



POLITECHNIKA GDAŃSKA
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Katedra Inżynierii Drogowej

ul. G. Narutowicza 11
80-233 GDAŃSK

Tel: (0-58) 347 13 47
Fax: (0-58) 347 10 97

Mgr inż. Marcin Stienss

**BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI
FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-
ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE
PRODUKCJI**

PRACA DOKTORSKA

Promotor:
Prof. dr hab. inż. Józef Judycki

Gdańsk, 2014

SPIS TREŚCI:

STRESZCZENIE	6
SUMMARY	8
1. WSTĘP	10
1.1. WPROWADZENIE	10
1.2. TEZA PRACY	12
1.3. CEL PRACY	12
1.4. ZAKRES PRACY	13
2. STUDIA LITERATURY	14
2.1. WPŁYW CECH SKŁADNIKÓW MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH NA PROCES ICH PRODUKCJI I WBUDOWYWANIA	14
2.1.1. Wpływ lepkości asfaltu	14
2.1.2. WPŁYW ADHEZJI ASFALTU I KRUSZYWA.....	17
2.1.3. WPŁYW KRUSZYWA.....	18
2.2. OPIS TECHNOLOGII OBNIŻANIA TEMPERATURY PRODUKCJI MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH	20
2.2.1. Sasobit	22
2.2.2. Asphaltan-B.....	24
2.2.3. Licomont BS 100.....	25
2.2.4. LEADCAP.....	25
2.2.5. Rediset WMX.....	27
2.2.6. Rediset LQ.....	27
2.2.7. Ceca Base RT	28
2.2.8. TLA-X Warm Mix.....	29
2.2.9. SonneWarmix	29
2.2.10. Iterlow T / QualiTherm / HyperTherm.....	30
2.2.11. Colas 3E LT	30
2.2.12. Evotherm 3G.....	31
2.2.13. Zeolit.....	32
2.3. WYBRANE TECHNOLOGIE PRODUKCJI MIESZANEK WMA W TECHNOLOGII SPIENIANIA ASFALTU.....	33
2.4. DOTYCZĄCE BADANIA WPŁYWU DODATKÓW OBNIŻAJĄCYCH TEMPERATURĘ NA PARAMETRY LEPISZCZA I MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH.....	34
2.4.1. Badania właściwości lepiszcza	34
2.4.2. Badania właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych	40
2.5. EMISJE SZKODLIWYCH ZWIĄZKÓW ORAZ ZUŻYCIE ENERGII	43
2.6. PODSUMOWANIE STUDIÓW LITERATURY	48
3. BADANE MATERIAŁY	50
3.1. WYBÓR RODZAJU MIESZANKI MINERALNO-ASFALTOWEJ DO BADAŃ	50
3.2. DODATKI WMA OBNIŻAJĄCE TEMPERATURĘ PRODUKCJI I WBUDOWYWANIA STOSOWANE W BADANIACH	51
3.3. ASFALTY STOSOWANE W BADANIACH	52
3.4. KRUSZYWA STOSOWANE W BADANIACH	53
3.5. PROJEKTOWANIE BETONU ASFALTOWEGO PRZEZNACZONEGO DO BADAŃ	55
3.5.1. Dobór składu mieszanki mineralnej	55
3.5.2. Dobór zawartości asfaltu	56
4. METODYKA BADAŃ LABORATORYJNYCH	59
4.1. WPROWADZENIE	59
4.2. MODYFIKACJA ASFALTÓW DODATKAMI WMA W WARUNKACH LABORATORYJNYCH	59
4.2.1. Modyfikacja asfaltów dodatkami w postaci stałej Sasobit, Licomont BS100, Rediset WMX	60
4.2.2. Modyfikacja asfaltów dodatkiem w postaci płynnej Ceca Base RT	63
4.2.3. Modyfikacja asfaltów dodatkiem zeolitu	63
4.3. PRZYGOTOWANIE PRÓBEK DO BADAŃ.....	63
4.3.1. Przygotowanie próbek do badań cech asfaltów	63
4.3.2. Przygotowanie próbek do badań cech mieszanek mineralno-asfaltowych.....	63

4.3.2.1. Wytwarzanie mieszanek mineralno-asfaltowych z asfaltami czystymi oraz z dodatkami Sasobit, Licomont BS100, Rediset WMX, Ceca Base RT.....	64
4.3.2.2. Wytwarzanie mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem zeolitu.....	65
4.3.2.3. Formowanie i zagęszczanie próbek mieszanek mineralno-asfaltowych.....	65
4.4. WYKORZYSTANE METODY BADAWCZE	67
4.4.1. Wykorzystane metody badawcze cech asfaltów	67
4.4.2. Wykorzystane metody badawcze mieszanek mineralno-asfaltowych	68
4.4.2.1. Stabilność	68
4.4.2.2. Zagęszczalność	68
4.4.2.3. Odporność na działanie wody i mrozu	71
4.4.2.4. Starzenie	75
4.4.2.5. Koleinowanie.....	79
4.4.2.6. Odporność na spękania niskotemperaturowe	82
4.5. OSZACOWANIE DOKŁADNOŚCI POMIARÓW	85
4.5.1. Odmienność warunków zewnętrznych podczas przygotowywania próbek.....	86
4.5.2. Zmienne warunki temperaturowe występujące w trakcie badania pojedynczych próbek ..	86
4.5.3. Niejednorodność struktury wewnętrznej materiału	87
4.5.4. Dokładność metod pomiarowych.....	87
4.5.5. Doświadczalna ocena rozrzutów wyników badań.....	89
5. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ LABORATORYJNYCH.....	90
5.1. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ ASFALTÓW	90
5.1.1. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ PENETRACJI	90
5.1.2. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ TEMPERATURY MIĘKNIENIA	92
5.1.3. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ LEPKOŚCI.....	94
5.2. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH.....	99
5.2.1. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ STABILNOŚCI WG MARSHALLA.....	99
5.2.2. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ ZAGĘSZCZALNOŚCI W ZAGĘSZCZARCE WALCOWEJ	101
5.2.3. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ ODPORNOŚCI NA DZIAŁANIE WODY I MROZU	107
5.2.4. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ WPŁYWU STARZENIA	110
5.2.5. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ ODPORNOŚCI NA KOLEINOWANIE.....	119
5.2.6. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ ODPORNOŚCI NA SPĘKANIA NISKOTEMPERATUROWE	122
5.3. WNIOSKI Z ETAPU BADAŃ LABORATORYJNYCH.....	124
6. BADANIA TERENOWE – ODCINEK DOŚWIADCZALNY	126
6.1. CEL BADAŃ TERENOWYCH	126
6.2. WYBÓR LOKALIZACJI I WYKONAWCY ODCINKA DOŚWIADCZALNEGO	126
6.3. MATERIAŁY STOSOWANE W BADANIACH TERENOWYCH.....	127
6.3.1. Rodzaju mieszanki mineralno-asfaltowej przeznaczonej do badań terenowych.....	127
6.3.2. Dodatki WMA obniżające temperaturę produkcji i wbudowywania zastosowane w badaniach terenowych	127
6.3.3. Asfalt zastosowany w badaniach terenowych	128
6.3.4. Kruszywa zastosowane w badaniach terenowych.....	128
6.3.5. Projektowanie mastyksu grysowego SMA przeznaczonego do badań terenowych.....	129
6.3.5.1. Dobór składu mieszanki mineralnej	129
6.3.5.2. Dobór zawartości asfaltu	130
6.3.5.3. Skład mieszanki mineralno-asfaltowej mastyksu grysowego SMA	130
6.3.5.4. Parametry mieszanki mineralno-asfaltowej mastyksu grysowego SMA	131
6.4. WYKONANIE ODCINKA DOŚWIADCZALNEGO	132
6.5. METODYKA BADAŃ NA ODCINKU DOŚWIADCZALNYM	137
6.5.1. Wprowadzenie	137
6.5.2. Przygotowanie próbek do badań	138
6.5.2.1. Pobieranie próbek luźnej mieszanki mastyksu grysowego SMA wytworzonej w wytwórni mas bitumicznych i pobranej na budowie.....	138
6.5.2.2. Pobieranie próbek walcowych mieszanki mastyksu grysowego SMA wytworzonego w wytwórni mas bitumicznych z wykonanej warstwy ścieralnej.....	139
6.5.2.3. Formowanie i zagęszczanie próbek z powtórnie rozgrzanej luźnej mieszanki mastyksu grysowego SMA wytworzonej w wytwórni mas bitumicznych i pobranej na budowie ..	139
6.5.3. Wykorzystane metody badawcze	140
6.5.3.1. Odporność na działanie wody i mrozu	140

6.5.3.2. Starzenie	141
6.5.3.3. Koleinowanie.....	142
6.5.3.4. Odporność na spękania niskotemperaturowe	143
6.5.3.5. Wskaźnik zagęszczenia i zawartość wolnych przestrzeni.....	144
6.6. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ	144
6.6.1. Odporność na działanie wody i mrozu	144
6.6.2. Starzenie długoterminowe	145
6.6.3. Odporność na koleinowanie	149
6.6.4. Odporność na spękania niskotemperaturowe	152
6.6.5. Zawartość wolnych przestrzeni i wskaźniki zagęszczenia w nawierzchni	154
6.6. WNIOSKI Z ETAPU BADAŃ TERENOWYCH.....	155
7. ANALIZA PRACY NAWIERZCHNI WYKONANYCH Z MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH ZAWIERAJĄCYCH DODATKI OBNIŻAJĄCE TEMPERATURĘ PRODUKCJI I WBUDOWYWANIA	156
7.1. WSTĘP	156
7.2. ANALIZA TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ	157
7.2.1. Procedura analizy	157
7.2.2. Przyjęcie kryteriów zmęczeniowych.....	157
7.2.3. Ocena statystyczna istotności wartości średnich parametrów materiałowych mieszanek mineralno-asfaltowych uzyskanych na etapie badań laboratoryjnych	159
7.2.3. Przyjęcie układu warstw konstrukcji nawierzchni oraz parametrów obciążenia.....	161
7.2.4. Obliczenie naprężeń i odkształceń w programie BISAR.....	164
7.2.5. Obliczenie trwałości zmęczeniowych analizowanych nawierzchni.....	169
7.2.6. Analiza wyników i wnioski.....	170
7.3. ANALIZA LEPKOSPĘŻYSTA.....	171
7.3.1 Procedura analizy	172
7.3.2. Wybór rodzajów mieszanek mineralno-asfaltowych do badań i analizy	172
7.3.3. Przyjęcie modelu reologicznego	173
7.3.4. Badania modułów dynamicznych w urządzeniu AMPT/SPT.....	176
7.3.5. Przyjęcie układu warstw nawierzchni do analizy wraz z rozkładem temperatury wewnątrz konstrukcji.....	180
7.3.6. Określenie krzywych wiodących badanych mieszanek mineralno-asfaltowych, modułu zespolonego E^* oraz kąta przesunięcia fazowego ϕ	186
7.3.7. Porównanie uzyskanych krzywych wiodących mieszanek mineralno-asfaltowych oraz krzywych Blacka	193
7.3.8. Określenie parametrów lepkosprężystości w programie DEBUROAD	194
7.3.9. Przeprowadzenie obliczeń w programie VEROAD.....	196
7.3.10. Analiza wyników i wnioski.....	199
8. WNIOSKI KOŃCOWE	203
8.1. WNIOSKI Z BADAŃ LABORATORYJNYCH.....	203
8.2. WNIOSKI Z BADAŃ TERENOWYCH.....	204
8.3. WNIOSKI Z ANALIZY TEORETYCZNEJ PRACY NAWIERZCHNI	204
8.4. KIERUNKI DALSZYCH PRAC.....	205
SPIS LITERATURY	206
ZAŁĄCZNIK P.1 – PLAN ORIENTACYJNY ODCINKA DOŚWIADCZALNEGO	216
ZAŁĄCZNIK P.2 – PLAN SYTUACYJNY ODCINKA DOŚWIADCZALNEGO	217

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

STRESZCZENIE

Niniejsza praca doktorska składa się zasadniczo z trzech części. Część pierwsza opisuje badania laboratoryjne asfaltów oraz mieszanek mineralno-asfaltowych, zawierających w swoim składzie dodatki WMA służące do obniżania temperatury produkcji i wbudowywania. Na etapie badań laboratoryjnych przebadano pięć dostępnych dodatków, w kombinacji z dwoma rodzajami asfaltów – asfaltem drogowym zwykłym 50/70 oraz asfaltem modyfikowanym 45/80-55. Badaną mieszanką mineralno-asfaltową był beton asfaltowy do warstwy ścieralnej.

W części drugiej przedstawiono wyniki badań uzyskane w trakcie realizacji odcinka doświadczalnego, podczas którego wytwarzano i wbudowywano na drodze mieszankę mastyksu grysowego SMA z asfaltem modyfikowanym wraz z dodatkami WMA. Do etapu badań terenowych wyznaczono trzy środki WMA, które wybrano na podstawie wniosków uzyskanych podczas badań laboratoryjnych.

Część trzecia zawiera analizy teoretyczne pracy nawierzchni z wybranymi dodatkami WMA. Obliczenia pracy nawierzchni przeprowadzono w dwóch wariantach. W pierwszym z nich, mechanistycznym, założono liniowosprężyste charakterystyki materiałów nawierzchniowych oraz obliczono trwałość zmęczeniową wykorzystując kryterium zmęczeniowe AASHTO 2004. W drugim wariantcie obliczeń przy użyciu programu VEROAD przeprowadzono analizę uwzględniającą lepkosprężysty charakter warstw asfaltowych. Analizy pracy nawierzchni przeprowadzono dla mieszanek z trzema wybranymi dodatkami WMA.

Na podstawie wyników badań laboratoryjnych, terenowych oraz analiz teoretycznych sformułowano następujące wnioski:

1. Działanie dodatków WMA umożliwiające obniżenie temperatury produkcji i wbudowywania nawierzchni jest zjawiskiem złożonym i nie jest związane jedynie ze zmianą lepkości lepiszcza asfaltowego. W warunkach laboratoryjnych trudno jednoznacznie stwierdzić poprawę urabialności i zagęszczalności.
2. Niektóre dodatki WMA powodują zmianę zachowania się lepiszcza w zakresie penetracji i temperatury mięknięcia.
3. Przebadane dodatki WMA nie powodują pogorszenia parametrów fizyko mechanicznych mieszanek mineralno-asfaltowych, a w niektórych przypadkach wpływają pozytywnie na wybrane parametry.
4. Mieszanki mineralno-asfaltowe wyprodukowane w warunkach przemysłowych z dodatkami WMA nie odbiegały zachowaniem od mieszanki zawierającej czysty asfalt (bez dodatków).

5. Przy obecnym poziomie technicznym produkcja mieszanek z dodatkami WMA możliwa jest w aktualnie wykorzystywanych wytwórniach mieszanek mineralno-asfaltowych.
6. Analiza mechanistyczna pracy nawierzchni pokazała, że wykorzystywanie dotychczas stosowanych kryteriów zmęzeniowych przy obliczaniu trwałości zmęczeniowej nawierzchni z dodatkami WMA może prowadzić do uzyskiwania do nieprecyzyjnych wniosków.
7. Proces wbudowania i zagęszczania mieszanek z dodatkami WMA przebiegał bez zakłóceń, a wbudowane warstwy asfaltowe miały prawidłowe właściwości fizykomechaniczne.
8. Obliczenia pracy nawierzchni w programie VEROAD z uwzględnieniem występowania efektów lepkośćościstywości wykazały zgodność z wynikami badań laboratoryjnych, tj. wprowadzenie do składu mieszanki mineralno-asfaltowej wybranych dodatków WMA (należących do grupy środków organicznych) powoduje zwiększenie odporności nawierzchni na deformacje trwałe.

STUDIES AND ANALYSIS OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF WARM ASPHALT MIXES

SUMMARY

This doctoral thesis consists of three parts. In the first part, studies concerning laboratory research of bitumen and asphalt mixes that include warm mix additives are presented. At the laboratory stage of the research, five different types of warm mix additives with two types of bitumen – normal bitumen with penetration grade 50/70 and modified bitumen with penetration grade 45/80-55 – were tested. The type of asphalt mix that was tested during this part of the research was asphalt concrete for wearing course.

The second part of the thesis presents results which were obtained during execution of experimental section. In the experimental section, stone matrix asphalt with three different warm mix additives chosen after laboratory phase conclusions was used.

Part three concerns theoretical analysis of pavement structures that includes layers constructed with certain warm mix asphalt additives. The theoretical analysis was performed in two stages. In the first stage, linear elastic characteristics of materials used were applied and AASHTO 2004 fatigue criterion was used. In the second stage, computer software VEROAD was used and viscoelastic properties of asphalt layers were assumed. Theoretical analysis was performed for two different warm mix asphalt additives.

With the use of laboratory tests, field research and theoretical analysis, the following conclusions were formulated:

1. The mechanism of warm mix asphalt additives that allows the reduction of production and laying temperatures is a complicated phenomenon and it is combined not only with changes in viscosity. In the laboratory conditions, it is hard to clearly state the improvement in workability and compactibility.
2. Some warm mix asphalt additives change penetration and softening point of the bitumen.
3. Warm mix asphalt additives that were tested in this thesis do not worsen physical and mechanical properties of asphalt mixes. In some cases these parameters even positive impact was noticed.
4. Warm asphalt mixes that were produced in real conditions did not vary from mix that were produced with neat bitumen (without WMA additives).
5. At the present technical state, the production of warm asphalt mixes is possible in traditional hot mix asphalt plants.
6. The theoretical analysis of pavements with warm mix additives shows, that using traditional fatigue criteria for these mixes can be misleading and result in improper conclusions.

7. The process of laying and compacting of warm mix asphalt was not interrupted by technical difficulties and layers were constructed in appropriate way.
8. Analysis that used VEROAD software which assumed viscoelasticity of asphalt mixes showed accordance with conclusions obtained after conducting laboratory phase of the research.

1. Wstęp

1.1. Wprowadzenie

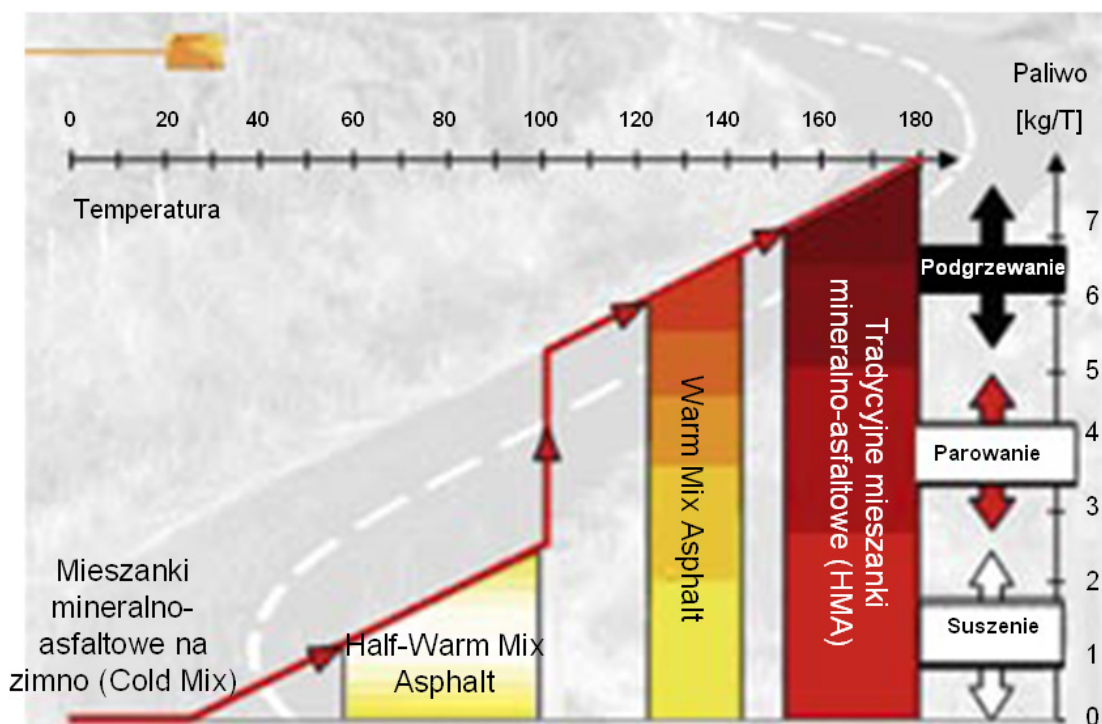
Budowa nawierzchni asfaltowych wymaga istotnej ilości energii. Związane jest to z zachowaniem jednego z podstawowych składników mieszanek mineralno-asfaltowych jakim jest asfalt. Aby mógł on dokładnie otoczyć wszystkie ziarna kompozytu mineralnego oraz było możliwe przetransportowanie gotowej mieszanki, a następnie jej wbudowanie i zagęszczenie konieczne jest jego podgrzanie do temperatury 150-195 °C lub nawet 230 °C w przypadku asfaltu lanego, ponieważ dopiero w takiej temperaturze uzyskuje on odpowiednią niską lepkość. Jeszcze większą ilość energii pochłania podgrzanie drugiego głównego składnika mieszanki jakim jest kruszywo, które dla zapewnienia dobrej przyczepności pomiędzy lepiszczem a powierzchnią ziaren mineralnych musi być dokładnie wysuszone i gorące. Oczywistym jest, że taki proces technologiczny nie jest obojętny dla środowiska naturalnego z uwagi na zużycie paliw wykorzystywanych do podgrzewania składników w procesie produkcji oraz wynikającą z tego emisję gazów cieplarnianych, szkodliwych związków oraz pyłów.

W odpowiedzi na powyższe kwestie w latach 90 XX wieku w Europie rozpoczęto prace nad opracowaniem technologii produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych, które pozwalałyby na obniżenie temperatury wytwarzania, rozkładania i zagęszczania. Uzyskano w ten sposób mieszanki nazywane w terminologii anglojęzycznej „warm mix asphalt” („mieszanki mineralno-asfaltowe na ciepło”) i oznaczane skrótem „WMA”. Charakteryzują się one temperaturą niższą o rząd 20-30 °C na każdym etapie procesu technologicznego (otaczanie, wbudowanie, zagęszczanie) od mieszanek wytwarzanych tradycyjnie, określanych jako „hot mix asphalt” („mieszanki mineralno-asfaltowe na gorąco”), w skrócie „HMA”. Obniżenia temperatury mieszanek osiągnęte jest poprzez jeden z następujących zabiegów:

- a) wprowadzenie do asfaltu dodatków zwiększających urabialność mieszanki mineralno-asfaltowej, zwanych dalej „dodatkami WMA”,
- b) spienienie asfaltu w obecności niewielkiej ilości wody, co prowadzi do czasowego, znacznego obniżenia jego lepkości, a w konsekwencji zwiększenia urabialności wykonanej z nim mieszanki mineralno-asfaltowej.

Zakres niniejszej pracy doktorskiej obejmuje pierwszy z wymienionych zabiegów technologicznych i nie dotyczy badań technologii wykorzystujących spienianie asfaltu za pomocą wody.

Umiejscowienie mieszanek mineralno-asfaltowych typu WMA pod względem temperatury produkcji w stosunku do mieszanek tradycyjnych typu HMA oraz mieszanek „na zimno” („cold mix asphalt”) produkowanych na bazie emulsji asfaltowych pokazano na schemacie zamieszczonym na rysunku 1.1. Występują na nim również mieszanki typu „half-warm mix asphalt”, których wytwarzanie polega na wykorzystaniu spienienia asfaltu i stosunkowo niewielkim (60-100 °C) podgrzaniu mieszanki mineralnej, bez przekraczania temperatury wrzenia wody.



Rys. 1.1. Zakresy temperatury produkcji poszczególnych rodzajów mieszanek mineralno-asfaltowych (opracowano na podstawie [89])

Uważa się, że zastosowanie mieszanek mineralno-asfaltowych typu WMA może przynieść wymierne korzyści nie tylko o charakterze środowiskowym – takie jak zmniejszenie zużycia energii i emisji szkodliwych związków – ale również technologicznym. Niższa temperatura otoczenia oznacza mniejsze starzenie technologiczne asfaltu oraz mniejszą uciążliwość środowiska pracy dla pracowników bezpośrednio zaangażowanych w proces produkcji i układania. Ponadto, w przypadku wyprodukowania mieszanki z wykorzystaniem technologii WMA opierającej się na dodatkach bądź spienieniu asfaltu, ale w temperaturze jak dla mieszanki tradycyjnej, możliwe jest wydłużenie czasu, jaki może minąć od momentu opuszczenia wytwórni do zakończenia zagęszczania. Ten dodatkowy okres czasu umożliwia wydłużenie czasu transportu bądź pozwala na poprawne wbudowanie i zagęszczenie warstwy pomimo panujących niekorzystnych warunków atmosferycznych powodujących szybkie ochładzanie się układanej mieszanki. Przytoczone pozytywne efekty zastosowania powodują, że technologie WMA korzystnie współdziałają z innymi „zielonymi” technologiami produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych – modyfikacją za pomocą miazgi gumowej (dodatek gumy wymusza zwiększenie temperatury produkcji) oraz recyklingiem na gorąco w wytwórni pozyskanego destruktu asfaltowego ze starych nawierzchni, który jest szczególnie wrażliwy na przegrzanie.

Pomimo coraz bardziej dynamicznego zwiększania ilości produkowanych mieszanek WMA na całym świecie, wciąż stawiane są pytania, czy obniżenie temperatury produkcji i zagęszczania o rząd 20-30°C przy jednoczesnym wprowadzeniu do składu kolejnego „obcego” składnika jakim jest dodatek poprawiający urabialność lub

niewielkiej ilości wody pochodzącej z procesu spieniania pozwoli na uzyskanie tej samej jakości i trwałości nawierzchni, jaką zapewniają tradycyjne mieszanki „na gorąco”. Pytania te są szczególnie istotne, ponieważ mieszanki WMA są stosowane dopiero od kilku lat i brak jest kilkudziesięcioletnich obserwacji zachowania się nawierzchni wykonanych z tego typu mieszanki w całym okresie eksploatacji – od momentu wbudowania do momentu zakończenia eksploatacji.

W Polsce, mając na uwadze, iż proces rozbudowy infrastruktury drogowej do poziomu zachodnioeuropejskiego będzie trwał jeszcze przez wiele lat i nie będzie dotyczył tylko autostrad, dróg ekspresowych lub krajowych, ale również dróg niższego rzędu nie można w żaden sposób zaniedbać wykorzystania mieszank mineralno-asfaltowych o obniżonej temperaturze produkcji i zagęszczania. Wydaje się również, że z powodu występujących obecnie uwarunkowań, tj. wyposażenia wykonawców prawie wyłącznie w wytwórnie mas bitumicznych o działaniu cyklicznym, jako pierwsze zostaną wykorzystane technologie WMA oparte na dodatkach modyfikujących asfalt, ponieważ wymagają one stosunkowo niewielkich modyfikacji już posiadanego sprzętu. Z tego względu, konieczne jest wyjątkowo dokładne określenie wpływu dodatków WMA na właściwości nawierzchni z ich udziałem.

1.2. Teza pracy

Sformułowano dwie następujące tezy pracy:

1. Właściwości fizykomechaniczne mieszank mineralno-asfaltowych z odpowiednio dobranymi dodatkami obniżającymi temperaturę produkcji i wbudowania nie ulegają pogorszeniu w stosunku do mieszank tradycyjnych, zaś w niektórych zakresach nawet ulegają polepszeniu.
2. Trwałość nawierzchni wykonanej z mieszank mineralno-asfaltowych o obniżonej temperaturze nie może być niższa w porównaniu do nawierzchni z mieszank tradycyjnych.

1.3. Cel pracy

Mieszanki mineralno-asfaltowe o obniżonej temperaturze produkcji i wbudowania wytwarzane w oparciu o dodatki WMA są stosowane od niedawna i w związku z tym brak jest pełnych informacji na temat ich właściwości oraz zachowania się w trakcie eksploatacji nawierzchni drogowej. Szczególnie istotne jest znalezienie odpowiedzi na następujące kwestie:

- Czy właściwości mieszank z dodatkami WMA w niskich temperaturach nie ulegają pogorszeniu w stosunku do mieszank tradycyjnych?
- Czy nie ulega pogorszeniu ich odporność na działanie wody i mrozu?
- Czy w wysokich temperaturach będą odporne na koleinowanie?
- Czy zastosowanie dodatków WMA w składzie mieszanki mineralno-asfaltowej nie spotęguje efektu starzenia technologicznego i eksploatacyjnego?

Szczegółowe cele pracy to:

- Ocena wpływu przyjętych dodatków na wybrane parametry samego lepiszcza asfaltowego (penetracja, temperatura mięknięcia, lepkość dynamiczna), zarówno przed jak i po starzeniu.
- Ocena wpływu wybranych dodatków na parametry mieszanek mineralno-asfaltowych takie jak stabilność, zagęszczalność, sztywność, odporność na działanie wody i mrozu, koleinowanie, starzenie, a także zachowanie niskotemperaturowe. Parametry te określono w niniejszej pracy dla mieszanek wytworzonych w warunkach laboratoryjnych, jak i przemysłowych.
- Analiza wpływu wybranych dodatków na obliczeniową trwałość nawierzchni wykonanej z mieszanek o obniżonej temperaturze produkcji i wbudowania.

1.4. Zakres pracy

Niniejsza praca doktorska obejmuje badania mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkami obniżającymi temperaturę otaczania i wbudowywania poprzez obniżenie lepkości lub polepszenie zwilżalności kruszywa. Praca nie obejmuje badań technologii produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych o obniżonej temperaturze otaczania i wbudowywania wykorzystujących zjawisko spieniania asfaltu, z wyjątkiem badań mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem zeolitu. Środek ten jest szczególnym przypadkiem, ponieważ dodanie go do mieszanki mineralno-asfaltowej powoduje efekt spieniania asfaltu, a przy tym nie wymaga specjalistycznych instalacji produkcyjnych. W pracy użyto go do porównania jego działania z innymi środkami.

Praca doktorska obejmuje 8 rozdziałów:

Rozdział 1 zawiera wprowadzenie w temat pracy doktorskiej, opis celu badań, tezę oraz zakres pracy.

Rozdział 2 zawiera studia literatury dotyczące mieszanek mineralno-asfaltowych o obniżonej temperaturze produkcji i wbudowania. Zawarto w nim opis dostępnych technologii produkcji mieszanek WMA, dotychczasowych badań wpływu dodatków obniżających temperaturę na parametry lepiszcza i samych mieszanek mineralno-asfaltowych oraz doświadczeń z technologiami WMA na świecie, w tym uzyskane redukcje emisji szkodliwych związków oraz zużycia energii.

Rozdział 3 zawiera opis materiałów wykorzystanych w badaniach laboratoryjnych.

Rozdział 4 dotyczy opisu badań laboratoryjnych wykorzystanych do określenia parametrów lepiszcza z dodatkami obniżającymi temperaturę produkcji i wbudowania oraz badań właściwości fizykomechanicznych mieszanek mineralno-asfaltowych wytworzonych z tymi dodatkami.

Rozdział 5 dotyczy analizy otrzymanych wyników badań laboratoryjnych przeprowadzonych przez autora. Określano wpływ dodatków obniżających temperaturę na parametry lepiszcza takie jak penetracja, temperatura mięknięcia, lepkość dynamiczna przed i po starzeniu TFOT oraz właściwości samych mieszanek mineralno-asfaltowych takich jak stabilność, zagęszczalność, sztywność, odporność na działanie wody i mrozu oraz starzenie a także zachowania niskotemperaturowe.

Rozdział 6 opisuje badania terenowe wykonane przez autora. Przedstawiono w nim badania wykonane na mieszankach wyprodukowanych i wbudowanych na odcinku

doświadczalnym, na którym zastosowano zwykłą mieszankę mastyksu grysowego SMA oraz mieszankę SMA z trzema dodatkami obniżającymi temperaturę produkcji i wbudowania.

Rozdział 7 zawiera mechanistyczną analizę trwałości konstrukcji nawierzchni przy uwzględnieniu wpływu dodatków obniżających temperaturę na parametry mieszanek mineralno-asfaltowych oraz analizę wykorzystującą elementy teorii lepkosprężystości i dotyczącą pracy w wysokich temperaturach nawierzchni z wybranymi dodatkami WMA.

W rozdziale 8 przedstawiono wnioski końcowe opracowane na podstawie analizy wyników własnych badań laboratoryjnych i terenowych.

2. STUDIA LITERATURY

2.1. Wpływ cech składników mieszanek mineralno-asfaltowych na proces ich produkcji i wbudowywania

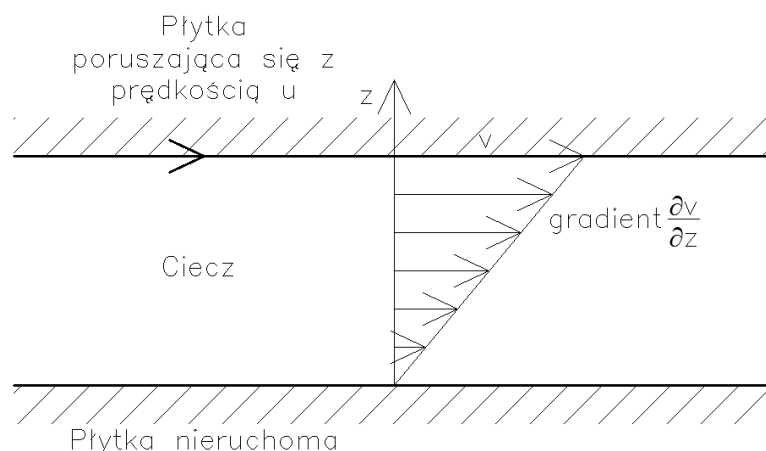
Dodatki WMA umożliwiające obniżenie temperatury wytwarzania oraz wbudowywania mieszanek mineralno-asfaltowych wpływają na wybrane cechy lepszczą i wykorzystują następujące mechanizmy:

- zmieniają charakterystykę lepkości asfaltu poprzez jej zmniejszenie w zakresie temperatur produkcyjnych przy jednoczesnym pozostawieniu na tym samym poziomie lub nieznacznym zwiększeniu w zakresie temperatur eksploatacyjnych,
- zmieniają charakterystykę zachowania asfaltu w zakresie powinowactwa do kruszywa, polepszając jego zwilżalność oraz adhezję.

Działanie dodatków WMA może opierać się na tylko jednym z wymienionych mechanizmów lub wykorzystywać oba jednocześnie. Ponadto, już po wyprodukowaniu mieszanki, na proces jej zagęszczania ma wpływ również drugi główny składnik jakim jest kruszywo. W dalszej części tekstu opisano wpływ wybranych składników i ich cech na proces produkcji i wbudowywania.

2.1.1. Wpływ lepkości asfaltu

W ujęciu fizycznym lepkość jest miarą oporu, jaką stawia ciecz przy ścinaniu. Definiowana jest jako stosunek naprężeń ścinających (*shear stresses*) do szybkości ścinania (*shear rate*). Schematyczne zobrazowanie przemieszczania się cienkiej warstwy cieczy umieszczonej pomiędzy dwiema płytkami i poddanej ścinaniu pokazano na rysunku 1.



Rys. 1 Gradient szybkości ścinania występujący podczas przesuwania warstwy cieczy pomiędzy dwiema płytkami.

Do przesunięcia ze stałą prędkością górnej ruchomej płyty względem dolnej konieczne jest przyłożenie do niej poziomej siły F , która będzie proporcjonalna do powierzchni styku A oraz lepkości dynamicznej μ :

$$\vec{F} = \mu A \frac{\Delta V}{\Delta z} \quad (1.1)$$

$$\frac{\vec{F}}{A} = \mu \frac{\Delta V}{\Delta z} \quad (1.2)$$

przy czym również:

$$\tau = \frac{\vec{F}}{A} \quad (1.3)$$

po porównaniu obu równań można otrzymać:

$$\tau = \mu \frac{\Delta V}{\Delta z} \quad (1.4)$$

$$\mu = \frac{\tau}{\frac{\Delta v}{\Delta z}} \quad (1.5)$$

Lepkość asfaltu jest zmienna i zależna od temperatury w jakiej się on znajduje. Produkcja mieszanek mineralno-asfaltowych polega na otoczeniu każdego ziarna kruszywa błonką asfaltu o wymaganej grubości. Możliwe jest to jedynie przy jego odpowiednio wysokiej temperaturze. Zwiększenie temperatury asfaltu powoduje wzrost ruchliwości molekularnej i spadek sił wewnętrznych, co przekłada się na zmniejszenie lepkości umożliwiając tym samym rozprowadzenie asfaltu na

powierzchni ziaren agregatu mineralnego. Ponadto niewielka lepkość lepiszcza niezbędna jest również w procesie zagęszczania mieszanki w warstwie, w czasie którego ziarna kruszywa zbliżają się i wzajemnie obracają względem siebie. Zbyt mała lepkość asfaltu (uzyskana np. przez przegrzanie mieszanki) również nie jest korzystna, ponieważ oprócz negatywnego efektu starzenia lepiszcza może doprowadzić do jego spływania z ziaren kruszywa. Co więcej, w takiej sytuacji niemożliwe jest również prowadzenie prawidłowego zagęszczenia ponieważ następuje wyciskanie mieszanki spod walców.

W literaturze wymieniane są określone przedziały lepkości asfaltu, których przestrzeganie pozwala na właściwą produkcję, wbudowanie i zagęszczenie mieszanek mineralno-asfaltowych. Według [110] lepkość asfaltu podczas otaczania powinna znajdować się na poziomie 0,20 Pa·s, zaś w trakcie zagęszczania mieszanki na budowie w przedziale od 2 do 20 Pa·s.

Osiągnięcie poziomów lepkości niezbędnych do otoczenia i wbudowania mieszanki wymaga podgrzania lepiszcza do temperatur znacznie przekraczających temperaturę otoczenia i sięgających 160 – 200 °C. Temperatury te zależą od rodzaju i twardości asfaltu. Asfalty miękkie, o dużych penetracjach wymagają niższych temperatur technologicznych, niż asfalty twarde o małej penetracji. Wyższych temperatur technologicznych wymagają również asfalty modyfikowane. Zależność lepkości asfaltu od temperatury ma charakter logarytmiczny, przez co stosunkowo niewielkie zmiany temperatury powodują znaczące zmiany lepkości. Spadek temperatury z poziomu 155 – 160 °C do 115 – 120 °C może powodować nawet 10-krotny wzrost lepkości asfaltu. Przykładowe maksymalne temperatury mieszanki mineralno-asfaltowej typu betonu asfaltowego, jakie może ona posiadać zaraz po wyprodukowaniu według aktualnie stosowanych polskich wymagań pokazano w tablicy 2.1.

Tablica 2.1. Maksymalna temperatura mieszanki mineralno-asfaltowej typu betonu asfaltowego w zależności od rodzaju zastosowanego lepiszcza według WT-2 2010.

Rodzaj asfaltu	Maksymalna temperatura mieszanki mineralno-asfaltowej typu betonu asfaltowego
20/30	195
35/50	195
50/70	180
70/100	180
PMB 10/40-65	180
PMB 25/55-60	180
PMB 45/80-55	180
PMB 45/80-65	180
PMB 65/105-60	170
Wielorodzajowy 35/50	195
Wielorodzajowy 50/70	180

Doprowadzenie asfaltu do przedstawionych temperatur technologicznych wymaga zaangażowania istotnych ilości energii. Ciepło właściwe asfaltu jest zależne od temperatury i wynosi od 1700 do 2 120 J/kg·°C. Podgrzanie o 160 °C 50 ton asfaltu niezbędnego do wyprodukowania jedynie 1 000 ton mieszanki mineralno-asfaltowej o średniej zawartości lepiszcza 5% wymaga dostarczenia ok. 15 300 MJ energii [102]. Odpowiada to zużyciu ok. 360 kg oleju opałowego. Ilość ta nie uwzględnia ewentualnych strat energii podczas podgrzewania.

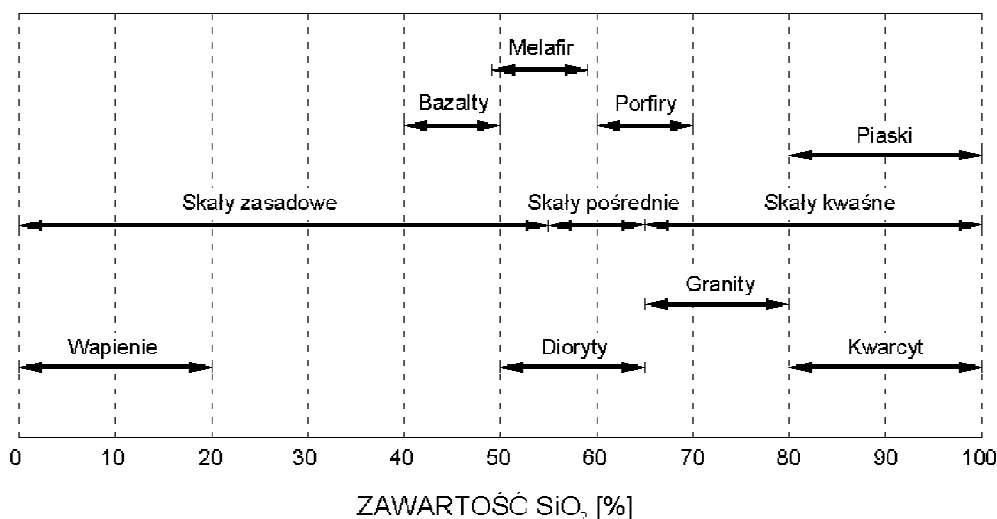
Podsumowując, proces otaczania lepiszczem ziaren agregatu mineralnego a następnie rozkładanie i zagęszczanie tak otrzymanej mieszanki wymaga przestrzegania określonych poziomów lepkości asfaltu, które osiągane są przy określonych temperaturach. W ujęciu czysto teoretycznym, obniżenie temperatury produkcji i wbudowania mieszanki wymaga przeprowadzenia działań – poprzez zmianę właściwości samego lepiszcza lub modyfikację procesu produkcyjnego – umożliwiających osiągnięcie wymaganej lepkości już przy niższej temperaturze. Mechanizm obniżania lepkości wykorzystuje większość technologii produkcji mieszanek WMA. Odbywa się to poprzez wprowadzenie do asfaltu odpowiednio dobranych substancji o lepkości znacznie mniejszej od lepkości samego asfaltu, przez co końcowa lepkość tak uzyskanej mieszaniny jest obniżona w stosunku do lepkości czystego asfaltu. W temperaturach eksploatacyjnych nawierzchni lepkość asfaltu z dodatkiem WMA jest natomiast taka sama lub nieznacznie większa od lepkości czystego asfaltu. Drugi rodzaj technologii wykorzystuje efekt spienienia gorącego asfaltu w obecności wody. Woda może być dostarczana bezpośrednio z zewnątrz (np. poprzez jej wtryskiwanie w strumień gorącego lepiszcza) lub pośrednio, za pomocą nośników wilgoci. W tym celu wykorzystywane są drobnouziarnione minerały o dużej chłonności (zeolity) lub wilgotne frakcje drobnego kruszywa.

2.1.2. Wpływ adhezji asfaltu i kruszywa

Innym rodzajem dodatków pozwalających na obniżenie temperatury produkcji i wbudowywania mieszanek mineralno-asfaltowych są substancje chemiczne zwiększające zwilżalność kruszywa przez asfalt, co ułatwia jego otoczenie oraz zagęszczenie gotowej mieszanki w temperaturze niższej, niż wymagana dla czystego asfaltu.

Łatwość z jaką asfalt zwilża i pokrywa kruszywo cienką warstwą uzależniona jest od wielkości sił przyciągania pomiędzy molekułami lepiszcza i kruszywa, a także sił przyciągania pomiędzy molekułami samego lepiszcza. Dobre zwilżanie występuje w sytuacji, kiedy siły pomiędzy molekułami lepiszcza są niewielkie i nie wywołują dużego napięcia powierzchniowego [58]. Ponadto wpływ na łatwość zwilżania posiada również rodzaj skały z jakiej wyprodukowane zostało kruszywo. Dobre powinowactwo z asfaltem wykazują kruszywa o niskiej zawartości krzemionki SiO₂ (np. wapienie i bazalty), nazywane ogólnie kruszywami o charakterze zasadowym. Wysoka zawartość krzemionki SiO₂ w kruszywach o charakterze kwaśnym (np. granity, dioryty) skutkuje natomiast złym powinowactwem (a w konsekwencji gorszą

adhezją) pomiędzy warstewką lepiszcza, a powierzchnią ziarna kruszywa. Ogólny podział kruszyw pod względem kwasowości pokazano na rysunku 2.2. Z jego analizy wynika, że pod względem zjawiska przyczepności asfaltu i kruszywa najwłaściwsze do zastosowania w mieszankach mineralno-asfaltowych byłyby kruszywa należące do grupy wapieni. Z drugiej jednak strony posiadają one gorsze właściwości mechaniczne od twardych skał kwaśnych, takich jak granity i dioryty.



Rys. 2.2. Podział skał pod względem kwasowości [58]

Zagadnienia zwilżalności ziaren kruszywa przez asfalt wykorzystywane są również przy produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych WMA w technologiach opartych na płynnych środkach chemicznych działających powierzchniowo czynnie. Wywodzą się one ze stosowanych dotychczas w drogownictwie płynnych środków adhezyjnych poprawiających przyczepność asfaltu do kruszywa w trakcie eksploatacji nawierzchni drogowej. Zasada ich działania polega na zmianie aktywności powierzchniowej asfaltu na dodatnią, przez co napięcie powierzchniowe występujące na styku lepiszcza i ziarna kruszywa ulega zmniejszeniu. W efekcie uzyskuje się łatwiejsze otoczenie lepiszczem poszczególnych ziaren agregatu mineralnego [58].

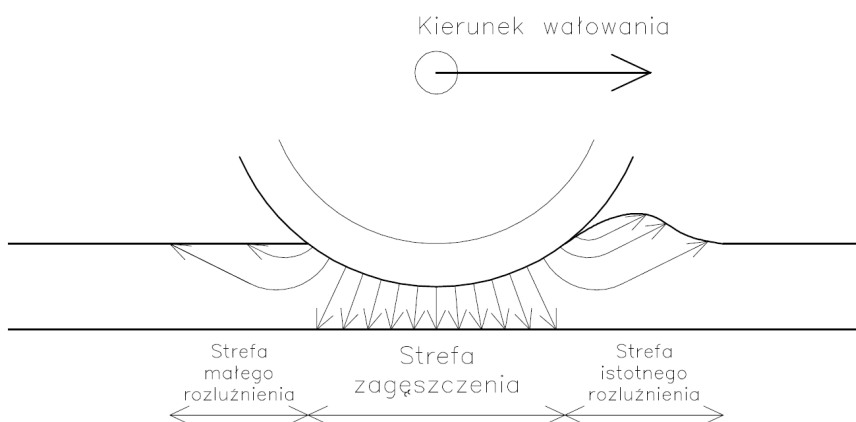
2.1.3. Wpływ kruszywa

Potrzeba zastosowania w składzie mieszanki mineralno-asfaltowej dodatków WMA może wynikać z konieczności zapewnienia odpowiednio wysokiej urabialności mieszankom, których wbudowywanie i zagęszczanie byłoby utrudnione ze względu na ich skład. Dzieje się tak w przypadku występowania w składzie mieszanki dużego udziału kruszyw łamanych. Mieszanka mineralno-asfaltowa zawierająca taki agregat mineralny i wytwarzana w temperaturze tradycyjnej może się okazać nawet trudniejsza do wbudowania i zagęszczenia od mieszanki wytwarzanej w temperaturze niższej, lecz posiadającą w swoim składzie kruszywa o ziarnach nieprzełamanych, o zaokrąglonych krawędziach.

W trakcie zagęszczania mieszanki mineralno-asfaltowej dochodzi do zmiany jej postaci ze stanu luźnego i plastycznego w jednolity, spójny materiał charakteryzujący się wytrzymałością na rozciąganie ([19], [67]). Procesowi zagęszczania towarzyszą ([19], [100]):

- wzajemne zbliżania się ziaren kruszywa,
- obrót ziaren względem siebie,
- zginanie bądź skręcanie się ziaren.

Schemat zagęszczania układanej warstwy mieszanki mineralno-asfaltowej pokazano na rysunku 3. W trakcie zagęszczania pod wałem i w jego sąsiedztwie tworzą się 3 strefy [67]. Rozkład sił ścinających powoduje, że właściwe zagęszczanie odbywa się jedynie w strefie położonej bezpośrednio pod wałem. Natomiast w strefach znajdujących się przed i za nim występuje pewne rozluźnienie mieszanki wynikające z przemieszczeń kruszywa wywołanych przez siły ścinające od poruszającego się wału. Rozluźnienie to jest istotniejsze w obszarze położonym przed poruszającym się wałem, gdzie następuje wypieranie mieszanki.



Rys. 2.3. Zagęszczanie warstwy mieszanki mineralno-asfaltowej przez poruszający się wał według [19] za [67]

Zagęszczeniu luźnej mieszanki mineralno-asfaltowej przeciwdziała jej tarcie wewnętrzne oraz kohezja. Tarcie wewnętrzne w mieszance mineralnej zależy od jej uziarnienia oraz wielkości, kształtu, tekstury i porowatości poszczególnych ziaren. Z tego powodu mieszanki mineralno-asfaltowe o ciągłym uziarnieniu, oparte o kruszywa naturalne, o okrągłych ziarnach, są łatwiejsze do zagęszczenia od mieszanek z nieciągłym uziarnieniem, wykorzystujących kruszywa łamane. Trzeba jednak pamiętać, że mieszanka mineralna zbyt „podatna”, w której poszczególne ziarna mogą bardzo łatwo przemieszczać się względem siebie również nie jest korzystna w aspekcie procesu zagęszczenia. W takim przypadku stawia ona zbyt mały opór siłom wywoływanym przez sprzęt zagęszczający co skutkuje znacznym zagłębianiem się wału w luźną mieszankę i zwiększenie strefy rozluźnienia przed wałem (rysunek 2.3) a także brakiem możliwości uzyskania pożądanej ilości wolnych przestrzeni.

W przypadku zagęszczenia gruntów opór tarcia wewnętrznego zmniejszany jest poprzez wodę, która ułatwia wzajemne przemieszczanie się ziaren. W mieszankach mineralno-asfaltowych taką rolę pełni natomiast mastyks, w skład którego wchodzi asfalt i wypełniacz. Odpowiednio dobrana ilość mastyksu ułatwia zagęszczanie. Również w tym aspekcie rodzaj kruszywa wpływa na zagęszczalność. Kruszywa o dużej porowatości w większym stopniu pochłaniają lepiszcze, zmniejszając jego wolną ilość w mastyksie pomiędzy powierzchniami poszczególnych ziaren, przez co mieszanka staje się mniej urabialna i podatna na zagęszczanie [19]. Z drugiej strony, obecność lepiszcza w mieszance mineralno-asfaltowej oddziałuje także negatywnie na proces zagęszczania. Asfalt zapewnia bowiem jej spójność wewnętrzną – kohezję. Nie jest ona stała, ponieważ podczas ochładzania wbudowywanej warstwy lepkość asfaltu wzrasta, zwiększając jednocześnie kohezję. Wzajemne przemieszczanie się poszczególnych ziaren kruszywa staje się wówczas coraz bardziej utrudnione, zaś po osiągnięciu przez mieszankę wytrzymałości na ścinanie przewyższającej oddziaływanie zewnętrzne proces zagęszczenia ustaje. Podczas niewłaściwie prowadzonych prac związanych z wbudowywaniem i zagęszczaniem (niekorzystne warunki atmosferyczne, niewystarczająca temperatura mieszanki, nieodpowiedni sprzęt zagęszczający) moment ten może wystąpić przed osiągnięciem wymaganego stopnia zagęszczenia. Nagłe użycie w takiej sytuacji większej siły zagęszczającej – na przykład poprzez wprowadzenie cięższego sprzętu zagęszczającego lub zwiększenie amplitudy drgań – prowadzi jedynie do powstawania pęknięć w już wykonanej warstwie.

2.2. Opis technologii obniżania temperatury produkcji mieszank mineralno-asfaltowych

Technologie obniżania temperatury produkcji i wbudowywania mieszank mineralno-asfaltowych dzielą się na dwie grupy. Pierwsza z nich obejmuje dodawanie substancji modyfikujących zachowania się asfaltu w taki sposób, aby możliwe było właściwe otoczenie nim ziaren mieszanki mineralnej w temperaturze niższej od normalnie wymaganych. Drugą grupę stanowią specjalistyczne technologie oparte na spienianiu asfaltu w obecności wody. Podział taki przedstawiono w tabelicy 2.2. Zawiera ona środki stosowane w 2011 r.

Tablica 2.2. Grupy technologii wytwarzania mieszanek WMA

Dodawanie do asfaltu środków wpływających na lepkość lub polepszających zwilżalność kruszywa	Technologie produkcji wykorzystujące spienianie asfaltu
<p>Sasobit Asphaltan-B Licomont BS 100 Rediset WMX Rediset LQ Ceca Base RT Zeolit Colas 3E LT Evotherm 3G Iterlow T / QualiTherm / HyperTherm Sonne Warmix TLA-X Warm Mix LEADCAP Astech PER</p>	<p>Shell WAM-Foam ASTEC Double Barrel Green Evotherm ET, Evotherm DAT LEA – Low Energy Asphalt LEAB Colas 3E DM Nynas LT Asphalt AccuShear Aquablack WMA AquaFoam EcoFoam II Meeker Warm Mix Terex WMA System TriMix Warm Injection System Ultrafoam GX</p>

Podział podany w tablicy 2.2. należy uznać za bardzo ogólny, opierający się jedynie na podstawowym kryterium jakim jest sposób produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych o obniżonej temperaturze. W każdej z tych dwóch grup można natomiast wyróżnić kilka podgrup biorąc pod uwagę dokładny mechanizm działania każdej technologii.

W grupie środków dodawanych do asfaltu można wyróżnić następujące podgrupy:

- dodatki pochodzenia organicznego z grupy parafin i amidów kwasów tłuszczowych wpływające na lepkość asfaltu (Sasobit, Asphaltan-B, Licomont BS 100, Rediset WMX, Sonne Warmix, LEADCAP),
- dodatki chemiczne działające powierzchniowo czynnie i polepszające zwilżalność kruszywa przez asfalt (Rediset LQ, Ceca Base RT, Evotherm 3G, Iterlow T, QualiTherm, HyperTerm),
- dodatki w postaci stałej będące nośnikami wody, która po dodaniu do gorącego kruszywa i asfaltu inicjuje spienienie asfaltu (zeolit).

W literaturze można spotkać również inne podziały, stawiające dodatki zeolitów wprost w grupie technologii spieniania asfaltów, obok technik opierających się na instalacjach wtryskujących bezpośrednio wodę w asfalt.

W grupie specjalistycznych technologii produkcji wykorzystujących spienianie asfaltu można wydzielić następujące charakterystyczne kierunki:

- technologie wyróżniające się specyficznym procesem wytwarzania mieszanki mineralno-asfaltowej wymagającym np. użycia sekwencyjnego trybu mieszania poszczególnych składników mieszanki wraz dodawaniem dwóch rodzajów asfaltu różniących się twardością lub dozowaniem wilgotnego kruszywa drobnej frakcji będącego nośnikiem wody wywołującej efekt spieniania (Shell WAM-Foam, LEA Low Energy Asphalt),
- technologie opierające się na komorach spieniania montowanych przed mieszalnikiem wytwórni (o charakterze cyklicznym lub ciągłym), w których w

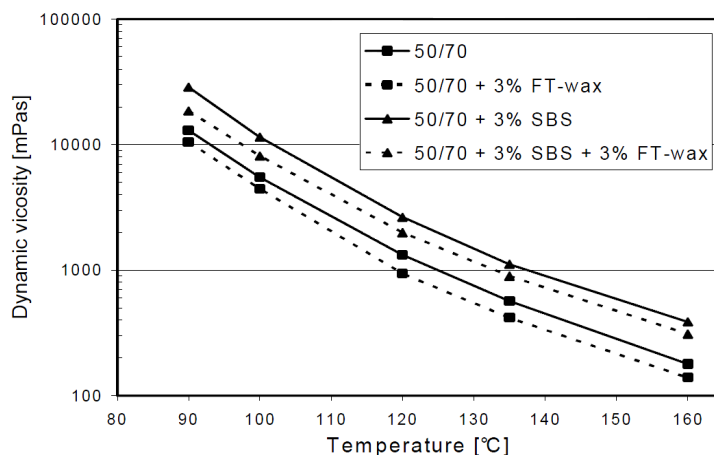
strumień gorącego lepiszcza wtryskiwana jest woda (ASTECC Double Barrel Green, AccuShear, Aquablack WMA, AquaFoam, EcoFoam, Meeker Warm Mix, Terex WMA System, TriMix Warm Injection System, Ultrafoam GX).

- technologie hybrydowe, które jednocześnie wykorzystują zarówno efekt spieniania, jak i wymagają zastosowania dodatku chemicznego (Evotherm ET, Evotherm DAT).

W dalszej części tekstu opisano sposoby obniżenia temperatury produkcji i układania mieszanek mineralno-asfaltowych za pomocą środków dozowanych do asfaltu. Technologie wykorzystujące zjawisko spieniania nie są objęte zakresem niniejszej pracy doktorskiej, dlatego w ich grupie opisano tylko kilka wybranych, najbardziej charakterystycznych metod.

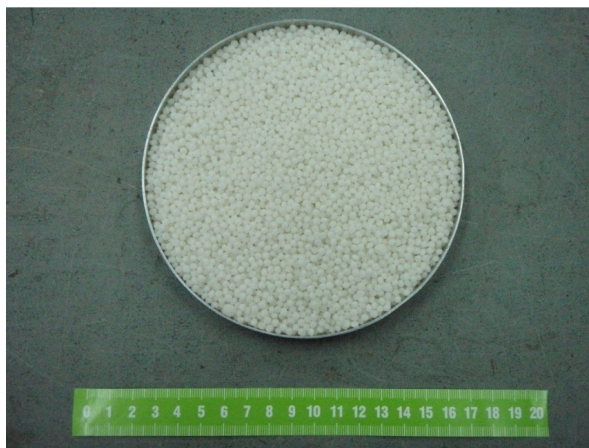
2.2.1. Sasobit

Producentem środka Sasobit jest południowo-afrykański koncern chemiczny Sasol, który w 1997 roku wprowadził go na rynek w Europie jako środek polepszający urabialność słabozagęszczalnych mieszanek mineralno-bitumicznych. Pod względem chemicznym jest to syntetyczny wosk (inaczej nazywany parafiną) produkowany metodą Fischera-Tropscha. Należy mieć na uwadze, że różne typy parafin mają bardzo różniące się cechy, dlatego nie należy mylić Sasobitu (i innych środków do obniżania temperatury produkcji mieszanek opartych na podobnych związkach) z parafinami występującymi naturalnie w asfaltach, które były odpowiedzialne za ich złe właściwości. Rodzaj wosku (parafiny) jakim jest Sasobit nie jest szkodliwy dla cech asfaltu [17]. Cechą odróżniającą go od innych parafin – których obecność w asfalcie jest niepożądana – jest większa długość łańcuchów węglowodorowych oraz drobniejsza struktura krystaliczna (pojedyncze łańcuchy węglowodorowe, brak pierścieni lub odgałęzień). Łańcuchy węglowodorowe parafin naturalnie występujących w asfalcie zawierają od 15 do 50 atomów węgla, natomiast w przypadku Sasobitu ilość ta wynosi od 45 do 100 [92]. Skutkuje to wyższą temperaturą topnienia Sasobitu (98 °C) w porównaniu z parafinami naturalnymi. Sasobit rozpuszcza się całkowicie w asfalcie w temperaturze powyżej 115 °C [37]. Według producenta, po dodaniu do asfaltu Sasobit obniża lepkość całej mieszaniny, tym samym pozwalając na właściwe otoczenie ziaren kruszywa mieszanki mineralnej już w niższej temperaturze niż tradycyjna. Natomiast w temperaturach poniżej punktu topnienia (a więc w zakresie, w jakim eksploatowana jest nawierzchnia drogowa) łańcuchy Sasobitu tworzą w asfalcie przestrzenną strukturę, usztywniając lepiszcze asfaltowe, a tym samym zwiększając odporność mieszanki mineralno-asfaltowej na deformacje trwałe.



Rys. 2.5. Wpływ dodatku Sasobitu na lepkość dynamiczną asfaltu wg [17]
(3% FT-wax oznacza 3% dodatek Sasobitu do asfaltu)

Postać handlowa Sasobitu to kuliste granulki (fotografia 2.1) lub płatki o średnicy 1-5 mm. Do wytwórni dostarczane są one w 50 kg workach lub w dużych, 600 kg opakowaniach typu „big-bag”.



Fot. 2.1. Granulki Sasobitu

Sasobit stosowany jest zarówno w Europie, jak i Stanach Zjednoczonych oraz Kanadzie. Na fotografii 2.2 przedstawiono dozator granulek Sasobitu przystosowany do współpracy z wytwórnią o działaniu ciągłym, który za pomocą sprężonego powietrza wdmuchuje środek w strumień gorącego lepiszcza. Na fotografii 2.3 pokazano dozator przeznaczony do współpracy z wytwórnią o działaniu cyklicznym. W urządzeniu tym następuje podgrzanie wosku, tak aby zmienił się on w postać ciekłą. Następnie upłynniony środek pompowany jest do wagi asfaltu.



Fot. 2.2. Pneumatyczny dozator Sasobitu. W dolnej części widoczny ciśnieniowy przewód transportujący granulki [21]



Fot. 2.3. Dozator przeznaczony do współpracy z wytwornią o działaniu cyklicznym. Widoczne dwa zbiorniki – jeden do przechowania granulek, drugi do ich podgrzewania [77]

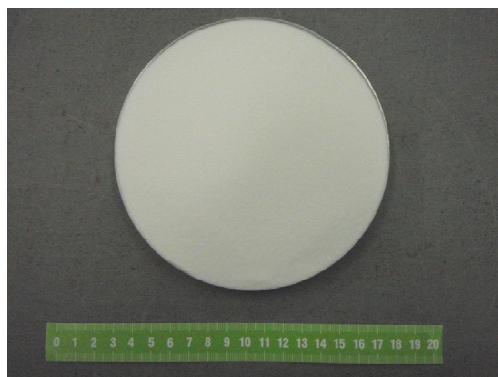
W zależności od ilości dodawanego Sasobitu umożliwia on obniżenie temperatury produkcji mieszanki mineralno-asfaltowej o 20-30 °C. W Europie, ilość dodawanego Sasobitu zawiera się zwykle w przedziale 2,5% – 3% w stosunku do masy lepiszcza asfaltowego, natomiast w Stanach Zjednoczonych wartość ta jest mniejsza i oscyluje w przedziale 1% – 1,5%. Firma Sasol posiada również w swojej ofercie dodatek stanowiący połączenie środka obniżającego temperaturę (Sasobit) i elastomeru Styren-Butadien-Styren (SBS) pod nazwą Sasoflex. Sasoflex nie tylko obniża temperaturę produkcji, ale działa podobnie jak elastomer SBS zmieniając właściwości mieszanki mineralno-asfaltowej.

2.2.2. Asphaltan-B

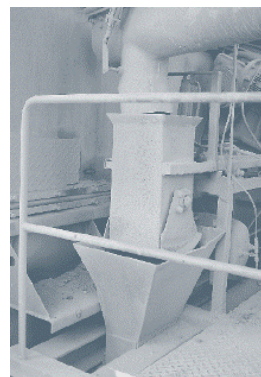
Środkiem wykorzystującym identyczny mechanizm działania jak Sasobit jest dodatek Asphaltan-B, produkowany przez niemiecką firmę Romonta GmbH. Produkcja Asphaltanu-B – inaczej wosku Montana – odbywa się poprzez ekstrakcję rzadko spotykanego gatunku węgla brunatnego, którego złoża występują min. w niemieckiej miejscowości Amsdorf [20]. Podobnie jak Sasobit, Asphaltan-B jest parafiną, która w swojej chemicznej strukturze posiada długie łańcuchy węglowodorowe. Temperatura topnienia zawiera się w przedziale 95-105 °C. Formą handlową Asphaltanu-B są granulki lub pastylki dostarczane w workach o różnym rozmiarze. Producent zaleca dodawanie Asphaltanu-B w ilości od 2 do 4% w stosunku do asfaltu, co pozwala na obniżenie temperatury produkcji mieszanki mineralno-asfaltowej o 20-30 °C przy jednoczesnym zwiększeniu odporności ułożonej nawierzchni na deformacje trwałe. Firma Romonta posiada również w swojej ofercie dodatek Asphaltan-A – przeznaczony do obniżania temperatury asfaltu lanego. Różni się on od Asphaltanu-B wyższą temperaturą topnienia, wynoszącą 133-143 °C.

2.2.3. Licomont BS 100

Licomont BS 100 produkowany jest przez szwajcarski koncern chemiczny Clariant. Licomont BS100 stanowiąc mieszaninę amidów kwasów tłuszczowych [105] o niewielkiej lepkości ($< 0,05 \text{ Pa s}$ w temperaturze $150 \text{ }^\circ\text{C}$) po dodaniu do asfaltu obniża lepkość całej mieszaniny, zaś w trakcie eksploatacji nawierzchni zwiększa odporność na koleinowanie. Środki o podobnej budowie chemicznej były już stosowane na przełomie lat 70 i 80 XX wieku jako modyfikatory lepkości asfaltów stosowanych w systemach izolacyjnych pokryć dachowych [93]. Temperatura topnienia Licomontu jest nieco wyższa niż Sasobitu czy Asphaltanu-B i wynosi $141\text{-}146 \text{ }^\circ\text{C}$. Licomont BS 100 występuje w postaci bardzo drobnego proszku (fotografia 2.4) bądź granulek, dostarczanego w małych, 25 kg workach bądź dużych opakowaniach 500 kg. Producent deklaruje możliwość obniżenia temperatury produkcji mieszanki mineralno-asfaltowej o $20\text{-}30^\circ\text{C}$ przy zawartości 3% Licomontu w stosunku do asfaltu. Dodawanie Licomontu BS 100 do mieszanki może odbywać się wprost do mieszalnika otaczarni z użyciem pośredniego zasobnika wagowego służącego do odmierzania żądanej ilości środka, jaka jest potrzebna do wykonania jednego zarobu (fotografia 2.5). Transport granulek Licomontu do zasobnika wagowego odbywa się drogą pneumatyczną.



Fot. 2.4. Licomont BS 100 w postaci bardzo drobnego proszku.



Fot. 2.5. Zasobnik wagowy służący do odmierzania niezbędnej ilości środka – wytwórnia mas bitumicznych w Niemczech [22]

2.2.4. LEADCAP

Dodatek LEADCAP (skrót od angielskiego wyrażenia „Low Energy AnD low Carbon Dioxide Asphalt Pavement) jest efektem współpracy koreańskiej firmy Kumho Petrochemical Company oraz Koreańskiego Instytutu Techniki Budowlanej (Korean Institute of Construction Technology). W jego skład wchodzi 3 składniki:

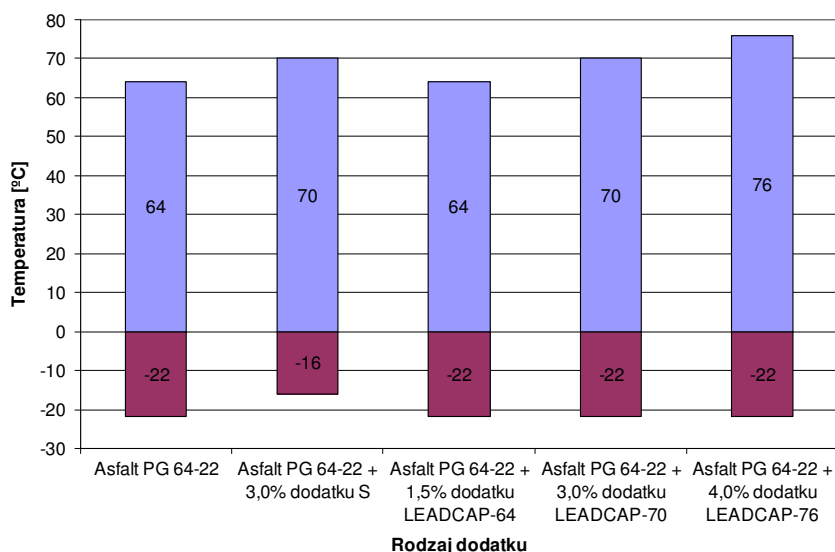
- komponent wosku odpowiedzialny za zmniejszenie lepkości lepiszczą,
- substancja kontrolująca proces krystalizacji wosku,
- dodatek adhezyjny zwiększający przyczepność asfaltu do kruszywa.

Środek LEADCAP produkowany jest w trzech odmianach: LEADCAP-64, LEADCAP-70 oraz LEADCAP-76 (fotografia 2.6).



Fot. 2.6. – Odmiany dodatku LEADCAP (od lewej): 64, 70, 76 [69]

Według wytwórcy, główną zaletą dodatku LEADCAP nad organicznymi dodatkami WMA innych producentów jest brak jego wpływu na zachowania asfaltu w niskich temperaturach. Wynika to z obecności w składzie środka LEADCAP składnika niedopuszczającego do zbyt wysokiego stopnia skryształizowania dodatku wosku. Zbyt wysoki stopień krystalizacji wosku powoduje wzrost temperatury łamliwości asfaltu, a tym samym obniża odporność mieszanki mineralno-asfaltowej na spękania niskotemperaturowe. Wpływ dodatku LEADCAP na temperatury klasyfikacyjne PG według klasyfikacji funkcjonalnej podanej w AASHTO M320 pokazano na rysunku 2.6. Jak widać, odmiany dodatku LEADCAP-70 i 76 w ilościach 3 i 4% poprawiają cechy asfaltu w wysokich temperaturach, a nie pogarszają w niskich.



Rys. 2.6. Wpływ dodatku LEADCAP na temperatury klasyfikacji systemu PG według normy AASHTO M320 – opracowano na podstawie [69]

Dodatek LEADCAP stosowany jest w zależności od potrzeb w przedziale od 1,5 do 4,0% w stosunku do masy asfaltu. Inne pozytywne aspekty jego użycia to zwiększenie odporności mieszanki na deformacje trwałe oraz na działanie wody i mrozu (z uwagi na jednoczesne wprowadzenie środka adhezyjnego). Według producenta LEADCAP pozwala na obniżenie temperatury produkcji mieszanki mineralno-asfaltowej o 30°C.

2.2.5. Rediset WMX

Firma Akzo Nobel, znana w drogownictwie jako producent środków adhezyjnych, posiada w swojej ofercie środek obniżający temperaturę produkcji mieszank mineralno-asfaltowych o nazwie Rediset WMX. Można go zakwalifikować do grupy środków pochodzenia organicznego z grupy parafin, jednakże zawiera jednocześnie środek adhezyjny. Dokładna formuła składu objęta jest tajemnicą wytwórcy. Rediset WMX pełni podwójną rolę – zarówno modyfikatora lepkości lepiszcza asfaltowego, jak i środka adhezyjnego polepszającego zwilżanie i przyczepność asfaltu do kruszywa [95]. Ilość dozowanego środka zależy od charakteru jego zastosowania. W przypadku konieczności jedynie polepszenia zagęszczalności mieszanki mineralno-asfaltowej ilość ta może wynosić 0,5-1,0% w stosunku do masy asfaltu, natomiast jeśli konieczna jest produkcja mieszanki o obniżonej temperaturze dodatek Redisetu WMX musi wynosić 1,0-1,5% przy zastosowaniu asfaltu zwykłego lub 1,5-2,0 % przy wykorzystywaniu asfaltu modyfikowanego. Dozowanie w takich proporcjach pozwala na obniżenie temperatury produkcji o ok. 30°C. W przypadku konieczności zapewnienia szczególnie wysokiej urabialności mieszank rozkładanych ręcznie (np. asfaltu lanego) ilość Redisetu WMX może być zwiększona do 2,0-3,0%. Dodatek ten występuje w postaci brązowych lub żółtych płatków (fotografia 6). Rediset WMX można dozować bezpośrednio w formie stałej do mieszalnika, bądź (po uprzednim podgrzaniu i roztopieniu) w postaci płynnej do linii podawania asfaltu. Możliwe jest również zadozowanie granulek Redisetu WMX bezpośrednio do zbiornika asfaltu wytwórni. Stabilność tak otrzymanej mieszaniny pozwala na wykorzystanie jej w ciągu siedmiu dni od momentu przygotowania.



Fot. 2.7. Postać dodatku Rediset WMX

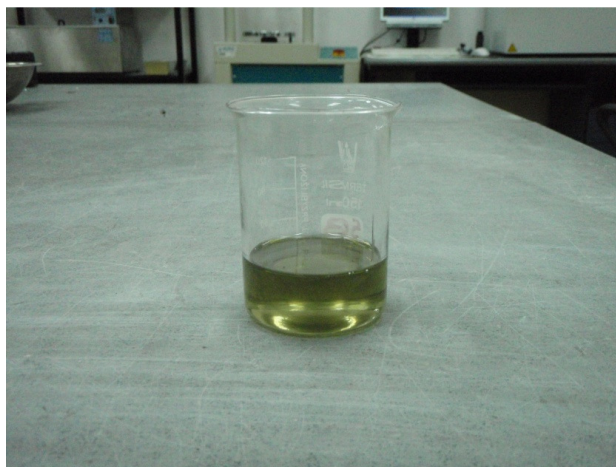
2.2.6. Rediset LQ

Drugim środkiem do obniżania temperatury produkcji mieszank mineralno-asfaltowych będącym w ofercie firmy Akzo Nobel jest Rediset LQ. W odróżnieniu od Redisetu WMX posiada on postać płynną, przez co może być wprowadzany do mieszanki za pośrednictwem instalacji do dozowania środków adhezyjnych, natomiast podobnie jak Rediset WMX pełni dwojaką rolę – dodatku pozwalającego

obniżyć temperaturę produkcji mieszanki mineralno-asfaltowej, jak i środka adhezyjnego przeciwdziałającego odmywaniu asfaltu [75]. Może być również stosowany w połączeniu z innymi technologiami produkcji mieszanek WMA wykorzystującymi spienianie asfaltu w celu ułatwienia otoczenia asfaltem ziaren kruszywa przy obecności wilgoci pochodzącej z procesu spieniania. Ilości, w jakich dozuje się Rediset LQ są znacznie mniejsze niż w przypadku Redisetu WMX lub innych środków w postaci stałej i zawierają się w przedziale 0,30-0,75% w stosunku do masy lepiszcza, przy czym również występuje pewne zróżnicowanie w zależności od roli, jaką ma on pełnić w procesie wytwarzania i wbudowywania mieszanki. Zwiększenie zagęszczalności mieszanki produkowanej w temperaturze normalnej wymaga użycia 0,3-0,5% środka, natomiast produkcja mieszanki WMA o obniżonej temperaturze 0,4-0,6% przy zastosowaniu w mieszance asfaltów miękkich lub 0,5 – 0,75% w przypadku asfaltów twardych lub produkcji mieszanek zawierających dużą ilość destruktu asfaltowego. Wymienione ilości pozwalają na zredukowanie temperatury produkcji o 30°C. Dla ułatwienia otaczania ziaren kruszywa w trakcie procesu produkcji mieszanki mineralno-asfaltowej wykorzystującego efekt spienienia asfaltu zalecane jest użycie dodatku na poziomie 0,3-0,5%.

2.2.7. Ceca Base RT

Innym płynnym środkiem do obniżania temperatury produkcji i wbudowywania mieszanek mineralno-asfaltowych jest Ceca Base RT, produkowany przez francuski koncern Ceca. Ceca Base RT jest oleistą cieczą o zielonkawej barwie (fotografia 2.8). Podobnie jak w przypadku Rediset WMX oraz Rediset LQ skład chemiczny niniejszego środka jest zastrzeżony. Cechą charakterystyczną jest bardzo niewielka ilość potrzebna do zmniejszenia temperatury produkcji mieszanki do 120-130 °C, która wynosi od 0,3 do 0,5 % masy asfaltu. Wbudowywanie może odbywać się wtedy z temperaturą 100-120 °C [97]. Ceca Base RT, tak samo jak Rediset LQ, występuje w postaci płynnej i dlatego posiada niewątpliwą zaletę w stosunku do pozostałych środków występujących w postaci proszku bądź granulek, która polega na możliwości wykorzystania istniejących już instalacji do dozowania płynnych środków adhezyjnych, bez konieczności modyfikacji posiadanej wytwórni.



Fot. 2.8. Środek CECA Base RT

2.2.8. TLA-X Warm Mix

Producentem dodatku TLA-X Warm Mix jest firma Trinidad Lake Asphalt eksploatująca złoża asfaltu naturalnego w Trynidadzie. Środek ten stanowi połączenie asfaltu naturalnego oraz dodatku pochodzenia organicznego wpływającego na lepkość. Sprzedawany jest w postaci granulek, które można dodawać do asfaltu przed rozpoczęciem produkcji mieszanki mineralno-asfaltowej bądź bezpośrednio podczas produkcji wprost do mieszalnika. Produkowane są dwie wersje środka – z powlekaniami granulek asfaltem oraz bez (fotografia 2.9). Dodatek TLA-X Warm Mix powoduje wzrost dodatniej temperatury klasyfikacyjnej systemu PG według AASHTO M320 [72] bez jednoczesnego wzrostu temperatury ujemnej (tj. pogorszenia właściwości niskotemperaturowych). Dzięki temu istnieje możliwość uzyskania lepizsca o parametrach odpowiadających klasie PG70-22 poprzez dodanie do czystego asfaltu PG67-22 dodatku TLA-X Warm Mix. Obniżenie temperatury produkcji przy zastosowaniu niniejszego dodatku może sięgać 30 °C.

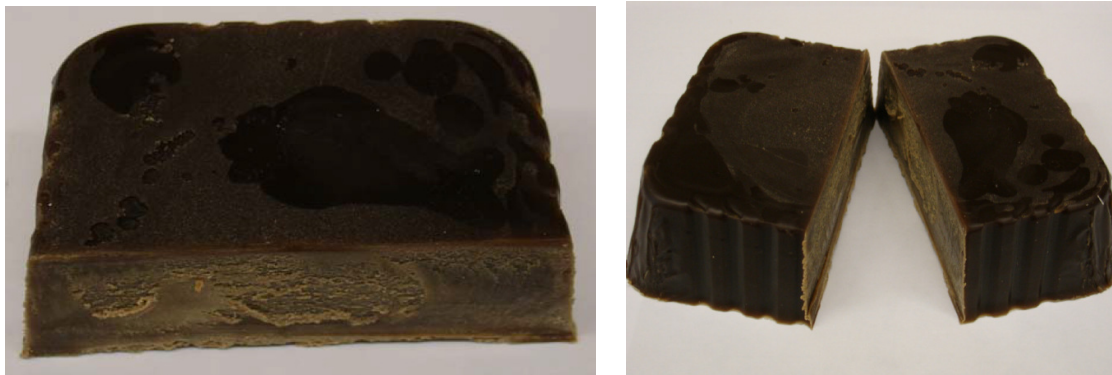


Fot. 2.9. Dodatek TLA-X Warm Mix w wersji powleczonej i niepowleczonej asfaltem [72]

2.2.9. SonneWarmix

Produkowany w Stanach Zjednoczonych dodatek SonneWarmix należy do grupy środków pochodzenia organicznego i przeznaczony jest zwłaszcza do mieszanek produkowanych w technologii recyklingu na gorąco ([82], [99]). W odróżnieniu do innych dodatków z tej grupy transportowany jest w postaci stałej, zaś przed dodaniem go do asfaltu konieczne jest jego podgrzanie. Środek SonneWarmix zaczyna przechodzić w stan ciekły przy temperaturze 80 °C, natomiast podczas produkcji mieszanki mineralno-asfaltowej musi zostać podgrzany do temperatury 90-120 °C aby całkowicie osiągnąć stan płynny. Ponadto dodawany jest do asfaltu w nieco mniejszych ilościach niż pozostałe środki pochodzenia organicznego. Proporcje stosowania dodatku SonneWarmix w stosunku do masy asfaltu zawierają się w przedziale 0,5-1,5 %, jednakże górny zakres wymienionego przedziału jest obowiązujący przy produkcji mieszanek zawierających destrukta asfaltowy, przetworzone dachówki bitumiczne (*recycled asphalt shingles*), gumę lub asfalt modyfikowany. Dla porównania przypomina się, że dodatek Sasobitu wynosi od 1 do 3%. W przypadku wytwarzania mieszanek mineralno-asfaltowych opartych na

asfalcie zwykłym oraz bez udziału materiałów poddawanych recyklingowi ilość dodatku SonneWarmix wynosi jedynie 0,75% w stosunku do masy asfaltu. Możliwość redukcji temperatury jest jednakże również mniejsza i wynosi ok. 10 °C. Środek SonneWarmix produkowany jest w dwóch odmianach: odmianie zwykłej oraz odmianie zawierającej jednocześnie środek odmładzający lepiszcze (*rejuvenating agent*). Odmiana ta jest stosowana przy produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych w technologii recyklingu na gorąco, z dużym udziałem destruktu asfaltowego (25 – 60 %) bądź przetworzonych dachówek bitumicznych.



Fot. 2.10. Postać stała dodatku SonneWarmix ([82], [99])

2.2.10. Iterlow T / QualiTherm / HyperTherm

Pomysłodawcą środka Iterlow T jest włoska firma Iterchemica oferująca szeroki wachlarz różnorodnych modyfikatorów oraz dodatków do asfaltu takich jak środki adhezyjne, emulgatory i polimery. W Stanach Zjednoczonych dodatek ten jest dystrybuowany pod nazwą QualiTherm, zaś w Kanadzie jako HyperTherm. Iterlow T należy do grupy ciekłych dodatków WMA działających powierzchniowo czynnie [108]. Podobnie jak inne środki z tej grupy, stosowana ilość dodatku jest bardzo niewielka i wynosi jedynie 0,2-0,5% w stosunku do masy lepiszcza. Według producenta, umożliwia to obniżenie temperatury produkcji mieszanki mineralno-asfaltowej do 120°C (ok. 40 °C poniżej tradycyjnie stosowanej), zaś układanie i zagęszczanie może się odbywać nawet w przedziale temperaturowym 90-100 °C. Środek QualiTherm nie wpływa na parametry asfaltu, takie jak penetracja, temperatura mięknięcia i lepkość. QualiTherm może być dodawany do lepiszcza bezpośrednio podczas produkcji lub mieszany z nim wcześniej, ponieważ zachowuje stabilność w zbiorniku z asfaltem do temperatury 190 °C.

2.2.11. Colas 3E LT

Francuska firma wykonawcza Colas posiada w swojej ofercie technologię określaną symbolem 3E [14], stanowiącym skrót od wyrażenia „*Environnementaux, Economies en Energie*” (*Środowisko, Ekonomia, Energia*) i pozwalającą na obniżenie temperatury produkowanej mieszanki mineralno-asfaltowej o rząd 40-45 °C. Technologia 3E występuje w dwóch odmianach:

- 3E LT polegającą na zastosowaniu lepiszcza modyfikowanego w wytwórni firmy Colas,
- 3E DB wykorzystującą efekt spieniania oraz sekwencyjne mieszanie dwóch różnych rodzajów asfaltu.

Wytwarzanie lepiszcza 3E LT polega na dodaniu do czystego asfaltu środków modyfikujących jego lepkość. Według firmy Colas, lepiszcze 3E LT może zostać wyprodukowane na bazie każdego asfaltu stosowanego w tradycyjnych mieszankach. Mieszanki mineralno-asfaltowe produkowane z użyciem lepiszcza 3E LT mogą być stosowane dla każdej warstwy konstrukcyjnej (warstwa ścieralna, wiążąca, podbudowa) oraz każdego obciążenia ruchem.

2.2.12. Evotherm 3G

Dodatek Evotherm 3G należy do rodziny technologii produkcji WMA opracowanej przez firmę MeadWestvaco. Jest on rozwinięciem wcześniejszych technologii Evotherm ET i Evotherm DAT wykorzystujących zjawisko spieniania asfaltu w obecności wody, które opisano w podrozdziale 2.3. W odróżnieniu od nich Evotherm 3G jest dodatkiem chemicznym, który bez udziału wody zwiększa zwilżalność kruszywa przez asfalt oraz poprawia adhezję między nimi. Nie zmienia cech reologicznych lepiszcza. Evotherm 3G może być dodawany do asfaltu jeszcze przed dostarczeniem do wytwórni, bądź bezpośrednio w trakcie produkcji mieszanki mineralno-asfaltowej. Proporcje jakie stosuje się podczas korzystania z dodatku Evotherm 3G są – tak jak przy pozostałych środkach działających powierzchniowo-czynnie – niewielkie i wahają się od 0,4 do 0,7% w stosunku do masy lepiszcza. Evotherm 3G może być stosowany w mieszankach zawierających nawet 40% destruktu asfaltowego a także z dodatkiem przetworzonych dachówek bitumicznych. Wprowadzenie środka Evotherm 3G do mieszanki mineralno-asfaltowej pozwala na obniżenie temperatur technologicznych o 10-30 °C. Producent Evothermu 3G w ramach kompleksowej obsługi swojego produktu oferuje dedykowane instalacje przeznaczone do dozowania środka w wytwórni mas bitumicznych (fotografia 2.11).



Fot. 2.11. Instalacja dozująca dodatek Evotherm 3G [78]

2.2.13. Zeolit

Technologia produkcji mieszank mineralno-asfaltowych o obniżonej temperaturze z zastosowaniem zeolitu została opracowana przez firmę Eurovia z Francji [109]. W USA zeolit występuje pod nazwą handlową Aspha-Min. Zastosowanie zeolitów w budownictwie nie jest niczym nowym, ponieważ od dość dawna znana jest możliwość jego zastosowania jako wypełniacza poprawiającego urabialność zapraw budowlanych. Pod względem chemicznym zeolit jest minerałem zaliczanym do grupy krzemianów. Dzięki budowie krystalicznej (fotografia 2.12) zeolit posiada możliwość magazynowania wody (do 21% w stosunku do swojej masy). W momencie zetknięcia z wysoką temperaturą zawarta w zeolicie woda uwalniana jest w postaci pary wodnej bez szkody dla struktury minerału. Właściwość tę posiadają zarówno zeolity pozyskiwane ze złóż naturalnych, jak i produkowane syntetycznie. Dodanie zeolitu do gorącej mieszanki mineralno-asfaltowej powoduje uwolnienie wody, która w postaci pary wodnej spienia asfalt, zmniejszając jego lepkość i polepszając zdolność do dokładnego otoczenia ziaren kruszywa. Zjawisko to nie następuje gwałtownie, ale trwa przez okres 2-3 godzin, przez co efekt zwiększonej urabialności trwa w trakcie produkcji, transportu i wbudowywania mieszanki [51].



Fot. 2.12. Kryształy zeolitu w powiększeniu [83]



Fot. 2.13. Zeolit w postaci dodawanej do mieszanki mineralno-asfaltowej

Zeolit dodawany jest w postaci drobnego proszku (fotografia 2.13) w stosunku 0,3% do masy całej mieszanki mineralno-asfaltowej. Z uwagi na charakter swojego działania ważna jest kolejność dozowania poszczególnych składników mieszanki. W przypadku wytwórni mas bitumicznych o działaniu cyklicznym zeolit dodawany jest do mieszalnika otaczarki w momencie zadozowania asfaltu do kruszywa i wypełniacza. Odpowiednią ilość zeolitu otrzymuje się przy użyciu dodatkowo zainstalowanego zasobnika wagowego (fotografia 2.14). W otaczarkach o działaniu ciągłym zeolit dostarczany jest wprost drogą pneumatyczną z silosa (fotografia 2.15 i 2.16) do pierścienia recyklingowego, którego normalną funkcją jest dodawanie do mieszanki destruktu asfaltowego. Technologia zeolitu umożliwia obniżenie temperatury produkcji o 20-30 °C, a końcowa temperatura przy wbudowaniu wynosi ok. 100 °C.



Fot. 2.14. Zasobnik wagowy służący do odmierzania ilości zeolitu [22]



Fot. 2.15. Przewoźny silos zeolitu współpracujący z otaczarnią o działaniu ciągłym [35]

2.3. Wybrane technologie produkcji mieszanek WMA w technologii spieniania asfaltu

Zagadnienia produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych WMA opartych na procesie spieniania asfaltu w obecności wody nie są przedmiotem badań niniejszej pracy. Z tego względu ograniczono się do krótkiego opisanie kilku najbardziej charakterystycznych technologii tego typu:

- Shell WAM-Foam – opiera się na wykorzystaniu dwóch mechanizmów: spieniania asfaltu w obecności wody oraz zastosowaniu dwóch różnych rodzajów asfaltów o znacznie różniących się twardościami, tj. asfaltu twardego o penetracji 20/30 i miękkiego o penetracji 300.
 - Astec Double Barrel Green – polega na spienianiu asfaltu w komorze wyposażonej w zestaw dysz wtryskujących w strumień gorącego asfaltu wodę.
-

Komora umieszczona jest przed miejscem podawania asfaltu do bębna suszarki wytwórni o działaniu ciągłym.

- Evotherm ET – w metodzie tej do gorącego kruszywa zamiast asfaltu dodawana jest specjalnie skomponowana emulsja asfaltowa. W zetknięciu z gorącym kruszywem następuje rozpad emulsji, a zawarta w niej woda wywołuje efekt spienienia asfaltu.
- LEA Low Energy Asphalt – opiera się na wykorzystaniu wilgotnego kruszywa frakcji piaskowej do wywołania efektu spieniania. Kruszywo to nie przechodzi w trakcie wytwarzania mieszanki mineralno-asfaltowej przez proces suszenia i podgrzewania, ale jest dodatkowo nawilżane i wprowadzane do mieszalnika oddzielną linią technologiczną.
- TriMix Warm Injection System – główną częścią tego systemu jest zespół specjalistycznych dysz wtryskujących wodę pod wysokim ciśnieniem w strumień asfaltu. Jest on umieszczany tuż przed miejscem wprowadzania asfaltu do mieszalnika wytwórni o działaniu cyklicznym lub bębna suszarki wytwórni o działaniu ciągłym.
- Stansteel AccuShear – wykorzystuje komorę mieszającą umieszczoną w ciągu linii pompowania asfaltu, w której dochodzi do jego mieszania z wodą w procesie ścinania, podobnie jak w przypadku młynów koloidalnych występujących w wytwórniach emulsji asfaltowych.

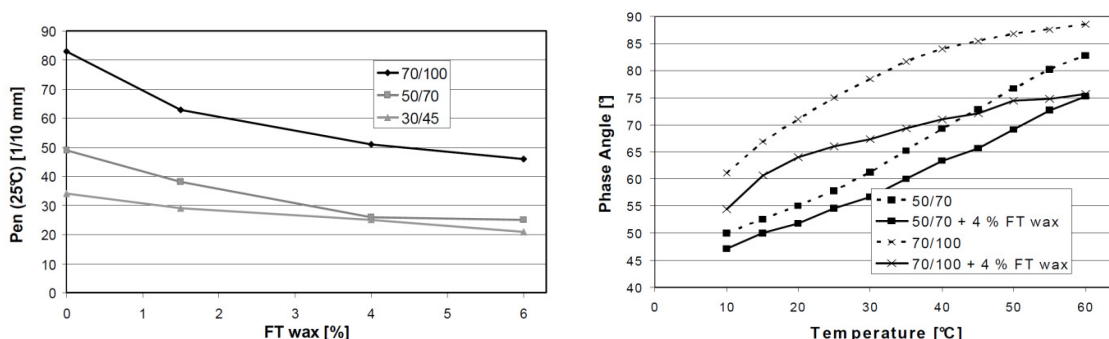
2.4. Dotychczasowe badania wpływu dodatków obniżających temperaturę na parametry lepiszcza i mieszanek mineralno-asfaltowych

Mieszanki mineralno-asfaltowe o obniżonej temperaturze produkcji i zagęszczania będąc relatywnie nowym rodzajem materiałów drogowych były i są przedmiotem badań wielu badaczy, zarówno w Europie, jak i Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej oraz Azji. W badaniach tych można wyróżnić kierunki dotyczące zachowania samych lepiszczy poddanych modyfikacji dodatkami WMA, zachowania się wyprodukowanych z nimi mieszanek mineralno-asfaltowych jak i opracowania dotyczące możliwych do uzyskania oszczędności środowiskowych. W dalszej części tekstu przedstawiono przegląd najistotniejszych prac badawczych z dziedziny mieszanek WMA. Z uwagi na zakres niniejszej pracy ograniczono się do badań dotyczących technologii obniżania temperatury produkcji przy udziale dodatków, bez uwzględniania technologii spieniania asfaltu.

2.4.1. Badania właściwości lepiszcza

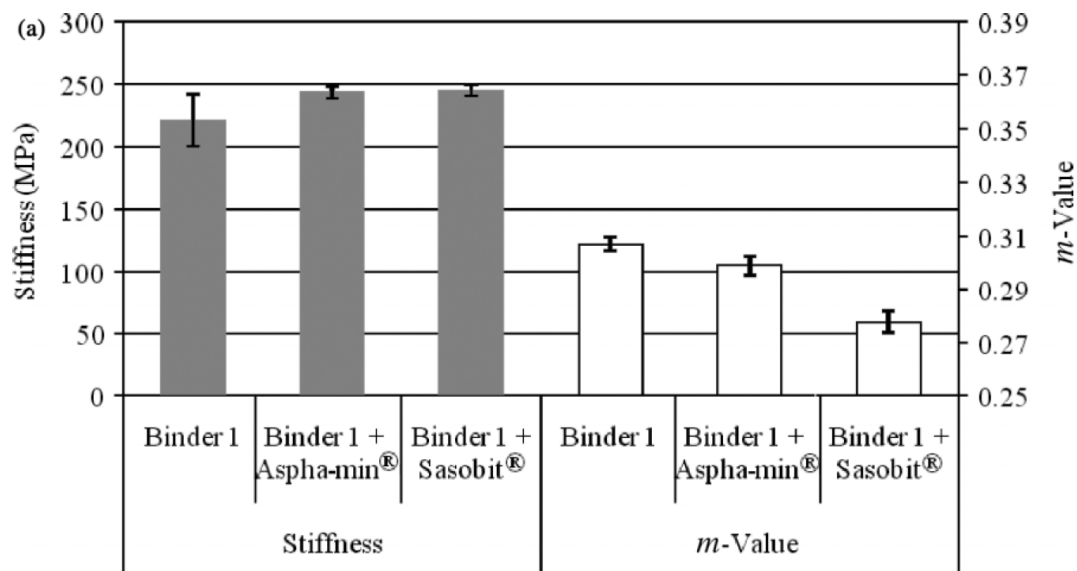
Początkowo badania związane z dodatkami obniżającymi temperaturę produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych były inicjowane przez producentów tych technologii. Jedne z pierwszych wyników badań wpływu wosku Fischera-Tropscha na zachowania się lepiszczy opublikował Butz [17], który analizował zmiany podstawowych właściwości (penetracja, lepkość, kąt przesunięcia fazowego DSR) asfaltów zwykłych 30/45, 50/70 oraz 70/100 po dodaniu do nich różnych ilości środka Sasobit. Uzyskane przez niego wyniki wskazywały na niewątpliwie pozytywny wpływ

dotadku w zakresie właściwości związanych z odpornością na deformację trwałą. Odnotowano zmniejszenie penetracji oraz zmniejszenie kątów przesunięć fazowych podczas badania w aparacie DSR [17] (rysunek 2.7).

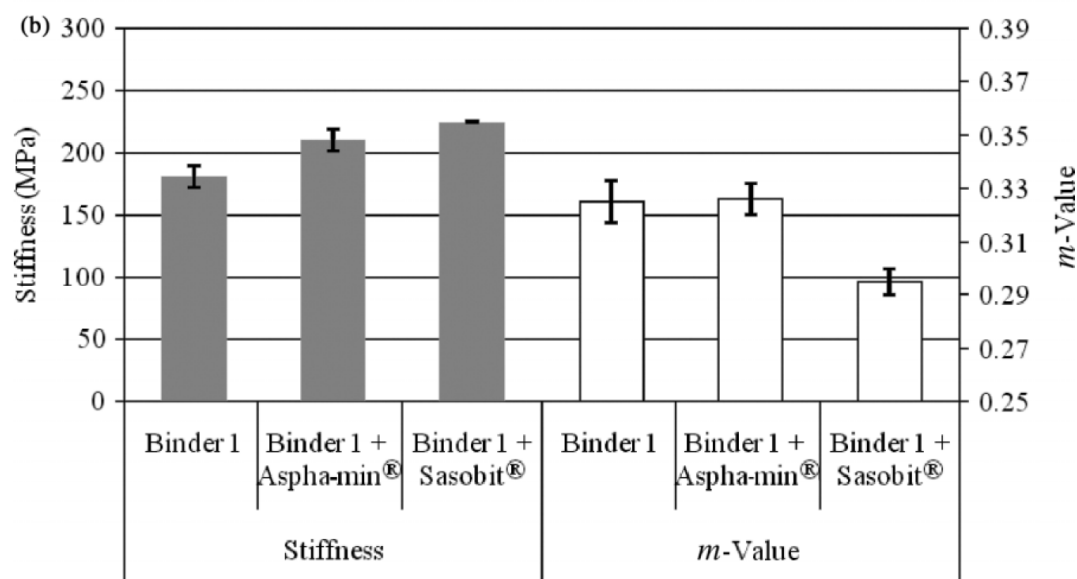


Rys. 2.7. Wpływ dodatku Sasobitu na penetrację i kąt przesunięcia fazowego DSR według [17]

Gruntowne badania asfaltów z różnymi dodatkami WMA prowadził Amirkhanian, Akisetty i inni ([1], [6], [36], [37], [68], [73], [113]), przy czym w pracach tych skupiano się głównie na zagadnieniach możliwości jednoczesnego zastosowania technologii WMA w mieszankach wytworzonych z asfaltem modyfikowanym gumą oraz zagadnieniach starzenia asfaltów zawierających dodatki obniżające temperaturę produkcji. W pracy [1] określano wpływ Sasobitu oraz zeolitu o nazwie handlowej Aspha-Min na lepkość w temperaturach 135 °C i 120 °C asfaltów pochodzących z pięciu źródeł, które zostały zmodyfikowane 10% dodatkiem granulatu gumowego. Lepiszczka poddawano również starzeniu RTFOT. Lepkość asfaltów z dodatkiem Sasobitu okazała się być w większości przypadków najmniejsza, natomiast zastosowanie zeolitu w czystym asfalcie (tzn. nie podczas produkcji mieszanki mineralno-asfaltowej) zwiększyło jego lepkość. W publikacji [37] opisano wyniki badań parametrów $G^* \sin \delta$ oraz $G^* / \sin \delta$ asfaltów z tymi samymi dodatkami oraz wyniki badań sztywności w reometrze BBR w temperaturze -12 °C. Lepiszczka poddawane były starzeniu RTFOT w standardowej temperaturze 163 °C oraz obniżonej 130 °C. Uzyskane rezultaty wskazywały na zwiększenie sztywności lepiszczy z dodatkami WMA, niezależnie od temperatury starzenia (rys. 2.8 i 2.9). W przypadku Sasobitu efekt ten tłumaczono krystalizacją wosku w strukturze asfaltu, która następuje po obniżeniu temperatury poniżej temperatury krzepnięcia wosku. Fakt usztywnienia po dodaniu zeolitu wiązano natomiast z wprowadzeniem do asfaltu nierozpuszczalnego minerału, który zadziałał w charakterze wypełniacza. W ocenie doktoranta takie działanie dodatków WMA może mieć pewien negatywny wpływ na odporność mieszanki mineralno-asfaltowej na spękania niskotemperaturowe.



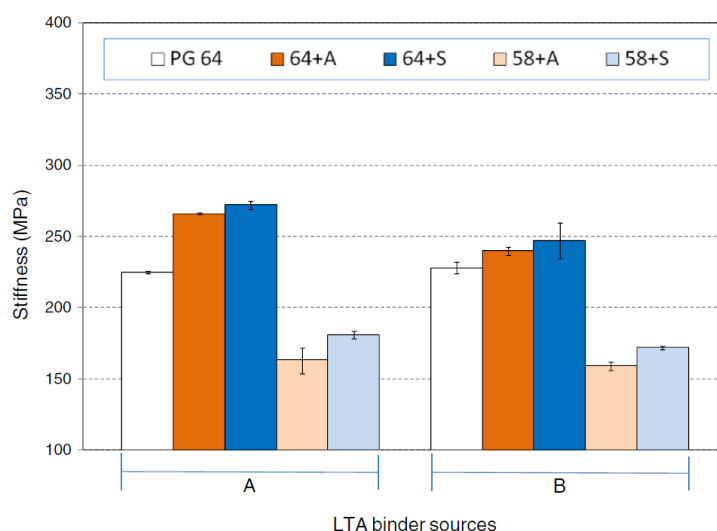
Rys. 2.8. Wpływ dodatku Sasobitu oraz zeolitu o nazwie handlowej Aspha-Min na sztywność asfaltu w temperaturze -12 °C po starzeniu RTFOT w temperaturze 163 °C według [37]



Rys. 2.9. Wpływ dodatku Sasobitu oraz zeolitu o nazwie handlowej Aspha-Min na sztywność asfaltu w temperaturze -12 °C po starzeniu RTFOT w temperaturze 130 °C według [37]

Praca Lee, Amirkhaniana i innych [73] zawiera wyniki badań lepiszcz z dodatkami WMA, do których został dodany asfalt poddany symulowanemu procesowi recyklingu nawierzchni na gorąco. Proporcje lepiszcza nowego do recyklowanego wynosiły 85:15. Właściwości asfaltu odpowiadające tym, które występują w destrukcji asfaltowym pochodzącym z eksploatowanej przez kilkanaście lat nawierzchni uzyskiwano poprzez poddanie go starzeniu krótkoterminowemu RTFOT w 163 °C, a

następnie długoterminowemu w 100 °C w aparacie PAV (Pressure Aging Vessel). Łącznie skomponowane lepiszcze składające się z asfaltu nowego, dodatku WMA oraz asfaltu recyklowanego badano w zakresie lepkości, właściwości wysoko- (reometr DSR) oraz niskotemperaturowych (reometr BBR). Uzyskane rezultaty wskazywały, że w przypadku chęci jednoczesnego stosowanie badanych dodatków WMA (Sasobit oraz zeolit) wraz z destruktem asfaltowym zawierającym zestarzone lepiszcze konieczna jest wnikliwa analiza rodzaju nowego asfaltu, jaki ma być użyty w produkowanej mieszance. Właściwe może być stosowanie bardziej miękkiego asfaltu. W przeciwnym wypadku łączne użycie dodatków WMA usztywniających asfalt w temperaturze eksploatacji wraz z dodatkiem starego lepiszcza pochodzącego z destruktu może skutkować otrzymaniem mieszanki o mniejszej od tradycyjnej odporności na spękania niskotemperaturowe. Na rysunku 2.10 pokazano wykres zawierający moduły sztywności badanych w pracy [73] asfaltów w -12 °C uzyskane w reometrze BBR.

