przedsięwzięcia Strategiczny program badań naukowych i prac rozwojowych „Nowoczesne Technologie Materiałowe” TECHMATSTRATEG II, który jest finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Spis treści

Wykaz skrótów używanych w pracy	7
1. WSTĘP.....	8
2. PRZEGLĄD LITERATURY	10
2.1 Charakterystyka technologii wytwarzania mieszanek mineralno-asfaltowych.....	10
2.1.1 Sposoby wytwarzania mieszanek mineralno-asfaltowych	10
2.1.2 Technologie wytwarzania mieszanek mineralno-asfaltowych metodą „na ciepło”	13
2.1.3 Charakterystyka technologii mieszanek mineralno-asfaltowych „na ciepło”	14
2.1.4 Sposoby obniżania temperatur technologicznych mieszanek mineralno-asfaltowych	15
2.1.5 Technologia asfaltu spienionego wodą.....	19
2.1.6 Procesy fizyczne zachodzące podczas spieniania lepiszcza asfaltowego	23
2.1.7 Korzyści obniżania temperatur technologicznych mieszanek mineralno-asfaltowych	28
2.2 Procedury starzenia krótkoterminowego mieszanek WMA w laboratorium	31
2.3 Charakterystyka technologii zbrojenia rozproszonego	32
2.3.1 Rodzaje i właściwości włókien stosowanych w roli zbrojenia rozproszonego w materiałach budowlanych.....	33
2.3.2 Zastosowanie włókien jako zbrojenia rozproszonego w budownictwie drogowym	35
2.4 Ocena właściwości wysokotemperaturowych lepiszczy asfaltowych i mieszanek mineralno-asfaltowych	45
2.4.1 Charakterystyka metod oceny właściwości wysokotemperaturowych lepiszczy asfaltowych i mieszanek mineralno-asfaltowych	45
2.4.2 Ocena wpływu wybranych włókien na właściwości wysokotemperaturowe mieszanek mineralno-asfaltowych	49
2.5 Podsumowanie przeglądu literatury	60
3. TEZY, CEL I ZAKRES PRACY.....	61
3.1 Tezy pracy	61
3.2 Cel i zakres pracy	61
4. CZĘŚĆ BADAWCZA.....	64
4.1 Plan badań	64
4.1.1 Plan badań dla etapu I.....	65

4.1.2	Plan badań dla etapu II	67
4.1.3	Plan badań etapu III	69
4.2	Metodyki badawcze	69
4.2.1	Podstawowe właściwości lepiszczy asfaltowych	69
4.2.2	Wytwarzanie i zagęszczanie próbek mieszanki mineralno-asfaltowej	73
4.2.3	Podstawowe właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej	75
4.2.4	Zaawansowane badania mieszanek mineralno-asfaltowych	77
4.3	Projekt mieszanki mineralno-asfaltowej	82
4.4	Etap I – badania lepiszczy asfaltowych	87
4.4.1	Badania piany asfaltowej	87
4.4.2	Badania podstawowych parametrów asfaltów	95
4.4.3	Podsumowanie etapu I	110
4.5	Etap II – badania podstawowe mieszanek mineralno-asfaltowych	110
4.5.1	Badania wpływu ilości i rodzaju włókien w mma na zawartość wolnej przestrzeni	111
4.5.2	Badania wpływu ilości i rodzaju włókien w mma na odporność na deformacje trwałe	115
4.5.3	Badania wpływu ilości i rodzaju włókien w mma na odporność na działanie wody i mrozu	122
4.5.4	Podsumowanie etapu II	130
4.6	Etap III – badania zaawansowane mieszanek mineralno-asfaltowych	131
4.6.1	Badania wpływu ilości i rodzaju włókien na zagęszczalność mieszanek mineralno-asfaltowych	132
4.6.2	Badania wpływu ilości i rodzaju włókien w mma na sztywność metodą rozciągania pośredniego w funkcji temperatury metodą IT-CY	143
4.6.3	Badania wpływu ilości i rodzaju włókien w mma na zespolony moduł sztywności	150
4.6.4	Badania wpływu ilości i rodzaju włókien w mma na odporność na zjawisko zmęczenia metodą IT-FT	168
4.6.5	Badania wpływu ilości i rodzaju włókien w mma na moduł sztywności pełzania	175
4.6.6	Podsumowanie etapu III	181
4.7	Optymalizacja składu mieszanek mineralno-asfaltowych	184
4.7.1	Optymalizacja składu mieszanek mineralno-asfaltowych w zakresie badanych parametrów mma.	186
4.7.2	Optymalizacja składu mieszanek mineralno-asfaltowych w aspekcie właściwości wysokotemperaturowych	190
5.	WNIOSKI KOŃCOWE I KIERUNKI DAJSZYCH BADAŃ	195
5.1	Wnioski końcowe	195

5.2	Kierunki dalszych badań	197
	WYKAZ NORM	198
	BIBLIOGRAFIA.....	200
	ZAŁĄCZNIKI.....	217
	SPIS RYSUNKÓW	242
	SPIS TABEL	247
	SPIS ZAŁĄCZNIKÓW	254

Wykaz skrótów używanych w pracy

AC		ang. <i>asphalt concrete</i> , beton asfaltowy,
BBTM	–	ang. <i>bitumen bound textured material</i> , beton asfaltowy do cienkich warstw,
CMA	–	ang. <i>cold-mix asphalt</i> , mieszanka mineralno-asfaltowa wytwarzana w technologii „na zimno”,
ER	–	ang. <i>expansion ratio</i> , wskaźnik ekspansji,
FI	–	ang. <i>foam index</i> , wskaźnik piany,
FHWA	–	ang. <i>Federal Highway Administration</i> ,
FWC	–	ang. <i>foaming water content</i> , zawartość wody spieniającej,
HiMA	–	ang. <i>high modified bitumen</i> , asfalt wysokomodyfikowany,
HL	–	ang. <i>half-life</i> , okres półtrwania piany asfaltowej,
HMA	–	ang. <i>hot-mix asphalt</i> , mieszanka mineralno-asfaltowa wytwarzana w technologii „na gorąco”,
HWMA	–	ang. <i>half-warm mix asphalt</i> , mieszanka mineralno-asfaltowa wytwarzana w technologii „na półciepło”,
ITSR	–	ang. <i>indirect tensile strength ratio</i> , wskaźnik odporności na działanie wody i mrozu,
mm	–	mieszanka mineralna,
mma	–	mieszanka mineralno-asfaltowa,
MSCR	–	ang. <i>multiple stress creep recovery</i> , badanie cyklicznego pełzania z odprężeniem,
LSL	–	ang. <i>lower specification limit</i> , dolna granica użyteczności,
PA	–	ang. <i>porous asphalt</i> , asfalt porowaty,
PmB	–	ang. <i>modified bitumen</i> , asfalt modyfikowany,
RTFOT	–	ang. <i>rotating thin film oven test</i> ,
SMA	–	ang. <i>stone mastic asphalt</i> , mieszanką mastyksowo-grysowa,
TTSP	–	ang. <i>time-temperature superposition principle</i> , zasada superpozycji temperaturowo-czasowej,
USL	–	ang. <i>upper specification limit</i> , górna granica użyteczności,
WMA	–	ang. <i>warm-mix asphalt</i> , mieszanka mineralno-asfaltowa wytwarzana w technologii „na ciepło”.

1. WSTĘP

Ciągły wzrost natężenia ruchu samochodowego prowadzi do szybszego zużycia nawierzchni drogowych i wymusza opracowywanie bardziej wytrzymałych rozwiązań konstrukcyjnych i materiałowych. Aby sprostać tym wyzwaniom, konieczne jest stosowanie technologii, które zapewnią nawierzchniom większą odporność na intensywny ruch oraz zmienne warunki atmosferyczne. Istnieje kilka sposobów na zwiększenie trwałości nawierzchni drogowych. Można w tym celu zwiększać grubości warstw konstrukcyjnych, co pozwala na lepsze rozłożenie obciążeń od ruchu i ogranicza odkształcenia w nawierzchni wywołane ruchem pojazdów. Niemniej jednak, tego rodzaju rozwiązania mogą znacząco podnieść koszty budowy nawierzchni drogowych i prowadzą do zwiększenia zużycia materiałów. Innym podejściem jest wprowadzenie nowych technologii budowy nawierzchni. Innowacyjne metody i materiały, takie jak wysokiej jakości beton asfaltowy, który charakteryzuje się wysoką odpornością na zjawisko zmęczenia i korzystnymi właściwościami lepkosprężystymi, mogą przyczynić się do wydłużenia żywotności nawierzchni. Kluczowym elementem jest w tym aspekcie także staranne dobranie technologii i materiałów już na etapie projektowania inwestycji. Odpowiedni dobór materiałów drogowych i technologii wykonawczych, dostosowanych do lokalnych warunków gruntowych, intensywności ruchu oraz klimatu, odgrywa fundamentalną rolę w uzyskaniu trwałej i wytrzymałej nawierzchni.

Również wzrost świadomości ekologicznej społeczeństwa wpływa aspekty technologii produkcji materiałów drogowych. Współczesne projekty drogowe coraz częściej uwzględniają kwestie zrównoważonego rozwoju, co skutkuje dążeniem do minimalizacji negatywnego wpływu na środowisko naturalne. Stosowanie ekologicznych materiałów oraz technologii niskoemisyjnych stało się priorytetem w nowoczesnym budownictwie drogowym. Projektanci i wykonawcy coraz częściej wybierają rozwiązania, które nie tylko zwiększają trwałość nawierzchni, ale również minimalizują ich wpływ na środowisko.

Technologią stosowaną w celu obniżenia energochłonności oraz redukcji szkodliwych gazów cieplarnianych jest sposób wytwarzania mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem spienionego lepiszcza wodą WMA (ang. *Warm Mix Asphalt*) [1]. Pierwsze próby podjęto już w latach 50 ubiegłego wieku i z czasem technologia ta stała się powszechna w Stanach Zjednoczonych oraz Europie. Zastosowanie lepiszcza w formie spienionej poprawie otoczenie ziaren kruszywa i urabialność, tym samym zwiększając jakość końcowego produktu.

W związku z postępującymi zmianami klimatu, można obecnie zaobserwować coroczny wzrost średnich temperatur, przez co coraz większe znaczenie ma wykonywanie badań

parametrów wysokotemperaturowych mieszanek mineralno-asfaltowych [1]. Nawierzchnie poddawane ciągłemu obciążeniu dynamicznemu i statycznemu muszą być odporne na powstawanie deformacji lepkoplastycznych i strukturalnych. Wzmocnienie szkieletu mineralnego mma może zapewnić zbrojenie rozproszone w postaci włókien, które od dawna stosowane są w betonach cementowych. W mieszankach mineralno-asfaltowych zbrojenie rozproszone stosowane było już w XX wieku w postaci włókien azbestowych, które okazały się być materiałem niebezpiecznym. Późniejsze próby koncentrowały się głównie na zastosowaniach w tradycyjnej technologii HMA i nieliczne prace uwzględniały dodatkowe obniżenie temperatur technologicznych wraz z zastosowaniem zbrojenia rozproszonego.

Przedmiotem niniejszej rozprawy doktorskiej jest ocena wpływu zbrojenia rozproszonego w postaci włókien (polimerowo-bazaltowych, aramidowych), rodzaju stosowanego lepiszcza asfaltowego oraz technologii na właściwości wysokotemperaturowe wytwarzania mieszanek mineralno-asfaltowych. Badania obejmowały porównanie właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych wykonanych metodą „na ciepło”, z użyciem asfaltu spienionego wodą, z mieszankami referencyjnymi produkowanymi tradycyjną metodą „na gorąco”. Dodatkowo analizowano wpływ rodzaju i zawartości włókien na parametry mieszanek mineralno-asfaltowych. Ostatecznym celem pracy była optymalizacja składu mieszanki mineralno-asfaltowej wykonanej w technologii „na ciepło” pod względem rodzaju lepiszcza asfaltowego oraz rodzaju i ilości włókien do warstwy ścieralnej.

2. PRZEGLĄD LITERATURY

2.1 Charakterystyka technologii wytwarzania mieszanek mineralno-asfaltowych

2.1.1 Sposoby wytwarzania mieszanek mineralno-asfaltowych

Współcześnie na całym świecie obserwuje się znaczące zmiany, których główną ideą jest rozwój społeczeństwa w kierunku osiągnięcia zrównoważonego rozwoju. Podejmowane działania koncentrują się głównie na zmniejszaniu negatywnego oddziaływania gospodarki na środowisko naturalne [2], [3]. W wyniku tych zmian, większy nacisk przykładano do ochrony środowiska oraz redukcji emisji szkodliwych gazów cieplarnianych w przemyśle drogowym przy równoczesnym zwiększeniu trwałości nawierzchni. W ramach tych działań, stosowane są nowoczesne technologie, które mają na celu maksymalne wykorzystanie surowców odpadowych oraz redukcję zużycia energii w procesie budowy dróg [4], [5]. Prace realizowane w tym obszarze koncentrują się na innowacyjnych rozwiązaniach technologicznych i materiałowych, takich jak wykorzystanie materiałów z recyklingu. Minimalizuje się w ten sposób negatywny wpływ na środowisko naturalne poprzez zastąpienie naturalnych surowców materiałami wtórnymi, zmniejszając tym samym ilość odpadów. Ponadto, rozwija się technologie mające na celu ograniczenie zużycia energii i emisji gazów cieplarnianych do atmosfery [2], [6].

Mieszanki mineralno-asfaltowe stanowią najpowszechniejszy materiał do budowy górnych warstw nawierzchni drogowych, niezależnie od panujących warunków klimatycznych w danym regionie [7], [8]. Mając na uwadze kwestie ochrony środowiska oraz dążenie do zrównoważonego rozwoju w sektorze budowlanym wprowadza się innowacyjne rozwiązania w budowie dróg, a jednym z nich jest zastosowanie mieszanek mineralno-asfaltowych o obniżonych temperaturach technologicznych. Wytwarzanie i wbudowanie tego rodzaju mieszanki następuje metodą „na ciepło” - WMA. Technologie WMA umożliwiają osiągnięcie tych celów, minimalizując jednocześnie negatywny wpływ na środowisko naturalne. Wykorzystanie mieszanek mineralno-asfaltowych w technologii WMA pozwala na obniżenie temperatury wymaganej do produkcji i ułożenia nawierzchni drogowych. Dodatkowo, stosowanie technologii WMA przynosi korzyści w zakresie redukcji emisji pyłów i gazów szkodliwych dla środowiska i zdrowia [3], [6], [9]. Należy podkreślić, że stosowanie mieszanek mineralno-asfaltowych o obniżonych temperaturach technologicznych nie tylko przyczynia się do ochrony środowiska, ale także zapewnia wysoką jakość nawierzchni drogowych. Materiał

ten wykazuje porównywalne właściwości mechaniczne i trwałość do tradycyjnych mieszanek, przy jednoczesnej redukcji zużycia energii i kosztów produkcji. W efekcie, wprowadzenie technologii WMA do branży drogownictwa przynosi pozytywne rezultaty, przyczyniając się do osiągnięcia celów związanych z ochroną środowiska, zrównoważonym rozwojem i zmniejszeniem zużycia energii w procesach produkcji materiałów drogowych [10], [11], [12], [13].

Technologią najczęściej stosowaną w Polsce do produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych jest tradycyjna metoda „na gorąco” [14]. Wysoka temperatura produkcji mieszanki sprawia, że lepkość lepiszcza asfaltowego jest na tyle mała że możliwe jest całkowite pokrycie nim ziaren mieszanki mineralnej i uzyskanie odpowiedniej urabialności i zagęszczalności mieszanki mineralno-asfaltowej [15]. Dodatkowo, podgrzewanie kruszywa do wysokich temperatur pozwala na jego osuszenie i tworzenie trwałego połączenia między ziarnami a lepiszczem. W klasycznej metodzie „na gorąco”, temperatura produkcji zazwyczaj wynosi 150°C lub więcej, co sprawia, że proces ten charakteryzuje się wysokim zapotrzebowaniem na energię i jest niekorzystny dla środowiska z uwagi na emisję dużych ilości gazów cieplarnianych [14], [16], [17], [18]. Rosnące wymagania związane z ograniczaniem różnego rodzaju emisji w przemyśle skłaniają do stosowania nowoczesnych technologii w dziedzinie budownictwa drogowego, takich jak np. mieszanki niskotemperaturowe. Wykorzystanie takich mieszanek przynosi wiele korzyści [5], [19], [20], [21], [22], [23], [24], m.in.:

- redukcję zużycia energii w procesie produkcji,
- zmniejszenie emisji zanieczyszczeń i gazów cieplarnianych do atmosfery,
- poprawę bezpieczeństwa pracowników poprzez eliminację oparów asfaltu i ograniczenie ryzyka poparzeń,
- ograniczenie wpływu transportu mieszanek mineralno-asfaltowych i warunków atmosferycznych na postęp prac budowlanych,
- przyspieszenie procesu wbudowywania warstw asfaltowych w konstrukcji nawierzchni drogowej,
- wydłużenie sezonu budowlanego,
- ograniczenie procesów starzenia asfaltu podczas produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych.

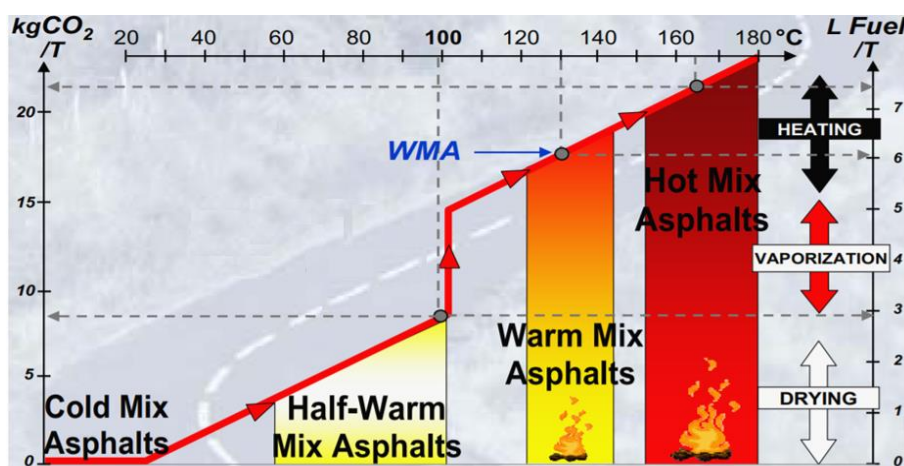
Z uwagi na powyższe, od kilkunastu lat prowadzone są badania nad innowacyjnymi rozwiązaniami materiałowo-technologicznymi mającymi na celu obniżenie temperatur technologicznych (produkcji, transportu, wbudowywania i zagęszczania) mieszanek

mineralno-asfaltowych. Do tych rozwiązań należą m.in. mieszanki wytwarzane metodą „na ciepło”, „na półciepło” (HWMA, ang. *Half-Warm Mix Asphalt*) oraz „na zimno” (CMA, ang. *Cold Mix Asphalt*) [25]. Klasyfikację mieszanek mineralno-asfaltowych w odniesieniu do temperatury produkcji przedstawiono w tabeli 2.1.

Tab. 2.1 Klasyfikacja mieszanek mineralno-asfaltowych w aspekcie temperatur wytwarzania [26].

Rodzaj mieszanki		Symbol	Nazwa technologii	Zakres temperatur produkcji
Metoda wytwarzania mieszanek mineralno-asfaltowych	„na gorąco”	HMA	<i>Hot Mix Asphalt</i>	135 ÷ 180°C
	„na ciepło”	WMA	<i>Warm Mix Asphalt</i>	100 ÷ 135°C
	„na półciepło”	HWMA	<i>Half-Warm Mix Asphalt</i>	60 ÷ 100°C
	„na zimno”	CMA	<i>Cold Mix Asphalt</i>	25 ÷ 60°C

Efekty obniżenia temperatur technologicznych w produkcji różnych typów mieszanek mineralno-asfaltowych z uwzględnieniem rodzaju zastosowanej technologii przedstawiono na rysunku 2.1 [27].



Rys. 2.1 Zakresy temperatur produkcji różnych typów mieszanek mineralno-asfaltowych oraz informacje dotyczące zużycia paliwa i emisji CO₂ podczas ogrzewania jednej tony mokrego kruszywa [27].

Produkcja mieszanek mineralno-asfaltowych w technologii „na gorąco” ma istotne wady względem technologii wykorzystujących obniżone temperatury technologiczne. Spośród najistotniejszych można wymienić [28], [29], [30]:

- wysokie zapotrzebowanie energetyczne, konieczne do procesów osuszania i podgrzewania komponentów mieszanki mineralnej,
- intensywne starzenie się asfaltu wskutek intensywnej ekspozycji na podwyższone temperatury,

- ograniczenia związane z ilością stosowanego granulatu asfaltowego w nowo wytwarzanych mieszankach mineralno-asfaltowych,
- emisja znacznych ilości lotnych związków organicznych wydzielanych z gorącego lepiszcza,
- trudne warunki pracy dla osób zaangażowanych w proces produkcji i wbudowywania mieszanek mineralno-asfaltowych.

Produkcja mieszanek mineralno-asfaltowych w wysokich temperaturach jest związana z potrzebą znacznego zużycia energii, co skutkuje emisją szkodliwych gazów oraz procesem starzenia się asfaltu. Pracownicy na etapie produkcji mma w zakładzie produkcyjnym, a także na etapie wbudowywania mieszanki, narażeni są na oddziaływanie oparów asfaltu oraz ryzyko wystawienia się na poparzenia gorącą mieszanką [31], [32], [33]. Wysoka temperatura, do jakiej podgrzewany jest asfalt, prowadzi do jego utleniania, co negatywnie wpływa na jego właściwości (proces starzenia asfaltu) [30].

2.1.2 Technologie wytwarzania mieszanek mineralno-asfaltowych metodą „na ciepło”

Postępujące zmiany klimatyczne, wprowadzenie restrykcji związanych z zasadami zrównoważonego rozwoju oraz rosnące koszty surowców mineralnych i energii elektrycznej wymuszają działania redukujące zapotrzebowanie energetyczne w sektorze budownictwa drogowego. Jednym z kierunków zmierzających do osiągnięcia tego celu jest zastosowanie w produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych technologii z grupy metod „na ciepło”. Charakteryzują się one obniżonymi o co najmniej 20°C do 30°C w porównaniu z konwencjonalną technologią „na gorąco”, jednocześnie dążąc do utrzymania niepogorszonych właściwości końcowego produktu – mieszanki mineralno-asfaltowej i nawierzchni [5], [32], [33], [34].

W celu zagwarantowania właściwego otaczania materiału mineralnego w warunkach niższych temperatur oraz osiągnięcia odpowiedniej urabialności i zagęszczalności mieszanek mineralno-asfaltowych, wymagane jest wprowadzenie modyfikacji do procesu produkcyjnego. Może on obejmować wykorzystanie dodatków do lepiszcza asfaltowego lub mieszanki mineralno-asfaltowej bądź też zastosowanie obu tych rozwiązań jednocześnie [29], [34], [35], [36]. Takie podejście ma na celu osiągnięcie kompromisu pomiędzy redukcją temperatur technologicznych a zachowaniem właściwości mieszanki, sprzyjając jednocześnie bardziej efektywnej i zrównoważonej produkcji nawierzchni drogowych. Jednym ze sposobów

obniżenia temperatury wytwarzania mieszanki mineralno-asfaltowej jest wprowadzenie do gorącego asfaltu niewielkiej ilości wody pod ciśnieniem w kontrolowany sposób [37], [38], [39].

2.1.3 Charakterystyka technologii mieszanek mineralno-asfaltowych „na ciepło”

Idea niskotemperaturowych mieszanek mineralno-asfaltowych produkowanych w niższych temperaturach względem tradycyjnej technologii HMA z wykorzystaniem dodatku wody do asfaltu sięga lat 50-tych XX wieku. Pomysłodawcą technologii asfaltu spienionego był profesor Ladis H. Csanyi z Uniwersytetu Stanowego Iowa w Stanach Zjednoczonych, który zainicjował pierwsze próby wykorzystania lepiszcza w formie spienionej do stabilizacji materiałów mineralnych [16], [40], [41]. Firma Mobil Oil w 1968 roku opatentowała technologię spieniania lepiszcza za pomocą zimnej wody wtryskiwanej do gorącego lepiszcza asfaltowego. Po wygaśnięciu ochrony patentowej technologia ta upowszechniła się na całym świecie, początkowo do stabilizacji materiałów mineralnych oraz technologii recyklingu „na zimno” [42].

W Europie, w ostatnich latach XX wieku, zapoczątkowano budowę pierwszych odcinków dróg, w których zastosowano technologię produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych metodą WMA [5], [33], [43], [44], [45]. Początkowe próby w dziedzinie technologii WMA koncentrowały się na wykorzystaniu dodatków do lepiszczy asfaltowych, dodatków do mieszanek mineralno-asfaltowych oraz wprowadzeniu emulsji asfaltowych w celu obniżenia temperatur procesu technologicznego. W kolejnych latach wprowadzono do praktyki zastosowanie technologii spieniania lepiszczy asfaltowych za pomocą wody. Obecnie technologie WMA oparte na wykorzystaniu dodatków oraz technologii spieniania lepiszczy asfaltowych znajdują globalne zastosowanie. Przykłady takiego wykorzystania można zaobserwować w Stanach Zjednoczonych, gdzie technologie WMA uzyskały szerokie zastosowanie [46], [47], a także w Europie i Azji, gdzie z powodzeniem zostają wdrażane [5], [48] [49], [50], [51].

We wstępnej fazie wprowadzania technologii produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych przy użyciu metody „na ciepło”, skupiano się na badaniach wpływu obniżonych temperatur technologicznych na ekspozycję pracowników zajmujących się wbudowywaniem tych mieszanek na lotne związki organiczne (LZO). Prace naukowe przeprowadzone przez m.in. Cavallariego [52], [53] dostarczyły istotnych rezultatów, wskazujących na możliwość ograniczenia wpływu LZO na skórę pracowników poprzez zastosowanie właściwych środków ochrony osobistej, co skutkowało redukcją ekspozycji w zakresie 76 - 86%. Dalsze analizy

przeprowadzone w ramach programu badawczego NCHRP 9-47A [31], [54] potwierdziły, że wprowadzenie technologii WMA pozwala na zmniejszenie wpływu związków organicznych na pracowników o 33 - 61% w porównaniu do tradycyjnej metody „na gorąco”. Wykonane pomiary podczas pracy wytwórni mieszank mineralno-asfaltowych wykazały istotne spadki emisji dwutlenku i tlenku węgla, związków siarki, tlenków azotu, lotnych związków organicznych oraz pyłów w trakcie produkcji mieszank WMA [31]. Stwierdzono również, że wykorzystanie niższych temperatur podczas wytwarzania mieszank mineralno-asfaltowych oraz modyfikacja istniejących wytwórni może ograniczyć ilość paliwa niezbędną do ogrzania składników mieszanki mineralnej o 40% [5].

W wyniku działania wody zwiększającej swoją objętość w procesie gwałtownego odparowania w kontakcie z gorącym lepiszczem piana asfaltowa wykazuje zmniejszoną lepkość w porównaniu z pierwotnym lepiszczem. To zjawisko wpływa korzystnie na zdolność lepiszcza do otaczania mieszanki mineralnej oraz na poprawę urabialności mieszanki mineralno-asfaltowej. W efekcie możliwe jest uniknięcie konieczności stosowania dodatków obniżających temperatury technologiczne w procesie produkcji i wbudowywania mieszank mineralno-asfaltowych [55], [56]. Jednak wykorzystanie asfaltu spienionego nie wyklucza możliwości stosowania dodatków WMA. Dodatki te mogą być stosowane w celu polepszenia adhezji lepiszcza do kruszywa oraz poprawienia odporności mieszanki na działanie wody i innych ich parametrów [57], [58], [59]. Taki krok może być uzasadniony, gdy istnieje potrzeba zapewnienia lepszej urabialności mieszanki przy niższych temperaturach lub poprawy odporności na deformacje trwałe. W praktyce, zastosowanie asfaltu spienionego i ewentualne użycie dodatków WMA mogą się wzajemnie uzupełniać, zapewniając optymalne właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej [60], [61].

2.1.4 Sposoby obniżania temperatur technologicznych mieszank mineralno-asfaltowych

Dążenie do ograniczenia zapotrzebowania na surowce energetyczne oraz redukcja szkodliwych związków trafiających do atmosfery doprowadziły do rozwinięcia szerokiej gamy rozwiązań materiałowo-technologicznych, umożliwiających wytwarzanie mieszanki mineralno-asfaltowej w obniżonej temperaturze technologicznej. W zależności od rodzaju stosowanych dodatków lub technologii, sposób obniżenia temperatury mieszank mineralno-asfaltowych można pogrupować według trzech kategorii [62], [63], [64]:

- asfalt spieniony za pomocą wody pod ciśnieniem dodanej do gorącego lepiszcza; metoda wykorzystywana w technologiach takich jak: WAM Foam, LEA, LEA-CO, Double-Barrel Green, Terex WMA System, EBE, EBT, LEAB, Ultrafoam GX oraz LT Asphalt,
- asfalt spieniony za pomocą naturalnego lub syntetycznego zeolitu,
- dodatki oddziałujące na lepkość asfaltu lub o działaniu powierzchniowo-czynnym z grupy parafin i amidów kwasów tłuszczowych; spośród nich można wymienić m.in. Sasobit, Asphaltan B, Licomont BS 100, Rediset WMX, Rediset LQ, 3E-LT, Iterlow T, Cecabase RT, Evotherm 3G, Revixarba Evotherm 3G, Zyco Therm.

Przeważająca liczba dostępnych obecnie na rynku dodatków WMA objęta jest patentami lub ich formuła chemiczna nie jest udostępniana przez producentów. Jednak w znacznej większości poznany jest ogólny mechanizm, w jakim te dodatki oddziałują na mieszanki mineralno-asfaltowe oraz główny rodzaj składników tych produktów. Charakterystyka wybranych dodatków i technologii stosowanych na świecie w celu obniżenia temperatur technologicznych mieszanek mineralno-asfaltowych została przedstawiona w tabeli 3.2.

Zastosowanie dodatków do lepiszczy i mieszanek mineralno-asfaltowych służące redukcji ich temperatur technologicznych, zazwyczaj nie wymaga gruntownych modyfikacji struktury zakładów produkcyjnych. Istniejące instalacje dozowania środków adhezyjnych mogą być wykorzystane do aplikacji płynnych dodatków WMA. Przy zastosowaniu dodatków w postaci stałej, wprowadzanie pewnych modyfikacji zazwyczaj nie ma znaczącego wpływu na procesy produkcyjne w wytwórni mieszanek mineralno-asfaltowych [65]. W przypadku wykorzystania asfaltu spienionego w procesie produkcji mieszanek WMA wymagane jest odpowiednie uzupełnienie istniejących systemów o komory spieniania lub elementy podające wodę [37].

Płynne dodatki chemiczne oraz środki powierzchniowo-czynne są zwykle podawane do lepiszcza asfaltowego, a ich oddziaływanie jest uzależnione od ich struktury chemicznej i składu samego lepiszcza asfaltowego [66]. Dodatki o charakterze powierzchniowo-czynnym są związkami organicznymi o różnej długości łańcuchów węglowych. Mogą one, szczególnie w przypadku zbyt obfitego dozowania, wpływać na właściwości reologiczne lepiszcza asfaltowego [5], [6], [66], [67], [68]. Mechanizm ich działania opiera się na zdolności do zmniejszenia napięcia powierzchniowego lepiszcza asfaltowego. W efekcie poprawiają

zdolność otaczania ziaren mieszanki mineralnej oraz stabilizują mikropęcherzyki powietrza zawarte w lepisczu podczas wytwarzania mieszanki [68]. Mogą działać także plastyfikująco, tworząc dodatkowe powierzchnie poślizgu pomiędzy micelami asfaltu [67].

Spośród najczęściej stosowanych dodatków organicznych w postaci stałej możemy wyróżnić substancje z grupy wosków. W naturalnych asfaltach występujące woski mogą prowadzić do obniżenia właściwości funkcjonalnych lepisczy asfaltowych w mieszankach mineralno-asfaltowych, w szczególności zwiększać ich kruchość. Ze względu na strukturę chemiczną można je podzielić na: makrokrystaliczne, mikrokrystaliczne oraz amorficzne, które posiadają mniejszą zdolność do krystalizacji, przez co ich ciągliwość jest ograniczona [69]. Niska temperatura topnienia oraz gruboziarnisty układ krystaliczny wosków makrokrystalicznych, które naturalnie występują w asfaltach negatywnie oddziałują na ich właściwości. Dodatki w postaci wosków o długich łańcuchach węglowych i drobnej strukturze charakteryzujące się wysoką temperaturą topnienia przekraczającą 100°C mogą być wolne od wad naturalnie występujących wosków w lepisczach asfaltowych [70]. Przykładem tego rodzaju dodatków jest Sasobit, produkowany w procesie syntezy Fischera-Tropscha, oraz produkty bazujące na wosku Montan. Ich działanie pozwala zmniejszyć lepkość lepiscza w trakcie produkcji mieszanki mineralno-asfaltowej i poprawić jej właściwości przy wyższych temperaturach w trakcie eksploatacji nawierzchni. Niemniej jednak, wprowadzenie wosków może negatywnie wpłynąć na cechy niskotemperaturowe lepiscza asfaltowego w przypadku stosowania asfaltów „twardych” [71].

Dodatki w postaci zeolitów naturalnych i syntetycznych spieniają lepiscze asfaltowe bezpośrednio podczas mieszania mieszanki mineralno-asfaltowej na skutek występowania wody zeolitowej w ich składzie. Należą do glinokrzemianów szkieletowych, które dzięki pustkom w swojej strukturze umożliwiają dyfuzję do nich związków chemicznych. Obecność „wody zeolitowej” sprawia, że w kontakcie z gorącym lepisczem powstaje piana asfaltowa poprawiająca urabialność mieszanki mineralno-asfaltowej. Podczas procesu projektowania mma część wypełniacza z mieszanki mineralnej jest zastępowana zeolitem, dzięki czemu temperatura produkcji może zostać obniżona. Obecnie w Polsce realizowane są badania zmierzające do optymalizacji składu mma z dodatkiem WMA w postaci zeolitu [72], [73].

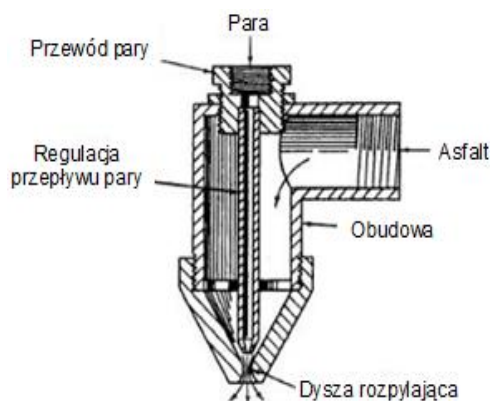
Tab. 2.2 Wybrane dodatki i technologie stosowane w celu obniżenia temperatur technologicznych mieszanek mineralno-asfaltowych w technologii WMA [5], [25], [38], [63], [70], [74], [75], [76], [77], [78].

Produkt	Producent	Charakterystyka	Dozowanie [wg producenta]	Temperatura produkcji mma lub [zakres redukcji temperatury]
Technologie spienianie lepiscza wodą pod ciśnieniem				
Low Energy Asphalt	LEACO	Wilgotny piasek wymieszany z gorącym, grubym kruszywem w obecności wody	±0,5% (masy asfaltu + środek adhezyjny)	≤100°C
WAM-Foam	Shell and KoloVeidekke	Wykorzystanie dwóch różnych lepisczy w procesie spieniania	-	100-120°C [62°C]
LEAB	BAM	Zmieszanie kruszywa z dodatkiem wody poniżej temperatury wrzenia	0,1% (masy asfaltu + środek adhezyjny)	90°C [30 °C]
Aspha-Min	Eurovia	Zeolit syntetyczny	0,3% (masy mieszanki)	30°C [20-30°C]
LT Asphalt	Nynas	Dodatek hydrofobowego wypełniacza podczas spieniania	0,5-1% (masy mieszanki)	90°C [30 °C]
Dodatki organiczne				
Sasobit	Sasol	Wosk syntetyczny procesu Fischera-Tropcha. W zależności od zastosowanej temperatury rozprasa fazę asfaltu bądź usztywnia go	2,5 do 3,0% w Niemczech, 1 do 1,5% w USA (masy asfaltu)	[od 10°C do 30°C]
Asphaltan B	Romonta GmbH	Mieszanina wosku Montana z amidami kwasów tłuszczowych. Dobra adhezja do kruszywa asfaltu niż wosk F-T	2 do 4% (masy mieszanki)	[od 20°C do 30°C]
Licomont BS 100	Clariant	Amidy kwasów tłuszczowych. Usztywniają asfalt, zwiększając temperaturę mięknięcia i redukując jego lepkość w temperaturze powyżej 145°C	3,0% (masy asfaltu)	[od 20°C do 30°C]
Asphaltan A oraz Romonta N	Romonta GmbH	Twardy wosk Montana powstający w procesie ekstrakcji węgla brunatnego	1,5% do 2,0% (masy asfaltu)	20°C [30°C]
3E LT or Ecoflex	Colas	Informacje zastrzeżone	-	[od 30 do 40°C]
Dodatki chemiczne				
Evotherm DAT	Mead-Westvaco	Dodatek chemiczny rozcieńczany wodą, który w niskich temperaturach redukuje lepkość asfaltu	1,5% do 2,0% (masy asfaltu)	[20°C]
CECABASE RT	CECA Arkema	Środek chemiczny	0,2-0,4% (masy mieszanki)	120°C*
Rediset WMX	-	Dodatek kationow-organiczny o działaniu powierzchniowo-czynnym. Ułatwia otoczenie asfaltem mieszanki mineralnej poprzez zmniejszenie napięcia powierzchniowego	2 do 4% (masy asfaltu)	[od 20°C do 30°C]
WarmMix L	Star Asphalt	Środek chemicznych na bazie amidu	0,5% (masy asfaltu)	[30°C*]
* Zakres temperatur określony przez producenta				

2.1.5 Technologia asfaltu spienionego wodą

Istotną rolę w przemyśle drogowym w ujęciu globalnym odgrywają technologie produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych metodą "na ciepło", zwłaszcza te oparte na spienianiu lepiszcza z dodatkiem niewielkiej ilości wody pod ciśnieniem [79], [80], [81], [82].

Początkowe próby wprowadzenia technologii asfaltu spienionego sięgają roku 1889, gdy podczas prac naprawczych w celu zwiększenia nośności istniejącej podbudowy drogi w Nebrasce podjęto eksperymenty w tej dziedzinie. Pierwszy system wykorzystujący technologię spieniania asfaltu wyprodukował i opatentował August Jacobi w 1928 roku. Profesor Csanyi z Uniwersytetu Stanowego Iowa jest uważany za kluczową postać w rozwoju tej technologii. W 1957 roku z powodzeniem wprowadził parę wodną do gorącego asfaltu, udowadniając, że lepiszcze w postaci piany może być skutecznie zmieszane z różnymi rodzajami gruntu, poprawiając ich właściwości i tworząc materiały użyteczne do konstrukcji dróg [40], [83]. Profesor Csanyi rozwijał koncepcję „zaprawy”, gdzie drobne frakcje w kruszywie mineralnym w połączeniu z lepiszczem asfaltowym tworzyły mastyks, stosowany do wiązania większych frakcji materiału mineralnego. Prowadził także badania nad zastosowaniem wody, powietrza i gazów jako środków pniących. Z uwagi jednak na dostępność pary wodnej w warunkach terenowych, uważał ją za najprostszy, najskuteczniejszy i najefektywniejszy środek pniący. W swoich badaniach eksplorował również wykorzystanie asfaltu spienionego do tworzenia mieszanki przeznaczonej na warstwy ścieralne typu „slurry seal” [40]. Konstrukcja dyszy stworzonej przez profesora Csanyiego przedstawiona na rysunku 2.2 została objęta patentem przez Iowa State College Research Foundation [84].



Rys. 2.2 Dysza do spieniania asfaltu opracowana przez profesora Csanyiego [84].

Produkcja piany asfaltowej metodą Csanyiego pozwalała na zwiększenie objętości lepiszcza asfaltowego jedynie dwukrotnie. Ograniczenie wzrostu objętości asfaltu spienionego za pomocą pary wodnej wynikało z faktu, że para wodna zajmuje większą objętość niż sama

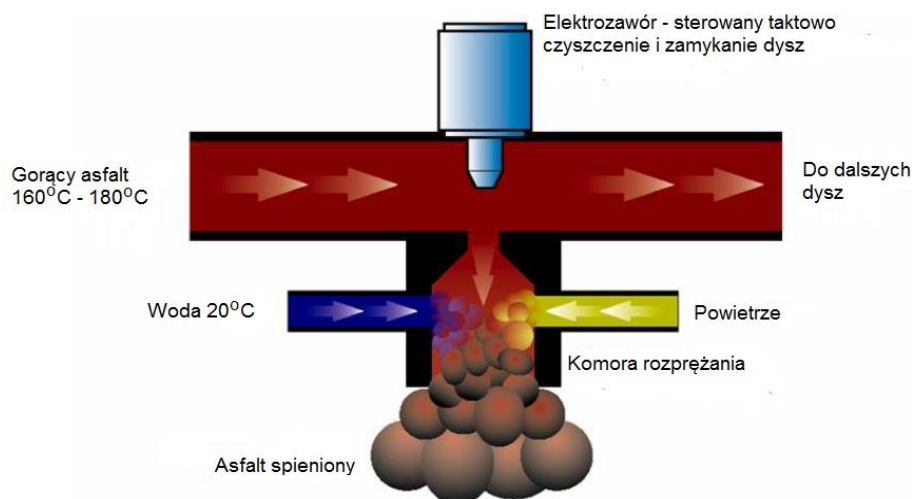
woda, dlatego niemożliwe było osiągnięcie odpowiedniego otoczenia ziaren mieszanki mineralnej [85].

Mimo potencjału, technologia ta do roku 1965 miała ograniczone zastosowanie na skalę globalną, głównie z powodu praw patentowych właściciela dyszy do spieniania. Ponadto, ze względu na skomplikowane wymagania dotyczące wyposażenia i trudności w dokładnym i kontrolowanym dozowaniu pary wodnej do asfaltu metoda ta nie znalazła praktycznego zastosowania [40], [83]. Stwierdzono, że kontrolowanie cech piany asfaltowej poprzez sterowanie ciśnieniem jest błędnym podejściem, ponieważ wpływa to nieprawidłowo na regulację objętości przepływu lepiscza [86]. Prawa do patentu profesora L. Csanyi uzyskała w roku 1968 firma Mobil Oil Australia Ltd. dokonując następnie modyfikacji procesu wytwarzania spienionego asfaltu poprzez zmianę konstrukcji dyszy oraz zastosowanie zimnej wody w ilości od 1,5% do 2,5% [84]. Nowy system kontrolujący przepływ asfaltu i zawartości wprowadzonej wody umożliwił wytwarzanie asfaltu spienionego o stałych parametrach i lepszej jakości oraz zredukował zużycie energii elektrycznej dzięki zastosowaniu zimnej wody zamiast pary wodnej [87], [88], [89]. Eliminacja systemu parowego przez Mobil Oil Australia Ltd. skutkowała popularyzacją prac badawczych w zakresie zastosowania asfaltu spienionego w 16 krajach na świecie [88].

W początkowym okresie rozwój technologii spieniania asfaltu wodą był ograniczony z uwagi na brak konkurencyjności w porównaniu z tradycyjną metodą produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych „na gorąco”. Rozwój tej technologii nabrał tempa po roku 1987, kiedy prawa patentowe Mobil Oil Australia Ltd. wygasły. Wraz z postępem w dziedzinie urządzeń do recyklingu na zimno, zainteresowanie technologią asfaltu spienionego wzrosło, ze względu na jej korzyści w porównaniu do tradycyjnych metod budowy dróg. Na obecną chwilę istnieje wiele systemów spieniania, które umożliwiają stosowanie technologii asfaltu spienionego na szeroką skalę w wielu krajach na świecie [90].

Wytwarzanie asfaltu spienionego polega na wprowadzeniu niewielkiej ilości zimnej wody do gorącego asfaltu, którego temperatura zazwyczaj wynosi od około 160°C do 180°C. Woda, mająca temperaturę otoczenia (nie jest ogrzewana), jest dodawana do lepiscza w celu wywołania procesu spieniania. Temperatura do jakiej należy podgrzać asfalt jest uzależniona głównie od charakterystyk rodzaju asfaltu oraz obecności ewentualnych dodatków [91]. Procedura wytwarzania asfaltu spienionego przeprowadzana w warunkach laboratoryjnych odbywa się w specjalnej komorze ekspansji, nazywanej również komorą rozprężania przedstawionej na rysunku 2.3. Proces spieniania ma charakter zjawiska fizycznego, a zmiany właściwości lepiscza mają źródło w powstaniu mieszaniny dyspersyjnej (piany) w której

ośrodkiem rozpraszającym jest lepiszczce asfaltowe a rozpraszany para wodna. Warto podkreślić, że skład chemiczny asfaltu nie ulega istotnym zmianom nawet w przypadku wyraźnych modyfikacji jego konsystencji i lepkości, które to zmiany są wynikiem procesu spieniania [83][12], [92], [93].



Rys. 2.3 Komora ekspansji do wytwarzania asfaltu spienionego [94].

Proces spieniania asfaltu inicjowany jest poprzez wprowadzenie w określonej kolejności składników do komory rozprężania. W początkowej fazie, dysza rozpylająca dostarcza wodę oraz powietrze pod odpowiednim ciśnieniem, po czym następuje podanie gorącego asfaltu. Ta kolejność ma na celu uniknięcie potencjalnego zatykania się dysz podających wodę i powietrze poprzez gorący asfalt, co mogłoby negatywnie wpłynąć na poprawność procesu spieniania. W momencie, gdy zimna woda jest wprowadzana do komory rozprężania i styka się z gorącym asfaltem, zachodzi dynamiczny proces spieniania. Warunki termiczne powodują nagłe parowanie wody, co generuje intensywne pęcherzyki w strukturze asfaltu. Skutkiem tego procesu jest tworzenie się piany asfaltowej, która charakteryzuje się większą objętością i znacznie niższą gęstością w porównaniu do asfaltu w stanie pierwotnym [95]. Krople wody w temperaturze pokojowej w kontakcie z gorącym asfaltem prowadzą do pojawiania się istotnych zjawisk opisanych w publikacjach [84], [96]. Spośród nich możemy wyróżnić następujące etapy:

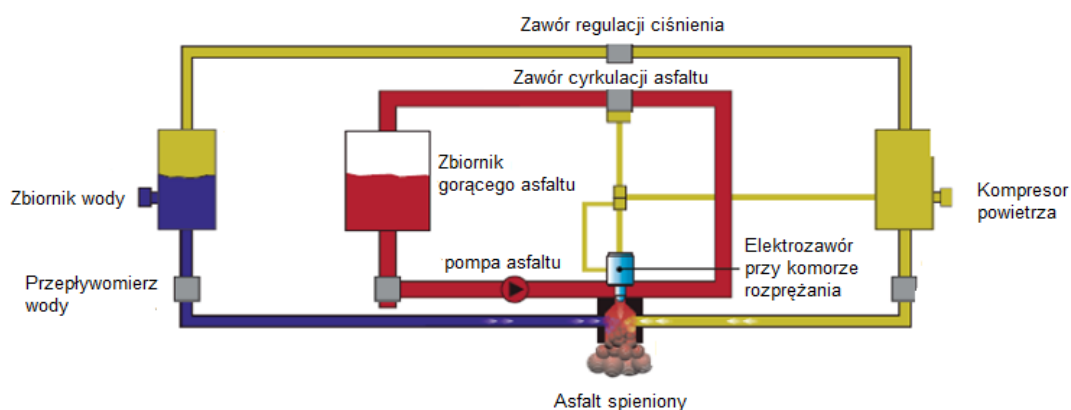
- krople wody są podgrzewane do temperatury 100°C poprzez energię cieplną zawartą w gorącym asfalcie. W efekcie dochodzi do zmiany ich stanu skupienia z ciekłej na gazową, czyli parę wodną. Ten etap wywołuje dalsze obniżenie temperatury błonki asfaltu otaczającej kroplę wody,
- energia cieplna wywołuje gwałtowne rozprężenie mieszaniny wody i asfaltu na skutek intensywnego parowania wody. W przypadku większych kropli wody,

para może zawierać niewielkie ilości niewyparowanej wody. Pęcherzyki są utrzymywane w stabilnym stanie za sprawą napięcia powierzchniowego filmu asfaltu, który otacza pęcherze i jest nieznacznie chłodniejszy,

- pęcherzyki pary wodnej uwięzione w asfalcie po przejściu przez dyszę rozpylającą rozszerzają się do momentu osiągnięcia stanu równowagi. W tym stanie cienka warstwa asfaltu wytwarza niewielkie ciśnienie pary wodnej tworząc stan równowagi,
- z uwagi na ograniczoną przewodność cieplną zarówno asfaltu, jak i wody, pęcherzyki pary otoczone lepiskiem asfaltowym mogą utrzymać trwały i stabilny stan równowagi przez pewien czas. W miarę ochładzania się pęcherzyków, para w nich zawarta kondensuje się, co powoduje stopniowe zmniejszanie ich rozmiaru.

Opisany mechanizm występuje przy znacznej liczbie mikroskopijnych pęcherzyków zawartych w lepisku asfaltowym, które tworzą pianę asfaltową. W miarę jak układ dyspersyjny ulega schłodzeniu w temperaturze otoczenia, cząsteczki pary wodnej zawartej w pęcherzykach zaczynają kondensować, co prowadzi do ich stopniowego opadania oraz rozpadu struktury piany asfaltowej.

Współczesne speniarki laboratoryjne posiadają system, w którym woda wprowadzana jest w formie delikatnej mgiełki, która podawana jest pod ciśnieniem sięgającym nawet 5 barów. Elementem wspólnym dla wszystkich speniarek laboratoryjnych jest możliwość podawania ściśle określonej ilości wody w kontrolowany sposób do określonej objętości lepiscza asfaltowego. Schemat procesu spieniania asfaltu w obiegu urządzenia laboratoryjnego przedstawiono na rysunku 2.4.



Rys. 2.4 Obieg asfaltu, wody oraz powietrza podczas spieniania asfaltu [97].

Sposób podawania wody do lepiszcza asfaltowego ma istotny wpływ na skuteczność procesu spieniania. Zastosowanie zeolitów lub frakcji wilgotnego kruszywa jako nośnika wody spieniającej pozwala na wytworzenie piany asfaltowej, lecz znacznie częściej wykorzystywane są wymuszone i kontrolowane techniki wykorzystujące bezpośrednie dozowanie wody do lepiszcza określane w zagranicznej literaturze jako „mechanical foaming” [14], [98], [99]. Kluczowym aspektem procesu spieniania lepiszczy asfaltowych jest zapewnienie optymalnych warunków do wymiany energii cieplnej między lepiszczem a wodą spieniającą oraz stworzenie warunków sprzyjających utworzeniu jednnorodnej piany asfaltowej. W celu osiągnięcia tego efektu wykorzystuje się różne rozwiązania techniczne, wśród których można wymienić m.in.[14]:

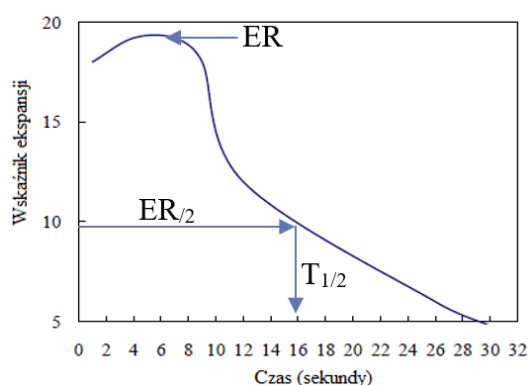
- wstrzykiwanie wody pod ciśnieniem w komorze ekspansji: proces spieniania lepiszcza asfaltowego rozpoczyna się od kontrolowanego wprowadzenia wody pod ciśnieniem do gorącego asfaltu. Ciśnienie pozwala na równomierne rozprowadzenie wody w masie asfaltu, co sprzyja procesowi spieniania,
- mieszanie mechaniczne w mieszalnikach wolnoobrotowych: woda jest mechanicznie mieszana z lepiszczem asfaltowym, co pomaga w równomiernym rozprowadzeniu wody i ułatwia proces spieniania,
- układ wyposażony w zwężkę Venturiego: wprowadzona woda do gorącego lepiszcza gwałtownie paruje. Homogenizacja piany asfaltowej następuje poprzez zmianę przepływu z laminarnego w turbulentny,
- dysza z poszerzonym przekrojem przewodu: zastosowanie zaawansowanych rozwiązań, takich jak rozpylanie wody w postaci delikatnej mgiełki pozwala na równomierne i kontrolowane wprowadzanie wody do lepiszcza asfaltowego.

Dzięki zastosowaniu tych zaawansowanych technik, możliwe jest osiągnięcie wysokiej jakości piany asfaltowej, co stanowi kluczowy czynnik w efektywnym wykorzystaniu technologii asfaltu spienionego w różnych zastosowaniach drogowych. Obecnie przeprowadzane są również badania nad wpływem rozcieńczonego metanolu i wody jako dodatku spieniającego lepiszcza asfaltowe [100].

2.1.6 Procesy fizyczne zachodzące podczas spieniania lepiszcza asfaltowego

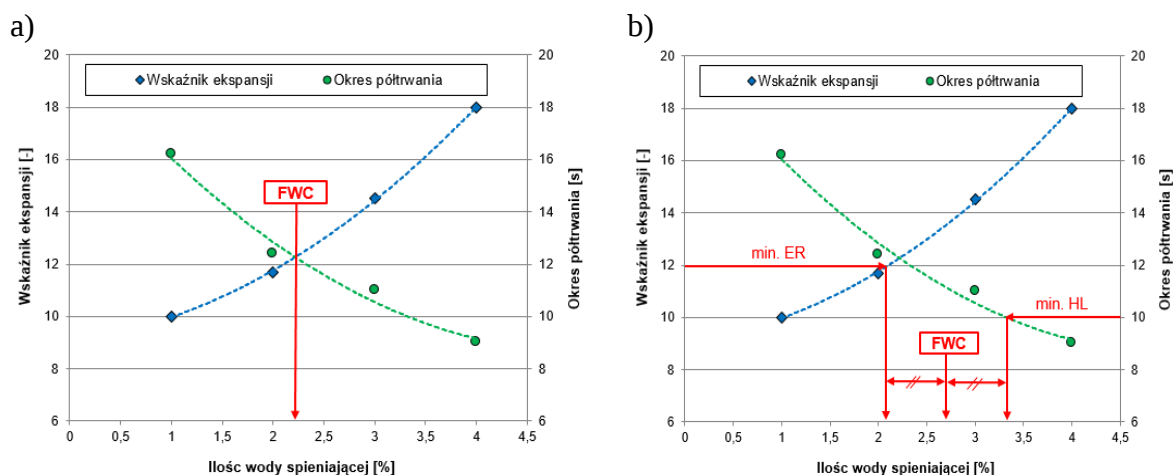
Postać piany asfaltowej ulega znaczącym zmianom w zależności od zastosowanego lepiszcza asfaltowego, temperatury, zawartości wody spieniającej oraz aparatury wykorzystanej do spieniania. Aby mogła być kontrolowana i efektywnie zastosowana

w procesie produkcyjnym należy sprawdzić jej jakość poprzez ocenę pienistości (*ang. foamability*) [101], [102]. Pozwala na to określenie dwóch empirycznych parametrów: wskaźnik ekspansji (ER, *ang. expansion ratio*) oraz okres półtrwania (HL, *ang. half-life*) [84], [103]. Wskaźnik ekspansji wyrażony jest jako wielokrotność zwiększenia objętości asfaltu po spienieniu w porównaniu z jego początkową objętością przed procesem spieniania, natomiast okres półtrwania to czas w sekundach od chwili uzyskania maksymalnej objętości asfaltu spienionego do momentu zmniejszenia tej objętości o połowę [84]. Zmienność wartości wskaźnika ekspansji w czasie i krzywą rozpadu asfaltu spienionego przedstawiono schematycznie na rysunku 2.5.



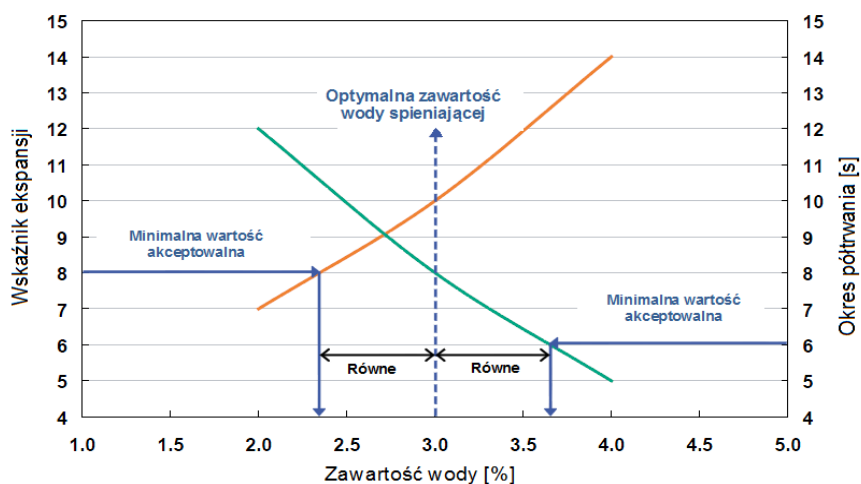
Rys. 2.5 Zmienność wskaźnika ekspansji w czasie [104], [105].

Ocena pienistości asfaltów za pomocą opisanych parametrów polega na spienianiu lepiszcza asfaltowego bezpośrednio do naczynia pomiarowego o określonej średnicy, niezmienną na całej jego wysokości. Jednocześnie dokonuje się pomiaru wzrostu objętości i czasu opadania piany asfaltowej z wykorzystaniem miarki i stopera [106]. W celu określenia dokładnego stopnia spienienia lepiszcza asfaltowego, konieczne jest wykonanie pomiarów HL i ER ze zmienną zawartością wody spieniającej (FWC, *ang. foaming water content*), zazwyczaj w zakresie 1% - 3% względem masy asfaltu. Na podstawie uzyskanych wyników tworzony jest wykres zależności ilości wody spieniającej, okresu półtrwania i wskaźnika ekspansji piany asfaltowej [106]. Przykładowe charakterystyki służące do określenia optymalnej zawartości wody w spienianym lepiszczu asfaltowym przedstawiono na rysunku 2.6.



Rys. 2.6 Sposoby określenia optymalnej zawartości wody spieniającej używane w technologii CMA oraz HWMA [106], [107], [108].

Wytyczne południowoafrykańskie TG2 z 2009 roku oraz niemieckie wymagania opracowane na ich podstawie w 2012 roku [94], [108] rekomendują określenie optymalnej ilości wody, która jest dozowana do asfaltu podczas procesu spieniania. Te zalecenia opierają się na zoptymalizowaniu wskaźnika ekspansji i okresu półtrwania piany asfaltowej. Rysunek 2.7 przedstawia zależność między ilością dozowanej wody a wskaźnikiem ekspansji oraz okresem półtrwania piany asfaltowej. Zgodnie z wykresem, optymalna ilość wody dozowanej do lepiszcza pozwala osiągnąć minimalną akceptowalną wartość wskaźnika ekspansji ($ER \geq 8$) i minimalny okres półtrwania ($HL \geq 6$ s) [108].

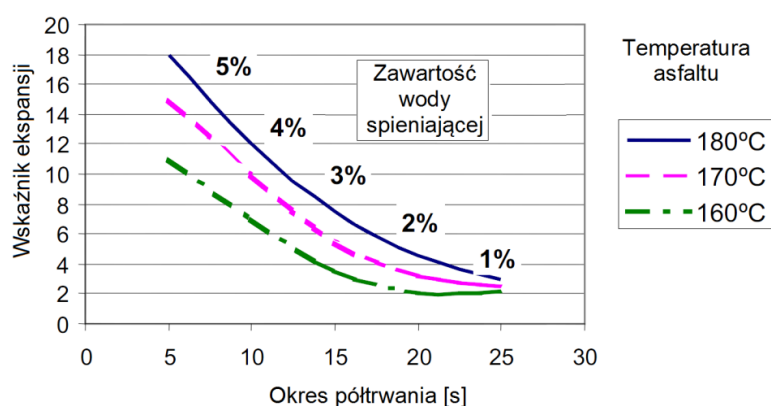


Rys. 2.7 Określenie optymalnej zawartości wody spieniającej na podstawie południowoafrykańskich wytycznych [108].

Jenkins [84] opierając się na przeprowadzonych badaniach i analizie dostępnej literatury, sformułował minimalne wymagania dotyczące wskaźników ekspansji i okresu półtrwania asfaltu spienionego, zależnie od jego zastosowania:

- w przypadku powierzchniowych utrwaleń minimalny wskaźnik ekspansji powinien być większy od 30, natomiast okres półtrwania powyżej 30 sekund,
- mieszanki wytwarzane w technologii CMA – wskaźnik ekspansji powyżej 15, okres półtrwania powyżej 15 sekund,
- mieszanki wytwarzane w technologii HWMA z dodatkiem granulatu asfaltowego – wskaźnik ekspansji powyżej 17, okres półtrwania powyżej 13 sekund,
- mieszanki wytwarzane w technologii WMA - wskaźnik ekspansji powyżej 12, okres półtrwania powyżej 10 sekund [109].

Właściwości asfaltu spienionego, takie jak wskaźnik ekspansji okres półtrwania, są uzależnione od różnych czynników, w tym od temperatury asfaltu podczas wprowadzania go do komory ekspansji oraz ilości użytej wody w procesie spieniania. Te czynniki wpływają na jakość i charakterystyki uzyskanej piany asfaltowej. Rysunek 2.8 ilustruje wpływ tych dwóch kluczowych czynników na zmiany opisanych parametrów.



Rys. 2.8 Zależność zawartości wody spieniającej i temperatury asfaltu na parametry pienistości lepiszcza asfaltowego [110].

Temperatura początkowa asfaltu, który jest wprowadzany do procesu spieniania, ma znaczący wpływ na efektywność i przebieg tego procesu. Różne rodzaje asfaltu mogą wymagać różnych temperatur początkowych, aby uzyskać optymalne wskaźniki ER i HL. Temperatura ta jest również często dostosowywana do konkretnego procesu wytwarzania asfaltu spienionego [110].

Badania przeprowadzone w ramach prac [14], [84], [102], [103] wykazały, że na zdolność lepiszczy asfaltowych do wytworzenia piany asfaltowej podczas procesu spieniania wodą wpływa wiele czynników, z których niektóre są kluczowe dla tego procesu. Należą do nich:

- rodzaj lepiszcza asfaltowego - charakterystyka chemiczna asfaltu, w tym rodzaje grup funkcyjnych i skład chemiczny, odgrywa kluczową rolę w procesie tworzenia piany.

Różne rodzaje asfaltów mogą wykazywać różną zdolność do tworzenia piany asfaltowej,

- czas rozpylania piany asfaltowej – ilość wykorzystanego lepiszcza podczas jednego cyklu spieniania,
- temperatura lepiszcza asfaltowego – bezpośrednio w momencie przeprowadzenia procesu spieniania ma istotny wpływ na zdolność tworzenia piany. Odpowiednio dostosowana temperatura może wpłynąć na jakość i charakterystyki ostatecznej piany,
- ilość wody wprowadzonej do gorącego asfaltu – przeprowadzone badania wskazują na istotny wpływ tego czynnika. Zwiększenie ilości wody spieniającej prowadzi do znacznego wzrostu wskaźnika ekspansji oraz zmniejszenia czasu półtrwania piany asfaltowej [102], [111], [112], [113],
- ciśnienie lepiszcza asfaltowego, wody oraz powietrza,
- rodzaj i rozmiar dyszy spieniającej,
- obecność środków przeciwpiannych lub pianotwórczych – stosowane w rafinerii lub w celu kontroli parametrów i procesu spieniania.

W ramach badań przeprowadzonych przez Alię i innych [114] potwierdzono negatywny wpływ zwiększonej ilości wody spieniającej na właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej, takie jak zmniejszenie odporności na powstawanie deformacji trwałych oraz obniżenie odporności na działanie wody. W przypadku dokładnego wysuszenia mieszanki mineralnej w temperaturze powyżej 90°C parametry określające pienistość lepiszcza nie wpływają znacząco na proces zagęszczania mma zgodnie z badaniami przedstawionymi przez Hailesilassiego [115]. Badania mieszanek mineralno-asfaltowych wytwarzanych w obniżonych temperaturach z asfaltem spienionym wodą w ilości od 0,7% do 5,5% wykazały porównywalną urabialność oraz właściwości względem tradycyjnej technologii „na gorąco”. Najkorzystniejsze rezultaty otrzymano przy stosunkowo niskiej wartości FWC wynoszącej 1,5% [116]. Podobna zależność została przedstawiona w badaniach [117], gdzie zastosowanie dwóch z trzech analizowanych lepiszczy wykorzystanych do produkcji mma w technologii WMA spowodowały lepszą urabialność mieszanki, w której zawartość wody spieniającej wynosiła 1%. Dodatkowo mieszanki wytwarzane w obniżonych temperaturach technologicznych z dodatkiem 1% wody spieniającej wykazały znacznie lepsze właściwości niż mieszanka referencyjna HMA.

Cechy piany asfaltowej, w tym wskaźnik ekspansji (ER) oraz okres półtrwania (HL), podlegają wpływom wielu zmiennych czynników, co może skutkować istotnymi zmianami

w ich wartościach. Wartości wskaźnika ER mają wpływ na lepkość lepiszcza asfaltowego podczas procesu mieszania, co z kolei wpływa na sposób, w jaki to lepiszcze zostaje rozproszone wewnątrz mieszanki mineralnej. Natomiast zmiany w okresie półtrwania obrazują zachowanie piany asfaltowej w trakcie określonego czasu dostępnego na jej wymieszanie z mieszanką mineralną, zanim opadnie ona do swojego pierwotnego stanu [118].

2.1.7 Korzyści obniżania temperatur technologicznych mieszanek mineralno-asfaltowych

Wykorzystanie mieszanek mineralno-asfaltowych o obniżonych temperaturach technologicznych przynosi liczne korzyści w zakresie aspektów technologicznych, produkcyjnych oraz ochrony środowiska. Jednym z kluczowych atutów tej technologii jest obniżenie temperatury, przy której przeprowadza się proces transportu i wbudowywania mieszanek mineralno-asfaltowych [119]. Ta różnica widoczna jest już na etapie załadunku mieszanki na pojazdy transportowe, jak przedstawiono na rysunku 2.9. Dodatkowo, istotna różnica w temperaturze zauważalna jest także w trakcie procesu układania, co obrazuje rysunek 2.10.

a) *Hot Mix Asphalt*



b) *Warm Mix Asphalt*



Rys. 2.9 Porównanie załadunku mma w technologii „na ciepło” (b) oraz tradycyjnej technologii „na gorąco” (a) [120].

a) **Hot Mix Asphalt**



b) **Warm Mix Asphalt**



Rys. 2.10 Wbudowywanie mieszanki mineralno-asfaltowej w technologii „na gorąco” (a) oraz „na ciepło” (b) [120].

Jest to istotne z punktu widzenia procesu produkcji i transportu mieszanek mineralno-asfaltowych, a także ma znaczący wpływ na emisję gazów cieplarnianych oraz obciążenie środowiska naturalnego. Wprowadzenie tej technologii może skutkować redukcją zużycia energii oraz obniżeniem emisji dwutlenku węgla, co wpisuje się w cele ochrony środowiska naturalnego. Ponadto, możliwość wykonywania warstw nawierzchni przy niższych temperaturach pozytywnie wpływa na komfort pracy oraz efektywność całego procesu budowy i utrzymania dróg.

Redukcja temperatur w procesie wytwarzania i układania mieszanek mineralno-asfaltowych niesie ze sobą wiele korzyści, które można podzielić na trzy kluczowe kategorie, opierając się na wynikach badań [64], [80], [81], [121]:

- ✓ Aspekty w zakresie ochrony środowiska:
 - znaczna redukcja emisji szkodliwych gazów – obniżenie temperatur produkcyjnych zmniejsza uwalnianie gazów cieplarnianych i innych toksycznych substancji do atmosfery,
 - polepszenie warunków pracy przy wbudowywaniu mieszanek mineralno-asfaltowych – proces staje się bardziej przyjazny dla środowiska oraz pracowników, dzięki niższej emisji frakcji olejowych będących składnikiem asfaltu; przekłada się to również na zmniejszenie uciążliwości dla otoczenia w pobliżu wytwórni mieszanek mineralno-asfaltowych,

- zmniejszenie zużycia energii – proces wytwarzania w obniżonej temperaturze wymaga mniej energii do osiągnięcia odpowiedniej lepkości lepiszcza asfaltowego oraz ogrzania składników mineralnych; to przekłada się na redukcję wykorzystania energii i wydatków operacyjnych w produkcji mma.
 - mniejsza uciążliwość dla terenów zamieszkałych w otoczeniu wytwórni mma.
- ✓ Aspekty technologiczno-produkcyjne:
- poprawa urabialności mieszanki mineralno-asfaltowej – redukcja lepkości lepiszcza asfaltowego w niskich temperaturach produkcji mieszanki,
 - zredukowanie stopnia starzenia asfaltu – przeprowadzone badania wykazały, że zmniejszenie temperatury o 10°C prowadzi do spadku intensywności utleniania lepiszcza asfaltowego,
 - spowolnienie tempa ochładzania się mieszanki mineralno-asfaltowej – poprzez mniejszą różnicę temperatur między mieszanką a otoczeniem,
 - wydłużenie czasu transportu mieszanki mineralno-asfaltowej z wytwórni – niwelowane jest ryzyko utraty wymaganego poziomu zagęszczenia spowodowane zbyt gwałtownym ochłodzeniem mieszanki,
 - poprawa zagęszczalności – dzięki redukcji lepkości asfaltu zmniejsza się opór zagęszczania wbudowywanej warstwy,
 - większe bezpieczeństwo dla pracowników – zastosowanie niższych temperatur mma skutkuje zmniejszeniem zagrożeń w postaci oparzeń oraz redukcją wydzielających się oparów przy pracach nawierzchniowych,
 - zmniejszenie czasu potrzebnego do wychłodzenia się ułożonej warstwy – pozwala to na szybsze wbudowanie kolejnych warstw oraz udostępnienie nawierzchni do ruchu samochodowego.
- ✓ Aspekty ekonomiczne:
- redukcja zużycia energii potrzebnej do ogrzania składników mma, tj. asfaltu i mieszanki mineralnej – prowadzi do obniżenia kosztów związanych z produkcją mieszanki i poprawy rentowności wytwórni mma.

W tabeli 2.3 przedstawiono porównanie zakresów ograniczenia emisji szkodliwych gazów w technologii produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych metodą „na ciepło” w stosunku do technologii wytwarzania tych mieszanki „na gorąco”. Ograniczenie emisji

szkodliwych gazów jest jednym z kluczowych aspektów związanych z wprowadzeniem technologii produkcji o obniżonych temperaturach. Pozwala to na ujęcie ilościowe korzyści środowiskowych związanych z tym podejściem oraz ilustruje znaczący wpływ obniżenia temperatury na redukcję emisji gazów.

Tab. 2.3 Zakresy redukcji emisji w technologii „na ciepło” w porównaniu do technologii „na gorąco” [5].

Rodzaj gazu	Zakres redukcji w technologii WMA, %			
	Norwegia	Włochy	Holandia	France
CO ₂	31,5	30-40	15-30	23
SO ₂	NA	35	NA	18
VOC	NA	50	NA	NA
CO	28,5	10-30	NA	NA
Dust	54	25-55	NA	NA
NA – dane niedostępne				

Według pracy badawczej realizowanej na uniwersytecie w Stanach Zjednoczonych [122], wprowadzenie rozwiązań materiałowo-technologicznych WMA w technologii produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych skutkuje znaczącą redukcją zużycia energii. W zależności od zastosowanego rozwiązania zmniejszenie wykorzystania energii może zostać ograniczone:

- przy zastosowaniu technologii asfaltu spienionego: od 30% do 40%,
- przy wykorzystaniu wosku F-T: do 20%.

Wyniki te świadczą o znaczącym potencjale w zakresie redukcji zużycia energii w technologii WMA i przyczyniają się do poprawy jej zrównoważonego charakteru.

2.2 Procedury starzenia krótkoterminowego mieszanek WMA w laboratorium

Starzenie krótkoterminowe MMA wytwarzanych w laboratorium ma za zadanie symulować procesy oraz zmiany chemiczne i fizyczne zachodzące w lepiszczach asfaltowych i w mieszankach mineralno-asfaltowych podczas ich wytwarzania, transportu na miejsce wbudowania i układania w nawierzchni. Wśród procesów związanych ze starzeniem mma, do tych które mają największe znaczenie w kształtowaniu ich właściwości można zaliczyć m.in. [66]:

- starzenie lepiszcza asfaltowego zachodzące na zasadzie utlenienia przy udziale wysokich temperatur i silnego narażenia na oddziaływanie tlenu, związanego

z dużą powierzchnią właściwą lepiszcza otaczającego mieszankę mineralną,

- odparowywanie lżejszych frakcji asfaltu i adsorpcję oraz absorpcję części lepiszcza, w tym niektórych jego frakcji, przez kruszywa mineralne.

Intensywność z jaką zachodzą wymienione zjawiska jest silnie związana z temperaturą wytwarzania mieszanki mineralno-asfaltowej. Od temperatury zależy szybkość reakcji chemicznych, lepkość lepiszcza asfaltowego (w tym mobilność cząstek asfaltu) i zdolność do odparowywania lżejszych frakcji lepiszcza. W związku z tym, niedługo po wykonaniu pierwszych odcinków doświadczalnych wykonanych w technologii WMA stało się oczywiste, że w związku z obniżonymi temperaturami technologicznymi konieczne jest stosowanie odmiennych procedur starzenia krótkoterminowego mieszanek WMA niż dla technologii HMA. Zrealizowano w tym zakresie szereg badań, w tym m.in. [123], [124], [125].

W związku z powyższym, w kolejnych latach podjęto się analizy wpływu różnych procedur starzenia krótkoterminowego na właściwości zarówno lepiszczy asfaltowych jak i mieszanek mineralno-asfaltowych w celu odwzorowania procesów starzenia technologicznego zachodzących w rzeczywistych warunkach. W efekcie wieloletnich prac, m.in. [43], [126], [127], [128] stwierdzono, że satysfakcjonująco reprezentatywne wyniki, zarówno w zakresie oceny właściwości fizycznych (gęstość, zawartość wolnej przestrzeni) jak i mechanicznych oraz funkcjonalnych, uzyskuje się poprzez starzenie mieszanek WMA w temperaturze zagęszczania w czasie 2 godzin. Dla potrzeb wdrażania ww. procedur w przemyśle, sformułowano zalecenia dotyczące temperatury starzenia mieszanek HMA w 135°C a mieszanek WMA w 116°C [129].

2.3 Charakterystyka technologii zbrojenia rozproszonego

Mieszanki mineralno-asfaltowe wykazują charakter kompozytowy, jako że złożone są z mieszanki mineralnej, lepiszcza asfaltowego oraz dodatków lub modyfikatorów, a każdy z tych składników charakteryzuje się istotnie różnymi od siebie właściwościami mechanicznymi. Każdy z wymienionych składników oddzielnie, jak i ich wzajemne oddziaływanie, wpływają na trwałość mma. Odpowiednia kombinacja składników może skutkować materiałem o zoptymalizowanych właściwościach mechanicznych i reologicznych, co jest kluczowe dla efektywnej eksploatacji w warunkach rzeczywistych [130], [131]. Z definicji materiałem kompozytowym nazywany jest materiał składający się z co najmniej dwóch komponentów o odmiennych właściwościach, które zostały dobrane w taki sposób, że

kompozyt ten wykazuje korzystniejsze właściwości niż jego indywidualne komponenty użyte osobno. Jest to wynikiem synergii między komponentami i nie można go sprowadzić jedynie jako sumy poszczególnych właściwości [132]. Dodatkowo, aby dokładniej określić materiał kompozytowy, jego komponenty powinny być rozpoznawalne na poziomie makroskopowym [133]. Definicja określona przez Broutmana i Krocka [134] opisuje materiał kompozytowy jako wytwór działalności człowieka zbudowany z odmiennych pod względem chemicznym materiałów, które w jednoznaczny sposób można zidentyfikować w kompozycie i poszczególne komponenty są rozłożone w całej objętości w sposób równomierny.

W przypadku klasycznie rozumianych materiałów kompozytowych, składających się z co najmniej dwóch głównych komponentów, możemy wyróżnić matrycę (osnowę) i zbrojenie (wzmocnienie) [135]. Matryca stanowi fazę ciągłą, w której umieszczone są elementy zbrojenia. Matryca najczęściej wykazuje izotropię, co jest szczególnie zauważalne w przypadku kompozytów metalowych, polimerowych i ceramicznych [136], [137]. Matryca pełni rolę przekazywania obciążeń na zbrojenie, kształtowania kompozytu oraz ochrony materiału wzmacniającego przed działaniem czynników zewnętrznych. Drugim kluczowym elementem definiującym właściwości kompozytu jest zbrojenie, stanowiące fazę rozproszoną. Tradycyjnie, w kompozytach stosowanych w takich dziedzinach jak aeronautyka czy przemysł motoryzacyjny, zbrojenie jest elementem nośnym, odpowiedzialnym za kształtowanie ogólnych właściwości materiału kompozytowego [136]. W przypadku innych materiałów kompozytowych, takich jak betony cementowe zbrojone włóknami, zbrojenie rozproszone pełni zazwyczaj rolę drugoplanową, ulepszając podstawowy materiał i rozszerzając jego zastosowanie [138].

2.3.1 Rodzaje i właściwości włókien stosowanych w roli zbrojenia rozproszonego w materiałach budowlanych

Dodatki włókniste znajdują swoje zastosowanie w budownictwie od starożytności, głównie w celu poprawy właściwości materiałów budowlanych. Dawniej słoma była dodawana do gliny w celu stworzenia konstrukcji domów oraz innych budowli z tego materiału. W okresie nowożytnym, istotną rolę w budownictwie odegrało wykorzystanie włókien azbestowych w mieszkankach cementowych. Z włókien azbestowych produkowano różnego rodzaju elementy, takie jak pokrycia dachowe czy rury. Zastosowanie włókien azbestowych znacząco zwiększało wytrzymałość na zginanie stwardniałej masy cementowej oraz eliminowało pęknięcia skurczowe, co przyczyniało się do zwiększenia szczelności wyrobów wykonanych z tego rodzaju materiału.

Obecnie, zbrojenie rozproszone w postaci włókien jest powszechnie stosowane na skalę przemysłową w betonach cementowych. Do tego celu wykorzystuje się przede wszystkim włókna stalowe, polipropylenowe oraz szklane [139].

Parametry charakteryzujące zbrojenie rozproszone w postaci włókien w materiale obejmują [140]:

- materiał z którego wykonano włókna,
- wymiary włókien, czyli długość i średnica,
- kształt włókien,
- rozkład przestrzenny włókien w próbce,
- zawartość włókien.

W konstrukcjach z betonu cementowego zastosowanie zbrojenia rozproszonego z definicji zakłada, że powinno ono pełnić funkcję wzmocnienia i wpływać na wzrost sztywności. Jednak praktyka wykazała, że zależy to przede wszystkim od typu zastosowanego zbrojenia i ma wpływ na parametry, takie jak wytrzymałość na zginanie, rozciąganie, ściskanie oraz redukcja powstawania rys w betonie [140].

Spośród najczęściej wykorzystywanych rodzajów zbrojenia rozproszonego w postaci włókien w budownictwie ze względu na materiał, z jakiego zostały wykonane możemy wymienić [136], [141], [142]:

- włókna szklane – odporne na korozję i zazwyczaj wykorzystywane w konstrukcjach betonowych,
- włókna mineralne (bazaltowe) – odporne na działanie agresywnych substancji chemicznych,
- włókna stalowe – charakteryzują się dużą odpornością i nośnością,
- włókna celulozowe – wykorzystywane w konstrukcjach wymagających redukcji masy materiałów,
- włókna poliolefinowe (np. polipropylenowe) – niska masa i wysoka odporność na korozję,
- włókna poliestrowe – wykazują dobre właściwości mechaniczne,
- włókna węglowe – wysoka wytrzymałość i sztywność.

W technologii betonu cementowego wykorzystanie włókien ma na celu ograniczenie powstawania rys oraz poprawę właściwości mechanicznych. Dodatki włókniste, takie jak włókna stalowe czy polipropylenowe mają zdolność do kontrolowania i zmniejszania

powstawania mikropęknięć i zarysowań w strukturze matrycy betonowej. Jest to szczególnie istotne w przypadku betonów, które podlegają obciążeniom dynamicznym lub muszą być odporne na działanie czynników zewnętrznych [138].

Charakterystykę właściwości włókien, które są powszechnie wykorzystywane w budownictwie w roli zbrojenia rozproszonego, przedstawiono w tabeli 2.4.

Tab. 2.4 Charakterystyka włókien stosowanych w budownictwie [138], [143].

Rodzaj włókna	Średnica [mm]	Gęstość [Mg/m ³]	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	Moduł sprężystości [GPa]	Wydłużenie przy zerwaniu [%]
Stalowe	0,1-1,0	7,8	500-2000	200	0,5-3,5
Polipropylenowe	0,02-0,2	0,9	300-700	5	15-25
Szklane	0,012-0,02	2,7	1000-3000	80	1,5-4,5
Aramidowe	0,008-0,012	1,4	3000	70-130	2-3,5
Bazaltowe	0,01-0,02	2,6	2800	90	3,2

Efektywność włókien jest ściśle związana z ich wytrzymałością właściwą, czyli stosunkiem wytrzymałości na rozciąganie do ciężaru właściwego danego materiału włókna, oraz modułem właściwym, który jest modułem sprężystości podzielonym przez ciężar właściwy materiału włókna. Wartości tych wskaźników mają istotny wpływ na efektywność włókna w kompozytach. W miarę zwiększania się tych parametrów, włókno staje się bardziej efektywne w procesie wzmacniania kompozytu [132], [144].

2.3.2 Zastosowanie włókien jako zbrojenia rozproszonego w budownictwie drogowym

Zastosowanie włókien w mieszankach mineralno-asfaltowych miało swój początek na początku XX wieku. Początkowe próby wykorzystania włókien w mma koncentrowały się głównie na włóknach azbestowych, jednakże okazały się one niebezpieczne zarówno dla środowiska, jak i zdrowia pracowników zaangażowanych w produkcję i układanie mma [145], [146]. W późniejszych latach zaczęto stosować różne rodzaje włókien, w tym te pochodzenia naturalnego i nieorganiczne, a także włókna sztuczne [147], [148]. Obecnie najpopularniejszymi rodzajami włókien wykorzystywanymi w mma są włókna celulozowe oraz syntetyczne. Ich głównym celem jest zapobieganie procesowi spływania lepiszcza z mieszanki podczas transportu, zwłaszcza w przypadku mieszanek o nieciągłym uziarnieniu, takich jak mieszanki mastyksowo-grysowe (SMA, *ang.* *Stone Mastic Asphalt*) [146].

Właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej z dodatkiem zbrojenia rozproszonego są ściśle związane z charakterystykami włókien, takimi jak kształt, stan powierzchni, zdolność do tworzenia połączeń chemicznych lub fizycznych poprzez adsorpcję oraz ich termostabilność. Wybór odpowiednich włókien ma kluczowe znaczenie dla właściwości końcowej mieszanki [146]. Zastosowanie zbrojenia rozproszonego w postaci włókien przyczynia się do poprawy wielu istotnych cech mieszanki mineralno-asfaltowej. Mieszanki te, w których wykorzystano włókna, charakteryzują się zwiększoną odpornością na deformacje trwałe oraz wydłużoną trwałością zmęczeniową [149], [150]. Takie właściwości sprawiają, że mieszanki te mogą znajdować zastosowanie w nawierzchniach dróg, które są obciążone ruchem od lekkiego do ciężkiego (od kategorii KR1 do KR7). Ponadto, mieszanki mineralno-asfaltowe z dodatkiem włókien są odpowiednie do zastosowania w obszarach szczególnie narażonych na ekstremalne obciążenia ruchem, takich jak nawierzchnie zatok autobusowych, parkingi, place manewrowe, drogi wewnętrzne, nawierzchnie w obrębie skrzyżowań oraz dodatkowe pasy na wzniesieniach. W celu dokładniejszego zrozumienia właściwości różnych rodzajów włókien stosowanych w mieszankach mineralno-asfaltowych zestawiono ich wady i zalety w tabeli 3.5.

W zależności od rodzaju zastosowanych włókien w mieszankach mineralno-asfaltowych zmieniają się ich parametry. W 1984 roku Button i Hunter w swojej pracy [151] przedstawili badania dotyczące stosowania różnych typów włókien w mieszankach ze zbrojeniem rozproszonym. W swojej pracy zwracali uwagę zarówno ku włóknom syntetycznym, jak i naturalnym. Badania obejmowały ocenę stabilności mieszanek według metody Marshalla, modułu sztywności, wytrzymałości na pośrednie rozciąganie, trwałości zmęczeniowej, pełzania oraz odporności na działanie wody. Wyniki badań wskazały na niewielką poprawę parametrów użytkowych mieszanki mineralno-asfaltowej po dodaniu włókien. W przypadku zastosowania włókien węglowych badania przeprowadzone w pracy [152] wykazały wzrost modułu sztywności w temperaturze 40°C o 51% w stosunku do mieszanek referencyjnych oraz zwiększoną odporność na działanie wody. Istotnym aspektem jest również odpowiednio dobrana długość włókien w mma oraz ich zawartość [153]. Badania przedstawione w pracy [154] wykazały, że zbyt wysoka zawartość włókien w mma prowadzi do zmniejszenia stabilności mma, a w konsekwencji do powstawania pęknięć w nawierzchni asfaltowej. Wady i zalety poszczególnych rodzajów włókien stosowanych w budownictwie przedstawiono w tabeli 2.5.

Tab. 2.5 Zalety i wady włókien stosowanych do mma [146], [150], [155].

Włókno		Zalety	Wady
Azbestowe		Duża chłonność asfaltu	Zagrożenie zdrowia
Celulozowe		Duża chłonność asfaltu	Podatność na wilgoć Brak efektu (lub słaby) zbrojenia
Mineralne (skalne, w tym bazaltowe)		Duża chłonność asfaltu Wzrost sztywności i poprawa trwałości zmęczeniowej do 70% Poprawa odporności na koleinowanie mieszanki	Pogorszona urabialność
Szkłane		Efekt zbrojenia Poprawa odporności na deformacje trwałe oraz działanie wody i mrozu	Kruchość Mała chłonność asfaltu
Syntetyczne:	Poliestrowe polipropylenowe akrylowe	Efekt zbrojenia Zwiększona trwałość Poprawa trwałości zmęczeniowej (wzrost do 25%) i odporności na koleinowanie ograniczenie spływności mastyksu w mieszankach o nieciągłym uziarnieniu zdolność do rozpraszania naprężeń w mieszance (wzrost trwałości zmęczeniowej) duża wytrzymałość na rozciąganie, zginanie i ścieranie mała chłonność wody wzrost stabilności wg Marshalla	Mała chłonność asfaltu
Stalowe		Efekt zbrojenia	Brak chłonności asfaltu Rdzewienie Trudności w zagęszczaniu Pogorszenie charakterystyki powierzchniowej nawierzchni

Poszukiwanie rozwiązań materiałowych służących zwiększeniu trwałości konstrukcji nawierzchni drogowych w obecnych czasach jest niezbędne z uwagi na rosnącą liczbę pojazdów poruszających się po drogach oraz zwiększone obciążenia jakie generują zwłaszcza samochody ciężarowe. Modyfikacja mieszanek mineralno-asfaltowych za pomocą zbrojenia rozproszonego może posłużyć polepszeniu właściwości nowo wybudowanych nawierzchni i modernizacji istniejących. Zastosowanie odpowiednich rozwiązań, np. z wykorzystaniem włókien, przystosowanych do panującego klimatu i natężenia ruchu pojazdów powinno przyczyniać się do poprawy wytrzymałości na rozciąganie, odporności na deformacje trwałe lub destrukcyjne działanie wody i mrozu oraz wzrostu trwałości zmęczeniowej nawierzchni [147], [156].

Niezwykle istotna jest również metoda wprowadzenia włókien do mieszanki mineralno-asfaltowej. Obecnie istnieją trzy podstawowe procedury mieszania: mokra, sucha i kombinacja tych dwóch metod. W metodzie mokrej włókna łączone są z lepiszczem, a następnie mieszane z mieszanką mineralną w mieszalniku. W metodzie suchej włókna są dodawane do kruszyw

przed zmieszaniem z lepiszczem. Ostatnim podejściem jest połączenie metod suchej i mokrej: połączenie kruszywa i lepiszcza, a następnie dodanie włókien. W wyniku tej metody uzyskuje się mieszanekę o mniejszej liczbie aglomeracji włókien i lepszej dyspersji [157].

Włókna syntetyczne

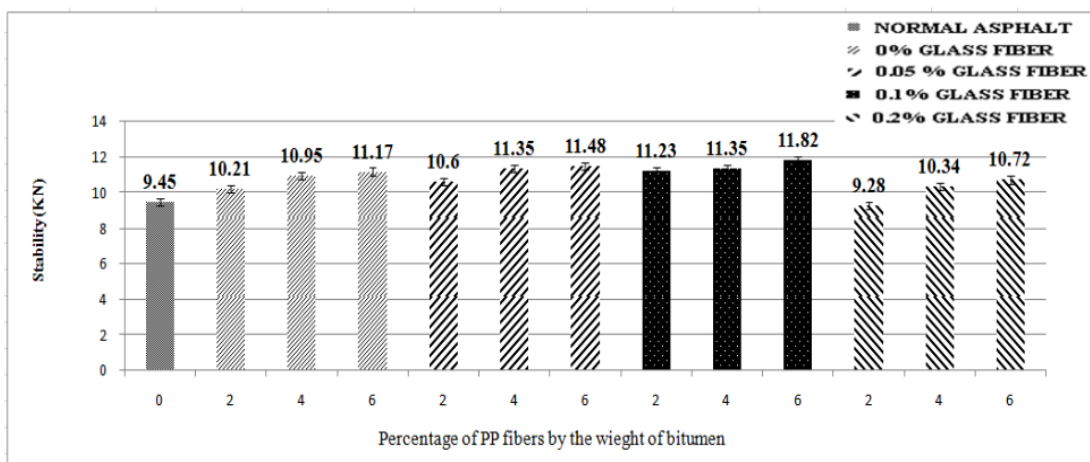
Włókna syntetyczne, takie jak włókna polipropylenowe lub polietylenowe, charakteryzują się niską temperaturą topnienia, co skutkuje ich częściowym stopieniem w kontakcie z gorącymi składnikami mieszanki mineralno-asfaltowej. W rezultacie nie pełnią one roli typowego zbrojenia rozproszonego, ponieważ stopiona część działa jak polimerowy modyfikator asfaltu [158]. W ofercie handlowej włókna te występują w postaci elementów ciętych z przędzy, włókien fibrylowanych z folii lub włókien strukturalnych przypominających włókna stalowe.

Włókna polipropylenowe przedstawione na rysunku 2.11, w zależności od grubości i zadozowanej ilości mogą pełnić funkcję zbrojenia strukturalnego podnosząc parametry mieszanki mineralno-asfaltowej.



Rys. 2.11 Włókna polipropylenowe o różnej długości (2 mm, 4 mm, 6 mm, 12 mm) [fot. K. Janus].

W pracy [159] zostały przedstawione wyniki badań mieszanek z dodatkiem włókien polipropylenowych o długości 12 mm w ilości 2%, 4% i 6% oraz szklanych w ilościach od 0 do 0,2% (rys. 2.12). W przypadku wszystkich rodzajów mieszanek zanotowano wzrost stabilności mma przy dozowaniu włókien polipropylenowych, w gdy stosowane były tylko one wynosił on do 18% w stosunku do mieszanek kontrolnych oraz zwiększyła się zawartość wolnych przestrzeni. Badacze wykazali, że zastosowanie tego typu włókien przynosi korzyści wynikające z poprawy parametrów mieszanki mineralno-asfaltowej a jednocześnie znacząco nie wzrastają koszty produkcji mma.



Rys. 2.12 Stabilność wg Marshalla dla różnych zawartości procentowych mieszanek z włóknami szklanymi oraz polipropylenowymi [159].

Tapkin i inni [160] w badaniu pełzania w temperaturze 50°C zauważyli znaczną poprawę tego parametru w stosunku do mieszanek niemodyfikowanych zbrojeniem rozproszonym. Próbkę z włóknami polipropylenowymi o długości 3 mm i ilości 3% w stosunku do masy lepiszcza asfaltowego poddane znacznie większej liczbie cykli nie wykazały zmian w strukturze próbki, natomiast mieszanki kontrolne uległy całkowitemu zniszczeniu. W kolejnej pracy Tapkin [161] zaobserwował zwiększenie trwałości zmęczeniowej próbek mma z dodatkiem 1% włókien polipropylenowych o długości 10 mm o 27% oraz wskazał, że zastosowanie tego rodzaju zbrojenia może być używane do specjalnych nawierzchni o bardzo wysokich parametrach użytkowych.

Włókna azbestowe

Włókna azbestowe (rys. 2.13) stosowane były na świecie zazwyczaj jako stabilizator w mieszkach typu SMA, natomiast zostały wycofane ze względu na szkodliwe ich działanie na zdrowie pracowników mających kontakt z tego rodzaju materiałem i zastąpiono je włóknami mineralnymi bądź też celulozowymi [162].



Rys. 2.13 Włókna azbestowe [163].

Przeprowadzone badania w latach 70 ubiegłego wieku w stanie Iowa [164] wskazują na problem z zagęszczaniem mieszanki z dodatkiem włókien azbestowych w ilości 1% - 1,5% oraz zwiększoną zawartość wolnych przestrzeni w próbkach. Badacze zauważyli również, że włókna nie wpływają na poprawę stabilności mma.

Włókna celulozowe

W sektorze budownictwa drogowego, jednymi z najbardziej powszechnie wykorzystywanych włókien są włókna celulozowe. Przeważnie znajdują one zastosowanie jako środek stabilizujący lepiszcz asfaltowy w mieszankach mastyksowo-grysowych SMA, betonie asfaltowym do bardzo cienkich warstw (BBTM, *fr. Béton Bitumineuse Très Mince*) czy także w asfalcie porowatym (PA, *ang. Porous Asphalt*). Włókna celulozowe odznaczają się właściwościami, takimi jak dobra dyspersja oraz zdolność do pochłaniania nadmiaru lepiscza asfaltowego w procesie produkcji mieszanki mineralno-asfaltowej, a także zdolnością do jego utrzymania podczas transportu na miejsce wbudowania w warstwę konstrukcyjną nawierzchni. Dzięki tym cechom, włókna celulozowe przyczyniają się do poprawy jakości i trwałości nawierzchni drogowych [165].

Włókna celulozowe mogą być wytwarzane w formie luźnych włókien (rys. 2.14) lub włókien granulowanych (rys. 2.15).



Rys. 2.14 Włókna celulozowe w postaci luźnej [fot. K. Janus].



Rys. 2.15 Włókna celulozowe w postaci granulatu [fot. K. Janus].

Włókna celulozowe często wykorzystywane są w formie granulowanej, co osiąga się poprzez pokrycie luźnych włókien warstwą oleju, wosku lub asfaltu (rys. 3.16). Włókna w takiej postaci posiadają większą odporność na wilgoć oraz są łatwiejsze w procesie dozowania podczas produkcji mma [166].

Stosowanie włókien celulozowych do mieszanek mineralno-asfaltowych o ciągłym uziarnieniu nie przynosi efektów zbrojenia mieszanki ze względu na ich ograniczoną długość.

Zdolność włókien celulozowych do absorbowania asfaltu pozwala jednak na zwiększenie zawartości lepiszcza w mieszance bez utraty jej stabilności. To z kolei prowadzi do uzyskania większej szczelności mieszanki, co jest szczególnie korzystne w przypadku warstwy ścieralnej [167]. Włókna celulozowe pokryte parafiną przedstawiono na rysunku 2.16.



Rys. 2.16 Włókna celulozowe pokryte parafiną [fot. K. Janus].

W przypadku zastosowania włókien celulozowych w mma istnieje potrzeba zwiększenia zawartości asfaltu. Badania mieszanek, w których zastosowano włókna wskazują na wyraźny wzrost stabilności Marshalla w stosunku do mieszanek referencyjnych [167].

Włókna stalowe

Włókna stalowe (rys. 2.17) mogą być wytwarzane z drutu, blachy lub z bloku stalowego metodą skrawania i frezowania, o różnej długości i kształcie [168], [169], [170]. Znajdują one zastosowanie głównie w betonach cementowych stosowanych w budownictwie kubaturowym, przy produkcji posadzek oraz nawierzchni betonowych. Charakteryzują się wysoką odpornością na rozciąganie, co przekłada się na podniesienie większości parametrów wytrzymałościowych. Włókna te są specjalnie formowane, aby zwiększyć ich przyczepność do betonu i maksymalizować zdolność do przenoszenia obciążeń. Z tego powodu często wyposażone są w haczyki lub fałowania. Włókna stalowe są najczęściej stosowane jako zbrojenie rozproszone, poprawiające użytkowe właściwości betonów, takie jak wytrzymałość na rozciąganie, udarność, oraz odporność na ścieranie. Dodatkowo, zmniejszają one pęknięcia skurczowe w betonie cementowym [171], [172].

W przypadku mieszanek mineralno-asfaltowych, stosowanie włókien stalowych jest ograniczone. Włókna te nie wchłaniają asfaltu i negatywnie wpływają na proces mieszania i zagęszczania mieszanki. W obecności wody mogą ulegać korozji, a na powierzchniach wykonanych z ich udziałem mogą powstawać rdzawe plamy, co prowadzi do obniżenia estetyki i trwałości eksploatacyjnej nawierzchni. Stosowanie włókien stalowych sprawia, że powierzchnia warstwy konstrukcyjnej staje się bardzo nierówna i niejednorodna. Ze względu

na te wady, mimo bardzo korzystnych właściwości zbrojeniowych samych włókien stalowych, nie są one powszechnie wykorzystywane w technologiach nawierzchni asfaltowych [146].



Rys. 2.17 Włókna stalowe stosowane do nawierzchniowego betonu cementowego [fot. K. Janus].

Zdecydowanie częściej w nawierzchniach asfaltowych wykonywane są wzmocnienia w postaci siatek stalowych a nie pojedynczych włókien. Badania wykazały pozytywny wpływ na właściwości nawierzchni, szczególnie tych remontowanych i znaczne podniesienie parametrów użytkowych przy zastosowaniu tego typu zbrojenia [173] jednak w oczywisty sposób stanowią wyzwanie w przypadku frezowania tego typu nawierzchni.

Włókna szklane

Włókna szklane (rys. 2.18 i rys. 2.19) są produkowane poprzez przeciąganie stopionej masy szklanej przez otwory o odpowiedniej średnicy. Technologia produkcji na skalę przemysłową rozwinięta została w XIX wieku [174]. Włókna szklane przeznaczone do zastosowania jako zbrojenie rozproszone zazwyczaj posiadają średnicę mniejszą niż 20 μm , co wynika z dużej kruchości szkła i niskiej wytrzymałości na zginanie. Zbrojenie w postaci włókien szklanych jest przeważnie wytwarzane z szkła bezalkalicznego, które jest bogate w tlenek cyrkonu ($>16\% \text{ZnO}$) w celu zwiększenia odporności na środowisko alkaliczne [174]. Włókna szklane do zastosowania w mieszankach betonowych często są łączone w pasma, co ułatwia ich równomierne wymieszanie ze składnikami mieszanki betonowej. Włókna szklane znajdują zastosowanie w różnych branżach, w tym w przemyśle budowlanym, lotniczym i motoryzacyjnym [146]. Często występują w postaci ciętych włókien, mat szklanych związanych lepiszczem, tkanin, taśm o różnej szerokości lub mielonych włókien [175].



Rys. 2.18 Włókna szklane [fot. K. Janus].



Rys. 2.19 Włókna szklane cyrkonowe [fot. K. Janus].

Efekt wzmocnienia mieszanek mineralno-asfaltowych wykazano w pracy [176], gdzie zostały zastosowane włókna o długości 6 i 12 mm w ilości 5,3% w stosunku do masy mma. Dodatek zbrojenia spowodował wzrost wytrzymałości w pośrednim rozciąganiu (ITS) oraz większą odporność na powstawanie deformacji trwałych. Długość włókien nie miała wpływu na uzyskane wyniki, ponieważ większą trwałość zmęczeniową oraz zdolność do samonaprawy po badaniu pełzania osiągnęły zarówno mieszanki z 6 i 12 mm włóknami.

Alidadi i Khabiri [177] w badaniach wykorzystali włókna szklane o długości 10 mm oraz węglowe o długości 6 mm w ilości 0,1%, 0,2%, 0,3% oraz 0,4%. Badacze zauważyli, że zastosowanie włókien szklanych w mma znacznie bardziej wpływa na poprawę odporności na koleinowanie niż użycie włókien węglowych. Stwierdzono trzykrotne zmniejszenie głębokości koleiny w mieszankach zbrojonych włóknami szklanymi w stosunku do mieszanek kontrolnych.

Włókna bazaltowe

Proces produkcji włókien bazaltowych jest analogiczny do technologii wytwarzania włókien szklanych. Polega on na stopieniu surowca bazaltowego przy temperaturze wynoszącej około 1500°C, a następnie przeciąganiu go przez otwory o odpowiednio małej średnicy, co powoduje formowanie przędzy, która jest cięta na odcinki o określonej długości. Proces produkcyjny nie wymaga tak dużego zużycia energii jak w przypadku włókien szklanych, co jest niezwykle korzystne pod względem wpływu na środowisko naturalne [178], [179]. Początkowo technologia produkcji włókien bazaltowych została opracowana w Związku Radzieckim, a potem rozwijana na terenie Ukrainy [143]. Włókna bazaltowe (rys. 2.20) charakteryzują się dobrą odpornością na działanie kwasów i zasad, warunki atmosferyczne, niską przewodnością cieplną oraz wykazują właściwości hydrofobowe [178].



Rys. 2.20 Włókna bazaltowe o długości 12 mm i 24 mm [fot. K. Janus].

Dodatek włókien bazaltowych o długości 4-5 mm do mieszanki mineralno-asfaltowej w ilości 0,5%, 1,0% oraz 2,0% przynosi korzyści w postaci zwiększonej odporności na zmiany temperatur, które mogą prowadzić do powstawania pęknięć, a także poprawia wytrzymałość na zginanie. Badania wykazały, że stosowanie włókien bazaltowych w konstrukcji dróg o wysokim natężeniu ruchu redukuje konieczność przeprowadzania prac remontowych 1,5-krotnie [180]. Oral i Cetin w swojej pracy [181] wykazali większą jednorodność rozproszenia włókien bazaltowych w próbkach w odniesieniu do mieszanek wykonanych z dodatkiem włókien polipropylenowych.

Włókna aramidowe

Włókna aramidowe przedstawione na rysunku 2.21 należą do grupy materiałów polimerowych uzyskiwanych z aromatycznego poliamidu [182]. Mieszanka z dodatkiem aramidu została opracowana w 1982 roku jako dodatek zwiększający trwałość zmęczeniową betonu asfaltowego [183]. Włókna aramidowe często mieszane są z włóknami poliolefinowymi lub pokrytymi woskiem, aby zapewnić odpowiednie rozprowadzenie w mieszance mineralno-asfaltowej [184].



Rys. 2.21 Włókna aramidowe o długości 12 mm [fot. K. Janus].

2.4 Ocena właściwości wysokotemperaturowych lepiszczy asfaltowych i mieszanek mineralno-asfaltowych

W kontekście powszechnie zauważalnych zmian klimatycznych, jednym z podstawowych efektów jest ciągły wzrost średniej rocznej temperatury powietrza. Ten trend skutkuje przedłużaniem okresów wysokich temperatur i skracaniem sezonu zimowego. Średnie wartości temperatur powietrza monitorowane przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej w okresie od 1951 roku do 2020 roku w okresach 30-letnich wzrosły o $1,5^{\circ}\text{C}$ [1]. Konsekwencją tego zjawiska jest podniesienie tzw. ekwiwalentnej temperatury nawierzchni. Obecnie w Katalogu Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych z 2014 roku przyjmuje się wartość temperatury ekwiwalentnej równą 13°C . Została określona na podstawie średnich temperatur z lat 1981-2010. Analiza temperatury ekwiwalentnej przeprowadzona w Politechnice Gdańskiej na podstawie średnich temperatur z okresu 1989-2019 wykazała zmienność tej wartości na terenie Polski, wartości różniły się o $2,31^{\circ}\text{C}$ w zależności od rejonu. Wyznaczona średnia ważona wartość temperatury ekwiwalentnej dla całego terytorium Polski wynosiła 16°C . Wyższa wartość wskazuje na konieczność zwiększenia grubości warstw asfaltowych [185]. W pracy [3] oceniono pogorszenie odporności nawierzchni na zjawisko powstawanie deformacji trwałych w ciągu najbliższych 20 lat na poziomie 9-40% z uwagi na zmieniające się warunki klimatyczne na świecie. Aktualnie w Polsce, zakres granicznych wartości temperatury nawierzchni sięga od -30 do 60°C dla warstwy ścieralnej [9]. W świetle powyższego niezbędne jest położenie większego nacisku na wykonywanie badań odporności lepiszczy asfaltowych i mieszanek mineralno-asfaltowych na działanie wysokich temperatur [186].

2.4.1 Charakterystyka metod oceny właściwości wysokotemperaturowych lepiszczy asfaltowych i mieszanek mineralno-asfaltowych

Badania dotyczące lepiszczy oraz mieszanek mineralno-asfaltowych przeprowadzone w latach 90. XX wieku w ramach programu Strategic Highway Research Program (SHRP) wykazały istotny wpływ właściwości asfaltów na zachowanie nawierzchni drogowej podczas eksploatacji [187]. Nieprawidłowy wybór lepiszcza asfaltowego odpowiedniego dla danej strefy klimatycznej stanowi jedną z głównych przyczyn występowania uszkodzeń w nawierzchni, w tym deformacji trwałych [186]. Szacuje się, że w przypadku zapewnienia odporności nawierzchni na powstawanie kolein, lepiszcze asfaltowe odpowiada za około 40% tej charakterystyki [66], [186]. Choć jego rola nie jest niepodzielna w tym aspekcie, to jednak

ma znaczący wpływ na zachowanie się nawierzchni drogowej. Poniżej podano charakterystyki wybranych metod oceny właściwości wysokotemperaturowych lepiszczy asfaltowych i mieszanek mineralno-asfaltowych stosowane w Polsce i na świecie.

Temperatura mięknięcia lepiszczy asfaltowych

Temperatura mięknięcia jest to parametr określający właściwości lepiszczy asfaltowych w wysokich temperaturach eksploatacyjnych oraz górną granicę stanu lepko-sprężystego. Badanie wykonywane zgodnie z normą PN-EN 1427 [N2] za pomocą metody „Pierścienia i Kuli”. Metoda opiera się na pomiarze temperatury pod wpływem której próbki lepiszcza umieszczonego w pierścieniach i obciążonego stalowymi kulkami pokonają dystans 25 mm [186].