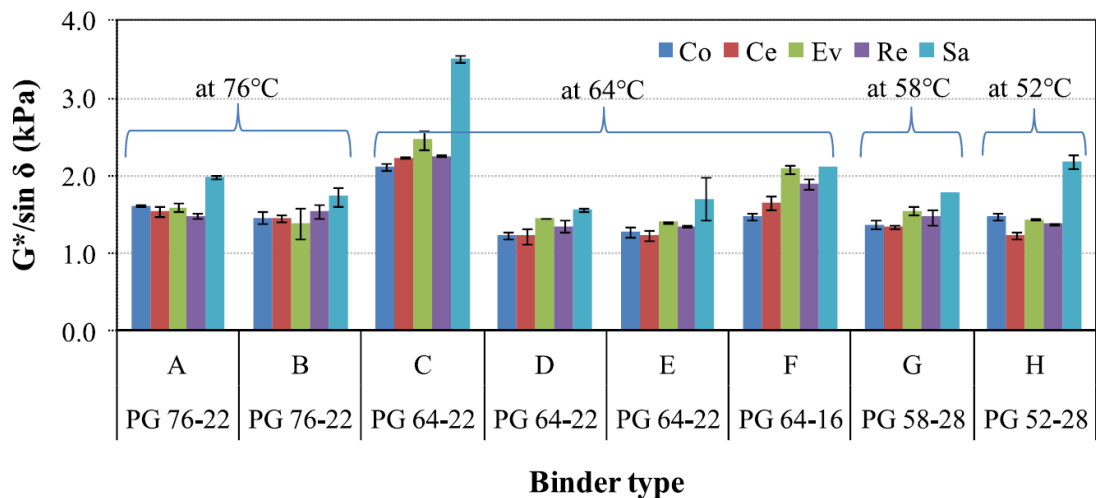


Rys. 2.10. Sztywność asfaltów z dodatkiem Sasobitu i zeolitu oraz dodatkiem recyklowanego asfaltu według [73]

Oznaczenia: PG-64 – asfalt PG 64-22 według klasyfikacji AASHTO M320 bez dodatku,
64+A – asfalt PG 64-22 z dodatkiem zeolitu o nazwie handlowej Aspha-Min,
64+S – asfalt PG 64-22 z dodatkiem Sasobitu,
58+A – asfalt PG 58-28 z dodatkiem zeolitu o nazwie handlowej Aspha-Min,
58+S – asfalt PG 58-28 z dodatkiem Sasobitu.

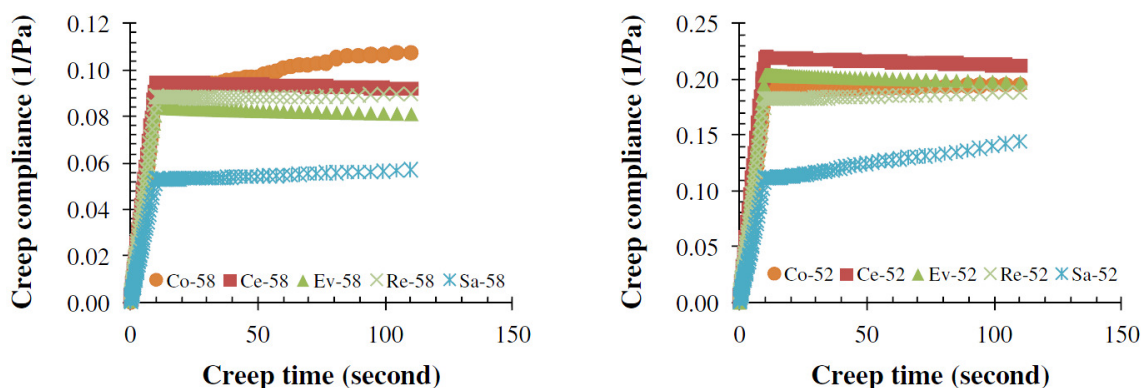
W późniejszej pracy Xiao, Punith i Amirkhanian [113] badali również inne dodatki obniżające temperaturę produkcji, takie jak Rediset, Ceca BaseRT i Evotherm, stosując podobną jak w poprzednich publikacjach metodykę oceny ich wpływu na asfalt. Ponownie uwidocznił się usztywniający charakter środka Sasobit, który w grupie badanych dodatków w największym stopniu zwiększał wartość modułu zespolonego G^* , wartość ilorazu $G^* / \sin \delta$ (rys. 2.11) oraz zmniejszał kąt przesunięcia fazowego. W dalszej kolejności efekty takie wywoływały dodatki Evothermu i Redisetu. Z kolei wprowadzenie do asfaltu środka Ceca BaseRT nie

powodowało znaczących zmian parametrów reologicznych lepszczą, pozostawiając je na oryginalnym poziomie. W przypadku charakterystyki pełzania Ceca BaseRT powodowała nawet jej nieznaczne obniżenie w stosunku do asfaltu czystego (rys. 2.12).



Rys. 2.11. Wartości ilorazu $G^* / \sin \delta$ dla różnych dodatków WMA przedstawione według [113]

Oznaczenia: A-H – Symbol rodzaju asfaltu z danego źródła, Co – asfalt bez dodatku, Ce – asfalt z dodatkiem Ceca BaseRT, Ev – asfalt z dodatkiem Evotherm, Re – asfalt z dodatkiem Rediset WMX, Sa – asfalt z dodatkiem Sasobitu.



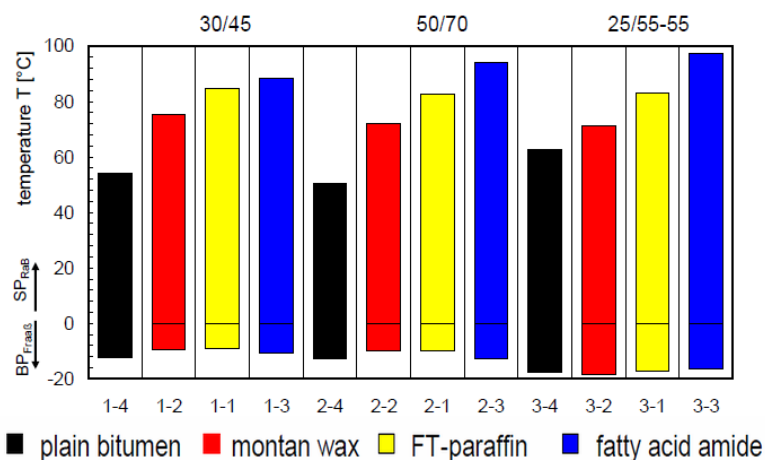
Rys. 2.12. Charakterystyki pełzania asfaltów PG 58-28 oraz PG 52-28 dla różnych dodatków WMA przedstawione w [113]

Oznaczenia: Co – asfalt bez dodatku, Ce – asfalt z dodatkiem Ceca BaseRT, Ev – asfalt z dodatkiem Evotherm, Re – asfalt z dodatkiem Rediset WMX, Sa – asfalt z dodatkiem Sasobitu.

W Europie badania nad asfaltami z dodatkami mającymi obniżać temperaturę produkcji mieszanki mineralno-asfaltowych prowadzone były min. przez Edwards, Yasedmira i Redeliusa ([30], [31], [33], [34]). W swoich pracach wykorzystywali komercyjnie dostępne środki pochodzenia organicznego (Sasobit, Asphaltan, wosk polietylenowy) oraz kwas polifosforowy w połączeniu z miękkim asfaltom 160/220

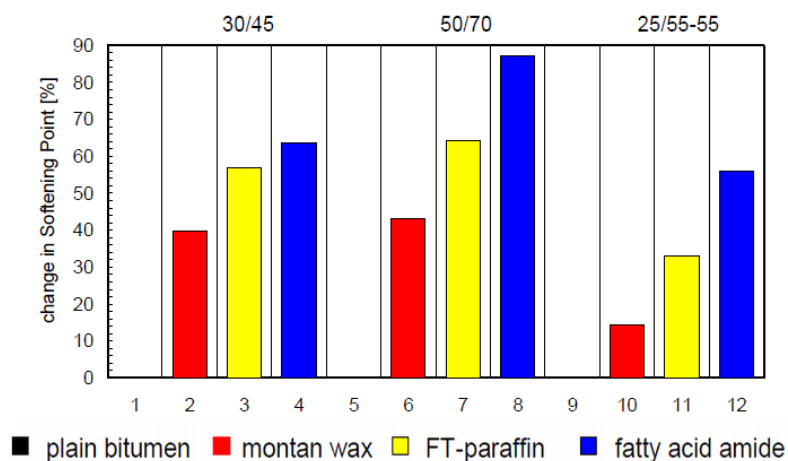
([30], [33], [34]) i asfaltem modyfikowanym PmB 32 [31]. Różnicą w stosunku od innych prac było użycie większych ilości dodatków, dochodzących w przypadku wosków nawet do 6% w stosunku do masy lepiszcza. Ogólne rezultaty były zbieżne z opisanymi wcześniej wynikami badań Amirkhaniana. Odnotowano poprawę zachowania się asfaltów pod kątem deformacji trwałych przy jednoczesnym pogorszeniu w pewnym stopniu charakterystyk w niskich temperaturach. Edwards wskazuje jednak [31], że przy ograniczeniu ilości dodatków takich jak Sasobit lub Asphaltan do 4% w stosunku do masy lepiszcza pogorszenie to jest nieznaczne i nie będzie miało praktycznego wpływu na zachowanie się wykonanych z nimi mieszanek mineralno-asfaltowych.

Inni europejscy badacze zajmujący się dodatkami WMA i ich wpływem na zachowania asfaltu to min. Metzker i Wistuba [79]. W grupie badanych przez nich środków, oprócz występujących wcześniej Sasobitu i Asphaltanu, znajdował się również dodatek z grupy amidów kwasów tłuszczowych (Licomont BS100). Wyjściowymi lepiszczami były asfalty zwykłe 30/45, 50/70 oraz modyfikowany 25/55-55. Wszystkie środki dodawano w proporcji 3% do masy lepiszcza. Zmiany właściwości (temperatura mięknięcia, penetracja, temperatura łamliwości, moduł zespolony i kąt przesunięcia fazowego DSR) po wprowadzeniu dodatków WMA w największym stopniu objawiały się w przypadku asfaltów zwykłych. Zmiany asfaltu modyfikowanego były mniejsze. Interesujące rezultaty otrzymano dla środka należącego do grupy amidów kwasów tłuszczowych. Jego obecność w asfalcie skutkowała największym spośród zastosowanych dodatków wzrostem właściwości odpowiedzialnych w mieszance mineralno-asfaltowej za odporność na deformacje trwałe, przy jednoczesnej najmniejszej zmianie temperaturę łamliwości Fraasa (rysunek 2.13 i 2.14).



Rys. 2.13. Bezwzględne zmiany temperatury mięknięcia i łamliwości asfaltów 30/45, 50/70 oraz 25/55-55 spowodowane dodaniem do nich Sasobitu, Asphaltanu oraz Licomontu BS 100 [79]

Oznaczenia: plain bitumen – asfalt bez dodatku, montan wax – asfalt z dodatkiem Asphaltanu, FT-paraffin – asfalt z dodatkiem Sasobitu, fatty acid amide – asfalt z dodatkiem Licomontu BS100.



Rys. 2.14. Względne zmiany temperatury mięknienia asfaltów 30/45, 50/70 oraz 25/55-55 spowodowane dodaniem do nich Sasobitu, Asphaltanu oraz Licomontu BS 100 [79]. Oznaczenia zgodne z rysunkiem 2.13.

2.4.2. Badania właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych

Badania mieszanek mineralno-asfaltowych o obniżonej temperaturze produkcji rozwinęły się szczególnie po roku 2008, kiedy nastąpił znaczny wzrost zainteresowania tą technologią. Początkowe prace badawcze miały charakter przeglądowy, mający na celu zebranie wstępnych informacji na temat dostępnych technologii obniżania temperatury. Do tego rodzaju zaliczają się min. publikacje [4], [16], [20], [50], [107] oraz raporty [22] autorstwa D'Angelo i innych, a także [93] Prowell'a, które opracowano dla FHWA na podstawie danych zebranych w 2007 roku przez przedstawicieli amerykańskiej administracji drogowej i firm wykonawczych podczas wizyt w krajach europejskich stosujących już technologie WMA. Celem tego przedsięwzięcia było pozyskanie użytecznych informacji na temat mieszanek mineralno-asfaltowych o obniżonej temperaturze produkcji, które byłyby pomocne w ich wdrażaniu w USA. Nieco wcześniej, w 2004 roku, wykonano w tym kraju jeden z pierwszych, ściśle zaplanowanych, odcinków doświadczalnych z mieszankami zawierającymi dodatki Sasobit i zeolit, co było poprzedzone również etapem badań doświadczalnych. Wyniki opublikowano w pracach [51] oraz [52] przygotowanych pod kierownictwem Hurley'a i Prowella. Mieszanki z dodatkami WMA badano w zakresie modułów sztywności, odporność na działanie wody, wytrzymałości na pośrednie rozciąganie i odporności na koleinowanie. Uzyskane wówczas wyniki wskazywały, że mieszanki produkowane w niższej temperaturze z dodatkami Sasobitu i zeolitu nie odbiegały właściwościami od mieszanek tradycyjnych. Zaobserwowane nieco niższe wartości wytrzymałości na pośrednie rozciąganie dla mieszanek z dodatkiem Sasobitu tłumaczono mniejszym starzeniem technologicznym asfaltu, ponieważ temperatura produkcji mieszanki WMA wynosiła jedynie 121 °C. W obu przypadkach zwrócono uwagę na możliwość powstawania uszkodzeń nawierzchni wynikających ze złej przyczepności asfaltu do kruszywa,

która może być spowodowana przez niecałkowite usunięcie wody z porów ziaren agregatu mineralnego podczas suszenia w obniżonej temperaturze ([51], [52]).

W dalszych pracach badawczych prowadzonych zarówno w Stanach Zjednoczonych, jak i Europie można wyróżnić kilka kierunków skupionych na rozwiązaniu konkretnych zagadnień:

- uwzględnienie działania dodatków WMA w projektowaniu składu mieszank mineralno-asfaltowych ([10], [12], [13], [46], [59], [75]),
- wyjaśnienie odporności mieszank WMA na oddziaływanie wody, również w sytuacji wykorzystywania technologii spieniania asfaltu ([18], [42], [70], [71], [81]),
- ocenie wpływu dodatków WMA na zagęszczalność ([40], [44], [96], [108], [116]),
- możliwość stosowania technologii WMA przy wytwarzaniu mieszank z dodatkiem destruktu asfaltowego lub asfaltem modyfikowanym gumą ([2], [3], [28], [90], [114]),
- odporności mieszank WMA na spękania niskotemperaturowe ([23], [47], [80]),
- wykorzystania cech mieszank WMA w projektowaniu nawierzchni ([39], [88], [98], [101]).

W pierwszej grupie wyróżnia się obszerny cykl badań wykonanych w ramach amerykańskiego programu „Mix Design Practices for Warm-Mix Asphalt”, którego wyniki opublikowane w raportach ([10], [12], [13], [59]) pod redakcją Bonaquista i Harrigana. Jego celem było opracowanie metody projektowania składów mieszank mineralno-asfaltowych o obniżonej temperaturze produkcji, zgodnej proceduralnie i sprzętowo z obowiązującą metodą projektowania mieszank tradycyjnych. Analizowano poszczególne etapy procesu projektowania składu (sposób mieszania, zagęszczalność, czasy kondycjonowania próbek) oraz właściwości asfaltów i gotowych mieszank (odporność na działanie wody, deformacje trwałe oraz zmęczenie). Parametry mieszank z etapu laboratoryjnego były weryfikowane na odcinkach doświadczalnych. Wnioski z przeprowadzonych analiz wskazywały, że proces projektowania mieszank WMA jest w dużym stopniu zbliżony do projektowania mieszank tradycyjnych. Mogą być stosowane asfalty o tej samej klasyfikacji PG. Zwrócono uwagę, że oczekiwana na podstawie teorii poprawa właściwości niskotemperaturowych asfaltów z uwagi na mniejsze starzenie technologiczne była odczuwalna jedynie przy radykalnie niższych temperaturach produkcji mieszank, trudnych do osiągnięcia w warunkach praktycznych. W pozostałych przypadkach pozytywny efekt mniejszego wygrzewania asfaltu podczas produkcji był bardzo nieznaczny. Ponadto stwierdzono, że pomimo próby oceny zagęszczalności mieszank tradycyjnych i mieszank WMA za pomocą kilku sposobów (urządzenie UMass, Nynas, prasa żyratorowa, urządzenie Uniwersytetu New Hampshire) uzyskiwane różnice były bardzo niewielkie. Różnice pomiędzy poszczególnymi rodzajami mieszank uwidaczniały się dopiero przy temperaturach

niższych o około 30 °C od temperatur zagęszczania występujących na drodze, w rzeczywistych warunkach stosowania mieszank WMA. W tabelicy 2.3. przedstawiono zestawienie metod pomiaru zagęszczalności, które stosowano w badaniach [10].

Tabela 2.4. Zestawienie analizowanych metod pomiaru zagęszczalności mieszank mineralno-asfaltowych [10]

Rodzaj urządzenia / metoda pomiarowa	Mierzona wielkość
Zmodyfikowane urządzenie NCAT	Moment obrotowy mieszadła przy stałej prędkości
Urządzenie UMass	Moment obrotowy mieszadła przy stałej prędkości
Zmodyfikowane urządzenie Nynas	Siła przy przesuwaniu porcji luźnej mieszanki przez łopatkę
Norma ASTM D6704	Siła przy wciskaniu łopatki w luźną mieszankę
Prasa żyratorowa	Naprężenia ścinające podczas zagęszczania próbki
Uniwersytet New Hampshire	Moment obrotowy występujący na wale mieszarki ręcznej

W pracy Mogaweera i Masada [81] ocenę zachowania się mieszank poddanych działaniu wody przeprowadzono analizując dane uzyskane z badania w koleinomierzu HWT (Hamburg Wheel Tester), posługując się stosunkiem modułów dynamicznych próbek kondycjonowanych do modułów próbek referencyjnych oraz wykorzystując analizę energii powierzchniowej i zagadnienia mechaniki spękań. Według Mogaweera ewentualne problemy z odpornością mieszank WMA na działanie wody (zwłaszcza przy stosowaniu technologii wykorzystujących spienianie) mogą być rozwiązane za pomocą tych samych środków adhezyjnych, jakie stosowane są dla mieszank tradycyjnych. Analizy energii powierzchniowej wskazały na mniejsze napięcie powierzchniowe asfaltów występujących w mieszankach WMA, co polepsza zwilżalność kruszywa i w istocie powinno zwiększać odporność na działanie wody [81].

Amirkhanian i Akisetty ([2], [3], [114]) zajmowali się tematyką jednoczesnego stosowania dodatków obniżających temperaturę i asfaltów modyfikowanych gumą. Wyniki przez nich uzyskane wskazywały na brak negatywnych efektów wprowadzania środków WMA do mieszank opartych o takie lepiszcze. Inne prace z tej dziedziny przeprowadził również Hajj z zespołem [41].

Przy określaniu zachowań niskotemperaturowych mieszank mineralno-asfaltowych o obniżonej temperaturze produkcji wykorzystywane były metoda TRST. Badania takie opisał Butz [17] oraz Butt, Tasdemir i Edwards ([15], [32]). W pracy [17] zamieszczono wyniki badań próbek betonów asfaltowych i mieszank SMA wytworzonych zarówno z asfaltami zwykłymi (50/70, 30/45), jak i modyfikowanymi (PmB 45). Odnotowane różnice w pomiarach naprężeń oraz temperatur przy których wystąpiło pęknięcie w próbce były niewielkie. Wprowadzenie do obu rodzajów

asfaltów 3% dodatku Sasobitu powodowało wzrost naprężeń rzędu 0,1 MPa i wzrost temperatury pęknięcia o 1 °C. Większe różnice otrzymano podczas badań opisanych w publikacji [15] dotyczącej asfaltów lanych. Dodatek 4% Sasobitu do asfaltu PmB 32 spowodował wzrost temperatury pęknięcia o 5 °C (z -35 na -30 °C). Inne podejście do zagadnienia spękań niskotemperaturowych zaprezentowali Hill, Behnia, Hakimzadeh i Buttlar [47], którzy do oceny zachowania się mieszanek w niskich temperaturach wykorzystali parametry związane z mechaniką spękań, tj. energię pęknięcia i współczynniki koncentracji naprężeń. Wielkości te określano na podstawie badań próbek o geometrii DC(T) (Disk-Shaped Compact-Tension) oraz 3PB (Three Point Bending), które nacinano w celu inicjacji spękania w określonym miejscu. Wyniki uzyskane przez Hilla i jego zespół pokazały, że energia pęknięcia zależała od rodzaju technologii WMA. W przypadku dodatku Redisetu oraz Evothermu odnotowano zwiększenie energii pęknięcia w stosunku do mieszanki tradycyjnej, oznaczający również lepsze charakterystyki pracy nawierzchni w niskich temperaturach. Dla dodatku Sasobit oraz zeolitu energia pęknięcia była mniejsza. Autorzy pracy [47] nie wskazują jednak na jednoznaczne powody takiego zachowania, wymieniając jako prawdopodobne przyczyny różny skład chemiczny analizowanych środków lub różną istotę ich działania, na które dodatkowo mógł nałożyć się efekt mniejszego starzenia asfaltu przy produkcji w niższej temperaturze. Z kolei rezultaty badań Kima [80] pokazały, że mieszanki WMA zawierające dodatek wosku parafinowego i Evothermu charakteryzowały się niegorszymi lub większymi współczynnikami intensywności naprężeń, przekładającymi się na lepsze właściwości niskotemperaturowe.

2.5. Emisje szkodliwych związków oraz zużycie energii

W literaturze dotyczącej mieszanek mineralno-asfaltowych o obniżonej temperaturze produkcji i zagęszczania można niejednokrotnie znaleźć informacje na temat redukcji emisji szkodliwych związków i zmniejszenia zużycia energii uzyskane dzięki zastosowaniu technologii WMA. Jednakże przy analizie i porównywaniu niniejszych danych należy mieć na uwadze różnice w jednostkach w których są one podane, metodologie pomiaru, rodzaj użytej technologii WMA oraz stopień obniżenia temperatury. Ponadto nie zawsze określane są emisje dla pełnego zakresu wszystkich szkodliwych substancji. Powyższe uwarunkowania utrudniają proste i jednoznaczne porównywanie różnych technologii produkcji mieszanek WMA pod kątem ich skuteczności w zmniejszaniu emitowania substancji szkodliwych dla zdrowia oraz gazów cieplarnianych. W dalszej części niniejszego rozdziału przytoczono kilka przykładów obniżenia emisji szkodliwych związków oraz zużycia paliwa występujących w literaturze.

W raporcie Federalnej Administracji Drogowej amerykańskiego Departamentu Transportu (*Federal Highway Administration of U.S. Department of Transportation*) [22] opracowanym na podstawie danych zebranych w 2006 i 2007 r. podczas wizytacji krajów europejskich podano procentowe redukcje emisji substancji związanych ze spalaniem paliw, lotnych związków organicznych (VOC, tj. volatile

organic compounds) oraz pyłów przy zastosowaniu technologii WMA w Norwegii, Włoszech, Holandii i Francji, przy czym nie we wszystkich krajach informacje dotyczyły pełnej listy wymienionych związków. Dane te przedstawiono w tablicy 2.4. Jak podano w [22] największe korzyści osiągnięto w zakresie obniżenia ilości emitowanych tlenków azotu (procentowa redukcja rzędu 60-70%) oraz pyłów (25-55%) w Norwegii i we Włoszech. Najmniejsze korzyści ekologiczne – osiągające około 20% poziom redukcji emisji – uzyskano we Francji. Redukcje pozostałych substancji najczęściej zawierały się w przedziale od 15% do 40% (w jednym przypadku 50%). Ponadto odnotowywano obniżenie zużycia paliwa o rząd 20-35%. W raporcie [22] nie są podane natomiast szczegółowe informacje dotyczące warunków pomiaru, rodzaju technologii WMA przy których uzyskano wymienione redukcje czy temperatury produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych.

Tablica 2.4. Uzyskane redukcje emisji szkodliwych związków na wytwórni w trakcie produkcji mieszanek WMA według raportu [22]

Rodzaj emitowanej substancji	Norwegia	Włochy	Holandia	Francja
CO ₂	31,5	30-40	15-30	23
SO ₂	-	35	-	18
VOC	-	50	-	19
CO	28,5	10-30	-	-
NO _x	61,5	60-70	-	18*
Pył	54	25-55	-	-

(-) brak danych

(*) dane dla dwutlenku azotu NO₂

Devivere, Barthel i Marchand [109] przedstawili porównanie wyników pomiaru emisji dymów i aerozoli prowadzonych w czasie produkcji mieszanki mineralno-asfaltowej Niemczech z asfaltem B65, bez oraz z dodatkiem zeolitu. Temperatura mieszanki tradycyjnej wynosiła 168°C, natomiast mieszanka produkowana w technologii WMA z zeolitem miała temperaturę 142°C. Pozwoliło to na zmniejszenie całkowitej ilości emitowanych dymów i aerozoli z 350,7 mg/m³ do jedynie 90,4 mg/m³ (tablica 5), oznaczając redukcję rzędu 75%. Odnotowane obniżenie zużycia energii na poziomie 30% było równoznaczne ze zmniejszeniem zapotrzebowania na olej opałowy do ok. 5,6 litra na jedną tonę wyprodukowanej mieszanki w porównaniu z wyjściowym (dla tradycyjnej temperatury produkcji) poziomem 8 litrów na jedną tonę.

Tablica 2.5. Uzyskane redukcje emisji szkodliwych związków na wytwórni w trakcie produkcji mieszanek WMA z dodatkiem zeolitu [109]

Rodzaj emitowanej substancji	Ilość emitowanych związków [mg/m ³]	
	Mieszanka referencyjna 168°C	Mieszanka z dodatkiem zeolitu 142°C
Aerozole	172,1	7,3
Łącznie dymy i aerozole	350,7	90,4

Gonzalez i inni [74] opublikowali rezultaty pomiarów emisji przeprowadzonych we Francji podczas wytwarzania mieszanki WMA z dodatkiem Ceca Base RT. W trakcie testów produkowano mieszankę betonu asfaltowego do bardzo cienkich warstw (BBTM) o uziarnieniu 0/10 mm i zawartości asfaltu 5,7%. Mieszankę referencyjną wytwarzano w temperaturze 170°C, zaś temperatura mieszanki WMA – z 0,4% dodatkiem środka Ceca Base RT – była znacząco niższa i wynosiła 125°C. Emisje każdej z badanych substancji obniżyły się w dość jednorodnym stopniu, a redukcje oscylowały wokół przedziału 20% - 30%. Pokazano je w tabelicy 2.6.

Tabela 2.6. Uzyskane redukcje emisji szkodliwych związków na wytwórni w trakcie produkcji mieszanki WMA z dodatkiem środka Ceca Base RT [74]

Rodzaj emitowanej substancji	Redukcja emitowanych związków [%]	
	Mieszanka z Ceca Base RT 125°C	
NO ₂	31,0	
VOC	21,0	
CO ₂	14,0	
CO	36,0	
Pył	27,0	

Bardziej rozbudowane informacje na temat metodyki i wyników pomiarów emisji w trakcie produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych zawarł Hurley, Prowell i Kvasnak ([51], [52], [53], [54], [55], [56]) w serii prac dotyczących odcinków próbnych z mieszankami WMA, zrealizowanych w roku 2006 w stanach Ohio, Michigan i Wisconsin. Celem wykonania odcinków próbnych było sprawdzenie zachowania się nawierzchni wykonanych z wykorzystaniem dodatków Sasobitu, zeolitu (Aspha-Min) oraz Evothermu ET (wersja w postaci emulsji asfaltowej). Na odcinku próbnym w stanie Ohio zastosowano wszystkie wymienione technologie. Odcinek próbny w stanie Michigan wykonano jedynie z dodatkiem Sasobitu. W stanie Wisconsin wykorzystano Sasobit oraz Evotherm. We wszystkich przypadkach produkowano mieszankę z przeznaczeniem do warstwy ścieralnej. Miały one uziarnienia 0/9,5 mm (Ohio i Michigan) lub 0/12,5 mm (Wisconsin). Zawartość asfaltu wynosiła odpowiednio 6,1, 5,5 oraz 5,3%. Każdorazowo wytwarzano ok. 800 – 1300 ton mieszanki dla danego rodzaju dodatku WMA oraz zbliżoną ilość mieszanki referencyjnej.

W tabelicy 2.7 przedstawiono dane dotyczące redukcji emisji szkodliwych substancji zarejestrowane podczas produkcji mieszanki WMA z Evothermem, zeolitem oraz Sasobitem i przeznaczonej do wbudowania na odcinku próbnym w stanie Ohio. Rejestracji podlegały parametry związane z emisją tlenków azotu, lotnych związków organicznych, dwutlenku węgla, tlenku węgla oraz dwutlenku siarki. Z uwagi na zastosowanie wytwórni z palnikiem suszarki wykorzystującym jako paliwo gaz ziemny oraz kruszyw wapiennych odnotowana emisja dwutlenku siarki była bardzo niewielka i nie pozwoliła na otrzymanie miarodajnych wyników. Temperatura produkcji mieszanek WMA wynosiła 135°C dla Evothermu i Sasobitu oraz 142°C dla

zeolitu. W rezultacie znaczącej redukcji uległy ilości emitowanych szkodliwych substancji dla mieszanek z dodatkami zeolitu i Sasobitu, jednakże w przypadku Evothermu poziom emitowanych lotnych związków organicznych i dwutlenku węgla znacząco wzrósł. Fakt ten przypisywano zwiększonemu zużyciu paliwa w trakcie produkcji z Evothermem, które wzrosło o 15,4% i mogło wynikać z większego zapotrzebowania energetycznego na odparowanie wody znajdującej się w emulsji Evothermu. Według [55] na uzyskane wyniki mogła wpłynąć również prawdopodobna zmiana ustawień pracy palnika suszarki po wyprodukowaniu mieszanki referencyjnej, co spowodowało zmianę poziomu odniesienia. W trakcie wytwarzania mieszanek z zeolitem i Sasobitem zużycie gazu okazało się być odpowiednio o 8,8% i 17,9% mniejsze niż w przypadku mieszanki referencyjnej, zaś zmierzona redukcja emisji tlenu węgla sięgała ponad 60%.

Tablica 2.7. Uzyskane redukcje emisji szkodliwych związków na wytwórni w trakcie produkcji mieszanek WMA z Evothermem, zeolitem i Sasobitem podczas realizacji odcinka doświadczalnego w stanie Ohio [55]

Rodzaj emitowanej substancji	Redukcja emitowanych związków [%]		
	Mieszanka z Evothermem 135°C	Mieszanka z zeolitem 142°C	Mieszanka z Sasobitem 135°C
NO _x	1,9	30,8	21,2
VOC	-159,0*	62,8	51,3
CO ₂	-20,0*	20,0	42,9
CO	20,3	62,0	63,2

* - odnotowano wzrost emisji danej substancji
brak znaku – odnotowano redukcję emisji danej substancji

W tablicy 2.8 przedstawiono dane dotyczące redukcji emisji zarejestrowane podczas produkcji mieszanki WMA z Evothermem i przeznaczonej do wbudowania na odcinku próbnym w stanie Wisconsin. W tym przypadku rejestrowano emisję tlenków azotu, lotnych związków organicznych oraz dwutlenku węgla. Temperatura produkcji mieszanki WMA była obniżona w stosunku do temperatury mieszanki referencyjnej (149°C) i wynosiła 121°C. Obniżenie emisji tlenków azotu i dwutlenku węgla przy wytwarzaniu mieszanki WMA było jednak stosunkowo niewielkie. Natomiast ponad trzykrotnie wzrosła emisja lotnych związków organicznych. Według autorów opracowania [56] wzrost ten był efektem niecałkowitego spalania oleju przez palnik suszarki, co wynikało z jego niedostatecznej regulacji do pracy w obniżonej temperaturze. Spadek zużycia paliwa był również relatywnie niewielki i sięgnął 9%.

Tablica 2.8. Uzyskane redukcje emisji szkodliwych związków na wytwórni w trakcie produkcji mieszanki WMA z Evothermem podczas realizacji odcinka doświadczalnego w stanie Wisconsin [56].

Rodzaj emitowanej substancji	Redukcja emitowanych związków [%]
	Mieszanka z Evothermem 121°C
NO _x	14
VOC	-313,0*
CO ₂	5,0

* - odnotowano wzrost emisji danej substancji

W tablicy 2.9 przedstawiono dane dotyczące redukcji emisji zarejestrowane podczas produkcji mieszanki WMA z Sasobitem i przeznaczonej do wbudowania na odcinku próbnym w stanie Michigan. Tak jak w poprzednim przypadku pomiarowi podlegała emisja tlenków azotu, lotnych związków organicznych i dwutlenku węgla. Ilość Sasobitu w stosunku do masy lepiszcza wynosiła 1,5%, zaś temperatura produkcji mieszanki 127°C. W porównaniu z mieszanką referencyjną wytwarzaną w temperaturze 163°C odnotowano spadek emisji tlenków azotu i spadek dwutlenku węgla. Wzrosła emisja lotnych związków organicznych, przy czym również w tym przypadku za przyczynę uznano niewłaściwą pracę palnika suszarki skutkującą niecałkowitym spalaniem. Zużycie paliwa było mniejsze o 10%.

Tablica 2.9. Uzyskane redukcje emisji szkodliwych związków na wytwórni w trakcie produkcji mieszanki WMA z dodatkiem Sasobitu podczas realizacji odcinka doświadczalnego w stanie Michigan [54]

Rodzaj emitowanej substancji	Redukcja emitowanych związków [%]
	Mieszanka z dodatkiem Sasobitu 127°C
NO _x	34,0
VOC	-8,0*
CO ₂	18,0

* - odnotowano wzrost emisji danej substancji

Bardziej pozytywne rezultaty w zastosowaniu technologii Evotherm opisał Davidson ([24], [25], [26], [27]). Podczas realizacji odcinka doświadczalnego w kanadyjskiej prowincji Ontario wyprodukowano 615 ton mieszanki WMA. Jej temperatura wynosiła 125°C i była niższa o 25°C od temperatury mieszanki referencyjnej równej 150°C. Dla każdej z rejestrowanych substancji odnotowano kilkudziesięcioprocentowe redukcje emisji (tablica 2.10). Zużycie paliwa było również znacząco niższe. Na wyprodukowanie 1 tony mieszanki referencyjnej zużyto średnio 11,37 litra oleju opałowego, zaś dla mieszanki WMA wartość ta wynosiła jedynie 5,20 litra.

Tablica 2.10. Uzyskane redukcje emisji szkodliwych związków na wytwórni w trakcie produkcji mieszanek WMA w technologii Evotherm w trakcie realizacji odcinka doświadczalnego w prowincji Ontario [26]

Rodzaj emitowanej substancji	Redukcja emitowanych związków [%]
	Mieszanka z Evothermem 125°C
NO	58,0
CO ₂	45,8
CO	63,1
SO ₂	41,2

Podsumowując przeprowadzone studia nad emisjami szkodliwych substancji podczas wytwarzania mieszanek mineralno-asfaltowych o obniżonej temperaturze produkcji można stwierdzić, że zastosowanie dodatków WMA ma niejednoznaczny wpływ na ilość emitowanych szkodliwych związków. Odnotowywano spadek emisji, ale w niektórych przypadkach ich wzrost. Ilość emitowanych substancji nie zależy tylko od temperatury produkcji mieszanki mineralno-asfaltowej, ale w pewnym stopniu również od czynników takich jak wilgotność kruszywa czy sprawność działania suszarki wytwórni mas bitumicznych.

Oddzielną tematyką poruszany przez badaczy jest uwzględnienie wpływu zastosowania dodatków WMA na całość emisji szkodliwych związków podczas produkcji i eksploatacji nawierzchni. Zagadnienia te zostały przedstawione min. w pracach [38], [43], [45], [106] oraz [115].

2.6. Podsumowanie studiów literatury

Z przeprowadzonych studiów literatury można pozwalają wyciągnąć następujące wnioski:

- Ilość dostępnych technologii służących do obniżania temperatury produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych zwiększa się. Dotyczy to zarówno technologii opartych na dodatkach dodawanych do asfaltów, jak i technologii wykorzystujących zjawisko spieniania asfaltów. Według danych zebranych przez doktoranta w roku 2009 dostępnych było kilka dodatków WMA i podobna ilość technologii spieniania. W roku 2011 istniało już kilkanaście różnych dodatków WMA oraz instalacji spieniających.
- Wyniki dotychczasowych badań wskazują na pozytywny wpływ wybranych dodatków WMA na odporność mieszanek mineralno-asfaltowych na deformacje trwale powstające w wysokich temperaturach. Dotyczy to dodatków należących do grupy wosków i amidów kwasów tłuszczowych (Sasobit, Licomont BS100, Asphaltan). Wpływ dodatków polepszających zwilżalność kruszywa przez asfalt jest w tym zakresie nie występuje.
- Obawy wzbudza odporność mieszanek mineralno-asfaltowych na działanie wody. Wskazywane jest ryzyko niedostatecznej przyczepności asfaltu do kruszywa, które może być spowodowane przez mniejszy stopień jego wysuszenia podczas produkcji mieszanki mineralno-asfaltowej w temperaturze

niższej niż tradycyjna. W przypadku dodatku zeolitu dochodzi również zagadnienie obecności wody wywołującej efekt spienienia.

- Usztywniający wpływ dodatków należących do grupy wosków może negatywnie wpływać na odporność mieszanek mineralno-asfaltowych na spękania niskotemperaturowe.
- Prowadzone są prace nad opracowaniem procedury badania mogącego mierzyć zagęszczalność mieszanek WMA w niskich temperaturach. Dotychczasowe laboratoryjne sposoby pomiaru nie wskazują jednoznacznie na lepszą zagęszczalność mieszanek WMA w stosunku do mieszanek tradycyjnych, pomimo pozytywnych rezultatów odnotowywanych na odcinkach doświadczalnych.
- Obniżenie temperatury produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych zwykle przekłada się na zmniejszenie emisji szkodliwych substancji. W niektórych przypadkach, przy nałożeniu się innych czynników (np. duże zawilgocenie wykorzystywanego kruszywa) emisje niekiedy mogą jednak wzrosnąć.

3. BADANE MATERIAŁY

3.1. Wybór rodzaju mieszanki mineralno-asfaltowej do badań

Przed rozpoczęciem badań rozważano następujące typy mieszanek:

- beton asfaltowy do warstwy podbudowy,
- beton asfaltowy do warstwy wiążącej,
- beton asfaltowy do warstwy ścieralnej,
- mieszankę mastyksu grysowo-asfaltowego (SMA) do warstwy ścieralnej.

Ostatecznie do dalszych prac laboratoryjnych wybrano beton asfaltowy do warstwy ścieralnej o uziarnieniu 0/12,8. Ten typ mieszanki mineralno-asfaltowej posiadał następujące zalety w aspekcie prowadzonych badań:

- Warstwa ścieralna jest ostatnią, wierzchnią warstwą nawierzchni, bezpośrednio narażoną na oddziaływanie warunków atmosferycznych oraz kół pojazdów.
- Z powodu wbudowywania w cienkiej warstwie o grubości 4 lub 5 cm warstwa ścieralna jest szczególnie wrażliwa w trakcie wbudowywania na wczesne ochłodzenie, a tym samym na niedostateczne zagęszczenie.
- Uziarnienie mieszanek do warstw ścieralnych jest drobniejsze niż do warstw podbudowy lub wiążącej, co wpływa pozytywnie na jednorodność wyników badań laboratoryjnych z uwagi na mniejszy wpływ niejednorodnego rozkładu ziaren w próbkach.
- W składzie betonu asfaltowego brak jest włókien celulozowych stosowanych w mieszankach mastyksu grysowego SMA, mogących mieć wpływ na uzyskiwane wyniki.
- Beton asfaltowy do warstwy ścieralnej jest mieszanką stosowaną przez zarządców dróg wszystkich szczebli – krajowych, wojewódzkich, powiatowych i gminnych. Obecnie znacznie zmalało wykorzystanie betonu asfaltowego do warstw ścieralnych na drogach krajowych, jednakże nadal można go spotkać w trakcie remontów nawierzchni dróg krajowych niebędących autostradami bądź drogami ekspresowymi oraz przy budowie odcinków dróg poprzecznych i dojazdowych towarzyszących dużym inwestycjom drogowym.
- W przypadku wykonywania odcinków doświadczalnych warstwa podbudowy i wiążąca jest zakryta i niewidoczna, a zatem nie ma możliwości przeprowadzenia oceny wizualnej po wykonaniu oraz w trakcie okresu eksploatacji.

Pierwotnym zamiarem było wykorzystanie mieszanki betonu asfaltowego do warstwy ścieralnej o identycznym lub zbliżonym składzie jak w badaniach laboratoryjnych również w trakcie budowy odcinka doświadczalnego w celu porównania cech mieszanki wytworzonej w skali przemysłowej (w wytwórni mas bitumicznych) z mieszanką uzyskaną w warunkach laboratoryjnych. Możliwości realizacyjne wynikające z umiejscowienia odcinka oraz terminu jego wykonania spowodowały

jednakże konieczność przyjęcia do terenowego etapu badań mieszanki mastyksu grysowego SMA z asfaltem modyfikowanym o składzie zgodnym z Wymaganiami Technicznymi WT-2 2010. Mastyks grysowy na odcinku doświadczalnym był także zaprojektowany z udziałem dodatków WMA.

Ostatecznie przyjęto:

- do badań laboratoryjnych beton asfaltowy do warstwy ścieralnej o uziarnieniu 0/12,8 wg normy PN-S-96025:2000,
- do odcinka doświadczalnego mieszankę SMA o uziarnieniu 0/11 wg WT-2 2010.

3.2. Dodatki WMA obniżające temperaturę produkcji i wbudowywania stosowane w badaniach

W badaniach wykorzystano następujące dodatki obniżające temperaturę produkcji i wbudowania mieszanek mineralno-asfaltowych:

- Sasobit,
- Licomont BS100,
- Rediset WMX,
- Ceca Base RT,
- Aspha-Min (zeolit).

W ten sposób w zakwalifikowanej do badań grupie dodatków znalazł się przynajmniej jeden przedstawiciel różnych grup dodatków:

- a. parafin zawierających długie łańcuchy węglowodorowe (Sasobit),
- b. mieszanin amidów kwasów tłuszczowych (Licomont BS 100),
- c. środków wykazujących podwójne działanie: modyfikujących lepkość i działających powierzchniowo czynnie (Rediset WMX),
- d. środków działających powierzchniowo czynnie (Ceca Base RT),
- e. środków powodujących spienienie asfaltu po dodaniu do mieszanki (zeolit).

Każdy z zastosowanych środków opisano w rozdziale 2 dotyczącym przeglądu literatury. W trakcie ich wyboru posłużono się następującymi kryteriami:

- mechanizmem działania danego środka należącego do różnych typów dodatków WMA,
- łatwością zastosowania w warunkach laboratoryjnych, jak i w trakcie ewentualnej produkcji mieszanek w skali przemysłowej,
- dostępnością na terenie Polski w momencie rozpoczynania programu badawczego (2009 rok).

W efekcie sprowadzono i zmagazynowano następujące handlowo dostępne dodatki WMA w poniższych ilościach:

- ok. 100 kg dodatku Sasobit w postaci granulek,
- ok. 100 kg dodatku Licomont BS 100 w postaci proszku,
- ok. 100 kg dodatku Rediset WMX w postaci płatków,

- ok. 5 kg dodatku Ceca Base RT w postaci płynnej,
- ok. 100 kg dodatku Aspha-Min w postaci proszku.

Na tym etapie podjęto również decyzję o ilości dodawanych środków w stosunku do masy lepiszcza. Przyjęto, że w trakcie całego programu badawczego będzie stosowana jedna procentowa ilość danego środka w stosunku do asfaltu, niezależnie od rodzaju badań lub – tylko w przypadku zeolitu – jedna procentową zawartość w stosunku do masy mieszanki mineralno-asfaltowej. Zastosowane ilości procentowe przyjęto na podstawie wskazań producentów danych środków i studiów literatury. Wyniosły one:

- Sasobit – 3% w stosunku do masy asfaltu,
- Licomont BS 100 – 3% w stosunku do masy asfaltu,
- Rediset WMX – 2% w stosunku do masy asfaltu,
- Ceca Base RT – 0,35% w stosunku do masy asfaltu,
- zeolit – 0,30% w stosunku do masy mieszanki mineralno-asf.

Biorąc pod uwagę niewielkie ilości dodatków potrzebnych do modyfikacji asfaltu zgromadzone ilości pozwoliły na przeprowadzenie wszystkich badań laboratoryjnych przez cały okres trwania programu przy wykorzystaniu jednej partii ich dostawy. Po określeniu ilości i rodzaju oraz sprowadzeniu dodatków przyjęto jednolitą metodykę oznaczania mieszanek wyprodukowanych z poszczególnymi dodatkami (lub samych lepiszczy z dodatkami), która obowiązywała przez cały okres badań. Schemat oznaczeń zamieszczono w tabelicy 3.1.

Tabela 3.1. Schemat oznaczeń poszczególnych mieszanek mineralno-asfaltowych lub asfaltów wytwarzanych z różnymi dodatkami WMA

Oznaczenie asfaltu lub mieszanki	Rodzaj asfaltu	Rodzaj dodatku	Ilość dodatku	Dozowanie w stosunku do masy
A	zwykły 50/70	-	-	-
B	zwykły 50/70	Sasobit	3%	lepiszcza
C	zwykły 50/70	Licomont BS100	3%	lepiszcza
D	zwykły 50/70	Rediset WMX	2%	lepiszcza
E	zwykły 50/70	Ceca Base RT	0,35%	lepiszcza
F	zwykły 50/70	zeolit	0,30%	mieszanki min.-asf.
G	modyfikowany 45/80-55	-	-	-
H	modyfikowany 45/80-55	Sasobit	3%	lepiszcza
I	modyfikowany 45/80-55	Licomont BS100	3%	lepiszcza
K	modyfikowany 45/80-55	Rediset WMX	2%	lepiszcza
L	modyfikowany 45/80-55	Ceca Base RT	0,35%	lepiszcza
M	modyfikowany 45/80-55	zeolit	0,30%	mieszanki min.-asf.

3.3. Asfalty stosowane w badaniach

Do etapu badań laboratoryjnych przyjęto dwa rodzaje asfaltów:

- asfalt drogowy zwykły rodzaju 50/70,
- asfalt modyfikowany polimerami MODBIT rodzaju 45/80-55.

Wybór ten był zgodny z wymaganiami technicznymi oraz praktyką w projektowaniu recept mieszank mineralno-asfaltowych do warstw ścieralnych w Polsce. Oba rodzaje asfaltów zostały wyprodukowane w rafinerii LOTOS w Gdańsku, która jest czołowym dostawcą asfaltu w Polsce. Podobnie jak w przypadku dodatków WMA zmagazynowano ilości pozwalające na przeprowadzenie pełnego zakresu badań laboratoryjnych wykorzystując jedną partię produkcyjną lepszą. W tablicy 3.2 przedstawiono wyniki badań wyjściowych cech asfaltu.

Tablica 3.2. Wyjściowe parametry asfaltów użytych na etapie badań laboratoryjnych przed wprowadzeniem do nich dodatków WMA

L.p.	Właściwość	Asfalt zwykły 50/70	Asfalt modyfikowany 45/80-55
1	Penetracja w 25°C wg PN-EN 1426:2001, [0,1·mm]	49,4	49,3
2	Temperatura mięknięcia wg PN-EN 1427:2007, [°C]	51,8	57,3
3	Lepkość dynamiczna wg PN-EN13702-2:2005, [Pa·s]: <ul style="list-style-type: none"> • w temperaturze 160°C • w temperaturze 135°C • w temperaturze 90°C • w temperaturze 60°C 	0,165 0,495 10,005 283,743	0,407 1,225 29,720 2 176,667

3.4. Kruszywa stosowane w badaniach

Do zaprojektowania i wytworzenia mieszank mineralno-asfaltowych w laboratorium użyto grysów ze skał granitowych pochodzenia skandynawskiego, ze Szwecji i Norwegii. Ponadto zastosowano piasek łamany granitowy z Norwegii oraz wypełniacz wapienny firmy Nordkalk. Łącznie wykorzystano następujące trzy rodzaje grysów granitowych, jeden rodzaj piasku łamanego oraz jeden rodzaj wypełniacza kamiennego:

- grys granitowy 8/11,
- grys granitowy 5/8,
- grys granitowy 2/5,
- piasek łamany granitowy 0/2,
- wypełniacz wapienny Nordkalk.

Wszystkie zgromadzone materiały należą do kruszyw powszechnie wykorzystywanych w produkcji mieszank mineralno-asfaltowych na Pomorzu. Kruszywa ze skały granitowej uznawane są za niezbyt korzystne do zastosowania w mieszankach mineralno-asfaltowych z uwagi na ich skład mineralogiczny (duża zawartość krzemionki), który skutkuje słabszym powinowactwem asfaltu do powierzchni ziaren kruszywa w stosunku do kruszyw zasadowych. Posiadają jednak dobre właściwości mechaniczne oraz korzystniejszą cenę na Pomorzu w stosunku do kruszyw transportowanych z południa kraju. Problem niewystarczającego powinowactwa asfaltu do kruszyw granitowych w warunkach rzeczywistej produkcji rozwiązywany jest poprzez wprowadzanie do składu mieszank środków

adhezyjnych. Mając na uwadze zakres i tematykę niniejszej pracy zdecydowano o niestosowaniu samodzielnych środków adhezyjnych, które dodatkowo mogłyby wpłynąć na działanie dodatków WMA obniżających temperaturę produkcji i wbudowywania.

W tabelicy 3.3 zamieszczono dane dotyczące uziarnienia użytych kruszyw.

Tabela 3.3. Uziarnienia kruszyw użytych na etapie badań laboratoryjnych

Sito # [mm]	Przechodzi przez sito dla kruszywa rodzaju, [%]:				
	Grys 8/11	Grys 5/8	Grys 2/5	Piasek łamany 0/2	Wypełniacz
12,8	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
9,6	72,0	100,0	100,0	100,0	100,0
8	24,8	87,0	100,0	100,0	100,0
6,3	12,8	43,8	99,8	100,0	100,0
4	4,9	6,9	65,0	100,0	100,0
2	3,0	3,3	14,6	96,9	100,0
0,085	2,2	2,4	6,2	65,6	100,0
0,42	1,9	2,1	4,4	44,7	100,0
0,3	1,7	2,0	3,8	36,4	100,0
0,18	1,5	1,8	3,1	23,6	100,0
0,15	1,4	1,7	2,9	18,7	96,8
0,075	1,0	1,3	2,1	6,3	88,3
<0,075	0,9	1,2	1,9	4,5	14,9

Z wymienionych materiałów skomponowano mieszankę mineralną spełniającą wymagania normy PN-S-96025:2000 dotyczące betonu asfaltowego do warstwy ścieralnej o uziarnieniu 0/12,8 mm dla kategorii ruchu KR3-6. O wyborze przyjętej wielkości uziarnienia 0/12,8 zadecydowały następujące czynniki:

- mieszanki o uziarnieniu 0/12,8 mm są najbardziej zbliżone pod względem uziarnienia do wprowadzanych w czasie niniejszych badań (początek 2009 roku) do stosowania w Polsce mieszanek betonów do warstw ścieralnych AC 11S.
- mieszanki o maksymalnym ziarnie 12,8 mm były mieszankami o najmniejszym uziarnieniu dopuszczonym przez normę PN-S-96025:2000 do stosowania w warstwach ścieralnych obciążonych ruchem KR3-6. Zastosowanie w programie badań laboratoryjnych mieszanek o większym rozmiarze maksymalnego ziarna 0/16 mm lub 0/20 mm (również dopuszczonych przez wspomnianą normę do stosowania w warstwach ścieralnych) byłoby niekorzystne ze względu na możliwy nierównomierny rozkład ziaren w próbkach laboratoryjnych, które w porównaniu z nimi posiadają stosunkowo małe wymiary. Dotyczy to zwłaszcza próbek formowanych metodą Marshalla oraz prostopadłościennych próbek (belek) wykorzystanych do określenia cech niskotemperaturowych.

3.5. Projektowanie betonu asfaltowego przeznaczonego do badań

3.5.1. Dobór składu mieszanki mineralnej

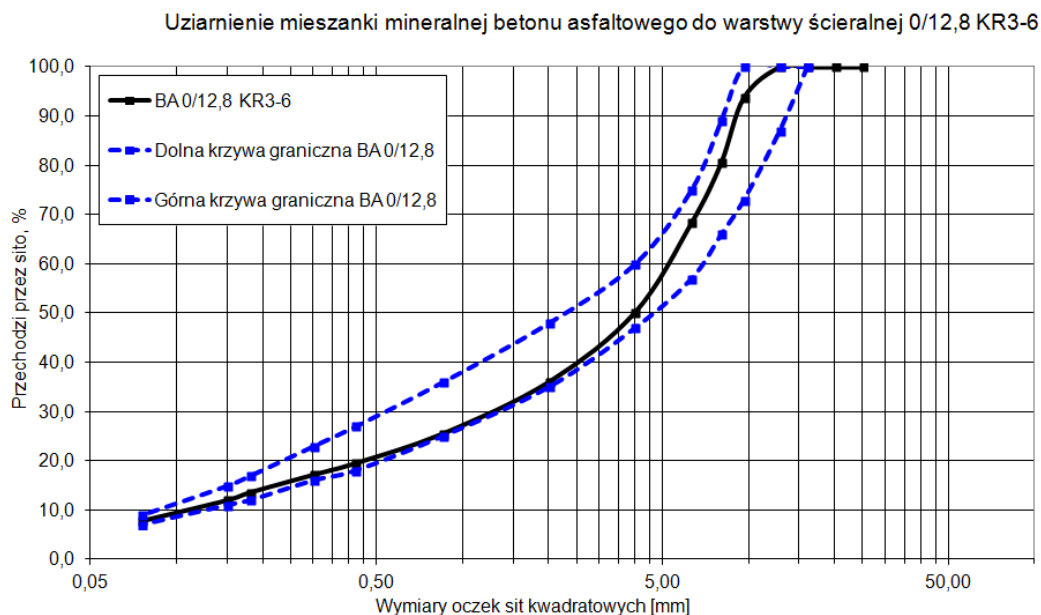
Zawartość poszczególnych kruszyw w zaprojektowanej mieszance mineralnej przedstawiono w tabelicy 3.4, zaś rzędne krzywej uziarnienia w tabelicy 3.5. Samą krzywą uziarnienia pokazano na rysunku 3.1. Skład mieszanki mineralnej zaprojektowano w taki sposób, aby jej krzywa uziarnienia przebiegała dla zakresu uziarnienia od 0 do 4 mm przy dolnej krzywej granicznej w celu spełnienia wymogów dotyczących odporności na koleinowanie.

Tablica 3.4. Procentowa zawartość materiałów mineralnych oraz ich gęstości w zaprojektowanej mieszance mineralnej 0/12,8 mm do warstwy ścieralnej z betonu asfaltowego dla ruchu KR3-6 wg normy PN-S-96025:2000

Materiał	Zawartość w mieszance mineralnej, [%]	Gęstość, [g/cm ³]
Grys 8/11	22	2,717
Grys 5/8	22	2,727
Grys 2/5	24	2,724
Piasek łamany 0/2	26	2,759
Wypełniacz	6	2,700
Suma	100	-
Gęstość mieszanki mineralnej		2,731

Tablica 3.5. Uziarnienie mieszanki mineralnej 0/12,8 mm do warstwy ścieralnej z betonu asfaltowego dla ruchu KR3-6 wg normy PN-S-96025:2000

Sito # [mm]	Dolna krzywa graniczna wg normy PN-S-96025:2000	Górna krzywa graniczna wg normy PN-S-96025:2000	Rzędne krzywej uziarnienia
16,0	100	100	100,0
12,8	87	100	100,0
9,6	73	100	93,8
8,0	66	89	80,6
6,3	57	75	68,4
4,0	47	60	50,2
2,0	35	48	36,1
0,85	25	36	25,6
0,42	18	27	19,5
0,30	16	23	17,2
0,18	12	17	13,6
0,15	11	15	12,0
0,075	7	9	7,8



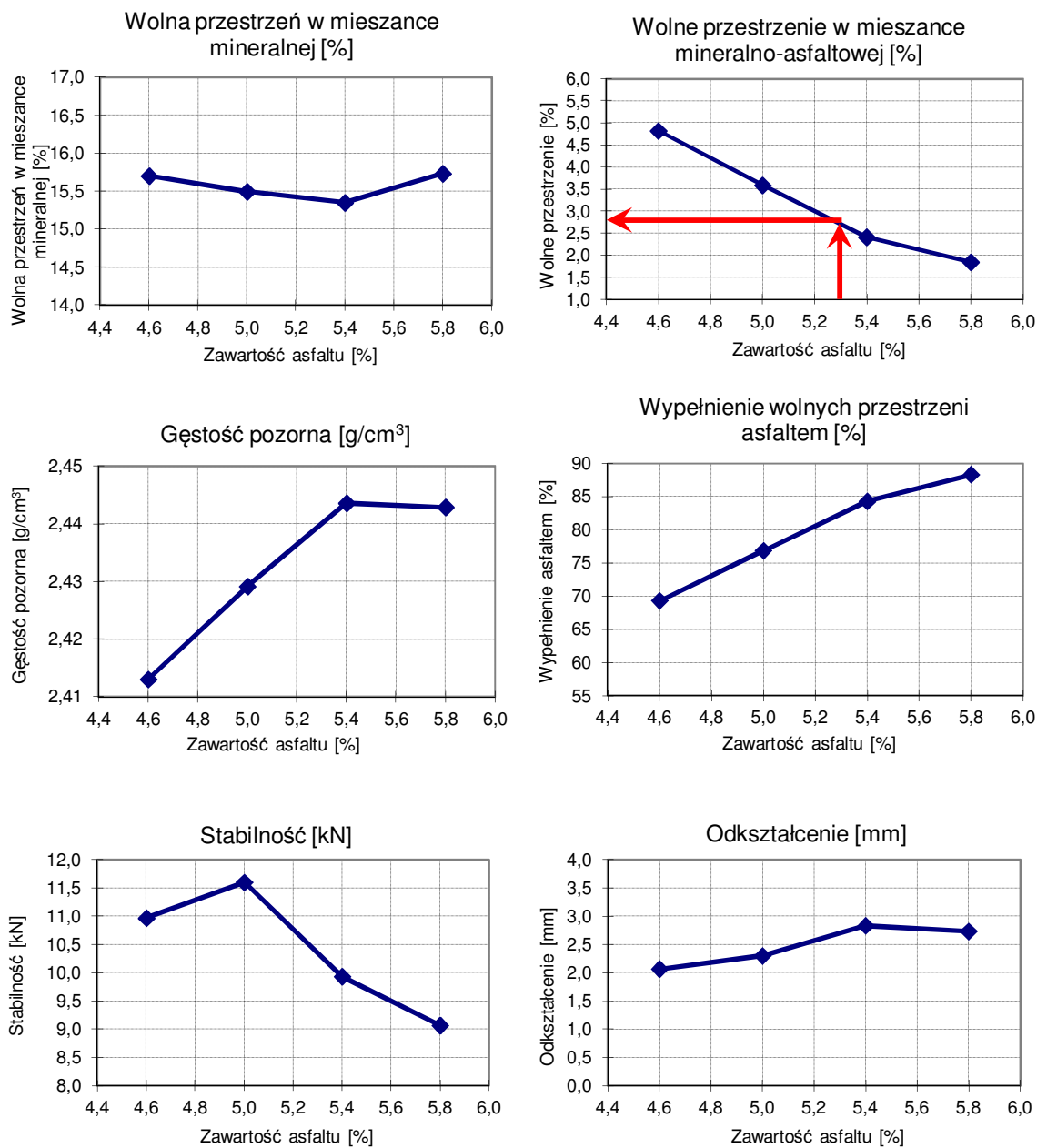
Rys. 3.1. Krzywa uziarnienia mieszanki mineralnej 0/12,8 mm do warstwy ścieralnej z betonu asfaltowego dla ruchu KR3-6 wg normy PN-S-96025:2000

3.5.2. Dobór zawartości asfaltu

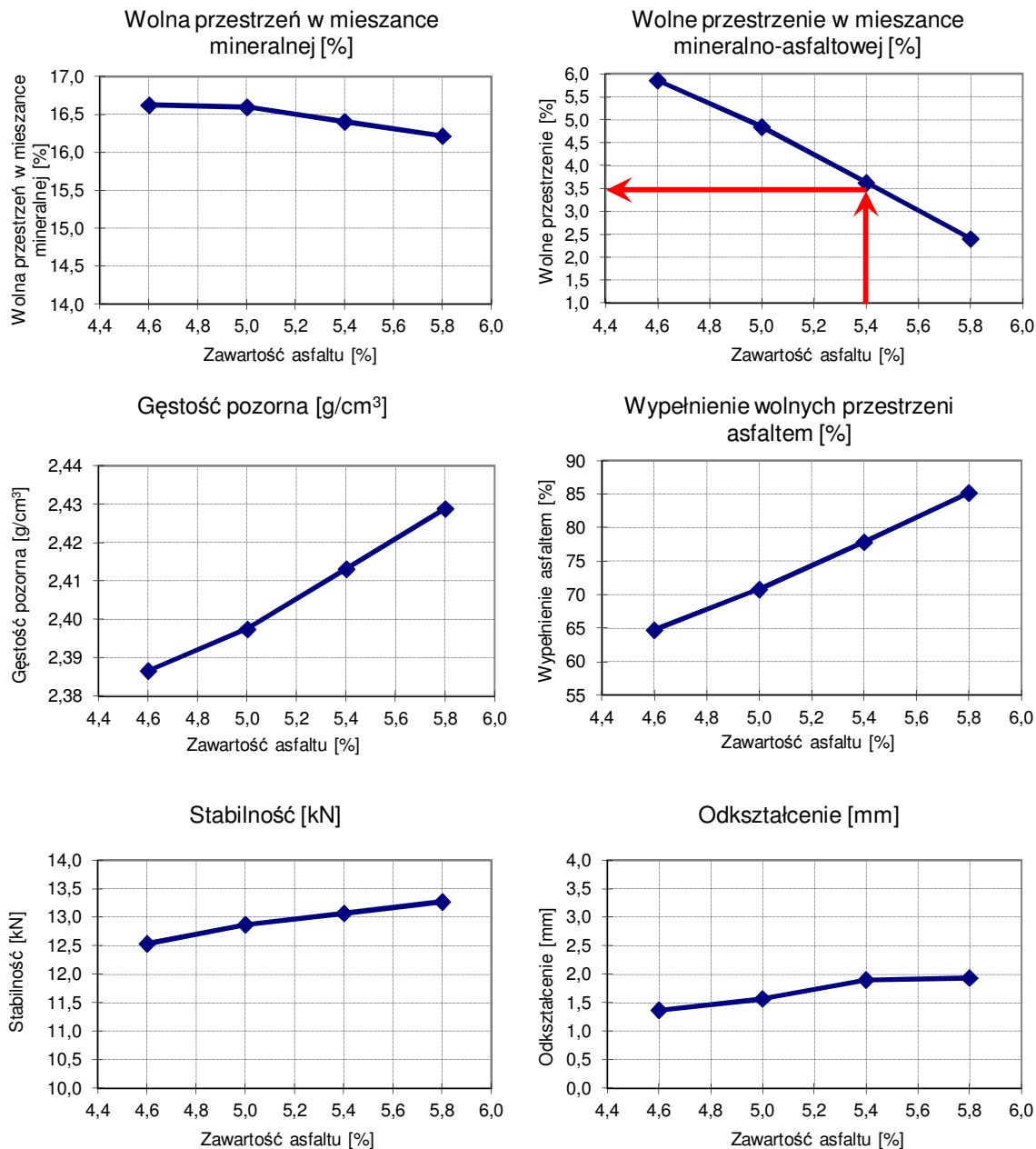
Ilość asfaltu w mieszance betonu asfaltowego przyjęto na podstawie zawartości wolnych przestrzeni w próbkach Marshalla wytworzonych w temperaturach tradycyjnych z asfaltem zwykłym 50/70 oraz asfaltem modyfikowanym 45/80-55. Do tego celu wykonano zaroby próbne mieszanek z różnymi zawartościami asfaltu, zawierającymi się w przedziale od 4,6% do 5,8%. Temperatura zagęszczania próbek wynosiła 140-145°C dla asfaltu zwykłego 50/70 oraz 145-150°C dla asfaltu modyfikowanego. Zastosowanym kryterium doboru zawartości asfaltu było otrzymanie zawartości wolnych przestrzeni w próbkach w przedziale od 2,5% do 3,5%. W rezultacie przyjęto zawartość 5,3% lepiszcza dla mieszanek wytwarzanych z asfaltem zwykłym 50/70 oraz 5,4% dla mieszanek wytwarzanych z asfaltem modyfikowanym 45/80-55. Wykresy obrazujące wielkości parametrów określonych w trakcie procedury doboru asfaltu, tj.:

- wolnej przestrzeni w mieszance mineralnej,
- wolnej przestrzeni w mieszance mineralno-asfaltowej,
- gęstości pozornej,
- wypełnienia wolnych przestrzeni asfaltem,
- stabilności,
- odkształcenia

w funkcji ilości asfaltu zwykłego 50/70 przedstawiono na rysunku 3.3, zaś dla asfaltu modyfikowanego 45/80-55 na rysunku 3.4.



Rys. 3.3. Parametry mieszanki mineralno-asfaltowej w próbkach Marshalla w zależności od ilości asfaltu zwykłego 50/70



Rys. 3.4. Parametry mieszanki mineralno-asfaltowej w próbkach Marshalla w zależności od ilości asfaltu modyfikowanego 45/80-55

4. METODYKA BADAŃ LABORATORYJNYCH

4.1. Wprowadzenie

W badaniach laboratoryjnych porównywano właściwości fizykomechaniczne mieszanek mineralno-asfaltowych wytwarzanych i zagęszczanych w obniżonej temperaturze dzięki zastosowaniu w ich składzie dodatków WMA z cechami wyjściowych mieszanek wytwarzanych w temperaturach tradycyjnych, bez dodatków WMA. Podczas badań laboratoryjnych wykorzystano następujące dwa rodzaje mieszanek mineralno-asfaltowych:

- beton asfaltowy do warstwy ścieralnej z asfaltem zwykłym,
- beton asfaltowy do warstwy ścieralnej z asfaltem modyfikowanym.

Poza tym wykonano badania zmian właściwości samych asfaltów z dodatkami WMA w stosunku do właściwości czystych asfaltów.

Spis wykonanych badań laboratoryjnych przedstawiono w tabelicy 4.1.

Tablica 4.1. Spis wykonanych badań laboratoryjnych

L.p.	Metoda badawcza	Cecha	Oznaczenie cechy	Norma lub opis metody
Badania asfaltów				
1.	Badanie penetracji	Penetracja	Pen	PN-EN 1426:2001
2.	Oznaczenie temperatury mięknięcia	Temperatura mięknięcia	T_{PIK}	PN-EN 1427:2007
3.	Badanie lepkości	Lepkość dynamiczna	Vis	PN-EN 13702-2:2005
Badania mieszanek mineralno-asfaltowych				
4.	Badanie Marshalla	Stabilność wg Marshalla Zawartość wolnych przestrzeni	Stab V_v	PN-EN 12697-34 PN-EN 12697-8
5.	Badanie zagęszczalności	Zawartość wolnych przestrzeni	V_v	Brak normy, opis w punkcie 4.4.2.2.
6.	Odporność na działanie wody i mrozu	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie Moduł sztywności	R S	PN-EN 12697-12
7.	Starzenie	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie Moduł sztywności	R S	Brak normy, opis w punkcie 4.4.2.4.
8.	Badanie koleinowania	Procentowa głębokość koleiny Prędkość przyrostu koleiny	PRD WTS	PN-EN 12697-22 BS 598
9.	Spękania niskotemperaturowe	Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu Odształcenie graniczne Moduł sztywności	R_z ϵ_{gr} E	Brak normy, opis w punkcie 4.4.2.6.

4.2. Modyfikacja asfaltów dodatkami WMA w warunkach laboratoryjnych

Przyjęty w pracy rodzaj technologii wykorzystujący dodatki WMA do lepiszcza, wiązał się koniecznością przeprowadzenia nimi modyfikacji zgromadzonych asfaltów. Procedura mieszania czystego asfaltu z określonym dodatkiem musiała być zgodna

z zaleceniami technologicznymi producenta danego środka, min. dotyczącymi temperatury mieszania i okresu przechowywania przygotowanej mieszanki. Podczas prac laboratoryjnych przyjęto ogólną zasadę, że modyfikacji poddawano na bieżąco jedynie taką ilość asfaltu, aby została zużyta do wykonania próbek w ciągu maksymalnie dwóch dni.

4.2.1. Modyfikacja asfaltów dodatkami w postaci stałej Sasobit, Licomont BS100, Rediset WMX

Do mieszania asfaltów z dodatkami w postaci stałej (Sasobit, Licomont BS100, Rediset WMX) wykorzystywano mieszadła mechaniczne. W pierwszym okresie badań laboratoryjnych, tj. podczas prac nad określeniem właściwości samych lepiszczy stosowano laboratoryjne mieszadło elektryczne z płynną regulacją obrotów pokazane na fotografii 4.1. Umożliwiało ono wymieszanie z dodatkiem jednorazowo ok. 0,5 kg asfaltu. Była to ilość odpowiednia do przygotowania próbek przeznaczonych do badania penetracji, temperatury mięknięcia i lepkości, jednakże niewystarczająca do wytwarzania dużej ilości próbek mieszanki mineralno-asfaltowych. Z tego powodu w dalszym etapie prac laboratoryjnych do modyfikowania asfaltów dodatkami WMA wykorzystywano mieszadło łopatkowe do farb zamocowane w uchwycie wiertarki elektrycznej (fotografia 4.2), które umożliwiało jednorazowe wymieszanie ok. 7 – 8 kg asfaltu. Do przeprowadzenia procesu modyfikacji asfalty były podgrzewane do temperatury 135°C.



Fot. 4.1. Mieszadło laboratoryjne stosowane do modyfikacji dodatkami WMA niewielkich ilości asfaltu

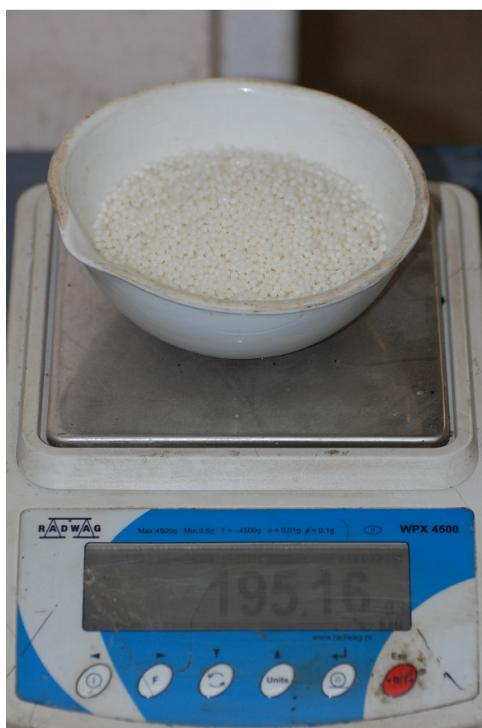


Fot. 4.2. Mieszadło łopatkowe zamocowane w uchwycie wiertarki przeznaczone do modyfikacji dużych ilości asfaltu

Procedura mieszania czystych asfaltów z dodatkami WMA Sasobit, Licomont BS100, Rediset WMX i Ceca Base RT w postaci stałej była następująca:

1. Odmierzenie z metalowego opakowania, w którym zmagazynowano asfalt w momencie odbioru z rafinerii, określonej ilości asfaltu poprzez przelanie go do mniejszego pojemnika o zmierzonej uprzednio masie.
2. Na podstawie znanej masy asfaltu obliczenie i odmierzenie ilości dodatku WMA, którą należało dodać do lepiszcza w celu osiągnięcia założonej proporcji (fot. 4.3).
3. Zadozowanie dodatku WMA do asfaltu przy wolnych obrotach mieszadła (fot. 4.4).
4. Mieszanie asfaltu z dodatkiem przy szybkich obrotach mieszadła przez okres 2 – 3 minut (fot. 4.5).
5. Zakończenie procesu mieszania poprzez zmniejszenie obrotów mieszadła i jego ostrożne wyjęcie z asfaltu (fot. 4.6).

Przy pierwszym wykonywaniu niniejszej procedury natrafiono na problem przyklejania się granulek środka do mieszadła, co w efekcie skutkowało obniżoną w stosunku do planowanej zawartością dodatku. Został on rozwiązany poprzez uprzednie podgrzewanie mieszadła do temperatury asfaltu.



Fot. 4.3. Odmierzona ilość dodatku WMA przed wprowadzeniem do asfaltu



Rys. 4.4. Dozowanie dodatku WMA do asfaltu przy jednoczesnej pracy mieszadła na wolnych obrotach



Fot. 4.5. Mieszanie asfaltu z dodatkiem WMA przy szybkich obrotach mieszadła



Fot. 4.6. Asfalt z dodatkiem WMA po zakończeniu mieszania

Szczelnie zamknięty pojemnik z tak przygotowanym asfaltem umieszczano następnie w suszarce laboratoryjnej o temperaturze 135°C, gdzie pozostawał przez okres 12-24 godziny do momentu wytworzenia mieszanki mineralno-asfaltowej. Podsumowując, przyjęty sposób modyfikacji asfaltu dodatkami WMA w laboratorium odzwierciedlał warunki przemysłowe, kiedy dodatki WMA są dozowane do zbiorników wytwórni mas bitumicznych, w których zmodyfikowany asfalt jest przez pewien czas przechowywany przed produkcją mieszanki.

4.2.2. Modyfikacja asfaltów dodatkiem w postaci płynnej Ceca Base RT

Modyfikacja asfaltów dodatkiem Ceca Base RT posiadającym postać płynną przebiegała według tej samej procedury, którą stosowano dla dodatków w postaci stałej i opisanej w punkcie 4.2.1. Jediną różnicą była znacznie mniejsza ilość dozowanego środka, wynikająca z przyjętej proporcji dodatku Ceca Base RT w stosunku do masy asfaltu (0,35%). Przy modyfikacji 8 kg asfaltu konieczne było zadozowanie do niego jedynie 28 g dodatku Ceca Base RT, w porównaniu do 160 – 240 g dodatków Sasobitu, Licomontu BS100 lub Redisetu WMX występujących w postaci stałej.

4.2.3. Modyfikacja asfaltów dodatkiem zeolitu

Z uwagi na charakter działania dodatku zeolitu, tj. wywoływaniu efektu spieniania asfaltu poprzez parę wodną powstającą w momencie zetknięcia się kryształów zeolitu zawierających wodę z gorącym kruszywem nie była możliwa modyfikacja asfaltu tym dodatkiem przed momentem produkcji mieszanki mineralno-asfaltowej. Proces produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem zeolitu opisano w punkcie 4.3.2.2.

4.3. Przygotowanie próbek do badań

4.3.1. Przygotowanie próbek do badań cech asfaltów

Do badań właściwości asfaltów czystych oraz z dodatkami WMA przygotowano próbki służące do określenia następujących cech:

- penetracji,
- temperatury mięknięcia,
- lepkości dynamicznej.

Procedury przygotowania próbek oraz samego badania penetracji, temperatury mięknięcia, lepkości dynamicznej oraz starzenia w cienkiej warstwie TFOT są określone normami i dobrze opisane w literaturze, dlatego w niniejszej pracy ograniczono się do ich wymienienia, bez dokładnego opisu.

4.3.2. Przygotowanie próbek do badań cech mieszanek mineralno-asfaltowych

Proces wytwarzania mieszanek mineralno-asfaltowych z asfaltami czystymi oraz z dodatkami Sasobit, Licomont BS100, Rediset WMX oraz Ceca Base RT przebiegał jednakowo, zaś jedyną różnicą była inna temperatura otaczania i zagęszczania. Mieszanki z czystym asfaltem drogowym 50/70 oraz asfaltem modyfikowanym 45/80-55 wytwarzano w temperaturze 160°C, natomiast mieszanki z asfaltami zawierającymi dodatki Sasobit, Licomont BS 100, Rediset WMX oraz Ceca Base RT w temperaturze 135°C. Podczas określania zagęszczalności wykonano również dodatkowe zaroby w temperaturze 135°C dla mieszanek referencyjnych z czystymi asfaltami oraz 110°C w przypadku mieszanek z dodatkami WMA.

Proces wytwarzania mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem zeolitu również odbywał się w temperaturze 135°C (oraz dodatkowo 110°C w przypadku określania

zagęszczalności), jednakże różnił się procedurą dozowania składników, wynikającą z jego odmiennego mechanizmu działania w stosunku do pozostałych dodatków WMA. Sposoby formowania i zagęszczania próbek były jednakowe dla wszystkich rodzajów mieszanek, inna była natomiast temperatura zagęszczania.

4.3.2.1. Wytwarzanie mieszanek mineralno-asfaltowych z asfaltami czystymi oraz z dodatkami Sasobit, Licomont BS100, Rediset WMX, Ceca Base RT

Podczas etapu badań laboratoryjnych mieszanki mineralno-asfaltowe w większości wytwarzano mechanicznie, w mieszarce bębnowej. Sposób ręczny wykorzystano jedynie w momencie przygotowywania recepty betonu asfaltowego. Zastosowana mieszarka bębnowa pozwalała na jednorazowe przygotowanie ok. 40 kg jednorodnej i dokładnie otoczonej mieszanki o zadanej przez operatora i automatycznie regulowanej temperaturze. Otaczanie ziaren kruszywa asfaltem odbywa się w obracającym się bębnie za pomocą mieszadła z łopatkami. W trakcie mieszania oś mieszadła pozostaje w stałym położeniu względem osi bębna. Mieszadło i bęben obracają się w kierunkach przeciwnych. Widok całego urządzenia mieszającego przedstawiono na fotografii 4.7.



Fot. 4.7. Widok wnętrza mieszarki wykorzystywanej do produkcji mieszanek w warunkach laboratoryjnych. U góry zdjęcia widoczny jest czujnik temperatury oraz wał mieszadła z łopatkami

Przed rozpoczęciem mieszania urządzenie uruchamiano wcześniej, aby możliwe było osiągnięcie przez bęben odpowiedniej temperatury. Sama procedura wytwarzania mieszanki obejmowała następujące czynności:

- napełnienie rozgrzanego bębna mieszarki kruszywem,
- wstępne mieszanie „na sucho” trwające 30 sekund,

- zadozowanie do mieszalnika asfaltu (czystego lub z uprzednio dodanym środkiem Sasobit, Licomont BS100, Rediset WMX lub Ceca Base RT),
- mieszanie właściwe trwające 180 sekund,
- rozładunek przygotowanego zarobu.

4.3.2.2. Wytwarzanie mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkiem zeolitu

Procedura wytwarzania mieszanki mineralno-asfaltowej z dodatkiem zeolitu została zmodyfikowana w stosunku do opisanej w punkcie 4.3.2.1. w celu osiągnięcia efektu spienienia asfaltu przez wodę zawartą w kryształach zeolitu i obejmowała następujące czynności:

- napełnienie rozgrzanego bębna mieszarki kruszywem,
- wstępne mieszanie „na sucho” trwające 30 sekund,
- zadozowanie do mieszalnika czystego asfaltu,
- bezpośrednio po dodaniu asfaltu zadozowanie do mieszalnika zeolitu,
- mieszanie właściwe trwające 180 sekund,
- pozostawienie mieszanki na czas 30 minut w celu ujednorodnienia efektu spienienia w całej objętości,
- rozładunek przygotowanego zarobu.

4.3.2.3. Formowanie i zagęszczanie próbek mieszanek mineralno-asfaltowych

W badaniach laboratoryjnych wykorzystano następujące sposoby formowania i zagęszczania próbek :

- Próbki walcowe o średnicy 100 mm i wysokości około 63,5 mm zagęszczane w ubijaku Marshalla (fotografia 4.8).
- Próbki prostopadłościennie o kształcie prostokątnym 300 x 300 mm i grubości 40 lub 60 mm oraz 400 x 400 mm i grubości 50 mm zagęszczane w zautomatyzowanej zagęszczarce walcowej (fotografia 4.9 i 4.10).

Próbki walcowe były wykorzystywane w badaniach stabilności, odporności na działanie wody i mrozu oraz wpływu starzenia, przy czym próbki służące do określenia stabilności oraz badaniu wpływu starzenia zagęszczano aplikując 75 uderzeń ubijaka na każdą stronę próbki, zaś do określenia odporności na działanie wody i mrozu stosowano po 35 uderzeń na każdą stronę próbki. Próbki przeznaczone do badania odporności na działanie wody i mrozu oraz wpływu starzenia poddawano różnym schematom kondycjonowania, które opisano w punktach 4.4.2.3. i 4.4.2.4.

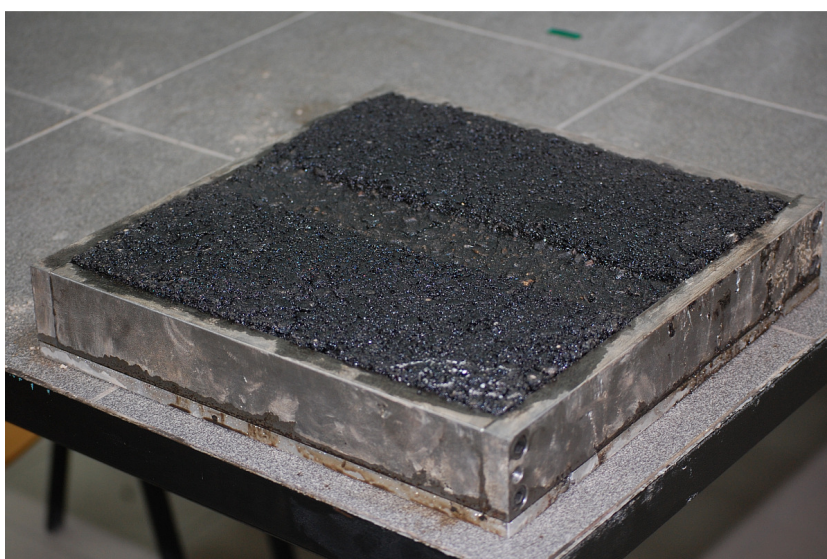
Próbki prostopadłościennie o wymiarach 300 x 300 mm i grubości 40 mm były wykorzystywane w badaniach koleinowania. Z próbek prostopadłościennych o wymiarach 400 x 400 mm i grubości 50 mm wycinano belki o przekroju prostokątnym 50 x 50 mm i długości 400 mm służące do określania odporności na spękania niskotemperaturowe. W tym przypadku ilość mieszanki mineralno-asfaltowej w formie była tak dostosowywana, aby po osiągnięciu przez próbkę podczas zagęszczania

zadanej grubości wskaźnik zagęszczenia zawierał się w przedziale od 98 do 100%. Próbki o wymiarach 300 x 300 x 60 mm służyły do określenia zagęszczalności mieszanek mineralno-asfaltowych, przy czym poddawane były one dalszej obróbce polegającej na przecięciu ich na cztery równe części. W tym przypadku wskaźnik zagęszczenia był różny i zależał od energii zagęszczania (dokładny opis w punkcie 4.4.2.2.).

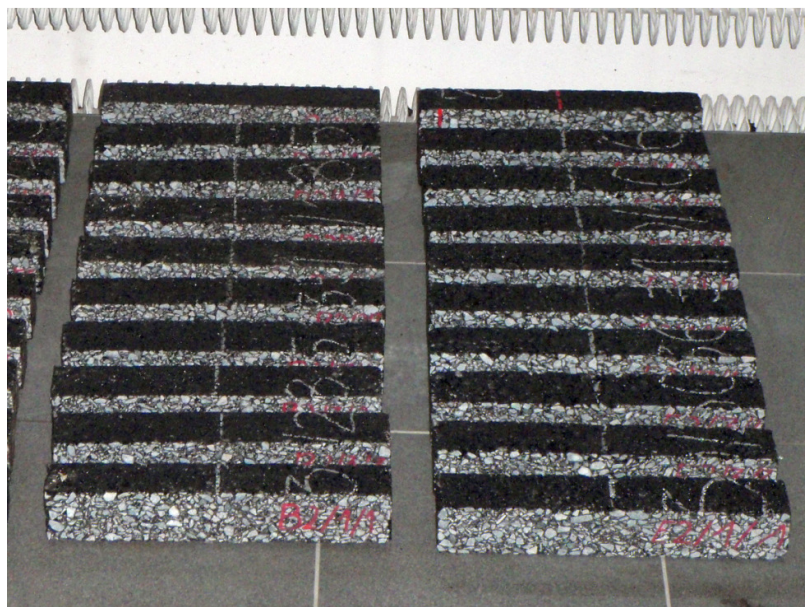
Temperatura zagęszczania wszystkich rodzajów próbek wytworzonych z czystymi asfaltami 50/70 oraz 45/80-55 zawierała się w przedziale 140 – 150°C. Temperatura zagęszczania próbek mieszanek mineralno asfaltowych wytworzonych z dodatkami WMA wynosiła 125°C.



Fot. 4.8. Próbki walcowe wykorzystywane w badaniach stabilności, odporności na działanie wody i mrozu oraz starzenia



Fot. 4.9. Umieszczona w formie próbka prostokątna o wymiarach 300 x 300 mm i grubości 40 mm po wykonaniu badania koleinowania



Fot. 4.10. Próbkę prostopadłościenną o wymiarach 50 x 50 x 400 mm wykorzystywaną w badaniach odporności na spękania niskotemperaturowe

4.4. Wykorzystane metody badawcze

4.4.1. Wykorzystane metody badawcze cech asfaltów

Dla asfaltów przeprowadzono badania następujących właściwości:

- penetracji według normy PN-EN 1426:2001,
- temperatury mięknięcia według normy PN-EN 1427:2007,
- lepkości dynamicznej w temperaturach 160, 135, 90 i 60°C według normy PN-EN 13702-2:2005.

Badania te przeprowadzono dla czystych asfaltów 50/70 oraz 45/80-55 oraz z dodatkami WMA Sasobit, Licomont BS100, Rediset WMX oraz Ceca Base RT. Wymienione właściwości określono zarówno przed, jak i po symulowanym starzeniu poprzez wygrzewanie w cienkiej warstwie TFOT. Lepkość dynamiczną badano w lepkościomierzu firmy „Brookfield Engineering Labs, współpracującym z programem komputerowym Rheocalc. Badanie lepkości polegało na pomiarze oporu badanej cieczy podczas obracania w niej wrzeciona umieszczonego w cylindrycznym pojemniku. Zastosowano wrzeciona o następujących parametrach:

- wrzeciono SC4-28 przy badaniu asfaltów w temperaturze 60°C,
- wrzeciono SC4-27 przy badaniu asfaltów w temperaturze 90°C,
- wrzeciono SC4-21 przy badaniu asfaltów w temperaturze 135 i 160°C.

Nie przeprowadzano badań właściwości samych asfaltów z dodatkiem zeolitu z uwagi na jego odmienny charakter działania, którego efekty są możliwe do uzyskania jedynie w mieszance mineralno-asfaltowej.

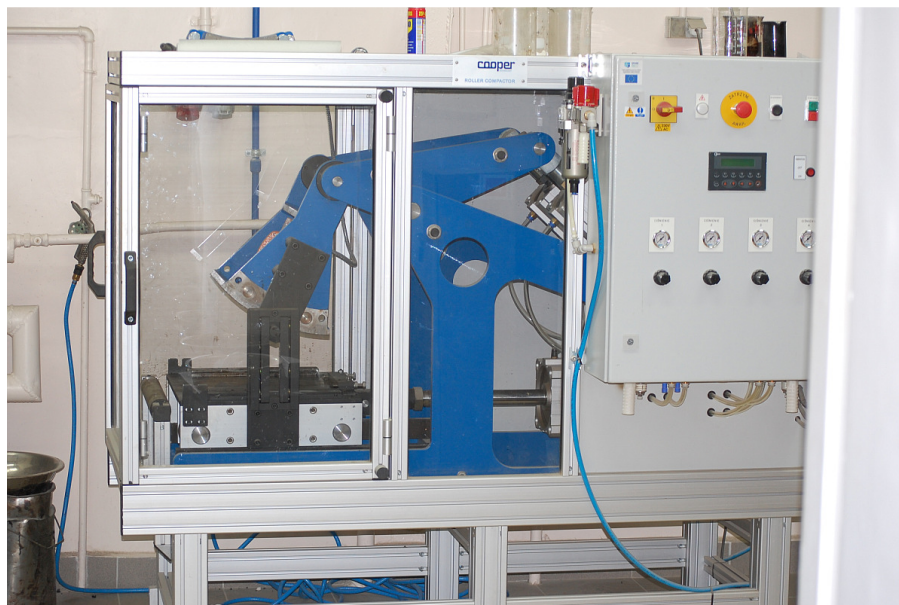
4.4.2. Wykorzystane metody badawcze mieszanek mineralno-asfaltowych

4.4.2.1. Stabilność

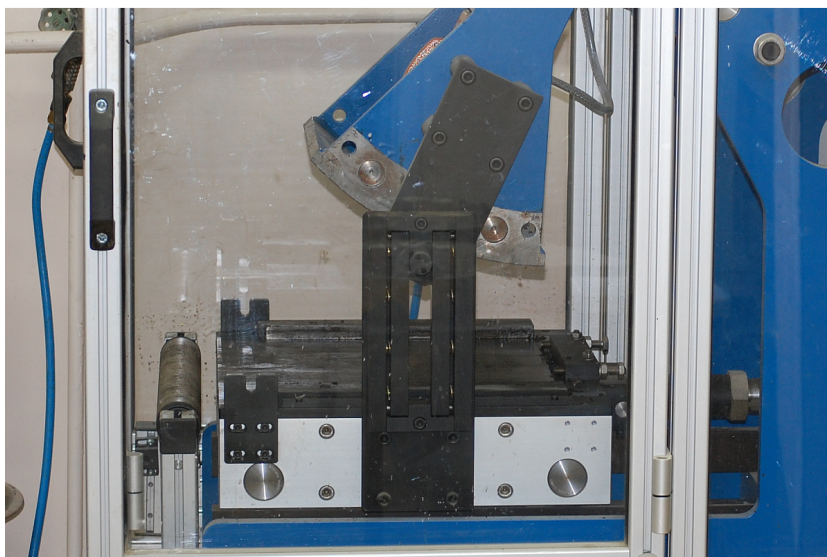
Oznaczenie stabilności oraz odkształcenia podczas badania Marshalla przeprowadzono według procedury zgodnej z normą PN-EN 12697-34. Badanie to jest powszechnie znane i dobrze opisane w literaturze, dlatego w niniejszej pracy nie będzie szczegółowo opisywane.

4.4.2.2. Zagęszczalność

Zagęszczalność jest miarą, która charakteryzuje zdolność mieszanek mineralno-asfaltowych do osiągania w trakcie procesu wbudowywania pożądanej gęstości pozornej. Zagęszczalność mierzona jest przez określenie zawartości wolnych przestrzeni oraz wskaźnika zagęszczenia. Na etapie badań laboratoryjnych do określenia i porównania tej właściwości różnych badanych mieszanek mineralno-asfaltowych wykorzystano zagęszczarkę walcową służącą do formowania i zagęszczania próbek prostokątnych wykorzystywanych później w badaniach koleinowania oraz odporności na spękania niskotemperaturowe (fotografia 4.11 i 4.12).



Fot. 4.10. Widok ogólny zagęszczarki walcowej



Fot. 4.12. Szczegół elementu zagęszczającego stanowiącego wycinek walca. Na zdjęciu brak formy zawierającej mieszankę

Urządzenie to umożliwia otrzymywanie próbek prostopadłościennych o kształcie prostokątnym i wymiarach 300 x 300 mm lub 400 x 400 mm i grubości od 40 do 100 mm. Proces zagęszczania odbywa się poprzez przesuw stolika na którym umieszczona jest forma z próbką wraz jednoczesnym ugniatającym oddziaływaniem wycinka walca stalowego, wywierającego nacisk na luźną mieszankę za pośrednictwem kinematycznego układu dźwigni i siłowników pneumatycznych. Występujący w urządzeniu mechanizm zagęszczania jest zbliżony do warunków rzeczywistych. Maksymalny wywierany na próbkę o szerokości 300 mm nacisk liniowy wynosi 30 kN, co odpowiada naciskowi ciężkich walców drogowych. Automatyka urządzenia steruje ilością przejść w taki sposób, aby zagęszczanie zakończyło się w momencie osiągnięcia zadanej grubości próbki. Zagęszczanie może być również zatrzymane przez operatora.

W pracy przyjęto, że do określenia różnic w zagęszczalności różnych rodzajów mieszanek mineralno-asfaltowych zostanie wykorzystana zależność ilości wolnych przestrzeni w stosunku do pracy zagęszczania, tj. ilości przejść elementu zagęszczającego. Zawartość wolnych przestrzeni określano na próbkach prostopadłościennych o wymiarach 300 x 300 mm i grubości 60 mm, które poddawano różnej ilości przejść elementu zagęszczającego, tj:

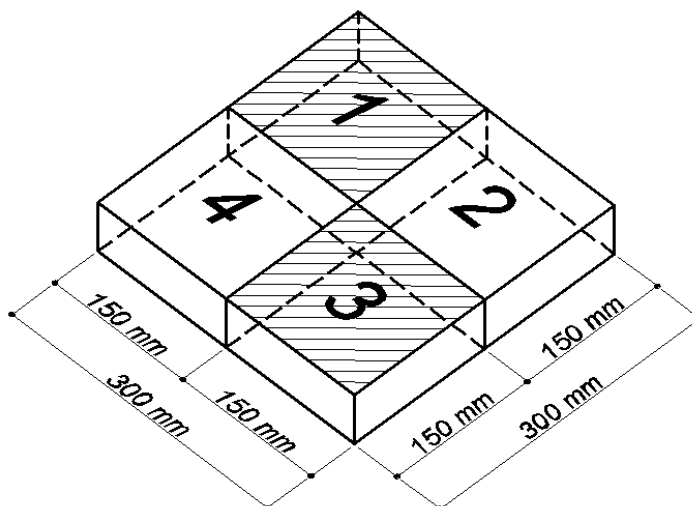
- 6,
- 8,
- 12,
- 16 przejść.

Mieszankę mineralno-asfaltową przeznaczoną dla próbek opisywanego etapu badań wytwarzano w dwóch temperaturach:

- 160 i 135°C w przypadku mieszanek zawierających czyste asfalty 50/70 oraz 45/80-55,

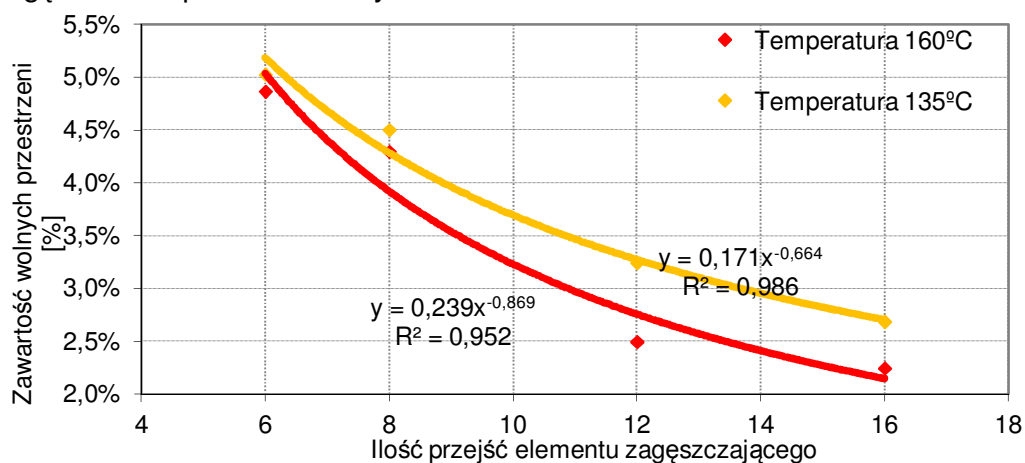
- 135 i 110°C w przypadku mieszanek zawierających dodatki WMA Sasobit, Licomont BS100, Rediset WMX, Ceca Base RT oraz zeolit.

Dla każdej kombinacji temperatury i asfaltu wytwarzano po dwie próbki w celu uśrednienia wyników. Następnie każdą próbkę przecinano na cztery równe części, z których dwie wykorzystywano do oznaczenia zawartości wolnych przestrzeni, a pozostałe dwie zachowywano jako świadki (rys 4.1).



Rys. 4.1. Schemat podziału próbki prostokątnej 300 x 300 x 60 mm na części przeznaczone do wyznaczenia wolnej przestrzeni (nr 1 i 3) oraz świadki (nr 2 i 4)

Zawartość wolnych przestrzeni obliczano na podstawie wagań fragmentów próbek w powietrzu i w wodzie. Jako wartość końcową przyjmowano średnią z czterech oznaczeń, tj. z dwóch części sygnowanych numerem 1 i 3 dla każdej z dwóch próbek 300 x 300 x 60 mm oraz dla każdej kombinacji temperatury i asfaltu. Przykładowy wykres zależności zawartości wolnych przestrzeni w zależności od ilości pracy zagęszczania pokazano na rysunku 4.2.



Rys. 4.2. Zawartość wolnych przestrzeni w zależności od pracy zagęszczania dla mieszanki mineralno-asfaltowej z asfaltem zwykłym 50/70 wytworzonej w temperaturze 160 oraz 135°C

4.4.2.3. Odporność na działanie wody i mrozu

Niszczące oddziaływanie wody i mrozu powoduje przedwczesne zniszczenia nawierzchni asfaltowych. Konsekwencją tych zniszczeń jest odmywanie asfaltu z powierzchni kruszywa, które powoduje odrywanie się ziaren kruszywa, łuszczenie i rozluźnienie się mieszanki mineralno-asfaltowej. Niekiedy zniszczenia te przyjmują postać nieregularnych spękań lub wykruszeń i wybojów, prowadząc do całkowitej degradacji nawierzchni.

Badanie odporności betonów asfaltowych na działanie wody oraz łącznie wody i mrozu polegało na określeniu wytrzymałości na pośrednie rozciąganie oraz dodatkowo modułów sztywności sprężystej próbek mieszanek mineralno-asfaltowych przed i po poddaniu ich niszczącemu oddziaływaniu wody i mrozu. Kondycjonowanie, symulujące warunki atmosferyczne panujące na drodze w laboratorium, polegało na nasycaniu próbek betonu asfaltowego wodą, poddawaniu ich cyklowi zamrażania i odmrażania oraz poddaniu przedłużonemu oddziaływaniu wody w podwyższonej temperaturze. Miarą odporności betonu asfaltowego na działanie wody i mrozu są zmiany wytrzymałości na pośrednie rozciąganie oraz modułu sztywności sprężystej po przejściu cykli kondycjonowania w laboratorium w stosunku do wytrzymałości na pośrednie rozciąganie i modułu sztywności bez kondycjonowania.

Przeprowadzone badania odporności betonów asfaltowych na działanie wody i mrozu opierały się na procedurach opisanych w normie europejskiej PN-EN 12697-12 oraz wskazań zawartych w Wymaganiach Technicznych „Nawierzchnie asfaltowe na drogach publicznych” WT-2 2008¹

Mieszanek mineralno-asfaltową przeznaczoną do badań wytwarzano i zagęszczano zgodnie z opisem zamieszczonym w punkcie 4.3.2. W trakcie zagęszczania próbek w ubijaku Marshalla stosowano 35 uderzeń na jedną stronę próbki, aby wytworzyć większe niż normalnie zawartości wolnych przestrzeni. Dla jednego rodzaju mieszanki mineralno-asfaltowej (tj. zawierającej jedną kombinację asfaltu z dodatkiem WMA lub asfalt czysty, bez dodatku) wytwarzano 10 próbek. Z liczby tej wydzielano trzy grupy po trzy próbki każda w taki sposób, aby próbki w danej grupie charakteryzowały się zbliżoną gęstością pozorną oraz zawartością wolnych przestrzeni. Pozostałą po podziale próbkę z najbardziej odchylną wartością gęstości pozornej odrzucano i nie wykorzystywano do dalszych badań. Jedna grupa próbek stanowiła serię kontrolną, która nie była poddawana kondycjonowaniu. Próbki należące do tej grupy były przechowywane w laboratorium w warunkach pokojowych, do czasu pierwszego badania modułu sztywności sprężystej i wytrzymałości na pośrednie rozciąganie, które odbywało się po zakończeniu kondycjonowania

¹ Badania prowadzono przed wprowadzeniem w Polsce Wymagań Technicznych WT-2 2010 „Nawierzchnie asfaltowe na drogach krajowych”.

pozostałych grup próbek, tj. po około 180 godzinach. Próbki z pozostałych dwóch grup poddawano kondycjonowaniu według następujących schematów:

- seria próbek bez cyklu zamrażania – procedura składała się z dwóch etapów:
 - próżniowego nasycania próbek wodą,
 - poddania próbek przedłużonemu oddziaływaniu wody w podwyższonej temperaturze.
- seria próbek z cyklem zamrażania – procedura składała się z trzech etapów:
 - próżniowego nasycania próbek wodą,
 - poddania próbek przedłużonemu oddziaływaniu wody w podwyższonej temperaturze.
 - poddania próbek 1 cyklowi zamrożenia-odmrożenia

Próżniowe nasycanie próbek wodą odbywało się poprzez zalanie ich wodą o temperaturze 20°C i przechowywaniu przez 30 minut w komorze próżniowej o ciśnieniu bezwzględny 67 hPa. Następnie mierzono wysokość i średnicę próbek i sprawdzano, czy nie doszło do zmiany objętości. Próbki, które zwiększyły swoją objętość o więcej niż 2% odrzucano z dalszego toku badań. Poddanie próbek przedłużonemu oddziaływaniu wody w podwyższonej temperaturze polegało na umieszczeniu ich w łaźni wodnej o temperaturze 40°C i przechowywanie w tych warunkach przez 68 godz. Następnie wybrane próbki jednej serii poddano 1-krotnemu zamrożeniu (-18°C przez 16 godz.) i odmrożeniu w łaźni wodnej (40°C w ciągu 68 godzin).

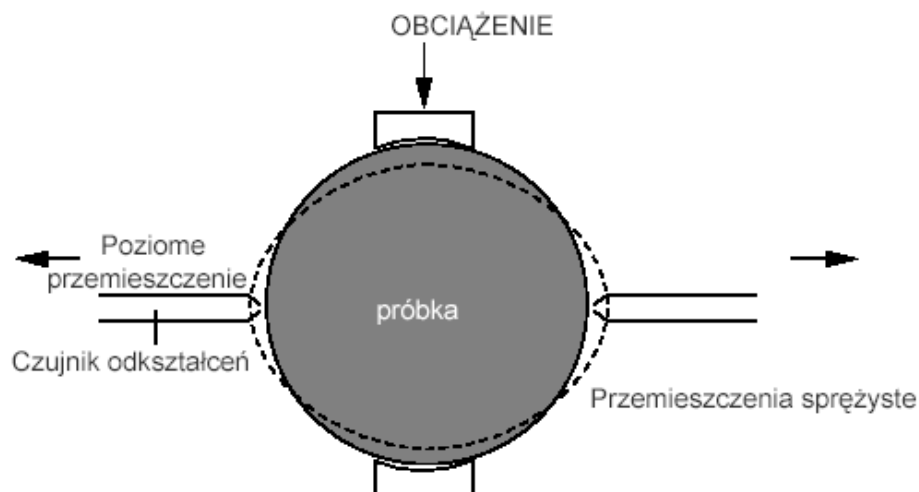
Łącznie do badań modułów sztywności i wytrzymałości na pośrednie rozciąganie przygotowano dla każdego z 12 rodzajów mieszanek 9 próbek jednorodnych:

- 3 próbki referencyjne, bez kondycjonowania,
- 3 próbki poddane cyklowi nasycania i działaniu wody, ale bez zamrażania,
- 3 próbki poddane cyklowi nasycania, działaniu wody oraz zamrażania.

Bezpośrednio przed każdym badaniem wszystkie próbki przechowywano w kąpielii wodnej przez 2 godziny w temperaturze 15°C. Każdą próbkę badano dwukrotnie:

- wykonując nieniszczące badanie modułu sztywności sprężystej przy pośrednim rozciąganiu,
- wykonując niszczące badanie wytrzymałości na pośrednie rozciąganie.

Badanie modułu sztywności sprężystej przy pośrednim rozciąganiu przeprowadzano w trybie kontrolowanego naprężenia. Podczas dynamicznego obciążenia pomiarowi poddawano przemieszczenia wzdłuż osi poziomej próbki, na poziomie płaszczyzny poziomej przechodzącej przez oś próbki prostopadłą do kierunku obciążenia. Obciążenie polegało na wywarceniu stałego naprężenia poziomego 250 kPa w czasie 0,124 s i przy długości cyklu 3 s. Temperatura badania wynosiła 15°C. Schemat badanej próbki przedstawiono na rysunku 4.4.



Rys. 4.4. Schemat badania modułu sztywności sprężystej przy pośrednim rozciąganiu

Moduł sztywności sprężystej S wyznaczano z następującej zależności:

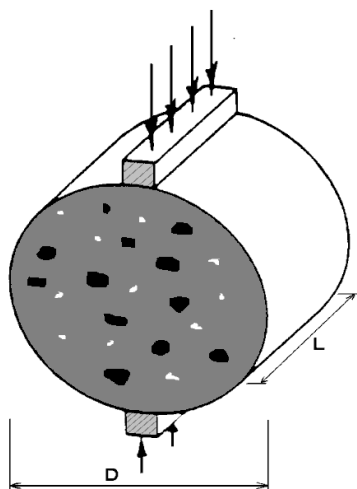
$$S = \frac{P \times (v + 0,2732)}{\delta \times h} \quad (4.1)$$

gdzie:

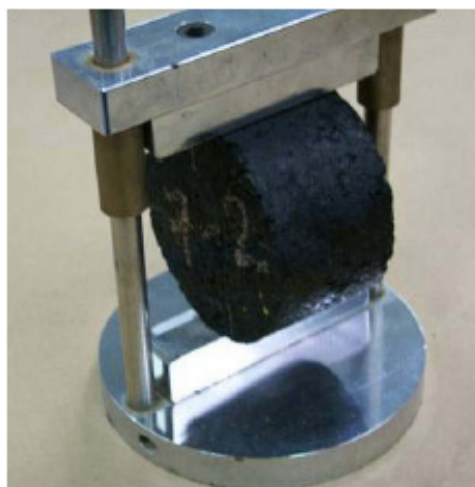
- S – moduł sztywności sprężystej [MPa],
- P – siła pionowa [MN],
- v – współczynnik Poissona,
- δ – przemieszczenie poziome [m],
- h – wysokość próbki [m].

Moduł sztywności sprężystej jest wyliczany automatycznie przez urządzenie badawcze. Dla każdej próbki badanie wykonywano dwukrotnie, drugie badanie wykonano po obrocie próbki o 90° . Miarodajny modułu dla każdej próbki był średnią z dwóch pomiarów.

Badanie wytrzymałości na pośrednie rozciąganie przeprowadzono w prasie do badania Marshalla, o przesuwie tłoka 50 mm/min. Obciążenie było przekazywane przez przekładki o szerokości 12 mm i krzywiznie o promieniu 50,5 mm. Próbkę obciążano aż do zniszczenia. Temperatura badania wynosiła $+15^\circ\text{C}$. Podczas badania monitorowano siłę obciążającą. Schemat badania przedstawiono na rysunku 4.3 i fotografii 4.13.



Rys. 4.3. Schemat obciążania próbki przy badaniu wytrzymałości na pośrednie rozciąganie



Fot. 4.13. Próbkę mieszanki mineralno-asfaltowej w uchwycie prasy służącym do badania wytrzymałości na pośrednie rozciąganie

Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie wyznaczano na podstawie zależności 4.2:

$$R = \frac{2 \times P}{\pi \times D \times h} \quad (4.2)$$

gdzie:

- R – wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa],
- P – siła niszcząca [MN],
- D – średnica próbki [m],
- H – wysokość próbki [m].

Na podstawie uzyskanych dla wszystkich próbek wartości modułów sztywności sprężystej oraz wytrzymałości na pośrednie rozciąganie obliczono następujące dwa wskaźniki charakteryzujące odporność danej mieszanki na działanie wody i mrozu:

- wskaźnik modułu sztywności sprężystej (ang. *Resilient Modulus Ratio* - RMR),
- wskaźnik wytrzymałości na pośrednie rozciąganie (ang. *Indirect Tensile Strength Ratio* - ITS).

Wskaźnik modułu sztywności sprężystej (RMR) jest zdefiniowany jako:

$$RMR = \frac{S_2}{S_1} \times 100\% \quad (4.3)$$

gdzie:

- S_2 – średni moduł sztywności sprężystej próbek kondycjonowanych,
- S_1 – średni moduł sztywności sprężystej próbek bez kondycjonowania.

Wskaźnik wytrzymałości na pośrednie rozciąganie (ITSR) jest zdefiniowany jako:

$$ITSR = \frac{R_2}{R_1} \times 100\% \quad (4.4)$$

gdzie:

- R_2 – średnia wytrzymałość próbek kondycjonowanych,
 R_1 – średnia wytrzymałość próbek bez kondycjonowania.

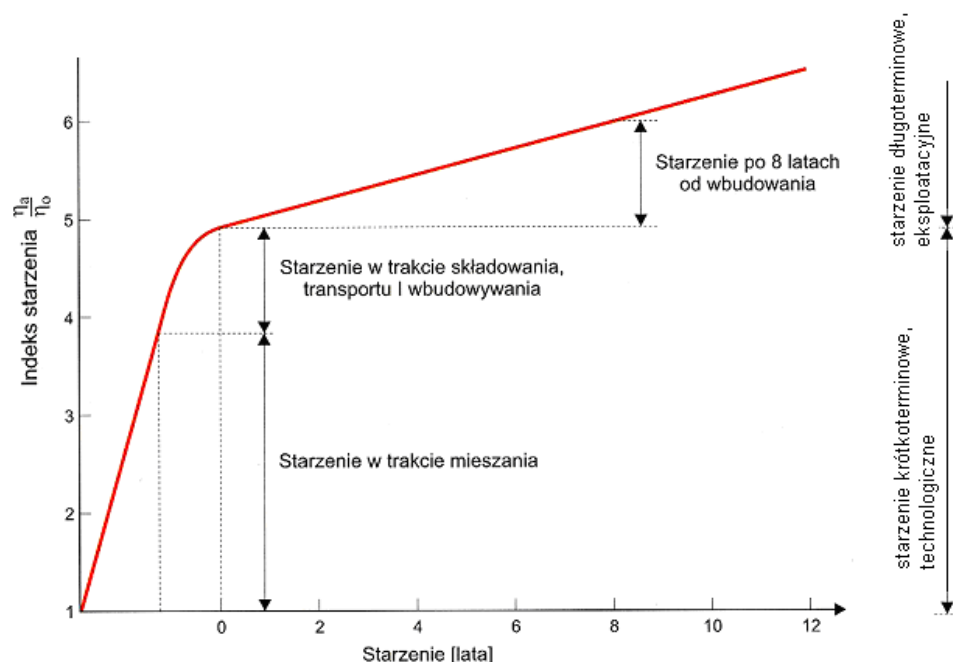
Mniejsze wartości wskaźników ITSR i RMR wskazują, że mieszanka mineralno-asfaltowa jest bardziej wrażliwa na działanie wody i mrozu. Wartości wskaźników zbliżone do 1,0 oznaczają brak wrażliwości mieszanki na działanie wody i mrozu.

4.4.2.4. Starzenie

Starzenie mieszanek mineralno-asfaltowych wynika ze zmian właściwości asfaltu wraz z upływem czasu, które spowodowane są oddziaływaniem podwyższonej temperatury oraz promieni ultrafioletowych. W efekcie zmianom podlegają również cechy mieszanki mineralno-asfaltowej. Mieszanka staje się bardziej sztywna i krucha przez co zmniejsza się jej odporność na spękania. Proces starzenia przebiega dwuetapowo:

- Etap I nazywany jest starzeniem krótkoterminowym. Przebiega on w trakcie wytwarzania, transportu i wbudowywania mieszanki mineralno-asfaltowej. Starzeniu w I etapie sprzyja wysoka temperatura mieszanki, która konieczna jest ze względów technologicznych. Podczas etapu I starzenie przebiega najintensywniej w trakcie mieszania składników ponieważ w tym momencie występuje najwyższa temperatura w trakcie całego procesu produkcyjnego, zaś powierzchnia kontaktu z powietrzem asfaltu rozproszanego w cienkiej warstwie na ziarnach kruszywa jest największa.
- Etap II przebiega w trakcie eksploatacji nawierzchni i nazywany jest starzeniem długoterminowym. Na jego wpływ ma intensywność oddziaływania promieni słonecznych, temperatury otoczenia, a także ilość wolnych przestrzeni w mieszance warunkująca dostęp powietrza do błonki asfaltu na ziarnach agregatu mineralnego.

Proces starzenia asfaltu w mieszankach mineralno-asfaltowych ilustruje rysunek 4.4.



Rys. 4.4. Proces starzenie asfaltu w mieszance mineralno-asfaltowej w czasie wytwarzania, wbudowywania i eksploatacji wyrażony za pomocą zmiany lepkości asfaltu, [7] za [110]

Badanie odporności betonów asfaltowych na proces starzenia polegało na określeniu zmian wybranych parametrów fizyko mechanicznych – modułów sztywności sprężystej oraz wytrzymałości na pośrednie rozciąganie – próbek mieszanek mineralno-asfaltowych przed i po poddaniu ich symulowanemu procesowi starzenia. Symulacja ta polegała na przetrzymywaniu w wysokiej temperaturze luźnej mieszanki mineralno-asfaltowej przed jej uformowaniem i zagęszczeniem (symulacja starzenia krótkoterminowego, technologicznego) oraz następnie poddawaniu gotowych próbek oddziaływaniu podwyższonej temperatury i powietrza (symulacja starzenia długoterminowego, eksploatacyjnego). Miarą odporności betonu asfaltowego na proces starzenia są zmiany wytrzymałości na pośrednie rozciąganie oraz modułu sztywności sprężystej po przejściu symulowanych procesów starzenia w stosunku do wytrzymałości na pośrednie rozciąganie i modułu sztywności uzyskanych dla próbek bez kondycjonowania. Wymagało to przygotowania następujących serii próbek według trzech schematów:

- Próbki niestarzone (NS) – próbki niepoddane procesowi starzenia. Wyniki uzyskane dla tych próbek były poziomem odniesienia w stosunku do jakiego porównywano wyniki uzyskane dla próbek poddanych procesowi starzenia. W dalszej części pracy próbki takie oznaczono jako próbki bez starzenia (NS).
- Próbki po starzeniu krótkoterminowym w suszarce (SKS) – próbki z betonu asfaltowego poddane procesowi starzenia krótkoterminowego według procedury podanej w dalszej części tego punktu. Próbki te w pracy oznaczono jako próbki po starzeniu krótkoterminowym (SKS). Starzenie krótkoterminowe mieszanki mineralno-asfaltowej symuluje zmiany, jakie zachodzą podczas

produkcji, transportu, wbudowania i zagęszczania mieszanki mineralno-asfaltowej

- Próbkę po starzeniu długoterminowym w suszarce (SDS) – próbki wykonane z betonu asfaltowego poddanego procesowi starzenia krótkoterminowego a po nim dodatkowo procesowi starzenia długoterminowego. Przebieg tych procesów opisano w dalszej części tego punktu. W pracy próbki te oznaczono jako po starzeniu długoterminowym (SDS). Starzenie długoterminowe mieszanki mineralno-asfaltowej symuluje zmiany, jakie zachodzą podczas eksploatacji nawierzchni.

Procesy starzenia krótkoterminowego i długoterminowego przeprowadzono według procedury, opracowanej w Katedrze Inżynierii Drogowej Politechniki Gdańskiej przez Ar-Rabtiego i Judyckiego [5], na podstawie badań prowadzonych w ramach amerykańskiego programu badawczego SHRP (Strategic Highway Research Program).

Starzenie krótkoterminowe (SKS) przeprowadzono wg następującej procedury:

- Mieszankę wytwarzano w mechanicznej miazarce zgodnie z opisem przedstawionym w punkcie 4.3.2. Temperatura wytwarzania mieszanki w przypadku czystych asfaltów 50/70 oraz 45/80-55 wynosiła 160°C, natomiast dla asfaltów z dodatkami WMA 135°C.
- Luźną (niezagęszczoną) mieszankę mineralno-asfaltową rozkładano w formach tak, aby grubość warstwy wynosiła około 1,5 cm.
- Formy z mieszanką przetrzymywano w suszarce z wymuszonym nawiewem przez okres 4 godzin. Dla mieszanek z asfaltami czystymi 50/70 oraz 45/80-55 temperatura przetrzymywania wynosiła 135°C, zaś dla mieszanek z dodatkami WMA 110°C. Niższą temperaturę przetrzymywania dla mieszanek z WMA przyjęto, ponieważ założono że w docelowym trybie zastosowania ich produkcja i transport będzie odbywała się w temperaturze niższej, niż mieszanek tradycyjnych, a zatem symulacja procesu starzenia krótkoterminowego również musi odbywać się w niższej niż 135°C temperaturze.
- Po zakończeniu tego okresu partie mieszanek podgrzewano do odpowiadających im temperaturom zagęszczenia i formowano próbki do dalszych badań (próbki walcowe w ubijaku Marshalla).

Z uwagi na charakter działania zeolitu – spieniania asfaltu poprzez wodę zawartą w porach minerału jakim jest zeolit – i ryzyko utraty stanu spienienia w trakcie 4 godzinowego starzenia krótkoterminowego, nie wykonywano dla tego rodzaju mieszanki starzenia krótkoterminowego. Próbki mieszanek wykonanych z użyciem zeolitu poddawano tylko starzeniu długoterminowemu.

Starzenie długoterminowe (SDS) przeprowadzono wg następującej procedury:

- Próbkę przygotowano z betonu asfaltowego poddanego procesowi starzenia krótkoterminowego.

- Po uformowaniu i zagęszczeniu próbki zabezpieczono przed rozpadnięciem się lub deformacjami pod własnym ciężarem drobnoziarnistą siatką miedzianą poprzez owinięcie próbek pobocznicą.
- Umieszczono próbki w suszarce z wymuszonym nawiewem.
- Próbki przetrzymywano przez 5 dni w temperaturze 85°C.
- Po tym czasie próbki poddano badaniom laboratoryjnym.

Widok próbek przygotowanych do starzenia długoterminowego przedstawiono na fotografii 4.14.



Fot. 4.14. Widok próbek walcowych w osłonkach z siatki miedzianej przygotowanych do starzenia długoterminowego

Wpływ starzenia w pośrednim rozciąganiu określono poprzez wyznaczenie wskaźników modułu sztywności sprężystej oraz wytrzymałości na pośrednie rozciąganie. Badania te wykonywano dla 4 temperatur: -10, 0, 10 oraz 20°C. Dla każdej kombinacji 3 zmiennych – temperatury, rodzaju starzenia oraz danego składu – badano 3 próbki. Wskaźniki zostały one zdefiniowane następująco:

Wskaźnik modułu sztywności po starzeniu krótkoterminowym:

$$WS_{SKS} = \frac{S_{SKS}}{S_{NS}} \times 100\% \quad (4.5a)$$

Wskaźnik modułu sztywności po starzeniu długoterminowym:

$$WS_{SDS} = \frac{S_{SDS}}{S_{SKS}} \times 100\% \quad (4.5b)$$

Wskaźnik modułu sztywności po starzeniu całkowitym:

$$WS_{SCS} = \frac{S_{SDS}}{S_{NS}} \times 100\% \quad (4.5c)$$

gdzie:

- WS_{SKS} , WS_{SDS} , WS_{SCS} – wskaźniki modułu sztywności po starzeniu krótkoterminowym, długoterminowym i całkowitym,
 S_{SKS} – moduł sztywności sprężystej po starzeniu krótkoterminowym,
 S_{SDS} – moduł sztywności sprężystej po starzeniu długoterminowym,
 S_{NS} – moduł sztywności sprężystej próbek niestarzonych.

Wskaźnik wytrzymałości na pośrednie rozciąganie po starzeniu krótkoterminowym:

$$WR_{SKS} = \frac{R_{SKS}}{R_{NS}} \times 100\% \quad (4.6a)$$

Wskaźnik wytrzymałości na pośrednie rozciąganie po starzeniu długoterminowym:

$$WR_{SDS} = \frac{R_{SDS}}{R_{SKS}} \times 100\% \quad (4.6b)$$

Wskaźnik wytrzymałości na pośrednie rozciąganie po starzeniu całkowitym:

$$WR_{SCS} = \frac{R_{SDS}}{R_{NS}} \times 100\% \quad (4.6c)$$

gdzie:

- WR_{SKS} , WR_{SDS} , WR_{SCS} – wskaźnik wytrzymałości na pośrednie rozciąganie po starzeniu krótkoterminowym, długoterminowym i całkowitym
 R_{SKS} – wytrzymałość próbek po starzeniu krótkoterminowym,
 R_{SDS} – wytrzymałość próbek po starzeniu długoterminowym,
 R_{NS} – wytrzymałość próbek niestarzonych.

4.4.2.5. Koleinowanie

Podczas badania koleinowania sprawdzeniu podlega odporność mieszanki mineralno-asfaltowej na deformacje trwale powstające w okresie wysokich temperatur. W warunkach laboratoryjnych do tego celu wykorzystywane są urządzenia symulujące ruch koła po nawierzchni drogowej, przy czym z uwagi na konieczność zmniejszenia próbek i samych urządzeń do rozmiarów zapewniających możliwość łatwego oraz codziennego użytkowania, koła aparatów badawczych –

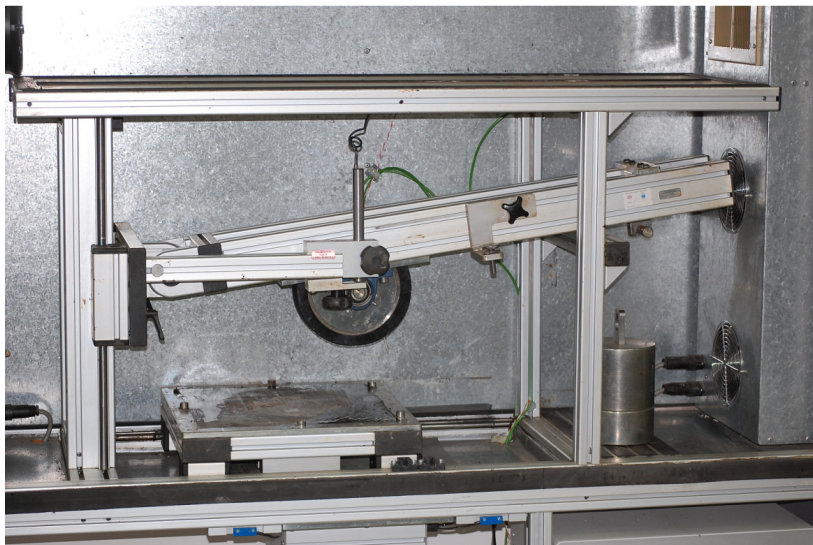
koleinometry – są znacznie mniejsze niż występujące w rzeczywistości na drodze. Istnieją różne typy koleinometry, zaś najczęściej spotykane to:

- koleinometr brytyjski (określany jako „mały aparat”),
- koleinometr francuski LCPC („duży aparat”),
- koleinometr niemiecki HWT (występujący w literaturze anglojęzycznej jako „Hamburg Wheel Tester”),
- urządzenie APA („Asphalt Pavement Analyzer”).

W każdym z nich pomiarowi podlega głębokość koleiny powstająca w próbce w wyniku oddziaływania na nią koła aparatury badawczej, zaś różnice występują w wymiarach i obciążeniu koła, temperaturze badania, środowisku w jakim znajduje się próbka (powietrze lub woda) czy liczbie cykli obciążenia.

W niniejszej pracy wykorzystano dwa typy koleinometry: brytyjski i francuski.

Koleinometr brytyjski użyto do sprawdzenia mieszanek wytwarzanych w warunkach laboratoryjnych oraz przemysłowych (w trakcie odcinka doświadczalnego). Badania mieszanek laboratoryjnych odbywały się według procedury opisanej w normie PN-EN 12697-22 oznaczonej jako metoda B w powietrzu oraz poprzednio stosowanej BS598. Mieszanki wyprodukowane w wytwórni mas bitumicznych testowano jedynie według procedury PN-EN 12697-22, jednakże dla nich przeprowadzono również badania w koleinometrze francuskim LCPC. Koleinometr brytyjski pokazano na fotografii 4.15.



Fot. 4.15. Widok koleinometra brytyjskiego, na zdjęciu brak próbki

Parametry badania w koleinometrze brytyjskim dla obu procedur badawczych (PN-EN 12697-22 metoda B w powietrzu oraz BS598) umieszczono w tablicy 4.2.

Tablica 4.2. Warunki badania próbek prostopadłościennych betonu asfaltowego w koleinomierzu brytyjskim

Procedura badawcza	PN-EN 12697-22, metoda B w powietrzu	BS598
Szerokość koła, [mm]	50	50
Średnica zewnętrzna koła, [mm]	200	200
Obciążenie koła	700	520
Całkowita droga przejścia koła po próbce, [mm]	230	230
Częstotliwość obciążenia, [cykli/min]	27	21
Ilość cykli obciążenia, [-]	20 000	1 900
Całkowita ilość przejść koła w obu kierunkach, [-]	10 000	950
Czas trwania badania, [min]	6 h 10 min	45 min
Temperatura badania, [°C]	+60	+60

W trakcie trwania obu procedur badawczych następuje automatyczny pomiar głębokości koleiny w próbce, jednakże obliczane na jej podstawie parametry są odmienne. Odporność mieszanek mineralno-asfaltowych na deformacje trwałe określana jest według zawartej w dokumencie PN-EN 12697-22 metody B w powietrzu za pomocą dwóch wielkości:

- prędkości przyrostu koleiny oznaczanej jako WTS_{AIR} ,
- proporcjonalnej głębokości koleiny oznaczanej skrótem PRD_{AIR} ,

Prędkość przyrostu koleiny WTS_{AIR} obliczana jest jako:

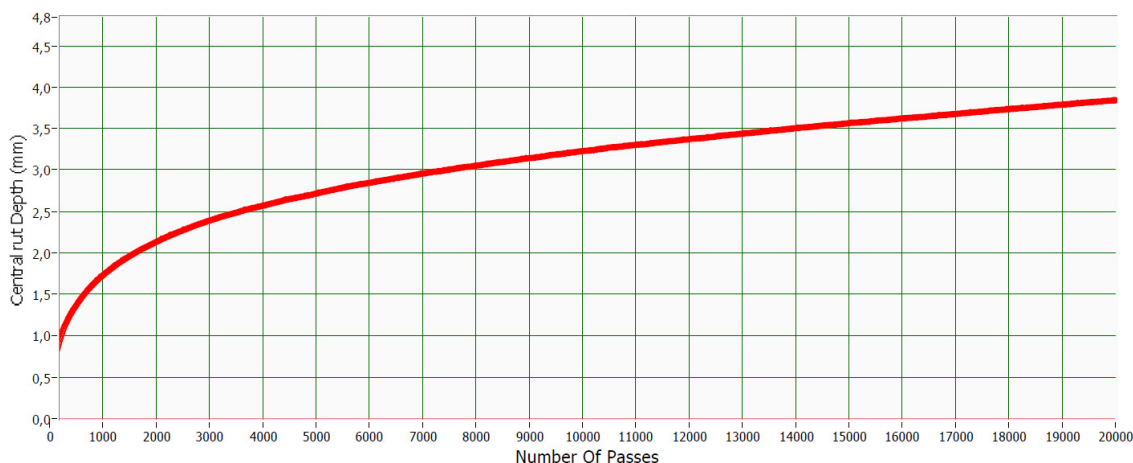
$$WTS_{AIR} = \frac{(d_{10000} - d_{5000})}{5} \quad (4.7)$$

gdzie:

- WTS_{AIR} – prędkość przyrostu koleiny, [mm/1000 cykli obciążenia],
 d_{10000} – głębokość koleiny po 10 000 cykli obciążenia, [mm],
 d_{5000} – głębokość koleiny po 5 000 cyklach obciążenia, [mm],

Proporcjonalną głębokość koleiny PRD_{AIR} otrzymuje się poprzez iloraz średniej głębokości koleiny po przeprowadzeniu wszystkich cykli przejść koła przez grubość badanej próbki. Proporcjonalną głębokość koleiny PRD_{AIR} wyraża się w jednostkach procentowych z dokładnością $\pm 0,1\%$.

Procedura zawarta w dokumencie BS598 opiera się natomiast na sprawdzeniu maksymalnej głębokości koleiny po przeprowadzeniu wszystkich cykli przejść koła. Głębokość koleiny określa się na podstawie różnicy pomiędzy odczytem początkowym a odczytem końcowym. Przykładowy wykres przedstawiający pomiar głębokości koleiny w zależności od ilości przejść koła pokazano na rysunku 4.5.

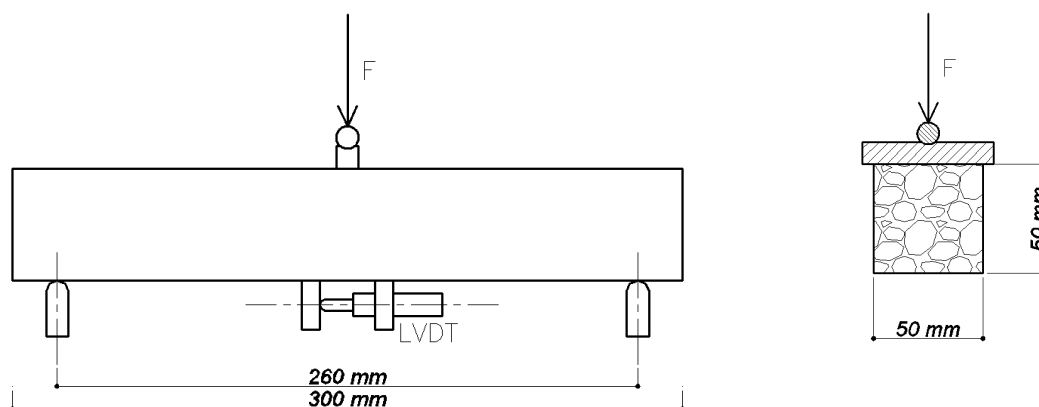


Rys. 4.5. Wykres przedstawiający wzrastającą głębokość koleiny w zależności od ilości przejazdów koła urządzenia pomiarowego.

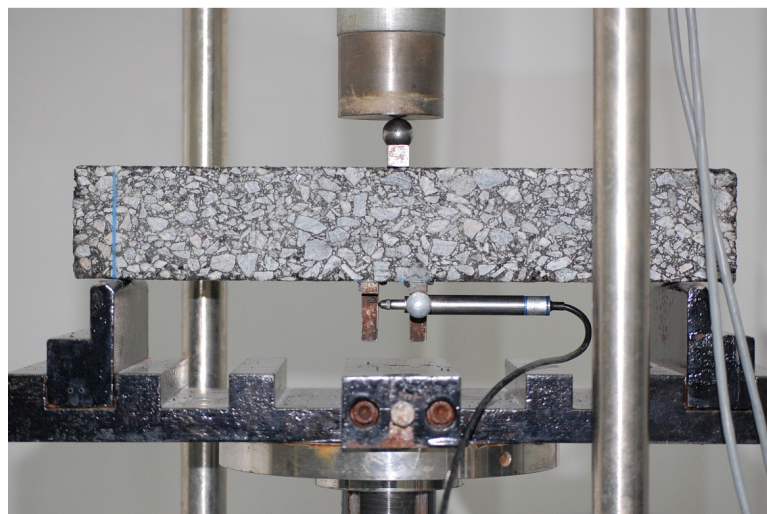
Procedurę przygotowania próbek oraz sposób przeprowadzania badania i interpretację wyników uzyskanych w koleinomierzu LCPC przedstawiono w punkcie 6.5.3.3.

4.4.2.6. Odporność na spękania niskotemperaturowe

Do porównania zachowań różnych mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkami WMA w niskich temperaturach wykorzystano metodę trójpunktowego zginania prostopadłościennych belek ze stałą prędkością deformacji. Metoda ta została oryginalnie opracowana przez Judyckiego i zastosowana w pracy [63] oraz następnie zmodyfikowana przez Pszczołę i Judyckiego w pracy [94]. Polega ona na określeniu siły maksymalnej i odkształcenia granicznego na spodzie próbki podczas zginania wolnopodpartej prostopadłościennej belki obciążonej siłą skupioną ze stałą prędkością deformacji. Zarejestrowana siła służy następnie do obliczenia wytrzymałości materiału na rozciąganie przy zginaniu. W badaniu wykorzystywane są próbki o długości 300 mm i przekroju kwadratowym o boku 50 mm. Powstają one przez przecięcie płyt o większych wymiarach, tj. 300x300x50 mm zagęszczanych w formach stalowych w zagęszczarce walcowej. Szczegółowy opis formowania i zagęszczania próbek przedstawiono w punkcie 4.3.2.3. Pomiar odkształcenia odbywa się za pośrednictwem czujnika przemieszczeń LVDT umieszczonego na spodzie belki za pomocą stalowego uchwytu przyklejanego do powierzchni żywicą epoksydową. Drugi uchwyt zapewnia oparcie dla końcówki czujnika LVDT. Rozstaw uchwytów stanowi bazę pomiarową wykorzystywaną do pomiarów odkształceń. Schemat, przekrój i widok badanej próbki przedstawiono na rysunku 4.6 oraz fotografii 4.16.

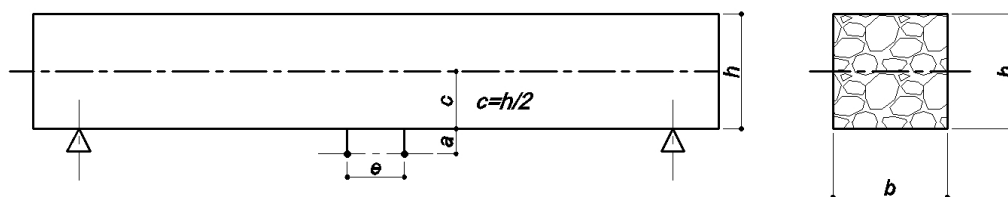


Rys. 4.6. Schemat badania wytrzymałości na zginanie i odkształcenia granicznego metodą trójpunktowego zginania prostopadłościennej belki – widok ogólny i przekrój poprzeczny

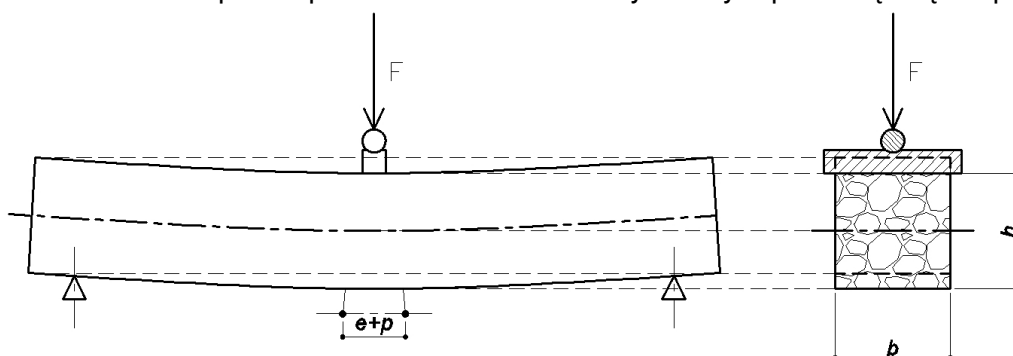


Fot. 4.16. Widok próbki z zamocowanym czujnikiem przemieszczeń LVDT

Obciążenie siłą wywoływano za pomocą prasy charakteryzującej się stałą prędkością przemieszczenia, która wynosiła 1,25 mm na minutę. W celu równomiernego rozłożenia obciążenia na szerokości próbki siłę przykładano za pośrednictwem stalowej podkładki. Punkty podparcia próbki rozmieszczone były w odległości 260 mm. Zmieniającą się w trakcie badania siłę mierzono za pomocą dwóch czujników indukcyjnych. Wszystkie mierzone wielkości (tj. odkształcenie z czujnika przemieszczeń LVDT, siła pionowa z czujników indukcyjnych) rejestrowano przy użyciu jednostki sterującej i odpowiedniego oprogramowania. Następnie na podstawie zależności geometrycznych obliczano wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu oraz towarzyszące mu odkształcenie graniczne w momencie zniszczenia próbki. Na rysunku 4.7 i 4.8 przedstawiono schematycznie stan próbki przed i po odkształceniu wywołanym siłą skupioną. Na rysunku 4.9 pokazano zaś wykres przebiegu badania, tj. zależności naprężeń rozciągających na spodzie belki w zależności od odkształcenia. Badanie przeprowadzono w temperaturze -20°C .



Rys. 4.7. Schemat próbki przed odkształceniem wywołanym pionową siłą skupioną



Rys. 4.8. Schemat próbki po odkształceniu wywołanym pionową siłą skupioną i zwiększeniu rozstawu uchwytów czujnika LVDT o wartość p

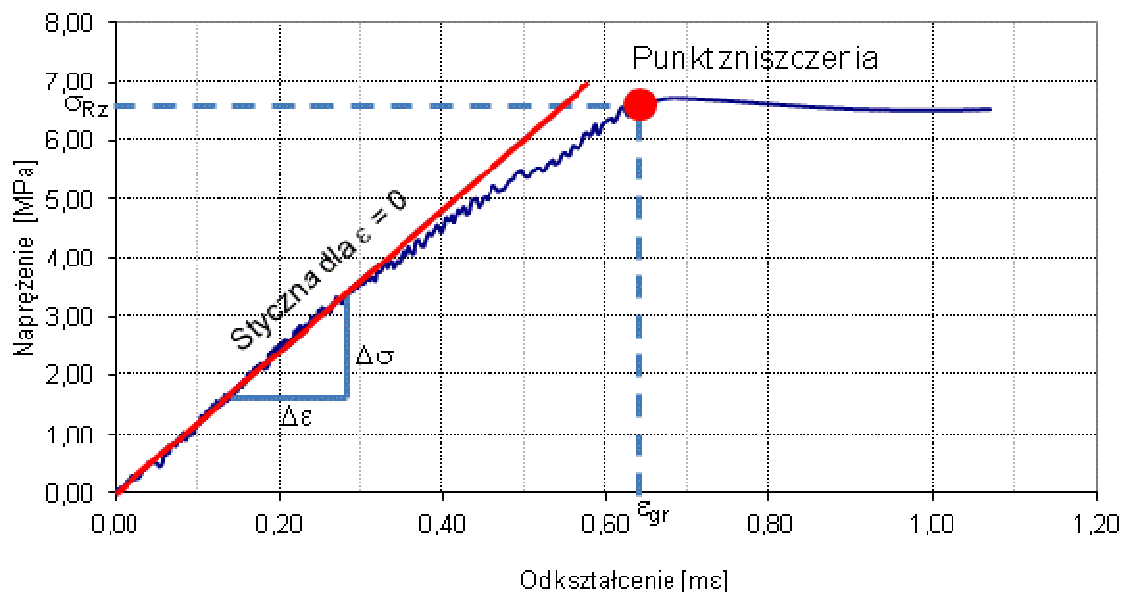
Odształcenie graniczne i wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu określa się z następujących zależności:

$$\varepsilon_{gran} = \frac{p_{max}}{e} \frac{c}{c+a} \quad (4.8)$$

$$R_{rz} = \frac{3F_{max}l}{2bh^2} \quad (4.9)$$

gdzie:

- ε_{gran} – średnie odkształcenie występujące na spodzie belki na odcinku bazy pomiarowej o długości e,
- p_{max} – przemieszczenia czujnika LVDT, przy maksymalnej sile F_{max} spowodowane zginaniem belki [mm],
- e – długość bazy pomiarowej – osiowa odległość pomiędzy płytkami bazowymi, [mm],
- a – odległość od spodu belki do osi czujnika LVDT [mm],
- c – połowa wysokości belki [mm].
- R_{rz} – wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu [MPa],
- F_{max} – siła niszcząca [kN],
- h – wysokość belki [mm],
- l – rozpiętość belki między podporami [mm],
- b – szerokość belki [mm],
- σ – naprężenia występujące na spodzie w środku rozpiętości [MPa].



Rys. 4.9. Wykres przebiegu badania wytrzymałości na zginanie i odkształcenia granicznego metodą trójpunktowego zginania prostokątnej belki

Na podstawie stycznej w punkcie początkowym do krzywej zależności naprężenia od odkształcenia określono moduł sztywności mieszanki mineralno-asfaltowej przy zginaniu za pomocą wzoru:

$$S = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (4.10)$$

gdzie:

- S – moduł sztywności przy zginaniu [MPa],
- $\Delta\sigma$ – przyrost naprężenia [MPa],
- $\Delta\varepsilon$ – przyrost odkształcenia [-].

Ocena badanych betonów asfaltowych przeprowadzona została w oparciu o odkształcenie graniczne, wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu oraz moduły sztywności. Lepszą odporność na spękania niskotemperaturowe posiadają mieszanki mineralno-asfaltowe charakteryzujące się większym odkształceniem granicznym, wyższą wytrzymałością na rozciąganie przy zginaniu oraz niższym modułem sztywności.

4.5. Oszacowanie dokładności pomiarów

Pomiarom poszczególnych cech lepiszcz i mieszanek mineralno-asfaltowych towarzyszą nieuniknione niedokładności, które wpływają na końcowe wyniki badań. Rozrzuty wyników mogą być spowodowane następującymi czynnikami:

- odmiennością warunków zewnętrznych podczas przygotowywania próbek,
- zmiennymi warunkami temperaturowymi występującymi w trakcie badania pojedynczych próbek, różnych od założonych,

- niejednorodnością struktury wewnętrznej materiału,
- błędami metod pomiarowych.

Efekty wymienionych czynników nakładają się na siebie skutkując sumarycznym błędem mierzonych cech danego materiału.

4.5.1. Odmienność warunków zewnętrznych podczas przygotowywania próbek

Natura asfaltu powoduje, że zmiana warunków przygotowania próbek takich jak:

- czas przetrzymywania lepiszcza w wysokiej temperaturze przed jego wykorzystaniem,
- czas przetrzymywania wykonanych porcji mieszank mineralno-asfaltowych w podwyższonej temperaturze przed uformowaniem próbek,

skutkuje możliwością uzyskania dość różniących się wyników badań przy takich samych proporcjach materiałów składowych, spowodowanych różnym stopniem zesterzenia asfaltu. Dotyczy to zwłaszcza badania stabilności, wytrzymałości na pośrednie rozciąganie, modułów sztywności sprężystej oraz koleinowania. W celu zmniejszenia rozrzutów wynikających z tych przyczyn, w trakcie prowadzenia badań związanych z niniejszą pracą doktorską zwracano szczególną uwagę na dokładne przestrzeganie procedur przygotowania poszczególnych rodzajów próbek. Ponadto stosowano zasadę wytwarzania zarobów mieszank o takich objętościach, aby możliwe było jednorazowe wykonanie wszystkich próbek potrzebnych do przeprowadzenia danego badania.

4.5.2. Zmienne warunki temperaturowe występujące w trakcie badania pojedynczych próbek

Zmienne warunki temperaturowe w trakcie badania próbek można podzielić na dwie okoliczności:

- odmienność temperatury wskazywanej przez układ sterujący komory chłodniczej od rzeczywistości w niej panującej podczas przechowywania próbek, wynikająca z dokładności utrzymywania stałej temperatury przez dane urządzenie chłodzące,
- zmiany temperatur próbek bezpośrednio w trakcie badania.

W celu zmniejszenia rozrzutów temperatury wskazywanej od rzeczywistości występującej w komorze chłodniczej dokonywano dodatkowych pomiarów sprawdzających za pomocą termometru rtęciowego o dokładności $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ w razie potrzeby wprowadzając korekty do układu sterującego komorą.

Ryzyko powstania rozrzutów wyników spowodowanych zmianą temperatury próbek bezpośrednio w trakcie badania wynikało z przeprowadzania niektórych testów w urządzeniach niewyposażonych w komorę termiczną, umożliwiającą utrzymanie stałej temperatury próbki. Dotyczyło to badania wytrzymałości na pośrednie rozciąganie oraz wytrzymałości na zginanie belki poddanej trójpunktowemu zginaniu. Przy tych badaniach przykładano szczególną wagę na szybkie umocowanie próbki w urządzeniu badawczym po wyjęciu z komory termicznej urządzenia chłodzącego i natychmiastowe przeprowadzenie testu.

4.5.3. Niejednorodność struktury wewnętrznej materiału

Mieszanki mineralno-asfaltowe są materiałami niejednorodnymi, składającymi się z dwóch głównych składników – kruszywa o różnych frakcjach oraz lepiszcza asfaltowego. Dodatkowo występują wolne przestrzenie. Rozkład wymienionych struktur jest losowy i niejednorodny. W pewnym stopniu zależy od staranności przygotowania (formowania) próbek, od którego w pewnym stopniu zależy rozsegregowanie ziaren kruszywa w danej objętości mieszanki mineralno-asfaltowej. Osiągnięcie idealnie równomiernego rozmieszczenia ziaren w próbkach nie jest jednak możliwe. W niniejszej pracy doktorskiej niekorzystny wpływ struktury wewnętrznej materiału zmniejszono poprzez zastosowanie w badaniach laboratoryjnych mieszanki o stosunkowo niewielkim wymiarze największego ziarna, tj. 12,8 mm, która nie jest tak podatna na segregację jak mieszanki 0/16 lub 0/25 mm.

4.5.4. Dokładność metod pomiarowych

Badania cech lepiszcza (penetracja, temperatura mięknięcia, lepkość) oraz większości cech mieszanek mineralno-asfaltowych (stabilność, odporność na działanie wody i mrozu, starzenie) prowadzono według procedur opisanych w odpowiednich normach, które uwzględniały błędy metod pomiarowych oraz możliwe rozrzuty wyników. Były to normy:

- określające badania cech asfaltów:
 - penetracji – PN-EN 1426:2001,
 - temperatury mięknięcia – PN-EN 1427:2007,
 - lepkości dynamicznej w temperaturach – PN-EN 13702-2:2005.
- Określające badania parametrów mieszanek mineralno-asfaltowych:
 - stabilności – PN-EN 12697-34,
 - odporności na działanie wody – PN-EN 12697-12,
 - koleinowania – PN-EN 12697-22, BS598..

Metodą nienormową było badanie wytrzymałości na rozciąganie oraz odkształcenia granicznego przy zginaniu trójpunktowym prostopadłościennych belek. Błąd metody pomiarowej obliczono w tym wypadku przekształcając wzory 4.8 i 4.9 zgodnie z zasadą obliczania błędów przy pomiarze cech będących funkcjami wielu zmiennych, tj. obliczając pierwiastek z sumy kwadratów pochodnych cząstkowych każdej zmiennej. Błąd bezwzględny pomiaru wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu obliczano według wzoru 4.11. Wartości błędów dla kilku poziomów siły obliczono w tablicy 4.9. Obliczenia wykonano dla trzech poziomów mierzonych wartości, odpowiadających trzem różnym temperaturom pomiarowym.

$$|\Delta R_{rz}| = \left[\left(1,5 \frac{l}{bh^2} \Delta P \right)^2 + \left(1,5 \frac{P}{bh^2} \Delta l \right)^2 + \left(1,5 \frac{Pl}{b^2 h^2} \Delta b \right)^2 + \left(3 \frac{Pl}{bh^3} \Delta h \right)^2 \right]^{0,5} \quad (4.11)$$

Tablica 4.9. Wyznaczenie błędu metody pomiaru wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu

Wartość pomiaru siły, [kN]	0,5	1,5	2,5
Wartość pomiaru rozstawu podpór, [mm]	260	260	260
Wartość pomiaru szerokości próbki, [mm]	50	50	50
Wartość pomiaru wysokości próbki, [mm]	50	50	50
Błąd pomiaru siły, [kN]	0,0008152	0,0008152	0,0008152
Błąd pomiaru rozstawu podpór, [mm]	0,1	0,1	0,1
Błąd pomiaru szerokości próbki, [mm]	0,1	0,1	0,1
Błąd pomiaru wysokości próbki, [mm]	0,1	0,1	0,1
Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu, [MPa]	1,56	4,68	7,8
Błąd bezwzględny, [MPa]	0,0074	0,0212	0,0351
Błąd względny, [%]	0,478	0,452	0,450

Błąd bezwzględny pomiaru odkształcenia granicznego przy zginaniu obliczono według wzoru 4.12:

$$|\Delta \varepsilon| = \left[\left(\frac{c}{e(c+a)} \Delta p \right)^2 + \left(\frac{p}{e^2} \frac{c}{c+a} \Delta e \right)^2 + \left(\frac{p}{e} \frac{a}{(c+a)^2} \Delta c \right)^2 + \left(\frac{p}{e} \frac{c}{(c+a)^2} \Delta a \right)^2 \right]^{0,5} \quad (4.12)$$

Tablica 4.10. Wyznaczenie błędu metody pomiaru odkształcenia granicznego przy zginaniu

Wartość pomiaru przemieszczenia czujnika, [mm]	0,05	0,1	0,2
Wartość pomiaru odległości od spodu belki do osi czujnika, a, [mm]	10,7	10,7	10,7
Wartość pomiaru długości bazy pomiarowej, e, [mm]	22	22	22
Wartość pomiaru połowy wysokości próbki, c, [mm]	25	25	25
Błąd pomiaru przemieszczenia czujnika, [mm]	0,0005	0,0005	0,0005
Błąd pomiaru odległości od spodu belki do osi czujnika, [mm]	0,1	0,1	0,1
Błąd pomiaru długości bazy pomiarowej, [mm]	0,1	0,1	0,1
Błąd pomiaru połowy wysokości próbki, [mm]	0,1	0,1	0,1
Odkształcenie graniczne, $\times 10^{-3}$, [-]	0,16	0,32	0,64
Błąd bezwzględny, $\times 10^{-3}$, [-]	0,00087	0,00174	0,00348
Błąd względny, [%]	0,5491	0,5477	0,5473

Wykonane obliczenia pokazują, że zastosowana metoda pomiaru wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu i odkształcenia granicznego cechuje duża dokładność, a wartość błędu względnego w małym stopniu zależy od poziomu mierzonej wielkości. W związku z tym, duże rozrzuty występujące podczas badania wytrzymałości na

rozciąganie przy zginaniu należy uznać za efekt niejednorodności materiału, jakim jest mieszanka mineralno-asfaltowa.

4.5.5. Doświadczalna ocena rozrzutów wyników badań

Ocenę rozrzutów wyników badań wykonano poprzez obliczenie podstawowych wartości statystycznych, tj.:

- wartość średnią \bar{X} ,
- odchylenie standardowe (S_x),
- współczynnik zmienności (V_x).

Parametrem opisującym rozrzuty uzyskanych wyników jest współczynnik zmienności. Wartości odchyłeń standardowych oraz współczynników zmienności podano w załączniku ze szczegółowymi wynikami badań.

W tabelicy 4.11 zawarto współczynniki zmienności uzyskane w badaniach mieszanek mineralno-asfaltowych występujących w niniejszej pracy.

Tablica 4.11. Współczynniki zmienności betonów asfaltowych obliczone w badaniach mieszanek mineralno-asfaltowych.

Lp.	Parametr	Ilość próbek	Średni współczynnik zmienności [%]	Przedział współczynnika zmienności [%]
1.	Stabilność	3	7,39	1,11 – 16,74
2.	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie	3	3,84	0,52 – 10,30
3.	Moduł sztywności sprężystej	3	6,55	0,07 – 20,34

Wartość współczynnika zmienności w niektórych typach badań sięga 20%. Wynika to z głównie z niejednorodności materiału, jakim jest mieszanka mineralno-asfaltowa, zaś w dalszej kolejności spowodowane jest to dokładnością metod badawczych oraz zmiennymi warunkami zewnętrznymi w trakcie wykonywanych badań.

5. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ LABORATORYJNYCH

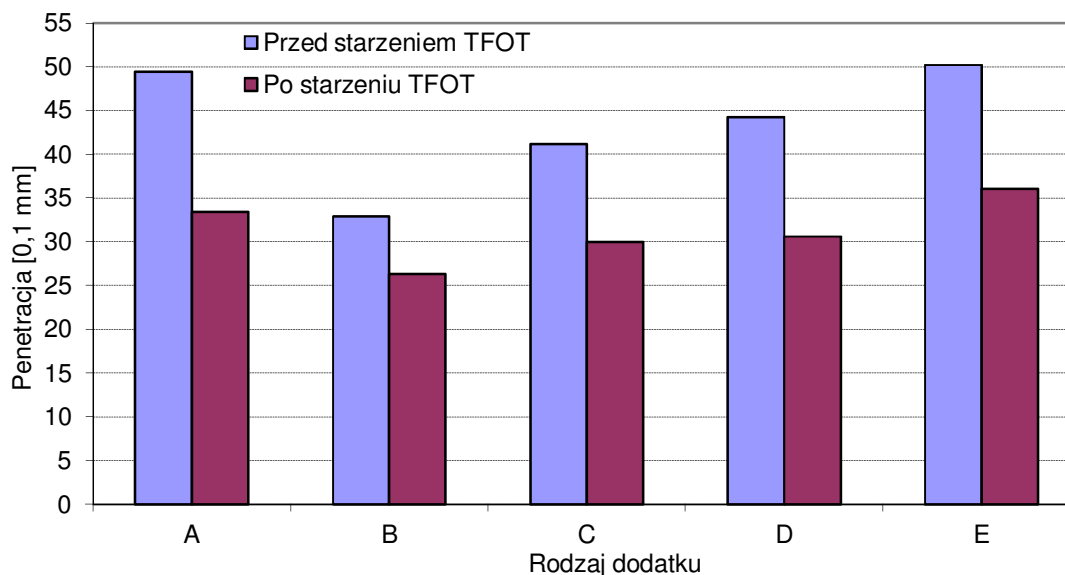
5.1. Analiza wyników badań asfaltów

5.1.1. Analiza wyników badań penetracji

Wyniki badania penetracji asfaltu drogowego 50/70 czystego i z dodatkami, przed i po starzeniu w cienkiej warstwie TFOT przedstawiono w tabelicy 5.1 oraz na rysunku 5.1. Wyniki badania penetracji asfaltu modyfikowanego 45/80-55 czystego i z dodatkami, przed i po starzeniu w cienkiej warstwie przedstawiono TFOT zamieszczono w tabelicy 5.2 i na rysunku 5.2.

Tablica 5.1. Wyniki badania penetracji asfaltu zwykłego 50/70 czystego i z dodatkami, przed i po starzeniu TFOT

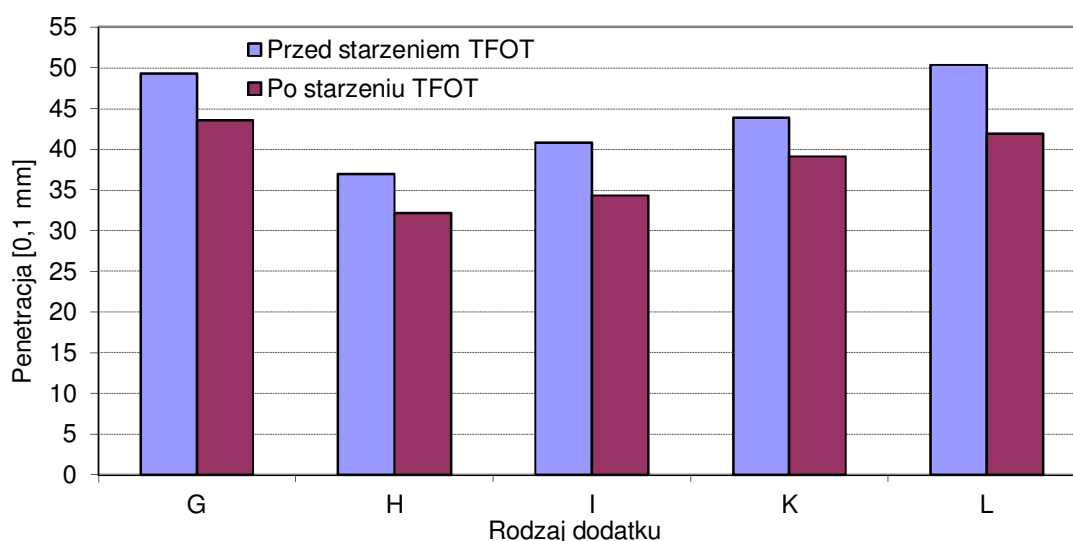
Rodzaj dodatku		Penetracja przed starzeniem TFOT	Różnica w stosunku do penetracji czystego asfaltu	Penetracja po starzeniu TFOT	Różnica w stosunku do penetracji po starzeniu czystego asfaltu	Spadek penetracji po starzeniu [%]
A	-	49,4		33,4		32,4%
B	Sasobit	32,9	33,5%	26,3	21,2%	19,9%
C	Licomont BS100	41,2	16,7%	30,0	10,3%	27,1%
D	Rediset WMX	44,2	10,6%	30,6	8,6%	30,8%
E	Ceca Base RT	50,2	-1,6%	36,0	-7,7%	28,3%



Rys. 5.1. Wyniki badania penetracji asfaltu zwykłego 50/70 czystego i z dodatkami, przed i po starzeniu TFOT

Tablica 5.2. Wyniki badania penetracji asfaltu modyfikowanego 45/80-55 czystego i z dodatkami, przed i po starzeniu TFOT

Rodzaj dodatku		Penetracja przed starzeniem TFOT	Różnica w stosunku do penetracji czystego asfaltu	Penetracja po starzeniu TFOT	Różnica w stosunku do penetracji po starzeniu czystego asfaltu	Spadek penetracji po starzeniu [%]
G	-	49,3		43,6		11,7%
H	Sasobit	37,0	25,0%	32,2	26,2%	13,1%
I	Licomont BS100	40,8	17,2%	34,3	21,2%	15,9%
K	Rediset WMX	43,8	11,1%	39,1	10,2%	10,7%
L	Ceca Base RT	50,3	-2,0%	41,9	3,7%	16,7%



Rys. 5.2. Wyniki badania penetracji asfaltu modyfikowanego 45/80-55 czystego i z dodatkami, przed i po starzeniu TFOT

Na podstawie otrzymanych wyników badań penetracji można stwierdzić, że wykryty wpływ poszczególnych dodatków na penetrację asfaltów uwidacznia się i posiada podobny charakter zarówno dla asfaltu zwykłego 50/70, jak i modyfikowanego 45/80-55, jednakże z inną intensywnością. Największy wpływ skutkujący utwardzeniem asfaltu, który odzwierciedlało zmniejszenie penetracji posiadał dodatek z grupy wosków – Sasobit – oraz przedstawiciel grupy mieszanin amidów kwasów tłuszczowych – Licomont BS100. Dodatek Sasobitu spowodował przed starzeniem spadek penetracji asfaltu zwykłego o 1/3, zaś modyfikowanego o 1/4. Wpływ dodatku Rediset WMX był mniejszy, co wynika z nieco innej formuły jego składu, zawierającego oprócz komponentu wosku również substancję działającą powierzchniowo czynnie. Natomiast zastosowanie płynnego środka Ceca Base RT działającego wyłącznie powierzchniowo-czynnie nie spowodowało spadku penetracji asfaltu, a wręcz uległa ona przed starzeniem niewielkiemu zwiększeniu (rzędu 1,6-2,0%). Wprowadzenie do lepszcza dodatków obniżających temperaturę produkcji nie

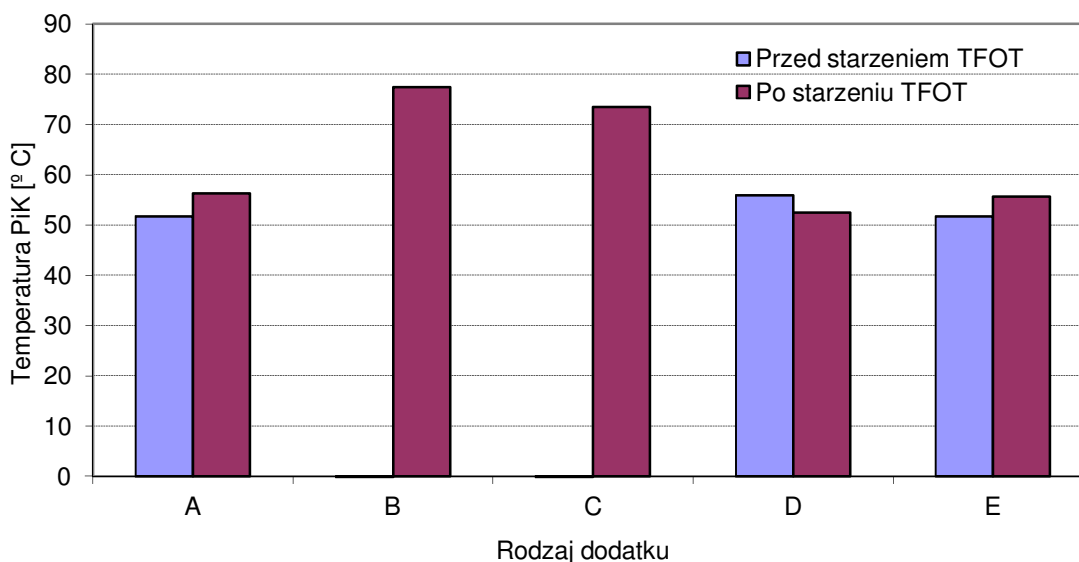
spowodowało natomiast zwiększenia intensywności starzenia w zakresie penetracji, przy czym proces starzenia TFOT w mniejszym stopniu wpłynął na parametry asfaltu modyfikowanego niż zwykłego. Spadek penetracji po starzeniu asfaltu zwykłego 50/70, zarówno czystego jak i z dodatkami WMA, zawierał się w przedziale od 19,9 do 32,4%. Dla asfaltu modyfikowanego przedział ten był mniejszy i zawierał się w granicach 10,7-16,7%. Największe starzenie po teście TFOT wykazał asfalt zwykły z dodatkiem Sasobitu.

5.1.2. Analiza wyników badań temperatury mięknięcia

Wyniki badania temperatury mięknięcia asfaltu drogowego 50/70 czystego i z dodatkami, przed i po starzeniu w cienkiej warstwie TFOT przedstawiono w tabelicy 5.3 oraz na rysunku 5.3. Wyniki badania temperatury mięknięcia asfaltu modyfikowanego 45/80-55 czystego i z dodatkami, przed i po starzeniu w cienkiej warstwie przedstawiono TFOT zamieszczono w tabelicy 5.4 i na rysunku 5.4.

Tablica 5.3. Wyniki badania temperatury mięknięcia według metody PiK dla asfaltu zwykłego 50/70 czystego i z dodatkami, przed i po starzeniu TFOT

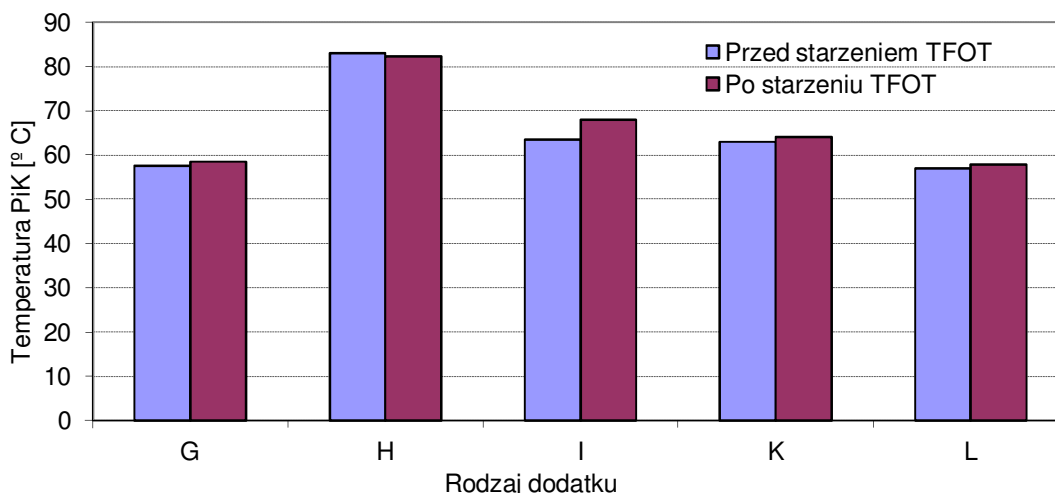
Rodzaj dodatku		Temperatura PiK przed starzeniem TFOT	Różnica w stosunku do temperatury PiK czystego asfaltu	Temperatura PiK po starzeniu TFOT	Różnica w stosunku do temp. PiK po starzeniu czystego asfaltu	Wzrost temperatury PiK po starzeniu [%]
A	-	51,8		56,3		8,7%
B	Sasobit	zerwanie	-	77,5	37,8%	-
C	Licomont BS100	zerwanie	-	73,5	30,7%	-
D	Rediset WMX	56,0	8,2%	52,5	-6,7%	-6,3%
E	Ceca Base RT	51,8	0,0%	55,8	-0,9%	7,7%



Rys. 5.3. Wyniki badania temperatury mięknięcia PiK asfaltu zwykłego 50/70 czystego i z dodatkami, przed i po starzeniu TFOT

Tablica 5.4. Wyniki badania temperatury mięknięcia PiK asfaltu modyfikowanego 45/80-55 czystego i z dodatkami, przed i po starzeniu TFOT

Rodzaj dodatku		Temperatura PiK przed starzeniem TFOT	Różnica w stosunku do temperatury PiK czystego asfaltu	Temperatura PiK po starzeniu TFOT	Różnica w stosunku do temp. PiK po starzeniu czystego asfaltu	Wzrost temperatury PiK po starzeniu [%]
G	-	57,5		58,5		1,7%
H	Sasobit	83,0	44,3%	82,3	40,6%	-0,9%
I	Licomont BS100	63,5	10,4%	68,0	16,2%	7,1%
K	Rediset WMX	63,0	9,6%	64,0	9,4%	1,6%
L	Ceca Base RT	57,0	-0,9%	57,8	-1,3%	1,3%



Rys 5.4. Wyniki badania temperatury mięknięcia PiK asfaltu modyfikowanego 45/80-55 czystego i z dodatkami, przed i po starzeniu TFOT

Uzyskane wyniki badań temperatury mięknięcia asfaltów czystych i z dodatkami obniżającymi temperaturę produkcji są ogólnie zbliżone z wynikami badań penetracji. Największy wpływ na temperaturę mięknięcia asfaltu zwykłego 50/70 posiadał ponownie dodatek z grupy wosków – Sasobit – oraz przedstawiciel grupy mieszanin amidów kwasów tłuszczowych – Licomont BS100. Ich obecność w lepiszczu spowodowała brak możliwości uzyskania miarodajnego wyniku badania – zamiast stopniowego oraz łagodnego wydłużania się umieszczonej w pierścieniu i obciążonej kulą stalową próbki asfaltu podczas podrzewania, dochodziło do gwałtownego, nie sygnalizowanego wcześniej jej zerwania. Możliwe było natomiast uzyskanie dla tych dodatków wyniku po przeprowadzeniu starzenia TFOT. W tym przypadku temperatura mięknięcia była odpowiednio większa o 37,8 (Sasobit) i 30,8% (Licomont BS100) w stosunku do czystego asfaltu 50/70. Wpływ dodatku Rediset WMX był podobnie jak dla penetracji mniej zauważalny, ponadto po procesie starzenia uzyskano spadek temperatury mięknięcia. Dodatek Ceca Base RT praktycznie w żaden sposób nie wpłynął na temperaturę mięknięcia, a uzyskane wartości (zarówno przed, jak i po starzeniu TFOT) praktycznie nie różniły się od wartości otrzymanych dla czystego asfaltu.

W trakcie badania asfaltu modyfikowanego 45/80-55 ponownie uwidocznił się silny wpływ środka Sasobit, który spowodował 44,3% wzrost temperatury mięknięcia w porównaniu do czystego lepiszcza przed starzeniem. Wpływ dodatku Licomont BS100 był natomiast w tym przypadku już nie tak znaczący i podniósł temperaturę mięknięcia o 10,4%. Najmniej ingerujący okazał się być ponownie płynny środek Ceca Base RT. Po procesie starzenia TFOT odnotowano zaś w większości (4 z 5 kombinacji) bardzo niewielki przyrost temperatury mięknięcia lub jej spadek, co wskazywałoby na brak efektu oddziaływania wysokiej temperatury na asfalt modyfikowany. Może to jednakże być związane ze zmianami struktury tego polimeroasfaltu, a nawet degradacją polimeru w czasie intensywnego długotrwałego wygrzewania w cienkiej warstwie.

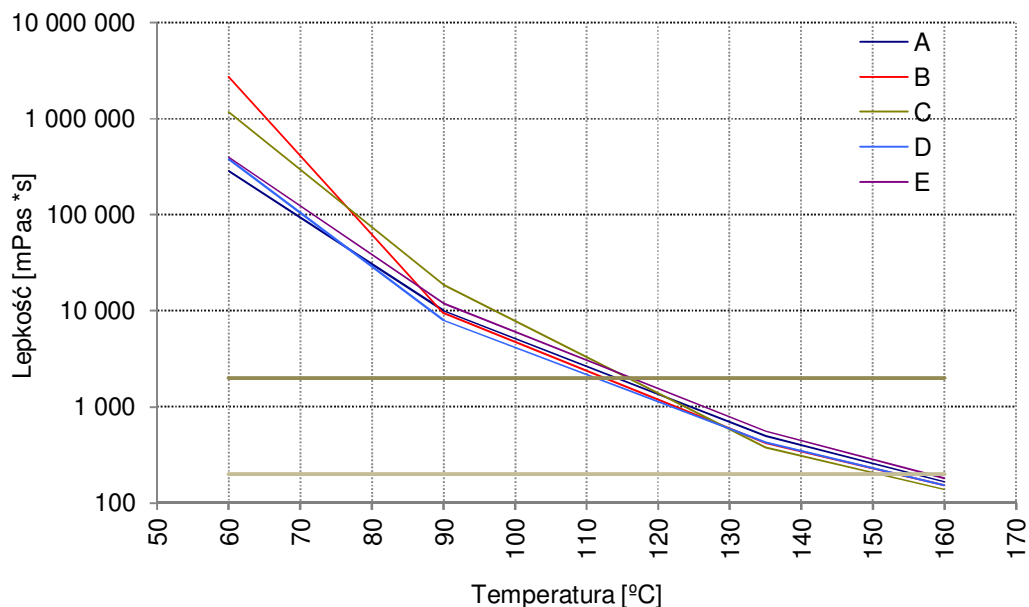
5.1.3. Analiza wyników badań lepkości

W tabelicy 5.5 przedstawiono wyniki badania lepkości dynamicznej obu rodzajów badanych asfaltów czystych i z dodatkami, przed i po starzeniu TFOT. W tabelicy 5.6 zamieszczono natomiast procentowe zmiany lepkości, jakie zaszły po starzeniu TFOT. Wykresy lepkości asfaltu zwykłego 50/70 czystego i z dodatkami pokazano na rysunkach 5.5 oraz 5.6, zaś asfaltu modyfikowanego 45/80-55 na rysunkach 5.7 i 5.8.

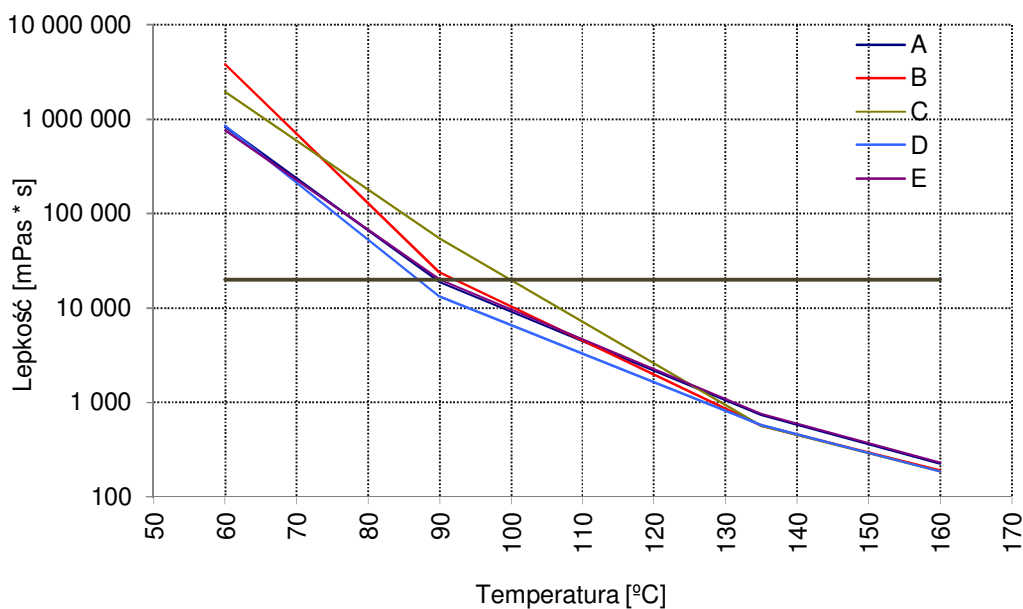
Tabela 5.5. Wyniki badania lepkości dynamicznej asfaltów zwykłego 50/70 i modyfikowanego 45/80-55 (czystych i z dodatkami) przed i po starzeniu TFOT

Rodzaj dodatku		Rodzaj lepkości	Lepkość dynamiczna w temperaturze [mPas * s]			
			60°C	90°C	135°C	160°C
Asfalt zwykły 50/70						
A	-	przed TFOT	283 743	10 005	495	165
		po TFOT	825 091	18 962	736	224
B	Sasobit	przed TFOT	2 757 273	9 380	418	151
		po TFOT	3 796 364	23 949	568	192
C	Licomont BS100	przed TFOT	1 171 394	18 600	377	138
		po TFOT	1 956 136	54 121	565	184
D	Rediset WMX	przed TFOT	383 258	7 923	426	153
		po TFOT	857 934	13 203	576	185
E	Ceca Base RT	przed TFOT	394 945	11 946	557	182
		po TFOT	758 333	20 091	760	232
Asfalt modyfikowany 45/80-55						
G	-	przed TFOT	2 176 667	29 720	1 225	407
		po TFOT	1 280 909	26 997	1 045	327
H	Sasobit	przed TFOT	*	35 110	929	299
		po TFOT	*	47 741	1 181	350
I	Licomont BS100	przed TFOT	1 511 591	47 483	820	302
		po TFOT	7 819 091	76 908	951	316
K	Rediset WMX	przed TFOT	4 932 273	30 903	1 161	401
		po TFOT	3 216 364	34 260	1 463	454
L	Ceca Base RT	przed TFOT	2 424 091	24 000	1 048	361
		po TFOT	1 392 045	30 167	1 228	379

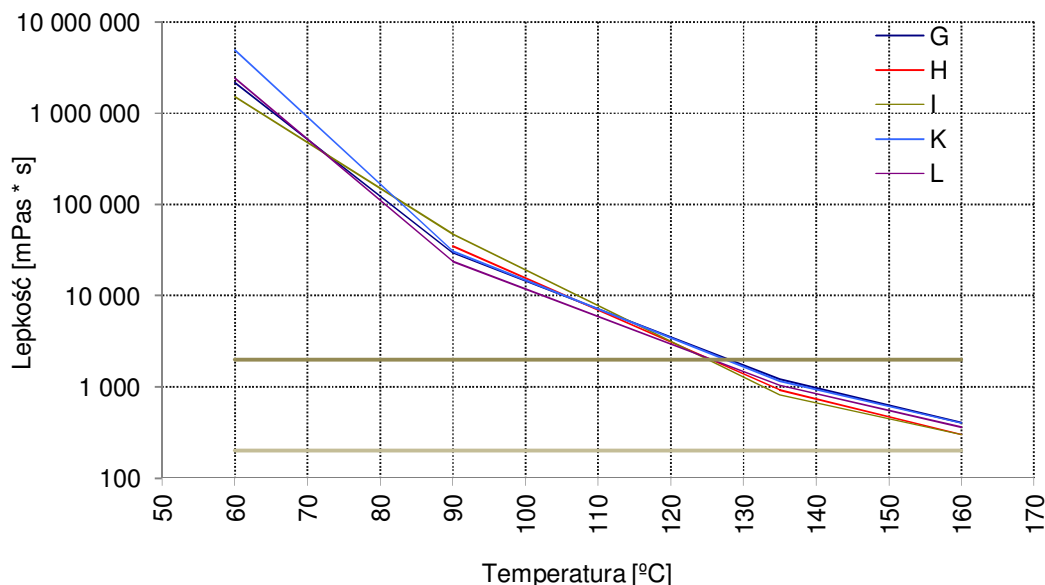
*) zbyt wysoka lepkość, poza zakresem badawczym lepkościomierza



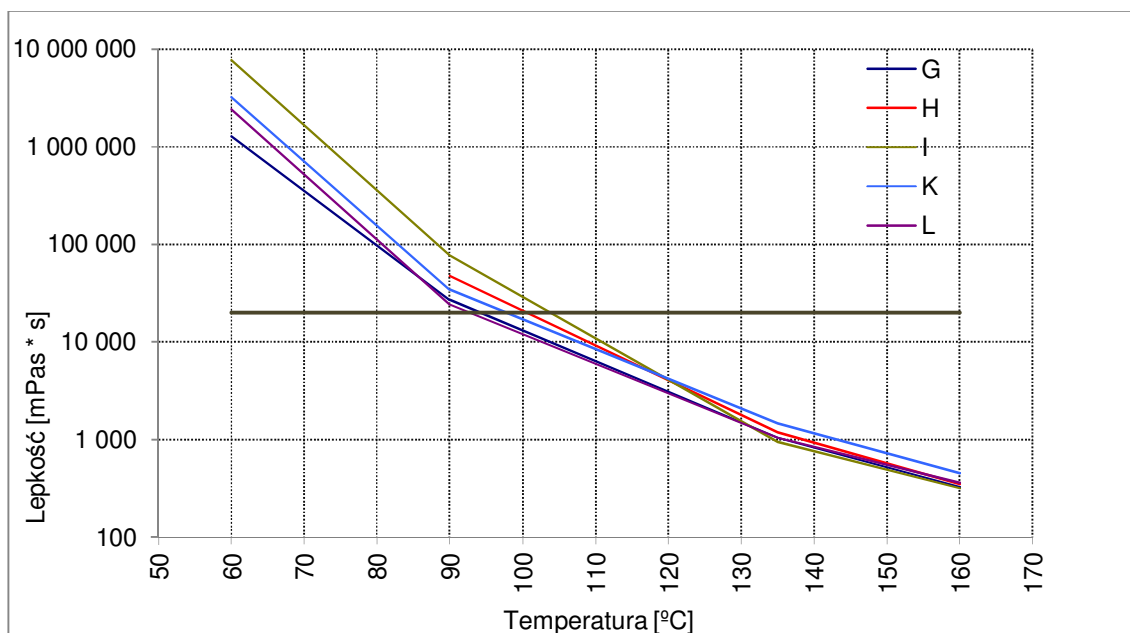
Rys. 5.5. Lepkość dynamiczna asfaltu zwykłego 50/70 (czystego i z dodatkami) przed starzeniem TFOT. Poziomymi liniami zaznaczono poziomy technologiczne poziomy lepkości: 0,2 i 2 , które odpowiadają granicy pompowania i otaczania wg [110]



Rys. 5.6. Lepkość dynamiczna asfaltu zwykłego 50/70 (czystego i z dodatkami) po starzeniu TFOT. Poziomą linią zaznaczono poziom lepkości 20 Pas, który odpowiada granicznej lepkości zagęszczania wg [110]



Rys. 5.7. Lepkość dynamiczna asfaltu modyfikowanego 45/80-55 (czystego i z dodatkami) przed starzeniem TFOT. Poziomymi liniami zaznaczono poziomy technologiczne poziomy lepkości: 0,2 i 2 , które odpowiadają granicy pompowania i otaczania wg [110]



Rys. 5.8. Lepkość dynamiczna asfaltu modyfikowanego 45/80-55 (czystego i z dodatkami) po starzeniu TFOT. Poziomą linią zaznaczono poziom lepkości 20 Pas, który odpowiada granicznej lepkości zagęszczania wg [110]

Procentowe zmiany lepkości po starzeniu TFOT występujące w tablicy 5.6 obliczono ze wzoru:

$$I_{\eta} = \frac{\eta_{TFOT}}{\eta_0} \times 100\% \quad (5.1)$$

gdzie:

- I_{η} - procentowa zmiana lepkości [%],
 η_{TFOT} - lepkość po starzeniu TFOT [mPas*s],
 η_0 - lepkość przed starzeniem TFOT [mPas*s].

Tablica 5.6. Procentowa zmiana lepkości dynamicznej asfaltów zwykłego 50/70 i modyfikowanego 45/80-55 (czystych i z dodatkami) po starzeniu TFOT w stosunku do lepkości przed starzeniem

Rodzaj dodatku		Procentowa zmiana lepkości dynamicznej po starzeniu TFOT [%] w temperaturze:			
		60°C	90°C	135°C	160°C
Asfalt zwykły 50/70					
A	-	291%	190%	149%	136%
B	Sasobit	138%	255%	136%	126%
C	Licomont BS100	167%	291%	150%	134%
D	Rediset WMX	224%	167%	135%	121%
E	Ceca Base RT	192%	168%	137%	127%
Asfalt modyfikowany 45/80-55					
G	-	59%	91%	85%	80%
H	Sasobit	*	136%	127%	117%
I	Licomont BS100	517%	162%	116%	105%
K	Rediset WMX	65%	111%	126%	113%
L	Ceca Base RT	57%	126%	117%	105%

*) zbyt wysoka lepkość, poza zakresem badawczym lepkościomierza

W tablicy 5.7 przedstawiono klasyfikację poszczególnych asfaltów czystych i z dodatkami pod względem wpływu na lepkość w skali od 1 do 5, przy czym liczba 1 oznacza lepiszczę o najmniejszej lepkości w danej temperaturze, zaś liczba 5 oznacza największą lepkość. Z kombinacji wszystkich przeprowadzonych badań lepkości różniących się warunkami (inne temperatury oraz badanie przed i po starzeniu) wybrano charakterystyczne przypadki, zbliżone do sytuacji rzeczywistych, tj.:

- lepkość w temperaturze 160°C przed starzeniem TFOT, tj. warunki odpowiadające pompowaniu asfaltu i otaczaniu nim ziaren kruszywa,
- lepkość w temperaturze 135°C po starzeniu TFOT, tj. warunki odpowiadające rozkładaniu i zagęszczaniu mieszanki mineralno-asfaltowej,
- lepkość w temperaturze 60°C po starzeniu TFOT, tj. warunki zbliżone do występujących podczas pracy nawierzchni w wysokich temperaturach powietrza.

Tablica 5.7. Klasyfikacja asfaltów czystych i z dodatkami pod względem lepkości dla różnych warunków badania

Rodzaj dodatku		Poziom lepkości dla:		
		60°C po starzeniu TFOT	135°C po starzeniu TFOT	160°C przed starzeniem TFOT
<u>Asfalt zwykły 50/70</u>				
A	-	4	4	4
B	Sasobit	1	2	2
C	Licomont BS100	2	1	1
D	Rediset WMX	3	3	3
E	Ceca Base RT	5	5	5
<u>Asfalt modyfikowany 45/80-55</u>				
G	-	5	2	5
H	Sasobit	1	3	1
I	Licomont BS100	2	1	2
K	Rediset WMX	3	5	4
L	Ceca Base RT	4	4	3

Z analizy samych zmian lepkości asfaltów z dodatkami obniżającymi temperaturę produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych (rys. 5.5 – 5.8) wynika, że możliwy do uzyskania stopień zmniejszenia temperatury otaczania i zagęszczania określony na podstawie krzywych lepkości jest niewielki i w najlepszym przypadku – dla środka Licomont BS 100 dodawanego do asfaltu zwykłego 50/70 – mógłby sięgać ok. 10°C, zaś dla pozostałych kombinacji innych dodatków jedynie kilka °C. Na podstawie uszeregowania poszczególnych kombinacji asfaltów z dodatkami można stwierdzić, że środek Licomont BS100 uzyskiwał również prawie zawsze największą skuteczność w obniżaniu lepkości asfaltu w temperaturach 160 i 135°C, niezależnie od jego rodzaju (zwykły lub modyfikowany). Na drugim miejscu występował zwykle środek Sasobit, przy czym po procesie starzenia TFOT asfalt modyfikowany z dodatkiem Sasobitu charakteryzował się w temperaturze 135°C lepkością większą nawet od czystego asfaltu modyfikowanego. W temperaturze 60°C zaobserwowano ogólny trend znacznego zwiększenia lepkości asfaltów z dodatkami pochodzenia organicznego, tj. Sasobitem i Licomontu BS100 w stosunku do pozostałych przypadków, co wynika z procesu krystalizacji tych substancji po obniżeniu temperatury poniżej punktu krzepnięcia. Dla pozostałych dodatków, tj. Rediset WMX oraz Ceca Base RT trudno stwierdzić jednoznaczne zależności. Lepkość asfaltu zwykłego 50/70 ze środkiem Ceca Base RT w temperaturach 160 była większa, niż czystego asfaltu, natomiast ten sam środek w połączeniu z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 owocował lepkością mniejszą od czystego lepiscza modyfikowanego. Jeszcze większe niejednoznaczności występowały w temperaturach 90 i 60°C. Prawdopodobną przyczyną tego stanu mógł być proces badania w lepkościomierzu obrotowym, podczas którego występowały trudności w uzyskiwaniu miarodajnych wyników w niższych temperaturach, zwłaszcza w 60°C. W temperaturze tej nie było możliwe

5.2. Analiza wyników badań mieszanek mineralno-asfaltowych

5.2.1. Analiza wyników badań stabilności wg Marshalla

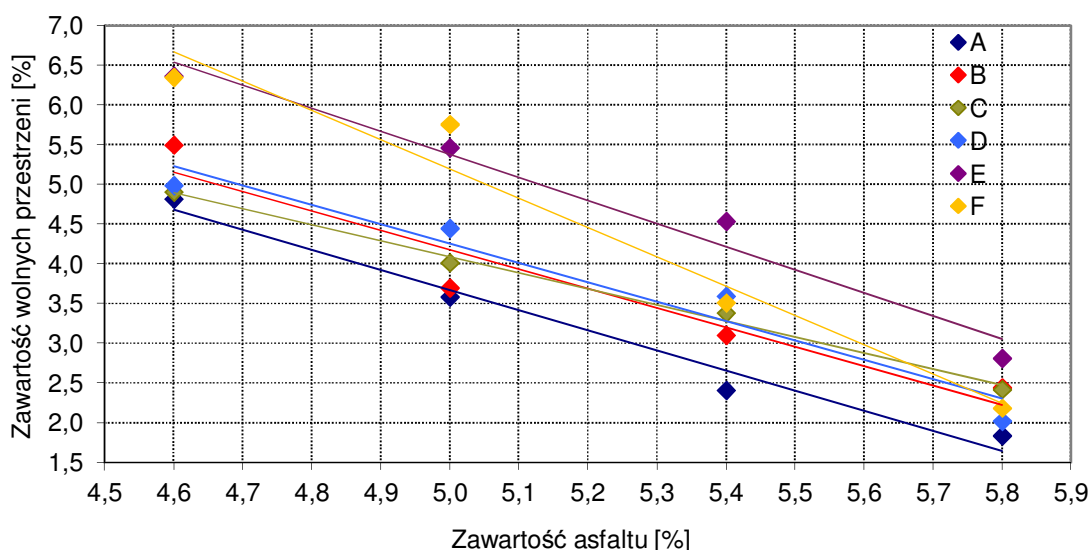
Badanie stabilności przeprowadzono na próbkach mieszanek mineralno-asfaltowych z czterema różnymi zawartościami asfaltu zwykłego 50/70 i modyfikowanego 45/80-55, tj:

- 4,60%
- 5,00%
- 5,40%
- 5,80%.

Parametry wytwarzania i zagęszczania mieszanek z asfaltem czystym oraz z dodatkami WMA (temperatura, ilość uderzeń ubijaka na jedną stronę próbki) były zgodne z opisem przedstawionym w punkcie 4.3.2. W tablicach 5.8 oraz 5.9 przedstawiono uzyskane zawartości wolnych przestrzeni w próbkach Marshalla w zależności od ilości asfaltu. Zależności graficzne dotyczące tych wielkości przedstawiono na rysunkach 5.9 oraz 5.10.

Tablica 5.8. Zawartość wolnych przestrzeni w próbkach Marshalla dla różnych zawartości lepiszcza – mieszanka z asfaltem zwykłym 50/70 czystym i z dodatkami

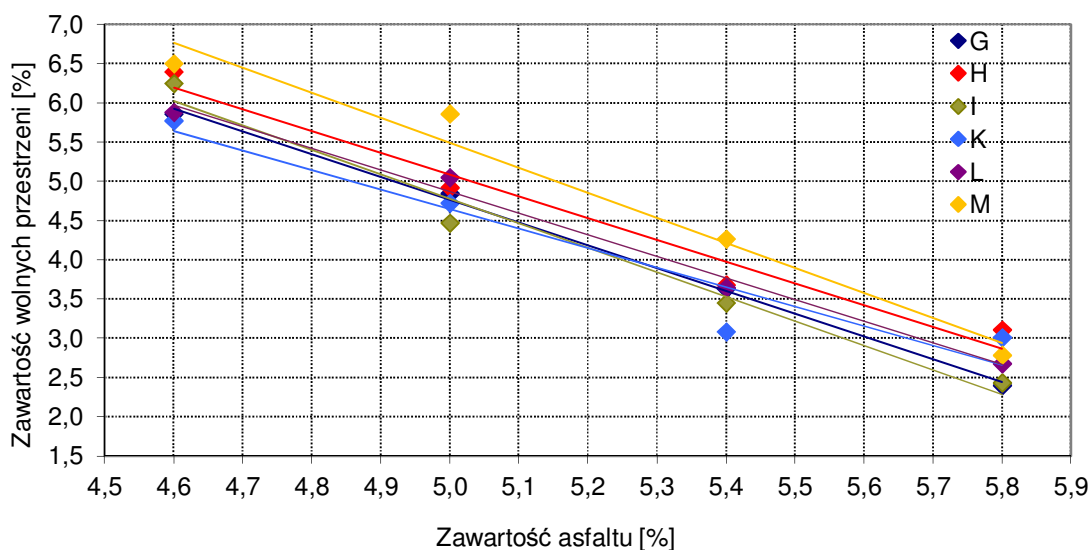
Rodzaj dodatku		Zawartość wolnych przestrzeni przy zawartości asfaltu [%]:			
		4,60	5,00	5,40	5,80
A	-	4,8	3,6	2,4	1,8
B	Sasobit	5,5	3,7	3,1	2,4
C	Licomont BS100	4,9	4,0	3,4	2,4
D	Rediset WMX	5,0	4,5	3,6	2,0
E	Ceca Base RT	6,4	5,5	4,5	2,8
F	Zeolit	6,4	5,8	3,5	2,2



Rys. 5.9. Wykres zawartości wolnych przestrzeni w próbkach Marshalla dla różnych zawartości lepiszcza – mieszanka z asfaltem zwykłym 50/70 czystym i z dodatkami

Tablica 5.9. Zawartość wolnych przestrzeni w próbkach Marshalla dla różnych zawartości lepiszcza – mieszanka z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 czystym i z dodatkami

Rodzaj dodatku		Zawartość wolnych przestrzeni przy zawartości asfaltu [%]:			
		4,60	5,00	5,40	5,80
G	-	5,9	4,8	3,6	2,4
H	Sasobit	6,4	4,9	3,7	3,1
I	Licomont BS100	6,2	4,5	3,5	2,1
K	Rediset WMX	5,8	4,7	3,1	3,0
L	Ceca Base RT	5,9	5,0	3,6	2,7
M	Zeolit	6,5	5,9	4,3	2,8



Rys. 5.10. Wykres zawartości wolnych przestrzeni w próbkach Marshalla dla różnych zawartości lepiszcza – mieszanka z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 czystym i z dodatkami

Osiągnięte stabilności próbek wykonanych z mieszanki mineralno-asfaltowej z asfaltem zwykłym 50/70 przedstawiono w tablicy 5.10, zaś z asfaltem modyfikowanym w tablicy 5.11.

Tablica 5.10. Stabilność Marshalla dla różnych zawartości lepiszcza – mieszanka z asfaltem zwykłym 50/70 czystym i z dodatkami

Rodzaj dodatku		Stabilność przy zawartości asfaltu [kN]:			
		4,60%	5,00%	5,40%	5,80%
A	-	11,0	11,6	9,9	9,1
B	Sasobit	9,0	8,8	10,5	9,8
C	Licomont BS100	11,8	11,1	9,5	10,1
D	Rediset WMX	8,2	8,1	8,0	7,7
E	Ceca Base RT	7,9	7,8	8,1	9,3
F	Zeolit	7,9	8,4	9,1	9,0

Tablica 5.11. Stabilność Marshalla dla różnych zawartości lepiszcza – mieszanka z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 czystym i z dodatkami

Rodzaj dodatku		Stabilność przy zawartości asfaltu [kN]:			
		4,60%	5,00%	5,40%	5,80%
G	-	12,5	12,9	13,1	13,3
H	Sasobit	10,0	13,9	13,5	13,0
I	Licomont BS100	10,4	10,7	10,8	11,1
K	Rediset WMX	11,0	11,2	11,2	10,1
L	Ceca Base RT	9,1	9,5	10,1	10,2
M	Zeolit	8,2	8,4	9,5	10,3

Zawartość wolnych przestrzeni w próbkach wykonanych z mieszanki z asfaltem zwykłym 50/70 wraz z dodatkami WMA i zagęszczanych w temperaturze mniejszej niż tradycyjna, była wbrew oczekiwaniom wyższa, niż zawartość wolnych przestrzeni w próbkach referencyjnej mieszanki z czystym asfaltem 50/70 zagęszczanej w normalnie stosowanej temperaturze. Widać to wyraźnie na rysunku 5.9, na którym linia dla mieszanki referencyjnej A z czystym asfaltem zwykłym 50/70 leży poniżej wszystkich pozostałych. Najmniejsze odchylenie wykazywały mieszanki z dodatkiem Sasobitu, Licomontu BS100 i Redisetu WMX, zaś największe z dodatkiem Ceca Base RT oraz zeolitem. Rozpiętość przedziału, w którym znajdowały się zawartości wolnych przestrzeni poszczególnych rodzajów mieszanki zależały też od zawartości samego lepiszcza. W przypadku największej zawartości asfaltu wynoszącej 5,8% różnice pomiędzy poszczególnymi rodzajami mieszanki ulegały zmniejszeniu i wszystkie wyniki mieściły się w jednoprocentowym przedziale. Próbkę wykonaną z mieszanki z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 charakteryzowały się znacznie mniejszymi różnicami zawartości wolnych przestrzeni i dla praktycznie dla wszystkich zawartości asfaltu oraz różnych dodatków nie różniły się więcej, niż o jeden procent. Wpływ środków obniżających temperaturę produkcji mieszanki mineralno-asfaltowych na parametr stabilności był niejednoznaczny. Generalnie, mieszanki z dodatkami WMA wytworzone i zagęszczone w temperaturze niższej (135°C) w stosunku do temperatury mieszanki referencyjnej (160°C) charakteryzowały się mniejszą stabilnością, przy czym jej najmniejszy spadek odnotowały mieszanki wytworzone ze środkiem Sasobit oraz Licomont BS 100, które przez swój skład powodują usztywnienie asfaltu. Najmniejszą stabilność posiadały mieszanki wyprodukowane ze środkiem Rediset WMX, Ceca Base RT oraz zeolitem, które nie zmieniają parametrów lepiszcza.

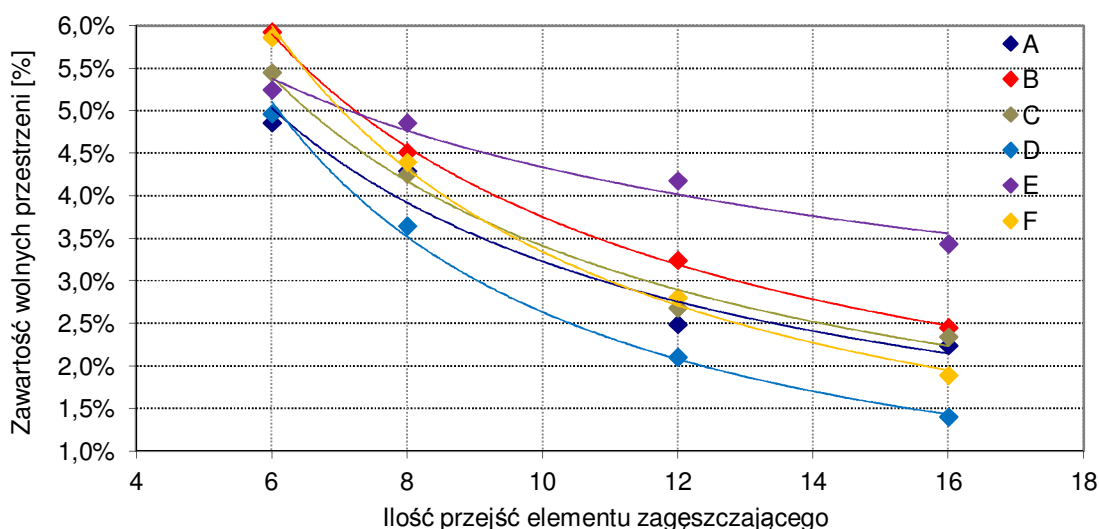
5.2.2. Analiza wyników badań zagęszczalności w zagęszczarce walcowej

Wyniki badań zagęszczalności przeprowadzonych w zagęszczarce walcowej według opisu zawartego w punkcie 4.4.2.2. i wyrażone za pomocą różnic zawartości wolnych przestrzeni w prostopadłościennych próbkach o wymiarach 150 x 150 x 60 mm przedstawiono w tablicach 5.12. – 5.15. oraz na rysunkach 5.15. – 5.18. W trakcie badań stosowano następujące porównawcze zestawienia temperatur zagęszczania:

- Próbki mieszanek z czystymi asfaltami zagęszczane w temperaturze 160°C porównywano z mieszankami zawierającymi asfalty z dodatkami WMA, które były zagęszczane w temperaturze 135 °C (tablica 5.12. i rysunek 5.13. oraz tablica 5.13. i rysunek 5.15).
- Próbki mieszanek z czystymi asfaltami zagęszczane w temperaturze 135°C porównywano z mieszankami zawierającymi asfalty z dodatkami WMA, które były zagęszczane w temperaturze 110 °C (tablica 5.14. i rysunek 5.14. oraz tablica 5.15. i rysunek 5.16).