Lepkość lepiszczy asfaltowych

Lepkość lepiszcza asfaltowego jest podstawowym parametrem technologicznym i użytkowym wykorzystywanym do opisu reologicznych właściwości lepiszczy asfaltowych. Rozumiana ona jest jako miara tarcia wewnętrznego przesuwu między cząsteczkami jednej warstwy lepiszcza względem drugiej i jest zależny od temperatury, szybkości ścinania i czasu trwania badania, szybkości ścinania oraz zastosowanego układu pomiarowego. Lepkość lepiszcza asfaltowego służy do wyznaczenia temperatury pompowania i otaczania asfaltu przez kruszywo oraz ustalenia temperatur zagęszczania mieszanki mineralno-asfaltowej [186]. Badanie wykonywane jest metodą próżniowej kapilary Cannon-Manning zgodnie z PN-EN 12596 [N14], metodą stożek-płytką z wykorzystaniem reometru zgodnie z PN-EN 13702 [N15] oraz przy pomocy lepkościomierza obrotowego zgodnie z PN-EN 13302 [N4]. Typowym zakresem temperaturowym oznaczenia lepkości dynamicznej jest przedział od 60°C do 180°C [131].

Zespolony moduł sztywności i kąt przesunięcia fazowego lepiszczy asfaltowych

Określenie parametrów wysokotemperaturowych wykonuje się w oparciu o normę AASHTO T 315 [N16], ASTM D 7175 [N17] oraz PN-EN 14770 [N18] przy użyciu reometru dynamicznego ścinania DSR. Pomiary wykonywane są przy określonej częstotliwości i temperaturze. Zespolony moduł sztywności definiuje odporność lepiszcza asfaltowego na odkształcenia, natomiast kąt przesunięcia fazowego opóźnienie powstającego odkształcenia w odniesieniu do przyłożonego naprężenia.

Badanie cyklicznego pełzania z odprężeniem (MSCR)

Badanie lepiszczy asfaltowych niestarzonych oraz starzonych metodą RTFOT i wykonywane jest w schemacie płytek równoległych o średnicy 25 mm i szczelinie 1 mm w temperaturze odpowiadającej wysokiej temperaturze eksploatacji nawierzchni w oparciu o normę PN-EN 16659 [N19] oraz AASHTO M332 [N20]. Procedura przeprowadzenia badania cyklicznego pełzania (MSCR, *ang. Multiple Stress Creep Recovery*) polega na pomiarze właściwości lepiszcza asfaltowego w warunkach maksymalnej przewidywanej temperatury pracy nawierzchni drogowej. Wyniki uzyskane z badania MSCR pozwalają określić wpływ danego asfaltu na odporność mieszanki mineralno-asfaltowej na powstawanie kolein oraz, w przypadku modyfikowanych asfaltów PMB, ocenić poziom ich modyfikacji polimerem. Procedura badania obejmuje zastosowanie dwóch wartości przykładanego naprężenia: 0,1 kPa oraz 3,2 kPa. Próbkę asfaltu poddana jest pełzaniu pod stałym naprężeniem przez 1 sekundę, po czym następuje jej odprężenie przez kolejne 9 sekund. W trakcie pojedynczego badania wykonuje się 10 cykli pełzania i odprężania przy niższym poziomie naprężenia, a następnie procedurę powtarza się dla wyższego poziomu naprężenia. Wynikiem badania jest nieodwracalna podatność na pełzanie określająca odporność lepiszcza asfaltowego na powstawanie deformacji trwałych oraz procentowy nawrót [186].

Cykliczne jednoosiowe ściskanie

Metoda jednoosiowego ściskania polega na obciążeniu próbki mma naprężeniem o stałej wartości w 3600 cyklach w założonej temperaturze zgodnie z Wytycznymi [N13]. Typową temperaturą badania jest 40°C. Wstępne obciążenie równe 10 ± 1 kPa utrzymywane jest przez okres 10 minut, następnie następuje faza cyklicznego obciążania przez nacisk wynoszący 100 ± 2 kPa z częstotliwością każdego impulsu 1 sekundy. Pionowe odkształcenie odnoszące się do zmiany wysokości próbek przy obciążaniu i odciążaniu trwającym 3600 sekund monitorowane są przy pomocy dwóch czujników.

Cykliczne trójosiowe ściskanie

Badanie wykonuje się w celu określenia odporności mieszanek mineralno-asfaltowych na trwałe odkształcenia wywołane powtarzalnym obciążeniem statycznym lub dynamicznym w przedziale temperaturowym od 30°C do 50°C zgodnie z PN-EN 12697-25 [N21]. Zmiana wysokości próbki umieszczonej pomiędzy dwiema stalowymi płytami jest mierzona po kolejnych występujących obciążeniach. W konsekwencji uzyskiwane są skumulowane osiowe

odkształcenia wyrażone w funkcji liczby obciążeń. W metodzie tej stosowane jest skrępowanie boczne o wartości naprężenia od 50 kPa do 200kPa zadawane za pomocą komory ciśnieniowej, pierścienia zaciskowego lub membrany próżniowej.

Moduł dynamiczny (dynamic modulus wg AASHTO T 342)

Badanie polega na osiowym powtarzalnym obciążaniu próbki walcowej umieszczonej pomiędzy dwiema stalowymi płytkami w określonej temperaturze i częstotliwości. Uzyskana wartość modułu zespolonego jest ilorazem zmiennego naprężenia w czasie i amplitudy odkształcenia mierzonej przy pomocy trzech czujników umieszczonych w rozstawie 120°. Zadane częstotliwości obciążania zależą od temperatury badania, natomiast wartość obciążenia sinusoidalnego dla każdej częstotliwości dobierana jest tak, aby średnia wartości odkształcenia wynosiła $100 \cdot 10^{-6}$ (100µε) [188]. Badanie nie jest powszechnie stosowane w Europie, natomiast amerykańska norma AASHTO T 342 [N11] określa zastosowanie tej procedury do próbek zawierających zakładaną zawartość wolnych przestrzeni.

Zespolony moduł sztywności

Badanie przeprowadzane może być na zagęszczonych próbkach mma w różnych schematach obciążenia, w teście kontrolowanego odkształcenia z pomiarem amplitudy naprężeń oraz kątem przesunięcia fazowego. Typowe temperatury badania mma mieszczą się w zakresie od -30°C do 40°C. Moduł sztywności może zostać wyznaczony poprzez badania zginania 2, 3 lub 4 punktowego, rozciągania pośredniego lub w bezpośrednim ściskaniu jednoosiowym. Próbki mma w zależności od wybranej metody poddane są obciążeniu sinusoidalnemu o częstotliwościach od 0,1 do 50 Hz [180].

Odporność na powstawanie deformacji trwałych

Odporność mma oceniana jest na podstawie powstałej koleiny w próbce prostopadłościenną wywołanej cyklicznym przejazdem obciążonego koła w danej temperaturze. Badanie wykonywane zgodnie z normą PN-EN 12697-22 [N7] w koleinomierzu bardzo dużym, dużym lub małym z wykorzystaniem powietrza lub wody. Standardowa temperatura badania w Polsce wynosi 60°C. Wynikiem pomiarów odporności na powstawanie deformacji trwałych jest wartość proporcjonalnej głębokości koleiny, przyrostu koleiny oraz nachylenia wykresu koleinowania.

Stabilność i odkształcenie wg Marshalla

Badanie wykonywane jest na próbkach zagęszczonych przez ubijanie w celu uzyskania wartości stabilności, odkształcenia i sztywności zgodnie z normą PN-EN 12697-34 [N22]. Próbki są kondycjonowane przed badaniem w łaźni wodnej w temperaturze 60°C przez okres od 40 do 60 minut. Obciążenie zadawane jest przy stałej prędkości przemieszczenia tłoka przekazującego obciążenie na próbkę wynoszące 50±2 mm/min z ciągłym pomiarem siły. Wartość stabilności jest równa maksymalnej sile zarejestrowanej w badaniu a odkształcenie przemieszczeniu próbki pod wpływem maksymalnej siły.

2.4.2 Ocena wpływu wybranych włókien na właściwości wysokotemperaturowe mieszanek mineralno-asfaltowych

Podobnie jak w przypadku innych dodatków, włókna stosowane w mieszankach mineralno-asfaltowych mogą mieć istotną rolę w poprawie ich właściwości, zarówno w trakcie procesu produkcji, jak i podczas eksploatacji nawierzchni, takich jak trwałość zmęczeniowa, odporność na pękanie czy wydłużenie okresu eksploatacji nawierzchni. Celem zastosowania tych dodatków jest optymalizacja parametrów technologicznych oraz mechanicznych w celu osiągnięcia najlepszych wyników trwałości nawierzchni drogowej. W kontekście zbrojenia rozproszonego, należy zauważyć, że tego rodzaju dodatek stanowi istotny element wpływający na mechaniczne właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej. Zbrojenie rozproszone, będące często włóknistym materiałem, może znacząco zwiększyć wytrzymałość mechaniczną oraz odporność na pękanie nawierzchni. Materiał zbrojeniowy, wprowadzony do mieszanki, tworzy sieć strukturalną, która pełni rolę wzmocnienia, zmniejszając tym samym podatność na powstawanie deformacji trwałych pod wpływem obciążeń dynamicznych. Dobór odpowiedniego rodzaju, długości, średnicy i parametrów włókien ma kluczowe znaczenie w aspekcie poprawy odpowiednich parametrów mieszanek [189]. Badania naukowe nad wpływem tego rodzaju dodatków są niezwykle istotne dla dalszego doskonalenia technologii budowy nawierzchni drogowych i zwiększenia ich efektywności w aspekcie praktycznym [146].

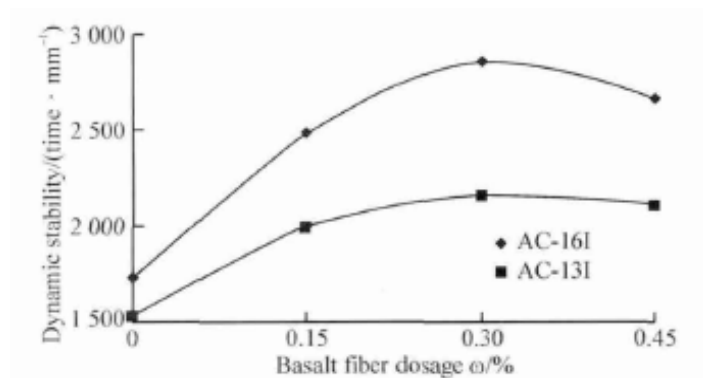
Dotychczas większość realizowanych prac badawczych skupiała się na zastosowaniu zbrojenia rozproszonego w mieszankach wykonanych w technologii HMA. Jako jedno z nielicznych badań z wykorzystaniem makro włókien syntetycznych w technologii obniżonej temperatury wytwarzania przedstawione w pracy [190], wykazały poprawę parametru koleinowania oraz odporności na pękanie w niskich temperaturach w stosunku do mieszanki

referencyjnej HMA. Podobne testy niskotemperaturowe zostały przeprowadzone przez badaczy [191] na próbkach z dodatkiem włókien bazaltowych, które wykazały poprawę odporności na pękanie przy optymalnej ilości zbrojenia w ilości 0,3%. Prace badawcze nad zastosowaniem włókien polipropylenowych w mieszankach z dodatkiem zeolitu jako środka spieniającego [192] wskazały na poprawę stabilności Marshalla i odporności na rozciąganie przy dozowaniu zbrojenia w ilości 0,02, 0,04 i 0,06.

Zastosowanie włókien bazaltowych

Badania przeprowadzone przez różnych badaczy [180], [193], [194] jednoznacznie potwierdzają, że dodatek włókien bazaltowych w ilości 0,2% - 2% do mieszanek mineralno-asfaltowych wpływa na zwiększenie ich sztywności w warunkach wysokich temperatur eksploatacyjnych, jednocześnie nie powodując usztywnienia tych mieszanek w niskich temperaturach.

Badanie stabilności dynamicznej (odporności na powstawanie deformacji trwałych) w temperaturze 60°C przeprowadzone przez Yuanxun i innych [195] dla betonu asfaltowego o różnym uziarnieniu (AC 16 oraz AC 13) wykazało istotny wpływ ilości dozowanego włókna bazaltowego o długości 12 mm. W pracy wykonano analizę porównawczą mieszanek kontrolnych oraz z włóknami bazaltowymi w ilości 0,15%, 0,3% oraz 0,45%. Na wykresie 2.22 przedstawiono wartość stabilności dla poszczególnych mieszanek mineralno-asfaltowych.

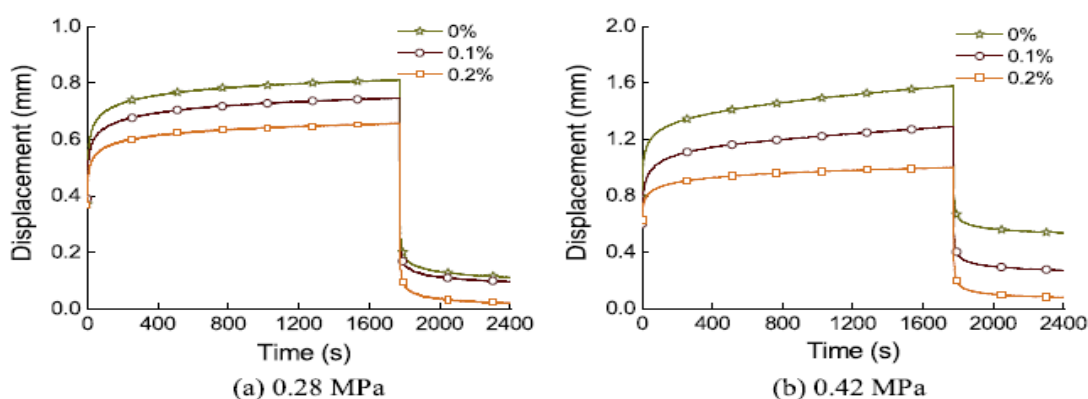


Rys. 2.22 Wpływ ilości dozowanych włókien bazaltowych na stabilność dynamiczną mieszanki betonu asfaltowego [195].

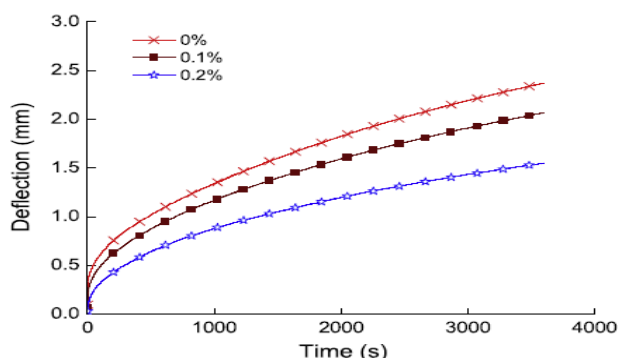
Stabilność dynamiczna mieszanek mineralno-asfaltowych modyfikowanych włóknami ulega znacznej poprawie, co jest widoczne w wynikach eksperymentalnych dla mieszanki AC 16 oraz AC 13. Dla AC 16, osiągnięto największą wartość stabilności dynamicznej, przy dozowaniu włókien w ilości 0,3%. W porównaniu z referencyjną mieszanką, stabilność dynamiczna mieszanki z włóknami bazaltowymi wzrosła o 65,9%. Podobnie, dla AC 13

uzyskano największą wartość stabilności dynamicznej, przy dozowaniu włókien w ilości 0,3%. W porównaniu z mieszanką bez dodatku zbrojenia, stabilność dynamiczna mieszanki z dodatkiem włókien bazaltowych wzrosła o 41,1% przy optymalnej zawartości zbrojenia w ilości 0,3%. W warunkach wysokiej temperatury krzyżujące się włókna zapobiegają poślizgowi kruszywa tworząc spójną mieszankę, w której naprężenia zostają rozłożone w sposób równomierny, zapobiegając powstawaniu deformacji w warstwie [195].

Zhang i inni w swoich badaniach [196] skupili się na określeniu wpływu zbrojenia włóknami bazaltowymi na pełzanie przy ściskaniu (CCT, *ang. Compressive Creep Test*) w temperaturze 60°C oraz pełzaniu przy zginaniu (BCT, *ang. Bending Creep Test*) w ujemnych temperaturach. W tym celu wykonano mieszankę kontrolną oraz mieszanki z dodatkiem 0,1% i 0,2% włókien bazaltowych z przeznaczeniem na warstwę ścieralną AC 13. Zaroby wykonano z dodatkiem asfaltu modyfikowanego oraz kruszyw wapiennych i bazaltowych. Na rysunkach 2.23 i 2.24 przedstawiono wyniki badań mieszanek w zależności odkształcenia i czasu (CCT) oraz w funkcji ugięcia i czasu (BCT).



Rys. 2.23 Zależność odkształcenia od czasu pod wpływem naprężeń ściskających na poziomie 0,28 MPa (a) oraz 0,42 MPa (b) w badaniu CCT [196].



Rys. 2.24 Zależność ugięcia od czasu w badaniu BCT dla mieszanki referencyjnej oraz z dodatkiem zbrojenia [196].

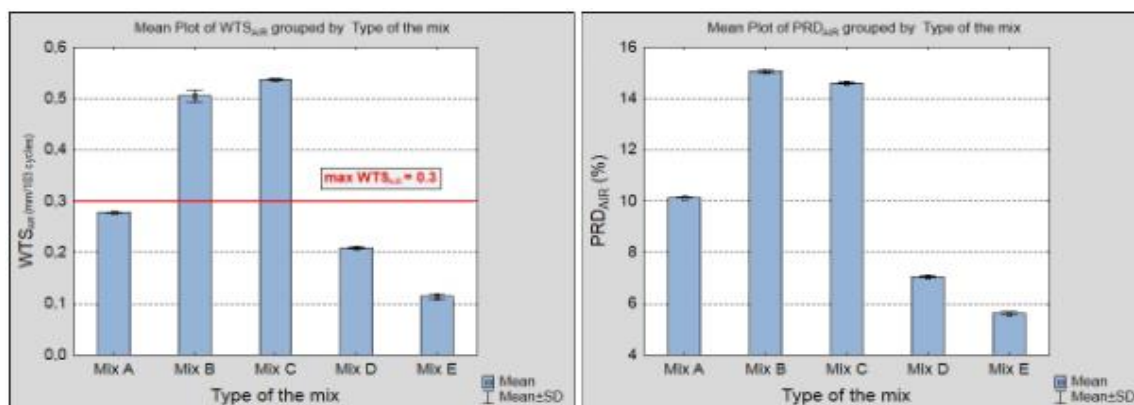
Porównanie mieszanek z dodatkiem włókien z mieszanką kontrolną wykazało zmniejszenie odkształceń mieszanki ze zbrojeniem w badaniu pełzania CCT pod obciążeniem statycznym. Świadczy to o podwyższonej stabilności mieszanek wysokich temperaturach. W testach pełzania przy zginaniu wykazano zmniejszenie ugięcia i szybkości pełzania próbek wraz ze wzrostem ilości stosowanych włókien. Po 3600 s badania parametry te zmniejszyły się odpowiednio o 13,1% i 34,6% [196].

W pracy [180] analizowano zmianę właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych poprzez dodatek włókien bazaltowych w ilości 0,5%, 1% i 2% zarówno w technologii „na gorąco”, jak i „na zimno”. Badania [172] wykazały, że dodatek włókien bazaltowych do mieszanek betonu asfaltowego wytwarzanych metodą na gorąco wpłynął na zwiększenie odporności tych mieszanek na pękanie, co skutkowało ograniczeniem powstawania pęknięć odbitych w nawierzchni. Mieszanki zawierające włókna wykazały mniejszą podatność na zmiany temperatury, a ich obecność wpłynęła na wzrost wytrzymałości na zginanie betonu asfaltowego (AC, *ang. Asphalt Concrete*). Autorzy wskazują, że w analizowanym przypadku dodatek włókien bazaltowych do mieszanki w ilości 1% umożliwia nawet 1,5-krotne zmniejszenie częstotliwości wykonywania prac utrzymaniowych na drogach o wysokim natężeniu ruchu. Uzyskane wyniki mają duże znaczenie dla utrzymania i wydłużenia trwałości nawierzchni dróg o dużym natężeniu ruchu.

Badania przeprowadzone przez zespół z Politechniki Warszawskiej [155] dotyczące mieszanki przeznaczonej na warstwę ścieralną, zawierającej zmienną zawartość (od 0,1% do 0,7%) włókien polimerowo-bazaltowych o długości 12 mm, wykazały istotne korzyści związane z ich zastosowaniem. Wyniki badań wykonanych w schemacie belki czteropunktowo zginanej (4PB-PR) wykazały znaczny wzrost modułów sztywności w mieszankach zawierających 0,5% włókien - sięgający 23% w porównaniu do mieszanek kontrolnych - przy każdym z analizowanych poziomów odkształcenia. Dodatkowo, zaobserwowano zwiększoną odporność na zmęczenie w przypadku betonu asfaltowego z dodatkiem włókien.

Zespół badawczy z Politechniki Świętokrzyskiej w swojej pracy [197] zastosował zbrojenie polimerowo-bazaltowe w mieszankach wykonanych w technologii HMA i WMA z asfaltem spienionym. Przygotowano mieszanki AC 22W z dodatkiem 6% lepiszcza 35/50 oraz kombinacją włókien o długości 24 mm oraz wosku F-T. Mieszanki oznaczono w następujący sposób: A - referencyjna (HMA), B - z dodatkiem włókien PB w ilości 0,5% (HMA), C - referencyjna (WMA), D - z dodatkiem 2,5% wosku F-T (WMA) oraz E - z dodatkiem 2,5% wosku F-T i 0,5% włókien PB. W aspekcie właściwości

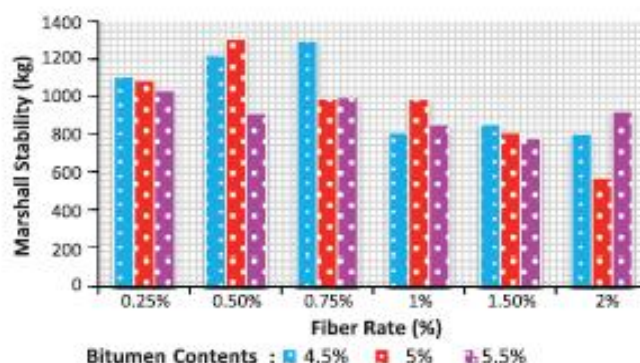
wysokotemperaturowych wykonano badanie odporności na powstawanie deformacji trwałych (rys. 2.25).



Rys. 2.25 Wpływ zbrojenia rozproszonego i technologii wytwarzania mma na odporność na powstawanie deformacji trwałych [197].

Dodatek włókien w mieszankach w technologii HMA spowodował wzrost parametru WTS (prędkość przyrostu koleiny) i PRD (proporcjonalna głębokość koleiny), co skutkuje pogorszeniem odporności na powstawanie deformacji trwałych. Mieszanki nie spełniają wymagań zawartych w Wymaganiach Technicznych WT-2 2014 [198] odnośnie maksymalnej wartości tego parametru. Zastosowanie technologii „na ciepło” z dodatkiem zbrojenia rozproszonego znacznie poprawiło odporność na koleinowanie.

W pracy [199] przedstawiono badania mieszanki mineralno-asfaltowej wykonanej z dodatkiem włókien bazaltowych od 0,25% do 2%. W porównaniu do mieszanki kontrolnej, beton asfaltowy ze zbrojeniem rozproszonym wykazał wzrost parametru zawartości wolnych przestrzeni w miarę zwiększania zawartości zastosowanych włókien. W badaniach wykonano analizę stabilności wg. Marshalla przedstawioną na rysunku 2.26.



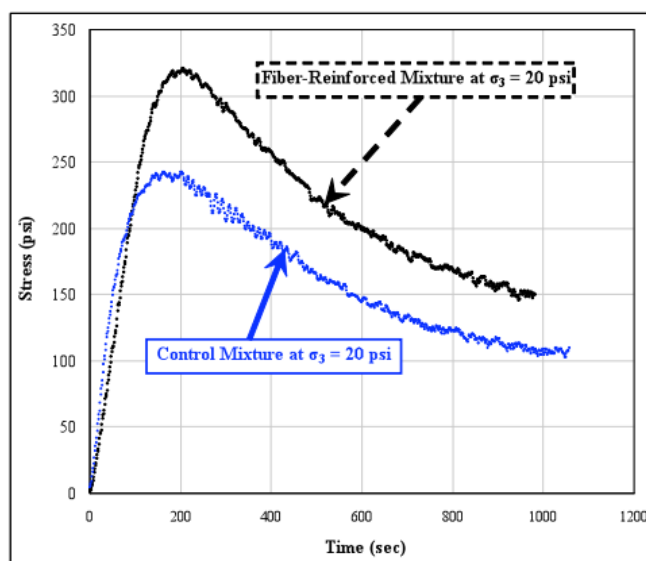
Rys. 2.26 Porównanie wartości stabilności Marshalla mma dla różnych zawartości włókien oraz ilości asfaltu [199].

Zaobserwowano wzrost stabilności w mieszankach zawierających od 0,25 do 0,75% włókien bazaltowych, zwiększanie zawartości zbrojenia powoduje spadek stabilności. Wynika

to ze zwiększenie ilości wolnych przestrzeni wraz ze wzrostem ilości stosowanego zbrojenia. Badacze zauważyli również znaczny spadek zagęszczalności tych mieszanek przy takiej samej liczbie uderzeń podczas zagęszczania próbek.

Zastosowanie włókien aramidowych

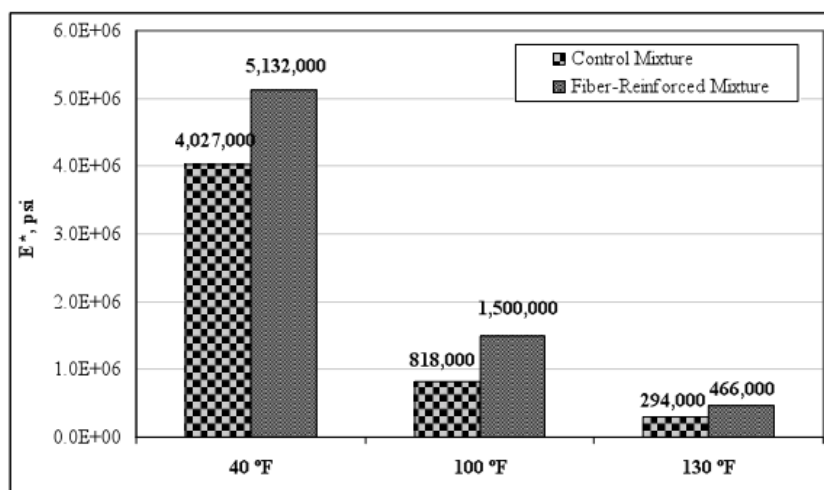
Wykorzystanie włókien aramidowych w mieszankach mineralno-asfaltowych przynosi wiele korzyści, takich jak znaczna poprawa właściwości tych mieszanek. Jednym z kluczowych efektów jest zwiększona odporność mma na deformacje trwałe, co wpływa na zwiększenie ich stabilności oraz wytrzymałości na pośrednie rozciąganie [148], [200]. Kaloush i inni w swojej pracy [200] przedstawili wyniki badań mma przeznaczonej na warstwę ścieralną na odcinku drogi w Arizonie z mieszanki referencyjnej oraz mieszanki z dodatkiem włókien polipropylenowo-aramidowych w ilości 0,45 kg na tonę mieszanki. Przygotowano próbki żyratorowe do badania trójosiowego ściskania i modułu dynamicznego. Na rysunku 2.27 przedstawiono wyniki badań trójosiowego ściskania w temperaturze 54,4°C przy ciśnieniu bocznym 138 kPa i 276 kPa. Próbkę obciążano osiowo do zniszczenia z prędkością zadawania pionowego odkształcenia równą 1,27 mm/min.



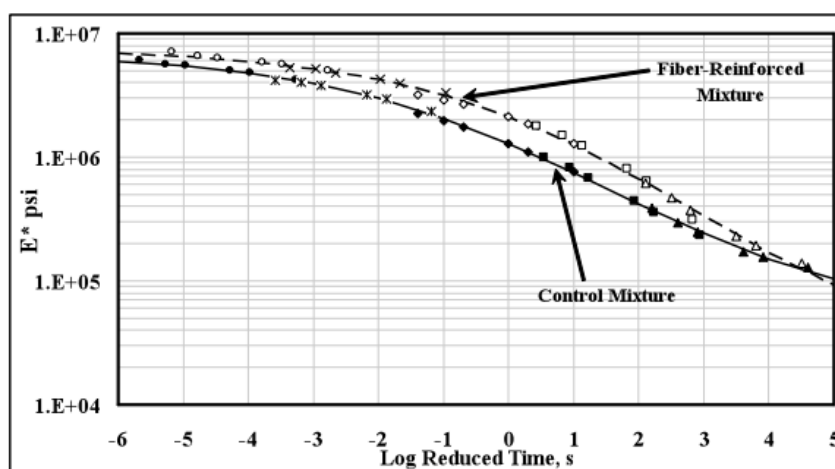
Rys. 2.27 Naprężenie w funkcji czasu dla mieszanki referencyjnej oraz zbrojonej włóknami przy ciśnieniu 138 kPa [200].

W przypadku mieszanki z dodatkiem włókien aramidowych zaobserwowano, że maksymalne naprężenie i czas jego wystąpienia są wyższe w porównaniu z mieszanką kontrolną. Włókna zapewniają dodatkowe wzmocnienie przy powstawaniu odkształceń trwałych i opóźniają wystąpienie uszkodzeń w warstwie przy ścinaniu.

Badacze wykonali również badania zespolonego modułu sztywności. Testy na próbkach cylindrycznych zagęszczanych w prasie żyratorowej realizowano w różnych temperaturach przy częstotliwościach 25, 10, 5, 1, 0,5 oraz 0,1 Hz. Na wykresie 2.28 przedstawiono wyniki badań mieszanek kontrolnych oraz ze zbrojeniem w postaci włókien aramidowych przy częstotliwości 10 Hz w funkcji temperatury, natomiast na rysunku 2.29 krzywe modułu dynamicznego w funkcji czasu działania obciążenia.

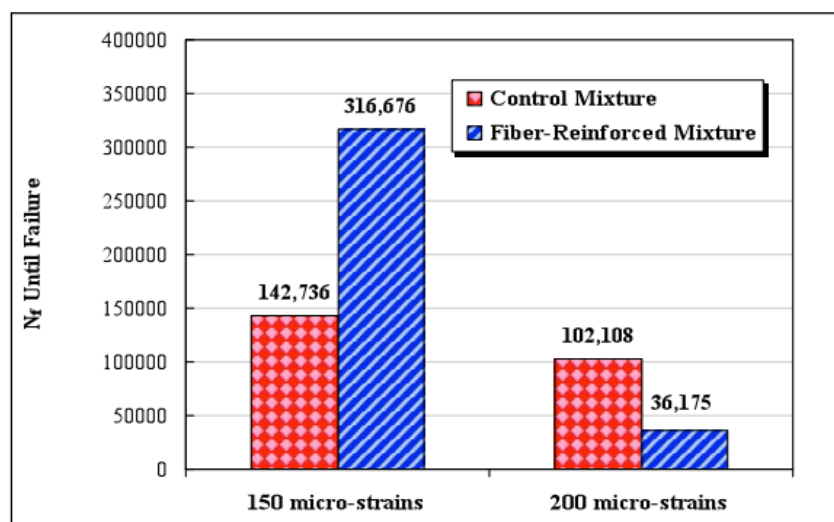


Rys. 2.28 Wartości zespolonego modułu dynamicznego przy częstotliwości 10 Hz w funkcji temperatury [200].



Rys. 2.29 Krzywe wzorcowe zespolonego modułu dynamicznego w funkcji czasu [200].

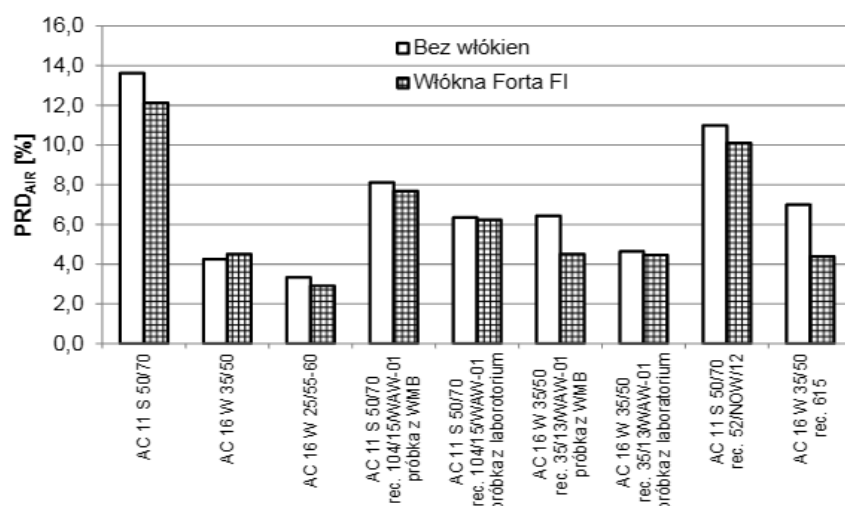
Mieszanki zbrojone włóknami aramidowymi uzyskały wyższe wartości modułów niż mieszanki kontrolne we wszystkich badanych temperaturach i częstotliwościach. Najmniejsze różnice występują w niższych temperaturach z uwagi na dominujący charakter lepiszcza, które staje się w tych warunkach sztywniejsze. Wyniki badań odporności na zmęczenie w temperaturze 21°C przy poziomie 150 oraz 200 $\mu\epsilon$ przedstawiono na poniższym wykresie 2.30.



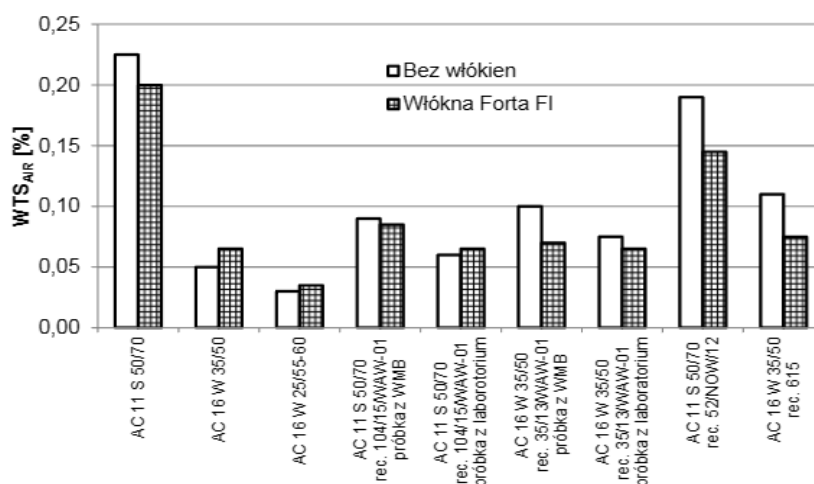
Rys. 2.30 Liczba cykli zmęczeniowych w funkcji poziomu odkształceń [200].

W badaniach przy odkształceniu na poziomie 150 $\mu\epsilon$ mieszanka wzmocniona włóknami wykazuje około 2 razy wyższą trwałość zmęczeniową w porównaniu z mieszanką kontrolną. Przy poziomie 200 $\mu\epsilon$ mieszanka kontrolna wykazuje około 3 razy wyższą trwałość zmęczeniową w porównaniu z mieszanką wzmocnioną włóknami. Zmiana przewidywanej trwałości zmęczeniowej sugeruje, że mieszanka wzmocniona włóknami będzie przeznaczona na drogi o wyższych obciążeniach ruchem, gdzie odkształcenia w nawierzchni są mniejsze (większa grubość konstrukcji nawierzchni). Badania przeprowadzone na Uniwersytecie w Arizonie wykazały wzrost wytrzymałości na pośrednie rozciąganie oraz trwałości zmęczeniowej w zakresie od 25% do 50% w przypadku mieszanek zawierających włókna polipropylenowo-aramidowe. Przeprowadzono również testy na odcinku drogi eksperymentalnej, na którym po roku eksploatacji zaobserwowano spękania jedynie w części wykonanej z mieszanki kontrolnej, co potwierdza pozytywny wpływ włókien aramidowych na wytrzymałość i trwałość nawierzchni [200].

Badania przeprowadzone przez Politechnikę Gdańską [201] zostały wykonane dla mieszanek przeznaczonych na warstwę ścieralną oraz wiążącą, z dodatkiem asfaltu drogowego i modyfikowanego, jako mieszanki referencyjne oraz zbrojone włóknami aramidowymi o długości 19 mm w ilości 0,5 kg na tonę mma. Na wykresie 2.31 i 2.32 przedstawiono odporność na powstawanie deformacji trwałych badanych mieszanek w aspekcie wartości parametrów WTS_{AIR} i PRD_{AIR} .



Rys. 2.31 Proporcjonalna głębokość koleiny badanych mieszanek mineralno-asfaltowych [201].

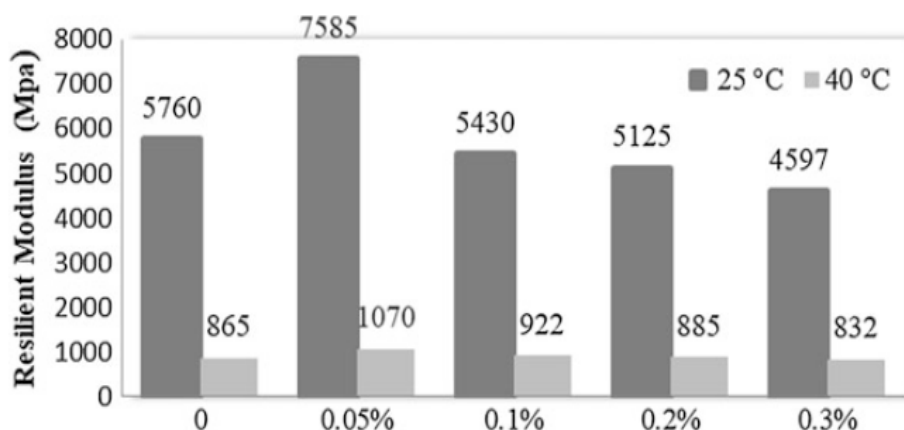


Rys. 2.32 Prędkość przyrostu koleiny badanych mieszanek mineralno-asfaltowych [201].

Poprawę odporności na powstawanie deformacji zauważono dla mieszanek mineralno-asfaltowych przeznaczonych na warstwę ścieralną z dodatkiem asfaltu 50/70 oraz mieszanki na warstwę wiążącą modyfikowaną asfaltem PmB 25-55/60. Uzyskane wyniki wskazują na poprawę odporności w zależności od przeznaczenia mieszanki, stosowanego rodzaju lepiszcza oraz sposobu przygotowania próbek.

Alnadish i Aman [202] wykonali mieszanki kontrolne bez dodatku zbrojenia oraz mieszanki ze zmienną ilością włókien aramidowych 0,05%, 0,1%, 0,2% oraz 0,3%. Próbkę przygotowano z wykorzystaniem zagęszczarki żyratorowej zgodnie z AASHTO T312 [N23] a następnie poddano je starzeniu technologicznemu. Badanie modułu sztywności przeprowadzono w dwóch temperaturach, przy czym badanie w temperaturze 25°C odnosiło się do odporności mieszanek na pękanie zmęczeniowe, natomiast badanie w temperaturze 40°C odnosiło się do odporności mieszanek na koleinowanie [203]. Każda z próbek została zbadana

w dwóch kierunkach, pierwszy pod kątem 0°, a następnie próbka obrócona o 90°. Test polegał na zastosowaniu powtarzalnego impulsu obciążenia ściskającego o wartości 1000 N. Na rysunku 2.33 przedstawiono wartość modułu sprężystości mieszanek w temperaturze 25°C i 40°C, który wskazuje na odporność mieszanki na pękanie (zmęczenie) i koleinowanie (trwałe odkształcenie).

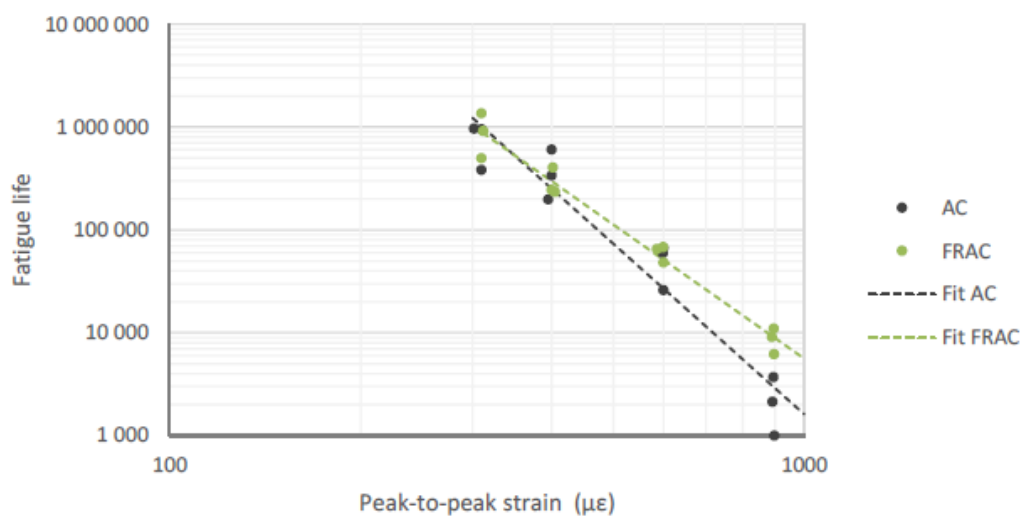


Rys. 2.33 Moduł sztywności mieszanek w funkcji temperatury i ilości dozowanych włókien [202].

Mieszanki mineralno-asfaltowe zawierające wysoką zawartość włókien aramidowych (0,1, 0,2 i 0,3%) wykazały obniżony moduł sprężystości w obu temperaturach badania (25°C i 40°C) w porównaniu z pozostałymi, co przypisuje się wysokiej zawartości włókna aramidowego, które pogorszyło zagęszczenie próbek. Z drugiej strony, mieszanki mineralno-asfaltowe zawierające 0,05% włókna aramidowego uzyskały najwyższy wynik pod względem modułu sprężystości w temperaturach 25°C i 40°C w porównaniu z pozostałymi mieszankami. Dodatek włókna w ilości 0,05% stanowi najkorzystniejszą z analizowanych zawartości, która wykazała odporność mieszanki mineralno-asfaltowej w badaniach pośrednich obciążeń rozciągających. Można zauważyć, że mieszanki zawierające 0,05% włókna aramidowego mają zwiększoną odporność o około 25% w temperaturze 25°C, natomiast w wysokiej temperaturze o około 20% w porównaniu z mieszankami kontrolnymi [202].

Prace badawcze nad wpływem włókien aramidowych na właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej prowadzone przez Mateos i Harvey [204] opierały się na przygotowaniu mieszanek o maksymalnym wymiarze kruszywa równym 19 mm, 15% dodatkiem destruktu asfaltowego oraz dodatku zbrojenia w postaci włókien aramidowych w ilości 0,013% względem masy mieszanki. Wykonano mieszanki referencyjne bez dodatku włókien dla oceny wpływu zbrojenia na właściwości zmęczeniowe w temperaturze 20°C oraz odporności na powstawanie deformacji trwałych w testach AMPT (*ang. Accelerated Mixture Performance Test*) w temperaturze 45°C i 55°C. Wszystkie próbki zostały zagęszczone do zawartości wolnej

przestrzeni równej $6 \pm 0,5\%$ zgodnie z AASHTO T331-13 [N24], [196]. Początkowo zastosowano trzy poziomy odkształceń w celu określenia odporności zmęczeniowej obu mieszanek: 300, 400 i 600 $\mu\epsilon$. Przy dwóch niższych poziomach odkształcenia włókna nie miały wpływu na trwałość zmęczeniową mieszanki mineralno-asfaltowej. Zgodnie z wynikami przedstawionymi na rysunku 2.34 przy poziomie odkształcenia 600 $\mu\epsilon$ dodanie włókien spowodowało 90-procentowy wzrost trwałości zmęczeniowej. Dodatkowo, wykonano badania przy poziomie odkształceń 900 $\mu\epsilon$ w celu sprawdzenia czy wpływ na trwałość zmęczeniową jest zależny od odkształcenia. Testy potwierdziły wrażliwość włókien na odkształcenia: przy 900 $\mu\epsilon$ dodanie włókien spowodowało 200-procentowy wzrost trwałości zmęczeniowej mieszanki mineralno-asfaltowej.



Rys. 2.34 Badanie trwałości zmęczeniowej przy zmiennych wartościach odkształcenia [204].

Badacze stwierdzili, że dodatek włókien aramidowych nie miał negatywnego wpływu na zagęszczalność mieszanki mineralno-asfaltowej. Dodatkowo zauważyli, że mieszanki mineralno-asfaltowe z dodatkiem włókien aramidowych znajdują zastosowanie w miejscach, gdzie występuje wysokim poziomom odkształceń, takich jak nakładki na nawierzchnie z betonu cementowego lub nakładki na nawierzchnie ze znacznymi spękaniem [204].

2.5 Podsumowanie przeglądu literatury

W pierwszej części, przegląd literatury krajowej i zagranicznej obejmował analizę kilku istotnych obszarów badawczych związanych z technologią wytwarzania mieszanek mineralno-asfaltowych oraz wykorzystaniem asfaltu spienionego wodą w celu obniżenia temperatury wytwarzania i wbudowywania betonu asfaltowego. Następnie skupiono się na określeniu wpływu poszczególnych rodzajów zbrojenia rozproszonego w postaci włókien na właściwości wysokotemperaturowe mieszanki mineralno-asfaltowej.

Zastosowanie asfaltu spienionego w mieszankach mineralno-asfaltowych wiąże się z wieloma korzyściami, zarówno środowiskowymi jak i ekonomicznymi, jednak przeprowadzone badania wskazują na możliwość wystąpienia problemów z zagęszczeniem i urabialnością otrzymanej mieszanki. Niezwykle istotnym aspektem w doborze odpowiednich włókien jest określenie parametrów mieszanki mineralno-asfaltowej, które wymagają poprawy oraz wybór optymalnej długości. Badania wskazują, że niedostosowanie ich wymiaru tj. długości, może skutkować zmniejszeniem urabialności i nierównym rozmieszczeniem zbrojenia rozproszonego w mma. Dobór odpowiedniego rodzaju i długości włókien pozwala na poprawę właściwości betonu asfaltowego bez pogorszenia urabialności i zagęszczalności mieszanki.

Dotychczas niewielu badaczy analizowało zagadnienia związane z wytwarzaniem mieszanek mineralno-asfaltowych metodą „na ciepło” z włóknami, a przedmiotem zrealizowanych prac nie była optymalizacja składu mieszanek tego typu ani szczegółowe badania nad wpływem rodzaju i ilości zbrojenia rozproszonego na projektowanie oraz właściwości mieszanek WMA z asfaltem spienionym. Większość z prac badaczy skupiała się głównie na właściwościach podstawowych i niskotemperaturowych mieszanek mineralno-asfaltowych.

3. TEZY, CEL I ZAKRES PRACY

3.1 Tezy pracy

Na podstawie dokonanego przeglądu literaturowego oraz doświadczeń własnych sformułowano dwie tezy dotyczące właściwości betonów asfaltowych stosowanych do warstw ścieralnych:

- 1 Zastosowanie zbrojenia rozproszonego ma korzystny wpływ na właściwości wysokotemperaturowe betonu asfaltowego przeznaczonego do warstwy ścieralnej nawierzchni drogowej wytwarzanego metodą „na ciepło” z asfaltem spienionym.
- 2 Efekty stosowania zbrojenia rozproszonego w tych mieszankach są zależne od rodzaju wykorzystanych włókien oraz rodzaju lepiszcza asfaltowego.
- 3 Zastosowanie zbrojenia rozproszonego może mieć korzystny wpływ na trwałość betonu asfaltowego wytwarzanego w obniżonych temperaturach.

3.2 Cel i zakres pracy

Celem pracy było określenie wpływu składu mieszanki mineralno-asfaltowej ze zbrojeniem rozproszonym wytwarzanej metodą „na ciepło” WMA (*ang. Warm Mix Asphalt*) z asfaltem spienionym na jej właściwości, w tym szczególnie na właściwości wysokotemperaturowe. Analizowany był wpływ dozowania dwóch rodzajów włókien w mieszankach z trzema rodzajami lepiszczy asfaltowych na właściwości betonu asfaltowego wykonanego w technologii WMA z asfaltem spienionym wodą. Wykonano analizę porównawczą w odniesieniu do mieszanek referencyjnych wytwarzanych tradycyjną metodą „na gorąco” (HMA, *ang. Hot Mix Asphalt*). Aby zrealizować powyższy cel, wykonano badania właściwości lepiszczy asfaltowych jak i mieszanek mineralno-asfaltowych. W pracy zastosowano trzy rodzaje asfaltów: drogowy, modyfikowany polimerami (PmB) oraz wysokomodyfikowany (HiMA), aby określić wpływ rodzaju użytego lepiszcza na właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej ze zbrojeniem rozproszonym. Jako zbrojenie rozproszone stosowano zmienną ilość włókien aramidowych oraz polimerowo-bazaltowych.

Zakres pracy obejmował przegląd literatury w zakresie technologii wytwarzania mieszanek mineralno-asfaltowych oraz rodzaju, właściwości i zawartości stosowanego zbrojenia rozproszonego w postaci włókien. Szczegółowo przedstawiono proces spieniania lepiszcza asfaltowego za pomocą wody oraz korzyści wynikające z obniżania temperatur technologicznych mieszanek mineralno-asfaltowych. Ponadto opisano metody badań

wysokotemperaturowych właściwości lepiszczy asfaltowych i mieszanek mineralno-asfaltowych stosowanych w kraju oraz wpływ zbrojenia rozproszonego na uzyskiwane zależności. Badania laboratoryjne rozpoczęły się od określenia optymalnej ilości wody spieniającej na podstawie wskaźnika ekspansji oraz okresu półtrwania piany asfaltowej. Następnie przeprowadzono badania podstawowych parametrów lepiszczy asfaltowych przed oraz po procesie spieniania:

- penetracja wg PN-EN 1426 [N1],
- temperatura mięknięcia wg PN-EN 1427 [N2],
- temperatura łamliwości wg Fraassa wg PN-EN 12593 [N3],
- lepkość dynamiczna wg PN-EN 13302 [N4],
- nawrót sprężysty wg PN-EN 13398 [N5].

W ramach prac wstępnych zaprojektowano mieszankę mineralno-asfaltową typu beton asfaltowy na warstwę ścieralną zgodnie z Wymaganiami Technicznymi WT-2 [198] na kategorię ruchu KR 5-7, która stanowiła bazę do realizacji prac badawczych. W ramach badań wykonano mieszanki mineralno-asfaltowe o jednakowym składzie mineralnym, różniące się rodzajem zastosowanego lepiszcza, w technologii HMA oraz WMA, ze zmienną ilością i rodzajem zbrojenia rozproszonego oraz badania podstawowych właściwości takich jak:

- zawartość wolnych przestrzeni wg PN-EN 12697-8 [N6],
- odporność na powstawanie deformacji trwałych wg PN-EN 12697-22 [N7],
- wrażliwość na działanie wody i mrozu wg PN-EN 12697-12 [N8].

Na tej podstawie wytypowano mieszanki spełniające podstawowe wymagania określone w WT-2, dla których wykonano zaawansowane badania w zakresie właściwości wysokotemperaturowych takie jak:

- zagęszczalności z wykorzystaniem prasy żyratorowej wg PN-EN 12697-10 [N19],
- modułu sztywności metodą rozciągania pośredniego IT-CY w funkcji temperatury wg PN-EN 12697-26 [N10],
- zespolonego modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego metodą ściskania cyklicznego wg AASHTO T342 [N11],
- odporności na zjawisko zmęczenia metodą rozciągania pośredniego wg PN-EN 12697-24 [N12],

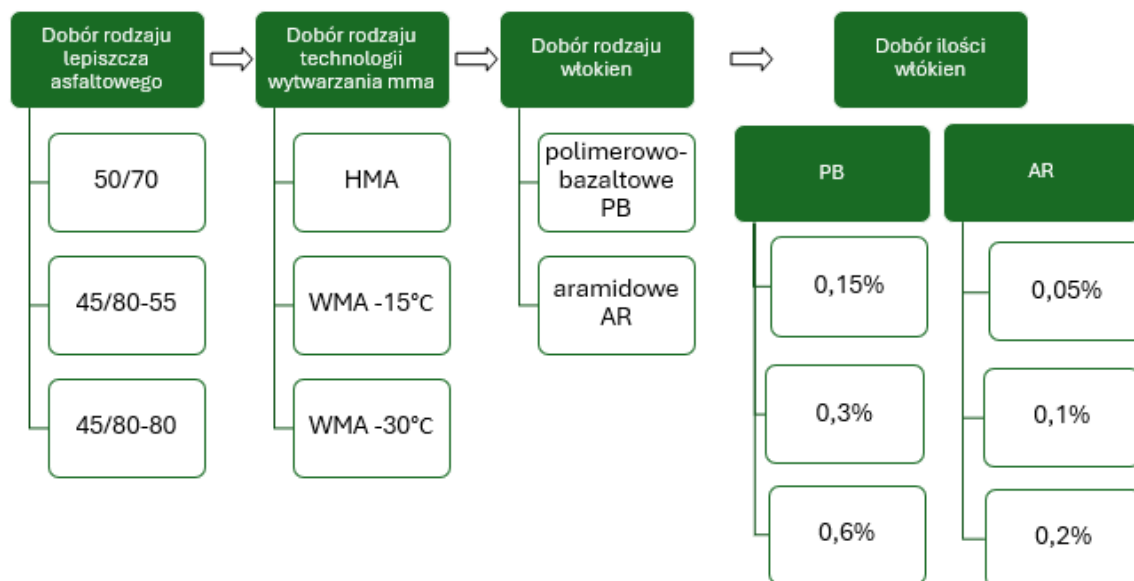
- modułu sztywności pełzania wg wytycznych oznaczenia odkształcenia i modułu sztywności mieszanek mineralno-bitumicznych metodą pełzania pod obciążeniem statycznym [N13].

Wykonano analizę statystyczną oraz optymalizację składu betonu asfaltowego w zakresie ilości i rodzaju zastosowanego zbrojenia rozproszonego oraz rodzaju lepiszcza asfaltowego.

4. CZĘŚĆ BADAWCZA

4.1 Plan badań

Ocenę wpływu rodzaju i zawartości włókien na parametry mieszanek mineralno-asfaltowych przeprowadzono dla mieszanek betonu asfaltowego przeznaczonych na warstwę ścieralną o maksymalnym wymiarze ziaren 11 mm (AC 11S), które zaprojektowano dla kategorii obciążenia ruchem KR 5-7 zgodnie z Wymaganiami Technicznymi WT-2 2014 [198]. Prace badawcze rozpoczęto od wyboru 3 rodzajów lepiszczy asfaltowych: drogowego 50/70, modyfikowanego polimerami 45/80-55 oraz wysokomodyfikowanego 45/80-80. Celem takiego doboru lepiszczy asfaltowych było dokonanie oceny, czy dodatek zbrojenia rozproszonego poprawia właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych bez względu na charakter stosowanego lepiszcza asfaltowego. Lepiszczce asfaltowe dozowano w tej samej ilości do każdej mieszanki, a jego ilość w mieszance została określona zgodnie z metodologią określoną w ww. Wymaganiach Technicznych WT-2 2014 [198]. Następnie, z wytypowanych na podstawie przeglądu literatury dwóch rodzajów włókien: polimerowo-bazaltowych (PB) oraz aramidowych (AR), przyjęto ich zawartości w składzie mieszanki mineralno-asfaltowej: PB 0,15%; 0,3%; 0,6% oraz AR 0,05%; 0,1%; 0,2%. Przewidziano również wykonanie mieszanek referencyjnych bez dodatku zbrojenia rozproszonego dla każdego rodzaju lepiszcza asfaltowego. Mieszanki mineralno-asfaltowe wytwarzano metodą „na gorąco” HMA oraz w technologii „na ciepło” WMA z asfaltem spienionym wodą. Zagęszczanie mieszanek w technologii WMA wykonano w temperaturze obniżonej o 15°C i 30°C względem mieszanki HMA. Dla wszystkich badanych czynników: rodzaj lepiszcza asfaltowego, rodzaj technologii produkcji mma, rodzaj i zawartość włókien wykorzystana została ta sama mieszanka mineralna, aby wyeliminować wpływ zmian uziarnienia i rodzaju użytego kruszywa. Na rysunku 4.1 przedstawiono schemat doboru materiałów i ich ilości oraz technologii mma na podstawie analizy przeglądu literatury w zakresie metod wytwarzania mieszanek mineralno-asfaltowych oraz wpływu rodzaju i zawartości włókien na właściwości mma. Badania podzielono na etapy, różniące się zakresem analizowanych czynników, rodzajem użytych materiałów i ocenianych parametrów, dążąc do optymalizacji uzyskiwanych rezultatów przy jednoczesnej ocenie wpływu kontrolowanych zmiennych.



Rys. 4.1 Schemat doboru technologii i materiałów do badań mieszanek mineralno-asfaltowych.

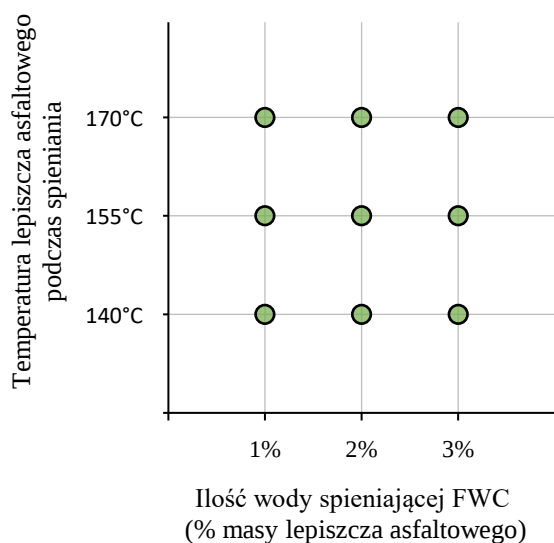
4.1.1 Plan badań dla etapu I

W pierwszym etapie pracy zrealizowano badania właściwości lepiszczy asfaltowych. Ocenie poddano charakterystyki spieniania lepiszczy asfaltowych w aspekcie ilości wody spieniającej oraz temperatury lepiszcza, co pozwoliło ustalić optymalne parametry procesu spieniania na potrzeby wytwarzania mieszanek mineralno-asfaltowych. Badaniom poddano właściwości lepiszczy asfaltowych przed spienieniem (NS- niespienione) i po spienieniu (SP-spienione) w zakresie ich podstawowych właściwości:

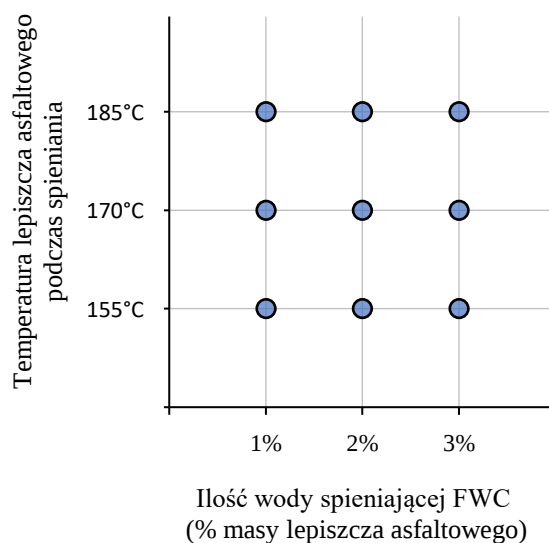
- penetracja wg PN-EN 1426 [N1],
- temperatura mięknięcia wg PN-EN 1427 [N2],
- temperatura łamliwości wg Fraassa wg PN-EN 12593 [N3],
- lepkość dynamiczna wg PN-EN 13302 [N4],
- nawrót sprężysty wg PN-EN 13398 [N5].

Na rysunkach 4.2 i 4.3 zostały przedstawione schematy eksperymentów przeprowadzonych w celu zbadania procesu spieniania analizowanych lepiszczy asfaltowych. Przeprowadzone badania miały na celu ocenę wpływu dwóch zmiennych niezależnych, a mianowicie temperatury i ilości wody spieniającej FWC, na wartości wskaźnika ekspansji oraz czasu półtrwania piany asfaltowej. W trakcie tych eksperymentów uwzględniono trzy różne poziomy dla każdej z tych niezależnych zmiennych, co razem dało dziewięć kombinacji.

Dla każdej kombinacji zmiennych niezależnych przeprowadzono trzy odrębne próby spieniania, podczas których równocześnie monitorowano wskaźniki ekspansji oraz czasy półtrwania piany asfaltowej.



Rys. 4.2 Plan eksperymentu dla spieniania asfaltu drogowego i polimeroasfaltu (50/70 i 45/80-55).



Rys. 4.3 Plan eksperymentu dla spieniania asfaltu wysokomodyfikowanego polimerami (45/80-80).

W ramach prowadzonych badań, na podstawie wcześniejszych doświadczeń przyjęto dolną i górną granicę temperatur lepiszczy przed procesem spieniania w zależności od ich rodzaju, w tym asfaltów drogowych, polimeroasfaltów oraz asfaltów wysokomodyfikowanych. Dla asfaltu drogowego 50/70 i polimeroasfaltu 45/80-55 zakres ten wynosił od 140°C do 170°C, podczas gdy dla asfaltu wysokomodyfikowanego polimerami 45/80-80, temperatury te były wyższe, oscylując w przedziale od 155°C do 185°C. Wybór konkretnych temperatur spieniania dla poszczególnych typów lepiszczy był uzasadniony kilkoma czynnikami:

- minimalne temperatury pompowania lepiszczy asfaltowych zależą od ich lepkości dynamicznej w określonych temperaturach, co zawiera się w rekomendacjach producentów lepiszczy (tabela 4.1),
- maksymalne temperatury przechowywania krótkotrwałego lepiszczy asfaltowych na wytwórniach mieszanek mineralno-asfaltowych są określone na podstawie odporności konkretnych lepiszczy na wysokie temperatury,
- temperatury spieniania zostały dostosowane na podstawie wcześniejszych badań i doświadczeń, uwzględniając konieczność osiągnięcia odpowiednio wysokich temperatur w celu skutecznego odparowania wody spieniającej oraz efektywnego procesu spieniania.

Tab. 4.1 Temperatury pompowania i przechowywania badanych lepiszczy asfaltowych [186].

Rodzaj lepiszcza	50/70	PMB 45/80-55	PMB HiMA 45/80-80
Min. temperatura pompowania	130°C	150°C	160°C
Maks. temperatura przechowywania krótkotrwałego	185°C	180°C	180°C

W przypadku asfaltów wysokomodyfikowanych polimerami przyjęto wyższy zakres temperatur lepiszcza przed procesem spieniania. To zastosowanie wynikało z istotnie wyższych zalecanych minimalnych temperatur pompowania przez producenta ($>160^{\circ}\text{C}$) [186]. Wartości zakresu dozowania wody spieniającej zostały ustalone na podstawie własnych doświadczeń, jak i innych badaczy [205], [206], zawierając się w zakresie od 155°C do 185°C .

Opierając się na dostępnych źródłach w literaturze krajowej [91], zagranicznej [84], [107], [207] oraz na doświadczeniach własnych w celu ustalenia optymalnych parametrów spieniania lepiszczy asfaltowych przyjęto następujące wartości:

- temperatura wody spieniającej ok. 20°C ,
- ciśnienie powietrza 500 kPa,
- ciśnienie wody 600 kPa.

4.1.2 Plan badań dla etapu II

Drugi etap badań obejmował badania mieszanek mineralno-asfaltowych AC 11S przeznaczonych na warstwę ścieralną dla kategorii obciążenia ruchem KR 5-7 w technologii HMA i WMA ze zmiennym rodzajem lepiszcza (50/70, 45/80-55 i 45/80-80) oraz zmienną zawartością zbrojenia rozproszonego (włókien aramidowych i polimerowo-bazaltowych). Temperaturę wytwarzania mieszanek w technologii „na gorąco” ustalono na podstawie Wymagań Technicznych WT-2 2014 [198] i zaleceń producenta lepiszcza. Mieszanki w technologii „na ciepło” zostały wytworzone z dodatkiem asfaltu spienionego o optymalnych parametrach ustalonych w pierwszym etapie badań. Mieszanki wytwarzano w temperaturze o 15°C niższej niż mieszanki „na gorąco” a temperatury zagęszczania określano zgodnie z planem eksperymentu tj. obniżenie temperatury o 15°C i 30°C względem technologii HMA. W tym etapie zrealizowano badania parametrów mieszanek mineralno-asfaltowych wg Wymagań Technicznych WT-2 2014 [198] dla nawierzchni asfaltowych na drogach krajowych:

- zawartość wolnych przestrzeni wg PN-EN 12697-8 [N6],
- odporność na powstawanie deformacji trwałych wg PN-EN 12697-22 [N7],

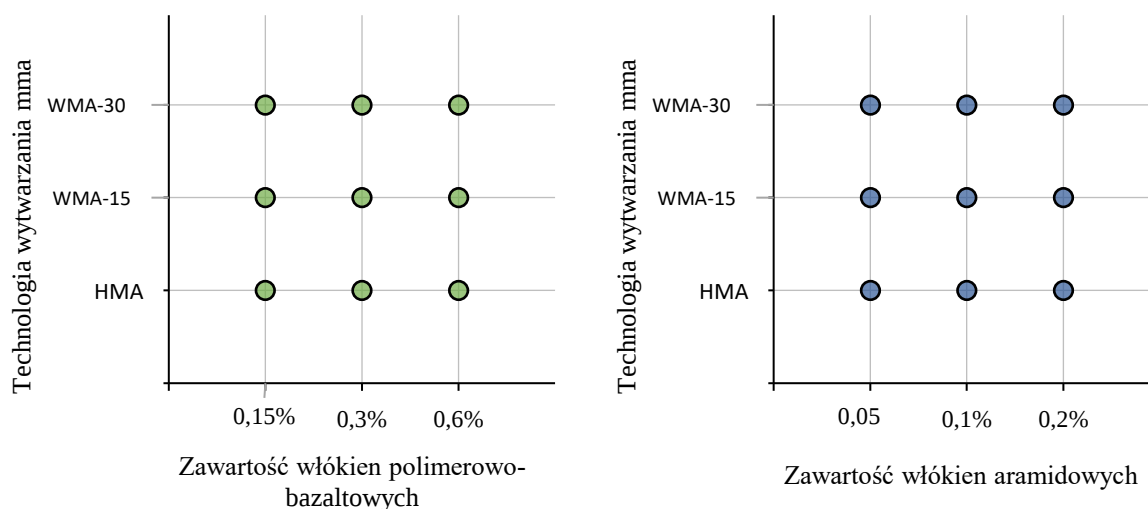
- wrażliwość na działanie wody i mrozu wg PN-EN 12697-12 [N8].

Wykonanie tych badań miało za zadanie scharakteryzować wytworzone mieszanki w podstawowy sposób ze względu na zawartość wolnych przestrzeni, odporność na powstawanie kolein oraz odporność na działanie wody i mrozu.

Próbki laboratoryjne zagęszczano w trzech temperaturach w zależności od technologii ich wytwarzania:

- HMA – mieszanki wytwarzane w technologii „na gorąco” w temperaturze zalecanej przez producenta zastosowanego lepiszcza asfaltowego,
- WMA15°C – mieszanki wytwarzane w technologii „na ciepło”, zagęszczanie w temperaturze niższej o 15°C względem mieszanki HMA,
- WMA30°C – mieszanki wytwarzane w technologii „na ciepło”, zagęszczanie w temperaturze niższej o 30°C względem mieszanki HMA.

Na rysunku 4.4 przedstawiono zastosowane plany badań niezależnie od użytego lepiszcza asfaltowego i rodzaju oraz zawartości zbrojenia rozproszonego w postaci włókien.



Rys. 4.4 Plan badań mieszanek mineralno-asfaltowych w technologii HMA i WMA z asfaltem spienionym.

W pracy przyjęto kodowanie oznaczeń mieszanek mineralno-asfaltowych w następujący sposób:

- oznaczenie wykorzystanego rodzaju włókien:
 - mieszanka referencyjna bez dodatku włókien – **REF**,
 - aramidowe – **AR**,
 - polimerowo-bazaltowe – **PB**,

- oznaczenie ilości zastosowanych włókien:
 - aramidowe – **0,05; 0,1; 0,2**,
 - polimerowo-bazaltowe – **0,15; 0,3; 0,6**,
- technologia wytwarzania i zagęszczania:
 - „na gorąco” HMA – **HMA**,
 - „na ciepło” WMA obniżona o 15°C względem tradycyjnej technologii HMA – **WMA-15**,
 - „na ciepło” WMA obniżona o 30°C względem tradycyjnej technologii HMA – **WMA-30**.

4.1.3 Plan badań etapu III

Podstawowym celem etapu III była realizacja badań dodatkowych, poza wymaganymi wg WT-2 2014 [198] właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych w zakresie:

- zagęszczalności z wykorzystaniem prasy żyratorowej wg PN-EN 12697-10 [N9],
- sztywności metodą rozciągania pośredniego w funkcji temperatury wg PN-EN 12697-26 [N10],
- zespolonego modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego wg AASHTO T342 [N11],
- odporności na zjawisko zmęczenia w schemacie rozciągania pośredniego wg PN-EN 12697-24 [N12],
- modułu sztywności pełzania wg Zeszytu IBDiM nr 48 [N13].

Badania mieszanek mineralno-asfaltowych wykonano w oparciu o plan badań etapu II, pomniejszony o punkty eksperymentu dla których nie zostały spełnione wymagania wg WT-2.

4.2 Metodyki badawcze

4.2.1 Podstawowe właściwości lepiszczy asfaltowych

Przygotowanie próbek

Przygotowanie próbek do podstawowych badań lepiszczy asfaltowych polegało na podgrzaniu 5 litrowych metalowych puszek z lepiszczem przez 4 godz. do jego upłynnienia zgodnie z normą PN-EN 12594 [N25]. Następnie asfalty zostały przelane do szklanych naczyń o pojemności ok. 500 ml z przeznaczeniem do badań parametrów lepiszczy asfaltowych niepoddanych procesowi spieniania. Pozostałe próbki asfaltu poddawano po kolei procesowi

spieniania zgodnie z określoną temperaturą i optymalną ilością wody spieniającej. Pomiar parametrów piany polegał na dozowaniu do odpowiednich metalowych wiader lepiszcza spienionego po 500 g, które następnie rozlewano do szklanych naczyń z przeznaczeniem do dalszych badań parametrów asfaltu po spienieniu. W dalszej kolejności, lepiszcza znajdujące się w szklanych naczyniach były umieszczane ponownie w suszarce laboratoryjnej w celu podgrzania do temperatury upłynnienia umożliwiającej przygotowanie próbek do badań. Badania nawrotu sprężystego wymagały wykonania starzenia technologicznego RTFOT zgodnie z PN-EN 12607-1 [N26].

Penetracja

Pomiary penetracji lepiszczy asfaltowych dokonywano zgodnie z zapisami normy PN-EN 1426 [N1]. Procedura badawcza opierała się na pomiarze zagłębienia stalowej igły w próbce lepiszcza asfaltowego pod wpływem obciążenia wartości 100 g, w czasie 5 s. Pomiar penetracji przeprowadzano w kontrolowanej temperaturze wynoszącej 25°C, przy wykorzystaniu półautomatycznego penetrometru. Dla każdego rodzaju lepiszcza asfaltowego przeprowadzono łącznie dziesięć pomiarów penetracji.

Temperatura mięknięcia

Oznaczanie temperatury mięknięcia lepiszczy asfaltowych wykonano z wykorzystaniem metody "Pierścień i Kula", zgodnie z normą PN-EN 1427 [N2]. Celem tej metody jest ustalenie umownej temperatury, w której lepiszcze asfaltowe przechodzi ze stanu lepko sprężystego w stan lepki. Badania temperatury mięknięcia lepiszczy asfaltowych wykonano przy użyciu aparatu automatycznego, wykorzystując zarówno łaźnię wodną, jak i łaźnię z glicerolem (w zależności od badanego lepiszcza asfaltowego – dla lepiszcza 50/70 i 45-80/55 łaźnia wodna, dla asfaltu 45/80-80 łaźnia z glicerolem). W obu przypadkach zapewniono stały przyrost temperatury wynoszący 5°C/min. Dla każdego rodzaju lepiszcza asfaltowego wykonano łącznie 4 oznaczenia temperatury mięknięcia.

Temperatura łamliwości

Temperaturę łamliwości lepiszczy asfaltowych oznaczano zgodnie z zapisami w normie PN-EN 12593 [N3]. Ta metoda badawcza polega na poddawaniu cienkiej warstwy lepiszcza asfaltowego o grubości około 0,5 mm, nałożonej na stalową płytkę, testowi zginania w niskich temperaturach. Początkowo badanie lepiszczy asfaltowych rozpoczyna się w temperaturze o 10°C wyższej niż przewidywana temperatura łamliwości, a następnie schładza się próbkę

z tempem $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Podczas schładzania przeprowadza się testy zginania po spadku temperatury o jeden pełny stopień. Temperatura, w której w trakcie zginania płytki stalowej powstaje pęknięcie w warstwie badanego lepiszcza, jest uważana za temperaturę łamliwości wg Fraassa. Badanie oznaczenia temperatury łamliwości wykonano w aparacie automatycznym. Wyniki przedstawiono na podstawie 4 prawidłowych oznaczeń dla każdego z asfaltów.

Lepkość dynamiczna

Określenie lepkości dynamicznej wykonano w oparciu o normę PN-EN 13302 [N4]. Badanie wykonano za pomocą reometru i cylindrów współosiowych na lepiszczach przed i po procesie spieniania. Badanie polega na przekazaniu naprężenia wywołanego przez moment obrotowy stożka dociskającego próbkę umieszczoną na płytce. Badanie wykonano w trzech temperaturach: 90°C , 110°C i 135°C przy szybkości ścinania równej 1 s^{-1} . Wykonano po 3 oznaczenia dla każdego asfaltu.

Nawrót sprężysty

Badanie nawrotu sprężystego wykonano dla asfaltów modyfikowanych w oparciu o normę PN-EN 13398 [N5], zarówno przed, jak i po procesie starzenia technologicznego (RTFOT, *ang. Rolling Thin Film Oven Test*). Procedura badawcza opiera się na rozciągnięciu próbki w łaźni wodnej do długości 200 mm, zachowując stałą prędkość tj. 50 mm/min w temperaturze 25°C . W trakcie badania, utworzoną nitkę asfaltową próbki przecięto w środku długości. Po upływie 30 minut od przecięcia, zmierzono odległość między dwoma końcami przeciętej próbki. Wynik nawrotu sprężystego wyrażony jest procentowo i oblicza się jako stosunek zmierzonej odległości do pełnej długości rozciągnięcia próbki (200 mm), pomnożony przez 100. Procentowy wynik nawrotu sprężystego informuje o stopniu elastyczności materiału. Wykonano po 4 oznaczenia dla każdego asfaltu.

Parametry spieniania lepiszczy asfaltowych

Ocena właściwości fizycznych piany asfaltowej opierała się na dwóch empirycznych parametrach: wskaźniku ekspansji maksymalnej (ER_m) oraz okresie półtrwania ($T_{1/2}$). Zarówno ilość wody spieniającej, jak i temperatura lepiszcza asfaltowego, odgrywają istotną rolę w procesie spieniania lepiszczy asfaltowych [112], [198], [208]. Należy zaznaczyć, że temperatura lepiszcza jest szczególnie istotna ze względu na jej wpływ na lepkość lepiszcza asfaltowego oraz konieczność odparowania wody spieniającej, co jest związane z oddawaniem

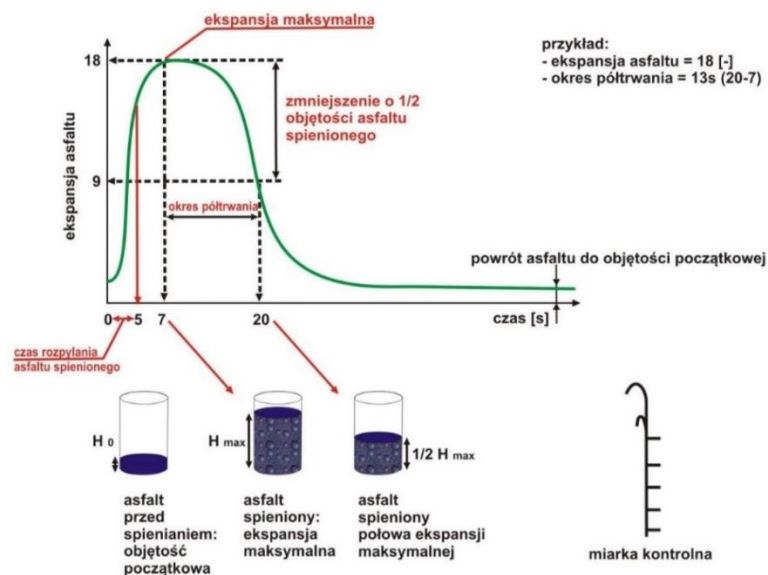
energii cieplnej. Proces spieniania został przeprowadzony przy użyciu spieniarki laboratoryjnej WLB10S przedstawionej na rysunku 4.5.



Rys. 4.5 Spieniarka laboratoryjna WLB 10 S [fot. K. Janus].

Badania wykonano zgodnie z planem eksperymentu z etapu I, w celu określenia wpływu temperatury lepiszcza i zawartości wody spieniającej na parametry ER_m i $T_{1/2}$ analizowanych lepiszczy asfaltowych.

Procedurę spieniania lepiszczy asfaltowych do badań parametrów podstawowych, rozpoczęto od rozgrzania metalowych puszek z asfaltem przez 4 godziny do temperatur wskazanych w planie badań dla etapu I. Zgodnie z planem eksperymentu dla lepiszczy asfaltowych wykonano po 3 pomiary parametrów piany asfaltowej dla każdej zawartości wody spieniającej i temperatury badania. Asfalt spieniano do wiadra pomiarowego w ilości 500 g monitorując ilość dozowanego lepiszcza, wysokość piany za pomocą miarki oraz czas połowicznego rozpadu przy pomocy stopera. Na tej podstawie ustalono optymalną zawartość wody spieniającej i temperaturę spieniania poszczególnych lepiszczy asfaltowych. Zasadę pomiaru obu wielkości oraz zastaw badawczy do pomiaru piany asfaltowej przedstawiono na rysunku 4.6.



Rys. 4.6 Zasada pomiaru ekspansji asfaltu oraz okresu jego półtrwania [106].

Korzystając z bazy danych zgromadzonych pomiarów, obejmujących maksymalną i początkową wysokość piany asfaltowej wykonano obliczenia wskaźnika ekspansji lepiszcza przy użyciu następującego wzoru (4.1) [84]:

$$ER = \frac{H_{max}}{H_0} \quad (4.1)$$

gdzie:

H_{max} - maksymalna wysokość piany asfaltowej [cm],

H_0 - teoretyczna początkowa wysokość lepiszcza asfaltowego w naczyniu przed spienieniem [cm].

4.2.2 Wytwarzanie i zagęszczanie próbek mieszanki mineralno-asfaltowej

Proces wytwarzania mieszanek odbywał się z wykorzystaniem mieszalnika mechanicznego, w równych partiach wynoszących po 10 kg na jednorazowy zarób. Techniki wytwarzania mieszanek HMA i WMA były zbliżone, a jedyne różnice wynikały z zastosowanej temperatury oraz formy lepiszcza: spienionej i niespienionej. W przypadku technologii „na gorąco” temperatura ta wynosiła 180°C, natomiast w metodzie „na ciepło” 165°C. Odważone składniki mieszanki mineralnej oraz lepiszcze asfaltowe podgrzewano w suszarce do ustalonej temperatury i zastosowanej technologii. Składniki mieszano do czasu całkowitego otoczenia ziaren kruszywa przez lepiszcze asfaltowe, zachowując jak najkrótszy czas mieszania, aby zapobiec mechanicznemu uszkodzeniu mieszanki mineralnej zgodnie z [N33]. Dodatkowo czas został wydłużony o 15 sekund. Na podstawie obserwacji czas mieszania wynosił od 2 min 30 s do 2 min 45 s. Dozowanie zbrojenia rozproszonego w postaci włókien

wykonywano po wstępnym przemieszaniu kruszywa, bezpośrednio do mieszalnika. Następnie, dozowano ustaloną ilość lepiszcza w formie płynnej w technologii HMA oraz spienionej w technologii WMA. Tak przygotowane zaroby były porcjowane na pojedyncze próbki, w zależności od przeznaczenia do badań.

Proces zagęszczania próbek różnił się zastosowaną temperaturą w zależności od technologii wytwarzania i rodzaju lepiszcza asfaltowego. Mieszanki wytwarzane metodą „na gorąco” z lepiszczem asfaltowym 50/70 zagęszczano w temperaturze 135°C, natomiast mieszanki z lepiszczem modyfikowanym i wysokomodyfikowanym w temperaturze 145°C. W technologii WMA temperatury te zostały zredukowane o 15°C i 30°C. Mieszanki przeznaczone do wykonania badań właściwości fizycznych (gęstość m/m^3), zagęszczalności i odporności na działanie wody i mrozu nie poddawano starzeniu krótkoterminowemu. Do pozostałych badań stosowano procedury starzenia krótkoterminowego:

- dla mieszanek HMA zgodnie z wytycznymi WT-2 w temperaturze 135°C,
- dla mieszanek WMA zgodnie z wytycznymi WT-2, w czasie 2 godzin, w temperaturze zagęszczania mieszanki (zgodnie z aktualnym stanem wiedzy dotyczącym starzenia krótkoterminowego mieszanek WMA) [123], [129].

Próbki zagęszczane były w temperaturach zgodnie z przyjętym planem badań etapu II oraz III. Do zagęszczania próbek wykorzystano ubijak Marshalla, zagęszczarkę płytową lub prasę żyratorową. Zagęszczanie dynamiczne w ubijaku Marshalla wg PN-EN 12697-30 [N27] wykonano poprzez 2x75 uderzeń w celu określenia zawartości wolnych przestrzeni oraz 2x35 uderzeń do badania odporności na działanie wody i mrozu. Zagęszczanie próbek w prasie żyratorowej wykonano zgodnie z normą PN-EN 12697-31 [N28]. W przypadku badań zagęszczalności, próbki poddano 512 cyklom w prasie żyratorowej, natomiast pozostałe próbki zagęszczano do uzyskania wymaganej wysokości wynoszącej 63,5 mm, co w połączeniu odpowiednią masą zagęszczanego materiału pozwalało uzyskać kontrolowaną zawartość wolnej przestrzeni. Parametry pracy prasy żyratorowej wynosiły: kąt nachylenia osi równym 1,25° oraz prędkość obrotowa równa 30 obr./min. Zagęszczenie próbek prostopadłościennych do określenia odporności na powstawanie deformacji trwałych wykonano przy pomocy zagęszczarki płytowej w stalowych formach o wymiarach 26 cm x 32 cm zgodnie z PN-EN 12697-33 [N29]. Wysokość próbek została określona zgodnie z wymaganiami PN-EN 12697-22 [N7] oraz WT-2 2014 [198]. Dla analizowanej mieszanki mineralno-

asfaltowej przeznaczonej do warstwy ścieralnej o maksymalnym wymiarze ziaren 11 mm grubość płyt wynosiła 40 mm.

4.2.3 Podstawowe właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej

Zawartość wolnych przestrzeni

Zawartość wolnej przestrzeni (V_a) jest podstawowym parametrem, który stanowi istotny wskaźnik zagęszczenia próbek mieszanek mineralno-asfaltowych. Wolne przestrzenie odnoszą się do przestrzeni w próbce, które są wypełnione powietrzem i znajdują się pomiędzy ziarnami kruszywa otoczonymi lepiskiem asfaltowym w zagęszczonej próbce. Zawartość wolnej przestrzeni w zagęszczonej próbce jest w dużej mierze zależna od rodzaju mieszanki oraz warunków przygotowania próbek. Aby ją obliczyć posłużono się wzorem 4.2 [N6]:

$$V_a = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \cdot 100\% \quad (4.2)$$

gdzie:

ρ_m - gęstości mieszanki mineralno-asfaltowej [Mg/m^3], określona wg PN-EN 12697-5 [N30],

ρ_b - gęstości objętościowej mieszanki mineralno-asfaltowej [Mg/m^3], określona wg PN-EN 12697-6 [N31].

Gęstość mieszanki mineralno-asfaltowej oznaczona została zgodnie z normą PN-EN 12697-5 [N30]. Wykorzystano metodę matematyczną w fazie projektowania składu ziarnowego (procedura C) oraz metodę objętościową w fazie produkcji mieszanki mineralno-asfaltowej (procedura A). Gęstość objętościowa mieszanki została określona zgodnie z normą PN-EN 12697-6 [N31], wykorzystując procedurę B, która opiera się na metodzie hydrostatycznej SSD. Dla każdej mieszanki mineralno-asfaltowej zostało wytworzone po sześć próbek zagęszczonych w ubijaku Marshalla.

Odporność na deformacje trwałe

Badanie odporności na deformacje trwałe wykonano zgodnie z procedurą opisaną w normie PN-EN 12697-22 [N7]. Zgodnie z wymogami WT-2 2014 [198] badanie wykonano przy użyciu małego aparatu, metodą B w warunkach powietrznych. Sprawdzenie odporności na powstawanie deformacji trwałych polegało na wielokrotnym przejeździe opony (o nacisku wynoszącym 700 N) po zagęszczonej płycie wykonanej z mieszanki mineralno-asfaltowej.

Aparatura testowa umożliwiła utrzymanie stałych warunków temperaturowych w komorze termicznej tj. 60°C. Podczas testu, aparatura pomiarowa dokonuje regularnych pomiarów głębokości powstałej deformacji próbki na odcinku przejazdu koła. Badanie kończyło się po wykonaniu 10 000 cykli przejazdowych lub w momencie osiągnięcia koleiny o głębokości 20 mm. Parametry wyznaczane na podstawie przeprowadzonego badania odporności na deformacje trwały to:

- nachylenie wykresu koleinowania (WTS_{AIR}),
- głębokość koleiny po 10000 cykli badania (RD_{AIR}),
- proporcjonalna głębokość koleiny po 10000 cykli badania (PRD_{AIR}).

Otrzymane wyniki pozwalają na ocenę odporności badanej mieszanki na deformacje trwale pod wpływem obciążenia kołowego. Dla każdej mieszanki mineralno-asfaltowej zostały wytworzone i zbadane cztery płyty.

Odporność na działanie wody i mrozu

Oznaczenie wskaźnika wytrzymałości na pośrednie rozciąganie ITSR (*ang. Indirect Tensile Strength Ratio*), określającego odporność na działanie wody i mrozu wykonano zgodnie z Wymaganiami Technicznymi WT-2 2014 – Załącznik 1 [198] poprzez wyznaczenie procentowego stosunku wytrzymałości na pośrednie rozciąganie próbek poddanych kondycjonowaniu w stosunku do próbek niekondycjonowanych. Wskaźnik odporności na działanie wody i mrozu ITSR określona się na podstawie wzoru 4.3 [198]:

$$ITSR = \frac{ITS_w}{ITS_s} \quad (4.3)$$

gdzie:

- ITS_w - wytrzymałość na pośrednie rozciąganie w 25°C próbek poddanych kondycjonowaniu [kPa],
- ITS_s - wytrzymałość na pośrednie rozciąganie w 25°C próbek niekondycjonowanych [kPa].

Próbki do badań podzielono na zestaw suchy poddany kondycjonowaniu w temperaturze pokojowej oraz zestaw mokry. Próbki z zestawu mokrego poddawano nasączeniu w komorze próżniowej, aby uzyskać wymagany stopień nasycenia, a następnie umieszczano w łaźni wodnej w temperaturze 40°C przez 72 godziny. Po tym czasie poddawano je zamrażaniu w temperaturze -18°C przez 24 godziny. Badanie wykonano na próbkach

kondycjonowanych w łaźni wodnej w temperaturze 25°C przez 24 godziny. Do badań przygotowano dwie serie próbek po 10 sztuk dla każdej metody kondycjonowania.

4.2.4 Zaawansowane badania mieszanek mineralno-asfaltowych

Zagęszczalność

Określenie zagęszczalności mieszanek mineralno-asfaltowych wykonano na podstawie normy PN-EN 12697-10 [N9] stosując prasę żyratorową. Dla każdej mieszanki wykonano po 3 próbki zagęszczone maksymalną liczbą cykli wynoszącą 512. Następnie określono gęstość objętościową próbek zagęszczonych zgodnie z PN-EN 12697-6 [N31] oraz obliczono zawartość wolnej przestrzeni. Wskaźnik zagęszczalności został określony na podstawie wzoru 4.4 [N9]:

$$u(n_g) = u(1) - K \cdot \ln(n_g) \quad (4.4)$$

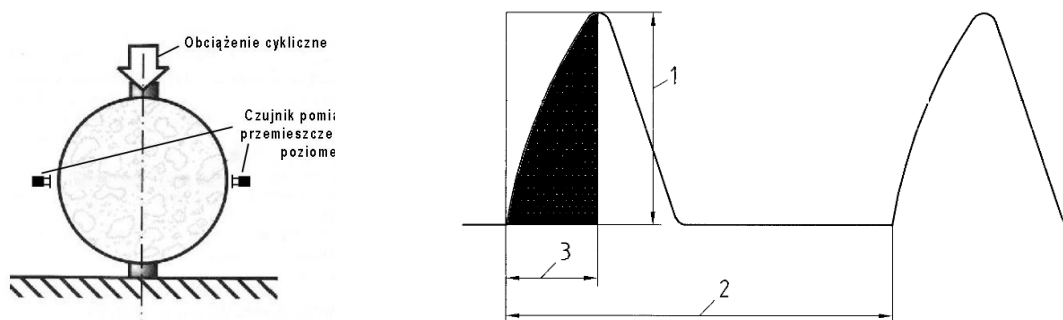
gdzie:

- $u(1)$ - wolna przestrzeń w próbce dla 1 obrotu prasy,
- K - zagęszczalność (nachylenie krzywej na półlogarytmicznym wykresie),
- n_g - liczba obrotów.

Parametr $u(1)$ oraz K oznacza się po wykonaniu regresji liniowej, aby uzyskać najbardziej odpowiednią aproksymację uzyskanych wyników. Dodatkowo określono wskaźnik stabilności MSI zagęszczonych próbek poprzez obliczenie pola powierzchni pod wykresem pomiędzy 8 cyklem zagęszczania a zawartością wolnych przestrzeni na poziomie 8% oraz indeks odporności MRI jako pole pod wykresem pomiędzy zawartością wolnych przestrzeni od 6% do 12%. Zakres wartości indeksu odporności został dobrany w sposób umożliwiający ujęcie wszystkich mieszanek, które spełniały wymagania WT-2 2014.

Sztywność metodą rozciągania pośredniego (IT-CY)

Badanie modułu sztywności w schemacie pośredniego rozciągania (IT-CY) zostało wykonane zgodnie z normą PN-EN 12697-26 [N10], załącznik C. Metoda ta polega na pomiarze sił i przemieszczeń w trakcie kontrolowanego odkształcenia próbki o średnicy 100 mm w schemacie pośredniego rozciągania. Przyłożona pionowa siła wywołuje poziome odkształcenie próbki o wartości 5 μm . Każdy impuls obciążenia wywołujący docelowe odkształcenie trwa 124 ms, podczas gdy pojedynczy cykl trwa 3 s. Badanie wykonano w trzech temperaturach: 5°C, 15°C i 20°C zgodnie z schematem przedstawionym na rysunku 4.7.



Rys. 4.7 Schemat przyłożenia obciążenia do próbki oraz impulsu siły podczas badania modułu sztywności w schemacie IT-CY (1-pik siły, 2-czas powtórzenia impulsu, 3-czas przyrostu siły) [209].

Wartość modułu sztywności dla współczynnika powierzchni równego 0,6 określa się według wzoru 4.5 [N10]:

$$SM = \frac{F(v + 27)}{z \cdot h} \quad (4.5)$$

gdzie:

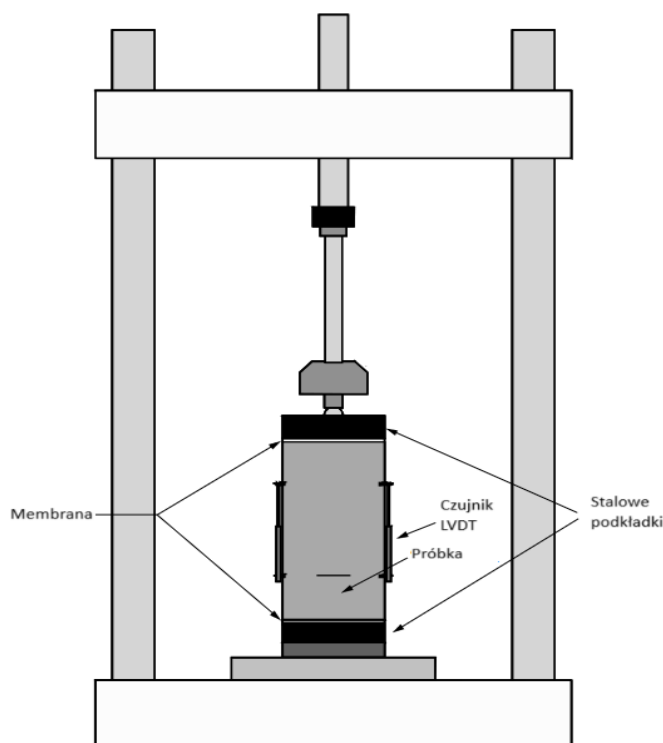
- SM - moduł sztywności sprężystej badanej próbki [MPa],
- F - maksymalna siła przyłożona do próbki [N],
- z - amplituda przemieszczenia poziomego próbki podczas obciążenia [mm],
- h - grubość próbki [mm],
- ν - współczynnik Poissona (wartość zależy od temperatury),
- ΔV - maksymalne przemieszczenie pionowe próbki [mm].

Badanie opiera się na przyłożeniu do próbki pięciu impulsów wstępnych, mających na celu sprawdzenie wartości siły dla określonego przemieszczenia, a następnie kolejnych pięciu, dla ustalonej wartości siły. Badanie wykonuje się dwukrotnie na tej samej próbce: w pozycji wyjściowej oraz po obrocie o 90° . Wartość średnia dla pięciu cykli zasadniczych jest wynikiem badania modułu sztywności.

Zespolony moduł sztywności metodą osiowego ściskania dynamicznego

Badanie zrealizowano w oparciu o normę badawczą AASHTO T 342 [N11]. Próbki do badań przygotowano w prasie żyrotorowej w formie o średnicy 150 mm i wysokości 170 mm, tak aby uzyskać zbliżoną zawartość wolnych przestrzeni dla wszystkich mieszanek. Następnie wiertnicą odwiercone zostały rdzenie o średnicy 100 mm, które docięto z każdej strony, tak aby uzyskać próbkę o wysokości 150 mm. Dla każdej mieszanki wykonano po 3 próbki, dla których została określona zawartość wolnej przestrzeni. Badanie polega na przyłożeniu sinusoidalnego osiowego obciążania ściskającego przy kontrolowanym odkształceniu w ustalonych temperaturach: -10°C , 5°C , 20°C i 35°C , przy częstotliwościach określonych normowo: 25 Hz,

10 Hz, 5 Hz, 1 Hz, 0,5 Hz, 0,1 Hz ze zmienną ilością zadanych cykli. W trakcie testu monitorowano wartość modułu dynamicznego przy poszczególnych częstotliwościach oraz kąt przesunięcia fazowego. Schemat obciążenia i montażu czujników przedstawiono na rysunku 4.8.



Rys. 4.8 Schemat badania zespolonego modułu sztywności [N11].

Moduł sztywności obliczany jest na podstawie 5 ostatnich cykli według poniższego wzoru 4.6 [N11]:

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (4.6)$$

gdzie:

σ_0 - amplituda naprężenia [MPa],

ε_0 - amplituda odkształcenia [mm/mm].

Charakterystyki mieszanek mineralno-asfaltowych pozwalają na stwierdzenie czy dany materiał posiada cechy ciała termoreologicznie prostego, do którego może zostać zastosowana zasada superpozycji temperaturowo-czasowej TTSP (*ang. time-temperature superposition principle*). Zgodnie z tą zasadą możliwe jest przesunięcie otrzymanych wyników badań z różnych temperatur w zakresie częstotliwości uzyskując krzywe wiodące. W tym celu należy określić współczynnik przesunięcia temperaturowego a_t (wzór 4.7), którego wartość zależy od różnicy logarytmu częstotliwości rzeczywistej f oraz zredukowanej f_{red} . Współczynnik

a_T obliczono na podstawie zależności Williamsa-Landela-Ferry'ego (wzór 4.8), natomiast model krzywej wiodącej wybrano jako funkcję sigmoidalną (wzór 4.9) [210].

$$\log f_{red} - \log f = \log a_T \quad (4.7)$$

$$\log a_T = -\frac{C_I(T - T_{ref})}{C_{II} + T - T_{ref}} \quad (4.8)$$

gdzie:

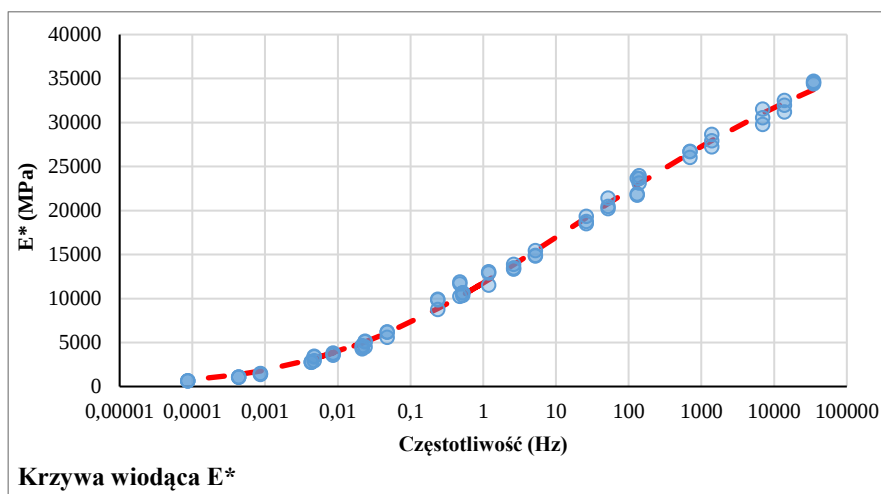
C_I, C_{II} - stałe współczynniki dopasowania,

T - temperatura badania [°C],

T_{ref} - temperatura referencyjna [°C].

$$\log|E^*| = \delta \frac{\alpha}{1 + \exp(\beta + \gamma \log f_{red})} \quad (4.9)$$

Krzywe wiodące zbudowano z wykorzystaniem modułu Solver programu Excel, który posłużył do określenia wartości zmiennych we wzorach 4.8 i 4.9 minimalizujących wartość sumy kwadratów różnic między danymi eksperymentalnymi a modelem. Przykładową krzywą wiodącą wraz z przesuniętymi w domenę częstotliwości danymi eksperymentalnymi dla mieszanki wytwarzanej w technologii HMA z lepiszczem asfaltowym 50/70 oraz dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych w ilości 0,15% przedstawiono na rysunku 4.9.



Rys. 4.9 Krzywa wiodąca dla modułu zespolonego na przykładzie mieszanki z lepiszczem asfaltowym 50/70 i dodatkiem 0,15% włókien polimerowo-bazaltowych.

Odporność na zjawisko zmęczenia (schemat IT-FT)

Badanie przeprowadzono metodą cyklicznego pośredniego rozciągania w schemacie IT-FT w temperaturze 10°C. Do powierzchni próbki przykładana jest powtarzalna pionowa siła ściskająca, która wywołuje wewnątrz niej poziome naprężenia rozciągające. Czas obciążania

próbek wynosi 0,1 s, natomiast czas odpoczynku 0,4 s. W prowadzonych badaniach przyjęta została zmienna wartość siły obciążającej oraz ustalony został limit dopuszczalnej liczby cykli lub krytycznego przemieszczania na poziomie 9 mm. Próbki, niezależnie od rodzaju mieszanki mineralno-asfaltowej, zostały zagęszczone w prasie żyratorowej do uzyskania zbliżonej zawartości wolnych przestrzeni, tak aby zminimalizować wpływ tego czynnika na wynik badania. Próbki badano na różnych poziomach naprężeń. Maksymalne odkształcenie rozciągające obliczono na podstawie wzoru 4.10 [N12]:

$$\varepsilon_0 = 2,1 \cdot \frac{\Delta H}{\varnothing} \quad (4.10)$$

gdzie:

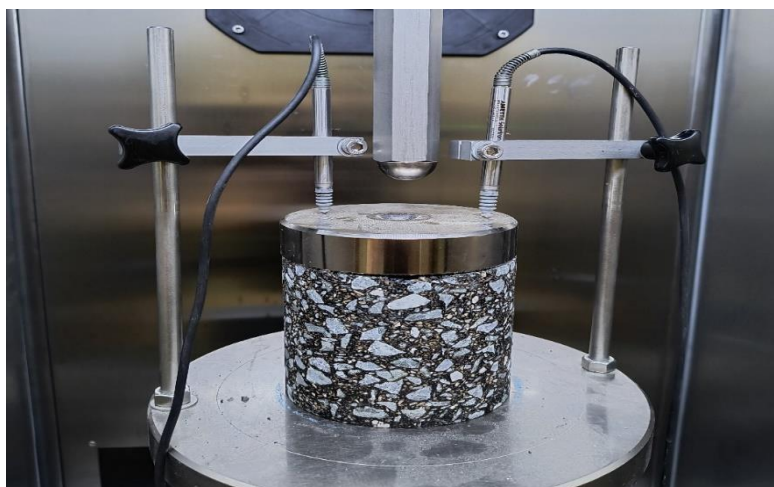
ΔH - deformacja pozioma próbki [mm],

$\varnothing$ - średnica próbki [mm].

Trwałość zmęczeniową określa się w momencie zniszczenia próbki lub w momencie osiągnięcia krytycznego przemieszczenia.

Moduł sztywności pełzania

Ocenę odporności mieszanek mineralno-asfaltowych wykonano w oparciu o Wytyczne IBDiM Zeszyt nr 48 [N13] w temperaturze 40°C metodą jednoosiowego ściskania. Badanie polega na przyłożeniu osiowo statycznej siły do próbki o wartości równej 0,1 MPa. Po badaniu próbka poddana jest odciążeniu w czasie 10 minut i rejestruje się odprężenia mieszanki. Próbki z każdej mieszanki zostały zagęszczone w prasie żyratorowej do zbliżonej zawartości wolnych przestrzeni, aby wyeliminować ten czynnik jako zmienną. Następnie próbki zostały odwiercone na wiertnicy do średnicy 100 mm i docięte w górnej i dolnej części do wysokości 100 mm. Na rysunku 4.10 przedstawiono próbkę w trakcie badania.



Rys. 4.10 Próbkę podczas badania sztywności pełzania [fot. K. Janus]

4.3 Projekt mieszanki mineralno-asfaltowej

W ramach realizacji rozprawy doktorskiej zaprojektowana została mieszanka mineralno-asfaltowa typu beton asfaltowy o maksymalnym uziarnieniu do 11 mm, przeznaczony dla ruchu KR 5-7 wg WT-2 2014. Zgodnie z założonym planem pracy, zaprojektowana została jedna mieszanka mineralna, do której zastosowane zostały trzy rodzaje asfaltów: drogowy 50/70, modyfikowany 45/80-55 oraz wysokomodyfikowany 45/80-80.

Lepiszczka asfaltowe

Na etapie projektowania recepty, wykonane zostały badania podstawowych parametrów lepiszczy asfaltowych, w celu potwierdzenia ich przydatności do wytworzenia mieszanki AC 11S, tj.:

- penetracja w 25°C wg PN-EN 1426 [N1],
- temperatura mięknięcia wg PN-EN 1427 [N2],
- nawrót sprężysty wg PN-EN 13398 [N5].

Zastosowany wybór lepiszczy asfaltowych jest zgodny z aktualnymi wymaganiami technicznymi [198] oraz przyjętą praktyką w zakresie projektowania receptur mieszanek mineralno-asfaltowych przeznaczonych na warstwy ścieralne. Aby zachować jednorodność badanych próbek, zmagazynowano lepiszcza asfaltowe pochodzące z jednej partii produkcyjnej do wykonania wszystkich badań oraz wytworzenia mieszanek mineralno-asfaltowych. Badania wykonano przed (NS) oraz po procesie spieniania (SP) lepiszczy asfaltowych. Lepiszczka asfaltowe dozowane było w jednakowej ilości 5,4% dla każdej mieszanki.

Wyniki badań podstawowych parametrów asfaltów wraz z kryteriami oceny przedstawione zostały w tabeli 4.2.

Tab. 4.2 Podstawowe parametry asfaltów wykorzystanych w badaniach [186].

Rodzaj lepiszcza asfaltowego	Wynik oznaczenia i wymagania	Właściwość			
		Penetracja w 25°C wg PN-EN 1426, [0,1·mm]	Temperatura mięknięcia wg PN-EN 1427, [°C]	Temperatura łamliwości wg Fraassa, EN 12593, [°C]	Nawrót sprężysty wg PN-EN 13398, [%]
Asfalt zwykły 50/70	Wynik oznaczenia NS	65	48,8	-13	-
	Wynik oznaczenia SP	66	46,3	-11	-
	Wymagania	50-70	46-54	≤ -8	-
Asfalt modyfikowany 45/80-55	Wynik oznaczenia NS	70	58,3	-17	75
	Wynik oznaczenia SP	65	56,2	-17	84
	Wymagania	45-80	≥ 55	≤ -15	≥ 50
Asfalt modyfikowany 45/80-80	Wynik oznaczenia NS	72	95,2	-23	98
	Wynik oznaczenia SP	71	92,2	-22	97
	Wymagania	45-80	≥ 80	≤ -18	≥ 60

Wykonane podstawowe badania potwierdziły zgodność podstawowych parametrów z deklaracją producenta, oraz przydatność do zastosowania do mieszanki AC 11S KR 5-7 wg WT-2 2014 [198]. Kompleksowe badania asfaltów w odniesieniu do normy PN-EN 12591:2002 [N32] uwzględniające podstawowe parametry oraz lepkości dynamiczne w 3 temperaturach wykonano w I etapie prac.

Kruszywa

W celu przygotowania i produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych wykorzystano kruszywa pochodzące z dwóch rodzajów skały tj. gabra oraz wapien. Kruszywo wapienne pochodziło z kopalni Trzuskawica znajdującej się w województwie świętokrzyskim, natomiast kruszywo gabrowe pochodziło z kopalni Braszowice zlokalizowanej na Dolnym Śląsku. Parametry fizyczne i mechaniczne kruszyw zostały zweryfikowane na podstawie deklaracji właściwości użytkowych na zgodność z wymaganiami zamieszczonymi w WT-1 2014 [211]. Zbadano natomiast podstawowe właściwości kruszywa, tj. skład ziarnowy oraz ich gęstości objętościowe. Uzyskane wyniki badań przedstawione zostały w tabeli 4.3.

Tab. 4.3 Wyniki oznaczenia składu ziarnowego oraz gęstości objętościowej kruszyw.

Wymiar oczka sita # (mm)	Kruszywo wypełniające	Kruszywo drobne łamane 0/2 mm	Kruszywo drobne łamane o ciągłym uziarnieniu 0/4 mm	Kruszywo grube 2/5 mm	Kruszywo grube 4/8 mm	Kruszywo grube 8/11 mm
31,5						
22,4						
16,0						
11,2						8,8
8,0					9,5	81,4
5,6				2,7	69,2	7,5
4			8,1	25,0	17,9	1,5
2		10,7	30,0	58,8	2,0	
1		29,9	22,4	11,9		
0,5		19,5	13,8			
0,25		17,8	11,5			
0,125	3,6	17,9	5,2			
0,063	10,0	3,4	2,5			
< 0,063	86,4	0,8	6,5	1,6	1,4	0,8
SUMA	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Gęstość [Mg/m ³]	2,70	2,72	2,69	2,95	2,96	2,96

Środek adhezyjny

Na podstawie doświadczeń własnych zdecydowano o zastosowaniu środka powierzchniowo czynnego Wetfix BE w celu poprawy powinowactwa asfaltu do kruszywa. Podstawowe parametry środka adhezyjnego podane przez producenta przedstawiono w tabeli 4.4.

Tab. 4.4 Właściwości środka adhezyjnego Wetfix BE [212].

Liczba kwasowa, mgKOH/g	<10
Liczba aminowa, mg KOH/g	246-285
Stan skupienia w 25°C	ciekły
Temperatura zapłonu, °C	>218
Temperatura krzepnięcia, °C	<-20
Gęstość w 20°C, g/cc	0,98
Lepkość w 20°C, mPa.s	538

Zgodnie z zaleceniami producenta dozowanie środka adhezyjnego powinno wynosić od 0,3% do 0,5% względem masy asfaltu [213]. Na podstawie doświadczeń własnych i zaleceń producenta zastosowano 0,3% środka adhezyjnego. Podczas wytwarzania mieszanek mineralno-asfaltowych środek w postaci ciekłej dozowano do gorącego lepiszcza i mieszano przy pomocy mieszadła mechanicznego przez 2-3 minuty. Modyfikację asfaltu wykonywano każdorazowo przed przygotowaniem mieszanki mineralno-asfaltowej.

Projekt mieszanki mineralno-asfaltowej

Uziarnienie mieszanki mineralnej oraz minimalna ilość dozowanego lepiszcza zostały określone w oparciu o Wymagania Techniczne WT-2 2014 [198] dla betonu asfaltowego o uziarnieniu do 11 mm przeznaczonego na warstwę ścieralną dla kategorii ruchu KR 5-7.

Ilość asfaltu w mieszance mineralno-asfaltowej dobrano w oparciu o wartość B_{min} oraz współczynnik korekcyjny α . W poniższej tabeli 4.5 przedstawione zostały obliczone ilości zastosowanego lepiszcza asfaltowego do mma.

Tab. 4.5 Dobór minimalnej zawartości asfaltu w mieszance mineralno-asfaltowej.

Parametr	Jednostka	Wynik
Gęstość mieszanki mineralnej ρ_a	Mg/m ³	2,853
Minimalna zawartość asfaltu B_{min}	%	5,8
Współczynnik korekcyjny $\alpha=2,650/\rho$	-	0,929
Minimalna zawartość asfaltu po korekcie ($B_{min} \times \alpha$)	%	5,4
Obliczenie asfaltu nierozpuszczalnego wg wzoru: $BA=0,014 \cdot F+0,1$, gdzie F - zawartość frakcji <0,063 mm	%	5,2
Zawartość asfaltu rozpuszczalnego	%	0,2

Skład mieszanki mineralnej oraz mieszanki mineralno-asfaltowej, niezależnie od zastosowanego asfaltu przedstawiono w tabeli 4.6.

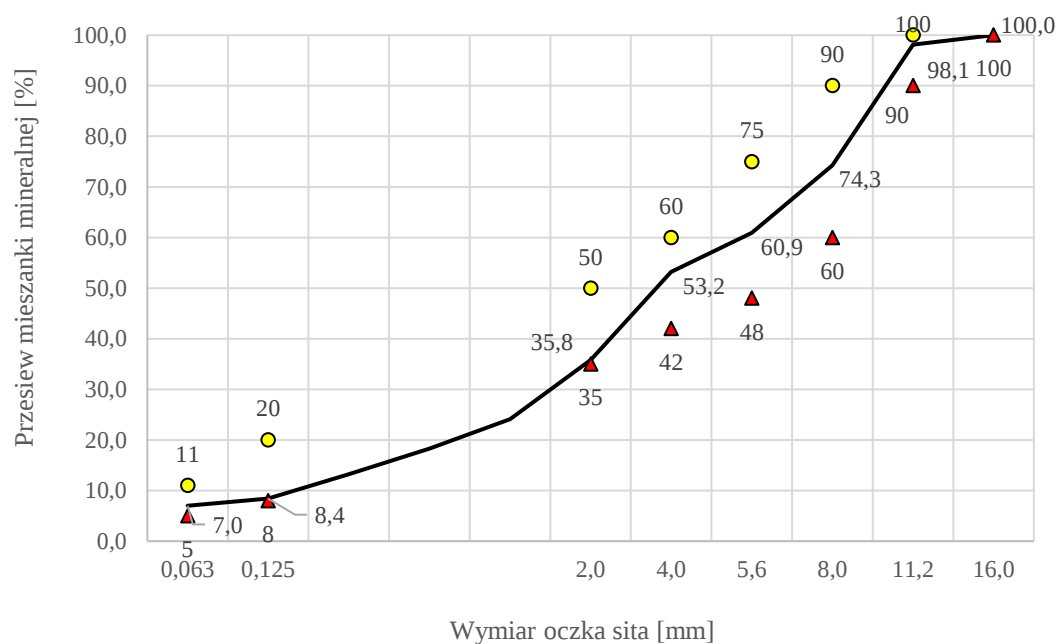
Tab. 4.6 Składniki mieszanki mineralnej i mieszanki mineralno-asfaltowej.

Materiały	Udział (% m/m)	
	mm	mma
Kruszywo wypełniające	5,0	4,7
Kruszywo drobne 0/2 mm	19,0	18,0
Kruszywo o ciągłym uziarnieniu 0/4 mm	18,0	17,0
Kruszywo grube 2/5 mm	17,0	16,1
Kruszywo grube 4/8 mm	15,0	14,2
Kruszywo grube 8/11 mm	26,0	24,6
Asfalt (50/70, 45/80-55, 45/80-80)	-	5,4
Wetfix BE, środek adhezyjny	-	0,3%/wag. asf.
SUMA:	100,0	100,0

W tabeli 4.7 oraz na rysunku 4.11 przedstawiono projekt mieszanki mineralnej spełniającej wymogi WT-2 2014 [198]. Podczas projektowania składu mieszanki mineralnej uwzględniono 30% odpylania kruszyw drobnych, grubych i o ciągłym uziarnieniu.

Tab. 4.7 Projekt mieszanki mineralnej, dla AC 11S KR 5-7.

Wymiar oczka sita [mm]	Odsiew (%)	Przesiew (%)	Punkty graniczne zgodne z WT-2 2014	
			Wymagania minimalne	Wymagania maksymalne
16,0	0,0	100,0	100	
11,2	1,9	98,1	90	100
8,0	23,8	74,3	60	90
5,6	13,4	60,9	48	75
4,0	7,7	53,2	42	60
2,0	17,4	35,8	35	50
1,0	11,7	24,1		
0,5	5,8	18,3		
0,25	5,1	13,2		
0,125	4,8	8,4	8	20
0,063	1,4	7,0	5	11
<0,063	7,0			
suma	100,0			



Rys. 4.11 Uziarnienie mieszanki mineralnej wraz z punktami kontrolnymi.

Mieszanka betonu asfaltowego o uziarnieniu 11 mm przeznaczona na warstwę ścieralną o kategorii ruchu KR 5-7 powinna spełniać parametry zgodnie z WT-2 2014 [198]. W tabeli 4.8 przedstawiono podstawowe parametry dla projektowanej mieszanki.

Tab. 4.8 Wymagane właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej AC 11S KR 5-7.

Właściwość	Warunki zagęszczania wg PN-EN 13108-20	Metoda i warunki badania	Wymiar mieszanki
			AC 11S
Zawartość wolnych przestrzeni	C.1.3, ubijanie, 2x75 uderzeń	PN-EN 12697-8, pkt 4	$V_{\min 2,0}$ $V_{\max 4,0}$
Odporność na deformacje trwałe	C.1.20, wałowanie, P_{98} - P_{100}	PN-EN 12697-22, metoda B w powietrzu, PN-EN 13108-20, D.1.6, 60°C, 10 000 cykli	$WTS_{AIR 0,10}$ $PRD_{AIR 7,0}$
Wrażliwość na działanie wody	C.1.1, ubijanie, 2x35 uderzeń	PN-EN 12697-12, przechowywanie w 40°C z jednym cyklem zamrażania, badanie w 25°C	ITSR ₉₀

4.4 Etap I – badania lepiszczy asfaltowych

Wytwarzanie piany asfaltowej do badań podstawowych parametrów lepiszczy asfaltowych rozpoczęto od ustalenia ilości wody spieniającej. Na podstawie studium literatury oraz własnych doświadczeń określono dozowanie wody na poziomie: 1%, 2% oraz 3% dla wszystkich lepiszczy, a temperatury lepiszczy podczas spieniania wynosiły odpowiednio 140°C, 155°C i 170°C dla asfaltów 50/70 i 45/80-55 oraz 155°C, 170°C i 185°C dla lepiszcza 45/80-80. Do wszystkich lepiszczy asfaltowych dozowano środek adhezyjny w ilości 0,3% w stosunku do masy asfaltu. W trakcie spieniania lepiszczy oznaczono wskaźnik ekspansji oraz okres półtrwania trzykrotnie dla każdego z nich. Na tej podstawie określono optymalną temperaturę i ilość wody spieniającej do badań lepiszczy oraz wytwarzania mieszanek mineralno-asfaltowych.

4.4.1 Badania piany asfaltowej

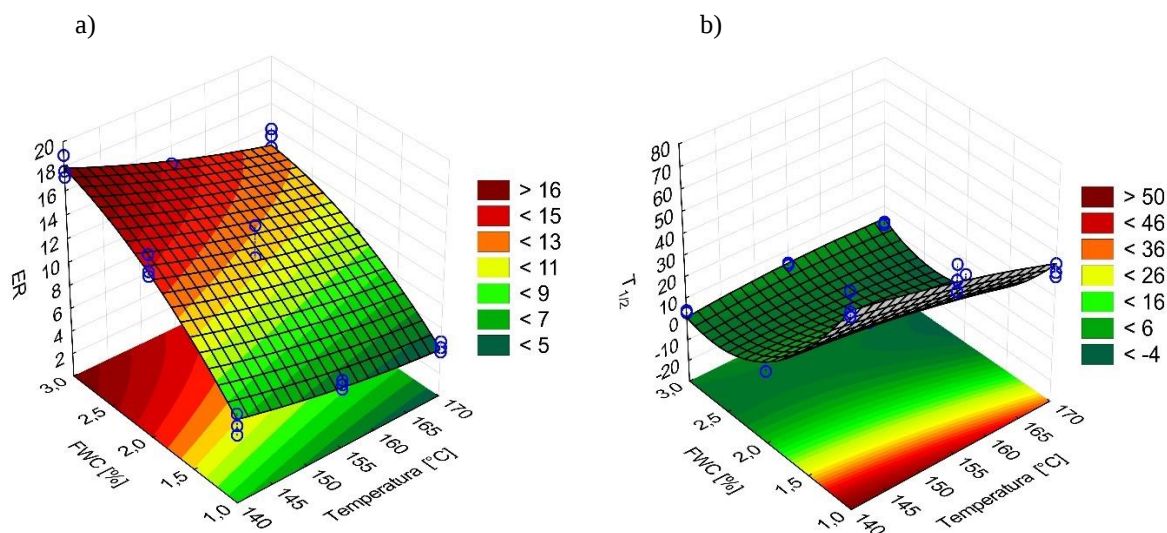
Optymalizacja ilości wody spieniającej FWC do badań lepiszczy asfaltowych oraz wytwarzania mieszanek mineralno-asfaltowych została przeprowadzona w oparciu o zmierzone parametry: współczynnik ekspansji (ER) i okres półtrwania (HL). W tabeli 4.9 przedstawiono uzyskane wyniki badań oraz podstawowe wielkości statystyczne: wartości średnie, odchylenia standardowe i współczynniki zmienności dla analizowanych lepiszczy asfaltowych w aspekcie rodzaju asfaltu, temperatury spieniania i zawartości wody spieniającej.

Tab. 4.9 Wartości maksymalnej ekspansji i czasu półtrwania piany asfaltowej wraz z podstawowymi wielkościami statystycznymi.

Lp.	Lepiszczce	Temperatura spieniania (°C)	Ilość wody spieniającej FWC (%)	Ekspansja maksymalna ER _m				Czas półtrwania piany asfaltowej T _{1/2}			
				n	$\bar{x}$ (-)	s (-)	CV	n	$\bar{x}$ (s)	s (s)	CV
1.	50/70	140	1	3	6,7	0,7	11,0%	3	61,3	4,8	7,8%
2.			2	3	14,4	0,8	5,3%	3	4,0	0,0*	0,0%*
3.			3	3	17,9	0,8	4,2%	3	3,3	0,5	14,1%
4.		155	1	3	5,5	0,3	5,9%	3	50,7	4,9	9,7%
5.			2	3	12,0	1,4	11,5%	3	3,3	0,5	14,1%
6.			3	3	14,0	0,5	3,6%	3	3,7	0,5	12,9%
7.		170	1	3	4,3	0,4	8,5%	3	31,7	2,5	7,9%
8.			2	3	8,9	0,3	3,2%	3	3,0	0,0*	0,0%*
9.			3	3	13,1	0,7	5,1%	3	1,3	0,5	35,4%
10.	45/80-55	140	1	3	6,4	0,4	5,4%	3	33,7	1,7	5,0%
11.			2	3	8,2	0,2	3,1%	3	32,7	0,9	2,9%
12.			3	3	8,3	1,9	23,3%	3	14,3	0,5	3,3%
13.		155	1	3	5,8	0,2	4,2%	3	36,3	1,2	3,4%
14.			2	3	12,9	0,5	4,2%	3	7,0	0,0*	0,0%*
15.			3	3	15,4	0,9	6,1%	3	5,0	0,8	16,3%
16.		170	1	3	5,4	0,9	16,1%	3	33,0	2,9	8,9%
17.			2	3	7,4	0,5	6,1%	3	13,3	1,2	9,4%
18.			3	3	8,8	0,2	2,3%	3	13,7	1,2	9,1%
19.	45/80-80	155	1	3	6,0	0,1	2,1%	3	68,7	2,5	3,6%
20.			2	3	13,1	0,2	1,9%	3	29,7	1,7	5,7%
21.			3	3	18,4	1,1	6,0%	3	35,0	1,6	4,7%
22.		170	1	3	5,0	0,3	6,6%	3	40,0	1,4	3,5%
23.			2	3	12,6	0,4	2,8%	3	8,0	0,0*	0,0%*
24.			3	3	12,6	0,3	2,1%	3	9,3	0,5	5,1%
25.		185	1	3	5,2	0,2	4,2%	3	49,0	2,2	4,4%
26.			2	3	7,5	0,7	9,8%	3	17,3	0,5	2,7%
27.			3	3	8,6	0,5	5,9%	3	11,3	2,5	22,0%
n – liczba pomiarów, $\bar{x}$ – wartość średnia mierzonej cechy, s – odchylenie standardowe ze średniej, CV – współczynnik zmienności, $CV = s/\bar{x}$, * – trzykrotnie pomierzono jednakowe czasy półtrwania piany asfaltowej.											

Dla każdego z badanych lepiszczy opracowano model statystyczny w formie powierzchni odpowiedzi w aspekcie zmienności badanych parametrów pienistości. Na wykresach przedstawiono wyniki badań w funkcji temperatury lepiszcza i zawartości wody spieniającej.

Na rysunku 4.12 przedstawiono powierzchnie odpowiedzi w funkcji temperatury i ilości wody spieniającej dla asfaltu 50/70. W tabeli 4.10 przedstawiono analizę wariancji uwzględniającą wpływ zmienności wskaźnika ekspansji maksymalnej oraz okresu półtrwania piany asfaltowej.



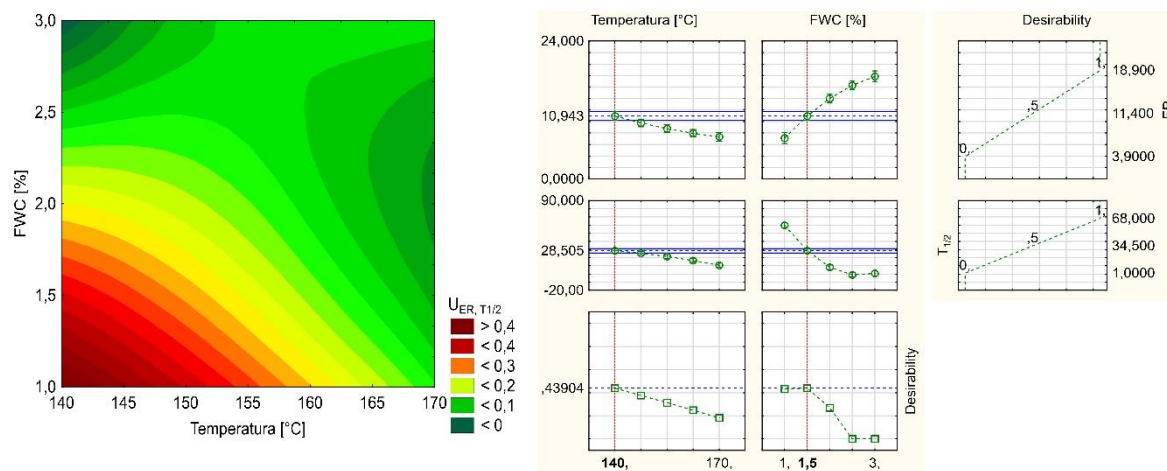
Rys. 4.12 Powierzchnie odpowiedzi dla zmiennych zależnych: wskaźnika ekspansji (a) i okresu półtrwania (b) dla asfaltu 50/70.

Tab. 4.10 Analiza wariancji dla zmiennych zależnych: wskaźnika ekspansji i okresu półtrwania dla asfaltu 50/70.

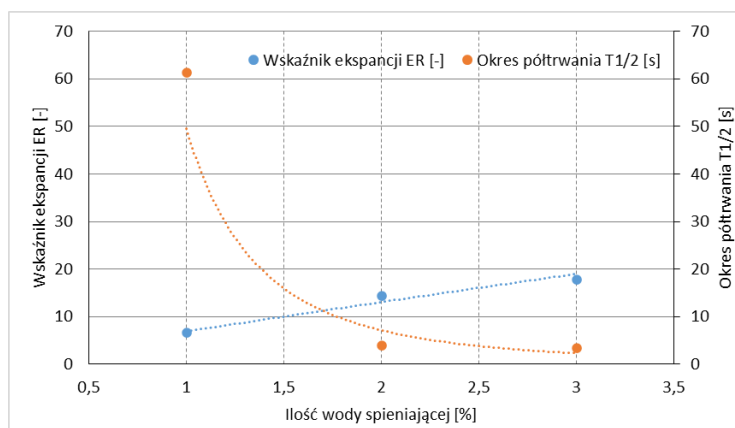
Analiza wariancji ANOVA						Zmienna zależna: ER_m ;					Zmienna zależna: $T_{1/2}$;				
Lepiszczce 50/70						$R^2 = 0,959$; $R^2_{adj} = 0,949$					$R^2 = 0,970$; $R^2_{adj} = 0,963$				
Czynnik	SS	df	MS	F	p	SS	df	MS	F	p	SS	df	MS	F	p
(1)Temperatura (°C)(L)	80,645	1	80,645	104,533	<0,001	533,56	1	533,556	59,041	<0,001	533,56	1	533,556	59,041	<0,001
Temperatura (°C)(Q)	0,8817	1	0,882	1,143	0,299	18,96	1	18,963	2,098	0,165	18,96	1	18,963	2,098	0,165
(2)FWC (%) (L)	404,227	1	404,227	523,962	<0,001	9157,56	1	9157,556	1013,336	<0,001	9157,56	1	9157,556	1013,336	<0,001
FWC (%) (Q)	13,802	1	13,802	17,890	<0,001	2874,74	1	2874,741	318,107	<0,001	2874,74	1	2874,741	318,107	<0,001
1L * 2L	4,563	1	4,563	5,915	0,025	574,08	1	574,083	63,526	<0,001	574,08	1	574,083	63,526	<0,001
Brak dopas.	7,621	3	2,540	3,293	0,044	239,40	3	79,799	8,830	<0,001	239,40	3	79,799	8,830	<0,001
Czysty błąd	13,887	18	0,772			162,67	18	9,037			162,67	18	9,037		
Suma	525,627	26				13560,96	26				13560,96	26			

Wyniki analizy statystycznej podane w tabeli 4.10 wykazały istotny wpływ temperatury lepiszcza podczas procesu spieniania oraz zawartości wody spieniającej na wartości wskaźnika maksymalnej ekspansji. Wzrost zawartości wody spieniającej prowadził do zwiększenia ER, osiągając maksimum przy 140°C i minimum przy 170°C. Podobnie, analiza statystyczna wykazała istotny wpływ temperatury lepiszcza w czasie spieniania i zawartości wody spieniającej na czas półtrwania piany asfaltowej. Wpływ zawartości wody spieniającej dominował w zakresie zmienności parametru HL w stosunku do czynnika temperatury. Najdłuższe czasy półtrwania zaobserwowano przy FWC = 1%, a zwiększenie do 2% skróciło znacznie czasy półtrwania, bez większego wpływu na ten parametr przy większej zawartości wody spieniającej. Zmiany temperatury spieniania wpływały na wartość HL, najsilniej przy FWC równym 1%, gdzie obserwowano nieznaczne wydłużenie czasów półtrwania przy

niższych temperaturach spieniania. Ocena wyników spieniania lepiszcza asfaltowego 50/70 z wykorzystaniem jednoczesnej optymalizacji ekspansji maksymalnej i okresu półtrwania została przedstawiona na rysunkach 4.13 i 4.14.



Rys. 4.13 Wynik optymalizacji parametrów spieniania ER i HL dla lepiszcza asfaltowego 50/70.

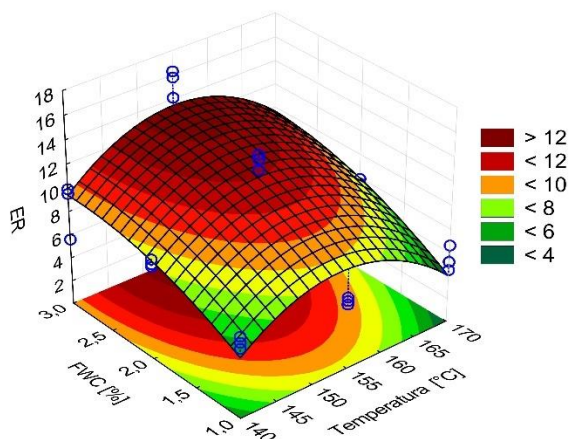


Rys. 4.14 Średnie wartości parametrów ER i HL dla lepiszcza asfaltowego 50/70 spienianego w temperaturze 140°C.

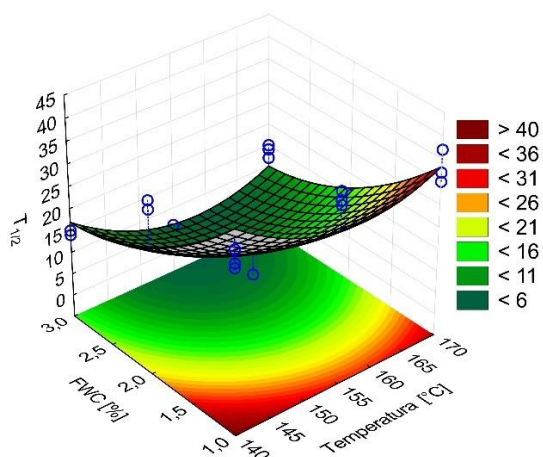
Na podstawie optymalizacji określono optymalne warunki spieniania tego lepiszcza przy temperaturze 140°C i FWC 1,5%. Z wykresu zależności ilości dozowanej wody oraz wskaźnika ekspansji i okresu półtrwania piany asfaltowej dla temperatury 140°C, metodą przecięcia charakterystyk spieniania, uzyskano optymalną ilość wody spieniającej na poziomie 1,7%.

Na rysunku 4.15 przedstawiono powierzchnie odpowiedzi w funkcji temperatury i ilości wody spieniającej dla asfaltu modyfikowanego 45/80-55. W tabeli 4.11 przedstawiono analizę wariancji uwzględniającą wpływ zmienności wskaźnika ekspansji maksymalnej oraz okresu półtrwania piany asfaltowej.

a)



b)



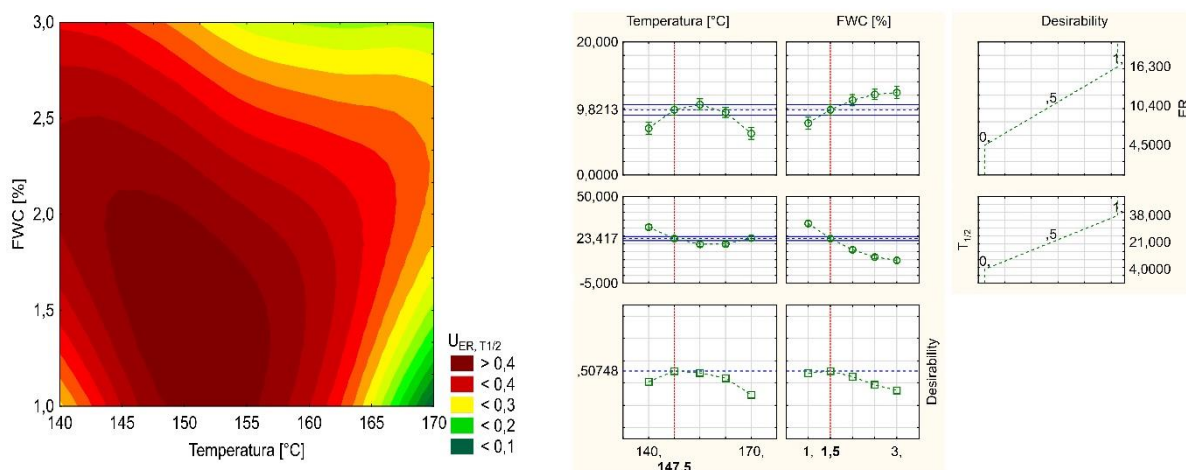
Rys. 4.15 Powierzchnie odpowiedzi dla zmiennych zależnych: wskaźnika ekspansji (a) i okresu półtrwania (b) dla asfaltu 45/80-55.

Tab. 4.11 Analiza wariancji dla zmiennych zależnych: wskaźnika ekspansji i okresu półtrwania dla asfaltu 45/80-55.

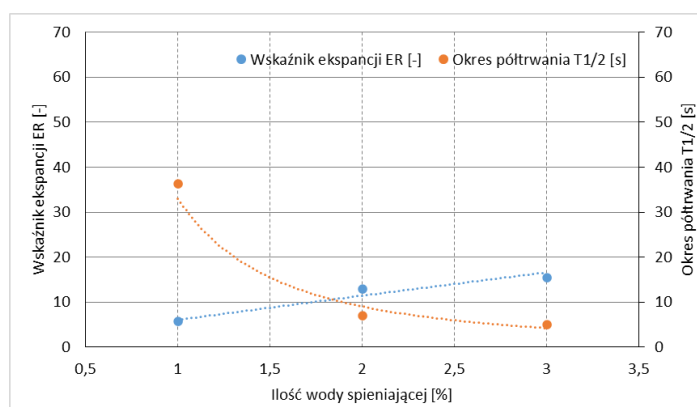
Analiza wariancji ANOVA Lepiszcz 45/80-55						Zmienna zależna: ER_m ; $R^2 = 0,750$; $R^2_{adj} = 0,690$					Zmienna zależna: $T_{1/2}$; $R^2 = 0,803$; $R^2_{adj} = 0,755$				
Czynnik	SS	df	MS	F	p	SS	df	MS	F	p	SS	df	MS	F	p
(1)Temperatura (°C)(L)	0,8450	1	0,8450	0,812	0,379	213,556	1	213,556	71,185	<0,001					
Temperatura (°C)(Q)	94,142	1	94,142	90,457	<0,001	322,667	1	322,667	107,556	<0,001					
(2)FWC (%) (L)	110,509	1	110,509	106,183	<0,001	2450,000	1	2450,000	816,667	<0,001					
FWC (%) (Q)	7,859	1	7,859	7,551	0,013232	150,000	1	150,000	50,000	<0,001					
1L * 2L	1,470	1	1,470	1,413	0,250	0,000	1	0,000	0,000	1,000					
Brak dopas.	53,025	3	17,675	16,983	<0,001	717,778	3	239,259	79,753	<0,001					
Czysty błąd	18,733	18	1,0407			54,000	18	3,000							
Suma	286,583	26				3908,000	26								

Wyniki analizy statystycznej podane w tabeli 4.11 wykazały istotny wpływ zawartości wody spieniającej podczas procesu spieniania na wartości wskaźnika maksymalnej ekspansji. Temperatura spieniania lepiszcza miała istotny wpływ na wartość ER, a największa wartość tego parametru była osiągana przy temperaturze 155°C. Wzrost zawartości wody spieniającej prowadził do w przybliżeniu proporcjonalnego zwiększenia ER. Analiza statystyczna potwierdziła również, że wartości parametru HL były znacząco uwarunkowane przez temperaturę lepiszcza w czasie spieniania, jak i zawartość wody spieniającej. Zawartość wody spieniającej dominowała, a zmiany FWC miały większy wpływ na zmienność HL niż zmiana temperatury spieniania. Najdłuższe czasy półtrwania zauważono przy FWC=1%, a zwiększenie ilości wody spieniającej do 2% i 3% skróciło czasy półtrwania. Stwierdzono nieznaczne wydłużenie czasów półtrwania przy zmniejszeniu temperatury spieniania, zwłaszcza przy FWC równym 1%. Ocena wyników spieniania lepiszcza asfaltowego 45/80-55 z wykorzystaniem

jednoczesnej optymalizacji ekspansji maksymalnej i okresu półtrwania została przedstawiona na rysunkach 4.16 i 4.17.



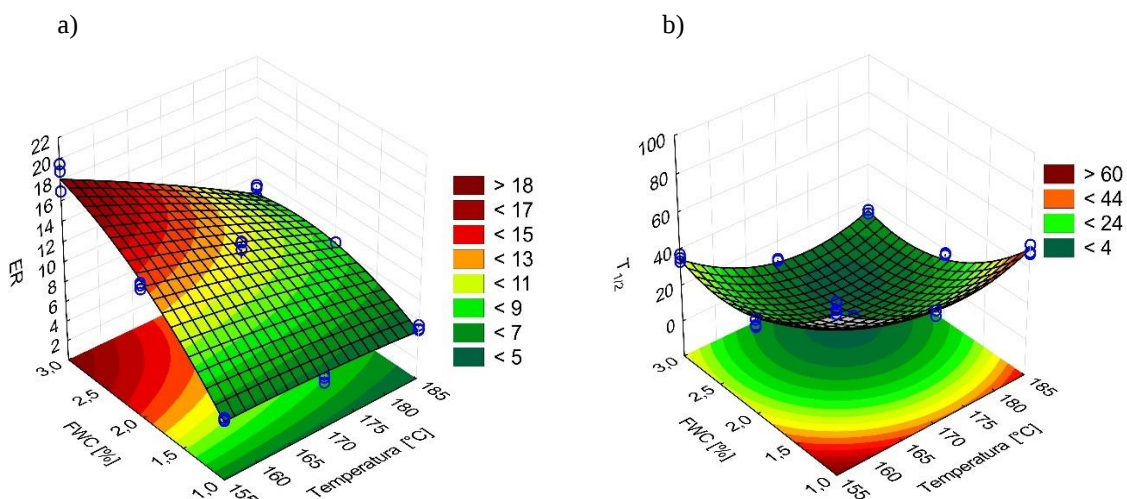
Rys. 4.16 Wynik optymalizacji parametrów spieniania ER i HL dla lepiszcza asfaltowego 45/80-55.



Rys. 4.17 Średnie wartości parametrów ER i HL dla lepiszcza asfaltowego 45/80-55 spienianego w temperaturze 147,5°C.

Najkorzystniejsze parametry piany asfaltowej uzyskano przy temperaturze spieniania pomiędzy 145°C a 155°C i FWC od 1% do 2%. Optymalizacja wskazała, że jednocześnie największe wartości ER i HL uzyskane zostaną przy temperaturze spieniania 147,5°C oraz zawartości wody spieniającej na poziomie 1,5%. Na podstawie wykresu zależności ilości dozowanej wody a wartościami ER i HL w temperaturze 155°C i metody przecięcia charakterystyk spieniania, stwierdzono optymalną zawartość wody spieniającej w ilości 1,8%.

Na rysunku 4.18 przedstawiono powierzchnie odpowiedzi w funkcji temperatury i ilości wody spieniającej dla asfaltu modyfikowanego 45/80-80. W tabeli 4.12 przedstawiono analizę wariancji uwzględniającą wpływ zmienności wskaźnika ekspansji maksymalnej oraz okresu półtrwania piany asfaltowej.



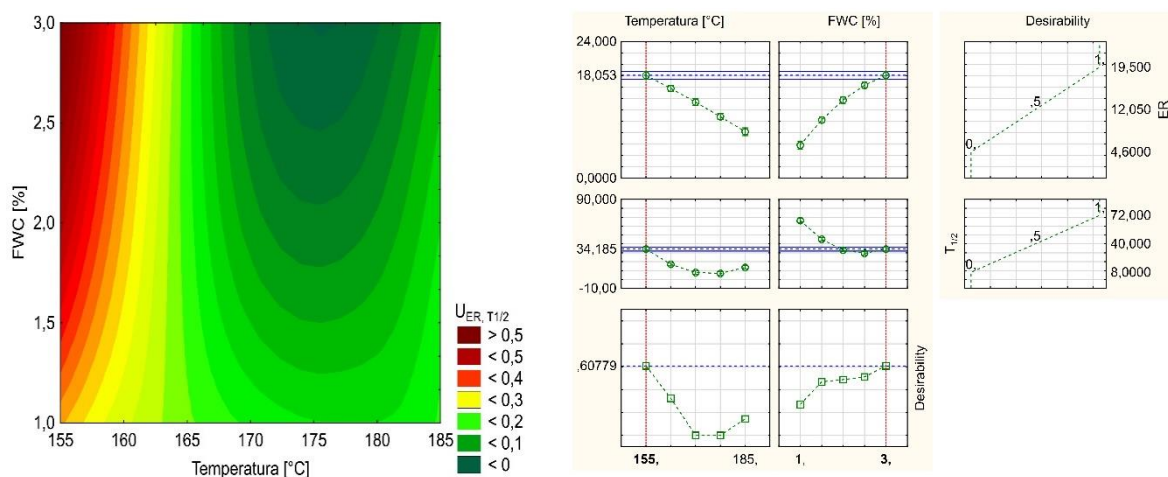
Rys. 4.18 Powierzchnie odpowiedzi dla zmiennych zależnych: wskaźnika ekspansji (a) i okresu półtrwania (b) dla asfaltu 45/80-80.

Tab. 4.12 Analiza wariancji dla zmiennych zależnych: wskaźnika ekspansji i okresu półtrwania dla asfaltu 45/80-80.

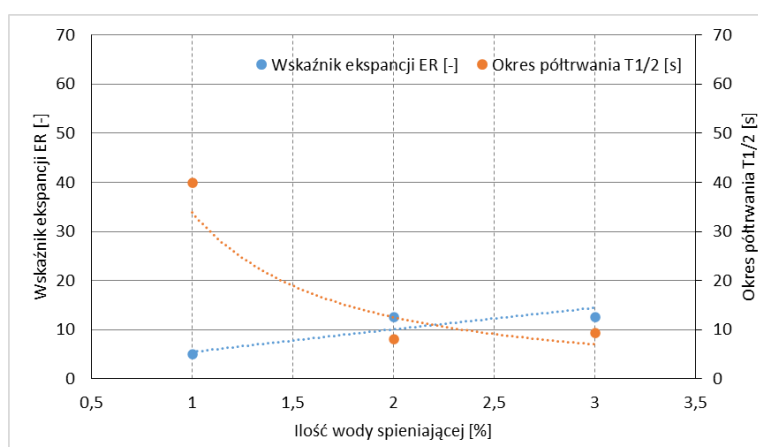
Analiza wariancji ANOVA Lepiszcz 45/80-55						Zmienna zależna: ER_m ; $R^2 = 0,961$; $R^2_{adj} = 0,951$					Zmienna zależna: $T_{1/2}$; $R^2 = 0,982$; $R^2_{adj} = 0,977$				
Czynnik	SS	df	MS	F	p	SS	df	MS	F	p	SS	df	MS	F	p
(1)Temperatura (°C)(L)	131,761	1	131,761	324,297	<0,001	1549,39	1	1549,389	370,208	<0,001	1549,39	1	1549,389	370,208	<0,001
Temperatura (°C)(Q)	0,375	1	0,375	0,923	0,349	1546,69	1	1546,685	369,562	<0,001	1546,69	1	1546,685	369,562	<0,001
(2)FWC (%) (L)	271,445	1	271,445	668,096	<0,001	5202,00	1	5202,000	1242,956	<0,001	5202,00	1	5202,000	1242,956	<0,001
FWC (%) (Q)	19,082	1	19,082	46,965	<0,001	1779,63	1	1779,630	425,221	<0,001	1779,63	1	1779,630	425,221	<0,001
1L * 2L	60,309	1	60,301	148,416	<0,001	12,00	1	12,000	2,867	0,108	12,00	1	12,000	2,867	0,108
Brak dopas.	12,404	3	4,135	10,176	<0,001	113,04	3	37,679	9,003	<0,001	113,04	3	37,679	9,003	<0,001
Czysty błąd	7,313	18	0,406			75,33	18	4,185			75,33	18	4,185		
Suma	502,680	26				10278,07	26				10278,07	26			

Wyniki analizy statystycznej podane w tabeli 4.12 wykazały istotny wpływ temperatury lepiszcza podczas procesu spieniania oraz zawartości wody spieniającej na wartości wskaźnika maksymalnej ekspansji. Wzrost ilości wody spieniającej skutkował wzrostem ER. Obserwowano największy wpływ temperatury przy FWC równej 3%, gdzie zwiększenie temperatury znacząco zmniejszało wartości wskaźnika ekspansji. Analiza statystyczna potwierdziła, że HL było znacząco kształtowane zarówno przez temperaturę lepiszcza w czasie spieniania, jak i zawartość wody spieniającej. Najdłuższe czasy półtrwania obserwowano przy FWC = 1%, a zwiększenie ilości wody spieniającej do 2% i 3% powodowało dalsze, niewielkie ich skrócenie. Dodatkowo, nieznaczne wydłużenie czasów półtrwania obserwowano przy temperaturze spieniania 155°C.

Ocena parametrów z wykorzystaniem jednoczesnej optymalizacji ekspansji maksymalnej i okresu półtrwania przedstawiona została na rysunkach 4.19 i 4.20.



Rys. 4.19 Wynik optymalizacji parametrów spieniania ER i HL dla lepiszcza asfaltowego 45/80-80.



Rys. 4.20 Średnie wartości parametrów ER i HL dla lepiszcza asfaltowego 45/80-80 spienianego w temperaturze 155°C.

Optymalne parametry spieniania uzyskano przy temperaturze lepiszcza 155°C i FWC od 2,5% do 3%. Na podstawie analizy statystycznej określono optymalną zawartość wody spieniającej na poziomie 3%, natomiast z wykresu zależności FWC a parametrami ER i HL dla temperatury spieniania 170°C określono zawartość wody w ilości 2,2%.

W tabeli 4.13 przedstawiono podsumowanie rezultatów procesu optymalizacji parametrów spieniania lepiszczy asfaltowych, ze szczególnym uwzględnieniem temperatury lepiszcza asfaltowego oraz ilości wody spieniającej.

Tab. 4.13 Optymalne zakresy parametrów spieniania lepiszczy asfaltowych w kontekście temperatury i ilości dozowanej wody.

Lepiszczce	Temperatura lepiszcza asfaltowego	Ilość wody spieniającej
50/70	140	1,0%-1,7%
45/80-55	145-155	1,0%-1,8%
45/80-80	155-170	1,5%-3,0%

Analiza wyników procesu spieniania lepiszczy asfaltowych 50/70 oraz 45/80-55 stanowiła podstawę do ustalenia, że przy zastosowaniu ilości wody spieniającej w przedziale od 1,0% do 1,8%, możliwe było osiągnięcie równowagi pomiędzy wartościami ekspansji maksymalnej a okresem półtrwania. Zastosowanie lepiszcza HiMA wymagało zastosowania większej ilości wody spieniającej na poziomie 1,5% a 3% w celu uzyskania odpowiednich parametrów ER i HL. W przypadku spieniania asfaltów modyfikowanych polimerami PMB i HiMA w systemie spieniarki laboratoryjnej zaobserwowano znaczący wzrost oporów tłoczenia lepiszcza asfaltowego przy najniższych analizowanych temperaturach spieniania (140°C dla PMB i 155°C dla HiMA). Z uwagi na to nie jest wskazane stosowanie procesu spieniania dla tych lepiszczy poniżej określonych krytycznych temperatur określanych każdorazowo doświadczalnie. Na podstawie uzyskanych parametrów z badań pienistości wybranych lepiszczy asfaltowych określono optymalne temperatury i zawartości wody spieniającej. Dla asfaltu 50/70 i 45/80-55 ustalono zawartość wody spieniającej w ilości 1,5%, temperatura spieniania dla lepiszcza 50/70 na poziomie 140°C, a dla lepiszcza 45/80-55 temperatura wynosiła 150°C. W przypadku asfaltu wysokomodyfikowanego HiMA temperatura spieniania to 160°C oraz zawartość wody spieniającej 2%.

4.4.2 Badania podstawowych parametrów asfaltów

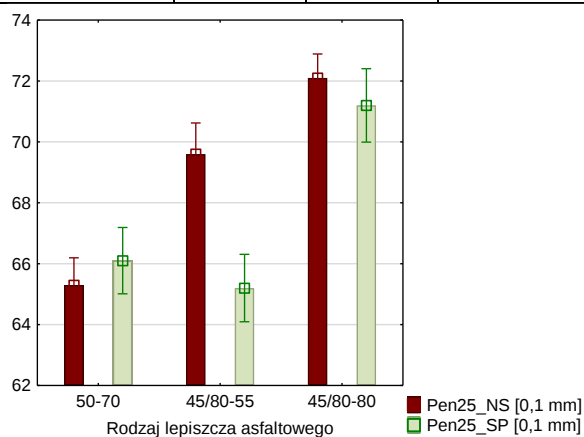
Podstawowe badania lepiszczy asfaltowych zostały zaplanowane w I etapie badań. Wykonano badanie penetracji w 25°C, temperatury mięknięcia metodą „Pierścienia i Kuli”, temperatury łamliwości wg Fraassa, nawrotu sprężystego dla asfaltów modyfikowanych przed oraz po procesie starzenia oraz lepkości dynamicznej w funkcji temperatury. Badania wykonano przed (NS) oraz po procesie spieniania (SP) lepiszczy asfaltowych. W pracy wykonano analizę statystyczną dla każdego parametru w celu określenia istotności rodzaju lepiszcza oraz wpływu procesu spienienia na badane właściwości. Na wykresach słupki reprezentują wartości średnie danego parametru.

Penetracja

Badanie penetracji zostało wykonane zgodnie z normą PN-EN 1426 [N1] po dziesięć pomiarów dla każdego analizowanego lepiszcza asfaltowego w formie spienionej oraz niespienionej. Dokonano oceny istotności statystycznej uzyskanych wyników z wykorzystaniem analizy wariancji oraz wyróżnienia grup homogenicznych z użyciem testu Tukeya. W tabeli 4.14 oraz na rysunku 4.21 przedstawiono wyniki badań penetracji w temperaturze 25°C.

Tab. 4.14 Penetracja w 25°C analizowanych lepiszczy asfaltowych.

Lp.	Lepiszczce	Rodzaj NS-niespionione SP-spionione	Penetracja w 25°C			
			n	$\bar{x}$ (0,1 mm)	s	CV
1.	50/70	NS	10	65	1,19	1,8%
2.		SP	10	66	1,45	2,2%
3.	45/80-55	NS	10	70	1,36	1,9%
4.		SP	10	65	1,47	2,3%
5.	45/80-80	NS	10	72	1,04	1,4%
6.		SP	10	71	1,6	2,2%



Rys. 4.21 Ocena penetracji dla poszczególnych rodzajów lepiszczy asfaltowych.

Na podstawie wykonanych badań zaobserwowano wzrost parametru penetracji w przypadku zastosowania lepiszczy niespionionych wraz ze zmianą rodzaju asfaltu: najniższą wartość posiadało lepiszcze drogowe 50/70, najwyższą lepiszcze wysokomodyfikowane 45/80-55. Asfalty spionione nie zachowały podobnej tendencji, ponieważ dla asfaltu modyfikowanego 45/80-55 odnotowano silny spadek wartości tej cechy po spienieniu w przeciwieństwie do asfaltu 50/70. Nieznaczny wzrost penetracji wystąpił w asfalcie drogowym 50/70 po jego spienieniu, w pozostałych przypadkach proces spieniania obniżył wartość tego parametru. Największą różnicą w penetracji pomiędzy lepiszczem niespionionym i spionionym wynoszącą 5 [0,1 mm] charakteryzowało się lepiszcze modyfikowane 45/80-55.

Wpływ rodzaju lepiszcza asfaltowego i procesu spieniania na wartość penetracji określono przy zastosowaniu analizy wariancji ANOVA – jej wyniki przedstawiono w tabeli 4.15.

Tab. 4.15 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza i procesu spieniania na penetrację asfaltu za pomocą analizy wariancji ANOVA.

Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez			
	Pen25 [0,1 mm] SS	Pen25 [0,1 mm] MS	Pen25 [0,1 mm] F	Pen25 [0,1 mm] p
Wyraz wolny	279483,8	279483,8	135355,4	<0,001
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [1]	375,7	187,9	91,0	<0,001
Spienianie [2]	33,7	33,7	16,3	<0,001
[1] * [2]	70,3	35,1	17,0	<0,001
Błąd	111,5	2,1		
Ogół	591,3			

Uzyskane wartości p-value < 0,001 dla badanych lepiszczy asfaltowych są mniejsze od zakładanego poziomu istotności $\alpha=0,05$. Pozwala to na stwierdzenie, że lepiszcza asfaltowe różnych rodzajów różniły się istotnie wartościami penetracji, oraz że proces spieniania miał istotny wpływ na tę wielkość. Wykazano również istotność statystyczną interakcji pomiędzy rodzajem lepiszcza a jego spienieniem.

Wyniki porównań wielokrotnych z wykorzystaniem testu Tukeya przedstawiono w tabelach 4.16 i 4.17.

Tab. 4.16 Test Tukeya określający grupy homogeniczne w badaniu penetracji w zależności od rodzaju lepiszczy asfaltowych i procesu spieniania.

Rodzaj lepiszcza asfaltowego	Proces spieniania	PEN25 [0.1 mm] Średnia	Test HSD Tukeya MS=2,065		
			1	2	3
45/80-55 {4}	SP	65,2	****		
50/70 {1}	NS	65,3	****		
50/70 {2}	SP	66,1	****		
45/80-55 {3}	NS	69,6		****	
45/80-80 {6}	SP	71,2		****	****
45/80-80 {5}	NS	72,1			****

Tab. 4.17 Test Tukeya porównań wielokrotnych penetracji w zależności od rodzaju lepiszczy asfaltowych i procesu spieniania.

Rodzaj lepiszcza asfaltowego	Proces spieniania	Test HSD Tukeya MS=2,065					
		{1} 65,3	{2} 66,1	{3} 69,6	{4} 65,2	{5} 72,1	{6} 71,2
50/70 {1}	NS		0,813	<0,001	0,999	<0,001	<0,001
50/70 {2}	SP	0,813		<0,001	0,727	<0,001	<0,001
45/80-55 {3}	NS	<0,001	<0,001		<0,001	<0,001	0,145
45/80-55 {4}	SP	0,999	0,727	<0,001		<0,001	<0,001
45/80-80 {5}	NS	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001		0,727
45/80-80 {6}	SP	<0,001	<0,001	0,145	<0,001	0,727	

Wyniki oceny istotności różnic między średnimi wartościami penetracji wykonane testem Tukeya pozwoliły na wskazanie lepiszczy asfaltowych, które osiągnęły zbliżone

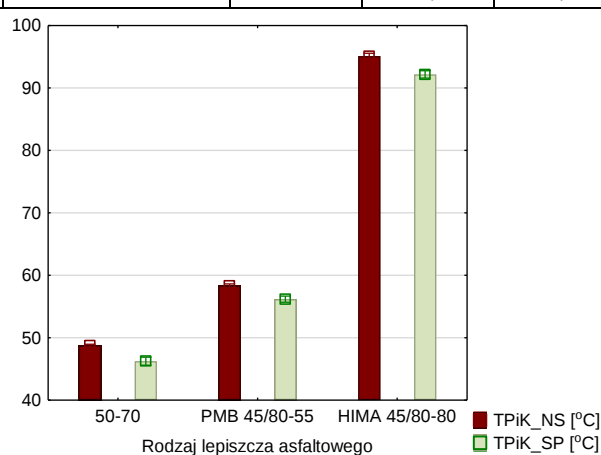
poziomy tego parametru przy braku istotnych statystycznie różnic. Przeprowadzone testy wykazały jednorodność w zakresie penetracji pomiędzy lepiszczem 50/70 NS oraz 50/70 SP. Większość analizowanych grup różniła się istotnie statystycznie. Brak istotnych różnic zauważono również w przypadku lepiszcza wysokomodyfikowanego 45/80-80 SP i 45/80-80 NS.

Temperatura mięknięcia

Badanie temperatury mięknięcia zostało wykonane zgodnie z normą PN-EN 1427 [N2] po osiem pomiarów dla każdego analizowanego lepiszcza asfaltowego w formie spienionej oraz niespionionej. Dokonano oceny istotności statystycznej uzyskanych wyników z wykorzystaniem analizy wariancji oraz wyróżnienia grup homogenicznych z użyciem testu Tukeya. W tabeli 4.18 oraz na rysunku 4.22 przedstawiono wyniki badań temperatury mięknięcia.

Tab. 4.18 Temperatura mięknięcia analizowanych lepiszczy asfaltowych.

Lp.	Lepiszczce	Rodzaj NS-niespionione SP-spionione	Temperatura mięknięcia			
			n	$\bar{x}$ (°C)	s	CV
1.	50/70	NS	8	48,8	0,25	0,5%
2.		SP	8	46,3	0,72	1,5%
3.	45/80-55	NS	8	58,3	0,32	0,5%
4.		SP	8	56,2	0,62	1,1%
5.	45/80-80	NS	8	95,2	0,53	0,6%
6.		SP	8	92,2	0,61	0,7%



Rys. 4.22 Ocena temperatury mięknięcia dla poszczególnych rodzajów lepiszczy asfaltowych.

Na podstawie wykonanych badań zaobserwowano wzrost parametru temperatury mięknięcia w przypadku zastosowania lepiszczy niespionionych oraz poddanych procesowi spieniania wraz ze zmianą rodzaju asfaltu: najniższą wartość posiadało lepiszcze drogowe

50/70, najwyższą lepiszcze wysokomodyfikowane 45/80-55. W każdym przypadku proces spieniania obniżył wartość temperatury mięknięcia. Wszystkie lepiszcza uzyskały zbliżone różnice w wartościach analizowanego parametru pomiędzy lepiszczem niespionym oraz spionym.

Wpływ rodzaju lepiszcza asfaltowego oraz procesu spieniania na wartość temperatury mięknięcia określono przy zastosowaniu analizy wariancji ANOVA a jej wyniki przedstawiono w tabeli 4.19.

Tab. 4.19 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza na temperaturę mięknięcia asfaltu za pomocą analizy wariancji ANOVA.

Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez			
	PiK [°C] SS	PiK [°C] MS	PiK [°C] F	PiK [°C] p
Wyraz wolny	210077,8	210077,8	643794,0	<0,001
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [1]	18972,7	9486,3	29071,4	<0,001
Spienianie [2]	76,2	76,2	233,6	<0,001
[1] * [2]	1,5	0,8	2,3	0,111
Błąd	13,7	0,3		
Ogół	19064,1			

Uzyskane wartości p-value < 0,001 dla lepiszczy asfaltowych są mniejsze od zakładanego poziomu istotności $\alpha=0,05$. Pozwala to na stwierdzenie, że różne rodzaje lepiszcza asfaltowego różniły się istotnie wartością temperatury mięknięcia, oraz że proces spieniania miał istotny wpływ na ten parametr. Nie wykazano istotności statystycznej dla interakcji lepiszcza asfaltowego oraz procesu spieniania.

Wyniki porównań wielokrotnych z wykorzystaniem testu Tukeya przedstawiono w tabelach 4.20 oraz 4.21.

Tab. 4.20 Test Tukeya określający grupy homogeniczne w badaniu temperatury mięknięcia w zależności od rodzaju lepiszczy asfaltowych i procesu spieniania.

Rodzaj lepiszcza asfaltowego	Proces spieniania	PiK [°C] Średnia	Test HSD Tukeya MS=0,326					
			1	2	3	4	5	6
50/70 {2}	SP	46,3	****					
50/70 {1}	NS	48,8		****				
45/80-55 {4}	SP	56,2			****			
45/80-55 {3}	NS	58,3				****		
45/80-80 {6}	SP	92,2					****	
45/80-80 {5}	NS	95,2						****

Tab. 4.21 Test Tukeya porównań wielokrotnych temperatury mięknięcia w zależności od lepiszcza asfaltowego i procesu spieniania.

Rodzaj lepiszcza asfaltowego	Proces spieniania	Test HSD Tukeya MS=0,326					
		{1} 48,8	{2} 46,3	{3} 58,3	{4} 56,2	{5} 95,2	{6} 92,2
50/70 {1}	NS		<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
50/70 {2}	SP	<0,001		<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
45/80-55 {3}	NS	<0,001	<0,001		<0,001	<0,001	<0,001
45/80-55 {4}	SP	<0,001	<0,001	<0,001		<0,001	<0,001
45/80-80 {5}	NS	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001		<0,001
45/80-80 {6}	SP	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	

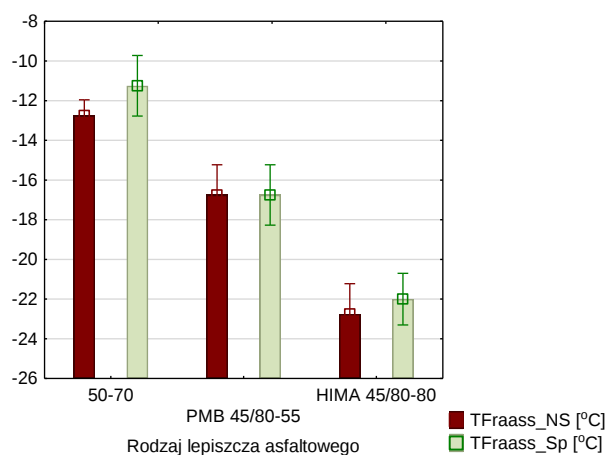
Wyniki oceny istotności różnic między średnimi wartościami temperatury mięknięcia wykonane testem Tukeya pozwoliły stwierdzić, że wszystkie z analizowanych przypadków lepiszczy asfaltowych różniły się istotnie statystycznie w aspekcie temperatury mięknięcia - test Tukeya wykazał brak grup jednorodnych w tym zakresie. Można zatem stwierdzić, że w każdym przypadku proces spieniania spowodował spadek pomierzonej temperatury mięknięcia lepiszczy asfaltowych.

Temperatura łamliwości

Badanie temperatury łamliwości zostało wykonane zgodnie z normą PN-EN 12593 [N3] po cztery pomiary dla każdego analizowanego lepiszcza asfaltowego w formie spienionej oraz niespienionej. Dokonano oceny istotności statystycznej uzyskanych wyników z wykorzystaniem analizy wariancji oraz wyróżnienia grup homogenicznych z użyciem testu Tukeya. W tabeli 4.22 oraz na rysunku 4.23 przedstawiono wyniki badań temperatury łamliwości Fraassa.

Tab. 4.22 Temperatura łamliwości analizowanych lepiszczy asfaltowych.

Lp.	Lepiszczce	Rodzaj NS-niespienione SP-spienione	Temperatura łamliwości Fraassa			
			<i>n</i>	$\bar{x}$ (°C)	<i>s</i>	<i>CV</i>
1.	50/70	NS	4	-13	0,43	3,3%
2.		SP	4	-11	0,83	7,5%
3.	45/80-55	NS	4	-17	0,83	4,9%
4.		SP	4	-17	0,83	4,9%
5.	45/80-80	NS	4	-23	0,83	3,6%
6.		SP	4	-22	0,71	3,2%



Rys. 4.23 Ocena temperatury łamliwości dla poszczególnych rodzajów lepiszczy asfaltowych.

Na podstawie wykonanych badań zaobserwowano spadek temperatury łamliwości w przypadku zastosowania lepiszczy niespianionych oraz poddanych procesowi spieniania wraz ze zmianą rodzaju asfaltu: najwyższą wartość posiadało lepiszcze drogowe 50/70, najniższą lepiszcze wysokomodyfikowane 45/80-55. W przypadku lepiszcza 50/70 oraz 45/80-80 proces spieniania zwiększył wartość temperatury łamliwości, jedynie lepiszcze modyfikowane utrzymało parametr ten na tym samym poziomie.

Wpływ rodzaju lepiszcza asfaltowego oraz procesu spieniania na wartość temperatury łamliwości określono przy zastosowaniu analizy wariancji ANOVA – wyniki przedstawiono w tabeli 4.23.

Tab. 4.23 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza na temperaturę łamliwości asfaltu za pomocą analizy wariancji ANOVA.

Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez			
	Fraass [°C] SS	Fraass [°C] MS	Fraass [°C] F	Fraass [°C] p
Wyraz wolny	6970,042	6970,042	9124,418	<0,001
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [1]	431,583	215,792	282,491	<0,001
Spienianie [2]	3,375	3,375	4,418	0,049
[1] * [2]	2,250	1,125	1,473	0,256
Błąd	13,750	0,764		
Ogół	450,958			

Dla wszystkich ocenianych efektów poza interakcją rodzaju lepiszcza i jego spienienia uzyskano wartości p-value mniejsze od zakładanego poziomu istotności $\alpha=0,05$. Pozwala to na stwierdzenie, że zastosowany rodzaj lepiszcza asfaltowego oraz proces spieniania ma istotny wpływ na temperaturę łamliwości, a między analizowanymi próbkami występują istotne różnice w zależności od rodzaju lepiszcza.

Wyniki porównań wielokrotnych z wykorzystaniem testu Tukeya przedstawiono w tabelach 4.24 i 4.25.

Tab. 4.24 Test Tukeya określający grupy homogeniczne w badaniu temperatury łamliwości w zależności od rodzaju lepiszczy asfaltowych i procesu spieniania.

Rodzaj lepiszcza asfaltowego	Proces spieniania	Fraass [°C] Średnia	Test HSD Tukeya MS=0,764		
			1	2	3
45/80-80 {5}	NS	-23	****		
45/80-80{6}	SP	-22	****		
45/80-55 {4}	SP	-17		****	
45/80-55 {3}	NS	-17		****	
50/70 {1}	NS	-13			****
50/70 {2}	SP	-11			****

Tab. 4.25 Test Tukeya porównań wielokrotnych temperatury łamliwości w zależności od lepiszcza asfaltowego i procesu spieniania.

Rodzaj lepiszcza asfaltowego	Proces spieniania	Test HSD Tukeya MS=0,764					
		{1} -13	{2} -11	{3} -17	{4} -17	{5} -23	{6} -22
50/70 {1}	NS		0,199	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
50/70 {2}	SP	0,199		<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
45/80-55 {3}	NS	<0,001	<0,001		1,000	<0,001	<0,001
45/80-55 {4}	SP	<0,001	<0,001	1,000		<0,001	<0,001
45/80-80 {5}	NS	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001		0,825
45/80-80 {6}	SP	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,825	

Wyniki oceny istotności różnic między średnimi wartościami temperatury łamliwości wykonane testem Tukeya pozwoliły na wskazanie lepiszczy asfaltowych, które osiągnęły zbliżone poziomy tego parametru przy braku istotnych statystycznie różnic. Grupy homogeniczne zostały utworzone w obrębie tych samych lepiszczy asfaltowych przed oraz po procesie spieniania.

Wyniki analizy statystycznej pozwalają stwierdzić, że w łącznej analizie uwzględniającej wszystkie trzy rodzaje lepiszcza asfaltowego proces spieniania spowodował istotny statystycznie wzrost temperatury łamliwości, to w bezpośrednich porównaniach w obrębie każdego z rodzaju lepiszczy efekt ten nie był istotny statystycznie.

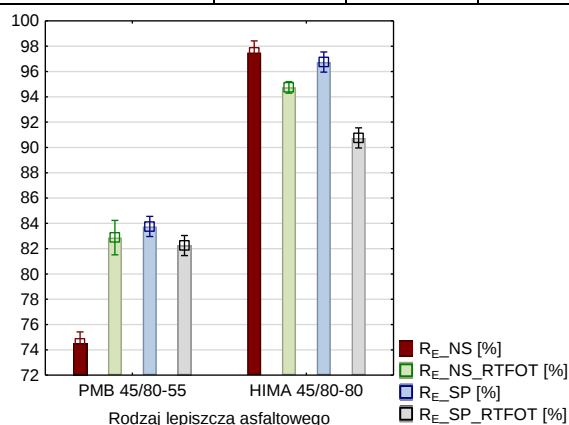
Nawrót sprężysty

Badania nawrotu sprężystego zostały wykonane zgodnie z normą PN-EN 13398 [N5] po cztery pomiary dla lepiszcza asfaltowego w formie spienionej oraz niespienionej. Badanie przeprowadzono dla asfaltu 45/80-55 oraz 45/80-80 przed oraz po procesie starzenia krótkoterminowego RTFOT. Dokonano oceny istotności statystycznej uzyskanych wyników

z wykorzystaniem analizy wariancji oraz wyróżnienia grup homogenicznych z użyciem testu Tukeya. W tabeli 4.26 oraz na rysunku 4.24 przedstawiono wyniki nawrotu sprężystego dla lepiszczy modyfikowanych.

Tab. 4.26 Nawrót sprężysty analizowanych lepiszczy asfaltowych.

Lp.	Lepiszczce	Rodzaj NS-niespianione SP-spianione	Nawrót sprężysty			
			n	$\bar{x}$ (%)	s	CV
1.	45/80-55	NS	4	75	0,50	0,7%
2.		NS RTFOT	4	83	0,74	0,9%
3.		SP	4	84	0,43	0,5%
4.		SP RTFOT	4	82	0,43	0,5%
5.	45/80-80	NS	4	98	0,50	0,5%
6.		NS RTFOT	4	95	0,25	0,3%
7.		SP	4	97	0,43	0,4%
8.		SP RTFOT	4	91	0,43	0,5%



Rys. 4.24 Ocenę nawrotu sprężystego dla poszczególnych rodzajów modyfikowanych lepiszczy asfaltowych.

Lepiszczce 45/80-80 poddane starzeniu krótkoterminowemu wykazało nieznaczny spadek wartości nawrotu sprężystego względem asfaltu niestarzonego w każdym przypadku (niespianione, spianione). Proces starzenia RTFOT wpłynął korzystnie na wartość analizowanego parametru dla lepiszcza 45/80-55 niepoddanego spienianiu, powodując jego wzrost. W przypadku asfaltu 45/80-80 proces spieniania spowodował nieznaczny spadek nawrotu sprężystego.

Wpływ rodzaju lepiszcza asfaltowego na wartość nawrotu sprężystego określono przy zastosowaniu analizy wariancji ANOVA – wyniki przedstawiono w tabeli 4.27.

Tab. 4.27 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza oraz procesu spieniania na wartość nawrotu sprężystego dla lepiszczy niestarczonych oraz po starzeniu za pomocą analizy wariancji ANOVA.

Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez							
	R _E [%] SS	R _E [%] MS	R _E [%] F	R _E [%] p	R _{E_RT} [%] SS	R _{E_RT} [%] MS	R _{E_RT} [%] F	R _{E_RT} [%] p
Wyraz wolny	124256,3	124256,3	426021,4	<0,001	122937,9	122937,9	374667,9	<0,001
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [1]	1296,0	1296,0	4443,4	<0,001	415,1	415,1	1265,2	<0,001
Spienienia [2]	72,3	72,3	247,7	<0,001	21,4	21,4	65,2	<0,001
[1] * [2]	100,0	100,0	342,9	<0,001	11,4	11,4	34,7	<0,001
Błąd	3,5	0,3			3,9	0,3		
Ogół	1471,8				451,9			

Uzyskane wartości p-value < 0,001 dla lepiszczy asfaltowych są mniejsze od zakładanego poziomu istotności $\alpha=0,05$. Pozwala to na stwierdzenie, że zastosowany rodzaj lepiszcza asfaltowego oraz proces spieniania miały istotny wpływ na wartość nawrotu sprężystego, a między analizowanymi próbkami występują istotne różnice w zależności od rodzaju lepiszcza. Istotność statystyczną wykazano również dla interakcji pomiędzy czynnikami.

Wyniki porównań wielokrotnych z wykorzystaniem testu Tukeya przedstawiono w tabelach 4.28 – 4.31.

Tab. 4.28 Test Tukeya określający grupy homogeniczne w badaniu nawrotu sprężystego lepiszczy niestarczonych w zależności od rodzaju lepiszczy asfaltowych i procesu spieniania.

Rodzaj lepiszcza asfaltowego	Proces spieniania	R _E [%] Średnia	Test HSD Tukeya MS=0,292		
			1	2	3
45/80-55 {1}	NS	75		****	
45/80-55 {2}	SP	84			****
45/80-80 {4}	SP	97	****		
45/80-80 {3}	NS	98	****		

Tab. 4.29 Test Tukeya określający grupy homogeniczne w badaniu nawrotu sprężystego lepiszczy starzonych w zależności od rodzaju lepiszczy asfaltowych i procesu spieniania.

Rodzaj lepiszcza asfaltowego	Proces spieniania	R _{E_RT} [%] Średnia	Test HSD Tukeya MS=0,328		
			1	2	3
45/80-55RT {1}	SP	82	****		
45/80-55RT {2}	NS	83	****		
45/80-80RT {4}	SP	91		****	
45/80-80RT {3}	NS	95			****

Tab. 4.30 Test Tukeya porównań wielokrotnych nawrotu sprężystego dla lepiszczy niestarzonych w zależności od rodzaju lepiszcza asfaltowego i procesu spieniania.

Rodzaj lepiszcza asfaltowego	Proces spieniania	Test HSD Tukeya MS=0,292			
		{1} 75	{2} 84	{3} 98	{4} 97
45/80-55 {1}	NS		<0,001	<0,001	<0,001
45/80-55 {2}	SP	<0,001		<0,001	<0,001
45/80-80 {3}	NS	<0,001	<0,001		0,254
45/80-80 {4}	SP	<0,001	<0,001	0,254	

Tab. 4.31 Test Tukeya porównań wielokrotnych nawrotu sprężystego dla lepiszczy starzonych w zależności od rodzaju lepiszcza asfaltowego i procesu spieniania.

Rodzaj lepiszcza asfaltowego	Proces spieniania	Test HSD Tukeya MS=0,328			
		{1} 83	{2} 82	{3} 95	{4} 91
45/80-55RT {1}	NS		0,444	<0,001	<0,001
45/80-55RT {2}	SP	0,444		<0,001	<0,001
45/80-80RT {3}	NS	<0,001	<0,001		<0,001
45/80-80RT {4}	SP	<0,001	<0,001	<0,001	

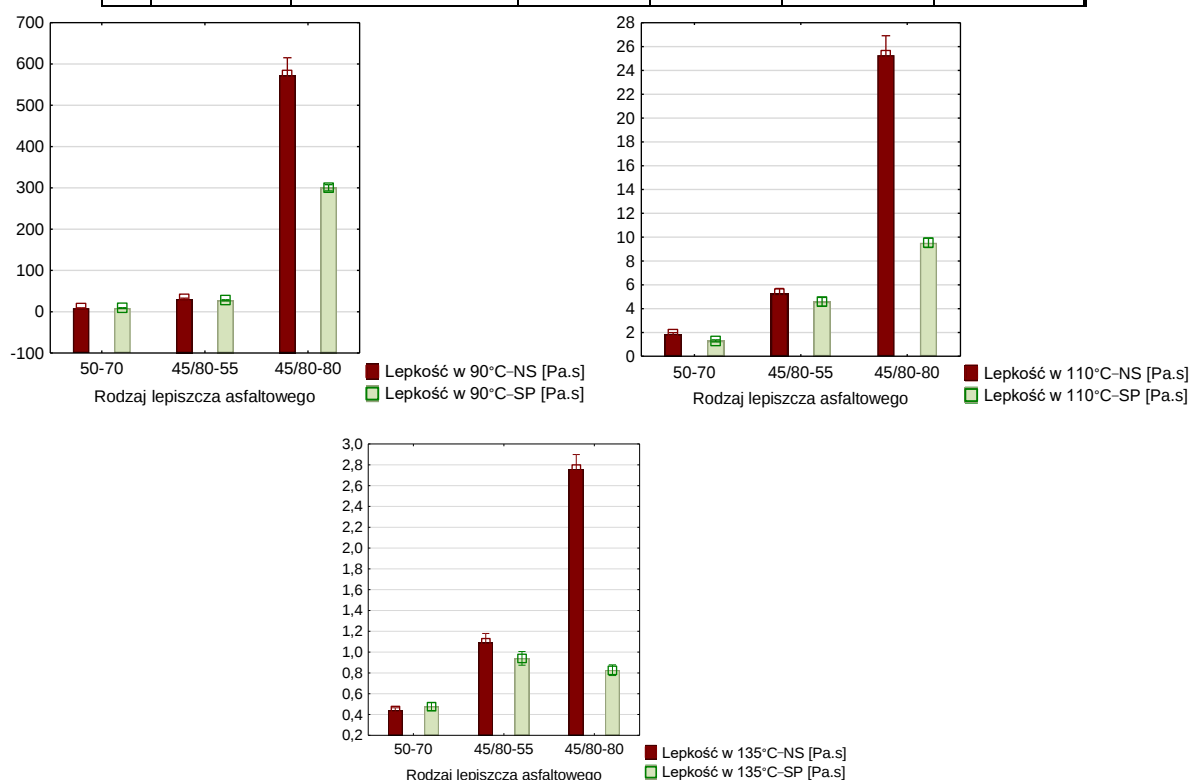
Wyniki oceny istotności różnic między średnimi wartościami nawrotu sprężystego wykonane testem Tukeya pozwoliły na wskazanie lepiszczy asfaltowych, które osiągnęły zbliżone poziomy tego parametru przy braku istotnych statystycznie różnic. Grupy homogeniczne zostały utworzone w obrębie tych samych lepiszczy asfaltowych. W przypadku lepiszczy niepoddanych procesowi starzenia grupy homogeniczne utworzyło lepiszcze wysokomodyfikowane 45/80-80 przed i po procesie spieniania, natomiast w lepiszczach po starzeniu asfalt 45/80-55 przed i po spienianiu. Nie wszystkie analizowane lepiszcza asfaltowe różniły się istotnie statystycznie. Brak różnic zauważono przed starzeniem w obrębie lepiszcza wysokomodyfikowanego 45/80-80 oraz po starzeniu w przypadku lepiszcza 45/80-55 przed i po procesie spieniania.

Lepkość dynamiczna

Badania lepkości dynamicznej zostały wykonane trzykrotnie dla każdego rodzaju lepiszcza asfaltowego w formie spienionej oraz niespienionej. Parametr ten oznaczono w trzech temperaturach: 90°C, 110°C oraz 135°C. Dokonano oceny istotności statystycznej uzyskanych wyników z wykorzystaniem analizy wariancji oraz testu porównań wielokrotnych z użyciem testu Tukeya. W tabeli 4.32 oraz na rysunku 4.25 przedstawiono wyniki lepkości dynamicznej dla analizowanych lepiszczy asfaltowych.

Tab. 4.32 Lepkość dynamiczna analizowanych lepiszczy asfaltowych.

Lp.	Lepiszczce	Rodzaj NS-niespionione SP-spionione	Lepkość dynamiczna			
			n	$\bar{x}$ (Pa·s)	s	CV
1.	50/70	NS 90°C	3	8,69	0,20	2,3%
2.		NS 110°C	3	1,85	0,04	2,3%
3.		NS 135°C	3	0,44	0,01	1,9%
4.		SP 90°C	3	8,9	0,24	2,7%
5.		SP 110°C	3	1,29	0,03	2,2%
6.		SP 135°C	3	0,48	0,01	2,6%
7.	45/80-55	NS 90°C	3	31,01	0,62	2,0%
8.		NS 110°C	3	5,25	0,15	2,8%
9.		NS 135°C	3	1,09	0,03	2,7%
10.		SP 90°C	3	27,74	0,41	1,5%
11.		SP 110°C	3	4,57	0,12	2,2%
12.		SP 135°C	3	0,94	0,01	2,6%
13.	45/80-80	NS 90°C	3	572,97	13,87	2,4%
14.		NS 110°C	3	25,28	0,54	2,1%
15.		NS 135°C	3	2,76	0,05	1,6%
16.		SP 90°C	3	300,29	2,48	0,8%
17.		SP 110°C	3	9,53	0,13	1,3%
18.		SP 135°C	3	0,83	0,02	2,1%



Rys. 4.25 Ocena lepkości dynamicznej dla poszczególnych rodzajów lepiszczy asfaltowych.

Na podstawie wykonanych badań zaobserwowano wzrost lepkości dynamicznej w przypadku zastosowania lepiszczy niespionionych wraz ze zmianą rodzaju asfaltu: najniższą wartość uzyskało lepiszcze drogowe 50/70, najwyższą lepiszcze wysokomodyfikowane 45/80-80, dla którego jednocześnie zanotowano znaczny spadek wartości badanego parametru

po procesie spieniania w każdej temperaturze. W tym przypadku również zanotowano największe różnice pomiędzy lepiszczem niepoddanym procesowi spieniania oraz lepiszczem spienionym. Proces spieniania nie wpłynął znacząco na parametr lepkości dynamicznej lepiszczy asfaltowych 50/70 oraz 45/80-55.

Wpływ rodzaju lepiszcza asfaltowego oraz procesu spieniania na wartość lepkości dynamicznej określono przy zastosowaniu analizy wariancji ANOVA. Porównywane grupy przedstawiono w tabelach 4.33 - 4.35.

Tab. 4.33 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza oraz procesu spieniania na lepkość dynamiczną asfaltu w temperaturze 90°C za pomocą analizy wariancji ANOVA.

Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez			
	L_90 [Pa·s] SS	L_90 [Pa·s] MS	L_90 [Pa·s] F	L_90 [Pa·s] p
Wyraz wolny	450873,2	450873,2	9057,019	<0,001
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [1]	698651,5	349325,7	7017,160	<0,001
Spienianie [2]	38015,4	38015,4	763,642	<0,001
[1] * [2]	73529,6	36764,8	738,521	<0,001
Błąd	597,4	49,8		
Ogół	810793,8			

Tab. 4.34 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza oraz procesu spieniania na lepkość dynamiczną asfaltu w temperaturze 110°C za pomocą analizy wariancji ANOVA.

Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez			
	L_110 [Pa·s] SS	L_110 [Pa·s] MS	L_110 [Pa·s] F	L_110 [Pa·s] p
Wyraz wolny	1140,986	1140,986	13287,89	<0,001
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [1]	836,056	418,028	4868,34	<0,001
Spienianie [2]	144,330	144,330	1680,86	<0,001
[1] * [2]	228,928	114,464	1333,04	<0,001
Błąd	1,030	0,086		
Ogół	1210,344			

Tab. 4.35 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza oraz procesu spieniania na lepkość dynamiczną asfaltu w temperaturze 135°C za pomocą analizy wariancji ANOVA.

Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez			
	L_135 [Pa·s] SS	L_135 [Pa·s] MS	L_135 [Pa·s] F	L_135 [Pa·s] p
Wyraz wolny	21,342	21,342	21827,27	<0,001
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [1]	5,396	2,698	2759,22	<0,001
Spienianie [2]	2,094	2,094	2142,02	<0,001
[1] * [2]	3,548	1,774	1814,32	<0,001
Błąd	0,012	0,001		
Ogół	11,050			

Uzyskane wartości p-value < 0,001 dla lepiszczy asfaltowych są mniejsze od zakładanego poziomu istotności $\alpha=0,05$. Pozwala to na stwierdzenie, że lepiszcza asfaltowe

różniły się istotnie wartością lepkości dynamicznej, oraz że proces spieniania miał istotny wpływ na ten parametr bez względu na temperaturę badania. W każdym analizowanym przypadku zastosowany rodzaj lepiszcza miał większy wpływ na parametr lepkości niż proces spieniania. Interakcja pomiędzy badanymi czynnikami również okazała się istotna statystycznie w każdej badanej temperaturze.

Wyniki porównań wielokrotnych z wykorzystaniem testu Tukeya przedstawiono w tabelach 4.36 – 4.41.

Tab. 4.36 Test Tukeya określający grupy homogeniczne w badaniu lepkości w temperaturze 90°C w zależności od rodzaju lepiszczy asfaltowych i procesu spieniania.

Rodzaj lepiszcza asfaltowego	Proces spieniania	L ₉₀ [Pa·s] Średnia	Test HSD Tukeya MS=49,782			
			1	2	3	4
50/70 {1}	NS	8,69	****			
50/70 {2}	SP	8,90	****			
45/80-55 {4}	SP	27,74	****	****		
45/80-55 {3}	NS	31,01		****		
45/80-80 {6}	SP	300,29			****	
45/80-80 {5}	NS	572,97				****

Tab. 4.37 Test Tukeya określający grupy homogeniczne w badaniu lepkości w temperaturze 110°C w zależności od rodzaju lepiszczy asfaltowych i procesu spieniania.

Rodzaj lepiszcza asfaltowego	Proces spieniania	L ₁₁₀ [Pa·s] Średnia	Test HSD Tukeya MS=0,086			
			1	2	3	4
50/70 {2}	SP	1,29	****			
50/70 {1}	NS	1,85	****			
45/80-55 {4}	SP	4,57		****		
45/80-55 {3}	NS	5,25		****		
45/80-80 {6}	SP	9,53			****	
45/80-80 {5}	NS	25,28				****

Tab. 4.38 Test Tukeya określający grupy homogeniczne w badaniu lepkości w temperaturze 135°C w zależności od rodzaju lepiszczy asfaltowych i procesu spieniania.

Rodzaj lepiszcza asfaltowego	Proces spieniania	L ₁₃₅ [Pa·s] Średnia	Test HSD Tukeya MS=0,001				
			1	2	3	4	
50/70 {1}	NS	0,44	****				
50/70 {2}	SP	0,48	****				
45/80-80 {6}	SP	0,83		****			
45/80-55 {4}	SP	0,94			****		
45/80-55 {3}	NS	1,09				****	
45/80-80 {5}	NS	2,76					****

Tab. 4.39 Test Tukeya porównań wielokrotnych lepkości dynamicznej w temperaturze 90°C w zależności od rodzaju lepiszcza asfaltowego i procesu spieniania.

Rodzaj lepiszcza asfaltowego	Proces spieniania	Test HSD Tukeya MS=49,782					
		{1} 8,69	{2} 8,90	{3} 31,01	{4} 27,74	{5} 527,97	{6} 300,29
50/70 {1}	NS		1,000	0,021	0,055	<0,001	<0,001
50/70 {2}	SP	1,000		0,022	0,058	<0,001	<0,001
45/80-55 {3}	NS	0,021	0,022		0,991	<0,001	<0,001
45/80-55 {4}	SP	0,055	0,058	0,991		<0,001	<0,001
45/80-80 {5}	NS	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001		<0,001
45/80-80 {6}	SP	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	

Tab. 4.40 Test Tukeya porównań wielokrotnych lepkości dynamicznej w temperaturze 110°C w zależności od rodzaju lepiszcza asfaltowego i procesu spieniania.

Rodzaj lepiszcza asfaltowego	Proces spieniania	Test HSD Tukeya MS=0,086					
		{1} 1,85	{2} 1,29	{3} 5,25	{4} 4,57	{5} 25,28	{6} 9,53
50/70 {1}	NS		0,251	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
50/70 {2}	SP	0,251		<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
45/80-55 {3}	NS	<0,001	<0,001		0,117	<0,001	<0,001
45/80-55 {4}	SP	<0,001	<0,001	0,117		<0,001	<0,001
45/80-80 {5}	NS	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001		<0,001
45/80-80 {6}	SP	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	

Tab. 4.41 Test Tukeya porównań wielokrotnych lepkości dynamicznej w temperaturze 135°C w zależności od rodzaju lepiszcza asfaltowego i procesu spieniania.

Rodzaj lepiszcza asfaltowego	Proces spieniania	Test HSD Tukeya MS=0,001					
		{1} 0,44	{2} 0,48	{3} 1,09	{4} 0,94	{5} 2,76	{6} 0,83
50/70 {1}	NS		0,707	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
50/70 {2}	SP	0,707		<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
45/80-55 {3}	NS	<0,001	<0,001		<0,001	<0,001	<0,001
45/80-55 {4}	SP	<0,001	<0,001	<0,001		<0,001	<0,001
45/80-80 {5}	NS	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001		<0,001
45/80-80 {6}	SP	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	

Wyniki oceny istotności różnic między średnimi wartościami lepkości dynamicznej wykonane testem Tukeya pozwoliły na wskazanie lepiszczy asfaltowych, które osiągnęły zbliżone poziomy tego parametru przy braku istotnych statystycznie różnic. W żadnej z temperatur nie wykazano istotnych różnic między lepkością dynamiczną niespionego i spionego lepiszcza 50/70, podobnie dla lepiszcza 45/80-55, ale tylko w temperaturze 90°C. W pozostałych przypadkach różnice w lepkościach dynamicznych lepiszczy niespionych i spionych były istotne statystycznie.

4.4.3 Podsumowanie etapu I

Na bazie zrealizowanych prac badawczych i analiz określono optymalne parametry spieniania lepiszczy asfaltowych oraz wpływ procesu spieniania na właściwości lepiszczy asfaltowych. Dzięki tej analizie możliwe jest efektywne ustalenie warunków, które wpływają na parametry spieniania, co ma kluczowe znaczenie w kontekście zapewnienia optymalnej wydajności oraz właściwości fizycznych otrzymywanej piany asfaltowej.

Analiza wyników procesu spieniania lepiszczy asfaltowych pozwoliła na określenie optymalnej temperatury oraz zawartości wody dla każdego analizowanego lepiszcza na podstawie maksymalnej ekspansji oraz czasu półtrwania piany asfaltowej. Dla asfaltu 50/70 ustalono temperaturę spieniania na poziomie 140°C oraz zawartość wody spieniającej w ilości 1,5%, przy zastosowaniu lepiszcza 45/80-55 optymalna temperatura lepiszcza to 150°C, a zawartość FWC 1,5%, natomiast w przypadku asfaltu wysokomodyfikowanego HiMA temperatura spieniania to 155°C oraz zawartość wody spieniającej 3%.

Analiza badań parametrów podstawowych lepiszczy asfaltowych ujawniła istotny wpływ rodzaju lepiszcza oraz procesu spieniania na analizowane właściwości. Najkorzystniejszymi parametrami charakteryzowało się lepiszcze wysokomodyfikowane 45/80-80, jednak pozostałe asfalty spełniały wymagania w zakresie badanych parametrów. W każdym przypadku rodzaj lepiszcza miał znacznie bardziej istotny wpływ na badany parametr niż proces spieniania. Spienianie lepiszczy asfaltowych nie wpływało istotnie na pogorszenie ich właściwości, dlatego zostały wykorzystane w kolejnym etapie do przygotowania mieszanek mineralno-asfaltowych.

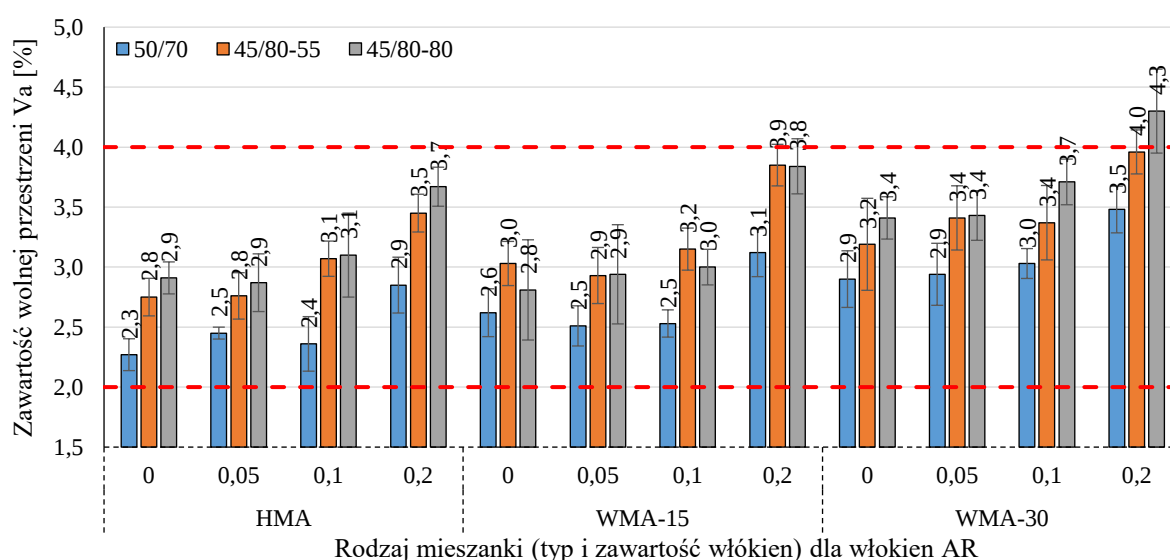
4.5 Etap II – badania podstawowe mieszanek mineralno-asfaltowych

Badania etapu II obejmowały określenie wpływu rodzaju asfaltu, rodzaju i ilości włókien oraz technologii wytwarzania mma na podstawowe parametry zgodnie z WT-2 2014 [198]. Wykonano analizę statystyczną dla poszczególnych rodzajów lepiszczy asfaltowych oraz analizę wieloczynnikową mającą na celu określenie istotności wymienionych czynników oraz interakcję pomiędzy poszczególnymi zmiennymi. Zostały wytypowane również grupy homogeniczne mieszanek mineralno-asfaltowych za pomocą testu Tukeya. Na wykresach kolorem niebieskim oznaczono mieszanki wykonane na bazie lepiszcza asfaltowego 50/70, kolorem pomarańczowym wykonane z lepiszczem modyfikowanym 45/80-55, natomiast kolorem szarym mieszanki z lepiszczem wysokomodyfikowanym 45/80-80. Wszystkie analizowane mieszanki zostały posegregowane na wykresach ze względu na technologię

wytwarzania: „na gorąco” HMA, na ciepło WMA z asfaltem spienionym w obniżonej temperaturze zagęszczania o 15°C oraz mieszanki WMA wytwarzane z asfaltem spienionym w temperaturze zredukowanej o 30°C względem tradycyjnej technologii.

4.5.1 Badania wpływu ilości i rodzaju włókien w mma na zawartość wolnej przestrzeni

Wyniki badań zawartości wolnej przestrzeni w próbkach mma z dodatkiem włókien aramidowych wykonanych zgodnie z planem eksperymentu z etapu II przedstawiono na rysunku 4.26. Czerwonymi liniami zaznaczono wymaganą minimalną oraz maksymalną wartość dla AC 11S KR 5-7 zgodnie z WT-2 2014 [198].



Rys. 4.26 Zawartość wolnej przestrzeni w mieszankach mineralno-asfaltowych z włóknami aramidowymi.

Mieszanki wykonane w technologii HMA i WMA-15°C charakteryzowały się zbliżonymi zawartościami wolnej przestrzeni przy tych samych zawartościach dodatku włókien. Obniżenie temperatury o dodatkowe 15°C skutkowało pogorszeniem zagęszczenia próbek (zwiększeniem parametru V_a). Dodatkowo, dodanie i zwiększanie zawartości włókien w badanych mieszankach skutkowało wzrostem parametru V_a . Spośród wszystkich analizowanych mieszanek, tylko mieszanka wykonana w technologii obniżonej temperatury o 30°C z lepiszczem wysokomodyfikowanym i dodatkiem 0,2% włókien AR nie spełniła wymagań WT-2 2014 w analizowanym zakresie, przekraczając wartość maksymalną zawartości wolnej przestrzeni. Przy górnej granicy wymaganego zakresu V_a znalazły się również mieszanki z ilością włókien wynoszącą 0,2% wytwarzane w temperaturze obniżonej o 15°C z lepiszczem 45/80-55 i 45/80-80 oraz mieszanka WMA-30°C z lepiszczem

45/80-55. Najbardziej zbliżone do mieszanek referencyjnych wartości V_a posiadały próbki z dodatkiem włókien w ilości 0,05% oraz 0,1% bez względu na technologię wytwarzania i zastosowane lepiszcze. Wzrost zawartości włókien oraz obniżenie temperatury w każdym przypadku skutkowało zwiększeniem zawartości wolnej przestrzeni w próbkach. Próbki wykonane z lepiszczami modyfikowanymi polimerami charakteryzowały się zauważalnie wyższymi wartościami badanego parametru.

Wpływ rodzaju lepiszcza asfaltowego, technologii wytwarzania oraz zawartości włókien aramidowych na zawartość wolnej przestrzeni w próbkach analizowano szczegółowo przy zastosowaniu analizy wariancji ANOVA. Wyniki porównań wielokrotnych z wykorzystaniem testu Tukeya przedstawiono w tabeli 4.42 oraz w załączniku Z.1.

Tab. 4.42 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza, technologii wytwarzania oraz zawartości włókien aramidowych na zawartość wolnej przestrzeni za pomocą analizy wariancji ANOVA.

Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez			
	Va SS	Va MS	Va F	Va p
Wyraz wolny	2088,427	2088,427	43459,94	<0,001
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [1]	13,925	6,963	144,89	<0,001
Technologia wytwarzania [2]	11,642	5,821	121,14	<0,001
Zawartość włókien aramidowych [3]	18,911	6,304	131,18	<0,001
[1] * [2]	0,741	0,185	3,85	0,005
[1] * [3]	0,758	0,126	2,63	0,018
[2] * [3]	0,310	0,052	1,07	0,380
[1] * [2] * [3]	0,463	0,039	0,80	0,647
Błąd	8,650	0,048		

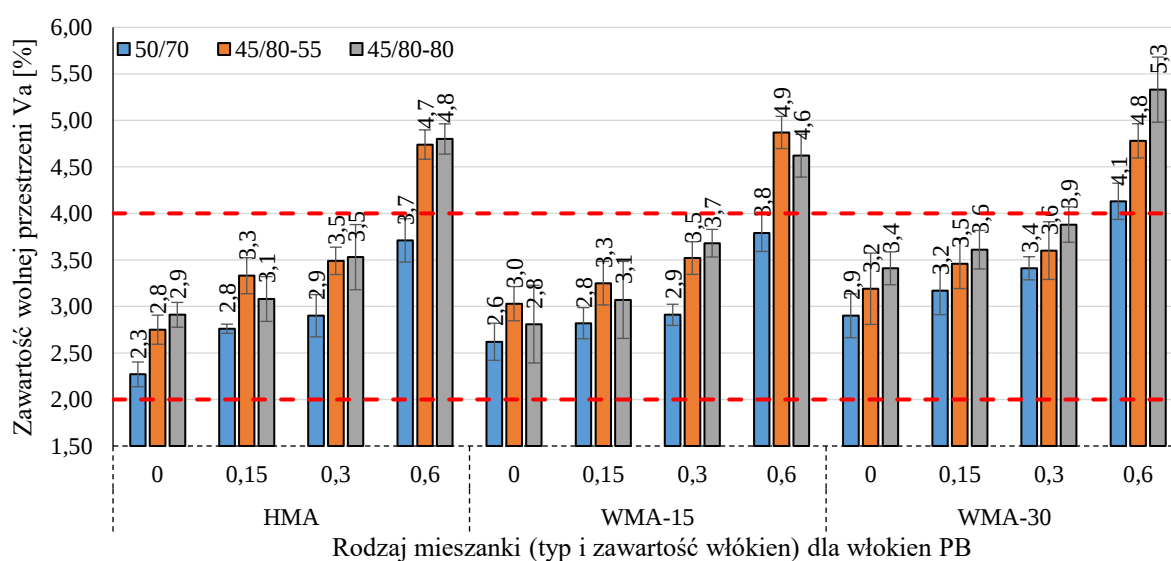
Wykonana analiza wariancji wykazała istotność statystyczną wszystkich efektów głównych oraz interakcji między rodzajem lepiszcza asfaltowego a technologią wytwarzania oraz rodzajem lepiszcza a zawartością włókien aramidowych ($p < 0,05$). Pozwala to na stwierdzenie, że zastosowany rodzaj lepiszcza asfaltowego, technologia wytwarzania oraz zawartość włókien aramidowych ma istotny wpływ na zawartość wolnych przestrzeni w próbkach.

Ocena istotności różnic między średnimi zawartościami wolnej przestrzeni wykonana za pomocą testu Tukeya pozwoliła na wskazanie mieszanek mineralno-asfaltowych, które osiągnęły zbliżone poziomy tego parametru przy braku istotnych statystycznie różnic. W technologii HMA przy zastosowaniu każdego rodzaju lepiszcza asfaltowego zauważono brak istotnych statystycznie różnic między mieszankami referencyjnymi a mieszankami z dodatkiem włókien aramidowych w ilościach 0,05% i 0,1%. Istotność statystyczną różnic w zawartości wolnej przestrzeni w tym przypadku wykazano względem mieszanki o zawartości

włókien 0,2%. Stwierdzić można zatem, że dodanie 0,05% i 0,1% włókien aramidowych nie wpłynęło na zwiększenie zawartości wolnej przestrzeni w próbkach z mieszanki HMA.

Nie potwierdzono również występowania istotnych statystycznie różnic między mieszanką z lepiszczem asfaltowym 45/80-80 wykonaną w technologii WMA-30°C z dodatkiem włókien w ilości 0,2% a trzema innymi mieszankami z 0,2% włókien aramidowych: z lepiszczem 45/80-55 w technologii obniżonych temperatur (-15°C i -30°C) oraz mieszanki z lepiszczem 45/80-80 wytwarzanej w temperaturze obniżonej o 15°C z tą samą zawartością zbrojenia rozproszonego. Oznacza to, że dodatek 0,2% włókien aramidowych, niezależnie od technologii produkcji, skutkowało znacznym pogorszeniem zagęszczenia badanych próbek. Były to cztery mieszanki o największej zawartości wolnej przestrzeni, zbliżonej do wartości granicznej 4%.

Wyniki badań zawartości wolnej przestrzeni w próbkach mma z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych wykonanych zgodnie z planem eksperymentu z etapu II przedstawiono na rysunku 4.27. Czerwonymi liniami zaznaczono minimalną oraz maksymalną wartość dla AC 11S KR 5-7 zgodnie z Wymaganiami Technicznymi [198].



Rys. 4.27 Zawartość wolnej przestrzeni w mieszankach mineralno-asfaltowych z włóknami polimerowo-bazaltowymi.

Spośród wszystkich analizowanych mieszanek, mieszanki z lepiszczami modyfikowanymi polimerami oraz dodatkiem 0,6% włókien polimerowo-bazaltowych bez względu na technologię wytwarzania, a także mieszanka z lepiszczem 50/70 wytwarzana w technologii WMA-30°C i zbrojeniem rozproszonym w ilości 0,6% nie spełniły wymagań zawartych w WT-2 2014. Najniższymi wartościami badanego parametru charakteryzowały się mieszanki przygotowane z asfaltem drogowym 50/70 w każdej technologii wytwarzania

i zagęszczania. W technologii WMA-30°C zaobserwowano wzrost zawartości wolnej przestrzeni wraz ze zwiększeniem ilości dozowanego włókna PB oraz zawartości polimeru w lepiszczu asfaltowym (45/80-55 względem 45/80-80). Podobnie jak w przypadku zastosowania włókien aramidowych, zwiększenie ilości dozowanych włókien polimerowo-bazaltowych oraz obniżanie temperatury zagęszczania zwiększało wartość badanego parametru. Najbardziej zbliżone do mieszanek referencyjnych wartości V_a posiadały próbki z dodatkiem włókien w ilości 0,15% bez względu na technologię wytwarzania i zastosowane lepiszcze.

Wpływ rodzaju lepiszcza asfaltowego, technologii wytwarzania oraz zawartości włókien polimerowo-bazaltowych na zawartość wolnej przestrzeni w próbkach określono przy zastosowaniu analizy wariancji ANOVA. Wyniki porównań wielokrotnych z wykorzystaniem testu Tukeya przedstawiono w tabeli 4.43 oraz w załączniku Z.2.

Tab. 4.43 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza, technologii wytwarzania oraz zawartości włókien polimerowo-bazaltowych na zawartość wolnej przestrzeni za pomocą analizy wariancji ANOVA.

Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez			
	Va SS	Va MS	Va F	Va p
Wyraz wolny	2651,253	2651,253	47833,12	<0,001
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [1]	16,396	8,198	147,90	<0,001
Technologia wytwarzania [2]	6,158	3,079	55,55	<0,001
Zawartość włókien polimerowo-bazaltowych [3]	84,265	28,088	506,76	<0,001
[1] * [2]	1,337	0,334	6,03	<0,001
[1] * [3]	3,069	0,511	9,23	<0,001
[2] * [3]	0,324	0,054	0,97	0,444
[1] * [2] * [3]	0,794	0,066	1,19	0,290
Błąd	9,977	0,055		

Wykonana analiza wariancji wykazała istotność statystyczną wszystkich efektów głównych oraz interakcji między rodzajem lepiszcza asfaltowego a technologią wytwarzania oraz rodzajem lepiszcza a zawartością włókien aramidowych ($p < 0,05$). Pozwala to na stwierdzenie, że zastosowany rodzaj lepiszcza asfaltowego, technologia wytwarzania oraz zawartość włókien PB miały istotny wpływ na zawartość wolnych przestrzeni w próbkach.

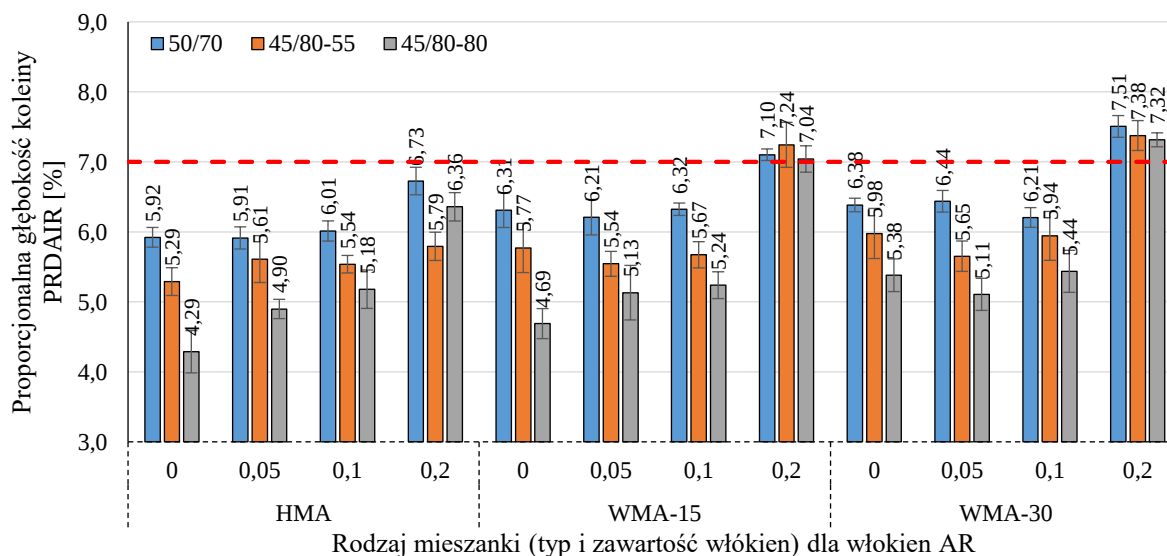
Ocena istotności różnic między średnimi zawartościami wolnej przestrzeni wykonana za pomocą testu Tukeya pozwoliła na wskazanie mieszanek mineralno-asfaltowych, które osiągnęły zbliżone poziomy tego parametru przy braku istotnych statystycznie różnic. W każdej z analizowanych technologii przy zastosowaniu każdego rodzaju lepiszcza asfaltowego i dodatku 0,6% włókien PB zauważono istotność statystyczną pomiędzy mieszankami z dodatkiem włókien w ilości 0,0%, 0,15% i 0,3%. Dodatek 0,6% włókien polimerowo-

bazaltowych znacząco wpłynął na zwiększenie zawartości wolnej przestrzeni w mieszankach w każdej technologii ich wytwarzania i zagęszczania.

Nie potwierdzono występowania istotnych statystycznie różnic między mieszanką z lepiszczem asfaltowym 45/80-80 wykonaną w technologii WMA-30°C z dodatkiem włókien w ilości 0,6% a mieszanką z taką samą zawartością włókien polimerowo-bazaltowych wytwarzaną w temperaturze obniżonej o 15°C. We wszystkich pozostałych przypadkach ta mieszanka istotnie różniła się od innych w aspekcie zawartości wolnej przestrzeni. Oznacza to, że dodatek 0,6% włókien polimerowo-bazaltowych skutkowało znacznym pogorszeniem zagęszczenia badanych próbek mma w technologii obniżonych temperatur wytwarzania i zagęszczania.

4.5.2 Badania wpływu ilości i rodzaju włókien w mma na odporność na deformacje trwałe

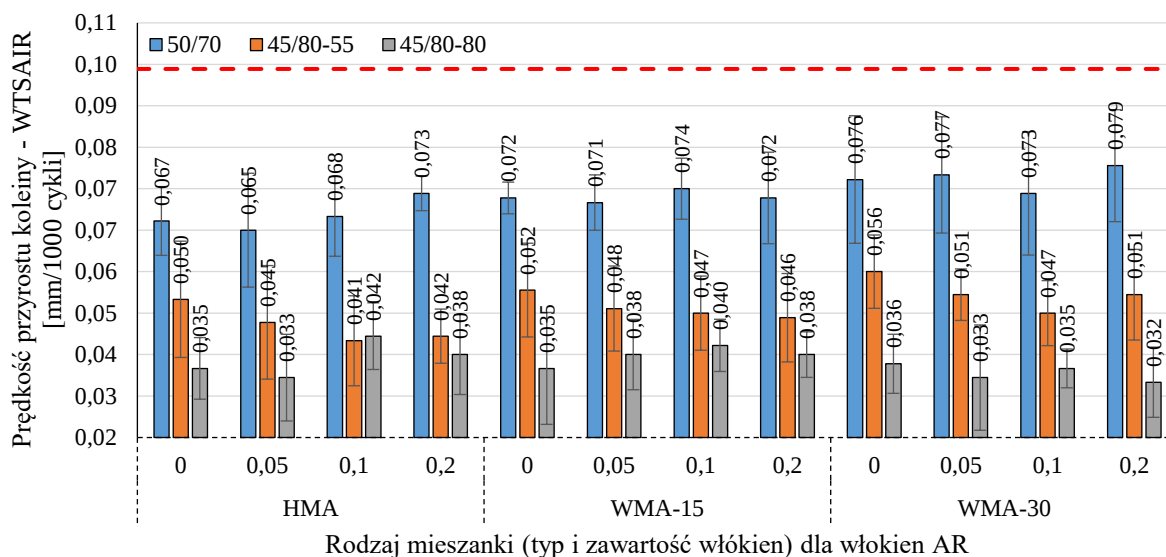
Wyniki badań odporności na powstawanie deformacji trwałych w próbkach mma z dodatkiem włókien aramidowych wykonanych zgodnie z planem eksperymentu z etapu II przedstawiono na rysunkach 4.28 - 4.29. Czerwoną linią zaznaczono maksymalną wartość proporcjonalnej głębokości koleiny PRD i tempa przyrostu koleiny WTS dla AC 11S KR 5-7 zgodnie z WT-2 2014 [198].



Rys. 4.28 Proporcjonalna głębokość koleiny w mieszankach mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien aramidowych.

Mieszanki mineralno-asfaltowe z dodatkiem 0,2% włókien aramidowych wytwarzane w obniżonych temperaturach nie spełniły wymagań w zakresie proporcjonalnej głębokości koleiny zgodnie z WT-2 2014. Przy górnej granicy dopuszczalnego zakresu znalazła się

mieszanka z lepiszczem 50/70 wykonana w technologii HMA z dodatkiem 0,2% włókien AR. Pozostałe mieszanki uzyskały wartości zbliżone do referencyjnych w obrębie określonej technologii wytwarzania i zagęszczania. We wszystkich próbkach zaobserwowano nieznaczny wzrost proporcjonalnej głębokości koleiny wraz z obniżeniem temperatury wytwarzania mieszanek. Najniższymi wartościami PRD bez względu na ilość włókien i technologię wytwarzania charakteryzowały się mieszanki z lepiszczem asfaltowym 45/80-80. Dodatek włókien w ilości 0,05% oraz 0,1% nie wpłynął na zmianę wartości PRD w odniesieniu do mieszanek referencyjnych.



Rys. 4.29 Prędkość przyrostu koleiny w mieszankach mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien aramidowych.

Wszystkie analizowane mieszanki spełniły wymagania WT-2 w zakresie prędkości przyrostu koleiny WTS. Dodatek zbrojenia rozproszonego bez względu na rodzaj użytego lepiszcza i zastosowaną technologię wytwarzania nie wpłynął w znaczący sposób na zmianę tego parametru. Analizowane mieszanki uzyskały wyniki zbliżone do mieszanek referencyjnych w zakresie WTS. Najniższymi wartościami parametru WTS charakteryzowały się mieszanki wytwarzane z lepiszczem wysokomodyfikowanym 45/80-80 bez względu na technologię wytwarzania i ilość włókien AR. Jedynie zastosowanie 0,1% dodatku zbrojenia rozproszonego w technologii HMA skutkowało zbliżonym tempem przyrostu koleiny przy zastosowaniu lepiszczy 45/80-55 i 45/80-80. Nie zaobserwowano wpływu obniżania temperatur produkcji i zagęszczania mieszanek mineralno-asfaltowych na tempo przyrostu koleiny.

Wpływ rodzaju lepiszcza asfaltowego, technologii wytwarzania oraz zawartości włókien aramidowych na odporność na powstawanie deformacji trwałych w próbkach

analizowano szczegółowo przy zastosowaniu analizy wariancji ANOVA. Wyniki porównań wielokrotnych z wykorzystaniem testu Tukeya przedstawiono w tabeli 4.44 oraz w załącznikach Z.3 i Z.4.

Tab. 4.44 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza, technologii wytwarzania oraz zawartości włókien aramidowych na odporność na powstawanie deformacji trwałych za pomocą analizy wariancji ANOVA.

Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez PRD				Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez WTS			
	PRD SS	PRD MS	PRD F	PRD p	WTS SS	WTS MS	WTS F	WTS p
Wyraz wolny	5112,870	5112,870	249160,4	<0,001	0,389	0,389	11961,19	<0,001
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [1]	20,134	10,067	490,6	<0,001	0,033	0,016	500,59	<0,001
Technologia wytwarzania [2]	8,913	4,457	217,2	<0,001	0,000	0,000	6,22	<0,001
Zawartość włókien aramidowych [3]	46,775	15,592	759,8	<0,001	0,000	0,000	0,79	0,505
[1] * [2]	0,244	0,061	3,0	<0,001	0,001	0,000	4,35	<0,001
[1] * [3]	5,450	0,908	44,3	<0,001	0,001	0,000	2,88	<0,001
[2] * [3]	3,346	0,558	27,2	<0,001	0,000	0,000	0,78	0,584
[1] * [2] * [3]	2,147	0,179	8,7	<0,001	0,000	0,000	0,49	0,916
Błąd	2,216	0,021			0,004	0,000		

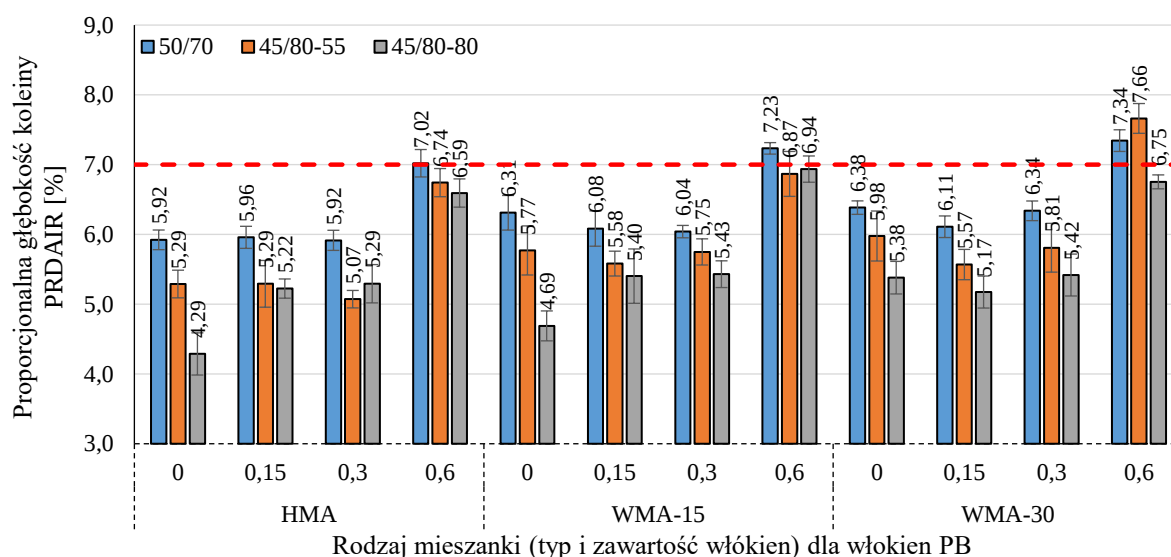
Wykonana analiza wariancji dla proporcjonalnej głębokości koleiny wykazała istotność statystyczną wszystkich efektów głównych oraz interakcji pomiędzy rodzajem lepiszcza, technologią wytwarzania i zawartością włókien aramidowych ($p < 0,05$). Pozwala to na stwierdzenie, że zastosowany rodzaj lepiszcza asfaltowego, technologia wytwarzania oraz zawartość włókien aramidowych miały istotny wpływ na wartość proporcjonalnej głębokości koleiny. Analiza wariancji dla prędkości przyrostu koleiny wykazała brak istotności statystycznej zawartości włókien aramidowych w mma ($p > 0,001$) oraz interakcji tego czynnika z technologią wytwarzania. Pozostałe analizowane czynniki i interakcje wykazały istotność statystyczną. Na prędkość przyrostu koleiny istotny wpływ miał rodzaj zastosowanego lepiszcza asfaltowego oraz technologia wytwarzania i zagęszczania mma.

Ocena istotności różnic między średnimi wartościami proporcjonalnej głębokości koleiny wykonana za pomocą testu Tukeya pozwoliła na wskazanie mieszanek mineralno-asfaltowych, które osiągnęły zbliżone poziomy tego parametru przy braku istotnych statystycznie różnic. W każdej technologii wytwarzania mma przy zastosowaniu lepiszczy asfaltowych 50/70 i 45/80-55 zauważono brak istotnych statystycznie różnic parametru PRD między mieszankami referencyjnymi a mieszankami z dodatkiem włókien aramidowych w ilości 0,05% i 0,1%. Jako istotnie różniącą się w tym przypadku mieszanki o zawartości włókien 0,2%. Stwierdzić można zatem, że dodanie 0,05% i 0,1% włókien aramidowych

nie wpłynęło istotnie na zmianę parametru proporcjonalnej głębokości koleiny w próbkach mma.

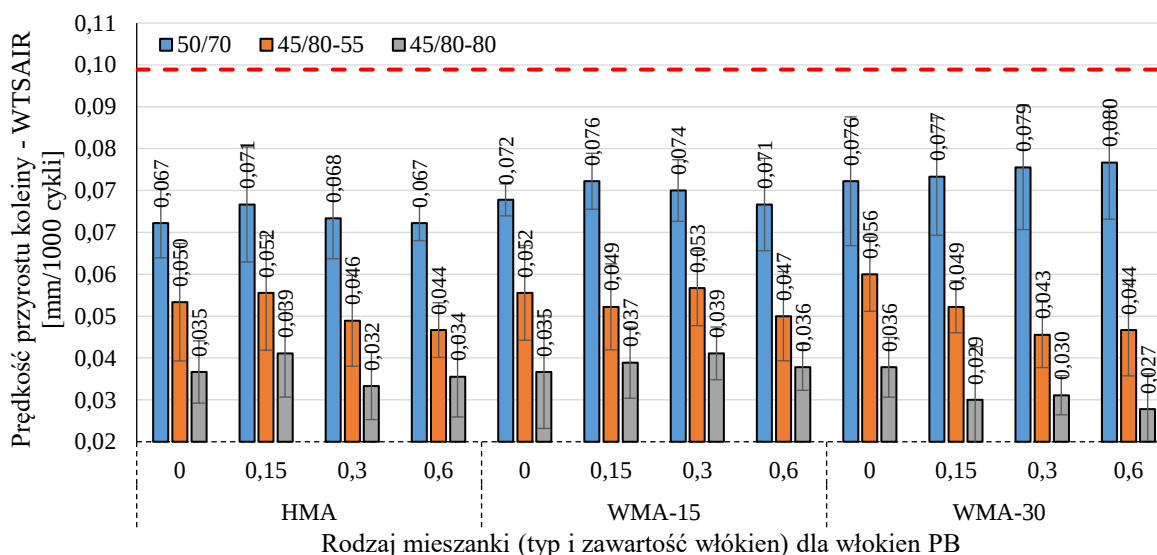
Nie potwierdzono również występowania istotnych statystycznie różnic proporcjonalnej głębokości koleiny między mieszanką z lepiszczem asfaltowym 50/70 wykonaną w technologii WMA-30°C z dodatkiem włókien aramidowych w ilości 0,2% a trzema innymi mieszankami: z lepiszczem 45/80-55 w technologii obniżonej temperatury o 30°C bez oraz z dodatkiem włókien w ilości 0,2%, a także mieszanki z lepiszczem 45/80-80 wytwarzanej w technologii WMA-30°C z tą samą zawartością zbrojenia rozproszonego. Oznacza to, że dodatek 0,2% włókien aramidowych w technologii obniżonych temperatur skutkowało znacznym pogorszeniem odporności na powstawanie kolein. Mieszanka referencyjna z lepiszczem 45/80-80 wykonana w technologii HMA różniła się istotnie w tym aspekcie od wszystkich pozostałych analizowanych mieszanek. Mieszanki z lepiszczem 50/70 nie różniły się istotnie w obrębie mieszanek referencyjnych oraz z ilością włókien 0,05% oraz 0,1%, istotne różnice występowały w mieszankach ze zwiększoną ilością zbrojenia w ilości 0,2%. Podobną zależność zaobserwowano w mieszankach z lepiszczem asfaltowym 45/80-55. Wszystkie uzyskane wyniki WTS mieszanek w lepiszczem 50 /70 różniły się istotnie w odniesieniu do próbek mma z lepiszczem 45/80-80 w każdej analizowanej technologii wytwarzania i z każdą zawartością zbrojenia rozproszonego. Wskazuje to na istotny wpływ zastosowanego rodzaju lepiszcza, technologii wytwarzania i zawartości włókien na prędkość przyrostu koleiny w mieszankach.

Wyniki badań odporności na powstawanie deformacji trwałych w próbkach mma z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych wykonanych zgodnie z planem eksperymentu z etapu II przedstawiono na rysunkach 4.30 - 4.31. Czerwoną linią zaznaczono maksymalną wartość proporcjonalnej głębokości koleiny PRD i tempa przyrostu koleiny WTS dla AC 11S KR 5-7 zgodnie z Wymaganiami Technicznymi [198].



Rys. 4.30 Proporcjonalna głębokość koleiny w mieszankach mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.

Wymagania dotyczące proporcjonalnej głębokości koleiny w mieszankach z lepiszczem asfaltowym 50/70 i dodatkiem 0,6% włókien PB bez względu na technologię wytwarzania nie zostały spełnione. Dodatkowo próbki przygotowywane w temperaturze zredukowanej o 30°C z lepiszczem 45/80-55 i największą zawartością włókien przekroczyły dopuszczalną granicę PRD wynoszącą 7%. Pozostałe mieszanki uzyskały wartości akceptowalne dla warstwy ścieralnej AC 11S KR 5-7 w odniesieniu do WT-2 2014 oraz porównywalne z mieszanką referencyjną wyniki. Zwiększenie ilości zbrojenia rozproszonego w postaci włókien polimerowo-bazaltowych do 0,6% skutkowało znacznym pogorszeniem analizowanego parametru. We wszystkich próbkach zaobserwowano niewielkie zwiększenie proporcjonalnej głębokości koleiny wraz z obniżeniem temperatury wytwarzania mieszanek. W mieszankach z lepiszczem wysokomodyfikowanym oraz dodatkiem 0,15% PB i 0,6% PB zaobserwowano niewielki spadek proporcjonalnej głębokości koleiny w technologii WMA-30°C względem WMA-15°C.



Rys. 4.31 Prędkość przyrostu koleiny w mieszankach mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.

Wszystkie analizowane mieszanki spełniły wymagania WT-2 2014 w zakresie prędkości przyrostu koleiny WTS. Zastosowanie większej ilości włókien w mieszankach z lepiszczem asfaltowym 45/80-80 pozwoliło na nieznaczne obniżenie badanego parametru, szczególnie przy największej zawartości zbrojenia oraz temperaturze zredukowanej o 30°C względem tradycyjnej technologii HMA. Zastosowanie zbrojenia rozproszonego w mieszankach z lepiszczem 45/80-55 i 45/80-80 obniżyło wartość parametru WTS bez względu na ich rodzaj w porównaniu do mieszanki referencyjnej. Podobną zależność zaobserwowano przy zwiększeniu ilości włókien PB w odniesieniu do mieszanki kontrolnej bez dodatku włókien, gdzie nastąpił spadek prędkości przyrostu koleiny wraz z ilością dozowanego zbrojenia. Wykorzystanie włókien PB i obniżenie temperatury zagęszczania o 30°C względem tradycyjnej technologii pozwoliło na zmniejszenie prędkości przyrostu koleiny.

Wpływ rodzaju lepiszcza asfaltowego, technologii wytwarzania oraz zawartości włókien polimerowo-bazaltowych na odporność na powstawanie deformacji trwałych w próbkach analizowano szczegółowo przy zastosowaniu analizy wariancji ANOVA. Wyniki porównań wielokrotnych z wykorzystaniem testu Tukeya przedstawiono w tabeli 4.45 oraz w załącznikach Z.5 i Z.6.

Tab. 4.45 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza, technologii wytwarzania oraz zawartości włókien polimerowo-bazaltowych na odporność na powstawanie deformacji trwałych za pomocą analizy wariancji ANOVA.

Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez PRD				Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez WTS			
	PRD SS	PRD MS	PRD F	PRD p	WTS SS	WTS MS	WTS F	WTS p
Wyraz wolny	5117,59	5117,59	251866,9	<0,001	0,386	0,386	12819,53	<0,001
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [1]	16,948	8,474	417,1	<0,001	0,037	0,019	619,79	<0,001
Technologia wytwarzania [2]	4,850	2,425	119,4	<0,001	0,000	0,000	3,91	0,023
Zawartość włókien polimerowo- bazaltowych [3]	53,689	17,896	880,8	<0,001	0,000	0,000	2,65	0,053
[1] * [2]	0,560	0,140	6,9	<0,001	0,001	0,000	7,38	<0,001
[1] * [3]	4,007	0,668	32,9	<0,001	0,000	0,000	1,46	0,200
[2] * [3]	1,255	0,209	10,3	<0,001	0,000	0,000	1,73	0,121
[1] * [2] * [3]	1,855	0,155	7,6	<0,001	0,000	0,000	0,80	0,645
Błąd	2,194	0,020			0,003	0,000		

Wykonana analiza wariancji dla proporcjonalnej głębokości koleiny wykazała istotność statystyczną ($p < 0,05$) wszystkich efektów głównych oraz interakcji pomiędzy rodzajem lepiszcza, technologią wytwarzania i zawartością włókien polimerowo-bazaltowych. Pozwala to na stwierdzenie, że zastosowany rodzaj lepiszcza asfaltowego, technologia wytwarzania oraz zawartość włókien PB miała istotny wpływ na wartość proporcjonalnej głębokości koleiny. Analiza wariancji dla prędkości przyrostu koleiny wykazała brak istotności statystycznej ($p > 0,05$) zawartości włókien PB w mieszankach mineralno-asfaltowych oraz interakcji tego czynnika z rodzajem lepiszcza asfaltowego i technologią wytwarzania. Dla pozostałych analizowanych czynników i interakcji wykazano istotność statystyczną. Na prędkość przyrostu koleiny istotny wpływ miał zatem zastosowany rodzaj lepiszcza asfaltowego oraz technologia wytwarzania i zagęszczania mma.

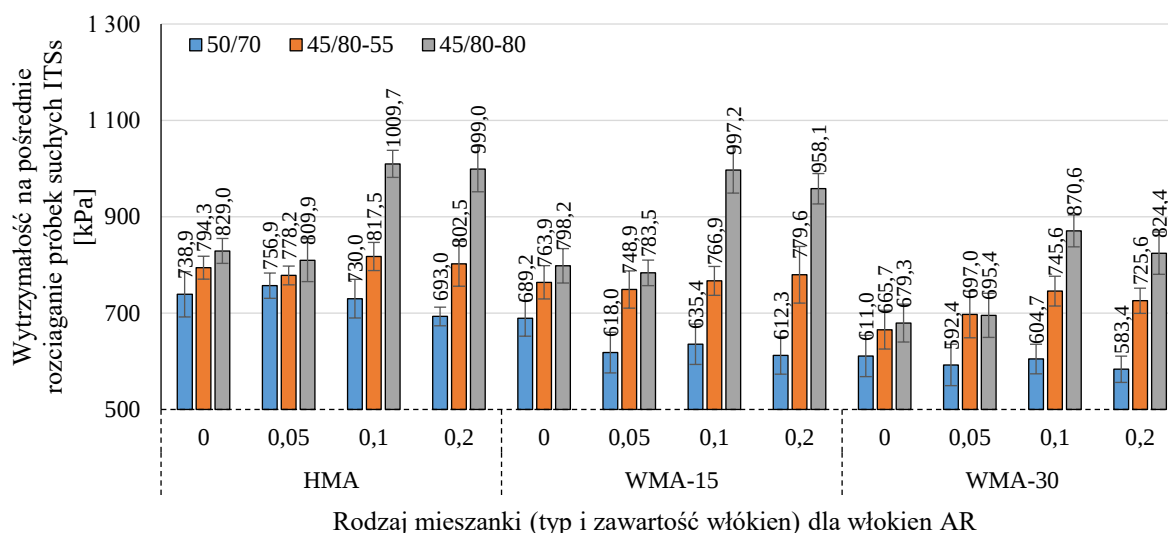
Ocena istotności różnic między średnimi proporcjonalnymi głębokościami koleiny wykonana za pomocą testu Tukeya pozwoliła na wskazanie mieszanek mineralno-asfaltowych, które osiągnęły zbliżone poziomy tego parametru przy braku istotnych statystycznie różnic. W przypadku mieszanek z lepiszczem 50/70, dodatek 0,15% i 0,3% włókien nie spowodował istotnej statystycznie zmiany parametru PRD, dopiero dodanie 0,6% włókien spowodowało istotny ($p < 0,05$) wzrost tej wielkości. Próbkę mma z lepiszczem asfaltowym 45/80-55 w każdej technologii wytwarzania przy zawartości 0,6% włókien polimerowo-bazaltowych różniły się istotnie w aspekcie PRD od wszystkich pozostałych mieszanek z tym lepiszczem. Stwierdzić można zatem, że dodanie 0,15% i 0,3% włókien polimerowo-bazaltowych nie wpłynęło na zmianę parametru proporcjonalnej głębokości koleiny w próbkach mma. Powyżej opisane

wyniki pozwalają stwierdzić, że zwiększenie ilości zbrojenia rozproszonego do 0,6% pogorszyło znacznie wartość PRD dla analizowanych mieszanek.

Nie potwierdzono również występowania istotnych statystycznie różnic proporcjonalnej głębokości koleiny między mieszanką z lepiszczem asfaltowym 45/80-55 wykonaną w technologii WMA-30°C z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych w ilości 0,6% a mieszanką z lepiszczem 50/70 w technologii obniżonej temperatury o 30°C z taką samą zawartością włókien. Podobnie mieszanka referencyjna z lepiszczem wysokomodyfikowanym 45/80-80 wytwarzana w technologii WMA-15°C nie różniła się istotnie ($p > 0,05$) od mieszanki z lepiszczem 45/80-55 wytwarzanej w tradycyjnej technologii HMA z dodatkiem 0,3% włókien PB. Mieszanka referencyjna z lepiszczem 45/80-80 wykonana w technologii HMA różniła się istotnie w tym aspekcie od wszystkich pozostałych analizowanych mieszanek. Stwierdzono, że dodatek 0,6% włókien polimerowo-bazaltowych w każdej technologii wytwarzania skutkowało znacznym przyrostem głębokości koleiny badanych próbek, prawdopodobnie ze względu na ich pogorszoną zagęszczalność. Mieszanki z lepiszczem 50/70 nie różniły się istotnie od siebie, natomiast istotne różnice wystąpiły w mieszankach z lepiszczem asfaltowym 45/80-80. Wskazuje to na istotny wpływ zastosowanego rodzaju lepiszcza, technologii wytwarzania i zawartości włókien na prędkość przyrostu koleiny w analizowanych mieszankach.

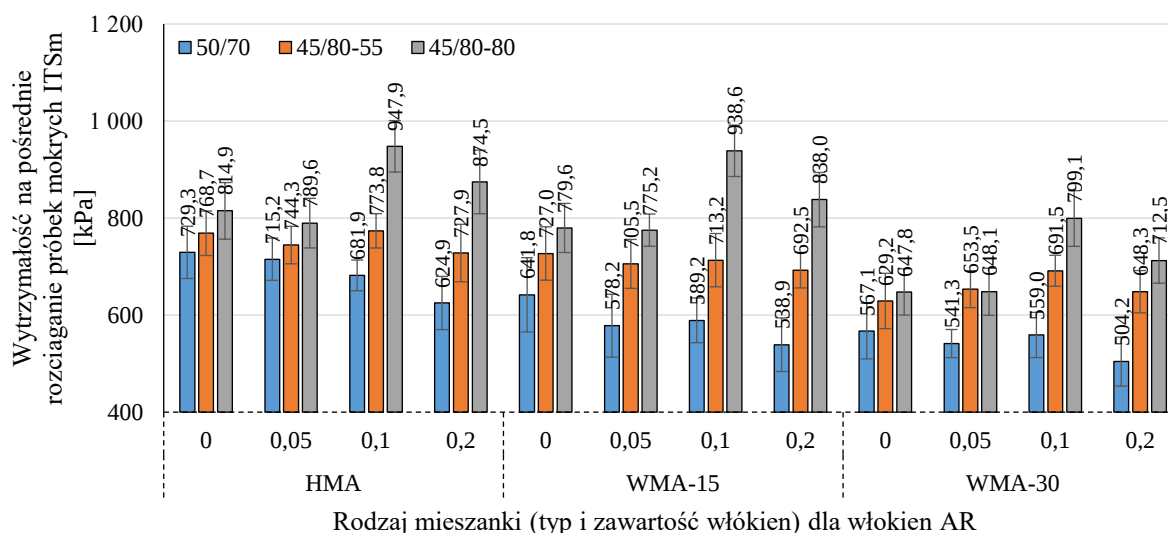
4.5.3 Badania wpływu ilości i rodzaju włókien w mma na odporność na działanie wody i mrozu

Wyniki badań odporności na działanie wody i mrozu w próbkach mma z dodatkiem włókien aramidowych wykonanych zgodnie z planem eksperymentu z etapu II przedstawiono na rysunkach 4.32 - 4.34. Czerwoną linią zaznaczono minimalną wartość wskaźnika ITS_R dla AC 11S KR 5-7 dopuszczalną dla tego rodzaju mieszanek zgodnie z Wymaganiami Technicznymi [198].



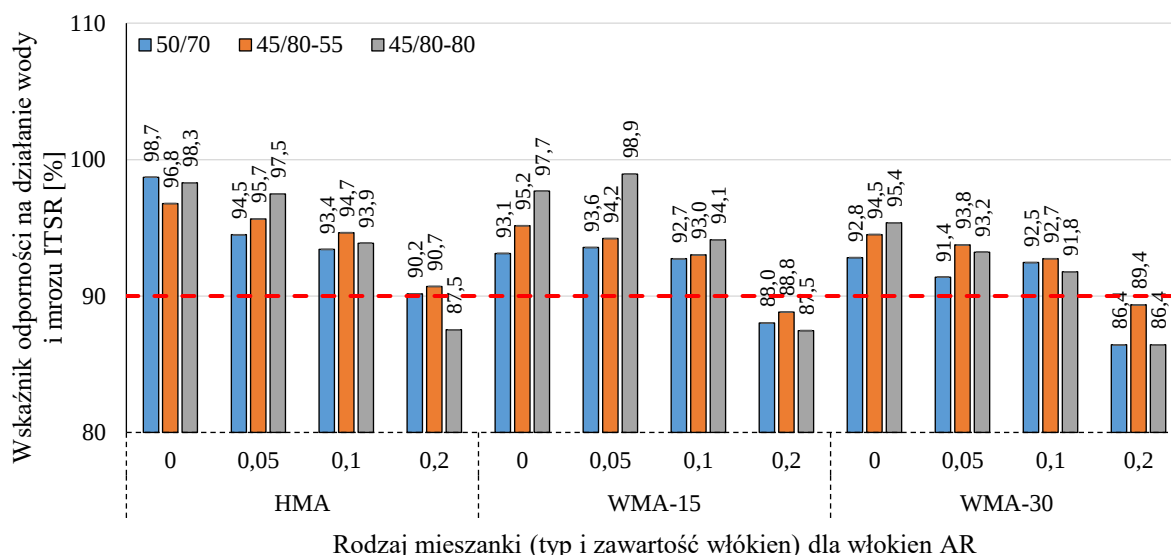
Rys. 4.32 Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie próbek suchych w temperaturze 25°C w mieszankach mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien aramidowych.

W każdym z analizowanych przypadków obniżenie temperatury wytwarzania mma skutkowało spadkiem wytrzymałości na pośrednie rozciąganie próbek. Pomiędzy mieszankami z lepiszczem 50/70 wytwarzanymi w technologii WMA-15°C i WMA-30°C z dodatkiem włókien AR nie zauważono większych zmian w wartości ITS_s – najczęściej zmniejszenie wytrzymałości ITS_s przy obniżeniu temperatury wytwarzania nie przekraczało 5%. Nie zaobserwowano wpływu zbrojenia rozproszonego na wytrzymałość na pośrednie rozciąganie próbek z lepiszczami 50/70 i 45/80-55 w stosunku do mieszanek referencyjnych. Mieszanki z lepiszczem 45/80-55 wytwarzane w technologii HMA i WMA-15°C nie wykazały znaczących różnic pomiędzy wartościami ITS_s, podczas gdy w technologii WMA-30°C nastąpił niewielki ich spadek, jednak różnice są widocznie głównie w odniesieniu do mieszanki referencyjnej. W przypadku mieszanek z lepiszczem 45/80-80, najwyższymi wartościami wytrzymałości na pośrednie rozciąganie w stanie suchym charakteryzowały się mieszanki z dodatkiem włókien 0,1% i 0,2% AR niezależnie od technologii wytwarzania, jednak obniżanie temperatur zagęszczania skutkowało stopniowym zmniejszaniem ich wytrzymałości.



Rys. 4.33 Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie próbek mokrych w temperaturze 25°C w mieszankach mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien aramidowych.

W odniesieniu do wartości ITS_w próbek z zestawu poddawanych jednemu cyklowi zamrażania można stwierdzić, że mieszanki wykonane w technologii WMA-15°C i WMA-30°C charakteryzowały się zbliżonymi wartościami wytrzymałości na pośrednie rozciąganie, gdy stosowane były lepiszcza 50/70 i 45/80-55 i taka sama zawartość włókien. Zauważono wzrost wytrzymałości próbek mma wraz z ilością polimeru znajdującego się w składzie lepiszcza asfaltowego. Podobne zależności zaobserwowano w wynikach wytrzymałości na pośrednie rozciąganie próbek kondycjonowanych w warunkach suchych. Dla asfaltów modyfikowanych, zwiększenie ilości włókien do 0,1% skutkowało uzyskaniem najwyższej wartości wytrzymałości na pośrednie rozciąganie w każdej technologii wytwarzania w odniesieniu do mieszanek referencyjnych. Podniesienie zawartości dozowanego zbrojenia do 0,2% spowodowało obniżenie wytrzymałości mma w odniesieniu do próbek z 0,1% włókien aramidowych.



Rys. 4.34 Wskaźnik odporności na działanie wody i mrozu w mieszankach mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien aramidowych.

Wszystkie mieszanki mineralno-asfaltowe z dodatkiem od 0% do 0,1% włókien aramidowych spełniły wymagania w zakresie odporności na działanie wody i mrozu określone w WT-2 2014, niezależnie od technologii wytwarzania. Zastosowanie większej ilości włókien w większości przypadków spowodowało uzyskanie wskaźników ITSR na poziomie poniżej 90% lub bardzo bliskich tej wartości. Największą odpornością na działanie wody i mrozu charakteryzowały się kolejno mieszanki w technologii „na gorąco”, referencyjne bez włókien oraz z włóknami AR w ilości 0,05% oraz 0,1%. Obniżenie temperatur produkcji i zagęszczania powodowało niewielki, ale zauważalny spadek ocenianego parametru.

Wpływ rodzaju lepiszcza asfaltowego, technologii wytwarzania oraz zawartości włókien aramidowych na odporność na działanie wody i mrozu w próbkach analizowano szczegółowo przy zastosowaniu analizy wariancji ANOVA. Wyniki porównań wielokrotnych z wykorzystaniem testu Tukeya przedstawiono w tabeli 4.46 oraz w załącznikach Z.7 i Z.8.

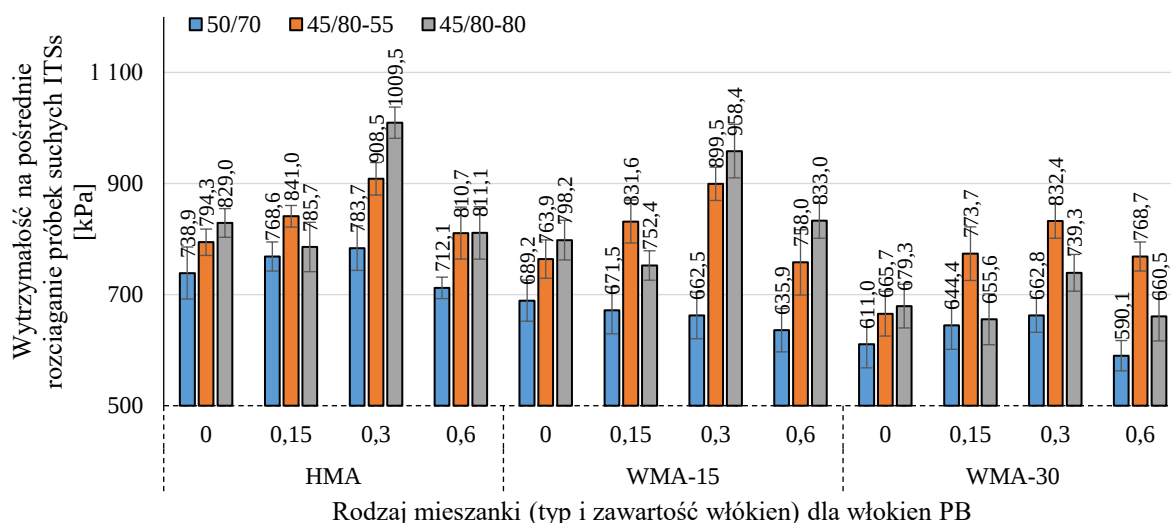
Tab. 4.46 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza, technologii wytwarzania oraz zawartości włókien aramidowych na odporność na działanie wody i mrozu za pomocą analizy wariancji ANOVA.

Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez ITS _s				Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez ITS _m			
	ITS _s SS	ITS _s MS	ITS _s F	ITS _s p	ITS _m SS	ITS _m MS	ITS _m F	ITS _m p
Wyraz wolny	205584422	205584422	74430,13	<0,001	177970795	177970795	35780,16	<0,001
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [1]	2378718	1189359	430,60	<0,001	2195988	1097994	220,75	<0,001
Technologia wytwarzania [2]	901517	450759	163,19	<0,001	1063223	531611	106,88	<0,001
Zawartość włókien aramidowych [3]	366152	122051	44,19	<0,001	215132	71711	14,42	<0,001
[1] * [2]	97721	24430	8,84	<0,001	127354	31839	6,40	<0,001
[1] * [3]	661221	110204	39,90	<0,001	403203	67201	13,51	<0,001
[2] * [3]	18168	3028	1,10	0,364	18665	3111	0,63	0,710
[1] * [2] * [3]	37181	3098	1,12	0,341	21942	1828	0,37	0,974
Błąd	894925	2762			1611578	4974		

Wykonana analiza wariancji dla wytrzymałości na pośrednie rozciąganie próbek suchych i mokrych wykazała istotność statystyczną wszystkich efektów głównych oraz interakcji pomiędzy rodzajem lepiszcza a technologią wytwarzania i zawartością włókien aramidowych ($p < 0,05$). Pozwala to na stwierdzenie, że zastosowany rodzaj lepiszcza asfaltowego, technologia wytwarzania oraz zawartość włókien AR ma istotny wpływ na wartość analizowanego parametru.

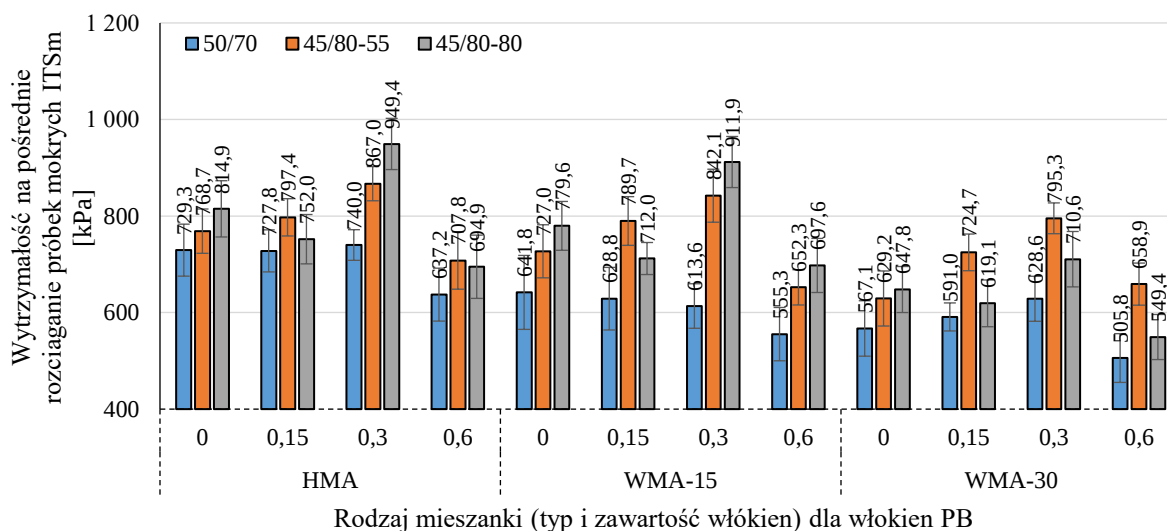
Ocena istotności różnic między średnimi wytrzymałościami na pośrednie rozciąganie wykonana za pomocą testu Tukeya pozwoliła na wskazanie mieszanek mineralno-asfaltowych, które osiągnęły zbliżone poziomy tego parametru przy braku istotnych statystycznie różnic. W każdej technologii wytwarzania mma przy zastosowaniu lepiszczy asfaltowych 50/70 oraz 45/80-55 zauważono brak istotnych różnic w wartościach parametrów ITS_s i ITS_m między mieszankami referencyjnymi, a mieszankami z dodatkiem pozostałych zawartości włókien AR. Referencyjne próbki mma z lepiszczem asfaltowym 45/80-55 w technologii wytwarzania HMA i WMA-15°C nie różniły się istotnie w obrębie tego lepiszcza. Stwierdzić można zatem, że dodanie włókien aramidowych nie wpłynęło istotnie na zmianę wytrzymałości na pośrednie rozciąganie próbek mma. Zwiększenie ilości zbrojenia rozproszonego w mieszankach z lepiszczem wysokomodyfikowanym poprawiło (podniosło) wartość analizowanego parametru.

Na rysunkach 4.35 – 4.37 przedstawiono wartości wytrzymałości na pośrednie rozciąganie próbek kondycjonowanych w stanie suchym i mokrym oraz wartości wskaźnika odporności na działanie wody i mrozu mieszanek z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.



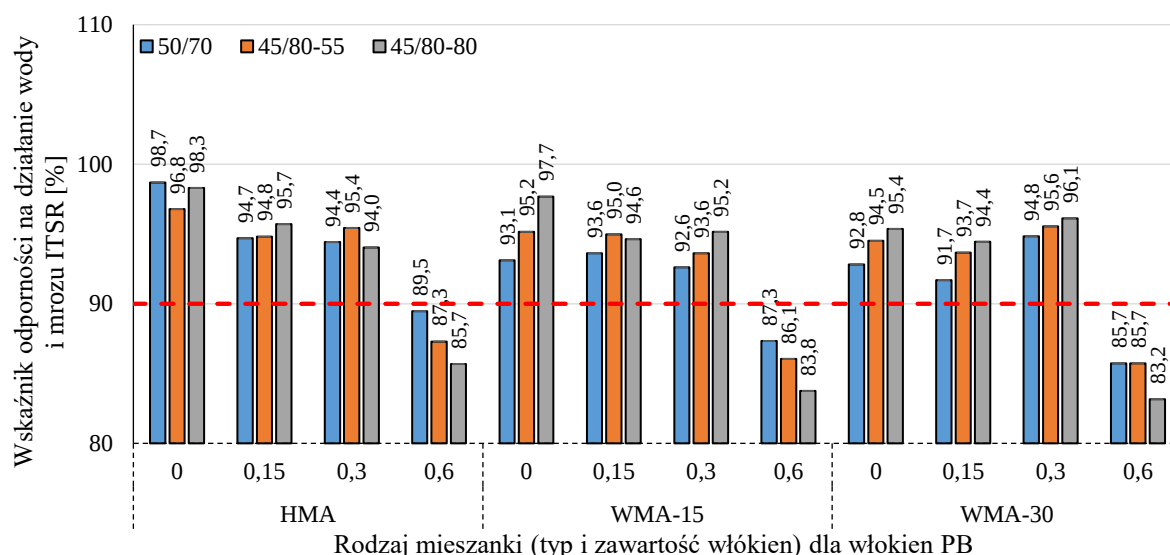
Rys. 4.35 Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie próbek suchych w temperaturze 25°C w mieszankach mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.

Mieszanki wytwarzane w technologii HMA i WMA-15°C nie wykazały znaczących różnic pomiędzy wartościami ITS_s, dlatego obniżenie temperatury o 15°C nie wpływa na zmianę tego parametru. W technologii WMA-30°C nastąpił niewielki spadek wartości analizowanego parametru, jednak różnice występują w odniesieniu do mieszanki referencyjnej. Największe różnice w wartościach ITS_s zaobserwowano w mieszankach z lepyszczem asfaltowym 45/80-80. Najwyższe wartości wytrzymałości w każdej technologii wytwarzania uzyskały mieszanki z dodatkiem 0,3% włókien polimerowo-bazaltowych. Nie zaobserwowano istotnego wpływu zbrojenia rozproszonego na wytrzymałość na pośrednie rozciąganie próbek w stosunku do mieszanki referencyjnej w każdej technologii wytwarzania.



Rys. 4.36 Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie próbek mokrych w temperaturze 25°C w mieszankach mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.

W przypadku wytrzymałości na pośrednie rozciąganie po jednym cyklu zamrażania, najwyższe wartości wytrzymałości w każdej technologii wytwarzania uzyskały również mieszanki z dodatkiem 0,3% włókien polimerowo-bazaltowych. W próbkach mma z lepiszczem 45/80-80 i dodatkiem 0,15% PB zaobserwowano spadek wytrzymałości w stosunku do mieszanek z lepiszczem 45/80-55. Mieszanki wykonane w technologii WMA-15°C i WMA-30°C z lepiszczem 50/70 i jednakowymi zawartościami włókien charakteryzowały się zbliżonymi wartościami wytrzymałości ITS_m . Obniżenie temperatury wytwarzania skutkowało obniżeniem wartości tego parametru w każdej technologii. Podobne zależności zaobserwowano w wynikach wytrzymałości na pośrednie rozciąganie próbek kondycjonowanych w warunkach suchych. Podniesienie zawartości dozowanego zbrojenia do 0,6% spowodowało obniżenie wytrzymałości mma w odniesieniu do próbek z 0,3% włókien polimerowo-bazaltowych.



Rys. 4.37 Wskaźnik odporności na działanie wody i mrozu w mieszankach mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.

Mieszanki z dodatkiem 0,6% włókien PB nie spełniły wymagań zawartych w [198] bez względu na technologię wytwarzania. Największą wytrzymałością charakteryzowały się mieszanki w technologii „na gorąco”, jednak nie zaobserwowano znaczącego wpływu technologii wytwarzania oraz dodatku zbrojenia rozproszonego na wartości analizowanego parametru. Porównywalne wyniki z mieszanką referencyjną uzyskały próbki z dodatkiem 0,05% i 0,1% AR oraz 0,15% i 0,3% PB bez względu na temperaturę wytwarzania.

Wpływ rodzaju lepiszcza asfaltowego, technologii wytwarzania oraz zawartości włókien polimerowo-bazaltowych na odporność na działanie wody i mrozu w próbkach analizowano szczegółowo przy zastosowaniu analizy wariancji ANOVA. Wyniki porównań

wielokrotnych z wykorzystaniem testu Tukeya przedstawiono w tabeli 4.47 oraz w załącznikach Z.9 i Z.10.

Tab. 4.47 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza, technologii wytwarzania oraz zawartości włókien polimerowo-bazaltowych na odporność na działanie wody i mrozu za pomocą analizy wariancji ANOVA.

Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez ITS _s				Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez ITS _m			
	ITS _s SS	ITS _s MS	ITS _s F	ITS _s p	ITS _m SS	ITS _m MS	ITS _m F	ITS _m p
Wyraz wolny	207489148	207489148	64990,20	<0,001	178723467	178723467	33144,47	<0,001
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [1]	1111150	555575	174,02	<0,001	993771	496885	92,15	<0,001
Technologia wytwarzania [2]	975609	487804	152,79	<0,001	1024127	512063	94,96	<0,001
Zawartość włókien polimerowo-bazaltowych [3]	593204	197735	61,93	<0,001	1089849	363283	67,37	<0,001
[1] * [2]	198409	49602	15,54	<0,001	184192	46048	8,54	<0,001
[1] * [3]	287262	47877	15,00	<0,001	270136	45023	8,35	<0,001
[2] * [3]	32286	5381	1,69	0,124	26126	4354	0,81	0,565
[1] * [2] * [3]	107709	8976	2,81	<0,001	81768	6814	1,26	0,239
Błąd	1034410	3193			1747091	5392		

Wykonana analiza wariancji dla wytrzymałości na pośrednie rozciąganie wykazała istotność statystyczną wszystkich efektów głównych oraz interakcji pomiędzy rodzajem lepiszcza, technologią wytwarzania i zawartością włókien aramidowych ($p < 0,05$). Jedynie dla interakcji pomiędzy technologią wytwarzania i zawartością zastosowanego zbrojenia nie potwierdzono istotności statystycznej. Zastosowany rodzaj lepiszcza asfaltowego, technologia wytwarzania oraz zawartość włókien PB miały zatem istotny wpływ na wartość analizowanego parametru.

Ocena istotności różnic między średnimi wytrzymałościami na pośrednie rozciąganie wykonana za pomocą testu Tukeya pozwoliła na wskazanie mieszanek mineralno-asfaltowych, które osiągnęły zbliżone poziomy tego parametru przy braku istotnych statystycznie różnic. W każdej technologii wytwarzania mma przy zastosowaniu lepiszcza asfaltowego 50/70 zauważono brak istotności statystycznej w wartościach parametru ITS w stanie suchym i mokrym między mieszankami referencyjnymi, a mieszankami z dodatkiem pozostałych zawartości włókien PB. Mieszanki mineralno-asfaltowe z lepiszczem 45/80-80 kondycjonowane w stanie suchym w technologii wytwarzania HMA z dodatkiem 0,3% PB nie różniły się istotnie jedynie w odniesieniu do mieszanki z tym samym lepiszczem wytwarzanej w temperaturze obniżonej o 15°C z taką samą ilością zbrojenia. Stwierdzić można zatem, że dodanie włókien polimerowo-bazaltowych nie wpłynęło istotnie na zmianę

wytrzymałości na pośrednie rozciąganie w próbkach mma. Zwiększenie ilości zbrojenia rozproszonego w mieszankach prowadziło do obniżenia wartości analizowanego parametru.

4.5.4 Podsumowanie etapu II

Realizacja badań w etapie II miała na celu wytypowanie mieszanek mineralno-asfaltowych spełniających wymagania zgodnie z WT-2 2014. Przeprowadzona analiza zawartości wolnej przestrzeni, odporności na powstawanie deformacji trwałych oraz odporności na działanie wody i mrozu pozwoliła wykluczyć mieszanki, które nie spełniły kryteriów jakie wymagane są dla warstwy ścieralnej przeznaczonych na kategorii ruchu KR 5- 7.

Najniższe zawartości wolnej przestrzeni zaobserwowano przy wykorzystaniu lepiszcza 50/70, natomiast najwyższe wartości uzyskały mieszanki z lepiszczem wysokomodyfikowanym 45-80-80 z uwagi na dodatek polimeru w składzie lepiszcza asfaltowego. Chociaż zwiększenie ilości zbrojenia rozproszonego skutkowało zwiększeniem zawartości wolnych przestrzeni, zarówno przy zastosowaniu włókien PB jak i AR, to w przypadku włókien PB zauważono większy wpływ na wartość V_a . Obniżenie temperatur wytwarzania i zagęszczania próbek o 15°C nie wpłynęło znacząco na zawartość wolnych przestrzeni w mieszankach, które uzyskały wyniki zbliżone do mieszanek referencyjnych bez względu na rodzaj zastosowanych włókien.

Wszystkie mieszanki z dodatkiem zbrojenia rozproszonego charakteryzowały się nieznacznym wzrostem proporcjonalnej głębokości koleiny wraz z obniżaniem temperatury wytwarzania i zagęszczania. Zastosowanie włókien aramidowych nie miało wpływu na tempo przyrostu koleiny, natomiast w mieszankach z lepiszczem wysokomodyfikowanym oraz dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych i obniżeniem temperatury technologicznej o 30°C zauważono zmniejszenie tego parametru. Mieszanki z największą zawartością zbrojenia rozproszonego nie spełniły wymagań dla projektowanej mieszanki.

W odniesieniu do badań odporności na działanie wody i mrozu oraz wyników oznaczeń wytrzymałości na pośrednie rozciąganie stwierdzono, że największą wytrzymałością charakteryzowały się mieszanki w tradycyjnej technologii HMA, jednak nie zaobserwowano znaczącego wpływu technologii wytwarzania oraz dodatku zbrojenia rozproszonego na wartość analizowanego parametru. Porównywalne wyniki z mieszanką referencyjną uzyskały próbki z mniejszą zawartością włókien bez względu na temperaturę wytwarzania. Dodatek włókien aramidowych nie wpłynął istotnie na zmianę wytrzymałości na pośrednie rozciąganie w badanych próbkach mma. Zwiększenie ilości zbrojenia rozproszonego w postaci włókien polimerowo-bazaltowych do 0,3% w mieszankach z lepiszczem wysokomodyfikowanym

poprawiło wartość analizowanego parametru. Mieszanki z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych wytwarzane w obniżonych temperaturach uzyskały korzystniejsze wyniki parametru ITSR w odniesieniu do mieszanek wytwarzanych „na gorąco” niż mieszanki z dodatkiem włókien aramidowych.

Analiza wyników pozwoliła wykluczyć z dalszych badań mieszanki zawierające zwiększone zawartości włókien, tj. PB 0,6% oraz AR 0,2% z uwagi na niespełnienie podstawowych parametrów jakim powinna odpowiadać mieszanka z betonu asfaltowego o uziarnieniu do 11 mm, przeznaczona na warstwę ścieralną obciążoną ruchem KR 5-7 zgodnie WT-2 2014 [198]. Mieszanki wytwarzane w każdej technologii ze zwiększoną zawartością zbrojenia rozproszonego przekraczały dopuszczalną zawartość wolnej przestrzeni dla AC 11S KR 5-7, z czym można powiązać zwiększoną podatność na powstawanie kolein i niewystarczającą odporność na działanie wody i mrozu. Dodatkowo z uwagi na duży zakres realizowanych badań przewidzianych w III etapie oraz ograniczone efekty obniżenia temperatury zagęszczania o 15°C w wynikach badań podstawowych parametrów mma wytwarzanych w technologii WMA-15°C, zdecydowano o wykluczeniu z badań zaawansowanych tych mieszanek. Jedynie mieszanka referencyjna w tej technologii, bez dodatku zbrojenia rozproszonego z dodatkiem wszystkich trzech analizowanych lepiszczy została wytworzona jako mieszanka kontrolna. Wykonanie badań zaawansowanych pozwoli na dokładne określenie wpływu rodzaju lepiszcza asfaltowego, rodzaju i ilości zbrojenia rozproszonego oraz wpływu obniżenia temperatury wytwarzania i zagęszczania o 30°C względem tradycyjnej technologii.

4.6 Etap III – badania zaawansowane mieszanek mineralno-asfaltowych

Badania etapu III obejmowały określenie wpływu rodzaju lepiszcza asfaltowego, rodzaju i ilości włókien oraz technologii wytwarzania mma na zaawansowane parametry mieszanek mineralno-asfaltowych. Badania wykonano dla mieszanek spełniających wymagania WT-2 2014, wytypowanych na podstawie wyników badań etapu II. Wykonano badania dla mieszanek referencyjnych w technologii HMA, WMA-15°C oraz WMA-30°C. Analizę wpływu zbrojenia rozproszonego wykonano dla wszystkich analizowanych lepiszczy asfaltowych w technologii HMA i WMA-30°C z dodatkiem włókien aramidowych i polimerowo-bazaltowych. Zakres prac obejmował wykonanie analizy zagęszczalności, sztywności metodą rozciągania pośredniego, zespolonego modułu sztywności, odporności na zmęczenie oraz modułu sztywności pełzania. Dla uzyskanych wyników badań wykonano

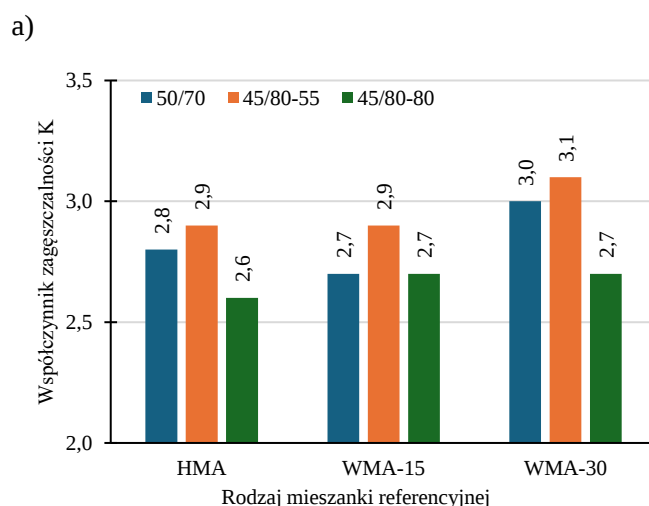
analizę wieloczynnikową mającą na celu określenie istotności wymienionych czynników oraz interakcji pomiędzy poszczególnymi zmiennymi.

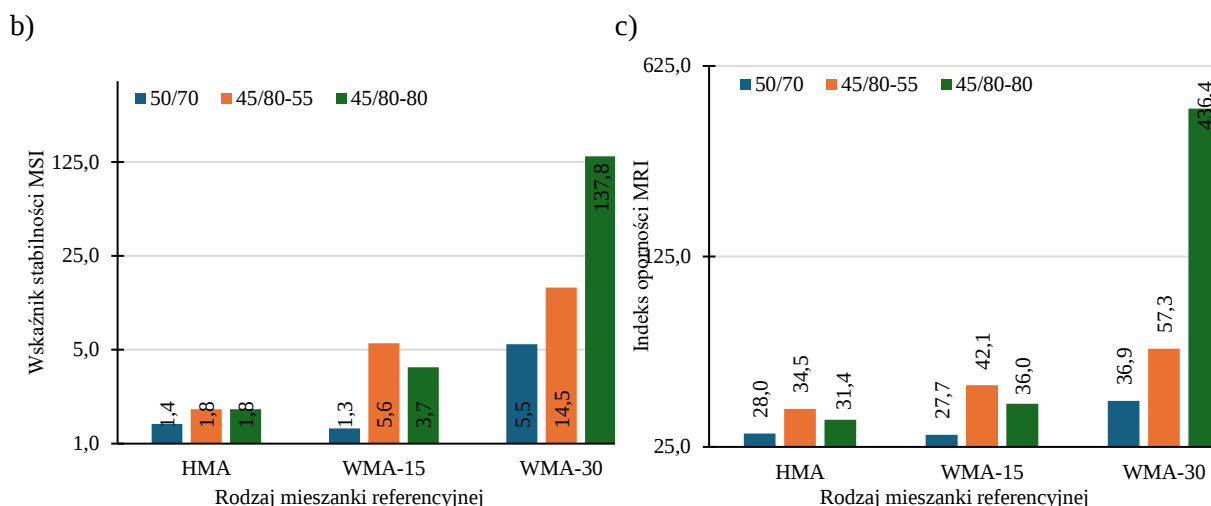
4.6.1 Badania wpływu ilości i rodzaju włókien na zagęszczalność mieszanek mineralno-asfaltowych

Ocena zagęszczalności mieszanek opierała się na określeniu zmiany przebiegu procesu zagęszczania próbek o średnicy 100 mm z zastosowaniem prasy żyratorowej na podstawie analizy różnic między zawartościami wolnej przestrzeni w zagęszczonych próbkach oraz wyciętych z nich rdzeniach a także wskaźników MSI, MRI charakteryzujących zagęszczalność mieszanki oraz współczynnika zagęszczalności K odpowiadającego nachyleniu krzywej zagęszczalności. Analiza została wykonana w aspekcie wpływu ilości i rodzaju włókien w mieszankach wykonanych w technologii HMA i WMA-30°C oraz wpływu technologii HMA, WMA-15°C i WMA-30°C na mieszanki referencyjne.

Analiza wpływu technologii wytwarzania mieszanek referencyjnych

Ocena wpływu technologii wytwarzania dla mieszanek referencyjnych bez dodatku zbrojenia rozproszonego wykonana została na podstawie parametrów MSI i MRI. Wyniki badań przedstawiono na wykresach z wykorzystaniem skali logarytmicznej z uwagi na duży zakres zmienności uzyskanych wyników. Na rysunku 4.38 przedstawiono parametry zagęszczalności dla referencyjnych mieszanek mineralno-asfaltowych w aspekcie wpływu temperatury wytwarzania.





Rys. 4.38 Zagęszczalność referencyjnych mieszanek mineralno-asfaltowych w aspekcie wpływu technologii wytwarzania i zagęszczania: a) współczynnik zagęszczalności K, b) wskaźnik stabilności MSI, c) indeks oporności MRI.

Mieszanki mineralno-asfaltowe z lepiszczem 45/80-80 uzyskały najniższe wartości współczynnika zagęszczalności w stosunku do pozostałych lepiszczy asfaltowych. Oznacza to najgorszą zagęszczalność tych mieszanek, co można wiązać z charakterem lepiszcza asfaltowego i jego największą lepkością dynamiczną. Technologia wytwarzania mma nie wpłynęła w znaczący sposób na wartości współczynnika zagęszczalności K. Najwyższe wartości wskaźnika stabilności MSI uzyskały mieszanki wytwarzane w temperaturze obniżonej o 30°C, co wskazuje na pogorszenie możliwości ich zagęszczania w początkowej fazie wbudowywania. Jednocześnie, mieszanki te wykazały również najlepszą oporność mma w fazie oddziaływania ruchu samochodowego, dzięki czemu są bardziej odporne na powstawanie kolein. Najlepsze zagęszczenie wstępne przy możliwości dogęszczania się mieszanki podczas eksploatacji nawierzchni wykazały mieszanki wykonywane w tradycyjnej technologii HMA. Na podstawie powyższej analizy stwierdzić można, że obniżenie temperatury i zastosowanie lepiszcza w formie spienionej korzystnie wpływa na odporność mieszanek na powstawanie deformacji trwałych w okresie eksploatacji nawierzchni.

Wpływ rodzaju lepiszcza asfaltowego i technologii wytwarzania na zagęszczalność mieszanek referencyjnych analizowano szczegółowo przy zastosowaniu analizy wariancji ANOVA. Wyniki porównań wielokrotnych z wykorzystaniem testu Tukeya przedstawiono w tabelach 4.48 i 4.49 oraz w załącznikach Z.11 – Z.13.

Tab. 4.48 Określenie wpływu temperatury wytwarzania referencyjnych mieszanek mineralno-asfaltowych na zagęszczalność i współczynnik zagęszczalności za pomocą analizy wariancji ANOVA.

Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez			
	K			
	K SS	K MS	K F	K p
Wyraz wolny	214,304	214,304	26295,28	<0,001
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [1]	0,484	0,242	29,68	<0,001
Technologia wytwarzania [2]	0,165	0,082	10,09	0,001
[1] * [2]	0,089	0,022	2,72	0,063
Błąd	0,147	0,008		

Tab. 4.49 Określenie wpływu temperatury wytwarzania referencyjnych mieszanek mineralno-asfaltowych na wskaźnik stabilności i indeks oporności mma za pomocą analizy wariancji ANOVA.

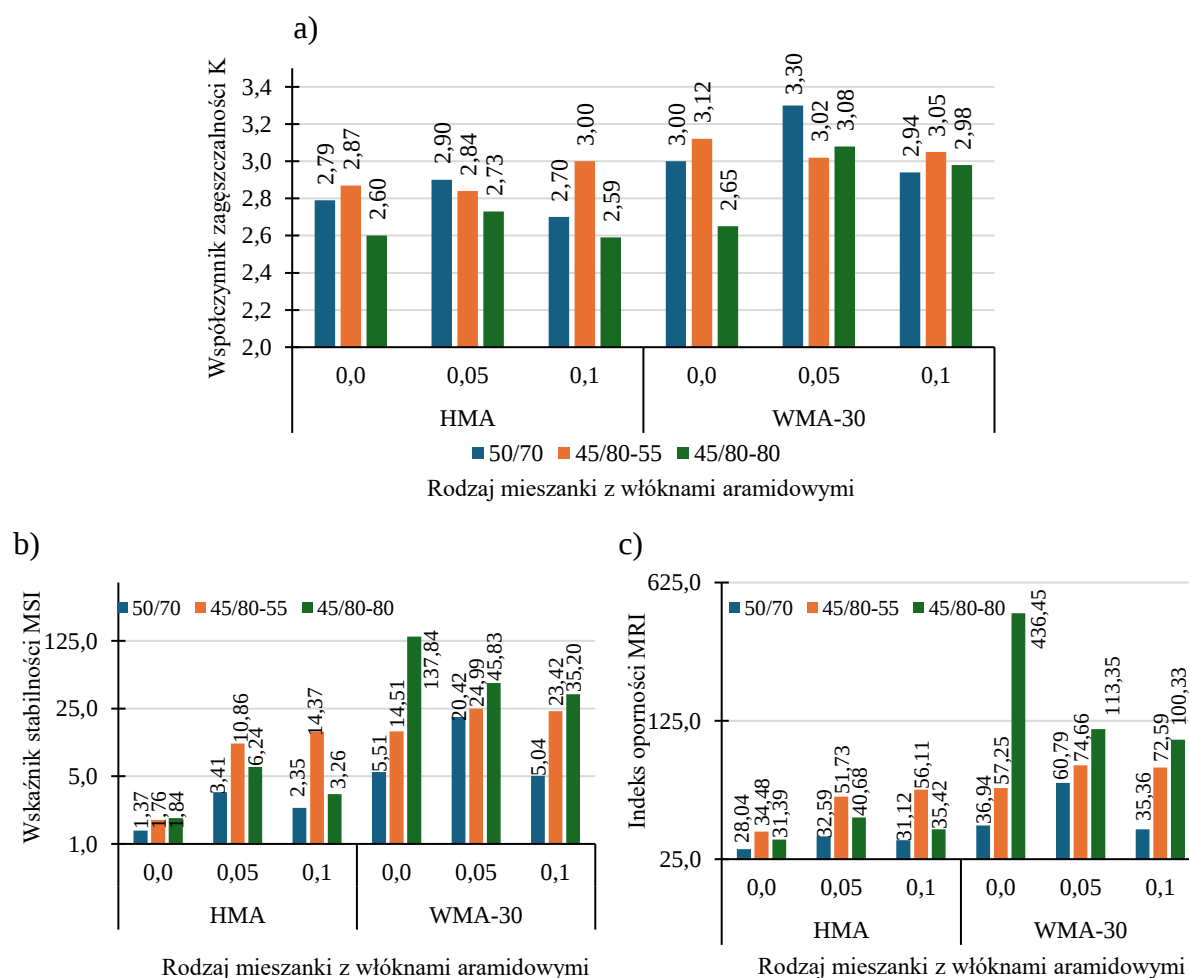
Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez				Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez			
	MSI				MRI			
	MSI SS	MSI MS	MSI F	MSI p	MRI SS	MRI MS	MRI F	MRI p
Wyraz wolny	10021,02	10021,02	87,805	<0,001	177787,9	177787,9	274,829	<0,001
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [1]	11070,46	5535,23	48,500	<0,001	102563,0	51281,5	79,272	<0,001
Technologia wytwarzania [2]	15035,06	7517,53	65,869	<0,001	123801,7	61900,8	95,688	<0,001
[1] * [2]	21759,18	5439,79	47,664	<0,001	201619,0	50404,8	77,917	<0,001
Błąd	2054,30	114,13			11644,3	646,9		

Wykonana analiza wariancji wykazała istotność statystyczną wszystkich efektów głównych oraz interakcji pomiędzy nimi ($p < 0,05$) w przypadku wskaźnika stabilności i indeksu oporności mma. Jedynie w przypadku współczynnika zagęszczalności K interakcja pomiędzy rodzajem lepiszcza i technologią wytwarzania nie uzyskała potwierdzenia istotności statystycznej. Stwierdzić można, że rodzaj zastosowanego asfaltu oraz technologia w jakiej mieszanka zostaje wytworzona i zagęszczona ma znaczący wpływ na zagęszczalność w początkowej fazie oraz na odporność na powstawanie deformacji trwałych w nawierzchni podczas jej eksploatacji.

Ocena istotności różnic między średnimi wartościami wskaźnika zagęszczalności wykonana za pomocą testu Tukeya pozwoliła na wskazanie mieszanek mineralno-asfaltowych, które osiągnęły zbliżone poziomy tego parametru przy braku istotnych statystycznie różnic. Analiza współczynnika zagęszczalności wykazała brak istotnych różnic pomiędzy wszystkimi mieszankami wytwarzanymi w technologii HMA a mieszankami wytwarzanymi z danym lepiszczem w obniżonej temperaturze. Współczynnik stabilności i indeks oporności wykazały takie same zależności. Mieszanka wytworzona z lepiszczem 45/80-80 w technologii HMA istotnie różniła się z pozostałymi analizowanymi mieszankami, które wykazały brak istotnych różnic względem mieszanek z każdym rodzajem lepiszcza i technologią wytwarzania mma.

Analiza wpływu rodzaju i zawartości zbrojenia rozproszonego na zagęszczalność mma

Ocena wpływu rodzaju i ilości zbrojenia została wykonana dla mieszanek z włóknami aramidowymi i polimerowo-bazaltowymi. W analizie porównawczej zostały również uwzględnione mieszanki referencyjne bez dodatku zbrojenia rozproszonego. Wykonano analizy dla mieszanek wykonanych w technologii HMA i WMA-30°C. Wyniki parametrów MSI i MRI przedstawiono na wykresach z wykorzystaniem skali logarytmicznej z uwagi na duży zakres zmienności wartości tych parametrów. Na rysunku 4.39 przedstawiono parametry zagęszczalności mma bez oraz z dodatkiem zbrojenia rozproszonego w postaci włókien AR.



Rys. 4.39 Zagęszczalność mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien aramidowych: a) współczynnik zagęszczalności K, b) wskaźnik stabilności MSI, c) indeks oporności MRI.

Mieszanki wykonane w technologii WMA-30°C charakteryzowały się wyższymi wartościami współczynnika zagęszczalności K w stosunku do mieszanek wykonanych w tradycyjnej technologii „na gorąco”. Oznacza to, że takie mieszanki będą łatwiej się zagęszczały. Najwyższy wynik uzyskała mieszanka z lepiszczem 50/70 wytwarzana w obniżonej temperaturze z dodatkiem 0,05% włókien aramidowych. Najkorzystniejszym

wskaźnikiem stabilności mma, który odpowiada energii jaką należy użyć w początkowej fazie zagęszczania charakteryzowały się mieszanki wykonane w tradycyjnej technologii HMA oraz w obniżonej temperaturze z lepiszczem 50/70 i 45/80-55. Najwyższy wynik uzyskały mieszanki w technologii WMA-30°C z lepiszczem wysokomodyfikowanym bez i z dodatkiem włókien. Te mieszanki uzyskały także najwyższy (najkorzystniejszy) wynik odporności na oddziaływanie ruchu samochodowego. Może to świadczyć o ich większej odporności na zjawisko dogęszczania się podczas eksploatacji, a tym samym tworzenia się kolein w nawierzchni. W mieszankach tych, zaobserwowano również istotny spadek wartości wskaźnika MRI spowodowany dodatkiem włókien – wskazuje to, że obecność zbrojenia rozproszonego ułatwia przy niższych zawartościach wolnych przestrzeni przesuwanie się ziaren mieszanki mineralnej względem siebie. Ponieważ jednak temperatura zagęszczania mma w tym przypadku była istotnie wyższa od temperatur eksploatacyjnych należy ostrożnie podejść do wnioskowania na tej podstawie o odporności na powstawanie deformacji trwałych tych mieszanek. Brak wpływu zbrojenia rozproszonego zaobserwowano w technologii HMA, ponieważ mieszanki te uzyskały zbliżone wartości indeksu oporności.

Określenie wpływu rodzaju lepiszcza asfaltowego, technologii wytwarzania mma i ilości włókien aramidowych za pomocą analizy wariancji ANOVA przedstawiono w tabelach 4.50 i 4.51 oraz w załącznikach Z.14 – Z.16.

Tab. 4.50 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza, technologii wytwarzania oraz zawartości włókien aramidowych na współczynnik zagęszczalności K za pomocą analizy wariancji ANOVA.

Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez			
	K			
	K SS	K MS	K F	K p
Wyraz wolny	453,812	453,812	51475,71	<0,001
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [1]	0,442	0,221	25,06	<0,001
Technologia wytwarzania [2]	0,752	0,752	85,33	<0,001
Zawartość włókien aramidowych [3]	0,183	0,092	10,40	<0,001
[1] * [2]	0,039	0,020	2,24	0,121
[1] * [3]	0,322	0,080	9,12	<0,001
[2] * [3]	0,042	0,021	2,36	0,108
[1] * [2] * [3]	0,125	0,031	3,55	0,015
Błąd	0,317	0,009		

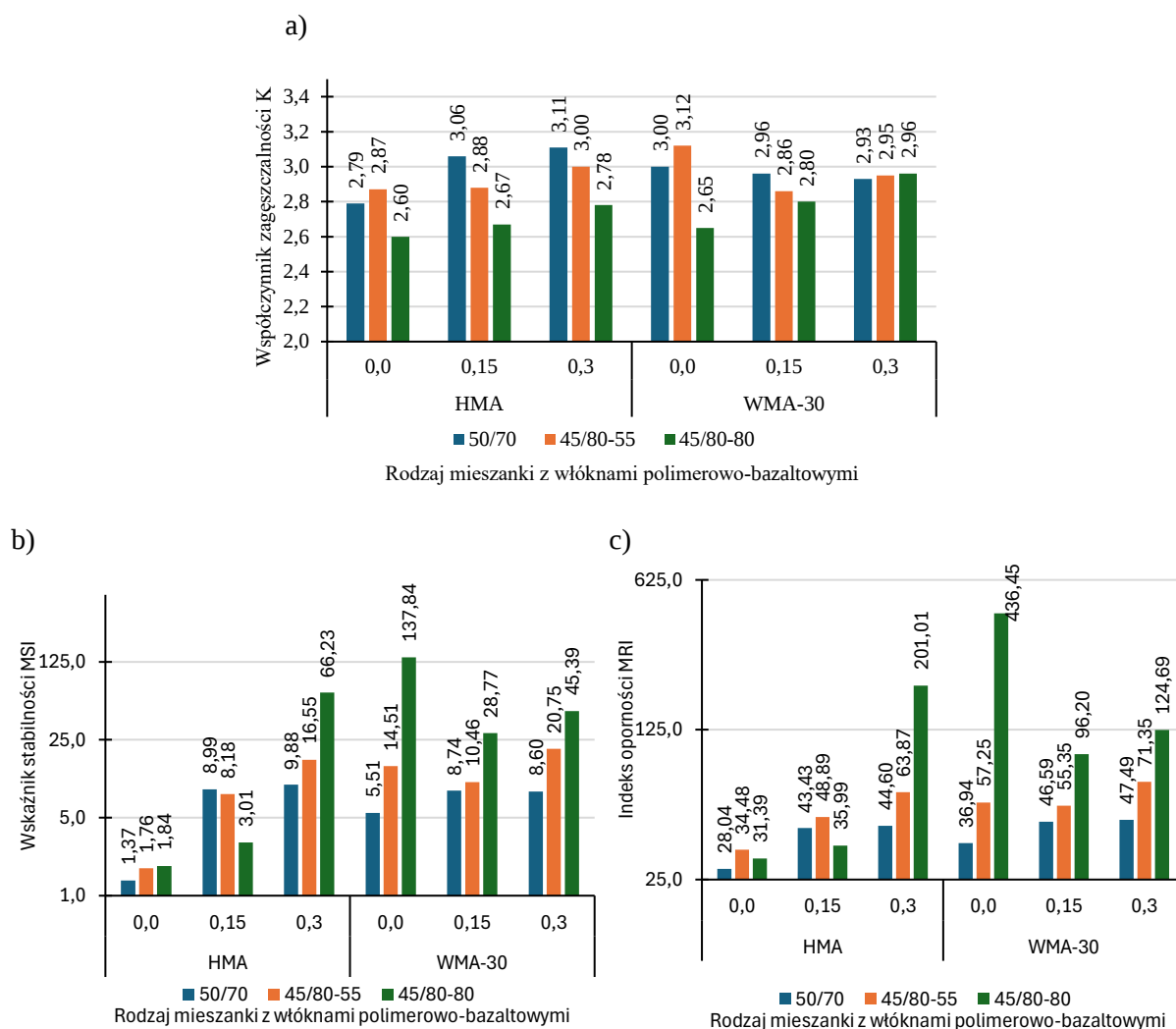
Tab. 4.51 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza, technologii wytwarzania oraz zawartości włókien aramidowych na wskaźnik stabilności i indeks oporności mma za pomocą analizy wariancji ANOVA.

Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez MSI				Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez MRI			
	MSI	MSI	MSI	MSI	MRI	MRI	MRI	MRI
	SS	MS	F	p	SS	MS	F	p
Wyraz wolny	21389,38	21389,38	290,158	<0,001	294505,7	294505,7	813,266	<0,001
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [1]	9876,70	4938,35	66,991	<0,001	77908,5	38954,2	107,571	<0,001
Technologia wytwarzania [2]	11908,53	11908,53	161,545	<0,001	69588,6	69588,6	192,166	<0,001
Zawartość włókien aramidowych [3]	1610,91	805,45	10,926	<0,001	25155,1	12577,5	34,732	<0,001
[1] * [2]	10557,01	5278,50	71,606	<0,001	80432,6	40216,3	111,056	<0,001
[1] * [3]	8144,93	2036,23	27,623	<0,001	81445,8	20361,4	56,227	<0,001
[2] * [3]	3235,23	1617,61	21,944	<0,001	37109,2	18554,6	51,238	<0,001
[1] * [2] * [3]	7062,58	1765,65	23,952	<0,001	76534,9	19133,7	52,837	<0,001
Błąd	2653,79	73,72			13036,6	362,1		

Wykonana analiza wariancji wykazała istotność statystyczną wszystkich efektów głównych oraz interakcji między nimi ($p < 0,05$) w przypadku parametru MSI i MRI. Pozwala to na stwierdzenie, że zastosowany rodzaj lepiszcza asfaltowego, technologia wytwarzania oraz zawartość włókien aramidowych mają istotny wpływ na zagęszczalność mieszanek w początkowej fazie oraz przy dogęszczaniu mma pod wpływem ruchu samochodowego. Istotnością statystyczną analizowanych czynników oraz interakcji pomiędzy rodzajem lepiszcza a zawartością włókien aramidowych charakteryzował się współczynnik zagęszczalności. Brak istotności wykazały pozostałe interakcje.

Ocena istotności różnic między parametrami zagęszczalności wykonana za pomocą testu Tukeya pozwoliła na wskazanie mieszanek mineralno-asfaltowych, które osiągnęły zbliżone poziomy tego parametru przy braku istotnych statystycznie różnic. Brak istotnych różnic wskaźnika zagęszczalności wystąpił pomiędzy mieszanką z lepiszczem 45/80-55 wytworzoną w technologii HMA a mieszankami z lepiszczem 45/80-80. Referencyjna mieszanka z lepiszczem 45/80-80 wykonana w technologii WMA-30°C różniła się istotnie w aspekcie wskaźnika stabilności i indeksu oporności od wszystkich pozostałych analizowanych mieszanek.

Na rysunku 4.40 przedstawiono parametry zagęszczalności dla mieszanek wytwarzanych bez oraz z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych w tradycyjnej i obniżonej temperaturze wytwarzania.



Rys. 4.40 Zagęszczalność mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych: a) współczynnik zagęszczalności K, b) wskaźnik stabilności MSI, c) indeks oporności MRI.

Współczynnik zagęszczalności w mieszankach z lepiszczem 45/80-80 wzrastał wraz z ilością dozowanego zbrojenia rozproszonego. Najwyższą wartość uzyskała mieszanka z lepiszczem 50/70 wykonana w technologii HMA z dodatkiem 0,3% włókien polimerowo-bazaltowych oraz mieszanka referencyjna wykonana w technologii WMA-30°C z lepiszczem modyfikowanym polimerem. Zaobserwowano spadek współczynnika zagęszczalności w mieszankach z lepiszczem wysokomodyfikowanym w każdej technologii wytwarzania i z każdą zawartością zbrojenia rozproszonego w stosunku do pozostałych asfaltów. Jedynie w przypadku obniżonej temperatury wytwarzania i największej zawartości włókien nie zaobserwowano wpływu zastosowanego rodzaju lepiszcza na współczynnik zagęszczalności mma. Najgorszym wskaźnikiem stabilności mma, który odpowiada energii jaką należy użyć w początkowej fazie zagęszczania charakteryzowała się mieszanka z lepiszczem wysokomodyfikowanym wykonana w tradycyjnej technologii HMA z dodatkiem

0,3% włókien PB oraz wszystkie mieszanki z tym samym lepiszczem wykonane w obniżonej temperaturze wytwarzania. Najlepsze zagęszczenia początkowe uzyskały mieszanki z lepiszczem drogowym i modyfikowany polimerem 45/80-55. Te same mieszanki, które uzyskały najmniej korzystną wartość MSI charakteryzowały się największym indeksem oporności mma, dzięki czemu są bardziej odporne na powstawanie kolein pomimo gorszego zagęszczania początkowego.

Określenie wpływu rodzaju lepiszcza asfaltowego, technologii wytwarzania mma i ilości włókien polimerowo-bazaltowych za pomocą analizy ANOVA przedstawiono na rysunkach 4.52 i 4.53 oraz w załącznikach Z.17 – Z.19.

Tab. 4.52 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza, technologii wytwarzania oraz zawartości włókien polimerowo-bazaltowych na zagęszczalność i współczynnik zagęszczalności za pomocą analizy wariancji ANOVA.

Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez			
	K			
	K SS	K MS	K F	K p
Wyraz wolny	450,859	450,859	85532,29	<0,001
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [1]	0,574	0,287	54,43	<0,001
Technologia wytwarzania [2]	0,039	0,039	7,40	0,010
Zawartość włókien polimerowo-bazaltowych [3]	0,127	0,064	12,05	<0,001
[1] * [2]	0,048	0,024	4,56	0,017
[1] * [3]	0,163	0,041	7,75	<0,001
[2] * [3]	0,099	0,049	9,38	<0,001
[1] * [2] * [3]	0,137	0,034	6,48	<0,001
Błąd	0,190	0,005		

Tab. 4.53 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza, technologii wytwarzania oraz zawartości włókien polimerowo-bazaltowych na wskaźnik stabilności i indeks oporności mma za pomocą analizy wariancji ANOVA.

Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez				Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez			
	MSI				MRI			
	MSI SS	MSI MS	MSI F	MSI p	MRI SS	MRI MS	MRI F	MRI p
Wyraz wolny	26451,42	26451,42	388,511	<0,001	377011,2	377011,2	1034,557	<0,001
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [1]	17151,78	8575,89	125,960	<0,001	136841,2	68420,6	187,753	<0,001
Technologia wytwarzania [2]	4415,41	4415,41	64,8523	<0,001	32358,3	32358,3	88,794	<0,001
Zawartość włókien polimerowo-bazaltowych [3]	3138,29	1569,14	23,0471	<0,001	24218,4	12109,2	33,229	<0,001
[1] * [2]	5702,11	2851,05	41,875	<0,001	44068,7	22034,3	60,464	<0,001
[1] * [3]	6785,49	1696,37	24,916	<0,001	63124,6	15781,2	43,305	<0,001
[2] * [3]	7819,87	3909,94	57,428	<0,001	67622,0	33811,0	92,781	<0,001
[1] * [2] * [3]	11760,96	2940,24	43,185	<0,001	117306,3	29326,6	80,475	<0,001
Błąd	2451,03	68,08			13119,1	364,4		

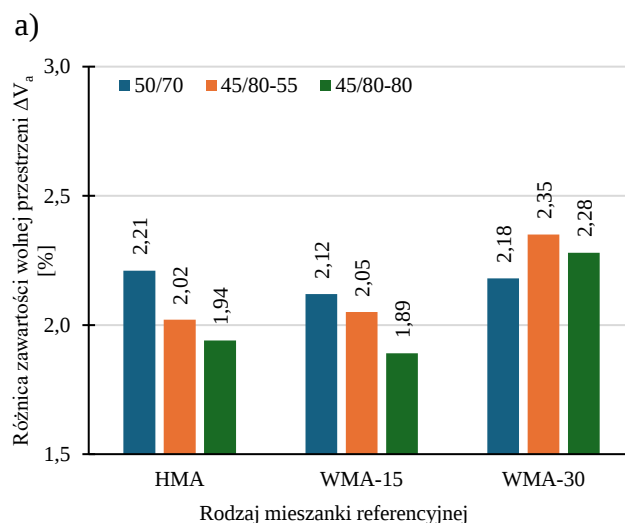
Wykonana analiza wariancji wykazała istotność statystyczną wszystkich efektów głównych oraz interakcji pomiędzy nimi ($p < 0,05$) w przypadku trzech ocenianych parametrów

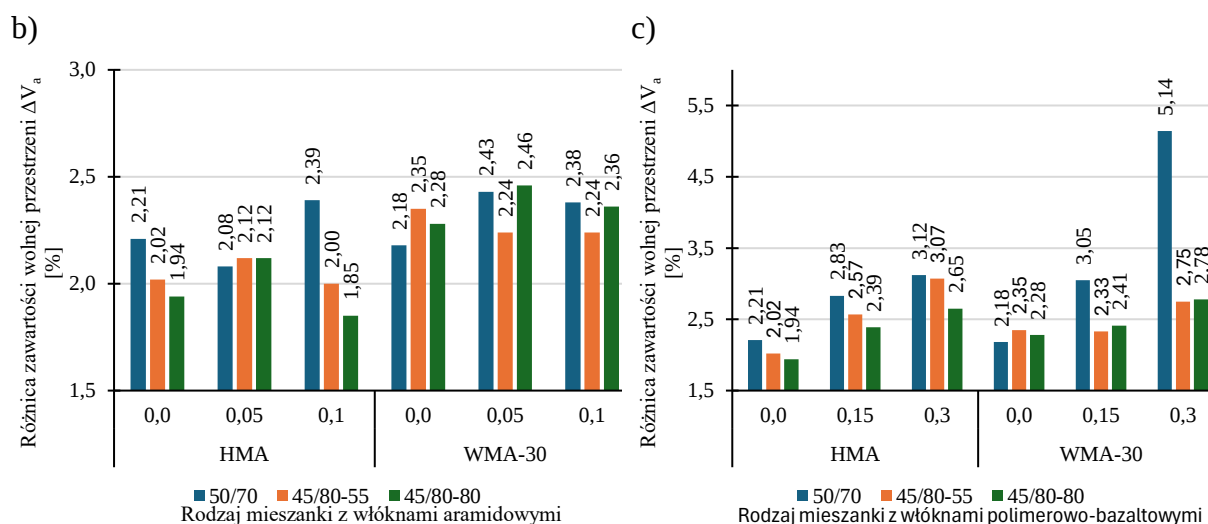
zagęszczalności dla mieszanek z włóknami polimerowo-bazaltowymi - współczynnika zagęszczalności K, MSI i MRI.

Ocena istotności różnic między parametrami zagęszczalności wykonana za pomocą testu Tukeya pozwoliła na wskazanie mieszanek mineralno-asfaltowych, które osiągnęły zbliżone poziomy tego parametru przy braku istotnych statystycznie różnic. Analiza współczynnika zagęszczalności K wykazała brak istotnych różnic pomiędzy mieszanką referencyjną z lepiszczem 50/70 wykonaną w technologii HMA, a wszystkimi mieszankami z lepiszczem asfaltowym 45/80-80. Dodatkowo brak istotnych różnic zaobserwowano pomiędzy mieszanką z lepiszczem 45/80-55 wykonaną w technologii WMA-30°C z dodatkiem 0,3% PB, a wszystkimi pozostałymi mieszankami z lepiszczami 50/70 i 45/80-55. Wskaźnik stabilności i indeks oporności wykazały te same zależności. Mieszanka referencyjna z lepiszczem 45/80-80 wykonana w obniżonej temperaturze istotnie się różniła ze wszystkimi pozostałymi mieszankami. W przypadku mieszanki z lepiszczem 45/80-80 wykonanej w technologii HMA z 0,3% PB istotne różnice wystąpiły jedynie pomiędzy mieszanką z tym samym lepiszczem i zawartością włókien wytwarzaną w obniżonej temperaturze.

Analiza rozkładu V_a

Wykonano analizę różnic ΔV_a w zawartości wolnej przestrzeni oznaczonej na próbkach żyratorowych po ich zagęszczeniu (wymiary próbki: średnica 150 mm, wysokość 130 mm; V_{gyr}) oraz po wycięciu rdzenia (wymiary próbki: średnica 100 mm, wysokość 100 mm; V_{a-r}). Wielkość ΔV_a została obliczona jako $\Delta V_a = V_{a-c} - V_{a-r}$. Docelowa zawartość wolnej przestrzeni w wyciętych rdzeniach V_{a-r} wynosiła 3%. Na rysunku 4.41 przedstawiono różnice zawartości wolnej przestrzeni na próbkach żyratorowych oraz wyciętych rdzeniach.





Rys. 4.41 Różnica zawartości wolnej przestrzeni ΔV_a w mieszankach mineralno-asfaltowych: a) referencyjnych, b) z dodatkiem włókien aramidowych, c) z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.

W przypadku mieszanek referencyjnych wykonanych w technologiach HMA i WMA-15°C zmiana rodzaju lepiszcza z asfaltu drogowego 50/70 na modyfikowane polimerami 45/80-55 oraz 45/80-80 powodowały zmniejszenie różnic w zawartości wolnych przestrzeni ΔV_a , a tym samym skutkowało to bardziej jednorodnym rozkładem wolnej przestrzeni w objętości próbek. Tendencja ta nie została zachowana w mma wytwarzanych w temperaturze obniżonej o 30°C, kiedy to wartości ΔV_a były większe w przypadku zastosowania polimeroasfaltów, niż asfaltu drogowego.

W mieszankach wytwarzanych metodą „na gorąco”, niezależnie od rodzaju zastosowanych włókien, obserwowano podobny efekt lepiszcza asfaltowego jak w mieszankach referencyjnych. Ponadto, szczególnie w mieszankach HMA z włóknami polimerowo-bazaltowymi zwiększenie dodatku włókien powodowało ogólny wzrost wartości ΔV_a .

W mieszankach wytwarzanych metodą WMA z dodatkiem włókien aramidowych zaobserwowano zwiększenie różnic w ilości wolnej przestrzeni ΔV_a w porównaniu z mieszankami HMA, a zawartość zbrojenia rozproszonego miała mały wpływ na tę wielkość. Z kolei w mieszankach WMA z włóknami polimerowo-bazaltowymi ΔV_a były zbliżone do tych w mieszankach HMA, a zwiększenie dozowania zbrojenia wpłynęło na wzrost różnic w wolnej przestrzeni w próbkach przed i po ich odwierceniu – największe zmiany w tym zakresie zaobserwowano dla próbek z lepiszczem 50/70.

W tabelach 4.54 i 4.55 przedstawiono analizę wariancji ANOVA dla mieszanek z dodatkiem zbrojenia rozproszonego w aspekcie wpływu rodzaju lepiszcza asfaltowego i technologii wytwarzania mma.

Tab. 4.54 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza i technologii wytwarzania na różnice z zawartości wolnej przestrzeni za pomocą analizy wariancji ANOVA.

Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez Mieszanki referencyjne			
	$V_{ac}-V_{ar}$ SS	$V_{ac}-V_{ar}$ MS	$V_{ac}-V_{ar}$ F	$V_{ac}-V_{ar}$ p
Wyraz wolny	120,817	120,817	11114,73	<0,001
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [1]	0,093	0,047	4,30	0,030
Technologia wytwarzania [2]	0,331	0,165	15,21	<0,001
[1] * [2]	0,149	0,037	3,42	0,030
Błąd	0,196	0,011		

Tab. 4.55 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza, technologii wytwarzania oraz zawartości włókien aramidowych na różnice z zawartości wolnej przestrzeni za pomocą analizy wariancji ANOVA.

Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez Włókna aramidowe				Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez Włókna polimerowo-bazaltowe			
	$V_{ac}-V_{ar}$ SS	$V_{ac}-V_{ar}$ MS	$V_{ac}-V_{ar}$ F	$V_{ac}-V_{ar}$ p	$V_{ac}-V_{ar}$ SS	$V_{ac}-V_{ar}$ MS	$V_{ac}-V_{ar}$ F	$V_{ac}-V_{ar}$ p
Wyraz wolny	261,764	261,764	7584,539	<0,001	385,378	385,378	744,200	<0,001
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [1]	0,161	0,080	2,325	0,112	4,819	2,409	4,653	0,016
Technologia wytwarzania [2]	0,811	0,811	23,503	<0,001	1,033	1,033	1,995	0,166
Zawartość włókien [3]	0,053	0,026	0,765	0,473	10,835	5,417	10,462	<0,001
[1] * [2]	0,193	0,096	2,788	0,075	1,592	0,796	1,537	0,229
[1] * [3]	0,217	0,054	1,570	0,203	3,352	0,838	1,618	0,191
[2] * [3]	0,008	0,004	0,110	0,896	0,844	0,422	0,815	0,451
[1] * [2] * [3]	0,192	0,048	1,389	0,257	3,323	0,831	1,604	0,194
Błąd	1,243	0,035			18,642	0,518		

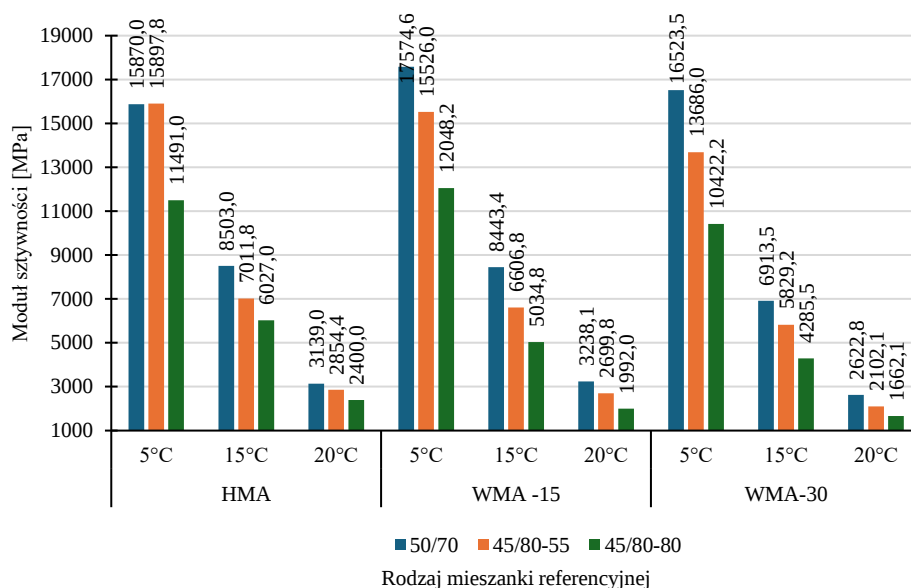
Wykonana analiza wariancji wykazała istotność statystyczną wszystkich efektów głównych oraz interakcji pomiędzy nimi ($p < 0,05$) dla mieszanek referencyjnych. W przypadku mieszanek z dodatkiem włókien aramidowych tylko wpływ technologii wytwarzania okazał się istotny statystycznie, podczas gdy w mieszkach z włóknami polimerowo-bazaltowymi istotność statystyczną potwierdzono tylko dla efektów głównych związanych z rodzajem lepiszcza asfaltowego i zawartości włókien. W przypadku analizy mieszanek z dodatkiem włókien nie potwierdzono istotności statystycznej interakcji między czynnikami.

4.6.2 Badania wpływu ilości i rodzaju włókien w mma na sztywność metodą rozciągania pośredniego IT-CY w funkcji temperatury

Badanie modułu sztywności wykonano dla każdej analizowanej mieszanki w aspekcie rodzaju zbrojenia rozproszonego w trzech temperaturach: 5°C, 15°C oraz 20°C. Wykonane analizy przeprowadzono dla mieszanek ze zbrojeniem wykonanych w technologii HMA i WMA-30°C oraz mieszanek referencyjnych w tradycyjnej technologii „na gorąco” oraz WMA-15°C i WMA- 30°C z lepiszczami spienionymi wodą. Na rysunkach 4.42 - 4.43 przedstawiono wyniki modułu sztywności z podziałem na zastosowany rodzaj włókien: aramidowych oraz polimerowo-bazaltowych.

Analiza wpływu technologii wytwarzania mieszanek referencyjnych na moduł sztywności w schemacie IT-CY

W pierwszej kolejności poddano ocenie wpływ technologii wytwarzania dla mieszanek referencyjnych bez dodatku zbrojenia rozproszonego. Na rysunku 4.42 przedstawiono wartości modułu sztywności w pośrednim rozciąganiu dla referencyjnych mieszanek mineralno-asfaltowych w aspekcie wpływu temperatur wytwarzania.



Rys. 4.42 Moduły sztywności IT-CY mieszanek referencyjnych.

W przeważającej większości przypadków zastosowanie technologii WMA spowodowało obniżenie wartości modułów sztywności analizowanych mieszanek, a najniższymi wartościami tego parametru we wszystkich temperaturach badania charakteryzowała się mieszanka WMA-30 z lepiszczami 45/80-55 i 45/80-80. Jedynie w przypadku zastosowania lepiszcza 50/70 uzyskano zwiększenie sztywności

wyprodukowanych w obniżonych temperaturach mieszanek, a najwyższymi wartościami modułu sztywności charakteryzowały się mieszanki zagęszczane w temperaturze obniżonej o 15°C.

Powyżej opisane zależności wynikające ze zmiany technologii produkcji miały znacznie mniejszą wielkość, niż efekty związane ze zmianą rodzaju lepiszcza asfaltowego. W większości przypadków zastosowanie asfaltu modyfikowanego polimerem skutkowało znacznym spadkiem sztywności materiału, co było jeszcze bardziej zauważalne w przypadku asfaltu wysokomodyfikowanego. Co więcej, zmiany te obserwowano niezależnie od temperatury badania.

Wpływ rodzaju lepiszcza asfaltowego i technologii wytwarzania na wartość modułu sztywności w pośrednim rozciąganiu analizowano szczegółowo przy zastosowaniu analizy wariancji ANOVA. Wyniki porównań wielokrotnych z wykorzystaniem testu Tukeya przedstawiono w tabelach 4.56 – 4.58 oraz w załącznikach Z.20 – Z.21.

Tab. 4.56 Określenie wpływu technologii wytwarzania na moduł sztywności IT-CY w temperaturze 5°C referencyjnych mieszanek mineralno-asfaltowych za pomocą analizy wariancji ANOVA.

Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez IT-CY 5°C			
	IT-CY 5°C SS	IT-CY 5°C MS	IT-CY 5°C F	IT-CY 5°C p
Wyraz wolny	1,110E+10	1,110E+10	9377,980	<0,001
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [1]	2,694E+08	1,347E+08	113,798	<0,001
Technologia wytwarzania [2]	2,058E+07	1,029E+07	8,695	0,001
[1] * [2]	1,331E+07	3,328E+06	2,812	0,036
Błąd	5,326E+07	1,183E+06		

Tab. 4.57 Określenie wpływu technologii wytwarzania na moduł sztywności IT-CY w temperaturze 15°C referencyjnych mieszanek mineralno-asfaltowych za pomocą analizy wariancji ANOVA.

Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez IT-CY 15°C			
	IT-CY 15°C SS	IT-CY 15°C MS	IT-CY 15°C F	IT-CY 15°C p
Wyraz wolny	2,293E+09	2,293E+09	7120,108	<0,001
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [1]	7,249E+07	3,624E+07	112,529	<0,001
Technologia wytwarzania [2]	2,122E+07	1,061E+07	32,946	<0,001
[1] * [2]	2,007E+06	5,018E+05	1,558	0,202
Błąd	1,449E+07	3,221E+05		

Tab. 4.58 Określenie wpływu technologii wytwarzania na moduł sztywności IT-CY w temperaturze 20°C referencyjnych mieszanek mineralno-asfaltowych za pomocą analizy wariancji ANOVA.

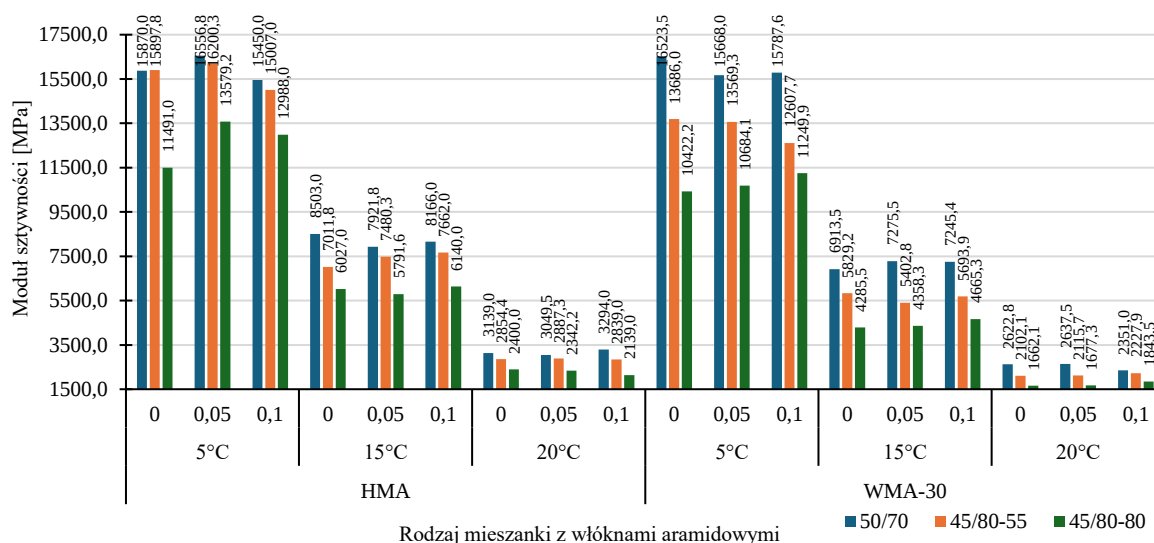
Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez IT-CY 20°C			
	IT-CY 20°C SS	IT-CY 20°C MS	IT-CY 20°C F	IT-CY 20°C p
Wyraz wolny	343836970	343836970	8231,193	<0,001
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [1]	8699760	4349880	104,133	<0,001
Technologia wytwarzania [2]	4414482	2207241	52,840	<0,001
[1] * [2]	429524	107381	2,571	0,0506
Błąd	1879760	41772		

Wykonana analiza wariancji wykazała istotność statystyczną czynników: rodzaju lepiszcza asfaltowego i technologii wytwarzania mieszanek referencyjnych we wszystkich temperaturach badania modułu sztywności. W temperaturze 5°C dodatkowo interakcje tych czynników wykazały istotność statystyczną, brak istotności wystąpił w wyższych temperaturach badania. Stwierdzić można, że moduł sztywności w pośrednim rozciąganiu zależy od rodzaju lepiszcza oraz technologii w jakiej wytwarzana i zagęszczana jest mieszanka.

Ocena istotności różnic między średnimi modułami sztywności wykonana za pomocą testu Tukeya pozwoliła na wskazanie mieszanek mineralno-asfaltowych, które osiągnęły zbliżone poziomy tego parametru przy braku istotnych statystycznie różnic. W temperaturze badania 5°C mieszanki z lepiszczem 50/70 różniły się istotnie w stosunku do mieszanek z lepiszczem 45/80-80 bez względu na technologię wykonania. Brak istotnych różnic zaobserwowano między mieszanką z lepiszczem 45/80-80 w technologii WMA-15°C oraz WMA-30°C, natomiast dla wszystkich pozostałych przypadków wykazano istotne statystycznie różnice w badaniach w temperaturach 15°C i 20°C.

Analiza wpływu rodzaju i ilości zbrojenia rozproszonego na moduł sztywności mma w schemacie IT-CY

Ocena wpływu rodzaju i ilości zbrojenia została wykonana dla mieszanek z włóknami aramidowymi i polimerowo-bazaltowymi. W analizie porównawczej zostały również uwzględnione mieszanki referencyjne bez dodatku zbrojenia rozproszonego. Wykonano analizy dla mieszanek wytwarzanych w technologii HMA i WMA-30°C. Na rysunku 4.43 przedstawiono wartości modułu sztywności w pośrednim rozciąganiu dla mieszanek z dodatkiem włókien aramidowych.



Rys. 4.43 Moduł sztywności IT-CY mieszanek z dodatkiem włókien aramidowych.

Podobnie jak w przypadku mieszanek referencyjnych, największy wpływ na wartości modułów sztywności miał rodzaj zastosowanego lepiszcza i ponownie to mieszanki mineralno-asfaltowe z lepiszczem asfaltowym 45/80-80 charakteryzowały się najniższymi wartościami tego parametru. Najwyższe wartości uzyskiwały mieszanki z lepiszczem drogowym 50/70 w każdej badanej temperaturze oraz w każdej technologii wytwarzania i zagęszczania. W przypadku mieszanek z włóknami AR zaobserwowano niewielki, niekorzystny wpływ redukcji temperatury wytwarzania na wartość modułu sztywności, szczególnie w wyższych temperaturach badania. W wielu przypadkach zastosowane zbrojenie rozproszone skutkowało niewielkim zwiększeniem sztywności badanego materiału, szczególnie gdy stosowane były lepiszcza modyfikowane polimerami.

Określenie wpływu rodzaju lepiszcza asfaltowego, technologii wytwarzania mma i ilości włókien aramidowych za pomocą analizy ANOVA przedstawiono w tabelach 4.59 - 4.61 oraz w załącznikach Z.23 – Z.25.

Tab. 4.59 Określenie wpływu włókien aramidowych na moduł sztywności IT-CY w temperaturze 5°C mieszanek mineralno-asfaltowych za pomocą analizy wariancji ANOVA.

Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez IT-CY 5°C			
	IT-CY 5°C SS	IT-CY 5°C MS	IT-CY 5°C F	IT-CY 5°C p
Wyraz wolny	2,138E+10	2,137E+10	19801,28	<0,001
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [1]	3,334E+08	1,667E+08	154,43	<0,001
Zawartość włókien [2]	5,425E+06	2,712E+06	2,51	0,086726
Technologia wytwarzania [3]	5,497E+07	5,497E+07	50,92	<0,001
[1] * [2]	1,639E+07	4,099E+06	3,80	<0,001
[1] * [3]	3,000E+07	1,500E+07	13,90	<0,001
[2] * [3]	7,519E+06	3,759E+06	3,48	0,035
[1] * [2] * [3]	1,848E+06	4,621E+05	0,43	0,788
Błąd	9,715E+07	1,079E+06		

Tab. 4.60 Określenie wpływu włókien aramidowych na moduł sztywności IT-CY w temperaturze 15°C mieszanek mineralno-asfaltowych za pomocą analizy wariancji ANOVA.

Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez IT-CY 15°C			
	IT-CY 15°C SS	IT-CY 15°C MS	IT-CY 15°C F	IT-CY 15°C p
Wyraz wolny	4,514E+09	4,514E+09	13205,29	<0,001
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [1]	1,090E+08	5,450E+07	159,45	<0,001
Zawartość włókien [2]	9,740E+05	4,870E+05	1,42	0,246
Technologia wytwarzania [3]	5,662E+07	5,662E+07	165,66	<0,001
[1] * [2]	3,090E+05	7,727E+04	0,23	0,923182
[1] * [3]	2,285E+06	1,142E+06	3,34	0,039
[2] * [3]	6,407E+04	3,203E+04	0,09	0,910
[1] * [2] * [3]	2,945E+06	7,364E+05	2,15	0,081
Błąd	3,076E+07	3,418E+05		

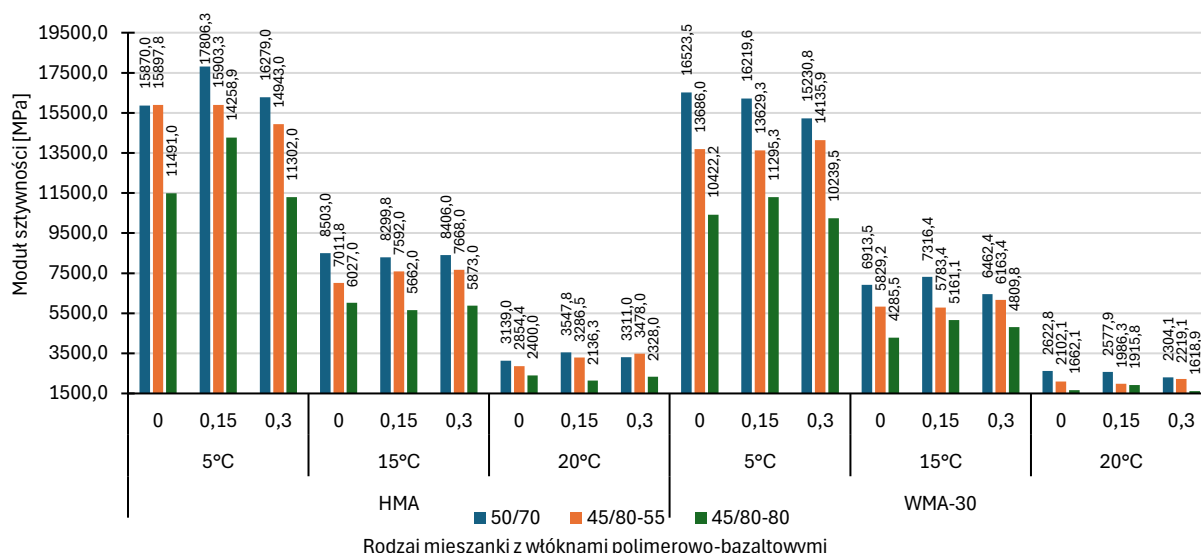
Tab. 4.61 Określenie wpływu włókien aramidowych na moduł sztywności IT-CY w temperaturze 20°C mieszanek mineralno-asfaltowych za pomocą analizy wariancji ANOVA.

Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez IT-CY 20°C			
	IT-CY 20°C SS	IT-CY 20°C MS	IT-CY 20°C F	IT-CY 20°C p
Wyraz wolny	650744407	650744407	15399,08	<0,001
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [1]	12782672	6391336	151,24	<0,001
Zawartość włókien [2]	4215	2108	0,05	0,951
Technologia wytwarzania [3]	10847424	10847424	256,69	<0,001
[1] * [2]	44726	11182	0,26	0,899
[1] * [3]	96714	48357	1,14	0,323
[2] * [3]	16529	8265	0,20	0,823
[1] * [2] * [3]	842028	210507	4,98	<0,001
Błąd	3803280	42259		

Wykonana analiza wariancji wykazała istotność statystyczną czynników: rodzaju lepiszcza asfaltowego i technologii wytwarzania mma we wszystkich temperaturach badania modułu sztywności. W temperaturach 5°C oraz 15°C dodatkowo potwierdzono istotność statystyczną interakcji tych czynników. Nie stwierdzono ponadto, aby na wartość badanego modułu sztywności miała wpływ zastosowaną zawartość włókien aramidowych. Stwierdzić można, że wartość modułu sztywności zależy przede wszystkim od rodzaju lepiszcza i temperatury w jakiej wytwarzana i zagęszczana jest mieszanka mineralno-asfaltowa.

Ocena istotności różnic między średnimi modułami sztywności wykonana za pomocą testu Tukeya pozwoliła na wskazanie mieszanek mineralno-asfaltowych, które osiągnęły zbliżone poziomy tego parametru przy braku istotnych statystycznie różnic. We wszystkich temperaturach badania mieszanki z lepiszczem 45/80-50 wykonane w technologii HMA i WMA-30°C z dodatkiem włókien aramidowych różniły się istotnie od siebie. Podobnie istotne różnice występowały w każdej temperaturze w mieszankach z lepiszczem 45/80-80 z dodatkiem włókien 0,05% AR. Brak istotnych różnic zaobserwowano w mieszankach z lepiszczem 50/70 wytwarzanych w technologii HMA i WMA-30°C w temperaturach badania 5°C i 15°C oraz mieszankach z lepiszczem 45/80-80 z 0,1% AR w technologii HMA i WMA-30°C w temperaturach 5°C i 20°C.

Efekty rodzaju lepiszcza asfaltowego, technologii wytwarzania mma i ilości włókien polimerowo-bazaltowych na wartości modułu sztywności mieszanek mineralno-asfaltowych przedstawiono na rysunku 4.44.



Rys. 4.44 Moduł sztywności IT-CY mieszanek z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.

Analizując wartości modułów sztywności w pośrednim rozciąganiu mieszanek z włóknami polimerowo-bazaltowymi można zauważyć, że ponownie najniższe wartości uzyskały mieszanki z lepiszczem 45/80-80 bez względu na temperaturę badania, technologię wytwarzania i zawartość włókien. Niewielki pozytywny wpływ zastosowania włókien można zauważyć w przypadku każdego z lepiszczy asfaltowych niezależnie od temperatury badania. Największe wartości modułu sztywności w zależności od rodzaju lepiszcza i temperatury badania obserwowano albo dla zawartości 0,15% albo 0,30% zbrojenia rozproszonego, wielkość tych efektów jednak najczęściej była mniejsza niż efektu związanego ze zmianą technologii produkcji mma.

Wpływ rodzaju lepiszcza asfaltowego, technologii wytwarzania i zawartości włókien polimerowo-bazaltowych na wartość modułu sztywności analizowano szczegółowo przy zastosowaniu analizy wariancji ANOVA. Wyniki porównań wielokrotnych z wykorzystaniem testu Tukeya przedstawiono w tabelach 4.62 - 4.64 oraz w załącznikach Z.26 – Z.28.

Tab. 4.62 Określenie wpływu włókien polimerowo-bazaltowych na moduł sztywności IT-CY w temperaturze 5°C mieszanek mineralno-asfaltowych za pomocą analizy wariancji ANOVA.

Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez IT-CY 5°C			
	IT-CY 5°C SS	IT-CY 5°C MS	IT-CY 5°C F	IT-CY 5°C p
Wyraz wolny	2,169E+10	2,169E+10	15424,03	<0,001
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [1]	4,330E+08	2,165E+08	153,93	<0,001
Zawartość włókien [2]	2,637E+07	1,318E+07	9,37	<0,001
Technologia wytwarzania [3]	5,099E+07	5,099E+07	36,25	<0,001
[1] * [2]	1,336E+07	3,340E+06	2,37	0,058
[1] * [3]	6,900E+06	3,450E+06	2,45	0,092
[2] * [3]	1,098E+07	5,493E+06	3,91	0,024
[1] * [2] * [3]	8,550E+06	2,137E+06	1,52	0,203
Błąd	1,266E+08	1,406E+06		

Tab. 4.63 Określenie wpływu włókien polimerowo-bazaltowych na moduł sztywności IT-CY w temperaturze 15°C mieszanek mineralno-asfaltowych za pomocą analizy wariancji ANOVA.

Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez IT-CY 15°C			
	IT-CY 15°C SS	IT-CY 15°C MS	IT-CY 15°C F	IT-CY 15°C p
Wyraz wolny	4,623E+09	4,623E+09	16695,17	<0,001
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [1]	1,001E+08	5,005E+07	180,75	<0,001
Zawartość włókien [2]	7,989E+05	3,994E+05	1,44	0,242
Technologia wytwarzania [3]	5,057E+07	5,057E+07	182,65	<0,001
[1] * [2]	1,992E+06	4,982E+05	1,80	0,136
[1] * [3]	9,609E+05	4,804E+05	1,74	0,182
[2] * [3]	9,915E+05	4,957E+05	1,79	0,173
[1] * [2] * [3]	3,326E+06	8,315E+05	3,00	0,022
Błąd	2,492E+07	2,769E+05		

Tab. 4.64 Określenie wpływu włókien polimerowo-bazaltowych na moduł sztywności IT-CY w temperaturze 20°C mieszanek mineralno-asfaltowych za pomocą analizy wariancji ANOVA.

Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez IT-CY 20°C			
	IT-CY 20°C SS	IT-CY 20°C MS	IT-CY 20°C F	IT-CY 20°C p
Wyraz wolny	689782561	689782561	18473,86	<0,001
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [1]	15678342	7839171	209,95	<0,001
Zawartość włókien [2]	238418	119209	3,19	0,046
Technologia wytwarzania [3]	18610676	18610676	498,43	<0,001
[1] * [2]	1029312	257328	6,89	<0,001
[1] * [3]	1351103	675551	18,09	<0,001
[2] * [3]	468915	234458	6,28	0,003
[1] * [2] * [3]	1044568	261142	6,99	<0,001
Błąd	3360448	37338		

Analiza wariancji wykazała istotność statystyczną wszystkich efektów głównych oraz interakcji pomiędzy nimi ($p < 0,05$) w przypadku badania modułu sztywności w temperaturze 20°C. W niższych temperaturach rodzaj zastosowanego lepiszcza i technologia wytwarzania również wykazały istotność statystyczną. Dodatkowo, w temperaturze 5°C zawartość włókien polimerowo-bazaltowych oraz ich interakcja z technologią wytwarzania okazały się istotne dla wartości modułu sztywności. Stwierdzić można, że zawartość włókien polimerowo-bazaltowych, w odróżnieniu od włókien aramidowych, w każdej z analizowanych temperatur wpływa na wartość modułu sztywności.