Tablica 5.12. Zawartość wolnych przestrzeni w próbkach prostopadłościennych w zależności od ilości przejść elementu zagęszczającego – mieszanka z czystym asfaltem zwykłym 50/70 zagęszczana w 160 °C, mieszanki z dodatkami zagęszczane w 135 °C

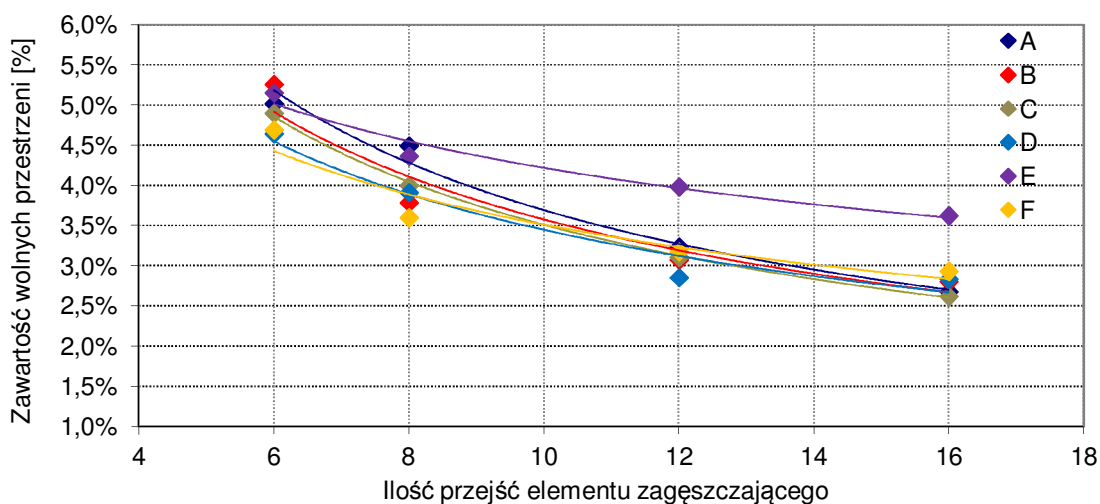
Rodzaj dodatku		Zawartość wolnych przestrzeni przy ilości przejść elementu zagęszczającego, [%]			
		6	8	12	16
A	-	4,9%	4,3%	2,5%	2,2%
B	Sasobit	5,9%	4,5%	3,2%	2,5%
C	Licomont BS100	5,5%	4,3%	2,7%	2,3%
D	Rediset WMX	5,0%	3,6%	2,1%	1,4%
E	Ceca Base RT	5,2%	4,9%	4,2%	3,4%
F	Zeolit	5,9%	4,4%	2,8%	1,9%



Rys. 5.13. Wykresy zawartości wolnych przestrzeni w próbkach prostopadłościennych w zależności od ilości przejść elementu zagęszczającego – mieszanka z czystym asfaltem zwykłym 50/70 zagęszczana w 160 °C, mieszanki z dodatkami zagęszczane w 135 °C

Tablica 5.13. Zawartość wolnych przestrzeni w próbkach prostopadłościennych w zależności od ilości przejść elementu zagęszczającego – mieszanka z czystym asfaltem zwykłym 50/70 zagęszczana w 135 °C, mieszanki z dodatkami zagęszczane w 110 °C

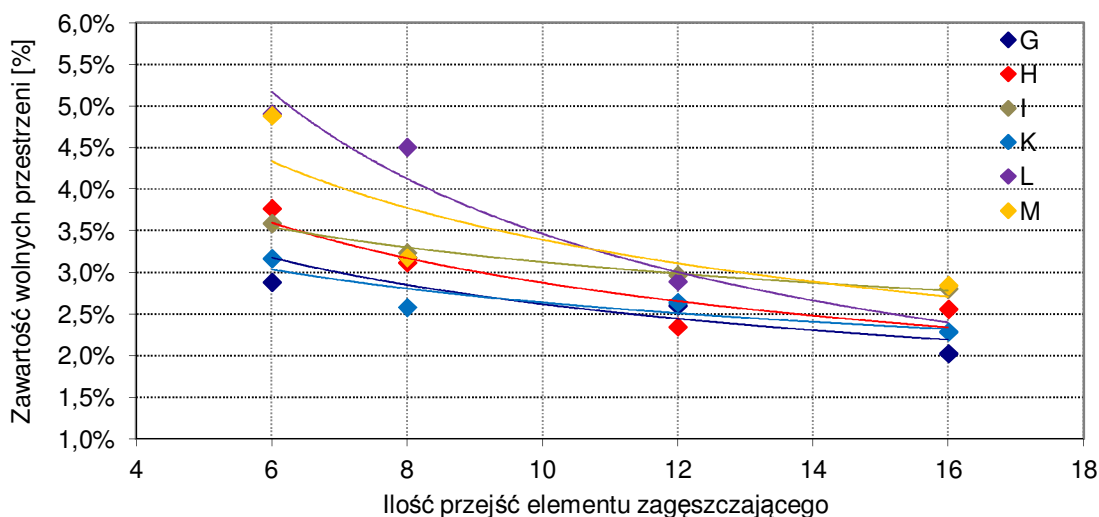
Rodzaj dodatku		Zawartość wolnych przestrzeni przy ilości przejść elementu zagęszczającego, [%]			
		6	8	12	16
A	-	5,0%	4,5%	3,2%	2,7%
B	Sasobit	5,3%	3,8%	3,1%	2,8%
C	Licomont BS100	4,9%	4,0%	3,1%	2,6%
D	Rediset WMX	4,6%	3,9%	2,9%	2,8%
E	Ceca Base RT	5,2%	4,4%	4,0%	3,6%
F	Zeolit	4,7%	3,6%	3,2%	2,9%



Rys. 5.14. Wykresy zawartości wolnych przestrzeni w próbkach prostopadłościennych w zależności od ilości przejść elementu zagęszczającego – mieszanka z czystym asfaltem zwykłym 50/70 zagęszczana w 135 °C, mieszanki z dodatkami zagęszczane w 110 °C

Tablica 5.14. Zawartość wolnych przestrzeni w próbkach prostopadłościennych w zależności od ilości przejść elementu zagęszczającego – mieszanka z czystym asfaltem modyfikowanym 45/80-55 zagęszczana w 160 °C, mieszanki z dodatkami zagęszczane w 135 °C

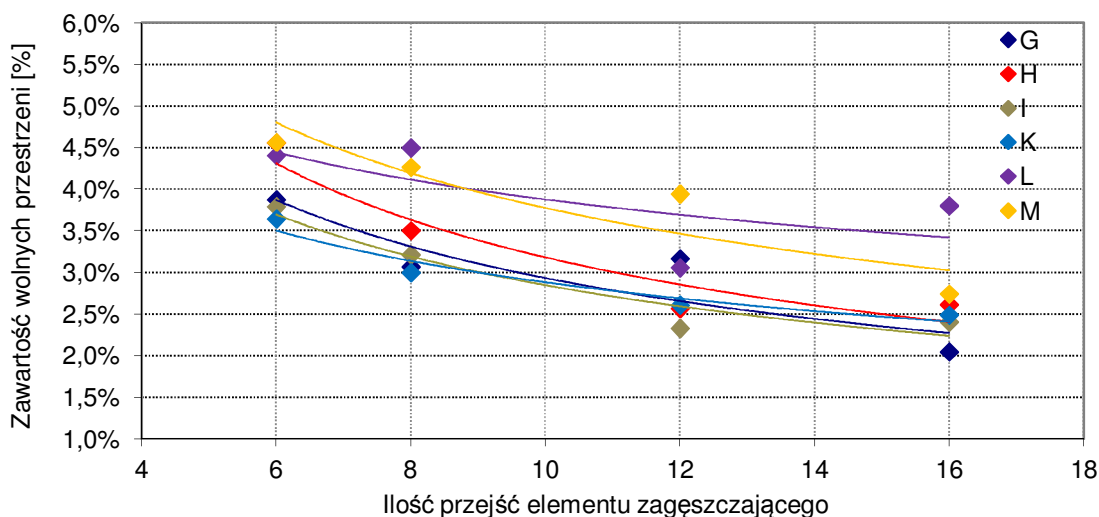
Rodzaj dodatku		Zawartość wolnych przestrzeni przy ilości przejść elementu zagęszczającego, [%]			
		6	8	12	16
G	-	2,9%	3,2%	2,6%	2,0%
H	Sasobit	3,8%	3,1%	2,4%	2,6%
I	Licomont BS100	3,6%	3,2%	3,0%	2,8%
K	Rediset WMX	3,2%	2,6%	2,6%	2,3%
L	Ceca Base RT	4,9%	4,5%	2,9%	
M	Zeolit	4,9%	3,2%		2,8%



Rys. 5.15. Wykresy zawartości wolnych przestrzeni w próbkach prostopadłościennych w zależności od ilości przejść elementu zagęszczającego – mieszanka z czystym asfaltem modyfikowanym 45/80-55 zagęszczana w 160 °C, mieszanki z dodatkami zagęszczane w 135 °C

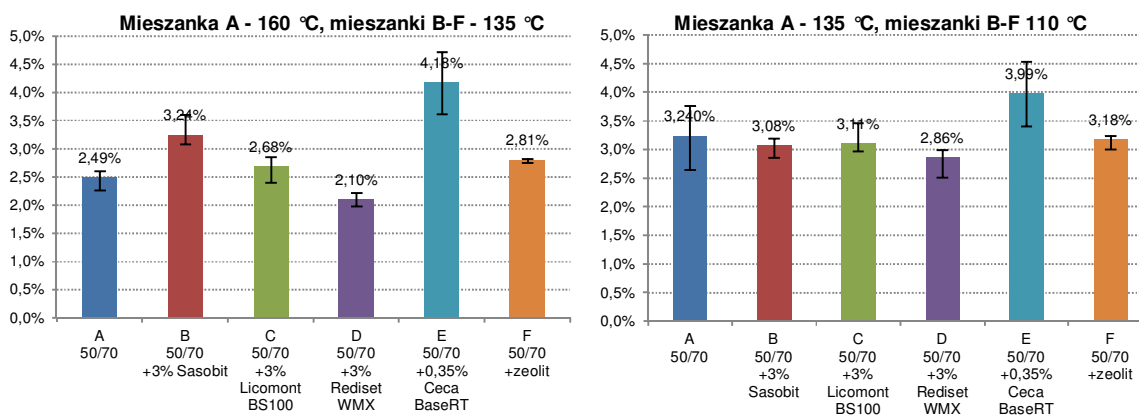
Tablica 5.15. Zawartość wolnych przestrzeni w próbkach prostopadłościennych w zależności od ilości przejść elementu zagęszczającego – mieszanka z czystym asfaltem modyfikowanym 45/80-55 zagęszczana w 135 °C, mieszanki z dodatkami zagęszczane w 110 °C

Rodzaj dodatku		Zawartość wolnych przestrzeni przy ilości przejść elementu zagęszczającego, [%]			
		6	8	12	16
G	-	3,9%	3,1%	3,2%	2,0%
H	Sasobit	4,6%	3,5%	2,6%	2,6%
I	Licomont BS100	3,8%	3,2%	2,3%	2,4%
K	Rediset WMX	3,6%	3,0%	2,6%	2,5%
L	Ceca Base RT	4,4%	4,5%	3,1%	3,8%
M	Zeolit	4,6%	4,3%	3,9%	2,7%

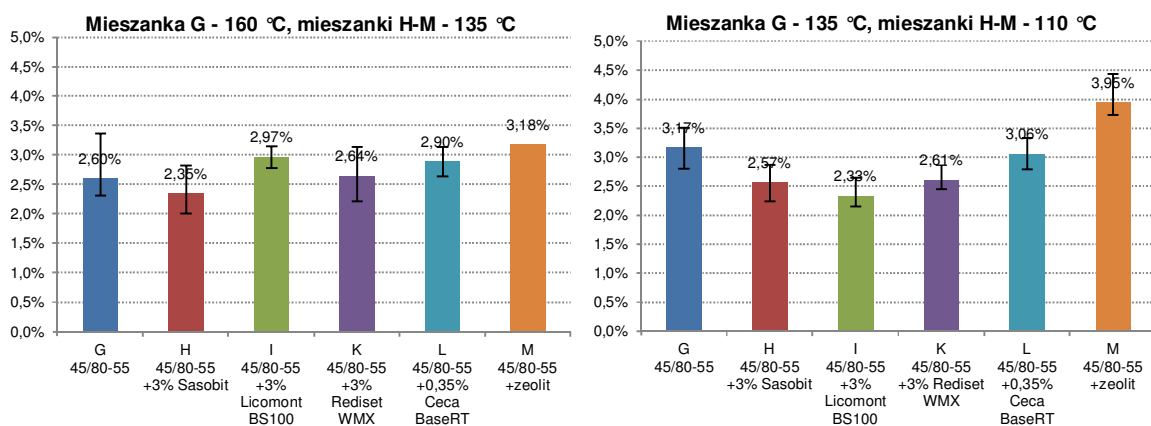


Rys. 5.16. Wykresy zawartości wolnych przestrzeni w próbkach prostopadłościennych w zależności od ilości przejść elementu zagęszczającego – mieszanka z czystym asfaltem modyfikowanym 45/80-55 zagęszczana w 135 °C, mieszanki z dodatkami zagęszczane w 110 °C

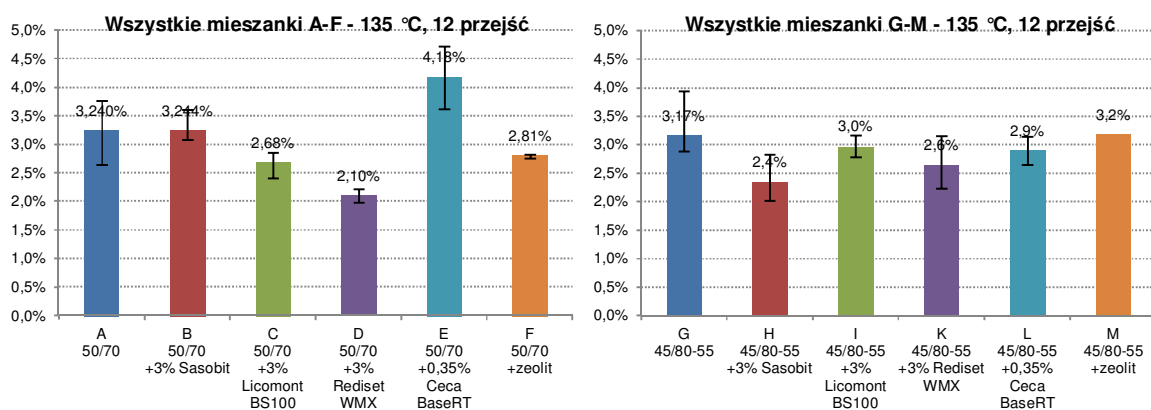
W celu porównawczych na rysunkach 5.16 i 5.17 pokazano wykresy przedstawiające uzyskane zawartości wolnych przestrzeni dla różnych mieszanek przy jednej, wybranej ilości 12 przejść elementu zagęszczającego. Na rysunkach 5.18 i 5.19 pokazano porównanie zawartości wolnych przestrzeni osiągnięte przy 12 i 8 przejściach elementu zagęszczającego przy jednakowej temperaturze 135 °C, zarówno dla mieszanek referencyjnych, jak i z dodatkami WMA.



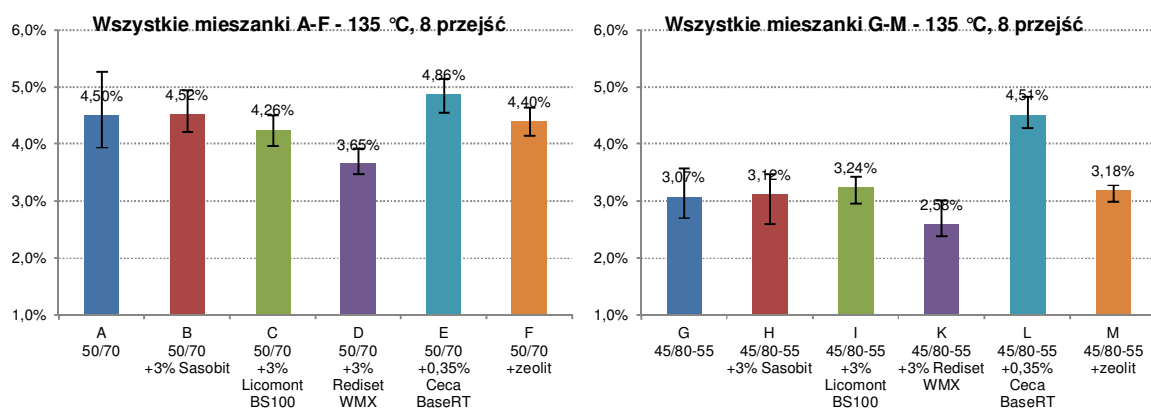
Rys. 5.16. Porównanie zawartości wolnych przestrzeni w próbkach wykonanych z asfaltem zwykłym 50/70 przy 12 przejściach elementu zagęszczającego



Rys. 5.17. Porównanie zawartości wolnych przestrzeni w próbkach wykonanych z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 przy 12 przejściach elementu zagęszczającego



Rys. 5.18. Porównanie zawartości wolnych przestrzeni w próbkach wykonanych z asfaltem zwykłym i modyfikowanym przy 12 przejściach elementu zagęszczającego – jednakowa temperatura zagęszczania próbek mieszanek referencyjnych oraz z dodatkami WMA



Rys. 5.19. Porównanie zawartości wolnych przestrzeni w próbkach wykonanych z asfaltem zwykłym i modyfikowanym przy 8 przejściach elementu zagęszczającego – jednakowa temperatura zagęszczania próbek mieszanek referencyjnych oraz z dodatkami WMA

Z przeprowadzonych badań zagęszczalności wynikają następujące wnioski:

- Przy obniżeniu temperatury zagęszczania mieszanki z asfaltem zwykłym 50/70 z 160 °C do 135 °C oraz z 135 °C do 110 °C po wprowadzeniu dodatków WMA otrzymano podobną zawartość wolnych przestrzeni w mieszance referencyjnej, jak w mieszankach z dodatkiem Sasobitu, Licomontu BS100, Redisetu WMX oraz zeolitu. Gorsze zagęszczenie występowało w mieszance ze środkiem Ceca Base RT.
- W przypadku asfaltu modyfikowanego 45/80-55 i obniżeniu temperatury zagęszczenia z 160 °C do 135 °C otrzymano podobną zawartość wolnych przestrzeni w mieszance referencyjnej, jak i z dodatkami WMA. Przy obniżeniu temperatury z 135 °C do 110 °C zaobserwowano pozytywny wpływ dodatku Sasobitu, Licomontu BS100, Redisetu WMX, Ceca Base RT. Gorsze zagęszczenie odnotowano dla mieszanki z dodatkiem zeolitu.
- Z porównania wyników mieszanek referencyjnych oraz z dodatkami WMA z asfaltem zwykłym 50/70 i zagęszczanych 12 przejściami elementu zagęszczającego w jednakowej temperaturze 135 °C wynika, że zagęszczalność mieszanek poprawiła się w przypadku dodatków Licomont BS100, Rediset WMX oraz zeolitu, nie zmieniła się przy dodatku Sasobitu, zaś pogorszyła się w przy dodatku Ceca Base RT. Podobny trend wystąpił przy mniejszej energii zagęszczenia, tj. 8 przejściach elementu zagęszczającego.
- W przypadku asfaltu modyfikowanego 45/80-55, jednakowej temperaturze 135 °C oraz 12 przejściach zagęszczalność uległa poprawie bądź nie zmieniła się. Przy 8 przejściach nie zaobserwowano polepszenia zagęszczalności przez dodatki WMA, zaś dla mieszanki z dodatkiem Ceca Base RT uległa ona pogorszeniu.
- Podsumowując, z przeprowadzonych badań zagęszczalności nie uzyskano jednoznacznych rezultatów, które potwierdzałyby wyraźnej poprawy szczelności po wprowadzeniu do mieszanek dodatków WMA. Według doktoranta, brak wyraźnego wpływu dodatków WMA na zagęszczalność mieszanek mineralno-asfaltowych badanych w laboratorium może wynikać z braku dokładnego odwzorowania procesu zagęszczania występującego w warunkach rzeczywistych.

5.2.3. Analiza wyników badań odporności na działanie wody i mrozu

Wyniki badań odporności mieszanek mineralno-asfaltowych na działanie wody i mrozu przeprowadzonych według procedury opisanej w punkcie 4.4.2.3. przedstawiono w tablicach 5.18. – 5.21. Zawierają one wartości wytrzymałości na pośrednie rozciąganie i modułów sztywności sprężystej dla różnych serii próbek (referencyjnych i poddawanych cykлом kondycjonowania) oraz obliczone na ich podstawie wskaźniki ITSR (Indirect Tensile Strength Ratio) oraz RMR (Resilient Modulus Ratio).

Tablica 5.18. Wytrzymałości na pośrednie rozciąganie oraz wskaźniki ITSR próbek mieszanek mineralno-asfaltowych z asfaltem zwykłym 50/70 czystym i z dodatkami

Rodzaj dodatku	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie próbek referencyjnych [MPa]	Wyniki dla próbek kondycjonowanych				
		Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie próbek bez cyklu zamrażania [MPa]	Wytrzymałość na pośrednie próbek z cyklem zamrażania [MPa]	Wskaźnik wytrzymałości ITSR dla próbek bez cyklu zamrażania	Wskaźnik wytrzymałości ITSR dla próbek z cyklem zamrażania	
A	-	1,81	1,63	1,56	90,0%	86,1%
B	Sasobit	1,81	1,79	1,58	98,6%	87,1%
C	Licomont BS100	1,63	1,52	1,46	93,3%	89,2%
D	Rediset WMX	1,79	1,67	1,76	93,1%	98,4%
E	Ceca Base RT	1,86	1,75	1,66	93,9%	89,3%
F	Zeolit	1,74	1,68	1,59	96,8%	91,5%

Tablica 5.19. Moduły sztywności sprężystej oraz wskaźniki RMR próbek mieszanek mineralno-asfaltowych z asfaltem zwykłym 50/70 czystym i z dodatkami

Rodzaj dodatku	Moduł sztywności sprężystej próbek referencyjnych [MPa]	Wyniki dla próbek kondycjonowanych				
		Moduł sztywności sprężystej próbek bez cyklu zamrażania [MPa]	Moduł sztywności sprężystej próbek z cyklem zamrażania [MPa]	Wskaźnik modułu sztywności sprężystej RMR dla próbek bez cyklu zamrażania	Wskaźnik modułu sztywności sprężystej RMR dla próbek z cyklem zamrażania	
A	-	6500	6191	6952	95,2%	106,9%
B	Sasobit	8624	9225	7791	107,0%	90,3%
C	Licomont BS100	7172	7892	6896	110,0%	96,2%
D	Rediset WMX	7073	7587	7064	107,3%	99,9%
E	Ceca Base RT	7210	6805	6279	94,4%	87,1%
F	Zeolit	5986	6537	6331	109,2%	105,8%

Tablica 5.20. Wytrzymałości na pośrednie rozciąganie oraz wskaźniki ITSR próbek mieszanek mineralno-asfaltowych z asfaltem mody. 45/80-55 czystym i z dodatkami

Rodzaj dodatku	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie świadków [MPa]	Wyniki dla próbek kondycjonowanych				
		Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie próbek bez cyklu zamrażania [MPa]	Wytrzymałość na pośrednie próbek z cyklem zamrażania [MPa]	Wskaźnik wytrzymałości ITSR dla próbek bez cyklu zamrażania	Wskaźnik wytrzymałości ITSR dla próbek z cyklem zamrażania	
G	-	1,67	1,59	1,50	95,0%	89,9%
H	Sasobit	2,03	1,87	1,96	92,3%	96,5%
I	Licomont BS100	1,71	1,74	1,71	101,9%	100,1%
K	Rediset WMX	1,87	1,74	1,83	92,8%	101,1%
L	Ceca Base RT	1,74	1,79	1,78	103,2%	102,7%
M	Zeolit	1,66	1,49	1,58	89,6%	95,0%

Tablica 5.21. Moduły sztywności sprężystej oraz wskaźniki RMR próbek mieszanek mineralno-asfaltowych z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 czystym i z dodatkami

Rodzaj dodatku	Moduł sztywności sprężystej świadków [MPa]	Wyniki dla próbek kondycjonowanych				
		Moduł sztywności sprężystej próbek bez cyklu zamrażania [MPa]	Moduł sztywności sprężystej próbek z cyklem zamrażania [MPa]	Wskaźnik modułu sztywności sprężystej RMR dla próbek bez cyklu zamrażania	Wskaźnik modułu sztywności sprężystej RMR dla próbek z cyklem zamrażania	
G	-	5506	4914	5979	89,2%	108,6%
H	Sasobit	9578	8107	9276	84,6%	96,9%
I	Licomont BS100	6622	6299	7125	95,1%	107,6%
K	Rediset WMX	6321	5440	6559	86,1%	103,8%
L	Ceca Base RT	6973	6115	6899	87,7%	98,9%
M	Zeolit	4266	4217	5587	98,9%	131,0%

Z otrzymanych wyników badań wynika, że żaden ze środków obniżających temperaturę produkcji i wbudowania mieszanek mineralno-asfaltowych nie wpłynął negatywnie na ich zachowanie pod kątem odporności na działanie wody i mrozu, pomimo że mieszanki zawierające dodatki WMA były wytwarzane i zagęszczane w niższej temperaturze. W przypadku mieszanek z asfaltem zwykłym 50/70 przekroczenie wymaganego przez polskie wytyczne WT-2 2008 dla warstwy ścieralnej progu ITSR = 90% dla próbek z cyklem zamrażania udało się uzyskać jedynie dla mieszanek wytworzonych ze środkiem Rediset WMX oraz zeolitem, jednakże należy zaznaczyć że dla każdego z pozostałych środków uzyskana wartość ITSR była i tak większa, niż w przypadku mieszanki z czystym asfaltem zwykłym 50/70, która osiągnęła najniższy poziom wskaźnika ITSR po cyklu zamrażania równy 86,1%. Pozostałe mieszanki z innymi środkami uzyskały poziom wskaźnika ITSR bliski poziomowi 90% (87,1 – 89,3%). W serii próbek bez cyklu zamrażania mieszanka z czystym asfaltem zwykłym 50/70 również wykazała się najmniejszą wartością wskaźnika ITSR, który wyniósł 90,0%, zaś pozostałe mieszanki z dodatkami WMA charakteryzowały się wskaźnikami ITSR o kilka procent wyższymi (93,1 – 98,6%). Mieszanki z badanymi dodatkami spełniłyby z dużym zapasem wymagania amerykańskie, które określają wymaganą wartość wskaźnika TSR (Tensile Strength Ratio) na poziomie 80%. Analizując wartości bezwzględne wytrzymałości na pośrednie rozciąganie można zauważyć, że niezależnie od serii próbek (tj. referencyjne, bez i z cyklem zamrażania) różnice wartości pomiędzy poszczególnymi rodzajami mieszanek są niewielkie i nie przekraczają 0,2 – 0,3 MPa. Taki poziom różnic jest typowy dla wyników badania odporności na działanie wody i mrozu, nawet w przypadku próbek jednorodnych. Mogą one wynikać z niejednorodności samego materiału, jakim jest mieszanka mineralno-asfaltowa, a nie z wpływu dodatków WMA.

W przypadku mieszanek z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 wartość wskaźnika ITSR po cyklu zamrażania dla próbek wytworzonych tylko z czystym asfaltem

modyfikowanym ponownie była najniższa (89,9%). Wskaźniki ITSR po cyklu zamrażania dla wszystkich mieszanki z asfaltem modyfikowanym i dodatkami obniżającymi temperaturę przekroczyły zaś wymagany poziom 90%. W trybie badania bez cyklu zamrażania najmniejszy wskaźnik ITSR odnotowano dla mieszanki z dodatkiem zeolitu (89,6%). Rozrzut wartości bezwzględnych był nieco większy niż w przypadku asfaltu zwykłego, przy czym wyraźnie większą wytrzymałością charakteryzowały się próbki z dodatkiem Sasobitu, niezależnie od serii próbek.

W wynikach badania modułów sztywności sprężystej i odpowiadających im wskaźników RMR zaobserwowano wyraźny wpływ dodatku Sasobit na wartości bezwzględne modułów. Zarówno dla asfaltu zwykłego 50/70, jak i modyfikowanego 45/80-55 mieszanki z Sasobitem charakteryzowały się niezależnie od serii próbek wyraźnie wyższymi modułami. Inne zależności były dość niejednoznaczne.

Warty odnotowania jest fakt, że w badanych mieszankach nie stosowano środka adhezyjnego. Uzyskane wyniki badania wytrzymałości na pośrednie rozciąganie (tj. jej zwiększenie dla mieszanek zawierających dodatki WMA) wskazują, że wprowadzenie do składu mieszanki dodatku WMA w postaci środka modyfikującego lepkość bądź działającego powierzchniowo czynnie pozwala nie tylko na obniżenie temperatury produkcji, ale również zapewnia lepsze otoczenie ziaren kruszywa lepiszczem zwiększając tym samym odporność na działanie wody i mrozu, bez dodatkowych tradycyjnych środków adhezyjnych.

5.2.4. Analiza wyników badań wpływu starzenia

W kolejnych tablicach i rysunkach przedstawiono wyniki badań wpływu starzenia na badane mieszanki mineralno-asfaltowe, wyrażone poprzez następujące parametry:

- bezwzględne wartości wytrzymałości na pośrednie rozciąganie określanych w czterech temperaturach dla serii próbek kontrolnych oraz poddanych starzeniu krótko- i długoterminowemu,
- bezwzględne wartości modułów sztywności sprężystej określanych w czterech temperaturach dla serii próbek kontrolnych oraz poddanych starzeniu krótko- i długoterminowemu,
- odpowiadające obu parametrom wskaźniki zmian obliczone na podstawie stosunków ich wartości bezwzględnych.

Tablica 5.22. Zestawienie średnich wartości wytrzymałości na pośrednie rozciąganie w różnych temperaturach dla próbek z asfaltem zwykłym 50/70 czystym i z dodatkami WMA

Rodzaj próbek	Temperatura badania wytrzymałości przy pośrednim rozciąganiu [°C]	A	B	C	D	E	F
		-	Sasobit	Licomont BS 100	Rediset WMS	Ceca BaseRT	zeolit
Grupa kontrolna N.S.	+20	2,13	2,37	1,88	2,14	2,17	1,96
	+10	3,90	4,24	3,56	3,81	3,91	3,95
	0	4,84	4,74	4,82	4,63	5,00	4,58
	-10	4,47	4,67	4,70	4,46	4,89	4,74
Starzenie krótkoterm. S.K.S.	+20	2,19	2,46	2,28	2,15	2,34	-*
	+10	3,83	4,06	3,58	4,04	4,26	-*
	0	4,77	4,80	4,63	4,84	4,63	-*
	-10	4,90	**	**	**	**	-*
Starzenie długoterm. S.D.S.	+20	2,12	2,47	2,30	2,27	2,37	2,07
	+10	4,17	3,78	4,05	4,13	4,26	4,10
	0	4,68	4,64	4,69	4,61	4,73	4,83
	-10	4,87	4,83	4,23	4,49	4,67	4,91

N.S – nie starzone; S.K.S – starzenie krótkoterminowe w suszarce S.D.S – starzenie długoterminowe w suszarce

* - brak możliwości przeprowadzenia starzenia krótkoterminowego z uwagi na charakter działania zeolitu

** - awaria urządzenia badawczego

Tablica 5.23. Zestawienie średnich wartości modułów sztywności sprężystej w różnych temperaturach dla próbek z asfaltem zwykłym 50/70 (czystym i z dodatkami)

Rodzaj próbek	Temperatura badania modułu sztywności [°C]	A	B	C	D	E	F
		-	Sasobit	Licomont BS 100	Rediset WMS	Ceca BaseRT	zeolit
Grupa kontrolna N.S.	+20	7 939	11 803	7 584	8 703	7 565	5 995
	+10	14 168	17 473	13 717	13 621	11 574	11 281
	0	19 901	21 081	20 771	21 572	22 491	23 095
	-10	24 540	27 400	22 618	25 121	22 336	22 771
Starzenie krótkoterm. S.K.S.	+20	8 992	13 088	10 428	9 824	8 768	-*
	+10	13 365	16 909	14 252	14 226	15 355	-*
	0	20 094	24 843	24 521	23 382	20 247	-*
	-10	25 525	25 388	24 560	26 347	25 855	-*
Starzenie długoterm. S.D.S.	+20	10 502	13 562	10 916	10 633	9 899	6 812
	+10	15 467	18 161	17 271	16 496	15 549	13 269
	0	16 783	20 129	19 979	18 366	17 548	16 287
	-10	22 438	23 117	22 562	21 513	21 918	22 183

N.S – nie starzone; S.K.S – starzenie krótkoterminowe w suszarce S.D.S – starzenie długoterminowe w suszarce

* - brak możliwości przeprowadzenia starzenia krótkoterminowego z uwagi na charakter działania zeolitu

Tablica 5.24. Zestawienie średnich wartości wskaźników wytrzymałości na pośrednie rozciąganie w różnych temperaturach dla próbek z asfaltem zwykłym 50/70 czystym i z dodatkami

Rodzaj wskaźnika WR	Temperatura badania wytrzymałości przy pośrednim rozciąganiu [°C]	A	B	C	D	E	F
		-	Sasobit	Licomont BS 100	Rediset WMS	Ceca BaseRT	zeolit
Starzenie krótkoterm. S.K.S./N.S.	+20	1,03	1,04	1,21	1,00	1,08	_*
	+10	0,98	0,96	1,01	1,06	1,09	_*
	0	0,99	1,01	0,96	1,05	0,93	_*
	-10	1,09	_**	_**	_**	_**	_*
Starzenie całkowite S.D.S./N.S.	+20	0,99	1,04	1,22	1,06	1,09	1,06
	+10	1,07	0,89	1,14	1,08	1,09	1,04
	0	0,97	0,98	0,97	1,00	0,95	1,06
	-10	1,09	1,04	0,90	1,01	0,96	1,04
Starzenie długoterminowe S.D.S./S.K.S.	+20	0,97	1,01	1,01	1,06	1,01	_*
	+10	1,09	0,9	1,13	1,02	1,00	_*
	0	0,98	0,97	1,01	0,95	1,02	_*
	-10	1,00	_**	_**	_**	_**	_*

N.S – nie starzone; S.K.S – starzenie krótkoterminowe w suszarce S.D.S – starzenie długoterminowe w suszarce

* - brak możliwości przeprowadzenia starzenia krótkoterminowego z uwagi na charakter działania zeolitu

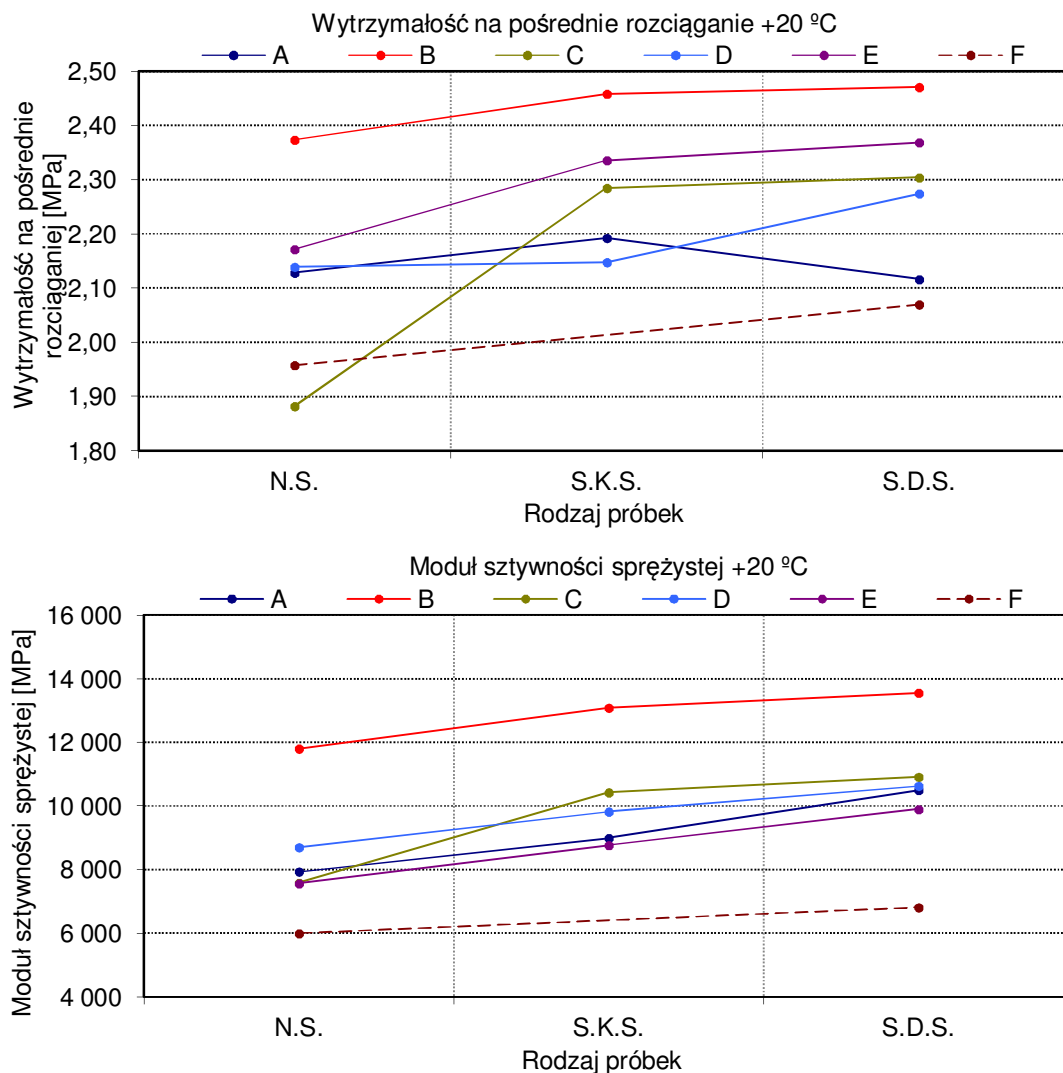
** - awaria urządzenia badawczego

Tablica 5.25. Zestawienie średnich wartości wskaźników modułów sztywności sprężystej w różnych temperaturach dla próbek z asfaltem zwykłym 50/70 czystym i z dodatkami

Rodzaj wskaźnika WS	Temperatura badania modułu sztywności [°C]	A	B	C	D	E	F
		-	Sasobit	Licomont BS 100	Rediset WMS	Ceca BaseRT	zeolit
Starzenie krótkoterm. S.K.S./N.S.	+20	1,13	1,11	1,37	1,13	1,16	_*
	+10	0,94	0,97	1,04	1,04	1,33	_*
	0	1,01	1,18	1,18	1,08	0,90	_*
	-10	1,04	0,93	1,09	1,05	1,16	_*
Starzenie całkowite S.D.S./N.S.	+20	1,32	1,15	1,44	1,22	1,31	1,14
	+10	1,09	1,04	1,26	1,21	1,34	1,18
	0	0,84	0,95	0,96	0,85	0,78	0,71
	-10	0,91	0,84	1,00	0,86	0,98	0,97
Starzenie długoterminowe S.D.S./S.K.S.	+20	1,17	1,04	1,05	1,08	1,13	_*
	+10	1,16	1,07	1,21	1,16	1,01	_*
	0	0,84	0,81	0,81	0,79	0,87	_*
	-10	0,88	0,91	0,92	0,82	0,85	_*

N.S – nie starzone; S.K.S – starzenie krótkoterminowe w suszarce S.D.S – starzenie długoterminowe w suszarce

* - brak możliwości przeprowadzenia starzenia krótkoterminowego z uwagi na charakter działania zeolitu



Rys. 5.20. Wykresy średnich wartości wytrzymałości na pośrednie rozciąganie oraz modułów sztywności w temperaturze +20°C dla próbek z asfaltem zwykłym 50/70 czystym i z dodatkami

Tablica 5.26. Zestawienie średnich wartości wytrzymałości na pośrednie rozciąganie w różnych temperaturach dla próbek z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 czystym i z dodatkami

Rodzaj próbek	Temperatura badania wytrzymałości przy pośrednim rozciąganiu [°C]	G	H	I	K	L	M
		-	Sasobit	Licomont BS 100	Rediset WMS	Ceca BaseRT	zeolit
Grupa kontrolna N.S.	+20	1,75	1,79	1,63	1,52	1,64	1,67
	+10	3,14	3,30	3,18	2,94	3,10	3,06
	0	3,74	3,50	4,81	4,86	3,86	4,87
	-10	4,47	4,69	4,84	4,07	5,27	4,83
Starzenie krótkoterm. S.K.S.	+20	1,74	1,84	1,60	1,63	1,73	-*
	+10	3,73	3,87	3,28	3,16	3,61	-*
	0	3,69	3,77	4,23	4,12	4,52	-*
	-10	4,58	5,26	4,69	4,28	5,08	-*
Starzenie długoterm. S.D.S.	+20	1,79	1,97	1,63	1,75	1,84	1,63
	+10	3,35	3,43	2,96	3,29	3,59	3,29
	0	4,80	4,75	3,89	4,22	4,23	4,74
	-10	4,60	5,03	4,00	4,73	5,04	4,87

N.S – nie starzone; S.K.S – starzenie krótkoterminowe w suszarce S.D.S – starzenie długoterminowe w suszarce

* - brak możliwości przeprowadzenia starzenia krótkoterminowego z uwagi na charakter działania zeolitu

Tablica 5.27. Zestawienie średnich wartości modułów sztywności sprężystej w różnych temperaturach dla próbek z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 czystym i z dodatkami

Rodzaj próbek	Temperatura badania modułu sztywności [°C]	G	H	I	K	L	M
		-	Sasobit	Licomont BS 100	Rediset WMS	Ceca BaseRT	zeolit
Grupa kontrolna N.S.	+20	4 162	6 890	5 494	4 407	4 436	6 115
	+10	8 224	11 068	10 114	8 657	7 965	7 663
	0	13 372	15 659	15 231	14 295	14 351	13 688
	-10	17 731	19 170	19 361	18 100	18 397	16 850
Starzenie krótkoterm. S.K.S.	+20	4 704	6 573	5 064	5 003	4 286	-*
	+10	8 244	11 208	9 211	8 879	8 472	-*
	0	13 989	15 964	14 617	14 212	13 956	-*
	-10	17 253	19 433	19 384	18 569	18 213	-*
Starzenie długoterm. S.D.S.	20	5 977	8 963	6 326	5 836	4 967	6 209
	10	9 198	9 321	9 326	9 055	7 707	8 276
	0	14 616	16 255	14 699	13 767	13 158	13 950
	-10	18 090	18 440	17 557	17 289	16 754	17 097

N.S – nie starzone; S.K.S – starzenie krótkoterminowe w suszarce S.D.S – starzenie długoterminowe w suszarce

* - brak możliwości przeprowadzenia starzenia krótkoterminowego z uwagi na charakter działania zeolitu

Tablica 5.28. Zestawienie średnich wartości wskaźników wytrzymałości na pośrednie rozciąganie w różnych temperaturach dla próbek z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 czystym i z dodatkami

Rodzaj wskaźnika WR	Temperatura badania wytrzymałości przy pośrednim rozciąganiu [°C]	G	H	I	K	L	M
		-	Sasobit	Licomont BS 100	Rediset WMS	Ceca BaseRT	zeolit
Starzenie krótkoterminowe S.K.S./N.S.	+20	0,99	1,03	0,98	1,08	1,05	-*
	+10	1,19	1,17	1,03	1,07	1,16	-*
	0	0,99	1,08	0,88	0,85	1,17	-*
	-10	1,03	1,12	0,97	1,05	0,96	-*
Starzenie całkowite S.D.S./N.S.	+20	1,03	1,10	1,00	1,15	1,12	0,97
	+10	1,07	1,04	0,93	1,12	1,15	1,07
	0	1,28	1,36	0,81	0,87	1,10	0,98
	-10	1,03	1,07	0,83	1,16	0,97	1,01
Starzenie długoterminowe S.D.S./S.K.S.	+20	1,03	1,07	1,02	1,07	1,06	-*
	+10	0,90	0,89	0,90	1,04	1,00	-*
	0	1,30	1,26	0,92	1,03	0,94	-*
	-10	1,00	0,96	0,85	1,11	0,99	-*

N.S – nie starzone; S.K.S – starzenie krótkoterminowe w suszarce S.D.S – starzenie długoterminowe w suszarce

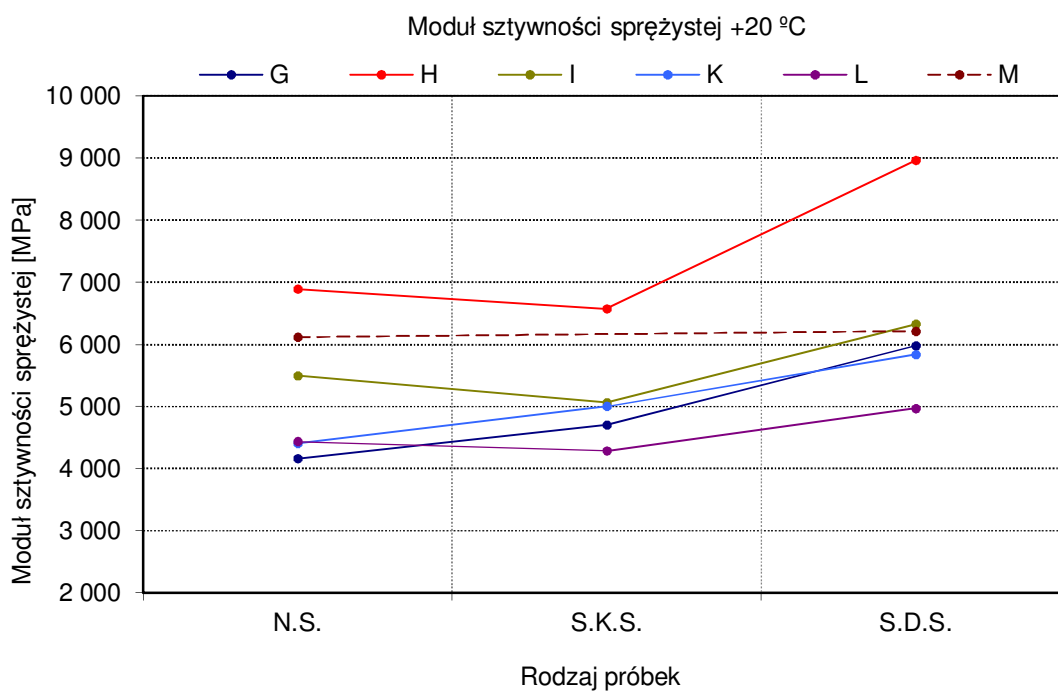
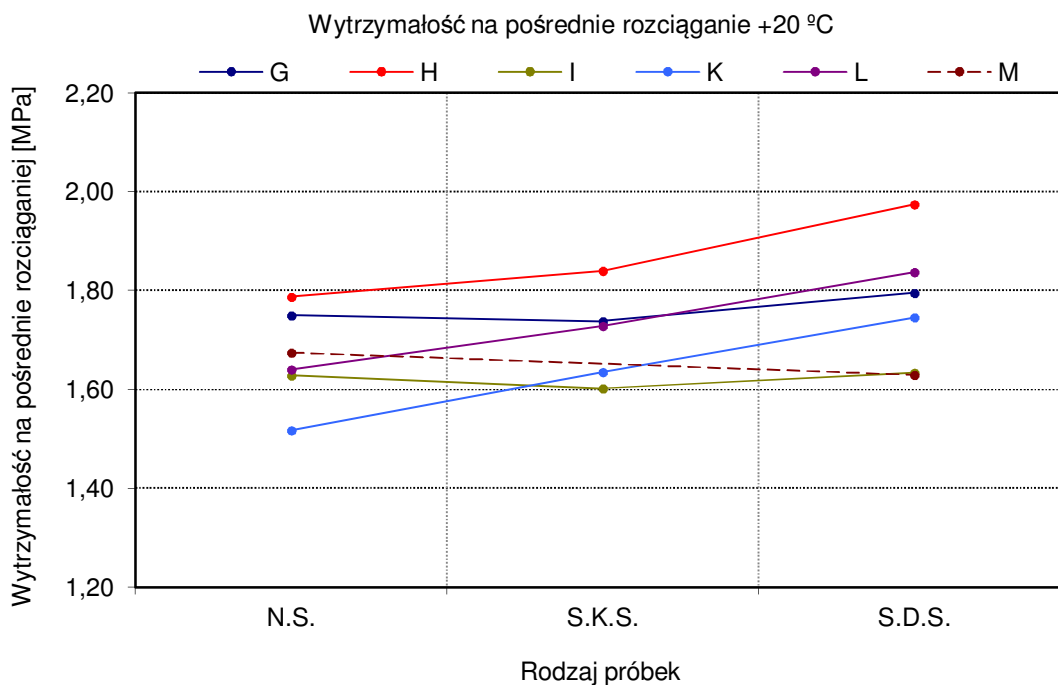
* - brak możliwości przeprowadzenia starzenia krótkoterminowego z uwagi na charakter działania zeolitu

Tablica 5.29. Zestawienie średnich wartości wskaźników modułów sztywności sprężystej w różnych temperaturach dla próbek z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 czystym i z dodatkami

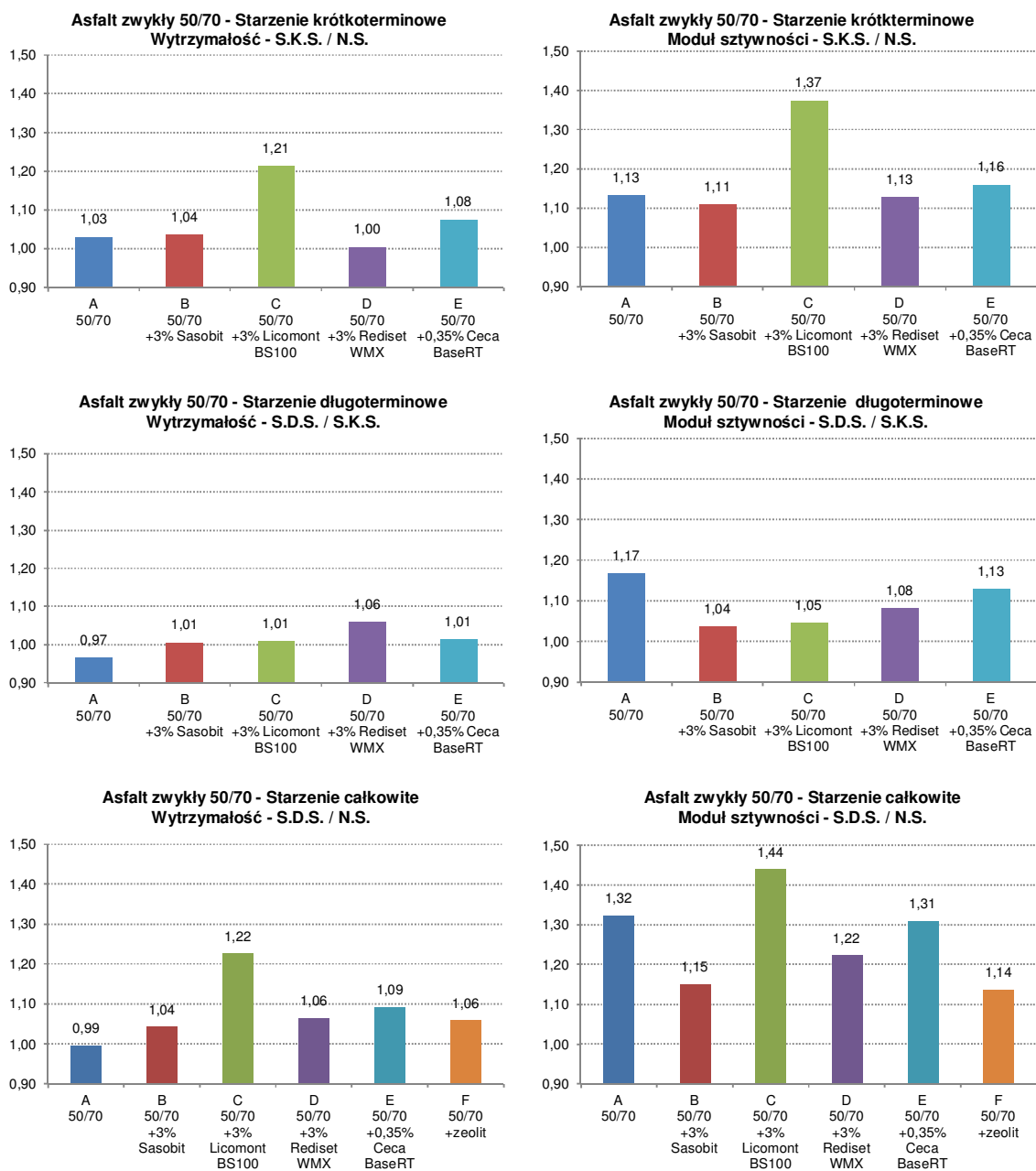
Rodzaj wskaźnika WS	Temperatura badania modułu sztywności [°C]	G	H	I	K	L	M
		-	Sasobit	Licomont BS 100	Rediset WMS	Ceca BaseRT	zeolit
Starzenie krótkoterminowe S.K.S./N.S.	+20	1,13	0,95	0,92	1,14	0,97	-*
	+10	1,00	1,01	0,91	1,03	1,06	-*
	0	1,05	1,02	0,96	0,99	0,97	-*
	-10	0,97	1,01	1,00	1,03	0,99	-*
Starzenie całkowite S.D.S./N.S.	+20	1,44	1,30	1,15	1,32	1,12	1,02
	+10	1,12	0,84	0,92	1,05	0,97	1,08
	0	1,09	1,04	0,97	0,96	0,92	1,02
	-10	1,02	0,96	0,91	0,96	0,91	1,02
Starzenie długoterminowe S.D.S./S.K.S.	+20	1,27	1,36	1,25	1,17	1,16	-*
	+10	1,12	0,83	1,01	1,02	0,91	-*
	0	1,05	1,02	1,01	0,97	0,94	-*
	-10	1,05	0,95	0,91	0,93	0,92	-*

N.S – nie starzone; S.K.S – starzenie krótkoterminowe w suszarce S.D.S – starzenie długoterminowe w suszarce

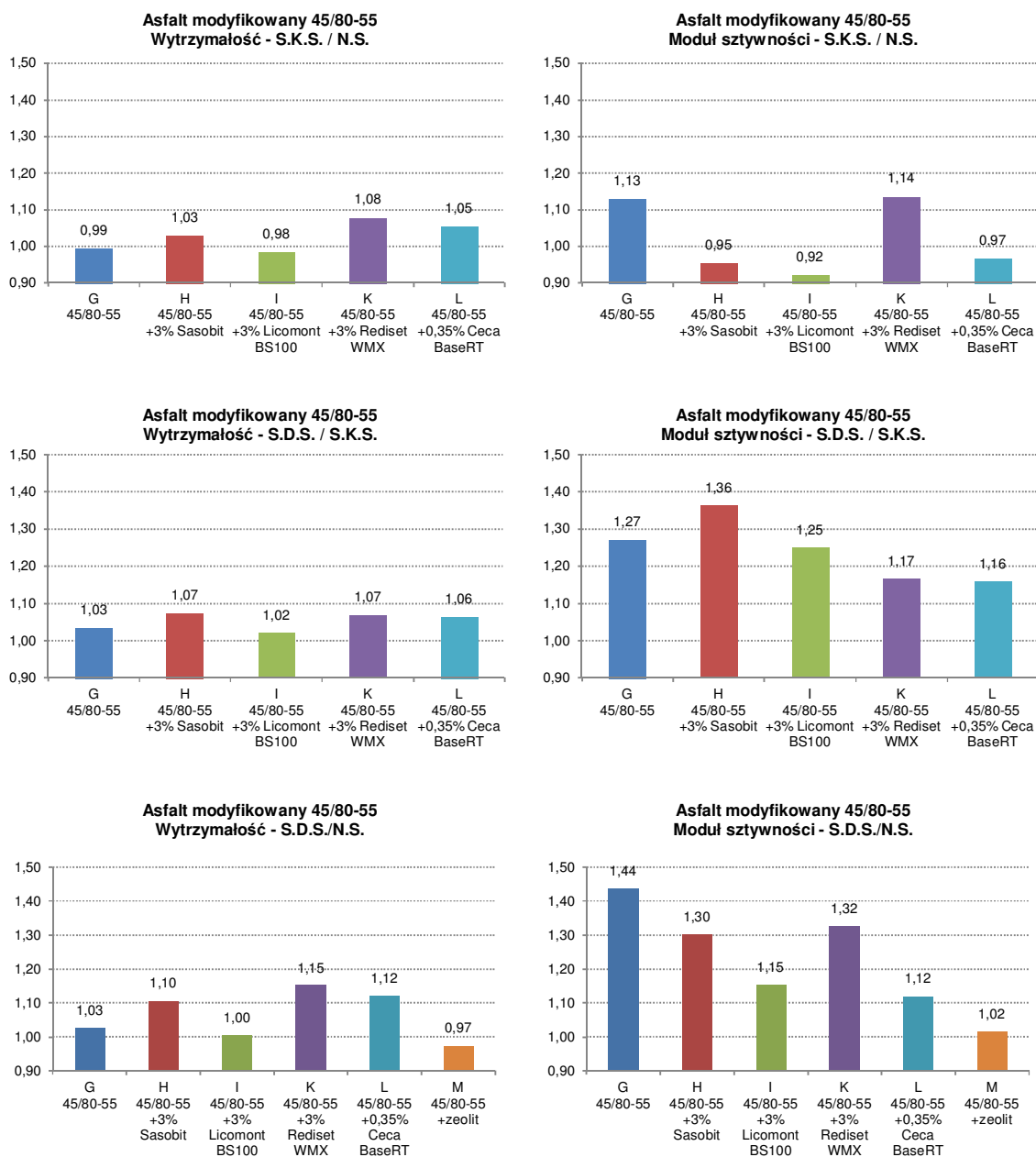
* - brak możliwości przeprowadzenia starzenia krótkoterminowego z uwagi na charakter działania zeolitu



Rys. 5.21. Wykresy średnich wartości wytrzymałości na pośrednie rozciąganie oraz modułów sztywności w temperaturze +20°C dla próbek z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 czystym i z dodatkami



Rys. 5.22. Wykresy wskaźników WR i WS dla próbek z asfaltem zwykłym 50/70 w temperaturze +20°C



Rys. 5.23. Wykresy wskaźników WR i WS dla próbek z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 w temperaturze +20°C

Z analizy otrzymanych wyników badań starzenia w temperaturze 20°C wynika, że w przypadku asfaltu zwykłego 50/70 najbardziej niekorzystnie wyróżnił się dodatek Licomont BS100, gdzie duże usztywnienie występowało zwłaszcza przy wygrzewaniu luźnej mieszanki z dodatkiem Licomontu BS100. Pozostałe dodatki nie wyróżniają się między sobą ani nie spowodowały większego usztywnienia mieszanki bardziej, niż wystąpiło to w mieszance referencyjnej. Ciekawe zachowanie odnotowano w zakresie niskotemperaturowym, tj. w temperaturze badania próbek -

10 °C. Niezależnie od rodzajów próbek (niestarzone, starzone krótkoterminowo lub długoterminowo) oraz rodzaju mieszanki (z asfaltem czystym lub z dodatkiem WMA) wytrzymałości na pośrednie rozciąganie były podobne. Moduły w -10 °C próbek niestarzonych były podobne, przy czym nieco większą wartość osiągnęła mieszanka z dodatkiem Sasobitu. Po przeprowadzeniu cyklu starzenia krótkoterminowego wartości modułów sztywności -10 °C uległy wyrównaniu i w dla większości rodzajów mieszanek wzrosły, jedynie w przypadku Sasobitu wystąpił spadek. Natomiast po przeprowadzeniu kolejnego cyklu – starzenia długoterminowego – wbrew oczekiwaniom sztywność wszystkich mieszanek (bez i z dodatkami) uległa zmniejszeniu.

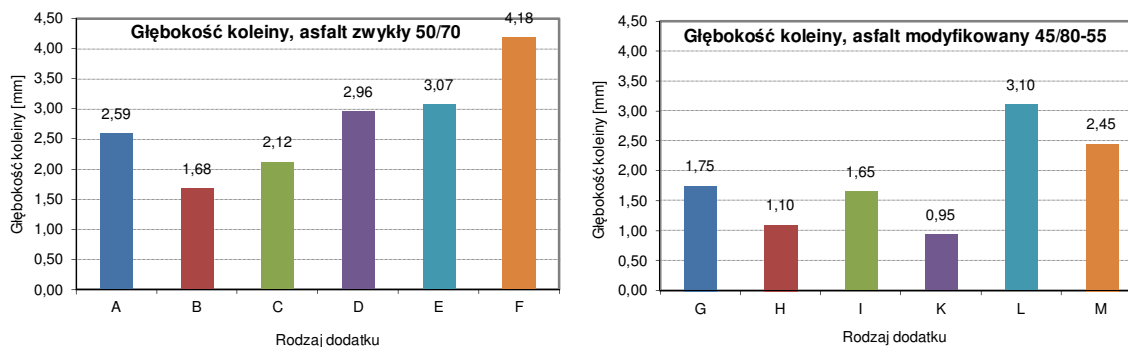
5.2.5. Analiza wyników badań odporności na koleinowanie

W tablicach 5.30 – 5.31 oraz na rysunkach 5.41 – 5.42 zamieszczono wyniki badań koleinowania przeprowadzonych według brytyjskiej normy BS598 oraz PN-EN 12697-22 dla mieszanek z asfaltem zwykłym 50/70 oraz modyfikowanym 45/80-55, czystym i z dodatkami.

Tablica 5.30. Wyniki badań z brytyjskiego koleinomierza kołowego w temperaturze 60 °C wg BS598 dla próbek mieszanki z asfaltem zwykłym 50/70 oraz modyfikowanym 45/80-55 czystym i z dodatkami

Rodzaj dodatku		Głębokość koleiny po 1900 przejściach [mm]	Rodzaj dodatku		Głębokość koleiny po 1900 przejściach [mm]
A	-	2,59	G	-	1,75
B	Sasobit	1,68	H	Sasobit	1,10
C	Licomont BS100	2,12	I	Licomont BS100	1,65
D	Rediset WMX	2,96	K	Rediset WMX	0,95
E	Ceca BaseRT	3,07	L	Ceca BaseRT	3,10
F	zeolit	4,18	M	zeolit	2,45

**BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O
OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI**

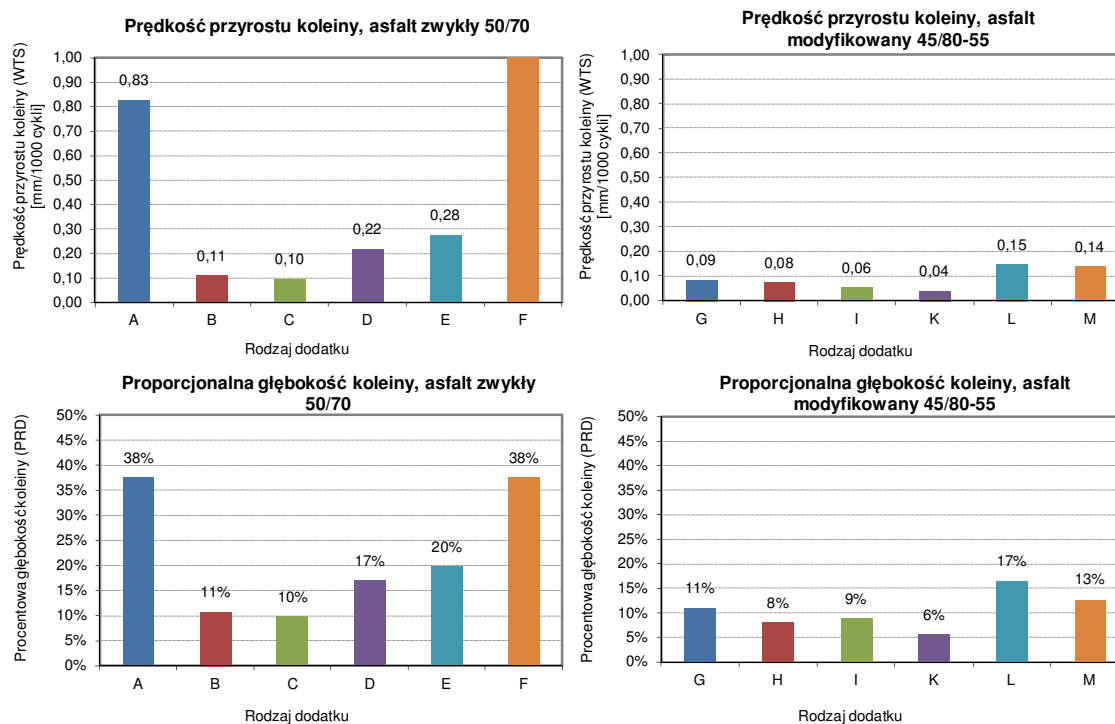


Rys. 5.41. Wyniki badań z brytyjskiego koleinomierza kołowego w temperaturze 60 °C wg BS598 dla próbek mieszanki z asfaltem zwykłym 50/70 oraz modyfikowanym 45/80-55 czystym i z dodatkami

Tablica 5.31. Wyniki badań z europejskiego koleinomierza kołowego dla próbek mieszanki z asfaltem zwykłym 50/70 i modyfikowanym 45/80-55, temperatura 60 °C, wg PN-EN12697-22, metoda B

Asfalt zwykły 50/70					Asfalt modyfikowany 45/80-55				
Rodzaj dodatku		Głębokość koleiny RD ₁₀₀₀₀ [mm]	Prędkość przyrostu koleiny WTS _{AIR} [mm/1000/p]	Proporcjonal na głębokość koleiny PRD _{AIR} [%]	Rodzaj dodatku		Głębokość koleiny RD ₁₀₀₀₀ [mm]	Prędkość przyrostu koleiny WTS _{AIR} [mm/1000/p]	Proporcjonal na głębokość koleiny PRD _{AIR} [%]
A	-	15,01	0,83	38%	G	-	4,40	0,09	11%
B	Sasobit	4,34	0,11	11%	H	Sasobit	3,20	0,08	8%
C	Licomont BS100	3,92	0,10	10%	I	Licomont BS100	3,55	0,06	9%
D	Rediset WMX	6,80	0,22	17%	K	Rediset WMX	2,26	0,06	6%
E	Ceca BaseRT	7,91	0,28	20%	L	Ceca BaseRT	6,65	0,15	17%
F	zeolit	15,01	1,89	38%	M	zeolit	5,10	0,14	13%

* awaria sprzętu



Rys. 5.42. Wyniki badań prędkości przyrostu oraz procentowej głębokości koleiny z europejskiego koleinomierza kołowego, temperatura 60 °C, wg PN-EN12697-22, metoda B

Wyniki badań koleinowania (dla obu metod badawczych) pokazują wyraźny pozytywny wpływ środków z grupy wosków (Sasobit) oraz mieszaniny amidów kwasów tłuszczowych (Licomont BS 100) na odporność na deformacje trwałe. Wpływ ten jest szczególnie widoczny w przypadku mieszanek z asfaltem zwykłym. Dla badania koleinowania według metody brytyjskiej mieszanek wytworzonych z asfaltem zwykłym 50/70 dodatki zmniejszyły głębokość koleiny (Sasobit, Licomont BS 100) lub pozostała ona na podobnym poziomie (Rediset WMX, Ceca Base RT) w stosunku do mieszanki referencyjnej z czystym asfaltem 50/70. Jedynie mieszanka z zeolitem uzyskała wynik wyraźnie gorszy od mieszanki referencyjnej. Podobne rezultaty uzyskano w trakcie badania koleinowania mieszanek z asfaltem zwykłym 50/70 według normy europejskiej. W tym przypadku niemal wszystkie środki spowodowały wzrost odporności na koleinowanie objawiający się mniejszą procentową głębokością koleiny oraz jej wolniejszym przyrastaniem, natomiast najgorszy wynik uzyskano ponownie dla mieszanki z zeolitem, dla której badanie w koleinomierzu europejskim skończyło się przed czasem po osiągnięciu przez koleinę granicznej wartości 15 mm. Wyniki badania koleinowania próbek mieszanek z asfaltem zwykłym zawierającym dodatki WMA są związane z wynikami badań parametrów samych lepiszcz, jednakże oprócz spodziewanego wzrostu odporności na deformacje trwałe w przypadku Sasobitu i Licomontu pozytywny efekt miały również dodatki Redisetu WMX oraz Ceca Base RT, które zmieniały właściwości samych asfaltów w niewielki sposób.

W przypadku asfaltów modyfikowanych wpływ dodatków obniżających temperaturę na odporność na deformacje trwałe jest niewielki. W tym przypadku wpływ modyfikatora polimerowego wyraźnie dominuje nad wpływem badanych dodatków, oprócz mieszanek zawierających asfalt ze środkiem Ceca Base RT oraz zeolit, które wykazały się nieco gorszym zachowaniem od mieszanki referencyjnej.

5.2.6. Analiza wyników badań odporności na spękania niskotemperaturowe

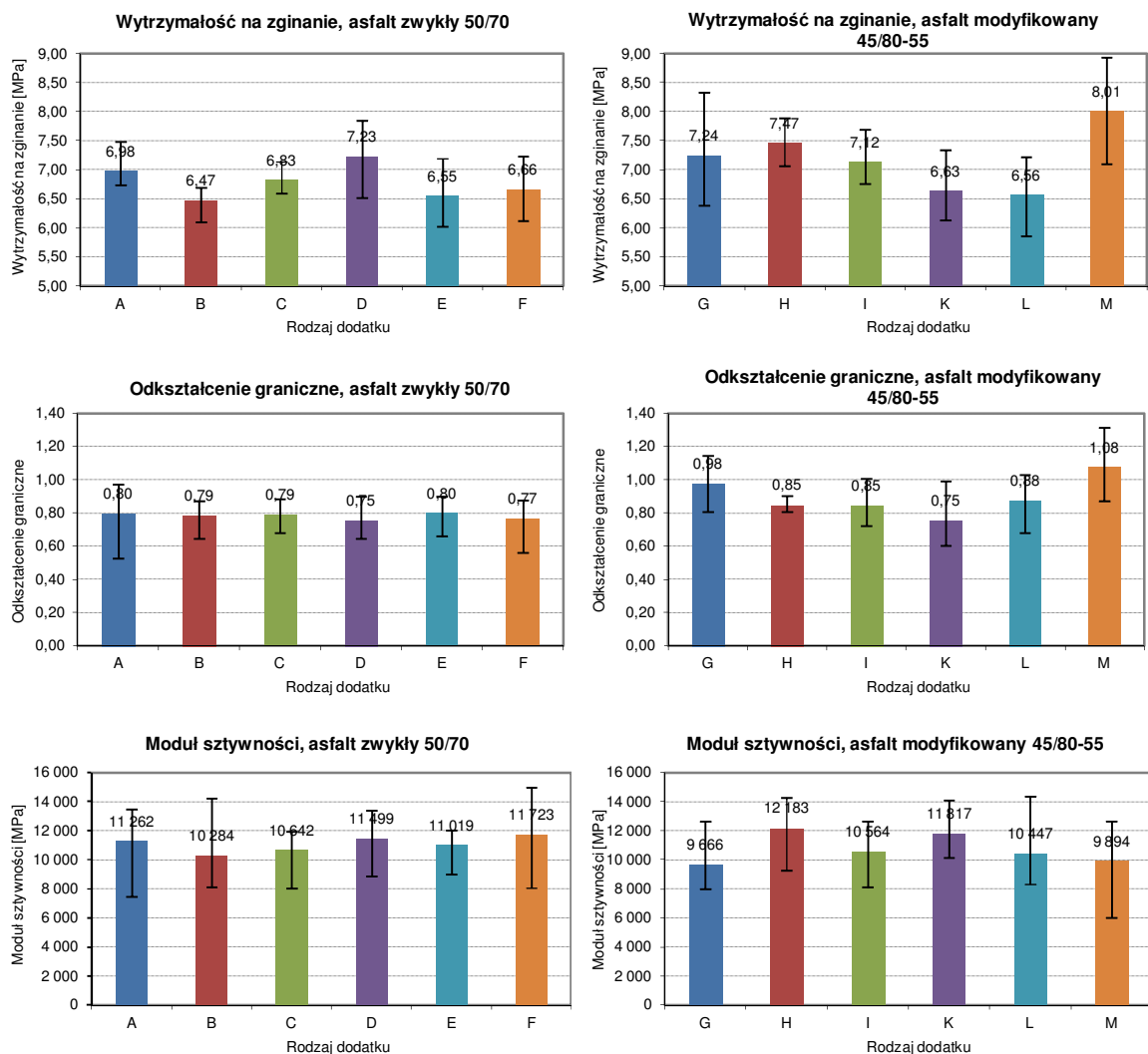
Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu, osiągnięte odkształcenia graniczne oraz moduły sztywności obliczone według wzorów 4.8, 4.9 i 4.10 przedstawiono w tablicach 5.32 i 5.33 oraz na rysunku 5.43.

Tablica 5.34. Wyniki badań trójpunktowego zginania betonu asfaltowego z asfaltem zwykłym 50/70 (czystym i z dodatkami) w temperaturze -20 °C

Rodzaj dodatku	Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu [MPa]	Odch. standardowe	Odkształcenie graniczne [%]	Odch. standardowe	Moduł sztywności [MPa]	Odch. standardowe
A -	6,98	0,25	0,80	0,15	11 262	1 851
B Sasobit	6,47	0,26	0,79	0,11	10 284	2 823
C Licomont BS100	6,83	0,19	0,79	0,08	10 642	1 496
D Rediset WMX	7,23	0,46	0,75	0,09	11 499	1 421
E Ceca Base RT	6,55	0,50	0,80	0,09	11 019	1 275
F zeolit	6,66	0,43	0,77	0,11	11 723	1 922

Tablica 5.35. Wyniki badań trójpunktowego zginania betonu asfaltowego z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 (czystym i z dodatkami) w temperaturze -20 °C

Rodzaj dodatku	Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu [MPa]	Odch. standardowe	Odkształcenie graniczne [%]	Odch. standardowe	Moduł sztywności [MPa]	Odch. standardowe
G -	7,24	0,63	0,98	0,13	9 666	1 426
H Sasobit	7,47	0,34	0,85	0,04	12 183	1 875
I Licomont BS100	7,12	0,33	0,85	0,11	10 564	1 463
K Rediset WMX	6,63	0,44	0,75	0,14	11 817	1 450
L Ceca Base RT	6,56	0,56	0,88	0,11	10 447	2 039
M zeolit	8,01	0,73	1,08	0,16	9 894	2 414



Rys. 5.43. Wyniki badań wytrzymałości na zginanie, odkształcenia granicznego oraz modułu sztywności metodą zginania belki trójpunktowej w temperaturze -20 °C

Wnioski z przeprowadzonych badań:

- W przypadku mieszank z asfaltem zwykłym 50/70 nieco mniejsze wartości wytrzymałości na pośrednie rozciąganie otrzymano w przypadku mieszank z dodatkiem Sasobitu, Ceca BaseRT oraz zeolitu.
- Żaden z dodatków w połączeniu z asfaltem zwykłym 50/70 nie spowodował praktycznie zmian w odkształceniu granicznym przy zginaniu.
- Uzyskane moduły sztywności dla próbek z asfaltem zwykłym 50/70 zawierającym dodatki WMA nie odbiegały od modułów sztywności mieszanki bez dodatku. Warto odnotować, że dodatki Sasobit i Licomont BS100, które w badaniach temperatury mięknienia oraz penetracji wykazywały tendencje do zwiększania twardości asfaltu, nie spowodowały wzrostu modułów sztywności przy zginaniu w temperaturze -20 °C.

- Również dla asfaltu modyfikowanego nie zaobserwowano odczuwalnego wpływu dodatków na wytrzymałość na rozciąganie lub odkształcenie graniczne. Największą wartość wytrzymałości oraz jednocześnie największe odkształcenie graniczne osiągnęła mieszanka z zeolitem, zaś najmniejsze mieszanka z dodatkiem Rediset WMX.
- Moduły sztywności mieszanek z dodatkami WMA oraz z asfaltem modyfikowanym były podobne, przy czym największą wartość osiągnęła mieszanka z dodatkiem Sasobitu.
- Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że dla obu asfaltów żaden dodatek nie spowodował znaczących zmian dla obu badanych parametrów, tj. wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu oraz odkształcenia granicznego.

5.3. Wnioski z etapu badań laboratoryjnych

Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych asfaltów z dodatkami obniżającymi temperaturę oraz mieszanek z nich wykonanych można sformułować następujące wnioski:

W zakresie właściwości asfaltów:

- Niektóre dodatki obniżające temperaturę istotnie zmieniają właściwości lepszca takie jak penetracja i temperatura mięknięcia. W grupie badanych w niniejszej pracy doktorskiej dodatków był to Sasobit oraz Licomont BS100.
- Środki oddziaływujące powierzchniowo-czynnie, takie jak Rediset WMX oraz Ceca Base RT w znacznie mniejszym stopniu lub w ogóle nie wpływały na właściwości samego lepszca.
- Wprowadzenie do asfaltu dodatków WMA nie potęgowało efektu starzenia w badaniu wygrzewania w cienkiej warstwie TFOT.
- Wpływ dodatków obniżających temperaturę na lepkość asfaltu był niejednoznaczny. Wprowadzenie dodatków WMA do lepszca powodowało na ogół obniżenie lepkości w porównaniu z asfaltem czystym, jednakże spadek ten był raczej niewielki. Odnosząc go do występujących w literaturze maksymalnych poziomów lepkości, jakimi powinien charakteryzować się asfalt podczas pompowania, otaczania i zagęszczania uzyskiwano jedynie kilkustopniową redukcję temperatury produkcji oraz wbudowywania mieszanek mineralno-asfaltowych. Doświadczenia uzyskane w warunkach rzeczywistych i opisywane w literaturze wskazują natomiast na możliwość znacznie większego obniżenia temperatury. Wynika z tego, że zjawisko łatwiejszego otaczania ziaren kruszywa przez asfalty z dodatkami WMA oraz poprawa urabialności gotowej mieszanki o obniżonej temperaturze jest złożone i nie związane tylko i wyłącznie lepkością asfaltu.

W zakresie właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych:

- Przeprowadzony cykl badań pokazał, że testowane środki dodawane do asfaltu mające służyć do obniżania temperatury produkcji i wbudowania nie

powodują negatywnych efektów w gotowym produkcie jakim jest mieszanka mineralno-asfaltowa.

- Dodatki należące do grupy środków organicznych, takie jak Sasobit (parafiny) lub Licomont BS 100 (amidy kwasów tłuszczowych) pozytywnie wpływają na parametry, dla których większa sztywność jest korzystniejsza – np. stabilność lub koleinowanie.
- W przeprowadzonych laboratoryjnych badaniach zagęszczalności nie zaobserwowano jednoznacznego pozytywnego wpływu dodatków WMA na łatwość zagęszczania mieszanek mineralno-asfaltowych.
- Wszystkie natomiast dodatki pozytywnie wpłynęły na odporność mieszanek mineralno-asfaltowych na działanie wody i mrozu. Łatwiejsze otaczanie ziaren kruszywa przez asfalt w trakcie produkcji mieszanek „na ciepło” skutkuje lepszym zachowaniem się takich mieszanek w dłuższym okresie czasowym, bez stosowania oddzielnych środków adhezyjnych.
- Nie zaobserwowano negatywnego wpływu dodatków WMA na proces starzenia mieszanek mineralno-asfaltowych. Wprowadzenie do składu mieszanek środków obniżających temperaturę produkcji nie powodowało – z wyjątkiem pojedynczych przypadków – usztywnienia próbek w stopniu większym, niż dla mieszanek referencyjnych.
- Przeprowadzone badania odporności na spękania niskotemperaturowe nie wykazały pogorszenia właściwości niskotemperaturowych, ale nie pozwoliły także na jednoznaczne wykluczenie ryzyka powstania takich uszkodzeń. Zagadnienie to wymaga dalszych badań i zweryfikowania w warunkach rzeczywistych.

6. BADANIA TERENOWE – ODCINEK DOŚWIADCZALNY

6.1. Cel badań terenowych

Celem wykonania odcinka doświadczalnego oraz badań terenowych było zweryfikowanie dotychczas zdobytych doświadczeń z mieszankami zawierającymi dodatki obniżające temperaturę produkcji, które były badane w poprzednim etapie w warunkach laboratoryjnych. Ponadto wykonanie odcinka doświadczalnego pozwala na zebranie doświadczeń i zapoznanie się z problemami z zakresu samej technologii produkcji mieszank z dodatkami WMA, które nie występują w laboratorium, w małej skali.

6.2. Wybór lokalizacji i wykonawcy odcinka doświadczalnego

Podobnie jak w przypadku badań laboratoryjnych uznano, że najlepszym rozwiązaniem będzie zastosowanie doświadczalne mieszank mineralno-asfaltowych o obniżonej temperaturze w warstwie ścieralnej, tak aby możliwa była późniejsza obserwacja jej zachowania w obliczu bezpośredniego oddziaływania ruchu drogowego i warunków atmosferycznych. Następnie przeprowadzono rozmowy z Generalną Dyrekcją Dróg Krajowych i Autostrad Oddział Gdańsk na temat możliwego umiejscowienia odcinka doświadczalnego na sieci drogowej znajdującej się w jej gestii. W trakcie rozmów ustalono, że z uwagi na harmonogram realizacji i charakter inwestycji prowadzonych przez gdański oddział GDDKiA możliwe jest wykonanie odcinka doświadczalnego w warstwie ścieralnej w okresie październik/listopad 2011 r. na obszarze łącznic Węzła Auchan, który stanowi część rozbudowywanego Węzła Karczemki będącego skrzyżowaniem Obwodowej Trójmiasta (droga ekspresowa S6) z ul. Kartuską (droga krajowa nr 7). Konstrukcja nawierzchni łącznic Węzła Auchan została zaprojektowana dla średniej kategorii ruchu KR3. Wykonanie odcinka doświadczalnego w okresie wcześniejszym i w innej lokalizacji niestety nie było możliwe z uwagi na brak wykonywania warstw ścieralnych na innych inwestycjach (za wyjątkiem niewielkich robót utrzymaniowych) lub odległy termin zakończenia prac i oddania drogi do ruchu.

Wybór przebudowywanego Węzła Auchan na lokalizację odcinka doświadczalnego jednocześnie określał pozostałe warunki i okoliczności wykonania odcinka, tj.:

- wykonawcę – firmę BUDIMEX SA, realizującą przebudowę całego Węzła Karczemki,
- wytwórnię mas bitumicznych – należąca do firmy Masfalt Sp. z o.o. i położoną w miejscowości Stara Piła k/Gdańska, realizującą dostawy mieszank mineralno-asfaltowych na cały okres realizacji inwestycji przebudowy Węzła Karczemki,
- rodzaj warstwy ścieralnej – mieszankę mastyksu grysowo-asfaltowego SMA o uziarnieniu 0/11 mm, opartą na asfalcie modyfikowanym 45/80-55 i układaną w grubości 4 cm, występująca w projekcie konstrukcji nawierzchni jezdni Węzła Karczemki.

Ustalono również, że całe przedsięwzięcie odbędzie się w porozumieniu z Wydziałem Technologii Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad O/Gdańsk, który zapewni również pomoc w wykonaniu niektórych badań laboratoryjnych i terenowych (badanie koleinowania w dużym koleinomierzu francuskim).

6.3. Materiały stosowane w badaniach terenowych

6.3.1. Rodzaju mieszanki mineralno-asfaltowej przeznaczonej do badań terenowych

Wybór rodzaju mieszanki mineralno-asfaltowej był narzucony przez okoliczność wykonywania odcinka doświadczalnego w ramach przebudowy węzła Karczemki, w projekcie której warstwę ścieralną zaprojektowano z mastyksu grysowego SMA o uziarnieniu 0/11 mm i układaną w grubości 4 cm. Zalety z wykorzystania mieszanki tego rodzaju były tożsame z niektórymi zagadnieniami wymienionymi w punkcie 3.1, tj.:

- bezpośrednie narażenie wierzchniej warstwy nawierzchni na oddziaływanie warunków atmosferycznych oraz kół pojazdów,
- drobne uziarnienie wpływające pozytywnie na jednorodność wyników badań,
- możliwość obserwacji wizualnej zachowania się warstwy ścieralnej w trakcie eksploatacji.

6.3.2. Dodatki WMA obniżające temperaturę produkcji i wbudowywania zastosowane w badaniach terenowych

W trakcie przygotowań do realizacji badań terenowych uznano, że z powodu wielkości powierzchni przydzielonego obszaru jezdni na odcinek doświadczalny, spodziewane trudności przy dozowaniu niektórych dodatków obniżających temperaturę oraz zbliżające się niekorzystne warunki atmosferyczne (późna jesień), nie będzie możliwe wyprodukowanie i wbudowanie mieszanek ze wszystkimi dodatkami sprawdzanymi na etapie badań laboratoryjnych. W związku z tym, do wyprodukowania mieszanek mineralno-asfaltowych na odcinek doświadczalny wybrano 3 następujące środki z 5 badanych w laboratorium:

- Odpowiednik środka Sasobit, dodawany automatycznie do mieszalnika otaczarni w formie połączonej z włóknem celulozowym – stabilizatorem mastyksu (nazwa handlowa produktu ViaTop Plus CT 40), przy czym na etapie badań laboratoryjnych stosowano czysty Sasobit dodawany w proporcji 3% w stosunku do masy asfaltu. Dodanie 0,5% ViaTopu Plus CT 40 do mieszanki mineralno-asfaltowej o zawartości 6,6% asfaltu jest praktycznie równoważne dodaniu 3% procent Sasobitu do masy asfaltu.
- Rediset WMX w postaci stałych granulek, dodawany w postaci 2% w stosunku do masy asfaltu, który planowano zadozować kilkanaście godzin przed rozpoczęciem produkcji wprost do zbiornika asfaltu na wytwórni.
- Ceca Base RT w postaci płynnej, dodawany ręcznie do wagi asfaltu w postaci płynnej w stosunku 0,35% do masy asfaltu.

Proporcje w jakich dozowano poszczególne środki oparto na podstawie zaleceń ich producentów.

W całości działań uwzględniono również – oprócz wykonania głównych fragmentów nawierzchni z mieszanką SMA wyprodukowaną wraz z dodatkami – konieczność pobrania próbek oraz oznaczenia odcinków, na którym miał zostać wbudowany mastyks grysowy SMA z czystym asfaltem modyfikowanym, będący referencyjną mieszanką porównawczą.

6.3.3. Asfalt zastosowany w badaniach terenowych

Zgodnie z zapisami obowiązującej na kontrakcie przebudowy Węzła Karczemki szczegółowej specyfikacji technicznej D-05.03.13. „Warstwa ścieralna z mieszanki mastykowo-grysowej (SMA)” [P2] zastosowano asfalt modyfikowany 45/80-55. Wykorzystany asfalt został wyprodukowany w firmie Lotos Asphalt.

6.3.4. Kruszywa zastosowane w badaniach terenowych

Tak jak w przypadku asfaltu, wybór kruszyw wchodzących w skład mastyksu grysowego SMA użytego w trakcie badań terenowych musiał być zgodny z kruszywami występującymi w składzie innych mieszanek mineralno-asfaltowych, zgodnych ze specyfikacjami technicznymi i zatwierdzonych już uprzednio przez wykonawcę podczas realizacji całej inwestycji przebudowy Węzła Karczemki. Łącznie wykorzystano trzy rodzaje kruszywa grubego (grysów), jeden rodzaj kruszywa łamanego o ciągłym uziarnieniu i jeden rodzaj wypełniacza:

- kruszywo grube ze skały granitowej Halsvik 5/11,
- kruszywo grube ze skały granitowej Halsvik 5/8,
- kruszywo grube ze skały granitowej Halsvik 2/5,
- kruszywo łamane o ciągłym uziarnieniu ze skały granitowej Glensanda 0/5,
- wypełniacz wapienny Wapienno.

Uziarnienie i gęstość użytych kruszyw zamieszczono w tablicy 6.1.

Tablica 6.1. Uziarnienie poszczególnych kruszyw wchodzących w skład mieszanki SMA zastosowanej na odcinku doświadczalnym

Sito # [mm]	Przechodzi przez sito dla kruszywa rodzaju, [%]:				
	Kruszywo grube 5/11	Kruszywo grube 5/8	Kruszywo grube 2/5	KŁ o ciągłym uziarnieniu 0/5	Wypełniacz
31,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
22,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
16,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
11,2	90,1	100,0	100,0	100,0	100,0
8,0	26,5	91,3	100,0	100,0	100,0
5,0	4,5	9,2	90,1	94,3	100,0
2,0	3,1	4,2	13,3	67,2	100,0
0,125	1,9	2,2	2,0	12,9	95,8
0,063	1,3	1,6	1,3	6,8	75,1
Gęstość, [Mg/m ³]	2,71	2,71	2,74	2,65	2,73

Z wymienionych materiałów skomponowano mieszankę mineralną o uziarnieniu 0/11, spełniającą wymagania specyfikacji technicznej D-05.03.13. „Warstwa ścieralna z mieszanki mastyksowo-grysowej (SMA)” [P2].

6.3.5. Projektowanie mastyksu grysowego SMA przeznaczonego do badań terenowych

Projektowanie mastyksu grysowego zostało przeprowadzone w ramach niniejszej pracy doktorskiej. Przy projektowaniu uwzględniono wymagania specyfikacji technicznej dotyczącej realizowanej inwestycji, warunki wynikające ze stosowania dodatków WMA obniżających temperaturę, a także receptę bazową, jaką przygotował wcześniej Wykonawca.

6.3.5.1. Dobór składu mieszanki mineralnej

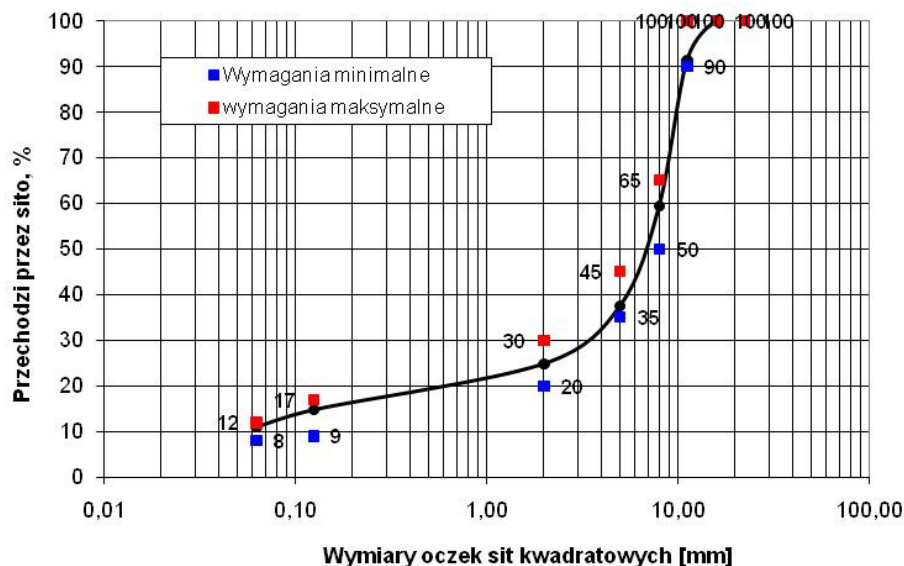
Z uwagi na fakt, iż recepta tradycyjnej mieszanki mastyksu grysowo-asfaltowego SMA przeznaczonej do wbudowania na obszarze całego przebudowywanego Węzła Karczemki były już wykonana i zatwierdzona, zdecydowano że zostanie ona wykorzystana i poddana jedynie niewielkiej modyfikacji, polegającej na wprowadzeniu do składu dodatków obniżających temperaturę, bez zmian ilościowych poszczególnych frakcji kruszywa kruszywa. Ich procentową zawartość w zastosowanej mieszance mineralnej przedstawiono w tabelicy 6.2., zaś rzędne krzywej uziarnienia w tabelicy 6.3. Samą krzywą uziarnienia pokazano na rysunku 6.1.

Tablica 6.2. Procentowa zawartość materiałów mineralnych w mieszance mineralnej 0/11 mm do warstwy ścieralnej z SMA zastosowanego na odcinku doświadczalnym

Materiały	Zawartość w mieszance mineralnej, [%]
Kruszywo grube 5/11	54,0
Kruszywo grube 5/8	10,0
Kruszywo grube 2/5	10,0
Kruszywo łamane o ciągłym uziarnieniu 0/5	14,0
Wypełniacz	11,5
Dodatek stabilizujący	0,5
Suma	100

Tablica 6.3. Uziarnienie mieszanki mineralnej 0/11 mm do warstwy ścieralnej z mastyksu grysowego SMA zastosowanego na odcinku doświadczalnym

Sito # [mm]	Wymaganie wg ST D-05.03.13		Rzędne krzywej uziarnienia
	Wymagania minimalne	Wymagania maksymalne	
31,5	100	100	100,0
22,4	100	100	100,0
16,0	100	100	100,0
11,2	90	100	94,7
8,0	50	65	59,5
5,0	35	45	37,6
2,0	20	30	24,8
0,125	9	17	14,7
0,063	8	12	11,0



Rys. 6.1. Krzywa uziarnienia mieszanki mineralnej 0/11 mm do warstwy ścieralnej z mastyksu grysowego SMA zastosowanego na odcinku doświadczalnym

6.3.5.2. Dobór zawartości asfaltu

Ilość asfaltu w mieszance określono zgodnie z zasadami podanymi w Wymaganiach Technicznych WT-2 2010, stosując odpowiedni współczynnik korekcyjny zależny od gęstości mieszanki mineralnej oraz zwiększając otrzymaną wartość o 0,3%. Sposób określenia minimalnej zawartości asfaltu przedstawiono w tabelcy 6.4.

Tabela 6.4. Określenie współczynnika korekcyjnego oraz minimalnej zawartości asfaltu w mieszance mastyksu grysowego SMA zastosowanego na odcinku doświadczalnym

Materiały	Wartość	Jednostka
Gęstość mieszanki mineralnej, ρ_a	2,700	[Mg/m ³]
Minimalna zawartość asfaltu, B_{min}	6,4	[%]
Współczynnik korekcyjny $\rho_a = 2,650 / \rho_a$	0,981	[-]
Minimalna zawartość asfaltu, B_{min} , po korekcie	6,3	[%]
Minimalna zawartość asfaltu, B_{min} , po korekcie zwiększona o 0,3 % wymagane w WT-2 2010	6,6	[%]

6.3.5.3. Skład mieszanki mineralno-asfaltowej mastyksu grysowego SMA

W tabelcy 6.5. przedstawiono zastosowane proporcje kruszyw oraz ilość asfaltu w odniesieniu do samej mieszanki mineralnej oraz całej mineralno-asfaltowej.

Tablica 6.5. Proporcje kruszyw oraz ilość asfaltu w mieszance mineralnej oraz mineralno-asfaltowej zastosowanej na odcinku doświadczalnym

Materiały	Mieszanka mineralna: [%]	Mieszanka mineralno-asfaltowa [%]
Kruszywo grube 5/11	54,0	50,4
Kruszywo grube 5/8	10,0	9,3
Kruszywo grube 2/5	10,0	9,3
Kruszywo łamane o ciągłym uziarnieniu 0/5	14,0	13,1
Kruszywo wypełniające	11,5	10,8
Dodatek stabilizujący ViaTop 80 lub ViaTop Plus CT40	0,5	0,5
Asfalt 45/80-55:		6,6
• asfalt rozpuszczalny:		6,4
• asfaltu wchłonięty przez kruszywo:		0,2

W składzie mieszanki przewidziano również użycie stabilizatora spływności w postaci włókien celulozowych o nazwie:

- ViaTop 80, jednakże tylko w przypadku mieszanek produkowanych z dodatkami Ceca Base RT oraz Rediset WMX,
- ViaTop Plus CT40, który zawierał jednocześnie w swoim składzie dodatek obniżający temperaturę (odpowiednik środka Sasobit).

Dozowanie zarówno włókien ViaTop 80, jak i ViaTop Plus CT 40 przewidziano w proporcji 0,5% w stosunku do masy mieszanki mineralno-asfaltowej. Dodatek 0,5% ViaTop Plus CT40 w stosunku do masy mieszanki mineralno-asfaltowej odpowiadał 3% dodatkowi Sasobitu do masy asfaltu.

Recepta tradycyjnej mieszanki SMA którą wykorzystano jako bazę do opracowania recept mieszank z dodatkami obniżającymi temperaturę uwzględniała w swoim składzie również ciekły środek adhezyjny. Jednakże mając na uwadze doświadczenia uzyskane w trakcie etapu badań laboratoryjnych z betonami asfaltowymi, które pokazały że dodatki obniżające temperaturę pozytywnie wpływają na odporność na działanie wody i mrozu zdecydowano o niestosowaniu dodatkowego środka adhezyjnego.

6.3.5.4. Parametry mieszanki mineralno-asfaltowej mastyksu grysowego SMA

Po opracowaniu składu, dla każdej wersji mieszanki (tj. dla każdej kombinacji asfaltu i dodatków WMA) wykonano badania typu w zakresie przewidzianym przez szczegółową specyfikację techniczną obowiązującą na kontrakcie przebudowy Węzła Karczemki. Otrzymane wyniki przedstawiono w tablicy 7.6. Z powodu występowania w składzie mieszanki dodatków WMA i ryzyka przegęszczenia wykonywanych w laboratorium próbek Marshalla, temperatura ich zagęszczania była obniżona w stosunku do normalnie stosowanej (tj. $145^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$) i zawierała się w przedziale 125-130°C.

Tablica 6.6. Porównanie parametrów mieszanki mineralno-asfaltowej SMA
przeznaczonej do wbudowania na odcinki doświadczalne

Cecha	Wartość dla mieszanki z asfaltem i dodatkami:			Wymaganie wg ST D-05.03.05.B dla ruchu KR3-KR4
	45/80-55 + 3% Sasobit	45/80-55 + 2% Rediset WMX	45/80-55 + 0,35% Ceca Base RT	
Gęstość, ρ_{mv} [Mg/m ³]	2,435	2,435	2,435	-
Gęstość objętościowa, ρ_b [Mg/m ³]	2,390	2,391	2,388	-
Zawartość wolnych przestrzeni V_m , [%]	1,9	1,8	1,9	$V_{min1,5} - V_{max3,5}$
Zawartość wolnych przestrzeni wypełnionych asfaltem VFB, [%]	89,2	89,4	88,9	-
Zawartość wolnych przestrzeni w mieszance mineralnej VMA, [%]	17,3	17,3	17,4	-
Odporność na deformacje trwałe wg PN-EN 12697-22, metoda B w powietrzu, +60°C, 10 000 cykli <ul style="list-style-type: none"> ▪ WTS ▪ PRD 	0,05 5,5	0,07 10,3	0,06 8,8	WTS _{AIR0,3} PRD _{AIRDekl.}
Odporność na działanie wody i mrozu wg PN-EN 12697-12, przechowywania w +40°C, z jednym cyklem zamrażania, badanie w +25°C	90,5	92,8	97,2	ITSR ₉₀
Splywność lepiscza wg PN-EN 12697-18, p.5	0,1	0,1	0,1	D _{0,3}

Uzyskane na etapie opracowywania składu zawartości wolnych przestrzeni w próbkach Marshalla na poziomie 1,8 – 1,9% były nieznacznie niższe niż wymagane przez szczegółową specyfikację techniczną $V_{min2,0}$ dla kategorii ruchu KR5-6. Na etapie przygotowania recepty zakładano jednakże wykonanie odcinków z dodatkami jedynie na obszarze łącznic, gdzie minimalny wymagany poziom wolnych przestrzeni wynosił 1,5% z uwagi na obowiązującą na ich obszarze kategorię ruchu KR3. Z tego powodu nie korygowano ponownie składu mieszanki w celu osiągnięcia zawartości wolnych przestrzeni 2,0%.

6.4. Wykonanie odcinka doświadczalnego

Przed rozpoczęciem robót zgromadzono na terenie wytwórni mas bitumicznych potrzebne dodatki WMA. Pozyskane od producentów ilości poszczególnych dodatków wystarczyły na wyprodukowanie każdorazowo ok. 300 ton mieszanki mineralno-asfaltowej, co zapewniało dwukrotne zabezpieczenie planowanych do wbudowania ilości, wynoszących ok. 150 ton dla jednego rodzaju mieszanki:

- ViaTop Plus CT 40 (odpowiednik Sasobitu) – 1 500 kg,
- Ceca Base RT – 70 kg,

- Rediset WMX – 400 kg.

Dodatek ViaTop Plus CT40 składa się z włókien celulozowych Arbocell ZZ 8/1 oraz wosku Fischera-Tropscha połączonych w proporcji 60:40. Dodanie 0,5% włókien celulozowych do mieszanki mineralno-asfaltowej o zawartości 6,6% asfaltu jest praktycznie równoważne dodaniu 3% procent Sasobitu do masy asfaltu:

$$1\ 000\ \text{kg} \times 0,005 \times 0,40 = 2,00\ \text{kg}$$

$$1\ 000\ \text{kg} \times 0,066 \times 0,03 = 1,98\ \text{kg}$$

Jednocześnie przyjęto – na podstawie informacji podanych w dostępnej literaturze – że z powodu przewidywanej temperatury otoczenia niższej od 5°C w trakcie wykonywania odcinka, temperatura produkcji i wbudowania nie będzie obniżona, natomiast dodatki zostaną wykorzystane jako środek umożliwiający właściwe zagęszczenie warstwy mieszanki SMA.

Prace nad odcinkiem doświadczalny trwały w następujących dniach:

- 22 listopad 2011 r. – wbudowanie mieszanek ze środkiem Ceca Base RT oraz ViaTop Plus CT 40,
- 23 listopad 2011 r. – wbudowanie tradycyjnej mieszanki SMA bez środków (odcinek porównawczy),
- 24 listopad 2011 r. – wbudowanie mieszanki ze środkiem Rediset WMX.

Powyższy podział wynikał z wewnętrznego harmonogramu prac Wykonawcy. Ponadto finalnie zmianie uległ nieco plan usytuowania poszczególnych fragmentów odcinka doświadczalnego. Jak wspomniano w punkcie 7.2 zakładano, że wszystkie trzy rodzaje mieszanek SMA z dodatkami WMA zostaną wykorzystane do ułożenia warstwy ścieralnej w obszarze łącznic Węzła Auchan. Sytuacja z frontem robót bitumicznych występująca na całym kontrakcie przebudowy Węzła Karczemki w okresie wykonywania odcinka doświadczalnego spowodowała, że mieszankę z dodatkiem Viatop Plus CT40 (odpowiednik Sasobitu) ułożono częściowo na fragmencie wschodniej jezdni Obwodowej Trójmiasta (drogi ekspresowej S6), zaś mieszankę z dodatkiem Redisetu WMX na jezdni drogi zbierająco-rozdzielającej. Jako odcinek z mieszanką referencyjną SMA (tj. z czystym asfaltem modyfikowanym 45/80-55, bez żadnego dodatku WMA) przyjęto wykonywany w tym samym okresie sąsiadujący fragment warstwy ścieralnej ułożony na wschodniej jezdni Obwodowej Trójmiasta (drogi ekspresowej S6) oraz jezdni drogi zbierająco-rozdzielającej.

Całość mieszanki użytej do wykonania odcinka doświadczalnego została wyprodukowana w wytwórni mas bitumicznych Parker BlackMix 2000 należącej do firmy Masfalt Sp.z o.o., położonej w miejscowości Stara Piła k/ Gdańska. Jest to wytwórnia o konstrukcji wieżowej o wydajności 160 t/h. Maksymalna wielkość jednego zarobu mieszalnika wynosiła 2000 kg.