Ocena istotności różnic między średnimi modułami sztywności wykonana za pomocą testu Tukeya pozwoliła na wskazanie mieszanek mineralno-asfaltowych, które osiągnęły zbliżone poziomy tego parametru przy braku istotnych statystycznie różnic. W temperaturze 5°C zauważono istotne różnice pomiędzy mieszankami z lepiszczem 45/80-80 w technologii WMA-30°C z dodatkiem zbrojenia rozproszonego, a mieszankami z lepiszczem 50/70 bez względu na technologię wytwarzania i zawartość włókien. W najwyższej temperaturze badania wykazano istotne statystycznie różnice mieszanki referencyjnej z lepiszczem 45/80-55

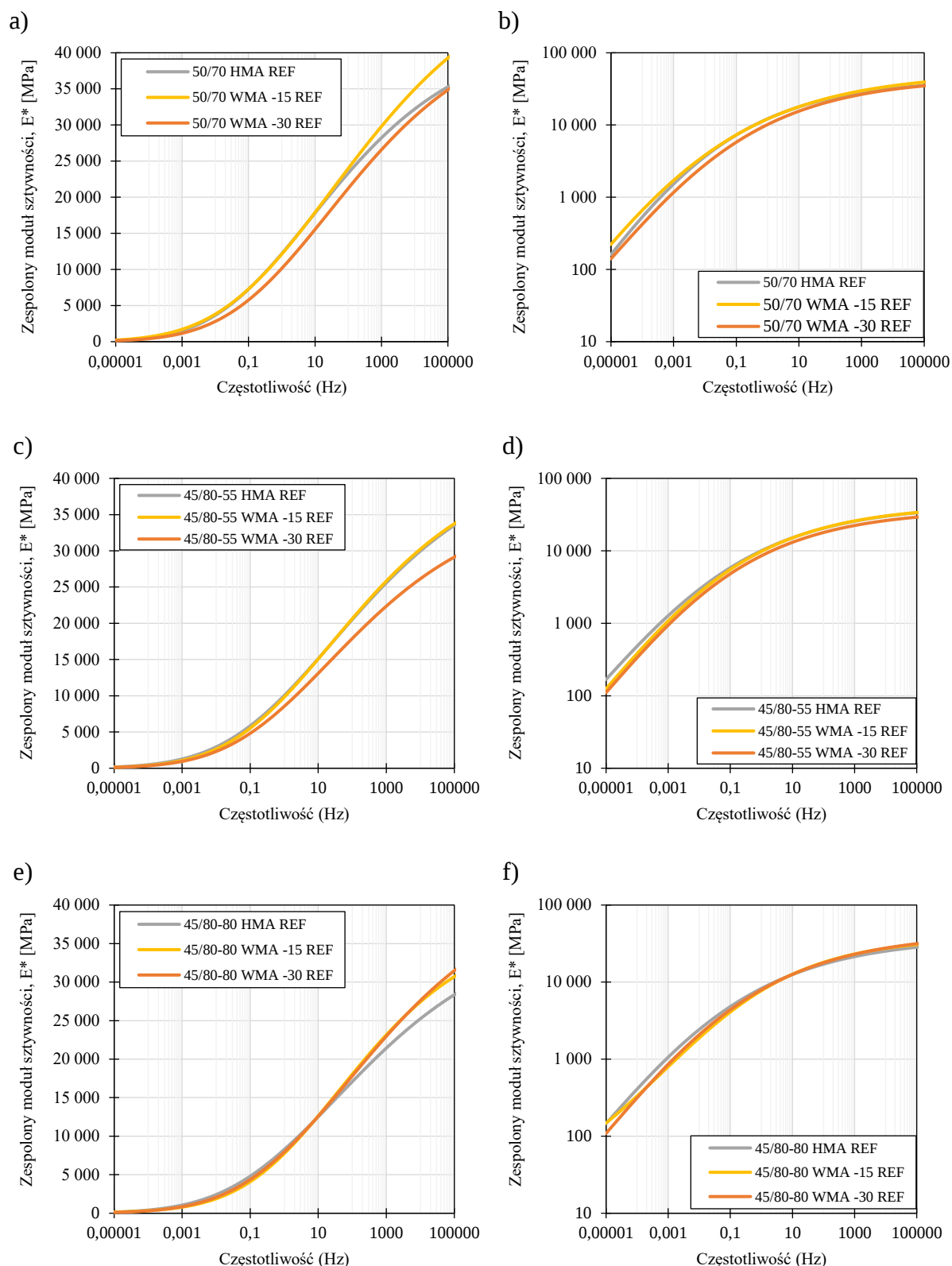
w technologii HMA względem pozostałych mieszanek z tym samym lepiszczem oraz wszystkich mieszanek z lepiszczem 45/80-80.

4.6.3 Badania wpływu ilości i rodzaju włókien w mma na zespolony moduł sztywności

Badania zespolonego modułu sztywności wykonano przy częstotliwościach równych 25 Hz, 10 Hz, 5 Hz, 1 Hz, 0,5 Hz, 0,1 Hz oraz czterech temperaturach: -10°C, 5°C, 20°C i 35°C. Analizy przeprowadzono dla mieszanek ze zbrojeniem rozproszonym wykonanych w technologii HMA i WMA-30 oraz mieszanek referencyjnych w tradycyjnej technologii „na gorąco” oraz obniżonych temperaturach o 15°C i 30°C z lepiszczami spienionymi wodą. Odrębnie analizowano wpływ temperatury wytwarzania i rodzaju lepiszcza asfaltowego na mieszanki referencyjne oraz dodatkowo wpływ ilości i rodzaju zbrojenia w technologii tradycyjnej i obniżonej o 30°C.

Analiza wpływu technologii wytwarzania mieszanek referencyjnych na zespolony moduł sztywności

Ocena wpływu technologii wytwarzania została wykonana dla mieszanek referencyjnych bez dodatku zbrojenia rozproszonego. W analizie została uwzględniona tradycyjna technologia „na gorąco” oraz technologia z asfaltem spienionym i obniżoną temperaturą o 15°C i 30°C. Dla mieszanek referencyjnych wytwarzanych i zagęszczanych w technologii HMA, WMA-15°C i WMA-30°C, na rysunku 4.45 przedstawiono wyniki w postaci krzywych wiodących zbudowanych dla temperatury 10°C. Wyniki dla każdego z lepiszczy przedstawiono dwukrotnie: na wykresach a, c i e w skali liniowej dla ukazania różnic w zakresie wysokich częstotliwości oraz w skali logarytmicznej na wykresach b, d i f dla lepszego rozróżnienia wyników w zakresie niskich częstotliwości.

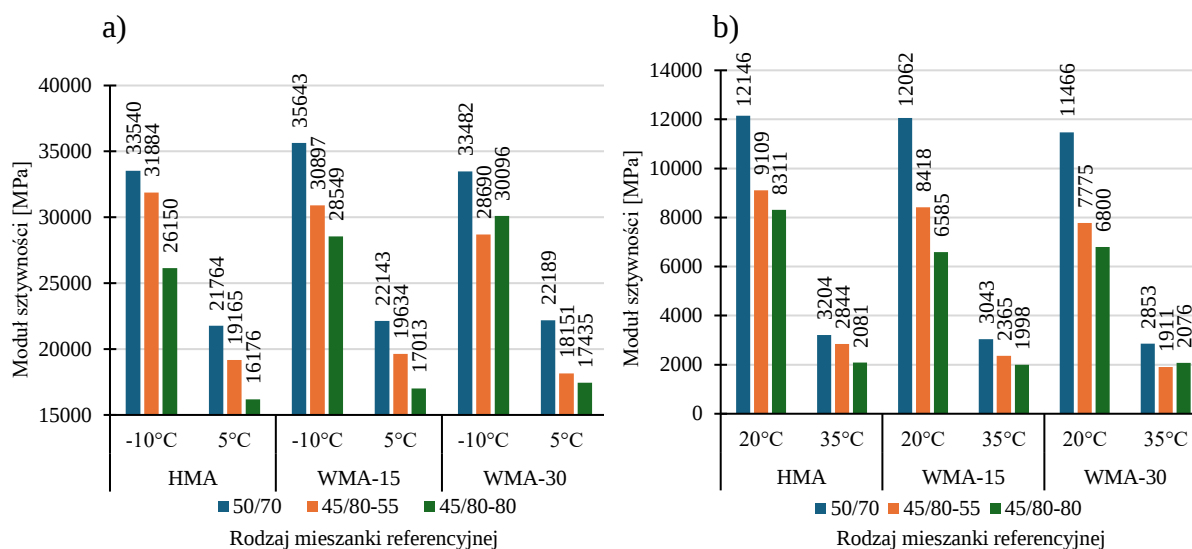


Rys. 4.45 Krzywe wiodące referencyjnych mieszanek mineralno-asfaltowych z lepiszczem: a), b) 50/70, c), d) 45/80-55, e), f) 45/80-80.

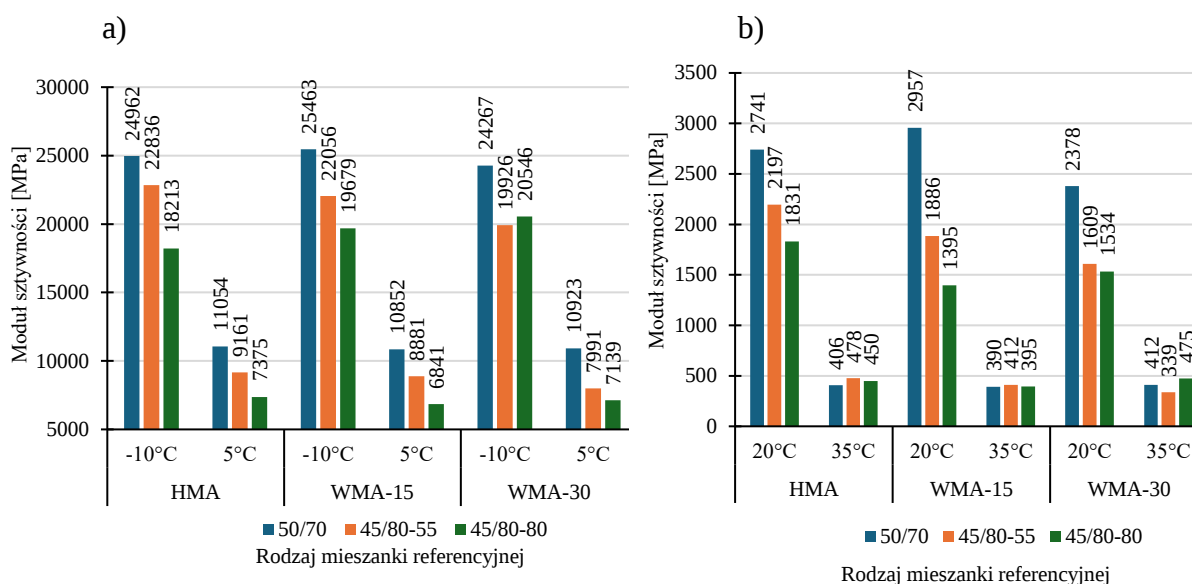
Najniższe wartości modułów sztywności mieszanek mineralno-asfaltowych z lepiszczem 50/70 w zakresie wysokich częstotliwości uzyskały mieszanki zagęszczane

w temperaturze obniżonej o 30°C, natomiast najwyższe wartości w zakresie niskich częstotliwości badania posiadały mieszanki zagęszczane w obniżonej temperaturze o 15°C. W przypadku mieszanek z lepiszczem 45/80-55 w wysokich częstotliwościach najniższe wartości tego parametru charakteryzowały mieszanki WMA-30°C, a krzywe wiodące dla dwóch pozostałych tj. HMA i WMA-15°C pokrywały się. W niskich częstotliwościach najbardziej korzystne (najwyższe) wartości modułu sztywności odnotowano dla mieszanki wytwarzanej metodą „na gorąco”. Mieszanki z lepiszczem wysokomodyfikowanym charakteryzowały się największymi wartościami modułu sztywności w wysokich częstotliwościach, kiedy były wytwarzane w technologiach obniżonych temperatur, podczas gdy mieszanki HMA charakteryzowały najniższe wartości modułu sztywności. W niskich częstotliwościach natomiast najwyższe wartości modułu zespolonego sztywności zarejestrowano dla mieszanki zagęszczanej w obniżonej temperaturze o 30°C. Podobnie jak w przypadku wyników sztywności uzyskanych w schemacie obciążania IT-CY, rodzaj lepiszcza asfaltowego miał istotny wpływ na rejestrowane wartości zespolonych modułów sztywności – najwyższe uzyskiwano z lepiszczem 50/70 a najniższe z wysokomodyfikowanym asfaltem 45/80-80.

W celu dokonania szczegółowej analizy wpływu analizowanych czynników na wyniki badań, na rysunkach 4.46 i 4.47 przedstawiono wartości zespolonego modułu sztywności określone w 10 Hz oraz 0,1 Hz dla referencyjnych mieszanek mineralno-asfaltowych w aspekcie wpływu temperatury wytwarzania i rodzaju zastosowanego lepiszcza asfaltowego.



Rys. 4.46 Zespolony moduł sztywności przy częstotliwości równej 10 Hz dla mieszanek referencyjnych.



Rys. 4.47 Zespolony moduł sztywności przy częstotliwości równej 0,1 Hz dla mieszanek referencyjnych.

Podobnie jak we wcześniej analizowanych przypadkach, przy częstotliwości 10 Hz zaobserwowano spadek zespolonego modułu sztywności w każdej z analizowanych temperatur kiedy stosowano lepiszcza modyfikowane polimerami, a najniższe wartości najczęściej obserwowano przy stosowaniu asfaltu wysokomodyfikowanego. Najwyższe wartości uzyskały mieszanki z lepiszczem asfaltowym 50/70 bez względu na technologię wytwarzania, temperaturę badania i częstotliwość działania obciążenia. Podobne zależności zaobserwowano przy niskiej częstotliwości 0,1 Hz, która odpowiada dłuższemu oddziaływaniu pojazdów na nawierzchnię, np. podczas krótkiego postoju, w tym przypadku jednak, kiedy temperatura badania była najwyższa i wynosiła 35°C wpływ rodzaju zastosowanego lepiszcza asfaltowego znacznie się zmniejszał, a lepsze rezultaty (wyższe wartości E^*) uzyskiwano dla lepiszczy modyfikowanych polimerami.

Wpływ rodzaju lepiszcza asfaltowego i technologii wytwarzania mieszanek referencyjnych na wartość zespolonego modułu sztywności analizowano szczegółowo przy zastosowaniu analizy wariancji ANOVA. Wyniki porównań wielokrotnych z wykorzystaniem testu Tukeya przedstawiono w tabelach 4.65 - 4.68 oraz w załącznikach Z.29 – Z.32.

Tab. 4.65 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza i technologii wytwarzania na zespolony moduł sztywności w temperaturze -10°C mieszanek mineralno-asfaltowych za pomocą analizy wariancji ANOVA.

Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez -10°C			
	M SS	M MS	M F	M p
Wyraz wolny	2,593E+10	2,593E+10	5725,999	<0,001
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [1]	1,630E+08	8,154E+07	18,004	<0,001
Technologia wytwarzania [2]	6,931E+06	3,465E+06	0,765	0,479
[1] * [2]	4,193E+07	1,048E+07	2,315	0,096
Błąd	8,152E+07	4,529E+06		

Tab. 4.66 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza i technologii wytwarzania na zespolony moduł sztywności w temperaturze 5°C mieszanek mineralno-asfaltowych za pomocą analizy wariancji ANOVA.

Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez 5°C			
	M SS	M MS	M F	M p
Wyraz wolny	1,005E+10	1,005E+10	6932,064	<0,001
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [1]	1,210E+08	6,050E+07	41,721	<0,001
Technologia wytwarzania [2]	1,438E+06	7,193E+05	0,496	0,617
[1] * [2]	4,796E+06	1,199E+06	0,827	0,525
Błąd	2,610E+07	1,450E+06		

Tab. 4.67 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza i technologii wytwarzania na zespolony moduł sztywności w temperaturze 20°C mieszanek mineralno-asfaltowych za pomocą analizy wariancji ANOVA.

Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez 20°C			
	M SS	M MS	M F	M p
Wyraz wolny	2,278E+09	2,278E+09	1581,092	<0,001
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [1]	1,053E+08	5,265E+07	36,545	<0,001
Technologia wytwarzania [2]	6,575E+06	3,287E+06	2,282	0,131
[1] * [2]	2,227E+06	5,567E+05	0,386	0,816
Błąd	2,593E+07	1,440E+06		

Tab. 4.68 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza i technologii wytwarzania na zespolony moduł sztywności w temperaturze 35°C mieszanek mineralno-asfaltowych za pomocą analizy wariancji ANOVA.

Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez 35°C			
	M SS	M MS	M F	M p
Wyraz wolny	166880208	166880208	8856,629	<0,001
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [1]	4506254	2253127	119,577	<0,001
Technologia wytwarzania [2]	834869	417434	22,154	<0,001
[1] * [2]	669115	167279	8,878	<0,001
Błąd	339163	18842		

Wykonana analiza wariancji wykazała istotność statystyczną wszystkich efektów głównych oraz interakcji pomiędzy nimi ($p < 0,05$) w przypadku badania zespolonego modułu sztywności w temperaturze 35°C. Niższe temperatury badania wykazały istotność statystyczną jedynie dla oceny wpływu lepiszcza asfaltowego. Technologia wytwarzania oraz interakcja

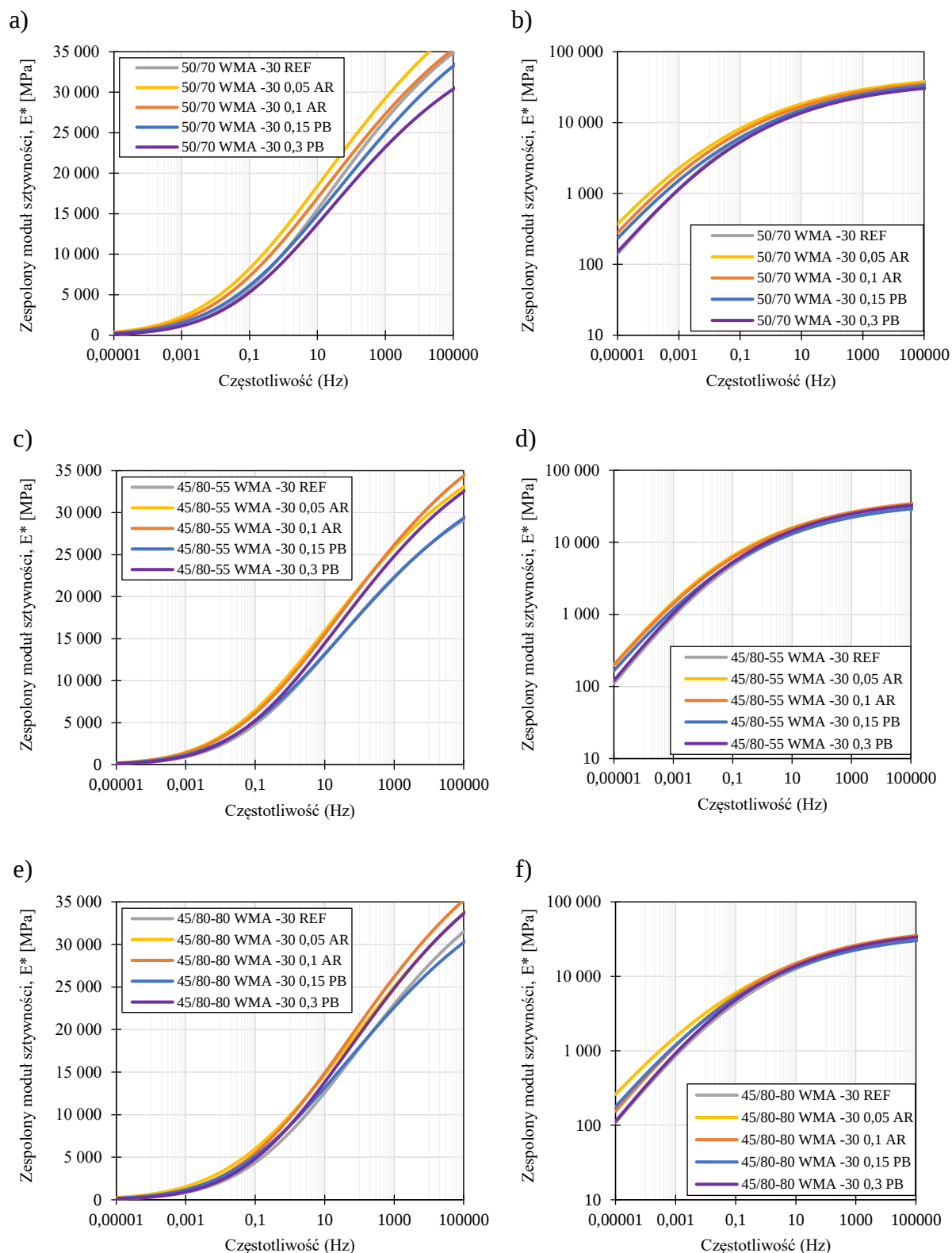
czynników nie była istotna statystycznie. Pozwala to na stwierdzenie, że obniżenie temperatury wytwarzania mma nie miało wpływu na wartość zespolonego modułu sztywności badanych mieszanek.

Ocena istotności różnic między średnimi modułami sztywności wykonana za pomocą testu Tukeya pozwoliła na wskazanie mieszanek mineralno-asfaltowych, które osiągnęły zbliżone poziomy tego parametru przy braku istotnych statystycznie różnic. Zaobserwowano istotne różnice w badaniu w temperaturze 35°C pomiędzy mieszankami z lepiszczem asfaltowym 50/70 i 45/80-80 ze względu na technologię wytwarzania, a także między mieszankami z lepiszczem 45/80-55 wytwarzanymi w obniżonych temperaturach (WMA-15 i WMA-30). W pozostałych temperaturach badania zauważono brak istotnych różnic pomiędzy mieszanką z lepiszczem 45/80-55 w technologii HMA a wszystkimi pozostałymi mieszankami. Istotne statystycznie różnice występowały jedynie w wysokiej temperaturze pomiędzy tą mieszanką a mieszankami wytwarzanymi z lepiszczem 45/80-80.

Analiza wpływu rodzaju i ilości zbrojenia rozproszonego na zespolony moduł sztywności mma

Ocena wpływu rodzaju i ilości zbrojenia rozproszonego oraz technologii wytwarzania została wykonana dla mieszanek bez dodatku zbrojenia rozproszonego oraz ze zmienną ilością włókien. W analizie została uwzględniona tradycyjna technologia „na gorąco” oraz technologia z asfaltem spienionym i obniżoną temperaturą o 30°C. Dla mieszanek wytwarzanych i zagęszczanych w obniżonej temperaturze z dodatkiem zbrojenia rozproszonego wykonano analizę krzywych wiodących zbudowanych dla temperatury 10°C, przedstawionych na rysunku 4.49. Podobnie jak dla poprzedniej analizy, wyniki dla każdego z lepiszczy przedstawiono dwukrotnie, w skali liniowej i logarytmicznej dla lepszej czytelności rysunków.

Dodatkowo na rysunku 4.48 przedstawiono wykres krzywych Blacka dla mieszanek z lepiszczem asfaltowym 45/80-80 zagęszczanych w obniżonych temperaturach o 30°C.

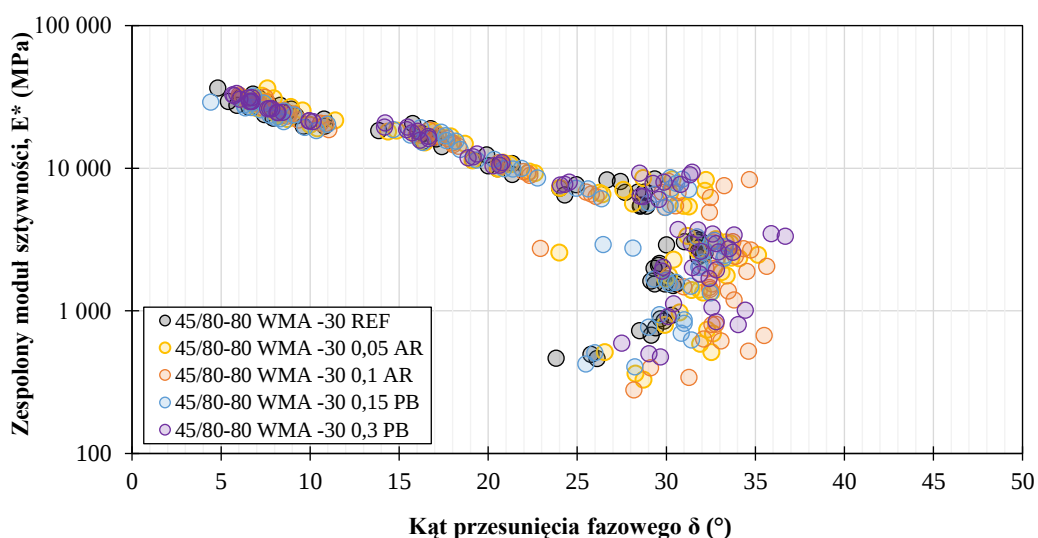


Rys. 4.48 Krzywe wiodące mieszanek mineralno-asfaltowych wytwarzanych w obniżonych temperaturach z lepiszczem asfaltowym: a), b) 50/70, c), d) 45/80-55, e), f) 45/80-80.

Na podstawie przedstawionych wykresów można zauważyć, że analizowane rodzaje i zawartości włókien w różny sposób zmieniały przebieg krzywych wiodących zespolonych

modułów sztywności mieszanek mineralno-asfaltowych w zależności od zastosowanego lepiszcza. W przypadku asfaltu drogowego 50/70 kolejność od najmniej do najbardziej sztywnych mieszanek w zakresie niskich i wysokich częstotliwości nie ulegała większym zmianom. Najniższe wartości modułów sztywności mieszanek mineralno-asfaltowych z lepiszczem 50/70 w niskich i wysokich częstotliwościach uzyskały mieszanki z dodatkiem 0,3% włókien polimerowo-bazaltowych, natomiast najwyższe wartości w całym zakresie badania charakteryzowały mieszanki z dodatkiem włókien aramidowych (szczególnie 0,05%). Można dodatkowo stwierdzić, że mieszanka referencyjna miała w ogólnym ujęciu najmniej korzystne właściwości (niska sztywność w niskich częstotliwościach i względnie wysoka w wysokich częstotliwościach).

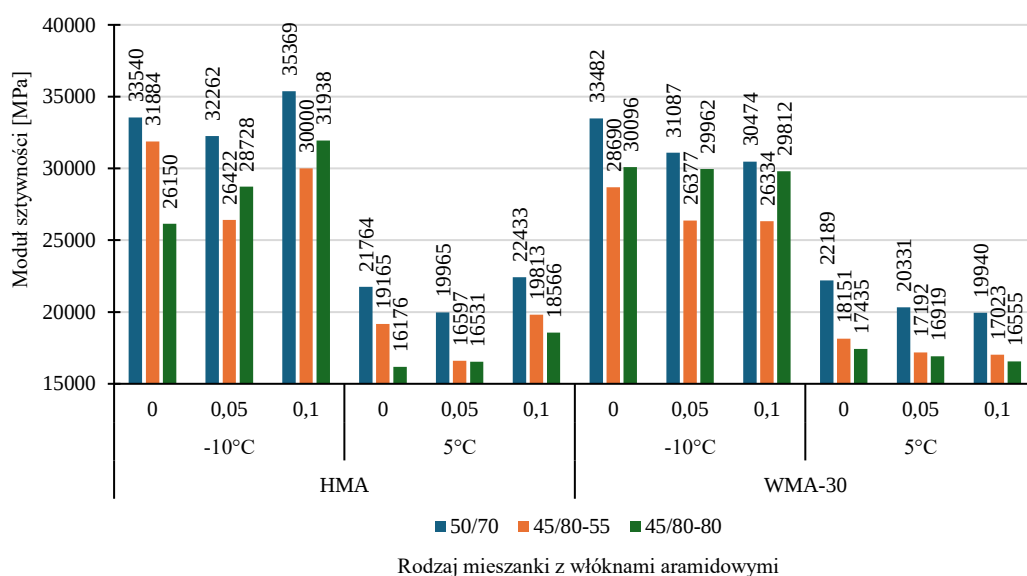
W przypadku zastosowania lepiszcza 45/80-55 można wskazać na korzystną charakterystykę mieszanki z dodatkiem 0,15% włókien polimerowo-bazaltowych, z względnie małymi sztywnościami w niskich temperaturach badania i wysokich częstotliwościach i względnie dużymi sztywnościami w zakresie wysokich częstotliwości. W tej grupie mieszanek krzywe wiodące mieszanki referencyjnej oraz z 0,15% PB pokrywały się tylko przy wysokich częstotliwościach, wskazując na pozytywny wpływ zbrojenia rozproszonego w zależności od warunków badania mieszanki. Rozpatrując tylko zakres niskich częstotliwości, najkorzystniejszy wynik uzyskały mieszanki z dodatkiem włókien aramidowych. Podobne zależności jak dla mieszanki z lepiszczem modyfikowanym 45/80-55 posiadały mieszanki z lepiszczem 45/80-80, gdzie w niskich temperaturach najniższe wartości uzyskały mieszanki z dodatkiem 0,15% włókien PB, natomiast w wysokich temperaturach korzystniej wypadały mieszanki ze zbrojeniem w postaci włókien aramidowych.



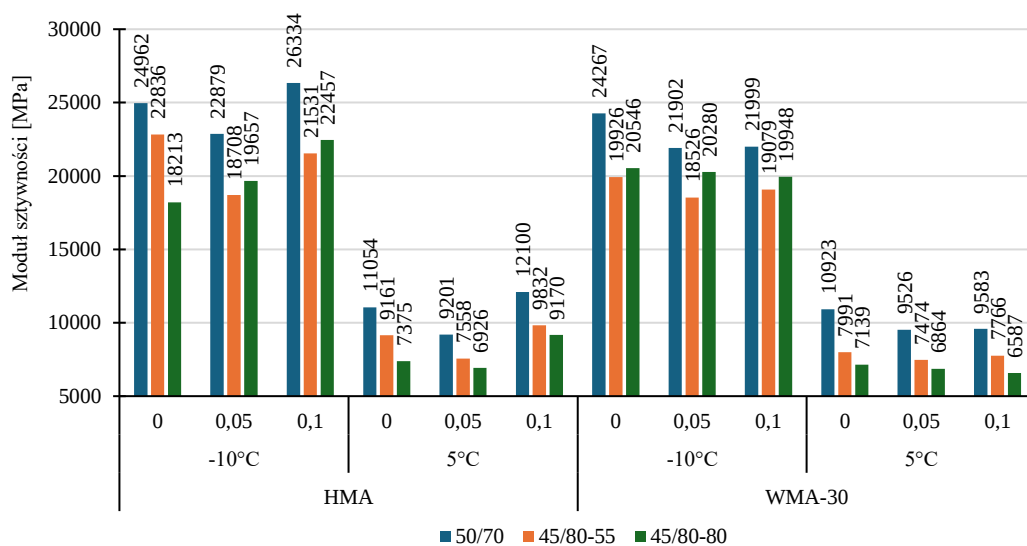
Rys. 4.49 Wykres Blacka mieszanek z lepiszczem 45/80-80 zagęszczanych w obniżonych temperaturach.

Wykres Blacka (rys. 4.49) przedstawia charakterystyki mieszanek z lepiszczem wysokomodyfikowanym 45/80-80 zagęszczanych w obniżonych temperaturach w wysokich temperaturach badania przy niskich częstotliwościach oraz niskich temperaturach i wysokich częstotliwościach badania. W niskich temperaturach mieszanki zachowują się w podobny sposób, a różnice widoczne są szczególnie podczas badań w wysokich temperaturach. Mieszanki z dodatkiem włókien aramidowych posiadają wyższe kąty przesunięcia fazowego w badaniach w wysokich temperaturach.

Podobnie jak w przypadku analizy wpływu technologii wytwarzania (temperatury), w celu dokonania szczegółowej analizy wpływu analizowanych czynników w aspekcie rodzaju i ilości zbrojenia rozproszonego na wyniki badań, na rysunkach 4.50 i 4.51 przedstawiono wartości zespolonego modułu sztywności mieszanek z włóknami aramidowymi oznaczone w 10 Hz oraz 0,1 Hz w temperaturach -10°C i 5°C, a na rysunkach 4.52 i 4.53 w temperaturach 20°C i 35°C.

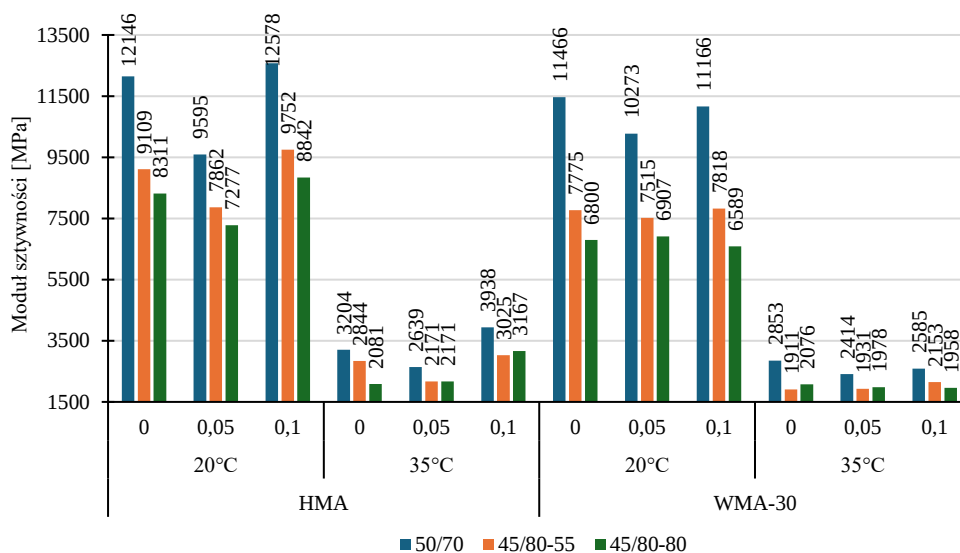


Rys. 4.50 Zespolony moduł sztywności w temperaturach -10°C i 5°C przy częstotliwości równej 10 Hz dla mma z dodatkiem włókien aramidowych.



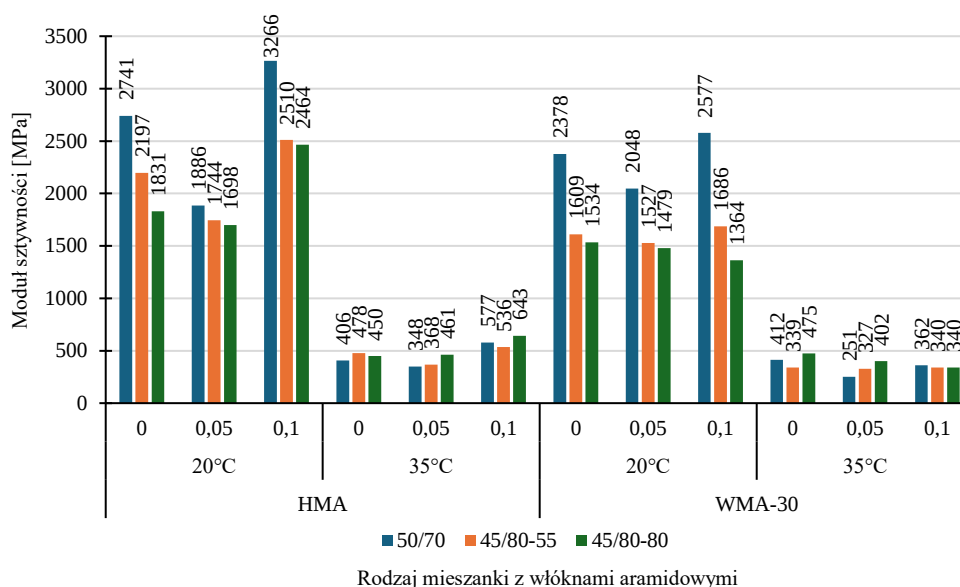
Rodzaj mieszanki z włóknami aramidowymi

Rys. 4.51 Zespolony moduł sztywności w temperaturach -10°C i 5°C przy częstotliwości równej 0,1 Hz dla mma z dodatkiem włókien aramidowych.



Rodzaj mieszanki z włóknami aramidowymi

Rys. 4.52 Zespolony moduł sztywności w temperaturach 20°C i 35°C przy częstotliwości równej 10 Hz dla mma z dodatkiem włókien aramidowych.



Rys. 4.53 Zespolony moduł sztywności w temperaturach 20°C i 35°C przy częstotliwości równej 0,1 Hz dla mma z dodatkiem włókien aramidowych.

Przy obu częstotliwościach i we wszystkich temperaturach badania najwyższe wartości zespolonego modułu sztywności uzyskiwały mieszanki z lepiszczem 50/70. W temperaturze -10°C, w przypadku wszystkich mieszanek z włóknami aramidowymi niezależnie od częstotliwości badania, wyższe wartości modułów zespolonych sztywności uzyskano stosując lepiszcze wysokomodyfikowane w porównaniu do asfaltu 45/80-55. W przypadku mieszanki HMA bez dodatku włókien z lepiszczem wysokomodyfikowanym zanotowano niższą wartość E^* niż z lepiszczem 45/80-55. W dwóch wyższych temperaturach, tj. 5, 20°C, niezależnie od stosowania włókien i częstotliwości badania, zastosowanie asfaltu 45/80-55 pozwalało uzyskać wyższe wartości zespolonych modułów sztywności. W temperaturze 35°C i częstotliwości 10 Hz opisane zależności zostały w większości zachowane, podczas gdy w częstotliwości 0,1 Hz zastosowanie włókien aramidowych powodowało uzyskanie istotnie wyższych wartości E^* z asfaltem wysokomodyfikowanym niż z drogowym i 45/80-55, szczególnie w przypadku mieszanki WMA-30. W pozostałych przypadkach, technologia wytwarzania w obniżonych temperaturach najczęściej skutkowałą redukcją sztywności materiału, ale efekty te miały podobną wielkość do tych związanych z rodzajem lepiszcza. Wpływ dodatku włókien aramidowych skutkował w większości przypadków niewielkim wzrostem rejestrowanych sztywności, szczególnie gdy stosowano 0,1% dodatku. Duże zmiany w efekcie zastosowania zbrojenia w formie włókien aramidowych obserwowano w mieszankach HMA z lepiszczem 50/70, gdzie dodatek 0,1% AR skutkował znacznym wzrostem wartości E^* .

Wpływ rodzaju lepiszcza asfaltowego, technologii wytwarzania i zawartości włókien aramidowych na wartość zespolonego modułu sztywności analizowano szczegółowo przy

zastosowaniu analizy wariancji ANOVA. Wyniki analizy wariancji przedstawiono w tabelach 4.69 - 4.72 a tabele porównań wielokrotnych z wykorzystaniem testu Tukeya zamieszczono w załącznikach Z.33 – Z.36.

Tab. 4.69 Określenie wpływu włókien aramidowych na zespolony moduł sztywności w temperaturze -10°C mieszanek mineralno-asfaltowych za pomocą analizy wariancji ANOVA.

Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez -10°C			
	M SS	M MS	M F	M p
Wyraz wolny	4,907E+10	4,907E+10	12978,24	<0,001
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [1]	1,887E+08	9,439E+07	24,97	<0,001
Technologia wytwarzania [2]	1,659E+07	1,659E+07	4,39	0,043
Zawartość włókien [3]	2,727E+07	1,363E+07	3,61	0,037
[1] * [2]	3,067E+07	1,533E+07	4,06	0,026
[1] * [3]	5,154E+07	1,288E+07	3,41	0,018
[2] * [3]	4,075E+07	2,037E+07	5,39	<0,001
[1] * [2] * [3]	1,788E+07	4,470E+06	1,18	0,335065
Błąd	1,361E+08	3,781E+06		

Tab. 4.70 Określenie wpływu włókien aramidowych na zespolony moduł sztywności w temperaturze 5°C mieszanek mineralno-asfaltowych za pomocą analizy wariancji ANOVA.

Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez 5°C			
	M SS	M MS	M F	M p
Wyraz wolny	1,889E+10	1,889E+10	16803,10	<0,001
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [1]	1,632E+08	8,162E+07	72,57	<0,001
Technologia wytwarzania [2]	4,635E+06	4,635E+06	4,12	0,049
Zawartość włókien [3]	1,674E+07	8,370E+06	7,44	0,002
[1] * [2]	2,023E+06	1,011E+06	0,90	0,416
[1] * [3]	6,880E+06	1,720E+06	1,53	0,214
[2] * [3]	2,309E+07	1,154E+07	10,27	<0,001
[1] * [2] * [3]	2,450E+06	6,127E+05	0,54	0,704
Błąd	4,049E+07	1,124E+06		

Tab. 4.71 Określenie wpływu włókien aramidowych na zespolony moduł sztywności w temperaturze 20°C mieszanek mineralno-asfaltowych za pomocą analizy wariancji ANOVA.

Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez 20°C			
	M SS	M MS	M F	M p
Wyraz wolny	4,362E+09	4,362E+09	5823,873	<0,001
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [1]	1,391E+08	6,955E+07	92,867	<0,001
Technologia wytwarzania [2]	1,399E+07	1,399E+07	18,685	<0,001
Zawartość włókien [3]	1,549E+07	7,746E+06	10,342	<0,001
[1] * [2]	2,085E+06	1,042E+06	1,392	0,261
[1] * [3]	4,062E+06	1,015E+06	1,356	0,268
[2] * [3]	7,895E+06	3,947E+06	5,270	<0,001
[1] * [2] * [3]	1,048E+05	2,621E+04	0,035	0,997
Błąd	2,696E+07	7,490E+05		

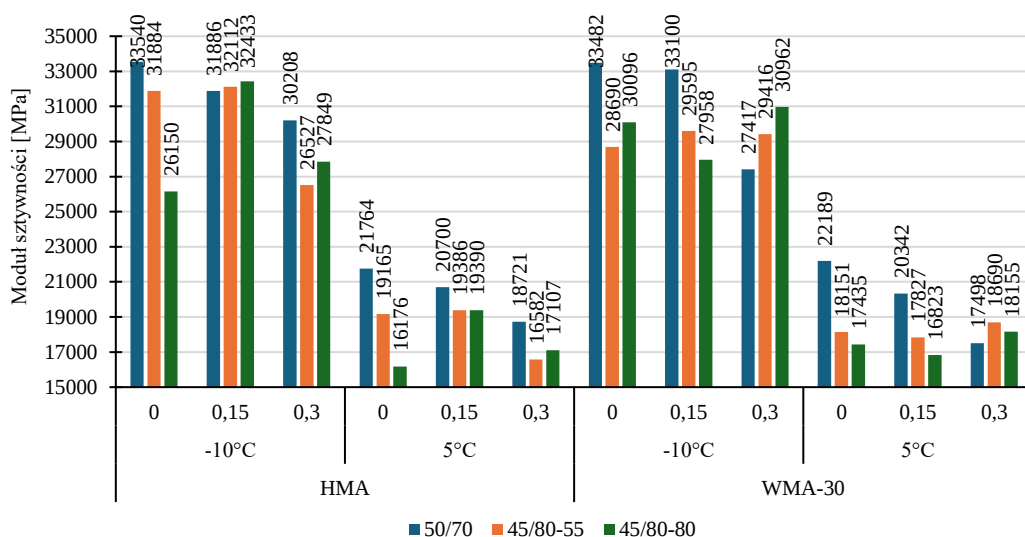
Tab. 4.72 Określenie wpływu włókien aramidowych na zespolony moduł sztywności w temperaturze 35°C mieszanek mineralno-asfaltowych za pomocą analizy wariancji ANOVA.

Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez 35°C			
	M SS	M MS	M F	M p
Wyraz wolny	338956568	338956568	5846,042	<0,001
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [1]	5158806	2579403	44,487	<0,001
Technologia wytwarzania [2]	4824664	4824664	83,212	<0,001
Zawartość włókien [3]	3104129	1552065	26,769	<0,001
[1] * [2]	114982	57491	0,992	0,380
[1] * [3]	414833	103708	1,789	0,152
[2] * [3]	2115542	1057771	18,244	<0,001
[1] * [2] * [3]	729357	182339	3,145	0,025
Błąd	2087299	57981		

Wykonana analiza wariancji wykazała istotność statystyczną wszystkich efektów głównych oraz niektórych interakcji pomiędzy nimi ($p < 0,05$). W przypadku badania zespolonego modułu sztywności w temperaturze -10°C wszystkie interakcje między dwoma czynnikami były istotne statystycznie, natomiast dla wyższych temperatur tj. 5°C, 20°C oraz 35°C wykazano istotność statystyczną dla interakcji pomiędzy technologią wytwarzania a zawartością włókien aramidowych. Pozwala to na stwierdzenie, że w mma z dodatkiem zbrojenia rozproszonego rodzaj lepiszcza, technologia wytwarzania oraz zawartość włókien wpływały istotnie na zmiany w zakresie wartości zespolonego modułu sztywności.

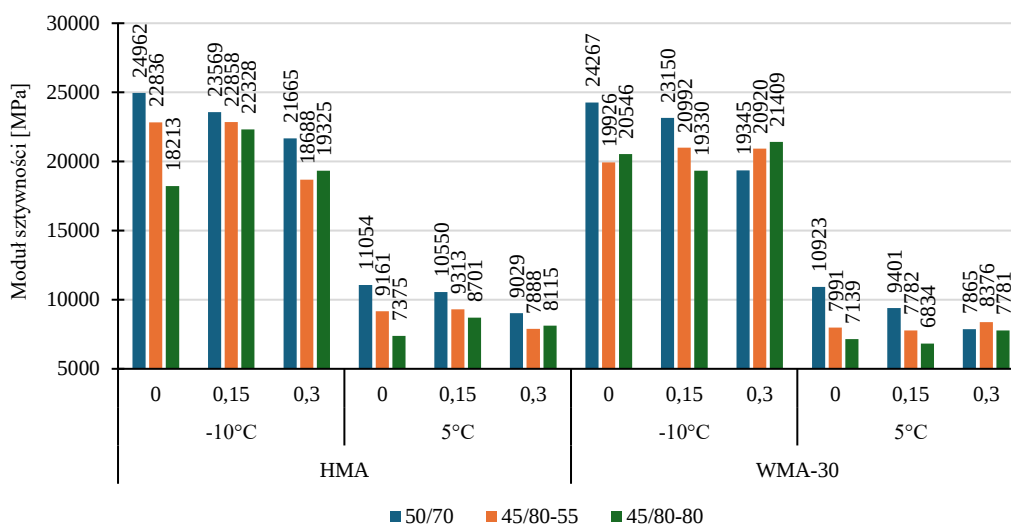
Ocena istotności różnic między średnimi modułami sztywności wykonana za pomocą testu Tukeya pozwoliła na wskazanie mieszanek mineralno-asfaltowych, które osiągnęły zbliżone poziomy tego parametru przy braku istotnych statystycznie różnic. Brak istotnych różnic zaobserwowano pomiędzy mieszankami referencyjnymi wytwarzanymi w technologii HMA z każdym analizowanym rodzajem lepiszcza asfaltowego a pozostałymi mieszankami w obrębie tego samego lepiszcza asfaltowego z dodatkiem zbrojenia rozproszonego w temperaturach badania -10°C, 5°C i 20°C. Mieszanki referencyjne z lepiszczem asfaltowym 45/80-80 wytwarzane w technologii HMA istotnie się różniły od mma z lepiszczem 50/70 w każdej analizowanej technologii i dla każdej zawartości włókien aramidowych w temperaturze badania równej 5°C. W wysokiej temperaturze wykazano brak istotnych różnic jedynie pomiędzy mieszanką z lepiszczem 50/70 w technologii HMA z 0,1%AR, a mieszanką referencyjną.

Na rysunkach 4.54 i 4.55 przedstawiono wartości zespolonego modułu sztywności przy częstotliwości 10 Hz oraz 0,1 Hz dla mieszanek z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych w temperaturze -10°C i 5°C, a na rysunkach 4.56 i 4.57 w temperaturach 20°C i 35°C.



Rodzaj mieszanki z włóknami polimerowo-bazaltowymi

Rys. 4.54 Zespolony moduł sztywności przy częstotliwości równej 10 Hz dla mma z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.



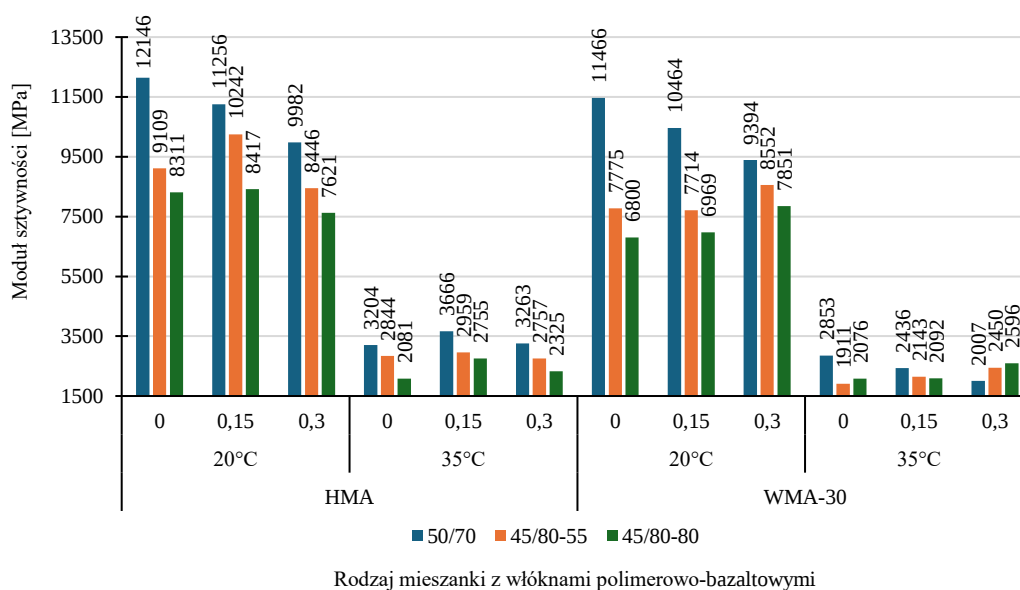
Rodzaj mieszanki z włóknami polimerowo-bazaltowymi

Rys. 4.55 Zespolony moduł sztywności przy częstotliwości równej 0,1 Hz dla mma z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.

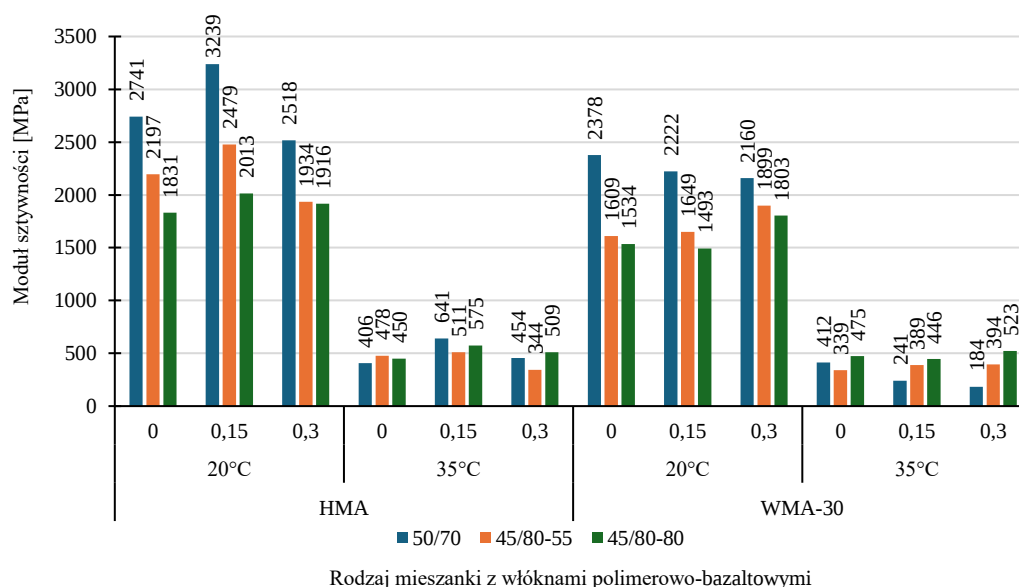
Analiza zespolonego modułu sztywności w temperaturach -10°C i 5°C przy częstotliwości 10 Hz i 0,1 Hz wykazała wzrost wartości modułu mieszanek z lepiszczami modyfikowanymi i dodatkiem 0,3% włókien polimerowo-bazaltowych wytwarzanych w obniżonej temperaturze względem tradycyjnej technologii HMA. W temperaturze badania równej 5°C zaobserwowano brak znaczącego wpływu rodzaju zastosowanego lepiszcza asfaltowego na wartości modułu sztywności w mieszankach z dodatkiem zbrojenia w ilości 0,3% PB bez względu na technologię wytwarzania. Największe różnice w wartościach modułu

sztywności z uwagi na zastosowane lepiszcze asfaltowe występowały w mieszankach referencyjnych w technologii HMA i WMA-30°C.

Na rysunku 4.56 i 4.57 przedstawiono wartości zespolonego modułu sztywności dla mieszanek z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych w temperaturze 20°C i 35°C.



Rys. 4.56 Zespolony moduł sztywności przy częstotliwości równej 10 Hz dla mma z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.



Rys. 4.57 Zespolony moduł sztywności przy częstotliwości równej 0,1 Hz dla mma z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.

W większości przypadków, przy obu częstotliwościach (10 Hz i 0,1 Hz) oraz w całym zakresie temperatur, najwyższe wartości zespolonego modułu sztywności (E^*) uzyskiwano dla mieszanek z lepiszczem 50/70. Wyjątek w tym zakresie stanowiły mieszanki z zawartością

0,3% włókien polimerowo-bazaltowych, kiedy wyższe wartości zespolonych modułów sztywności uzyskiwano z lepiszczami modyfikowanymi polimerami – częściej w technologii WMA-30.

Dodatek zbrojenia rozproszonego w postaci włókien polimerowo-bazaltowych powodował spadek wartości E^* w mieszankach z asfaltem drogowym 50/70 w prawie wszystkich przypadkach – wyjątek stanowiły mieszanki HMA w temperaturze badania 35°C. Jednocześnie, w mieszankach z polimeroasfaltami – szczególnie 45/80-55 – można było zauważyć wzrost tego parametru po dodaniu włókien w ilości 0,15% lub 0,3% zależnie od temperatury i częstotliwości badania. W przypadku mieszanek wytwarzanych metodą na gorąco największy wzrost wartości E^* widoczny był przy dodatku 0,15% włókien, podczas gdy była stosowana technologia WMA-30 – było to 0,3%.

Zmiana częstotliwości oddziaływania obciążenia miała największy wpływ na obserwowane zależności w najwyższej temperaturze badania, tj. 35°C. W warunkach tych bardziej korzystnymi właściwościami charakteryzowały się mieszanki z polimeroasfaltami, szczególnie wysokomodyfikowanym 45/80-80.

Podsumowując, zastosowanie technologii obniżonych temperatur w mieszankach mineralno-asfaltowych z włóknami PB skutkowało w większości przypadków obniżeniem sztywności analizowanego materiału, które częściowo mogło być skompensowane zastosowaniem lepiszcza asfaltowego 45/80-55 z dodatkiem 0,3% włókien polimerowo-bazaltowych.

Wpływ rodzaju lepiszcza asfaltowego, technologii wytwarzania i zawartości włókien polimerowo-bazaltowych na wartość zespolonego modułu sztywności analizowano szczegółowo przy zastosowaniu analizy wariancji ANOVA. Wyniki analizy wariancji przedstawiono w tabelach 4.73 - 4.76 a tabele porównań wielokrotnych z wykorzystaniem testu Tukeya zamieszczono w załącznikach Z.37 – Z.40.

Tab. 4.73 Określenie wpływu włókien polimerowo-bazaltowych na zespolony moduł sztywności w temperaturze -10°C mieszanek mineralno-asfaltowych za pomocą analizy wariancji ANOVA.

Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez -10°C			
	M SS	M MS	M F	M p
Wyraz wolny	4,919E+10	4,919E+10	11038,76	<0,001
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [1]	5,652E+07	2,826E+07	6,34	<0,001
Technologia wytwarzania [2]	5,838E+05	5,838E+05	0,13	0,719
Zawartość włókien [3]	5,969E+07	2,984E+07	6,70	0,003
[1] * [2]	8,072E+06	4,036E+06	0,91	0,413
[1] * [3]	5,474E+07	1,368E+07	3,07	0,028
[2] * [3]	2,149E+07	1,074E+07	2,41	0,104
[1] * [2] * [3]	8,899E+07	2,224E+07	4,99	0,002
Błąd	1,604E+08	4,456E+06		

Tab. 4.74 Określenie wpływu włókien polimerowo-bazaltowych na zespolony moduł sztywności w temperaturze 5°C mieszanek mineralno-asfaltowych za pomocą analizy wariancji ANOVA.

Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez 5°C			
	M SS	M MS	M F	M p
Wyraz wolny	1,882E+10	1,882E+10	11785,12	<0,001
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [1]	6,876E+07	3,438E+07	21,52	<0,001
Technologia wytwarzania [2]	5,890E+05	5,890E+05	0,37	0,547
Zawartość włókien [3]	2,096E+07	1,048E+07	6,56	0,003
[1] * [2]	2,206E+05	1,103E+05	0,07	0,933
[1] * [3]	3,399E+07	8,499E+06	5,32	0,002
[2] * [3]	1,155E+07	5,778E+06	3,62	0,037
[1] * [2] * [3]	1,609E+07	4,024E+06	2,52	0,058
Błąd	5,751E+07	1,597E+06		

Tab. 4.75 Określenie wpływu włókien polimerowo-bazaltowych na zespolony moduł sztywności w temperaturze 20°C mieszanek mineralno-asfaltowych za pomocą analizy wariancji ANOVA.

Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez 20°C			
	M SS	M MS	M F	M p
Wyraz wolny	4,401E+09	4,401E+09	4390,294	<0,001
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [1]	9,187E+07	4,593E+07	45,816	<0,001
Technologia wytwarzania [2]	1,216E+07	1,216E+07	12,135	<0,001
Zawartość włókien [3]	4,127E+06	2,063E+06	2,058	0,142
[1] * [2]	7,294E+05	3,647E+05	0,364	0,697
[1] * [3]	1,052E+07	2,630E+06	2,623	0,050
[2] * [3]	5,440E+06	2,720E+06	2,713	0,079
[1] * [2] * [3]	2,732E+06	6,838E+05	0,681	0,609
Błąd	3,609E+07	1,002E+06		

Tab. 4.76 Określenie wpływu włókien polimerowo-bazaltowych na zespolony moduł sztywności w temperaturze 35°C mieszanek mineralno-asfaltowych za pomocą analizy wariancji ANOVA.

Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez 35°C			
	M SS	M MS	M F	M p
Wyraz wolny	359105121	359105121	5420,197	<0,001
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [1]	3193622	1596811	24,102	<0,001
Technologia wytwarzania [2]	4665192	4665192	70,415	<0,001
Zawartość włókien [3]	296862	148431	2,240	0,121
[1] * [2]	1552282	776141	11,715	<0,001
[1] * [3]	1059245	264811	3,997	0,009
[2] * [3]	670402	335201	5,059	0,012
[1] * [2] * [3]	1149240	287310	4,337	0,006
Błąd	2385113	66253		

Wykonana analiza wariancji wykazała istotność statystyczną rodzaju zastosowanego lepiszcza asfaltowego ($p < 0,05$) w przypadku badania zespolonego modułu sztywności w każdej temperaturze. W niższych temperaturach, tj. -10°C i 5°C , dodatkowo zawartość włókien polimerowo-bazaltowych oraz interakcja pomiędzy tymi czynnikami wykazały istotność statystyczną, podczas gdy technologia wytwarzania mieszanek okazała się wpływać na wartości zespolonego modułu sztywności poprzez interakcje z pozostałymi zmiennymi. W temperaturze 20°C , poza rodzajem lepiszcza asfaltowego, tylko technologia wytwarzania miała istotny statystycznie wpływ na wartości E^* . W wynikach badań w temperaturze 35°C , jedynie efekt główny związany z zawartością włókien polimerowych nie uzyskał istotności statystycznej.

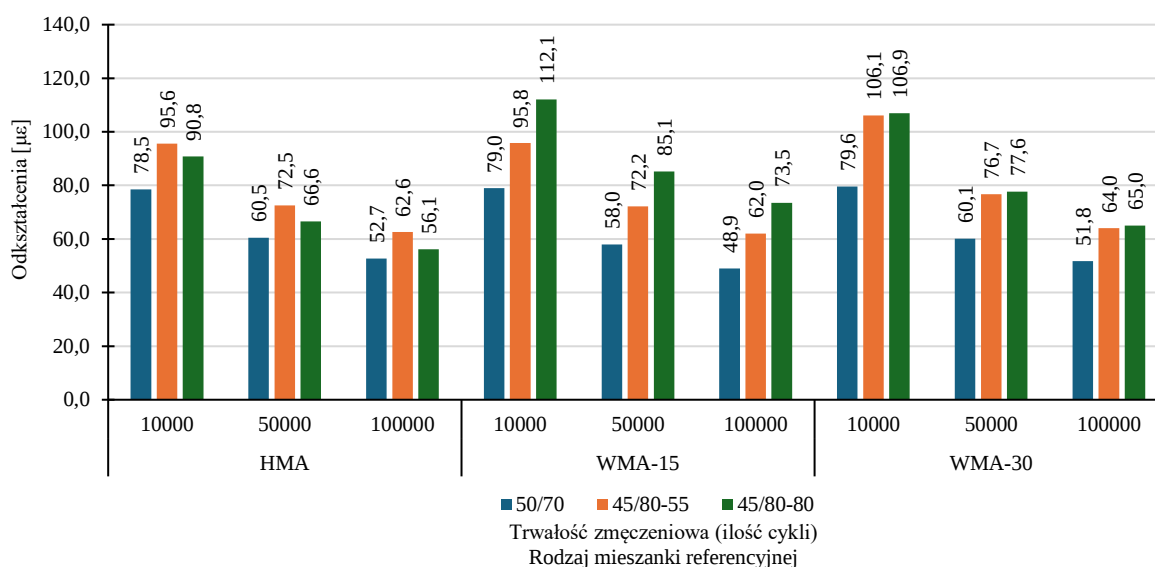
Ocena istotności różnic między średnimi modułami sztywności wykonana za pomocą testu Tukeya pozwoliła na wskazanie mieszanek mineralno-asfaltowych, które osiągnęły zbliżone poziomy tego parametru przy braku istotnych statystycznie różnic. W temperaturze -10°C tylko nieliczne mieszanki istotnie różniły się od pozostałych analizowanych mieszanek. Mieszanki referencyjne z lepiszczem 50/70 bez względu na technologię wytwarzania nie różniły się istotnie z mieszankami z lepiszczem 45/80-55 wytwarzanymi w technologii HMA z 0,3% PB oraz mieszanką referencyjną z lepiszczem 45/80-80 wytwarzaną w tradycyjnej technologii. W wysokich temperaturach badania tj. 35°C , wykazano istotne różnice jedynie pomiędzy mieszanką z lepiszczem wysokomodyfikowanym wytwarzaną w obniżonej temperaturze z dodatkiem 0,3% PB oraz mieszanką z lepiszczem 50/70 wytwarzaną w tradycyjnej technologii HMA z dodatkiem 0,15% PB. W pozostałych przypadkach mieszanka ta nie różniła się istotnie od pozostałych analizowanych mieszanek.

4.6.4 Badania wpływu ilości i rodzaju włókien w mma na odporność na zjawisko zmęczenia metodą IT-FT

Ocena odporności na zjawisko zmęczenia została wykonana dla każdej mieszanki poprzez badanie próbek przy zadanym naprężeniu rozciągającym i określeniu liczby cykli koniecznych do zniszczenia próbki. W 100 cyklu określano wartość odkształcenia początkowego charakterystycznego dla zadawanego naprężenia rozciągającego. Na tej podstawie dokonano regresji uzyskanych wyników i określono krzywą zmęczeniową dla każdej analizowanej mieszanki. Na podstawie uzyskanych krzywych dokonano analizy trwałości zmęczeniowej mieszanek mineralno-asfaltowych na podstawie wartości odkształceń początkowych odpowiadających trwałości zmęczeniowej równej 10 000, 50 000 i 100 000 cykli. Uzyskane wartości odkształceń początkowych określają tolerancję materiału na wielkość występujących w nim odkształceń rozciągających. Analizy wykonano osobno dla mieszanek referencyjnych w kontekście wpływu technologii i rodzaju lepiszcza asfaltowego oraz mieszanek z dodatkiem zbrojenia rozproszonego. Badania przeprowadzono w stałej temperaturze wynoszącej 10°C.

Analiza wpływu technologii wytwarzania mieszanek referencyjnych na odporność na zjawisko zmęczenia

Ocena wpływu technologii wytwarzania została wykonana dla mieszanek referencyjnych bez dodatku zbrojenia rozproszonego. W analizie została uwzględniona tradycyjna technologia „na gorąco” oraz technologia z asfaltem spienionym i obniżoną temperaturą o 15°C i 30°C. Na rysunku 4.58 przedstawiono wartości odkształceń początkowych odpowiadające trwałości zmęczeniowej referencyjnych mieszanek mineralno-asfaltowych w aspekcie wpływu temperatury wytwarzania i rodzaju zastosowanego lepiszcza asfaltowego.



Rys. 4.58 Odształcenia początkowe odpowiadające trwałościom zmęczeniowym referencyjnych mieszanek mineralno-asfaltowych badanych w schemacie IT-FT w 10°C.

Analiza wykazała we wszystkich przypadkach, że wyższe wartości odkształceń początkowych są konieczne dla uzyskania porównywalnych trwałości zmęczeniowych w przypadku stosowania lepiszczy modyfikowanych polimerami niż asfaltu drogowego. Obniżenie temperatury wytwarzania w mieszankach z lepiszczem wysokomodyfikowanym 45/80-80 skutkowało uzyskaniem najwyższych wartości odkształceń przy każdej analizowanej liczbie cykli, a różnica względem asfaltu 45/80-55 była największa w przypadku technologii WMA-15. W przypadku technologii WMA-15 i stosowania asfaltu wysokomodyfikowanego uzyskano największy wzrost tolerancji na wartość odkształceń, a gdy stosowano asfalt drogowy nastąpiło jej pogorszenie. Z kolei przy obniżeniu temperatur zagęszczania o 30°C odporność na zmęczenie mieszanek z asfaltem 50/70 i 45/80-55 były porównywalne do mieszanek HMA, a tylko zastosowanie lepiszcza 45/80-80 skutkowało poprawą w tym zakresie. Poziom analizowanej liczby cykli zmęczeniowych nie miał zauważalnego wpływu na obserwowane zależności.

Można wobec tego stwierdzić, że największy wpływ na trwałość zmęczeniową miał rodzaj lepiszcza, ponieważ mieszanki z lepiszczem modyfikowanym charakteryzowały się największymi wartościami dopuszczalnych odkształceń dla każdego poziomu trwałości zmęczeniowej.

Wpływ rodzaju lepiszcza asfaltowego i technologii wytwarzania na wartość odkształceń w badaniu zmęczeniowym analizowano szczegółowo przy zastosowaniu analizy wariancji ANOVA. Wyniki porównań wielokrotnych z wykorzystaniem testu Tukeya przedstawiono w tabelach 4.77 - 4.79.

Tab. 4.77 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza asfaltowego oraz technologii wytwarzania mieszanek referencyjnych na odkształcenia przy zmęczeniu po 10 000 cykli za pomocą analizy wariancji ANOVA.

Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez IT-FT 10 000			
	IT-FT 10 000 SS	IT-FT 10 000 MS	IT-FT 10 000 F	IT-FT 10 000 p
Wyraz wolny	79216,78	79216,78	1789,441	<0,001
Technologia wytwarzania [1]	143,04	71,52	1,616	0,306
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [2]	1011,16	505,58	11,421	0,022
Błąd	177,08	44,27		

Tab. 4.78 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza asfaltowego oraz technologii wytwarzania mieszanek referencyjnych na odkształcenia przy zmęczeniu po 50 000 cykli za pomocą analizy wariancji ANOVA.

Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez IT-FT 50 000			
	IT-FT 50 000 SS	IT-FT 50 000 MS	IT-FT 50 000 F	IT-FT 50 000 p
Wyraz wolny	43996,07	43996,07	1269,546	<0,001
Technologia wytwarzania [1]	52,15	26,08	0,752	0,528
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [2]	496,88	248,44	7,169	0,047
Błąd	138,62	34,65		

Tab. 4.79 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza asfaltowego oraz technologii wytwarzania mieszanek referencyjnych na odkształcenia przy zmęczeniu po 100 000 cykli za pomocą analizy wariancji ANOVA.

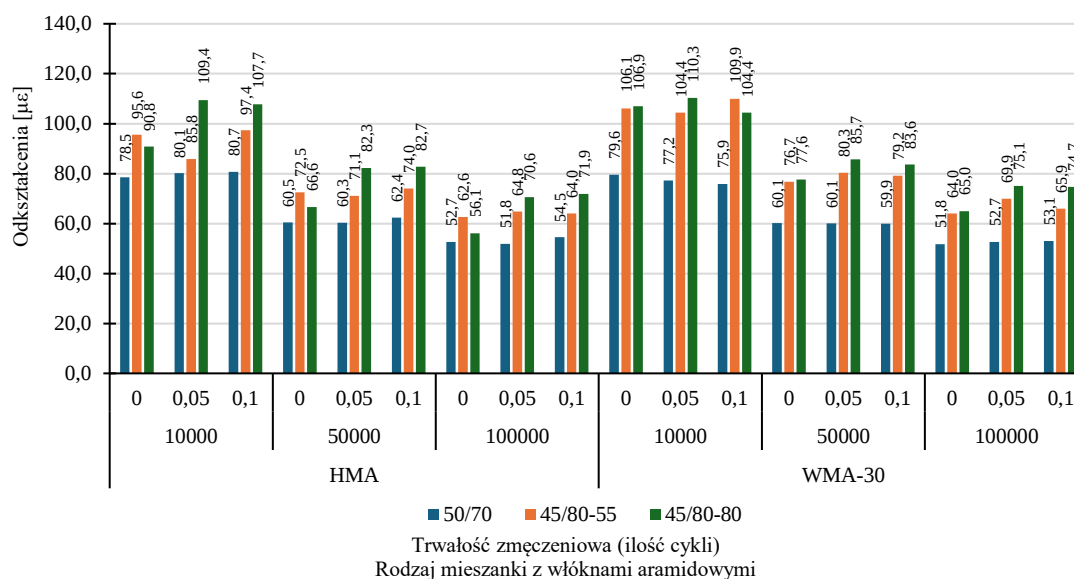
Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez IT-FT 100 000			
	IT-FT 100 000 SS	IT-FT 100 000 MS	IT-FT 100 000 F	IT-FT 100 000 p
Wyraz wolny	31995,15	31995,15	976,511	<0,001
Technologia wytwarzania [1]	30,08	15,04	0,459	0,661
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [2]	331,16	165,58	5,053	0,080
Błąd	131,06	32,76		

Wykonana analiza wariancji wykazała istotność statystyczną tylko rodzaju lepiszcza asfaltowego ($p < 0,05$) w przypadku odporności na zmęczenie równej 10 000 i 50 000 cykli. Mieszanki poddane działaniu mniejszych odkształceń i wynikającemu z tego długotrwałego działania obciążeń cyklicznych po 100 000 cykli wykazały brak istotności statystycznej dla obu analizowanych czynników tj. rodzaju lepiszcza asfaltowego oraz technologii wytwarzania.

Analiza wpływu ilości i rodzaju zbrojenia rozproszonego na odporność na zjawisko zmęczenia

Ocena wpływu rodzaju i ilości zbrojenia rozproszonego oraz technologii wytwarzania została wykonana dla mieszanek bez dodatku zbrojenia rozproszonego oraz ze zmienną ilością włókien. W analizie została uwzględniona tradycyjna technologia „na gorąco” oraz technologia z asfaltem spienionym i obniżoną temperaturą o 30°C. Na rysunku 4.59 przedstawiono wartości odkształceń początkowych odpowiadających trwałości zmęczeniowej mieszanek mineralno-asfaltowych równej 10 000, 50 000 i 100 000 cykli obciążenia w aspekcie wpływu rodzaju

i ilości zbrojenia rozproszonego, temperatury wytwarzania i rodzaju zastosowanego lepiszcza asfaltowego.



Rys. 4.59 Odształcenia początkowe odpowiadające trwałościom zmęczeniowym mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien aramidowych badanych w schemacie IT-FT w 10°C.

Analiza wykazała w większości przypadków zwiększenie wartości odkształceń dla każdej trwałości zmęczeniowej wyrażonej liczbą cykli obciążenia w mieszankach z lepiszczami modyfikowanymi w wyniku zastosowania technologii WMA-30. Mieszanki z lepiszczem asfaltowym 50/70 niezależnie od dozowania włókien aramidowych nie wykazały zmian tolerancji na wartość odkształcenia przy 50 000 i 100 000 cykli obciążenia przy zastosowaniu technologii WMA. W mieszankach z asfaltami modyfikowanymi polimerami, gdzie obserwowano korzystny wpływ stosowania zbrojenia rozproszonego, był on podobny niezależnie od tego czy dozowano do mieszanki 0,05% czy 0,1% włókien aramidowych.

Wpływ rodzaju lepiszcza asfaltowego, technologii wytwarzania oraz ilości zbrojenia rozproszonego na wartość odkształceń w badaniu zmęczeniowym analizowano szczegółowo przy zastosowaniu analizy wariancji ANOVA. Wyniki porównań wielokrotnych z wykorzystaniem testu Tukeya przedstawiono w tabelach 4.80 - 4.82.

Tab. 4.80 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza asfaltowego, technologii wytwarzania i zawartości włókien aramidowych na odkształcenia mieszanek po badaniu trwałości zmęczeniowej po 10 000 cyklach za pomocą analizy wariancji ANOVA.

Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez IT-FT 10 000			
	IT-FT 10 000 SS	IT-FT 10 000 MS	IT-FT 10 000 F	IT-FT 10 000 p
Wyraz wolny	62204,20	62204,20	1611,754	<0,001
Zawartość włókien [1]	28,52	28,52	0,739	0,405
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [2]	2329,89	1164,95	30,185	<0,001
Technologia wytwarzania [3]	132,17	132,17	3,425	0,087
Błąd	501,72	38,59		

Tab. 4.81 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza asfaltowego, technologii wytwarzania i zawartości włókien aramidowych na odkształcenia mieszanek po badaniu trwałości zmęczeniowej po 50 000 cyklach za pomocą analizy wariancji ANOVA.

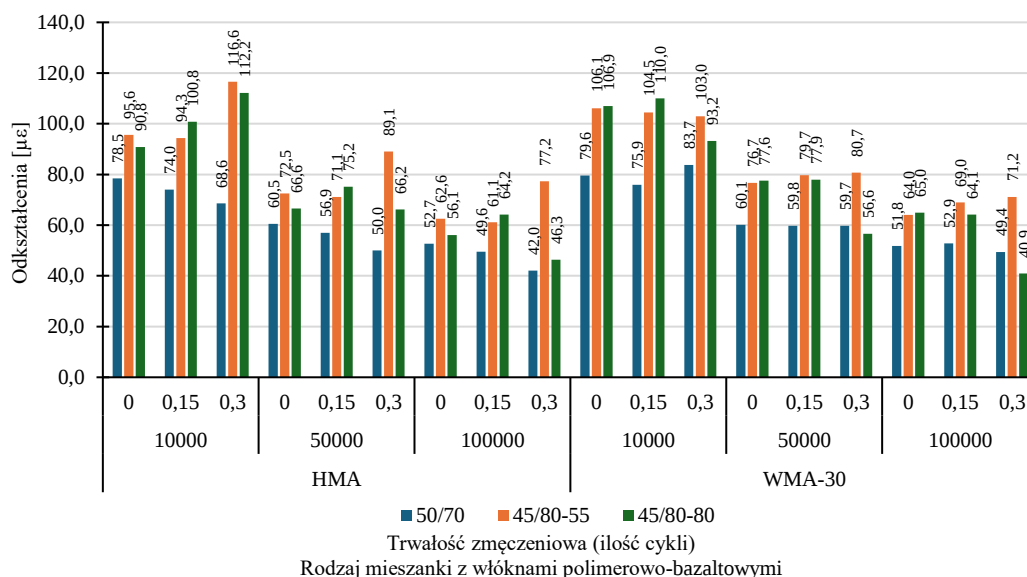
Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez IT-FT 50 000			
	IT-FT 50 000 SS	IT-FT 50 000 MS	IT-FT 50 000 F	IT-FT 50 000 p
Wyraz wolny	34933,81	34933,81	2290,941	<0,001
Zawartość włókien [1]	64,77	64,77	4,247	0,059
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [2]	1225,35	612,67	40,179	<0,001
Technologia wytwarzania [3]	52,50	52,50	3,443	0,086
Błąd	198,23	15,25		

Tab. 4.82 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza asfaltowego, technologii wytwarzania i zawartości włókien aramidowych na odkształcenia mieszanek po badaniu trwałości zmęczeniowej po 100 000 cyklach za pomocą analizy wariancji ANOVA.

Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez IT-FT 100 000			
	IT-FT 100 000 SS	IT-FT 100 000 MS	IT-FT 100 000 F	IT-FT 100 000 p
Wyraz wolny	25596,10	25596,10	1801,030	<0,001
Zawartość włókien [1]	84,89	84,89	5,973	0,029
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [2]	858,55	429,27	30,205	<0,001
Technologia wytwarzania [3]	29,33	29,33	2,064	0,174
Błąd	184,76	14,21		

Wykonana analiza wariancji wykazała istotność statystyczną rodzaju lepiszcza asfaltowego ($p < 0,05$) w przypadku odporności na zmęczenie ocenianych mieszanek przy każdej wartości trwałości zmęczeniowej wyrażonej liczbą cykli obciążenia. Dla największej liczby cykli równej 100 000 wykazano dodatkowo istotność statystyczną zawartości włókien aramidowych w składzie mieszanki. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że obniżenie temperatury wytwarzania nie miało istotnego wpływu na trwałość zmęczeniową mma.

Na rysunku 4.60 przedstawiono wartości odkształceń początkowych odpowiadających analizowanym trwałościom zmęczeniowym dla mieszanek z dodatkiem zmiennej zawartości włókien polimerowo-bazaltowych.



Rys. 4.60 Odształcenia początkowe odpowiadające trwałościom zmęczeniowym mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych badanych w schemacie IT-FT w 10°C.

Analizując uzyskane wyniki mieszanek z włóknami polimerowo-bazaltowymi można stwierdzić, że zastosowanie lepiszcza asfaltowego 50/70 w technologii HMA skutkowało istotnym zmniejszeniem wartości odkształceń początkowych wraz ze zwiększaniem ilości dozowanych włókien. Chociaż już w technologii WMA-30, efekt ten nie był zauważalny, to mieszanki z asfaltem drogowym charakteryzowały się najniższą trwałością zmęczeniową.

Wśród mieszanek z asfaltem modyfikowanym polimerami 45/80-55 zauważalny był wzrost wartości odkształcenia początkowego wraz z ilością dozowanych włókien, szczególnie w technologii HMA. Przy obniżeniu temperatur wytwarzania odnotowano dużo mniej znaczące zmiany w tym zakresie, widoczne głównie przy najwyższym poziomie (100 000) cykli obciążenia.

Korzystny wpływ stosowania włókien polimerowo-bazaltowych z lepiszczem asfaltowym 45/80-80 widoczny był głównie w przypadku mieszanek HMA i w warunkach większych obciążeń działających na materiał, kiedy analizowane trwałości zmęczeniowe nie przekraczały 50 000 cykli.

Obniżenie temperatury wytwarzania i zagęszczania mieszanek z zastosowaniem włókien polimerowo-bazaltowych w większości przypadków skutkowało poprawą ich właściwości zmęczeniowych.

Wpływ rodzaju lepiszcza asfaltowego, technologii wytwarzania oraz ilości włókien polimerowo-bazaltowych na wartość odkształceń w badaniu zmęczeniowym analizowano

szczegółowo przy zastosowaniu analizy wariancji ANOVA. Wyniki porównań wielokrotnych z wykorzystaniem testu Tukeya przedstawiono w tabelach 4.83 - 4.85.

Tab. 4.83 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza asfaltowego, technologii wytwarzania i zawartości włókien polimerowo-bazaltowych na odkształcenia mieszanek po badaniu trwałości zmęczeniowej po 10 000 cykli za pomocą analizy wariancji ANOVA.

Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez IT-FT 10 000			
	IT-FT 10 000 SS	IT-FT 10 000 MS	IT-FT 10 000 F	IT-FT 10 000 p
Wyraz wolny	61590,99	61590,99	1041,562	<0,001
Zawartość włókien [1]	32,14	32,14	0,544	0,474
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [2]	2732,00	1366,00	23,100	<0,001
Technologia wytwarzania [3]	55,48	55,48	0,938	0,350
Błąd	768,73	59,13		

Tab. 4.84 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza asfaltowego, technologii wytwarzania i zawartości włókien polimerowo-bazaltowych na odkształcenia mieszanek po badaniu trwałości zmęczeniowej po 50 000 cykli za pomocą analizy wariancji ANOVA.

Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez IT-FT 50 000			
	IT-FT 50 000 SS	IT-FT 50 000 MS	IT-FT 50 000 F	IT-FT 50 000 p
Wyraz wolny	34967,34	34967,34	744,048	<0,001
Zawartość włókien [1]	11,19	11,19	0,238	0,633
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [2]	1270,46	635,23	13,516	<0,001
Technologia wytwarzania [3]	24,28	24,28	0,516	0,485
Błąd	610,95	47,00		

Tab. 4.85 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza asfaltowego, technologii wytwarzania i zawartości włókien polimerowo-bazaltowych na odkształcenia mieszanek po badaniu trwałości zmęczeniowej po 100 000 cykli za pomocą analizy wariancji ANOVA.

Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez IT-FT 100 000			
	IT-FT 100 000 SS	IT-FT 100 000 MS	IT-FT 100 000 F	IT-FT 100 000 p
Wyraz wolny	25807,42	25807,42	454,780	<0,001
Zawartość włókien [1]	52,24	52,24	0,920	0,354
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [2]	974,57	487,28	8,587	0,004
Technologia wytwarzania [3]	14,76	14,76	0,260	0,618
Błąd	737,71	56,75		

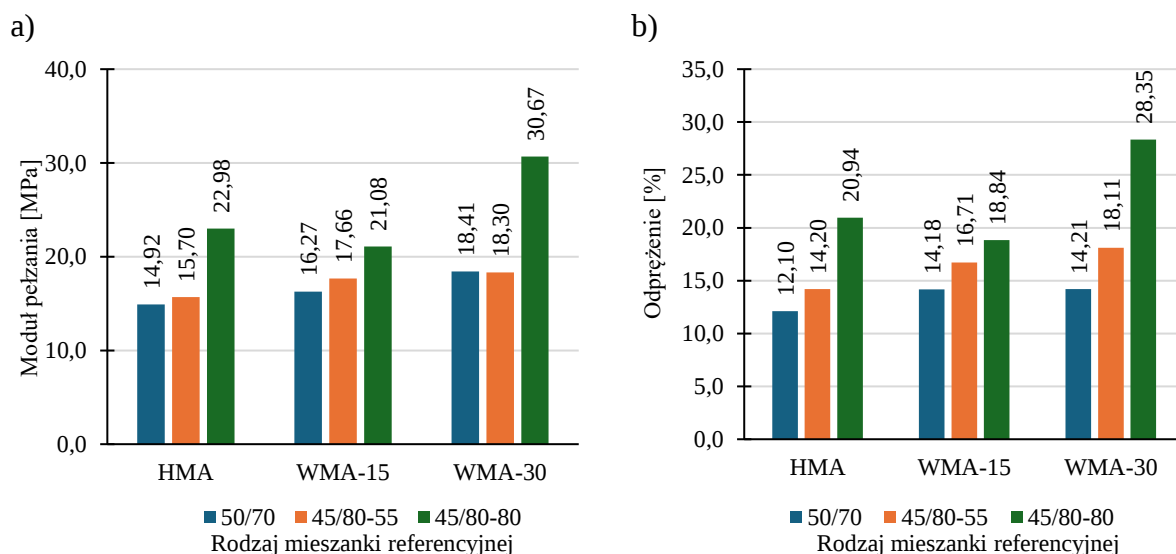
Analiza wariancji wykazała istotność statystyczną rodzaju lepiszcza asfaltowego ($p < 0,05$) dla każdego z analizowanych poziomów trwałości zmęczeniowej wyrażonego liczbą cykli obciążenia. W żadnym z analizowanych zakresów liczby cykli zmęczeniowych nie miała wpływu technologia wytwarzania mieszanek. Można zatem stwierdzić, że obniżenie temperatury wytwarzania nie miało istotnego wpływu na trwałość zmęczeniową mma, podobnie jak w przypadku mieszanek z włóknami aramidowymi.

4.6.5 Badania wpływu ilości i rodzaju włókien w mma na moduł sztywności pełzania

Badania modułu sztywności pełzania wykonano w temperaturze 40°C zadając stałe naprężenie ściskające o wartości 0,1 MPa w czasie 60 minut po którym następowało 10 minut odprężenia. Analizy przeprowadzono dla mieszanek ze zbrojeniem rozproszonym wykonanych w technologii HMA i WMA-30 oraz mieszanek referencyjnych w tradycyjnej technologii „na gorąco” oraz obniżonych temperaturach o 15°C i 30°C z lepiszczami spienionymi wodą. Odrębnie analizowano wpływ temperatury wytwarzania i rodzaju lepiszcza asfaltowego na mieszanki referencyjne oraz dodatkowo wpływ ilości i rodzaju zbrojenia w technologii tradycyjnej i temperaturze obniżonej o 30°C.

Analiza wpływu technologii wytwarzania mieszanek referencyjnych na moduły sztywności pełzania

Ocena wpływu technologii wytwarzania została wykonana dla mieszanek referencyjnych bez dodatku zbrojenia rozproszonego. W analizie została uwzględniona tradycyjna technologia „na gorąco” oraz technologia z asfaltem spienionym i obniżoną temperaturą o 15°C i 30°C. Na rysunku 4.61 przedstawiono wartości modułów pełzania po 60 minutach działania obciążenia oraz procentową wartość odprężenia (wyrażoną jako stosunek zmiany wartości odkształcenia na koniec cyklu odprężenia a odkształcenia na koniec cyklu pełzania) próbek mma dla referencyjnych mieszanek mineralno-asfaltowych w aspekcie wpływu temperatury wytwarzania i rodzaju zastosowanego lepiszcza asfaltowego.



Rys. 4.61 Wyniki badania pełzania dla mieszanek referencyjnych: a) wartości modułów pełzania, b) procentowa wartość odprężenia.

Analizując wykresy modułów pełzania i procentowej wartości odprężenia dla mieszanek referencyjnych można stwierdzić, że dla każdej z technologii produkcji zastosowanie polimeroasfaltów skutkowało wzrostem zarówno wartości modułów pełzania po jak i wartości odprężenia, największe wartości obu parametrów obserwowano z lepiszczem 45/80-80. Ponadto, zaobserwowano korzystny wpływ obniżenia temperatury wytwarzania na wartości analizowanych parametrów w mieszankach z lepiszczem 50/70 oraz polimeroasfaltem 45/80-55 w przypadku technologii WMA-15 i WMA-30 oraz korzystny wpływ technologii WMA-30 w przypadku lepiszcza wysokomodyfikowanego. W przypadku mieszanek z lepiszczem 45/80-80 obniżenie temperatury o 15°C skutkowało obniżeniem obu parametrów w odniesieniu do mieszanki referencyjnej wytwarzanej „na gorąco”.

Wpływ rodzaju lepiszcza asfaltowego oraz technologii wytwarzania na wartość modułu pełzania i procentowej wartości odprężenia analizowano szczegółowo przy zastosowaniu analizy wariancji ANOVA. Wyniki porównań wielokrotnych z wykorzystaniem testu Tukeya przedstawiono w tabeli 4.86 oraz w załącznikach Z.41 i Z.42.

Tab. 4.86 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza oraz technologii wytwarzania na wartość modułu pełzania i procentowej wartości odprężenia za pomocą analizy wariancji ANOVA.

Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez Moduł pełzania				Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez Odprężenie			
	M	M	M	M	O	O	O	O
	SS	MS	F	p	SS	MS	F	p
Wyraz wolny	10573,82	10573,82	1520,418	<0,001	8462,571	8462,571	1446,505	<0,001
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [1]	376,16	188,08	27,044	<0,001	400,329	200,165	34,214	<0,001
Technologia wytwarzania [2]	122,78	61,39	8,827	0,002	109,704	54,852	9,376	0,002
[1] * [2]	60,21	15,05	2,164	0,114	71,409	17,852	3,051	0,043
Błąd	125,18	6,95			105,306	5,850		

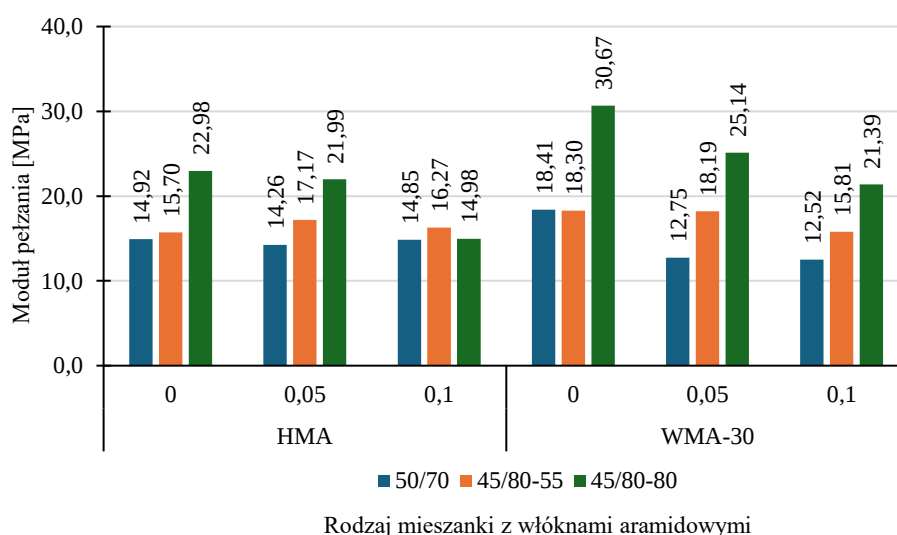
Analiza wariancji wykazała istotność statystyczną rodzaju lepiszcza asfaltowego i technologii wytwarzania ($p < 0,05$) w określeniu wartości modułów pełzania i wartości odprężenia. Brak istotnego wpływu zaobserwowano przy interakcji obu czynników na wartości modułów pełzania.

Ocena istotności różnic między średnimi wartościami modułów pełzania i odprężenia wykonana za pomocą testu Tukeya pozwoliła na wskazanie mieszanek mineralno-asfaltowych, istotnie się różniących od innych oraz tych, które osiągnęły zbliżone poziomy tego parametru przy braku istotnych statystycznie różnic. Zaobserwowano istotne różnice pomiędzy mieszanką z lepiszczem wysokomodyfikowanym zagęszczaną w obniżonej temperaturze o 30°C a wszystkimi pozostałymi mieszankami w aspekcie wartości modułów sztywności

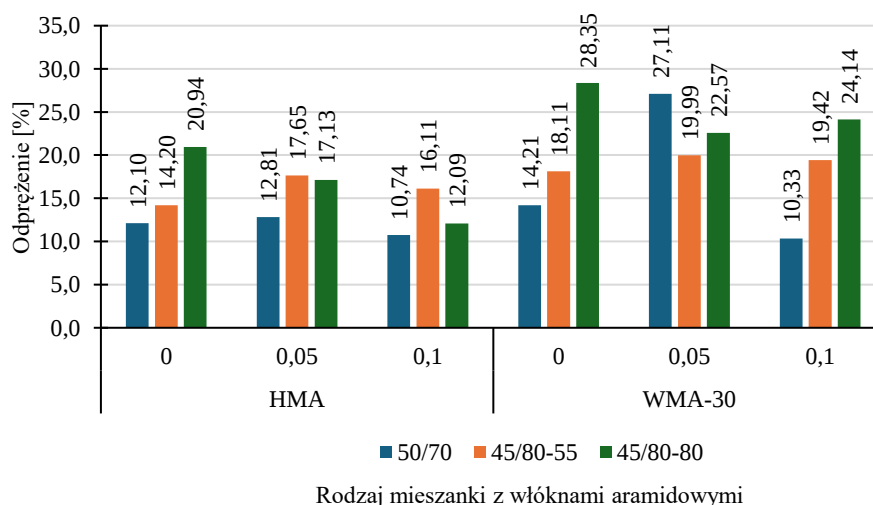
i odprężenia. Dodatkowo istotne różnice wystąpiły między mieszankami wytwarzanymi w tradycyjnej technologii „na gorąco” z lepiszczami 50/70 i 45/80-80.

Analiza wpływu technologii, rodzaju i ilości zbrojenia rozproszonego na moduł sztywności pelzania

Ocena wpływu rodzaju i ilości zbrojenia rozproszonego oraz technologii wytwarzania została wykonana dla mieszanek bez dodatku zbrojenia rozproszonego oraz ze zmienną ilością włókien. W analizie została uwzględniona tradycyjna technologia „na gorąco” oraz technologia z asfaltem spienionym i obniżoną temperaturą o 30°C. Na rysunkach 4.62 i 4.63 przedstawiono wartości modułów pelzania i procentowej wartości odprężenia dla mieszanek mineralno-asfaltowych w aspekcie wpływu ilości zbrojenia rozproszonego w formie włókien aramidowych, temperatury wytwarzania i rodzaju zastosowanego lepiszcza asfaltowego.



Rys. 4.62 Moduły pelzania mieszanek z dodatkiem włókien aramidowych.



Rys. 4.63 Procentowa wartość odprężenia mieszanek z dodatkiem włókien aramidowych.

Analiza wyników badania pełzania dla mieszanek z dodatkiem włókien aramidowych wykazała w większości przypadków ograniczony wpływ tego dodatku na wartości modułu pełzania. W mieszankach z lepiszczami 50/70 i 45/80-55 wytwarzanymi w tradycyjnej technologii „na gorąco” dodatek włókien nie wpłynął znacząco na zmianę wartości modułu pełzania, lub spowodował jego nieznaczny wzrost (w przypadku polimeroasfaltu). Podobnie w przypadku lepiszcza 45/80-55 i technologii WMA-30, gdzie tylko przy największej zawartości włókien zaobserwowano obniżenie modułu pełzania. Z drugiej strony, kiedy w mieszankach mineralno-asfaltowych stosowany był asfalt wysokomodyfikowany, każda z analizowanych zawartości włókien powodowało obniżenie wartości analizowanego parametru. Jednocześnie, obniżenie temperatur technologicznych w mieszankach z asfaltem 45/80-80 spowodowało znaczny wzrost wartości modułów sztywności pełzania.

Podobne tendencje zaobserwowano w przypadku procentowej wartości odprężenia z wyjątkiem mieszanki z lepiszczem 50/70 oraz dodatkiem 0,05% włókien aramidowych, gdzie nastąpił znaczny wzrost wartości analizowanego parametru. Wyższe wartości odprężeń uzyskiwały mieszanki wytwarzane w obniżonej temperaturze z asfaltem spienionym w porównaniu do mieszanek wytwarzanych w tradycyjnej technologii HMA.

Wpływ rodzaju lepiszcza asfaltowego, technologii wytwarzania i ilości włókien aramidowych na wartość modułów pełzania i procentowej wartości odprężeń analizowano szczegółowo przy zastosowaniu analizy wariancji ANOVA. Wyniki porównań wielokrotnych z wykorzystaniem testu Tukeya przedstawiono w tabeli 4.87 oraz w załącznikach Z.43 i Z.44.

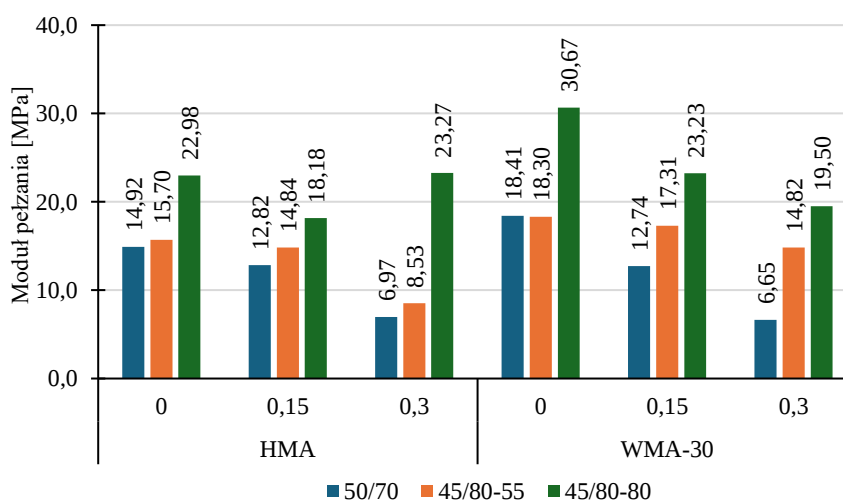
Tab. 4.87 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza, technologii wytwarzania oraz zawartości włókien aramidowych na wartości modułów pełzania i odprężenia za pomocą analizy wariancji ANOVA.

Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez Moduł pełzania				Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez Odprężenie			
	M	M	M	M	O	O	O	O
	SS	MS	F	p	SS	MS	F	p
Wyraz wolny	19464,41	19464,41	3073,060	<0,001	16226,66	16226,66	2515,527	<0,001
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [1]	876,93	438,46	69,225	<0,001	842,33	421,16	65,291	<0,001
Zawartość włókien aramidowych [2]	76,41	38,21	6,032	0,006	32,10	16,05	2,488	0,097
Technologia wytwarzania [3]	29,89	29,89	4,720	0,036	171,16	171,16	26,534	<0,001
[1] * [2]	19,10	4,77	0,754	0,562	83,80	20,95	3,248	0,022
[1] * [3]	11,75	5,87	0,927	0,405	79,53	39,77	6,165	0,005
[2] * [3]	97,23	48,61	7,675	0,002	8,06	4,03	0,625	0,541
[1] * [2] * [3]	22,58	5,65	0,891	0,479	1,96	0,49	0,076	0,989
Błąd	228,02	6,33			232,22	6,45		

Analiza wariancji wykazała istotność statystyczną rodzaju lepiszcza asfaltowego, zawartości włókien aramidowych, technologii wytwarzania i interakcji pomiędzy ilością włókien i technologią wytwarzania ($p < 0,05$) dla wartości modułów sztywności pełzania. Dodatkowo, analiza wykazała istotność statystyczną rodzaju zastosowanego lepiszcza, technologii wytwarzania i interakcji rodzaju lepiszcza asfaltowego z zawartością włókien oraz technologią wytwarzania dla wartości odprężeń. W tym przypadku nieistotny statystycznie okazał się efekt główny związany z zawartością zastosowanego zbrojenia rozproszonego.

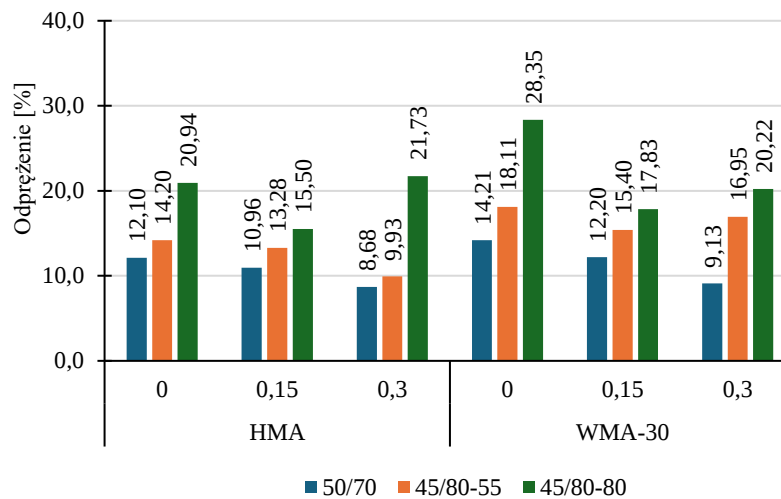
Ocena istotności różnic między wartościami modułów pełzania i procentowej wartości odprężenia wykonana za pomocą testu Tukeya pozwoliła na wskazanie mieszanek mineralno-asfaltowych, które osiągnęły zbliżone poziomy tego parametru przy braku istotnych statystycznie różnic. W technologii HMA i WMA-30°C przy zastosowaniu lepiszczy 50/70 i 45/80-55 zauważono brak istotnych statystycznie różnic modułów pełzania między tymi mieszankami. Mieszanka z lepiszczem wysokomodyfikowanym wytwarzana w obniżonej temperaturze różniła się od mieszanek z lepiszczem 50/70 i polimeroasfaltem 45/80-55 w aspekcie tego parametru. Podobną zależność istotnych statystycznie różnic dla mieszanki z lepiszczem 45/80-80 w technologii WMA zaobserwowano dla parametru odprężania ϵ_{mm} .

Na rysunkach 4.64 i 4.65 przedstawiono wartości modułów pełzania i procentowej wartości odprężenia dla mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych w aspekcie wpływu ilości zbrojenia rozproszonego, temperatury wytwarzania i rodzaju zastosowanego lepiszcza asfaltowego.



Rodzaj mieszanki z włóknami polimerowo-bazaltowymi

Rys. 4.64 Moduł pełzania mieszanek z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.



Rodzaj mieszanki z włóknami polimerowo-bazaltowymi

Rys. 4.65 Procentowa wartość odprężenia mieszanek z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.

Analizując wartości modułów sztywności pełzania zaobserwowano wzrost ich wartości wraz ze zmianą rodzaju lepiszcza asfaltowego z asfaltu drogowego na polimeroasfalt 45/80-55 a następnie na asfalt wysokomodyfikowany 45/80-80 w większości przypadków niezależnie od technologii wytwarzania mieszanek i zawartości włókien. W przypadku mieszanek z lepiszczami 50/70 i 45/80-55 dodatek włókien skutkował obniżeniem wartości analizowanego parametru, z kolei w mieszance HMA z lepiszczem wysokomodyfikowanym odnotowano spadek przy dozowaniu 0,15% PB, jednak dodatek 0,3% włókien spowodował wzrost w stosunku do mieszanki referencyjnej. Obniżenie temperatury wytwarzania skutkowało spadkiem wartości modułów pełzania w większości przypadków, z wyjątkiem kiedy jako lepiszcze stosowano polimeroasfalt 45/80-55 – dla każdej zawartości włókien moduły pełzania wzrosły w technologii WMA-30, a w największym stopniu gdy zastosowano 0,3% włókien PB.

Podobne zależności wystąpiły w aspekcie wartości odprężenia. Obniżenie temperatury zagęszczania mma w mieszankach z lepiszczami 50/70 i 45/80-55 powodowało wzrost wartości odprężenia przy każdej zawartości dozowanych włókien polimerowo-bazaltowych, a w przypadku asfaltu 45/80-80 tylko przy zawartości 0,15%. Dodatek włókien PB w większości przypadków zmniejszyło obserwowane wartości odprężenia.

Wpływ rodzaju lepiszcza asfaltowego, technologii wytwarzania i ilości włókien polimerowo-bazaltowych na wartość modułów pełzania i procentowej wartości odprężenia analizowano szczegółowo przy zastosowaniu analizy wariancji ANOVA. Wyniki porównań wielokrotnych z wykorzystaniem testu Tukeya przedstawiono w tabeli 4.89 oraz w załącznikach Z.45 i Z.46.

Tab. 4.88. Określenie wpływu rodzaju lepiszcza, technologii wytwarzania oraz zawartości włókien polimerowo-bazaltowych na różnice w zawartości wolnej przestrzeni za pomocą analizy wariancji ANOVA.

Efekt	Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez Moduł pełzania				Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Dekompozycja efektywnych hipotez Odpężenie			
	M SS	M MS	M F	M p	O SS	O MS	O F	O p
Wyraz wolny	15997,27	15997,27	3671,026	<0,001	13694,36	13694,36	2128,902	<0,001
Rodzaj lepiszcza asfaltowego [1]	1064,60	532,30	122,151	<0,001	827,28	413,64	64,304	<0,001
Zawartość włókien polimerowo-bazaltowych [2]	411,04	205,52	47,162	<0,001	142,64	71,32	11,087	<0,001
Technologia wytwarzania [3]	124,57	124,57	28,586	<0,001	124,59	124,59	19,368	<0,001
[1] * [2]	129,20	32,30	7,412	<0,001	125,39	31,35	4,873	0,003
[1] * [3]	29,05	14,52	3,333	0,047	34,49	17,25	2,681	0,082
[2] * [3]	46,09	23,05	5,289	0,009	22,10	11,05	1,718	0,193
[1] * [2] * [3]	91,15	22,79	5,229	0,002	44,32	11,08	1,723	0,166
Błąd	156,88	4,36			231,57	6,43		

Analiza wariancji wykazała istotność statystyczną wszystkich efektów głównych i interakcji pomiędzy rodzajem lepiszcza asfaltowego i zawartością włókien polimerowo-bazaltowych oraz technologią wytwarzania mma ($p < 0,05$) w aspekcie modułów pełzania. Tylko interakcje pomiędzy rodzajem lepiszcza asfaltowego i technologią wytwarzania oraz ilości zbrojenia okazały się nieistotne statystycznie dla wartości odpężenia.

Ocena istotności różnic między wartościami modułów pełzania i procentowej wartości odpężeń wykonana za pomocą testu Tukeya pozwoliła na wskazanie mieszanek mineralno-asfaltowych, które osiągnęły zbliżone poziomy tego parametru przy braku istotnych statystycznie różnic. W obrębie referencyjnej mieszanki wytwarzanej w technologii WMA z lepiszczem wysokomodyfikowanym wystąpiły istotne różnice w odniesieniu do wszystkich pozostałych mieszanek w aspekcie modułów pełzania. Podobna zależność wystąpiła w odniesieniu do tej mieszanki podczas analizy wartości odpężeń, gdzie brak istotnych różnic zaobserwowano jedynie w przypadku dwóch mieszanek z lepiszczem 45/80-80 wytwarzanych w technologii HMA: mieszanki referencyjnej oraz z dodatkiem 0,3% włókien polimerowo-bazaltowych.

4.6.6 Podsumowanie etapu III

Realizacja badań zaawansowanych mieszanek mineralno-asfaltowych spełniających wymagania zawarte w WT-2 2014 pozwoliła na określenie wpływu rodzaju lepiszcza asfaltowego, technologii wytwarzania oraz rodzaju i ilości zbrojenia rozproszonego w postaci włókien aramidowych i polimerowo-bazaltowych na szersze spektrum ich właściwości.

W pierwszej kolejności wykonano badania obejmujące ocenę zagęszczalności mma, które podobnie jak w przypadku prac innych badaczy wykazały wzrost wskaźników stabilności MSI i indeksu odporności MRI pod wpływem obniżenia temperatury wytwarzania i dodatku włókien. Jednocześnie, wymienione czynniki nie miały większego wpływu na współczynnik zagęszczalności K. Wyniki te świadczą o zmniejszonej urabialności mieszanek wytwarzanych metodą na ciepło z dodatkiem zbrojenia rozproszonego, ale również ich zmniejszonym potencjale do dogęszczania się pod ruchem. Prowadzić to może do trudności w uzyskaniu porównywalnych jak w mieszankach referencyjnych zawartości wolnej przestrzeni, ale bez negatywnego wpływu na odporność na koleinowanie. Zaobserwowano również wpływ analizowanych czynników na jednorodność zagęszczanych próbek ocenianą rozkładem przestrzennym zawartych w nich wolnych przestrzeni.