Dodatek płynny Ceca Base RT wlewano ręcznie do wagi asfaltu. Dodatek ViaTop Plus CT40 dodawano za pośrednictwem instalacji dozowania włókien celulozowych. Dodatek Rediset WMX (występujący w postaci granulek) planowano dodać bezpośrednio do zbiornika asfaltu. Niestety dzień przed wykonaniem ostatniego fragmentu odcinka ze środkiem Rediset WMX okazało się, że nie ma możliwości jego uprzedniego zadozowania do zbiornika asfaltu (co planowano wykonać w godzinach wieczornych 23 listopada 2011 r.) z uwagi na brak w nim odpowiedniego poziomu lepiszcza, wynikającego z nieco większej niż zakładano produkcji mieszanek w ciągu poprzedzających dni. Zdecydowano się zatem na próbę dozowania dodatku Rediset WMX wprost do wagi asfaltu, podobnie jak uczyniono to z dodatkiem płynnym Ceca Base RT dwa dni wcześniej. Niestety, po rozpoczęciu produkcji mieszanki 24 listopada okazało się, że środek Rediset WMX nie był całkowicie wypompowywany wraz z asfaltem z wagi do mieszalnika, z powodu niewystarczającego rozmieszania (zbyt krótki czas przebywania w asfalcie nie pozwalający na całkowite rozpuszczenie granulek w lepiszczu). Z tego powodu konieczne było zaprzestanie produkcji mieszanki ze środkiem Rediset WMX po wyprodukowaniu ok. 30 ton mieszanki SMA. Łączna długość odcinka wyniosła 532,7 m, z czego 320,7 m przypadło na łącznice, 140 m na wschodnią jezdnię drogi ekspresowej S6 oraz 72 m na jezdnię drogi zbierająco-rozdzielającej. Szerokość poszczególnych fragmentów odcinka wyniosła na łącznicach 7,1 – 8,0 m, na jezdni drogi ekspresowej S6 7,5 m, zaś na jezdni drogi zbierająco-rozdzielającej 4,0 m. Powierzchnia każdego z fragmentów wyniosła:

- Mieszanka SMA z dodatkiem Ceca Base RT – 1 730 m²,
- Mieszanka SMA z dodatkiem ViaTop Plus CT40 (odpowiednik Sasobitu) – 1 680 m²,
- Mieszanka SMA z dodatkiem Redisetu WMX – 290 m².

W trakcie układania mieszanek panowały następujące, zbliżone do siebie warunki otoczenia:

- 22 listopada (fragment z mieszankami z dodatkami Ceca Base RT oraz ViaTop Plus CT40) – temperatura powietrza 7°C, temperatura podłoża 4°C, brak opadów,
- 23 listopada (fragment z tradycyjną mieszanką referencyjną) – temperatura powietrza 4°C, temperatura podłoża 3°C, brak opadów,
- 24 listopada – temperatura powietrza 2°C, temperatura podłoża 3°C, brak opadów.

Z tego powodu produkcję mieszanek z dodatkami wykonywano – zgodnie z wcześniejszymi ustaleniami – w temperaturze jak dla mieszanki normalnej, tj. 165 – 170°C

Wszystkie cztery fragmenty nawierzchni (SMA z dodatkiem Ceca Base RT, ViaTop Plus CT40, Rediset WMX oraz odcinek uznany za referencyjny) wykonano przy użyciu tego samego zespołu maszyn, obsługiwanego przez niezmienny skład pracowników. W skład zespołu rozkładającego wchodziły:

- 2 układarki gąsienicowe Voegele Super 2100 oraz Super 1900,
- 6 walców stalowych:
 - 3 walce Dynapac CC 522 o masie 12,5 t,
 - 1 walec Hamm HD 120+ o masie 13 t,
 - 1 walec Dynapac CC 424HF o masie 11,6 t
 - 1 walec Hamm DV 85 o masie 9,5 t.

Transport wszystkich rodzajów mieszanek z wytwórni na miejsce wbudowania odbywał się wyłącznie za pomocą ciągników siodłowych z naczepami samowładowczymi z przekryciem skrzyń ładunkowych.

Lokalizację odcinka doświadczalnego na planie orientacyjnym pokazano na rysunku załącznika P.1. Rozmieszenie poszczególnych rodzajów mieszanek z danym środkiem pokazano na rysunku-załączniku planu sytuacyjnego P.2. Na fotografiach 6.1-6.4 przedstawiono wybrane fragmenty prac przy wykonywaniu odcinka doświadczalnego. Podsumowując, niewymagająca żadnych modyfikacji procesu wytwarzania (a tym samym najłatwiejsza do wyprodukowania) okazała się być mieszanka z dodatkiem ViaTop Plus CT40, stanowiącego połączenie włókien celulozowych i wosku Fischera-Tropscha. Produkcja mieszanek z dodatkami Ceca Base RT oraz Rediset WMX wymagała ich ręcznego dozowania do wagi asfaltu, przy czym sposób ten okazał się być nieskuteczny w przypadku Redisetu WMX występującego w postaci granulek. Lepszy efekt osiągnięto by prawdopodobnie w przypadku jego dozowania wprost do mieszalnika. Otrzymana mieszanka SMA (z wszystkimi dodatkami) wizualnie niczym nie różniła się od mieszanki z czystym asfaltem, zaś wbudowywanie przebiegało normalnie bez jakichkolwiek utrudnień.



Fot. 6.1. Widok mieszanki SMA wyprodukowanej ze środkiem Ceca Base RT po załadunku do skrzyni samochodu ciężarowego



Fot. 6.2. Rozkładanie mieszanki SMA wyprodukowanej ze środkiem Ceca Base RT
równocześnie przez dwie rozkładarki



Fot. 6.3. Przygotowane do pobrania próbek mieszanki foremki stalowe



Fot. 6.4. Jeden z pomiarów temperatury mieszanki w trakcie układania

6.5. Metodyka badań na odcinku doświadczalnym

6.5.1. Wprowadzenie

Program badań na odcinku doświadczalnym obejmował zarówno badanie samych mieszanek mastyksu grysowego SMA wytworzonego w skali przemysłowej (w wytwórni mieszanek), jak i gotowej warstwy ścieralnej z niego wykonanej. Sprawdzeniu podlegały mieszanki SMA wytworzone na bazie asfaltu modyfikowanego wraz z dodatkami WMA oraz mieszanka referencyjna, którą stanowił mastyks grysowy SMA z czystym asfaltem modyfikowanym. Nie określano właściwości samego asfaltu. W tabelicy 6.7. przedstawiono spis badań laboratoryjnych przeprowadzonych w związku z realizacją odcinka doświadczalnego.

Tablica 6.7. Spis wykonanych badań przeprowadzonych w ramach realizacji odcinka doświadczalnego

L.p.	Metoda badawcza	Cecha	Oznaczenie	Norma lub opis metody
Badania mieszanek mineralno-asfaltowych				
1.	Odporność na działanie wody i mrozu	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie Moduł sztywności	R S	PN-EN 12697-12
2.	Starzenie	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie Moduł sztywności	R S	Brak normy, opis w punkcie 4.4.2.4.
3.	Badanie koleinowania	Procentowa głębokość koleiny Prędkość przyrostu koleiny	PRD WTS	PN-EN 12697-22 BS 598
4.	Zachowania niskotemperaturowe	Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu Odształcenie graniczne Moduł sztywności	R_z ϵ_{gr} E	Brak normy, opis w punkcie 4.4.2.6.
Badania warstwy nawierzchni				
5.	Zagęszczenie warstwy	Zawartość wolnych przestrzeni Wskaźnik zagęszczenia	V_v I_s	PN-EN 12697-8

6.5.2. Przygotowanie próbek do badań

Próbki wykorzystywane na etapie realizacji odcinka doświadczalnego zostały wykonane z mieszanki wyprodukowanej w wytwórni mas bitumicznych, nie zachodziła zatem konieczność modyfikacji asfaltu dodatkami WMA oraz wytwarzania mieszanki w laboratorium jak opisano w punkcie 4.2. oraz 4.3. W przypadku próbek przeznaczonych do badania odporności na działanie wody i mrozu, starzenia oraz zachowań niskotemperaturowych przygotowanie próbek polegało na powtórnym podgrzaniu, uformowaniu i zagęszczeniu w laboratorium partii luźnej mieszanki pobranej na budowie. W przypadku próbek przeznaczonych do określenia zawartości wolnych przestrzeni oraz wskaźnika zagęszczenia przygotowanie próbek polegało na wycięciu ich wiertłem rdzeniowym z gotowej warstwy ścieralnej. Bardziej złożony schemat wykorzystania próbek wystąpił przy badaniu koleinowania. Do określenia odporności na deformacje trwałe w koleinomierzu brytyjskim wykorzystano zarówno próbki uformowane z powtórnie rozgrzanej luźnej mieszanki pobranej na budowie, jak i próbki odwiercone z nawierzchni. Do określenia odporności na deformacje trwałe z koleinomierzu francuskim wykorzystano tylko próbki uformowane z luźnej mieszanki.

6.5.2.1. Pobieranie próbek luźnej mieszanki mastyksu grysowego SMA wytworzonej w wytwórni mas bitumicznych i pobranej na budowie

Przed przystąpieniem do wykonywania odcinka doświadczalnego obliczono, że do przeprowadzenia wszystkich rodzajów przewidzianych badań konieczne jest pobranie co najmniej 105 kg luźnej mieszanki SMA każdego rodzaju (z dodatkami WMA oraz z asfaltem czystym). W trakcie realizacji mieszankę uważnie pobierano niedopuszczając do jej rozsegregowania z zasobnika rozkładarki mas bitumicznych, do uprzednio przygotowanych i opisanych stalowych foremek (fotografia 6.5). Następnie formy przetransportowano do Laboratorium Badań Drogowych Politechniki Gdańskiej. Mieszankę wytworzoną z dodatkiem Ceca Base RT oraz ViaTop Plus CT 40 (odpowiednik dodatku Sasobitu) pobrano w dniu 22 listopada, mieszankę referencyjną (z czystym asfaltem modyfikowanym 45/80-55) w dniu 23 listopada, zaś mieszankę z dodatkiem Rediset WMX w dniu 24 listopada.



Fot. 6.5. Pobieranie mieszanki SMA z zasobnika rozkładarki mas bitumicznych

6.5.2.2. Pobieranie próbek walcowych mieszanki mastyksu grysowego SMA wytworzonego w wytwórni mas bitumicznych z wykonanej warstwy ścieralnej

Próbki walcowe z wykonanej warstwy ścieralnej pobierano poprzez wykonanie odwiertu wiertłem rdzeniowym. Do określenia wskaźników zagęszczenia oraz zawartości wolnych odwiercano próbki o średnicy 150 mm, natomiast dla próbek przeznaczonych do badania odporności na deformacje trwałe w małym koleinomierzu stosowano średnicę 200 mm. W przypadku tych próbek, przed przystąpieniem do wiercenia, na powierzchni warstwy ścieralnej oznaczano kierunek wałowania nawierzchni, aby w tym samym kierunku odbywały się przejazdy koła w koleinomierzu. Następnie próbki zostały zamocowane w formach stalowych umożliwiającym umieszczenie ich w uchwytach aparatury badawczej.

6.5.2.3. Formowanie i zagęszczanie próbek z powtórnie rozgrzanej luźnej mieszanki mastyksu grysowego SMA wytworzonej w wytwórni mas bitumicznych i pobranej na budowie

Umieszczoną w stalowych foremkach luźną mieszankę rozgrzewano w suszarkach laboratoryjnych w celu uformowania i zagęszczenia próbek potrzebnych do przeprowadzenia dalszych badań. Temperatura podgrzewania dla mieszanki referencyjnej z czystym asfaltem 45/80-55 wynosiła 150 – 155 °C, natomiast dla partii mieszanki z dodatkami 130 – 135 °C. Po uzyskaniu rozluźnienia mieszanki przystępowano do formowania i zagęszczania próbek, które w głównej części były identyczne rodzajem z próbkami wykorzystywanymi na etapie badań betonów asfaltowych wytworzonych w laboratorium, tj:

- próbki walcowe o średnicy 100 mm i wysokości około 63,5 mm zagęszczane w ubijaku Marshalla,
- próbki prostopadłościennne o kształcie prostokątnym 300 x 300 mm i grubości 40 mm zagęszczane w zautomatyzowanej zagęszczarce walcowej.

Dodatkowym nowym rodzajem były próbki prostopadłościennne o wymiarach 500 x 180 x 50 mm, przygotowane w laboratorium gdańskiego oddziału Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad przy użyciu zagęszczarki PC-BBAC, w której elementem zagęszczającym jest koło z oponą pneumatyczną (fotografia 6.6). Próbki te przeznaczone były do badania odporności na deformacje trwałe w dużym koleinomierzu francuskim.

Próbki mieszanki z czystym asfaltem 45/80-55 zagęszczano w temperaturze 145 – 150 °C, natomiast próbki z mieszanki zawierającej dodatki Ceca Base RT, ViaTop Plus CT40 oraz Rediset WMX w temperaturze 125 – 130 °.

Przyjęty sposób wytwarzania próbek laboratoryjnych (tj. z powtórnie rozgrzewanej luźnej mieszanki wytworzonej uprzednio w wytwórni) oznaczał, że łącznie przechodziły one przez dwa cykle starzenia krótkoterminowego, trwającego podczas przetrzymywania mieszanki w wysokiej temperaturze. Sytuacja ta była nie do uniknięcia, ponieważ po pobraniu na budowie nie było możliwości natychmiastowego

zagęszczenia całej ilości gorącej luźnej mieszanki (ok. 105 kg) w laboratorium, natomiast utrzymywanie jej wysokiej temperatury w suszarce i kolejno postępujące formowanie oraz zagęszczanie skutkowałoby różną długością „drugiego cyklu” starzenia krótkoterminowego. Wobec tego zdecydowano się na dopuszczenie do ostygnięcia luźnych partii mieszanki, a następnie sukcesywne podgrzewanie oraz przygotowywanie niewielkich ilości próbek w miarę postępujących potrzeb. Dzięki temu okres powtórnego przetrzymywania mieszanki w wysokiej temperaturze był dla wszystkich partii danego rodzaju jednakowy.



Fot. 6.6. Przygotowywanie formy 500 x 180 x 50 mm w zagęszczarce PC-BBAC

6.5.3. Wykorzystane metody badawcze

6.5.3.1. Odporność na działanie wody i mrozu

Ogólny schemat postępowania podczas badania odporności mieszanki mastyksu grysowego SMA na działanie wody i mrozu był zgodny z procedurą podaną w punkcie 4.4.2.3, opisującym niniejsze badanie wykonane na betonach asfaltowych wytworzonych w laboratorium z pewnymi zmianami. Z uwagi na późniejszy okres, w którym prowadzono prace nad odcinkiem doświadczalnym, a zwłaszcza fakt jego wykonywania w ramach realizacji prawdziwej inwestycji, konieczne było zastosowanie aktualnych wówczas procedur, zgodnych ze szczegółowymi specyfikacjami technicznymi obowiązującymi na kontrakcie. Dlatego też, wykorzystano zapisy normy europejskiej PN-EN 12697-12 wraz z procedurą kondycjonowania opisaną w Wymaganiach Technicznych WT-2 2010, zmienioną w stosunku do procesu kondycjonowania występującego w WT-2 2008, który wykorzystano na etapie badania mieszanki wytworzonych w laboratorium. Inną była też temperatura badania wytrzymałości na pośrednie rozciąganie. Różnice w stosunku do procedury podanej w punkcie 4.4.2.3 dotyczyły następujących zagadnień:

- cykl rozmrażania jednej z serii próbek z mieszanki SMA wytworzonej podczas realizacji odcinka doświadczalnego polegał na przetrzymywaniu ich w wodzie o temperaturze 60°C przez 24 godziny, natomiast poprzednio podczas badań betonów asfaltowych wytworzonych w laboratorium stosowano temperaturę 40°C i czas rozmrażania trwający 68 godzin,
- wytrzymałość na pośrednie rozciąganie dla próbek z mieszanki SMA określano w 25°C (wcześniej 15°C).

Do wszystkich mieszanek SMA z odcinka doświadczalnego stosowano ten sam zmodyfikowany schemat badania.

Pozostałe parametry występujące w zastosowanej procedurze – tj. sposób podziału próbek na poszczególne serie, ilość próbek, rodzaje serii (bez kondycjonowania, kondycjonowanie bez cyklu zamrażania, kondycjonowanie z cyklem zamrażania) i sposób nasycania wodą były takie same, jak opisane w punkcie 4.4.2.3. Ocenę odporności mieszanki SMA na działanie wody i mrozu dokonano na podstawie analizy wartości bezwzględnych oraz wskaźników wytrzymałości na pośrednie rozciąganie, bez określania modułów sztywności.

6.5.3.2. Starzenie

Określenie wpływu starzenia na parametry mieszanki SMA wytworzonej w trakcie realizacji odcinka doświadczalnego wykonano podobnie, jak dla betonów asfaltowych badanych na etapie prac laboratoryjnych, co opisano w punkcie 4.4.2.4. Biorąc pod uwagę jednak fakt, że w mieszance pobranej w trakcie wykonywania odcinka doświadczalnego zaszło już starzenie krótkoterminowe podczas produkcji, transportu i wbudowywania próbki poddano tylko starzeniu długoterminowemu w suszarce (SDS.).

Proces starzenia długoterminowego (SDS.) symulowano jak na etapie badań mieszanek wytworzonych w laboratorium, tj. poprzez przetrzymywanie odpowiednio przygotowanych próbek w suszarce w temperaturze 85°C przez okres 120 godzin. Taka sama była również liczba próbek w jednej serii – trzy. Sam wpływ starzenia tak samo określano za pomocą wskaźników zmian modułów sztywności oraz wytrzymałości na pośrednie rozciąganie. W omawianym przypadku, kiedy dysponowano serią próbek po starzeniu krótkoterminowym w wytwórni oraz długoterminowym w suszarce, wskaźniki te zdefiniowano w następujący sposób:

Wskaźnik modułu sztywności po starzeniu długoterminowym:

$$WS_{SDS} = \frac{S_{SDS}}{S_{KW}} \times 100\% \quad (6.1)$$

gdzie:

WS_{SDS} – wskaźnik modułu sztywności po starzeniu długoterminowym w suszarce,

S_{SDS} – moduł sztywności sprężystej po starzeniu długoterminowym w suszarce (w warunkach laboratoryjnych),

S_{KW} – moduł sztywności sprężystej próbek po starzeniu krótkoterminowym w wytwórni.

Wskaźnik wytrzymałości na pośrednie rozciąganie:

$$WR_{SDS} = \frac{R_{SDS}}{R_{KW}} \times 100\% \quad (6.2)$$

gdzie:

WR_{SDS} – wskaźnik wytrzymałości na pośrednie rozciąganie po starzeniu długoterminowym,

R_{SDS} – wytrzymałość próbek po starzeniu długoterminowym w suszarce (w warunkach laboratoryjnych),

R_{KW} – wytrzymałość próbek po starzeniu krótkoterminowym w wytwórni.

Badania obu cech (moduł oraz wytrzymałość) wykonywano dla pięciu temperatur: -20, -10, 0, +10 oraz +20 °C. Dla każdej kombinacji 3 zmiennych – temperatury, rodzaju starzenia oraz danego składu – badano 3 próbki.

6.5.3.3. Koleinowanie

Badanie koleinowania przeprowadzono dwiema metodami – w małym koleinomierzu brytyjskim oraz w dużym koleinomierzu francuskim.

Koleinomierz brytyjski (określany również jako „mały aparat”) pozwala na przeprowadzenie badania na próbkach uformowanych z powtórnie rozgrzanej w laboratorium luźnej mieszanki pobranej na budowie oraz próbek wyciętych z nawierzchni. W każdym przypadku badano po dwie próbki danego rodzaju (formowane w laboratorium lub odwierty) dla każdej mieszanki SMA. W koleinomierzu francuskim wykorzystano tylko próbki uformowane w laboratorium. Procedura badawcza przy użyciu koleinomierza brytyjskiego na etapie wykonywania odcinka doświadczalnego była zgodna z procedurą opisaną w punkcie 4.4.2.5., dlatego w dalszej części niniejszego punktu przedstawiono jedynie procedurę badawczą w koleinomierzu francuskim.

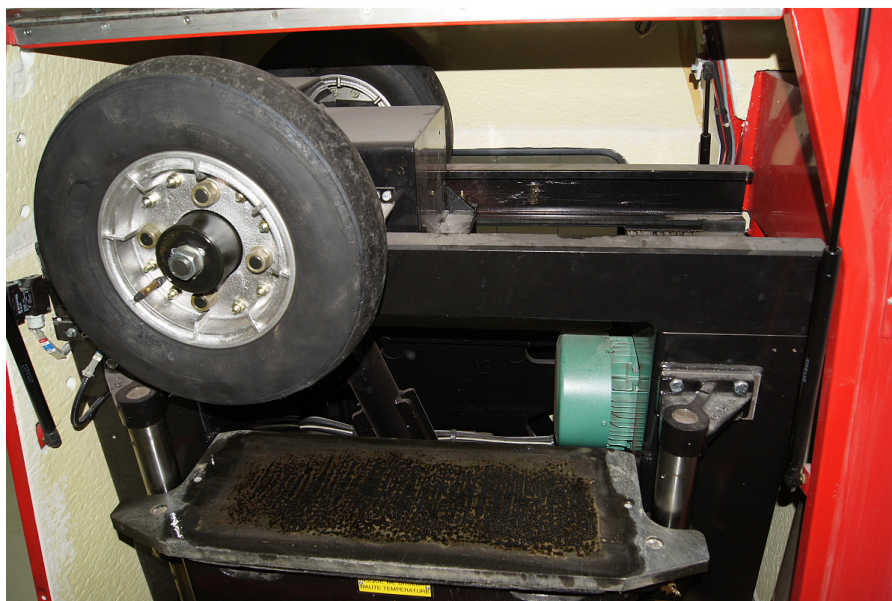
Badanie w koleinomierzu Vectra Orniereur (fotografia 6.7) wyposażonym w koło z oponą pneumatyczną wykonano w laboratorium Wydziału Technologii gdańskiego oddziału GDDKiA. Budowa urządzenia umożliwia jednoczesne koleinowanie dwóch próbek. Przed wykonaniem pierwszego pomiaru próbki były poddawane kondycjonowaniu polegającym na wykonaniu 1000 przejść koła w temperaturze 20°C. Po cyklach kondycjonujących odbywał się tzw. pomiar zerowy głębokości koleiny. Następnie, po 12 godzinach przebywania próbek w komorze koleinomierza w temperaturze 60°C rozpoczynano cykle obciążeniowe właściwego badania. Po odbyciu 3 000, 10 000 i 30 000 cykli dokonywano odczytów głębokości koleiny. Pomiar odbywał się w 5 pięciu przekrojach, przy czym w każdym przekroju dokonuje się 3 odczytów. Dla każdej ilości cykli została wyliczona proporcjonalna głębokość koleiny według wzoru:

$$P_i = \frac{\sum_{j=1}^{15} (m_{ij} - m_{0j})}{15 \times h} \times 100\% \quad (6.3)$$

gdzie:

- P_i – zmierzona proporcjonalna głębokość koleiny, %,
- m_{ij} – odczyt głębokości koleiny w punkcie j w czasie serii pomiarowej i , mm,
- m_{0j} – odczyt początkowy głębokości koleiny w punkcie j , mm,
- h – grubość próbki (50 mm),
- i – oznaczenie serii pomiarowej (po 3, 10 i 30 tysiącach cykli obciążenia),
- j – numeracja punktu pomiarowego, j zmienia się w zakresie od 1 do 15.

Wynik obliczono jako średnią arytmetyczną z badania 2 próbek mieszanki SMA o tym samym składzie.



Fot. 6.7. Widok koleinomierza francuskiego. Na zdjęciu brak próbki.

6.5.3.4. Odporność na spękania niskotemperaturowe

Odporność na spękania niskotemperaturowe mieszanek SMA wytworzonych w wytwórni na odcinek doświadczalny oceniano w taki sam sposób, jak mieszanki betonów asfaltowych wytworzonych w laboratorium, stosując metodę trójpunktowego zginania belki prostopadłościowej. W analizie wyników uwzględniano odkształcenie graniczne, wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu oraz moduły sztywności. Pełną procedurę badania przedstawiono w punkcie 4.4.2.6.

6.5.3.5. Wskaźnik zagęszczenia i zawartość wolnych przestrzeni

Określenie zawartości wolnych przestrzeni i wskaźników zagęszczenia określono na podstawie badań próbek o średnicy 150 mm odwierconych z nawierzchni oraz próbek Marshalla wykonanych z mieszanki pobranej podczas wykonywania odcinka doświadczalnego i powtórnie podgrzanej w laboratorium. Procedury obliczania niniejszych wielkości są dobrze znane i stosowane od wielu lat i z tego powodu nie będą tu opisywane.

6.6. Analiza wyników badań

6.6.1. Odporność na działanie wody i mrozu

Wyniki badań wytrzymałości na pośrednie rozciąganie i wskaźników ITSR przedstawiono w tabelicy 6.8.

Tabela 6.8 Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie oraz wskaźniki ITSR dla mieszanki SMA wytworzonej z czystym asfaltem modyfikowanym 45/80-55 oraz z dodatkami

Rodzaj mieszanki	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie próbek:			Wskaźniki wytrzymałości ITSR próbek:	
	niekondycjonowanych [MPa]	kondycjonowanych bez cyklu zamrażania [MPa]	kondycjonowanych z cyklem zamrażania [MPa]	kondycjonowanych bez cyklu zamrażania	kondycjonowanych z cyklem zamrażania
45/80-55	1,34	1,31	1,33	97,7	99,1
45/80-55 + 0,35% Ceca Base RT	1,27	1,21	1,37	94,8	107,9
45/80-55 + 0,5% Viatop Plus CT40	1,26	1,22	1,16	97,1	92,1
45/80-55 + 2% Rediset WMX	1,23	1,19	1,32	96,5	107,5

Z analizy otrzymanych wyników wynika, że żaden ze środków obniżających temperaturę produkcji mieszanki mineralno-asfaltowych nie wpłynął negatywnie na zachowanie w zakresie odporności na działanie wody i mrozu, pomimo niższej temperatury zagęszczania próbek w laboratorium. Gorsze wyniki od innych, ale w zakresie dopuszczalnym przez polskie uregulowania (tj. minimalna wartość wskaźnika ITSR 90%), uzyskano dla dodatku ViaTop Plus CT40 (odpowiednik Sasobitu). Otrzymane wytrzymałości na pośrednie rozciąganie są nieco niższe dla mieszanki z dodatkami, lecz spadek ten jest niewielki i nie przekracza 10%. W dwóch przypadkach (Ceca Base RT i Rediset) uzyskano większą wytrzymałość dla próbek kondycjonowanych z

cyklem zamrażania, niż dla próbek niekondycjonowanych. Wzrost ten o wartości ok. 8% mieści się jednak w granicach dokładności metody badania.

6.6.2. Starzenie długoterminowe

W tablicach 6.9 – 6.12 oraz na rysunkach 6.2 – 6.3 przedstawiono średnie wyniki badań wpływu starzenia na badane mieszanki mastyksu grysowo-asfaltowego SMA, wyrażone poprzez następujące parametry:

- bezwzględne wartości wytrzymałości na pośrednie rozciąganie określanych w pięciu temperaturach dla serii próbek kontrolnych (które przebyły już starzenie krótkoterminowe) oraz poddanych starzeniu długoterminowemu,
- bezwzględne wartości modułów sztywności sprężystej określanych w pięciu temperaturach dla serii próbek kontrolnych (które przebyły już starzenie krótkoterminowe) oraz poddanych starzeniu długoterminowemu,
- odpowiadające obu parametrom wskaźniki zmian obliczone na podstawie stosunków ich wartości bezwzględnych.

Rysunki 6.4 oraz 6.5 przedstawiają porównanie wytrzymałości na pośrednie rozciąganie i modułów sztywności sprężystej dla wszystkich przebadanych mieszanek we wszystkich temperatur.

Tablica 6.9. Zestawienie wyników badania starzenia długoterminowego (wytrzymałości na pośrednie rozciąganie) próbek mastyksu grysowo-asfaltowego SMA z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 czystym i z dodatkami

Rodzaj próbek	Temperatura badania [°C]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie, [MPa]			
		45/80-55	45/80-55 + 0,35% Ceca Base RT	45/80-55 + 0,5% ViaTop Plus CT40	45/80-55 + 2% Rediset WMX
Grupa kontrolna (po starzeniu krótkoterminowym w wytwórni) K.W.	+20	2,17	1,74	-*	1,75
	+10	3,32	3,17	3,30	3,03
	0	4,49	4,34	3,75	4,29
	-10	4,41	3,70	3,85	3,61
	-20	4,47	4,21	3,04	4,08
Grupa po starzeniu długoterminowym w suszarce S.D.S.	+20	2,09	1,77	1,84	1,97
	+10	2,94	3,31	3,04	3,00
	0	3,99	4,46	4,03	4,07
	-10	4,66	4,42	4,42	4,69
	-20	4,55	4,62	4,40	3,79

* brak danych, awaria sprzętu

Tablica 6.10. Zestawienie wyników badania starzenia długoterminowego (modułów sztywności) próbek mastyksu grysowo-asfaltowego SMA z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 czystym i z dodatkami

Rodzaj próbek	Temperatura badania [°C]	Moduł sztywności, [MPa]			
		45/80-55	45/80-55 + 0,35% Ceca Base RT	45/80-55 + 0,5% ViaTop Plus CT40	45/80-55 + 2% Rediset WMX
Grupa kontrolna (po starzeniu krótkoterminowym w wytwórni)	+20	6 402	5 504	7 361	5 171
	+10	9 969	8 956	10 334	8 960
	0	9 764	11 472	12 605	12 620
	-10	19 038	16 822	16 454	16 602
	-20	22 494	20 981	21 144	20 819
Grupa po starzenie długoterminowym w suszarce	20	6 006	5 157	7 088	6 053
	10	9 235	9 353	10 570	9 150
	0	14 529	14 971	14 901	14 676
	-10	18 003	18 053	18 388	17 811
	-20	24 545	22 395	22 248	21 818

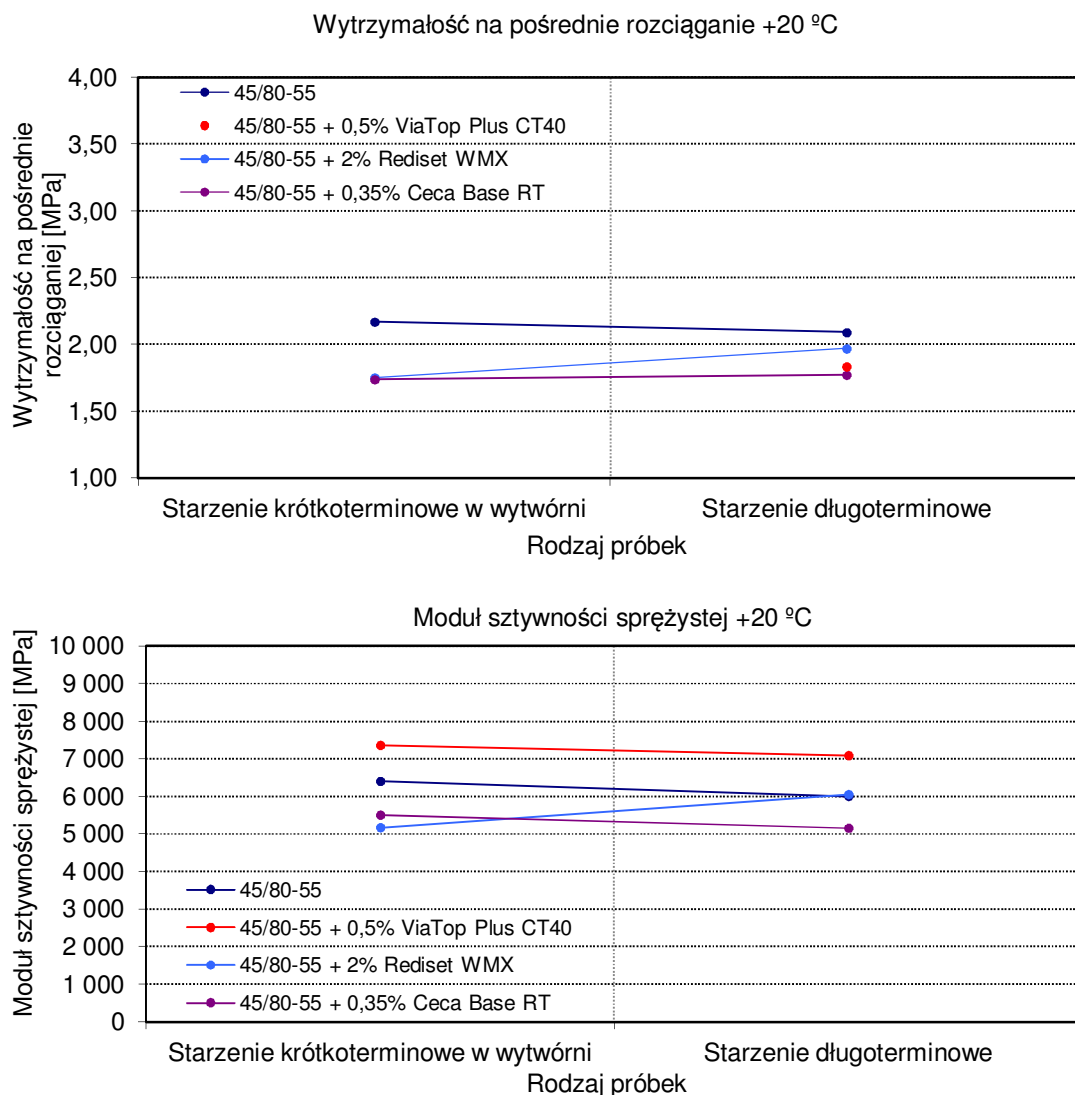
Tablica 6.11. Zestawienie średnich wartości wskaźników wytrzymałości na pośrednie rozciąganie, w różnych temperaturach dla próbek mastyksu grysowo-asfaltowego SMA z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 czystym i z dodatkami

Rodzaj wskaźnika WR	Temperatura badania modułu sztywności [°C]	45/80-55	45/80-55 + 0,35% Ceca Base RT	45/80-55 + 0,5% ViaTop Plus CT40	45/80-55 + 2% Rediset WMX
Starzenie długoterminowe S.D.S./K.W.	+20	0,96	1,02	-*	1,12
	+10	0,89	1,05	0,92	0,99
	0	0,89	1,03	1,08	0,95
	-10	1,06	1,19	1,15	1,30
	-20	1,03	1,25	1,14	1,05

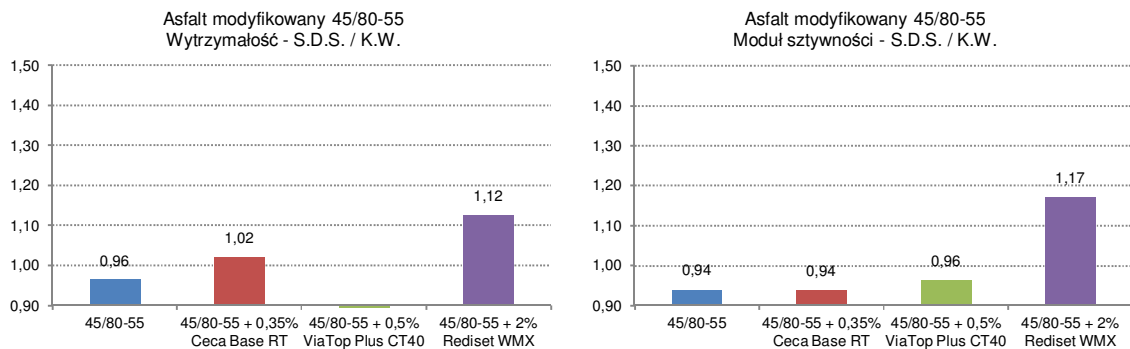
* brak danych, awaria sprzętu

Tablica 6.12. Zestawienia średnich wartości wskaźników modułów sztywności sprężystej, w różnych temperaturach dla próbek mastyksu grysowo-asfaltowego SMA z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 czystym i z dodatkami

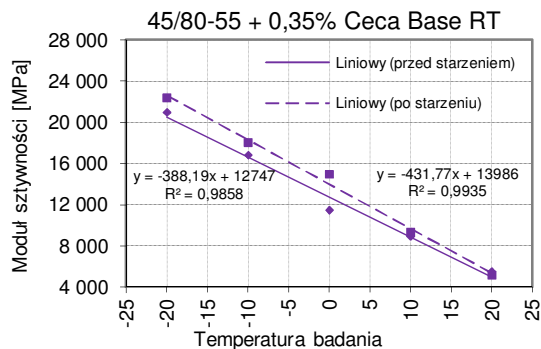
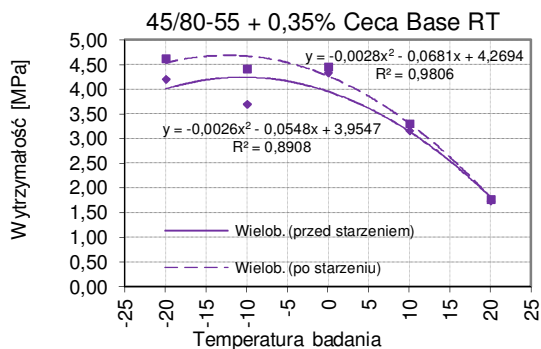
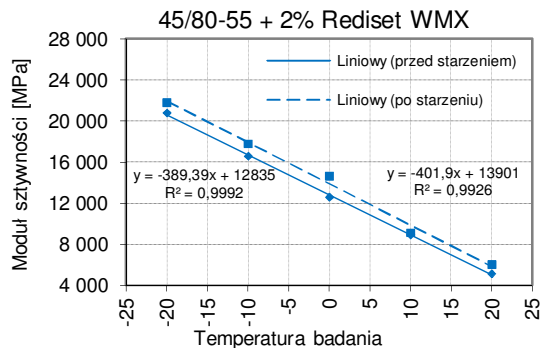
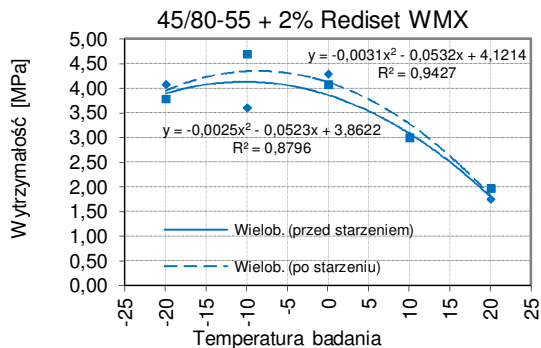
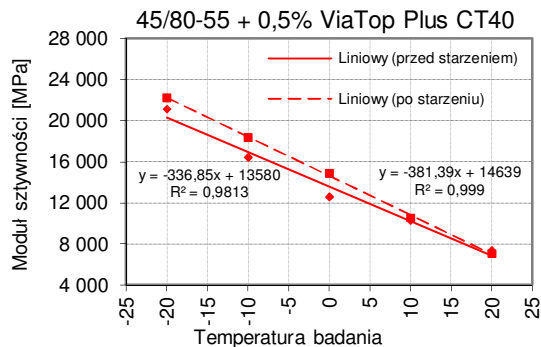
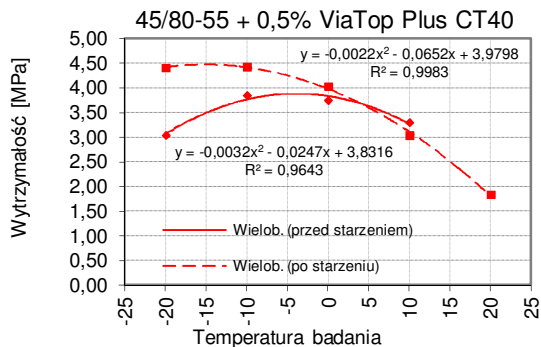
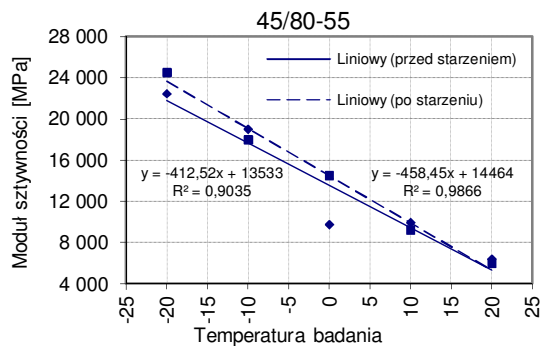
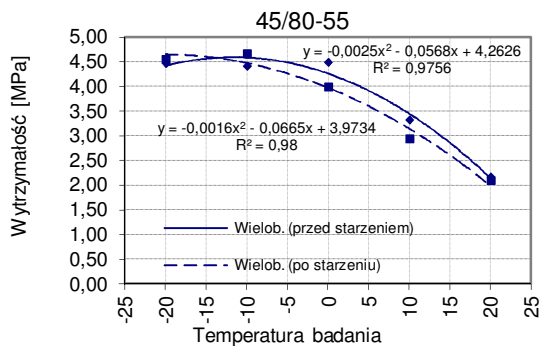
Rodzaj wskaźnika WS	Temperatura badania modułu sztywności [°C]	45/80-55	45/80-55 + 0,35% Ceca Base RT	45/80-55 + 0,5% ViaTop Plus CT40	45/80-55 + 2% Rediset WMX
Starzenie długoterminowe S.D.S./K.W.	+20	0,94	0,94	0,96	1,17
	+10	0,93	1,04	1,02	1,02
	0	1,49	1,31	1,18	1,16
	-10	0,95	1,07	1,12	1,07
	-20	1,09	1,07	1,05	1,05



Rys. 6.2. Wykresy średnich wartości wytrzymałości na pośrednie rozciąganie oraz modułów sztywności w temperaturze +20 °C dla próbek mieszanki SMA z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 czystym i z dodatkami



Rys. 6.3. Wykresy wskaźników WR i WS dla próbek SMA z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 w temperaturze +20°C



Rys. 6.4. Porównanie wytrzymałości na pośrednie rozciąganie mieszanki SMA przed i po starzeniu długoterminowym

Rys. 6.5. Porównanie modułów sztywności sprężystej mieszanki SMA przed i po starzeniu długoterminowym

Z analizy przeprowadzonych badań wpływu starzenia na mieszankę mastyksu grysowego SMA wyprodukowanego w laboratorium można sformułować następujące wnioski:

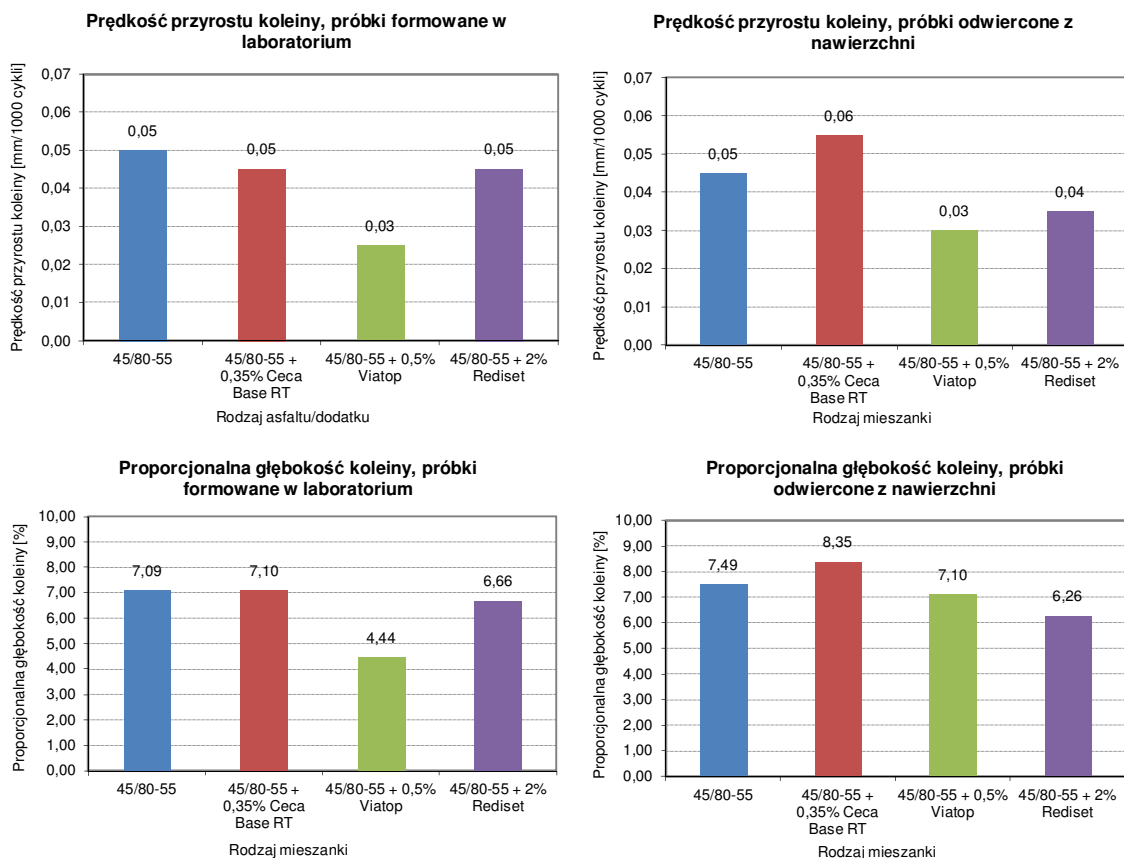
- Najwyraźniejsze usztywnienie mieszanki w 20°C po starzeniu nastąpiło w przypadku dodatku Rediset WMX. Wzrost modułów sztywności w tej temperaturze dla pozostałych mieszanek był bardzo mały (maksymalnie do 6%).
- Mieszanka z dodatkiem środka Rediset WMX wykazała się również wzrostem wytrzymałości na pośrednie rozciąganie w 20°C. Wytrzymałość mieszanki z asfaltem czystym oraz dodatkiem Ceca Base RT pozostała praktycznie na tym samym poziomie.
- Z analizy modułów sztywności przed i po starzeniu we wszystkich temperaturach wynika, że wzrost sztywności dla mieszanki referencyjnej oraz z dodatkiem środka ViaTop Plus CT40 oraz Ceca Base RT zwiększał się wraz z obniżaniem temperatury badania. Dla mieszanki z dodatkiem Redisetu WMX wzrost sztywności był dość równomierny we wszystkich temperaturach.
- Dla mieszanki z dodatkiem ViaTop Plus CT40 odnotowano wyraźne przesunięcie się (w stronę niższej temperatury) wartości maksymalnej wytrzymałości na pośrednie rozciąganie po przeprowadzeniu symulowanych procesów starzenia długoterminowego.

6.6.3. Odporność na koleinowanie

Wyniki badań odporności na koleinowanie w koleinomierzu europejskim przedstawiono w tabelicy 6.13 oraz rysunku 6.6. Tablica 6.14 oraz rysunek 6.7 dotyczą badania w koleinomierzu francuskim.

Tablica 6.13. Wyniki badań w koleinomierzu europejskim mieszanki SMA z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 czystym i z dodatkami

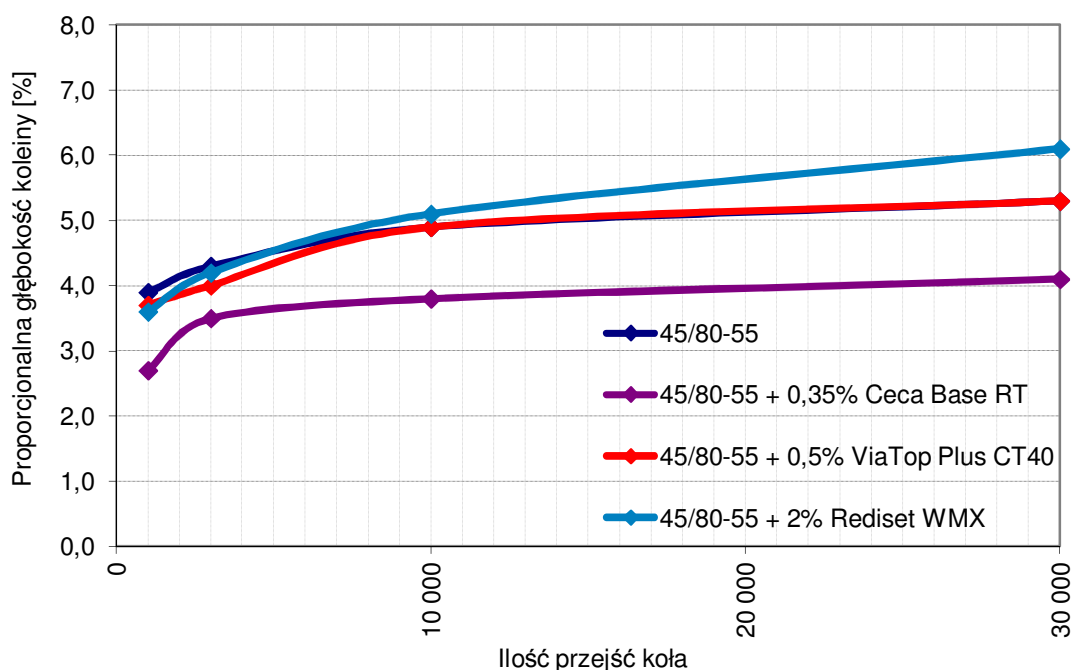
Rodzaj mieszanki	Próbki formowane i zagęszczane w laboratorium			Próbki odwiercone z nawierzchni		
	Głębokość koleiny RD ₁₀₀₀₀ [mm]	Prędkość przyrostu koleiny WTS _{AIR} [mm/1000/p]	Proporcjonalna głębokość koleiny PRD _{AIR} [%]	Głębokość koleiny RD ₁₀₀₀₀ [mm]	Prędkość przyrostu koleiny WTS _{AIR} [mm/1000/p]	Proporcjonalna głębokość koleiny PRD _{AIR} [%]
45/80-55	2,84	0,050	7,09	3,46	0,045	7,49
45/80-55 + 0,35% Ceca Base RT	2,84	0,045	7,10	3,45	0,055	8,35
45/80-55 + 0,5% ViaTop Plus CT40	1,78	0,025	4,44	3,00	0,030	7,10
45/80-55 + 2% Rediset WMX	2,67	0,045	6,66	2,51	0,035	6,26



Rys. 6.6. Wyniki badań prędkości przyrostu oraz procentowej głębokości koleiny dla próbek mieszanki SMA z asfaltem modyfikowanym czystym i z dodatkami, temperatura 60°C, wg PN-EN12697-22, metoda B

Tablica 6.14. Wyniki badań koleinowania w koleinomierzu francuskim dla próbek mieszanki SMA z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 czystym i z dodatkami – próbki formowane w laboratorium

Rodzaj mieszanki	Ilość przejeżdżonych przejazdów koła	Głębokość koleiny [mm]	Proporcjonalna głębokość koleiny [%]
45/80-55	1 000	1,9	3,9
	3 000	2,1	4,3
	10 000	2,4	4,9
	30 000	2,6	5,3
45/80-55 + 0,35% Ceca Base RT	1 000	1,4	2,7
	3 000	1,8	3,5
	10 000	1,9	3,8
	30 000	2,0	4,1
45/80-55 + 0,5% ViaTop Plus CT40	1 000	1,8	3,7
	3 000	2,0	4,0
	10 000	2,5	4,9
	60 000	2,6	5,3
45/80-55 + 2% Rediset WMX	1 000	1,7	3,6
	3 000	2,1	4,2
	10 000	2,5	5,1
	30 000	3,1	6,1



Rys. 6.7. Proporcjonalna głębokość koleiny uzyskana w koleinomierzu francuskim dla mieszanki SMA z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 czystym i z dodatkami – próbki formowane i zagęszczane w laboratorium

Z analizy otrzymanych danych wynika, że w przypadku badań odporności na koleinowanie w małym koleinomierzu żadna z mieszanek z dodatkami obniżającymi temperaturę nie wykazała pogorszonej odporności na koleinowanie, zarówno w stosunku do mieszanki referencyjnej, jak i do tożsamyh mieszanek z dodatkami wytworzonych na etapie przygotowania recepty w laboratorium. Dotyczyło to zarówno wyników otrzymanych na próbkach wytworzonych z powtórnie podgrzanej mieszanki w laboratorium, jak i próbkach odwierconych z nawierzchni, jednakże rozrzut wyników próbek odwierconych z nawierzchni jest większy.

W badaniu w małym koleinomierzu zaznaczył się pozytywny wpływ dodatku ViaTop Plus CT40 (odpowiednik Sasobitu) na odporność na deformacje trwałe. Dotyczyło to zwłaszcza próbek przygotowywanych w laboratorium z powtórnie podgrzewanej mieszanki. Potwierdza to wyniki uzyskane na etapie badań laboratoryjnych. Natomiast rezultaty z badania w dużym koleinomierzu są nieco inne. W tym przypadku najmniejszą proporcjonalną głębokość koleiny otrzymano dla mieszanki z dodatkiem Ceca Base RT. Pozostałe mieszanki (referencyjna, ViaTop Plus CT40 oraz Rediset WMX) w początkowej fazie badania 1 000 – 10 000 cykli różnią się bardzo niewiele. W dalszej fazie 10 000 – 30 000 cykli krzywe mieszanki referencyjnej i mieszanki z dodatkiem ViaTop Plus CT40 niemal się pokrywają, natomiast prędkość przyrostu koleiny dla mieszanki z dodatkiem Rediset WMX ulega zwiększeniu w stosunku do pozostałych. Kąt nachylenia krzywej (odzwierciedlający prędkość przyrostu koleiny) w dalszej fazie 10 000 – 30 000 cykli dla mieszanki

referencyjnej z czystym asfaltem 45/80-55, oraz mieszanek z dodatkiem ViaTop Plus CT40 oraz Ceca Base RT jest bardzo zbliżony, natomiast większy jest dla mieszanki z dodatkiem Rediset WMX.

6.6.4. Odporność na spękania niskotemperaturowe

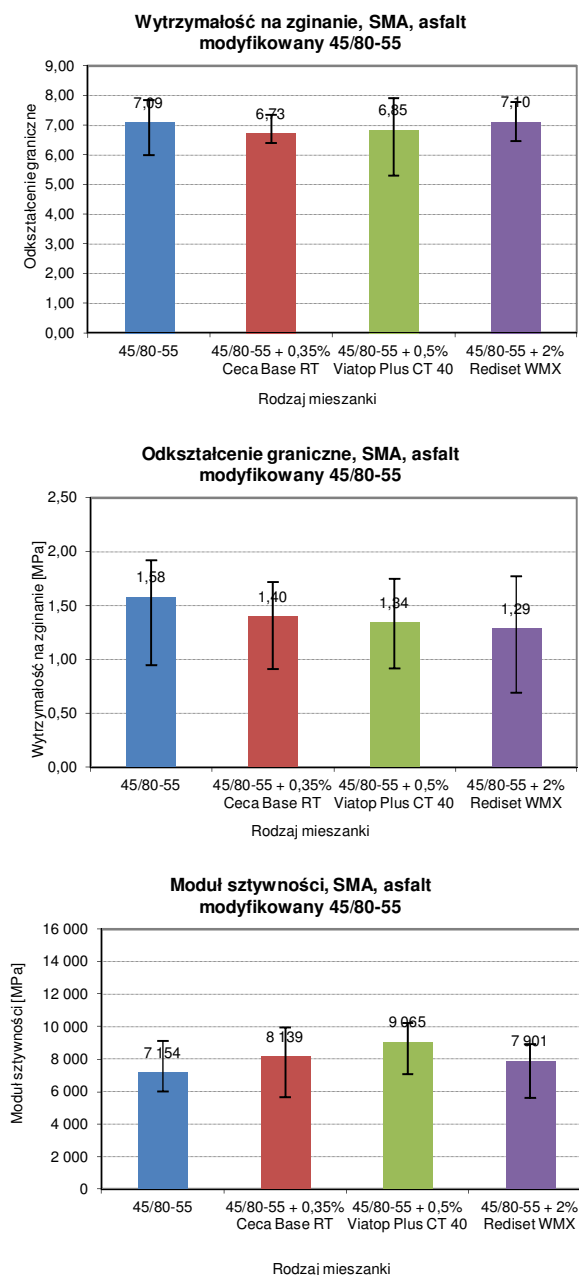
W każdej serii badano po 5 próbek, odrzucając wyniki niemiernodajne (np. pęknięcie belki poza bazą pomiarową czujnika LVDT). Belki do badania zostały wycięte z płyt o wymiarach 300 x 300 x 50 mm zagęszczonych w zagęszczarce walcowej z powtórnie podgrzanej mieszanki pobranej w trakcie wykonywania odcinka doświadczalnego.

Badanie przeprowadzono dla wszystkich belek w temperaturze -20°C.

Wyniki badań wytrzymałości na zginanie przedstawiono w tablicy 6.15 oraz na rysunku 6.8.

Tablica 6.15. Wyniki badań trójpunktowego zginania belek z mieszanki SMA z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 (czystym i dodatkami)

Rodzaj mieszanki	Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu [MPa]	Odch. standardowe	Odształcenie graniczne [%]	Odch. standardowe	Moduł sztywności [MPa]	Odch. standardowe
45/80-55	7,09	0,77	1,58	0,41	7 154	1 167
45/80-55 + 0,35% Ceca Base RT	6,73	0,39	1,40	0,30	8 139	2 215
45/80-55 + 0,5% Viatop Plus CT 40	6,85	1,01	1,34	0,30	9 065	1 236
45/80-55 + 2% Rediset WMX	7,10	0,48	1,29	0,40	7 901	1 314



Rys. 6.8. Wyniki badań wytrzymałości na zginanie, odkształcenia granicznego oraz modułu sztywności metodą zginania belki trójpunktowej

Z przeprowadzonych badań wynika, że żaden z zastosowanych dodatków nie spowodował znaczącego spadku wytrzymałości na pośrednie rozciąganie lub odkształcenia granicznego. Jedynie w przypadku mieszanek SMA z dodatkiem ViaTop Plus CT40 (odpowiednik Sasobitu) zaobserwowano nieco większy moduł sztywności.

6.6.5. Zawartość wolnych przestrzeni i wskaźniki zagęszczenia w nawierzchni

Określenie zawartości wolnych przestrzeni i wskaźników zagęszczenia określono na podstawie badań próbek o średnicy 150 mm odwierconych z nawierzchni oraz próbek Marshalla wykonanych z mieszanki pobranej podczas wykonywania odcinka doświadczalnego i powtórnie podgrzanej w laboratorium. Temperatura zagęszczania próbek Marshalla dla mieszanki referencyjnej wynosiła 150 – 155 °C, natomiast mieszanki z dodatkiem Ceca Base RT, ViaTop Plus CT40 oraz Rediset WMX w temperaturze 130 – 135 °C. Gęstość samej mieszanki określano na jej porcjach pobranych w trakcie wykonywania odcinka doświadczalnego. Wyniki badania zawartości wolnych przestrzeni oraz wskaźników zagęszczenia przedstawiono w tablicy 6.16. Występujące w niej wartości średnie obliczono na podstawie czterech odwiertów wykonanych w każdym z poszczególnych odcinków warstwy ścieralnej z danej mieszanki.

Tablica 6.16. Wyniki badań gęstości objętościowej, wolnych przestrzeni i wskaźników zagęszczenia mieszanki SMA z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 (czystym i dodatkami)

Rodzaj mieszanki	Wolna przestrzeń [%]	Wskaźnik zagęszczenia [%]
45/80-55	4,70%	98,6%
45/80-55 + 0,35% Ceca Base RT	4,42%	99,2%
45/80-55 + 0,5% ViaTop Plus CT40	4,69%	99,0%
45/80-55 + 2% Rediset WMX	2,39%	101,0%

Wszystkie badane próbki spełniały wymogi narzucane wykonanej warstwie ścieralnej przez szczegółową specyfikację techniczną obowiązującą na kontrakcie, która wymagała osiągnięcia przez warstwę ścieralną SMA zawartości wolnych przestrzeni w przedziale 2 – 6% (dla kategorii ruchu KR5-6) lub 1,5 – 6% (dla kategorii ruchu KR3-4) oraz wskaźnika zagęszczenia większego od 97%. Dla mieszank z dodatkami obniżającymi temperaturę stwierdzono nieco większy wskaźnik zagęszczenia, szczególnie dla mieszanki z dodatkiem środka Rediset WMX. W tym przypadku osiągnięto również niemal dwukrotnie mniejszą zawartość wolnych przestrzeni w stosunku do pozostałych mieszank. Uzyskane rezultaty nie wykazały jednoznacznego wpływu dodatków WMA na końcową zawartość wolnych przestrzeni w warstwie, która – w przypadku takiej samej temperatury produkcji mieszanki mineralno-asfaltowej zwykłej oraz z dodatkami WMA – powinna być niższa na odcinkach z dodatkami WMA. Według doktoranta, nie oznacza to braku efektywności działania środków mających obniżyć temperaturę wbudowania. Z uwagi na brak możliwości technicznych nie prowadzono bezpośredniego pomiaru podczas wbudowywania mieszank, który pozwolił by na określenie prędkości zmian w zawartości wolnych przestrzeni w zależności od zastosowanej energii zagęszczania

(tj. ilości przejść walców). Obliczanie zawartości wolnych przestrzeni i wskaźnika zagęszczenia na podstawie gęstości próbek odwierconych z nawierzchni pozwala na określenie jedynie ich ostatecznych wartości, po zakończeniu procesu zagęszczania, bez wskazywania różnic pomiędzy poszczególnymi rodzajami mieszanek w trakcie jego trwania.

6.6. Wnioski z etapu badań terenowych

Na podstawie przeprowadzonych badań mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkami obniżającymi temperaturę można sformułować następujące wnioski:

- Produkcja mieszanek z dodatkami WMA może odbywać się w tradycyjnej wytwórni mieszanek mineralno-asfaltowych.
- Wprowadzenie do składu mieszanek mineralno-asfaltowych dodatków WMA nie spowodowało obniżenia ich jakości. Mieszanki SMA były jednorodne, nie występowały problemy z nadmierną spływnością asfaltu z kruszywa.
- Odporność na działanie wody i mrozu mieszanek SMA z dodatkami WMA nie odbiegała od odporności referencyjnej mieszanki SMA, z czystym asfaltem modyfikowanym 45/80-55.
- Nie odnotowano wzrostu efektów starzenia w mieszankach SMA zawierających dodatki WMA.
- Odporność na deformacje trwale mieszanek SMA z dodatkami WMA nie była gorsza od referencyjnej mieszanki SMA, zaś dla dodatku ViaTop Plus CT40 (będący odpowiednikiem dodatku Sasobit wykorzystanym na etapie badań laboratoryjnych) była nawet większa.
- Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu i odkształcenie graniczne uzyskane w badaniu trójpunktowego zginania w $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ prostopadłościennej belki dla wszystkich badanych mieszanek SMA były podobne. Odnotowano nieco większe moduły sztywności dla próbek wykonanych z mieszanki z dodatkiem ViaTop Plus CT40, co wynika z usztywniającego wpływu wosku Fischera-Tropscha, wchodzącego w skład niniejszego dodatku.
- Badając zawartości wolnych przestrzeni oraz wskaźniki zagęszczenia na podstawie odwiertów wykonanych w gotowej nawierzchni nie stwierdzono jednoznacznego wpływu dodatków WMA na zagęszczalność mieszanki. W przypadku dodatku Rediset WMX zawartość wolnych przestrzeni w warstwie była prawie dwukrotnie mniejsza, niż w przypadku mieszanki referencyjnej, zaś wskaźnik zagęszczenia był większy. Dla pozostałych dwóch dodatków, tj. Ceca Base RT oraz ViaTop Plus CT40 (odpowiednik Sasobitu) różnic praktycznie nie stwierdzono. Określanie wymienionych parametrów na podstawie próbek odwierconych z gotowej nawierzchni nie pozwala jednakże na uchwycenie różnic występujących w trakcie procesu zagęszczania.

7. ANALIZA PRACY NAWIERZCHNI WYKONANYCH Z MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH ZAWIERAJĄCYCH DODATKI OBNIŻAJĄCE TEMPERATURĘ PRODUKCJI I WBUDOWYWANIA

7.1. Wstęp

W niniejszym rozdziale przedstawiono rozważania dotyczące analizy pracy nawierzchni wykonanych z mieszank mineralno-asfaltowych zawierających dodatki obniżające temperaturę produkcji i wbudowywania. Analizę pracy nawierzchni przedstawiono w dwóch ujęciach:

- przy założeniu liniowosprężystych charakterystyk materiałowych asfaltowych warstw nawierzchni,
- przy założeniu lepkosprężystych charakterystyk materiałowych asfaltowych warstw nawierzchni.

W pierwszej części głównym zamierzeniem było określenie ewentualnych różnic w trwałościach zmęczeniowych nawierzchni wykonanych z mieszank mineralno-asfaltowych zawierających różne dodatki WMA. Do tego celu wykorzystano kryterium spękań zmęczeniowych przyjęte w mechanistyczno-empirycznej metodzie AASHTO 2004 oraz dane materiałowe uzyskane na etapie badań laboratoryjnych opisanych w rozdziale 5. Do obliczenia naprężeń i odkształceń w nawierzchni niezbędnych do zastosowania w kryterium zmęczeniowym wykorzystano program do analizy wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej BISAR. Przed wykonaniem właściwych obliczeń trwałości zmęczeniowej dokonano oceny statystycznej wyników badań modułów sztywności i wytrzymałości na pośrednie rozciąganie, aby odrzucić te dodatki WMA, które nie powodowały istotnej zmiany parametrów materiałowych.

Celem drugiej części analizy było określenie wpływu dodatków WMA na zachowanie się konstrukcji nawierzchni w okresie wysokich temperatur. Analizę tę przeprowadzono wykorzystując wyniki odkształceń oraz ugięć nawierzchni uzyskane z programu VEROAD, który umożliwia modelowanie wielowarstwowych układów konstrukcji nawierzchni o charakterze lepkosprężystym. Parametry materiałowe potrzebne do programu VEROAD określono na podstawie wyników z dodatkowego cyklu badań laboratoryjnych, podczas których określono w urządzeniu AMPT/SPT moduły dynamiczne mieszank mineralno-asfaltowych z wybranymi dodatkami WMA. Model rozkładu temperatury w przyjętym układzie warstw analizowanym programem VEROAD przyjęto na podstawie rzeczywistych pomiarów temperatury nawierzchni prowadzonych na sieci drogowej Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad.

7.2. Analiza trwałości zmęczeniowej

7.2.1. Procedura analizy

Analiza trwałości zmęczeniowej nawierzchni wykonanych z mieszanek mineralno-asfaltowych zawierających różne dodatki WMA obejmowała następujące kroki:

- przyjęcie kryteriów zmęczeniowych,
- ocena statystyczna istotności wartości średnich parametrów materiałowych mieszanek mineralno-asfaltowych uzyskanych na etapie badań laboratoryjnych,
- przyjęcie układu warstw konstrukcji nawierzchni oraz parametrów obciążenia,
- obliczenie naprężeń i odkształceń w programie BISAR,
- wprowadzenie uzyskanych naprężeń i odkształceń do kryteriów zmęczeniowych,
- ocena wyników i wnioski.

7.2.2. Przyjęcie kryteriów zmęczeniowych

W analizie trwałości zmęczeniowej wykorzystano dwa rodzaje kryteriów:

- kryterium spękań zmęczeniowych warstw asfaltowych występujące w metodzie AASHTO 2004, noszącej w USA nazwę MEPDG („Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide”),
- kryterium deformacji trwałych podłoża gruntowego Instytutu Asfaltowego.

Podstawy dotyczące opracowania i kalibracji kryterium spękań zmęczeniowych warstw asfaltowych według AASHTO 2004 opisano między innymi w amerykańskich pracach [84] oraz [85] zaś w Polsce w [62], [64] i [66]. Ponieważ zagadnienia teorią trwałości zmęczeniowej nawierzchni nie są tematem niniejszej pracy doktorskiej ograniczono się do przedstawienia zastosowanych wzorów wraz z objaśnieniem występujących w nich symboli.

Trwałość warstw asfaltowych z uwagi na wystąpienie spękań zmęczeniowych obliczano według wzoru 7.1:

$$N_f = 7,3557 \cdot (10^{-6}) \cdot C \cdot k'_1 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{3,9492} \cdot \left(\frac{1}{E}\right)^{1,281} \quad (7.1)$$

gdzie:

- N_f – liczba powtarzalnych obciążeń do wystąpienia spękań zmęczeniowych na 50% całkowitej powierzchni pasa ruchu,
- k'_1 – parametr określony w procesie kalibracji metody, zależny od grubości warstw asfaltowych,
- ε_t – odkształcenie rozciągające w krytycznym punkcie, w przekroju pionowym nawierzchni,
- E – moduł sztywności warstwy asfaltowej, w MPa,
- C – współczynnik zależny od właściwości objętościowych mieszanki mineralno-asfaltowej, określony wzorami 7.2 i 7.3:

$$C = 10^M \quad (7.2)$$

$$M = 4,84 \cdot \left(\frac{V_b}{V_a + V_b} - 0,69 \right) \quad (7.3)$$

gdzie:

- V_b – efektywna zawartość asfaltu, % objętościowo,
 V_a – zawartość wolnych przestrzeni, % objętościowo.

W metodzie AASHTO 2004 występują dwa modele powstawania spękań w warstwach asfaltowych:

- mechanizm spękań „z dołu do góry”,
- mechanizm spękań „z góry do dołu”.

W zależności od analizowanego modelu powstawania spękań przyjmuje się odpowiednie wzory do wyznaczenia parametru k'_1 . W niniejszej pracy przyjęto do rozważań dotychczasowy powszechnie stosowany model powstawania spękań „z dołu do góry”, wobec czego parametr k'_1 określono wzorem 7.4:

$$FC_{bottom} = \frac{100}{1 + e^{(C_1 \cdot C'_1 + C_2 \cdot C'_2 \cdot \log_{10}(D \cdot 100))}} \quad (7.4)$$

gdzie:

- h_{ac} – całkowita grubość wszystkich warstw asfaltowych w konstrukcji nawierzchni.

Według założeń metody AASHTO 2004 wyjściowa forma wzorów 7.1, 7.2 i 7.3 służy do wyznaczenia ilości powtarzalnych obciążeń, które spowodują powstanie spękań zmęczeniowych na 50% całkowitej powierzchni pasa ruchu, oznaczając wystąpienie szkody zmęczeniowej $D=1$. Metoda AASHTO 2004 pozwala jednakże na obliczenie ilości przejść osi obliczeniowych, które spowodują wystąpienie dowolnego stopnia spękań siatkowych. W obliczeniach w niniejszym rozdziale przyjęto wartość parametru FC jako 10%. Ilość spękań siatkowych powstających „z dołu do góry” wyznacza się na podstawie przyjętej wartości szkody zmęczeniowej według wzoru 7.5:

$$k'_1 = \frac{1}{0,000398 + \frac{0,003602}{1 + e^{(11,02 - 1,374 \cdot h_{ac})}}} \quad (7.5)$$

gdzie:

- FC_{bottom} – ilość spękań siatkowych typu „z dołu do góry”, wyrażona w procentach w stosunku do całej powierzchni pasa ruchu,
 D – szkoda zmęczeniowa wywołana na spodzie warstw asfaltowych,

wyrażona w formacie dziesiętnym,
C1, C'1, C2, C'2 – współczynniki kalibracyjne określona następującymi wzorami:

$$\begin{aligned} C_1 &= 1,0 \\ C_2' &= -2,40874 - 39,748 \cdot (1 + h_{ac} / 2,54)^{-2,856} \\ C_1' &= -2 \cdot C_2' \\ C_2 &= 1,0 \end{aligned} \quad (7.6)$$

Trwałość konstrukcji nawierzchni z uwagi na deformację podłoża gruntowego określano za pomocą kryterium Instytutu Asfaltowego:

$$N_f = \left(\frac{k}{\varepsilon_z} \right)^{\left(\frac{1}{m} \right)} \quad (7.7)$$

gdzie:

- ε_z – pionowe odkształcenia ściskające na górnej powierzchni podłoża gruntowego,
- k, m – współczynniki empiryczne:

$$\begin{aligned} m &= 0,223 \\ k &= 1,05 \cdot 10^{-2} \end{aligned} \quad (7.8)$$

7.2.3. Ocena statystyczna istotności wartości średnich parametrów materiałowych mieszanek mineralno-asfaltowych uzyskanych na etapie badań laboratoryjnych

Do wykonania obliczeń mechanistycznych konstrukcji nawierzchni wykorzystano dane materiałowe (moduły sztywności) uzyskane na etapie badań laboratoryjnych betonów asfaltowych z różnymi dodatkami WMA, które zostały opisane w rozdziale 5 niniejszej pracy doktorskiej. Z uwagi na to, że otrzymane wyniki dla różnych składów niejednokrotnie różniły się od siebie jedynie o kilkanaście procent (co jest normalnym rozrzutem wyników podczas mieszanek mineralno-asfaltowych) konieczne było przeprowadzenie oceny statystycznej istotności różnic otrzymanych wartości dla sprawdzenia celowości przeprowadzania obliczeń mechanistycznych dla konkretnej mieszanki mineralno-asfaltowej z danym dodatkiem WMA. Do stwierdzenia, czy wyniki otrzymane w badaniach laboratoryjnych różnią się między sobą w sposób losowy lub istotny zastosowano test „t”, w którym wartości testowe dla wszystkich kombinacji par serii wyników modułów sztywności obliczano za pośrednictwem wzoru:

$$t_{oblicz} = \frac{|\bar{X}_1 - \bar{X}_2|}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}} \quad (7.9)$$

gdzie:

- t_{oblicz} – statystyka „t”,
 \bar{X} – wartości średnie modułów sztywności,
 S – odchylenia standardowe modułów sztywności,
 n_1, n_2 – liczba próbek w serii.

Uzyskane wartości testowe „ t_{oblicz} ” porównano z wartościami tablicowymi $t(P,k)$, które zostały podane dla przyjętego poziomu ufności P oraz liczby stopni swobody k:

$$k = n_1 + n_2 - 2 \quad (7.10)$$

Przy uwzględnieniu ilości jednorodnych próbek podczas badania modułów sztywności wynoszącej 3, liczba stopni równała się $k = 4$.

Uzyskanie z równania 7.9 wartości bezwzględnej t_{oblicz} większej od wartości tablicowej $t(P,k)$ oznacza, że z prawdopodobieństwem ufności P można stwierdzić, iż różnica pomiędzy analizowanymi średnimi wartościami jest istotna (nieprzypadkowa). W tabelicy 7.1 przedstawiono finalne wyniki testu hipotezy zakładającej istotną różnicę wartości średnich modułów sztywności betonów asfaltowych z asfaltem zwykłym 50/70 czystym oraz z dodatkami WMA. Analizowano moduły sztywności próbek poddanych starzeniu długoterminowemu (opis w punkcie 5.2.4.) uzyskane w temperaturze 10 °C. Przyjęto prawdopodobieństwo ufności $P = 90\%$, dla którego $t = 2,132$. Tablica 7.2 dotyczy wyników testu przy takich samych założeniach dla betonów asfaltowych z asfaltem modyfikowanym 45/80-55. Szczegółowe wyniki testów istotności różnic wartości średnich zamieszczono w załączniku z wynikami badań.

Tablica 7.1. Wyniki testu prawdziwości hipotezy o istotnej różnicy modułów sztywności betonów asfaltowych z asfaltem zwykłym 50/70 w temperaturze 10 °C po starzeniu długoterminowym przy prawdopodobieństwie ufności $P = 90\%$

Rodzaj mieszanki	A	B	C	D	E	F
	-	Sasobit	Licomont BS100	Rediset WMX	Ceca Base RT	zeolit
Prawdziwość hipotezy o istotnej różnicy modułów dla prawdopodobieństwa ufności $P = 90\%$ ($k = 4, t = 2,132$)	A	TAK	NIE	NIE	NIE	TAK
	B		NIE	NIE	TAK	TAK
	C			NIE	NIE	TAK
	D				NIE	TAK
	E					TAK
	F					

Tablica 7.2. Wyniki testu prawdziwości hipotezy o istotnej różnicy modułów sztywności betonów asfaltowych z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 w temperaturze 10 °C po starzeniu długoterminowym przy prawdopodobieństwie ufności P = 90 %

Rodzaj mieszanki		G	H	I	K	L	M
		-	Sasobit	Licomont BS100	Rediset WMX	Ceca Base RT	zeolit
Prawdziwość hipotezy o istotnej różnicy modułów dla prawdopodobieństwa ufności P = 90% (k = 4, t = 2,132)	G		NIE	NIE	NIE	TAK	TAK
	H			NIE	NIE	TAK	TAK
	I				NIE	TAK	TAK
	K					TAK	TAK
	L						NIE
	M						

Według uzyskanych wyników, w przypadku betonów asfaltowych z asfaltem zwykłym 50/70 istotnie różne moduły sztywności w porównaniu z czystym lepiszczem wystąpiły dla mieszanek zawierających asfalt z dodatkiem Sasobitu oraz zeolitu. Dla betonów asfaltowych z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 istotnie różne moduły wystąpiły dla mieszanek zawierających asfalt z dodatkiem Ceca Base RT oraz ponownie zeolit. Finalnie do obliczeń przyjęto następujące rodzaje mieszanek mineralno-asfaltowych:

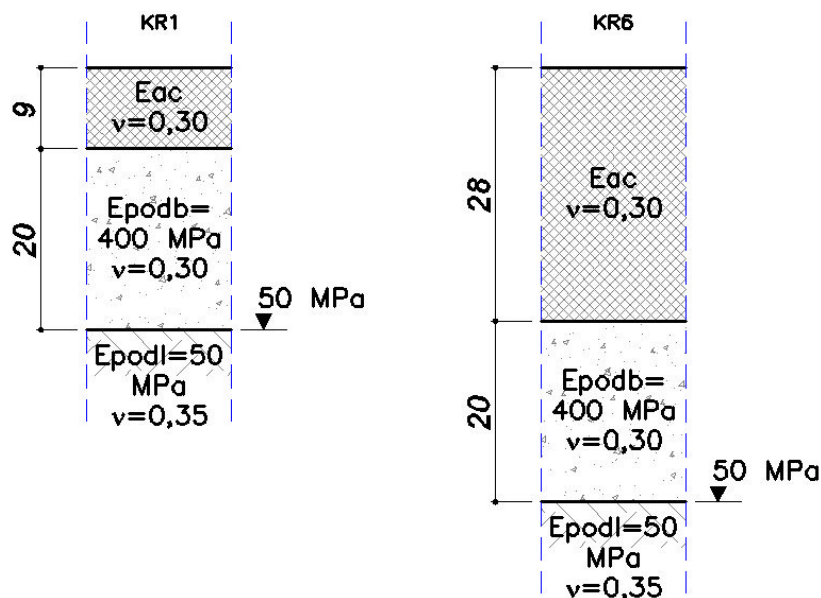
- asfalt zwykły 50/70:
 - mieszanka z czystym asfaltem,
 - mieszanka z dodatkiem Sasobitu,
 - mieszanka z dodatkiem zeolitu.
- asfalt modyfikowany 45/80-55:
 - mieszanka z czystym asfaltem,
 - mieszanka z dodatkiem Ceca Base RT,
 - mieszanka z dodatkiem zeolitu.

7.2.3. Przyjęcie układu warstw konstrukcji nawierzchni oraz parametrów obciążenia

Do obliczeń przyjęto następujące konstrukcje podatne, o grubościach warstw konstrukcyjnych zgodnych z Katalogiem Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych 2012 [61]:

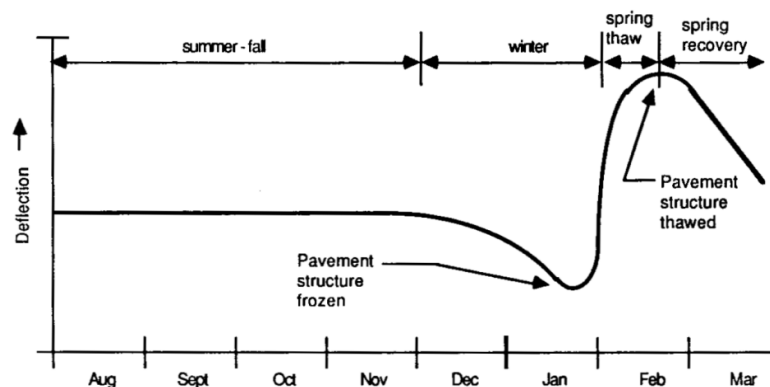
- konstrukcję przeznaczoną dla ruchu lekkiego o kategorii KR1, o łącznej grubości warstw asfaltowych wynoszącej 9 cm leżących na podbudowie z kruszywa łamanego stabilizowanego mechanicznie o grubości 20 cm.
- konstrukcję przeznaczoną dla ruchu ciężkiego o kategorii KR6, składającą się z warstw asfaltowych o łącznej grubości 28 cm ułożonych również na podbudowie z kruszywa łamanego stabilizowanego mechanicznie grubości 20 cm.

Ponieważ w ramach badań laboratoryjnych niniejszej pracy doktorskiej analizowano wyłącznie betony asfaltowe do warstw ścieralnych (tym samym dysponując wynikami badań tego rodzaju mieszank) założono, że cały pakiet warstw asfaltowych (warstwa ścieralna, warstwa wiążąca oraz warstwa podbudowy asfaltowej w konstrukcji KR6) jest wykonany z mieszanki mineralno jednego rodzaju – betonu asfaltowego do warstwy ścieralnej. Jest to uproszczenie w stosunku do sytuacji występującej w rzeczywistości, kiedy poszczególne warstwy są wykonywane z mieszank istotnie różniących się uziarnieniem oraz zawartością asfaltu, co skutkuje ich odmiennymi parametrami materiałowymi. Z uwagi na charakter rozważań i główny cel analizy mającej uwidocznic ewentualny wpływ dodatków WMA na zachowanie się konstrukcji nawierzchni uznano, że fakt ten nie będzie miał znaczenia przy formułowaniu wniosków. Schematy przyjętych konstrukcji nawierzchni pokazano na rysunku 7.1.



Rys. 7.1. Układy warstw konstrukcji nawierzchni przyjęte do obliczeń

Do obliczeń trwałości zmęczeniowej w okresie wiosennym przyjęto stałą wartość temperatury 10 °C dla całej grubości wszystkich warstw asfaltowych. Temperatura ta odpowiada porze wiosennej, podczas której występuje zjawisko odmarzania podłoża gruntowego, prowadzące do znacznego zwiększenia jego wilgotności i zmniejszenia nośności. Ugięcia nawierzchni w tym okresie są z tego powodu największe (rysunek 7.2) przez co porę wiosenną uznaje się za najbardziej newralgiczną z punktu widzenia pracy konstrukcji nawierzchni. Aby odwzorować wpływ rozmarzania, w obliczeniach zastosowano obniżoną wartość modułu odkształcenia podłoża gruntowego, tj. 50 MPa. Jest to wartość mniejsza, niż występująca w [61] wartość 80 MPa dla kategorii KR1 oraz 120 MPa dla kategorii KR6.



Rys. 7.2. Schematyczny wykres przebiegu zmian ugięć nawierzchni w zależności od pory roku [76]

Konstrukcję nawierzchni obu typów (dla ruchu lekkiego KR1, jak i ciężkiego KR6) obciążano kołem o nacisku 57,5 kN i ciśnieniu jednostkowym 850 kPa. Obciążenie od koła przekazywano na nawierzchnię za pomocą śladu zastępczego o kształcie kołowym.

W tablicach 7.3 i 7.4 zamieszczono zestawienie parametrów warstw asfaltowych przyjęte do obliczeń. Dane dotyczące zawartości wolnych przestrzeni oraz zawartości asfaltu w mieszance mineralno-asfaltowej przyjęto na podstawie rozdziału 3 dotyczącego materiałów wykorzystanych w badaniach. W tablicy 7.5 zamieszczono dane dotyczące podbudowy z kruszywa oraz podłoża gruntowego.

Tablica 7.3. Parametry warstw asfaltowych przyjęte do obliczeń mechanistycznych konstrukcji nawierzchni dla mieszanek z asfaltem zwykłym 50/70

Rodzaj mieszanki	50/70	50/70 + 3% Sasobit	50/70 + zeolit
Temperatura nawierzchni	10 °C		
Grubość warstw asfaltowych	9 cm i 28 cm		
Moduł warstw asfaltowych	15 467 MPa	18 161 MPa	13 269 MPa
Współczynnik Poissona warstw asfaltowych	0,30		
Objętościowa zawartość wolnych przestrzeni	3,00 %		
Objętościowa zawartość asfaltu	13,25 %		

Tablica 7.4. Parametry warstw asfaltowych przyjęte do obliczeń mechanistycznych konstrukcji nawierzchni dla mieszanek z asfaltem modyfikowanym 45/80-55

Rodzaj mieszanki	45/80-55	45/80-55 + 0,35% Ceca Base RT	45/80-55 + zeolit
Temperatura nawierzchni	10 °C		
Grubość warstw asfaltowych	9 i 28 cm		
Moduł warstw asfaltowych	9 198 MPa	7 707 MPa	8 276 MPa
Współczynnik Poissona warstw asfaltowych	0,30		
Objętościowa zawartość wolnych przestrzeni	3,50 %		
Objętościowa zawartość asfaltu	13,50 %		

Tablica 7.5. Parametry podbudowy z kruszywa oraz podłoża gruntowego przyjęte do obliczeń mechanicznych konstrukcji nawierzchni

Grubość podbudowy z kruszywa łamanego	20 cm
Moduł podbudowy z kruszywa	400 MPa
Współczynnik Poissona podbudowy z kruszywa	0,30
Moduł podłoża gruntowego	50 MPa
Współczynnik Poissona podłoża gruntowego	0,35

7.2.4. Obliczenie naprężeń i odkształceń w programie BISAR

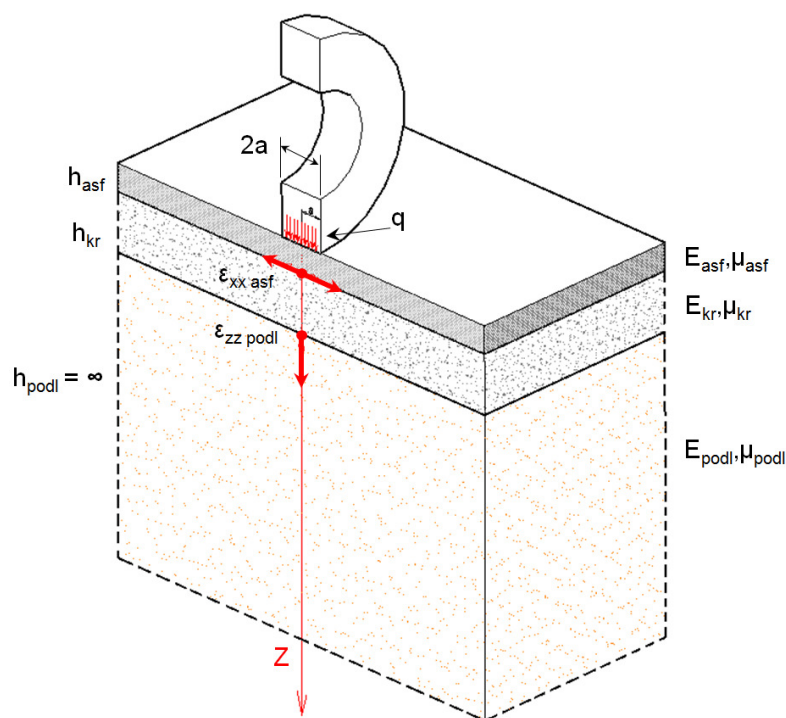
Naprężenia i odkształcenia w konstrukcji nawierzchni powstałe od obciążenia kołem obliczono w programie BISAR 3.0, który służy do analizy uwarstwionej półprzestrzeni sprężystej. Mechanizm działania programu BISAR wykorzystuje rozwiązanie numeryczne układu zawierającego n-warstw sprężystych według teorii Burmistera [49]. Główne założenia są następujące:

- model nawierzchni złożony jest z poziomych warstw o stałej grubości, spoczywających na podłożu o nieskończonej grubości,
- wymiary warstw w płaszczyźnie poziomej XY są nieograniczone,
- materiał każdej warstwy jest izotropowy,
- ciężar własny nie jest uwzględniany,
- każda warstwa składa się z materiału o charakterystyce liniowosprężystej i jest charakteryzowana przez moduł sprężystości E, współczynnik Poissona μ oraz grubość h,
- obciążenie o stałej wartości q przykładane jest w sposób równomiernie rozłożonym w śladzie kołowym o promieniu a do górnej warstwy nawierzchni,
- pomiędzy warstwami występują warunki pełnej szczepności.

Program BISAR pozwala na wprowadzanie do 10 warstw do modelu obliczeniowego, jednakże z uwagi na zastąpienie w analizowanych konstrukcjach pakietu kilku warstw asfaltowych przez jedną warstwę z mieszanki mineralno-asfaltowej o stałych parametrach, modelowano jedynie trzy (warstwa asfaltowa, podbudowa z kruszywa i podłoże gruntowe). Schemat obliczeniowy zgodny z wymienionymi założeniami pokazano na rysunku 7.3. Do analizy różnic pomiędzy nawierzchniami wykonanymi z mieszanek mineralno-asfaltowych zawierających z różne dodatki WMA wykorzystano następujące obliczone wielkości:

- naprężenia na spodzie warstw asfaltowych σ_{xx} ,
- odkształcenia rozciągające na spodzie warstw asfaltowych ϵ_{xx} ,
- odkształcenia ściskające na górnej powierzchni podłoża gruntowego ϵ_{zz} ,
- ugięcia pod kołem u.

Odształcenia rozciągające na spodzie warstw asfaltowych ϵ_{xx} oraz odkształcenia ściskające na górnej powierzchni podłoża gruntowego ϵ_{zz} wprowadzono następnie do kryteriów zmęczeniowych opisanych w punkcie 7.2.2 wzorami 7.1 oraz 7.7.



Rys. 7.3. Model konstrukcji nawierzchni zastosowany w programie BISAR

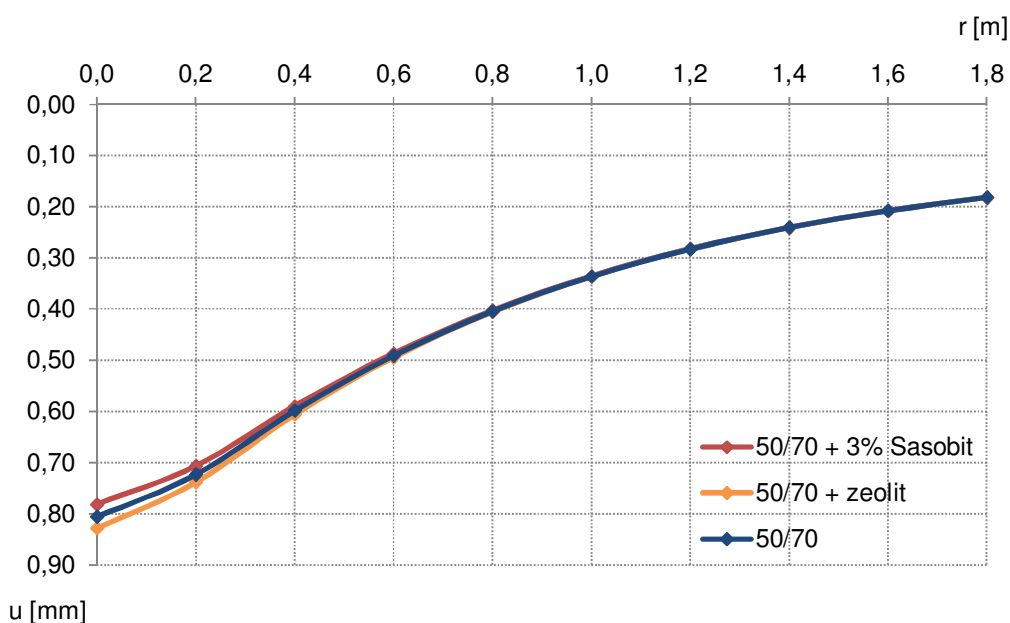
Obliczone naprężenia, odkształcenia i ugięcia wszystkich analizowanych wariantów nawierzchni zamieszczono w tabelicy 7.6. Wartości te dotyczą punktów umieszczonych bezpośrednio pod obciążeniem ($x, y = 0$). Na rysunkach 7.4 – 7.11 przedstawiono dodatkowo wykresy ugięć oraz naprężeń poziomych w funkcji odległości i głębokości od środka obciążonego obszaru.

Tablica 7.6. Wyniki obliczeń naprężeń, odkształceń i ugięć analizowanych nawierzchni

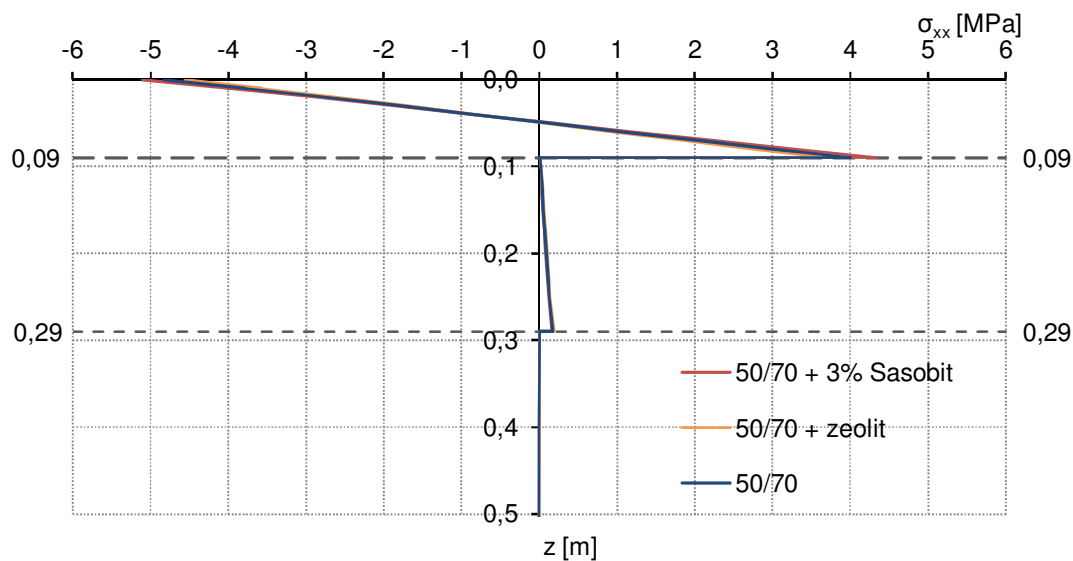
Rodzaj konstrukcji	Rodzaj mieszanki	Naprężenia na spodzie warstw asfaltowych σ_{xx} [MPa]	Odkształcenia		Ugięcie nawierzchni u [mm]
			rozciągające na spodzie warstw asfaltowych ϵ_{xx}	ściskające w podłożu gruntowym ϵ_{zz}	
Ruch lekki KR1 (9 cm warstw asfaltowych)	50/70	4,01	185,2	-956,7	0,81
	50/70 + 3% Sasobit	4,33	169,8	-902,2	0,78
	50/70 + zeolit	3,71	200,3	-1009	0,83
	45/80-55	3,00	237,7	-1136	0,88
	45/80-55 + 0,35% Ceca Base RT	2,68	255,6	-1197	0,91
	45/80-55 + zeolit	2,81	248,4	-1173	0,90

**BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O
OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI**

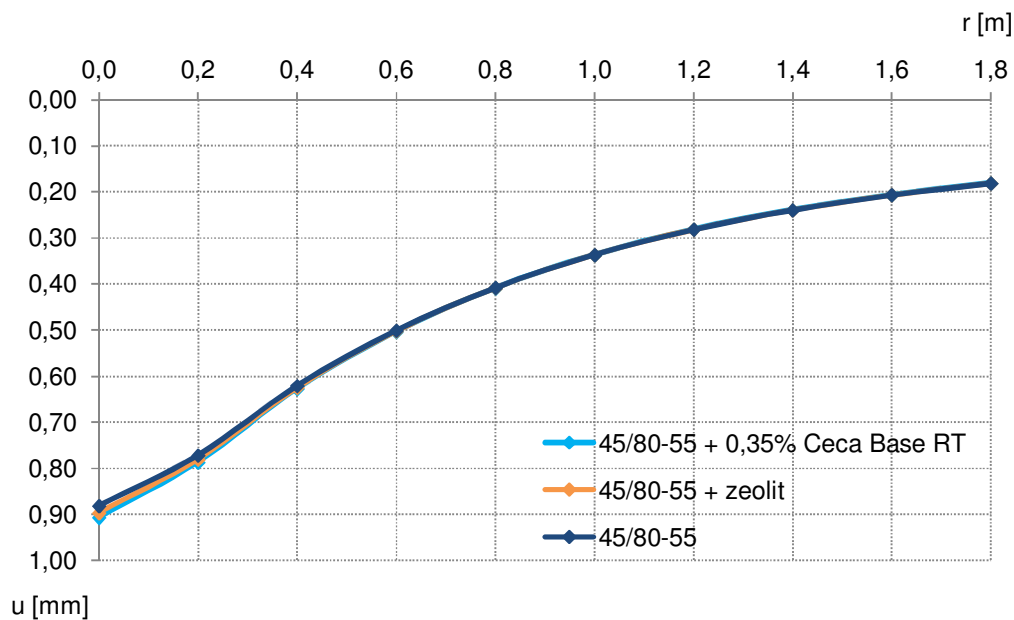
Ruch ciężki KR6 (28 cm warstw asfaltowych)	50/70	1,00	45,9	-180,0	0,34
	50/70 + 3% Sasobit	1,04	40,5	-163,1	0,33
	50/70 + zeolit	0,97	51,5	-197,5	0,36
	45/80-55	0,87	67,5	-245,1	0,40
	45/80-55 + 0,35% Ceca Base RT	0,82	76,4	-270,7	0,42
	45/80-55 + zeolit	0,84	72,7	-260,1	0,41



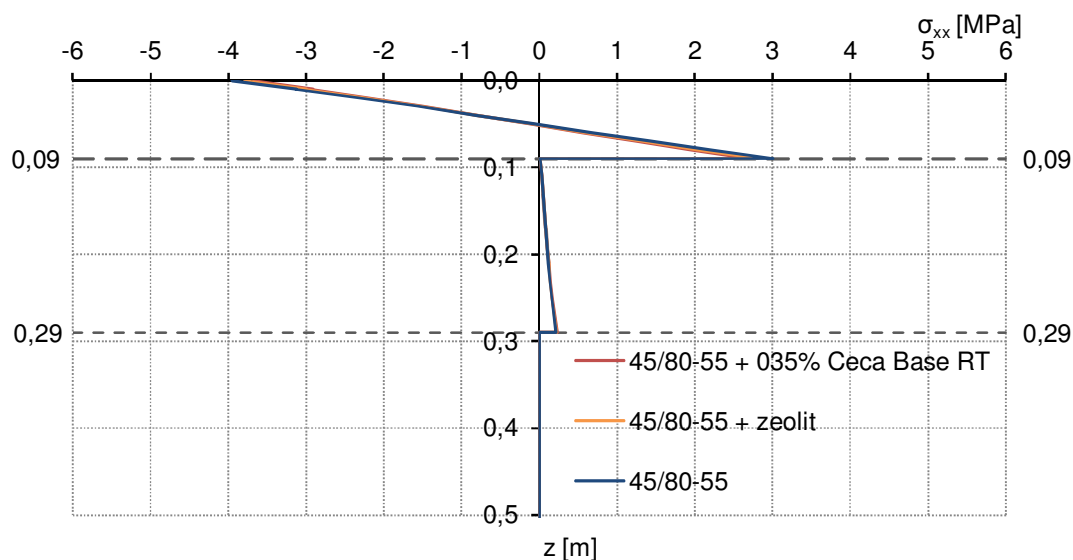
Rys. 7.4. Ugięcia nawierzchni z betonu asfaltowego z asfaltem zwykłym 50/70 czystym i dodatkami WMA dla ruchu lekkiego KR1



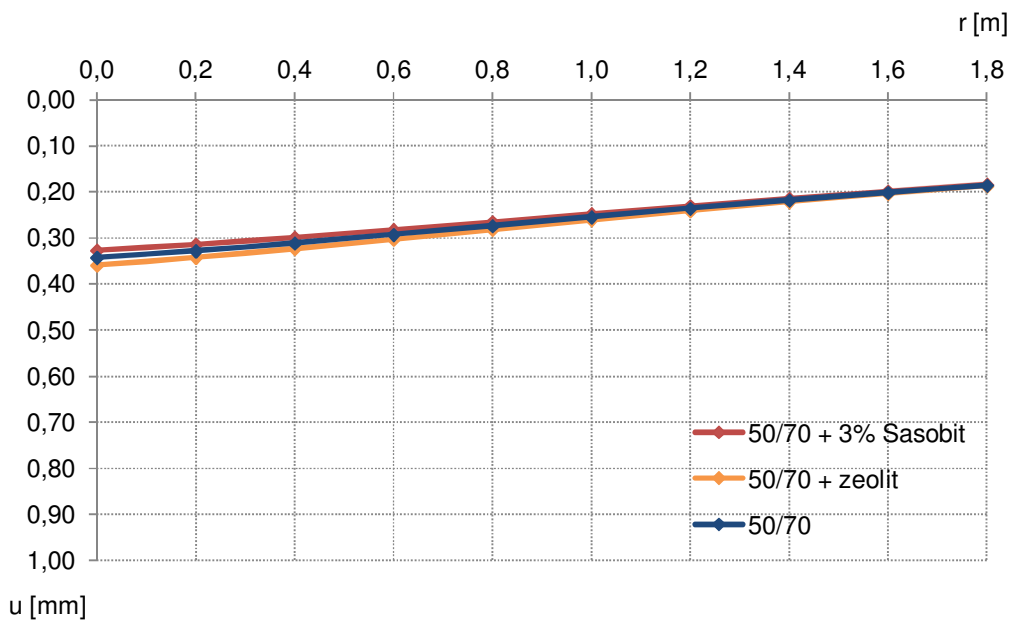
Rys. 7.5. Naprężenia poziome w nawierzchni z betonu asfaltowego z asfaltem zwykłym 50/70 czystym i dodatkami WMA dla ruchu lekkiego KR1



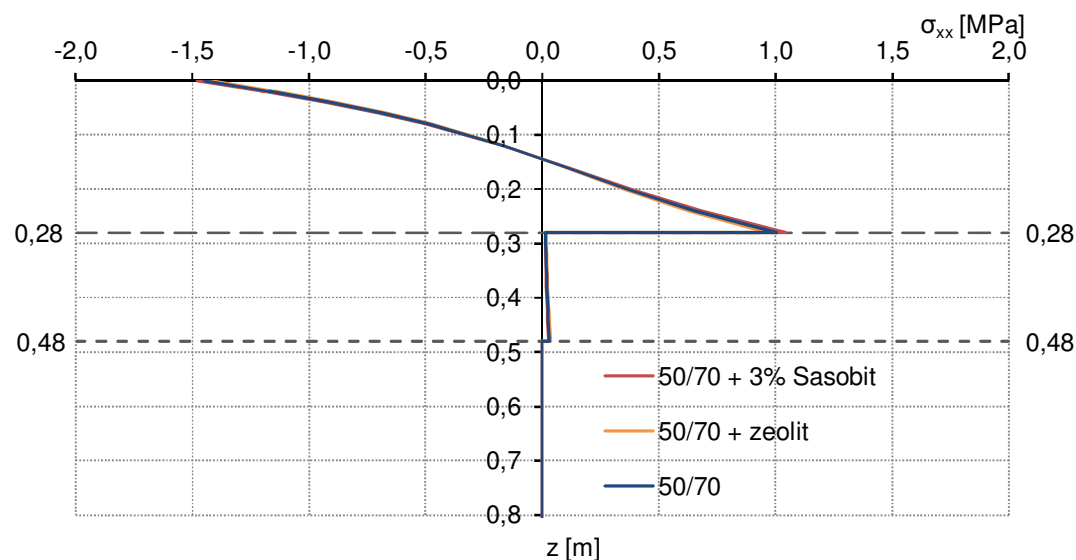
Rys. 7.6. Ugięcia nawierzchni z betonu asfaltowego z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 czystym i dodatkami WMA dla ruchu lekkiego KR1



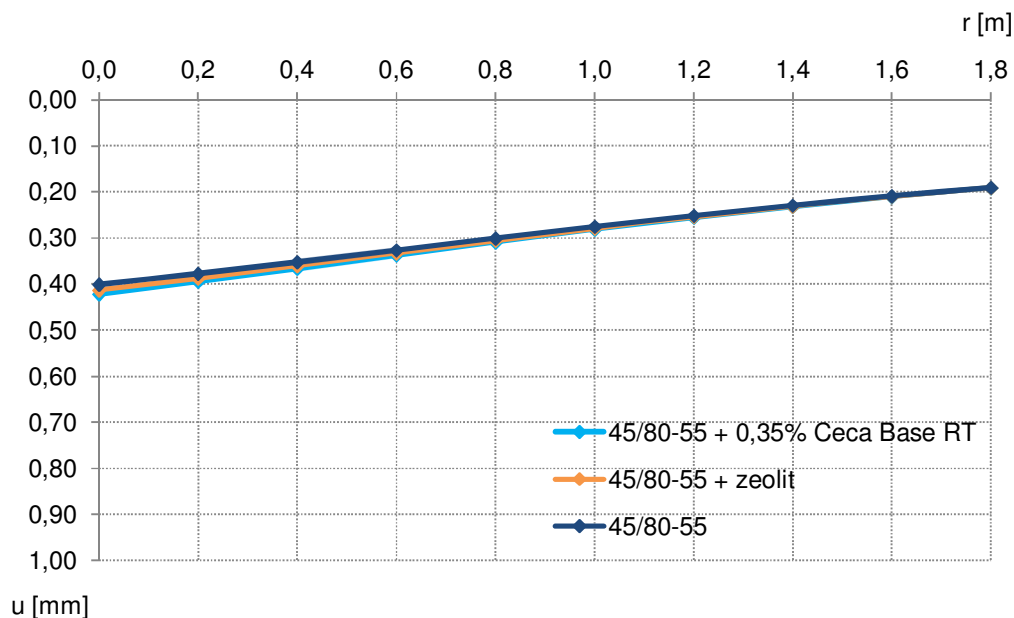
Rys. 7.7. Naprężenia poziome w nawierzchni z betonu asfaltowego z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 czystym i dodatkami WMA dla ruchu lekkiego KR1



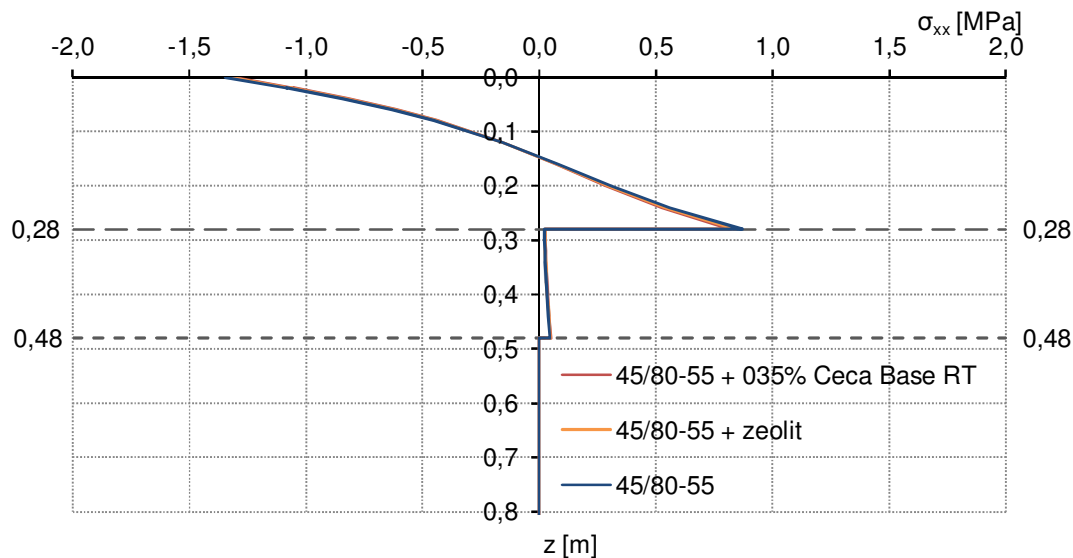
Rys. 7.8. Ugięcia nawierzchni z betonu asfaltowego z asfaltem zwykłym 50/70 czystym i dodatkami WMA dla ruchu ciężkiego KR6



Rys. 7.9. Naprężenia poziome w nawierzchni z betonu asfaltowego z asfaltem zwykłym 50/70 czystym i dodatkami WMA dla ruchu ciężkiego KR6



Rys. 7.10. Naprężenia poziome w nawierzchni z betonu asfaltowego z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 czystym i dodatkami WMA dla ruchu ciężkiego KR6



Rys. 7.11. Naprężenia poziome w nawierzchni z betonu asfaltowego z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 czystym i dodatkami WMA dla ruchu ciężkiego KR6

7.2.5. Obliczenie trwałości zmęczeniowych analizowanych nawierzchni

Wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej z wykorzystaniem kryteriów opisanych w punkcie 7.2.2. pokazano w tabelicy 7.7.

Tablica 7.7. Wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej

Rodzaj konstrukcji	Rodzaj mieszanki	Trwałość zmęczeniowa		
		warstw asfaltowych $N_{f\text{ asf}}$ [mln osi 115 kN]	podłoża gruntowego $N_{f\text{ podł}}$ [mln osi 115 kN]	decydująca N_f [mln osi 115 kN]
Ruch lekki KR1 (9 cm warstw asfaltowych)	50/70	3,85	0,046	0,046
	50/70 + 3% Sasobit	4,42	0,060	0,060
	50/70 + zeolit	3,44	0,036	0,036
	45/80-55	2,80	0,021	0,021
	45/80-55 + 0,35% Ceca Base RT	2,63	0,017	0,017
	45/80-55 + zeolit	2,69	0,019	0,019
Ruch ciężki KR6 (28 cm warstw asfaltowych)	50/70	547 892,61	82 967,77	82 967,77
	50/70 + 3% Sasobit	728 686,27	129 098,38	129 098,38
	50/70 + zeolit	420 761,85	54 728,83	54 728,83
	45/80-55	231 541,16	20 782,37	20 782,37
	45/80-55 + 0,35% Ceca Base RT	178 267,45	13 311,28	13 311,28
	45/80-55 + zeolit	197 753,58	15 922,57	15 922,57

7.2.6. Analiza wyników i wnioski

Z przeprowadzonych obliczeń trwałości zmęczeniowych nawierzchni wynika, że wprowadzenie do składu mieszank mineralno-asfaltowych dodatków obniżających temperaturę produkcji i w budowywania nie zmienia istotnie warunków pracy nawierzchni z nich wykonanych. Obliczone wartości ugięć pionowych pod kołem dla wszystkich rodzajów nawierzchni były do siebie zbliżone i nie różniły się w stosunku do nawierzchni z mieszank referencyjnych z czystymi asfaltami o więcej niż 0,03 mm. Różnice naprężeń na spodzie warstw asfaltowych z mieszank zawierających dodatki WMA były również niewielkie i zawierały się w przedziale $\pm 0,3$ MPa. Analizując wartości odkształceń oraz obliczonych na ich podstawie trwałości zmęczeniowych można odnieść wrażenie, iż wpływ dodatków WMA na trwałość zmęczeniową jest znaczny. Dla obu typów nawierzchni (dla ruchu lekkiego KR1, jak i dla ruchu ciężkiego KR6) decydującym okazało się być kryterium deformacji podłoża gruntowego. W obliczeniach nawierzchni z grubymi warstwami asfaltowymi (KR3-KR6) decydującym o trwałości zmęczeniowej dla tego rodzaju nawierzchni jest

najczęściej kryterium odkształcenia poziomego na spodzie warstw asfaltowych. Uzyskany odmienny rezultat dla nawierzchni KR6 w niniejszych obliczeniach wynika z przyjęcia niewielkiej wartości modułu odkształcenia podłoża gruntowego, tj. 50 MPa dla okresu rozmarzania podłoża. Jest to istotne zaniżenie nośności w stosunku do wartości rzeczywistych, jednakże celem tego działania było zasymulowanie warunków ekstremalnych, jakie mogą wystąpić w krytycznych warunkach wiosną, po rozmarznięciu podłoża gruntowego. Różnice pomiędzy wartościami bezwzględnie obliczonych trwałości zmęczeniowych są znaczne. Należy jednak pamiętać, że kryteria zmęczeniowe opisane funkcjami o charakterze wykładniczym są bardzo wrażliwe i nawet niewielka zmiana danych wejściowych takich jak moduł sztywności czy odkształcenie na spodzie warstw asfaltowych skutkuje znaczącą zmianą obliczonej trwałości zmęczeniowej. Ponadto zastosowane w obliczeniach kryteria nie uwzględniają odmiennej (tj. znacząco lepszej) charakterystyki zmęczeniowej mieszanek mineralno-asfaltowych z asfaltami modyfikowanymi, przez co prosta analiza jedynie wartości bezwzględnych otrzymanych wprost z kryteriów zmęczeniowych może prowadzić do błędnej oceny. Otrzymane z przeprowadzonych obliczeń wyniki wskazywałyby na gorsze zachowanie się nawierzchni z asfaltem modyfikowanym 45/80-55, niż z asfaltem zwykłym 50/70, przy tych samych grubościach warstw i obciążeniach. Wynika to jednakże jedynie z mniejszych modułów sztywności warstw z asfaltem modyfikowanym, który wprowadzono do wzoru 7.1. Ponadto otrzymane dla nawierzchni dla ruchu ciężkiego KR6 wartości trwałości zmęczeniowej rzędu 10^{10} osi o nacisku 115 kN o wiele przekraczają wartości realne (rzędu 10^7 osi 115 kN). Wynika to z przyjęcia na całej grubości warstw asfaltowych mieszanki mineralno-asfaltowej do warstwy ścieralnej, charakteryzującej się bardzo małą zawartością wolnej przestrzeni (3 i 3,5%) przy jednoczesnej dużej zawartości objętościowej asfaltu (13,25 oraz 13,5%), co pokazano w tablicach 7.3 i 7.4. W przypadku zawartości wolnych przestrzeni oraz asfaltu na właściwych poziomach (tj. odpowiednio 7 – 9% dla wolnych przestrzeni oraz 10% dla asfaltu) obliczone trwałości zmęczeniowe byłyby bardziej realne. W związku z powyższym wyniki należy traktować tylko jako porównanie oddziaływania dodatków WMA. Podsumowując, w ocenie doktoranta, otrzymane wartości trwałości zmęczeniowych dla poszczególnych typów nawierzchni i mieszanek są tego samego rzędu i nie wskazują na gorsze zachowanie się nawierzchni zawierających dodatki WMA obniżające temperaturę produkcji i wbudowywania.

7.3. Analiza lepkośćysta

Przeprowadzona analiza mechanistyczna pracy konstrukcji nawierzchni przedstawiona w punkcie 7.2 została wykonana w oparciu o kryteria zmęczeniowe, które w swojej istocie wykorzystują wartości odkształceń obliczone przy założeniu liniowosprężystych charakterystyk materiałowych warstw nawierzchni. Jest to pewne uproszczenie, ponieważ nawierzchnie z mieszanek mineralno-asfaltowych są eksploatowane nie tylko w niskich temperaturach, w których zachowują się liniowosprężystość (lub w zbliżony sposób), ale również w temperaturach wyższych, w których uwidaczniają się ich właściwości lepkie.

Z tego powodu wykonano analizę lepkosprężystej pracy nawierzchni wykonanych z mieszank mineralno-asfaltowych zawierających dodatki obniżające temperaturę produkcji. Jej celem było sprawdzenie, czy dodatki WMA nie mają negatywnego wpływu na zachowanie się konstrukcji nawierzchni w okresie wysokich temperatur. W dalszej części niniejszego podpunktu przedstawiono poszczególne etapy działań wraz z uzyskanymi wynikami.

7.3.1 Procedura analizy

Do wykonania obliczeń mechanistycznych występujących w punkcie 7.2 wykorzystano cechy materiałowe (tj. modułu sztywności mieszank mineralno-asfaltowych w różnych temperaturach) uzyskane podczas wcześniej przeprowadzonych badań laboratoryjnych opisanych w rozdziale 5. Natomiast przeprowadzenie obliczeń konstrukcji nawierzchni z uwzględnieniem efektów lepkosprężystości wymagało określenia nowych parametrów materiałowych, charakteryzujących przyjęty model reologiczny zachowania się mieszank. Z tego powodu, procedura według której wykonano analizę opisywaną w niniejszym rozdziale obejmowała również dodatkowe badania laboratoryjne, niezbędne do określenia nowych parametrów materiałowych. Schemat prac wyglądał następująco:

- wybór rodzajów mieszank mineralno-asfaltowych do badań i analizy,
- przyjęcie modelu lepkosprężystości,
- wykonanie badań modułów dynamicznych wybranych mieszank w urządzeniu AMPT/SPT,
- przyjęcie układów warstw konstrukcji do analizy, wraz z rozkładem temperatury w nawierzchni,
- określenie krzywych wiodących mieszank mineralno-asfaltowych,
- określenie parametrów modelu lepkosprężystości w programie DEBUROAD, wchodzącego w skład pakietu VEROAD [104],
- wprowadzenie danych i przeprowadzenie obliczeń w programie VEROAD,
- analiza wyników i wnioski.

Analizy pracy nawierzchni z użyciem programu VEROAD przedstawiano min. w polskich publikacjach [8], [60] oraz [103].

7.3.2. Wybór rodzajów mieszank mineralno-asfaltowych do badań i analizy

Przy rozpoczynaniu prac nad opisywaną analizą zdecydowano, że nie będą jej podlegały wszystkie rodzaje asfaltów i mieszank mineralno-asfaltowych badane w rozdziale 5. Przy wyborze asfaltu przyjęto, że ze względu na dominujący wpływ na odporność na deformacje trwałe polimeru występującego w asfalcie modyfikowanym będą analizowane tylko mieszanki wytworzone na bazie asfaltu zwykłego 50/70, jako bardziej narażone na koleinowanie. Przy wyborze dodatków obniżających temperaturę produkcji przyjęto, że wybrane będą te środki, które odnotowały skrajne wyniki w badaniach odporności na deformacje trwałe opisane w punkcie 5.2.5. oraz jednocześnie zostały zastosowane na odcinku doświadczalnym. Oznaczało to

przyjęcie do analizy lepkosprężystej mieszanek mineralno-asfaltowych wytworzonych z następującymi dodatkami:

- Sasobit, którą w rozdziale 5 oznaczano literą B. Mieszanki z dodatkiem Sasobitu w większości przypadków osiągały najmniejsze wartości głębokości koleiny podczas badań odporności na deformacje trwałe.
- Ceca BaseRT, którą w rozdziale 5 oznaczano literą E. Mieszanki z dodatkiem Ceca BaseRT w większości przypadków osiągały największe wartości głębokości koleiny podczas badań odporności na deformacje trwałe.

Mieszanki z dodatkami Licomont BS100 (litera C) oraz zeolit (F) nie były analizowane, ponieważ nie zastosowano ich na odcinku doświadczalnym. Mieszanka z dodatkiem Rediset WMX (oznaczana w rozdziale 5 literą D) występowała co prawda zarówno na etapie badań laboratoryjnych, jak i terenowych, jednakże w badaniach koleinowania wykazywała zwykle wartości pośrednie pomiędzy mieszanką z dodatkiem Sasobitu i Ceca BaseRT.

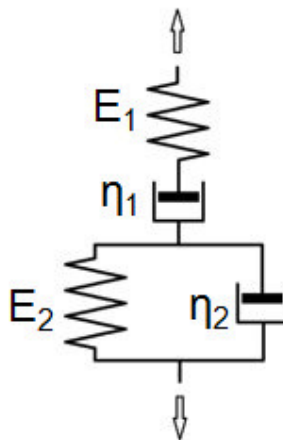
Oprócz wymienionych mieszanek wytworzonych z asfaltami zawierającymi w swoim składzie dodatki obniżające temperaturę produkcji Sasobit i Ceca BaseRT wykonano również w celach porównawczych próbki porównawcze, z czystym asfaltem zwykłym 50/70.

7.3.3. Przyjęcie modelu reologicznego

Przy rozważaniach pracy nawierzchni w zakresie lepkosprężystym konieczne jest przyjęcie modelu reologicznego charakteryzującego mieszanki mineralno-asfaltowe. W niniejszej analizie wykorzystano model Burgersa. Jest to jeden z najczęściej stosowanych modeli materiału lepkosprężystego, który opisują cztery parametry:

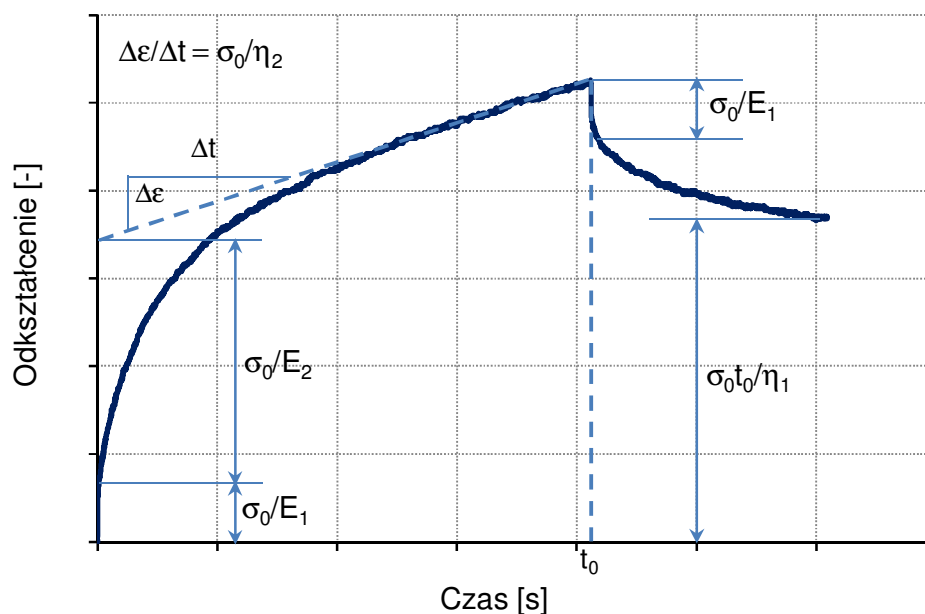
- moduł sprężystości E_1 [MPa],
- moduł sprężystości E_2 [MPa],
- współczynnik lepkości η_1 [MPa*s],
- współczynnik lepkości η_2 [MPa*s].

Każdy parametr dotyczy pojedynczego elementu modelu Burgersa, sprężystego (Hooke'a) lub lepkiego (Newton'a). Cały model składa się ze złożenia czterech elementów szeregowo i równoległe (rysunek 7.12).



Rys. 7.12. Czteroparametrowy model Burgersa składający się z elementów sprężystych i lepkich złożonych szeregowo i równolegle

Po przyłożeniu do materiału opisanego modelem Burgersa obciążenia wywołującego w nim naprężenie σ_0 wystąpi w nim natychmiastowe odkształcenie sprężyste $\varepsilon_1 = \sigma_0 / E_1$. Dalszy przyrost całkowitego odkształcenia będzie wynikał z występowania opóźnienia sprężystego $\varepsilon_2 = \sigma_0 / E_2$ oraz lepkiego płynięcia z prędkością σ_0 / η_1 . Po zdjęciu obciążenia wystąpi natychmiastowy spadek odkształcenia sprężystego ε_1 , jednakże odkształcenie wynikające z płynięcia lepkiego jest nieodwracalne i po długim okresie odciążenia będzie wynosiło $\varepsilon_2 = \sigma_0 * t_0 / \eta_2$. Schemat procesu powstawania odkształceń w materiale opisanym modelem Burgersa pokazano na rysunku 7.13.



Rys. 7.13. Schemat zachowania się modelu Burgersa

Zachowanie się materiału opisanego modelem Burgersa i poddanego stałemu obciążeniu można opisać za pomocą dwóch funkcji w następujących przedziałach:

- dla czasu od 0 do t_0 , tj. w momencie występowania stałego obciążenia (przy $\sigma_0 = \text{const}$):

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \left\{ \frac{1}{E_1} + \frac{1}{\eta_1} + \frac{1}{E_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\lambda_2}\right) \right] \right\} \quad (7.11)$$

- dla czasu większego od t_0 , tj. pod odjęciem obciążenia (przy $\sigma_0 = 0$):

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \left\{ \frac{t_0}{\eta_1} + \frac{1}{E_2} \exp\left(-\frac{t}{\lambda_2}\right) \left[\exp\left(\frac{t_0}{\lambda_2}\right) - 1 \right] \right\} \quad (7.12)$$

gdzie:

- $\varepsilon(t)$ – odkształcenie w chwili t [-],
 σ_0 – naprężenie wywołane stałym obciążeniem w czasie od 0 do t_0 , [MPa],
 E_1 – moduł sprężystości natychmiastowej, [MPa],
 E_2 – moduł sprężystości opóźnionej, [MPa],
 η_1 – współczynnik lepkości płynięcia ustalonego, $\eta_1 = E_1 * \lambda_1$ [MPa*s]
 η_2 – współczynnik opóźnienia sprężystego, $\eta_2 = E_2 * \lambda_2$, [MPa*s],
 λ_1 – czas relaksacji naprężeń, [s],
 λ_2 – czas retardacji naprężeń, [s].

Z odniesienia modelu Burgersa do przypadku mieszanki mineralno-asfaltowej występującej w konstrukcji nawierzchni wynika, że parametry materiałowe E_1 , E_2 , η_1 oraz η_2 odpowiadają za jej zachowanie w momencie obciążenia kołem. Po ustąpieniu obciążenia, o wielkości nieodwracalnego ugięcia nawierzchni (które po wielu cyklicznych przejazdach będzie objawiało się pojawieniem zauważalnej deformacji trwałej) decyduje współczynnik lepkości η_1 . Im większy współczynnik lepkości η_1 , tym mniejsza deformacja trwała powstająca przy jednym cyklu obciążenia.

Wyznaczenie cech materiałowych występujących w modelu Burgersa możliwe jest między innymi poprzez przeprowadzenie następujących rodzajów badań:

- pełzania mieszanki mineralno-asfaltowej pod obciążeniem statycznym,
- wielokrotnego obciążania dynamicznego przy różnych częstotliwościach.

Metoda określania parametrów modelu lepkosprężystego za pomocą wyników badania pełzania pod obciążeniem statycznym jest dobrze opanowana i od dość dawna wykorzystywana w Katedrze Inżynierii Drogowej Politechniki Gdańskiej. Została wykorzystana min. w pracach Judyckiego [63] i [65]. Polega ona na poddawaniu prostopadłościennej próbki mieszanki mineralno-asfaltowej obciążeniu statycznemu i rejestrowaniu procesu narastania odkształceń oraz – po odciążeniu próbki – ich spadku. Wymiary próbek, schemat ich obciążenia oraz metodyka pomiaru odkształceń (za pomocą liniowego czujnika przemieszczeń LVDT) są identyczne jak przy badaniu wytrzymałości oraz odkształcenia granicznego w trójpunktowym zginaniu prostopadłościennej belki, które zostało opisane w punkcie 4.4.2.6. Samo wyznaczenie parametrów modelu Burgersa odbywa się na podstawie interpretacji geometrycznej wykresu zależności odkształcenia od czasu przy znanych parametrach obciążenia (wielkość i czas działania). Metoda ta posiada również pewne niedogodności, tj. utrudnione dopasowanie funkcji opisujących krzywą pełzania oraz wyznaczenia w badaniu modułu E_1 . Ponadto trwa ono kilka godzin i umożliwia otrzymanie parametrów tylko dla pojedynczej temperatury i czasu obciążenia [57].

Dlatego z tych powodów zdecydowano o wykorzystaniu do wyznaczenia parametrów modelu Burgersa metody opierającej się na wynikach uzyskanych z badania pod obciążeniem dynamicznym, które przeprowadza się na próbkach walcowych w

urządzeniu AMPT/SPT. Badanie przeprowadza się dla kilku ustalonych kombinacji różnych temperatur i częstotliwości. Uzyskane z niego wartości modułu dynamicznego E_i^* oraz kąta przesunięcia fazowego ϕ_i służą do opracowania krzywych wiodących, umożliwiających wyznaczenie modułu dynamicznego i kąta przesunięcia fazowego dla dowolnej kombinacji temperatury i częstotliwości. Na ich podstawie dzięki aplikacji DEBUROAD możliwe jest obliczenie już właściwych parametrów modelu Burgersa, finalnie wykorzystywanych w obliczeniach konstrukcji nawierzchni przez algorytmy programu VEROAD.

7.3.4. Badania modułów dynamicznych w urządzeniu AMPT/SPT

Urządzenie AMPT/SPT (Asphalt Mixture Performance Tester/Simple Performance Tester) umożliwia wyznaczanie modułu dynamicznego dla próbek walcowych poddawanych cyklicznemu, pionowemu obciążeniu zadawanemu przy różnych temperaturach i częstotliwościach. Komora w której znajduje się próbka umożliwia zachowanie stałej temperatury z przedziału od 4 °C do 60 °C oraz ciśnienia z zakresu od 0 do 210 kPa. Obciążenie wywoływane jest poprzez siłownik hydrauliczny przekazujący siłę na próbkę przez przegub kulowy. Maksymalna wartość siły przy statycznym trybie obciążenia wynosi 15 kN, zaś przy dynamicznym 13,5 kN. Przykładanie pionowego obciążenia do walcowej próbki powoduje jej skrócenie, które rejestrowane jest za pośrednictwem 3 liniowych czujników przemieszczeń LVDT rozmieszczonych równomiernie na poboczniczy próbki co 120°. Czujniki umieszczone są w uchwytych przyklejanych klejem żywicznym przed przystąpieniem do badania. Widok urządzenia AMPT/SPT przedstawiono na fotografii 7.1. Fotografia 7.2 przedstawia widok próbki walcowej przed badaniem.

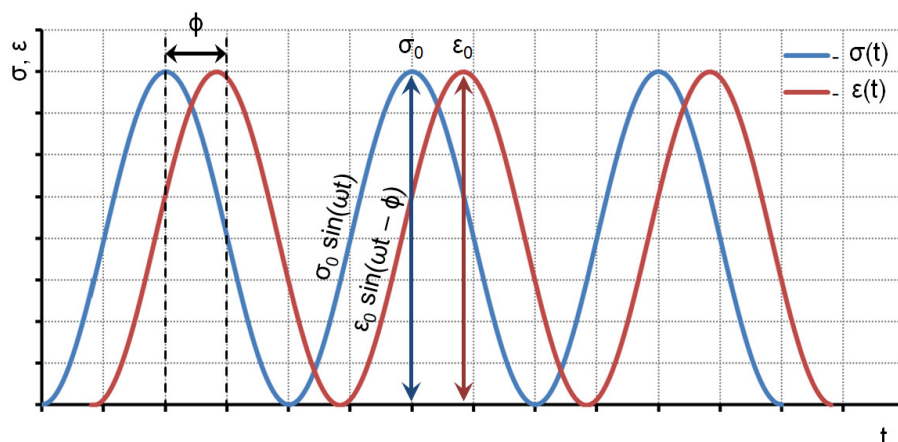
Próbki walcowe wykorzystywane do określenia modułu dynamicznego posiadały średnicę 100 mm i wysokość 150 mm. Warunki wytwarzania mieszanek porównawczych (z czystymi asfaltami) oraz z dodatkami obniżającymi temperaturę produkcji były identyczne z opisanymi w punkcie 4.3.2 rozdziału 4. Inny natomiast był sposób formowania i zagęszczania, do którego zastosowano prasę żyratorową. Jej zaletą jest możliwość uzyskania próbek o dokładnej projektowanej ilości wolnych przestrzeni poprzez automatyczne kontrolowanie wysokości próbki podczas procesu zagęszczania. Próbki wytwarzane w prasie żyratorowej bezpośrednio po uformowaniu i zagęszczeniu posiadały wysokość około 170 mm, która była nieco większa niż docelowo wymagana 150 mm. Wynikała ona z konieczności przycinania obu końców próbki w celu uzyskania idealnie płaskich podstaw. Na rysunku 7.14 przedstawiono schemat obciążenia i odkształcenia próbek walcowych badanych w urządzeniu AMPT/SPT. Badania modułów dynamicznych przedstawiono min. w pracach [111], [112] oraz [9].



Fot. 7.1. Widok ogólny urządzenia AMPT/SPT. W centrum widoczna komora z próbką



Fot. 7.2. Próbką walcową średnicy 100 mm i wysokości 150 mm umieszczona w uchwytach aparatu AMPT/SPT. Widoczne są czujniki LVDT rejestrujące skrócenie próbki w momencie obciążenia



Rys. 7.14. Przebieg krzywej naprężenia i odkształcenia w badaniu modułu dynamicznego w urządzeniu AMPT/SPT

W dowolnej chwili t , aktualną wartość naprężenia i odkształcenia powstającego w próbce poddanej cyklicznemu obciążeniu o charakterze sinusoidalnym można wyrazić za pomocą wzorów 7.13 i 7.14:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \sin(\omega t) \quad (7.13)$$

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \phi) \quad (7.14)$$

gdzie:

- $\sigma(t)$ – naprężenie w chwili t , [MPa],
- $\varepsilon(t)$ – odkształcenie w chwili t , [-],
- σ_0 – maksymalne naprężenie, [MPa],
- ε_0 – maksymalne odkształcenie, [-],
- ϕ – kąt przesunięcia fazowego, [°],
- ω – częstość kątowna, [rad/s],
- t – czas, [s].

Po wyrażeniu we wzorach 7.13 i 7.14 funkcji sinusoidalnych za pomocą liczb zespolonych otrzymuje się [87]:

$$\sigma^*(t) = \sigma_0 e^{i\omega t} \quad (7.15)$$

$$\varepsilon^*(t) = \varepsilon_0 e^{i(\omega t - \phi)} \quad (7.16)$$

Stosunek pomiędzy naprężeniem, a odkształceniem określonym za pomocą wzorów 7.15 i 7.16 wyznacza dynamiczny moduł zespolony:

$$E^*(\omega) = \frac{\sigma^*(t)}{\varepsilon^*(t)} \quad (7.17)$$

Wprowadzając następnie w równaniu 7.17 w miejsce licznika i mianownika wzory 7.15 i 7.16 otrzymuje się:

$$E^*(\omega) = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cos \phi + i \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \sin \phi = E_1 + iE_2 \quad (7.18)$$

gdzie:

E_1 – część rzeczywista modułu zespolonego, [MPa],

E_2 – część urojona modułu zespolonego, [MPa],

Część rzeczywista modułu zespolonego E_1 odpowiedzialna jest za reakcję sprężystą na przyłożone obciążenie. Część urojona E_2 odpowiada za zachowania o charakterze lepkiem. Moduł zespolony materiałów idealnie sprężystych składa się jedynie z części rzeczywistej E_1 , natomiast moduł zespolony dla materiałów idealnie lepkich składa się jedynie z części urojonej E_2 . Wartość bezwzględna modułu zespolonego oraz wartość kąta przesunięcia fazowego można obliczyć z następujących zależności pomiędzy częścią rzeczywistą i zespoloną:

$$|E^*(\omega)| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (7.20)$$

$$\tan \phi = \frac{E_2}{E_1} \quad (7.21)$$

Wyznaczenie modułów dynamicznych oraz kątów przesunięcia fazowego w urządzeniu AMPT/SPT odbywa się automatycznie przez oprogramowanie sterujące na podstawie wprowadzonych przez operatora wymiarów oraz zarejestrowanych w trakcie trwania cykli obciążenia zmian geometrycznych kształtu próbek.

W niniejszej pracy moduły dynamiczne określano dla trzech temperatur – 4, 20 i 40°C przy następujących częstotliwościach: 0,01; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5; 10; 20 oraz 25 Hz. Zestaw częstotliwości od 0,1 do 25 Hz stosowano w temperaturach 4 i 20°C. W przypadku temperatury badania 40°C zakres był zwiększony o dodatkową częstotliwość 0,01 Hz. W jednej temperaturze badano trzy próbki każdego z trzech rodzajów mieszanki mineralno-asfaltowej stosując wymienione zakresy częstotliwości. Łącznie określono moduły dynamiczne i kąty przesunięcia fazowego dla 27 próbek. Do dalszych analizy przyjmowano dla każdej częstotliwości wartości średnich arytmetycznych modułów i kątów przesunięć określone z trzech pojedynczych próbek. Cały cykl badania dynamicznego pojedynczej próbki (tj. przy wszystkich częstotliwościach) trwał od 15 do 30 minut, w zależności od temperatury badania.

Parametry materiałowe uzyskane w badaniach dynamicznych wykorzystano do określenia krzywych wiodących oraz krzywych Blacka, które w dalszej części analizy posłużyły do wyznaczenia właściwych parametrów modelu lepko-sprężystego Burgersa.

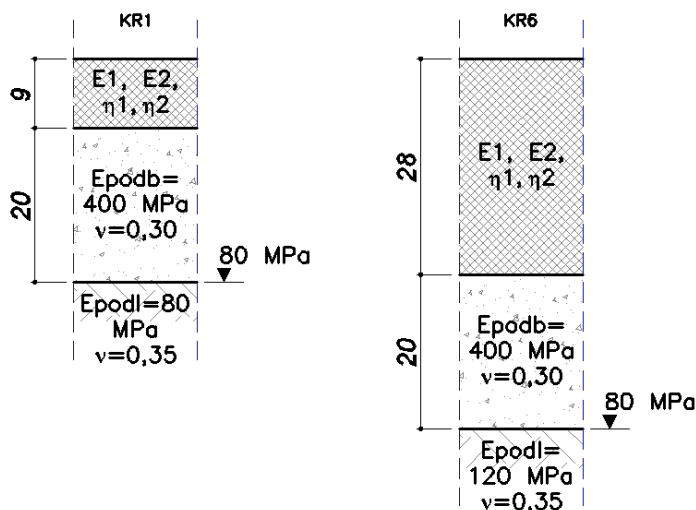
7.3.5. Przyjęcie układu warstw nawierzchni do analizy wraz z rozkładem temperatury wewnątrz konstrukcji

Do analizy zachowania się nawierzchni z uwzględnieniem cech lepkosprężystych przyjęto układ warstw występujący wcześniej w punkcie 7.2, zawierającym obliczenia mechanistyczne trwałości zmęczeniowej, tj.:

- konstrukcję podatną przeznaczoną dla ruchu lekkiego o kategorii KR1 o grubości warstw asfaltowych 9 cm na podbudowie z kruszywa łamanego o grubości 20 cm,
- konstrukcję podatną przeznaczoną dla ruchu ciężkiego o kategorii KR6 według z warstwami asfaltowymi o łącznej grubości 28 cm ułożonych na podbudowie z kruszywa o grubości 20 cm.

Tak samo jak podczas obliczeń trwałości zmęczeniowej opisanych w punkcie 7.2 założono, że cały pakiet warstw asfaltowych w obu konstrukcjach (warstwa ścieralna, warstwa wiążąca, podbudowa asfaltowa) jest wykonany z mieszanki mineralno jednego rodzaju – betonu asfaltowego do warstwy ścieralnej – którego wyniki badań laboratoryjnych przedstawiono w rozdziale 5 niniejszej pracy doktorskiej.

Parametry warstwy podbudowy z kruszywa znajdującej się pod warstwami asfaltowymi przyjęto na tym samym poziomie, co przy obliczeniach w punkcie 7.2, tj. moduł równy 400 MPa oraz współczynnik Poissona równy 0,3. Inne wartości parametrów przyjęto natomiast dla podłoża gruntowego. Problem deformacji trwałych analizowany w niniejszym punkcie istotny jest w porze letniej, podczas występowania wysokich temperatur. W tym okresie podłoże gruntowe pracuje w korzystnych warunkach wodnych i jego nośność nie jest obniżona. Dlatego też, w obliczeniach z uwzględnieniem wpływu lepkosprężystości zastosowano wyższe niż w punkcie 7.2. moduły odkształcenia podłoża gruntowego, tj. 80 MPa w konstrukcji dla ruchu KR1 oraz 120 MPa w konstrukcji dla ruchu KR6. Są to moduły zgodne z wymaganymi w [61]. Schematy konstrukcji nawierzchni przyjętych do analizy lepkosprężystej konstrukcji nawierzchni pokazano na rysunku 7.15.



Rys. 7.15. Układy warstw konstrukcji nawierzchni przyjęte do analizy lepkosprężystej

W odróżnieniu jednak od obliczeń mechanistycznych, które przeprowadzano tylko dla wariantu występowania jednej stałej temperatury na całej grubości warstw asfaltowych, obliczenia naprężeń, odkształceń i ugięć nawierzchni z uwzględnieniem cech lepkosprężystych przeprowadzono w bardziej złożonym schemacie, tj.:

- przy występowaniu na całej grubości warstw asfaltowych stałej temperatury, równej temperaturze na powierzchni jezdni (na głębokości 0 cm), której wartość przyjęto na podstawie rzeczywistych danych,
- przy występowaniu na grubości warstw asfaltowych zmiennego rozkładu temperatury, uzależnionego od temperatury występującej na powierzchni jezdni (na głębokości 0 cm), którą również określano na podstawie danych z pomiarów rzeczywistych.

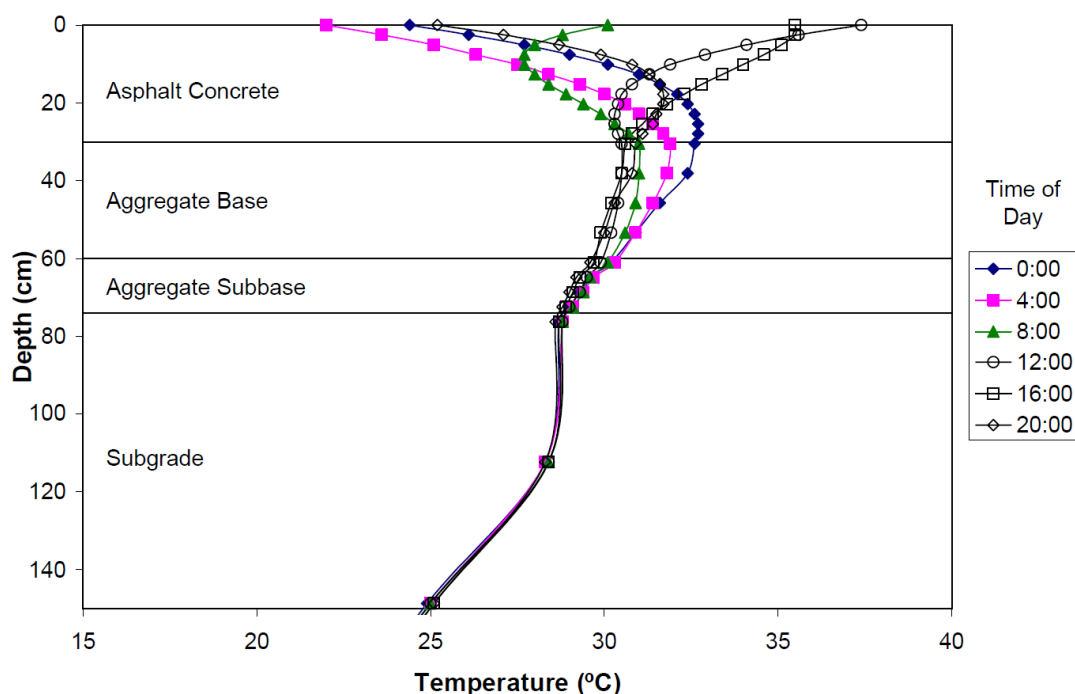
Rzeczywiste dane pomiarowe temperatur występujących w konstrukcjach nawierzchni uzyskano z bazy danych Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad. W chwili obecnej na sieci dróg zarządzanych przez GDDKiA pracuje układ stacji meteorologicznych umożliwiających ciągły, bieżący pomiar wielu parametrów pogodowych wraz z bezpośrednim wysyłaniem ich do bazy danych. Spośród nich, istotne z punktu widzenia pracy konstrukcji nawierzchni z mieszanek mineralno-asfaltowych są następujące parametry:

- temperatura nawierzchni na głębokości 0 cm,
- temperatura nawierzchni na głębokości 5 cm,
- temperatura podbudowy na głębokości 30 cm (wybrane, najnowsze stacje).

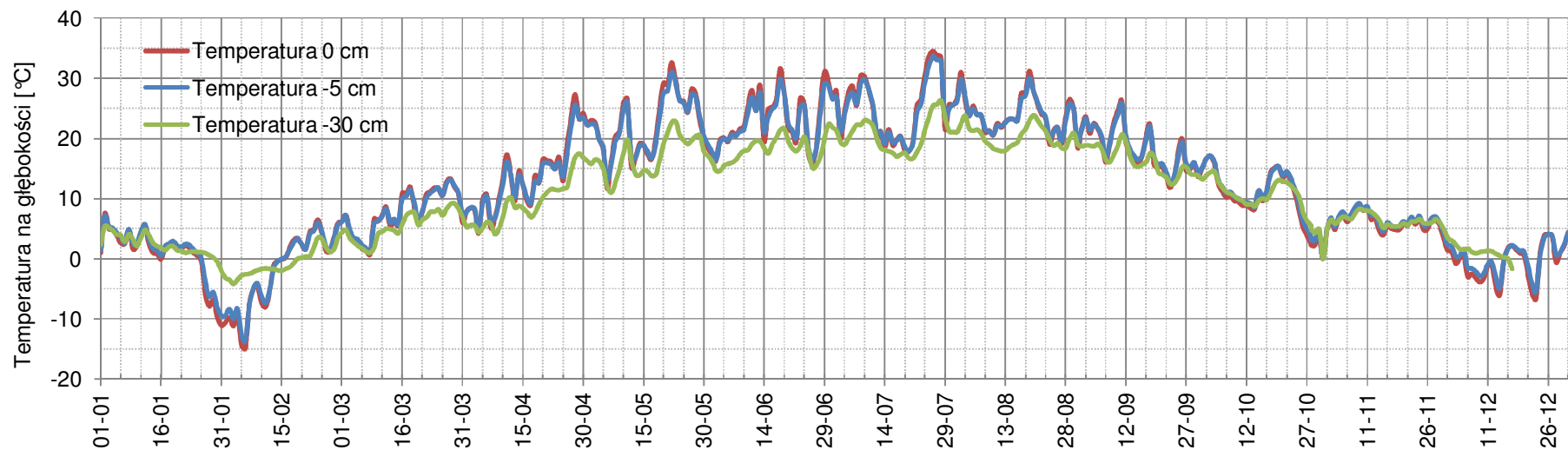
W niniejszej pracy wykorzystano dane zarejestrowane w roku 2012 przez stację meteorologiczną usytuowaną w miejscowości Redzikowo przy drodze ekspresowej S6 w powiecie słupskim. W pierwszym etapie pracy przeanalizowano roczny przebieg zmian temperatury o godzinie 12.00. Pozwoliło to na określenie lipca jako miesiąca, w którym występowały najwyższe temperatury na powierzchni jezdni. Dzięki temu w dalszym etapie możliwe było ograniczenie zakresu analizowanych danych tylko do jednego miesiąca, przy jednoczesnym zwiększeniu rozdzielczości zbioru danych do wielkości zapisywanych z dziesięciominutowym interwałem. Wykresy przedstawiające wymienione przebiegi zmian temperatury przedstawiono na rysunku 7.16 i 7.17.

Na podstawie wykresu temperatury w całym miesiącu lipcu 2012 roku określono najwyższą możliwą jej wartość na powierzchni jezdni. W dniach 24, 25 i 26 lipca oscylowała ona na poziomie 50 °C i wynosiła kolejno 51,1, 51,3 oraz 49,5 °C. Wartości te występowały o godzinie 15. W związku z tym zdecydowano, że w pierwszym wariantcie obliczeń – przy stałym rozkładzie na grubości warstw asfaltowych – przyjęta temperatura będzie wynosiła 50 °C. Archiwalne dane z 24, 25 i 26 lipca posłużyły również do wyznaczenia rozkładu temperatury na grubości warstw asfaltowych w drugim wariantcie obliczeń. Początkowo planowano zastosować bezpośrednio dane z pomiarów na głębokości 0, 5 i 30 cm, zaś

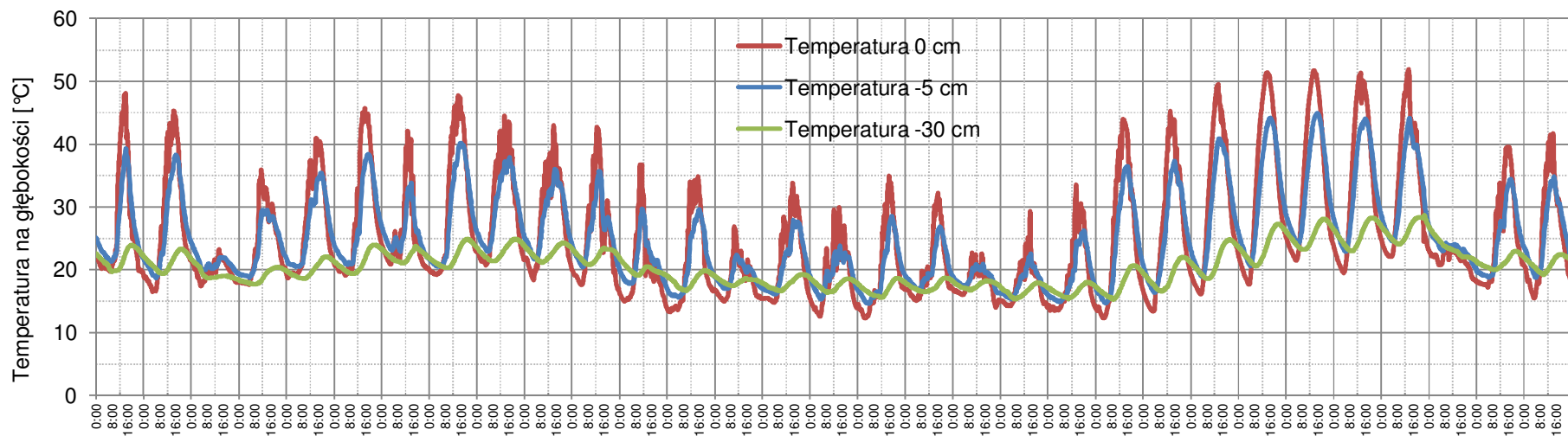
temperatury na innych poziomach uzyskać z aproksymacji liniowej. Z zapisu danych na głębokości 30 cm wynikała jednakże znaczna różnica pomiędzy temperaturą występującą na tej głębokości (około 25 °C), a temperaturą na powierzchni jezdni. Mogło to wskazywać na usytuowanie czujnika poza warstwami asfaltowymi, w materiale o innej przewodności cieplnej (np. w podbudowie z kruszywa lub gruncie podłoża poza obszarem nawierzchni). Na rysunku 7.18 przedstawiono wykresy temperatur nawierzchni zmierzonych w różnych porach dnia zawarte w publikacji [91], gdzie pomimo nagrzewania się powierzchni jezdni jedynie do temperatury 36 – 37 °C oraz jej spadku w nocy do wartości ok. 22 °C temperatura spodu warstw asfaltowych pozostawała w przedziale 30 – 33 °C. W związku z brakiem pewności co do poprawności pomiarów na głębokości 30 cm zdecydowano o wyznaczeniu temperatur poniżej górnej powierzchni jezdni za pomocą wzoru teoretycznego.



Rys. 7.18. Wykresy zmian temperatury wewnątrz konstrukcji nawierzchni według [91]



Rys. 7.16. Wykres zmian temperatur nawierzchni jezdni na głębokości 0, 5 i 30 cm zarejestrowany w całym roku 2012 na stacji meteorologicznej Redzikowo, droga ekspresowa S6



Rys. 7.17. Wykres zmian temperatur nawierzchni jezdni na głębokości 0, 5 i 30 cm zarejestrowany w lipcu roku 2012 na stacji meteorologicznej Redzikowo, droga ekspresowa S6

Do wyznaczenia temperatury w nawierzchni zastosowano wzór BELLS3, który stanowi rozwinięcie poprzednich wersji wzorów BELLS i BELLS2. Zostały one opracowane empirycznie w USA do celów określania temperatury panującej wewnątrz konstrukcji nawierzchni podczas prowadzenia badań FWD [29]. Model rozkładu temperatury BELLS2 i 3 wykorzystuje średnią temperaturę powietrza panującą w dniu poprzedzającym pomiary, bieżącą temperaturę powierzchni jezdni mierzoną czujnikiem podczerwieni oraz czas. Zmiana temperatury w ciągu dnia uwzględniana jest poprzez wprowadzenie do wzoru funkcji sinusoidalnej o cyklu 18 godzinnym i kącie przesunięcia fazowego 15,5 oraz 13,5 godzinnym:

$$T_d = 0,95 + 0,892 \cdot T_s + (\log d - 1,25) \cdot \left\{ 0,621 \cdot T_a - 0,448 \cdot T_s + 1,83 \cdot \sin \left[(hr_{11} - 15,5) \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{18} \right] \right\} + 0,042 \cdot T_s \cdot \sin \left[(hr_9 - 13,5) \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{18} \right] \quad (7.22)$$

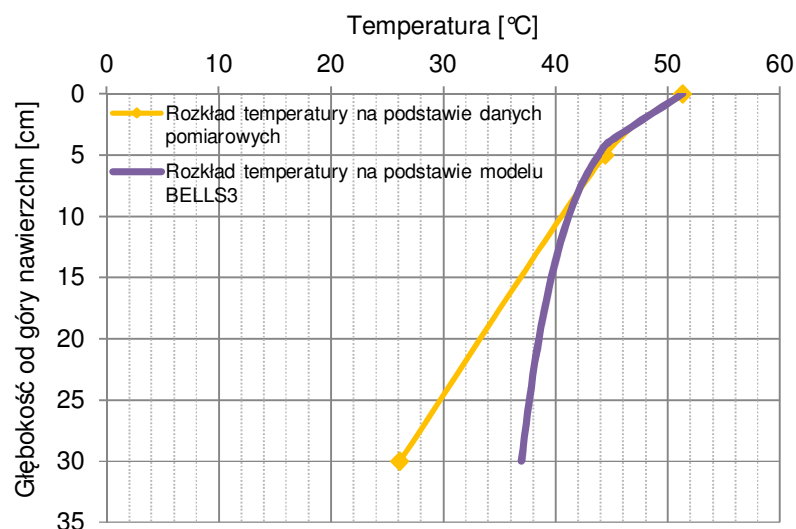
gdzie:

- T_d - temperatura w nawierzchni na głębokości d , [°C],
- T_s - bieżąca temperatura nawierzchni mierzona czujnikiem podczerwieni, [°C],
- d - głębokość poniżej góry nawierzchni, [mm],
- T_a - średnia temperatura powietrza w dniu poprzedzającym dzień pomiarów,
- hr_{11} - bieżący czas wyrażony w formacie dziesiętnym pomiędzy godziną 11:00, a 5:00,
- hr_9 - bieżący czas wyrażony w formacie dziesiętnym pomiędzy godziną 9:00, a 3:00.

Z uwagi na empiryczny charakter wzór 7.22 posiada pewne ograniczenia w stosowaniu – nie ma zastosowania w porze nocnej, zaś głębokość na której ma być oszacowana temperatura musi zawierać się w przedziale od 45 do 305 mm [29]. Może być również nieprzydatny w warunkach klimatycznych i materiałowych innych, niż te dla których został opracowany.

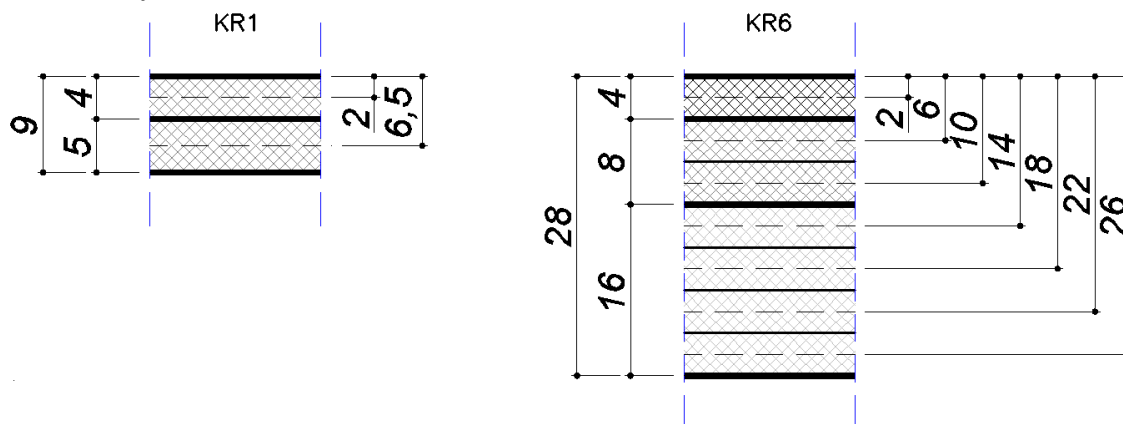
Na rysunku 7.19 pokazano porównanie rozkładu temperatury wewnątrz konstrukcji nawierzchni uzyskanego z aproksymacji liniowej danych pomiarowych na głębokości 0, 5 oraz 30 cm z rozkładem otrzymanym poprzez zastosowanie modelu BELLS3. Porównanie to przeprowadzono dla pojedynczego dnia (25 lipca), w którym temperatura powierzchni jezdni o godzinie 15.00 sięgnęła 51,3 °C. Z powodu ograniczeń stosowania przyjętego modelu wartości pomiędzy głębokością 0, a 45 mm przyjęto jako zmieniające się liniowo pomiędzy temperaturą zmierzoną na głębokości 0 mm, a pierwszą wartością obliczoną na głębokości 45 mm. Można zauważyć, że do głębokości ok. 10 cm poniżej góry nawierzchni uzyskano dość dobrą zgodność obu rozkładów. Po przekroczeniu tej głębokości obie krzywe

zaczynają się rozchodzić, wskutek czego temperatury na spodzie warstw asfaltowych różnią się o ok. 10,5 °C.



Rys. 7.19. Porównanie rozkładów temperatur wewnątrz konstrukcji nawierzchni otrzymanych na podstawie danych pomiarowych oraz modelu BELLS3

Finalnie, wykorzystując model BELLS3 wyznaczono temperaturę wewnątrz konkretnych układów nawierzchni analizowanych w bieżącym rozdziale, tj. konstrukcji dla ruchu KR6 (28 cm warstw asfaltowych) oraz KR1 (9 cm warstw asfaltowych) przy założeniu występowania na powierzchni jezdni temperatury 51,3 °C. Konstrukcję KR6 podzielono na siedem warstw o grubości 4 cm każda, zaś konstrukcję KR1 na dwie warstwy o grubości 4 i 5 cm. Temperatury określano w środku grubości każdej cząstkowej warstwy. Dzięki temu, w obliczeniach w programie VEROAD było możliwe zróżnicowanie parametrów materiałowych warstwy asfaltowej w zależności do głębokości poniżej powierzchni jezdni. Podział na warstwy cząstkowe i odpowiadające im temperatury przedstawiono na rysunku 7.20 oraz tablicy 7.5.



Rys. 7.20. Podział warstw asfaltowych analizowanych konstrukcji nawierzchni na cząstkowe warstwy o różnej temperaturze

Tablica 7.8. Rozkład temperatury w konstrukcjach nawierzchni KR1 i KR6 według modelu BELLS3 przy założeniu temperatury na powierzchni jezdni 51,3 °C

Głębokość poniżej powierzchni jezdni KR6 [cm]	Temperatura na danej głębokości [°C]
2	48,0
6	43,1
10	41,2
14	39,9
18	38,9
22	38,1
26	37,5
Głębokość poniżej powierzchni jezdni KR1 [cm]	Temperatura na danej głębokości [°C]
2	48,0
6,5	42,8

7.3.6. Określenie krzywych wiodących badanych mieszanek mineralno-asfaltowych, modułu zespolonego E^* oraz kąta przesunięcia fazowego ϕ

Idea konstruowania krzywych wiodących mieszanek mineralno-asfaltowych polega na zdefiniowaniu ciągłej krzywej zależności modułu zespolonego i częstotliwości w określonej temperaturze referencyjnej na podstawie częściowych danych uzyskanych z badania modułu zespolonego przy kilku ustalonych parametrach (tj. temperatury i częstotliwości). Dysponując krzywą wiodącą możliwe jest za pośrednictwem współczynników przesunięcia określić wartość modułu zespolonego dla dowolnej kombinacji temperatury i częstotliwości działania obciążenia. W metodologii występującej w metodzie projektowania nawierzchni AASHTO 2004 (MEPDG) krzywa wiodąca opisywana jest funkcja sigmoidalną według wzoru [11]:

$$\log |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \cdot (\log \omega_r)}} \quad (7.23)$$

gdzie:

- $|E^*|$ – moduł dynamiczny,
- ω_r – częstotliwość zredukowana,
- δ – minimalna wartość modułu dynamicznego $|E^*|$,
- α – maksymalna wartość modułu dynamicznego $|E^*|$,
- β, γ – parametry opisujące kształt krzywej wiodącej.

Wartość modułu zespolonego obliczanego według wzoru 7.23 uzależniona jest od temperatury za pośrednictwem wartości częstotliwości zredukowanej ω_r . Częstotliwość zredukowaną ω_r oblicza się poprzez przemnożenie częstotliwości obciążenia występującej bezpośrednio podczas badania próbki przez współczynnik przesunięcia czasowo-temperaturowego $a(T)$:

$$\omega_r = a(T) \cdot \omega \quad (7.24)$$

$$\log(\omega_r) = \log[a(T)] + \log(\omega) \quad (7.25)$$

gdzie:

- ω_r – częstotliwość zredukowana,
- ω – częstotliwość obciążenia w temperaturze badania,
- $a(T)$ – współczynnik przesunięcia czasowo-temperaturowego,
- T – temperatura badania.

Według oryginalnych założeń metody AASHTO 2004 współczynniki przesunięcia czasowo-temperaturowego w przypadku analizy krzywej wiodącej asfaltu oblicza się na podstawie jego lepkości według wzorów 7.26 i 7.27:

$$\log[a(T)] = c \cdot [\log(\eta) - \log(\eta_{70RTFOT})] \quad (7.26)$$

$$\log \log \eta = A + VTS \cdot \log T_R \quad (7.27)$$

gdzie:

- $a(T)$ – współczynnik przesunięcia temperaturowego w temperaturze T
- η – lepkość w danej temperaturze przy określonym stopniu starzenia,
- $\eta_{70RTFOT}$ – lepkość w temperaturze odniesienia krzywej wiodącej 70°F,
- c – parametr dopasowania,
- T_R – temperatura w skali Rankin'a,
- A – współczynnik regresji,
- VTS – nachylenie krzywej regresji zależności lepkość-temperatura.

Po uwzględnieniu wzorów 7.24 – 7.27 wzór określający krzywą wiodącą przyjmuje finalną postać:

$$\log|E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \cdot \{\log(\omega) + c \cdot [10^{A+VTS \cdot \log T_R} - \log(\eta_{70RTFOT})]\}}]} \quad (7.28)$$

gdzie: oznaczenia zgodne z wzorami 7.23 – 7.27.

Określanie krzywej wiodącej według wzoru 7.26 wymaga znajomości wielkości, które nie są uzyskiwane podczas badania modułów zespolonych w urządzeniu AMPT/SPT, tj. minimalnych i maksymalnych wartości modułów zespolonych oraz charakterystyk lepkości. W pracy [11] przedstawiono wzór oparty o równanie Arrheniusa umożliwiający wyznaczenie współczynników przesunięć $\alpha(T)$ dla mieszanek mineralno-asfaltowych na podstawie samych wartości temperatur:

$$\log[a(T)] = \frac{\Delta E_a}{19,14714} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right) \quad (7.29)$$

gdzie:

- $a(T)$ – współczynnik przesunięcia temperaturowego dla mieszanek mineralno-

- asfaltowych w temperaturze T
- T_r – temperatura odniesienia,
- T – temperatura badania,
- ΔE_a – energia aktywacji (parametr dopasowania).

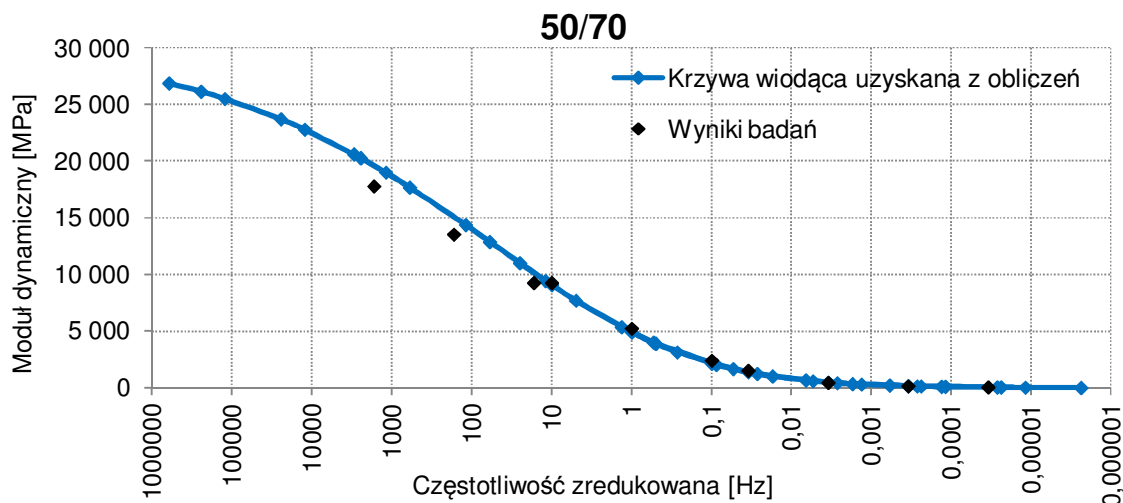
Przy zastosowaniu zależności 7.29 w zmodyfikowanym wzorze 7.23 otrzymuje się:

$$\log |E^*| = \delta + \frac{(Max - \delta)}{1 + e^{\beta + \gamma \left[\log(\omega) + \frac{\Delta E_a}{19,14714} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right) \right]}} \quad (7.30)$$

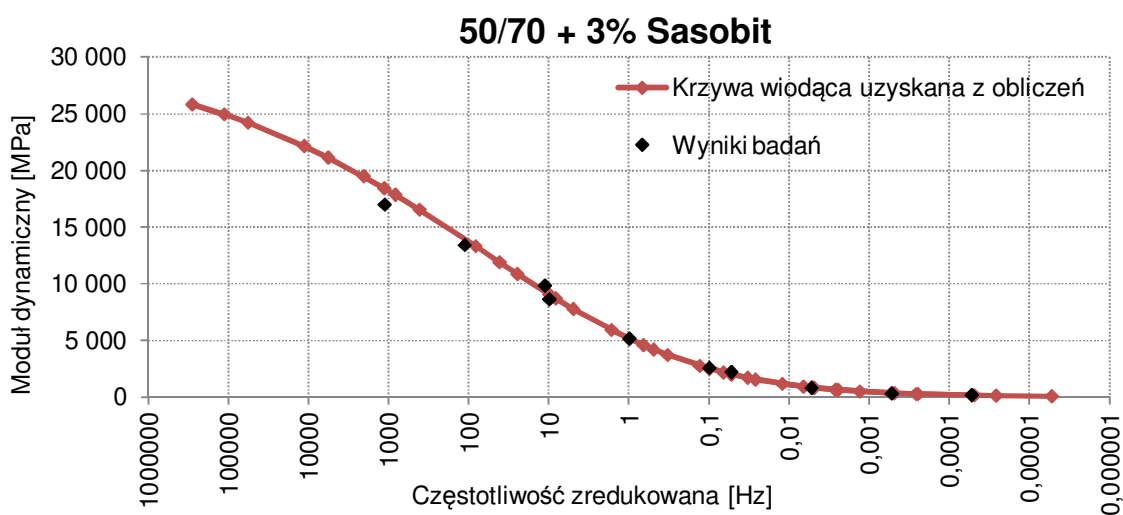
gdzie:

- $|E^*|$ – moduł dynamiczny,
- ω – częstotliwość obciążenia w temperaturze badania,
- T_r – temperatura odniesienia,
- T – temperatura badania,
- Max – maksymalna wartość modułu dynamicznego,
- $\delta, \beta, \gamma, \Delta E_a$ – parametry dopasowania krzywej.

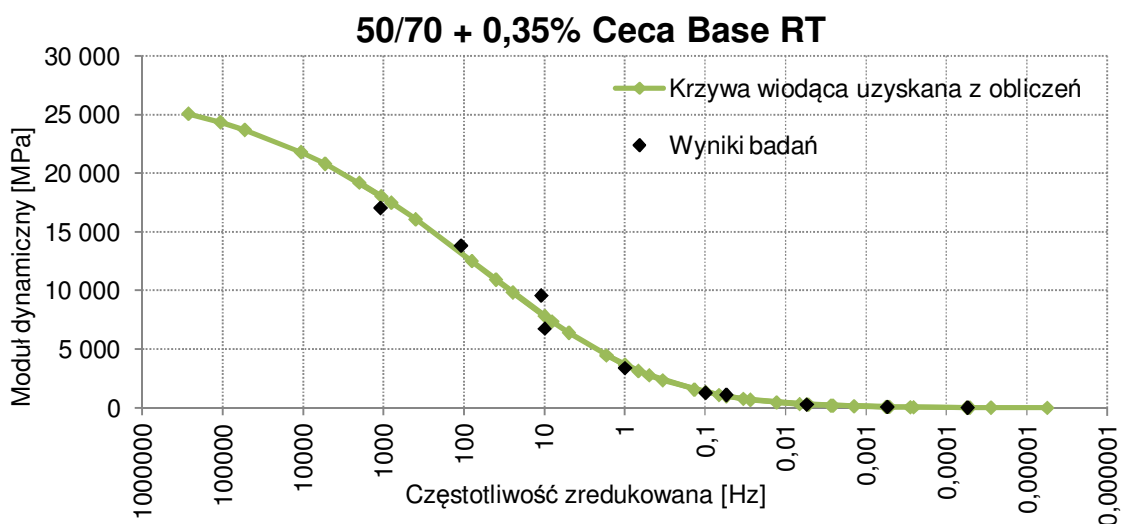
W niniejszej pracy doktorskiej do wyznaczenia krzywych wiodących zastosowano wzory 7.29 i 7.30. Jako dane wejściowe wykorzystano wartości modułów dynamicznych uzyskane w czterech temperaturach (4, 20 i 40 °C) i zestawie częstotliwości podanym w punkcie 7.3.4. Parametry dopasowania krzywej uzyskiwano poprzez iteracyjną optymalizację równania 7.30, do którego w pierwszym kroku wprowadzono orientacyjne wartości $\delta, \beta, \gamma, \Delta E_a$. Optymalizacja polegała na wielokrotnej zmianie parametrów dopasowania w taki sposób, aby finalnie otrzymać najmniejszą sumę kwadratów odchyłeń pomiędzy modułami dynamicznymi uzyskanymi w badaniach laboratoryjnych, a wartościami wynikającymi z równania 7.30. Niezbędny do obliczeń maksymalny moduł, jaki może wystąpić dla danej mieszanki mineralno-asfaltowej określano w badaniu ITSM w -40 °C na dodatkowej serii próbek betonów asfaltowych zagęszczanych metodą Marshalla. Przyjęto, że w tak niskiej temperaturze mieszanka mineralno-asfaltowa zachowuje się niemal idealnie sprężyste (kąąt przesunięcia fazowego zbliżony do 0°) i wartości modułów sztywności uzyskanych w badaniu ITSM odpowiadają modułom dynamicznym. Uzyskane krzywe wiodące zamieszczono na rysunkach 7.21 – 7.23. Jako temperaturę odniesienia krzywych wiodących przyjęto 20 °C.



Rys. 7.21. Krzywa wiodąca dla mieszanki mineralno-asfaltowej z asfaltem zwykłym 50/70

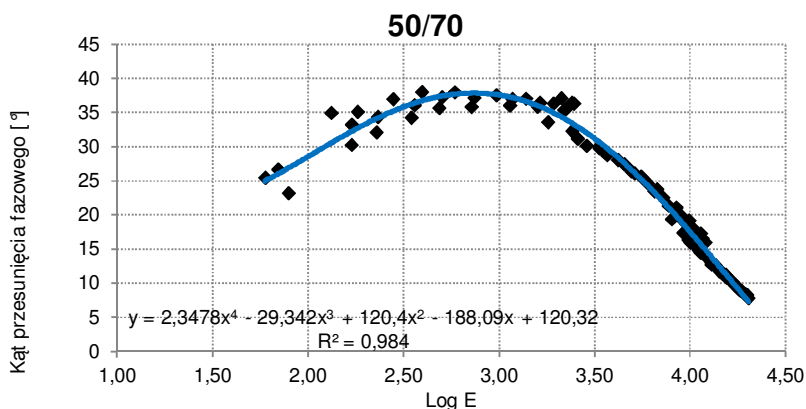


Rys. 7.22. Krzywa wiodąca dla mieszanki mineralno-asfaltowej z asfaltem zwykłym 50/70 i dodatkiem Sasobit

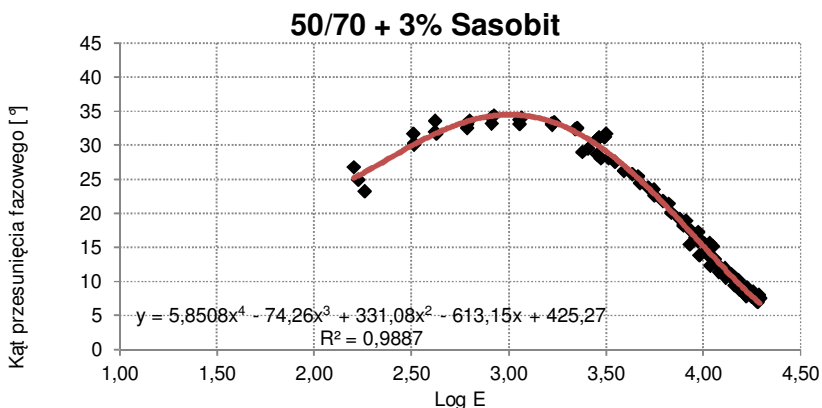


Rys. 7.23. Krzywa wiodąca uzyskana z obliczeń dla mieszanki mineralno-asfaltowej z asfaltem zwykłym 50/70 i dodatkiem Ceca Base RT

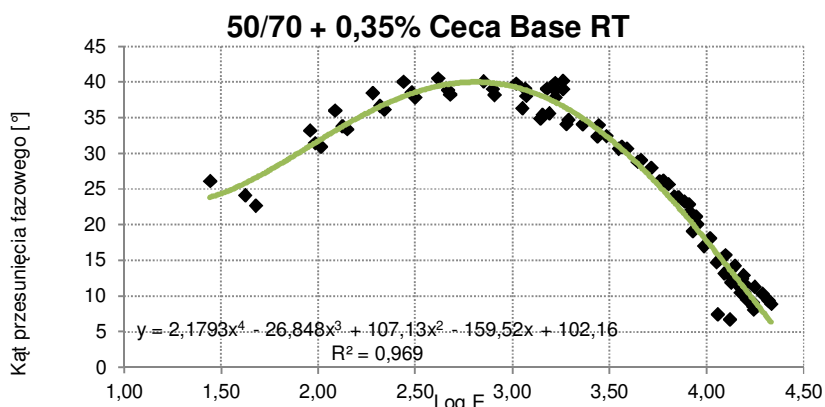
Uzyskane krzywe wiodące pozwoliły na określenie wartości modułów dynamicznych dla różnych częstotliwości w temperaturach opisanych w tabelicy 7.8, tj. dla oszacowanych temperatur warstw asfaltowych położonych na różnej głębokości poniżej góry nawierzchni. Do określenia parametrów lepkosprężystości w programie DEBUROAD (które są niezbędne w dalszym etapie obliczeń przeprowadzanych bezpośrednio w programie VEROAD) konieczna jest również znajomość kąta przesunięcia fazowego w danej temperaturze i częstotliwości. Do wyznaczenia kątów przesunięcia fazowego odpowiadających uzyskanym z krzywych wiodących modułom dynamicznym wykorzystano wykresy Blacka. Wykres Blacka tworzony jest na podstawie uszeregowanych par wartości logarytmu modułu dynamicznego i kąta przesunięcia fazowego, które otrzymano podczas badań laboratoryjnych. Umożliwia on utworzenie funkcji wielomianowej opisującej zależność kąta przesunięcia fazowego od logarytmu modułu dynamicznego. Znając współczynniki wielomianu można następnie obliczyć wartość kąta przesunięcia fazowego dla dowolnej wartości modułu. Wykonane wykresy Blacka dla analizowanych mieszanek mineralno-asfaltowych pokazano na rysunkach 7.24 – 7.26. Tablice 7.9 – 7.11 zawierają moduły dynamiczne oraz odpowiadające im kąty przesunięcia fazowego wyznaczone dla oszacowanych temperatur warstw asfaltowych na różnych głębokościach.



Rys. 7.24. Krzywa wiodąca uzyskana z obliczeń dla mieszanki mineralno-asfaltowej z asfaltem zwykłym 50/70



Rys. 7.25. Krzywa wiodąca uzyskana z obliczeń dla mieszanki mineralno-asfaltowej z asfaltem zwykłym 50/70 oraz dodatkiem



Rys. 7.26. Krzywa wodząca uzyskana z obliczeń dla mieszanki mineralno-asfaltowej z asfaltem zwykłym 50/70 oraz dodatkiem Ceca Base RT

Tablica 7.9. Zestawienie modułów dynamicznych i kątów przesunięcia fazowego dla różnych częstotliwości obciążenia dla betonu asfaltowego z asfaltem zwykłym 50/70

	Głębokość [cm]	Temperatura [°C]	Obliczony moduł dynamiczny [MPa] i kąt przesunięcia fazowego [°] dla częstotliwości [Hz]:					
			25	10	5	1	0,5	0,1
50/70	2,0	48,0	844	554	401	191	140	72
			37,82	37,63	36,79	33,06	30,99	26,26
	6,0	43,1	1 461	979	715	339	246	120
			36,41	37,63	37,87	36,14	34,56	29,88
	10,0	41,2	1 810	1 227	902	430	312	150
			35,33	37,07	37,75	37,02	35,77	31,44
	14,0	39,9	2 078	1 422	1 051	504	365	174
			34,48	36,52	37,49	37,44	36,44	32,46
	18,0	38,9	2 300	1 585	1 177	568	411	196
			33,78	36,03	37,19	37,67	36,87	33,21
	22,0	38,1	2 491	1 727	1 287	625	453	215
			33,19	35,59	36,90	37,79	37,17	33,78
	26,0	37,5	2 660	1 854	1 387	676	491	233
			32,67	35,19	36,63	37,85	37,38	34,24

Tablica 7.10. Zestawienie modułów dynamicznych i kątów przesunięcia fazowego dla różnych częstotliwości obciążenia dla betonu asfaltowego z asfaltem zwykłym 50/70 i dodatkiem Sasobit

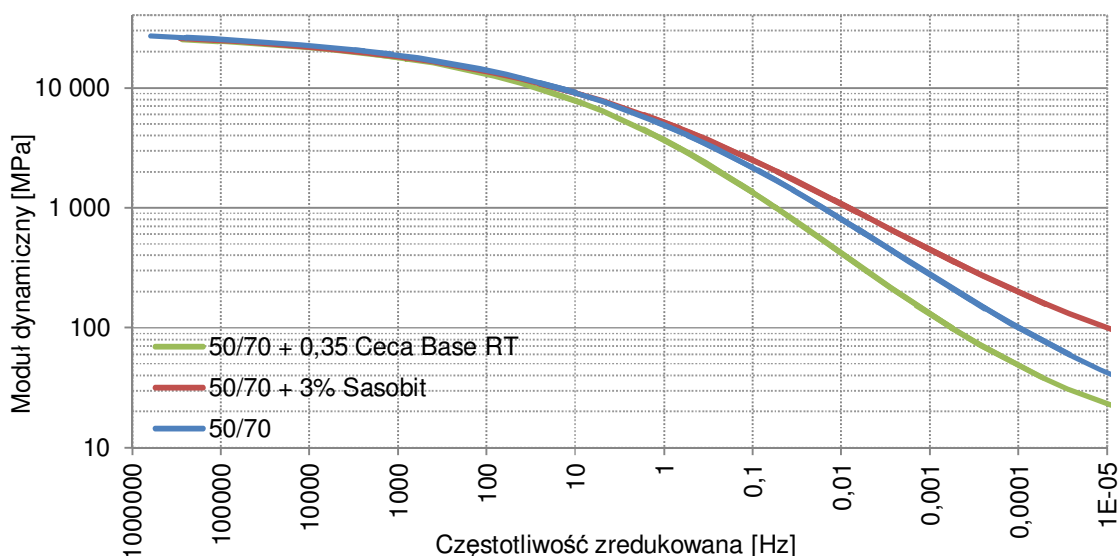
50/70 + 3% Sasobit	Głębokość [cm]	Temperatura [°C]	Obliczony moduł dynamiczny [MPa] i kąt przesunięcia fazowego [°] dla częstotliwości [Hz]:					
			25	10	5	1	0,5	0,1
			2,0	48,0	1 393 36,61	985 37,62	756 37,87	410 36,87
6,0	43,1	2 119 34,35	1 520 36,23	1 173 37,20	634 37,80	487 37,36	270 35,07	
		10,0	41,2	2 501 33,16	1 809 35,34	1 401 36,58	760 37,87	583 37,71
14,0	39,9			2 784 32,30	2 026 34,65	1 575 36,06	858 37,80	658 37,83
		18,0	38,9	3 013 31,62	2 203 34,09	1 718 35,62	940 37,69	721 37,87
22,0	38,1			3 207 31,05	2 355 33,61	1 842 35,23	1 010 37,57	775 37,87
		26,0	37,5	3 377 28,44	2 489 31,06	1 950 32,64	1 074 34,42	824 34,27

Tablica 7.11. Zestawienie modułów dynamicznych i kątów przesunięcia fazowego dla różnych częstotliwości obciążenia dla betonu asfaltowego z asfaltem zwykłym 50/70 i dodatkiem Ceca Base RT

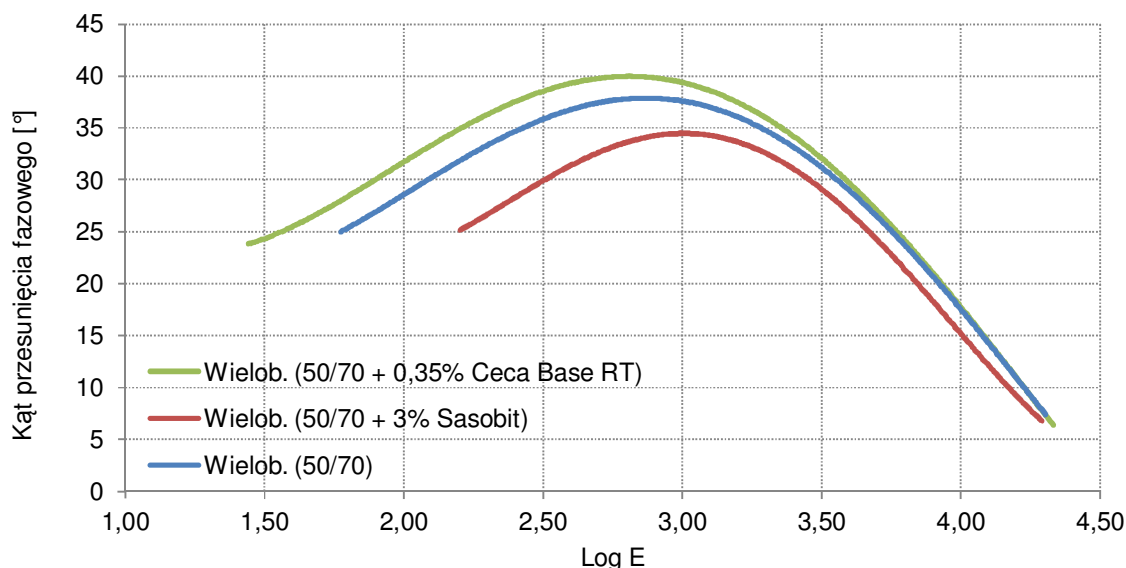
50/70 + 0,35% Ceca Base RT	Głębokość [cm]	Temperatura [°C]	Obliczony moduł dynamiczny [MPa] i kąt przesunięcia fazowego [°] dla częstotliwości [Hz]:					
			25	10	5	1	0,5	0,1
			2,0	48,0	610 37,76	378 36,58	264 34,95	119 29,80
6,0	43,1	1 091 37,40			686 37,86	479 37,32	208 33,59	147 31,33
		10,0	41,2	1 374 36,66	873 37,79	611 37,76	265 34,96	186 32,88
14,0	39,9			1 595 36,00	1 022 37,55	719 37,87	311 35,76	218 33,86
		18,0	38,9	1 780 35,43	1 148 37,26	811 37,85	352 36,30	246 34,56
22,0	38,1			1 941 34,92	1 260 36,98	892 37,76	388 36,67	271 35,08
		26,0	37,5	2 084 32,26	1 360 34,07	967 34,43	422 31,69	294 29,38

7.3.7. Porównanie uzyskanych krzywych wiodących mieszanek mineralno-asfaltowych oraz krzywych Blacka

Na rysunkach 7.27 oraz 7.28 przedstawiono zbiorcze zestawienie uzyskanych z obliczeń krzywych wiodących mieszanek mineralno-asfaltowych oraz kątów przesunięcia fazowego. W celu lepszego uwidocznienia różnic wartości modułów dynamicznych na osi pionowej rysunku 7.27 zastosowano skalę logarytmiczną.



Rys. 7.27. Porównanie krzywych wiodących dla mieszanek mineralno-asfaltowych z asfaltem czystym 50/70 oraz dodatkiem Sasobit i Ceca Base RT



Rys. 7.28. Porównanie kątów przesunięcia fazowego dla mieszanek mineralno-asfaltowych z asfaltem czystym 50/70 oraz dodatkiem Sasobit i Ceca Base RT

Z analizy zestawienia krzywych wiodących dla poszczególnych mieszanek mineralno-asfaltowych wynika, że w zakresie wysokich częstotliwości od 10^1 do 10^6

Hz (odpowiadających niskim temperaturom pracy nawierzchni) moduł dynamiczny dla wszystkich trzech badanych mieszanek był na tym samym poziomie. Zróżnicowanie modułu dynamicznego następowało przy zmniejszeniu częstotliwości obciążenia do zakresu poniżej 10 Hz lub – w innym ujęciu – przy podwyższonych temperaturach pracy nawierzchni. W tym przypadku największą wartością modułu dynamicznego charakteryzowała się mieszanka z dodatkiem Sasobitu, następnie mieszanka z czystym asfaltem zwykłym 50/70 oraz mieszanka z dodatkiem Ceca Base RT. Wyniki te są zbieżne z rezultatami uzyskanymi podczas badań laboratoryjnych odporności na deformacje trwałe (punkt 5.2.5), gdzie najwyższą odpornością na koleinowanie charakteryzowały się mieszanki z dodatkiem Sasobitu. Próbkę mieszanki z tym dodatkiem osiągały również mniejsze od pozostałych wartości kątów przesunięcia fazowego (rysunek 7.28).

7.3.8. Określenie parametrów lepkosprężystości w programie DEBUROAD

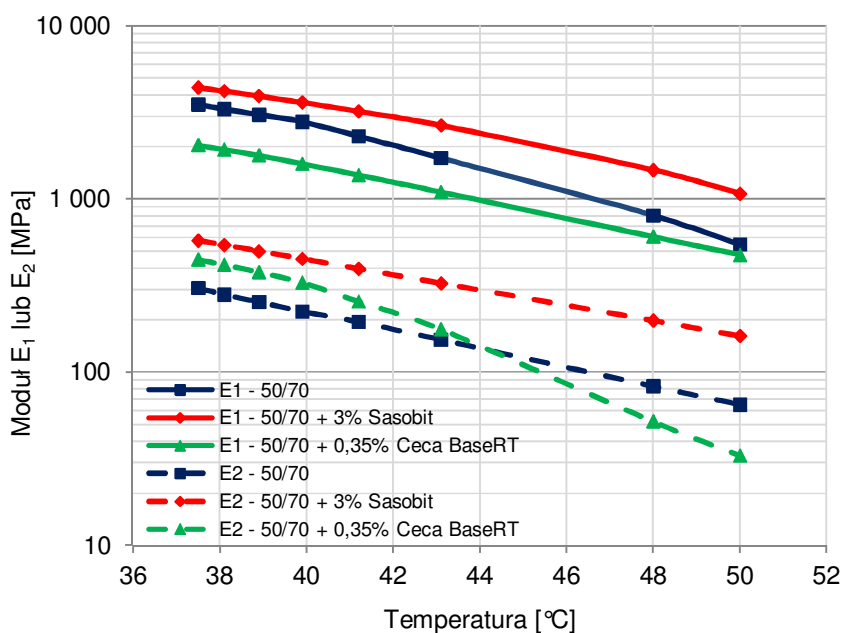
Program VEROAD wymaga podania charakterystyk materiałów lepkosprężystych (tj. warstw asfaltowych) za pomocą parametrów reologicznych zgodnych z modelem lepkosprężystości Burgersa lub Hueta-Sayegha. W niniejszej pracy doktorskiej stosowano model Burgersa. Do przekształcenia uzyskanych wcześniej wartości modułów dynamicznych oraz kątów przesunięcia fazowego na parametry reologiczne E_1 , E_2 , η_1 , η_2 (opis w punkcie 7.3.3.) wykorzystano podprogram DEBUROAD, będący częścią całego pakietu VEROAD. Program DEBUROAD wykorzystując metodę najmniejszych kwadratów dobiera iteracyjnie wartości parametrów Burgersa w celu uzyskania najlepszego dopasowania do modelu Pronka [86]. Dopasowanie odbywa się z uwzględnieniem wag, które służą do nadania istotności modułowi lub kątowi przesunięcia fazowego w procesie iteracji. Według Hopmana wskazane jest stosowanie proporcji istotności modułu do kąta przesunięcia fazowego na poziomie 10:1. Uzyskane parametry modelu Burgersa w różnych temperaturach (przyjętych według rozkładu opisanego w punkcie dla trzech analizowanych mieszanek mineralno-asfaltowych z asfaltem zwykłym 50/70 czystym i z wybranymi dodatkami WMA zamieszczono w tablicy 7.12 oraz pokazano graficznie na rysunkach 7.29 oraz 7.30.

Tablica 7.12. Zestawienie uzyskanych na podstawie modułów dynamicznych oraz kątów przesunięcia fazowego parametrów modelu Burgersa

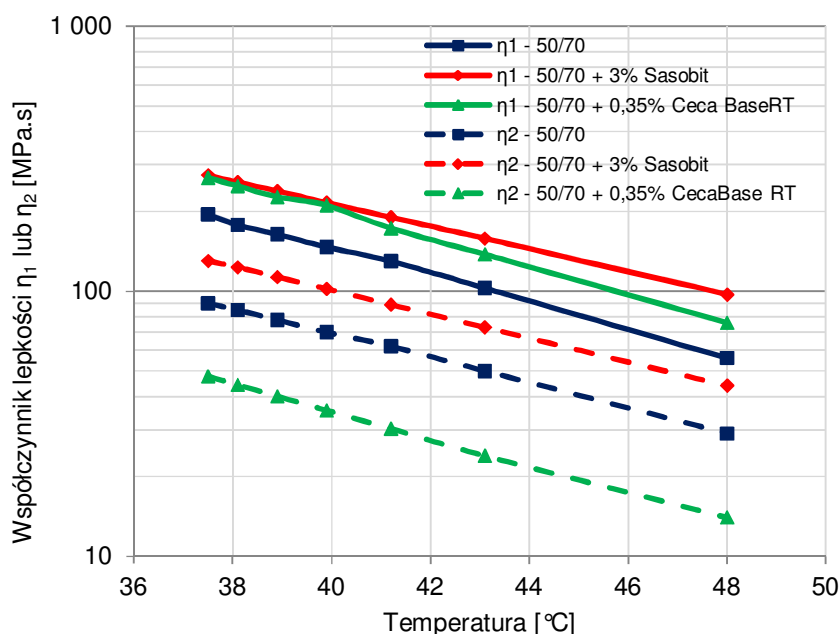
	Temp. [°C]	Moduły sprężystości [MPa]		Współczynnik lepkości [MPa.s]	
		E_1	E_2	η_1	η_2
50/70	37,5	3 511	306	195	90
	38,1	3 307	280	178	85
	38,9	3 065	254	164	78
	39,9	2 793	224	147	70
	41,2	2 302	195	130	62
	43,1	1 727	154	103	50
	48,0	803	83	56	29
	50,0	546	65	43	23

50/70 + 3% Sasobit	Temp. [°C]	Moduły sprężystości [MPa]		Współczynnik lepkości [MPa.s]	
		E ₁	E ₂	η ₁	η ₂
	37,5	4 406	574	274	130
38,1	4 200	541	258	123	
38,9	3 933	499	239	113	
39,9	3 610	451	216	102	
41,2	3 210	395	190	89	
43,1	2 664	326	158	73	
48,0	1 471	199	97	44	
50,0	1 073	162	80	36	

50/70 + 0,35% Ceca Base RT	Temp. [°C]	Moduły sprężystości [MPa]		Współczynnik lepkości [MPa.s]	
		E ₁	E ₂	η ₁	η ₂
	37,5	2 046	447	268	48
38,1	1 934	417	249	44	
38,9	1 786	378	227	40	
39,9	1 600	329	211	35	
41,2	1 375	256	173	30	
43,1	1 097	177	138	24	
48,0	606	52	76	14	
50,0	475	33	61	11	



Rys. 7.29. Wykres uzyskanych w programie DEBUROAD modułów E_1 i E_2 modelu Burgersa



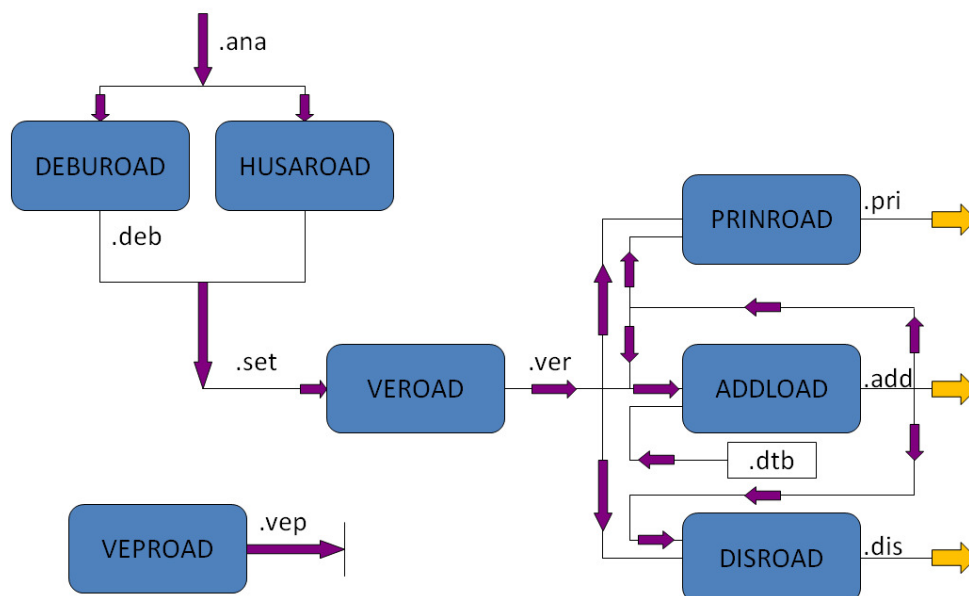
Rys. 7.30. Wykres uzyskanych w programie DEBUROAD współczynników lepkości η_1 i η_2 modelu Burgersa

7.3.9. Przeprowadzenie obliczeń w programi VEROAD

Oprogramowanie VEROAD (Visco Elastic Road Analysis Delft) stworzone na Uniwersytecie Delft w Holandii składa się w istocie z pakietu kilku programów wzajemnie współpracujących ze sobą:

- VEROAD – główny składnik pakietu służący do przeprowadzania obliczeń naprężeń, odkształceń i przemieszczeń,
- ADDLOAD – przeznaczony do obliczania efektów oddziaływania osi wielokrotnych i kół bliźniaczych,
- PRINROAD – program do obliczania naprężeń głównych,
- DISROAD – program do obliczania energii rozproszonej,
- DEBUROAD oraz HUSAROAD – programy do wyznaczania parametrów modeli lepkoelastycznych Burgersa oraz Hueta-Sayegha,
- VEPROAD – program do obliczeń parametrów takich jak moduł sztywności i współczynnik Poissona na podstawie parametrów modeli lepkoelastycznych Burgersa i Hueta-Sayegha.

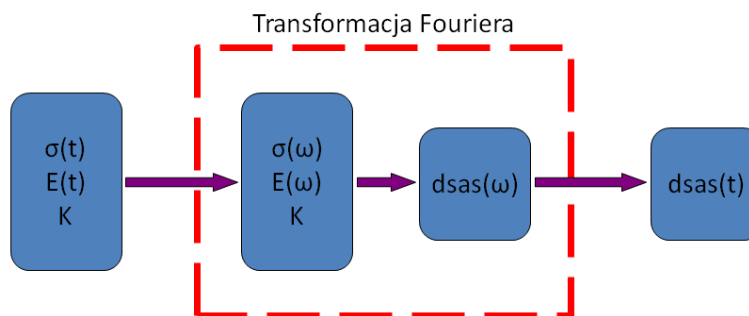
Zależności pomiędzy poszczególnymi programami składowymi całego pakietu VEROAD pokazano na rysunku 7.31. W niniejszej pracy doktorskiej wykorzystano dwa z nich – program DEBUROAD do określenia parametrów lepkoelastyczności modelu Burgersa oraz właściwy program VEROAD do obliczenia odkształceń poziomych podłużnych i deformacji trwałych.



Rys. 7.31. Zależności pomiędzy programami składowymi pakietu VEROAD [86]

Program VEROAD umożliwia obliczanie wartości odkształceń i przemieszczeń odwracalnych (*transient*) oraz trwałych (*permanent*). Działanie programu odbywa się według następującego schematu (rysunek 7.32):

- zamiana zmiennych zależnych od czasu za pomocą transformacji Fouriera na zmienne zależne od częstotliwości,
- wyrażenie parametrów lepkościowości w formacie częstotliwości,
- obliczenie szukanych wielkości poprzez rozwiązanie układu o charakterze liniowo sprężystym dla każdej częstotliwości,
- zamiana uzyskanych wartości zależnych od częstotliwości do wartości zależnych od czasu.



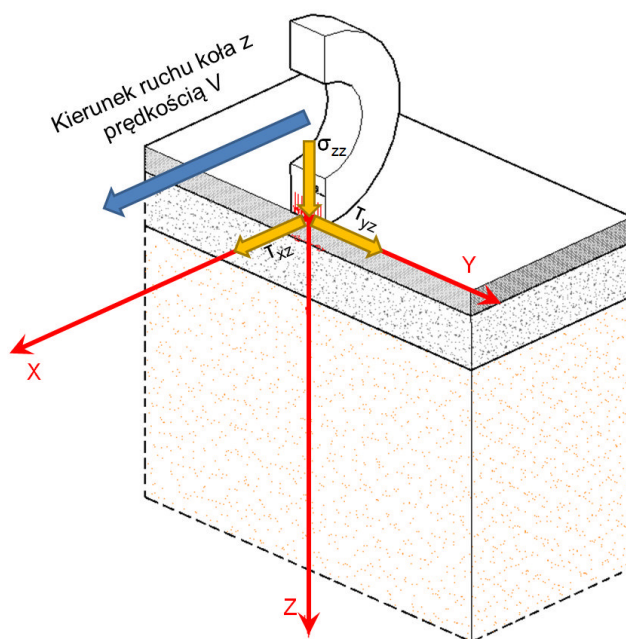
Rys. 7.32. Kolejność działań algorytmu obliczeń w programie VEROAD [48]

Obciążenie kołem modelowane jest za pośrednictwem obciążenia równomiernie rozłożonego na powierzchni o kształcie kołowym, przy czym obciążenie to porusza się po nawierzchni z zadaną prędkością. Parametry obciążenia w opisywanych w bieżącym punkcie obliczeniach z uwzględnieniem lepkościowości przyjęto takie

same, jak przy obliczeniach mechanistycznych opisanych w punkcie 7.2.3., tj. koło pojedyncze o nacisku 57,5 kN, ciśnienie jednostkowe 850 kPa oraz średnica śladu zastępczego 0,3 m. Dla deformacji trwałych analizowano cztery prędkości poruszania się koła po nawierzchni – 20, 40, 60 i 80 km/h. Dla odkształceń odwracalnych na spodzie warstw asfaltowych stosowano prędkość ruchu koła 60 km/h.

Model nawierzchni składa się z układu poziomych warstw o skończonej grubości ułożonych na podłożu gruntowym o nieskończonej grubości. Wymiary warstw w płaszczyźnie poziomej są nieograniczone. W niniejszych obliczeniach wprowadzono do programu w jednym wariancie odpowiednio dwie (nawierzchnia dla ruchu lekkiego KR1) lub siedem (nawierzchnia dla ruchu ciężkiego KR6) warstw opisanych parametrami lepkosprężystymi, które stanowiły łącznie pakiet warstw asfaltowych w którym uwzględniono rozkład temperatury na grubości. W drugim wariancie całość warstw asfaltowych modelowano jedną warstwą, tj. z uwzględnieniem jednej stałej temperatury na całej jej grubości. Dalsze warstwy, tj. warstwa odpowiadająca podbudowie z kruszywa łamanego oraz podłożu gruntowemu określono jako warstwy o charakterze liniowosprężystym.

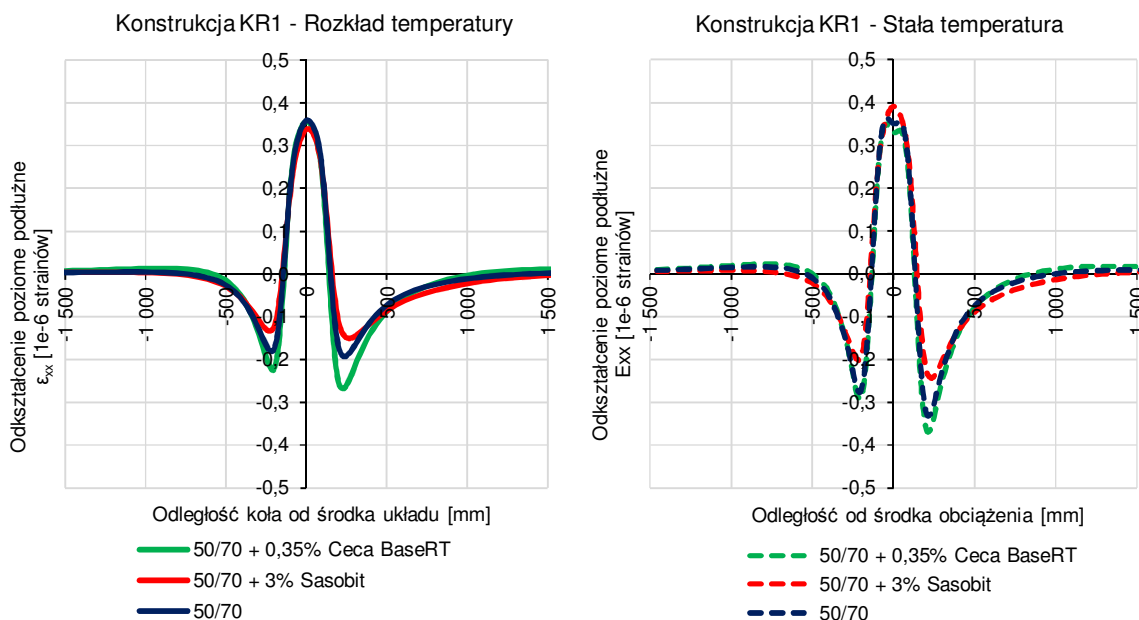
Z uwagi uwzględnienie w obliczeniach efektów lepkosprężystości oraz ruchome obciążenie uzyskiwane wartości naprężeń, odkształceń i przemieszczeń nie są symetryczne względem analizowanego punktu znajdującego się w początku układu współrzędnych. Orientację układu współrzędnych obowiązującego w programie VEROAD przedstawiono na rysunku 7.33.