Dalsze badania realizowano na próbkach zagęszczonych z analizowanych mieszanek. Wykonano badania modułu sztywności w schemacie pośredniego rozciągania, zespolonego modułu sztywności w funkcji temperatury i częstotliwości oraz odporności na zjawisko zmęczenia w celu określenia wpływu zbrojenia, technologii oraz rodzaju lepiszcza na właściwości materiałowe przygotowanych mieszanek mineralno-asfaltowych. W pracy wykonano również badania pełzania analizowanych mieszanek, aby w szerszym zakresie poddać analizie właściwości mieszanek w warunkach wysokiej temperatury i długiego czasu trwania obciążenia.

Analiza wyników badań modułu sztywności w pośrednim rozciąganiu pozwoliła na stwierdzenie, że stosowanie polimeroasfaltów w składzie mieszanek mineralno-asfaltowych skutkowało obniżeniem jego wartości w każdej temperaturze badania w zakresie od 5°C do 20°C bez względu na technologię wytwarzania mma. Efekty związane z zastosowanymi włóknami były różne w zależności od rodzaju włókien i rodzaju lepiszcza asfaltowego. W przypadku włókien aramidowych wpływ na moduł sztywności IT-CY był zauważalny tylko w najniższej temperaturze badania równej 5°C (i był różny w przypadku mieszanek HMA i WMA-30), podczas gdy włókna polimerowo-bazaltowe oddziaływały na ten parametr w szerszym zakresie temperatur. Oceniając wielkość obserwowanych efektów w kontekście inżynierskim, trzeba zwrócić uwagę, że rodzaj lepiszcza asfaltowego miał wielokrotnie większy wpływ na wartości modułów sztywności IT-CY niż obecność zbrojenia rozproszonego.

Analiza wartości zespolonego modułu sztywności wykazała podobne zależności w mieszankach referencyjnych jak badanie modułu sztywności w pośrednim rozciąganiu. Zaobserwowano spadek wartości modułu wraz ze zmianą rodzaju lepiszcza asfaltowego oraz

ograniczony wpływ rodzaju zastosowanego lepiszcza w wysokich temperaturach badania. Najwyższe wartości analizowanego parametru uzyskały mieszanki z lepiszczem asfaltowym 50/70 bez względu na technologię wytwarzania. Zaobserwowano korzystny wpływ włókien polimerowo-bazaltowych w mieszankach wytwarzanych w obniżonych temperaturach z lepiszczem modyfikowanym, gdzie wraz ze wzrostem ilości dozowanych włókien nastąpił wzrost wartości modułu sztywności w wysokich temperaturach badania. W odniesieniu do włókien aramidowych, przy niskich częstotliwościach badania w temperaturze 20°C nastąpił wzrost wartości modułu sztywności po dodaniu zbrojenia w ilości 0,1% w mieszankach z lepiszczem 50/70 w odniesieniu do mieszanek referencyjnych wykonanych w technologii HMA i WMA-30°C.

W ocenie wyników badań ITFT stwierdzono, że najniższą odporność na zjawisko zmęczenia wykazały mieszanki mineralno-asfaltowe z lepiszczem 50/70 w każdej technologii wytwarzania. Dodatek zbrojenia w postaci włókien aramidowych w mieszankach z lepiszczami modyfikowanymi wytwarzanych w obniżonych temperaturach przyniósł pozytywny wpływ w postaci wzrostu tolerancji na odkształcenia przy wszystkich analizowanych poziomach trwałości zmęczeniowej wraz z ze zwiększeniem ilości dozowanych włókien. Zastosowanie w mieszankach włókien polimerowo-bazaltowych również przyniosło korzystny skutek, a mieszanka z lepiszczem modyfikowanym oraz dodatkiem 0,3% PB uzyskała najwyższą wartość analizowanego parametru. Analiza statystyczna w przypadku odporności na zmęczenie wykazała brak istotnego wpływu technologii wytwarzania mieszanek na wartość odkształceń początkowych przy ocenianych poziomach trwałości zmęczeniowej.

Obniżenie temperatury wytwarzania i zagęszczania mieszanek mineralno-asfaltowych w aspekcie modułu pełzania i ocenianej procentowej wartości odprężania mieszanek wykazało korzystny wpływ, szczególnie w mieszankach z lepiszczem wysokomodyfikowanym – w przypadku stosowania tego lepiszcza obserwowano też ogólnie najwyższe wartości modułu pełzania i wartości odprężeń. Zastosowanie włókien aramidowych i polimerowo-bazaltowych powodowało najczęściej spadek wartości analizowanych parametrów wraz z ilością dozowanego zbrojenia. W obu przypadkach najwyższe wartości modułów pełzania spośród mieszanek z dodatkiem włókien uzyskały te mieszanki, które zostały wytworzone w obniżonej temperaturze z dodatkiem 0,05% włókien aramidowych oraz 0,15% włókien polimerowo-bazaltowych. Korzystnie w połączeniu z tymi zawartościami włókien wypadały mieszanki z lepiszczem 50/70 oraz 45/80-55.

4.7 Optymalizacja składu mieszanek mineralno-asfaltowych

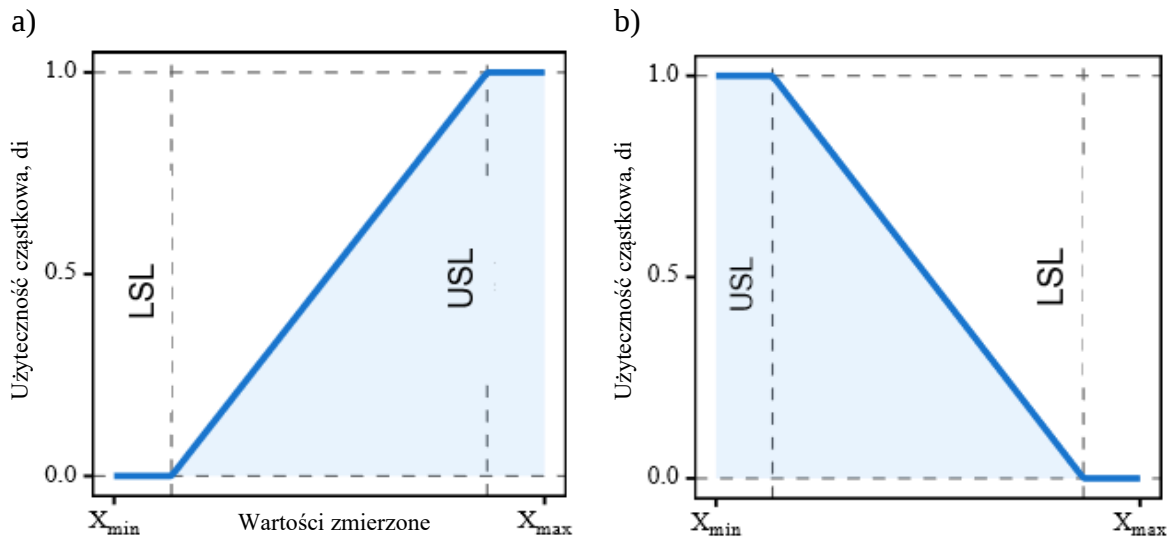
Celem optymalizacji było określenie rodzaju i zawartości zbrojenia rozproszonego w składzie mieszanek mineralno-asfaltowych, które zapewni uzyskanie najkorzystniejszej kombinacji analizowanych parametrów. Dokonano optymalizacji w aspekcie *wszechstronnej* oceny właściwości mma, tj. względem parametrów ze wszystkich analizowanych grup (zagęszczalność, odporność na koleinowanie, odporność na działanie wody i mrozu, sztywność w niskich, pośrednich i wysokich temperaturach, odporność na zmęczenie, moduł sztywności pełzania) oraz optymalizacji w aspekcie oceny ich właściwości wysokotemperaturowych. W analizach zostały uwzględnione mieszanki wytwarzane w technologii HMA i WMA-30°C, które poddawane były badaniom w etapie III. Dla realizacji powyższego celu zastosowano metodę jednoczesnej optymalizacji wielu zmiennych z wykorzystaniem funkcji użyteczności opisaną w [214].

Parametry wykorzystane w analizach optymalizacji przedstawiono w tabeli 4.89.

Tab. 4.89 Parametry mieszanek mineralno-asfaltowych wykorzystane w optymalizacjach.

Parametr	Nazwa parametru	Uzasadnienie uwzględnienia w analizie optymalizacyjnej	Rodzaj optymalizacji
PRD _{AIR}	proporcjonalna głębokość koleiny	odporność na koleinowanie, odporność na dogęszczanie mieszanki pod ruchem	wszechstronna; właściwości wysokotemperaturowe
WTS _{AIR}	Prędkość przyrostu koleiny	odporność na koleinowanie, odporność na dogęszczanie mieszanki pod ruchem	wszechstronna; właściwości wysokotemperaturowe
ITSR	wskaźnik odporności na działanie wody i mrozu	odporność na warunki klimatyczne	wszechstronna
K	współczynnik K	zagęszczalność mieszanki	wszechstronna
IT-CY 5°C IT-CY 20°C	moduł sztywności IT-CY	sztywność w pośrednich temperaturach	wszechstronna
E* -10°C E* 35°C E* 35°C	zespółony moduł sztywności	sztywność i właściwości lepkosprężyste w niskich i wysokich temperaturach	wszechstronna wszechstronna; właściwości wysokotemperaturowe
IT-FT 10 000 IT-FT 100 000	odkształcenie początkowe w badaniu IT-FT dla trwałości zmęczeniowej 10 000 i 100 000 cykli	odporność na zmęczenie	wszechstronna
M _p	moduł sztywności pełzania	odporność na oddziaływanie obciążeń długotrwałych w wysokich temperaturach	wszechstronna; właściwości wysokotemperaturowe

W zastosowanej metodzie zastosowano cząstkowe funkcje użyteczności rosnące i malejące, przedstawione schematycznie na rysunku 4.66. Rolą przedstawionych funkcji jest dokonanie standaryzacji i oceny użyteczności uzyskanych parametrów materiałowych w kolejnych eksperymentach (jak bardzo uzyskane wartości są pożądane).



Rys. 4.66. Funkcje użyteczności zastosowane w badaniach: a) rosnąca, b) malejąca.

Dolne granice użyteczności LSL (ang. *lower specification limit*) oraz górne granice użyteczności USL (ang. *upper specification limit*) zostały określone na potrzeby budowy funkcji użyteczności cząstkowych $d_i(x)$, gdzie i oznacza analizowany parametr mieszanki a x wartość średnią tego parametru dla danego rodzaju mieszanki mineralno-asfaltowej. Cząstkowe funkcje użyteczności zdefiniowane przedziałami przedstawiono w 4.11 - 4.13:

$$a) \quad d_i = \begin{cases} 0, & X < LSL_i \\ \frac{X - LSL_i}{|USL_i - LSL_i|} & LSL_i \leq X \leq USL_i \\ 1, & X > USL_i \end{cases} \quad (4.11)$$

$$b) \quad d_i = \begin{cases} 1, & X < USL_i \\ \frac{USL_i - X}{|LSL_i - USL_i|} & USL_i \leq X \leq LSL_i \\ 0, & X > LSL_i \end{cases} \quad (4.12)$$

$$c) \quad d_i = \begin{cases} 0, & X < LSL_i \\ \frac{X - LSL_i}{|USL_i - LSL_{1i}|} & LSL_{1i} \leq X \leq USL_i \\ \frac{LSL_{2i} - X}{|LSL_{2i} - USL_i|} & USL_i \leq X \leq LSL_{2i} \\ 0 & X > LSL_{2i} \end{cases} \quad (4.13)$$

Z wykorzystaniem powyższych funkcji dla każdej wartości badanego parametru określono jego „użyteczność” w zakresie (0, 1], gdzie „0” oznaczała nieakceptowalną wartość, natomiast wartość „1” najbardziej pożądaną.

Przedmiotem transformacji z wykorzystaniem wymienionych funkcji były średnie wartości optymalizowanych parametrów obliczone dla każdego punktu eksperymentu – każdej z analizowanych mieszanek mineralno-asfaltowych.

Dla każdego z ocenianych parametrów określono dolne i górne granice użyteczności (LSL, USL) definiujące funkcje użyteczności. W przypadku parametrów podstawowych objętych wymaganiami WT-2 2014 jako granice użyteczności przyjęto minimalne i maksymalne wartości wg tego dokumentu. Ustalone graniczne wartości dla parametrów wg WT-2 2014 przedstawiono w tabeli 4.90.

Tab. 4.90. Graniczne wartości użyteczności dla parametrów wg WT-2 2014.

Parametr	Granica użyteczności	Wartość użyteczności d_i	Wartości graniczne
PRD _{AIR}	LSL	0	7,0
	USL	1	min (PRD _{AIR})
WTS _{AIR}	LSL	0	0,1
	USL	1	min (WTS _{AIR})
ITSR	LSL	0	90
	USL	1	100

W przypadku pozostałych parametrów za wartości graniczne przyjęto minimalne i maksymalne obserwowane w eksperymentach ich wartości gwarantując, że przypisane w ten sposób użyteczności cząstkowe zawierać się będą w przedziale (0; 1] – wszystkie analizowane mieszanki spełniały wymagania wg WT-2.

Każdemu z analizowanych parametrów przypisano użyteczność cząstkową w odniesieniu do poszczególnych mieszanek mineralno-asfaltowych. Uzyskany zbiór wartości użyteczności cząstkowych dla każdego z analizowanych parametrów został wykorzystany do obliczenia wartości indeksu użyteczności DI (ang. *desirability index*) jako średniej geometrycznej użyteczności cząstkowych.

4.7.1 Optymalizacja składu mieszanek mineralno-asfaltowych w wszechstronnej analizie właściwości mma.

W tabeli 4.91 przedstawiono obliczone dla wszystkich badanych parametrów użyteczności cząstkowe oraz indeksy użyteczności charakteryzujące i wartościujące wg przyjętych kryteriów analizowane mieszanki mineralno-asfaltowe.

Tab. 4.91 Użyteczność cząstkowa funkcji dla poszczególnych parametrów oraz wskaźnik użyteczności.

Rodzaj asfaltu	Technologia wytwarzania	Rodzaj włókien	Zawartość włókien (%)	PRD _{AIR}	WTS _{AIR}	ITSR	K	IT-CY 5°C	IT-CY 20°C	E* -10°C	E* 35°C	IT-FT 10 000	IT-FT 100 000	M _p	DI
50/70	HMA	REF	0	0,391	0,463	0,870	0,301	0,748	0,790	0,243	0,629	0,213	0,325	0,710	0,459
50/70	HMA	A	0,05	0,394	0,491	0,449	0,459	0,837	0,744	0,370	0,358	0,246	0,301	0,684	0,451
50/70	HMA	A	0,1	0,359	0,449	0,341	0,190	0,693	0,870	0,062	0,981	0,257	0,374	0,707	0,364
50/70	HMA	P	0,15	0,378	0,407	0,469	0,683	1,000	1,000	0,407	0,851	0,123	0,242	0,618	0,478
50/70	HMA	P	0,3	0,394	0,449	0,442	0,749	0,801	0,878	0,573	0,657	0,014	0,041	0,070	0,272
50/70	WMA-30	REF	0	0,224	0,337	0,282	0,601	0,833	0,524	0,249	0,461	0,235	0,300	0,816	0,392
50/70	WMA-30	A	0,05	0,204	0,323	0,138	1,000	0,721	0,532	0,486	0,250	0,187	0,325	0,614	0,365
50/70	WMA-30	A	0,1	0,288	0,379	0,245	0,515	0,737	0,385	0,546	0,332	0,161	0,335	0,602	0,378
50/70	WMA-30	P	0,15	0,323	0,323	0,170	0,539	0,793	0,501	0,287	0,261	0,161	0,329	0,614	0,346
50/70	WMA-30	P	0,3	0,240	0,295	0,484	0,502	0,664	0,361	0,849	0,055	0,317	0,238	0,013	0,244
45/80-55	HMA	REF	0	0,621	0,701	0,678	0,415	0,751	0,644	0,407	0,457	0,556	0,588	0,737	0,581
45/80-55	HMA	A	0,05	0,504	0,771	0,566	0,377	0,791	0,660	0,947	0,134	0,359	0,648	0,783	0,534
45/80-55	HMA	A	0,1	0,531	0,828	0,465	0,596	0,635	0,636	0,593	0,543	0,592	0,626	0,756	0,610
45/80-55	HMA	P	0,15	0,620	0,673	0,481	0,432	0,752	0,866	0,384	0,512	0,531	0,549	0,706	0,573
45/80-55	HMA	P	0,3	0,700	0,757	0,544	0,595	0,627	0,964	0,937	0,415	0,977	0,979	0,290	0,664
45/80-55	WMA-30	REF	0	0,371	0,617	0,451	0,766	0,463	0,257	0,723	0,009	0,767	0,627	0,813	0,380
45/80-55	WMA-30	A	0,05	0,489	0,687	0,375	0,622	0,448	0,264	0,952	0,019	0,733	0,784	0,810	0,423
45/80-55	WMA-30	A	0,1	0,384	0,743	0,274	0,660	0,322	0,321	0,956	0,125	0,843	0,677	0,741	0,474
45/80-55	WMA-30	P	0,15	0,520	0,715	0,367	0,404	0,455	0,197	0,633	0,120	0,735	0,759	0,787	0,452
45/80-55	WMA-30	P	0,3	0,432	0,800	0,555	0,521	0,521	0,317	0,651	0,268	0,704	0,817	0,706	0,541
45/80-80	HMA	REF	0	0,984	0,912	0,829	0,051	0,177	0,410	0,974	0,091	0,459	0,417	0,906	0,400
45/80-80	HMA	A	0,05	0,763	0,940	0,749	0,223	0,449	0,380	0,719	0,134	0,833	0,802	0,890	0,541
45/80-80	HMA	A	0,1	0,660	0,814	0,387	0,036	0,372	0,276	0,402	0,611	0,799	0,837	0,712	0,426
45/80-80	HMA	P	0,15	0,644	0,856	0,571	0,139	0,537	0,274	0,353	0,414	0,660	0,632	0,810	0,479
45/80-80	HMA	P	0,3	0,619	0,954	0,404	0,290	0,152	0,373	0,806	0,208	0,888	0,156	0,911	0,425
45/80-80	WMA-30	REF	0	0,588	0,898	0,536	0,118	0,037	0,031	0,584	0,088	0,783	0,653	0,997	0,284
45/80-80	WMA-30	A	0,05	0,687	0,940	0,321	0,707	0,071	0,038	0,597	0,041	0,851	0,921	0,937	0,340
45/80-80	WMA-30	A	0,1	0,568	0,912	0,178	0,571	0,145	0,124	0,612	0,032	0,733	0,911	0,879	0,353
45/80-80	WMA-30	P	0,15	0,663	0,996	0,444	0,326	0,151	0,161	0,795	0,096	0,845	0,630	0,910	0,427
45/80-80	WMA-30	P	0,3	0,574	0,982	0,612	0,543	0,013	0,008	0,498	0,338	0,507	0,011	0,841	0,195

Analiza użyteczności cząstkowych wykazała pogorszenie wartości proporcjonalnej głębokości koleiny wraz z ilością dozowanego zbrojenia. W mieszankach z polimeroasfaltem i lepiszczem wysokomodyfikowanym zaobserwowano poprawę parametru WTS_{AIR} przy zastosowaniu zbrojenia rozproszonego i technologii obniżonej temperatury. Najlepsze wyniki uzyskały mieszanki wytwarzane w technologii WMA-30°C z lepiszczem 45/80-80 z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych. Najkorzystniejsze wyniki uzyskały mieszanki wytwarzane w tradycyjnej technologii HMA, jednak obniżenie temperatury i zastosowanie włókien w składzie mma poprawiło zagęszczalność tych mieszanek mierzoną współczynnikiem zagęszczalności K bez względu na zastosowany rodzaj lepiszcza asfaltowego. Najlepsze wyniki uzyskały mieszanki z dodatkiem włókien aramidowych w ilości 0,05% wytwarzane w technologii WMA. Moduł sztywności w pośrednim rozciąganiu w temperaturze 5°C w mieszankach z lepiszczem 50/70 nie zmienił się znacząco, co świadczy o korzystnym wpływie włókien w mieszankach wytwarzanych w obniżonych temperaturach. W wyższej temperaturze badania oraz w mieszankach z lepiszczami modyfikowanymi polimerem parametr ten uległ pogorszeniu. Pozytywny wpływ zbrojenia rozproszonego zaobserwowano w badaniu zespolonego modułu sztywności w ujemnych temperaturach, gdzie mieszanka z lepiszczem 50/70 wytwarzana w obniżonych temperaturach o 30°C z 0,3% PB charakteryzowała się znacznie wyższą wartością użyteczności niż mieszanka referencyjna. Podobnie w przypadku mieszanek z lepiszczem 45/80-55 wytwarzanych w technologii WMA z dodatkiem włókien aramidowych. Badania wykonane w wysokich temperaturach wykazały korzystniejsze wartości użyteczności dla mieszanek wytwarzanych w tradycyjnej technologii HMA. Największy wpływ zbrojenia rozproszonego i obniżenia temperatury zaobserwowano w badaniach zmęczeniowych z asfaltem 45/80-55. Mieszanki z dodatkiem lepiszczy modyfikowanych polimerem, które wytworzono w obniżonych temperaturach z dodatkiem zbrojenia rozproszonego uzyskały korzystniejsze wartości użyteczności w badaniu odporności na zjawisko zmęczenia niż mieszanki referencyjne w technologii HMA. Obniżenie temperatury nie wpłynęło niekorzystnie na pełzanie mieszanek z uwagi na dodatek włókien aramidowych i polimerowo-bazaltowych. Oceniając uzyskane wartości indeksu użyteczności w grupie wszystkich mieszanek mineralno-asfaltowych stwierdzić można, że najlepszymi parametrami charakteryzowały się mieszanki z lepiszczem 45/80-55 wytwarzane metodą „na gorąco”, a dodatek włókien niezależnie od ich rodzaju korzystnie wpływał na ich właściwości. Wśród mieszanek wytwarzanych metodą „na ciepło” w technologii WMA-30 najkorzystniejsze właściwości uzyskano stosując lepiszcze 45/80-55 i 0,3% dodatku włókien polimerowo-bazaltowych.

W tabelach 4.92 - 4.94 przedstawiono wartości wskaźnika użyteczności dla poszczególnych lepiszczy asfaltowych w celu dokonania analizy mieszanek w obrębie każdego z analizowanych lepiszczy.

Tab. 4.92 Wskaźnik użyteczności dla mieszanek z lepiszczem asfaltowym 50/70.

Rodzaj asfaltu	Technologia wytwarzania	Rodzaj włókien	Zawartość włókien (%)	DI
50/70	HMA	P	0,15	0,478
50/70	HMA	REF	0	0,459
50/70	HMA	A	0,05	0,451
50/70	WMA-30	REF	0	0,392
50/70	WMA-30	A	0,1	0,378
50/70	WMA-30	A	0,05	0,365
50/70	HMA	A	0,1	0,364
50/70	WMA-30	P	0,15	0,346
50/70	HMA	P	0,3	0,272
50/70	WMA-30	P	0,3	0,244

Tab. 4.93 Wskaźnik użyteczności dla mieszanek z lepiszczem asfaltowym 45/80-55.

Rodzaj asfaltu	Technologia wytwarzania	Rodzaj włókien	Zawartość włókien (%)	DI
45/80-55	HMA	P	0,3	0,664
45/80-55	HMA	A	0,1	0,610
45/80-55	HMA	REF	0	0,581
45/80-55	HMA	P	0,15	0,573
45/80-55	WMA-30	P	0,3	0,541
45/80-55	HMA	A	0,05	0,534
45/80-55	WMA-30	A	0,1	0,474
45/80-55	WMA-30	P	0,15	0,452
45/80-55	WMA-30	A	0,05	0,423
45/80-55	WMA-30	REF	0	0,380

Tab. 4.94 Wskaźnik użyteczności dla mieszanek z lepiszczem asfaltowym 45/80-80.

Rodzaj asfaltu	Technologia wytwarzania	Rodzaj włókien	Zawartość włókien (%)	DI
45/80-80	HMA	A	0,05	0,541
45/80-80	HMA	P	0,15	0,479
45/80-80	WMA-30	P	0,15	0,427
45/80-80	HMA	A	0,1	0,426
45/80-80	HMA	P	0,3	0,425
45/80-80	HMA	REF	0	0,400
45/80-80	WMA-30	A	0,1	0,353
45/80-80	WMA-30	A	0,05	0,340
45/80-80	WMA-30	REF	0	0,284
45/80-80	WMA-30	P	0,3	0,195

Analiza użyteczności w aspekcie rodzaju zastosowanego lepiszcza asfaltowego wykazała w każdym przypadku największą wartość przy zastosowaniu dodatku zbrojenia rozproszonego. W przypadku lepiszczy 50/70 i 45/80-55 efekt ten uzyskano wykorzystując włókna polimerowo-bazaltowe (odpowiednio 0,15% i 0,3%), a z lepiszczem 45/80-80 były to włókna aramidowe. Najwyższe wartości użyteczności we wszystkich przypadkach posiadały mieszanki wytwarzane w technologii HMA. Obniżenie temperatury wytwarzania skutkowało

spadkiem wartości indeksu użyteczności, jednak dodatek zbrojenia rozproszonego w składzie mieszanek z lepiszczami modyfikowanymi polimerem pozwolił na uzyskanie wyższych wartości niż mieszanki wytwarzane w tej samej technologii bez dodatku zbrojenia rozproszonego. W przypadku tych mieszanek WMA korzystniejsze okazało się zastosowanie zbrojenia w postaci włókien polimerowo-bazaltowych, natomiast w mieszankach z lepiszczem 50/70 zaobserwowano obniżenie indeksu użyteczności tożsame z pogorszeniem ich parametrów w przypadku stosowania obu rodzajów włókien.

W tabeli 4.95 przedstawiono wskaźniki użyteczności mieszanek wytwarzanych technologii WMA-30°C.

Tab. 4.95 Wskaźnik użyteczności dla mieszanek wytwarzanych w obniżonej temperaturze o 30°C.

Rodzaj lepiszcza	Rodzaj włókien	Zawartość włókien (%)	DI
45/80-55	P	0,3	0,541
45/80-55	A	0,1	0,474
45/80-55	P	0,15	0,452
45/80-80	P	0,15	0,427
45/80-55	A	0,05	0,423
50/70	REF	0	0,392
45/80-55	REF	0	0,380
50/70	A	0,1	0,378
50/70	A	0,05	0,365
45/80-80	A	0,1	0,353
50/70	P	0,15	0,346
45/80-80	A	0,05	0,340
45/80-80	REF	0	0,284
50/70	P	0,3	0,244
45/80-80	P	0,3	0,195

Analiza wskaźników użyteczności dla mieszanek wytwarzanych w obniżonej o 30°C temperaturze wykazała najkorzystniejszą wartość dla mieszanki z lepiszczem 45/80-55 i dodatkiem 0,3% włókien polimerowo-bazaltowych. Wszystkie mieszanki z tym lepiszczem asfaltowym i dodatkiem zbrojenia rozproszonego uzyskały najlepsze wartości wskaźnika użyteczności. Najgorsze wartości tego parametru uzyskały mieszanki z lepiszczami 50/70 i 45/80-80 z dodatkiem 0,3% włókien polimerowo-bazaltowych.

4.7.2 Optymalizacja składu mieszanek mineralno-asfaltowych w aspekcie właściwości wysokotemperaturowych

Optymalizacja w aspekcie właściwości wysokotemperaturowych została przeprowadzona dla mieszanek wytwarzanych w technologii HMA i WMA-30°C

z wykorzystaniem parametrów: PRD_{AIR} , WTS_{AIR} , zespolony moduł sztywności w temperaturze 35°C oraz moduł sztywności pełzania.

W tabeli 4.96 przedstawiono obliczone dla analizowanych parametrów użyteczności cząstkowe oraz indeksy użyteczności charakteryzujące i wartościujące wg przyjętych kryteriów analizowane mieszanki mineralno-asfaltowe.

Tab. 4.96 Użyteczność cząstkowa funkcji dla poszczególnych parametrów oraz wskaźnik użyteczności.

Rodzaj asfaltu	Technologia wytwarzania	Rodzaj włókien	Zawartość włókien (%)	PRD_{AIR}	WTS_{AIR}	$E^* 35^{\circ}C$	M_p	DI
50/70	HMA	REF	0	0,391	0,463	0,629	0,71	0,533
50/70	HMA	A	0,05	0,394	0,491	0,358	0,684	0,467
50/70	HMA	A	0,1	0,359	0,449	0,981	0,707	0,578
50/70	HMA	P	0,15	0,378	0,407	0,851	0,618	0,533
50/70	HMA	P	0,3	0,394	0,449	0,657	0,07	0,301
50/70	WMA-30	REF	0	0,224	0,337	0,461	0,816	0,410
50/70	WMA-30	A	0,05	0,204	0,323	0,25	0,614	0,317
50/70	WMA-30	A	0,1	0,288	0,379	0,332	0,602	0,385
50/70	WMA-30	P	0,15	0,323	0,323	0,261	0,614	0,359
50/70	WMA-30	P	0,3	0,24	0,295	0,055	0,013	0,084
45/80-55	HMA	REF	0	0,621	0,701	0,457	0,737	0,619
45/80-55	HMA	A	0,05	0,504	0,771	0,134	0,783	0,449
45/80-55	HMA	A	0,1	0,531	0,828	0,543	0,756	0,652
45/80-55	HMA	P	0,15	0,62	0,673	0,512	0,706	0,623
45/80-55	HMA	P	0,3	0,7	0,757	0,415	0,29	0,502
45/80-55	WMA-30	REF	0	0,371	0,617	0,009	0,813	0,203
45/80-55	WMA-30	A	0,05	0,489	0,687	0,019	0,81	0,267
45/80-55	WMA-30	A	0,1	0,384	0,743	0,125	0,741	0,403
45/80-55	WMA-30	P	0,15	0,52	0,715	0,12	0,787	0,433
45/80-55	WMA-30	P	0,3	0,432	0,800	0,268	0,706	0,505
45/80-80	HMA	REF	0	0,984	0,912	0,091	0,906	0,521
45/80-80	HMA	A	0,05	0,763	0,940	0,134	0,89	0,541
45/80-80	HMA	A	0,1	0,66	0,814	0,611	0,712	0,695
45/80-80	HMA	P	0,15	0,644	0,856	0,414	0,81	0,656
45/80-80	HMA	P	0,3	0,619	0,954	0,208	0,911	0,578
45/80-80	WMA-30	REF	0	0,588	0,898	0,088	0,997	0,464
45/80-80	WMA-30	A	0,05	0,687	0,940	0,041	0,937	0,398
45/80-80	WMA-30	A	0,1	0,568	0,912	0,032	0,879	0,347
45/80-80	WMA-30	P	0,15	0,663	0,996	0,096	0,91	0,490
45/80-80	WMA-30	P	0,3	0,574	0,982	0,338	0,841	0,633

Analiza użyteczności cząstkowych w aspekcie właściwości wysokotemperaturowych wykazała pogorszenie wartości proporcjonalnej głębokości koleiny przy obniżeniu temperatury wytwarzania mma. Dodatek zbrojenia rozproszonego w mieszankach z lepiszczem wysokomodyfikowanym wytwarzanych w technologii WMA-30°C skutkowało podniesieniem tego parametru w odniesieniu do mieszanki referencyjnej. Najkorzystniejsze wartości użyteczności cząstkowej parametru prędkości przyrostu koleiny wystąpiły w mieszankach

z polimeroasfalem i lepiszczem wysokomodyfikowanym. Dodatkowo, korzystny efekt miało obniżenie temperatury wytwarzania w tych mieszankach dla włókien aramidowych i polimerowo-bazaltowych. Najlepsze wyniki uzyskały mieszanki wytwarzane w technologii WMA-30°C z lepiszczem 45/80-80 z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.

Analiza zespolonego modułu sztywności w temperaturze 35°C wskazuje na pogorszenie wartości tego parametru wraz z obniżeniem temperatury wytwarzania, jednak warto zauważyć, że mieszanki z polimeroasfalem i lepiszczem wysokomodyfikowanym wytwarzane w tej technologii z dodatkiem 0,3% włókien polimerowo-bazaltowych uzyskały lepsze rezultaty niż mieszanki referencyjne bez zbrojenia. Wpływ zbrojenia rozproszonego na wartość modułu pełzania w mieszankach z lepiszczem 50/70 wskazuje na znaczne pogorszenie tego parametru bez względu na zastosowaną technologię przy 0,3% włókien PB. Mieszanki z lepiszczem 45/80-80 wytwarzane w technologii WMA-30°C z dodatkiem 0,05% AR i 0,15% PB uzyskały lepsze wyniki modułu pełzania niż mieszanki z taką samą zawartością zbrojenia wytwarzane w technologii HMA. Spośród mieszanek wytwarzanych w technologii obniżonej temperatury z lepiszczem spienionym najkorzystniejsze wartości użyteczności uzyskała mieszanka z lepiszczem 45/80-80 z dodatkiem 0,3% włókien polimerowo-bazaltowych.

W tabelach 4.97 - 4.99 przedstawiono wartości wskaźnika użyteczności dla poszczególnych lepiszczy asfaltowych w celu dokonania analizy mieszanek w obrębie każdego rodzaju.

Tab. 4.97 Wskaźnik użyteczności dla mieszanek z lepiszczem asfaltowym 50/70 w aspekcie właściwości wysokotemperaturowych.

Rodzaj asfaltu	Technologia wytwarzania	Rodzaj włókien	Zawartość włókien (%)	DI
50/70	HMA	A	0,1	0,578
50/70	HMA	P	0,15	0,533
50/70	HMA	REF	0	0,533
50/70	HMA	A	0,05	0,467
50/70	WMA-30	REF	0	0,410
50/70	WMA-30	A	0,1	0,385
50/70	WMA-30	P	0,15	0,359
50/70	WMA-30	A	0,05	0,317
50/70	HMA	P	0,3	0,301
50/70	WMA-30	P	0,3	0,084

Tab. 4.98 Wskaźnik użyteczności dla mieszanek z lepiszczem asfaltowym 45/80-55 w aspekcie właściwości wysokotemperaturowych.

Rodzaj asfaltu	Technologia wytwarzania	Rodzaj włókien	Zawartość włókien (%)	DI
45/80-55	HMA	A	0,1	0,652
45/80-55	HMA	P	0,15	0,623
45/80-55	HMA	REF	0	0,619
45/80-55	WMA-30	P	0,3	0,505
45/80-55	HMA	P	0,3	0,502
45/80-55	HMA	A	0,05	0,449
45/80-55	WMA-30	P	0,15	0,433
45/80-55	WMA-30	A	0,1	0,403
45/80-55	WMA-30	A	0,05	0,267
45/80-55	WMA-30	REF	0	0,203

Tab. 4.99 Wskaźnik użyteczności dla mieszanek z lepiszczem asfaltowym 45/80-80 w aspekcie właściwości wysokotemperaturowych.

Rodzaj asfaltu	Technologia wytwarzania	Rodzaj włókien	Zawartość włókien (%)	DI
45/80-80	HMA	A	0,1	0,695
45/80-80	HMA	P	0,15	0,656
45/80-80	WMA-30	P	0,3	0,633
45/80-80	HMA	P	0,3	0,578
45/80-80	HMA	A	0,05	0,541
45/80-80	HMA	REF	0	0,521
45/80-80	WMA-30	P	0,15	0,490
45/80-80	WMA-30	REF	0	0,464
45/80-80	WMA-30	A	0,05	0,398
45/80-80	WMA-30	A	0,1	0,347

Analiza użyteczności w aspekcie rodzaju zastosowanego lepiszcza asfaltowego wykazała w każdym przypadku największą wartość przy zastosowaniu dodatku zbrojenia rozproszonego. Najwyższe wartości indeksu użyteczności w każdym z analizowanych lepiszczy asfaltowych uzyskały mieszanki wytwarzane w technologii HMA z dodatkiem włókien aramidowych w ilości 0,1% oraz 0,15% polimerowo-bazaltowych. Bardziej korzystne okazało się zastosowanie włókien polimerowo-bazaltowych w ilości 0,3% w mieszankach wytwarzanych w obniżonych temperaturach z polimeroasfaltem i lepiszczem wysokomodyfikowanym. W przypadku mieszanki z lepiszczem 45/80-80 wytwarzanej w technologii WMA-30°C z dodatkiem włókien PB w ilości 0,3% uzyskała ona znacznie wyższy indeks użyteczności niż mieszanki z dodatkiem zbrojenia w technologii HMA. Podobna zależność została zaobserwowana w mieszankach z polimeroasfaltem.

W tabeli 4.100 przedstawiono wskaźniki użyteczności mieszanek wytwarzanych w technologii WMA-30°C w aspekcie właściwości wysokotemperaturowych.

Tab. 4.100 Wskaźnik użyteczności dla mieszanek wytwarzanych w obniżonej temperaturze o 30°C w aspekcie właściwości wysokotemperaturowych.

Rodzaj lepiszcza	Rodzaj włókien	Zawartość włókien (%)	DI
45/80-80	P	0,3	0,633
45/80-55	P	0,3	0,505
45/80-80	P	0,15	0,490
45/80-80	REF	0	0,464
45/80-55	P	0,15	0,433
50/70	REF	0	0,410
45/80-55	A	0,1	0,403
45/80-80	A	0,05	0,398
50/70	A	0,1	0,385
50/70	P	0,15	0,359
45/80-80	A	0,1	0,347
50/70	A	0,05	0,317
45/80-55	A	0,05	0,267
45/80-55	REF	0	0,203
50/70	P	0,3	0,084

Analiza wskaźników użyteczności dla mieszanek wytwarzanych w obniżonej o 30°C temperaturze wykazała najkorzystniejszą wartość dla mieszanki z lepiszczem wysokomodyfikowanym z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych w ilości 0,3%. Niewielki spadek wskaźnika zaobserwowano w mieszance z polimeroasfaltem i każdą zawartością włókien PB. Najmniej korzystne parametry wysokotemperaturowe posiadała mieszanka z tym samym rodzajem włókien i lepiszczem 50/70, której wartość indeksu użyteczności była znacznie niższa niż mieszanki referencyjnej bez dodatku włókien. Analiza użyteczności pozwoliła na wytypowanie włókien polimerowo-bazaltowych jako bardziej korzystnych w aspekcie ich wpływu na właściwości wysokotemperaturowe mieszanek mineralno-asfaltowych.

Podsumowując rezultaty optymalizacji parametrów wysokotemperaturowych stwierdzić można, że na właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych miały zarówno technologia ich wytwarzania, zastosowane lepiszcze asfaltowe, jak i rodzaj i ilość zbrojenia rozproszonego. Analizowane rodzaje zbrojenia rozproszonego pozwalały uzyskać różne rezultaty w zależności od technologii wytwarzania mma oraz stosowanego lepiszcza asfaltowego. Przedstawione wyniki pokazują również, że skuteczne i efektywne zastosowanie zbrojenia rozproszonego w mieszankach mineralno-asfaltowych stanowi istotne wyzwanie i może w niektórych przypadkach prowadzić do pogorszenia właściwości zaprojektowanej mieszanki. Zastosowanie włókien polimerowo-bazaltowych w mieszankach z polimeroasfaltem i lepiszczem wysokomodyfikowanym w ilości 0,3% pozwala na wytworzenie mieszanki posiadającej korzystne właściwości wysokotemperaturowe.

5. WNIOSKI KOŃCOWE I KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ

5.1 Wnioski końcowe

Na podstawie wyników badań i dokonanych analiz lepiszczy asfaltowych i mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem zbrojenia rozproszonego w postaci włókien aramidowych i polimerowo-bazaltowych wytwarzanych w tradycyjnej technologii HMA i obniżonej temperaturze z dodatkiem asfaltu spienionego sformułowano następujące wnioski o charakterze ogólnym:

- spośród analizowanych mieszanek wytwarzanych w obniżonych temperaturach najwyższymi właściwościami wysokotemperaturowymi (odporność na powstawanie deformacji trwałych, zespolony moduł sztywności, moduł sztywności pełzania) charakteryzowały się mieszanki ze zbrojeniem rozproszonym, potwierdzając jego korzystny wpływ na tę grupę właściwości,
- korzystne efekty zastosowania zbrojenia rozproszonego w technologii WMA obserwowano głównie w przypadku mieszanek mineralno-asfaltowych z lepiszczami asfaltowymi modyfikowanymi polimerami; gdy wykorzystywano asfalt drogowy 50/70, mieszanki zawierające w swoim składzie zbrojenie rozproszone charakteryzowały się obniżonymi parametrami względem mieszanki referencyjnej,
- w technologii wytwarzania „na gorąco” najwyższymi parametrami charakteryzowały się mieszanki wykorzystujące zbrojenie włóknami aramidowymi, podczas gdy w technologii „na ciepło” lepsze rezultaty uzyskiwano z włóknami polimerowo-bazaltowymi,
- korzystne efekty zastosowania zbrojenia rozproszonego obserwowano również w aspekcie odporności na działanie wody i mrozu, sztywności w niskich temperaturach oraz odporności na zmęczenie, pozwalając stwierdzić o jego pozytywnym wpływie na trwałość analizowanych mieszanek mineralno-asfaltowych.

Sformułowano również wnioski szczegółowe:

- zarówno ilość wody spieniającej jak i temperatura lepiszcza asfaltowego miały istotny wpływ na parametry spieniania każdego z analizowanych lepiszczy asfaltowych; szczególnie w przypadku lepiszczy modyfikowanych polimerami konieczna była wyższa temperatura dla uzyskania najwyższych parametrów wartości ekspansji i czasu półtrwania piany asfaltowej,

- proces spieniania miał istotny wpływ na podstawowe parametry lepiszczy asfaltowych bezpośrednio po ich spienieniu,
- wykazano istotny wpływ rodzaju lepiszcza asfaltowego na właściwości podstawowe i zaawansowane mieszanek mineralno-asfaltowych,
- rodzaj zastosowanego lepiszcza asfaltowego, technologii wytwarzania i zagęszczania oraz zawartość zbrojenia rozproszonego miały istotny wpływ na zawartość wolnej przestrzeni, proporcjonalną głębokość koleiny oraz odporność na działanie wody i mrozu mieszanek z dodatkiem włókien aramidowych i polimerowo-bazaltowych,
- wszystkie analizowane czynniki miały istotny wpływ na zagęszczalność mieszanek mineralno-asfaltowych, zespolony moduł sztywności mieszanek z dodatkiem włókien aramidowych oraz moduł pełzania mieszanek z włóknami polimerowo-bazaltowymi,
- brak istotnego wpływu technologii wytwarzania mieszanek mineralno-asfaltowych wykazano w badaniach zespolonego modułu sztywności w niskich temperaturach dla mieszanek z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych oraz odporności na zjawisko zmęczenia mieszanek z każdym rodzajem włókien,
- brak istotnego wpływu zawartości zbrojenia rozproszonego wykazano w badaniach modułów sztywności w pośrednim rozciąganiu mieszanek z dodatkiem włókien aramidowych, zespolonego modułu sztywności w wysokich temperaturach badania dla mieszanek z włóknami polimerowo-bazaltowymi, odporności na zjawisko zmęczenia mieszanek z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych oraz wartości odprężenia przy badaniu modułów pełzania mieszanek z włóknami aramidowymi,
- dobór odpowiedniego rodzaju zbrojenia rozproszonego oraz jego zawartości może być zróżnicowany w zależności od rodzaju zastosowanego lepiszcza asfaltowego,
- mieszanki z polimeroasfaltem i lepiszczem wysokomodyfikowanym wytwarzane w obniżonych temperaturach z dodatkiem zbrojenia rozproszonego wykazują lepsze właściwości zmęczeniowe i niskotemperaturowe niż mieszanki referencyjne w technologii HMA,
- największą odpornością na tworzenie się deformacji trwałych i pełzanie mieszanek w wysokich temperaturach eksploatacyjnych charakteryzują się mieszanki z lepiszczem wysokomodyfikowanym wytwarzane w technologii WMA-30°C z dodatkiem zbrojenia rozproszonego,
- najwyższe wartości indeksu użyteczności właściwości wysokotemperaturowych w mieszankach z każdym rodzajem lepiszczy asfaltowych uzyskały te z dodatkiem

0,1% włókien aramidowych i 0,15% włókien polimerowo-bazaltowych wytwarzane w technologii HMA,

- korzystniejsze wyniki użyteczności mieszanek wytwarzanych w technologii WMA- 30°C uzyskały mieszanki z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych,
- na podstawie przeprowadzonej optymalizacji wykazano, że obniżenie temperatury wytwarzania powoduje pogorszenie właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych, jednak dodatek włókien do tych mieszanek poprawia ich parametry.

Zrealizowany plan badawczy pozwolił potwierdzić słuszność stawianych hipotez w zakresie wpływu technologii wytwarzania i zagęszczania mieszanek mineralno-asfaltowych oraz korzystnego wpływu zbrojenia rozproszonego na właściwości betonu asfaltowego. Wykazano istotność tych czynników na poszczególne parametry mieszanek mineralno-asfaltowych oraz na podstawie przeprowadzonej optymalizacji wytypowano najkorzystniejsze rozwiązania w aspekcie poszczególnych rodzajów lepiszczy asfaltowych stosowanych w mieszankach.

5.2 Kierunki dalszych badań

Na podstawie uzyskanych wyników badań i przeprowadzonych analiz przedstawionych w niniejszej rozprawie planowane kierunki dalszych badań dotyczą:

- uzupełnienie oceny wpływu zbrojenia rozproszonego i obniżania temperatur wytwarzania mieszanek mineralno-asfaltowych o wyniki uzyskane w badaniach mieszanek z lepiszczami asfaltowymi o większej sztywności,
- rozszerzenie oceny wpływu zbrojenia rozproszonego o inne rodzaje włókien w aspekcie obniżonych temperatur wytwarzania i zagęszczania mieszanek mineralno-asfaltowych,
- rozszerzenie zakresu badań o analizę właściwości zmęczeniowych przy kontrolowanym odkształceniu, szczególnie w zakresie dużych odkształceń,
- wykonanie badań zaawansowanych na wytypowanych mieszankach w wyższych zakresach temperatur,
- realizacja prac w zakresie zastosowania zbrojenia rozproszonego do warstwy wiążącej wytwarzanej w obniżonych temperaturach z asfaltem spienionym,
- prace w kierunku możliwości zastosowania granulatu asfaltowego do mieszanek mineralno-asfaltowych wytwarzanych w obniżonych temperaturach z dodatkiem zbrojenia rozproszonego z przeznaczeniem na warstwę ścieralną.

WYKAZ NORM

- [N1] PN-EN 1426 Asfalty i lepiszcza asfaltowe - Oznaczanie penetracji igłą
- [N2] PN-EN 1427 Asfalty i lepiszcza asfaltowe - Oznaczanie temperatury mięknięcia - Metoda Pierścień i Kula
- [N3] PN-EN 12593 Asfalty i lepiszcza asfaltowe - Oznaczanie temperatury łamliwości Fraassa
- [N4] PN-EN 13302 Asfalty i lepiszcza asfaltowe - Oznaczanie lepkości dynamicznej lepiszczy asfaltowych lepkościomierzem obrotowym
- [N5] PN-EN 13398 Asfalty i lepiszcza asfaltowe - Oznaczanie nawrotu sprężystego asfaltów modyfikowanych
- [N6] PN-EN 12697-8 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań - Część 8: Oznaczanie zawartości wolnej przestrzeni próbek mineralno-asfaltowych
- [N7] PN-EN 12697-22 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań - Część 22: Koleinowanie
- [N8] PN-EN 12697-12 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań - Część 12: Określanie wrażliwości na wodę próbek mineralno-asfaltowych
- [N9] PN-EN 12697-10 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań - Część 10: Zagęszczalność
- [N10] PN-EN 12697-26 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań - Część 26: Sztywność
- [N11] AASHTO T342 Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)
- [N12] PN-EN 12697-24 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań - Część 24: Odporność na zmęczenie
- [N13] Wytyczne oznaczenia odkształcenia i modułu sztywności mieszanek mineralno-bitumicznych metodą pełzania pod obciążeniem statycznym. Zeszyt IBDiM nr 48. Warszawa 1995.
- [N14] PN-EN 12596 Oznaczenie lepkości dynamicznej metodą próżniowej kapilary
- [N15] PN-EN 13702 Asfalty i lepiszcza asfaltowe - Oznaczanie lepkości dynamicznej asfaltów i lepiszczy asfaltowych metodą stożek i płytka
- [N16] AASHTO T315 Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)
- [N17] ASTM D 7175-08 Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer
- [N18] PN-EN 14770:2024-01 Asfalty i lepiszcza asfaltowe – wyznaczenie zespolonego modułu sprężystości i kąta fazowego – reometr dynamicznego ścinania

- [N19] PN-EN 16659 Asfalty i lepiszcza asfaltowe - Badanie cyklicznego pelzania z odprężeniem (MSCRT)
- [N20] AASHTO M 332 Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test
- [N21] PN-EN 12697-25 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 25: Penetracja dynamiczna
- [N22] PN-EN 12697-34 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 34: Badanie Marshalla
- [N23] AASHTO T312 Standard Method of Test for Preparing and Determining the Density of Asphalt Mixture Specimens by Means of the Superpave Gyratory Compactor
PN-EN 12697-34 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metoda badań - Część 34: Badanie Marshalla
- [N24] AASHTO T331 Standard Method of Test for Bulk Specific Gravity (Gmb) and Density of Compacted Asphalt Mixtures Using Automatic Vacuum Sealing Method
PN-EN 13108-20 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Wymagania - Część 20: Badanie typu
- [N25] PN-EN 12594 Asfalty i lepiszcza asfaltowe - Przygotowanie próbek do badań
- [N26] PN-EN 12607-1 Asfalty i lepiszcza asfaltowe - Oznaczanie odporności na starzenie pod wpływem ciepła i powietrza - Część 1: Metoda RTFOT
- [N27] PN-EN 12697-30 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań - Część 30: Przygotowanie próbek zagęszczonych przez ubijanie
- [N28] PN-EN 12697-31 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań - Część 31: Przygotowanie próbek w prasie żyratorowej
- [N29] PN-EN 12697-33 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metoda badań - Część 33: Przygotowanie próbek zagęszczanych urządzeniem wałującym
- [N30] PN-EN 12697-5 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań - Część 5: Oznaczanie gęstości
- [N31] PN-EN 12697-6 Mieszanki mineralno-asfaltowe - Metody badań - Część 6: Oznaczanie gęstości objętościowej próbek mieszanki mineralno-asfaltowej
- [N32] PN-EN 12591 Asfalty i produkty asfaltowe -- Bitumy do układania -- Specyfikacja

BIBLIOGRAFIA

- [1] Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, „Klimat Polski 2020”, 2020.
- [2] P. Radziszewski i in., „Perspektywy i kierunki rozwoju technologii nawierzchni drogowych w aspekcie ochrony środowiska i zrównoważonego rozwoju”, Warszawa, 2014.
- [3] Z. Gong, L. Zhang, J. Wu, Z. Xiu, L. Wang, i Y. Miao, „Review of regulation techniques of asphalt pavement high temperature for climate change adaptation”, *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, t. 3, nr 1, 2022, doi: 10.1186/s43065-022-00054-5.
- [4] Polskie Stowarzyszenie Wykonawców Nawierzchni Asfaltowych, „Zrównoważony rozwój dróg publicznych w Polsce”. Dostęp: 26 czerwiec 2022. [Online]. Dostępne na: https://www.pswana.pl/sites/default/files/publications/2022-03/Zrownowazony_rozwoj_drog_publicznych_w_polsce_FIN_PUBLIKACJE.pdf
- [5] J. A. D'Angelo, Harm E. E, Bartoszek J. C, i G. L. Baumgardner, „Warm-Mix Asphalt : European Practice”, Washington, 2008. Dostęp: 28 maj 2023. [Online]. Dostępne na: www.international.fhwa.dot.gov
- [6] B. D. Prowell i G. C. Hurley, *Warm-Mix Asphalt: Best Practices*, t. 125, nr 125. National Asphalt Pavement Association, 2012.
- [7] J. Piłat i P. Radziszewski, *Nawierzchnie asfaltowe*. Warszawa: WKŁ, 2010.
- [8] B. Stefańczyk i P. Mieczkowski, *Mieszanki mineralno-asfaltowe. Wykonawstwo i badania*. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2009.
- [9] ORLEN Asfalt, „Nawierzchnie asfaltowe wobec zmian klimatycznych”, *Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne*, t. 6, s. 48–49, 2021, Dostęp: 12 styczeń 2024. [Online]. Dostępne na: www.poradnikasfaltowy.pl,
- [10] M. Szruba, „Nawierzchnie asfaltowe na drodze nieustannego rozwoju”, *Nowoczesne budownictwo inżynieryjne*, s. 69–73, 2020.
- [11] F. Xiao, J. Jordan, i S. N. Amirkhanian, „Laboratory investigation of moisture damage in warm-mix asphalt containing moist aggregate”, *Transp Res Rec*, s. 115–124, 2009.
- [12] K. Maciejewski, A. Chomicz-Kowalska, i E. Remisova, „Effects of water-foaming and liquid warm mix additive on the properties and chemical composition of asphalt binders in terms of short term ageing process”, *Constr Build Mater*, t. 341, 2022.
- [13] M. Iwański i in., „Stiffness Evaluation of Laboratory and Plant Produced Foamed Bitumen Warm Asphalt Mixtures with Fiber Reinforcement and Bio-Flux Additive”, *Materials*, t. 16, nr 5, 2023, doi: 10.3390/ma16051950.

- [14] D. E. Newcomb i in., „Properties of foamed asphalt for warm mix asphalt applications”, s. 122, 2015.
- [15] P. Mieczkowski i B. Budziński, „The influence of water on the heat loss of hot mix asphalt”, *Applied Sciences*, t. 9, nr 9, 2019.
- [16] B. Jennings i R. Wirtjes, „Hot-Mix Asphalt vs. Warm-Mix Asphalt 2018 Illinois Asphalt Pavement Association Scholarship”, Illinois, 2019.
- [17] A. Milad i in., „A comparative review of hot and warm mix asphalt technologies from environmental and economic perspectives: towards a sustainable asphalt pavement”, *Int J Environ Res Public Health*, t. 19, nr 22, 2022, doi: 10.3390/ijerph192214863.
- [18] P. Mieczkowski i B. Budziński, „Ochrona środowiska w aspekcie produkcji i wbudowywania mieszanek mineralno-asfaltowych”, *Autostrady*, t. 11–12, s. 40–44, 2016.
- [19] M. Danowski, „Zastosowanie mieszanek mineralno-asfaltowych o obniżonej temperaturze zagęszczania - doświadczenia niemieckie”, *Nawierzchnie Drogowe i Lotniskowe*.
- [20] J. Ekiert i D. Łokaj, „Ekologia w produkcji mas bitumicznych-Sasobit (I)”. Dostęp: 28 maj 2023. [Online]. Dostępne na: <https://edroga.pl/nauka/badania/1091-ekologia-w-produkcji-mas-bitumicznych-sasobit-i?format=pdf>
- [21] W. Bańkowski i D. Sybilski, „Proekologiczne asfaltowe nawierzchnie dróg”, IBDiM, Warszawa, 2009.
- [22] M. Iwański i G. Mazurek, „Odporność na oddziaływanie wody i mrozu betonu asfaltowego z modyfikatorem niskowiskozowym”, w *56 Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN oraz Komitetu Naukowego PZiTb*, Krynica, 2010, s. 295–302.
- [23] J. Król, P. Radziszewski, J. Piłat, K. Kowalski, i P. Świerzewski, „Właściwości ekologicznych lepiszczy modyfikowanych dodatkami obniżającymi temperaturę technologiczną”, w *Ochrona środowiska i estetyka a rozwój infrastruktury drogowej*, 2011, s. 189–200.
- [24] K. J. Jenkins, A. A. A. Molenaar, J. de Groot, i M. van de Ven, „Foamed asphalt produced using warmed aggregates”, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, t. 71, s. 444–478, 2002.
- [25] F. Olard, A. Romier, B. Héritier, i Y. Martineau, „Low energy asphalt LEA: new half-warm mix asphalt for minimizing impacts from asphalt plant to job site”, w *Congress on Asphalt Pavements and Environment*, Zurich, 2008.
- [26] „Warm Mix Asphalt Technical Working Group”. Dostęp: 2 styczeń 2021. [Online]. Dostępne na: Warm Mix Asphalt Technical Working Group
- [27] F. Olard, „Les Enrobes LEA - Low Energy Asphalt”, *Bitume*, s. 22, 2007.

- [28] M. Stienss, „Charakterystyka mieszanek mineralno-asfaltowych produkowanych w technologii na ciepło (WMA)”, w *Nawierzchnie drogowe*, Kraków, 2016.
- [29] M. Stienss i J. Judycki, „Mieszanki mineralno-asfaltowe na ciepło - przegląd dodatków”, *Drogownictwo*, t. 7–8, s. 227–232, 2010.
- [30] M. Sukhija, N. Saboo, i A. Pani, „Economic and environmental aspects of warm mix asphalt mixtures: A comparative analysis”, *Transp Res D Transp Environ*, t. 109, 2022,
- [31] B. Prowell, B. Frank, L. Osborne, T. Kriech, i R. West, „NCHRP 9-47A Defat Final Report: Effects of WMA on Plant Energy and Emissions and Worker Exposures to Respirable Fumes”, 2014.
- [32] A. Almeida-Costa i A. Benta, „Economic and environmental impact study of warm mix asphalt compared to hot mix asphalt”, *J Clean Prod*, t. 112, s. 2308–2317, 2016.
- [33] S. D. Capitão, L. G. Picado-Santos, i F. Martinho, „Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt”, *Constr Build Mater*, t. 36, s. 1016–1024, 2012.
- [34] M. C. Rubio, G. Martínez, L. Baena, i F. Moreno, „Warm mix asphalt: an overview”, *J Clean Prod*, t. 24, s. 76–84, 2012, doi: 10.1016/j.jclepro.2011.11.053.
- [35] A. M. Mosa, L. A. Salem, i W. A. Waryosh, „New Admixture for Foamed Warm Mix Asphalt: A Comparative Study”, *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*, t. 44, s. 649–660, 2020, doi: 10.1007/s40996-020-00397-7.
- [36] P. Mieczkowski, „The effect of an organometallic catalyst on the properties of pen grade bitumens”, *Structure*, t. 10, s. 338–353, 2018, doi: 10.30540/sae-2018-031.
- [37] J. Judycki i M. Stienss, „Badania mieszanek mineralno-asfaltowych o obniżonej temperaturze otaczania. Raport końcowy”, Gdańsk, 2011.
- [38] „Shell Wam Foam Process: for reducing energy consumption and emissions”. Dostęp: 28 maj 2023. [Online]. Dostępne na: http://www-static.shell.com/static/bitumen/downloads/business/shell_wamfoam_brochure.pdf
- [39] O. R. Larsen, Ø. Moen, C. Robertus, i B. G. Koenders, „Wam foam asphalt production at lower operating temperatures as an environmentally friendly alternative to HMA”, w *Proceedings of the 3rd Eurasphalt and Eurobitume Congress*, Vienna, 2004, s. 641–650.
- [40] L. Csanyi, „Foamed asphalt”, *American Road Builders Association*, t. 204, 1959.
- [41] L. Csanyi, „Foamed Asphalt for Economical Road Construction”, *Civil Engineering*, t. 32, s. 66–68, 1962.
- [42] S. Maccarrone, G. Holleran, D. Leonard, i S. Hey, „Pavement recycling using foamed bitumen”, w *17th ARRB Conference*, Melbourne, 1994.

- [43] National Academies of Sciences, „NCHRP Report 691: Mix design practices for warm mix asphalt”, Washington, 2011. doi: 10.17226/14488.
- [44] K. A. Tutu, Y. A. Tuffour, K. A. Tutu, i Y. A. Tuffour, „Warm-Mix Asphalt and Pavement Sustainability: A Review”, *Open Journal of Civil Engineering*, t. 6, nr 2, s. 84–93, 2016.
- [45] R. Kumar i S. Chandra, „Warm Mix Asphalt Investigation on Public Roads - A Review”, *Civil Engineering and Urban Planning*, t. 3, nr 2, s. 75–86, 2016, doi: 10.5121/CIVEJ.2016.3206.
- [46] „NCHRP Report 779: Field Performance of Warm Mix Asphalt Technologies”, Transportation Research Board, paź. 2014. doi: 10.17226/22272.
- [47] Y. Kim, J.-J. Lee, C. Baek, S. Kwon, Y. C. SUH, i J. Son, „Evaluation of warm-mix asphalt mixtures using leadcap additive”, *International Journal on Pavement Engineering & Asphalt Technology*, t. 14, nr 2, s. 67–74, 2013, doi: 10.2478/IJPEAT-2013-0004.
- [48] J. Zhang, L. Xu, L. Lin, i S. Liu, „The application of warm mix asphalt technology in China: a review”, w *International Conference on Innovative Material Science and Technology*, Shenzhen, 2016, s. 328–331.
- [49] B. Middleton i R. W. Forfyflow, „Evaluation of Warm-Mix Asphalt Produced with the Double Barrel Green Process”, *Transportation Research Board*, nr 2126, s. 19–26, 2009.
- [50] B. Prowell, „Scan Tour Examines Warm-Mix in Europe”, Lanham, 2007.
- [51] Y. Kim, D. Cho, S. Researcher, J. Lee, S. Yang, i Y. Kim, „Building Sustainable Pavements with Wax-Based Compound Using a Warm-Mix Asphalt Technology in Korea”, *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, t. 8, s. 278–278, 2011.
- [52] J. M. Cavallari, L. M. Zwack, C. R. Lange, R. F. Herrick, i M. D. McClean, „Temperature-dependent emission concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons in paving and built-up roofing asphalts”, *Annals of Occupational Hygiene*, t. 56, nr 2, s. 148–160, 2012.
- [53] J. M. Cavallari i in., „Predictors of dermal exposures to polycyclic aromatic compounds among hot-mix asphalt paving workers”, *Annals of Occupational Hygiene*, t. 56, nr 2, s. 125–137, 2012, doi: 10.1093/ANNHYG/MER108.
- [54] A. J. Kriech, L. V Osborn, B. D. Prowell, A. P. Redman, i R. C. West, „Comparison of worker breathing zone exposures between hot mix asphalt and warm mix asphalt applications”, w *International Warm Mix Conference*, St. Louis, 2011.
- [55] A. Bozorgzad, B. J. Chon, A. Sampath, Y. Kim, i H. D. Lee, „Impacts of WMA additives on viscosity and cracking of asphalt binder”, *Adv Civ Eng Mater*, t. 7, nr 1, s. 496–506, 2018.
- [56] A. Behnood, M. M. Karimi, i G. Cheraghian, „Coupled effects of warm mix asphalt (WMA) additives and rheological modifiers on the properties of asphalt binders”, *Clean Eng Technol*, t. 1, 2020, doi: 10.1016/J.CLET.2020.100028.

- [57] N. M. Wasiuddin, M. M. Zaman, i E. A. O'Rear, „Effect of sasobit and Aspha-Min on wettability and adhesion between asphalt binders and aggregates”, *Transp Res Rec*, nr 2051, s. 80–89, 2008, doi: 10.3141/2051-10.
- [58] J. Ji i in., „Moisture Susceptibility of Warm Mix Asphalt (WMA) with an Organic Wax Additive Based on X-Ray Computed Tomography (CT) Technology”, *Advances in Civil Engineering*, t. 2019, 2019, doi: 10.1155/2019/7101982.
- [59] T. Glueckert, „Impacts of WMA additives on rutting resistance and moisture susceptibility”, University of Iowa, 2012. doi: 10.17077/ETD.PV13AQCI.
- [60] A. Chomicz-Kowalska, W. Gardziejczyk, i M. M. Iwański, „Moisture resistance and compactibility of asphalt concrete produced in half-warm mix asphalt technology with foamed bitumen”, *Constr Build Mater*, t. 126, s. 108–118, 2016.
- [61] A. L. Belc, E. Coleri, F. Belc, i C. Costescu, „Influence of Different Warm Mix Additives on Characteristics of Warm Mix Asphalt”, *Materials*, t. 14, nr 13, 2021.
- [62] M. Zaumanis, V. Haritonovs, G. Brencis, i J. Smirnovs, „Assessing the Potential and Possibilities for the Use of Warm Mix Asphalt in Latvia”, *Construction Science*, t. 13, 2013.
- [63] M. Zaumanis i J. Smirovs, „Analysis of possibilities for use of warm mix asphalt in Latvia”, w *3rd International Conference CIVIL ENGINEERING*, Jelgava, 2011, s. 57–64.
- [64] A. Vaitkus, V. Vorobjovas, i L. Zalimienė, „The research on the use of warm mix asphalt for asphalt Pavement structures”, w *XXVII International Baltic Road Conference*, Ryga, 2009.
- [65] M. Stienss, „Badanie i analiza właściwości fizykomechanicznych mieszanek mineralno-asfaltowych o obniżonej temperaturze produkcji”, Politechnika Gdańska, Gdańsk, 2014.
- [66] I. Gawel, M. Kalabińska, i J. Piłat, *Asfalty drogowe*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2014.
- [67] B. Stefańczyk i P. Mieczkowski, *Dodatki, katalizatory i emulgatory w mieszankach mineralno-asfaltowych*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2010.
- [68] S. A. M. Hesp, K. Johnson, R. McEwan, S. Kumar, S. Ritchie, i M. Thomas, „Effect of ten commercial warm mix additives on the quality and durability of cold lake asphalt cement”, w *Transportation Research Board 93rd Annual Meeting*, Washington, 2014.
- [69] Y. Edwards i U. Isacsson, „Wax in Bitumen”, *Road Materials and Pavement Design*, t. 6, nr 3, s. 281–309, 2005, doi: 10.1080/14680629.2005.9690009.
- [70] G. C. Hurley i B. D. Prowell, „Evaluation of Sasobit for use in warm mix asphalt”, Auburn, 2005.
- [71] Y. Edwards, Y. Tasdemir, i U. Isacsson, „Influence of commercial waxes on bitumen aging properties”, *Energy and Fuels*, t. 19, nr 6, s. 2519–2525, 2005, doi: 10.1021/EF050166R.

- [72] A. Wozuk, A. Zofka, L. Bandura, i W. Franus, „Effect of zeolite properties on asphalt foaming”, *Constr Build Mater*, t. 139, s. 247–255, 2017.
- [73] A. Wozuk i W. Franus, „Properties of the Warm Mix Asphalt involving clinoptilolite and Na-P1 zeolite additives”, *Constr Build Mater*, t. 114, s. 556–563, 2016.
- [74] M. Zaumanis, „Warm mix asphalt investigation”, Technical University of Denmark, 2010.
- [75] Suit-Kote, „Low Emission Asphalt (LEA)”. Dostęp: 26 czerwiec 2023. [Online]. Dostępne na: <https://www.suit-kote.com/low-emission-asphalt-lea/>
- [76] S. W. Perkins, „Synthesis of warm mix asphalt paving strategies for use in Montana highway construction”, Montana, 2009.
- [77] Sasobit, „Warm-Mix Asphalt from Sasol Sasobit”. Dostęp: 28 maj 2023. [Online]. Dostępne na: <https://www.sasobit.com/en/>
- [78] K.- Damm, J. Abraham, T. Butz, G. Hildebrand, i G. Riebesehl, „Asphalt flow improvers as «intelligent fillers» for hot asphalts - a new chapter in asphalt technology”, *Journal of Applied Asphalt Binder Technology*, t. 2, nr 1, 2002.
- [79] Nynas, „Nynas - specialty oils and bitumen”. Dostęp: 10 sierpień 2022. [Online]. Dostępne na: <https://www.nynas.com/>
- [80] „WAM Foam: Asphalt pavements at lower temperatures”, w *WMA TWG*, Hunt Valley, 2007.
- [81] Nynas, „LT-Asphalt / LT Asphalt - Zastosowanie na zimno i na ciepło.”
- [82] A. Kavussi i S. M. Motevalizadeh, „Fracture and mechanical properties of water-based foam warm mix asphalt containing reclaimed asphalt pavement”, *Constr Build Mater*, t. 269, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121332.
- [83] L. H. Csanyi, „Foamed asphalt in bituminous paving mixtures”, *Highway Research Board Bulletin*, nr 160, 1957.
- [84] K. J. Jenkins, „Mix design considerations for cold and half-warm bituminous mixes with emphasis on foamed bitumen”, University of Stellenbosch, Stellenbosch, 2000.
- [85] Mobil Oil Australia Ltd, „Method and apparatus for producing foamed materials”, 857/71, 1971
- [86] K. O Anderson, R. C. G. Haas, i A. D. Laplante, *Triaxial Shear Strength Characteristics Of Some Sand-Asphalt Mixtures*. 2021.
- [87] B. Shackel, K. Makiuchi, i J. R. Derbyshire, „The response of a foamed bitumen stabilised soil to repeated triaxial loading”, w *7th Australian Road Research Board (ARRB) Conference*, 1974.
- [88] D. Y. Lee, „Treating marginal aggregates and soil with foamed asphalt”, Ames, 1980.

- [89] R. H. Bowering i C. L. Martin, „Foamed bitumen production and application of mixtures evaluation and performance of pavements”, w *Association of Asphalt Paving Technologists*, New Orleans, 1976.
- [90] J. Judycki i P. Jaskuła, „New Technologies of Asphalt Pavement”, *Drogownictwo*, t. 2, 2005.
- [91] M. Iwański i A. Chomicz, „Przydatność do spienienia asfaltów drogowych stosowanych w Polsce”, *Drogownictwo*, t. nr 8, s. 267–272, 2006.
- [92] M. Iwański i in., „Effects of Laboratory Ageing on the FTIR Measurements of Water-Foamed Bio-Fluxed Asphalt Binders”, *Materials 2023, Vol. 16, Page 513*, t. 16, nr 2, s. 513, 2023.
- [93] K. Maciejewski, „Wpływ rodzaju dodatku i starzenia krótkoterminowego na właściwości wysokotemperaturowe asfaltów drogowych przeznaczonych do mieszanek mineralno-asfaltowych wytwarzanych w technologii «na ciepło» z asfaltem spienionym wodą”, Kielce University of Technology, Kielce, 2019.
- [94] Wirtgen GmbH, *Wirtgen Cold Recycling Technology*. 2012.
- [95] D. Sybilski, R. Horodecka, W. Bańkowski, A. Wróbel, i K. Mirski, „Zastosowanie asfaltu spienionego w technologii recyklingu nawierzchni na zimno”, Warszawa, 2004.
- [96] J. Kij, K. J. Jenkins, M. Van De Ven, i J. De Groot, „Characterisation of foamed bitumen”, w *7th Conference on asphalt pavements for Southern Africa*, CAPSA, 1999.
- [97] „Laboratory-scale foamed bitumen plant WLB10. Information brochure No.54-12 EN-06/01”, 2001, Wirtgen GmbH, Windhagen, Germany.
- [98] L. Bandura, M. Franus, G. Józefaciuk, i W. Franus, „Synthetic zeolites from fly ash as effective mineral sorbents for land-based petroleum spills cleanup”, *Fuel*, t. 147, s. 100–107, 2015.
- [99] W. Franus, A. Woszek, L. Bandura, i A. Zofka, „Właściwości zeolitu naturalnego i syntetycznego oraz ich wpływ na efekt spienienia asfaltu”, *Materiały Budowlane*, t. 1, nr 8, s. 62–66, 2017, doi: 10.15199/33.2017.08.18.
- [100] M. R. Mohd Hasan i in., „Effects of diluted methanol and water as foaming agents on the performance of latex foamed warm asphalt mixtures”, *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, t. 10, nr 3, s. 413–426, 2023, doi: 10.1016/j.jtte.2021.07.007.
- [101] A. Chomicz-Kowalska, „Statistical methods for evaluating associations between selected foamed bitumen parameters”, w *6th International Conference on Bituminous Mixtures and Pavements*, CRC Press/Balkema, 2015, s. 3–12. doi: 10.1201/B18538-3.
- [102] M. Iwański, A. Chomicz-Kowalska, i K. Maciejewski, „Application of synthetic wax for improvement of foamed bitumen parameters”, *Constr Build Mater*, t. 83, s. 62–69, maj 2015.
- [103] G. He i W. Wong, „Decay properties of the foamed bitumens”, *Constr Build Mater*, t. 20, nr 10, s. 866–877, 2006, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2005.06.027.

- [104] K. J. Jenkins, J. L. A. De Groot, M. F. C. Van De Ven, i A. A. A. Molenaar, „Half-warm foamed bitumen treatment, a new process”, w *7th Conf. Asph. Pavements South. Africa*, 1999, s. 1–17.
- [105] May. Namutebi, „Some aspects of foamed bitumen technology”, 2011.
- [106] M. Iwański, A. Chomicz-Kowalska, J. Stępień, K. Maciejewski, P. Ramiączek, i M. M. Iwański, „Zalecenia dotyczące projektowania, wytwarzania i wbudowywania mieszanek mineralno-asfaltowych z asfaltem spienionym o obniżonych temperaturach technologicznych”, Kielce, 2018.
- [107] K. M. Muthen, „Foamed Asphalt Mixes-Mix Design Procedure”, Pretoria, 1999.
- [108] Sasiba, „Bitumen stabilised materials”, 2020.
- [109] M. Iwański i et al., „Wykorzystanie materiałów z recyklingu w mieszankach mineralno-asfaltowych na zimno i na półciepło z asfaltem spienionym. Załącznik nr 5 do raportu RID-I/6 ”, Kielce, 2018.
- [110] L. Rafalski, „Podbudowy drogowe”, Warszawa: IBDiM, 2007, Zeszyt 58, s. 110–117.
- [111] P. Fu, D. Jones, i J. T. Harvey, „The effects of asphalt binder and granular material characteristics on foamed asphalt mix strength”, *Constr Build Mater*, t. 25, nr 2, s. 1093–1101, 2011, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2010.06.067.
- [112] A. Chomicz-Kowalska, J. Mrugała, i K. Maciejewski, „Evaluation of Foaming Performance of Bitumen Modified with the Addition of Surface Active Agent”, *Materials Science and Engineering*, t. 245, nr 3, 2017, doi: 10.1088/1757-899X/245/3/032086.
- [113] L. H. Castedo, F. And, i L. E. Wood, „Stabilization with foamed asphalt of aggregates commonly used in low-volume roads”, *Transp Res Rec*, t. 898, s. 297–302.
- [114] A. Ali, A. Abbas, M. Nazzal, A. Alhasan, A. Roy, i D. Powers, „Effect of temperature reduction, foaming water content, and aggregate moisture content on performance of foamed warm mix asphalt”, *Constr Build Mater*, t. 48, s. 1058–1066, 2013, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.07.081.
- [115] B. W. Hailesilassie, M. Hugener, i M. N. Partl, „Influence of foaming water content on foam asphalt mixtures”, *Constr Build Mater*, t. 85, s. 65–77, 2015.
- [116] F. Yin, E. Arambula, i D. E. Newcomb, „Effect of water content on binder foaming characteristics and foamed mixture properties”, *Transp Res Rec*, t. 2506, s. 1–7, 2015.
- [117] F. Yin, E. Arambula, D. Newcomb, i A. Bhasin, „Workability and coatability of foamed Warm-Mix Asphalt”, w *International Conference on Asphalt Pavements*, Taylor and Francis - Balkema, 2014, s. 721–730. doi: 10.1201/B17219-90.

- [118] M. Brennen, M. Tia, A. Al Tschaeffl, i L. E. Wood, „Laboratory investigation of the use of foamed asphalt for recycled bituminous pavements”, *Transp Res Rec*, t. 911, 1981.
- [119] J. Keith i D. P. Eng, „Warm asphalt technology as a sustainable strategy for pavements”, w *Annual Conference of the Transportation Association of Canada*, 2008.
- [120] „Warm Mix Green Asphalt Technology.” Dostęp: 3 czerwiec 2023. [Online]. Dostępne na: http://www.warmmixasphalt.org/submissions/72_20080324_2007WarmMixGreenAsphaltTechnology_NAPA2008.pdf
- [121] „Warm Mix Asphalt”, 2008.
- [122] O. Kristjansdottir, „Warm Mix Asphalt for Cold Weather Paving”, University of Washington, Washington, 2006.
- [123] D. Jones, R. Wu, B. Tsai, C. Barros, i J. Peterson, „Accelerated Loading, Laboratory and Field Testing Studies to Fast-track the Implementation of Warm Mix Asphalt in California”, w *4th International Conference on Accelerated Pavement Testing*, Davis CA, 2012.
- [124] C. Estakhri, J. Button, i A. Alvarez, „FHWA/TX-10 Field and laboratory investigation of warm mix asphalt in Texas”, Texas, 2010. [Online]. Dostępne na: <http://www.ntis.gov>
- [125] D. Jones, „Warm Mix Asphalt Study: Field Test Performance Evaluation”, California, 2013. [Online]. Dostępne na: <https://escholarship.org/uc/item/4bp7602f>
- [126] T. M. Clements, P. Blankenship, i K. C. Mohboub, „The Effect of Loose Mix Aging on the Performance of Warm Mix Asphalt”, *Asphalt Paving Technology*, t. 81, s. 541–566, 2012.
- [127] C. Estakhri, „Laboratory and field performance measurements to support the implementation of warm mix asphalt in Texas.”, Texas Transportation Institute, Texas, 2012.
- [128] A. E. Martin i in., „Evaluation of the Moisture Susceptibility of WMA Technologies”, Transportation Research Board, Washington, 2014. doi: 10.17226/22429.
- [129] M. Anderson i in., „Implementation of Proposed AASHTO Standards for Asphalt Binders and Mixtures”, Alabama, 2023.
- [130] Y. Richard, *Modeling of Asphalt Concrete*. ASCE Press, 2009. doi: 10.1036/007146462X.
- [131] K. Błażejowski i S. Styk, *Technologia warstw asfaltowych*. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2004.
- [132] A. Boczkowska i G. Krzesiński, *Kompozyty i techniki ich wytwarzania*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2016.
- [133] J. German, *Podstawy mechaniki kompozytów włóknistych*. Kraków: Politechnika Krakowska, 1996.
- [134] L. J. Broutman i R. H. Krock, *Composite materials*. New York: Academic Press, 1975.

- [135] M. F. Ashby i D. R. H. Jones, *Materiały inżynierskie*, t. 2. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1998.
- [136] R. Bielawski, W. Rządkowski, S. Augustyn, i P. Pyrzanowski, „Nowoczesne materiały stosowane w konstrukcjach lotniczych - wybrane problemy oraz kierunki rozwoju”, *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Mechanika*, t. 87, nr 3, s. 203–216, 2015.
- [137] R. Bielewski, „Badanie i modelowanie połączeń nitowych w lotniczych strukturach kompozytowych”, Politechnika Warszawska, Warszawa, 2016.
- [138] T. Zych, „Współczesny fibrobeton-możliwość kształtowania elementów konstrukcyjnych i architektonicznych”, *Czasopismo Techniczne*, t. 108, nr 18, s. 371–386, 2010.
- [139] M. Górski, B. Kotala, i R. Białozor, „Rodzaje i właściwości zbrojenia niemetalicznego”, w *XXXIII Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji*, Szczyrk, 2018.
- [140] M. A. Glinicki, „Ocena i projektowanie fibrobetonów na podstawie wytrzymałości równoważnej”, *Drogi i Mosty*, t. 3, s. 5–36, 2002.
- [141] „Rodzaje włókien w zbrojeniu rozproszonym”. Dostęp: 27 kwiecień 2023. [Online]. Dostępne na: <https://intako.pl/Rodzaje-wlokien-w-zbrojeniu-rozproszonym-blog-pol-1604391526.html>
- [142] B. Stankiewicz, „Świat włókien w budownictwie”, *Szkło i Ceramika*, t. 59, s. 8–12, 2008.
- [143] V. Fiore, T. Scalici, G. Di Bella, i A. Valenza, „A review on basalt fibre and its composites”, *Compos B Eng*, t. 74, s. 74–94, 2015, doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2014.12.034.
- [144] P. Jaskula i in., „The effect of multiaxial geocomposite reinforcement on fatigue performance and crack propagation delay in double-layered asphalt beams”, *Road Materials and Pavement Design*, t. 24, s. 352–368, 2023, doi: 10.1080/14680629.2023.2180998.
- [145] D. Sybilski, „Modyfikatory i dodatki do asfaltów drogowych. Część 2: Modyfikatory i dodatki do mieszanek”, *Drogownictwo*, t. 3, s. 67–72, 2000.
- [146] D. Sybilski, R. Horodecka, A. Wróbel, W. Bańkowski, i K. Mirski, „Ocena skuteczności dodatku włókien do mieszanek mineralno-asfaltowych”, Warszawa, 2008.
- [147] O. S. Abiola, W. K. Kupolati, E. R. Sadiku, i J. M. Ndambuki, „Utilisation of natural fibre as modifier in bituminous mixes: A review”, *Constr Build Mater*, t. 54, s. 305–312, 2014, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.12.037.
- [148] NCHRP Synthesis 475, „Fiber Additives in Asphalt Mixtures”, Washington, 2015.
- [149] A. Mahrez, M. Karim, H. Katman, i K. Lumpur., „Prospect of using glass fibre reinforced bituminous mixes”, *Engineering, Materials Science*, 2003.
- [150] P. Jaskuła, M. Stienss, i C. Szydłowski, „Wpływ zbrojenia polimerowymi włóknami rozproszonymi na wybrane właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych”, *Drogownictwo*, t. 9, s. 275–280, 2017.

- [151] J. W. Button i T. G. Hunter, „Synthetic Fibres in Asphalt Paving Mixtures”, Texas, 1984.
- [152] T. Geckil i P. Ahmedzade, „Effects of carbon fibre on performance properties of asphalt mixtures”, *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, t. 15, nr 2, s. 49–65, 2020.
- [153] H. Gao, L. Zhang, D. Zhang, T. Ji, i J. Song, „Mechanical properties of fiber-reinforced asphalt concrete: Finite element simulation and experimental study”, *e-Polymers*, t. 21, nr 1, s. 533–548, 2021, doi: 10.1515/EPOLY-2021-0057.
- [154] F. Guo, R. Li, S. Lu, Y. Bi, i H. He, „Evaluation of the effect of fiber type, length and content on asphalt properties and asphalt mixture performance”, *Materials*, t. 13, nr 7, 2020.
- [155] P. Radziszewski i in., „Innowacyjne hybrydowe zbrojenie kompozytowe FRP do konstrukcji infrastrukturalnych o podwyższonej trwałości (HFRP). Raport z badań - rozdział 7”, Warszawa, 2019.
- [156] A. Chomicz-Kowalska, K. Maciejewski, i K. Janus, „Sposób wykonania mieszanki mineralno-asfaltowej typu beton asfaltowy o ciągłym uziarnieniu i mieszanka mineralno-asfaltowa typu beton asfaltowy o ciągłym uziarnieniu do budowy nawierzchni drogowej o podwyższonej trwałości eksploatacyjnej”, P.436075
- [157] S. Pirmohammad, B. Amani, i Y. M. Shokorlou, „The effect of basalt fibres on fracture toughness of asphalt mixture”, *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, t. 43, nr 7, s. 1446–1460, 2020.
- [158] J. Li i in., „Research progresses of fibers in asphalt and cement materials: A review”, *Journal of Road Engineering*, t. 3, nr 1, s. 35–70, 2023, doi: 10.1016/J.JRENG.2022.09.002.
- [159] S. Mahdi Abtahi, S. Esfandiarpour, M. Kunt, S. Mahdi Hejazi, i M. Ghorban Ebrahimi, „Hybrid Reinforcement of Asphalt-Concrete Mixtures Using Glass and Polypropylene Fibers”, *J Eng Fiber Fabr*, t. 8, s. 25–35, 2013.
- [160] S. Tapkin, A. Çevik, i Ü. Uşar, „Accumulated strain prediction of polypropylene modified marshall specimens in repeated creep test using artificial neural networks”, *Expert Syst Appl*, t. 36, nr 8, s. 11186–11197, 2009, doi: 10.1016/J.ESWA.2009.02.089.
- [161] S. Tapkin i S. Tapkin, „The effect of polypropylene fibers on asphalt performance”, *Build Environ*, t. 43, s. 1065–1071, 2008, doi: 10.1016/j.buildenv.2007.02.011.
- [162] J. Lombardo, „Asbestos in Asphalt? Handle with Care”. Dostęp: 15 maj 2023. [Online]. Dostępne na: <https://www.forconstructionpros.com/asphalt/article/12028118/asbestos-in-asphalt-handle-with-care>
- [163] „Azbest - Wynalazki i odkrycia”. Dostęp: 15 maj 2023. [Online]. Dostępne na: <https://wynalazki.andrej.edu.pl/index.php/wynalazki/10-a/9-azbest>
- [164] B. H. Ortgies, „Asbestos fibres in type B asphaltic concrete surface course”, Iowa, 1968.

- [165] M. Irfan, Y. Ali, S. Ahmed, S. Iqbal, i H. Wang, „Rutting and Fatigue Properties of Cellulose Fiber-Added Stone Mastic Asphalt Concrete Mixtures”, *Advances in Materials Science and Engineering*, t. 2019, 2019, doi: 10.1155/2019/5604197.
- [166] „Stabilizatory mastyksu w SMA - SMA 16 JENA”. Dostęp: 7 kwiecień 2023. [Online]. Dostępne na: <https://www.sma16jena.pl/stabilizatory/>
- [167] A. Aljubory, Z. T. Teama, H. T. Salman, i H. M. Abd Alkareem, „Effects of cellulose fibers on the properties of asphalt mixtures”, *Mater Today Proc*, t. 42, s. 2941–2947, 2021.
- [168] K. Krzywiński, A. Chajec, i Ł. Sadowski, „The effect of the concentration of steel fibres on the properties of industrial floors”, *Czasopismo Techniczne*, t. 4, s. 115–132, 2019.
- [169] Z. Jamróży, *Beton i jego technologie*. Warszawa: PWN, 2005.
- [170] D. J. Hannant, „Fibre-reinforced concrete”, *Advanced Concrete Technology*, s. 1–17, 2003, doi: 10.1016/B978-075065686-3/50292-5.
- [171] F. Grzymski, „Fiber reinforced concrete- selected test results”, *Builder*, s. 5–7, 2019.
- [172] D. Janikowska, „Influence of Abrasive Treatment of Steel Fibers on the Effectiveness of Anchoring in Concrete”, *Rocznik Ochrona Środowiska*, t. 24, s. 83–96, 2022.
- [173] R. Duszyński, „Zbrojenie nawierzchni asfaltowych siatkami stalowymi Road Mesh”. Dostęp: 19 lipiec 2023. [Online]. Dostępne na: <https://www.drogigminneipowiatowe.pl/technologie/zbrojenie-nawierzchni-asfaltowych-siatkami-stalowymi-road-mesh-r>
- [174] R. Porębska, „Wybrane zagadnienia oceny własności mechanicznych kompozytów termoplastycznych”, Politechnika Krakowska, Kraków, 2008.
- [175] R. Bielawski, „Badanie i modelowanie połączeń nitowych w lotniczych strukturach kompozytowych”, 2017.
- [176] M. Enieb, A. Diab, i X. Yang, „Short- and long-term properties of glass fiber reinforced asphalt mixtures”, *International Journal of Pavement Engineering*, t. 22, nr 1, s. 64–76, 2021.
- [177] M. M. Khabiri i M. Alidadi, „The experimental study of the effect of glass and carbon fiber on physical and micro-structure behavior of asphalt”, *International Journal of Integrated Engineering*, t. 8, nr 3, s. 1–8, 2016.
- [178] C. Celauro i F. G. Praticò, „Asphalt mixtures modified with basalt fibres for surface courses”, *Constr Build Mater*, t. 170, s. 245–253, 2018, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.03.058.
- [179] P. Radziszewski, M. Sarnowski, A. Plewa, i P. Pokorski, „Properties of asphalt concrete with basalt-polymer fibers”, *Archives of Civil Engineering*, t. 64, 2018.

- [180] K. Krayushkina i in., „Perspectives on using basalt fiber filaments in the construction and rehabilitation of highway pavements and airport runways”, *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, t. 11, nr 1, s. 77–83, 2016, doi: 10.3846/BJRBE.2016.09.
- [181] G. Oral i A. Cetin, „The Performance Evaluation of Porous Asphalt Mixtures Reinforced by Fibers”, *International Journal of Civil Engineering*, t. 21, nr 3, s. 445–459, 2023.
- [182] W. Derkowski i T. Zych, „Nowoczesne materiały kompozytowe do wzmacniania konstrukcji budowlanych”, *Czasopismo Techniczne. Budownictwo*, t. R. 101, z. 14-B, s. 15–25, 2004.
- [183] „FORTA Asphalt Fiber”. Dostęp: 23 lipiec 2023. [Online]. Dostępne na: <https://forta-fi.com/>
- [184] M. D. Nazzal, P. Ahmad Al-Hosainat, S.-S. Kim, A. R. Abbas, i A. Hudaib, „Analysis of aramid synthetic fibers in asphalt mixes on local roads”, Ohio, 2021.
- [185] M. Pszczoła i W. Leszczyńska, „Analiza temperatury ekwiwalentnej do projektowania nawierzchni asfaltowych w Polsce z wykorzystaniem metody AASHTO 2004”, *Przegląd komunikacyjny*, t. 4, s. 10–17, 2021.
- [186] K. Błazejowski, M. Wójcik-Wisniewska, i W. Baranowska, *PORADNIK ASFALTOWY*. Płock, 2018.
- [187] P. Radziszewski i in., „Weryfikacja wymagań i metod oceny właściwości lepkosprężystych krajowych asfaltów i asfaltów modyfikowanych”, Warszawa, 2011.
- [188] J. Judycki, M. Pszczoła, M. Jaczewski, Ł. Mejłun, i D. Ryś, „Badanie wpływu zastosowania warstw betonu asfaltowego o wysokim module sztywności (AC-WMS) w konstrukcjach nawierzchni na spękania niskotemperaturowe i na zmniejszenie powstawania deformacji trwałych”, Gdańsk, 2014.
- [189] H. K. Shanbara, S. S. Musa, i A. Dulaimi, „The Effect of polypropylene fibres on the tensile performance of asphalt mixtures for road pavements”, w *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, 2020. doi: 10.1088/1757-899X/888/1/012082.
- [190] F. Morea i R. Zerbino, „Incorporation of synthetic macrofibres in Warm Mix Asphalt”, *Road Materials and Pavement Design*, t. 21, nr 2, s. 542–556, 2020.
- [191] S. Pirmohammad i M. Hojjati Mengharpey, „Influence of natural fibers on fracture strength of WMA (warm mix asphalt) concretes using a new fracture test specimen”, *Constr Build Mater*, t. 251, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118927.
- [192] S. F. Mohammed i M. Q. Ismael, „Effect of polypropylene fibers on moisture susceptibility of warm mix asphalt”, *Civil Engineering Journal*, t. 7, nr 6, s. 988–997, 2021.

- [193] S. Wu, Q. Ye, N. Li, i H. Yue, „Effects of fibers on the dynamic properties of asphalt mixtures”, *Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition*, t. 22, nr 4, s. 733–736, 2007, doi: 10.1007/S11595-006-4733-3.
- [194] C. Zhang, „Effect of basalt fiber on properties of asphalt and asphalt mixture”, *Highlights in Science, Engineering and Technology*, t. 28, s. 367–373, 2022, doi: 10.54097/hset.v28i.4203.
- [195] Y. Zheng, Y. Cai, G. Zhang, i H. Fang, „Fatigue property of basalt fiber-modified asphalt mixture under complicated environment”, *Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition*, t. 29, nr 5, s. 996–1004, 2014, doi: 10.1007/s11595-014-1033-1.
- [196] X. Zhang, X. Gu, J. Lv, Z. Zhu, i X. Zou, „Numerical analysis of the rheological behaviors of basalt fiber reinforced asphalt mortar using ABAQUS”, *Constr Build Mater*, t. 157, s. 392–401, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.044.
- [197] A. Chomicz-Kowalska, M. M. Iwański, i J. Mrugała, „Basic performance of fibre reinforced asphalt concrete with reclaimed asphalt pavement produced in low temperatures with foamed bitumen”, w *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017.
- [198] „WT-2 Wymagania Techniczne, Mieszanki mineralno-asfaltowe, Nawierzchnie asfaltowe na drogach krajowych - część I”, Warszawa, 2014.
- [199] N. Morova, „Investigation of usability of basalt fibers in hot mix asphalt concrete”, *Constr Build Mater*, t. 47, s. 175–180, paź. 2013, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.04.048.
- [200] K. E. Kaloush, K. P. Biligiri, W. A. Zeiada, M. C. Rodezno, i J. X. Reed, „Evaluation of fiber-reinforced asphalt mixtures using advanced material characterization tests”, *J Test Eval*, t. 38, nr 4, 2010, doi: 10.1520/JTE102442.
- [201] P. Jaskuła, M. Stienss, i C. Szydłowski, „Badania mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien Forta-Fi”, Gdańsk, 2015.
- [202] A. Alnadish i Y. Aman, „Evaluation of aramid fibre-reinforced asphalt mixtures”, *Lecture Notes in Civil Engineering*, t. 9, s. 1377–1388, 2019, doi: 10.1007/978-981-10-8016-6_99.
- [203] J. Read i D. Whiteoak, *The Shell Bitumen Handbook*. 2003.
- [204] A. Mateos i J. Harvey, „Laboratory Evaluation of the Mechanical Properties of Asphalt Concrete Reinforced with Aramid Synthetic Fibers”, California, 2019.
- [205] A. Chomicz-Kowalska, W. Gardziejczyk, i M. M. Iwański, „Właściwości betonu asfaltowego AC8S wytwarzanego w obniżonej temperaturze w technologii asfaltu spienionego, w świetle wymagań WT-2 2010 i WT-2 2014”, *Drogownictwo*, t. 6, 2017.
- [206] N. Li i in., „Investigation of Moisture Dissipation of Water-Foamed Asphalt and Its Influence on the Viscosity”, *Materials*, t. 13, nr 23, s. 5325, 2020, doi: 10.3390/MA13235325.

- [207] Y. Kim i H. “David” Lee, „Development of mix design procedure for cold in-place recycling with foamed asphalt”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, t. 18, nr 1, s. 116–124, 2006.
- [208] A. Chomicz-Kowalska, „Laboratory testing of low temperature asphalt concrete produced in foamed bitumen technology with fiber reinforcement”, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, t. 65, nr 6, s. 779–790, 2017, doi: 10.1515/BPASTS-2017-0086.
- [209] M. M. Iwański, „Effect of Hydrated Lime on Indirect Tensile Stiffness Modulus of Asphalt Concrete Produced in Half- Warm Mix Technology”, *Materials*, t. 13, 2020.
- [210] A. Chomicz-Kowalska, K. Maciejewski, i P. Ramiączek, „Wpływ rodzaju asfaltu na właściwości lepkosprężyste mieszanek mineralno-cementowych z asfaltem spienionym”, *Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture*, 2016, doi: 10.7862/RB.2016.75.
- [211] „WT-1 2014 Wymagania Techniczne, Kruszywa do mieszanek mineralno-asfaltowych i powierzchniowych utrwaleń na drogach krajowych”, Warszawa, 2014.
- [212] Nouryon, „Wetfix BE”, 2021.
- [213] Nouryon, „Asphalt applications”, 2021.
- [214] A. Chomicz-Kowalska i K. Maciejewski, „Multivariate optimization of recycled road base cold mixtures with foamed bitumen”, w *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd, 2015, s. 436–444. doi: 10.1016/j.proeng.2015.06.168.

Streszczenie

W pracy badano wpływ dodatku zbrojenia rozproszonego na mieszanki mineralno-asfaltowe wytwarzane w obniżonych temperaturach z asfaltem spienionym wodą w aspekcie właściwości wysokotemperaturowych. Wpływ dodatku zbrojenia rozproszonego analizowano w odniesieniu do mieszanek referencyjnych bez dodatku włókien. Analiza wpływu technologii wytwarzania opierała się na wytworzeniu mieszanek w tradycyjnej technologii HMA oraz mieszanek wytwarzanych w obniżonych temperaturach WMA z dodatkiem asfaltu spienionego.

W prezentowanej pracy przedstawiono przegląd literatury krajowej i zagranicznej dotyczącej zagadnień związanych z technologią wytwarzania mieszanek mineralno-asfaltowych, sposobem obniżania temperatur technologicznych oraz technologią spieniania lepiszczy asfaltowych. Ponadto, charakteryzowano rodzaje włókien stosowanych w budownictwie, ich wpływ na właściwości wysokotemperaturowe mieszanek mineralno-asfaltowych oraz metody oceny tych właściwości. Dotychczas niewielu badaczy analizowało zagadnienia związane z wytwarzaniem mieszanek mineralno-asfaltowych metodą „na ciepło” z włóknami, a przedmiotem zrealizowanych prac nie była optymalizacja składu mieszanek na właściwości mieszanek WMA z asfaltem spienionym.

Na podstawie analizy literatury oraz wyników zrealizowanych badań postawiono trzy tezy: (1) zastosowanie zbrojenia rozproszonego ma korzystny wpływ na właściwości wysokotemperaturowe betonu asfaltowego przeznaczonego do warstwy ścieralnej nawierzchni drogowej wytwarzanego metodą „na ciepło” z asfaltem spienionym, (2) efekty stosowania zbrojenia rozproszonego w tych mieszankach są zależne od rodzaju wykorzystanych włókien oraz rodzaju lepiszcza asfaltowego, (3) zastosowanie zbrojenia rozproszonego może mieć korzystny wpływ na trwałość betonu asfaltowego wytwarzanego w obniżonych temperaturach.

Jako materiały wyjściowe zastosowano trzy rodzaje lepiszczy asfaltowych: 50/70, 45/80-55 oraz 45/80-80, dwa rodzaje zbrojenia rozproszonego: włókna aramidowe (0,05%, 0,1%, 0,2%) i polimerowo-bazaltowe (0,15%, 0,3%, 0,6%) w aspekcie technologii HMA, WMA-15°C i WMA-30°C.

Badania laboratoryjne podzielono na 3 etapy:

- badania wpływu technologii i rodzaju lepiszczy asfaltowych na parametry piany asfaltowej oraz podstawowych właściwości przed i po procesie spieniania,
- badania wpływu technologii, rodzaju lepiszcza asfaltowego oraz rodzaju i ilości zbrojenia rozproszonego na właściwości podstawowe mieszanek mineralno-asfaltowych zgodnie z wymaganiami WT-2 2014,
- badania wpływu technologii, rodzaju lepiszcza asfaltowego oraz rodzaju i ilości zbrojenia rozproszonego na właściwości zaawansowane mieszanek mineralno-asfaltowych.

Zrealizowane w ramach niniejszej rozprawy badania pozwoliły na optymalizację składu betonu asfaltowego wytwarzanego w obniżonych temperaturach z dodatkiem zbrojenia rozproszonego w celu wytypowania mieszanek o najbardziej korzystnych właściwościach wysokotemperaturowych.

Abstract

The thesis investigates the effect of the addition of dispersed reinforcement on asphalt mixtures produced at reduced temperatures with water-foamed asphalt in terms of high-temperature properties. The effect of the addition of dispersed reinforcement was analyzed in relation to reference mixtures without the addition of fibers. The analysis of the effect of the production technology was based on the production of mixtures using traditional HMA technology and mixtures produced at reduced temperatures WMA with the addition of foamed asphalt.

The paper presents a review of domestic and foreign literature on issues related to the technology of producing asphalt mixtures, the method of reducing technological temperatures and the technology of foaming asphalt binders. In addition, the types of fibers used in construction, their effect on the high-temperature properties of asphalt mixtures and the methods of assessing these properties were characterized. So far, few researchers have analyzed issues related to the production of mineral-asphalt mixtures using the "warm" method with fibers, and the subject of the work carried out was not the optimization of the composition of the mixtures on the properties of WMA mixtures with foamed asphalt.

Based on the analysis of the literature and the results of the conducted research, three theses were put forward: (1) the use of dispersed reinforcement has a beneficial effect on the high-temperature properties of asphalt concrete intended for the wearing course of road pavement produced by the "warm" method with foamed asphalt, (2) the effects of using dispersed reinforcement in these mixtures depend on the type of fibers used and the type of asphalt binder, (3) the use of dispersed reinforcement may have a beneficial effect on the durability of asphalt concrete.

Three types of asphalt binders were used as starting materials: 50/70, 45/80-55 and 45/80-80, two types of dispersed reinforcement: aramid fibers (0,05%, 0,1%, 0,2%) and polymer-basalt fibers (0,15%, 0,3%, 0,6%) in the aspect of HMA technology, WMA-15°C and WMA-30°C.

Laboratory tests were divided into 3 stages:

- tests of the influence of technology and type of asphalt binders on the parameters of asphalt foam and basic properties before and after the foaming process,
- tests of the influence of technology, type of asphalt binder and type and amount of dispersed reinforcement on the basic properties of mineral-asphalt mixtures in accordance with the requirements of WT-2 2014,
- tests of the influence of technology, type of asphalt binder and type and amount of dispersed reinforcement on the advanced properties of mineral-asphalt mixtures.

The tests carried out as part of this dissertation allowed for the optimization of the composition of asphalt concrete produced at reduced temperatures with the addition of dispersed reinforcement in order to select mixtures with the best high-temperature properties.

ZAŁĄCZNIKI

Tab. Z. 1 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami zawartości wolnej przestrzeni mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien aramidowych.