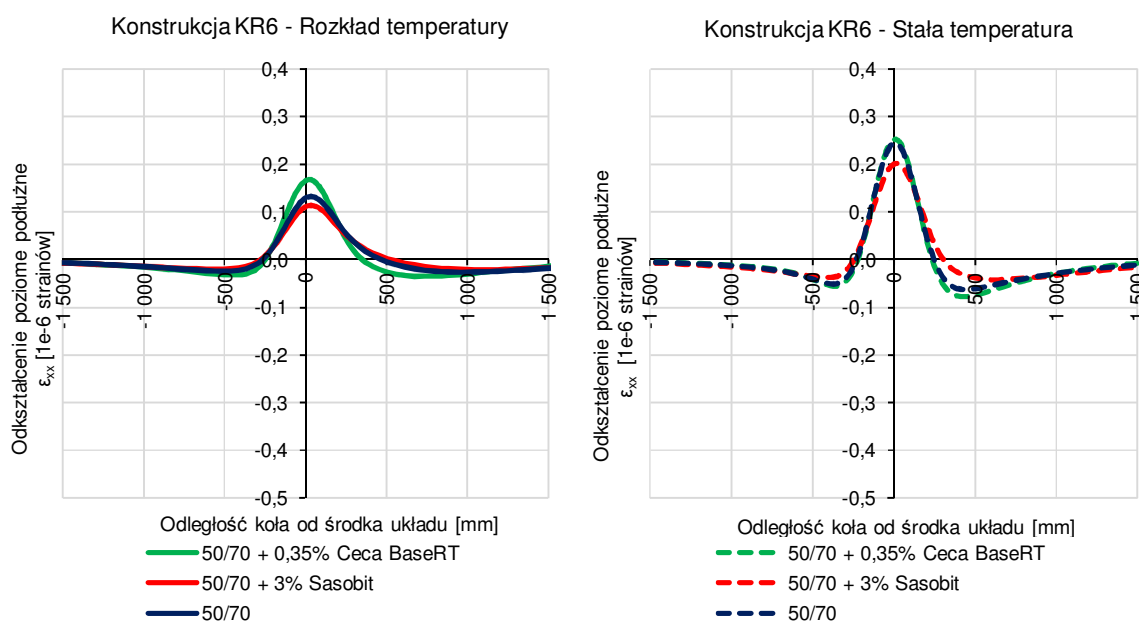
Rys. 7.33. Orientacja układu współrzędnych obowiązująca w programie VEROAD

7.3.10. Analiza wyników i wnioski

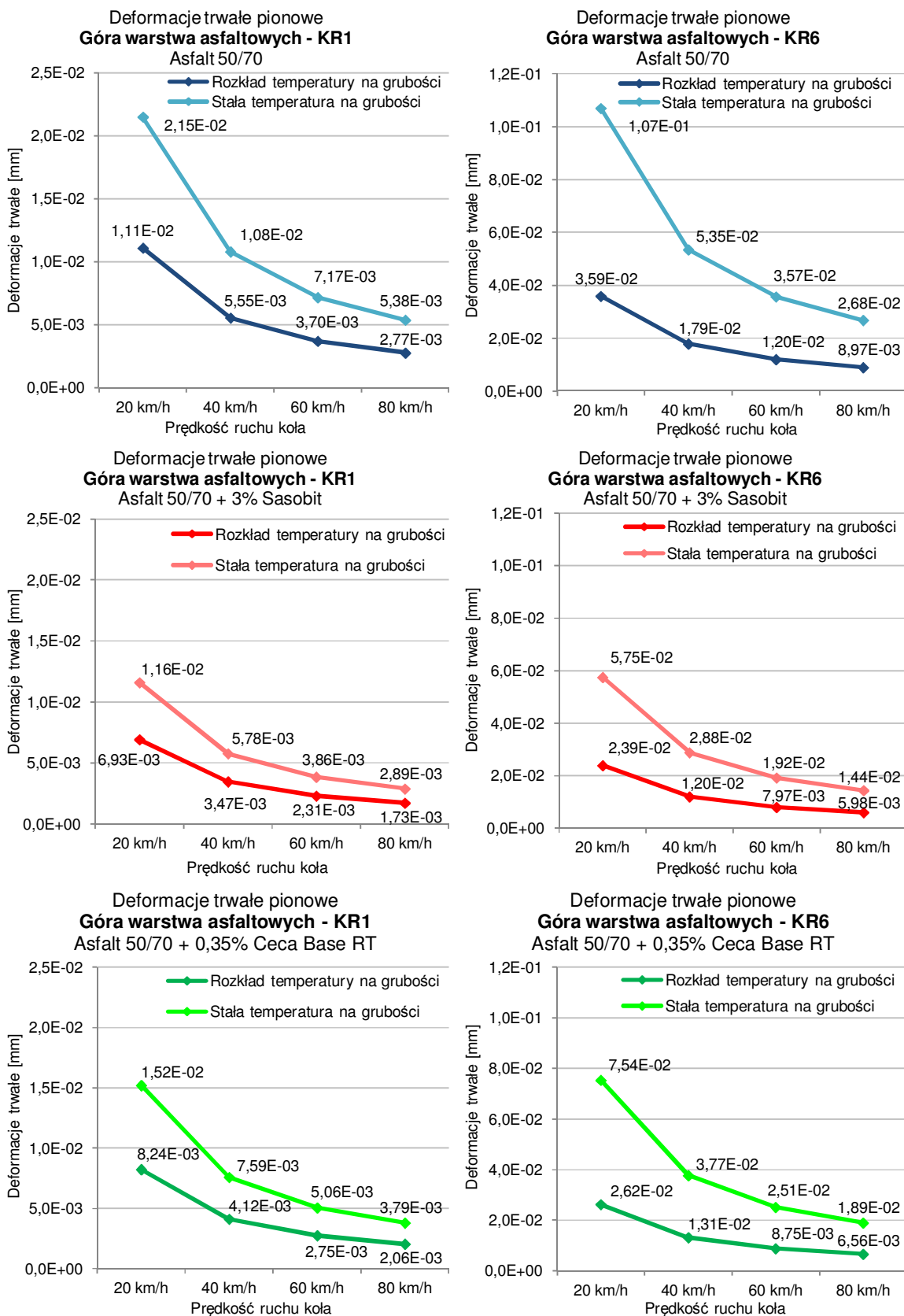
Na rysunkach 7.34 i 7.35 przedstawiono wykresy odkształceń odwracalnych poziomych dla obu konstrukcji KR1 i KR6, dla wariantów uwzględniających zarówno rozkład temperatury w konstrukcji nawierzchni, jak i stałą temperaturę na całej grubości. Rysunek 7.36 zawiera wykresy deformacji trwałych pionowych wykonane dla obu konstrukcji przy różnych prędkościach ruchu koła.



Rys. 7.34. Wykresy odkształceń odwracalnych poziomych na spodzie warstw asfaltowych nawierzchni dla ruchu lekkiego KR1

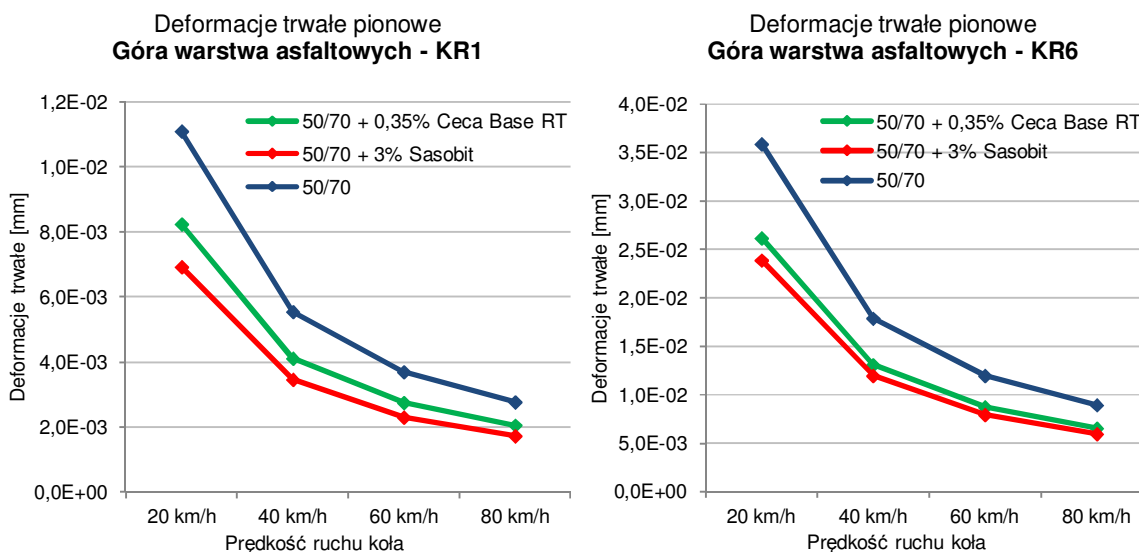


Rys. 7.35. Wykresy odkształceń odwracalnych poziomych na spodzie warstw asfaltowych nawierzchni dla ruchu ciężkiego KR6



Rys. 7.36. Wykresy deformacji trwałych pionowych

Z analizy wykresów na rysunkach 7.34 – 7.36 wynika, że obliczenia wykonane przy założeniu stałej temperatury nawierzchni na całej jej grubości są obarczone błędem i prowadzą do przeszacowania wartości odkształceń poziomych i deformacji pionowych. Z tego powodu na rysunku 7.37 pokazano równoczesne zestawienie wykresów deformacji trwałych dla wszystkich analizowanych w niniejszym punkcie mieszanek mineralno-asfaltowych jedynie dla wariantu uwzględniającego rozkład temperatury w nawierzchni.



Rys. 7.37. Wykresy deformacji trwałych pionowych dla mieszanek mineralno-asfaltowych z asfaltem czystym 50/70 oraz dodatkiem Sasobit i Ceca Base RT przy założeniu rozkładu temperatury w nawierzchni

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń pracy nawierzchni w zakresie lepko-sprężystym można sformułować następujące wnioski:

- W momencie, gdy koło znajduje się bezpośrednio nad analizowanym punktem, odkształcenia odwracalne poziome rozciągające na spodzie nawierzchni KR1 były na tym samym poziomie, niezależnie od rodzaju mieszanki mineralno-asfaltowej i dodatku WMA. Różnice występowały natomiast dla nawierzchni KR6. W tym przypadku najmniejszą wartość odkształceń odwracalnych poziomych odnotowano dla mieszanki mineralno-asfaltowej z dodatkiem Sasobitu. W dalszej kolejności występowała mieszanka z czystym asfaltem 50/70 oraz mieszanka z dodatkiem Ceca Base RT.
- W momencie, gdy koło znajduje się dalej niż ok. 0,10 m (nawierzchnia KR1) lub 0,25 m (nawierzchnia KR6) przed lub za analizowanym punktem, na spodzie warstw asfaltowych występowały odkształcenia ściskające. Były one bardziej zróżnicowane dla nawierzchni KR1, gdzie ich największą wartość odnotowano dla mieszanki z dodatkiem Ceca Base RT, zaś najmniejszą dla mieszanki z dodatkiem Sasobitu. W przypadku nawierzchni KR6 wartości odkształceń ściskających były do siebie zbliżone.

- Z kolei rezultaty obliczeń deformacji trwałych wskazały na mieszankę z czystym asfaltem 50/70 jako podlegającą największym odkształceniom o charakterze lepkoplastycznym. Wyniki takie otrzymano zarówno dla nawierzchni KR1, jak i KR6. Najlepszą odpornością na deformacje trwałe okazały się być nawierzchnie z mieszanką mineralno-asfaltową z dodatkiem Sasobitu. Odkształcenia trwałe dla mieszanki z dodatkiem Ceca Base RT były zbliżone i nieznacznie większe, niż w przypadku mieszanki z dodatkiem Sasobitu. Uzyskane wartości deformacji trwałych należy traktować jako wskaźnikowe z powodu występowania uproszczeń w modelu obliczeń, tj. założenia na całej grubości warstw asfaltowych występowania mieszanki mineralno-asfaltowej do warstwy ścieralnej, która charakteryzuje się najwyższą wśród innych mieszanek zawartością asfaltu oraz najmniejszą zawartością wolnych przestrzeni.
- Uzyskane tendencje wyników przy obliczaniu deformacji trwałych są w dużej mierze zgodne z wynikami badań laboratoryjnych opisanych w punkcie 5.2.5. i w ocenie doktoranta wprowadzenie do składu mieszanki wybranych dodatków WMA służących do obniżenia temperatury produkcji i wbudowania nie pogarsza jej odporności na deformacje trwałe.

8. WNIOSKI KOŃCOWE

8.1. Wnioski z badań laboratoryjnych

1. Wprowadzenie do asfaltu dodatków WMA należących do grupy środków pochodzenia organicznego (Sasobit, Licomont BS 100) powoduje ogólnie zwiększenie sztywności lepizcza objawiające się spadkiem penetracji oraz wzrostem temperatury mięknięcia. Dodatki o innym charakterze chemicznym (Rediset WMX, Ceca Base RT) nie wywołują zmian w tym zakresie.
2. Obecność dodatków WMA w asfalcie nie zwiększa efektu starzenia podczas wygrzewania w cienkiej warstwie TFOT.
3. Nie określono jednoznacznego wpływu dodatków WMA na lepkość. Na ogół odnotowywano zmniejszenie lepkości, ale w odniesieniu do podawanych w literaturze poziomów granicznych dla poszczególnych procesów technologicznych oznaczało to jedynie kilkustopniową redukcję temperatur otaczania i wbudowywania. Wskazuje to na złożony mechanizm działania dodatków WMA, których pozytywny wpływ na urabialność i zagęszczalność nie wynika tylko i wyłącznie ze zmiany lepkości.
4. Z uwagi na charakter działania (spienianie asfaltu po wprowadzeniu do mieszanki mineralno-asfaltowej) nie prowadzono badań samego asfaltu z dodatkiem zeolitu.
5. Zastosowany w pracy sposób pomiaru zagęszczalności mieszanek mineralno-asfaltowych w postaci określania zawartości wolnych przestrzeni w próbkach prostopadłościennych nie wykazał jednoznacznego pozytywnego działania dodatków WMA w zakresie poprawy zagęszczalności i urabialności, co nie koreluje z doświadczeniami terenowymi opisywanymi w literaturze. Według doktoranta, przyczyną takiego rezultatu jest złożoność procesu zagęszczania, który trudno odwzorować w warunkach laboratoryjnych.
6. Mieszanki mineralno-asfaltowe z badanymi dodatkami WMA wykazują co najmniej taką samą lub lepszą odporność na działanie wody i mrozu w porównaniu z mieszankami referencyjnymi, pomimo ich wytwarzania oraz zagęszczania w niższej temperaturze.
7. Dodatki WMA nie zwiększają negatywnego efektu usztywnienia mieszanek mineralno-asfaltowych po przeprowadzeniu symulowanych procesów starzenia w stosunku do mieszanek referencyjnych.
8. Wprowadzenie do składu mieszanek dodatków WMA powoduje w większości przypadków (z wyjątkiem zeolitu) zwiększenie odporności na deformacje trwałe, zwłaszcza dla dodatków należących do grupy środków organicznych. Pozytywny efekt większej odporności na koleinowanie uwidacznia się bardziej dla asfaltu zwykłego niż modyfikowanego.
9. Badania odporności na spękania niskotemperaturowe przeprowadzone według metodyki przedstawionej w niniejszej pracy nie wykazały pogorszenia właściwości niskotemperaturowych. Problem ten wymaga dalszych badań i nie można takiego zjawiska jednoznacznie wykluczyć.

10. W ocenie doktoranta, według wyników wykonanych badań laboratoryjnych obecność w składzie mieszanek mineralno-asfaltowych dodatków WMA, służących do obniżania temperatury produkcji i wbudowywania nie wywołuje negatywnych efektów w porównaniu do mieszanek, których takich dodatków nie zawierają. Należy jednak mieć na uwadze, że niektóre z badanych dodatków należących do grupy środków organicznych (Sasobit, Licomont BS100) wpływają pozytywnie na parametry, dla których korzystniejsza jest większa sztywność. W warunkach polskich nadmierne zwiększanie sztywności mieszanek mineralno-asfaltowych w niskich temperaturach (a w konsekwencji sztywności warstw asfaltowych) może wywoływać negatywne skutki w postaci przedwczesnych spękań nawierzchni o charakterze niskotemperaturowym.

8.2. Wnioski z badań terenowych

1. Przy obecnym poziomie technicznym produkcja mieszanek z dodatkami WMA możliwa jest w aktualnie wykorzystywanych wytwórniach mieszanek mineralno-asfaltowych.
2. Na odcinku doświadczalnym zastosowano mieszankę mastyksu grysowego SMA, która jest wrażliwa na błędy popełnione podczas projektowania jej składu, produkcji i wbudowywania. Dodanie do składu produkowanej mieszanki SMA środków WMA nie spowodowało jednak problemów technologicznych takich jak nadmierna spływność bądź powstawanie plam na wykonanej nawierzchni.
3. Mieszanki SMA wytworzone w skali przemysłowej z dodatkami WMA nie odbiegały pod względem odporności na działanie wody i mrozu, starzenia, odporności na deformacje trwałe oraz odporności na spękania niskotemperaturowe od referencyjnej mieszanki SMA z czystym asfaltem modyfikowanym 45/80-55.
4. Warunki panujące podczas wykonywania odcinka doświadczalnego (niska temperatura, duża wilgotność) zdecydowały o tym, że wytwarzanie mieszanek SMA z dodatkami WMA odbywało się w takiej samej temperaturze, jak dla mieszanki SMA referencyjnej. W związku z tym, wystąpił brak możliwości zbadania wpływu obecności dodatków WMA na zagęszczenie warstwy ścieralnej. Z odwiertów uzyskano wartości końcowe, po zakończeniu procesu zagęszczania, które nie pozwoliły na określenie różnic pomiędzy różnymi mieszankami w trakcie procesu zagęszczania.

8.3. Wnioski z analizy teoretycznej pracy nawierzchni

1. Analiza mechanistyczna pracy konstrukcji nawierzchni uwzględniająca jedynie zmianę modułów sztywności może prowadzić do nieprecyzyjnych wniosków, ponieważ obecne kryteria zmęczeniowe nie uwzględniają (podobnie jak np. dla asfaltów modyfikowanych) prawdopodobnych odmiennych charakterystyk zmęczeniowych mieszanek wykorzystujących asfalty z dodatkami WMA. Dlatego też uzyskane wyniki obliczeń trwałości

zmęczeniowej oraz ich różnice pomiędzy poszczególnymi mieszankami z dodatkami WMA należy traktować z dużą ostrożnością. Wartości bezwzględne obliczeń trwałości zmęczeniowej dla mieszanek zawierających analizowane dodatki WMA istotnie różnią się między sobą. Natomiast wyniki obliczeń ugięć pionowych będących w warunkach rzeczywistych pewną miarą trwałości nawierzchni są do siebie bardzo zbliżone.

2. Obliczenia nawierzchni w programie VEROAD z uwzględnieniem występowania efektów lepkośćprężystości wykazały zgodność z wynikami badań laboratoryjnych, tj. wprowadzenie do składu mieszanki mineralno-asfaltowej dodatku Sasobit (należącego do grupy środków organicznych) powoduje zwiększenie odporności na deformacje trwałe.
3. Dodatkowe badania laboratoryjne i analizy poprzedzające obliczenia w programie VEROAD, tj. określenie modułów dynamicznych i krzywych wiodących mieszanek mineralno-asfaltowych uwidocznily tendencję zgodną z wynikami wcześniejszych badań laboratoryjnych dotyczących odporności na koleinowanie oraz spękania niskotemperaturowe. Przy wysokich częstotliwościach zredukowanych (odpowiadających niskim temperaturom pracy nawierzchni) moduły dynamiczne badanych mieszanek były bardzo do siebie zbliżone. Różnice modułów dynamicznych uwidacznily się natomiast przy niskiej częstotliwości zredukowanej (odpowiadającej wysokim temperaturom pracy nawierzchni).

8.4. Kierunki dalszych prac

1. Konieczne jest opracowanie metody pomiarowej pozwalającej jednoznacznie określić w warunkach laboratoryjnych wpływ dodatków WMA na charakterystyki zagęszczalności mieszanek o obniżonej temperaturze produkcji i wbudowania oraz porównywać je z mieszankami tradycyjnymi.
2. Wymagane jest dalsze prowadzenie badań nad zachowaniem się mieszanek mineralno-asfaltowych zawierających dodatki WMA w zakresie niskich temperatur. Zagadnienie to jest szczególnie ważne w polskich warunkach klimatycznych.
3. Konieczne jest prowadzenie badań pozwalających określić charakterystyki zmęczeniowe mieszanek mineralno-asfaltowych o obniżonej temperaturze produkcji i wbudowania i ewentualne różnice w stosunku do mieszanek tradycyjnych.
4. Niezbędne jest określenie długotrwałego efektu oddziaływania wprowadzonych do składu mieszanek mineralno-asfaltowych środków chemicznych (WMA) w ciągu wielu lat eksploatacji nawierzchni.

SPIS LITERATURY

Publikacje

- [1] Akisetty C. K., Lee S.-J., & Amirkhani S. N.: "High temperature properties of rubberized binders containing warm asphalt additives", *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 1, pp. 565–573, Jan. 2009
- [2] Akisetty C. K., Xiao F., Gandhi T., & Amirkhani S. N.: "Estimating correlations between rheological and engineering properties of rubberized asphalt concrete mixtures containing warm mix asphalt additive", *Construction and Building Materials*, vol. 25, no. 2, pp. 950–956, Feb. 2011
- [3] Akisetty C. K.: "Evaluation of Warm Asphalt Additives on Performance Properties of CRM Binders and Mixtures", Ph.D. Thesis, Clemson University, Clemson, 2008
- [4] Al-Qadi I., Kern J., & Meister J.: "A Study on Warm-Mix Asphalt", Urbana, 2011
- [5] Ar-Rabti A. H. G.: "The Effect of Aging on Mechanical Properties of Asphalt Concrete, Stone Mastic Asphalt and Porous Asphalt Mixes", Ph.D. Thesis, Technical University of Gdańsk, Civil Engineering Department, Gdańsk, 1998
- [6] Biro S., Gandhi T., & Amirkhani S. N.: "Determination of zero shear viscosity of warm asphalt binders", *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 5, pp. 2080–2086, May 2009
- [7] Błażejowski K. & Styk S.: *Technologia warstw asfaltowych*, 1st ed. Warszawa: Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, 2004, p. 406
- [8] Błażejowski K., Nilsson R., Hopman P., & Sybilski D.: "Visco-elastic analysis of typical Polish flexible pavements using VEROAD", in *2nd International Conference Durable and Safe Road Pavements*, 1996, p. 12
- [9] Bonaquist R., Jenks C. W., Jencks C. F., Harrigan E. T., & Delaney E. P.: *NCHRP Report 629 - Ruggedness Testing of the Dynamic Modulus and Flow Number Tests with the Simple Performance Tester*. Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2008, p. 137
- [10] Bonaquist R., Jenks C. W., Jencks C. F., Harrigan E. T., Delaney E. P., & Chafee E. M.: *NCHRP Report 691 - Mix Design Practices for Warm Mix Asphalt*. Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2011, p. 111
- [11] Bonaquist R., Jenks C. W., Jencks C. F., Harrigan E. T., Delaney E. P., & Hagwood M. B.: *NCHRP Report 614 - Refining the Simple Performance Tester for Use in Routine Practice*. Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2008, p. 153

- [12] Bonaquist R.: *NCHRP Report 691 - Mix Design Practices for Warm Mix Asphalt - Appendix C - Inspector Guide - Special Mixture Design Considerations and Methods for Warm Mix Asphalt*. Washington, D.C., 2011
- [13] Bonaquist R.: *NCHRP Report 691 - Mix Design Practices for Warm Mix Asphalt - Appendix E - Experimental Plans, Results and Analyses*, Washington, D.C., 2011
- [14] Brosseaud Y.: "Ecologiques, securitaires, confortables, les enrobes de demain se feront autrement: Presentation des Enrobes Tiedes", p. 11, 2000
- [15] Butt A. A., Tasdemir Y., & Edwards Y.: "Environmental friendly wax modified mastic asphalt", in *ENVIROAD 2009*, 2009, p. 12
- [16] Button J. W., Estakhri C., & Wimsatt A.: "A Synthesis of Warm Mix Asphalt", College Station, 2007
- [17] Butz T.: "Warm Asphalt Mix – Technologies, Research and Experience", p. 9, 2001
- [18] Caro S., Beltrán D. P., Alvarez A. E., & Estakhri C.: "Analysis of moisture damage susceptibility of warm mix asphalt (WMA) mixtures based on Dynamic Mechanical Analyzer (DMA) testing and a fracture mechanics model", *Construction and Building Materials*, vol. 35, pp. 460–467, Oct. 2012
- [19] Chadbourn B. A., Newcomb D. E., Voller V. R., De Sombre R. A., Luoma J. A., & Timm D. H.: "An Asphalt Paving Tool for Adverse Conditions", Minneapolis, 1998
- [20] Chowdhury A. & Button J. W.: "A Review of Warm Mix Asphalt", College Station, 2008
- [21] Corrigan M.: "Warm Mix Asphalt Technology", National Asphalt Pavment Association, Nashville, 2005
- [22] D'Angelo J., Harm E., Bartoszek J., Baumgardner G., Corrigan M., Cowsert J., Harman T., Jamshidi M., Jones W., Newcomb D. E., Prowell B. D., Sines R., & Yeaton B.: "Warm-Mix Asphalt: European Practice", Washington, D.C., 2008
- [23] Das P. K., Tasdemir Y., & Birgisson B.: "Low temperature cracking performance of WMA with the use of the Superpave indirect tensile test", *Construction and Building Materials*, vol. 30, pp. 643–649, May 2012
- [24] Davidson J. K.: "Evotherm Trial – Aurora Ontario", Toronto, 2005
- [25] Davidson J. K.: "Evotherm Trial – City of Calgary", Toronto, 2006
- [26] Davidson J. K.: "Evotherm Trial – Ramara Township", Toronto, 2005

- [27] Davidson J. K.: "Warm Asphalt Mix Technology – The Canadian Perspective", Toronto, 2006
- [28] Doyle J. D., Mejias-Santiago M., Brown E. R., & Howard I. L.: "Performance of High RAP-WMA Surface Mixtures", *AAPT Journal*, vol. 80, pp. 419–457, 2011
- [29] Drumm E. C. & Meier R.: "NCHRP Web Document 60 - LTPP Data Analysis: Daily and Seasonal Variations in Insitu Material Properties", Transportation Research Board, Knoxville, 2003
- [30] Edwards Y. & Redelius P.: "Rheological Effects of Waxes in Bitumen", *Energy & Fuels*, vol. 17, no. 3, pp. 511–520, May 2003
- [31] Edwards Y., Tasdemir Y., & Butt A. A.: "Energy saving and environmental friendly wax concept for polymer modified mastic asphalt", *Materials and Structures*, vol. 43, no. S1, pp. 123–131, Apr. 2010
- [32] Edwards Y., Tasdemir Y., & Isacsson U.: "Influence of commercial waxes and polyphosphoric acid on bitumen and asphalt concrete performance at low and medium temperatures", *Materials and Structures*, vol. 39, no. 7, pp. 725–737, Jun. 2006
- [33] Edwards Y., Tasdemir Y., & Isacsson U.: "Rheological effects of commercial waxes and polyphosphoric acid in bitumen 160/220 – high and medium temperature performance", *Construction and Building Materials*, vol. 21, no. 10, pp. 1899–1908, Oct. 2007
- [34] Edwards Y., Tasdemir Y., & Isacsson U.: "Rheological effects of commercial waxes and polyphosphoric acid in bitumen 160/220 – low temperature performance", *Fuel*, vol. 85, no. 7–8, pp. 989–997, May 2006
- [35] Fitts G. L.: "Warm Mix Asphalt", Asphalt Institute, Garden Ridge
- [36] Gandhi T. & Amirghanian S. N.: "Laboratory Simulation of Warm Mix Asphalt (WMA) Binder Aging Characteristics", p. 10
- [37] Gandhi T., Akisetty C. K., & Amirghanian S. N.: "Laboratory evaluation of warm asphalt binder aging characteristics", *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 10, no. 5, pp. 353–359, Oct. 2009
- [38] Gaudefroy V., Olard F., Beduneau E., & Roche C. de La: "Influence of the low-emission asphalt LEA composition on total organic compounds emissions using the factorial experimental design approach", in *ENVIROAD 2009*, 2009, p. 14
- [39] Goh S. W., You Z., & Dam T. J. Van: "Laboratory Evaluation and Pavement Design for Warm Mix Asphalt", in *2007 Mid-Continent Transportation Research Symposium*, 2007, no. August 2007, p. 11
- [40] Guwe V., Aruleswaran N., Koenders B., Sangsuwan P., & Xu L.: "WMA Workability and Application", in *7th International Conference on Road and*

- Airfield Pavement Technology*, 2011, pp. 594–605
- [41] Hajj E. Y., Sebaaly P. E., Hitti E., & Borroel C.: “Performance Evaluation of Terminal Blend Tire Rubber Asphalt Mixtures”, Tampa, p. 24, 2011
- [42] Hamzah M. O., Aman M. Y., Shahadan Z., & Mohd Hasan M. R.: “Laboratory Evaluation of the Dynamic Stripping Test on Porous Asphalt incorporating Sasobit”, in *7th International Conference on Road and Airfield Pavement Technology*, 2011, pp. 130–141
- [43] Hamzah M. O., Jamshidi A., & Shahadan Z.: “Evaluation of the potential of Sasobit to reduce required heat energy and CO₂ emission in the asphalt industry”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 18, no. 18, pp. 1859–1865, Dec. 2010
- [44] Hanz A. & Bahia H.: “Effects of Warm Mix Additives on Mixture Workability and the Performance Implications of Reduced Binder Aging”, in *7th International Conference on Road and Airfield Pavement Technology*, 2011, pp. 66–76
- [45] Harder G. A., Legoff Y., Loustau A., Martineau Y., Heritier B., & Romier A.: “Energy and environmental gains of warm and half-warm asphalt mix: quantitative approach”, Washington, D.C., 2008
- [46] Harrigan E. T.: “Research Results Digest 370 - Guidelines for project selection and materials sampling, conditioning and testing in WMA research studies”, 2012
- [47] Hill B., Behnia B., Hakimzadeh S., Buttlar W. G., & Reis H.: “Evaluation of the Low Temperature Cracking Performance of WMA Mixtures”, *Journal of the Transportation Research Board*, no. 2294, pp. 81–88, 2012
- [48] Hopman P.: “VEROAD: The visco-elastic multilayer program”, *Transportation Research Board*, vol. 41, no. 1, pp. 71–91, 1996
- [49] Huang Y. H.: *Pavement Analysis and Design*, 2nd ed. Pearson Prentice Hall, 2003
- [50] Hurley G. C. & Prowell B. D.: “Evaluation of Potential Processes for Use in Warm Mix Asphalt”
- [51] Hurley G. C. & Prowell B. D.: “NCAT Report 05-04 - Evaluation of Aspha-Min Zeolite for Use in Warm Mix Asphalt”, Auburn, 2005
- [52] Hurley G. C. & Prowell B. D.: “NCAT Report 05-06 - Evaluation of Sasobit for Use in Warm Mix Asphalt”, Auburn, 2005
- [53] Hurley G. C. & Prowell B. D.: “NCAT Report 06-02 - Evaluation of Evotherm for Use in Warm Mix Asphalt”, Auburn, 2006
- [54] Hurley G. C., Prowell B. D., & Kvasnak A. N.: “Michigan Field Trial of Warm Mix Asphalt Technologies: Construction Summary”, Auburn, 2009

- [55] Hurley G. C., Prowell B. D., & Kvasnak A. N.: "Ohio Field Trial of Warm Mix Asphalt Technologies: Construction Summary", Auburn, 2009
- [56] Hurley G. C., Prowell B. D., & Kvasnak A. N.: "Wisconsin Field Trial of Warm Mix Asphalt Technologies: Construction Summary", Auburn, 2010
- [57] Jaczewski M. & Mejłun Ł.: "Wyznaczanie parametrów lepkosprężystego modelu Burgersa mieszaneek mineralno-asfaltowych na podstawie wyników badania pod obciążeniem dynamicznym," *Drogownictwo*, vol. 11, pp. 344–348, 2013
- [58] Jaskuła P.: "Analiza niszczącego oddziaływania wody i mrozu na mieszanki mineralno-asfaltowe", Praca doktorska, Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej, Gdańsk, 2004
- [59] Jenks C. W., Jencks C. F., Harrigan E. T., Adcock M., Delaney E. P., & Freer H.: *NCHRP Report 714 - Special Mixture Design Considerations and Methods for Warm Mix Asphalt: A Supplement to NCHRP Report 673: A Manual for Design of Hot Mix Asphalt with Commentary*. Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2011, p. 53
- [60] Judycki J. & Mejłun Ł.: "Analiza konstrukcji nawierzchni asfaltowych oparta o teorię lepkosprężystości", *Drogownictwo*, vol. 10, pp. 315–320, 2012
- [61] Judycki J., Jaskuła P., Pszczoła M., Alenowicz J., Dołżycki B., Jaczewski M., Ryś D., & Stienss M.: "Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Pólsztynowych 2012", Gdańsk, 2012
- [62] Judycki J., Jaskuła P., Pszczoła M., Alenowicz J., Dołżycki B., Jaczewski M., Ryś D., & Stienss M.: *Analizy i projektowanie konstrukcji nawierzchni podatnych i pólsztynowych*. Warszawa: Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, 2014, p. 573
- [63] Judycki J.: "Analiza niektórych właściwości reologicznych drogowego betonu asfaltowego poddanego działaniu obciążeń statycznych", Praca doktorska, Politechnika Gdańska, Instytut Budownictwa Lądowego, Gdańsk, 1975
- [64] Judycki J.: "Budowa i kalibracja modeli spękań zmęczeniowych warstw asfaltowych nawierzchni drogowych w mechanistyczno-empirycznej metodzie AASHTO 2004", *Drogi i Mosty*, vol. 4, pp. 31–53, 2011
- [65] Judycki J.: "Drogowe asfalty i mieszanki mineralno-asfaltowe modyfikowane elastomerem", *Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, Budownictwo Lądowe XLV, Nr 452*, Gdańsk, 1991
- [66] Judycki J.: "Modele spękań zmęczeniowych warstw asfaltowych nawierzchni drogowych w mechanistyczno-empirycznej metodzie AASHTO 2004", *Drogownictwo*, vol. 11, pp. 343–347, 2011

- [67] Kari W. J.: "Mix Properties as They Affect Compaction", *AAPT Journal*, vol. 36, pp. 295–309, 1967
- [68] Kim H., Lee S.-J., & Amirkhanian S. N.: "Rheology of warm mix asphalt binders with aged binders", *Construction and Building Materials*, vol. 25, no. 1, pp. 183–189, Jan. 2011
- [69] Kim Y.: "World Best Warm-Mix Asphalt Technology LEADCAP", Korea Institute of Construction Technology, p. 52
- [70] Kim Y.-R., Zhang J., & Ban H.: "Moisture damage characterization of warm-mix asphalt mixtures based on laboratory-field evaluation", *Construction and Building Materials*, vol. 31, pp. 204–211, Jun. 2012
- [71] Kuang Y.: "Evaluation of Evotherm as a WMA technology compaction and anti-strip additive", M.Sc. Thesis, Iowa State University, Ames, 2012
- [72] Lake Asphalt of Trynidad and Tobago: "TLA-X New Warm Mix Asphalt Technology", p. 6
- [73] Lee S.-J., Amirkhanian S. N., Park N.-W., & Kim K. W.: "Characterization of warm mix asphalt binders containing artificially long-term aged binders", *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 6, pp. 2371–2379, Jun. 2009
- [74] León J. A. G., Ligier S., Caujolle P., Barreto G., & Recherche C. De: "Warm Mix Asphalts with Chemical Additives : Properties and Advantages", in *ENVIROAD 2009*, 2009, p. 10
- [75] Lewis A., Naidoo K., Lathlieff E., Nortje W., Marais H., McDonald I., Archibald R., Needham D., & Strydom S.: "Best Practice Guideline & Specification for Warm Mix Asphalt"
- [76] Mahoney J. P., Rutherford M. S., & Hicks R. G.: "WA-RD 80.2 - Guidelines for Spring Highway Use Restrictions, Summary Report," Seattle, 1986
- [77] Materiały informacyjne firmy Bennighoven
- [78] MeadWestvaco: "Evotherm Delivery Systems" p. 2
- [79] Metzker K. & Wistuba M. P.: "Comparative study on wax modified bitumen", in *ENVIROAD 2009*, 2009, pp. 1–8
- [80] Min-Yong Yoo, Seung-Ho Jeong, Ji-Yong Park, Nam-Ho Kim K.-W. K.: "Low-Temperature Fracture Characteristics of Selected Warm-Mix Asphalt Concretes", *Transportation Research Record*, vol. 2, no. 2208, pp. 40–47, 2011
- [81] Mogawer W. S., Austerman A. J., Kassem E., & Masad E.: "Moisture Damage Characteristics of Warm Mix Asphalt Mixtures", *AAPT Journal*, vol. 80, pp. 491–526, 2011

- [82] Mogawer W. S.: "Performance Characteristics of Asphalt Rubber Mixes Containing RAP and SonneWarmix Technology"
- [83] NAPA: "Warm Mix Asphalt"
- [84] NCHRP: "Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, Appendix II-1: Calibration of Fatigue Cracking Models for Flexible Pavements", 2004
- [85] NCHRP: "Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, Final Report, Part 3 – Design and Analysis", 2004
- [86] Netherlands Pavement Consultants: "VEROAD User Manual", Utrecht, 2000
- [87] Nilsson R.: "A Viscoelastic Approach to Flexible Pavement Design - Licentiate Thesis," Department of Infrastructure and Planning, Royal Institute of Technology, Stockholm, 1999
- [88] Noelting M., Arnold J., & Jones B.: "Heavy Duty Pavement - New asphalt designs meet extreme challenges", in *China-Japan Paving Technology Symposium*, 2005, p. 12
- [89] Olard F.: "Les Enrobes LEA - Low Energy Asphalt", in *Bitume Quebec*, 2007, p. 22
- [90] Oliveira J. R. M., Silva H. M. R. D., Abreu L. P. F., & Gonzalez-Leon J. a.: "The role of a surfactant based additive on the production of recycled warm mix asphalts – Less is more", *Construction and Building Materials*, vol. 35, pp. 693–700, Oct. 2012
- [91] Ongel A. & Harvey J.: "Analysis of 30 Years of Pavement Temperatures using the Enhanced Integrated Climate Model (EICM)", Berkley, 2004
- [92] Petit C., Millien a., Canestrari F., Pannunzio V., & Virgili a.: "Experimental study on shear fatigue behavior and stiffness performance of Warm Mix Asphalt by adding synthetic wax", *Construction and Building Materials*, vol. 34, pp. 537–544, Sep. 2012
- [93] Prowell B. D.: "Warm Mix Asphalt - The International Technology Scanning Program Summary Report", Washington, D.C., 2007
- [94] Pszczoła M.: "Spękania niskotemperaturowe warstw asfaltowych nawierzchni", Praca doktorska, Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej, Gdańsk, 2006
- [95] Saboori A., Abdelrahman M., & Ragab M.: "Warm Mix Asphalt Processes Applicable to North Dakota", 2012

- [96] Sanchez-Alonso E., Vega-Zamanillo A., Castro-Fresno D., & DelRio-Prat M.: "Evaluation of compactability and mechanical properties of bituminous mixes with warm additives", *Construction and Building Materials*, vol. 25, no. 5, pp. 2304–2311, May 2011
- [97] Sheth N. M.: "Evaluation of selected warm mix asphalt additives", M.Sc. Thesis, University of Iowa, Iowa City, 2010
- [98] Silva H. M. R. D., Oliveira J. R. M., Ferreira C. I. G., & Pereira P. A. A.: "Assessment of the Performance of Warm Mix Asphalts in Road Pavements", in *ENVIROAD 2009*, 2009, p. 12
- [99] Sonneborn: "SonneWarmix - A Warm Mix Asphalt Technology by Sonneborn", Auburn, 2010
- [100] Sowers G. B. & Sowers G. F.: *Introductory Soil Mechanics and Foundations*, Third Edit. New York: Macmillen, 1970
- [101] Su K., Maekawa R., & Hachiya Y.: "Laboratory evaluation of WMA mixture for use in airport pavement rehabilitation", *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 7, pp. 2709–2714, Jul. 2009
- [102] Swanson M., Farrow G., & Moon M.: "Technical Paper T-140 - Heating and Storing Asphalt at HMA Plants", Chattanooga, 2003
- [103] Sybilski D., Bańkowski W., & Mularzuk R.: "Ocena konstrukcji nawierzchni z BAWMS z zastosowaniem programu komputerowego VEROAD", in *Polski Kongres Drogowy*, p. 10
- [104] Sybilski D., Jezierska D., Maliszewski M., Mularzuk R., & Jemiolo S.: "Analiza zdolności zbrojenia nawierzchni siatka z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych - Zastosowanie teoretycznych modeli warstwy konstrukcyjnej ze zbrojeniem siatką w standardowych programach wspomagających projektowanie konstrukcji nawierzchni", Warszawa, 2006
- [105] Syroezhko a. M., Baranov M. a., Ivanov S. N., & Maidanova N. V.: "Influence of natural additives and those synthesized by the Fischer-Tropsch method on the properties of petroleum bitumen and quality of floated asphalt", *Coke and Chemistry*, vol. 54, no. 1, pp. 26–31, May 2011
- [106] Tatari O., Nazzal M., & Kucukvar M.: "Comparative sustainability assessment of warm-mix asphalts: A thermodynamic based hybrid life cycle analysis", *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 58, pp. 18–24, Jan. 2012
- [107] Vaitkus A., Čygas D., Laurinavičius A., & Perveneckas Z.: "Analysis and evaluation of possibilities for the use of warm mix asphalt in Lithuania", *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 80–86, Jun. 2009

- [108] Vaitkus A., Čygas D., Laurinavičius A., Vorobjovas V., & Perveneckas Z.: "Analysis and Evaluation of Compaction Properties of Warm Mix Asphalt", in *ENVIROAD 2009*, 2009, vol. 945, no. 2004, p. 8
- [109] Von Devivere M., Barthel W., & Marchand J. P.: "Warm Asphalt Mixes By Adding Aspha-Min – A Synthetic Zeolite", p. 12
- [110] Whiteoak D.: *The Shell Bitumen Handbook*. East Molesey: Design and Print Partnership Limited, 1990, p. 336
- [111] Witczak M. W. & Bari J.: "Development of a Master Curve (E*) Database for Lime Modified Asphaltic Mixtures", Tempe, 2004
- [112] Witczak M. W., Reilly R. J., Jencks C. F., Harrigan E. T., Delaney E. P., Freer H., & Barnes N.: *NCHRP Report 547 - Simple Performance Tests: Summary of Recommended Methods and Database*. Washington, D.C., 2005, p. 25
- [113] Xiao F., Punith V. S., & Amirhanian S. N.: "Effects of non-foaming WMA additives on asphalt binders at high performance temperatures", *Fuel*, vol. 94, pp. 144–155, Apr. 2012
- [114] Xiao F., Wenbin Zhao P. E., & Amirhanian S. N.: "Fatigue behavior of rubberized asphalt concrete mixtures containing warm asphalt additives", *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 10, pp. 3144–3151, Oct. 2009
- [115] Zaumanis M.: "Warm Mix Asphalt Investigation", M.Sc. Thesis, Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering, Kgs. Lyngby, 2010
- [116] Zhao G. & Guo P.: "Workability of Sasobit Warm Mixture Asphalt", *Energy Procedia*, vol. 16, pp. 1230–1236, Jan. 2012

Normy

PN-S-96025:2000	„Drogi samochodowe i lotniskowe. Nawierzchnie asfaltowe. Wymagania.”,
PN-EN 1426:2001	„Asfalty i produkty asfaltowe – Oznaczenie penetracji igłą”,
PN-EN 1427:2007	„Asfalty i lepiszcza asfaltowe – Oznaczenie temperatury mięknięcia – Metoda Pierścieni i Kula”,
PN-EN 13702-2:2005	„Asfalty i lepiszcza asfaltowe – Oznaczenie lepkości dynamicznej modyfikowanych asfaltów – Część 2: Metoda współosiowych cylindrów”,
PN-EN 12607-2:2007	„Asfalty i lepiszcza asfaltowe – Oznaczenie odporności na twardnienie pod wpływem ciepła i powietrza – Część 2: Metoda TFOT”,

PN-EN 12697-34:2008	„Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 34: Badanie Marshalla”
PN-EN 12697-8:2005	„Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 8: Oznaczanie zawartości wolnej przestrzeni”,
PN-EN 12697-12:2008	„Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badania mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 12: Określanie wrażliwości próbek asfaltowych na wodę”,
PN-EN 12697-22:2008	„Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 22: Koleinowanie”
BS 598	“Sampling and examination of bituminous mixtures for roads and other paved areas” Part 110 “Methods of test for the determination of wheel-tracking rate and depth”,
PN-EN 12697-18:2007	“Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 18: Spływność lepiszcza”

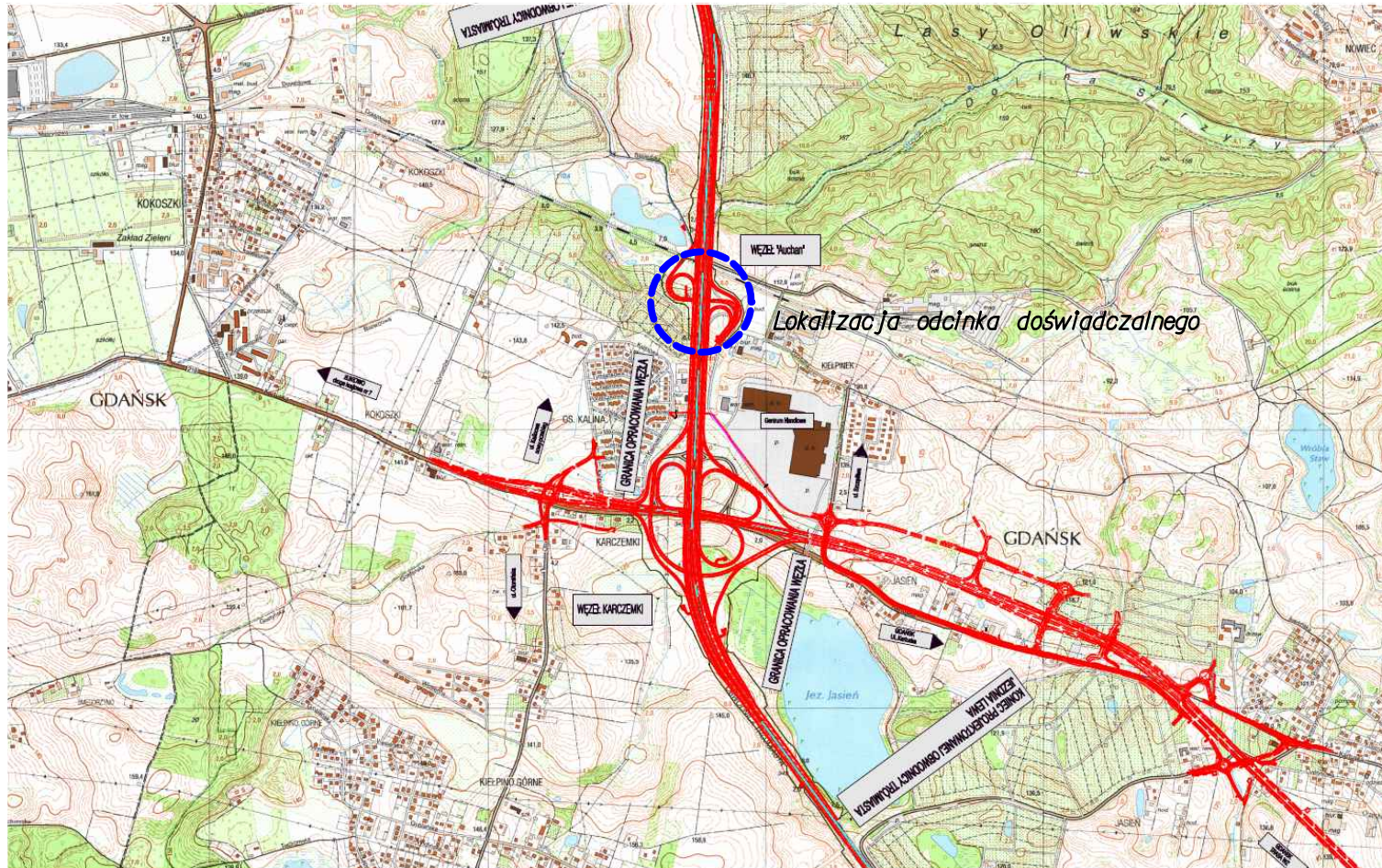
Wymagania Techniczne

WT-2 Nawierzchnie asfaltowe na drogach publicznych 2008

WT-2 Nawierzchnie asfaltowe na drogach krajowych 2010

**ZAŁĄCZNIK P.1 – PLAN ORIENTACYJNY ODCINKA
DOŚWIADCZALNEGO**

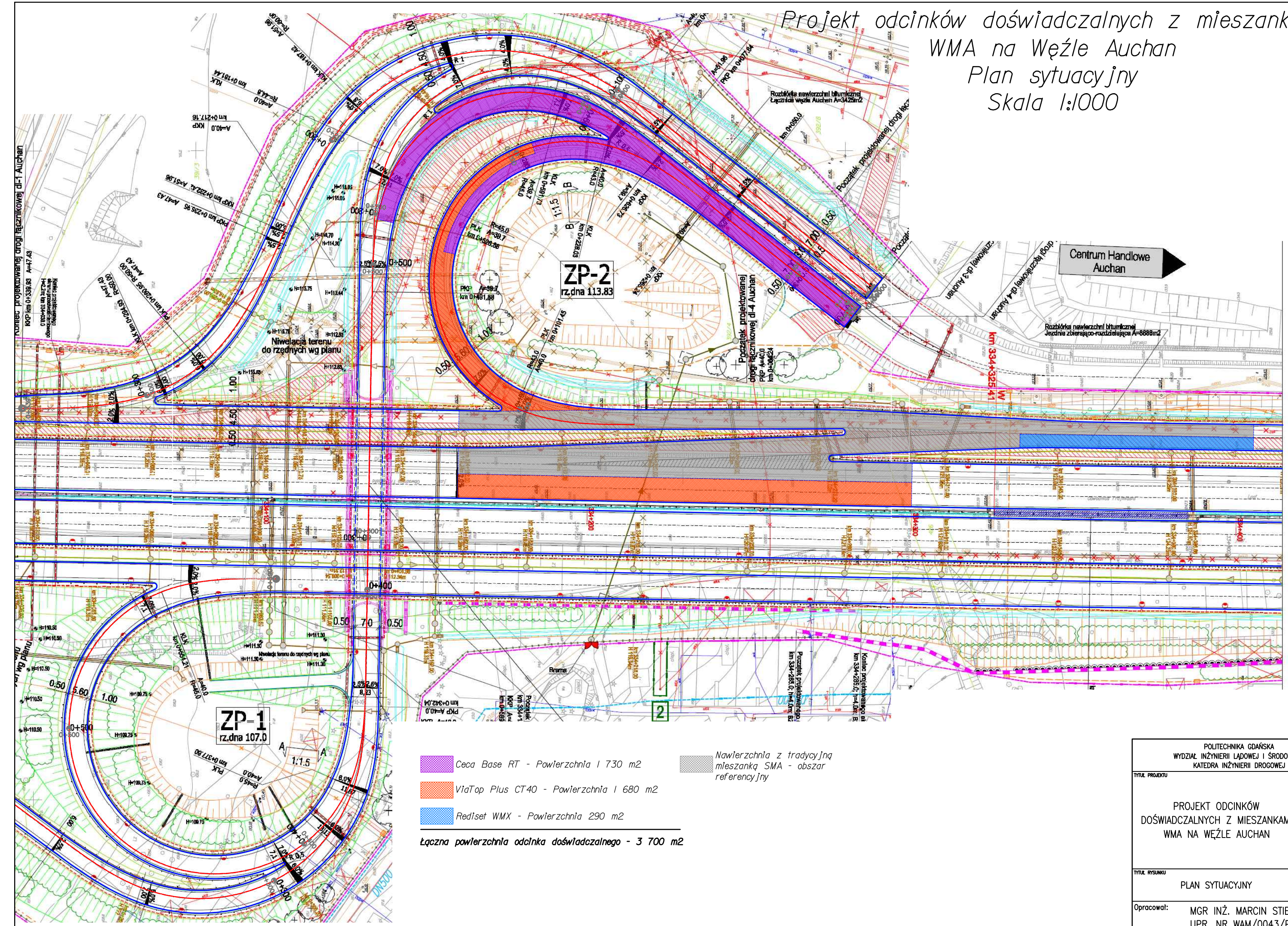
Odcinek doświadczalny z mieszankami WMA na Węźle Auchan



POLITECHNIKA GDAŃSKA WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ I ŚRODOWISKA KATEDRA INŻYNIERII DROGOWEJ	
NAZWA ZADANIA:	ZNAK —
PROJEKT ODCINKÓW DOŚWIADCZALNYCH Z MIESZANKAMI WMA NA WĘZLE AUCHAN	NR RYS. 1
	SKALA —
TYTUŁ RYSUNKU PLAN ORIENTACYJNY	DATA 11.2011
Opracował:	MGR INŻ. MARCIN STIENS

**ZAŁĄCZNIK P.2 – PLAN SYTUACYJNY ODCINKA
DOŚWIADCZALNEGO**

Projekt odcinków doświadczalnych z mieszankami
WMA na Węźle Auchan
Plan sytuacyjny
Skala 1:1000



- Ceca Base RT - Powierzchnia 1 730 m²
- ViaTop Plus CT40 - Powierzchnia 1 680 m²
- Rediset WMX - Powierzchnia 290 m²

Nawierzchnia z tradycyjną mieszanką SMA - obszar referencyjny

Łączna powierzchnia odcinka doświadczalnego - 3 700 m²

POLITECHNIKA GDAŃSKA WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ I ŚRODOWISKA KATEDRA INŻYNIERII DROGOWEJ	
Tytuł projektu	ZAW.
PROJEKT ODCINKÓW DOŚWIADCZALNYCH Z MIESZANKAMI WMA NA WĘŻLE AUCHAN	NR RYS. 2
PLAN SYTUACYJNY	SKALA 1:1000
Opracował:	DATA 11.2011
MGR INŻ. MARCIN STIENSS UPR. NR WAM/0043/PWOD/09	

Politechnika Gdańska
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Katedra Inżynierii Drogowej

Rozprawa doktorska

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH
MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ
TEMPERATURZE PRODUKCJI

Autor rozprawy:
Mgr inż. Marcin Stienss

Promotor rozprawy:
Prof. dr hab. inż. Józef Judycki

Gdańsk, 2014



POLITECHNIKA GDAŃSKA
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Katedra Inżynierii Drogowej

ul. G. Narutowicza 11
80-233 GDAŃSK

Tel: (0-58) 347 13 47
Fax: (0-58) 347 10 97

Mgr inż. Marcin Stienss

**BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI
FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-
ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE
PRODUKCJI**

PRACA DOKTORSKA

Załączniki

Promotor:
Prof. dr hab. inż. Józef Judycki

Gdańsk, 2014

SPIS ZAŁĄCZNIKÓW:

ZAŁĄCZNIK 1 – WYNIKI OZNACZEŃ PENETRACJI ASFALTÓW	4
ZAŁĄCZNIK 2 – WYNIKI OZNACZEŃ TEMPERATURY MIĘKNIENIA ASFALTÓW	6
ZAŁĄCZNIK 3 – WYNIKI BADAŃ BETONÓW ASFALTOWYCH METODĄ MARSHALLA	8
ZAŁĄCZNIK 4 – WYNIKI BADAŃ ZAGĘSZCZALNOŚCI BETONÓW ASFALTOWYCH WYTWORZONYCH W WARUNKACH LABORATORYJNYCH	21
ZAŁĄCZNIK 5 – WYNIKI BADAŃ ODPORNOŚCI NA DZIAŁANIE WODY I MROZU BETONÓW ASFALTOWYCH WYTWORZONYCH W WARUNKACH LABORATORYJNYCH	46
ZAŁĄCZNIK 6 – WYNIKI BADAŃ ODPORNOŚCI NA STARZENIE BETONÓW ASFALTOWYCH WYTWORZONYCH W WARUNKACH LABORATORYJNYCH	59
ZAŁĄCZNIK 7 – WYNIKI BADAŃ ODPORNOŚCI NA DEFORMACJE TRWAŁE BETONÓW ASFALTOWYCH WYTWORZONYCH W WARUNKACH LABORATORYJNYCH	94
ZAŁĄCZNIK 9 – WYNIKI BADAŃ ODPORNOŚCI NA DZIAŁANIE WODY I MROZU MASTYKSU GRYSOWEGO ZASTOSOWANEGO NA ODCINKU DOŚWIADCZALNYM.....	101
ZAŁĄCZNIK 10 – WYNIKI BADAŃ ODPORNOŚCI NA STARZENIE MIESZANKI SMA ZASTOSOWANEJ NA ODCINKU DOŚWIADCZALNYM.....	104
ZAŁĄCZNIK 11 – WYNIKI BADAŃ ODPORNOŚCI NA DEFORMACJE TRWAŁE MIESZANKI SMA ZASTOSOWANEJ NA ODCINKU DOŚWIADCZALNYM.....	113
ZAŁĄCZNIK 12 – WYNIKI BADAŃ ODPORNOŚCI NA SPĘKANIA NISKOTEMPERATUROWE MIESZANKI SMA ZASTOSOWANEJ NA ODCINKU DOŚWIADCZALNYM	115
ZAŁĄCZNIK 13 – WYNIKI BADAŃ ZAGĘSZCZENIA MIESZANKI SMA ZASTOSOWANEJ NA ODCINKU DOŚWIADCZALNYM	118
ZAŁĄCZNIK 14 – ANALIZA ISTOTNOŚCI RÓŻNIC WYNIKÓW BADAŃ MODUŁÓW SZTYWNOŚCI BETONÓW ASFALTOWYCH PO STARZENIU DŁUGOTERMINOWYM W TEMPERATURZE 10°C	120

ZAŁĄCZNIK 1 – WYNIKI OZNACZEŃ PENETRACJI ASFALTÓW

Tablica Z.1.1. Wyniki oznaczeń penetracji asfaltu zwykłego 50/70 czystego i z dodatkami, przed starzeniem TFOT

Rodzaj dodatku	Oznaczenie [j. pen.]:			Średnia [j. pen.]	Odchylenie standardowe [j. pen.]	Współczynnik zmienności	
	1	2	3				
A	-	50,0	48,3	50,0	49,4	1,0	2%
B	Sasobit	31,0	34,0	33,6	32,9	1,6	5%
C	Licomont BS100	40,5	42,0	41,0	41,2	0,8	2%
D	Rediset WMX	44,8	44,8	43,0	44,2	1,0	2%
E	Ceca Base RT	49,1	52,0	49,5	50,2	1,6	3%

Tablica Z.1.2. Wyniki oznaczeń penetracji asfaltu zwykłego 50/70 czystego i z dodatkami, po starzeniu TFOT

Rodzaj dodatku	Oznaczenie [j. pen.]:			Średnia [j. pen.]	Odchylenie standardowe [j. pen.]	Współczynnik zmienności	
	1	2	3				
A	-	33,5	33,0	33,8	33,4	0,4	1%
B	Sasobit	25,0	27,0	27,0	26,3	1,2	4%
C	Licomont BS100	30,0	30,0	30,0	30,0	0,0	0%
D	Rediset WMX	30,6	30,2	30,9	30,6	0,4	1%
E	Ceca Base RT	34,0	38,0	36,0	36,0	2,0	6%

Tablica Z.1.3. Wyniki oznaczeń penetracji asfaltu modyfikowanego 45/80-55 czystego i z dodatkami, przed starzeniem TFOT

Rodzaj dodatku	Oznaczenie [j. pen.]:			Średnia [j. pen.]	Odchylenie standardowe [j. pen.]	Współczynnik zmienności	
	1	2	3				
G	-	50,0	48,5	49,5	49,3	0,8	2%
H	Sasobit	37,0	37,5	36,5	37,0	0,5	1%
I	Licomont BS100	41,0	39,5	42,0	40,8	1,3	3%
K	Rediset WMX	44,0	42,5	45,0	43,8	1,3	3%
L	Ceca Base RT	50,0	49,0	52,0	50,3	1,5	3%

Tablica Z.1.4. Wyniki oznaczeń penetracji asfaltu modyfikowanego 45/80-55 czystego i z dodatkami, po starzeniu TFOT

Rodzaj dodatku	Oznaczenie [j. pen.]:			Średnia [j. pen.]	Odchylenie standardowe [j. pen.]	Współczynnik zmienności	
	1	2	3				
G	-	44,5	44,0	42,2	43,6	1,2	3%
H	Sasobit	31,5	32,9	32,1	32,2	0,7	2%
I	Licomont BS100	34,2	34,8	34,0	34,3	0,4	1%
K	Rediset WMX	40,0	39,0	38,4	39,1	0,8	2%
L	Ceca Base RT	41,8	41,0	43,0	41,9	1,0	2%

ZAŁĄCZNIK 2 – WYNIKI OZNACZEŃ TEMPERATURY MIĘKNIENIA ASFALTÓW

Tablica Z.2.1. Wyniki oznaczeń temperatury mięknięcia asfaltu zwykłego 50/70 czystego i z dodatkami, przed starzeniem TFOT

Rodzaj dodatku		Próbka nr [°C]:		Średnia
		1	2	
A	-	52,0	51,5	51,8
B	Sasobit	zerwanie	zerwanie	-
C	Licomont BS 100	zerwanie	zerwanie	-
D	Rediset WMX	56,0	56,0	56,0
E	Ceca Base RT	51,5	52,0	51,8

Tablica Z.2.2. Wyniki oznaczeń temperatury mięknięcia asfaltu zwykłego 50/70 czystego i z dodatkami, po starzeniu TFOT

Rodzaj dodatku		Próbka nr [°C]:		Średnia
		1	2	
A	-	56,0	56,5	56,3
B	Sasobit	77,0	78,0	77,5
C	Licomont BS 100	73,0	74,0	73,5
D	Rediset WMX	52,0	53,0	52,5
E	Ceca Base RT	55,5	56,0	55,8

Tablica Z.2.3. Wyniki oznaczeń temperatury mięknięcia asfaltu modyfikowanego 45/80-55 czystego i z dodatkami, przed starzeniem TFOT

Rodzaj dodatku		Próbka nr [°C]:		Średnia
		1	2	
G	-	57,0	58,0	57,5
H	Sasobit	83,0	83,0	83,0
I	Licomont BS 100	63,5	63,5	63,5
K	Rediset WMX	63,0	63,0	63,0
L	Ceca Base RT	57,0	57,0	57,0

Tablica Z.2.4. Wyniki oznaczeń temperatury mięknięcia asfaltu modyfikowanego 45/80-55 czystego i z dodatkami, po starzeniu TFOT

Rodzaj dodatku		Próbka nr [°C]:		Średnia
		1	2	
G	-	58,5	58,5	58,5
H	Sasobit	82,0	82,5	82,3
I	Licomont BS 100	68,0	68,0	68,0
K	Rediset WMX	63,5	64,5	64,0
L	Ceca Base RT	57,5	58,0	57,8

ZAŁĄCZNIK 3 – WYNIKI BADAŃ BETONÓW ASFALTOWYCH METODĄ MARSHALLA

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.3.1. Właściwości próbek betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem zwykłym 50/70 uzyskane w badaniu Marshalla

Nr próbki	Wysokość	Procentowa zawartość asfaltu w stosunku do:		Masa próbki			Objętość próbki	Gęstość pozorna próbki		Gęstość próbki		Objętość całkowita w próbce mieszanki mineralno-bitumicznej						Wolna przestrzeń					
		Mieszanki mineralnej	Masy bitumicznej	W powietrzu	W wodzie	W powietrzu po nasyceniu		Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia	Asfaltu		Mieszanki mineralnej		Wolnej przestrzeni		Mieszanki mineralnej		Wypełniona w mieszance mineralnej			
												Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia
A1/1	63,5	4,82	4,60	1 209,22	709,91	1 209,22	499,31	2,417		2,535		10,9		84,4		4,7		15,6		70,0			
A1/2	64,5	4,82	4,60	1 222,68	717,05	1 222,68	505,63	2,413	2,413	2,535	2,535	10,9	10,9	84,3	84,3	4,8	4,8	15,7	15,7	69,4	69,4		
A1/3	61,0	4,82	4,60	1 149,90	673,47	1 149,90	476,43	2,409		2,535		10,9		84,1		5,0		15,9		68,5			
A2/1	60,2	5,26	5,00	1160,67	683,93	1160,67	476,74	2,430		2,519		11,9		84,5		3,6		15,5		77,0			
A2/2	63,7	5,26	5,00	1223,96	721,5	1223,96	502,46	2,431	2,429	2,519	2,519	11,9	11,9	84,6	84,5	3,5	3,6	15,4	15,5	77,2	76,8		
A2/3	66,1	5,26	5,00	1270,67	748,06	1270,67	522,61	2,427		2,519		11,9		84,4		3,7		15,6		76,3			
A3/1	60,2	5,71	5,40	1163,08	688,12	1163,08	474,96	2,444		2,504		12,9		84,7		2,4		15,3		84,4			
A3/2	59,7	5,71	5,40	1161,62	686,54	1161,62	475,08	2,440	2,444	2,504	2,504	12,9	12,9	84,5	84,6	2,5	2,4	15,5	15,4	83,5	84,3		
A3/3	64,2	5,71	5,40	1261,19	746,72	1261,19	514,47	2,447		2,504		13,0		84,8		2,3		15,2		84,9			
A4/1	65,3	6,16	5,80	1259,58	744,00	1259,58	515,58	2,438		2,489		13,9		84,1		2,0		15,9		87,2			
A4/2	59,9	6,16	5,80	1167,36	692,06	1167,36	475,30	2,451	2,443	2,489	2,489	13,9	13,9	84,6	84,3	1,5	1,8	15,4	15,7	90,2	88,3		
A4/3	60,5	6,16	5,80	1168,61	690,49	1168,61	478,12	2,439		2,489		13,9		84,1		2,0		15,9		87,5			

Tablica Z.3.2. Zawartość wolnych przestrzeni oraz stabilność Marshalla próbek betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem zwykłym 50/70

Nr próbki	Wolna przestrzeń całkowita w mieszance mineralno-asfaltowej [%]				Stabilność [kN]			
	Pojedyncza	Średnia	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Pojedyncza	Średnia	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności
A1/1	4,7	4,8	0,2	0,03	10,80	11,0	0,2	0,01
A1/2	4,8				11,10			
A1/3	5,0				11,00			
A2/1	3,6	3,6	0,1	0,03	11,50	11,6	0,4	0,03
A2/2	3,5				11,30			
A2/3	3,7				12,00			
A3/1	2,4	2,4	0,1	0,05	9,90	9,9	0,5	0,05
A3/2	2,5				9,50			
A3/3	2,3				10,40			
A4/1	2,0	1,8	0,3	0,16	9,30	9,1	0,4	0,04
A4/2	1,5				9,30			
A4/3	2,0				8,60			

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.3.3. Właściwości próbek betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem zwykłym 50/70 i dodatkiem Sasobit uzyskane w badaniu Marshalla

Nr próbki	Wysokość	Procentowa zawartość asfaltu w stosunku do:		Masa próbki			Objętość próbki	Gęstość pozorna próbki		Gęstość próbki	Objętość całkowita w próbce mieszanki mineralno-bitumicznej						Wolna przestrzeń						
		Mieszanki mineralnej	Masy bitumicznej	W powietrzu	W wodzie	W powietrzu po nasyceniu		Pojedyncza	Średnia		Asfaltu		Mieszanki mineralnej		Wolnej przestrzeni		Mieszanki mineralnej		Wypełniona w mieszance mineralnej				
											Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia	
B1/1	65,3	4,82	4,60	1 292,48	756,40	1 292,48	536,08	2,406		2,535		10,9		84,1		5,1		15,9		68,1			
B1/2	60,6	4,82	4,60	1 208,65	704,40	1 208,65	504,25	2,392	2,396	2,535	2,535	10,8	10,8	83,6	83,7	5,6	5,5	16,4	16,3	65,7	66,3		
B1/3	62,0	4,82	4,60	1 082,93	630,50	1 082,93	452,43	2,389		2,535		10,8		83,5		5,8		16,5		65,1			
B2/1	69,0	5,26	5,00	1256,15	742,02	1256,15	514,13	2,438		2,519		12,0		84,8		3,2		15,2		78,8			
B2/2	63,9	5,26	5,00	1123,59	660,77	1123,59	462,82	2,423	2,426	2,519	2,519	11,9	11,9	84,3	84,4	3,8	3,7	15,7	15,6	75,6	76,3		
B2/3	58,1	5,26	5,00	1171,57	687,9	1171,57	483,67	2,417		2,519		11,9		84,1		4,1		15,9		74,5			
B3/1	65,1	5,71	5,40	1256,15	742,02	1256,15	514,13	2,438		2,504		12,9		84,5		2,6		15,5		83,1			
B3/2	58,1	5,71	5,40	1123,59	660,77	1123,59	462,82	2,423	2,426	2,504	2,504	12,8	12,8	83,9	84,0	3,2	3,1	16,1	16,0	79,8	80,6		
B3/3	61,5	5,71	5,40	1171,57	687,90	1171,57	483,67	2,417		2,504		12,8		83,7		3,5		16,3		78,7			
B4/1	65,2	6,16	5,80	1261,43	746,15	1261,43	515,28	2,443		2,489		13,9		84,3		1,8		15,7		88,4			
B4/2	59,7	6,16	5,80	1143,23	672,23	1143,23	471,00	2,422	2,428	2,489	2,489	13,8	13,8	83,6	83,7	2,7	2,4	16,4	16,3	83,8	85,0		
B4/3	58,9	6,16	5,80	1129,55	663,32	1129,55	466,23	2,418		2,489		13,7		83,4		2,8		16,6		82,9			

Tablica Z.3.4. Zawartość wolnych przestrzeni oraz stabilność Marshalla próbek z asfaltem zwykłym 50/70 i dodatkiem Sasobit

Nr próbki	Wolna przestrzeń całkowita w mieszance mineralno-asfaltowej [%]				Stabilność [kN]			
	Pojedyncza	Średnia	Odstąpienie standardowe	Współczynnik zmienności	Pojedyncza	Średnia	Odstąpienie standardowe	Współczynnik zmienności
B1/1	5,1	5,5	0,4	0,07	10,00	9,0	1,2	0,13
B1/2	5,6				7,70			
B1/3	5,8				9,30			
B2/1	3,2	3,7	0,4	0,12	8,90	8,8	0,6	0,06
B2/2	3,8				9,30			
B2/3	4,1				8,20			
B3/1	2,6	3,1	0,4	0,14	12,10	10,5	1,4	0,14
B3/2	3,2				9,90			
B3/3	3,5				9,40			
B4/1	1,8	2,4	0,5	0,22	10,50	9,8	0,6	0,06
B4/2	2,7				9,60			
B4/3	2,8				9,40			

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.3.5. Właściwości próbek betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem zwykłym 50/70 i dodatkiem Licomont BS100 uzyskane w badaniu Marshalla

Nr próbki	Wysokość	Procentowa zawartość asfaltu w stosunku do:		Masa próbki			Objętość próbki	Gęstość pozorna próbki		Gęstość próbki		Objętość całkowita w próbce mieszanki mineralno-bitumicznej						Wolna przestrzeń			
		Mieszanki mineralnej	Masy bitumicznej	W powietrzu	W wodzie	W powietrzu po nasyceniu		Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia	Asfaltu		Mieszanki mineralnej		Wolnej przestrzeni		Mieszanki mineralnej		Wypełniona w mieszance mineralnej	
												Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia
C1/1	60,5	4,82	4,60	1 143,44	670,23	1 143,44	473,21	2,412		2,535		10,9		84,2		4,9		15,8		69,0	
C1/2	62,9	4,82	4,60	1 201,49	704,74	1 201,49	496,75	2,414	2,411	2,535	2,535	10,9	10,9	84,3	84,2	4,8	4,9	15,7	15,8	69,5	68,9
C1/3	62,3	4,82	4,60	1 175,09	687,83	1 175,09	487,26	2,407		2,535		10,9		84,1		5,1		15,9		68,2	
C2/1	57,8	5,26	5,00	1105,03	648,18	1105,03	456,85	2,414		2,519		11,8		84,0		4,2		16,0		73,9	
C2/2	65,7	5,26	5,00	1257,00	737,34	1257,00	519,66	2,414	2,418	2,519	2,519	11,8	11,9	84,0	84,1	4,2	4,0	16,0	15,9	73,9	74,7
C2/3	58,2	5,26	5,00	1123,51	661,44	1123,51	462,07	2,427		2,519		11,9		84,4		3,7		15,6		76,3	
C3/1	64,3	5,71	5,40	1208,28	709	1208,28	499,28	2,415		2,504		12,8		83,7		3,5		16,3		78,3	
C3/2	66,4	5,71	5,40	1250,77	731,92	1250,77	518,85	2,406	2,419	2,504	2,504	12,7	12,8	83,3	83,8	3,9	3,4	16,7	16,2	76,5	79,2
C3/3	60,4	5,71	5,40	1169,66	690,59	1169,66	479,07	2,437		2,504		12,9		84,4		2,7		15,6		82,7	
C4/1	61,5	6,16	5,80	1191,67	700,93	1191,67	490,74	2,423		2,489		13,8		83,6		2,6		16,4		84,0	
C4/2	61,2	6,16	5,80	1176,07	691,9	1176,07	484,17	2,424	2,424	2,489	2,489	13,8	13,8	83,6	83,6	2,6	2,6	16,4	16,4	84,2	84,2
C4/3	65,6	6,16	5,80	1264,84	744,30	1264,84	520,54	2,425		2,489		13,8		83,7		2,6		16,3		84,3	

Tablica Z.3.6. Zawartość wolnych przestrzeni oraz stabilność próbek z asfaltem zwykłym 50/70 i dodatkiem Licomont BS100

Nr próbki	Wolna przestrzeń całkowita w mieszance mineralno-asfaltowej [%]				Stabilność [kN]			
	Pojedyncza	Średnia	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Pojedyncza	Średnia	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności
C1/1	4,9	4,9	0,1	0,03	12,80	11,8	0,9	0,07
C1/2	4,8				11,60			
C1/3	5,1				11,10			
C2/1	4,2	4,0	0,3	0,07	10,10	11,1	0,9	0,08
C2/2	4,2				11,80			
C2/3	3,7				11,50			
C3/1	3,5	3,4	0,6	0,19	8,90	9,5	0,9	0,09
C3/2	3,9				9,20			
C3/3	2,7				10,50			
C4/1	2,6	2,6	0,0	0,01	9,70	10,1	0,3	0,03
C4/2	2,6				10,30			
C4/3	2,6				10,30			

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.3.7. Właściwości próbek betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem zwykłym 50/70 i dodatkiem Rediset WMX uzyskane w badaniu Marshalla

Nr próbki	Wysokość	Procentowa zawartość asfaltu w stosunku do:		Masa próbki			Objętość próbki	Gęstość pozorna próbki		Gęstość próbki		Objętość całkowita w próbce mieszanki mineralno-bitumicznej						Wolna przestrzeń			
		Mieszanki mineralnej	Masy bitumicznej	W powietrzu	W wodzie	W powietrzu po nasyceniu		Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia	Asfaltu		Mieszanki mineralnej		Wolnej przestrzeni		Mieszanki mineralnej		Wypełniona w mieszance mineralnej	
												Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia
D1/1	66,2	4,82	4,60	1 259,11	739,85	1 259,11	519,26	2,420		2,535		10,9		84,5		4,5		15,5		70,6	
D1/2	60,5	4,82	4,60	1 152,86	675,00	1 152,86	477,86	2,408	2,409	2,535	2,535	10,9	10,9	84,1	84,1	5,0	5,0	15,9	15,9	68,4	68,6
D1/3	60,8	4,82	4,60	1 127,98	658,60	1 127,98	469,38	2,398		2,535		10,8		83,8		5,4		16,2		66,7	
D2/1	64,8	5,26	5,00	1228,74	721,34	1228,74	507,40	2,417		2,519		11,8		84,1		4,1		15,9		74,4	
D2/2	60,0	5,26	5,00	1141,04	666,71	1141,04	474,33	2,401	2,407	2,519	2,519	11,8	11,8	83,5	83,7	4,7	4,5	16,5	16,3	71,4	72,6
D2/3	63,7	5,26	5,00	1198,12	700,8	1198,12	497,32	2,404		2,519		11,8		83,6		4,6		16,4		72,1	
D3/1	59,6	5,71	5,40	1143,92	670,77	1143,92	473,15	2,413		2,504		12,8		83,6		3,6		16,4		77,8	
D3/2	60,4	5,71	5,40	1146,18	669,37	1146,18	476,81	2,399	2,414	2,504	2,504	12,7	12,8	83,1	83,6	4,2	3,6	16,9	16,4	75,2	78,1
D3/3	65,4	5,71	5,40	1260,06	742,53	1260,06	517,53	2,430		2,504		12,9		84,2		3,0		15,8		81,3	
D4/1	63,8	6,16	5,80	1225,12	723,01	1225,12	502,11	2,435		2,489		13,8		84,0		2,2		16,0		86,5	
D4/2	65,6	6,16	5,80	1259,75	743	1259,75	516,75	2,433	2,438	2,489	2,489	13,8	13,9	83,9	84,1	2,2	2,0	16,1	15,9	86,1	87,3
D4/3	60,9	6,16	5,80	1191,15	705,32	1191,15	485,83	2,447		2,489		13,9		84,4		1,7		15,6		89,2	

Tablica Z.3.8. Zawartość wolnych przestrzeni oraz stabilność próbek z asfaltem zwykłym 50/70 i dodatkiem Rediset WMX

Nr próbki	Wolna przestrzeń całkowita w mieszance mineralno-asfaltowej [%]				Stabilność [kN]			
	Pojedyncza	Średnia	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Pojedyncza	Średnia	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności
D1/1	4,5	5,0	0,4	0,09	9,60	8,2	1,3	0,16
D1/2	5,0				7,90			
D1/3	5,4				7,10			
D2/1	4,1	4,5	0,3	0,07	8,80	8,1	0,6	0,07
D2/2	4,7				7,80			
D2/3	4,6				7,80			
D3/1	3,6	3,6	0,6	0,17	7,90	8,0	1,2	0,14
D3/2	4,2				6,90			
D3/3	3,0				9,20			
D4/1	2,2	2,0	0,3	0,15	7,60	7,7	0,1	0,01
D4/2	2,2				7,70			
D4/3	1,7				7,70			

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.3.9. Właściwości betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem zwykłym 50/70 i dodatkiem Ceca Base RT uzyskane w badaniu Marshalla

Nr próbki	Wysokość	Procentowa zawartość asfaltu w stosunku do:		Masa próbki			Objętość próbki	Gęstość pozorna próbki		Gęstość próbki		Objętość całkowita w próbce mieszanki mineralno-bitumicznej						Wolna przestrzeń			
		Mieszanki mineralnej	Masy bitumicznej	W powietrzu	W wodzie	W powietrzu po nasyceniu		Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia	Asfaltu		Mieszanki mineralnej		Wolnej przestrzeni		Mieszanki mineralnej		Wypełniona w mieszance mineralnej	
												Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia
E1/1	69,6	4,82	4,60	1 274,57	737,59	1 274,57	536,98	2,369		2,535		10,7		82,8		6,6		17,2		62,0	
E1/2	63,7	4,82	4,60	1 194,69	695,94	1 194,69	498,75	2,391	2,374	2,535	2,535	10,8	10,7	83,5	82,9	5,7	6,4	16,5	17,1	65,4	62,7
E1/3	63,7	4,82	4,60	1 159,79	669,63	1 159,79	490,16	2,361		2,535		10,6		82,5		6,9		17,5		60,8	
E2/1	62,1	5,26	5,00	1154,48	667,96	1154,48	486,52	2,368		2,519		11,6		82,4		6,0		17,6		65,9	
E2/2	70,5	5,26	5,00	1294,63	753,65	1294,63	540,98	2,388	2,382	2,519	2,519	11,7	11,7	83,1	82,9	5,2	5,5	16,9	17,1	69,2	68,1
E2/3	61,4	5,26	5,00	1155,33	672,66	1155,33	482,67	2,389		2,519		11,7		83,1		5,2		16,9		69,3	
E3/1	66,4	5,71	5,40	1252,18	729,6	1252,18	522,58	2,391		2,504		12,7		82,8		4,5		17,2		73,8	
E3/2	64,5	5,71	5,40	1224,18	715,4	1224,18	508,78	2,401	2,390	2,504	2,504	12,7	12,7	83,2	82,8	4,1	4,5	16,8	17,2	75,6	73,6
E3/3	61,7	5,71	5,40	1149,29	667,02	1149,29	482,27	2,378		2,504		12,6		82,4		5,0		17,6		71,5	
E4/1	60,9	6,16	5,80	1161,52	682,29	1161,52	479,23	2,419		2,489		13,8		83,4		2,8		16,6		83,1	
E4/2	64,9	6,16	5,80	1244,96	732,35	1244,96	512,61	2,424	2,419	2,489	2,489	13,8	13,8	83,6	83,4	2,6	2,8	16,4	16,6	84,1	83,0
E4/3	62,3	6,16	5,80	1192,44	699,26	1192,44	493,18	2,413		2,489		13,7		83,2		3,0		16,8		81,9	

Tablica Z.3.10. Zawartość wolnych przestrzeni oraz stabilność próbek z asfaltem zwykłym 50/70 i dodatkiem Ceca Base RT

Nr próbki	Wolna przestrzeń całkowita w mieszance mineralno-asfaltowej [%]				Stabilność [kN]			
	Pojedyncza	Średnia	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Pojedyncza	Średnia	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności
E1/1	6,6	6,4	0,6	0,09	7,50	7,9	0,9	0,12
E1/2	5,7				9,00			
E1/3	6,9				7,30			
E2/1	6,0	5,5	0,5	0,09	6,90	7,8	0,9	0,11
E2/2	5,2				7,80			
E2/3	5,2				8,60			
E3/1	4,5	4,5	0,5	0,10	8,10	8,1	1,4	0,17
E3/2	4,1				9,40			
E3/3	5,0				6,70			
E4/1	2,8	2,8	0,2	0,08	8,70	9,3	0,9	0,09
E4/2	2,6				10,30			
E4/3	3,0				8,90			

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.3.11. Właściwości betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem zwykłym 50/70 i dodatkiem zeolitu uzyskane w badaniu Marshalla

Nr próbki	Wysokość	Procentowa zawartość asfaltu w stosunku do:		Masa próbki			Objętość próbki	Gęstość pozorna próbki		Gęstość próbki		Objętość całkowita w próbce mieszanki mineralno-bitumicznej						Wolna przestrzeń			
		Mieszanki mineralnej	Masy bitumicznej	W powietrzu	W wodzie	W powietrzu po nasyceniu		Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia	Asfaltu		Mieszanki mineralnej		Wolnej przestrzeni		Mieszanki mineralnej		Wypełniona w mieszance mineralnej	
												Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia
F1/1	65,8	4,82	4,60	1 196,17	687,81	1 196,17	508,36	2,348		2,535		10,6		82,0		7,4		18,0		59,0	
F1/2	63,4	4,82	4,60	1 165,41	677,25	1 165,41	488,16	2,383	2,374	2,535	2,535	10,7	10,7	83,2	82,9	6,0	6,4	16,8	17,1	64,1	62,9
F1/3	68,7	4,82	4,60	1 267,68	738,65	1 267,68	529,03	2,391		2,535		10,8		83,5		5,7		16,5		65,5	
F2/1	64,5	5,26	5,00	1191,07	688,52	1191,07	502,55	2,365		2,519		11,6		82,3		6,1		17,7		65,5	
F2/2	68,1	5,26	5,00	1268,48	737,49	1268,48	530,99	2,384	2,374	2,519	2,519	11,7	11,6	82,9	82,6	5,4	5,8	17,1	17,4	68,5	66,9
F2/3	62,9	5,26	5,00	1174,13	680,45	1174,13	493,68	2,374		2,519		11,6		82,6		5,8		17,4		66,8	
F3/1	62,2	5,71	5,40	1178,5	690,39	1178,50	488,11	2,410		2,504		12,8		83,5		3,8		16,5		77,2	
F3/2	63,1	5,71	5,40	1212,93	712,96	1212,93	499,97	2,421	2,416	2,504	2,504	12,8	12,8	83,9	83,7	3,3	3,5	16,1	16,3	79,5	78,5
F3/3	66,4	5,71	5,40	1260,57	740,13	1260,57	520,44	2,417		2,504		12,8		83,7		3,5		16,3		78,7	
F4/1	66,1	6,16	5,80	1267,11	747,01	1267,11	520,10	2,431		2,489		13,8		83,9		2,3		16,1		85,7	
F4/2	62,3	6,16	5,80	1189,59	703	1189,59	486,59	2,440	2,434	2,489	2,489	13,9	13,8	84,2	84,0	2,0	2,2	15,8	16,0	87,6	86,3
F4/3	60,8	6,16	5,80	1170,07	689,75	1170,07	480,32	2,431		2,489		13,8		83,9		2,3		16,1		85,7	

Tablica Z.3.12. Zawartość wolnych przestrzeni oraz stabilność próbek betonu z asfaltem zwykłym 50/70 i dodatkiem zeolitu

Nr próbki	Wolna przestrzeń całkowita w mieszance mineralno-asfaltowej [%]				Stabilność [kN]			
	Pojedyncza	Średnia	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Pojedyncza	Średnia	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności
F1/1	7,4	6,4	0,9	0,14	7,30	7,9	0,5	0,07
F1/2	6,0				8,00			
F1/3	5,7				8,30			
F2/1	6,1	5,8	0,4	0,06	8,20	8,4	0,5	0,06
F2/2	5,4				9,00			
F2/3	5,8				8,00			
F3/1	3,8	3,5	0,2	0,07	8,60	9,1	0,4	0,05
F3/2	3,3				9,40			
F3/3	3,5				9,20			
F4/1	2,3	2,2	0,2	0,09	9,00	9,0	0,1	0,01
F4/2	2,0				8,90			
F4/3	2,3				9,10			

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.3.13. Właściwości betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 uzyskane w badaniu Marshalla

Nr próbki	Wysokość	Procentowa zawartość asfaltu w stosunku do:		Masa próbki			Objętość próbki	Gęstość pozorna próbki		Gęstość próbki		Objętość całkowita w próbce mieszanki mineralno-bitumicznej						Wolna przestrzeń			
		Mieszanki mineralnej	Masy bitumicznej	W powietrzu	W wodzie	W powietrzu po nasyceniu		Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia	Asfaltu		Mieszanki mineralnej		Wolnej przestrzeni		Mieszanki mineralnej		Wypełniona w mieszance mineralnej	
												Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia
G1/1	62,1	4,82	4,60	1 165,23	678,31	1 165,23	486,92	2,388		2,535		10,8		83,4		5,8		16,6		65,0	
G1/2	65,8	4,82	4,60	1 223,70	711,99	1 223,70	511,71	2,387	2,387	2,535	2,535	10,8	10,8	83,4	83,4	5,9	5,9	16,6	16,6	64,7	64,7
G1/3	66,1	4,82	4,60	1 231,41	716,12	1 231,41	515,29	2,385		2,535		10,8		83,3		5,9		16,7		64,5	
G2/1	65,1	5,26	5,00	1231,88	720,63	1231,88	511,25	2,405		2,519		11,8		83,7		4,6		16,3		72,1	
G2/2	63,8	5,26	5,00	1204,35	702,37	1204,35	501,98	2,394	2,397	2,519	2,519	11,7	11,8	83,3	83,4	5,0	4,8	16,7	16,6	70,3	70,8
G2/3	66,1	5,26	5,00	1244,05	725,27	1244,05	518,78	2,393		2,519		11,7		83,3		5,0		16,7		70,1	
G3/1	63,1	5,71	5,40	1194,48	700,28	1194,48	494,20	2,412		2,504		12,8		83,6		3,7		16,4		77,7	
G3/2	63,7	5,71	5,40	1211,8	710,37	1211,80	501,43	2,412	2,413	2,504	2,504	12,8	12,8	83,6	83,6	3,7	3,6	16,4	16,4	77,6	77,9
G3/3	66,2	5,71	5,40	1265,56	742,63	1265,56	522,93	2,415		2,504		12,8		83,7		3,5		16,3		78,3	
G4/1	62,7	6,16	5,80	1208,43	713,82	1208,43	494,61	2,438		2,489		13,9		84,1		2,0		15,9		87,3	
G4/2	62,9	6,16	5,80	1207,88	711,61	1207,88	496,27	2,429	2,429	2,489	2,489	13,8	13,8	83,8	83,8	2,4	2,4	16,2	16,2	85,2	85,2
G4/3	97,7	6,16	5,80	1294,12	760,25	1294,12	533,87	2,419		2,489		13,8		83,5		2,8		16,5		83,1	

Tablica Z.3.14. Zawartość wolnych przestrzeni oraz stabilność próbek betonu z asfaltem modyfikowanym 45/80-55

Nr próbki	Wolna przestrzeń całkowita w mieszance mineralno-asfaltowej [%]				Stabilność [kN]			
	Pojedyncza	Średnia	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Pojedyncza	Średnia	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności
G1/1	5,8	5,9	0,1	0,01	12,40	12,5	0,3	0,03
G1/2	5,9				12,90			
G1/3	5,9				12,30			
G2/1	4,6	4,8	0,3	0,05	14,00	12,9	1,0	0,08
G2/2	5,0				12,00			
G2/3	5,0				12,60			
G3/1	3,7	3,6	0,1	0,02	13,40	13,1	0,4	0,03
G3/2	3,7				12,70			
G3/3	3,5				13,10			
G4/1	2,0	2,4	0,4	0,16	13,70	13,3	0,7	0,05
G4/2	2,4				13,60			
G4/3	2,8				12,50			

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.3.15. Właściwości betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 i dodatkiem Sasobitu uzyskane w badaniu Marshalla

Nr próbki	Wysokość	Procentowa zawartość asfaltu w stosunku do:		Masa próbki			Objętość próbki	Gęstość pozorna próbki		Gęstość próbki		Objętość całkowita w próbce mieszanki mineralno-bitumicznej						Wolna przestrzeń			
		Mieszanki mineralnej	Masy bitumicznej	W powietrzu	W wodzie	W powietrzu po nasyceniu		Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia	Asfaltu		Mieszanki mineralnej		Wolnej przestrzeni		Mieszanki mineralnej		Wypełniona w mieszance mineralnej	
												Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia
H1/1	65,2	4,82	4,60	1 114,18	644,56	1 114,18	469,62	2,368		2,535		10,7		82,7		6,6		17,3		61,8	
H1/2	67,3	4,82	4,60	1 146,26	663,26	1 146,26	483,00	2,368	2,373	2,535	2,535	10,7	10,7	82,7	82,9	6,6	6,4	17,3	17,1	61,9	62,6
H1/3	64,3	4,82	4,60	1 221,35	709,84	1 221,35	511,51	2,383		2,535		10,7		83,2		6,0		16,8		64,2	
H2/1	67,0	5,26	5,00	1198,72	698,05	1198,72	500,67	2,389		2,519		11,7		83,1		5,2		16,9		69,4	
H2/2	68,6	5,26	5,00	1190,28	695,32	1190,28	494,96	2,400	2,395	2,519	2,519	11,8	11,7	83,5	83,3	4,7	4,9	16,5	16,7	71,3	70,5
H2/3	71,1	5,26	5,00	1259,53	735,12	1259,53	524,41	2,397		2,519		11,8		83,4		4,9		16,6		70,7	
H3/1	65,7	5,71	5,40	1190,19	697,09	1190,19	493,10	2,409		2,504		12,8		83,4		3,8		16,6		77,0	
H3/2	67,4	5,71	5,40	1161,58	681,19	1161,58	480,39	2,413	2,412	2,504	2,504	12,8	12,8	83,6	83,5	3,6	3,7	16,4	16,5	77,9	77,6
H3/3	68,0	5,71	5,40	1266,73	742,90	1266,73	523,83	2,413		2,504		12,8		83,6		3,6		16,4		77,9	
H4/1	65,8	6,16	5,80	1178,19	690,03	1178,19	488,16	2,409		2,489		13,7		83,1		3,2		16,9		81,0	
H4/2	67,7	6,16	5,80	1190,79	698,95	1190,79	491,84	2,416	2,411	2,489	2,489	13,7	13,7	83,4	83,2	2,9	3,1	16,6	16,8	82,5	81,5
H4/3	65,3	6,16	5,80	1312,36	768,68	1312,36	543,68	2,409		2,489		13,7		83,1		3,2		16,9		81,1	

Tablica Z.3.16. Zawartość wolnych przestrzeni oraz stabilność próbek z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 i dodatkiem Sasobitu

Nr próbki	Wolna przestrzeń całkowita w mieszance mineralno-asfaltowej [%]				Stabilność [kN]			
	Pojedyncza	Średnia	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Pojedyncza	Średnia	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności
H1/1	6,6	6,4	0,3	0,05	9,60	10,0	0,4	0,04
H1/2	6,6							
H1/3	6,0							
H2/1	5,2	4,9	0,2	0,04	15,20	13,9	1,2	0,08
H2/2	4,7							
H2/3	4,9							
H3/1	3,8	3,7	0,1	0,03	14,00	13,5	0,8	0,06
H3/2	3,6							
H3/3	3,6							
H4/1	3,2	3,1	0,2	0,06	13,50	13,0	0,5	0,04
H4/2	2,9							
H4/3	3,2							

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.3.17. Właściwości betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 i dodatkiem Licomont BS100 uzyskane w badaniu Marshalla

Nr próbki	Wysokość	Procentowa zawartość asfaltu w stosunku do:		Masa próbki			Objętość próbki	Gęstość pozorna próbki		Gęstość próbki		Objętość całkowita w próbce mieszanki mineralno-bitumicznej						Wolna przestrzeń			
		Mieszanki mineralnej	Masy bitumicznej	W powietrzu	W wodzie	W powietrzu po nasyceniu		Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia	Asfaltu		Mieszanki mineralnej		Wolnej przestrzeni		Mieszanki mineralnej		Wypełniona w mieszance mineralnej	
												Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia
11/1	62,5	4,82	4,60	1 173,97	681,66	1 173,97	492,31	2,380		2,535		10,7		83,1		6,1		16,9		63,7	
11/2	61,2	4,82	4,60	1 150,98	669,08	1 150,98	481,90	2,384	2,377	2,535	2,535	10,7	10,7	83,3	83,0	6,0	6,2	16,7	17,0	64,3	63,2
11/3	62,5	4,82	4,60	1 149,36	664,76	1 149,36	484,60	2,367		2,535		10,7		82,7		6,6		17,3		61,7	
12/1	63,3	5,26	5,00	1198,48	701,67	1198,48	496,81	2,408		2,519		11,8		83,8		4,4		16,2		72,6	
12/2	63,5	5,26	5,00	1194,29	698,91	1194,29	495,38	2,406	2,407	2,519	2,519	11,8	11,8	83,7	83,7	4,5	4,5	16,3	16,3	72,4	72,5
12/3	63,2	5,26	5,00	1190,28	696,77	1190,28	493,51	2,407		2,519		11,8		83,7		4,5		16,3		72,6	
13/1	62,0	5,71	5,40	1186,98	698,33	1186,98	488,65	2,424		2,504		12,8		84,0		3,2		16,0		80,1	
13/2	63,3	5,71	5,40	1210,37	710,8	1210,37	499,57	2,418	2,418	2,504	2,504	12,8	12,8	83,8	83,8	3,4	3,5	16,2	16,2	78,8	78,8
13/3	62,8	5,71	5,40	1205,34	706,31	1205,34	499,03	2,411		2,504		12,8		83,5		3,7		16,5		77,4	
14/1	60,0	6,16	5,80	1158,82	684,55	1158,82	474,27	2,438		2,489		13,9		84,1		2,0		15,9		87,3	
14/2	62,6	6,16	5,80	1210,89	715,07	1210,89	495,82	2,437	2,435	2,489	2,489	13,9	13,8	84,1	84,0	2,1	2,1	15,9	16,0	87,0	86,6
14/3	61,8	6,16	5,80	1203,13	708,97	1203,13	494,16	2,430		2,489		13,8		83,8		2,4		16,2		85,4	

Tablica Z.3.18. Zawartość wolnych przestrzeni oraz stabilność próbek z asfaltem mod. 45/80-55 i dodatkiem Licomont BS100

Nr próbki	Wolna przestrzeń całkowita w mieszance mineralno-asfaltowej [%]				Stabilność [kN]			
	Pojedyncza	Średnia	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Pojedyncza	Średnia	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności
11/1	6,1	6,2	0,3	0,05	9,90	10,4	0,8	0,08
11/2	6,0				11,30			
11/3	6,6				10,00			
12/1	4,4	4,5	0,0	0,01	11,00	10,7	0,3	0,03
12/2	4,5				10,50			
12/3	4,5				10,50			
13/1	3,2	3,5	0,3	0,08	11,00	10,8	0,5	0,05
13/2	3,4				10,20			
13/3	3,7				11,20			
14/1	2,0	2,1	0,2	0,09	11,60	11,1	0,9	0,08
14/2	2,1				11,60			
14/3	2,4				10,10			

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.3.19. Właściwości betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 i dodatkiem Rediset WMX uzyskane w badaniu Marshalla

Nr próbki	Wysokość	Procentowa zawartość asfaltu w stosunku do:		Masa próbki			Objętość próbki	Gęstość pozorna próbki		Gęstość próbki		Objętość całkowita w próbce mieszanki mineralno-bitumicznej						Wolna przestrzeń			
		Mieszanki mineralnej	Masy bitumicznej	W powietrzu	W wodzie	W powietrzu po nasyceniu		Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia	Asfaltu		Mieszanki mineralnej		Wolnej przestrzeni		Mieszanki mineralnej		Wypełniona w mieszance mineralnej	
												Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia
K1/1	61,4	4,82	4,60	1 156,88	674,02	1 156,88	482,86	2,391		2,535		10,8		83,5		5,7		16,5		65,5	
K1/2	62,1	4,82	4,60	1 166,85	677,66	1 166,85	489,19	2,380	2,389	2,535	2,535	10,7	10,8	83,2	83,5	6,1	5,8	16,8	16,5	63,8	65,1
K1/3	62,9	4,82	4,60	1 161,00	677,19	1 161,00	483,81	2,395		2,535		10,8		83,7		5,5		16,3		66,1	
K2/1	60,1	5,26	5,00	1139,83	666,49	1139,83	473,34	2,403		2,519		11,8		83,6		4,6		16,4		71,9	
K2/2	63,1	5,26	5,00	1194,93	698,97	1194,93	495,96	2,405	2,401	2,519	2,519	11,8	11,8	83,6	83,5	4,6	4,7	16,4	16,5	72,1	71,4
K2/3	62,1	5,26	5,00	1169,16	681,73	1169,16	487,43	2,394		2,519		11,7		83,3		5,0		16,7		70,2	
K3/1	60,4	5,71	5,40	1166,55	687,54	1166,55	479,01	2,430		2,504		12,9		84,2		2,9		15,8		81,4	
K3/2	61,8	5,71	5,40	1181,28	694,04	1181,28	487,24	2,420	2,427	2,504	2,504	12,8	12,8	83,8	84,1	3,4	3,1	16,2	15,9	79,2	80,7
K3/3	59,9	5,71	5,40	1142,06	673,07	1142,06	468,99	2,430		2,504		12,9		84,2		2,9		15,8		81,4	
K4/1	62,6	6,16	5,80	1205,92	708,45	1205,92	497,47	2,419		2,489		13,8		83,5		2,8		16,5		83,1	
K4/2	62,9	6,16	5,80	1192,92	700,2	1192,92	492,72	2,416	2,414	2,489	2,489	13,7	13,7	83,4	83,3	2,9	3,0	16,6	16,7	82,5	82,0
K4/3	62,2	6,16	5,80	1182,54	691,97	1182,54	490,57	2,406		2,489		13,7		83,0		3,3		17,0		80,4	

Tablica Z.3.20. Zawartość wolnych przestrzeni oraz stabilność próbek z asfaltem mod. 45/80-55 i dodatkiem Rediset WMX