Lp.	Rodzaj lepiszcza	Technologia	Rodzaj włókien	Zawartość włókien	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
1	50/70	HMA	A	0	0.999992	1.000000	0.002593	0.644118	0.996238	0.986263	0.000034	0.000416	0.000115	0.000035	0.000034	0.055722	0.042332	0.000034	0.000034	0.000034	0.000128	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000324	0.001198	0.000034	0.000034	0.009258	0.000090	0.000037	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	
2	50/70	HMA	A	0.05	0.999992	1.000000	0.341249	0.999997	1.000000	1.000000	0.000115	0.128727	0.050906	0.002815	0.000034	0.910961	0.874276	0.000685	0.000034	0.002655	0.055722	0.000053	0.000034	0.000036	0.000034	0.000034	0.000034	0.109984	0.236526	0.000168	0.000034	0.588565	0.040397	0.007029	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034		
3	50/70	HMA	A	0.1	1.000000	1.000000	0.040397	0.981781	1.000000	0.999996	0.000034	0.009256	0.002655	0.000098	0.000034	0.370804	0.312961	0.000045	0.000034	0.000094	0.002985	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.007430	0.022553	0.000035	0.000034	0.109984	0.001977	0.000239	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	
4	50/70	HMA	A	0.2	0.002503	0.341249	0.040397		0.998828	0.738774	0.845329	0.983389	1.000000	1.000000	0.999995	0.000367	1.000000	1.000000	0.999586	0.001059	0.999994	1.000000	0.926291	0.000034	0.728752	0.005943	0.021447	0.000034	1.000000	1.000000	0.991720	0.000034	1.000000	1.000000	0.000034	0.005016	0.002360	0.000034	0.000034	0.000034	
5	50/70	WMA-15	A	0	0.644118	0.999997	0.981781	0.998828		1.000000	1.000000	0.042332	0.917787	0.874276	0.322244	0.000034	1.000000	1.000000	0.149873	0.000034	0.312961	0.887406	0.016615	0.000034	0.003989	0.000034	0.000036	0.000034	0.961090	0.994661	0.058272	0.000034	0.999977	0.837543	0.487719	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	
6	50/70	WMA-15	A	0.05	0.996238	1.000000	1.000000	0.738774	1.000000		1.000000	0.001059	0.422517	0.221356	0.021447	0.000034	0.996666	0.993325	0.006287	0.000034	0.020389	0.236526	0.000324	0.000034	0.000079	0.000034	0.000034	0.000034	0.380914	0.610929	0.001628	0.000034	0.916290	0.186372	0.046454	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	
7	50/70	WMA-15	A	0.1	0.986263	1.000000	0.999996	0.845329	1.000000	1.000000		0.002225	0.554851	0.322244	0.038539	0.000034	0.999343	0.998457	0.012117	0.000034	0.036757	0.341249	0.000685	0.000034	0.000142	0.000034	0.000034	0.000034	0.509969	0.738774	0.003354	0.000034	0.964013	0.277373	0.79054	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	
8	50/70	WMA-15	A	0.2	0.000034	0.000115	0.000034	0.983389	0.042332	0.001059	0.002225		0.999516	0.999992	1.000000	0.554851	0.577340	0.644118	1.000000	0.738774	1.000000	0.999988	1.000000	0.000037	1.000000	0.943740	0.993325	0.000034	0.999745	0.995239	1.000000	0.006648	0.905409	0.999998	1.000000	0.000040	0.930967	0.852897	0.001532	0.000034	0.000034
9	50/70	WMA-30	A	0	0.000416	0.128727	0.009256	1.000000	0.971787	0.422517	0.554851	0.999516		1.000000	1.000000	0.002225	1.000000	1.000000	0.999999	0.005943	1.000000	1.000000	0.940424	0.000034	0.939688	0.027507	0.082475	0.000034	1.000000	1.000000	0.999847	0.000034	1.000000	1.000000	0.000034	0.023710	0.012117	0.000034	0.000034	0.000034	
10	50/70	WMA-30	A	0.05	0.000115	0.050906	0.002655	1.000000	0.874276	0.221356	0.322244	0.999992	1.000000		1.000000	0.007852	0.999988	0.999997	1.000000	0.019378	1.000000	1.000000	0.999699	0.000034	0.990804	0.075752	0.193032	0.000034	1.000000	1.000000	0.999998	0.000037	1.000000	1.000000	0.000034	0.066529	0.036757	0.000034	0.000034	0.000034	
11	50/70	WMA-30	A	0.1	0.000035	0.002815	0.000099	0.999995	0.322244	0.021447	0.038539	1.000000	1.000000	1.000000		0.109984	0.971787	0.983389	1.000000	0.206861	1.000000	1.000000	1.000000	0.000034	0.999999	0.476672	0.738774	0.000034	1.000000	1.000000	1.000000	0.000270	0.999586	1.000000	1.000000	0.000034	0.443933	0.312961	0.000072	0.000034	0.000034
12	50/70	WMA-30	A	0.2	0.000034	0.000034	0.000034	0.000367	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.554851	0.002225	0.007852	0.109984		0.000037	0.000040	0.252368	1.000000	0.114453	0.007029	0.758358	0.554851	0.939688	1.000000	1.000000	0.066529	0.002815	0.000077	0.476672	0.999985	0.000099	0.010316	0.055722	0.644118	1.000000	1.000000	0.998828	0.000034
13	45/80-55	HMA	A	0	0.055722	0.910961	0.370804	1.000000	1.000000	0.996666	0.999343	0.577340	1.000000	0.999988	0.971787	0.000037		1.000000	0.867373	0.000048	0.969356	0.999992	0.370804	0.000034	0.161389	0.000168	0.0000728	0.000034	1.000000	1.000000	0.655048	0.000034	1.000000	0.999965	0.994024	0.000034	0.000142	0.000075	0.000034	0.000034	0.000034
14	45/80-55	HMA	A	0.05	0.042332	0.874276	0.312961	1.000000	1.000000	0.993325	0.998457	0.644118	1.000000	0.999997	0.983389	0.000040	1.000000		0.905409	0.000058	0.981781	0.999998	0.433179	0.000034	0.199860	0.000038	0.001059	0.000034	1.000000	1.000000	0.718585	0.000034	1.000000	0.999990	0.997052	0.000034	0.000020	0.000096	0.000034	0.000034	0.000034
15	45/80-55	HMA	A	0.1	0.000034	0.000685	0.000045	0.999586	0.149873	0.006287	0.012117	1.000000	0.999999	1.000000	1.000000	0.252368	0.867373	0.905409		0.411954	1.000000	1.000000	1.000000	0.000034	1.000000	0.728752	0.916290	0.000034	1.000000	0.999949	1.000000	0.001127	0.991720	1.000000	0.697856	0.554851	0.000239	0.000034	0.000034	0.000034	
16	45/80-55	HMA	A	0.2	0.000034	0.000034	0.000034	0.001059	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.738774	0.005943	0.019378	0.206861	1.000000	0.000049	0.000058	0.411954		0.214024	0.017494	0.893632	0.370804	0.984881	1.000000	1.000000	0.030331	0.007430	0.002225	0.665896	0.999647	0.000254	0.024920	0.114453	0.454771	1.000000	1.000000	0.990804	0.000034
17	45/80-55	WMA-15	A	0	0.000034	0.002655	0.000094	0.999994	0.312961	0.020389	0.036757	1.000000	1.000000	1.000000	0.114453	0.969356	0.981781	1.000000	0.214024		1.000000	1.000000	0.000034	0.999999	0.487719	0.748646	0.000034	1.000000	1.000000	0.000287	0.999516	1.000000	1.000000	0.000034	0.454771	0.322244	0.000075	0.000034	0.000034		
18	45/80-55	WMA-15	A	0.05	0.000128	0.055722	0.002985	1.000000	0.887406	0.236526	0.341249	0.999988	1.000000	1.000000	0.007029	0.999992	0.999998	1.000000	0.017494	1.000000		0.999586	0.000034	0.988720	0.069492	0.179879	0.000034	1.000000	1.000000	0.999998	0.000037	1.000000	1.000000	1.000000	0.000034	0.060922	0.033408	0.000034	0.000034	0.000034	
19	45/80-55	WMA-15	A	0.1	0.000034	0.000035	0.000034	0.926291	0.016615	0.000324	0.000685	1.000000	0.994024	0.999699	1.000000	0.758358	0.370804	0.433179	1.000000	0.893632	1.000000	0.999586		0.000049	1.000000	0.988720	0.999435	0.996238	0.969356	1.000000	0.018415	0.758358	0.999871	1.000000	0.000062	0.984881	0.954712	0.004738	0.000034	0.000034	
20	45/80-55	WMA-15	A	0.2	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000037	0.000034	0.000034	0.000034	0.554851	0.000034	0.000034	0.370804	0.000034	0.000048	0.000034	0.000142	0.144354	0.053267	1.000000	0.000034	0.000034	0.000035	0.999990	0.000034	0.000034	0.000034	1.000000	0.161389	0.252368	1.000000	0.114453		
21	45/80-55	WMA-30	A	0	0.000034	0.000036	0.000034	0.728752	0.003989	0.000079	0.000142	1.000000	0.939688	0.990804	0.999999	0.939688	0.161389	0.199860	1.000000	0.984881	0.999999	0.988720	1.000000	0.000142	0.999586	0.999996	0.000034	0.954712	0.837543	1.000000	0.063673	0.476672	0.994661	0.999972	0.000225	0.999343	0.996238	0.019378	0.000034	0.000034	
22	45/80-55	WMA-30	A	0.05	0.000034	0.000034	0.000034	0.005943	0.000034	0.000034	0.000034	0.943740	0.027507	0.075752	0.476672	1.000000	0.000168	0.000239	0.728752	1.000000	0.487719	0.069492	0.988720	0.144354	0.999586		1.000000	0.006648	0.033408	0.011487	0.910961	0.986263	0.001532	0.093478	0.312961	0.193032	1.000000	1.000000	0.905409	0.000034	
23	45/80-55	WMA-30	A	0.1	0.000034	0.000034	0.000034	0.021447	0.000036	0.000034	0.000034	0.993325	0.082475	0.193032	0.738774	1.000000	0.000729	0.001059	0.916290	1.000000	0.748646	0.179879	0.999435	0.053267	0.999996	1.000000		0.001628	0.097401	0.038539	0.986263	0.910961	0.006287	0.228857	0.566099	0.075752	1.000000	1.000000	0.708284	0.000034	0.000034
24	45/80-55	WMA-30	A	0.2	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.006529	0.000034	0.000034	0.000034	0.030331	0.000034	0.000034	0.00																	

Tab. Z. 2 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami zawartości wolnej przestrzeni mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.

l.p.	Rodzaj lepiszcza	Technologia	Rodzaj włókien	Zawartość włókien	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
1	50/70	HMA	PB	0		0,106733	0,002337	0,000034	0,791929	0,021306	0,001393	0,000034	0,002094	0,000034	0,000034	0,000034	0,128267	0,000034	0,000034	0,000034	0,000046	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,001653	0,000036	0,000034	0,000034	0,029440	0,000035	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034
2	50/70	HMA	PB	0,15		0,106733		1,000000	0,000034	1,000000	1,000000	1,000000	0,000034	1,000000	0,444087	0,000034	1,000000	0,013177	0,000082	0,000034	0,993391	0,106733	0,000044	0,000034	0,339054	0,000160	0,000034	0,000034	1,000000	0,922522	0,000042	0,000034	1,000000	0,946884	0,000034	0,000034	0,000987	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034
3	50/70	HMA	PB	0,3		0,002337	1,000000		0,000036	0,991919	1,000000	0,000034	0,000000	0,000034	0,000000	0,064087	0,000034	1,000000	0,312765	0,006819	0,000034	1,000000	0,783478	0,000294	0,000034	0,972237	0,013838	0,000137	0,000034	1,000000	0,999997	0,001748	0,000034	1,000000	0,999999	0,000038	0,000034	0,059017	0,000118	0,000034	0,000034
4	50/70	HMA	PB	0,6		0,000034	0,000034	0,000036		0,000034	0,000034	1,000000	0,000036	0,035236	0,965132	0,375808	0,000034	0,661218	0,999849	0,000034	0,000368	0,213114	0,999998	0,000034	0,056613	0,998838	1,000000	0,000034	0,000036	0,002212	0,999999	0,000034	0,000034	0,001562	1,000000	0,000034	0,970006	1,000000	0,999999	0,000034	0,000034
5	50/70	WMA-15	PB	0		0,791929	1,000000	0,991919	0,000034		0,999982	0,981526	0,000034	0,990181	0,024506	0,000036	0,000034	1,000000	0,000144	0,000034	0,000034	0,484827	0,002212	0,000034	0,000034	0,014530	0,000034	0,000034	0,000034	0,985789	0,213114	0,000034	0,000034	0,999996	0,256113	0,000034	0,000034	0,000037	0,000034	0,000034	0,000034
6	50/70	WMA-15	PB	0,15		0,021306	1,000000	1,000000	0,000034	0,999982		1,000000	0,000034	1,000000	0,816278	0,008817	0,000034	1,000000	0,072380	0,000620	0,000034	0,999969	0,357202	0,000177	0,000034	0,720164	0,0001393	0,000038	0,000034	1,000000	0,998906	0,000151	0,000034	1,000000	0,998498	0,000034	0,000034	0,007980	0,000037	0,000034	0,000034
7	50/70	WMA-15	PB	0,3		0,001393	1,000000	1,000000	0,000036	0,981526	1,000000		0,000034	1,000000	0,995670	0,091669	0,000034	1,000000	0,394845	0,010790	0,000034	1,000000	0,853287	0,003422	0,000034	0,987007	0,021306	0,000221	0,000034	1,000000	1,000000	0,002908	0,000034	1,000000	1,000000	0,000042	0,000034	0,084818	0,000187	0,000034	0,000034
8	50/70	WMA-15	PB	0,6		0,000034	0,000034	0,000034	1,000000	0,000034	0,000034	0,000034		0,000034	0,003071	0,630624	0,846257	0,000034	0,206458	0,962479	0,000034	0,000045	0,032222	0,994632	0,000034	0,005532	0,907838	0,999997	0,000034	0,000034	0,000137	0,996122	0,000034	0,000034	0,000102	1,000000	0,000034	0,651085	0,999999	1,000000	0,000034
9	50/70	WMA-30	PB	0		0,002094	1,000000	1,000000	0,000036	0,990181	1,000000	0,000034		0,991084	0,069521	0,000034	1,000000	0,330164	0,007561	0,000034	1,000000	0,800216	0,002337	0,000034	0,976312	0,015253	0,000151	0,000034	1,000000	0,999998	0,001981	0,000034	1,000000	1,000000	0,000039	0,000034	0,064087	0,000130	0,000034	0,000034	
10	50/70	WMA-30	PB	0,15		0,000034	0,444087	0,989203	0,035236	0,024506	0,816278	0,995670	0,003071	0,991084		0,999410	0,000034	0,394845	1,000000	0,935515	0,000034	1,000000	1,000000	0,800216	0,000034	1,000000	0,976312	0,330164	0,000034	0,994039	1,000000	0,774868	0,000034	0,757191	1,000000	0,075337	0,000034	0,999221	0,304260	0,000034	0,000034
11	50/70	WMA-30	PB	0,3		0,000034	0,001108	0,064087	0,965132	0,000038	0,008817	0,091669	0,630624	0,069521	0,999410		0,000089	0,000836	1,000000	1,000000	0,000034	0,651085	1,000000	1,000000	0,000034	0,999892	1,000000	0,999988	0,000034	0,081554	0,902556	1,000000	0,000034	0,006144	0,866772	0,992685	0,000034	1,000000	0,999978	0,147823	0,000034
12	50/70	WMA-30	PB	0,6		0,000034	0,000034	0,000034	0,375808	0,000034	0,000034	0,000034	0,846257	0,000034	0,000034	0,000089		0,000034	0,000035	0,001243	0,003422	0,000034	0,000034	0,004243	0,000061	0,000034	0,000052	0,043881	0,0000879	0,000034	0,000034	0,004978	0,000521	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034
13	45/80-55	HMA	PB	0		0,128267	1,000000	1,000000	0,000034	1,000000	1,000000	1,000000	0,000034	1,000000	0,394845	0,000830	0,000034		0,010262	0,000068	0,000034	0,989203	0,088189	0,000040	0,000034	0,295890	0,000124	0,000034	0,000034	1,000000	0,897081	0,000039	0,000034	1,000000	0,927038	0,000034	0,000034	0,000739	0,000034	0,000034	0,000034
14	45/80-55	HMA	PB	0,15		0,000034	0,013177	0,312765	0,661218	0,000144	0,072380	0,394845	0,206458	0,330164	1,000000	1,000000	0,000036	0,010262		1,000000	0,000034	0,962479	1,000000	0,999992	0,000034	1,000000	1,000000	0,991084	0,000034	0,366449	0,998073	0,999985	0,000034	0,054293	0,996122	0,824046	0,000034	1,000000	0,988146	0,022328	0,000034
15	45/80-55	HMA	PB	0,3		0,000034	0,000082	0,006819	0,999849	0,000034	0,000620	0,010790	0,962479	0,007561	0,935515	1,000000	0,001243	0,000068	1,000000		0,000034	0,206458	0,999322	1,000000	0,000034	0,970006	1,000000	1,000000	0,000034	0,009278	0,474553	1,000000	0,000034	0,000413	0,414279	0,999995	0,000034	1,000000	1,000000	0,547265	0,000034
16	45/80-55	HMA	PB	0,6		0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,003422	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	1,000000	0,000034	0,000034	0,000034	1,000000	0,000034	0,000034	0,000034	1,000000	0,000034	0,000034	0,000034	1,000000	0,000034	0,000034	0,000034
17	45/80-55	WMA-15	PB	0		0,000046	0,993391	1,000000	0,003368	0,484827	0,999969	1,000000	0,000046	1,000000	0,651085	0,000034	0,989203	0,962479	0,206458		0,999823	0,095260	0,000034	1,000000	0,312765	0,011343	0,000034	1,000000	1,000000	0,084818	0,000034	0,999892	1,000000	0,001046	0,000034	0,630624	0,009758	0,000034	0,000034	0,000034	
18	45/80-55	WMA-15	PB	0,15		0,000034	0,106733	0,783478	0,213114	0,002212	0,357202	0,853287	0,032222	0,800216	1,000000	1,000000	0,000034	0,088189	1,000000	0,999322	0,000034	0,999823		0,991084	0,000034	1,000000	0,999923	0,791929	0,000034	0,831634	1,000000	0,988146	0,000034	0,295890	0,999999	0,357202	0,000034	1,000000	0,766104	0,001875	0,000034
19	45/80-55	WMA-15	PB	0,3		0,000034	0,000044	0,002094	0,999998	0,000034	0,000177	0,003422	0,994632	0,002337	0,800216	1,000000	0,004243	0,000040		0,999992	1,000000	0,005260	0,991084		0,000034	0,879482	1,000000	1,000000	0,000034	0,002908	0,271602	1,000000	0,000034	0,000124	0,226863	1,000000	0,000034	1,000000	1,000000	0,766104	0,000034
20	45/80-55	WMA-15	PB	0,6		0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	1,000000	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	1,000000	0,000034	0,000034	0,000034	1,000000	0,000034	0,000034	0,000034	1,000000	0,000034	0,000034	0,998073	0,000034	0,000034	0,206458
21	45/80-55	WMA-30	PB	0		0,000034	0,339054	0,972237	0,056613	0,014530	0,720164	0,987007	0,005532	0,976312	1,000000	0,999892	0,000034	0,295890	1,000000	0,970006	0,000034	1,000000	1,000000	0,879482	0,000034		0,991084	0,434070	0,000034	0,983044	1,000000	0,860126	0,000034	0,651085	1,000000	0,114972	0,000034	0,999849	0,404515	0,00233	0,000034
22	45/80-55	WMA-30	PB	0,15		0,000034	0,000160	0,013838	0,998838	0,000034	0,001393	0,021306	0,907836	0,015253	0,976312	1,000000	0,000052	0,000124	1,000000	1,000000	0,000034	0,312765	0,999923	1,000000	0,000034	0,991084		1,000000	0,000034	0,018486	0,620310	1,000000	0,000034	0,000931	0,557737	0,999923	0,000034	1,000000	1,000000	0,404515	0,000034
23	45/80-55	WMA-30	PB	0,3		0,000034	0,000034	0,000137	1,000000	0,000034	0,000038	0,000221	0,999997	0,000151	0,330164	0,999988	0,043881	0,000034	0,991084	1,000000	0,000034	0,011343	0,791929	1,000000	0,000034	0,434070	1,000000		0,000034	0,000187	0,047817	1,000000	0,000034	0,000036	0,036832	1,000000	0,000034	0,999992	1,000000	0,988146	0,000034
24	45/80-55	WMA-30	PB	0,6		0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	1,000000	0,000034	1,000000	0,000034															

Tab. Z. 3 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami proporcjonalnej głębokości koleiny mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien aramidowych.

Lp.	Rodzaj lepiszcza	Rodzaj włókien	Zawartość włókien	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36				
1	50/70	HMA	0		1,000000	1,000000	0,000153	0,070576	0,606168	0,048438	0,000153	0,006330	0,000935	0,636785	0,000153	0,000156	0,427202	0,079677	0,999999	0,999932	0,092946	0,860148	0,000153	1,000000	0,733869	1,000000	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,015474	0,000153	0,000153	0,000398	0,000153	0,002743	0,000153	0,000398	0,000153	0,002743			
2	50/70	HMA	0,05	1,000000		1,000000	0,000153	0,050262	0,540491	0,000153	0,006330	0,000673	0,000691	0,571420	0,000153	0,000158	0,490657	0,108888	0,999999	0,999811	0,116898	0,899390	0,000153	1,000000	0,790303	1,000000	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,015474	0,000153	0,000153	0,000154	0,000153	0,000613	0,000153	0,000398	0,000153	0,000398			
3	50/70	HMA	0,1	1,000000	1,000000		0,000153	0,521232	0,991542	0,425381	0,000153	0,109379	0,000153	0,002234	0,993816	0,000153	0,000153	0,448806	0,041398	0,966699	0,896243	0,000153	0,051099	0,246175	0,000153	1,000000	0,151198	1,000000	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,208014	0,000153	0,000153	0,000153	0,000157	0,000153	0,000207	0,000153	0,000207		
4	50/70	HMA	0,2	0,000153	0,000153	0,000153		0,030893	0,000912	0,043896	0,098181	0,000153	0,002257	0,000394	0,990796	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	
5	50/70	WMA-15	0	0,070576	0,050526	0,521232	0,030893		1,000000	1,000000	0,000153	1,000000	0,999999	0,999999	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,278425	0,000154	0,122398	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	1,000000	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	
6	50/70	WMA-15	0,05	0,606168	0,540491	0,921542	0,000912	1,000000		1,000000	0,000153	0,998936	0,944314	1,000000	0,000153	0,000153	0,000171	0,000154	0,030401	0,000153	0,000154	0,000463	0,000153	0,929961	0,000274	0,752742	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,999955	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	
7	50/70	WMA-15	0,1	0,048438	0,037310	0,495381	0,045934	0,000153	1,000000		0,000153	0,998936	0,944314	1,000000	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,929961	0,000274	0,752742	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,999955	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153
8	50/70	WMA-15	0,2	0,000153	0,000153	0,000153	0,098181	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000154	0,000153	0,043896	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,999996	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,976212	
9	50/70	WMA-30	0,05	0,006330	0,004673	0,109379	0,234257	0,000153	0,998936	0,000153	0,000153		1,000000	0,998386	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000179	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	
10	50/70	WMA-30	0,1	0,000935	0,000991	0,022134	0,600394	0,999999	0,944314	0,000153	0,000154	1,000000		0,932381	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000154	0,000153	0,000153	0,000153	0,000675	0,000153	0,0001896	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000167	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	
11	50/70	WMA-30	0,1	0,636785	0,571420	0,993816	0,000795	0,999154	0,000153	0,000153	0,000153	0,998386	0,932381		0,000153	0,000153	0,000175	0,034504	0,160095	0,000154	0,000521	0,000153	0,942202	0,002996	0,779164	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,999921	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	
12	50/70	WMA-30	0,2	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,043896	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,782374	0,000153	0,782374	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,999998	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,994857		
13	45/80-55	HMA	0	0,000156	0,000156	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,352043	0,863925	0,0001379	0,000325	0,834842	0,081390	0,000153	0,000153	0,141962	0,000154	0,141962	0,000153	0,000153	0,000153	0,064705	0,000153	0,000179	0,999987	1,000000	0,000000	0,997791	0,999966	0,000153	0,000000			
14	45/80-55	HMA	0,05	0,427202	0,490657	0,448806	0,000153	0,000153	0,000171	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000175	0,000153	0,352043		1,000000	0,997685	0,999826	1,000000	1,000000	0,000153	0,130620	1,000000	0,293344	0,000153	0,000153	0,000153	0,018453	0,000153	0,000328	0,108650	0,000153	0,935517	0,000140	0,998963	0,000153	0,000000				
15	45/80-55	HMA	0,1	0,079677	0,100888	0,049148	0,000153	0,000153	0,000154	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,863925	1,000000		0,827798	0,932381	0,000153	0,000000	0,999996	0,000153	0,014340	1,000000	0,442126	0,000153	0,000153	0,000153	0,157934	0,000153	0,000153	0,040007	0,511640	0,000153	0,998947	0,018762	1,000000				
16	45/80-55	HMA	0,2	0,999999	1,000000	0,996969	0,000153	0,000097	0,030401	0,000580	0,000153	0,000179	0,000156	0,034504	0,000153	0,0001379	0,976685	0,827798		1,000000	0,857593	0,000153	0,997518	0,999985	0,999999	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000167	0,002040	0,000153	0,000544	0,000289	0,000153	0,000398	0,000153	0,162887	0,000000				
17	45/80-55	WMA-15	0	0,999932	0,999991	0,896243	0,000153	0,000418	0,013980	0,000303	0,000153	0,000161	0,000154	0,016005	0,000153	0,000325	0,999826	0,932381	0,000153		0,948372	1,000000	0,000153	0,983856	1,000000	0,999204	0,000153	0,000153	0,000153	0,000180	0,000153	0,000153	0,000541	0,000798	0,000153	0,278425	0,000000						
18	45/80-55	WMA-15	0,05	0,092946	0,116894	0,050915	0,000153	0,000153	0,000154	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,834842	1,000000	0,857593	0,948372		0,999998	0,000153	0,017260	0,000153	0,052224	0,000153	0,000153	0,000153	0,137510	0,000153	0,000153	0,033700	0,469884	0,000153	0,999697	0,015605	1,000000						
19	45/80-55	WMA-15	0,1	0,860148	0,899390	0,246175	0,000153	0,000153	0,000156	0,000463	0,000154	0,000153	0,000153	0,000153	0,000521	0,000153	0,881380	1,000000	0,999996	1,000000	0,000000	0,999998		0,000153	0,477409	0,000000	0,739068	0,000153	0,000153	0,000153	0,002094	0,000153	0,000153	0,000401	0,161691	0,000153	0,567551	0,000239	0,918783				
20	45/80-55	WMA-15	0,2	0,000153	0,000153	0,000153	0,000863	0,000153	0,000153	0,000153	0,999886	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,782374	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,988203	0,000153	0,000153	1,000000	0,000000					
21	45/80-55	WMA-30	0	1,000000	1,000000	1,000000	0,000153	0,278425	0,929961	0,210420	0,000153	0,996969	0,006675	0,942202	0,000153	0,130620	0,413400	0,997518	0,983856	0,017260	0,477409	0,000153		0,330732	1,000000	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153			
22	45/80-55	WMA-30	0,05	0,733869	0,790303	0,151198	0,000153	0,000154	0,000274	0,000154	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000298	0,000153	0,141962	1,000000	0,999985	1,000000	0,000000	0,999996		0,584950	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000466	0,000153	0,000153	0,000776	0,032910	0,000153	0,723396	0,000372	0,972295	0,000000					
23	45/80-55	WMA-30	0,1	1,000000	1,000000	1,000000	0,000153	0,122398	0,752742	0,086734	0,000153	0,012730	0,001898	0,779164	0,000153	0,000154	0,293344	0,044216	0,999959	0,999204	0,052224	0,739068	0,000153	1,000000	0,584950		0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,028994	0,000153	0,000153	0,000153	0,000253	0,000153	0,001320	0,000153	0,000000				
24	45/80-55	WMA-30	0,2	0,000153	0,000153	0,000153	0,000154	0,000153	0,000153	0,000153	0,705510	0,000153	0,000153	0,000153	0,999998	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,																						

Tab. Z. 4 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami tempa przyrostu koleiny mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien aramidowych.

Lp.	Rodzaj lepiszcza	Rodzaj włókien	Zawartość włókien	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36			
1	50/70	HMA	0	1.000000	1.000000	0.999866	0.999993	0.999994	1.000000	0.998804	0.999997	0.975043	0.882251	0.999977	0.546937	0.017216	0.000306	0.000155	0.081754	0.002325	0.004119	0.595489	0.000419	0.000130	0.000952	0.026859	0.000153	0.000153	0.000157	0.000153	0.000153	0.000153	0.000154	0.000153	0.000153	0.000153	0.000153	0.000153	0.000153	0.000153		
2	50/70	HMA	0.05	1.000000	1.000000	0.963922	0.999943	0.999389	0.998860	0.999334	0.999999	0.451410	0.983313	0.960428	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
3	50/70	HMA	0.1	1.000000	1.000000	0.999992	1.000000	1.000000	0.999866	1.000000	1.000000	0.993334	0.949459	0.999999	0.690428	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
4	50/70	HMA	0.2	0.999866	0.963922	0.999992	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	0.993334	0.949459	0.999999	0.690428	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
5	50/70	WMA-15	0	0.999999	0.996043	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	0.999389	0.000268	0.000154	0.000153	0.000153	0.001180	0.000161	0.000159	0.000154	0.001900	0.000419	0.000156	0.000769	0.000153	0.000153	0.000153	0.000153	0.000153	0.000153	0.000153	0.000153	0.000153	0.000153	0.000153	0.000153	0.000153	0.000153
6	50/70	WMA-15	0.05	1.000000	0.999389	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	0.999992	0.000000	0.000000	0.996043	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
7	50/70	WMA-15	0.1	0.998804	0.998865	0.999866	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	0.999992	0.000000	0.000000	0.996043	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
8	50/70	WMA-15	0.2	0.999997	0.993334	1.000000																																				

Tab. Z. 5 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami proporcjonalnej głębokości koleiny mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.

ip	Rodzaj lepiączka	Rodzaj włókien	Zawartość włókien	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36			
1	50/70	HMA	0	1,000000	1,000000	0,000153	0,066763	0,999704	1,000000	0,000153	0,059837	0,995770	0,028435	0,000153	0,000156	0,000153	0,000153	0,999724	0,231999	0,999030	0,000153	1,000000	0,270097	1,000000	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000156	0,000154	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153		
2	50/70	HMA	0,15	1,000000	1,000000	0,000153	0,177482	0,999999	0,999999	0,000153	0,020650	0,999927	0,085822	0,000153	0,000154	0,000154	0,000153	0,995678	0,926560	0,979308	0,000153	1,000000	0,063431	0,999947	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000154	0,000156	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153		
3	50/70	HMA	0,3	1,000000	1,000000	0,000153	0,053876	0,999316	0,999999	0,000153	0,004497	0,992334	0,022429	0,000153	0,000157	0,000158	0,000153	0,999974	0,271770	0,999565	0,000153	1,000000	0,202251	1,000000	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000158	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	
4	50/70	HMA	0,6	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,973824	0,000153	0,000153	0,330073	0,000153	0,000153	0,000153	0,669737	0,000153	0,000153	0,000153	0,999916	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	1,000000	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,743718		
5	50/70	WMA-15	0	0,066763	0,177482	0,053876	0,000153		0,947397	0,724495	0,000153	1,000000	0,989227	0,000000	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	
6	50/70	WMA-15	0,15	0,999704	0,999999	0,999316	0,000153	0,947397	1,000000	0,000153	0,502098	0,000000	0,832012	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,391010	0,000153	0,235790	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	
7	50/70	WMA-15	0,3	1,000000	0,999999	0,999999	0,000153	0,724495	1,000000	0,000153	0,211848	1,000000	0,513740	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,726263	0,006730	0,588005	0,000153	1,000000	0,004185	0,931919	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153
8	50/70	WMA-15	0,6	0,000153	0,000153	0,000153	0,973824	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	
9	50/70	WMA-30	0	0,005837	0,020650	0,004497	0,000156	0,000000	0,500289	0,211848	0,000153		0,697492	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	
10	50/70	WMA-30	0,15	0,995770	0,999927	0,992334	0,000153	0,989227	1,000000	0,000000	0,000153		0,697492	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	
11	50/70	WMA-30	0,3	0,028435	0,085822	0,022429	0,000153	0,000153	0,832012	0,513740	0,000153	1,000000	0,941828	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	
12	50/70	WMA-30	0,6	0,000153	0,000153	0,000153	0,330073	0,000153	0,000153	0,000153	1,000000	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	
13	45/80-55	HMA	0	0,000156	0,000154	0,000157	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	1,000000	0,967299	0,000153	0,002986	0,556342	0,063638	0,000153	0,658460	0,007300	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153
14	45/80-55	HMA	0,15	0,000156	0,000154	0,000158	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	1,000000	0,960707	0,000153	0,003374	0,581607	0,070761	0,000153	0,000153	0,682773	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	
15	45/80-55	HMA	0,3	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,967299	0,960707	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	
16	45/80-55	HMA	0,6	0,000153	0,000153	0,000153	0,669737	0,016163	0,000154	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153		
17	45/80-55	WMA-15	0	0,999924	0,995678	0,999974	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153		
18	45/80-55	WMA-15	0,15	0,231999	0,926560	0,271770	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153		
19	45/80-55	WMA-15	0,3	0,999030	0,979308	0,999565	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153		
20	45/80-55	WMA-15	0,6	0,000153	0,000153	0,000153	0,999916	0,000262	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0,000153	0									

Tab. Z. 6 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami tempa przyrostu koleiny mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych

[illegible]

Tab. Z. 7 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami wytrzymałości na pośrednie rozciąganie próbek suchych mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien aramidowych.

[illegible]

Tab. Z. 8 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami wytrzymałości na pośrednie rozciąganie próbek mokrych mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien aramidowych.

p.	Rodzaj lepiszcza	Rodzaj włókien	Zawartość włókien	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
1	50/70	HMA	0		1,000000	0,999971	0,240766	0,657419	0,000937	0,004632	0,000034	0,000183	0,000036	0,000069	0,000034	1,000000	1,000000	0,999994	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	0,330919	0,902286	1,000000	0,811866	0,708028	0,996215	0,000034	0,002289	0,999889	0,999987	0,000034	0,169821	0,800759	0,808580	0,964153	1,000000		
2	50/70	HMA	0,05	1,000000		1,000000	0,583260	0,931883	0,007034	0,028311	0,000045	0,001480	0,000052	0,000441	0,000034	0,999599	1,000000	0,997718	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	0,696848	0,994311	1,000000	0,979799	0,341171	0,921223	0,000034	0,000078	0,988569	0,996491	0,000034	0,041189	0,977371	0,979098	0,749291	1,000000		
3	50/70	HMA	0,1	0,999971	1,000000		0,999607	1,000000	0,254263	0,519020	0,003124	0,096037	0,004352	0,040699	0,000042	0,676545	0,993046	0,541440	0,999986	0,999991	1,000000	1,000000	1,000000	0,999705	1,000000	1,000000	0,011969	0,184687	0,000034	0,000034	0,387508	0,502798	0,000034	0,000048	1,000000	1,000000	0,075248	1,000000		
4	50/70	HMA	0,2	0,240766	0,583260	0,999607		1,000000	0,999979	1,000000	0,698187	0,998214	0,756105	0,984015	0,051835	0,002772	0,059251	0,001319	0,268943	0,287755	0,819839	0,635909	0,976612	1,000000	1,000000	0,981218	1,000000	0,000034	0,000131	0,000034	0,000034	0,000547	0,001066	0,000034	0,000034	1,000000	1,000000	0,000051	0,855848	
5	50/70	WMA-15	0	0,657419	0,931883	1,000000	1,000000		0,990621	0,999718	0,271891	0,917499	0,323107	0,774820	0,006546	0,025436	0,277787	0,133651	0,694519	0,717264	0,990310	0,950989	0,999868	1,000000	1,000000	0,999916	1,000000	0,000055	0,001548	0,000034	0,000034	0,006311	0,011352	0,000034	0,000034	1,000000	1,000000	0,000373	0,957182	
6	50/70	WMA-15	0,05	0,000937	0,007034	0,254263	0,999979	0,990621		1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	0,925875	0,000034	0,000108	0,000034	0,001161	0,001329	0,024074	0,009125	0,100171	0,999850	0,908623	0,110654	0,961544	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,965224	0,962673	0,000034	0,010073	
7	50/70	WMA-15	0,1	0,004632	0,028311	0,519020	1,000000	0,999718	1,000000		0,999892	1,000000	0,999963	1,000000	0,722038	0,000040	0,000515	0,000036	0,005639	0,006378	0,082061	0,035575	0,262705	1,000000	0,988887	0,283655	0,997307	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000035	0,000034	0,000034	0,997712	0,997434	0,000034	0,038793	
8	50/70	WMA-15	0,2	0,000034	0,000045	0,003124	0,698187	0,271891	1,000000	0,999892		1,000000	1,000000	1,000000	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000035	0,000103	0,000051	0,000653	0,584692	0,997884	0,000762	0,159608	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,167261	0,161868	0,000034	0,000053	
9	50/70	WMA-30	0	0,000183	0,001480	0,096037	0,998214	0,917499	1,000000	1,000000	1,000000		1,000000	1,000000	0,992141	0,000034	0,000043	0,000034	0,000224	0,000256	0,005853	0,001996	0,030492	0,993704	0,687270	0,034341	0,809264	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,820120	0,812544	0,000034	0,002222	
10	50/70	WMA-30	0,05	0,000035	0,000052	0,004352	0,756105	0,323107	1,000000	0,999963	1,000000	1,000000		1,000000	1,000000	0,000034	0,000034	0,000034	0,000035	0,000035	0,000139	0,000060	0,000934	0,648387	0,123126	0,001088	0,195968	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,204843	0,198590	0,000034	0,000064
11	50/70	WMA-30	0,1	0,000069	0,000441	0,040699	0,984015	0,774820	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000		1,000000	0,999342	0,000034	0,000036	0,000034	0,000086	0,000088	0,001889	0,000592	0,011250	0,961190	0,471164	0,012830	0,611785	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,626014	0,616046	0,000034	0,000063
12	50/70	WMA-30	0,2	0,000034	0,000034	0,000042	0,051835	0,006546	0,925875	0,722038	1,000000	0,992141	1,000000	0,999342		0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000035	0,031869	0,001235	0,000035	0,002665	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,002873	0,002725	0,000034	0,000034
13	45/80-55	HMA	0	1,000000	0,999599	0,676545	0,002772	0,025436	0,000034	0,000040	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034		1,000000	1,000000	0,999999	0,999999	0,991648	0,999179	0,896884	0,005049	0,092134	0,881424	0,053441	0,999994	1,000000	0,000040	0,216105	1,000000	1,000000	0,000072	0,967304	0,050425	0,052524	1,000000	0,998933	
14	45/80-55	HMA	0,05	1,000000	1,000000	0,993046	0,059251	0,277787	0,000108	0,000515	0,000034	0,000043	0,000034	0,000036	0,000034	1,000000		1,000000	1,000000	1,000000	0,999796	0,092520	0,569302	0,999685	0,430050	0,958452	0,999990	0,000034	0,017182	1,000000	1,000000	0,000034	0,494014	0,116447	0,425968	0,998365	1,000000			
15	45/80-55	HMA	0,1	0,999994	0,997718	0,541440	0,001319	0,013651	0,000034	0,000036	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	1,000000	1,000000		0,999988	0,999979	0,973478	0,995912	0,807374	0,002493	0,054402	0,785462	0,030165	0,999999	1,000000	0,000051	0,317293	1,000000	1,000000	0,000128	0,989149	0,028341	0,029612	1,000000	0,994947	
16	45/80-55	HMA	0,2	1,000000	1,000000	0,999986	0,268943	0,694519	0,001161	0,006639	0,000034	0,000224	0,000035	0,000080	0,000034	0,999999	1,000000	0,999986		1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	0,364649	0,920994	1,000000	0,840226	0,671402	0,994340	0,000034	0,001865	0,999798	0,999972	0,000034	0,149500	0,830034	0,837217	0,953297	1,000000	
17	45/80-55	WMA-15	0	1,000000	1,000000	0,999991	0,287755	0,717264	0,001329	0,006378	0,000035	0,000256	0,000035	0,000088	0,000034	0,999999	1,000000	0,999979	1,000000		1,000000	1,000000	1,000000	0,386768	0,931457	1,000000	0,856821	0,674649	0,992792	0,000034	0,001611	0,999709	0,999957	0,000034	0,137648	0,847236	0,853994	0,945290	1,000000	
18	45/80-55	WMA-15	0,05	1,000000	1,000000	1,000000	0,819839	0,990310	0,024074	0,082061	0,000103	0,005853	0,000139	0,001889	0,000034	0,991648	1,000000	0,973478	1,000000		1,000000	1,000000	0,894836	0,999774	1,000000	0,998489	0,159609	0,745416	0,000034	0,000079	0,924233	0,964816	0,000034	0,012860	0,998206	0,998409	0,496287	1,000000		
19	45/80-55	WMA-15	0,1	1,000000	1,000000	1,000000	0,635909	0,950989	0,009125	0,035575	0,000051	0,001996	0,000060	0,000592	0,000034	0,999179	1,000000	0,995912	1,000000	1,000000		1,000000	0,745013	0,996732	1,000000	0,987025	0,297223	0,895085	0,000034	0,000210	0,982015	0,993926	0,000034	0,032911	0,985315	0,986532	0,701412	1,000000		
20	45/80-55	WMA-15	0,2	1,000000	1,000000	1,000000	0,976612	0,999868	0,100171	0,262705	0,006633	0,030492	0,000934	0,011250	0,000035	0,896884	0,999790	0,807374	1,000000	1,000000	1,000000		1,000000	0,991343	1,000000	1,000000	0,999994	0,042973	0,404518	0,000034	0,000037	0,667979	0,776390	0,000034	0,002191	0,999993	0,999994	0,202584	1,000000	
21	45/80-55	WMA-30	0	0,330919	0,696848	0,999705	1,000000	1,000000	0,999850	1,000000	0,584692	0,993704	0,648387	0,961190	0,031869	0,005049	0,092520	0,002493	0,364649	0,386768	0,894836	0,745013	0,991343		1,000000	0,993357	1,000000	0,000035	0,000237	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	1,000000	1,000000	0,000072	0,762678		
22	45/80-55	WMA-30	0,05	0,902286	0,994311	1,000000	1,000000	1,000000	0,908623	0,988887	0,978884	0,687270	0,123126	0,471164	0,001235	0,092134	0,569302	0,054402	0,920994	0,931457	0,999774	0,996732	1,000000	1,000000		1,000000	1,000000	0,000205	0,008029	0,000034	0,000034	0,027923	0,046490	0,000034	0,000036	1,000000	1,000000	0,002161	0,997393	
23	45/80-55	WMA-30	0,1	1,000000	1,000000	1,000000	0,981218	0,999916	0,110654	0,283655	0,000762	0,034341	0,001088	0,012830	0,000035	0,881424	0,999685	0,785462	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	0,993357	1,000000		0,999997	0,038270	0,379133	0,000034	0,000037	0,641128	0,752930	0,000034	0,001894	0,999996	0,999997	0,185885	1,000000		
24	45/80-55	WMA-30	0,2	0,811866	0,979799	1,000000	1,000000	1,000000	0,961544	0,997307	0,159609	0,809264	0,196989	0,611785	0,002665	0,053441	0,430050	0,030165	0,840226	0,856821	0,988489	0,987025	0,999994	1,000000	1,000000	0,999997		0,000103	0,003949	0,000034	0,000034	0,014765	0,025470	0,000034	0,000034	1,000000	1,000000	0,000991	0,989172	
25	45/80-80	HMA	0	0,708028	0,341171	0,011969	0,000034	0,000055	0,000034	0,000034	0,																													

Tab. Z. 9 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami wytrzymałości na pośrednie rozciąganie próbek suchych mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.

t.p.	Rodzaj lepiszcza	Rodzaj włókien	Zawartość włókien	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
13	45/80-55	HMA	0	0.968328	1.000000	1.000000	0.279080	0.015152	0.006092	0.001350	0.000034	0.000034	0.000036	0.000142	0.000034		0.997860	0.003302	1.000000	1.000000	0.999980	0.014821	0.999990	0.000235	1.000000	0.999990	1.000000	0.999990	1.000000	0.000034	1.000000	1.000000	0.999757	0.000034	0.999955	0.002897	0.000055	0.971149	0.000099	
14	45/80-55	HMA	0.15	0.023856	0.581829	0.950440	0.000222	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.997860		0.740821	1.000000	0.426821	1.000000	0.936616	0.257095	0.000034	0.746931	1.000000	0.583820	1.000000	0.969056	0.000034	1.000000	0.999604	0.143336	0.001897	1.000000	0.000034	0.000034	0.025242	0.000034	
15	45/80-55	HMA	0.3	0.000034	0.000050	0.000470	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.997860			0.044884	0.000039	0.432404	1.000000	0.000039	0.000034	0.000098	0.457630	0.000050	0.353090	0.006689	0.028087	0.047160	0.006461	0.000034	0.993396	0.477064	0.000034	0.000034	0.000034		
16	45/80-55	HMA	0.6	0.600507	0.997116	1.000000	0.039788	0.000863	0.000052	0.000036	0.000034	0.000034	0.000034	0.000036	0.000034	1.000000	1.000000	0.044884		0.997812	1.000000	0.140704	0.984197	0.000039	0.999984	1.000000	0.999724	1.000000	1.000000	0.000034	1.000000	1.000000	0.838699	0.000036	1.000000	0.000142	0.000034	0.613263	0.000025	
25	45/80-80	HMA	0	0.119591	0.907597	0.998789	0.002026	0.000050	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.999996	1.000000	0.353090	1.000000	0.807719	1.000000	0.647228	0.628373	0.000034	0.968889	1.000000	0.908583		0.999506	0.000034	1.000000	1.000000	0.441797	0.000024	1.000000	0.000035	0.000034	0.125026	0.000034	
26	45/80-80	HMA	0.15	0.997780	1.000000	1.000000	0.541859	0.052956	0.003317	0.000630	0.000039	0.000034	0.000040	0.000667	0.000034	1.000000	0.969056	1.000689	1.000000	1.000000	0.998490	0.003586	1.000000	0.001150	1.000000	0.997941	1.000000	0.999506		0.000034	1.000000	1.000000	0.999999	0.000034	0.997415	0.012203	0.000178	0.998085	0.000436	
27	45/80-80	HMA	0.3	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.028087	0.000034	0.000034	0.000034	0.006782	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034		0.000034	0.000034	0.000034	0.990143	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	
28	45/80-80	HMA	0.6	0.588573	0.999662	1.000000	0.037824	0.000807	0.000051	0.000035	0.000034	0.000034	0.000034	0.000036	0.000034	1.000000	1.000000	0.047160	1.000000	0.997490	1.000000	0.146517	0.982534	0.000038	0.999980	1.000000	0.999671	1.000000	1.000000	0.000034			1.000000	0.934072	0.000036	1.000000	0.000134	0.000034	0.601293	0.000035
1	50/70	HMA	0		1.000000	0.999032	1.000000	0.993772	0.744417	0.448455	0.020914	0.000263	0.069822	0.458514	0.000035	0.968328	0.023856	0.000034	0.600587	1.000000	0.087473	0.000034	1.000000	0.555815	0.999996	0.979277	1.000000	0.119591	0.997780	0.000034	0.588573	0.925520	1.000000	0.000034	0.073488	0.920862	0.250099	1.000000	0.386456	
2	50/70	HMA	0.15	1.000000		1.000000	0.959021	0.354418	0.049291	0.012874	0.000116	0.000034	0.000528	0.013534	0.000034	1.000000	0.581829	0.000050	0.999716	1.000000	0.857905	0.000156	1.000000	0.021240	1.000000	0.840239	1.000000	0.907597	1.000000	0.000034	0.999662	1.000000	1.000000	0.000034	0.826039	0.131822	0.004092	1.000000	0.009391	
3	50/70	HMA	0.3	0.999032	1.000000		0.610384	0.069422	0.004716	0.000922	0.000036	0.000034	0.000052	0.000976	0.000034	1.000000	0.950440	0.000470	1.000000	0.996688	0.002510	1.000000	0.001672	1.000000	0.995621	1.000000	0.998789	1.000000	0.000034	1.000000	1.000000	1.000000	0.000034	0.994628	0.016823	0.000255	0.999178	0.000639		
4	50/70	HMA	0.6	1.000000	0.959021	0.610384		1.000000	0.999871	0.993900	0.453672	0.027436	0.733840	0.994502	0.000784	0.279080	0.000222	0.000034	0.039788	0.987930	0.001275	0.000034	0.998487	0.998111	0.886774	0.001104	0.958463	0.002062	0.541859	0.000034	0.037824	0.189298	0.999891	0.000034	0.000989	0.999999	0.958359	1.000000	0.988652	
17	45/80-55	WMA-15	0	1.000000	1.000000	1.000000	0.987930	0.502680	0.090762	0.026362	0.000259	0.000034	0.001261	0.027591	0.000034	1.000000	0.426821	0.000039	0.997812			0.735615	0.000077	1.000000	0.041945	1.000000	0.711886	1.000000	0.807719	1.000000	0.000034	0.997490	0.999998	1.000000	0.000034	0.693389	0.218481	0.008976	1.000000	0.019638
18	45/80-55	WMA-15	0.15	0.087473	0.857905	0.996688	0.001275	0.000042	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.999980	1.000000	0.432404	1.000000	0.735615			0.728701	0.542028	0.000034	0.944148	1.000000	0.859198	1.000000	0.998490	0.000034	1.000000	0.999999	0.361722	0.0000325	1.000000	0.000034	0.000034	0.091705	0.000034
19	45/80-55	WMA-15	0.3	0.000034	0.000156	0.002510	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.014821	0.936616	1.000000	0.140704	0.000077	0.728701			0.000045	0.000034	0.000393	0.751869	0.000158	0.647228	0.003586	0.006782	0.146517	0.026914	0.000036	0.931101	0.768879	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034
20	45/80-55	WMA-15	0.6	1.000000	1.000000	1.000000	0.998487	0.699639	0.180592	0.060813	0.000778	0.000036	0.003690	0.063352	0.000034	0.999990	0.257095	0.000035	0.984197	1.000000	0.542028	0.000045		0.092048	1.000000	0.515837	1.000000	0.628373	1.000000	0.000034	0.982534	0.999898	1.000000	0.000034	0.496058	0.375178	0.022849	1.000000	0.046635	
29	45/80-80	WMA-15	0	0.925520	1.000000	1.000000	0.189298	0.008058	0.003333	0.000760	0.000034	0.000034	0.000034	0.000079	0.000034	1.000000	0.999604	0.006461	1.000000	0.999998	0.999999	0.026914	0.999898	0.000120	1.000000	0.999998	1.000000	1.000000	0.000034	1.000000	0.000034		0.998564	0.000034	0.999996	0.000034	0.000034	0.930854	0.000061	
30	45/80-80	WMA-15	0.15	1.000000	1.000000	1.000000	0.999891	0.852441	0.311856	0.122515	0.002200	0.000045	0.009469	0.127013	0.000034	0.999757	0.143336	0.000034	0.938699	1.000000	0.361722	0.000036	1.000000	0.176037	1.000000	0.338898	1.000000	0.441797	0.999999	0.000034	0.934072	0.998564		0.000034	0.322083	0.557134	0.050973	1.000000	0.096817	
31	45/80-80	WMA-15	0.3	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.001897	0.993396	0.000036	0.000034	0.000325	0.931101	0.000034	0.000034	0.000375	0.000034	0.000204	0.000034	0.000034		0.990143	0.000036	0.000034	0.000034		0.000419	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034
32	45/80-80	WMA-15	0.6	0.073488	0.826039	0.994628	0.000989	0.000040	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.999955	1.000000	0.477064	1.000000	0.693389	1.000000	0.768879	0.496058	0.000034	0.926270	1.000000	0.827489	1.000000	0.997415	0.000034	1.000000	0.999996	0.322083	0.000419		0.000034	0.000034	0.000034	0.077154	0.000034
5	50/70	WMA-15	0	0.993772	0.354418	0.069422	1.000000		1.000000	1.000000	0.981568	0.390341	0.999050	1.000000	0.036988	0.015152	0.000034	0.000034	0.000863	0.502680	0.000042	0.000034	0.699639	1.000000	0.220809	0.000041	0.352677	0.000050	0.052956	0.000034	0.000807	0.008058	0.852441	0.000034	0.000040	1.000000	0.999999	0.992945	1.000000	
6	50/70	WMA-15	0.15	0.744417	0.049291	0.004716	0.999871	1.000000		1.000000	0.999994	0.905300	1.000000	1.000000	0.296556	0.000692	0.000034	0.000034	0.000050	0.090762	0.000034	0.000034	0.180592	1.000000	0.023553	0.000034	0.048893	0.000034	0.003317	0.000034	0.000051	0.000333	0.311856	0.000034	0.000034	1.000000	1.000000	0.733117	1.000000	
7	50/70	WMA-15	0.3	0.448455	0.012874	0.000922	0.993900	1.000000	1.000000		1.000000	0.988869	1.000000	0.581188	0.000135	0.000034	0.000034	0.000036	0.026362	0.000034	0.060813	0.000034	0.000034	0.000528	0.000034	0.000630	0.000034	0.000035	0.000076	0.122515	0.000034	0.000034	1.000000	0.999999	0.436205	1.000000	0.000000	1.000000		
8	50/70	WMA-15	0.6	0.020914	0.000116	0.000036	0.453672	0.001568	0.999994	1.000000		1.000000	1.000000	1.000000	0.998510	0.000034	0.000034	0.000034	0.000259	0.000034	0.000034	0.000773	1.000000	0.000069	0.000034	0.000115	0.000034	0.000035	0.000034	0.000034	0.000034	0.000034	0.000220	0.000034	0.000034	0.999486	1.000000	0.019744	1.000000	
21	45/80-55	WMA-30	0	0.555815	0.021240																																			

Tab. Z. 10 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami wytrzymałości na pośrednie rozciąganie próbek mokrych mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.

l.p.	Rodzaj lepiszcza	Rodzaj włókien	Zawartość włókien	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
1	50/70	HMA	0	1,000000	1,000000	0,632750	0,744297	0,417458	0,135931	0,000097	0,000468	0,012133	0,412923	0,000034	1,000000	0,985865	0,013196	1,000000	1,000000	0,998076	0,174966	0,925454	0,427397	1,000000	0,991199	0,976690	0,787624	1,000000	0,000034	1,000000	0,999955	1,000000	0,000048	1,000000	0,862887	0,215249	1,000000	0,000056		
2	50/70	HMA	0,15	1,000000	1,000000	0,670592	0,777520	0,454671	0,154887	0,000115	0,000581	0,014586	0,450000	0,000034	1,000000	0,980469	0,010956	1,000000	1,000000	0,997006	0,154159	0,940901	0,464890	1,000000	0,987483	0,982932	0,755057	1,000000	0,000034	1,000000	0,999913	1,000000	0,000044	1,000000	0,886360	0,241501	1,000000	0,000063		
3	50/70	HMA	0,3	1,000000	1,000000	0,675834	0,777520	0,454671	0,154887	0,000115	0,000434	0,000111	0,003054	0,196142	0,000034	1,000000	0,999275	0,044810	1,000000	1,000000	0,999665	0,379486	0,740683	0,205627	1,000000	0,999650	0,871585	0,946686	1,000000	0,000034	0,999997	1,000000	0,0000124	0,999999	0,630170	0,084355	1,000000	0,000037		
4	50/70	HMA	0,6	0,632750	0,670592	0,364134	1,000000	1,000000	1,000000	0,857717	0,978069	0,999994	1,000000	0,027775	0,027790	0,000630	0,000034	0,975866	0,681502	0,001896	0,000034	1,000000	1,000000	0,744707	0,000846	1,000000	0,000067	0,147116	0,000034	0,999181	0,007272	0,947742	0,000034	0,998055	1,000000	1,000000	0,958695	0,738178		
5	50/70	WMA-15	0	0,744297	0,777520	0,475834	1,000000	1,000000	1,000000	0,768489	0,948876	0,999943	1,000000	0,016280	0,045403	0,001218	0,000034	0,991216	0,795363	0,003533	0,000034	1,000000	1,000000	0,839036	0,001626	1,000000	0,000107	0,214711	0,000034	0,999845	0,012931	0,977472	0,000034	0,999576	1,000000	1,000000	0,983096	0,625923		
6	50/70	WMA-15	0,15	0,417458	0,454671	0,199091	1,000000	1,000000	1,000000	0,958300	0,997188	1,000000	1,000000	0,068420	0,010024	0,000191	0,000034	0,901996	0,476139	0,000563	0,000034	1,000000	1,000000	0,534106	0,000253	1,000000	0,000041	0,066702	0,000034	0,990866	0,002383	0,834332	0,000034	0,983104	1,000000	1,000000	0,858628	0,895968		
7	50/70	WMA-15	0,3	0,135931	0,154887	0,048154	1,000000	1,000000	1,000000	0,999012	0,999993	1,000000	1,000000	0,258467	0,001303	0,000045	0,000034	0,580690	0,166450	0,000078	0,000034	1,000000	1,000000	0,200193	0,000050	0,999996	0,000034	0,012086	0,000034	0,867084	0,000271	0,471052	0,000034	0,818919	1,000000	1,000000	0,506297	0,994345		
8	50/70	WMA-15	0,6	0,000097	0,000115	0,000043	0,857717	0,768489	0,958300	0,999012	1,000000	1,000000	0,959647	0,999969	0,000034	0,000034	0,000034	0,001919	0,000128	0,000034	0,000034	0,507664	0,955251	0,000171	0,000034	0,344924	0,000034	0,000034	0,000034	0,010407	0,000034	0,001038	0,000034	0,007395	0,624848	0,994929	0,001265	1,000000		
9	50/70	WMA-30	0	0,000468	0,000581	0,000111	0,978069	0,948876	0,997188	0,999993	1,000000	1,000000	0,997336	0,997483	0,000034	0,000034	0,000034	0,009148	0,000657	0,000034	0,000034	0,796166	0,996842	0,000909	0,000034	0,640417	0,000034	0,000043	0,000034	0,041249	0,000034	0,005302	0,000034	0,030623	0,877883	0,999906	0,006342	1,000000		
10	50/70	WMA-30	0,15	0,012133	0,014586	0,003054	0,999994	0,999943	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	0,996721	0,000067	0,000034	0,000034	0,123374	0,016152	0,000034	0,000034	0,997463	1,000000	0,021079	0,000034	0,985975	0,000034	0,000552	0,000034	0,337093	0,000038	0,082817	0,000034	0,280124	0,999405	1,000000	0,094563	1,000000		
11	50/70	WMA-30	0,3	0,412923	0,450000	0,196142	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	0,959647	0,997336	1,000000	0,069711	0,009793	0,000187	0,000034	0,899482	0,471408	0,000548	0,000034	1,000000	1,000000	0,529279	0,000034	0,000041	0,065458	0,000034	0,990449	0,002324	0,830880	0,000034	0,982417	1,000000	1,000000	0,855474	0,898539			
12	50/70	WMA-30	0,6	0,000034	0,000034	0,000034	0,027775	0,016280	0,068420	0,258467	0,999969	0,997483	0,796721	0,069711	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,004300	0,065678	0,000034	0,001723	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000038	0,000034	0,000034	0,000036	0,007769	0,167363	0,000034	0,999999			
13	45/80-55	HMA	0	1,000000	1,000000	1,000000	0,027390	0,045403	0,010024	0,001303	0,000034	0,000034	0,000067	0,009793	0,000034	1,000000	0,472704	0,997728	1,000000	1,000000	0,958876	0,127596	0,010544	0,999998	1,000000	0,000053	0,956057	1,000000	0,999424	0,006618	0,973288	0,083571	0,002834	0,999078	0,000034	0,000034				
14	45/80-55	HMA	0,15	0,985865	0,980469	0,999275	0,000630	0,001218	0,000191	0,000495	0,000034	0,000034	0,000034	0,000187	0,000034	1,000000	0,979837	0,695985	0,976760	1,000000	0,999997	0,005169	0,000202	0,964216	1,000000	0,999996	0,002037	0,372425	1,000000	0,792176	0,150775	0,437568	0,002027	0,000064	0,762666	0,000034	0,000034			
15	45/80-55	HMA	0,3	0,013196	0,010956	0,044810	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,472704	0,979837	1,000000	0,000718	0,009856	0,922608	1,000000	0,000034	0,000034	0,007411	0,969767	0,000034	0,999901	0,144618	0,850055	0,000121	0,748071	0,001315	0,999997	0,000171	0,000034	0,000034	0,001081	0,000034
16	45/80-55	HMA	0,6	1,000000	1,000000	1,000000	0,975886	0,991216	0,901996	0,580690	0,001919	0,009148	0,123374	0,899482	0,000034	0,997728	0,695985	0,000718	1,000000	0,856309	0,019721	0,999630	0,907327	1,000000	0,744114	0,999977	0,270937	0,999998	0,000034	1,000000	0,968755	1,000000	0,998294	0,719106	1,000000	0,000815	0,000034	0,000034		
17	45/80-55	WMA-15	0	1,000000	1,000000	1,000000	0,691502	0,795363	0,476139	0,166450	0,001280	0,000657	0,016152	0,471408	0,000034	0,997680	0,976760	0,009856	1,000000	0,996199	0,143250	0,948543	0,486481	1,000000	0,984869	0,985818	0,735756	1,000000	0,000034	1,000000	0,999876	1,000000	0,998829	0,257235	1,000000	0,000068	0,000034	0,000034		
18	45/80-55	WMA-15	0,15	0,998076	0,997006	0,999965	0,001896	0,003533	0,000563	0,000778	0,000034	0,000034	0,000034	0,000548	0,000034	1,000000	1,000000	0,922608	0,856309	0,996199	0,999890	0,013607	0,000597	0,993110	1,000000	0,029721	1,000000	0,000067	0,999996	0,563848	1,000000	0,917689	0,074215	0,633643	0,007728	0,000146	0,900149	0,000034		
19	45/80-55	WMA-15	0,3	0,174966	0,154159	0,379486	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,958876	0,999997	1,000000	0,019721	0,143250	0,999890	0,000037	0,000034	0,117173	0,999992	0,000046	1,000000	0,684003	0,268713	0,003917	0,996492	0,032072	0,979394	0,005596	0,000395	0,000034	0,027468	0,000034		
20	45/80-55	WMA-15	0,6	0,925454	0,940901	0,740683	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	0,507664	0,796166	0,997463	1,000000	0,004309	0,127595	0,005169	0,000034	0,999630	0,948543	0,013607	0,000037	1,000000	0,965295	0,006740	1,000000	0,000041	0,437072	0,000034	0,999999	0,043280	0,998436	0,000034	0,999996	1,000000	1,000000	0,998994	0,361627		
21	45/80-55	WMA-30	0	0,427397	0,464890	0,205627	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	0,955251	0,996842	1,000000	0,000000	0,065678	0,010544	0,000202	0,000034	0,907327	0,486481	0,000597	0,000034	1,000000	0,544629	0,000260	1,000000	0,000041	0,069480	0,000034	0,991721	0,002518	0,841711	0,000034	0,984524	0,000034	0,984524	0,000034	0,980225		
22	45/80-55	WMA-30	0,15	1,000000	1,000000	1,000000	0,744707	0,839036	0,534106	0,200193	0,000171	0,000909	0,021079	0,529279	0,000034	0,999999	0,964216	0,007411	1,000000	1,000000	0,993110	0,117173	0,965295	0,544629	0,975761	0,991607	0,681935	1,000000	1,000000	0,999700	1,000000	0,000040	1,000000	0,926287	0,302030	1,000000	0,000084			
23	45/80-55	WMA-30	0,3	0,991199	0,987483	0,999650	0,000846	0,001626	0,003054	0,000050	0,000034	0,000034	0,000247	0,000034	1,000000	1,000000	0,969767	0,744114	0,984869	0,999992	0,006740	0,000260	0,975761	0,015501	1,000000	0,000035	0,001512	0,421227	1,000000	0,832351	0,125980	0,489119	0,003720	0,000077	0,805742	0,000034	0,000034			
24	45/80-55	WMA-30	0,6	0,976690	0,982932	0,871585	1,000000	1,000000	1,000000	0,999996	0,344924	0,640417	0,986975	1,000000	0,001723	0,222740	0,012080	0,000034	0,999977	0,985818	0,029721	0,000046	1,000000	1,000000	0,991607	0,015501	0,001155	0,608444	0,000034	1,000000	0,085601	0,999855	0,000034	1,000000	1,000000	0,999918	0,226341			
25	45/80-80	HMA	0	0,787624	0,755057	0,946686	0,000067	0,000107	0,000041	0,000034	0,000034	0,000034	0,000034	0,000041	0,000034	0,999994	1,000000																							

Tab. Z. 12 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami wskaźnika stabilności referencyjnych mieszanek mineralno-asfaltowych.

Lp.	Rodzaj lepiszcza	Technologia	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	50/70	HMA		1,000000	0,999891	1,000000	0,999862	0,839068	1,000000	0,999999	0,000173
2	50/70	WMA-15	1,000000		0,999865	1,000000	0,999830	0,832611	1,000000	0,999998	0,000173
3	50/70	WMA-30	0,999891	0,999865		0,999948	1,000000	0,977237	0,999955	1,000000	0,000173
4	45/80-55	HMA	1,000000	1,000000	0,999948		0,999932	0,858541	1,000000	1,000000	0,000173
5	45/80-55	WMA-15	0,999862	0,999830	1,000000	0,999932		0,979183	0,999942	1,000000	0,000173
6	45/80-55	WMA-30	0,839068	0,832611	0,977237	0,858541	0,979183		0,862441	0,935322	0,000173
7	45/80-80	HMA	1,000000	1,000000	0,999955	1,000000	0,999942	0,862441		1,000000	0,000173
8	45/80-80	WMA-15	0,999999	0,999998	1,000000	1,000000	0,935322	1,000000			0,000173
9	45/80-80	WMA-30	0,000173	0,000173	0,000173	0,000173	0,000173	0,000173	0,000173	0,000173	

Tab. Z. 13 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami indeksu oporności referencyjnych mieszanek mineralno-asfaltowych.

Lp.	Rodzaj lepiszcza	Technologia	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	50/70	HMA		1,000000	0,999950	0,999996	0,998588	0,881316	1,000000	0,999979	0,000173
2	50/70	WMA-15	1,000000		0,999932	0,999994	0,998291	0,874284	1,000000	0,999970	0,000173
3	50/70	WMA-30	0,999950	0,999932		1,000000	0,999999	0,983429	0,999999	1,000000	0,000173
4	45/80-55	HMA	0,999996	0,999994	1,000000		0,999985	0,967377	1,000000	1,000000	0,000173
5	45/80-55	WMA-15	0,998588	0,998291	0,999999	0,999985		0,997539	0,999802	0,999997	0,000173
6	45/80-55	WMA-30	0,881316	0,874284	0,983429	0,967377	0,997539		0,934725	0,978246	0,000173
7	45/80-80	HMA	1,000000	1,000000	0,999999	1,000000	0,999802	0,934725		1,000000	0,000173
8	45/80-80	WMA-15	0,999979	0,999970	1,000000	1,000000	0,999997	0,978246	1,000000		0,000173
9	45/80-80	WMA-30	0,000173	0,000173	0,000173	0,000173	0,000173	0,000173	0,000173	0,000173	

Tab. Z. 14 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami współczynnika zagęszczalności mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien aramidowych.

Lp.	Rodzaj lepiszcza	Rodzaj włókien	Zawartość włókien	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	50/70	HMA	0		0,985451	0,999696	0,329788	0,000175	0,833775	0,999614	0,999999	0,353807	0,008926	0,228648	0,108688	0,623578	0,999998	0,525158	0,943203	0,037863	0,501756
2	50/70	HMA	0,05	0,985451		0,505849	0,994875	0,001218	1,000000	1,000000	0,999996	0,996401	0,290565	0,978777	0,885428	0,036507	0,716518	0,025147	0,157502	0,633335	0,999673
3	50/70	HMA	0,1	0,999696	0,505849		0,033836	0,000168	0,210502	0,773606	0,932535	0,037687	0,000554	0,019909	0,007542	0,995998	1,000000	0,987995	0,999999	0,002209	0,067183
4	50/70	WMA-30	0	0,329788	0,994875	0,033836		0,044211	0,999992	0,938586	0,785898	1,000000	0,977059	1,000000	1,000000	0,001000	0,073279	0,000701	0,005530	0,999825	1,000000
5	50/70	WMA-30	0,05	0,000175	0,001218	0,000168	0,044211		0,005221	0,000460	0,000263	0,039752	0,722089	0,072538	0,161054	0,000167	0,000168	0,000167	0,000168	0,365034	0,021676
6	50/70	WMA-30	0,1	0,833775	1,000000	0,210502	0,999992	0,005221		0,999928	0,996270	0,999996	0,623536	0,999822	0,993433	0,008927	0,368391	0,005988	0,046553	0,918676	1,000000
7	45/80-55	HMA	0	0,999614	1,000000	0,773606	0,938586	0,000460	0,999928		1,000000	0,949566	0,129964	0,864088	0,656124	0,097495	0,919725	0,069598	0,339376	0,366528	0,986728
8	45/80-55	HMA	0,05	0,999999	0,999996	0,932535	0,785898	0,000263	0,996270	1,000000		0,809595	0,057327	0,658101	0,418887	0,207094	0,988035	0,154356	0,565806	0,192964	0,914552
9	45/80-55	HMA	0,1	0,353807	0,996401	0,037687	1,000000	0,039752	0,999996	0,949566	0,809595		0,970749	1,000000	1,000000	0,001117	0,080953	0,000775	0,006226	0,999703	1,000000
10	45/80-55	WMA-30	0	0,008926	0,290565	0,000554	0,977059	0,722089	0,623536	0,129964	0,057327	0,970749		0,994315	0,999860	0,000172	0,001191	0,000170	0,000215	1,000000	0,911232
11	45/80-55	WMA-30	0,05	0,228648	0,978777	0,019909	1,000000	0,072538	0,999822	0,864088	0,658101	1,000000	0,994315		1,000000	0,000609	0,044687	0,000444	0,003132	0,999992	1,000000
12	45/80-55	WMA-30	0,1	0,108688	0,885428	0,007542	1,000000	0,161054	0,993433	0,656124	0,418887	1,000000	0,999860	1,000000		0,000309	0,017715	0,000257	0,001185	1,000000	0,999984
13	45/80-80	HMA	0	0,623578	0,036507	0,995998	0,001000	0,000167	0,008927	0,097495	0,207094	0,001117	0,000172	0,000609	0,000309		0,966471	1,000000	0,000198	0,002088	
14	45/80-80	HMA	0,05	0,999998	0,716518	1,000000	0,073279	0,000168	0,368391	0,919725	0,988035	0,080953	0,001191	0,044687	0,017715	0,966471		0,932388	0,999857	0,005304	0,137120
15	45/80-80	HMA	0,1	0,525158	0,025147	0,987995	0,000701	0,000167	0,005988	0,069598	0,154356	0,000775	0,000170	0,000444	0,000257	1,000000	0,932388		0,999995	0,000186	0,001413
16	45/80-80	WMA-30	0	0,943203	0,157502	0,999999	0,005530	0,000168	0,046553	0,339376	0,565806	0,006226	0,000215	0,003132	0,001185	1,000000	0,999857	0,999995		0,000421	0,011864
17	45/80-80	WMA-30	0,05	0,037863	0,633335	0,002209	0,999825	0,365034	0,918676	0,366528	0,192964	0,999703	1,000000	0,999992	1,000000	0,000198	0,005304	0,000186	0,000421		0,996638
18	45/80-80	WMA-30	0,1	0,501756	0,999673	0,067183	1,000000	0,021676	1,000000	0,986728	0,914552	1,000000	0,911232	1,000000	0,999984	0,002088	0,137120	0,001413	0,011864	0,996638	

Tab. Z. 15 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami wskaźnika stabilności mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien aramidowych.

Lp.	Rodzaj lepiszcza	Rodzaj wtókien	Zawartość wtókien	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	50/70	HMA	0		1,000000	1,000000	1,000000	0,404294	1,000000	1,000000	0,994733	0,910417	0,903487	0,120671	0,191591	1,000000	0,999999	1,000000	0,000167	0,000190	0,002914
2	50/70	HMA	0,05	1,000000		1,000000	1,000000	0,594260	1,000000	1,000000	0,999696	0,978022	0,975413	0,218492	0,325765	1,000000	1,000000	1,000000	0,000167	0,000233	0,006487
3	50/70	HMA	0,1	1,000000	1,000000		1,000000	0,493381	1,000000	1,000000	0,998455	0,951042	0,946391	0,162036	0,249964	1,000000	1,000000	1,000000	0,000167	0,000210	0,004280
4	50/70	WMA-30	0	1,000000	1,000000	1,000000		0,784246	1,000000	1,000000	0,999997	0,997542	0,997079	0,368592	0,508714	1,000000	1,000000	1,000000	0,000167	0,000331	0,014537
5	50/70	WMA-30	0,05	0,404294	0,594260	0,493381	0,784246		0,744752	0,438112	0,994308	0,999981	0,999986	1,000000	1,000000	0,445309	0,839255	0,579113	0,000167	0,067687	0,794774
6	50/70	WMA-30	0,1	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	0,744752		1,000000	0,999989	0,995631	0,994885	0,330595	0,464576	1,000000	1,000000	1,000000	0,000167	0,000300	0,012148
7	45/80-55	HMA	0	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	0,438112	1,000000		0,996635	0,928196	0,922174	0,135609	0,212973	1,000000	1,000000	1,000000	0,000167	0,000194	0,003382
8	45/80-55	HMA	0,05	0,994733	0,999696	0,998455	0,999997	0,994308	0,999989	0,996635		1,000000	0,843380	0,930732	0,996947	1,000000	0,999604	0,999604	0,000167	0,001872	0,096116
9	45/80-55	HMA	0,1	0,910417	0,978022	0,951042	0,997542	0,999981	0,995631	0,928196	1,000000		1,000000	0,983674	0,996870	0,931583	0,999104	0,974963	0,000167	0,007367	0,265684
10	45/80-55	WMA-30	0	0,903487	0,975413	0,946391	0,997079	0,999986	0,994885	0,922174	1,000000	1,000000		0,985567	0,997360	0,925751	0,998908	0,972090	0,000167	0,007766	0,275018
11	45/80-55	WMA-30	0,05	0,120671	0,218492	0,162036	0,368592	1,000000	0,330595	0,135609	0,843380	0,983674	0,985567		1,000000	0,138908	0,431351	0,209271	0,000167	0,264725	0,988756
12	45/80-55	WMA-30	0,1	0,191591	0,325765	0,249964	0,508714	1,000000	0,464576	0,212973	0,930732	0,996870	0,997360	1,000000		0,217651	0,578025	0,133540	0,000167	0,172785	0,958442
13	45/80-80	HMA	0	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	0,445309	1,000000	1,000000	0,996947	0,931583	0,925751	0,138908	0,217651		1,000000	1,000000	0,000167	0,000195	0,003489
14	45/80-80	HMA	0,05	0,999999	1,000000	1,000000	1,000000	0,839255	1,000000	1,000000	1,000000	0,999104	0,998908	0,431351	0,578025	1,000000		1,000000	0,000167	0,000394	0,019125
15	45/80-80	HMA	0,1	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	0,579113	1,000000	1,000000	0,999604	0,974963	0,972090	0,209271	0,313540	1,000000	1,000000		0,000167	0,000229	0,006098
16	45/80-80	WMA-30	0	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167		0,000167	0,000167
17	45/80-80	WMA-30	0,05	0,000190	0,000233	0,000210	0,000331	0,067687	0,000300	0,000194	0,001872	0,007367	0,007766	0,264725	0,172785	0,000195	0,000394	0,000229	0,000167		0,983466
18	45/80-80	WMA-30	0,1	0,002914	0,006487	0,004280	0,014537	0,794774	0,012148	0,003382	0,096116	0,265684	0,275018	0,988756	0,958442	0,003489	0,019125	0,006098	0,000167		0,983466

Tab. Z. 16 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami indeksu oporności mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien aramidowych.

Lp.	Rodzaj lepiszcza	Rodzaj wtókien	Zawartość wtókien	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	50/70	HMA	0		1,000000	1,000000	1,000000	0,795237	1,000000	1,000000	0,982569	0,926251	0,901194	0,252132	0,318658	1,000000	0,999992	1,000000	0,000167	0,000542	0,004692
2	50/70	HMA	0,05	1,000000		1,000000	1,000000	0,923679	1,000000	1,000000	0,998168	0,983762	0,974746	0,410495	0,495579	1,000000	1,000000	1,000000	0,000167	0,001085	0,010425
3	50/70	HMA	0,1	1,000000	1,000000		1,000000	0,889989	1,000000	1,000000	0,995782	0,971613	0,958199	0,354472	0,434482	1,000000	1,000000	1,000000	0,000167	0,000853	0,008074
4	50/70	WMA-30	0	1,000000	1,000000	1,000000		0,981473	1,000000	1,000000	0,999928	0,998139	0,996403	0,593388	0,681760	1,000000	1,000000	1,000000	0,000167	0,002262	0,021881
5	50/70	WMA-30	0,05	0,795237	0,923679	0,889989	0,981473		0,966924	0,955775	1,000000	1,000000	1,000000	0,999970	0,999997	0,896648	0,996780	0,967510	0,000167	0,116880	0,514981
6	50/70	WMA-30	0,1	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	0,966924		1,000000	0,999727	0,995475	0,992000	0,525253	0,614593	1,000000	1,000000	1,000000	0,000167	0,001721	0,016777
7	45/80-55	HMA	0	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	0,955775	1,000000		0,999471	0,992935	0,988081	0,487679	0,576366	1,000000	1,000000	1,000000	0,000167	0,001481	0,014417
8	45/80-55	HMA	0,05	0,982569	0,998168	0,995782	0,999928	1,000000	0,999727	0,999471		1,000000	1,000000	0,987266	0,995198	0,996337	0,999999	0,999738	0,000167	0,029317	0,198361
9	45/80-55	HMA	0,1	0,926251	0,983762	0,971613	0,998139	1,000000	0,995475	0,992935	1,000000		1,000000	0,998730	0,999702	0,974196	0,999873	0,995596	0,000167	0,058709	0,330096
10	45/80-55	WMA-30	0	0,901194	0,974746	0,958199	0,996403	1,000000	0,992000	0,988081	1,000000	1,000000		0,999410	0,999883	0,961652	0,999680	0,992194	0,000167	0,069895	0,371802
11	45/80-55	WMA-30	0,05	0,252132	0,410495	0,354472	0,593388	0,999970	0,525253	0,487679	0,987266	0,998730	0,999410		1,000000	0,364275	0,748901	0,527493	0,000167	0,551487	0,964124
12	45/80-55	WMA-30	0,1	0,318658	0,495579	0,434482	0,681760	0,999997	0,614593	0,576366	0,995198	0,999702	0,999883	1,000000		0,445279	0,823682	0,616845	0,000167	0,463455	0,932578
13	45/80-80	HMA	0	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	0,896648	1,000000	1,000000	0,996337	0,974196	0,961652	0,364275	0,445279		1,000000	1,000000	0,000167	0,000893	0,008457
14	45/80-80	HMA	0,05	0,999992	1,000000	1,000000	1,000000	0,996780	1,000000	1,000000	0,999999	0,999873	0,999680	0,748901	0,823682	1,000000		1,000000	0,000167	0,004378	0,040297
15	45/80-80	HMA	0,1	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	0,967510	1,000000	1,000000	0,999738	0,995596	0,992194	0,527493	0,616845	1,000000	1,000000		0,000167	0,001737	0,016926
16	45/80-80	WMA-30	0	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167		0,000167	0,000167
17	45/80-80	WMA-30	0,05	0,000542	0,001085	0,000853	0,002262	0,116880	0,001721	0,001481	0,029317	0,058709	0,069895	0,551487	0,463455	0,000893	0,004378	0,001737	0,000167		0,999987
18	45/80-80	WMA-30	0,1	0,004692	0,010425	0,008074	0,021881	0,514981	0,016777	0,014417	0,198361	0,330096	0,371802	0,964124	0,932578	0,008457	0,040297	0,016926	0,000167	0,999987	

Tab. Z. 17 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami współczynnika zagęszczalności mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.

Lp.	Rodzaj lepiszcza	Rodzaj wtókien	Zawartość wtókien	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	50/70	HMA	0		0,004158	0,000518	0,059147	0,288626	0,566529	0,992487	0,971596	0,069770	0,000352	0,997661	0,413367	0,216782	0,853124	1,000000	0,704950	1,000000	0,262983
2	50/70	HMA	0,15	0,004158		0,999992	0,999831	0,936387	0,723660	0,140921	0,214007	0,999605	0,999829	0,103644	0,853535	0,000168	0,000174	0,002826	0,000170	0,009547	0,949903
3	50/70	HMA	0,3	0,000518	0,999992		0,918464	0,487114	0,232558	0,020136	0,034295	0,893370	1,000000	0,013832	0,350668	0,000167	0,000168	0,000390	0,000168	0,001059	0,521719
4	50/70	WMA-30	0	0,059147	0,999831	0,918464		0,999997	0,998459	0,690555	0,813711	1,000000	0,835404	0,596532	0,999896	0,000172	0,000375	0,042023	0,000259	0,118496	0,999999
5	50/70	WMA-30	0,15	0,288626	0,936387	0,487114	0,999997		1,000000	0,982616	0,996114	0,999999	0,362919	0,961305	1,000000	0,000243	0,002256	0,223425	0,001126	0,465427	1,000000
6	50/70	WMA-30	0,3	0,566529	0,723660	0,232558	0,998459	1,000000		0,999679	0,999982	0,999243	0,156817	0,998517	1,000000	0,000481	0,007902	0,473249	0,003833	0,763134	1,000000
7	45/80-55	HMA	0	0,992487	0,140921	0,020136	0,690555	0,982616	0,999679		1,000000	0,734548	0,011845	1,000000	0,996544	0,007487	0,114021	0,980703	0,062405	0,999551	0,976204
8	45/80-55	HMA	0,15	0,971596	0,214007	0,034295	0,813711	0,996114	0,999982	1,000000		0,848869	0,020529	1,000000	0,999557	0,004235	0,071257	0,942492	0,037648	0,996504	0,994076
9	45/80-55	HMA	0,3	0,069770	0,999605	0,893370	1,000000	0,999999	0,999243	0,734548	0,848869		0,798800	0,643216	0,999962	0,000174	0,000425	0,049861	0,000281	0,137610	1,000000
10	45/80-55	WMA-30	0	0,000352	0,999829	1,000000	0,835404	0,362919	0,156817	0,011845	0,020529	0,798800		0,008075	0,248089	0,000167	0,000168	0,000287	0,000168	0,000648	0,393847
11	45/80-55	WMA-30	0,15	0,997661	0,103644	0,013832	0,596532	0,961305	0,998517	1,000000	1,000000	0,643216	0,008075		0,989683	0,010992	0,154255	0,992564	0,086864	0,999926	0,949943
12	45/80-55	WMA-30	0,3	0,413367	0,853535	0,350668	0,999896	1,000000	1,000000	0,996544	0,999557	0,999962	0,248089	0,989683		0,000315	0,004148	0,331300	0,002012	0,612907	1,000000
13	45/80-80	HMA	0	0,216782	0,000168	0,000167	0,000172	0,000243	0,000481	0,007487	0,004235	0,000174	0,000167	0,010992	0,000315		0,999594	0,280690	0,999990	0,116277	0,000232
14	45/80-80	HMA	0,15	0,853124	0,000174	0,000168	0,000375	0,002256	0,007902	0,114021	0,071257	0,000425	0,000168	0,154255	0,004148	0,999594		0,910749	1,000000	0,679117	0,001958
15	45/80-80	HMA	0,3	1,000000	0,002826	0,000390	0,042023	0,223425	0,473249	0,980703	0,942492	0,049861	0,000287	0,992564	0,331300	0,280690	0,910749		0,789547	1,000000	0,202053
16	45/80-80	WMA-30	0	0,704950	0,000170	0,000168	0,000259	0,001126	0,003833	0,062405	0,037648	0,000281	0,000168	0,086864	0,002012	0,999990	1,000000	0,789547		0,503280	0,000984
17	45/80-80	WMA-30	0,15	1,000000	0,009547	0,001059	0,118496	0,465427	0,763134	0,999551	0,996504	0,137610	0,000648	0,999926	0,612907	0,116277	0,679117	1,000000	0,503280		0,432031
18	45/80-80	WMA-30	0,3	0,262983	0,949903	0,521719	0,999999	1,000000	1,000000	0,976204	0,994076	1,000000	0,393847	0,949943	1,000000	0,000232	0,001958	0,202053	0,000984	0,432031	

Tab. Z. 18 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami wskaźnika stabilności mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.

Lp.	Rodzaj lepiszcza	Rodzaj wtókien	Zawartość wtókien	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	50/70	HMA	0		0,999343	0,997559	1,000000	0,999564	0,999659	1,000000	0,999840	0,708821	0,873182	0,994945	0,313391	1,000000	1,000000	0,000167	0,000167	0,022590	0,000179
2	50/70	HMA	0,15	0,999343		1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	0,999653	1,000000	0,999402	0,999991	1,000000	0,943195	0,999698	0,999973	0,000167	0,000167	0,282604	0,000655
3	50/70	HMA	0,3	0,997559	1,000000		1,000000	1,000000	1,000000	0,998567	1,000000	0,999879	0,999999	1,000000	0,970657	0,998732	0,999823	0,000168	0,000167	0,353199	0,000903
4	50/70	WMA-30	0	1,000000	1,000000	1,000000		1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	0,966720	0,995486	0,999998	0,702647	1,000000	1,000000	0,000167	0,000167	0,100407	0,000265
5	50/70	WMA-30	0,15	0,999564	1,000000	1,000000	1,000000		1,000000	0,999778	1,000000	0,999114	0,999983	1,000000	0,933104	0,999808	0,999985	0,000167	0,000167	0,264653	0,000604
6	50/70	WMA-30	0,3	0,999659	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000		0,999830	1,000000	0,998899	0,999976	1,000000	0,926775	0,999854	0,999989	0,000167	0,000167	0,254670	0,000576
7	45/80-55	HMA	0	1,000000	0,999653	0,998567	1,000000	0,999778	0,999830		0,999925	0,744004	0,896296	0,996841	0,344461	1,000000	1,000000	0,000167	0,000167	0,026148	0,000181
8	45/80-55	HMA	0,15	0,999840	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	0,999925		0,998002	0,999940	1,000000	0,906371	0,999937	0,999996	0,000167	0,000167	0,227373	0,000507
9	45/80-55	HMA	0,3	0,708821	0,999402	0,999879	0,966720	0,999114	0,998899	0,744004	0,998002		1,000000	0,999964	1,000000	0,751145	0,846374	0,000168	0,000167	0,923505	0,012852
10	45/80-55	WMA-30	0	0,873182	0,999991	0,999999	0,995486	0,999983	0,999976	0,896296	0,999940	1,000000		1,000000	0,999949	0,900767	0,952953	0,000168	0,000167	0,789522	0,005667
11	45/80-55	WMA-30	0,15	0,994945	1,000000	1,000000	0,999998	1,000000	1,000000	0,996841	1,000000	0,999964	1,000000		0,982198	0,997148	0,999504	0,000168	0,000167	0,403829	0,001121
12	45/80-55	WMA-30	0,3	0,313391	0,943195	0,970657	0,702647	0,933104	0,926775	0,344461	0,906371	1,000000	0,999949	0,982198		0,351128	0,457303	0,000173	0,000167	0,998777	0,062706
13	45/80-80	HMA	0	1,000000	0,999698	0,998732	1,000000	0,999808	0,999854	1,000000	0,999937	0,751145	0,900767	0,997148	0,351128		1,000000	0,000167	0,000167	0,026974	0,000182
14	45/80-80	HMA	0,15	1,000000	0,999973	0,999823	1,000000	0,999985	0,999989	1,000000	0,999996	0,846374	0,952953	0,999504	0,457303	1,000000		0,000167	0,000167	0,041883	0,000194
15	45/80-80	HMA	0,3	0,000167	0,000167	0,000168	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000168	0,000168	0,000168	0,000173	0,000167	0,000167		0,000167	0,000471	0,211776
16	45/80-80	WMA-30	0	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167		0,000167	0,000167	0,000167
17	45/80-80	WMA-30	0,15	0,022590	0,282604	0,353199	0,100407	0,264653	0,254670	0,026148	0,227373	0,923505	0,789522	0,403829	0,998777	0,026974	0,041883	0,000471	0,000167		0,567492
18	45/80-80	WMA-30	0,3	0,000179	0,000655	0,000903	0,000265	0,000604	0,000576	0,000181	0,000507	0,012852	0,005667	0,001121	0,062706	0,000182	0,000194	0,211776	0,000167	0,567492	

Tab. Z. 19 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami indeksu oporności mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.

Lp.	Rodzaj lepiszcza	Rodzaj wtórkien	Zawartość wtórkien	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	50/70	HMA	0		0,999882	0,999699	1,000000	0,998784	0,997872	1,000000	0,995396	0,679115	0,903377	0,941665	0,368155	1,000000	1,000000	0,000167	0,000167	0,010062	0,000210
2	50/70	HMA	0,15	0,999882		1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	0,996283	0,999973	0,999997	0,930799	0,999996	1,000000	0,000167	0,000167	0,116416	0,001044	
3	50/70	HMA	0,3	0,999699	1,000000		1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	0,998084	0,999992	0,999999	0,950491	0,999985	1,000000	0,000167	0,000167	0,136579	0,001261	
4	50/70	WMA-30	0	1,000000	1,000000	1,000000		1,000000	0,999999	1,000000	0,999997	0,947857	0,996525	0,998884	0,736606	1,000000	1,000000	0,000167	0,000167	0,044194	0,000407
5	50/70	WMA-30	0,15	0,998784	1,000000	1,000000	1,000000		1,000000	0,999996	1,000000	0,999483	0,999999	1,000000	0,974534	0,999900	0,999999	0,000167	0,000167	0,177791	0,001763
6	50/70	WMA-30	0,3	0,997872	1,000000	1,000000	0,999999	1,000000		0,999988	1,000000	0,999736	1,000000	1,000000	0,981906	0,999788	0,999998	0,000167	0,000167	0,199418	0,002059
7	45/80-55	HMA	0	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	0,999996	0,999988		0,999951	0,899005	0,988446	0,995319	0,634884	1,000000	1,000000	0,000167	0,000167	0,029777	0,000314
8	45/80-55	HMA	0,15	0,995396	1,000000	1,000000	0,999997	1,000000	1,000000	0,999951		0,999918	1,000000	1,000000	0,989934	0,999396	0,999990	0,000167	0,000167	0,236480	0,002630
9	45/80-55	HMA	0,3	0,679115	0,996283	0,998084	0,947857	0,999483	0,999736	0,899005	0,999918		1,000000	1,000000	1,000000	0,807939	0,931458	0,000167	0,000167	0,813261	0,034456
10	45/80-55	WMA-30	0	0,903377	0,999973	0,999992	0,996525	0,999999	1,000000	0,988446	1,000000	1,000000		1,000000	0,999964	0,962666	0,994286	0,000167	0,000167	0,545894	0,011389
11	45/80-55	WMA-30	0,15	0,941665	0,999997	0,999999	0,998884	1,000000	1,000000	0,995319	1,000000	1,000000	1,000000		0,999805	0,981133	0,997979	0,000167	0,000167	0,465430	0,008200
12	45/80-55	WMA-30	0,3	0,368155	0,930799	0,950491	0,736606	0,974534	0,981906	0,634884	0,989934	1,000000	0,999964	0,999805		0,502425	0,698270	0,000168	0,000167	0,973739	0,107402
13	45/80-80	HMA	0	1,000000	0,999996	0,999985	1,000000	0,999900	0,999788	1,000000	0,999396	0,807939	0,962666	0,981133	0,502425		1,000000	0,000167	0,000167	0,017832	0,000247
14	45/80-80	HMA	0,15	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	0,999999	0,999998	1,000000	0,999990	0,931458	0,994286	0,997979	0,698270	1,000000		0,000167	0,000167	0,037988	0,000365
15	45/80-80	HMA	0,3	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000168	0,000167	0,000167		0,000167	0,000173	0,002398
16	45/80-80	WMA-30	0	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167		0,000167	0,000167
17	45/80-80	WMA-30	0,15	0,010062	0,116416	0,136579	0,044194	0,177791	0,199418	0,029777	0,236480	0,813261	0,545894	0,465430	0,973739	0,017832	0,037988	0,000173	0,000167		0,919352
18	45/80-80	WMA-30	0,3	0,000210	0,001044	0,001261	0,000407	0,001763	0,002059	0,000314	0,002630	0,034456	0,011389	0,008200	0,107402	0,000247	0,000365	0,002398	0,000167		

Tab. Z. 20 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami modułu sztywności w pośrednim rozciąganiu w temperaturze 5°C referencyjnych mieszanek mineralno-asfaltowych.

Lp.	Rodzaj lepiszcza	Technologia	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	50/70	HMA		0,172152	0,979555	1,000000	0,999770	0,028505	0,000143	0,000148	0,000143
2	50/70	WMA-15	0,172152		0,758959	0,188153	0,049561	0,000146	0,000143	0,000143	0,000143
3	50/70	WMA-30	0,979555	0,758959		0,984409	0,806132	0,001481	0,000143	0,000143	0,000143
4	45/80-55	HMA	1,000000	0,188153	0,984409		0,999592	0,025328	0,000143	0,000147	0,000143
5	45/80-55	WMA-15	0,999770	0,049561	0,806132	0,999592		0,108770	0,000144	0,000183	0,000143
6	45/80-55	WMA-30	0,028505	0,000146	0,001481	0,025328	0,108770		0,027194	0,212343	0,000283
7	45/80-80	HMA	0,000143	0,000143	0,000143	0,000143	0,000144	0,027194		0,992664	0,742399
8	45/80-80	WMA-15	0,000148	0,000143	0,000143	0,000147	0,000183	0,212343	0,992664		0,220121
9	45/80-80	WMA-30	0,000143	0,000143	0,000143	0,000143	0,000143	0,000283	0,742399	0,220121	

Tab. Z. 21 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami modułu sztywności w pośrednim rozciąganiu w temperaturze 15°C referencyjnych mieszanek mineralno-asfaltowych.

Lp.	Rodzaj lepiszcza	Technologia	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	50/70	HMA		1,000000	0,000594	0,001347	0,000158	0,000143	0,000143	0,000143	0,000143
2	50/70	WMA-15	1,000000		0,000958	0,002274	0,000174	0,000143	0,000143	0,000143	0,000143
3	50/70	WMA-30	0,000594	0,000958		0,999998	0,989534	0,043960	0,175073	0,000162	0,000143
4	45/80-55	HMA	0,001347	0,002274	0,999998		0,943864	0,020002	0,091555	0,000149	0,000143
5	45/80-55	WMA-15	0,000158	0,000174	0,989534	0,943864		0,323274	0,701219	0,000680	0,000143
6	45/80-55	WMA-30	0,000143	0,000143	0,043960	0,020002	0,323274		0,999528	0,296402	0,000855
7	45/80-80	HMA	0,000143	0,000143	0,175073	0,091555	0,701219	0,999528		0,086851	0,000237
8	45/80-80	WMA-15	0,000143	0,000143	0,000162	0,000149	0,000680	0,296402	0,086851		0,371510
9	45/80-80	WMA-30	0,000143	0,000143	0,000143	0,000143	0,000143	0,000855	0,000237	0,371510	

Tab. Z. 22 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami modułu sztywności w pośrednim rozciąganiu w temperaturze 20°C referencyjnych mieszanek mineralno-asfaltowych.

Lp.	Rodzaj lepiszcza	Technologia	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	50/70	HMA		0,994918	0,002236	0,302879	0,014675	0,000143	0,000145	0,000143	0,000143
2	50/70	WMA-15	0,994918		0,000275	0,050799	0,001308	0,000143	0,000143	0,000143	0,000143
3	50/70	WMA-30	0,002236	0,000275		0,575633	0,999163	0,002007	0,625325	0,000228	0,000143
4	45/80-55	HMA	0,302879	0,050799	0,575633		0,923129	0,000144	0,010207	0,000143	0,000143
5	45/80-55	WMA-15	0,014675	0,001308	0,999163	0,923129		0,000361	0,240737	0,000150	0,000143
6	45/80-55	WMA-30	0,000143	0,000143	0,002007	0,000144	0,000361		0,248034	0,989765	0,014391
7	45/80-80	HMA	0,000145	0,000143	0,625325	0,010207	0,240737	0,248034		0,029986	0,000145
8	45/80-80	WMA-15	0,000143	0,000143	0,000228	0,000143	0,000150	0,989765	0,029986		0,145240
9	45/80-80	WMA-30	0,000143	0,000143	0,000143	0,000143	0,000143	0,014391	0,000145	0,145240	

Tab. Z. 23 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami modułu sztywności w pośrednim rozciąganiu w temperaturze 5°C mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien aramidowych.

Lp.	Rodzaj lepiszcza	Zawartość wtókien	Technologia	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	50/70	0	HMA		0,999747	0,999520	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	0,043534	1,000000	0,024255	0,992651	0,000225	0,000172	0,000172	0,025527	0,000172	0,000948	0,000172
2	50/70	0	WMA -30°C	0,999747		1,000000	0,993322	0,940457	0,998853	0,999858	0,001208	1,000000	0,000655	0,516374	0,000172	0,000172	0,000172	0,000688	0,000172	0,000178	0,000172
3	50/70	0,05	HMA	0,999520	1,000000		0,989956	0,923721	0,998036	0,999718	0,001007	1,000000	0,000560	0,476505	0,000172	0,000172	0,000586	0,000172	0,000177	0,000172	
4	50/70	0,05	WMA -30°C	1,000000	0,993322	0,989956		1,000000	1,000000	1,000000	0,109270	0,999985	0,065216	0,999706	0,000407	0,000172	0,000172	0,068257	0,000172	0,002971	0,000172
5	50/70	0,1	HMA	1,000000	0,940457	0,923721	1,000000		1,000000	0,999999	0,252394	0,998540	0,164781	0,999999	0,001176	0,000172	0,000172	0,171199	0,000172	0,010262	0,000172
6	50/70	0,1	WMA -30°C	1,000000	0,998853	0,998036	1,000000	1,000000		1,000000	0,064371	1,000000	0,036788	0,997659	0,000277	0,000172	0,000172	0,038633	0,000172	0,001493	0,000172
7	45/80-55	0	HMA	1,000000	0,999858	0,999718	1,000000	0,999999	1,000000		0,037988	1,000000	0,020990	0,989707	0,000215	0,000172	0,000172	0,022103	0,000172	0,000819	0,000172
8	45/80-55	0	WMA -30°C	0,043534	0,001208	0,001007	0,109270	0,252394	0,064371	0,037988		0,007664	1,000000	0,746866	0,938198	0,041260	0,000224	1,000000	0,000524	0,999410	0,011822
9	45/80-55	0,05	HMA	1,000000	1,000000	1,000000	0,999985	0,998540	1,000000	1,000000	0,007664		0,003939	0,866425	0,000176	0,000172	0,000172	0,004169	0,000172	0,000249	0,000172
10	45/80-55	0,05	WMA -30°C	0,024255	0,000655	0,000560	0,065216	0,164781	0,036788	0,020990	1,000000	0,003939		0,612029	0,977821	0,071627	0,000303	1,000000	0,000932	0,999948	0,022026
11	45/80-55	0,1	HMA	0,992651	0,516374	0,476505	0,999706	0,999999	0,997659	0,989707	0,746866	0,866425	0,612029		0,014420	0,000179	0,000172	0,623993	0,000172	0,093219	0,000173
12	45/80-55	0,1	WMA -30°C	0,000225	0,000172	0,000172	0,000407	0,001176	0,000277	0,000215	0,938198	0,000176	0,977821	0,014420		0,918176	0,043215	0,975540	0,139147	1,000000	0,706250
13	45/80-80	0	HMA	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,041260	0,000172	0,071627	0,000179	0,918176		0,942586	0,068465	0,996520	0,540007
14	45/80-80	0	WMA -30°C	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000224	0,000172	0,000303	0,000172	0,043215	0,942586		0,000294	1,000000	0,005722	0,995362
15	45/80-80	0,05	HMA	0,025527	0,000688	0,000586	0,068257	0,171199	0,038633	0,022103	1,000000	0,004169	1,000000	0,623993	0,975540	0,068465	0,000294		0,000885	0,999934	0,020917
16	45/80-80	0,05	WMA -30°C	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000524	0,000172	0,000932	0,000172	0,139147	0,996520	1,000000	0,000885		0,023862	0,999964
17	45/80-80	0,1	HMA	0,000948	0,000178	0,000177	0,002971	0,010262	0,001493	0,000819	0,999410	0,000249	0,999948	0,093219	1,000000	0,540007	0,005722	0,999934	0,023862		0,275390
18	45/80-80	0,1	WMA -30°C	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,011822	0,000172	0,022026	0,000173	0,706250	1,000000	0,995362	0,020917	0,999964	0,275390	

Tab. Z. 24 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami modułu sztywności w pośrednim rozciąganiu w temperaturze 15°C mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien aramidowych.

Lp.	Rodzaj lepiszcza	Zawartość włókien	Technologia	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	50/70	0	HMA		0,001297	0,957218	0,044096	0,999921	0,033895	0,003532	0,000172	0,209029	0,000172	0,543026	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172
2	50/70	0	WMA -30°C	0,001297		0,228997	0,999794	0,035454	0,999936	1,000000	0,137280	0,965769	0,002894	0,736976	0,047203	0,446366	0,000172	0,103959	0,000172	0,686994	0,000172
3	50/70	0,05	HMA	0,957218	0,228997		0,898535	0,999999	0,859477	0,398476	0,000173	0,997503	0,000172	0,999998	0,000172	0,000196	0,000172	0,000173	0,000172	0,000287	0,000172
4	50/70	0,05	WMA -30°C	0,044096	0,999794	0,898535		0,438120	1,000000	0,999998	0,005581	1,000000	0,000204	0,999519	0,001403	0,036726	0,000172	0,003805	0,000172	0,093681	0,000172
5	50/70	0,1	HMA	0,999921	0,035454	0,999999	0,438120		0,377921	0,080901	0,000172	0,845942	0,000172	0,989115	0,000172	0,000173	0,000172	0,000172	0,000172	0,000176	0,000172
6	50/70	0,1	WMA -30°C	0,033895	0,999936	0,859477	1,000000	0,377921		1,000000	0,007557	1,000000	0,000220	0,998758	0,001900	0,047678	0,000172	0,005170	0,000172	0,117652	0,000172
7	45/80-55	0	HMA	0,003532	1,000000	0,398476	0,999998	0,080901	1,000000		0,064385	0,995044	0,001072	0,893884	0,019575	0,264684	0,000172	0,046961	0,000172	0,477204	0,000172
8	45/80-55	0	WMA -30°C	0,000172	0,137280	0,000173	0,005581	0,000172	0,007557	0,064385		0,000723	0,998359	0,000227	1,000000	1,000000	0,002058	1,000000	0,004347	0,999974	0,074907
9	45/80-55	0,05	HMA	0,209029	0,965769	0,997503	1,000000	0,845942	1,000000	0,995044	0,000723		0,000174	1,000000	0,000281	0,005196	0,000172	0,000527	0,000172	0,015834	0,000172
10	45/80-55	0,05	WMA -30°C	0,000172	0,002894	0,000172	0,000204	0,000172	0,000220	0,001072	0,998359	0,000174		0,000172	0,999990	0,922381	0,107625	0,999482	0,181038	0,758579	0,757798
11	45/80-55	0,1	HMA	0,543026	0,736976	0,999998	0,999519	0,989115	0,998758	0,893884	0,000227	1,000000	0,000172		0,000181	0,000838	0,000172	0,000205	0,000172	0,002579	0,000172
12	45/80-55	0,1	WMA -30°C	0,000172	0,047203	0,000172	0,001403	0,000172	0,001900	0,019575	1,000000	0,000281	0,999990	0,000181		0,999933	0,008166	1,000000	0,016563	0,997173	0,201046
13	45/80-80	0	HMA	0,000172	0,446366	0,000196	0,036726	0,000173	0,047678	0,264684	1,000000	0,005196	0,922381	0,000838	0,999933		0,000358	1,000000	0,000621	1,000000	0,012905
14	45/80-80	0	WMA -30°C	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,002058	0,000172	0,107625	0,000172	0,008166	0,000358		0,003032	1,000000	0,000213
15	45/80-80	0,05	HMA	0,000172	0,103959	0,000173	0,003805	0,000172	0,005170	0,046961	1,000000	0,000527	0,999482	0,000205	1,000000	1,000000	0,003032		0,006364	0,999876	0,100523
16	45/80-80	0,05	WMA -30°C	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,004347	0,000172	0,181038	0,000172	0,016563	0,000621	1,000000	0,006364		0,000287	0,999979
17	45/80-80	0,1	HMA	0,000172	0,686994	0,000287	0,093681	0,000176	0,117652	0,477204	0,999974	0,015834	0,758579	0,002579	0,997173	1,000000	0,000213	0,999876	0,000287		0,004177
18	45/80-80	0,1	WMA -30°C	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,074907	0,000172	0,757798	0,000172	0,201046	0,012905	0,999616	0,100523	0,999979	0,004177

Tab. Z. 25 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami modułu sztywności w pośrednim rozciąganiu w temperaturze 20°C mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien aramidowych.

Lp.	Rodzaj lepiszcza	Zawartość włókien	Technologia	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	50/70	0	HMA		0,004459	0,999999	0,006817	0,997550	0,000172	0,611268	0,000172	0,796743	0,000172	0,516615	0,000172	0,000173	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172
2	50/70	0	WMA -30°C	0,004459		0,049619	1,000000	0,000192	0,688205	0,883149	0,003925	0,729595	0,005815	0,930992	0,103120	0,912802	0,000172	0,635605	0,000172	0,011259	0,000172
3	50/70	0,05	HMA	0,999999	0,049619		0,070294	0,830934	0,000179	0,971876	0,000172	0,995822	0,000172	0,944754	0,000172	0,000217	0,000172	0,000177	0,000172	0,000172	0,000172
4	50/70	0,05	WMA -30°C	0,006817	1,000000	0,070294		0,000207	0,599534	0,929259	0,002557	0,806493	0,003795	0,962204	0,074298	0,860785	0,000172	0,545217	0,000172	0,007439	0,000172
5	50/70	0,1	HMA	0,997550	0,000192	0,830934	0,000207		0,000172	0,036161	0,000172	0,079233	0,000172	0,024384	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172
6	50/70	0,1	WMA -30°C	0,000172	0,688205	0,000179	0,599534	0,000172		0,006456	0,810487	0,002496	0,869362	0,010011	0,999868	1,000000	0,000182	1,000000	0,000190	0,941371	0,005746
7	45/80-55	0	HMA	0,611268	0,883149	0,971876	0,929259	0,036161	0,006456		0,000173	1,000000	0,000173	1,000000	0,000287	0,024757	0,000172	0,005004	0,000172	0,000175	0,000172
8	45/80-55	0	WMA -30°C	0,000172	0,003925	0,000172	0,002557	0,000172	0,810487	0,000173		0,000172	1,000000	0,000173	0,999823	0,529361	0,035785	0,850147	0,051989	1,000000	0,761763
9	45/80-55	0,05	HMA	0,796743	0,729595	0,995822	0,806493	0,079233	0,002496	1,000000	0,000172		0,000172	1,000000	0,000203	0,010221	0,000172	0,001923	0,000172	0,000173	0,000172
10	45/80-55	0,05	WMA -30°C	0,000172	0,005815	0,000172	0,003795	0,000172	0,869362	0,000173	1,000000	0,000172		0,000174	0,999963	0,612796	0,025302	0,900999	0,037232	1,000000	0,685771
11	45/80-55	0,1	HMA	0,516615	0,930992	0,944754	0,962204	0,024384	0,010011	1,000000	0,000173	1,000000	0,000174		0,000366	0,036693	0,000172	0,007797	0,000172	0,000178	0,000172
12	45/80-55	0,1	WMA -30°C	0,000172	0,103120	0,000172	0,074298	0,000172	0,999868	0,000287	0,999823	0,000203	0,999963	0,000366		0,992010	0,001068	0,999952	0,001637	0,999999	0,128623
13	45/80-80	0	HMA	0,000173	0,912802	0,000217	0,860785	0,000172	1,000000	0,024757	0,529361	0,010221	0,612796	0,036693	0,992010		0,000173	1,000000	0,000174	0,748817	0,001386
14	45/80-80	0	WMA -30°C	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000182	0,000172	0,035785	0,000172	0,025302	0,000172	0,001068	0,000173		0,000186	1,000000	0,013579	0,986134
15	45/80-80	0,05	HMA	0,000172	0,635605	0,000177	0,545217	0,000172	1,000000	0,005004	0,850147	0,001923	0,900999	0,007797	0,999952	1,000000	0,000186		0,000197	0,959324	0,007404
16	45/80-80	0,05	WMA -30°C	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000190	0,000172	0,051989	0,000172	0,037232	0,000172	0,001637	0,000174	1,000000	0,000197		0,020421	0,994515
17	45/80-80	0,1	HMA	0,000172	0,011259	0,000172	0,007439	0,000172	0,941371	0,000175	1,000000	0,000173	1,000000	0,000178	0,999999	0,748817	0,013579	0,959324	0,020421		0,544193
18	45/80-80	0,1	WMA -30°C	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,005746	0,000172	0,761763	0,000172	0,685771	0,000172	0,128623	0,001386	0,986134	0,007404	0,994515	0,544193	

Tab. Z. 26 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami modułu sztywności w pośrednim rozciąganiu w temperaturze 5°C mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.

Lp.	Rodzaj lepiszcza	Zawartość włókien	Technologia	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	50/70	0	HMA		0,999958	0,315240	1,000000	1,000000	0,999969	1,000000	0,145037	1,000000	0,118370	0,996259	0,513237	0,000172	0,000172	0,643755	0,000172	0,000172	0,000172
2	50/70	0	WMA -30°C	0,999958		0,914072	1,000000	1,000000	0,908835	0,999977	0,008984	0,999980	0,006792	0,675394	0,067403	0,000172	0,000172	0,108430	0,000172	0,000172	0,000172
3	50/70	0,15	HMA	0,315240	0,914072		0,669070	0,728458	0,030458	0,339884	0,000175	0,344797	0,000174	0,007924	0,000247	0,000172	0,000172	0,000343	0,000172	0,000172	0,000172
4	50/70	0,15	WMA -30°C	1,000000	1,000000	0,669070		1,000000	0,992357	1,000000	0,036581	1,000000	0,028509	0,917230	0,203030	0,000172	0,000172	0,294488	0,000172	0,000172	0,000172
5	50/70	0,3	HMA	1,000000	1,000000	0,728458	1,000000		0,985938	1,000000	0,028172	1,000000	0,021809	0,883549	0,166939	0,000172	0,000172	0,247474	0,000172	0,000172	0,000172
6	50/70	0,3	WMA -30°C	0,999969	0,908835	0,030458	0,992357	0,985938		0,999944	0,711273	0,999937	0,653654	1,000000	0,978351	0,000220	0,000172	0,993660	0,000185	0,000185	0,000172
7	45/80-55	0	HMA	1,000000	0,999977	0,339884	1,000000	1,000000	0,999944		0,131467	1,000000	0,106830	0,994785	0,483970	0,000172	0,000172	0,614477	0,000172	0,000172	0,000172
8	45/80-55	0	WMA -30°C	0,145037	0,008984	0,000175	0,036581	0,028172	0,711273	0,131467		0,128946	1,000000	0,926739	1,000000	0,139549	0,001072	0,999994	0,066552	0,068382	0,000486
9	45/80-55	0,15	HMA	1,000000	0,999980	0,344797	1,000000	1,000000	0,999937	1,000000	0,128946		0,104695	0,994449	0,478321	0,000172	0,000172	0,608739	0,000172	0,000172	0,000172
10	45/80-55	0,15	WMA -30°C	0,118370	0,006792	0,000174	0,028509	0,021809	0,653654	0,106830	1,000000	0,104695		0,897019	0,999999	0,169682	0,001412	0,999975	0,083291	0,085499	0,000609
11	45/80-55	0,3	HMA	0,996259	0,675394	0,007924	0,917230	0,883549	1,000000	0,994785	0,926739	0,994449	0,897019		0,999307	0,000476	0,000172	0,999920	0,000259	0,000262	0,000172
12	45/80-55	0,3	WMA -30°C	0,513237	0,067403	0,000247	0,203030	0,166939	0,978351	0,483970	1,000000	0,478321	0,999999	0,999307		0,022295	0,000228	1,000000	0,008847	0,009141	0,000189
13	45/80-80	0	HMA	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000220	0,139549	0,000172	0,169682	0,000476	0,022295		0,982900	0,012572	1,000000	0,000000	1,000000	0,929274
14	45/80-80	0	WMA -30°C	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,001072	0,000172	0,000412	0,000172	0,000228	0,982900		0,000197	0,998163	0,997987
15	45/80-80	0,15	HMA	0,643755	0,108430	0,000343	0,294488	0,247474	0,993660	0,614477	0,999994	0,608739	0,999975	0,999920	1,000000	0,012572	0,000197		0,004805	0,004969	0,000179
16	45/80-80	0,15	WMA -30°C	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000185	0,000172	0,066552	0,000172	0,083291	0,000259	0,008847	1,000000	0,998163	0,004805		1,000000	0,984879
17	45/80-80	0,3	HMA	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000185	0,000172	0,068382	0,000172	0,085499	0,000262	0,009141	1,000000	0,997987	0,004969	1,000000		0,983880
18	45/80-80	0,3	WMA -30°C	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000486	0,000172	0,000609	0,000172	0,000189	0,929274	1,000000	0,000179	0,984879	0,983880

Tab. Z. 27 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami modułu sztywności w pośrednim rozciąganiu w temperaturze 15°C mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.

Lp.	Rodzaj lepiszcza	Zawartość włókien	Technologia	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	50/70	0	HMA		0,000310	1,000000	0,019472	1,000000	0,000172	0,000687	0,000172	0,223483	0,000172	0,364167	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172
2	50/70	0	WMA -30°C	0,000310		0,002129	0,997054	0,000679	0,989728	1,000000	0,053551	0,726487	0,034489	0,548825	0,559439	0,264320	0,000172	0,009744	0,000184	0,079731	0,000172
3	50/70	0,15	HMA	1,000000	0,002129		0,129272	1,000000	0,000175	0,006497	0,000172	0,660061	0,000172	0,820312	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172
4	50/70	0,15	WMA -30°C	0,019472	0,997054	0,129272		0,050984	0,325207	0,999916	0,000715	0,999979	0,000471	0,999449	0,027457	0,006402	0,000172	0,000223	0,000172	0,001127	0,000172
5	50/70	0,3	HMA	1,000000	0,000679	1,000000	0,050984		0,000172	0,001946	0,000172	0,409853	0,000172	0,588480	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172
6	50/70	0,3	WMA -30°C	0,000172	0,989728	0,000175	0,325207	0,000172		0,935162	0,817736	0,034659	0,725394	0,015959	0,999935	0,992946	0,000172	0,440518	0,005605	0,888204	0,000224
7	45/80-55	0	HMA	0,000687	1,000000	0,006497	0,999916	0,001946	0,935162		0,020299	0,900423	0,012533	0,773389	0,336585	0,127880	0,000172	0,003237	0,000174	0,031658	0,000172
8	45/80-55	0	WMA -30°C	0,000172	0,053551	0,000172	0,000715	0,000172	0,817736	0,020299		0,000182	1,000000	0,000175	0,999712	1,000000	0,000432	1,000000	0,748883	1,000000	0,095754
9	45/80-55	0,15	HMA	0,223483	0,726487	0,660061	0,999979	0,409853	0,034659	0,900423	0,000182		0,000177	1,000000	0,001326	0,000364	0,000172	0,000173	0,000172	0,000191	0,000172
10	45/80-55	0,15	WMA -30°C	0,000172	0,034489	0,000172	0,000471	0,000172	0,725394	0,012533	1,000000	0,000177		0,000173	0,998539	0,999997	0,000645	1,000000	0,837091	1,000000	0,139761
11	45/80-55	0,3	HMA	0,364167	0,548825	0,820312	0,999449	0,588480	0,015959	0,773389	0,000175	1,000000	0,000173		0,000605	0,000234	0,000172	0,000172	0,000172	0,000178	0,000172
12	45/80-55	0,3	WMA -30°C	0,000172	0,559439	0,000172	0,027457	0,000172	0,999935	0,336585	0,999712	0,001326	0,998539	0,000605		1,000000	0,000173	0,970792	0,110622	0,999957	0,003096
13	45/80-80	0	HMA	0,000172	0,264320	0,000172	0,006402	0,000172	0,992946	0,127880	1,000000	0,000364	0,999997	0,000234	1,000000		0,000186	0,999121	0,302002	1,000000	0,014105
14	45/80-80	0	WMA -30°C	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000432	0,000172	0,000645	0,000172	0,000173	0,000186		0,002380	0,283915	0,000314	0,956359
15	45/80-80	0,15	HMA	0,000172	0,009744	0,000172	0,000223	0,000172	0,440518	0,003237	1,000000	0,000173	1,000000	0,000172	0,970792	0,999121	0,002380		0,971061	1,000000	0,328696
16	45/80-80	0,15	WMA -30°C	0,000172	0,000184	0,000172	0,000172	0,000172	0,005605	0,000174	0,748883	0,000172	0,837091	0,000172	0,110622	0,302002	0,283915	0,971061		0,650513	0,999454
17	45/80-80	0,3	HMA	0,000172	0,079731	0,000172	0,001127	0,000172	0,888204	0,031658	1,000000	0,000191	1,000000	0,000178	0,999957	1,000000	0,000314	1,000000	0,650513		0,065031
18	45/80-80	0,3	WMA -30°C	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000224	0,000172	0,095754	0,000172	0,139761	0,000172	0,003096	0,014105	0,956359	0,328696	0,999454	0,065031	

Tab. Z. 28 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami modułu sztywności w pośrednim rozciąganiu w temperaturze 20°C mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.

Lp.	Rodzaj lepiszcza	Zawartość włókien	Technologia	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	50/70	0	HMA		0,001707	0,040596	0,000491	0,984880	0,000172	0,499838	0,000172	0,997156	0,000172	0,204905	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172
2	50/70	0	WMA -30°C	0,001707		0,000172	1,000000	0,000174	0,298396	0,822017	0,001492	0,000177	0,000188	0,000172	0,046463	0,862902	0,000172	0,004304	0,000173	0,435341	0,000172
3	50/70	0,15	HMA	0,040596	0,000172		0,000172	0,795729	0,000172	0,000173	0,000172	0,651063	0,000172	1,000000	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172
4	50/70	0,15	WMA -30°C	0,000491	1,000000	0,000172		0,000172	0,569921	0,552465	0,005961	0,000173	0,000276	0,000172	0,135884	0,978889	0,000172	0,016476	0,000177	0,721903	0,000172
5	50/70	0,3	HMA	0,984880	0,000174	0,795729	0,000172		0,000172	0,010658	0,000172	1,000000	0,000172	0,988819	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172
6	50/70	0,3	WMA -30°C	0,000172	0,298396	0,000172	0,569921	0,000172		0,000640	0,934418	0,000172	0,303140	0,000172	0,999998	0,999990	0,000184	0,988285	0,068489	1,000000	0,000174
7	45/80-55	0	HMA	0,499838	0,822017	0,000173	0,552465	0,010658	0,000640		0,000172	0,021572	0,000172	0,000199	0,000188	0,011359	0,000172	0,000172	0,000172	0,001255	0,000172
8	45/80-55	0	WMA -30°C	0,000172	0,001492	0,000172	0,005961	0,000172	0,934418	0,000172		0,000172	0,999867	0,000172	0,999847	0,415859	0,017245	1,000000	0,967396	0,849059	0,004756
9	45/80-55	0,15	HMA	0,997156	0,000177	0,651063	0,000173	1,000000	0,000172	0,021572	0,000172		0,000172	0,958323	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172
10	45/80-55	0,15	WMA -30°C	0,000172	0,000188	0,000172	0,000276	0,000172	0,303140	0,000172	0,999867	0,000172		0,000172	0,816655	0,035714	0,270468	0,996538	1,000000	0,194373	0,112251
11	45/80-55	0,3	HMA	0,204905	0,000172	1,000000	0,000172	0,988819	0,000172	0,000199	0,000172	0,958323	0,000172		0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172
12	45/80-55	0,3	WMA -30°C	0,000172	0,046463	0,000172	0,135884	0,000172	0,999998	0,000188	0,999847	0,000172	0,816655	0,000172		0,975228	0,000541	0,999999	0,383272	0,999942	0,000241
13	45/80-80	0	HMA	0,000172	0,862902	0,000172	0,978889	0,000172	0,999990	0,011359	0,415859	0,000172	0,035714	0,000172	0,975228		0,000172	0,636098	0,004601	1,000000	0,000172
14	45/80-80	0	WMA -30°C	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000184	0,000172	0,017245	0,000172	0,270468	0,000172	0,000541	0,000172		0,006254	0,699155	0,000176	1,000000
15	45/80-80	0,15	HMA	0,000172	0,004304	0,000172	0,016476	0,000172	0,988285	0,000172	1,000000	0,000172	0,996538	0,000172	0,999999	0,636098	0,006254		0,871933	0,958002	0,001647
16	45/80-80	0,15	WMA -30°C	0,000172	0,000173	0,000172	0,000177	0,000172	0,068489	0,000172	0,967396	0,000172	1,000000	0,000172	0,383272	0,004601	0,699155	0,871933		0,037088	
17	45/80-80	0,3	HMA	0,000172	0,435341	0,000172	0,721903	0,000172	1,000000	0,001255	0,849059	0,000172	0,194373	0,000172	0,999942	1,000000	0,000176	0,958002	0,037088		0,000173
18	45/80-80	0,3	WMA -30°C	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000172	0,000174	0,000172	0,004756	0,000172	0,112251	0,000172	0,000241	0,000172	1,000000	0,001647	0,422487	0,000173	

Tab. Z. 29 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami zespolonego modułu sztywności w temperaturze -10°C referencyjnych mieszanek mineralno-asfaltowych.

Lp.	Rodzaj lepiszcza	Technologia	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	50/70	HMA		0,943900	1,000000	0,985861	0,831869	0,184900	0,011092	0,161073	0,572563
2	50/70	WMA-15	0,943900		0,935280	0,465833	0,204223	0,018538	0,001028	0,015725	0,090755
3	50/70	WMA-30	1,000000	0,935280		0,988677	0,847147	0,195488	0,011874	0,170615	0,592708
4	45/80-55	HMA	0,985861	0,465833	0,988677		0,999591	0,659296	0,074143	0,610658	0,977501
5	45/80-55	WMA-15	0,831869	0,204223	0,847147	0,999591		0,927859	0,204094	0,901952	0,999913
6	45/80-55	WMA-30	0,184900	0,018538	0,195488	0,659296	0,927859		0,858584	1,000000	0,995077
7	45/80-80	HMA	0,011092	0,001028	0,011874	0,074143	0,204094	0,858584		0,891072	0,405992
8	45/80-80	WMA-15	0,161073	0,015725	0,170615	0,610658	0,901952	1,000000	0,891072		0,990808
9	45/80-80	WMA-30	0,572563	0,090755	0,592708	0,977501	0,999913	0,995077	0,405992	0,990808	

Tab. Z. 30 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami zespolonego modułu sztywności w temperaturze 5°C referencyjnych mieszanek mineralno-asfaltowych.

Lp.	Rodzaj lepiszcza	Technologia	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	50/70	HMA		0,999978	0,999946	0,235590	0,464358	0,035811	0,000709	0,003431	0,008174
2	50/70	WMA-15	0,999978		1,000000	0,122366	0,271938	0,016475	0,000411	0,001610	0,003743
3	50/70	WMA-30	0,999946	1,000000		0,112327	0,252682	0,014956	0,000389	0,001473	0,003405
4	45/80-55	HMA	0,235590	0,122366	0,112327		0,999887	0,977251	0,120079	0,451342	0,705621
5	45/80-55	WMA-15	0,464358	0,271938	0,252682	0,999887		0,837997	0,048862	0,227192	0,424602
6	45/80-55	WMA-30	0,035811	0,016475	0,014956	0,977251	0,837997		0,556895	0,955853	0,997594
7	45/80-80	HMA	0,000709	0,000411	0,000389	0,120079	0,048862	0,556895		0,993145	0,924982
8	45/80-80	WMA-15	0,003431	0,001610	0,001473	0,451342	0,227192	0,955853	0,993145		0,999949
9	45/80-80	WMA-30	0,008174	0,003743	0,003405	0,705621	0,424602	0,997594	0,924982	0,999949	

Tab. Z. 31 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami zespolonego modułu sztywności w temperaturze 20°C referencyjnych mieszanek mineralno-asfaltowych.

Lp.	Rodzaj lepiszcza	Technologia	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	50/70	HMA		1,000000	0,998289	0,107867	0,027634	0,007275	0,022192	0,000719	0,001044
2	50/70	WMA-15	1,000000		0,999334	0,125910	0,032809	0,008669	0,026380	0,000831	0,001217
3	50/70	WMA-30	0,998289	0,999334		0,337845	0,105551	0,029806	0,086327	0,002552	0,003952
4	45/80-55	HMA	0,107867	0,125910	0,337845		0,998074	0,898331	0,994863	0,262081	0,361945
5	45/80-55	WMA-15	0,027634	0,032809	0,105551	0,998074		0,998856	1,000000	0,640278	0,766631
6	45/80-55	WMA-30	0,007275	0,008669	0,029806	0,898331	0,998856		0,999690	0,942881	0,981628
7	45/80-80	HMA	0,022192	0,026380	0,086327	0,994863	1,000000	0,999690		0,704656	0,822238
8	45/80-80	WMA-15	0,000719	0,000831	0,002552	0,262081	0,640278	0,942881	0,704656		1,000000
9	45/80-80	WMA-30	0,001044	0,001217	0,003952	0,361945	0,766631	0,981628	0,822238	1,000000	

Tab. Z. 32 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami zespolonego modułu sztywności w temperaturze 35°C referencyjnych mieszanek mineralno-asfaltowych.

Lp.	Rodzaj lepiszcza	Technologia	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	50/70	HMA		0,870511	0,102032	0,087957	0,000183	0,000173	0,000173	0,000173	0,000173
2	50/70	WMA-15	0,870511		0,742112	0,696223	0,000420	0,000173	0,000174	0,000173	0,000174
3	50/70	WMA-30	0,102032	0,742112		1,000000	0,009023	0,000174	0,000222	0,000180	0,000219
4	45/80-55	HMA	0,087957	0,696223	1,000000		0,010636	0,000175	0,000230	0,000182	0,000225
5	45/80-55	WMA-15	0,000183	0,000420	0,009023	0,010636		0,016770	0,280495	0,077806	0,260749
6	45/80-55	WMA-30	0,000173	0,000173	0,000174	0,000175	0,016770		0,832629	0,996280	0,854144
7	45/80-80	HMA	0,000173	0,000174	0,000222	0,000230	0,280495	0,832629		0,997226	1,000000
8	45/80-80	WMA-15	0,000173	0,000173	0,000180	0,000182	0,077806	0,996280	0,997226		0,998246
9	45/80-80	WMA-30	0,000173	0,000174	0,000219	0,000225	0,260749	0,854144	1,000000	0,998246	

Tab. Z. 33 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami zespolonego modułu sztywności w temperaturze -10°C mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien aramidowych.

Lp.	Rodzaj lepiszcza	Rodzaj włókien	Zawartość włókien	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	50/70	HMA	0		0,999993	0,999173	1,000000	0,980258	0,880846	0,999759	0,007456	0,722679	0,227866	0,006902	0,006412	0,004654	0,238376	0,999844	0,759577	0,707636	0,646426
2	50/70	HMA	0,05	0,999993		0,870005	0,999996	0,999998	0,999370	1,000000	0,059552	0,991004	0,710161	0,055648	0,052134	0,039206	0,725291	1,000000	0,994280	0,989365	0,980456
3	50/70	HMA	0,1	0,999173	0,870005		0,998800	0,416970	0,215871	0,744104	0,000402	0,117171	0,015652	0,000382	0,000365	0,000305	0,016699	0,764528	0,133484	0,111209	0,090105
4	50/70	WMA-30	0	1,000000	0,999996	0,998800		0,984250	0,895479	0,999848	0,008232	0,745122	0,243898	0,007624	0,007081	0,005154	0,254920	0,999904	0,780810	0,730491	0,670464
5	50/70	WMA-30	0,05	0,980258	0,999998	0,416970	0,984250		1,000000	1,000000	0,281804	0,999999	0,984103	0,267985	0,255212	0,205182	0,986391	1,000000	1,000000	0,999999	0,999993
6	50/70	WMA-30	0,1	0,880846	0,999370	0,215871	0,895479	1,000000		0,999972	0,510413	1,000000	0,999391	0,491757	0,474116	0,400777	0,999534	0,999953	1,000000	1,000000	1,000000
7	45/80-55	HMA	0	0,999759	1,000000	0,744104	0,999848	1,000000	0,999972		0,103179	0,998820	0,844779	0,096868	0,091147	0,069694	0,856200	1,000000	0,999372	0,998499	0,996468
8	45/80-55	HMA	0,05	0,007456	0,059552	0,000402	0,008232	0,281804	0,510413	0,103179		0,708170	0,990801	1,000000	1,000000	1,000000	0,989118	0,095601	0,669092	0,723202	0,779612
9	45/80-55	HMA	0,1	0,722679	0,991004	0,117171	0,745122	0,999999	1,000000	0,998820	0,708170		0,999990	0,690071	0,672519	0,595244	0,999993	0,998344	1,000000	1,000000	1,000000
10	45/80-55	WMA-30	0	0,227866	0,710161	0,015652	0,243898	0,984103	0,999391	0,844779	0,990801	0,999990		0,988801	0,986577	0,972838	1,000000	0,827801	0,999973	0,999993	0,999999
11	45/80-55	WMA-30	0,05	0,006902	0,055648	0,000382	0,007624	0,267985	0,491757	0,096868	1,000000	0,690071	0,988801		1,000000	1,000000	0,986833	0,089635	0,650453	0,705373	0,763171
12	45/80-55	WMA-30	0,1	0,006412	0,052134	0,000365	0,007081	0,255212	0,474116	0,091147	1,000000	0,672519	0,986577	1,000000		1,000000	0,984313	0,084275	0,632478	0,688043	0,747025
13	45/80-80	HMA	0	0,004654	0,039206	0,000305	0,005154	0,205182	0,400777	0,069694	1,000000	0,595244	0,972838	1,000000	1,000000		0,968992	0,064306	0,554496	0,611299	0,673751
14	45/80-80	HMA	0,05	0,238376	0,725291	0,016699	0,254920	0,986391	0,999534	0,856200	0,989118	0,999993	1,000000	0,986833	0,984313	0,968992		0,839876	0,999982	0,999996	0,999999
15	45/80-80	HMA	0,1	0,999844	1,000000	0,764528	0,999904	1,000000	0,999953	1,000000	0,095601	0,998344	0,827801	0,089635	0,084275	0,064306	0,839876		0,999098	0,997924	0,995322
16	45/80-80	WMA-30	0	0,759577	0,994280	0,133484	0,780810	1,000000	1,000000	0,999372	0,669092	1,000000	0,999973	0,650453	0,632478	0,554496	0,999982	0,999098		1,000000	1,000000
17	45/80-80	WMA-30	0,05	0,707636	0,989365	0,111209	0,730491	0,999999	1,000000	0,998499	0,723202	1,000000	0,999993	0,705373	0,688043	0,611299	0,999996	0,997924	1,000000		1,000000
18	45/80-80	WMA-30	0,1	0,646426	0,980456	0,090105	0,670464	0,999993	1,000000	0,996468	0,779612	1,000000	0,999999	0,763171	0,747025	0,673751	0,999999	0,995322	1,000000	1,000000	

Tab. Z. 34 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami zespolonego modułu sztywności w temperaturze 5°C mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien aramidowych.

Lp.	Rodzaj lepiszcza	Rodzaj włókien	Zawartość włókien	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	50/70	HMA	0		0,811567	0,999996	1,000000	0,963532	0,796119	0,251668	0,000252	0,708506	0,017183	0,000884	0,000561	0,000183	0,000235	0,057595	0,001817	0,000434	0,000240
2	50/70	HMA	0,05	0,811567		0,328029	0,499232	1,000000	0,999951	0,035509	1,000000	0,802031	0,170871	0,113408	0,009986	0,029302	0,970469	0,289905	0,086643	0,031433	
3	50/70	HMA	0,1	0,999996	0,328029		1,000000	0,593571	0,312601	0,047286	0,000173	0,240869	0,002104	0,000233	0,000198	0,000168	0,000172	0,007837	0,000321	0,000188	0,000172
4	50/70	WMA-30	0	1,000000	0,499232	1,000000		0,773041	0,480599	0,091671	0,000182	0,388296	0,004547	0,000321	0,000252	0,000170	0,000179	0,016653	0,000541	0,000227	0,000180
5	50/70	WMA-30	0,05	0,963532	1,000000	0,593571	0,773041		1,000000	0,995039	0,011832	1,000000	0,533417	0,067635	0,042301	0,003148	0,009640	0,832097	0,127112	0,031311	0,010387
6	50/70	WMA-30	0,1	0,796119	1,000000	0,312601	0,480599	1,000000		0,999968	0,038124	1,000000	0,817267	0,180927	0,120649	0,010782	0,031494	0,974799	0,304515	0,092469	0,033771
7	45/80-55	HMA	0	0,251668	0,999951	0,047286	0,091671	0,995039	0,999968		0,268483	0,999998	0,998998	0,692302	0,563058	0,100705	0,233572	0,999999	0,851418	0,483105	0,245878
8	45/80-55	HMA	0,05	0,000252	0,035509	0,000173	0,000182	0,011832	0,038124	0,268483		0,054642	0,929641	0,999999	1,000000	1,000000	1,000000	0,694525	0,999910	1,000000	1,000000
9	45/80-55	HMA	0,1	0,708506	1,000000	0,240869	0,388296	1,000000	1,000000	0,999998	0,054642		0,885875	0,240184	0,164326	0,015957	0,045411	0,990036	0,386919	0,127742	0,048590
10	45/80-55	WMA-30	0	0,017183	0,802031	0,002104	0,004547	0,533417	0,817267	0,998998	0,929641	0,885875		0,999489	0,996551	0,690817	0,904397	1,000000	0,999990	0,991158	0,914156
11	45/80-55	WMA-30	0,05	0,000884	0,170871	0,000233	0,000321	0,067635	0,180927	0,692302	0,999999	0,240184	0,999489		1,000000	0,998974	0,999997	0,974744	1,000000	1,000000	0,999998
12	45/80-55	WMA-30	0,1	0,000561	0,113408	0,000198	0,000252	0,042301	0,120649	0,563058	1,000000	0,164326	0,996551	1,000000		0,999896	1,000000	0,933474	1,000000	1,000000	1,000000
13	45/80-80	HMA	0	0,000183	0,009986	0,000168	0,000170	0,003148	0,010782	0,100705	1,000000	0,015957	0,690817	0,998974	0,999896		1,000000	0,378928	0,989065	0,999983	1,000000
14	45/80-80	HMA	0,05	0,000235	0,029302	0,000172	0,000179	0,009640	0,031494	0,233572	1,000000	0,045411	0,904397	0,999997	1,000000	1,000000		0,644753	0,999757	1,000000	1,000000
15	45/80-80	HMA	0,1	0,057595	0,970469	0,007837	0,016653	0,832097	0,974799	0,999999	0,694525	0,990036	1,000000	0,974744	0,933474	0,378928	0,644753		0,996414	0,892629	0,663040
16	45/80-80	WMA-30	0	0,001817	0,289905	0,000321	0,000541	0,127112	0,304515	0,851418	0,999910	0,386919	0,999990	1,000000	1,000000	0,989065	0,999757	0,996414		1,000000	0,999829
17	45/80-80	WMA-30	0,05	0,000434	0,086643	0,000188	0,000227	0,031311	0,092469	0,483105	1,000000	0,127742	0,991158	1,000000	1,000000	0,999983	1,000000	0,892629	1,000000		1,000000
18	45/80-80	WMA-30	0,1	0,000240	0,031433	0,000172	0,000180	0,010387	0,033771	0,245878	1,000000	0,048590	0,914156	0,999998	1,000000	1,000000	1,000000	0,663040	0,999829	1,000000	

Tab. Z. 35 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami zespolonego modułu sztywności w temperaturze 20°C mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien aramidowych.

Lp.	Rodzaj lepiszcza	Rodzaj włókien	Zawartość włókien	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	50/70	HMA	0		0,070144	1,000000	0,999917	0,446699	0,993208	0,012310	0,000231	0,115964	0,000212	0,000178	0,000221	0,000622	0,000171	0,004405	0,000168	0,000168	0,000168
2	50/70	HMA	0,05	0,070144		0,015089	0,448198	0,999920	0,727575	0,999999	0,576466	1,000000	0,494436	0,279004	0,534728	0,922698	0,145580	0,999683	0,030076	0,043895	0,013805
3	50/70	HMA	0,1	1,000000	0,015089		0,976622	0,151408	0,851043	0,002316	0,000174	0,026964	0,000172	0,000169	0,000173	0,000236	0,000168	0,000868	0,000168	0,000168	0,000167
4	50/70	WMA-30	0	0,999917	0,448198	0,976622		0,956933	1,000000	0,129556	0,001392	0,595164	0,001014	0,000437	0,001186	0,007841	0,000263	0,054772	0,000176	0,000183	0,000170
5	50/70	WMA-30	0,05	0,446699	0,999920	0,151408	0,956933		0,997557	0,964866	0,109683	0,999998	0,083173	0,034321	0,095530	0,369008	0,014352	0,838062	0,002278	0,003452	0,001042
6	50/70	WMA-30	0,1	0,993208	0,727575	0,851043	1,000000	0,997557		0,295815	0,004405	0,850374	0,003142	0,001175	0,003711	0,024251	0,000528	0,143158	0,000213	0,000238	0,000181
7	45/80-55	HMA	0	0,012310	0,999999	0,002316	0,129556	0,964866	0,295815		0,938300	0,999961	0,898241	0,706574	0,919664	0,999351	0,483949	1,000000	0,149494	0,202773	0,077512
8	45/80-55	HMA	0,05	0,000231	0,576466	0,000174	0,001392	0,109683	0,004405	0,938300		0,430634	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	0,999990	0,993208	0,984804	0,994833	0,927685
9	45/80-55	HMA	0,1	0,115964	1,000000	0,026964	0,595164	0,999998	0,850374	0,999961	0,430634		0,356774	0,183728	0,392429	0,830997	0,089671	0,996939	0,016917	0,025088	0,007595
10	45/80-55	WMA-30	0	0,000212	0,494436	0,000172	0,001014	0,083173	0,003142	0,898241	1,000000	0,356774		1,000000	1,000000	0,999997	0,999999	0,984106	0,993567	0,998227	0,958910
11	45/80-55	WMA-30	0,05	0,000178	0,279004	0,000169	0,000437	0,034321	0,001175	0,706574	1,000000	0,183728	1,000000		1,000000	0,999371	1,000000	0,901945	0,999838	0,999982	0,996306
12	45/80-55	WMA-30	0,1	0,000221	0,534728	0,000173	0,001186	0,095530	0,003711	0,919664	1,000000	0,392429	1,000000	1,000000		0,999999	0,999997	0,989365	0,989972	0,996914	0,944992
13	45/80-80	HMA	0	0,000622	0,922698	0,000236	0,007841	0,369008	0,024251	0,999351	1,000000	0,830997	0,999997	0,999371	0,999999		0,988327	0,999997	0,777744	0,856556	0,587243
14	45/80-80	HMA	0,05	0,000171	0,145580	0,000168	0,000263	0,014352	0,000528	0,483949	0,999990	0,089671	0,999999	1,000000	0,999997	0,988327		0,732527	0,999999	1,000000	0,999902
15	45/80-80	HMA	0,1	0,004405	0,999683	0,000868	0,054772	0,838062	0,143158	1,000000	0,993208	0,996939	0,984106	0,901945	0,989365	0,999997	0,732527		0,306551	0,391864	0,175768
16	45/80-80	WMA-30	0	0,000168	0,030076	0,000168	0,000176	0,002278	0,000213	0,149494	0,984804	0,016917	0,993567	0,999838	0,989972	0,777744	0,999999	0,306551		1,000000	1,000000
17	45/80-80	WMA-30	0,05	0,000168	0,043895	0,000168	0,000183	0,003452	0,000238	0,202773	0,994833	0,025088	0,998227	0,999982	0,996914	0,856556	1,000000	0,391864	1,000000		1,000000
18	45/80-80	WMA-30	0,1	0,000168	0,013805	0,000167	0,000170	0,001042	0,000181	0,077512	0,927685	0,007595	0,958910	0,996306	0,944992	0,587243	0,999902	0,175768	1,000000	1,000000	

Tab. Z. 36 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami zespolonego modułu sztywności w temperaturze 35°C mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien aramidowych.

Lp.	Rodzaj lepiszcza	Rodzaj włókien	Zawartość włókien	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	50/70	HMA	0		0,314952	0,052188	0,932981	0,025630	0,191006	0,918865	0,000944	0,999960	0,000177	0,000181	0,000758	0,000354	0,000944	1,000000	0,000339	0,000199	0,000190
2	50/70	HMA	0,05	0,314952		0,000176	0,999580	0,999237	1,000000	0,999756	0,626216	0,867207	0,056395	0,071750	0,565944	0,336222	0,626216	0,424079	0,321437	0,122370	0,097875
3	50/70	HMA	0,1	0,052188	0,000176		0,000513	0,000168	0,000171	0,000469	0,000167	0,004808	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,032791	0,000167	0,000167	0,000167
4	50/70	WMA-30	0	0,932981	0,999580	0,000513		0,719882	0,994339	1,000000	0,096768	0,999978	0,003202	0,004234	0,078848	0,032512	0,096768	0,973533	0,030359	0,008112	0,006149
5	50/70	WMA-30	0,05	0,025630	0,999237	0,000168	0,719882		0,999978	0,748000	0,998126	0,206086	0,507132	0,575055	0,995862	0,956384	0,998126	0,041207	0,950285	0,730415	0,665503
6	50/70	WMA-30	0,1	0,191006	1,000000	0,000171	0,994339	0,999978		0,996087	0,796058	0,718821	0,105927	0,132070	0,743900	0,503775	0,796058	0,271877	0,485980	0,213605	0,174879
7	45/80-55	HMA	0	0,918865	0,999756	0,000469	1,000000	0,748000	0,996087		0,107122	0,999955	0,003629	0,004808	0,087561	0,036468	0,107122	0,966042	0,034073	0,009180	0,006968
8	45/80-55	HMA	0,05	0,000944	0,626216	0,000167	0,096768	0,998126	0,796058	0,107122		0,995919	0,998350	1,000000	1,000000	1,000000	0,001529	1,000000	0,999889	0,999604	
9	45/80-55	HMA	0,1	0,999960	0,867207	0,004808	0,999978	0,206086	0,718821	0,999955	0,010920		0,000382	0,000469	0,008571	0,003143	0,010920	0,999999	0,002919	0,000788	0,000621
10	45/80-55	WMA-30	0	0,000177	0,056395	0,000167	0,003202	0,507132	0,105927	0,003629	0,995919	0,000382		1,000000	0,998155	0,999980	0,995919	0,000186	0,999987	1,000000	1,000000
11	45/80-55	WMA-30	0,05	0,000181	0,071750	0,000167	0,004234	0,575055	0,132070	0,004808	0,998350	0,000469	1,000000		0,999340	0,999997	0,998350	0,000194	0,999998	1,000000	1,000000
12	45/80-55	WMA-30	0,1	0,000758	0,565944	0,000167	0,078848	0,995862	0,743900	0,087561	1,000000	0,008571	0,998155	0,999340		1,000000	1,000000	0,001211	1,000000	0,999969	0,999869
13	45/80-80	HMA	0	0,000354	0,336222	0,000167	0,032512	0,956384	0,503775	0,036468	1,000000	0,003143	0,999980	0,999997	1,000000		1,000000	0,000509	1,000000	1,000000	1,000000
14	45/80-80	HMA	0,05	0,000944	0,626216	0,000167	0,096768	0,998126	0,796058	0,107122	1,000000	0,010920	0,995919	0,998350	1,000000	1,000000		0,001529	1,000000	0,999889	0,999604
15	45/80-80	HMA	0,1	1,000000	0,424079	0,032791	0,973533	0,041207	0,271877	0,966042	0,001529	0,999999	0,000186	0,000194	0,001211	0,000509	0,001529		0,000483	0,000234	0,000217
16	45/80-80	WMA-30	0	0,000339	0,321437	0,000167	0,030359	0,950285	0,485980	0,034073	1,000000	0,002919	0,999987	0,999998	1,000000	1,000000	1,000000	0,000483		1,000000	1,000000
17	45/80-80	WMA-30	0,05	0,000199	0,122370	0,000167	0,008112	0,730415	0,213605	0,009180	0,999889	0,000788	1,000000	1,000000	0,999969	1,000000	0,999889	0,000234	1,000000		1,000000
18	45/80-80	WMA-30	0,1	0,000190	0,097875	0,000167	0,006149	0,665503	0,174879	0,006968	0,999604	0,000621	1,000000	1,000000	0,999869	1,000000	0,999604	0,000217	1,000000	1,000000	

Tab. Z. 37 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami zespolonego modułu sztywności w temperaturze -10°C mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.

Lp.	Rodzaj lepiszcza	Rodzaj włókien	Zawartość włókien	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	50/70	HMA	0		0,999920	0,880149	1,000000	1,000000	0,079966	0,999918	0,999989	0,022496	0,347868	0,685481	0,616988	0,012633	1,000000	0,139209	0,851246	0,158778	0,985478
2	50/70	HMA	0,15	0,999920		0,999902	0,999950	0,999999	0,483298	1,000000	1,000000	0,205513	0,910416	0,995691	0,990494	0,131610	1,000000	0,650574	0,999773	0,691836	1,000000
3	50/70	HMA	0,3	0,880149	0,999902		0,893718	0,958988	0,969789	0,999904	0,999507	0,779322	0,999975	1,000000	1,000000	0,642378	0,996876	0,994105	1,000000	0,996466	1,000000
4	50/70	WMA-30	0	1,000000	0,999950	0,893718		1,000000	0,086373	0,999949	0,999994	0,024542	0,367102	0,707019	0,639426	0,013818	1,000000	0,149367	0,866657	0,170046	0,988375
5	50/70	WMA-30	0,15	1,000000	0,999999	0,958988	1,000000		0,140465	0,999999	1,000000	0,042920	0,505875	0,834146	0,778326	0,024713	1,000000	0,231603	0,944040	0,260163	0,998014
6	50/70	WMA-30	0,3	0,079966	0,483298	0,969789	0,086373	0,140465		0,484180	0,400609	1,000000	0,999998	0,997531	0,999101	0,999998	0,296047	1,000000	0,979121	1,000000	0,822247
7	45/80-55	HMA	0	0,999918	1,000000	0,999904	0,999949	0,999999	0,484180		1,000000	0,206051	0,910888	0,995738	0,990584	0,131990	1,000000	0,651469	0,999776	0,692705	1,000000
8	45/80-55	HMA	0,15	0,999989	1,000000	0,999507	0,999994	1,000000	0,400609	1,000000		0,158275	0,857381	0,988556	0,977938	0,098966	1,000000	0,563121	0,999010	0,605588	1,000000
9	45/80-55	HMA	0,3	0,022496	0,205513	0,779322	0,024542	0,042920	1,000000	0,206051	0,158275		0,997730	0,933994	0,959343	1,000000	0,106406	0,999996	0,815073	0,999989	0,496454
10	45/80-55	WMA-30	0	0,347868	0,910416	0,999975	0,367102	0,505875	0,999998	0,910888	0,857381	0,997730		1,000000	1,000000	0,987432	0,758480	1,000000	0,999992	1,000000	0,996063
11	45/80-55	WMA-30	0,15	0,685481	0,995691	1,000000	0,707019	0,834146	0,997531	0,995738	0,988556	0,933994	1,000000		1,000000	0,850881	0,965163	0,999836	1,000000	0,999930	0,999994
12	45/80-55	WMA-30	0,3	0,616988	0,990494	1,000000	0,639426	0,778326	0,999101	0,990584	0,977938	0,959343	1,000000	1,000000		0,895437	0,942242	0,999961	1,000000	0,999986	0,999968
13	45/80-80	HMA	0	0,012633	0,131610	0,642378	0,013818	0,024713	0,999998	0,131990	0,098966	1,000000	0,987432	0,850881	0,895437		0,064456	0,999884	0,684981	0,999741	0,360406
14	45/80-80	HMA	0,15	1,000000	1,000000	0,996876	1,000000	0,296047	1,000000	1,000000	0,106406	0,758480	0,965163	0,942242	0,064456		0,440747		0,994662	0,481535	0,999984
15	45/80-80	HMA	0,3	0,139209	0,650574	0,994105	0,149367	0,231603	1,000000	0,651469	0,563121	0,999996	1,000000	0,999836	0,999961	0,999884	0,440747		0,996517	1,000000	0,926361
16	45/80-80	WMA-30	0	0,851246	0,999773	1,000000	0,866657	0,944040	0,979121	0,999776	0,999010	0,815073	0,999992	1,000000	1,000000	0,684981	0,994662	0,996517		0,998021	1,000000
17	45/80-80	WMA-30	0,15	0,158778	0,691836	0,996466	0,170046	0,260163	1,000000	0,692705	0,605588	0,999989	1,000000	0,999930	0,999986	0,999741	0,481535	1,000000	0,998021		0,944139
18	45/80-80	WMA-30	0,3	0,985478	1,000000	1,000000	0,988375	0,998014	0,822247	1,000000	1,000000	0,496454	0,996063	0,999994	0,999968	0,360406	0,999984	0,926361	1,000000	0,944139	

Tab. Z. 38 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami zespolonego modułu sztywności w temperaturze 5°C mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.

Lp.	Rodzaj lepiszcza	Rodzaj włókien	Zawartość włókien	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	50/70	HMA	0		0,999794	0,276860	1,000000	0,993657	0,018998	0,532567	0,675792	0,001713	0,090041	0,042838	0,262251	0,000639	0,677892	0,006885	0,016185	0,003238	0,090953
2	50/70	HMA	0,15	0,999794		0,886558	0,989793	1,000000	0,207969	0,986222	0,997321	0,027527	0,565010	0,365168	0,873896	0,009770	0,997402	0,093982	0,184478	0,049346	0,567829
3	50/70	HMA	0,3	0,276860	0,886558		0,122708	0,977055	0,998837	1,000000	1,000000	0,813770	1,000000	0,999980	1,000000	0,567829	1,000000	0,977861	0,997897	0,915734	1,000000
4	50/70	WMA-30	0	1,000000	0,989793	0,122708		0,931007	0,006284	0,285493	0,405289	0,000612	0,033496	0,014856	0,114893	0,000297	0,407261	0,002218	0,005316	0,001080	0,033851
5	50/70	WMA-30	0,15	0,993657	1,000000	0,977055	0,931007		0,381423	0,999268	0,999950	0,064707	0,786575	0,587576	0,972728	0,024475	0,999953	0,195577	0,346204	0,110438	0,788935
6	50/70	WMA-30	0,3	0,018998	0,207969	0,998837	0,006284	0,381423		0,970454	0,918630	0,999972	1,000000	1,000000	0,999147	0,997141	0,917565	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000
7	45/80-55	HMA	0	0,532567	0,986222	1,000000	0,285493	0,999268	0,970454		1,000000	0,542921	0,999890	0,996733	1,000000	0,303442	1,000000	0,853140	0,959319	0,698295	0,999896
8	45/80-55	HMA	0,15	0,675792	0,997321	1,000000	0,405289	0,999950	0,918630	1,000000		0,404305	0,998691	0,984035	0,999999	0,205009	1,000000	0,735745	0,896966	0,555906	0,998748
9	45/80-55	HMA	0,3	0,001713	0,027527	0,813770	0,000612	0,064707	0,999972	0,542921	0,404305		0,982994	0,998552	0,829505	1,000000	0,402341	1,000000	0,999990	1,000000	0,982545
10	45/80-55	WMA-30	0	0,090041	0,565010	1,000000	0,033496	0,786575	1,000000	0,999890	0,998691	0,982994		1,000000	1,000000	0,888247	0,998649	0,999838	0,999999	0,996985	1,000000
11	45/80-55	WMA-30	0,15	0,042838	0,365168	0,999980	0,014856	0,587576	1,000000	0,996733	0,984035	0,998552	1,000000		0,999988	0,972875	0,983707	0,999999	1,000000	0,999903	1,000000
12	45/80-55	WMA-30	0,3	0,262251	0,873896	1,000000	0,114893	0,972728	0,999147	1,000000	0,999999	0,829505	1,000000	0,999988		0,588227	0,999999	0,981546	0,998421	0,925538	1,000000
13	45/80-80	HMA	0	0,000639	0,009770	0,567829	0,000297	0,024475	0,997141	0,303442	0,205009	1,000000	0,888247	0,972875	0,588227		0,203732	0,999966	0,998371	1,000000	0,865558
14	45/80-80	HMA	0,15	0,677892	0,997402	1,000000	0,407261	0,999953	0,917565	1,000000	1,000000	0,402341	0,998649	0,983707	0,999999	0,203732		0,733762	0,895730	0,553741	0,998703
15	45/80-80	HMA	0,3	0,006885	0,093982	0,977861	0,002218	0,195577	1,000000	0,853140	0,735745	1,000000	0,999838	0,999999	0,981546	0,999966	0,733762		1,000000	1,000000	0,999829
16	45/80-80	WMA-30	0	0,016185	0,184478	0,997897	0,005316	0,346204	1,000000	0,959319	0,896966	0,999990	0,999999	1,000000	0,998421	0,998371	0,895730	1,000000		1,000000	0,999999
17	45/80-80	WMA-30	0,15	0,003238	0,049346	0,915734	0,001080	0,110438	1,000000	0,698295	0,555906	1,000000	0,996985	0,999903	0,925538	1,000000	0,553741	1,000000	1,000000		0,996874
18	45/80-80	WMA-30	0,3	0,090953	0,567829	1,000000	0,033851	0,788935	1,000000	0,999896	0,998748	0,982545	1,000000	1,000000	1,000000	0,886558	0,998703	0,999829	0,999999	0,996874	

Tab. Z. 39 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami zespolonego modułu sztywności w temperaturze 20°C mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.

Lp.	Rodzaj lepiszcza	Rodzaj włókien	Zawartość włókien	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	50/70	HMA	0		0,999590	0,448969	0,999989	0,822203	0,121536	0,054651	0,659282	0,006661	0,000751	0,000631	0,009466	0,004226	0,006038	0,000495	0,000179	0,000190	0,000943
2	50/70	HMA	0,15	0,999590		0,978682	1,000000	0,999909	0,692962	0,461751	0,998012	0,103980	0,013683	0,011220	0,137650	0,071295	0,095995	0,008248	0,000590	0,000965	0,017513
3	50/70	HMA	0,3	0,448969	0,978682		0,923584	1,000000	0,999999	0,999675	1,000000	0,901634	0,415242	0,370704	0,942461	0,828682	0,887778	0,307332	0,035281	0,058520	0,474308
4	50/70	WMA-30	0	0,999989	1,000000	0,923584		0,998272	0,522244	0,310116	0,985317	0,057446	0,006848	0,005590	0,077934	0,038352	0,052701	0,004082	0,000355	0,000531	0,008812
5	50/70	WMA-30	0,15	0,822203	0,999909	1,000000	0,998272		0,996370	0,963063	1,000000	0,566415	0,142952	0,122072	0,653105	0,457041	0,542360	0,094948	0,007493	0,013073	0,173055
6	50/70	WMA-30	0,3	0,121536	0,692962	0,999999	0,522244	0,996370		1,000000	0,999779	0,999106	0,859406	0,823256	0,999796	0,995831	0,998716	0,759828	0,181159	0,268050	0,898277
7	45/80-55	HMA	0	0,054651	0,461751	0,999675	0,310116	0,963063	1,000000		0,993281	0,999992	0,967720	0,952967	0,999999	0,999899	0,999986	0,921898	0,342093	0,467268	0,981001
8	45/80-55	HMA	0,15	0,659282	0,998012	1,000000	0,985317	1,000000	0,999779	0,993281		0,743704	0,244544	0,212726	0,817317	0,637710	0,721628	0,169809	0,015546	0,026677	0,288896
9	45/80-55	HMA	0,3	0,006661	0,103980	0,901634	0,057446	0,566415	0,999106	0,999992	0,743704		0,999991	0,999969	1,000000	1,000000	1,000000	0,999843	0,843855	0,926001	0,999998
10	45/80-55	WMA-30	0	0,000751	0,013683	0,415242	0,006848	0,142952	0,859406	0,967720	0,244544	0,999991		1,000000	0,999929	1,000000	0,999995	1,000000	0,998751	0,999885	1,000000
11	45/80-55	WMA-30	0,15	0,000631	0,011220	0,370704	0,005590	0,122072	0,823256	0,952967	0,212726	0,999969	1,000000		0,999808	0,999998	0,999982	1,000000	0,999424	0,999960	1,000000
12	45/80-55	WMA-30	0,3	0,009466	0,137650	0,942461	0,077934	0,653105	0,999796	0,999999	0,817317	1,000000	0,999929	0,999808		1,000000	1,000000	0,999278	0,774835	0,878732	0,999983
13	45/80-80	HMA	0	0,004226	0,071295	0,828682	0,038352	0,457041	0,995831	0,999899	0,637710	1,000000	1,000000	0,999998	1,000000		1,000000	0,999986	0,912562	0,965998	1,000000
14	45/80-80	HMA	0,15	0,006038	0,095995	0,887778	0,052701	0,542360	0,998716	0,999986	0,721628	1,000000	0,999995	0,999982	1,000000	1,000000		0,999902	0,860707	0,936531	0,999999
15	45/80-80	HMA	0,3	0,000495	0,008248	0,307332	0,004082	0,094948	0,759828	0,921898	0,169809	0,999843	1,000000	1,000000	0,999278	0,999986	0,999902		0,999853	0,999994	1,000000
16	45/80-80	WMA-30	0	0,000179	0,000590	0,035281	0,000355	0,007493	0,181159	0,342093	0,015546	0,843855	0,998751	0,999424	0,774835	0,912562	0,860707	0,999853		1,000000	0,997011
17	45/80-80	WMA-30	0,15	0,000190	0,000965	0,058520	0,000531	0,013073	0,268050	0,467268	0,026677	0,926001	0,999885	0,999960	0,878732	0,965998	0,936531	0,999994	1,000000		0,999632
18	45/80-80	WMA-30	0,3	0,000943	0,017513	0,474308	0,008812	0,173055	0,898277	0,981001	0,288896	0,999998	1,000000	1,000000	0,999983	1,000000	0,999999	1,000000	0,997011	0,999632	

Tab. Z. 40 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami zespolonego modułu sztywności w temperaturze 35°C mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.

Lp.	Rodzaj lepiszcza	Rodzaj włókien	Zawartość włókien	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
1	50/70	HMA	0		0,741305	1,000000	0,960889	0,063300	0,000363	0,951710	0,999047	0,785112	0,000217	0,001594	0,073739	0,000761	0,780610	0,016787	0,000718	0,000866	0,305667	
2	50/70	HMA	0,15	0,741305		0,887229	0,037460	0,000287	0,000168	0,033653	0,121432	0,011424	0,000168	0,000168	0,000314	0,000168	0,011184	0,000187	0,000168	0,000168	0,001425	
3	50/70	HMA	0,3	1,000000	0,887229		0,871974	0,031570	0,000249	0,852630	0,989324	0,605791	0,000183	0,000776	0,037165	0,000410	0,600471	0,007841	0,000392	0,000453	0,180401	
4	50/70	WMA-30	0	0,960889	0,037460	0,871974		0,857793	0,025159	1,000000	1,000000	1,000000	0,007479	0,117737	0,885948	0,060500	1,000000	0,536623	0,056943	0,068466	0,998316	
5	50/70	WMA-30	0,15	0,063300	0,000287	0,031570	0,857793		0,830197	0,876737	0,553608	0,982272	0,546168	0,992742	1,000000	0,956978	0,983123	1,000000	0,951343	0,967099	0,999997	
6	50/70	WMA-30	0,3	0,000363	0,000168	0,000249	0,025159	0,830197		0,028095	0,006599	0,077065	1,000000	1,000000	0,795752	1,000000	0,078488	0,983786	1,000000	1,000000	0,354275	
7	45/80-55	HMA	0	0,951710	0,033653	0,852630	1,000000	0,876737	0,028095		1,000000	1,000000	0,008398	0,129111	0,902524	0,066953	1,000000	0,565315	0,063062	0,075663	0,998898	
8	45/80-55	HMA	0,15	0,999047	0,121432	0,989324	1,000000	0,553608	0,006599	1,000000		0,999920		0,001888	0,036149	0,597277	0,017070	0,999910	0,245418	0,015949	0,019579	0,948341
9	45/80-55	HMA	0,3	0,785112	0,011424	0,605791	1,000000	0,982272	0,077065	1,000000	0,999920		0,025159	0,289387	0,988360	0,166555	1,000000	0,822902	0,158140	0,185015	0,999997	
10	45/80-55	WMA-30	0	0,000217	0,000168	0,000183	0,007479	0,546168	1,000000	0,008398	0,001888	0,025159		0,999518	0,502940	0,999992	0,025676	0,864279	0,999995	0,999981	0,152053	
11	45/80-55	WMA-30	0,15	0,001594	0,000168	0,000776	0,117737	0,992742	1,000000	0,129111	0,036149	0,289387	0,999518		0,988484	1,000000	0,293404	0,999980	1,000000	1,000000	0,766867	
12	45/80-55	WMA-30	0,3	0,073739	0,000314	0,037165	0,885948	1,000000	0,795752	0,902524	0,597277	0,988360	0,502940	0,988484		0,941537	0,988970	1,000000	0,934593	0,954220	0,999999	
13	45/80-80	HMA	0	0,000761	0,000168	0,000410	0,060500	0,956978	1,000000	0,066953	0,017070	0,166555	0,999992	1,000000	0,941537		0,169256	0,999107	1,000000	1,000000	0,579165	
14	45/80-80	HMA	0,15	0,780610	0,011184	0,600471	1,000000	0,983123	0,078488	1,000000	0,999910	1,000000	0,025676	0,293404	0,988970	0,169256		0,826974	0,160733	0,188039	0,999997	
15	45/80-80	HMA	0,3	0,016787	0,000187	0,007841	0,536623	1,000000	0,983786	0,565315	0,245418	0,822902	0,864279	0,999980	1,000000	0,999107	0,826974		0,998844	0,999492	0,996907	
16	45/80-80	WMA-30	0	0,000718	0,000168	0,000392	0,056943	0,951343	1,000000	0,063062	0,015949	0,158140	0,999995	1,000000	0,934593	1,000000	0,160733	0,998844		1,000000	0,562121	
17	45/80-80	WMA-30	0,15	0,000866	0,000168	0,000453	0,068466	0,967099	1,000000	0,075663	0,019579	0,185015	0,999981	1,000000	0,954220	1,000000	0,188039	0,999492	1,000000		0,614293	
18	45/80-80	WMA-30	0,3	0,305667	0,001425	0,180401	0,998316	0,999997	0,354275	0,998898	0,948341	0,999997	0,152053	0,766867	0,999999	0,579165	0,999997	0,996907	0,562121	0,614293		

Tab. Z. 41 Ocena istotności różnic modułów pełzania referencyjnych mieszanek mineralno-asfaltowych.

Lp.	Rodzaj lepiszcza	Technologia	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	50/70	HMA		0,999365	0,783431	0,998089	0,932385	0,596691	0,032813	0,143838	0,000193
2	50/70	WMA-15	0,999365		0,979247	1,000000	0,998922	0,906260	0,104800	0,373238	0,000237
3	50/70	WMA-30	0,783431	0,979247		0,989099	0,999985	0,999994	0,502948	0,912886	0,000664
4	45/80-55	HMA	0,998089	1,000000	0,989099		0,999680	0,936846	0,125749	0,426730	0,000249
5	45/80-55	WMA-15	0,932385	0,998922	0,999985	0,999680		0,998377	0,310159	0,748676	0,000401
6	45/80-55	WMA-30	0,596691	0,906260	0,999994	0,936846	0,998377		0,696100	0,981582	0,001150
7	45/80-80	HMA	0,032813	0,104800	0,502948	0,125749	0,310159	0,696100		0,996130	0,039537
8	45/80-80	WMA-15	0,143838	0,373238	0,912886	0,426730	0,748676	0,981582	0,996130		0,008136
9	45/80-80	WMA-30	0,000193	0,000237	0,000664	0,000249	0,000401	0,001150	0,039537	0,008136	

Tab. Z. 42 Ocena istotności różnic procentowej wartości odprężeń referencyjnych mieszanek mineralno-asfaltowych.

Lp.	Rodzaj lepiszcza	Technologia	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	50/70	HMA		0,976585	0,963651	0,920371	0,376801	0,065293	0,007257	0,047508	0,000175
2	50/70	WMA-15	0,976585		1,000000	0,999999	0,921636	0,374689	0,058395	0,296162	0,000197
3	50/70	WMA-30	0,963651	1,000000		1,000000	0,944216	0,418029	0,068372	0,334022	0,000200
4	45/80-55	HMA	0,920371	0,999999	1,000000		0,977139	0,519039	0,095330	0,425087	0,000216
5	45/80-55	WMA-15	0,376801	0,921636	0,944216	0,977139		0,976031	0,482653	0,945361	0,000488
6	45/80-55	WMA-30	0,065293	0,374689	0,418029	0,519039	0,976031		0,967846	1,000000	0,003036
7	45/80-80	HMA	0,007257	0,058395	0,068372	0,095330	0,482653	0,967846		0,987879	0,027864
8	45/80-80	WMA-15	0,047508	0,296162	0,334022	0,425087	0,945361	1,000000	0,987879		0,004208
9	45/80-80	WMA-30	0,000175	0,000197	0,000200	0,000216	0,000488	0,003036	0,027864	0,004208	

Tab. Z. 43 Ocena istotności różnic modułów pełzania mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien aramidowych.

Lp.	Rodzaj lepiszcza	Zawartość włókien	Technologia	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	50/70	0	HMA		0,955085	1,000000	1,000000	1,000000	0,998871	0,999998	0,833287	0,994046	0,939834	1,000000	1,000000	0,034978	0,000168	0,095963	0,001241	0,006415	0,190728
2	50/70	0	WMA -30°C	0,955085		0,829854	0,974549	0,952512	0,312319	0,999921	1,000000	1,000000	1,000000	0,999738	0,997241	0,741534	0,000245	0,935081	0,101314	0,332123	0,989216
3	50/70	0,05	HMA	1,000000	0,829854		1,000000	1,000000	0,999988	0,999609	0,624875	0,950804	0,796688	0,999876	0,999997	0,014288	0,000168	0,042425	0,000542	0,002479	0,091648
4	50/70	0,05	WMA -30°C	1,000000	0,974549	1,000000		1,000000	0,996885	1,000000	0,882636	0,997578	0,964232	1,000000	1,000000	0,045696	0,000168	0,121669	0,001644	0,008598	0,234537
5	50/70	0,1	HMA	1,000000	0,952512	1,000000	1,000000		0,998995	0,999997	0,827470	0,993491	0,936689	1,000000	1,000000	0,033983	0,000168	0,093515	0,001205	0,006218	0,186348
6	50/70	0,1	WMA -30°C	0,998871	0,312319	0,999988	0,996885	0,998995		0,885315	0,165691	0,510211	0,280263	0,919187	0,972474	0,001474	0,000167	0,004655	0,000191	0,000347	0,011282
7	45/80-55	0	HMA	0,999998	0,999921	0,999609	1,000000	0,999997	0,885315		0,996706	1,000000	0,999818	1,000000	1,000000	0,186885	0,000170	0,394258	0,009183	0,044338	0,605833
8	45/80-55	0	WMA -30°C	0,833287	1,000000	0,624875	0,882636	0,827470	0,165691	0,996706		1,000000	1,000000	0,993091	0,970491	0,908168	0,000386	0,990188	0,205382	0,542552	0,999461
9	45/80-55	0,05	HMA	0,994046	1,000000	0,950804	0,997578	0,993491	0,510211	1,000000	1,000000		1,000000	0,999999	0,999930	0,527395	0,000191	0,797608	0,047171	0,182717	0,934643
10	45/80-55	0,05	WMA -30°C	0,939834	1,000000	0,796688	0,964232	0,936689	0,280263	0,999818	1,000000	1,000000		0,999457	0,995334	0,778564	0,000261	0,951193	0,116281	0,367495	0,993124
11	45/80-55	0,1	HMA	1,000000	0,999738	0,999876	1,000000	1,000000	0,919187	1,000000	0,993091	0,999999	0,999457		1,000000	0,155077	0,000169	0,340760	0,007151	0,035267	0,543882
12	45/80-55	0,1	WMA -30°C	1,000000	0,997241	0,999997	1,000000	1,000000	0,972474	1,000000	0,970491	0,999930	0,995334	1,000000		0,095279	0,000168	0,228920	0,003847	0,019766	0,398400
13	45/80-80	0	HMA	0,034978	0,741534	0,014288	0,045696	0,033983	0,001474	0,186885	0,908168	0,527395	0,778564	0,155077	0,095279		0,044643	1,000000	0,997851	1,000000	0,999998
14	45/80-80	0	WMA -30°C	0,000168	0,000245	0,000168	0,000168	0,000168	0,000167	0,000170	0,000386	0,000191	0,000261	0,000169	0,000168	0,044643		0,015095	0,512452	0,188017	0,006290
15	45/80-80	0,05	HMA	0,095963	0,935081	0,042425	0,121669	0,093515	0,004655	0,394258	0,990188	0,797608	0,951193	0,340760	0,228920	1,000000	0,015095		0,960192	0,999683	1,000000
16	45/80-80	0,05	WMA -30°C	0,001241	0,101314	0,000542	0,001644	0,001205	0,000191	0,009183	0,205382	0,047171	0,116281	0,007151	0,003847	0,997851	0,512452	0,960192		1,000000	0,851740
17	45/80-80	0,1	HMA	0,006415	0,332123	0,002479	0,008598	0,006218	0,000347	0,044338	0,542552	0,182717	0,367495	0,035267	0,019766	1,000000	0,188017	0,999683	1,000000		0,992988
18	45/80-80	0,1	WMA -30°C	0,190728	0,989216	0,091648	0,234537	0,186348	0,011282	0,605833	0,999461	0,934643	0,993124	0,543882	0,398400	0,999998	0,006290	1,000000	0,851740	0,992988	

Tab. Z. 44 Ocena istotności różnic procentowej wartości odprężen mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien aramidowych.

Lp.	Rodzaj lepiszcza	Zawartość włókien	Technologia	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	50/70	0	HMA		0,999689	1,000000	1,000000	0,999998	0,999990	0,998144	0,169548	0,329739	0,037945	0,887541	0,083710	0,014041	0,000168	0,538204	0,000845	0,544763	0,000311
2	50/70	0	WMA -30°C	0,999689		0,999998	1,000000	0,928690	0,896784	1,000000	0,775852	0,933451	0,356524	0,999985	0,566290	0,177508	0,000172	0,989636	0,014666	0,990320	0,003802
3	50/70	0,05	HMA	1,000000	0,999998		1,000000	0,999674	0,999084	0,999967	0,316231	0,536985	0,084521	0,975693	0,172418	0,033488	0,000168	0,756179	0,002011	0,761990	0,000580
4	50/70	0,05	WMA -30°C	1,000000	1,000000	1,000000		0,997911	0,995327	0,999999	0,418841	0,655596	0,125293	0,992341	0,242989	0,051876	0,000168	0,851436	0,003266	0,856022	0,000881
5	50/70	0,1	HMA	0,999998	0,928690	0,999674	0,997911		1,000000	0,865686	0,031323	0,075043	0,005469	0,447249	0,013377	0,001905	0,000167	0,157112	0,000237	0,160306	0,000179
6	50/70	0,1	WMA -30°C	0,999990	0,896784	0,999084	0,995327	1,000000		0,820479	0,024663	0,060234	0,004226	0,389515	0,010414	0,001487	0,000167	0,129141	0,000221	0,131871	0,000176
7	45/80-55	0	HMA	0,998144	1,000000	0,999967	0,999999	0,865686	0,820479		0,862896	0,970763	0,459192	0,999999	0,678492	0,245560	0,000175	0,997230	0,022834	0,997464	0,006049
8	45/80-55	0	WMA -30°C	0,169548	0,775852	0,316231	0,418841	0,031323	0,024663	0,862896		1,000000	1,000000	0,996866	1,000000	0,999764	0,004588	0,999999	0,804653	0,999999	0,487252
9	45/80-55	0,05	HMA	0,329739	0,933451	0,536985	0,655596	0,075043	0,060234	0,970763	1,000000		0,999828	0,999946	0,999999	0,992432	0,001720	1,000000	0,578676	1,000000	0,277711
10	45/80-55	0,05	WMA -30°C	0,037945	0,356524	0,084521	0,125293	0,005469	0,004226	0,459192	1,000000	0,999828		0,873873	1,000000	1,000000	0,026653	0,994758	0,990494	0,994341	0,881526
11	45/80-55	0,1	HMA	0,887541	0,999985	0,975693	0,992341	0,447249	0,389515	0,999999	0,996866	0,999946	0,873873		0,970104	0,656670	0,000256	1,000000	0,117457	1,000000	0,036577
12	45/80-55	0,1	WMA -30°C	0,083710	0,566290	0,172418	0,242989	0,013377	0,010414	0,678492	1,000000	0,999999	1,000000	0,970104		0,999999	0,011163	0,999814	0,938610	0,999789	0,703539
13	45/80-80	0	HMA	0,014041	0,177508	0,033488	0,051876	0,001905	0,001487	0,245560	0,999764	0,992432	1,000000	0,656670	0,999999		0,068615	0,945285	0,999744	0,942780	0,980242
14	45/80-80	0	WMA -30°C	0,000168	0,000172	0,000168	0,000168	0,000167	0,000167	0,000175	0,004588	0,001720	0,026653	0,000256	0,011163	0,068615		0,000733	0,498206	0,000717	0,813605
15	45/80-80	0,05	HMA	0,538204	0,989636	0,756179	0,851436	0,157112	0,129141	0,997230	0,999999	1,000000	0,994758	1,000000	0,999814	0,945285	0,000733		0,363638	1,000000	0,144693
16	45/80-80	0,05	WMA -30°C	0,000845	0,014666	0,002011	0,003266	0,000237	0,000221	0,022834	0,804653	0,578676	0,990494	0,117457	0,938610	0,999744	0,498206	0,363638		0,358003	1,000000
17	45/80-80	0,1	HMA	0,544763	0,990320	0,761990	0,856022	0,160306	0,131871	0,997464	0,999999	1,000000	0,994341	1,000000	0,999789	0,942780	0,000717	1,000000	0,358003		0,141751
18	45/80-80	0,1	WMA -30°C	0,000311	0,003802	0,000580	0,000881	0,000179	0,000176	0,006049	0,487252	0,277711	0,881526	0,036577	0,703539	0,980242	0,813605	0,144693	1,000000	0,141751	

Tab. Z. 45 Ocena istotności różnic modułów pełzania mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.

Lp.	Rodzaj lepiszcza	Zawartość włókien	Technologia	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	50/70	0	HMA		0,828235	0,998737	0,996485	0,004179	0,008421	0,999971	0,576023	1,000000	0,014019	0,363258	1,000000	0,004151	0,000167	0,886508	0,002321	0,002446	0,442983
2	50/70	0	WMA -30°C	0,828235		0,158629	0,125690	0,000173	0,000181	0,999147	1,000000	0,861392	0,739117	0,002865	0,820052	0,445350	0,000168	1,000000	0,320687	0,331188	1,000000
3	50/70	0,15	HMA	0,998737	0,158629		1,000000	0,090029	0,156727	0,808007	0,064121	0,997562	0,000600	0,973860	0,998922	0,000274	0,000167	0,204618	0,000224	0,000227	0,039298
4	50/70	0,15	WMA -30°C	0,996485	0,125690	1,000000		0,115203	0,195876	0,744509	0,049156	0,993877	0,000477	0,986693	0,996930	0,000244	0,000167	0,164104	0,000202	0,000211	0,029760
5	50/70	0,3	HMA	0,004179	0,000173	0,090029	0,115203		1,000000	0,000442	0,000169	0,003457	0,000167	0,890618	0,004365	0,000167	0,000167	0,000176	0,000167	0,000167	0,000168
6	50/70	0,3	WMA -30°C	0,008421	0,000181	0,156727	0,195876	1,000000		0,000783	0,000171	0,006986	0,000167	0,964163	0,008791	0,000167	0,000167	0,000188	0,000167	0,000167	0,000169
7	45/80-55	0	HMA	0,999971	0,999147	0,808007	0,744509	0,000442	0,000783		0,977968	0,999991	0,123316	0,059745	0,999963	0,043637	0,000168	0,999802	0,025622	0,026946	0,938114
8	45/80-55	0	WMA -30°C	0,576023	1,000000	0,064121	0,049156	0,000169	0,000171	0,977968		0,622203	0,929624	0,000972	0,565342	0,714423	0,000172	1,000000	0,575139	0,588153	1,000000
9	45/80-55	0,15	HMA	1,000000	0,861392	0,997562	0,993877	0,003457	0,006986	0,999991	0,622203		0,016837	0,324765	1,000000	0,005023	0,000167	0,912298	0,002804	0,002959	0,487496
10	45/80-55	0,15	WMA -30°C	0,014019	0,739117	0,000600	0,000477	0,000167	0,000167	0,123316	0,929624	0,016837		0,000169	0,013438	1,000000	0,001690	0,657963	1,000000	0,973870	
11	45/80-55	0,3	HMA	0,363258	0,002865	0,973860	0,986693	0,890618	0,964163	0,059745	0,000972	0,324765	0,000169		0,372493	0,000168	0,000167	0,004063	0,000168	0,000168	0,000600
12	45/80-55	0,3	WMA -30°C	1,000000	0,820052	0,998922	0,996930	0,004365	0,008791	0,999963	0,565342	1,000000	0,013438	0,372493		0,003974	0,000167	0,879973	0,002223	0,002343	0,432960
13	45/80-80	0	HMA	0,004151	0,445350	0,000274	0,000244	0,000167	0,000167	0,043637	0,714423	0,005023	1,000000	0,000168	0,003974		0,005752	0,367765	1,000000	1,000000	0,830130
14	45/80-80	0	WMA -30°C	0,000167	0,000168	0,000167	0,000167	0,000167	0,000167	0,000168	0,000172	0,000167	0,001690	0,000167	0,000167	0,005752		0,000168	0,010219	0,009700	0,000176
15	45/80-80	0,15	HMA	0,886508	1,000000	0,204618	0,164104	0,000176	0,000188	0,999802	1,000000	0,912298	0,657963	0,004063	0,879973	0,367765	0,000168		0,256619	0,265746	0,999998
16	45/80-80	0,15	WMA -30°C	0,002321	0,320687	0,000224	0,000202	0,000167	0,000167	0,025622	0,575139	0,002804	1,000000	0,000168	0,002223	1,000000	0,010219	0,256619		1,000000	0,708319
17	45/80-80	0,3	HMA	0,002446	0,331188	0,000227	0,000211	0,000167	0,000167	0,026946	0,588153	0,002959	1,000000	0,000168	0,002343	1,000000	0,009700	0,265746	1,000000		0,720500
18	45/80-80	0,3	WMA -30°C	0,442983	1,000000	0,039298	0,029760	0,000168	0,000169	0,938114	1,000000	0,487496	0,973870	0,000600	0,432960	0,830130	0,000176	0,999998	0,708319	0,720500	

Tab. Z. 46 Ocena istotności różnic procentowej wartości odprężen mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.

Lp.	Rodzaj lepiszcza	Zawartość włókien	Technologia	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	50/70	0	HMA		0,999683	1,000000	1,000000	0,962417	0,983180	0,998114	0,168014	1,000000	0,129357	1,000000	0,621595	0,013821	0,000168	0,957249	0,359031	0,005044	0,034438
2	50/70	0	WMA -30°C	0,999683		0,971665	0,999787	0,398770	0,488553	1,000000	0,774126	1,000000	0,697425	0,993140	0,996016	0,175930	0,000172	1,000000	0,947732	0,078552	0,335573
3	50/70	0,15	HMA	1,000000	0,971665		1,000000	0,999419	0,999897	0,935011	0,049855	0,999209	0,036596	1,000000	0,287331	0,003165	0,000168	0,724076	0,129458	0,001169	0,008303
4	50/70	0,15	WMA -30°C	1,000000	0,999787	1,000000		0,955706	0,979455	0,998624	0,179479	1,000000	0,138678	1,000000	0,643427	0,015077	0,000168	0,963786	0,378085	0,005516	0,037380
5	50/70	0,3	HMA	0,962417	0,398770	0,999419	0,955706		1,000000	0,303454	0,002567	0,699447	0,001828	0,995346	0,023842	0,000266	0,000167	0,126395	0,008052	0,000194	0,000468
6	50/70	0,3	WMA -30°C	0,983180	0,488553	0,999897	0,979455	1,000000		0,382596	0,003791	0,785234	0,002688	0,998693	0,034225	0,000321	0,000167	0,169883	0,011799	0,000217	0,000629
7	45/80-55	0	HMA	0,998114	1,000000	0,935011	0,998624	0,303454	0,382596		0,861646	1,000000	0,798524	0,978789	0,999184	0,243661	0,000175	1,000000	0,978497	0,114795	0,435620
8	45/80-55	0	WMA -30°C	0,168014	0,774126	0,049855	0,179479	0,002567	0,003791	0,861646		0,475891	1,000000	0,083697	0,999990	0,999759	0,004507	0,982599	1,000000	0,991587	0,999999
9	45/80-55	0,15	HMA	1,000000	1,000000	0,999209	1,000000	0,699447	0,785234	1,000000	0,475891		0,396858	0,999949	0,934183	0,064049	0,000168	0,999626	0,748468	0,025496	0,140909
10	45/80-55	0,15	WMA -30°C	0,129357	0,697425	0,036596	0,138678	0,001828	0,002688	0,798524	1,000000	0,396858		0,062470	0,999929	0,999956	0,006368	0,964459	1,000000	0,996885	1,000000
11	45/80-55	0,3	HMA	1,000000	0,993140	1,000000	1,000000	0,995346	0,998693	0,978789	0,083697	0,999949	0,062470		0,410412	0,005788	0,000168	0,846412	0,202696	0,002082	0,014959
12	45/80-55	0,3	WMA -30°C	0,621595	0,996016	0,287331	0,643427	0,023842	0,034225	0,999184	0,999990	0,934183	0,999929	0,410412		0,905444	0,000540	0,999999	1,000000	0,715972	0,983445
13	45/80-80	0	HMA	0,013821	0,175930	0,003165	0,015077	0,000266	0,000321	0,243661	0,999759	0,064049	0,999956	0,005788	0,905444		0,067805	0,499935	0,988568	1,000000	1,000000
14	45/80-80	0	WMA -30°C	0,000168	0,000172	0,000168	0,000168	0,000167	0,000167	0,000175	0,004507	0,000168	0,006368	0,000168	0,000540	0,067805		0,000211	0,001455	0,154701	0,028614
15	45/80-80	0,15	HMA	0,957249	1,000000	0,724076	0,963786	0,126395	0,169883	1,000000	0,982599	0,999626	0,964459	0,846412	0,999999	0,499935	0,000211		0,999487	0,280870	0,731573
16	45/80-80	0,15	WMA -30°C	0,359031	0,947732	0,129458	0,378085	0,008052	0,011799	0,978497	1,000000	0,748468	1,000000	0,202696	1,000000	0,988568	0,001455	0,999487		0,917934	0,999487
17	45/80-80	0,3	HMA	0,005044	0,078552	0,001169	0,000516	0,000194	0,000217	0,114795	0,991587	0,025496	0,996885	0,002082	0,715972	1,000000	0,154701	0,280870	0,917934		0,999998
18	45/80-80	0,3	WMA -30°C	0,034438	0,335573	0,008303	0,037380	0,000468	0,000629	0,435620	0,999999	0,140909	1,000000	0,014959	0,983445	1,000000	0,028614	0,731573	0,999487	0,999998	

SPIS RYSUNKÓW

Rys. 2.1 Zakresy temperatur produkcji różnych typów mieszanek mineralno-asfaltowych oraz informacje dotyczące zużycia paliwa i emisji CO ₂ podczas ogrzewania jednej tony mokrego kruszywa [27].	12
Rys. 2.2 Dysza do spieniania asfaltu opracowana przez profesora Csanyi [84].	19
Rys. 2.3 Komora ekspansji do wytwarzania asfaltu spienionego [94].	21
Rys. 2.4 Obieg asfaltu, wody oraz powietrza podczas spieniania asfaltu [97].	22
Rys. 2.5 Zmienność wskaźnika ekspansji w czasie [104], [105].	24
Rys. 2.6 Sposoby określenia optymalnej zawartości wody spieniającej używane w technologii CMA oraz HWMA [106], [107], [108].	25
Rys. 2.7 Określenie optymalnej zawartości wody spieniającej na podstawie południowoafrykańskich wytycznych [108].	25
Rys. 2.8 Zależność zawartości wody spieniającej i temperatury asfaltu na parametry pienistości lepiszcza asfaltowego [110].	26
Rys. 2.9 Porównanie załadunku mma w technologii „na ciepło” (b) oraz tradycyjnej technologii „na gorąco” (a) [120].	28
Rys. 2.10 Wbudowywanie mieszanki mineralno-asfaltowej w technologii „na gorąco” (a) oraz „na ciepło” (b) [120].	29
Rys. 2.11 Włókna polipropylenowe o różnej długości (2 mm, 4 mm, 6 mm, 12 mm) [fot. K. Janus].	38
Rys. 2.12 Stabilność wg Marshalla dla różnych zawartości procentowych mieszanek z włóknami szklanymi oraz polipropylenowymi [159].	39
Rys. 2.13 Włókna azbestowe [163].	39
Rys. 2.14 Włókna celulozowe w postaci luźnej [fot. K. Janus].	40
Rys. 2.15 Włókna celulozowe w postaci granulatu [fot. K. Janus].	40
Rys. 2.16 Włókna celulozowe pokryte parafiną [fot. K. Janus].	41
Rys. 2.17 Włókna stalowe stosowane do nawierzchniowego betonu cementowego [fot. K. Janus].	42
Rys. 2.18 Włókna szklane [fot. K. Janus].	43
Rys. 2.19 Włókna szklane cyrkonowe [fot. K. Janus].	43
Rys. 2.20 Włókna bazaltowe o długości 12 mm i 24 mm [fot. K. Janus].	44
Rys. 2.21 Włókna aramidowe o długości 12 mm [fot. K. Janus].	44
Rys. 2.22 Wpływ ilości dozowanych włókien bazaltowych na stabilność dynamiczną mieszanki betonu asfaltowego [195].	50
Rys. 2.23 Zależność odkształcenia od czasu pod wpływem naprężeń ściskających na poziomie 0,28 MPa (a) oraz 0,42 MPa (b) w badaniu CCT [196].	51
Rys. 2.24 Zależność ugięcia od czasu w badaniu BCT dla mieszanki referencyjnej oraz z dodatkiem zbrojenia [196].	51

Rys. 2.25 Wpływ zbrojenia rozproszonego i technologii wytwarzania mma na odporność na powstawanie deformacji trwałych [197].	53
Rys. 2.26 Porównanie wartości stabilności Marshalla mma dla różnych zawartości włókien oraz ilości asfaltu [199].	53
Rys. 2.27 Naprężenie w funkcji czasu dla mieszanki referencyjnej oraz zbrojonej włóknami przy ciśnieniu 138 kPa [200].	54
Rys. 2.28 Wartości zespolonego modułu dynamicznego przy częstotliwości 10 Hz w funkcji temperatury [200].	55
Rys. 2.29 Krzywe wzorcowe zespolonego modułu dynamicznego w funkcji czasu [200].	55
Rys. 2.30 Liczba cykli zmęczeniowych w funkcji poziomu odkształceń [200].	56
Rys. 2.31 Proporcjonalna głębokość koleiny badanych mieszanek mineralno-asfaltowych [201].	57
Rys. 2.32 Prędkość przyrostu koleiny badanych mieszanek mineralno-asfaltowych [201].	57
Rys. 2.33 Moduł sztywności mieszanek w funkcji temperatury i ilości dozowanych włókien [202]. ..	58
Rys. 2.34 Badanie trwałości zmęczeniowej przy zmiennych wartościach odkształcenia [204].	59
Rys. 4.1 Schemat doboru technologii i materiałów do badań mieszanek mineralno-asfaltowych.	65
Rys. 4.2 Plan eksperymentu dla spieniania asfaltu drogowego i polimeroasfaltu (50/70 i 45/80-55)...	66
Rys. 4.3 Plan eksperymentu dla spieniania asfaltu wysokomodyfikowanego polimerami (45/80-80). ..	66
Rys. 4.4 Plan badań mieszanek mineralno-asfaltowych w technologii HMA i WMA z asfaltem spienionym.	68
Rys. 4.5 Spieniarka laboratoryjna WLB 10 S [fot. K. Janus].	72
Rys. 4.6 Zasada pomiaru ekspansji asfaltu oraz okresu jego półtrwania [106].	73
Rys. 4.7 Schemat przyłożenia obciążenia do próbki oraz impulsu siły podczas badania modułu sztywności w schemacie IT-CY (1-pik siły, 2-czas powtórzenia impulsu, 3-czas przyrostu siły) [209].	78
Rys. 4.8 Schemat badania zespolonego modułu sztywności [N11].	79
Rys. 4.9 Krzywa wiodąca dla modułu zespolonego na przykładzie mieszanki z lepiszczem asfaltowym 50/70 i dodatkiem 0,15% włókien polimerowo-bazaltowych.	80
Rys. 4.10 Próbkę podczas badania sztywności pełzania [fot. K. Janus]	81
Rys. 4.11 Uziarnienie mieszanki mineralnej wraz z punktami kontrolnymi.	86
Rys. 4.12 Powierzchnie odpowiedzi dla zmiennych zależnych: wskaźnika ekspansji (a) i okresu półtrwania (b) dla asfaltu 50/70.	89
Rys. 4.13 Wynik optymalizacji parametrów spieniania ER i HL dla lepiszcza asfaltowego 50/70.	90
Rys. 4.14 Średnie wartości parametrów ER i HL dla lepiszcza asfaltowego 50/70 spienianego w temperaturze 140°C.	90

Rys. 4.15 Powierzchnie odpowiedzi dla zmiennych zależnych: wskaźnika ekspansji (a) i okresu półtrwania (b) dla asfaltu 45/80-55.	91
Rys. 4.16 Wynik optymalizacji parametrów spieniania ER i HL dla lepiszcza asfaltowego 45/80-55.	92
Rys. 4.17 Średnie wartości parametrów ER i HL dla lepiszcza asfaltowego 45/80-55 spienianego w temperaturze 147,5°C.	92
Rys. 4.18 Powierzchnie odpowiedzi dla zmiennych zależnych: wskaźnika ekspansji (a) i okresu półtrwania (b) dla asfaltu 45/80-80.	93
Rys. 4.19 Wynik optymalizacji parametrów spieniania ER i HL dla lepiszcza asfaltowego 45/80-80.	94
Rys. 4.20 Średnie wartości parametrów ER i HL dla lepiszcza asfaltowego 45/80-80 spienianego w temperaturze 155°C.	94
Rys. 4.21 Ocena penetracji dla poszczególnych rodzajów lepiszczy asfaltowych.	96
Rys. 4.22 Ocena temperatury mięknięcia dla poszczególnych rodzajów lepiszczy asfaltowych.	98
Rys. 4.23 Ocena temperatury łamliwości dla poszczególnych rodzajów lepiszczy asfaltowych.	101
Rys. 4.24 Ocena nawrotu sprężystego dla poszczególnych rodzajów modyfikowanych lepiszczy asfaltowych.	103
Rys. 4.25 Ocena lepkości dynamicznej dla poszczególnych rodzajów lepiszczy asfaltowych.	106
Rys. 4.26 Zawartość wolnej przestrzeni w mieszankach mineralno-asfaltowych z włóknami aramidowymi.	111
Rys. 4.27 Zawartość wolnej przestrzeni w mieszankach mineralno-asfaltowych z włóknami polimerowo-bazaltowymi.	113
Rys. 4.28 Proporcjonalna głębokość koleiny w mieszankach mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien aramidowych.	115
Rys. 4.29 Prędkość przyrostu koleiny w mieszankach mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien aramidowych.	116
Rys. 4.30 Proporcjonalna głębokość koleiny w mieszankach mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.	119
Rys. 4.31 Prędkość przyrostu koleiny w mieszankach mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.	120
Rys. 4.32 Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie próbek suchych w temperaturze 25°C w mieszankach mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien aramidowych.	123
Rys. 4.33 Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie próbek mokrych w temperaturze 25°C w mieszankach mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien aramidowych.	124
Rys. 4.34 Wskaźnik odporności na działanie wody i mrozu w mieszankach mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien aramidowych.	125

Rys. 4.35 Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie próbek suchych w temperaturze 25°C w mieszankach mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.....	127
Rys. 4.36 Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie próbek mokrych w temperaturze 25°C w mieszankach mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.	127
Rys. 4.37 Wskaźnik odporności na działanie wody i mrozu w mieszankach mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.....	128
Rys. 4.38 Zagęszczalność referencyjnych mieszanek mineralno-asfaltowych w aspekcie wpływu technologii wytwarzania i zagęszczania: a) współczynnik zagęszczalności K, b) wskaźnik stabilności MSI, c) indeks oporności MRI.	133
Rys. 4.39 Zagęszczalność mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien aramidowych: ..	135
Rys. 4.40 Zagęszczalność mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych: a) współczynnik zagęszczalności K, b) wskaźnik stabilności MSI, c) indeks oporności MRI.....	138
Rys. 4.41 Różnica zawartości wolnej przestrzeni ΔV_a w mieszankach mineralno-asfaltowych: a) referencyjnych, b) z dodatkiem włókien aramidowych, c) z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.....	141
Rys. 4.42 Moduły sztywności IT-CY mieszanek referencyjnych.....	143
Rys. 4.43 Moduł sztywności IT-CY mieszanek z dodatkiem włókien aramidowych.	145
Rys. 4.44 Moduł sztywności IT-CY mieszanek z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.	148
Rys. 4.45 Krzywe wiodące referencyjnych mieszanek mineralno-asfaltowych z lepiszczem: a), b) 50/70, c), d) 45/80-55, e), f) 45/80-80.	151
Rys. 4.46 Zespolony moduł sztywności przy częstotliwości równej 10 Hz dla mieszanek referencyjnych.	152
Rys. 4.47 Zespolony moduł sztywności przy częstotliwości równej 0,1 Hz dla mieszanek referencyjnych.	153
Rys. 4.48 Krzywe wiodące mieszanek mineralno-asfaltowych wytwarzanych w obniżonych temperaturach z lepiszczem asfaltowym: a), b) 50/70, c), d) 45/80-55, e), f) 45/80-80.	156
Rys. 4.49 Wykres Blacka mieszanek z lepiszczem 45/80-80 zagęszczanych w obniżonych temperaturach.	157
Rys. 4.50 Zespolony moduł sztywności w temperaturach -10°C i 5°C przy częstotliwości równej 10 Hz dla mma z dodatkiem włókien aramidowych.	158
Rys. 4.51 Zespolony moduł sztywności w temperaturach -10°C i 5°C przy częstotliwości równej 0,1 Hz dla mma z dodatkiem włókien aramidowych.	159
Rys. 4.52 Zespolony moduł sztywności w temperaturach 20°C i 35°C przy częstotliwości równej 10 Hz dla mma z dodatkiem włókien aramidowych.	159

Rys. 4.53 Zespolony moduł sztywności w temperaturach 20°C i 35°C przy częstotliwości równej 0,1 Hz dla mma z dodatkiem włókien aramidowych.	160
Rys. 4.54 Zespolony moduł sztywności przy częstotliwości równej 10 Hz dla mma z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.	163
Rys. 4.55 Zespolony moduł sztywności przy częstotliwości równej 0,1 Hz dla mma z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.	163
Rys. 4.56 Zespolony moduł sztywności przy częstotliwości równej 10 Hz dla mma z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.	164
Rys. 4.57 Zespolony moduł sztywności przy częstotliwości równej 0,1 Hz dla mma z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.	164
Rys. 4.58 Odkształcenia początkowe odpowiadające trwałościom zmęczeniowym referencyjnych mieszanek mineralno-asfaltowych badanych w schemacie IT-FT w 10°C.....	169
Rys. 4.59 Odkształcenia początkowe odpowiadające trwałościom zmęczeniowym mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien aramidowych badanych w schemacie IT-FT w 10°C.....	171
Rys. 4.60 Odkształcenia początkowe odpowiadające trwałościom zmęczeniowym mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych badanych w schemacie IT-FT w 10°C.....	173
Rys. 4.61 Wyniki badania pełzania dla mieszanek referencyjnych: a) wartości modułów pełzania, b) procentowa wartość odprężenia.	175
Rys. 4.62 Moduły pełzania mieszanek z dodatkiem włókien aramidowych.	177
Rys. 4.63 Procentowa wartość odprężenia mieszanek z dodatkiem włókien aramidowych.....	177
Rys. 4.64 Moduł pełzania mieszanek z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.	179
Rys. 4.65 Procentowa wartość odprężeń mieszanek z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.	180
Rys. 4.66. Funkcje użyteczności zastosowane w badaniach: a) rosnąca, b) malejąca.	185

SPIS TABEL

Tab. 2.1 Klasyfikacja mieszanek mineralno-asfaltowych w aspekcie temperatur wytwarzania [26]....	12
Tab. 2.2 Wybrane dodatki i technologie stosowane w celu obniżenia temperatur technologicznych mieszanek mineralno-asfaltowych w technologii WMA [5], [25], [38], [63], [70], [74], [75], [76], [77], [78].	18
Tab. 2.3 Zakresy redukcji emisji w technologii „na ciepło” w porównaniu do technologii „na gorąco” [5].	31
Tab. 2.4 Charakterystyka włókien stosowanych w budownictwie [138], [143].	35
Tab. 2.5 Zalety i wady włókien stosowanych do mma [146], [150], [155].	37
Tab. 4.1 Temperatury pompowania i przechowywania badanych lepiszczy asfaltowych [186].	67
Tab. 4.2 Podstawowe parametry asfaltów wykorzystanych w badaniach [186].	83
Tab. 4.3 Wyniki oznaczenia składu ziarnowego oraz gęstości objętościowej kruszyw.	84
Tab. 4.4 Właściwości środka adhezyjnego Wetfix BE [212].	84
Tab. 4.5 Dobór minimalnej zawartości asfaltu w mieszance mineralno-asfaltowej.	85
Tab. 4.6 Składniki mieszanki mineralnej i mieszanki mineralno-asfaltowej.	85
Tab. 4.7 Projekt mieszanki mineralnej, dla AC 11S KR 5-7.	86
Tab. 4.8 Wymagane właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej AC 11S KR 5-7.	87
Tab. 4.9 Wartości maksymalnej ekspansji i czasu półtrwania piany asfaltowej wraz z podstawowymi wielkościami statystycznymi.	88
Tab. 4.10 Analiza wariancji dla zmiennych zależnych: wskaźnika ekspansji i okresu półtrwania dla asfaltu 50/70.	89
Tab. 4.11 Analiza wariancji dla zmiennych zależnych: wskaźnika ekspansji i okresu półtrwania dla asfaltu 45/80-55.	91
Tab. 4.12 Analiza wariancji dla zmiennych zależnych: wskaźnika ekspansji i okresu półtrwania dla asfaltu 45/80-80.	93
Tab. 4.13 Optymalne zakresy parametrów spieniania lepiszczy asfaltowych w kontekście temperatury i ilości dozowanej wody.	94
Tab. 4.14 Penetracja w 25°C analizowanych lepiszczy asfaltowych.	96
Tab. 4.15 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza i procesu spieniania na penetrację asfaltu za pomocą analizy wariancji ANOVA.	97
Tab. 4.16 Test Tukeya określający grupy homogeniczne w badaniu penetracji w zależności od rodzaju lepiszczy asfaltowych i procesu spieniania.	97
Tab. 4.17 Test Tukeya porównań wielokrotnych penetracji w zależności od rodzaju lepiszczy asfaltowych i procesu spieniania.	97
Tab. 4.18 Temperatura mięknięcia analizowanych lepiszczy asfaltowych.	98

Tab. 4.19 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza na temperaturę mięknięcia asfaltu za pomocą analizy wariancji ANOVA.....	99
Tab. 4.20 Test Tukeya określający grupy homogeniczne w badaniu temperatury mięknięcia w zależności od rodzaju lepiszczy asfaltowych i procesu spieniania.....	99
Tab. 4.21 Test Tukeya porównań wielokrotnych temperatury mięknięcia w zależności od lepiszcza asfaltowego i procesu spieniania.	100
Tab. 4.22 Temperatura łamliwości analizowanych lepiszczy asfaltowych.	100
Tab. 4.23 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza na temperaturę łamliwości asfaltu za pomocą analizy wariancji ANOVA.....	101
Tab. 4.24 Test Tukeya określający grupy homogeniczne w badaniu temperatury łamliwości w zależności od rodzaju lepiszczy asfaltowych i procesu spieniania.	102
Tab. 4.25 Test Tukeya porównań wielokrotnych temperatury łamliwości w zależności od lepiszcza asfaltowego i procesu spieniania.	102
Tab. 4.26 Nawrót sprężysty analizowanych lepiszczy asfaltowych.	103
Tab. 4.27 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza oraz procesu spieniania na wartość nawrotu sprężystego dla lepiszczy niestarczonych oraz po starzeniu za pomocą analizy wariancji ANOVA.....	104
Tab. 4.28 Test Tukeya określający grupy homogeniczne w badaniu nawrotu sprężystego lepiszczy niestarczonych w zależności od rodzaju lepiszczy asfaltowych i procesu spieniania.	104
Tab. 4.29 Test Tukeya określający grupy homogeniczne w badaniu nawrotu sprężystego lepiszczy starzonych w zależności od rodzaju lepiszczy asfaltowych i procesu spieniania.	104
Tab. 4.30 Test Tukeya porównań wielokrotnych nawrotu sprężystego dla lepiszczy niestarczonych w zależności od rodzaju lepiszcza asfaltowego i procesu spieniania.	105
Tab. 4.31 Test Tukeya porównań wielokrotnych nawrotu sprężystego dla lepiszczy starzonych w zależności od rodzaju lepiszcza asfaltowego i procesu spieniania.	105
Tab. 4.32 Lepkość dynamiczna analizowanych lepiszczy asfaltowych.....	106
Tab. 4.33 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza oraz procesu spienienia na lepkość dynamiczną asfaltu w temperaturze 90°C za pomocą analizy wariancji ANOVA.....	107
Tab. 4.34 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza oraz procesu spienienia na lepkość dynamiczną asfaltu w temperaturze 110°C za pomocą analizy wariancji ANOVA.....	107
Tab. 4.35 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza oraz procesu spienienia na lepkość dynamiczną asfaltu w temperaturze 135°C za pomocą analizy wariancji ANOVA.....	107
Tab. 4.36 Test Tukeya określający grupy homogeniczne w badaniu lepkości w temperaturze 90°C w zależności od rodzaju lepiszczy asfaltowych i procesu spieniania.....	108
Tab. 4.37 Test Tukeya określający grupy homogeniczne w badaniu lepkości w temperaturze 110°C w zależności od rodzaju lepiszczy asfaltowych i procesu spieniania.....	108

Tab. 4.38 Test Tukeya określający grupy homogeniczne w badaniu lepkości w temperaturze 135°C w zależności od rodzaju lepiszczy asfaltowych i procesu spieniania.....	108
Tab. 4.39 Test Tukeya porównań wielokrotnych lepkości dynamicznej w temperaturze 90°C w zależności od rodzaju lepiszcza asfaltowego i procesu spieniania.....	109
Tab. 4.40 Test Tukeya porównań wielokrotnych lepkości dynamicznej w temperaturze 110°C w zależności od rodzaju lepiszcza asfaltowego i procesu spieniania.....	109
Tab. 4.41 Test Tukeya porównań wielokrotnych lepkości dynamicznej w temperaturze 135°C w zależności od rodzaju lepiszcza asfaltowego i procesu spieniania.....	109
Tab. 4.42 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza, technologii wytwarzania oraz zawartości włókien aramidowych na zawartość wolnej przestrzeni za pomocą analizy wariancji ANOVA.....	112
Tab. 4.43 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza, technologii wytwarzania oraz zawartości włókien polimerowo-bazaltowych na zawartość wolnej przestrzeni za pomocą analizy wariancji ANOVA.....	114
Tab. 4.44 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza, technologii wytwarzania oraz zawartości włókien aramidowych na odporność na powstawanie deformacji trwałych za pomocą analizy wariancji ANOVA.....	117
Tab. 4.45 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza, technologii wytwarzania oraz zawartości włókien polimerowo-bazaltowych na odporność na powstawanie deformacji trwałych za pomocą analizy wariancji ANOVA.....	121
Tab. 4.46 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza, technologii wytwarzania oraz zawartości włókien aramidowych na odporność na działanie wody i mrozu za pomocą analizy wariancji ANOVA.....	126
Tab. 4.47 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza, technologii wytwarzania oraz zawartości włókien polimerowo-bazaltowych na odporność na działanie wody i mrozu za pomocą analizy wariancji ANOVA.....	129
Tab. 4.48 Określenie wpływu temperatury wytwarzania referencyjnych mieszanek mineralno-asfaltowych na zagęszczalność i współczynnik zagęszczalności za pomocą analizy wariancji ANOVA.....	134
Tab. 4.49 Określenie wpływu temperatury wytwarzania referencyjnych mieszanek mineralno-asfaltowych na wskaźnik stabilności i indeks oporności mma za pomocą analizy wariancji ANOVA.....	134
Tab. 4.50 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza, technologii wytwarzania oraz zawartości włókien aramidowych na współczynnik zagęszczalności K za pomocą analizy wariancji ANOVA....	136

Tab. 4.51 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza, technologii wytwarzania oraz zawartości włókien aramidowych na wskaźnik stabilności i indeks oporności mma za pomocą analizy wariancji ANOVA.....	137
Tab. 4.52 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza, technologii wytwarzania oraz zawartości włókien polimerowo-bazaltowych na zagęszczalność i współczynnik zagęszczalności za pomocą analizy wariancji ANOVA.....	139
Tab. 4.53 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza, technologii wytwarzania oraz zawartości włókien polimerowo-bazaltowych na wskaźnik stabilności i indeks oporności mma za pomocą analizy wariancji ANOVA.....	139
Tab. 4.54 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza i technologii wytwarzania na różnice z zawartości wolnej przestrzeni za pomocą analizy wariancji ANOVA.....	142
Tab. 4.55 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza, technologii wytwarzania oraz zawartości włókien aramidowych na różnice z zawartości wolnej przestrzeni za pomocą analizy wariancji ANOVA.	142
Tab. 4.56 Określenie wpływu technologii wytwarzania na moduł sztywności IT-CY w temperaturze 5°C referencyjnych mieszanek mineralno-asfaltowych za pomocą analizy wariancji ANOVA. ...	144
Tab. 4.57 Określenie wpływu technologii wytwarzania na moduł sztywności IT-CY w temperaturze 15°C referencyjnych mieszanek mineralno-asfaltowych za pomocą analizy wariancji ANOVA.	144
Tab. 4.58 Określenie wpływu technologii wytwarzania na moduł sztywności IT-CY w temperaturze 20°C referencyjnych mieszanek mineralno-asfaltowych za pomocą analizy wariancji ANOVA.	144
Tab. 4.59 Określenie wpływu włókien aramidowych na moduł sztywności IT-CY w temperaturze 5°C mieszanek mineralno-asfaltowych za pomocą analizy wariancji ANOVA.	146
Tab. 4.60 Określenie wpływu włókien aramidowych na moduł sztywności IT-CY w temperaturze 15°C mieszanek mineralno-asfaltowych za pomocą analizy wariancji ANOVA.	146
Tab. 4.61 Określenie wpływu włókien aramidowych na moduł sztywności IT-CY w temperaturze 20°C mieszanek mineralno-asfaltowych za pomocą analizy wariancji ANOVA.	147
Tab. 4.62 Określenie wpływu włókien polimerowo-bazaltowych na moduł sztywności IT-CY w temperaturze 5°C mieszanek mineralno-asfaltowych za pomocą analizy wariancji ANOVA.	148
Tab. 4.63 Określenie wpływu włókien polimerowo-bazaltowych na moduł sztywności IT-CY w temperaturze 15°C mieszanek mineralno-asfaltowych za pomocą analizy wariancji ANOVA.	149

Tab. 4.64 Określenie wpływu włókien polimerowo-bazaltowych na moduł sztywności IT-CY w temperaturze 20°C mieszanek mineralno-asfaltowych za pomocą analizy wariancji ANOVA.	149
Tab. 4.65 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza i technologii wytwarzania na zespolony moduł sztywności w temperaturze -10°C mieszanek mineralno-asfaltowych za pomocą analizy wariancji ANOVA.	154
Tab. 4.66 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza i technologii wytwarzania na zespolony moduł sztywności w temperaturze 5°C mieszanek mineralno-asfaltowych za pomocą analizy wariancji ANOVA.	154
Tab. 4.67 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza i technologii wytwarzania na zespolony moduł sztywności w temperaturze 20°C mieszanek mineralno-asfaltowych za pomocą analizy wariancji ANOVA.	154
Tab. 4.68 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza i technologii wytwarzania na zespolony moduł sztywności w temperaturze 35°C mieszanek mineralno-asfaltowych za pomocą analizy wariancji ANOVA.	154
Tab. 4.69 Określenie wpływu włókien aramidowych na zespolony moduł sztywności w temperaturze - 10°C mieszanek mineralno-asfaltowych za pomocą analizy wariancji ANOVA.	161
Tab. 4.70 Określenie wpływu włókien aramidowych na zespolony moduł sztywności w temperaturze 5°C mieszanek mineralno-asfaltowych za pomocą analizy wariancji ANOVA.	161
Tab. 4.71 Określenie wpływu włókien aramidowych na zespolony moduł sztywności w temperaturze 20°C mieszanek mineralno-asfaltowych za pomocą analizy wariancji ANOVA.	161
Tab. 4.72 Określenie wpływu włókien aramidowych na zespolony moduł sztywności w temperaturze 35°C mieszanek mineralno-asfaltowych za pomocą analizy wariancji ANOVA.	162
Tab. 4.73 Określenie wpływu włókien polimerowo-bazaltowych na zespolony moduł sztywności w temperaturze -10°C mieszanek mineralno-asfaltowych za pomocą analizy wariancji ANOVA.	166
Tab. 4.74 Określenie wpływu włókien polimerowo-bazaltowych na zespolony moduł sztywności w temperaturze 5°C mieszanek mineralno-asfaltowych za pomocą analizy wariancji ANOVA.	166
Tab. 4.75 Określenie wpływu włókien polimerowo-bazaltowych na zespolony moduł sztywności w temperaturze 20°C mieszanek mineralno-asfaltowych za pomocą analizy wariancji ANOVA.	166
Tab. 4.76 Określenie wpływu włókien polimerowo-bazaltowych na zespolony moduł sztywności w temperaturze 35°C mieszanek mineralno-asfaltowych za pomocą analizy wariancji ANOVA.	167

Tab. 4.77 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza asfaltowego oraz technologii wytwarzania mieszanek referencyjnych na odkształcenia przy zmęczeniu po 10 000 cykli za pomocą analizy wariancji ANOVA.....	170
Tab. 4.78 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza asfaltowego oraz technologii wytwarzania mieszanek referencyjnych na odkształcenia przy zmęczeniu po 50 000 cykli za pomocą analizy wariancji ANOVA.....	170
Tab. 4.79 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza asfaltowego oraz technologii wytwarzania mieszanek referencyjnych na odkształcenia przy zmęczeniu po 100 000 cykli za pomocą analizy wariancji ANOVA.....	170
Tab. 4.80 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza asfaltowego, technologii wytwarzania i zawartości włókien aramidowych na odkształcenia mieszanek po badaniu trwałości zmęczeniowej po 10 000 cykli za pomocą analizy wariancji ANOVA.	172
Tab. 4.81 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza asfaltowego, technologii wytwarzania i zawartości włókien aramidowych na odkształcenia mieszanek po badaniu trwałości zmęczeniowej po 50 000 cykli za pomocą analizy wariancji ANOVA.	172
Tab. 4.82 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza asfaltowego, technologii wytwarzania i zawartości włókien aramidowych na odkształcenia mieszanek po badaniu trwałości zmęczeniowej po 100 000 cykli za pomocą analizy wariancji ANOVA.	172
Tab. 4.83 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza asfaltowego, technologii wytwarzania i zawartości włókien polimerowo-bazaltowych na odkształcenia mieszanek po badaniu trwałości zmęczeniowej po 10 000 cykli za pomocą analizy wariancji ANOVA.	174
Tab. 4.84 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza asfaltowego, technologii wytwarzania i zawartości włókien polimerowo-bazaltowych na odkształcenia mieszanek po badaniu trwałości zmęczeniowej po 50 000 cykli za pomocą analizy wariancji ANOVA.	174
Tab. 4.85 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza asfaltowego, technologii wytwarzania i zawartości włókien polimerowo-bazaltowych na odkształcenia mieszanek po badaniu trwałości zmęczeniowej po 100 000 cykli za pomocą analizy wariancji ANOVA.	174
Tab. 4.86 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza oraz technologii wytwarzania na wartość modułu pełzania i procentowej wartości odprężenia za pomocą analizy wariancji ANOVA.....	176
Tab. 4.87 Określenie wpływu rodzaju lepiszcza, technologii wytwarzania oraz zawartości włókien aramidowych na wartości modułów pełzania i odprężenia za pomocą analizy wariancji ANOVA.	178
Tab. 4.88. Określenie wpływu rodzaju lepiszcza, technologii wytwarzania oraz zawartości włókien polimerowo-bazaltowych na różnice w zawartości wolnej przestrzeni za pomocą analizy wariancji ANOVA.....	181

Tab. 4.89 Parametry mieszanek mineralno-asfaltowych wykorzystane w optymalizacjach.	184
Tab. 4.90. Graniczne wartości użyteczności dla parametrów wg WT-2 2014.....	186
Tab. 4.91 Użyteczność cząstkowa funkcji dla poszczególnych parametrów oraz wskaźnik użyteczności.	187
Tab. 4.92 Wskaźnik użyteczności dla mieszanek z lepiszczem asfaltowym 50/70.	189
Tab. 4.93 Wskaźnik użyteczności dla mieszanek z lepiszczem asfaltowym 45/80-55.....	189
Tab. 4.94 Wskaźnik użyteczności dla mieszanek z lepiszczem asfaltowym 45/80-80.....	189
Tab. 4.95 Wskaźnik użyteczności dla mieszanek wytwarzanych w obniżonej temperaturze o 30°C.	190
Tab. 4.96 Użyteczność cząstkowa funkcji dla poszczególnych parametrów oraz wskaźnik użyteczności.	191
Tab. 4.97 Wskaźnik użyteczności dla mieszanek z lepiszczem asfaltowym 50/70 w aspekcie właściwości wysokotemperaturowych.	192
Tab. 4.98 Wskaźnik użyteczności dla mieszanek z lepiszczem asfaltowym 45/80-55 w aspekcie właściwości wysokotemperaturowych.	193
Tab. 4.99 Wskaźnik użyteczności dla mieszanek z lepiszczem asfaltowym 45/80-80 w aspekcie właściwości wysokotemperaturowych.	193
Tab. 4.100 Wskaźnik użyteczności dla mieszanek wytwarzanych w obniżonej temperaturze o 30°C w aspekcie właściwości wysokotemperaturowych.	194

SPIS ZAŁĄCZNIKÓW

Tab. Z. 1 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami zawartości wolnej przestrzeni mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien aramidowych.	217
Tab. Z. 2 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami zawartości wolnej przestrzeni mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.	218
Tab. Z. 3 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami proporcjonalnej głębokości koleiny mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien aramidowych.	219
Tab. Z. 4 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami tempa przyrostu koleiny mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien aramidowych.	220
Tab. Z. 5 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami proporcjonalnej głębokości koleiny mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.	221
Tab. Z. 6 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami tempa przyrostu koleiny mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.	222
Tab. Z. 7 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami wytrzymałości na pośrednie rozciąganie próbek suchych mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien aramidowych.	223
Tab. Z. 8 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami wytrzymałości na pośrednie rozciąganie próbek mokrych mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien aramidowych.	224
Tab. Z. 9 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami wytrzymałości na pośrednie rozciąganie próbek suchych mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.	225
Tab. Z. 10 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami wytrzymałości na pośrednie rozciąganie próbek mokrych mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.	226
Tab. Z. 11 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami współczynnika zagęszczalności referencyjnych mieszanek mineralno-asfaltowych.	226
Tab. Z. 12 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami wskaźnika stabilności referencyjnych mieszanek mineralno-asfaltowych.	227
Tab. Z. 13 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami indeksu oporności referencyjnych mieszanek mineralno-asfaltowych.	227
Tab. Z. 14 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami współczynnika zagęszczalności mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien aramidowych.	227
Tab. Z. 15 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami wskaźnika stabilności mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien aramidowych.	228
Tab. Z. 16 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami indeksu oporności mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien aramidowych.	228

Tab. Z. 17 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami współczynnika zagęszczalności mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.	229
Tab. Z. 18 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami wskaźnika stabilności mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.	229
Tab. Z. 19 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami indeksu oporności mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.	230
Tab. Z. 20 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami modułu sztywności w pośrednim rozciąganiu w temperaturze 5°C referencyjnych mieszanek mineralno-asfaltowych.	230
Tab. Z. 21 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami modułu sztywności w pośrednim rozciąganiu w temperaturze 15°C referencyjnych mieszanek mineralno-asfaltowych.	230
Tab. Z. 22 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami modułu sztywności w pośrednim rozciąganiu w temperaturze 20°C referencyjnych mieszanek mineralno-asfaltowych.	231
Tab. Z. 23 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami modułu sztywności w pośrednim rozciąganiu w temperaturze 5°C mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien aramidowych.	231
Tab. Z. 24 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami modułu sztywności w pośrednim rozciąganiu w temperaturze 15°C mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien aramidowych.	232
Tab. Z. 25 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami modułu sztywności w pośrednim rozciąganiu w temperaturze 20°C mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien aramidowych.	232
Tab. Z. 26 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami modułu sztywności w pośrednim rozciąganiu w temperaturze 5°C mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.	233
Tab. Z. 27 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami modułu sztywności w pośrednim rozciąganiu w temperaturze 15°C mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.	233
Tab. Z. 28 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami modułu sztywności w pośrednim rozciąganiu w temperaturze 20°C mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.	234
Tab. Z. 29 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami zespolonego modułu sztywności w temperaturze -10°C referencyjnych mieszanek mineralno-asfaltowych.	234
Tab. Z. 30 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami zespolonego modułu sztywności w temperaturze 5°C referencyjnych mieszanek mineralno-asfaltowych.	234

Tab. Z. 31 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami zespolonego modułu sztywności w temperaturze 20°C referencyjnych mieszanek mineralno-asfaltowych.	235
Tab. Z. 32 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami zespolonego modułu sztywności w temperaturze 35°C referencyjnych mieszanek mineralno-asfaltowych.	235
Tab. Z. 33 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami zespolonego modułu sztywności w temperaturze -10°C mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien aramidowych.	235
Tab. Z. 34 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami zespolonego modułu sztywności w temperaturze 5°C mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien aramidowych.	236
Tab. Z. 35 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami zespolonego modułu sztywności w temperaturze 20°C mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien aramidowych.	236
Tab. Z. 36 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami zespolonego modułu sztywności w temperaturze 35°C mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien aramidowych.	237
Tab. Z. 37 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami zespolonego modułu sztywności w temperaturze -10°C mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.	237
Tab. Z. 38 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami zespolonego modułu sztywności w temperaturze 5°C mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.	238
Tab. Z. 39 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami zespolonego modułu sztywności w temperaturze 20°C mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.	238
Tab. Z. 40 Ocena istotności różnic między średnimi wartościami zespolonego modułu sztywności w temperaturze 35°C mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.	239
Tab. Z. 41 Ocena istotności różnic modułów pełzania referencyjnych mieszanek mineralno-asfaltowych.	239
Tab. Z. 42 Ocena istotności różnic procentowej wartości odprężeń referencyjnych mieszanek mineralno-asfaltowych.	239
Tab. Z. 43 Ocena istotności różnic modułów pełzania mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien aramidowych.	240
Tab. Z. 44 Ocena istotności różnic procentowej wartości odprężeń mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien aramidowych.	240

Tab. Z. 45 Ocena istotności różnic modułów pełzania mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.	241
Tab. Z. 46 Ocena istotności różnic procentowej wartości odprężeń mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem włókien polimerowo-bazaltowych.....	241