Nr próbki	Wolna przestrzeń całkowita w mieszance mineralno-asfaltowej [%]				Stabilność [kN]			
	Pojedyncza	Średnia	Odstąpienie standardowe	Współczynnik zmienności	Pojedyncza	Średnia	Odstąpienie standardowe	Współczynnik zmienności
K1/1	5,7	5,8	0,3	0,05	11,10	11,0	0,6	0,05
K1/2	6,1				11,60			
K1/3	5,5				10,40			
K2/1	4,6	4,7	0,2	0,05	11,00	11,2	0,3	0,03
K2/2	4,6				11,60			
K2/3	5,0				11,00			
K3/1	2,9	3,1	0,2	0,08	10,80	11,2	0,5	0,05
K3/2	3,4				11,80			
K3/3	2,9				11,10			
K4/1	2,8	3,0	0,3	0,09	10,00	10,1	0,5	0,05
K4/2	2,9				10,60			
K4/3	3,3				9,60			

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.3.21. Właściwości betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 i dodatkiem Ceca Base RT uzyskane w badaniu Marshalla

Nr próbki	Wysokość	Procentowa zawartość asfaltu w stosunku do:		Masa próbki			Objętość próbki	Gęstość pozorna próbki		Gęstość próbki		Objętość całkowita w próbce mieszanki mineralno-bitumicznej						Wolna przestrzeń			
		Mieszanki mineralnej	Masy bitumicznej	W powietrzu	W wodzie	W powietrzu po nasyceniu		Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia	Asfaltu		Mieszanki mineralnej		Wolnej przestrzeni		Mieszanki mineralnej		Wypełniona w mieszance mineralnej	
												Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia
L1/1	69,6	4,82	4,60	1 163,61	677,66	1 163,61	485,95	2,390		2,535		10,8		83,5		5,7		16,5		65,3	
L1/2	63,7	4,82	4,60	1 176,20	684,82	1 176,20	491,38	2,389	2,386	2,535	2,535	10,8	10,8	83,5	83,4	5,8	5,9	16,5	16,6	65,1	64,7
L1/3	63,7	4,82	4,60	1 131,81	657,15	1 131,81	474,66	2,380		2,535		10,7		83,1		6,1		16,9		63,6	
L2/1	62,1	5,26	5,00	1202,54	701,83	1202,54	500,71	2,397		2,519		11,7		83,4		4,9		16,6		70,7	
L2/2	70,5	5,26	5,00	1183,55	690,22	1183,55	493,33	2,394	2,392	2,519	2,519	11,7	11,7	83,3	83,2	5,0	5,0	16,7	16,8	70,3	69,9
L2/3	61,4	5,26	5,00	1128,71	656,54	1128,71	472,17	2,386		2,519		11,7		83,0		5,3		17,0		68,8	
L3/1	66,4	5,71	5,40	1156,64	676,79	1156,64	479,85	2,406		2,504		12,7		83,3		3,9		16,7		76,4	
L3/2	64,5	5,71	5,40	1200,99	703,83	1200,99	497,16	2,411	2,413	2,504	2,504	12,8	12,8	83,5	83,6	3,7	3,6	16,5	16,4	77,4	77,8
L3/3	61,7	5,71	5,40	1199,01	704,86	1199,01	494,15	2,422		2,504		12,8		83,9		3,3		16,1		79,6	
L4/1	60,9	6,16	5,80	1202,14	703,90	1202,14	498,24	2,408		2,489		13,7		83,1		3,2		16,9		80,8	
L4/2	64,9	6,16	5,80	1168,26	688,35	1168,26	479,91	2,429	2,422	2,489	2,489	13,8	13,8	83,8	83,5	2,4	2,7	16,2	16,5	85,3	83,8
L4/3	62,3	6,16	5,80	1194,36	703,56	1194,36	490,80	2,429		2,489		13,8		83,8		2,4		16,2		85,1	

Tablica Z.3.22. Zawartość wolnych przestrzeni oraz stabilność próbek z asfaltem mod. 45/80-55 i dodatkiem Ceca Base RT

Nr próbki	Wolna przestrzeń całkowita w mieszance mineralno-asfaltowej [%]				Stabilność [kN]			
	Pojedyncza	Średnia	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Pojedyncza	Średnia	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności
L1/1	5,7	5,9	0,2	0,04	9,90	9,1	0,8	0,08
L1/2	5,8				9,10			
L1/3	6,1				8,40			
L2/1	4,9	5,0	0,2	0,05	9,30	9,5	1,0	0,10
L2/2	5,0				10,50			
L2/3	5,3				8,60			
L3/1	3,9	3,6	0,3	0,09	9,60	10,1	0,5	0,05
L3/2	3,7				10,20			
L3/3	3,3				10,60			
L4/1	3,2	2,7	0,5	0,18	9,40	10,2	0,8	0,07
L4/2	2,4				10,40			
L4/3	2,4				10,90			

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.3.23. Właściwości betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 i dodatkiem zeolitu uzyskane w badaniu Marshalla

Nr próbki	Wysokość	Procentowa zawartość asfaltu w stosunku do:		Masa próbki			Objętość próbki	Gęstość pozorna próbki		Gęstość próbki		Objętość całkowita w próbce mieszanki mineralno-bitumicznej						Wolna przestrzeń			
		Mieszanki mineralnej	Masy bitumicznej	W powietrzu	W wodzie	W powietrzu po nasyceniu		Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia	Asfaltu		Mieszanki mineralnej		Wolnej przestrzeni		Mieszanki mineralnej		Wypełniona w mieszance mineralnej	
												Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia	Pojedyncza	Średnia
M1/1	65,8	4,82	4,60	1 173,84	680,27	1 173,84	493,57	2,374		2,535		10,7		82,9		6,4		17,1		62,7	
M1/2	63,4	4,82	4,60	1 047,64	604,82	1 047,64	442,82	2,361	2,370	2,535	2,535	10,6	10,7	82,5	82,8	6,9	6,5	17,5	17,2	60,8	62,2
M1/3	68,7	4,82	4,60	1 217,16	706,05	1 217,16	511,11	2,377		2,535		10,7		83,0		6,3		17,0		63,2	
M2/1	64,5	5,26	5,00	1241,64	722,16	1241,64	519,48	2,385		2,519		11,7		83,0		5,3		17,0		68,7	
M2/2	68,1	5,26	5,00	1146,97	664,02	1146,97	482,95	2,370	2,372	2,519	2,519	11,6	11,6	82,5	82,5	5,9	5,9	17,5	17,5	66,2	66,5
M2/3	62,9	5,26	5,00	1240,05	715,63	1240,05	524,42	2,360		2,519		11,6		82,1		6,3		17,9		64,6	
M3/1	62,2	5,71	5,40	1206,28	705,13	1206,28	501,15	2,402		2,504		12,7		83,2		4,1		16,8		75,8	
M3/2	63,1	5,71	5,40	1163,32	678,8	1163,32	484,52	2,396	2,397	2,504	2,504	12,7	12,7	83,0	83,0	4,3	4,3	17,0	17,0	74,7	74,9
M3/3	66,4	5,71	5,40	1208,58	704,58	1208,58	504,00	2,393		2,504		12,7		82,9		4,4		17,1		74,1	
M4/1	66,1	6,16	5,80	1181,3	693,52	1181,30	487,78	2,417		2,489		13,7		83,4		2,9		16,6		82,7	
M4/2	62,3	6,16	5,80	1140,82	670,15	1140,82	470,67	2,419	2,419	2,489	2,489	13,8	13,8	83,4	83,5	2,8	2,8	16,6	16,5	83,1	83,1
M4/3	60,8	6,16	5,80	1204,88	708,39	1204,88	496,49	2,422		2,489		13,8		83,5		2,7		16,5		83,7	

Tablica Z.3.24. Zawartość wolnych przestrzeni oraz stabilność próbek z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 i dodatkiem zeolitu

Nr próbki	Wolna przestrzeń całkowita w mieszance mineralno-asfaltowej [%]				Stabilność [kN]			
	Pojedyncza	Średnia	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Pojedyncza	Średnia	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności
M1/1	6,4	6,5	0,3	0,05	7,70	8,2	0,9	0,11
M1/2	6,9				7,70			
M1/3	6,3				9,30			
M2/1	5,3	5,9	0,5	0,09	8,30	8,4	0,2	0,03
M2/2	5,9				8,30			
M2/3	6,3				8,70			
M3/1	4,1	4,3	0,2	0,04	9,40	9,5	0,3	0,03
M3/2	4,3				9,80			
M3/3	4,4				9,20			
M4/1	2,9	2,8	0,1	0,04	10,40	10,3	0,5	0,04
M4/2	2,8				9,80			
M4/3	2,7				10,70			

**ZAŁĄCZNIK 4 – WYNIKI BADAŃ ZAGĘSZCZALNOŚCI BETONÓW
ASFALTOWYCH WYTWORZONYCH W WARUNKACH
LABORATORYJNYCH**

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.4.1. Zawartość wolnych przestrzeni w próbkach prostopadłościennych z betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem zwykłym 50/70 – temperatura zagęszczenia 160 °C

Nr próbki	Ilość przejść elementu zagęszczającego	Masa w powietrzu [g]	Masa w wodzie [g]	Masa po nasyceniu [g]	Gęstość pozorna [g/cm ³]	Gęstość właściwa [g/cm ³]	Zawartość wolnych przestrzeni [%]	Średnia zawartość wolnych przestrzeni [%]	Odchylenie standardowe [%]	Wsp. zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
A/11/1/1	6 przejść	3206,02	1860,92	3206,02	2,379	2,508	5,15	4,86	0,24	0,05	4,65	5,15
A/11/1/3		3178,73	1851,51	3178,73	2,390	2,508	4,70					
A/11/2/1		3270,42	1901,27	3270,42	2,384	2,508	4,95					
A/11/2/3		3145,00	1832,50	3145,00	2,391	2,508	4,65					
A/12/1/1	8 przejść	3196,41	1871,86	3196,41	2,408	2,508	3,97	4,29	0,57	0,13	3,68	4,89
A/12/1/3		3210,54	1883,59	3210,54	2,415	2,508	3,72					
A/12/2/1		3211,85	1884,87	3211,85	2,416	2,508	3,69					
A/12/2/3		3182,54	1867,74	3182,54	2,416	2,508	3,68					
A/12/1/2		3281,60	1909,11	3281,60	2,386	2,508	4,86					
A/12/1/4		3154,78	1836,65	3154,78	2,389	2,508	4,76					
A/12/2/2		3139,99	1826,22	3139,99	2,385	2,508	4,89					
A/12/2/4		3230,20	1880,44	3230,20	2,388	2,508	4,77					
A/13/1/1	12 przejść	3315,04	1965,33	3315,04	2,451	2,508	2,26	2,49	0,16	0,06	2,26	2,61
A/13/1/3		3146,13	1860,89	3146,13	2,443	2,508	2,59					
A/13/2/1		3509,82	2075,81	3509,82	2,443	2,508	2,61					
A/13/2/3		3179,46	1881,74	3179,46	2,445	2,508	2,51					
A/14/1/1	16 przejść	3386,33	2007,29	3386,33	2,451	2,508	2,29	2,24	0,11	0,05	2,11	2,37
A/14/1/3		3297,13	1953,26	3297,13	2,449	2,508	2,37					
A/14/2/1		3466,26	2055,79	3466,26	2,453	2,508	2,21					
A/14/2/3		2981,45	1769,52	2981,45	2,455	2,508	2,11					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.4.2. Zawartość wolnych przestrzeni w próbkach prostopadłościennych z betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem zwykłym 50/70 i dodatkiem Sasobit – temperatura zagęszczenia 135 °C

Nr próbki	Ilość przejść elementu zagęszczającego	Masa w powietrzu [g]	Masa w wodzie [g]	Masa po nasyceniu [g]	Gęstość pozorna [g/cm ³]	Gęstość właściwa [g/cm ³]	Zawartość wolnych przestrzeni [%]	Średnia zawartość wolnych przestrzeni [%]	Odchylenie standardowe [%]	Wsp. zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
B/11/1/1	6 przejść	3196,30	1848,96	3196,30	2,368	2,508	5,60	5,93	0,49	0,08	5,46	6,51
B/11/1/3		3194,55	1849,96	3194,55	2,371	2,508	5,46					
B/11/2/1		3173,08	1822,56	3173,08	2,345	2,508	6,51					
B/11/2/3		3297,87	1899,40	3297,87	2,353	2,508	6,16					
B/12/1/1	8 przejść	3328,81	1939,48	3328,81	2,391	2,508	4,66	4,52	0,35	0,08	4,22	4,95
B/12/1/3		3070,06	1784,79	3070,06	2,384	2,508	4,95					
B/12/2/1		3296,48	1926,68	3296,48	2,402	2,508	4,24					
B/12/2/3		3117,32	1822,20	3117,32	2,402	2,508	4,22					
B/13/1/1	12 przejść	3323,06	1957,70	3323,06	2,429	2,508	3,15	3,24	0,24	0,08	3,09	3,61
B/13/1/3		3058,51	1795,87	3058,51	2,417	2,508	3,61					
B/13/2/1		3117,76	1837,06	3117,76	2,430	2,508	3,13					
B/13/2/3		3349,50	1974,17	3349,50	2,431	2,508	3,09					
B/14/1/1	16 przejść	3282,49	1946,70	3282,49	2,452	2,508	2,22	2,45	0,41	0,17	2,02	2,91
B/14/1/3		3129,82	1858,68	3129,82	2,457	2,508	2,02					
B/14/2/1		3188,54	1884,99	3188,54	2,441	2,508	2,67					
B/14/2/3		3210,02	1894,37	3210,02	2,435	2,508	2,91					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.4.3. Zawartość wolnych przestrzeni w próbkach prostopadłościennych z betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem zwykłym 50/70 i dodatkiem Licomont BS100 – temperatura zagęszczenia 135 °C

Nr próbki	Ilość przejść elementu zagęszczającego	Masa w powietrzu [g]	Masa w wodzie [g]	Masa po nasyceniu [g]	Gęstość pozorna [g/cm ³]	Gęstość właściwa [g/cm ³]	Zawartość wolnych przestrzeni [%]	Średnia zawartość wolnych przestrzeni [%]	Odchylenie standardowe [%]	Wsp. zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
C/11/1/1	6 przejść	3084,68	1782,66	3084,68	2,364	2,508	5,73	5,45	0,27	0,05	5,20	5,73
C/11/1/3		3275,47	1894,14	3275,47	2,367	2,508	5,64					
C/11/2/1		3369,25	1954,35	3369,25	2,377	2,508	5,24					
C/11/2/3		3034,23	1760,62	3034,23	2,378	2,508	5,20					
C/12/1/1	8 przejść	3125,62	1823,63	3125,62	2,396	2,508	4,47	4,26	0,27	0,06	3,97	4,51
C/12/1/3		3276,67	1911,23	3276,67	2,395	2,508	4,51					
C/12/2/1		3321,06	1943,42	3321,06	2,406	2,508	4,07					
C/12/2/3		3045,76	1783,64	3045,76	2,408	2,508	3,97					
C/13/1/1	12 przejść	3224,75	1906,22	3224,75	2,441	2,508	2,68	2,68	0,20	0,07	2,41	2,86
C/13/1/3		3204,48	1897,89	3204,48	2,448	2,508	2,41					
C/13/2/1		3257,86	1923,36	3257,86	2,436	2,508	2,86					
C/13/2/3		3153,13	1862,30	3153,13	2,438	2,508	2,80					
C/14/1/1	16 przejść	3236,25	1921,72	3236,25	2,457	2,508	2,03	2,34	0,35	0,15	2,03	2,65
C/14/1/3		3181,61	1889,07	3181,61	2,457	2,508	2,05					
C/14/2/1		3252,20	1922,99	3252,20	2,442	2,508	2,64					
C/14/2/3		3144,27	1859,00	3144,27	2,441	2,508	2,65					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.4.4. Zawartość wolnych przestrzeni w próbkach prostopadłościennych z betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem zwykłym 50/70 i dodatkiem Rediset WMX – temperatura zagęszczenia 135 °C

Nr próbki	Ilość przejść elementu zagęszczającego	Masa w powietrzu [g]	Masa w wodzie [g]	Masa po nasyceniu [g]	Gęstość pozorna [g/cm ³]	Gęstość właściwa [g/cm ³]	Zawartość wolnych przestrzeni [%]	Średnia zawartość wolnych przestrzeni [%]	Odchylenie standardowe [%]	Wsp. zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
D/11/1/1	6 przejść	3364,11	1953,92	3364,11	2,381	2,508	5,07	4,97	0,24	0,05	4,74	5,26
D/11/1/3		3072,34	1788,01	3072,34	2,387	2,508	4,81					
D/11/2/1		3276,28	1900,25	3276,28	2,376	2,508	5,26					
D/11/2/3		3138,60	1827,58	3138,60	2,389	2,508	4,74					
D/12/1/1	8 przejść	3157,38	1854,56	3157,38	2,419	2,508	3,56	3,65	0,20	0,05	3,48	3,93
D/12/1/3		3246,09	1907,81	3246,09	2,421	2,508	3,48					
D/12/2/1		3310,31	1939,18	3310,31	2,409	2,508	3,93					
D/12/2/3		3134,63	1840,48	3134,63	2,417	2,508	3,62					
D/13/1/1	12 przejść	3282,86	1949,89	3282,86	2,458	2,508	2,00	2,10	0,13	0,06	1,99	2,22
D/13/1/3		3167,03	1881,22	3167,03	2,458	2,508	1,99					
D/13/2/1		3227,89	1914,42	3227,89	2,453	2,508	2,21					
D/13/2/3		3184,66	1888,61	3184,66	2,452	2,508	2,22					
D/14/1/1	16 przejść	3249,74	1937,08	3249,74	2,471	2,508	1,49	1,40	0,12	0,08	1,29	1,52
D/14/1/3		3166,08	1886,77	3166,08	2,470	2,508	1,52					
D/14/2/1		3233,33	1929,50	3233,33	2,475	2,508	1,32					
D/14/2/3		3188,14	1902,96	3188,14	2,476	2,508	1,29					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.4.5. Zawartość wolnych przestrzeni w próbkach prostopadłościennych z betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem zwykłym 50/70 i dodatkiem Ceca Base RT – temperatura zagęszczenia 135°C

Nr próbki	Ilość przejść elementu zagęszczającego	Masa w powietrzu [g]	Masa w wodzie [g]	Masa po nasyceniu [g]	Gęstość pozorna [g/cm ³]	Gęstość właściwa [g/cm ³]	Zawartość wolnych przestrzeni [%]	Średnia zawartość wolnych przestrzeni [%]	Odchylenie standardowe [%]	Wsp. zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
E/11/1/1	6 przejść	3261,23	1891,55	3261,23	2,376	2,508	5,25	5,25	0,20	0,04	5,01	5,50
E/11/1/3		3130,68	1819,17	3130,68	2,382	2,508	5,01					
E/11/2/1		3199,07	1851,93	3199,07	2,370	2,508	5,50					
E/11/2/3		3221,21	1868,77	3221,21	2,377	2,508	5,22					
E/12/1/1	8 przejść	3145,49	1832,22	3145,49	2,390	2,508	4,69	4,86	0,29	0,06	4,55	5,15
E/12/1/3		3239,41	1888,93	3239,41	2,394	2,508	4,55					
E/12/2/1		3213,31	1866,58	3213,31	2,381	2,508	5,05					
E/12/2/3		3259,17	1891,87	3259,17	2,379	2,508	5,15					
E/13/1/1	12 przejść	3153,40	1851,43	3153,40	2,417	2,508	3,62	4,18	0,54	0,13	3,62	4,72
E/13/1/3		3236,74	1897,63	3236,74	2,412	2,508	3,82					
E/13/2/1		3260,46	1901,12	3260,46	2,394	2,508	4,55					
E/13/2/3		3174,82	1848,85	3174,82	2,390	2,508	4,72					
E/14/1/1	16 przejść	3206,31	1903,97	3206,31	2,457	2,508	2,03	3,44	1,59	0,46	2,03	4,83
E/14/1/3		3208,19	1904,30	3208,19	2,456	2,508	2,09					
E/14/2/1		3197,74	1861,11	3197,74	2,388	2,508	4,80					
E/14/2/3		3210,48	1868,17	3210,48	2,387	2,508	4,83					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.4.6. Zawartość wolnych przestrzeni w próbkach prostopadłościennych z betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem zwykłym 50/70 i dodatkiem zeolitu – temperatura zagęszczenia 135 °C

Nr próbki	Ilość przejść elementu zagęszczającego	Masa w powietrzu [g]	Masa w wodzie [g]	Masa po nasyceniu [g]	Gęstość pozorna [g/cm ³]	Gęstość właściwa [g/cm ³]	Zawartość wolnych przestrzeni [%]	Średnia zawartość wolnych przestrzeni [%]	Odchylenie standardowe [%]	Wsp. zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
F/11/1/1	6 przejść	3009,74	1736,47	3009,74	2,359	2,508	5,94	5,82	0,16	0,03	5,60	5,94
F/11/1/3		3374,19	1948,99	3374,19	2,363	2,508	5,79					
F/11/2/1		3269,55	1886,42	3269,55	2,359	2,508	5,94					
F/11/2/3		3137,36	1814,83	3137,36	2,367	2,508	5,60					
F/12/1/1	8 przejść	3321,08	1942,30	3321,08	2,404	2,508	4,15	4,40	0,35	0,08	4,15	4,65
F/12/1/3		3090,87	1801,01	3090,87	2,391	2,508	4,65					
F/12/2/1		3223,77	1854,11	3223,77	2,349	2,508	6,34					
F/12/2/3		3148,92	1817,75	3148,92	2,361	2,508	5,87					
F/13/1/1	12 przejść	3154,22	1862,52	3154,22	2,437	2,508	2,83	2,79	0,03	0,01	2,76	2,83
F/13/1/3		3284,91	1940,30	3284,91	2,438	2,508	2,79					
F/13/2/1		3304,32	1952,16	3304,32	2,439	2,508	2,76					
F/13/2/3		3116,91	1840,99	3116,91	2,438	2,508	2,79					
F/14/1/1	16 przejść	3137,02	1865,97	3137,02	2,463	2,508	1,79	1,82	0,14	0,08	1,66	1,99
F/14/1/3		3308,05	1964,91	3308,05	2,458	2,508	1,99					
F/14/2/1		3142,73	1871,07	3142,73	2,466	2,508	1,66					
F/14/2/3		3306,81	1966,36	3306,81	2,462	2,508	1,83					

Wartości przekreślone – wykluczone z obliczeń

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.4.7. Zawartość wolnych przestrzeni w próbkach prostopadłościennych z betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem zwykłym 50/70 – temperatura zagęszczenia 135 °C

Nr próbki	Ilość przejść elementu zagęszczającego	Masa w powietrzu [g]	Masa w wodzie [g]	Masa po nasyceniu [g]	Gęstość pozorna [g/cm ³]	Gęstość właściwa [g/cm ³]	Zawartość wolnych przestrzeni [%]	Średnia zawartość wolnych przestrzeni [%]	Odchylenie standardowe [%]	Wsp. zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
A/15/1/1	6 przejść	3197,93	1861,60	3197,93	2,388	2,508	4,77	5,02	0,40	0,08	4,61	5,45
A/15/1/3		3211,86	1860,16	3211,86	2,371	2,508	5,45					
A/15/2/1		3220,31	1867,59	3220,31	2,376	2,508	5,27					
A/15/2/3		3188,87	1858,63	3188,87	2,392	2,508	4,61					
A/16/1/1	8 przejść	3220,31	1867,59	3220,31	2,376	2,508	5,27	4,50	0,58	0,13	3,94	5,27
A/16/1/3		3188,87	1858,63	3188,87	2,392	2,508	4,61					
A/16/2/1		3264,03	1911,90	3264,03	2,409	2,508	3,94					
A/16/2/3		3127,40	1828,69	3127,40	2,403	2,508	4,18					
A/17/1/1	12 przejść	3170,53	1859,52	3170,53	2,414	2,508	3,77	3,24	0,46	0,14	2,65	3,77
A/17/1/3		3218,67	1893,29	3218,67	2,424	2,508	3,36					
A/17/2/1		3272,64	1934,94	3272,64	2,442	2,508	2,65					
A/17/2/3		3102,53	1827,36	3102,53	2,428	2,508	3,18					
A/18/1/1	16 przejść	3195,02	1881,08	3195,02	2,427	2,508	3,24	2,68	0,44	0,16	2,16	3,24
A/18/1/3		3245,64	1919,11	3245,64	2,442	2,508	2,64					
A/18/2/1		3278,70	1945,20	3278,70	2,454	2,508	2,16					
A/18/2/3		3143,78	1858,17	3143,78	2,440	2,508	2,69					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.4.8. Zawartość wolnych przestrzeni w próbkach prostopadłościennych z betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem zwykłym 50/70 i dodatkiem Sasobit – temperatura zagęszczenia 110 °C

Nr próbki	Ilość przejść elementu zagęszczającego	Masa w powietrzu [g]	Masa w wodzie [g]	Masa po nasyceniu [g]	Gęstość pozorna [g/cm ³]	Gęstość właściwa [g/cm ³]	Zawartość wolnych przestrzeni [%]	Średnia zawartość wolnych przestrzeni [%]	Odchylenie standardowe [%]	Wsp. zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
B/15/1/1	6 przejść	3144,00	1823,51	3144,00	2,376	2,508	5,26	5,10	0,19	0,04	4,90	5,27
B/15/1/3		3215,58	1864,78	3215,58	2,376	2,508	5,27					
B/15/2/1		3178,45	1847,26	3178,45	2,383	2,508	4,99					
B/15/2/3		3214,26	1869,33	3214,26	2,385	2,508	4,90					
B/16/1/1	8 przejść	3208,72	1879,55	3208,72	2,409	2,508	3,94	3,79	0,13	0,03	3,66	3,94
B/16/1/3		3202,28	1876,90	3202,28	2,411	2,508	3,86					
B/16/2/1		3188,51	1871,51	3188,51	2,416	2,508	3,66					
B/16/2/3		3196,64	1875,61	3196,64	2,415	2,508	3,71					
B/17/1/1	12 przejść	3250,05	1914,34	3250,05	2,428	2,508	3,18	3,08	0,15	0,05	2,87	3,20
B/17/1/3		3122,14	1838,70	3122,14	2,428	2,508	3,20					
B/17/2/1		3267,75	1929,07	3267,75	2,436	2,508	2,87					
B/17/2/3		3165,30	1865,83	3165,30	2,431	2,508	3,07					
B/18/1/1	16 przejść	3221,34	1901,08	3221,34	2,435	2,508	2,91	2,81	0,07	0,02	2,76	2,91
B/18/1/3		3166,45	1870,57	3166,45	2,439	2,508	2,77					
B/18/2/1		3171,52	1873,21	3171,52	2,438	2,508	2,79					
B/18/2/3		3188,15	1883,49	3188,15	2,439	2,508	2,76					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.4.9. Zawartość wolnych przestrzeni w próbkach prostopadłościennych z betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem zwykłym 50/70 i dodatkiem Licomont BS100 – temperatura zagęszczenia 110 °C

Nr próbki	Ilość przejść elementu zagęszczającego	Masa w powietrzu [g]	Masa w wodzie [g]	Masa po nasyceniu [g]	Gęstość pozorna [g/cm ³]	Gęstość właściwa [g/cm ³]	Zawartość wolnych przestrzeni [%]	Średnia zawartość wolnych przestrzeni [%]	Odchylenie standardowe [%]	Wsp. zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
C/15/1/1	6 przejść	3137,66	1814,85	3137,66	2,367	2,508	5,61	4,90	0,49	0,10	4,48	5,61
C/15/1/3		3175,92	1848,18	3175,92	2,387	2,508	4,82					
C/15/2/1		3197,49	1862,37	3197,49	2,390	2,508	4,70					
C/15/2/3		3169,57	1849,10	3169,57	2,396	2,508	4,48					
C/16/1/1	8 przejść	3035,58	1769,62	3035,58	2,393	2,508	4,58	4,00	0,50	0,13	3,45	4,58
C/16/1/3		3376,07	1973,30	3376,07	2,402	2,508	4,23					
C/16/2/1		3224,47	1891,50	3224,47	2,414	2,508	3,74					
C/16/2/3		3176,82	1867,46	3176,82	2,421	2,508	3,45					
C/17/1/1	12 przejść	2968,38	1744,75	2968,38	2,421	2,508	3,47	3,11	0,24	0,08	2,97	3,47
C/17/1/3		3432,11	2024,29	3432,11	2,433	2,508	2,99					
C/17/2/1		3210,42	1893,14	3210,42	2,432	2,508	3,02					
C/17/2/3		3187,10	1880,03	3187,10	2,433	2,508	2,97					
C/18/1/1	16 przejść	3066,54	1807,90	3066,54	2,432	2,508	3,05	2,62	0,43	0,16	2,14	3,05
C/18/1/3		3275,50	1932,93	3275,50	2,435	2,508	2,92					
C/18/2/1		3168,80	1880,27	3168,80	2,454	2,508	2,14					
C/18/2/3		3246,28	1922,92	3246,28	2,448	2,508	2,39					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.4.10. Zawartość wolnych przestrzeni w próbkach prostopadłościennych z betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem zwykłym 50/70 i dodatkiem Rediset WMX – temperatura zagęszczenia 110 °C

Nr próbki	Ilość przejść elementu zagęszczającego	Masa w powietrzu [g]	Masa w wodzie [g]	Masa po nasyceniu [g]	Gęstość pozorna [g/cm ³]	Gęstość właściwa [g/cm ³]	Zawartość wolnych przestrzeni [%]	Średnia zawartość wolnych przestrzeni [%]	Odchylenie standardowe [%]	Wsp. zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
D/15/1/1	6 przejść	3032,94	1773,44	3032,94	2,403	2,508	4,18	4,65	0,67	0,14	3,98	5,26
D/15/1/3		3359,15	1967,07	3359,15	2,408	2,508	3,98					
D/15/2/1		3297,10	1912,23	3297,10	2,376	2,508	5,26					
D/15/2/3		3096,98	1797,27	3096,98	2,378	2,508	5,18					
D/16/1/1	8 przejść	3156,02	1857,30	3156,02	2,425	2,508	3,30	3,92	0,82	0,21	3,12	4,64
D/16/1/3		3215,89	1894,95	3215,89	2,430	2,508	3,12					
D/16/2/1		3272,49	1907,40	3272,49	2,392	2,508	4,61					
D/16/2/3		3133,46	1825,91	3133,46	2,392	2,508	4,64					
D/17/1/1	12 przejść	3277,27	1932,83	3277,27	2,433	2,508	3,00	2,86	0,23	0,08	2,52	3,00
D/17/1/3		3099,28	1834,16	3099,28	2,445	2,508	2,52					
D/17/2/1		3266,04	1927,14	3266,04	2,434	2,508	2,93					
D/17/2/3		3113,07	1836,16	3113,07	2,433	2,508	2,99					
D/18/1/1	16 przejść	3143,40	1854,59	3143,40	2,434	2,508	2,95	2,84	0,11	0,04	2,70	2,95
D/18/1/3		3279,70	1938,43	3279,70	2,440	2,508	2,70					
D/18/2/1		3304,19	1951,15	3304,19	2,437	2,508	2,82					
D/18/2/3		3132,94	1849,17	3132,94	2,436	2,508	2,89					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.4.11. Zawartość wolnych przestrzeni w próbkach prostopadłościennych z betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem zwykłym 50/70 i dodatkiem Ceca Base RT – temperatura zagęszczenia 110 °C

Nr próbki	Ilość przejść elementu zagęszczającego	Masa w powietrzu [g]	Masa w wodzie [g]	Masa po nasyceniu [g]	Gęstość pozorna [g/cm ³]	Gęstość właściwa [g/cm ³]	Zawartość wolnych przestrzeni [%]	Średnia zawartość wolnych przestrzeni [%]	Odchylenie standardowe [%]	Wsp. zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
E/15/1/1	6 przejść	3156,47	1826,50	3156,47	2,369	2,508	5,56	5,16	0,34	0,07	4,83	5,56
E/15/1/3		3230,22	1879,65	3230,22	2,387	2,508	4,83					
E/15/2/1		3272,29	1896,96	3272,29	2,375	2,508	5,32					
E/15/2/3		3134,99	1823,00	3134,99	2,385	2,508	4,92					
E/16/1/1	8 przejść	3046,63	1778,74	3046,63	2,398	2,508	4,38	4,37	0,06	0,01	4,28	4,41
E/16/1/3		3342,47	1951,04	3342,47	2,397	2,508	4,41					
E/16/2/1		3209,99	1873,70	3209,99	2,397	2,508	4,41					
E/16/2/3		3191,66	1864,85	3191,66	2,401	2,508	4,28					
E/17/1/1	12 przejść	3021,02	1763,01	3021,02	2,397	2,508	4,44	3,99	0,59	0,15	3,41	4,54
E/17/1/3		3399,51	1982,37	3399,51	2,394	2,508	4,54					
E/17/2/1		3187,62	1872,44	3187,62	2,419	2,508	3,55					
E/17/2/3		3225,69	1896,82	3225,69	2,423	2,508	3,41					
E/18/1/1	16 przejść	3015,72	1763,03	3015,72	2,403	2,508	4,20	3,63	0,65	0,18	2,91	4,20
E/18/1/3		3396,26	1986,15	3396,26	2,404	2,508	4,16					
E/18/2/1		3264,91	1926,76	3264,91	2,435	2,508	2,91					
E/18/2/3		3175,93	1869,72	3175,93	2,427	2,508	3,25					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.4.12. Zawartość wolnych przestrzeni w próbkach prostopadłościennych z betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem zwykłym 50/70 i dodatkiem zeolitu – temperatura zagęszczenia 110 °C

Nr próbki	Ilość przejść elementu zagęszczającego	Masa w powietrzu [g]	Masa w wodzie [g]	Masa po nasyceniu [g]	Gęstość pozorna [g/cm ³]	Gęstość właściwa [g/cm ³]	Zawartość wolnych przestrzeni [%]	Średnia zawartość wolnych przestrzeni [%]	Odchylenie standardowe [%]	Wsp. zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
F/15/1/1	6 przejść	3145,87	1829,92	3145,87	2,386	2,508	4,87	4,97	0,38	0,08	4,52	5,43
F/15/1/3		3236,85	1887,81	3236,85	2,395	2,508	4,52					
F/15/2/1		3213,74	1861,43	3213,74	2,372	2,508	5,43					
F/15/2/3		3183,98	1849,47	3183,98	2,381	2,508	5,06					
F/16/1/1	8 przejść	3286,90	1930,26	3286,90	2,418	2,508	3,59	3,83	0,27	0,07	3,59	4,08
F/16/1/3		3127,81	1836,44	3127,81	2,417	2,508	3,62					
F/16/2/1		3243,53	1898,45	3243,53	2,407	2,508	4,04					
F/16/2/3		3181,54	1861,67	3181,54	2,406	2,508	4,08					
F/17/1/1	12 przejść	3190,22	1878,15	3190,22	2,427	2,508	3,25	3,12	0,10	0,03	3,01	3,25
F/17/1/3		3240,93	1909,82	3240,93	2,430	2,508	3,11					
F/17/2/1		3187,51	1878,13	3187,51	2,429	2,508	3,13					
F/17/2/3		3242,39	1912,18	3242,39	2,433	2,508	3,01					
F/18/1/1	16 przejść	3138,69	1849,62	3138,69	2,430	2,508	3,11	2,83	0,19	0,07	2,68	3,11
F/18/1/3		3276,14	1935,46	3276,14	2,439	2,508	2,76					
F/18/2/1		3158,94	1867,29	3158,94	2,441	2,508	2,68					
F/18/2/3		3237,55	1912,47	3237,55	2,438	2,508	2,78					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.4.13. Zawartość wolnych przestrzeni w próbkach prostopadłościennych z betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 – temperatura zagęszczenia 160 °C

Nr próbki	Ilość przejść elementu zagęszczającego	Masa w powietrzu [g]	Masa w wodzie [g]	Masa po nasyceniu [g]	Gęstość pozorna [g/cm ³]	Gęstość właściwa [g/cm ³]	Zawartość wolnych przestrzeni [%]	Średnia zawartość wolnych przestrzeni [%]	Odchylenie standardowe [%]	Wsp. zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
G/11/1/1	6 przejść	3236,42	1902,72	3236,42	2,422	2,496	2,97	2,88	0,29	0,10	2,47	3,17
G/11/1/3		3168,89	1863,61	3168,89	2,423	2,496	2,93					
G/11/2/1		3291,89	1932,62	3291,89	2,417	2,496	3,17					
G/11/2/3		3340,41	1970,95	3340,41	2,434	2,496	2,47					
G/12/1/1	8 przejść	3144,69	1844,36	3144,69	2,414	2,496	3,30	3,18	0,40	0,13	2,68	3,64
G/12/1/3		3245,74	1906,44	3245,74	2,419	2,496	3,10					
G/12/2/1		3171,72	1855,65	3171,72	2,405	2,496	3,64					
G/12/2/3		3208,84	1890,43	3208,84	2,429	2,496	2,68					
G/13/1/1	12 przejść	3165,24	1868,69	3165,24	2,436	2,496	2,39	2,60	0,52	0,20	2,32	3,38
G/13/1/3		3241,54	1914,62	3241,54	2,438	2,496	2,32					
G/13/2/1		3166,58	1856,19	3166,58	2,412	2,496	3,38					
G/13/2/3		3219,80	1901,68	3219,80	2,438	2,496	2,33					
G/14/1/1	16 przejść	3157,81	1870,77	3157,81	2,449	2,496	1,90	2,03	0,35	0,17	1,78	2,54
G/14/1/3		3241,42	1920,40	3241,42	2,449	2,496	1,89					
G/14/2/1		3138,98	1851,16	3138,98	2,433	2,496	2,54					
G/14/2/3		3254,53	1929,63	3254,53	2,452	2,496	1,78					

Tablica Z.4.14. Zawartość wolnych przestrzeni w próbkach prostopadłościennych z betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 i dodatkiem Sasobit – temperatura zagęszczenia 135 °C

Nr próbki	Ilość przejść elementu zagęszczającego	Masa w powietrzu [g]	Masa w wodzie [g]	Masa po nasyceniu [g]	Gęstość pozorna [g/cm ³]	Gęstość właściwa [g/cm ³]	Zawartość wolnych przestrzeni [%]	Średnia zawartość wolnych przestrzeni [%]	Odchylenie standardowe [%]	Wsp. zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
H/11/1/1	6 przejść	3059,00	1790,60	3059,00	2,407	2,496	3,57	3,77	0,60	0,16	3,33	4,67
H/11/1/3		3231,75	1892,39	3231,75	2,408	2,496	3,52					
H/11/2/1		3112,94	1807,35	3112,94	2,380	2,496	4,67					
H/11/2/3		3199,19	1875,95	3199,19	2,413	2,496	3,33					
H/12/1/1	8 przejść	3202,12	1877,66	3202,12	2,413	2,496	3,33	3,12	0,38	0,12	2,60	3,47
H/12/1/3		3187,83	1872,79	3187,83	2,419	2,496	3,07					
H/12/2/1		3158,48	1850,16	3158,48	2,409	2,496	3,47					
H/12/2/3		3209,14	1891,71	3209,14	2,431	2,496	2,60					
H/13/1/1	12 przejść	3113,17	1840,04	3113,17	2,440	2,496	2,23	2,35	0,34	0,15	2,01	2,83
H/13/1/3		3255,57	1927,10	3255,57	2,446	2,496	2,01					
H/13/2/1		3253,22	1914,62	3253,22	2,425	2,496	2,83					
H/13/2/3		3131,88	1849,73	3131,88	2,438	2,496	2,33					
H/14/1/1	16 przejść	2976,36	1752,14	2976,36	2,426	2,496	2,79	2,56	0,35	0,14	2,04	2,79
H/14/1/3		3230,61	1903,15	3230,61	2,429	2,496	2,69					
H/14/2/1		3165,41	1864,28	3165,41	2,428	2,496	2,73					
H/14/2/3		3230,44	1911,94	3230,44	2,445	2,496	2,04					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.4.15. Zawartość wolnych przestrzeni w próbkach prostopadłościennych z betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 i dodatkiem Licomont BS100 – temperatura zagęszczenia 135 °C

Nr próbki	Ilość przejść elementu zagęszczającego	Masa w powietrzu [g]	Masa w wodzie [g]	Masa po nasyceniu [g]	Gęstość pozorna [g/cm ³]	Gęstość właściwa [g/cm ³]	Zawartość wolnych przestrzeni [%]	Średnia zawartość wolnych przestrzeni [%]	Odchylenie standardowe [%]	Wsp. zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
I/11/1/1	6 przejść	3176,37	1860,80	3176,37	2,410	2,496	3,46	3,59	0,22	0,06	3,44	3,92
I/11/1/3		3185,57	1864,95	3185,57	2,407	2,496	3,55					
I/11/2/1		3022,39	1764,61	3022,39	2,398	2,496	3,92					
I/11/2/3		3384,03	1982,72	3384,03	2,410	2,496	3,44					
I/12/1/1	8 przejść	2966,31	1738,11	2966,31	2,410	2,496	3,43	3,24	0,21	0,07	2,96	3,43
I/12/1/3		3340,45	1960,78	3340,45	2,416	2,496	3,19					
I/12/2/1		3154,10	1848,86	3154,10	2,412	2,496	3,38					
I/12/2/3		3261,95	1917,87	3261,95	2,422	2,496	2,96					
I/13/1/1	12 przejść	3168,38	1865,27	3168,38	2,427	2,496	2,78	2,97	0,19	0,06	2,78	3,16
I/13/1/3		3144,11	1845,97	3144,11	2,417	2,496	3,16					
I/13/2/1		3022,44	1775,19	3022,44	2,418	2,496	3,11					
I/13/2/3		3399,99	2000,82	3399,99	2,425	2,496	2,84					
I/14/1/1	16 przejść	3031,27	1782,61	3031,27	2,423	2,496	2,93	2,81	0,12	0,04	2,65	2,93
I/14/1/3		3365,52	1983,17	3365,52	2,430	2,496	2,65					
I/14/2/1		3147,76	1852,10	3147,76	2,425	2,496	2,86					
I/14/2/3		3215,75	1893,30	3215,75	2,427	2,496	2,77					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.4.16. Zawartość wolnych przestrzeni w próbkach prostopadłościennych z betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 i dodatkiem Rediset WMX – temperatura zagęszczenia 135 °C

Nr próbki	Ilość przejść elementu zagęszczającego	Masa w powietrzu [g]	Masa w wodzie [g]	Masa po nasyceniu [g]	Gęstość pozorna [g/cm ³]	Gęstość właściwa [g/cm ³]	Zawartość wolnych przestrzeni [%]	Średnia zawartość wolnych przestrzeni [%]	Odchylenie standardowe [%]	Wsp. zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
K/11/1/1	6 przejść	3187,30	1870,72	3187,30	2,416	2,496	3,20	3,17	0,30	0,09	2,87	3,56
K/11/1/3		3241,78	1907,32	3241,78	2,424	2,496	2,87					
K/11/2/1		3193,70	1869,57	3193,70	2,407	2,496	3,56					
K/11/2/3		3193,19	1876,36	3193,19	2,420	2,496	3,04					
K/12/1/1	8 przejść	3157,81	1864,26	3157,81	2,436	2,496	2,39	2,58	0,29	0,11	2,39	3,02
K/12/1/3		3252,23	1919,60	3252,23	2,436	2,496	2,42					
K/12/2/1		3152,01	1852,52	3152,01	2,421	2,496	3,02					
K/12/2/3		3237,71	1909,87	3237,71	2,433	2,496	2,51					
K/13/1/1	12 przejść	3150,76	1850,00	3150,76	2,417	2,496	3,15	2,64	0,40	0,15	2,23	3,15
K/13/1/3		3238,55	1911,29	3238,55	2,435	2,496	2,44					
K/13/2/1		3139,07	1848,32	3139,07	2,427	2,496	2,76					
K/13/2/3		3230,02	1909,12	3230,02	2,440	2,496	2,23					
K/14/1/1	16 przejść	3138,81	1849,68	3138,81	2,430	2,496	2,65	2,29	0,28	0,12	1,97	2,65
K/14/1/3		3249,43	1919,57	3249,43	2,439	2,496	2,30					
K/14/2/1		3185,37	1882,50	3185,37	2,440	2,496	2,24					
K/14/2/3		3214,79	1903,60	3214,79	2,447	2,496	1,97					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.4.17. Zawartość wolnych przestrzeni w próbkach prostopadłościennych z betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 i dodatkiem Ceca Base RT – temperatura zagęszczenia 135 °C

Nr próbki	Ilość przejść elementu zagęszczającego	Masa w powietrzu [g]	Masa w wodzie [g]	Masa po nasyceniu [g]	Gęstość pozorna [g/cm ³]	Gęstość właściwa [g/cm ³]	Zawartość wolnych przestrzeni [%]	Średnia zawartość wolnych przestrzeni [%]	Odchylenie standardowe [%]	Wsp. zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
L/11/1/1	6 przejść	3155,16	1823,22	3155,16	2,364	2,496	5,28	4,91	0,35	0,07	4,48	5,28
L/11/1/3		3238,86	1878,53	3238,86	2,376	2,496	4,80					
L/11/2/1		3130,04	1811,74	3130,04	2,370	2,496	5,07					
L/11/2/3		3247,37	1888,05	3247,37	2,384	2,496	4,48					
L/12/1/1	8 przejść	3191,68	1850,71	3191,68	2,375	2,496	4,83	4,51	0,23	0,05	4,29	4,83
L/12/1/3		3204,93	1866,08	3204,93	2,389	2,496	4,29					
L/12/2/1		3199,66	1860,40	3199,66	2,384	2,496	4,47					
L/12/2/3		3188,20	1854,14	3188,20	2,385	2,496	4,44					
L/13/1/1	12 przejść	3193,90	1882,19	3193,90	2,430	2,496	2,64	2,90	0,21	0,07	2,64	3,14
L/13/1/3		3159,49	1858,92	3159,49	2,424	2,496	2,87					
L/13/2/1		3162,23	1856,80	3162,23	2,418	2,496	3,14					
L/13/2/3		3216,03	1891,35	3216,03	2,423	2,496	2,93					
L/14/1/1	16 przejść	3194,85	1859,82	3194,85	2,388	2,496	4,31	4,34	0,22	0,05	4,05	4,56
L/14/1/3		3227,61	1875,47	3227,61	2,382	2,496	4,56					
L/14/2/1		3193,46	1857,22	3193,46	2,385	2,496	4,44					
L/14/2/3		3253,21	1897,54	3253,21	2,395	2,496	4,05					

Wartości przekreślone – wykluczone z obliczeń

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.4.18. Zawartość wolnych przestrzeni w próbkach prostopadłościennych z betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 i dodatkiem zeolitu – temperatura zagęszczenia 135 °C

Nr próbki	Ilość przejść elementu zagęszczającego	Masa w powietrzu [g]	Masa w wodzie [g]	Masa po nasyceniu [g]	Gęstość pozorna [g/cm ³]	Gęstość właściwa [g/cm ³]	Zawartość wolnych przestrzeni [%]	Średnia zawartość wolnych przestrzeni [%]	Odchylenie standardowe [%]	Wsp. zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
M/11/1/1	6 przejść	3224,68	1868,36	3224,68	2,373	2,496	4,94	4,99	0,26	0,05	4,81	5,37
M/11/1/3		3153,02	1828,19	3153,02	2,375	2,496	4,84					
M/11/2/1		3212,59	1855,13	3212,59	2,362	2,496	5,37					
M/11/2/3		3101,69	1798,81	3101,69	2,376	2,496	4,81					
M/12/1/1	8 przejść	3205,61	1883,05	3205,61	2,419	2,496	3,09	3,11	0,12	0,04	2,99	3,28
M/12/1/3		3184,70	1868,16	3184,70	2,414	2,496	3,28					
M/12/2/1		3208,03	1885,78	3208,03	2,421	2,496	2,99					
M/12/2/3		3191,75	1874,87	3191,75	2,419	2,496	3,09					
M/13/1/1	12 przejść	3190,43	1854,69	3190,43	2,384	2,496	4,50	5,04	1,85	0,37	3,81	7,78
M/13/1/3		3323,62	1882,56	3323,62	2,302	2,496	7,78					
M/13/2/1		2994,60	1746,54	2994,60	2,395	2,496	4,06					
M/13/2/3		3451,10	2016,52	3451,10	2,401	2,496	3,81					
M/14/1/1	16 przejść	3184,01	1870,95	3184,01	2,420	2,496	3,04	2,76	0,30	0,11	2,40	3,04
M/14/1/3		3218,10	1896,33	3218,10	2,430	2,496	2,65					
M/14/2/1		3176,42	1867,50	3176,42	2,422	2,496	2,97					
M/14/2/3		3250,05	1918,66	3250,05	2,436	2,496	2,40					

Wartości przekreślone – wykluczone z obliczeń

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.4.19. Zawartość wolnych przestrzeni w próbkach prostopadłościennych z betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 – temperatura zagęszczenia 135 °C

Nr próbki	Ilość przejść elementu zagęszczającego	Masa w powietrzu [g]	Masa w wodzie [g]	Masa po nasyceniu [g]	Gęstość pozorna [g/cm ³]	Gęstość właściwa [g/cm ³]	Zawartość wolnych przestrzeni [%]	Średnia zawartość wolnych przestrzeni [%]	Odchylenie standardowe [%]	Wsp. zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
G/15/1/1	6 przejść	3151,17	1841,19	3151,17	2,401	2,496	3,82	3,88	0,21	0,05	3,64	4,14
G/15/1/3		3223,57	1886,01	3223,57	2,405	2,496	3,64					
G/15/2/1		3198,88	1867,75	3198,88	2,398	2,496	3,91					
G/15/2/3		3195,55	1862,66	3195,55	2,393	2,496	4,14					
G/16/1/1	8 przejść	3141,13	1843,87	3141,13	2,417	2,496	3,18	3,07	0,39	0,13	2,71	3,58
G/16/1/3		3243,32	1908,86	3243,32	2,426	2,496	2,82					
G/16/2/1		3164,75	1852,42	3164,75	2,407	2,496	3,58					
G/16/2/3		3213,07	1892,62	3213,07	2,428	2,496	2,71					
G/17/1/1	16 przejść	3144,21	1844,99	3144,21	2,415	2,496	3,24	3,17	0,29	0,09	2,81	3,51
G/17/1/3		3236,51	1900,84	3236,51	2,418	2,496	3,11					
G/17/2/1		3172,03	1857,58	3172,03	2,408	2,496	3,51					
G/17/2/3		3191,52	1878,55	3191,52	2,426	2,496	2,81					
G/18/1/1	16 przejść	3153,95	1866,59	3153,95	2,445	2,496	2,04	2,05	0,08	0,04	2,00	2,16
G/18/1/3		3233,72	1914,39	3233,72	2,446	2,496	2,00					
G/18/2/1		3179,82	1880,34	3179,82	2,442	2,496	2,16					
G/18/2/3		3226,04	1909,84	3226,04	2,446	2,496	2,00					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.4.20. Zawartość wolnych przestrzeni w próbkach prostopadłościennych z betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 i dodatkiem Sasobit – temperatura zagęszczenia 110 °C

Nr próbki	Ilość przejść elementu zagęszczającego	Masa w powietrzu [g]	Masa w wodzie [g]	Masa po nasyceniu [g]	Gęstość pozorna [g/cm ³]	Gęstość właściwa [g/cm ³]	Zawartość wolnych przestrzeni [%]	Średnia zawartość wolnych przestrzeni [%]	Odchylenie standardowe [%]	Wsp. zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
H/15/1/1	6 przejść	3132,54	1818,44	3132,54	2,379	2,496	4,69	4,57	0,11	0,02	4,43	4,69
H/15/1/3		3210,25	1867,12	3210,25	2,385	2,496	4,43					
H/15/2/1		3247,71	1886,42	3247,71	2,381	2,496	4,61					
H/15/2/3		3191,90	1854,92	3191,90	2,383	2,496	4,54					
H/16/1/1	8 przejść	3152,46	1843,30	3152,46	2,403	2,496	3,72	3,51	0,30	0,09	3,21	3,81
H/16/1/3		3271,22	1918,91	3271,22	2,414	2,496	3,28					
H/16/2/1		3236,71	1891,26	3236,71	2,401	2,496	3,81					
H/16/2/3		3184,69	1869,08	3184,69	2,416	2,496	3,21					
H/17/1/1	12 przejść	3105,00	1826,82	3105,00	2,424	2,496	2,87	2,57	0,25	0,10	2,25	2,87
H/17/1/3		3265,44	1925,56	3265,44	2,432	2,496	2,55					
H/17/2/1		3168,16	1867,55	3168,16	2,431	2,496	2,60					
H/17/2/3		3216,92	1901,08	3216,92	2,440	2,496	2,25					
H/18/1/1	16 przejść	3182,92	1874,96	3182,92	2,429	2,496	2,70	2,62	0,13	0,05	2,47	2,74
H/18/1/3		3203,48	1888,98	3203,48	2,432	2,496	2,56					
H/18/2/1		3188,87	1877,87	3188,87	2,428	2,496	2,74					
H/18/2/3		3221,11	1900,54	3221,11	2,434	2,496	2,47					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.4.21. Zawartość wolnych przestrzeni w próbkach prostopadłościennych z betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 i dodatkiem Licomont BS100 – temperatura zagęszczenia 110 °C

Nr próbki	Ilość przejść elementu zagęszczającego	Masa w powietrzu [g]	Masa w wodzie [g]	Masa po nasyceniu [g]	Gęstość pozorna [g/cm ³]	Gęstość właściwa [g/cm ³]	Zawartość wolnych przestrzeni [%]	Średnia zawartość wolnych przestrzeni [%]	Odchylenie standardowe [%]	Wsp. zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
I/15/1/1	6 przejść	3092,62	1804,86	3092,62	2,397	2,496	3,98	3,79	0,30	0,08	3,51	4,12
I/15/1/3		3288,54	1924,94	3288,54	2,407	2,496	3,57					
I/15/2/1		3128,48	1823,86	3128,48	2,393	2,496	4,12					
I/15/2/3		3241,82	1898,42	3241,82	2,408	2,496	3,51					
I/16/1/1	8 przejść	3157,41	1846,76	3157,41	2,404	2,496	3,68	3,21	0,39	0,12	2,82	3,68
I/16/1/3		3279,22	1930,00	3279,22	2,426	2,496	2,82					
I/16/2/1		3155,82	1849,76	3155,82	2,411	2,496	3,39					
I/16/2/3		3249,02	1910,12	3249,02	2,422	2,496	2,97					
I/17/1/1	12 przejść	3137,79	1849,03	3137,79	2,430	2,496	2,65	2,33	0,22	0,09	2,15	2,65
I/17/1/3		3231,27	1910,02	3231,27	2,441	2,496	2,21					
I/17/2/1		3177,89	1877,14	3177,89	2,438	2,496	2,31					
I/17/2/3		3215,86	1901,75	3215,86	2,442	2,496	2,15					
I/18/1/1	16 przejść	3124,40	1842,74	3124,40	2,433	2,496	2,53	2,41	0,17	0,07	2,19	2,55
I/18/1/3		3224,19	1903,92	3224,19	2,437	2,496	2,36					
I/18/2/1		3126,82	1843,93	3126,82	2,432	2,496	2,55					
I/18/2/3		3251,24	1922,12	3251,24	2,441	2,496	2,19					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.4.22. Zawartość wolnych przestrzeni w próbkach prostopadłościennych z betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 i dodatkiem Rediset WMX – temperatura zagęszczenia 110 °C

Nr próbki	Ilość przejść elementu zagęszczającego	Masa w powietrzu [g]	Masa w wodzie [g]	Masa po nasyceniu [g]	Gęstość pozorna [g/cm ³]	Gęstość właściwa [g/cm ³]	Zawartość wolnych przestrzeni [%]	Średnia zawartość wolnych przestrzeni [%]	Odchylenie standardowe [%]	Wsp. zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
K/15/1/1	6 przejść	3170,42	1848,79	3170,42	2,394	2,496	4,08	3,65	0,37	0,10	3,20	4,08
K/15/1/3		3243,22	1898,75	3243,22	2,407	2,496	3,55					
K/15/2/1		3214,45	1879,08	3214,45	2,402	2,496	3,75					
K/15/2/3		3185,99	1870,00	3185,99	2,416	2,496	3,20					
K/16/1/1	8 przejść	3229,21	1897,15	3229,21	2,419	2,496	3,07	3,00	0,27	0,09	2,72	3,34
K/16/1/3		3172,87	1866,73	3172,87	2,424	2,496	2,87					
K/16/2/1		3165,16	1855,91	3165,16	2,413	2,496	3,34					
K/16/2/3		3226,43	1900,29	3226,43	2,428	2,496	2,72					
K/17/1/1	12 przejść	3196,39	1880,61	3196,39	2,424	2,496	2,87	2,61	0,18	0,07	2,45	2,87
K/17/1/3		3212,74	1894,67	3212,74	2,433	2,496	2,54					
K/17/2/1		3215,98	1897,81	3215,98	2,435	2,496	2,45					
K/17/2/3		3204,38	1889,13	3204,38	2,431	2,496	2,59					
K/18/1/1	16 przejść	3153,51	1860,16	3153,51	2,433	2,496	2,51	2,49	0,28	0,11	2,22	2,88
K/18/1/3		3267,95	1931,60	3267,95	2,441	2,496	2,22					
K/18/2/1		3187,28	1875,11	3187,28	2,424	2,496	2,88					
K/18/2/3		3214,98	1898,56	3214,98	2,437	2,496	2,35					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.4.23. Zawartość wolnych przestrzeni w próbkach prostopadłościennych z betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 i dodatkiem Ceca Base RT – temperatura zagęszczenia 110 °C

Nr próbki	Ilość przejść elementu zagęszczającego	Masa w powietrzu [g]	Masa w wodzie [g]	Masa po nasyceniu [g]	Gęstość pozorna [g/cm ³]	Gęstość właściwa [g/cm ³]	Zawartość wolnych przestrzeni [%]	Średnia zawartość wolnych przestrzeni [%]	Odchylenie standardowe [%]	Wsp. zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
L/15/1/1	6 przejść	3158,34	1833,96	3158,34	2,380	2,496	4,65	4,41	0,24	0,05	4,08	4,65
L/15/1/3		3232,49	1884,98	3232,49	2,394	2,496	4,08					
L/15/2/1		3218,49	1872,61	3218,49	2,387	2,496	4,38					
L/15/2/3		3175,51	1845,76	3175,51	2,383	2,496	4,52					
L/16/1/1	8 przejść	3201,97	1853,75	3201,97	2,370	2,496	5,04	4,50	0,38	0,08	4,17	5,04
L/16/1/3		3218,18	1871,38	3218,18	2,385	2,496	4,46					
L/16/2/1		3207,16	1866,75	3207,16	2,388	2,496	4,33					
L/16/2/3		3213,17	1872,52	3213,17	2,392	2,496	4,17					
L/17/1/1	12 przejść	3223,87	1892,46	3223,87	2,417	2,496	3,18	3,06	0,24	0,08	2,80	3,33
L/17/1/3		3182,97	1866,39	3182,97	2,413	2,496	3,33					
L/17/2/1		3204,63	1884,76	3204,63	2,423	2,496	2,92					
L/17/2/3		3193,81	1880,02	3193,81	2,426	2,496	2,80					
L/18/1/1	16 przejść	3173,07	1854,33	3173,07	2,401	2,496	3,79	3,80	0,08	0,02	3,71	3,91
L/18/1/3		3237,61	1893,23	3237,61	2,403	2,496	3,71					
L/18/2/1		3197,83	1867,24	3197,83	2,399	2,496	3,91					
L/18/2/3		3171,73	1853,29	3171,73	2,401	2,496	3,81					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.4.24. Zawartość wolnych przestrzeni w próbkach prostopadłościennych z betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 i dodatkiem zeolitu – temperatura zagęszczenia 110 °C

Nr próbki	Ilość przejść elementu zagęszczającego	Masa w powietrzu [g]	Masa w wodzie [g]	Masa po nasyceniu [g]	Gęstość pozorna [g/cm ³]	Gęstość właściwa [g/cm ³]	Zawartość wolnych przestrzeni [%]	Średnia zawartość wolnych przestrzeni [%]	Odchylenie standardowe [%]	Wsp. zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
M/15/1/1	6 przejść	3039,11	1762,97	3039,11	2,377	2,496	4,78	4,49	0,20	0,04	4,35	4,78
M/15/1/3		3331,65	1938,93	3331,65	2,387	2,496	4,35					
M/15/2/1		3174,81	1846,03	3174,81	2,384	2,496	4,47					
M/15/2/3		3200,80	1862,60	3200,80	2,387	2,496	4,36					
M/16/1/1	8 przejść	3161,01	1841,61	3161,01	2,391	2,496	4,21	4,27	0,12	0,03	4,14	4,40
M/16/1/3		3187,19	1855,18	3187,19	2,388	2,496	4,33					
M/16/2/1		3202,28	1862,99	3202,28	2,386	2,496	4,40					
M/16/2/3		3201,04	1865,86	3201,04	2,393	2,496	4,14					
M/17/1/1	12 przejść	3190,86	1859,64	3190,86	2,392	2,496	4,16	4,13	0,29	0,07	3,74	4,44
M/17/1/3		3207,43	1875,20	3207,43	2,403	2,496	3,74					
M/17/2/1		3203,62	1863,11	3203,62	2,385	2,496	4,44					
M/17/2/3		3233,17	1884,06	3233,17	2,392	2,496	4,18					
M/18/1/1	16 przejść	3181,75	1871,68	3181,75	2,424	2,496	2,89	2,61	0,20	0,08	2,46	2,89
M/18/1/3		3222,69	1899,76	3222,69	2,431	2,496	2,60					
M/18/2/1		3211,84	1895,20	3211,84	2,435	2,496	2,46					
M/18/2/3		3181,38	1877,07	3181,38	2,434	2,496	2,47					

**ZAŁĄCZNIK 5 – WYNIKI BADAŃ ODPORNOŚCI NA DZIAŁANIE
WODY I MROZU BETONÓW ASFALTOWYCH WYTWORZONYCH
W WARUNKACH LABORATORYJNYCH**

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.5.1. Wyniki badań odporności na działanie wody i mrozu betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem zwykłym 50/70

Rodzaj grupy	Nr próbki	Wysokość średnia [mm]	Średnica średnia [mm]	Masa w powietrzu [g]	Masa w wodzie [g]	Masa w pow. po nasączeniu [g]	Gęstość pozorna [g/cm ³]	Gęstość właściwa [g/cm ³]	Wolna przestrzeń [%]	Siła niszcząca [kN]
Próbki referencyjne	A41	58,3	101,0	1086,50	659,75	1088,15	2,531	2,508	-0,9	15,90
	A48	59,3	101,0	1134,82	651,89	1135,17	2,343	2,508	6,6	19,60
	A49	57,7	101,0	1103,97	654,08	1103,99	2,449	2,508	2,4	14,85
Kondycjonowanie bez cyklu zamrażania	A43	61,3	101,0	1151,05	653,54	1152,30	2,303	2,508	8,2	15,80
	A45	58,3	101,0	1097,39	676,70	1098,78	2,595	2,508	-3,5	15,10
	A46	58,9	101,0	1121,83	656,22	1122,27	2,402	2,508	4,2	15,20
Kondycjonowanie z cyklem zamrażania	A42	60,7	101,0	1138,30	653,86	1138,66	2,343	2,508	6,6	15,35
	A44	61,0	101,0	1140,49	654,72	1142,64	2,333	2,508	7,0	15,10
	A50	56,1	101,0	1074,66	660,83	1075,48	2,587	2,508	-3,1	13,50

Rodzaj grupy	Nr próbki	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]				Moduł sztywności sprężystej [MPa]					
		Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności
Próbki referencyjne	A41	1,72	1,81	0,24	13%	5654	5833	5744	6500	713	11%
	A48	2,08				6488	6706	6597			
	A49	1,62				7041	7279	7160			
Kondycjonowanie bez cyklu zamrażania	A43	1,62	1,63	0,00	0%	5521	5694	5608	6191	681	11%
	A45	1,63				5933	6118	6026			
	A46	1,63				7048	6829	6939			
Kondycjonowanie z cyklem zamrażania	A42	1,59	1,56	0,04	2%	5569	5401	5485	6952	2108	30%
	A44	1,56				9526	9209	9368			
	A50	1,52				6099	5907	6003			

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.5.2. Wyniki badań odporności na działanie wody i mrozu betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem zwykłym 50/70 i dodatkiem Sasobit

Rodzaj grupy	Nr próbki	Wysokość średnia [mm]	Średnica średnia [mm]	Masa w powietrzu [g]	Masa w wodzie [g]	Masa w pow. po nasączeniu [g]	Gęstość pozorna [g/cm ³]	Gęstość właściwa [g/cm ³]	Wolna przestrzeń [%]	Siła niszcząca [kN]
Próbki referencyjne	B45	56,6	101,0	1066,50	621,52	1066,88	2,390	2,508	4,7	16,00
	B46	61,6	101,0	1157,13	674,30	1157,96	2,388	2,508	4,8	16,95
	B48	61,8	101,0	1151,49	669,66	1152,84	2,378	2,508	5,2	18,85
Kondycjonowanie bez cyklu zamrażania	B41	60,8	101,0	1157,69	628,94	1157,96	2,184	2,508	12,9	19,00
	B43	60,2	101,0	1131,96	658,59	1132,66	2,383	2,508	5,0	16,10
	B44	52,1	101,0	989,34	579,04	989,95	2,403	2,508	4,2	14,10
Kondycjonowanie z cyklem zamrażania	B42	61,6	101,0	1153,10	661,20	1153,35	2,338	2,508	6,8	16,30
	B47	61,5	101,0	1130,42	653,22	1131,87	2,357	2,508	6,0	14,40
	B50	57,7	101,0	1097,19	643,39	1097,86	2,409	2,508	3,9	14,60

Rodzaj grupy	Nr próbki	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]				Moduł sztywności sprężystej [MPa]					
		Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności
Próbki referencyjne	B45	1,78	1,81	0,10	5%	8369	8082	8226	8624	581	7%
	B46	1,73				8219	8494	8357			
	B48	1,92				9136	9446	9291			
Kondycjonowanie bez cyklu zamrażania	B41	1,97	1,79	0,16	9%	9356	9044	9200	9225	122	1%
	B43	1,69				9265	8969	9117			
	B44	1,71				9198	9518	9358			
Kondycjonowanie z cyklem zamrażania	B42	1,67	1,58	0,10	6%	8086	7805	7946	7791	718	9%
	B47	1,48				7113	6902	7008			
	B50	1,59				8293	8544	8419			

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.5.3. Wyniki badań odporności na działanie wody i mrozu betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem zwykłym 50/70 i dodatkiem Licomont BS100

Rodzaj grupy	Nr próbki	Wysokość średnia [mm]	Średnica średnia [mm]	Masa w powietrzu [g]	Masa w wodzie [g]	Masa w pow. po nasączeniu [g]	Gęstość pozorna [g/cm ³]	Gęstość właściwa [g/cm ³]	Wolna przestrzeń [%]	Siła niszcząca [kN]
Próbki referencyjne	C42	62,7	101,0	1171,05	682,33	1173,24	2,381	2,508	5,1	17,25
	C44	57,7	101,0	1085,25	631,82	1086,49	2,382	2,508	5,0	14,45
	C47	60,9	101,0	1139,16	660,68	1140,83	2,368	2,508	5,6	15,30
Kondycjonowanie bez cyklu zamrażania	C41	54,4	101,0	1031,35	602,53	1031,89	2,397	2,508	4,4	14,95
	C45	55,7	101,0	1026,51	595,48	1027,05	2,374	2,508	5,4	13,40
	C50	63,7	101,0	1163,26	672,19	1166,02	2,351	2,508	6,3	13,35
Kondycjonowanie z cyklem zamrażania	C43	53,0	101,0	1006,13	586,99	1006,46	2,394	2,508	4,6	14,50
	C46	54,3	101,0	990,70	572,74	992,93	2,353	2,508	6,2	11,50
	C48	63,5	101,0	1179,73	685,09	1180,88	2,375	2,508	5,3	13,20

Rodzaj grupy	Nr próbki	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]				Moduł sztywności sprężystej [MPa]					
		Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności
Próbki referencyjne	C42	1,73	1,63	0,09	5%	6554	6761	6658	7172	652	9%
	C44	1,58				8030	7779	7905			
	C47	1,58				7074	6833	6954			
Kondycjonowanie bez cyklu zamrażania	C41	1,73	1,52	0,21	14%	9130	8827	8979	7892	945	12%
	C45	1,52				7381	7144	7263			
	C50	1,32				7316	7552	7434			
Kondycjonowanie z cyklem zamrażania	C43	1,72	1,46	0,23	16%	6754	6553	6654	6896	1475	21%
	C46	1,33				5471	5643	5557			
	C48	1,31				8318	8637	8478			

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.5.4. Wyniki badań odporności na działanie wody i mrozu betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem zwykłym 50/70 i dodatkiem Rediset WMX

Rodzaj grupy	Nr próbki	Wysokość średnia [mm]	Średnica średnia [mm]	Masa w powietrzu [g]	Masa w wodzie [g]	Masa w pow. po nasączeniu [g]	Gęstość pozorna [g/cm ³]	Gęstość właściwa [g/cm ³]	Wolna przestrzeń [%]	Siła niszcząca [kN]
Próbki referencyjne	D44	56,6	101,0	1065,88	617,27	1066,36	2,369	2,508	5,6	14,05
	D46	60,1	101,0	1116,37	648,28	1117,01	2,377	2,508	5,2	17,60
	D47	60,2	101,0	1130,21	655,94	1130,85	2,375	2,508	5,3	18,82
Kondycjonowanie bez cyklu zamrażania	D43	57,5	101,0	1073,78	624,60	1074,92	2,380	2,508	5,1	15,80
	D45	57,0	101,0	1091,68	637,26	1092,00	2,396	2,508	4,5	15,50
	D48	55,8	101,0	1027,17	590,66	1028,83	2,340	2,508	6,7	13,85
Kondycjonowanie z cyklem zamrażania	D41	60,0	101,0	1128,50	655,82	1129,38	2,378	2,508	5,2	17,40
	D42	60,0	101,0	1127,69	654,53	1128,39	2,375	2,508	5,3	16,70
	D49	62,6	101,0	1165,15	674,78	1167,37	2,361	2,508	5,9	17,00

Rodzaj grupy	Nr próbki	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]				Moduł sztywności sprężystej [MPa]					
		Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności
Próbki referencyjne	D44	1,56	1,79	0,21	12%	5741	5920	5831	7073	1110	16%
	D46	1,85				7832	8100	7966			
	D47	1,97				7548	7299	7424			
Kondycjonowanie bez cyklu zamrażania	D43	1,73	1,67	0,09	6%	7511	7278	7395	7587	751	10%
	D45	1,71				8277	8553	8415			
	D48	1,56				7067	6833	6950			
Kondycjonowanie z cyklem zamrażania	D41	1,83	1,76	0,06	3%	6692	6913	6803	7064	244	3%
	D42	1,75				6979	7223	7101			
	D49	1,71				7412	7162	7287			

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.5.5. Wyniki badań odporności na działanie wody i mrozu betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem zwykłym 50/70 i dodatkiem Ceca Base RT

Rodzaj grupy	Nr próbki	Wysokość średnia [mm]	Średnica średnia [mm]	Masa w powietrzu [g]	Masa w wodzie [g]	Masa w pow. po nasączeniu [g]	Gęstość pozorna [g/cm ³]	Gęstość właściwa [g/cm ³]	Wolna przestrzeń [%]	Siła niszcząca [kN]
Próbki referencyjne	E42	59,8	101,0	1121,15	648,42	1122,00	2,363	2,508	5,8	17,90
	E45	61,6	101,0	1128,46	648,80	1132,26	2,329	2,508	7,1	18,10
	E47	60,0	101,0	1097,15	632,56	1101,00	2,337	2,508	6,8	17,50
Kondycjonowanie bez cyklu zamrażania	E44	61,0	101,0	1107,85	635,77	1113,02	2,317	2,508	7,6	15,95
	E48	62,7	101,0	1160,96	669,70	1162,19	2,353	2,508	6,2	18,85
	E49	60,6	101,0	1129,04	655,58	1131,56	2,367	2,508	5,6	16,30
Kondycjonowanie z cyklem zamrażania	E43	59,6	101,0	1123,88	653,89	1124,60	2,383	2,508	5,0	18,00
	E46	61,6	101,0	1113,45	637,30	1118,14	2,311	2,508	7,9	13,60
	E50	60,5	101,0	1111,77	639,42	1116,07	2,328	2,508	7,2	16,20

Rodzaj grupy	Nr próbki	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]				Moduł sztywności sprężystej [MPa]					
		Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności
Próbki referencyjne	E42	1,89	1,86	0,02	1%	7443	7686	7565	7210	480	7%
	E45	1,85				6553	6773	6663			
	E47	1,84				7527	7275	7401			
Kondycjonowanie bez cyklu zamrażania	E44	1,65	1,75	0,13	8%	6484	6283	6384	6805	377	6%
	E48	1,89				6994	7223	7109			
	E49	1,70				7038	6807	6923			
Kondycjonowanie z cyklem zamrażania	E43	1,90	1,66	0,26	15%	6996	7239	7118	6279	811	13%
	E46	1,39				5408	5589	5499			
	E50	1,69				6130	6310	6220			

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.5.6. Wyniki badań odporności na działanie wody i mrozu betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem zwykłym 50/70 i dodatkiem zeolitu

Rodzaj grupy	Nr próbki	Wysokość średnia [mm]	Średnica średnia [mm]	Masa w powietrzu [g]	Masa w wodzie [g]	Masa w pow. po nasączeniu [g]	Gęstość pozorna [g/cm ³]	Gęstość właściwa [g/cm ³]	Wolna przestrzeń [%]	Siła niszcząca [kN]
Próbki referencyjne	F43	60,3	101,0	1128,49	651,33	1129,42	2,356	2,508	6,1	17,55
	F45	60,2	101,0	1118,14	648,18	1120,81	2,361	2,508	5,9	16,25
	F49	64,4	101,0	1187,18	684,59	1189,79	2,345	2,508	6,5	17,20
Kondycjonowanie bez cyklu zamrażania	F46	62,9	101,0	1181,37	684,35	1182,84	2,365	2,508	5,7	18,50
	F47	62,5	101,0	1151,33	663,64	1154,35	2,342	2,508	6,6	14,90
	F50	62,9	101,0	1166,16	674,15	1169,08	2,351	2,508	6,2	16,90
Kondycjonowanie z cyklem zamrażania	F41	67,9	101,0	1264,42	730,21	1266,04	2,355	2,508	6,1	17,80
	F44	65,2	101,0	1206,60	695,64	1210,38	2,339	2,508	6,7	14,95
	F48	60,9	101,0	1143,63	661,60	1144,66	2,363	2,508	5,8	16,20

Rodzaj grupy	Nr próbki	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]				Moduł sztywności sprężystej [MPa]					
		Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności
Próbki referencyjne	F43	1,83	1,74	0,08	5%	5341	5515	5428	5986	534	9%
	F45	1,70				6600	6386	6493			
	F49	1,68				6136	5936	6036			
Kondycjonowanie bez cyklu zamrażania	F46	1,85	1,68	0,18	10%	6986	7231	7109	6537	519	8%
	F47	1,50				6195	5998	6097			
	F50	1,69				6301	6511	6406			
Kondycjonowanie z cyklem zamrażania	F41	1,65	1,59	0,13	8%	7267	7036	7152	6331	1027	16%
	F44	1,45				5264	5094	5179			
	F48	1,68				6777	6546	6662			

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.5.7. Wyniki badań odporności na działanie wody i mrozu betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55

Rodzaj grupy	Nr próbki	Wysokość średnia [mm]	Średnica średnia [mm]	Masa w powietrzu [g]	Masa w wodzie [g]	Masa w pow. po nasączeniu [g]	Gęstość pozorna [g/cm ³]	Gęstość właściwa [g/cm ³]	Wolna przestrzeń [%]	Siła niszcząca [kN]
Próbki referencyjne	G43	59,0	101,0	1082,55	621,33	1084,95	2,330	2,496	6,6	15,10
	G46	59,4	101,0	1096,54	634,11	1099,62	2,351	2,496	5,8	17,00
	G49	57,0	101,0	1059,95	612,13	1061,70	2,353	2,496	5,7	14,50
Kondycjonowanie bez cyklu zamrażania	G45	60,9	101,0	1120,48	645,25	1124,16	2,335	2,496	6,5	15,45
	G48	60,9	101,0	1111,48	638,24	1115,09	2,326	2,496	6,8	14,15
	G50	60,2	101,0	1118,76	647,92	1120,63	2,362	2,496	5,4	16,30
Kondycjonowanie z cyklem zamrażania	G41	61,6	101,0	1112,23	638,91	1117,08	2,321	2,496	7,0	13,40
	G42	59,8	101,0	1082,46	623,41	1083,90	2,346	2,496	6,0	13,60
	G47	61,3	101,0	1140,84	659,42	1142,32	2,358	2,496	5,5	16,60

Rodzaj grupy	Nr próbki	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]				Moduł sztywności sprężystej [MPa]					
		Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położzeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności
Próbki referencyjne	G43	1,61	1,67	0,11	7%	5133	5317	5225	5506	469	9%
	G46	1,80				5953	6143	6048			
	G49	1,60				5164	5328	5246			
Kondycjonowanie bez cyklu zamrażania	G45	1,60	1,59	0,12	8%	4559	4425	4492	4914	842	17%
	G48	1,46				4429	4305	4367			
	G50	1,71				5784	5983	5884			
Kondycjonowanie z cyklem zamrażania	G41	1,37	1,50	0,18	12%	4942	5089	5016	5979	1016	17%
	G42	1,43				5975	5789	5882			
	G47	1,71				7155	6925	7040			

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.5.8. Wyniki badań odporności na działanie wody i mrozu betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 i dodatkiem Sasobit

Rodzaj grupy	Nr próbki	Wysokość średnia [mm]	Średnica średnia [mm]	Masa w powietrzu [g]	Masa w wodzie [g]	Masa w pow. po nasączeniu [g]	Gęstość pozorna [g/cm ³]	Gęstość właściwa [g/cm ³]	Wolna przestrzeń [%]	Siła niszcząca [kN]
Próbki referencyjne	H41	61,3	101,0	1123,13	649,68	1124,90	2,359	2,496	5,5	17,30
	H43	60,2	101,0	1126,23	656,97	1126,99	2,391	2,496	4,2	21,00
	H45	57,5	101,0	1064,48	618,65	1064,94	2,380	2,496	4,6	19,20
Kondycjonowanie bez cyklu zamrażania	H48	57,5	101,0	1060,35	615,39	1061,33	2,373	2,496	4,9	18,00
	H49	57,2	101,0	1069,92	620,66	1071,27	2,370	2,496	5,1	15,20
	H50	59,3	101,0	1117,64	650,76	1117,73	2,389	2,496	4,3	18,50
Kondycjonowanie z cyklem zamrażania	H42	58,3	101,0	1102,69	644,43	1103,24	2,399	2,496	3,9	20,50
	H44	54,5	101,0	1009,14	583,75	1010,87	2,358	2,496	5,5	15,00
	H47	59,4	101,0	1120,18	650,74	1121,17	2,376	2,496	4,8	18,10

Rodzaj grupy	Nr próbki	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]				Moduł sztywności sprężystej [MPa]					
		Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności
Próbki referencyjne	H41	1,78	2,03	0,22	11%	8316	8033	8175	9578	1348	14%
	H43	2,20				11058	10669	10864			
	H45	2,10				9537	9852	9695			
Kondycjonowanie bez cyklu zamrażania	H48	1,97	1,87	0,17	9%	7938	8229	8084	8107	576	7%
	H49	1,67				7412	7675	7544			
	H50	1,97				8848	8542	8695			
Kondycjonowanie z cyklem zamrażania	H42	2,22	1,96	0,24	12%	9990	10355	10173	9276	883	10%
	H44	1,73				8535	8278	8407			
	H47	1,92				9080	9419	9250			

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.5.9. Wyniki badań odporności na działanie wody i mrozu betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 i dodatkiem Licomont BS100

Rodzaj grupy	Nr próbki	Wysokość średnia [mm]	Średnica średnia [mm]	Masa w powietrzu [g]	Masa w wodzie [g]	Masa w pow. po nasączeniu [g]	Gęstość pozorna [g/cm ³]	Gęstość właściwa [g/cm ³]	Wolna przestrzeń [%]	Siła niszcząca [kN]
Próbki referencyjne	I46	59,3	101,0	1134,34	661,60	1134,88	2,392	2,496	4,2	16,60
	I48	58,8	101,0	1097,69	635,30	1098,88	2,363	2,496	5,3	14,95
	I50	60,4	101,0	1123,55	653,58	1124,50	2,381	2,496	4,6	16,90
Kondycjonowanie bez cyklu zamrażania	I42	54,9	101,0	1023,19	591,92	1024,71	2,359	2,496	5,5	13,05
	I43	60,3	101,0	1144,08	667,22	1144,81	2,391	2,496	4,2	18,30
	I45	58,6	101,0	1112,74	649,11	1112,80	2,395	2,496	4,0	16,90
Kondycjonowanie z cyklem zamrażania	I44	57,8	101,0	1074,75	621,41	1075,53	2,362	2,496	5,4	15,30
	I47	54,4	101,0	1020,14	596,46	1020,45	2,401	2,496	3,8	15,65
	I49	59,6	101,0	1106,73	641,68	1108,23	2,367	2,496	5,2	15,65

Rodzaj grupy	Nr próbki	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]				Moduł sztywności sprężystej [MPa]					
		Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności
Próbki referencyjne	I46	1,76	1,71	0,09	5%	7226	6998	7112	6622	792	12%
	I48	1,60				5620	5798	5709			
	I50	1,76				6932	7159	7046			
Kondycjonowanie bez cyklu zamrażania	I42	1,50	1,74	0,22	12%	5263	5105	5184	6299	992	16%
	I43	1,91				6966	7204	7085			
	I45	1,82				6520	6738	6629			
Kondycjonowanie z cyklem zamrażania	I44	1,67	1,71	0,09	5%	7254	7492	7373	7125	427	6%
	I47	1,81				7490	7249	7370			
	I49	1,66				6736	6526	6631			

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.5.10. Wyniki badań odporności na działanie wody i mrozu betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 i dodatkiem Rediset WMX

Rodzaj grupy	Nr próbki	Wysokość średnia [mm]	Średnica średnia [mm]	Masa w powietrzu [g]	Masa w wodzie [g]	Masa w pow. po nasączeniu [g]	Gęstość pozorna [g/cm ³]	Gęstość właściwa [g/cm ³]	Wolna przestrzeń [%]	Siła niszcząca [kN]
Próbki referencyjne	K41	60,4	101,0	1125,33	652,62	1125,75	2,374	2,496	4,9	17,50
	K43	58,3	101,0	1091,02	635,90	1091,39	2,390	2,496	4,2	18,60
	K46	62,2	101,0	1152,78	666,54	1153,37	2,363	2,496	5,3	17,55
Kondycjonowanie bez cyklu zamrażania	K44	60,1	101,0	1129,12	657,03	1129,37	2,386	2,496	4,4	17,50
	K45	56,6	101,0	1053,20	610,51	1053,93	2,370	2,496	5,0	15,30
	K50	60,7	101,0	1130,35	655,38	1130,91	2,372	2,496	5,0	16,10
Kondycjonowanie z cyklem zamrażania	K42	59,5	101,0	1110,43	643,13	1111,76	2,365	2,496	5,3	16,00
	K47	59,3	101,0	1105,80	642,64	1105,49	2,384	2,496	4,5	16,80
	K49	60,5	101,0	1136,45	659,54	1136,57	2,378	2,496	4,7	19,20

Rodzaj grupy	Nr próbki	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]				Moduł sztywności sprężystej [MPa]					
		Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności
Próbki referencyjne	K41	1,83	1,87	0,12	7%	5976	5783	5880	6321	401	6%
	K43	2,01				6766	6560	6663			
	K46	1,78				6516	6323	6420			
Kondycjonowanie bez cyklu zamrażania	K44	1,84	1,74	0,09	5%	5238	5080	5159	5440	463	9%
	K45	1,70				5262	5111	5187			
	K50	1,67				5883	6066	5975			
Kondycjonowanie z cyklem zamrażania	K42	1,69	1,83	0,16	9%	6169	5974	6072	6559	599	9%
	K47	1,79				7347	7107	7227			
	K49	2,00				6488	6269	6379			

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.5.11. Wyniki badań odporności na działanie wody i mrozu betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 i dodatkiem Ceca Base RT

Rodzaj grupy	Nr próbki	Wysokość średnia [mm]	Średnica średnia [mm]	Masa w powietrzu [g]	Masa w wodzie [g]	Masa w pow. po nasączeniu [g]	Gęstość pozorna [g/cm ³]	Gęstość właściwa [g/cm ³]	Wolna przestrzeń [%]	Siła niszcząca [kN]
Próbki referencyjne	L45	63,4	101,0	1168,52	676,70	1171,44	2,357	2,496	5,6	17,10
	L49	59,2	101,0	1119,50	654,08	1120,96	2,393	2,496	4,1	15,55
	L50	61,0	101,0	1137,79	660,83	1139,15	2,374	2,496	4,9	17,90
Kondycjonowanie bez cyklu zamrażania	L41	60,0	101,0	1136,49	659,75	1136,93	2,377	2,496	4,8	17,30
	L42	61,3	101,0	1132,40	653,86	1135,11	2,348	2,496	5,9	16,30
	L47	58,8	101,0	1111,02	648,48	1111,71	2,394	2,496	4,1	17,50
Kondycjonowanie z cyklem zamrażania	L43	59,5	101,0	1122,38	653,54	1122,78	2,387	2,496	4,4	17,25
	L44	60,6	101,0	1130,79	654,72	1132,52	2,362	2,496	5,4	18,15
	L48	60,3	101,0	1125,24	651,89	1126,43	2,366	2,496	5,2	15,60

Rodzaj grupy	Nr próbki	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]				Moduł sztywności sprężystej [MPa]					
		Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności
Próbki referencyjne	L45	1,70	1,74	0,10	6%	6259	6063	6161	6973	1061	15%
	L49	1,66				8304	8044	8174			
	L50	1,85				6688	6480	6584			
Kondycjonowanie bez cyklu zamrażania	L41	1,82	1,79	0,10	6%	6183	5987	6085	6115	905	15%
	L42	1,68				5304	5145	5225			
	L47	1,88				6918	7151	7035			
Kondycjonowanie z cyklem zamrażania	L43	1,83	1,78	0,13	8%	7093	6875	6984	6899	87	1%
	L44	1,89				7018	6786	6902			
	L48	1,63				6693	6928	6811			

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.5.12. Wyniki badań wytrzymałości na działanie wody i mrozu betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 i dodatkiem zeolitu

Rodzaj grupy	Nr próbki	Wysokość średnia [mm]	Średnica średnia [mm]	Masa w powietrzu [g]	Masa w wodzie [g]	Masa w pow. po nasączeniu [g]	Gęstość pozorna [g/cm ³]	Gęstość właściwa [g/cm ³]	Wolna przestrzeń [%]	Siła niszcząca [kN]
Próbki referencyjne	M44	63,3	101,0	1168,06	676,91	1169,16	2,368	2,496	5,1	17,05
	M46	61,9	101,0	1155,30	670,07	1156,36	2,371	2,496	5,0	16,25
	M49	60,9	101,0	1138,56	660,76	1139,70	2,372	2,496	4,9	15,75
Kondycjonowanie bez cyklu zamrażania	M41	62,5	101,0	1156,18	667,48	1159,03	2,347	2,496	6,0	11,10
	M45	62,4	101,0	1176,92	683,63	1177,23	2,380	2,496	4,7	17,70
	M48	61,1	101,0	1148,89	667,31	1150,07	2,375	2,496	4,8	15,10
Kondycjonowanie z cyklem zamrażania	M42	60,7	101,0	1139,18	658,61	1140,35	2,360	2,496	5,4	13,50
	M43	60,2	101,0	1136,04	662,47	1137,37	2,387	2,496	4,4	17,20
	M47	61,7	101,0	1145,32	662,23	1146,79	2,359	2,496	5,5	15,00

Rodzaj grupy	Nr próbki	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]:				Moduł sztywności sprężystej [MPa]:					
		Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności
Próbki referencyjne	M44	1,70	1,66	0,03	2%	4722	4577	4650	4266	460	11%
	M46	1,65				4460	4326	4393			
	M49	1,63				3705	3806	3756			
Kondycjonowanie bez cyklu zamrażania	M41	1,12	1,49	0,34	23%	4078	3971	4025	4217	224	5%
	M45	1,79				4225	4102	4164			
	M48	1,56				4526	4401	4464			
Kondycjonowanie z cyklem zamrażania	M42	1,40	1,58	0,20	13%	5287	5132	5210	5587	1051	19%
	M43	1,80				6669	6879	6774			
	M47	1,53				4846	4706	4776			

**ZAŁĄCZNIK 6 – WYNIKI BADAŃ ODPORNOŚCI NA STARZENIE
BETONÓW ASFALTOWYCH WYTWORZONYCH W WARUNKACH
LABORATORYJNYCH**

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.6.1. Wyniki badań odporności na starzenie betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem zwykłym 50/70 – Próbki referencyjne

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Wysokość [mm]	Średnica [mm]	Siła niszcząca [kN]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]:					
					Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
A41	20	63	101	21,93	2,19	2,13	0,06	3%	2,09	2,19
A42		62	101	20,53	2,09					
A43		59	101	19,70	2,10					
A44	10	62	101	39,31	4,00	3,90	0,10	3%	3,80	4,00
A45		64	101	39,81	3,92					
A46		65	101	39,15	3,80					
A47	0	62	101	46,66	4,74	4,84	0,17	4%	4,74	5,04
A48		63	101	47,44	4,75					
A49		62	101	49,60	5,04					
A50	-10	64	101	49,42	4,87	4,47	0,35	8%	4,19	4,87
A51		66	101	45,68	4,36					
A52		66	101	43,89	4,19					

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Moduł sztywności sprężystej [MPa]							
		Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
A41	20	8 337	8 089	8 213	7 939	307	4%	7 607	8 213
A42		7 719	7 494	7 607					
A43		8 116	7 879	7 998					
A44	10	13 797	13 349	13 573	14 168	637	4%	13 573	14 841
A45		15 125	14 556	14 841					
A46		14 251	13 932	14 092					
A47	0	19 346	18 594	18 970	19 901	2 798	14%	17 686	23 046
A48		18 055	17 317	17 686					
A49		23 459	22 632	23 046					
A50	-10	27 964	26 783	27 374	24 540	2 497	10%	22 662	27 374
A51		24 088	23 084	23 586					
A52		23 093	22 230	22 662					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.6.2. Wyniki badań odporności na starzenie betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem zwykłym 50/70 – Próbki poddane procesowi symulowanego starzenia krótkoterminowego

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Wysokość [mm]	Średnica [mm]	Siła niszcząca [kN]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]:					
					Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
A53	20	62	101	22,12	2,25	2,19	0,06	3%	2,13	2,25
A54		64	101	22,29	2,20					
A55		63	101	21,33	2,13					
A56	10	60	101	35,54	3,73	3,83	0,15	4%	3,73	4,01
A57		64	101	40,68	4,01					
A58		65	101	38,68	3,75					
A59	0	62	101	47,56	4,84	4,77	0,11	2%	4,64	4,84
A60		64	101	47,14	4,64					
A61		65	101	49,95	4,84					
A62	-10	65	101	49,83	4,83	4,90	0,09	2%	4,83	5,00
A63		65	101	50,11	4,86					
A64		67	101	53,10	5,00					

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Moduł sztywności sprężystej [MPa]							
		Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
A53	20	9 635	9 350	9 493	8 992	634	7%	8 280	9 493
A54		9 343	9 063	9 203					
A55		8 423	8 136	8 280					
A56	10	14 851	14 314	14 583	13 365	1 259	9%	12 069	14 583
A57		12 280	11 857	12 069					
A58		13 698	13 192	13 445					
A59	0	19 557	18 765	19 161	20 094	1 236	6%	19 161	21 496
A60		21 923	21 068	21 496					
A61		20 026	19 223	19 625					
A62	-10	24 551	23 588	24 070	25 525	1 805	7%	24 070	27 544
A63		25 476	24 445	24 960					
A64		28 059	27 029	27 544					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.6.3. Wyniki badań odporności na starzenie betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem zwykłym 50/70 – Próbki poddane procesowi symulowanego starzenia długoterminowego

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Wysokość [mm]	Średnica [mm]	Siła niszcząca [kN]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]:					
					Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
A65	20	63	101	20,69	2,07	2,12	0,04	2%	2,07	2,16
A66		65	101	22,26	2,16					
A67		65	101	21,87	2,12					
A68	10	67	101	43,71	4,11	4,17	0,21	5%	3,99	4,40
A69		64	101	40,48	3,99					
A70		66	101	46,11	4,40					
A71	0	65	101	49,05	4,76	4,68	0,10	2%	4,57	4,76
A72		65	101	48,71	4,72					
A73		66	101	47,54	4,57					
A74	-10	65	101	49,33	4,75	4,87	0,11	2%	4,75	4,97
A75		64	101	49,57	4,90					
A76		62	101	49,18	4,97					

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Moduł sztywności sprężystej [MPa]							
		Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
A65	20	10 070	9 734	9 902	10 502	834	8%	9 902	11 454
A66		11 657	11 250	11 454					
A67		10 318	9 980	10 149					
A68	10	14 007	13 530	13 769	15 467	1 485	10%	13 769	16 521
A69		16 838	16 203	16 521					
A70		16 397	15 824	16 111					
A71	0	17 233	15 348	16 291	16 783	430	3%	16 291	17 085
A72		17 805	16 364	17 085					
A73		17 590	16 356	16 973					
A74	-10	23 764	20 861	22 313	22 438	141	1%	22 313	22 591
A75		23 621	21 201	22 411					
A76		23 207	21 974	22 591					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.6.4. Wyniki badań odporności na starzenie betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem zwykłym 50/70 i dodatkiem Sasobit – Próbki referencyjne

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Wysokość [mm]	Średnica [mm]	Siła niszcząca [kN]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]:					
					Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
B41	20	63	101	23,57	2,36	2,37	0,20	8%	2,18	2,58
B42		63	101	25,81	2,58					
B43		63	101	21,80	2,18					
B44	10	61	101	42,47	4,39	4,24	0,14	3%	4,10	4,39
B45		63	101	42,22	4,22					
B46		65	101	42,31	4,10					
B47	0	64	101	49,89	4,91	4,74	0,24	5%	4,47	4,91
B48		65	101	50,01	4,85					
B49		63	101	44,67	4,47					
B50	-10	66	101	50,01	4,78	4,67	0,32	7%	4,31	4,92
B51		64	101	43,79	4,31					
B52		64	101	49,99	4,92					

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Moduł sztywności sprężystej [MPa]							
		Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
B41	20	11 652	11 270	11 461	11 803	477	4%	11 461	12 348
B42		12 574	12 122	12 348					
B43		11 805	11 393	11 599					
B44	10	16 727	16 082	16 405	17 473	1 199	7%	16 405	18 770
B45		17 565	16 925	17 245					
B46		19 151	18 388	18 770					
B47	0	16 428	15 858	16 143	21 081	4 278	20%	16 143	23 653
B48		23 941	22 954	23 448					
B49		24 150	23 155	23 653					
B50	-10	31 192	29 800	30 496	27 400	2 859	10%	24 861	30 496
B51		25 296	24 425	24 861					
B52		27 428	26 259	26 844					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.6.5. Wyniki badań odporności na starzenie betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem zwykłym 50/70 i dodatkiem Sasobit – Próbki poddane procesowi symulowanego starzenia krótkoterminowego

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Wysokość [mm]	Średnica [mm]	Siła niszcząca [kN]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]:					
					Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
B53	20	64	101	24,08	2,37	2,46	0,10	4%	2,37	2,56
B54		64	101	26,03	2,56					
B55		62	101	24,01	2,44					
B56	10	63	101	40,04	4,01	4,06	0,10	2%	4,00	4,18
B57		65	101	43,07	4,18					
B58		65	101	41,26	4,00					
B59	0	64	101	47,63	4,69	4,80	0,11	2%	4,69	4,90
B60		65	101	49,47	4,80					
B61		64	101	49,80	4,90					

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Moduł sztywności sprężystej [MPa]							
		Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
B53	20	12 515	12 072	12 294	13 088	740	6%	12 294	13 757
B54		14 030	13 484	13 757					
B55		13 462	12 963	13 213					
B56	10	16 093	15 486	15 790	16 909	1 084	6%	15 790	17 954
B57		18 312	17 596	17 954					
B58		17 269	16 696	16 983					
B59	0	24 645	23 601	24 123	24 843	1 702	7%	23 620	26 787
B60		27 360	26 214	26 787					
B61		24 115	23 125	23 620					
B62	-10	25 583	24 557	25 070	25 388	309	1%	25 070	25 688
B63		25 912	24 899	25 406					
B64		26 171	25 204	25 688					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.6.6. Wyniki badań odporności na starzenie betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem zwykłym 50/70 i dodatkiem Sasobit – Próbki poddane procesowi symulowanego starzenia długoterminowego

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Wysokość [mm]	Średnica [mm]	Siła niszcząca [kN]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]:					
					Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
B77	20	59	101	23,95	2,56	2,47	0,09	4%	2,37	2,56
B78		67	101	26,36	2,48					
B79		65	101	24,49	2,37					
B80	10	62	101	37,19	3,78	3,78	0,12	3%	3,66	3,91
B81		70	101	43,37	3,91					
B82		66	101	38,28	3,66					
B83	0	63	101	43,42	4,33	4,64	0,27	6%	4,33	4,82
B84		65	101	49,11	4,78					
B85		64	101	49,21	4,82					
B86	-10	66	101	50,13	4,77	4,83	0,09	2%	4,77	4,94
B87		63	101	49,28	4,94					
B88		65	101	49,60	4,79					

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Moduł sztywności sprężystej [MPa]							
		Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
B77	20	13 407	13 002	13 205	13 562	419	3%	13 205	14 023
B78		13 713	13 206	13 460					
B79		14 282	13 763	14 023					
B80	10	19 133	18 455	18 794	18 161	615	3%	17 567	18 794
B81		17 878	17 255	17 567					
B82		18 480	17 764	18 122					
B83	0	19 958	19 375	19 667	20 129	401	2%	19 667	20 378
B84		20 572	20 183	20 378					
B85		20 484	20 201	20 343					
B86	-10	23 550	21 917	22 734	23 117	353	2%	22 734	23 429
B87		24 375	22 482	23 429					
B88		23 928	22 449	23 189					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.6.7. Wyniki badań odporności na starzenie betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem zwykłym 50/70 i dodatkiem Licomont BS100 – Próbki referencyjne

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Wysokość [mm]	Średnica [mm]	Siła niszcząca [kN]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]:					
					Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
C41	20	64	101	19,26	1,90	1,88	0,12	6%	1,75	2,00
C42		64	101	20,26	2,00					
C43		62	101	17,26	1,75					
C44	10	65	101	36,65	3,55	3,56	0,08	2%	3,48	3,64
C45		65	101	37,53	3,64					
C46		64	101	35,32	3,48					
C47	0	64	101	49,64	4,89	4,82	0,14	3%	4,66	4,92
C48		64	101	49,94	4,92					
C49		65	101	48,03	4,66					
C50	-10	66	101	48,10	4,59	4,70	0,09	2%	4,59	4,77
C51		65	101	48,88	4,74					
C52		66	101	49,94	4,77					

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Moduł sztywności sprężystej [MPa]							
		Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
C41	20	8 421	8 164	8 293	7 584	982	13%	6 464	8 293
C42		8 122	7 870	7 996					
C43		6 565	6 362	6 464					
C44	10	14 086	13 539	13 813	13 717	321	2%	13 359	13 979
C45		14 219	13 739	13 979					
C46		13 621	13 096	13 359					
C47	0	20 886	20 024	20 455	20 771	376	2%	20 455	21 187
C48		21 008	20 337	20 673					
C49		21 640	20 733	21 187					
C50	-10	24 500	23 569	24 035	22 618	1 438	6%	21 160	24 035
C51		23 125	22 191	22 658					
C52		21 557	20 763	21 160					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.6.8. Wyniki badań odporności na starzenie betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem zwykłym 50/70 i dodatkiem Licomont BS100 – Próbki poddane procesowi symulowanego starzenia krótkoterminowego

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Wysokość [mm]	Średnica [mm]	Siła niszcząca [kN]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]:					
					Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
C53	20	63	101	23,39	2,34	2,28	0,05	2%	2,24	2,34
C54		62	101	22,04	2,24					
C55		64	101	23,09	2,27					
C56	10	64	101	37,35	3,68	3,58	0,08	2%	3,53	3,68
C57		61	101	34,31	3,55					
C58		65	101	36,36	3,53					
C59	0	66	101	50,01	4,78	4,63	0,46	10%	4,12	5,00
C60		66	101	43,13	4,12					
C61		63	101	49,94	5,00					

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Moduł sztywności sprężystej [MPa]							
		Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
C53	20	11 596	11 216	11 406	10 428	897	9%	9 644	11 406
C54		10 399	10 067	10 233					
C55		9 817	9 471	9 644					
C56	10	15 639	15 027	15 333	14 252	1 038	7%	13 264	15 333
C57		13 519	13 009	13 264					
C58		14 435	13 882	14 159					
C59	0	22 764	21 774	22 269	24 521	3 298	13%	22 269	28 307
C60		28 914	27 699	28 307					
C61		23 483	22 493	22 988					
C62	-10	24 331	23 336	23 834	24 560	744	3%	23 834	25 320
C63		25 864	24 775	25 320					
C64		24 959	24 097	24 528					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.6.9. Wyniki badań odporności na starzenie betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem zwykłym 50/70 i dodatkiem Licomont BS100 – Próbki poddane procesowi symulowanego starzenia długoterminowego

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Wysokość [mm]	Średnica [mm]	Siła niszcząca [kN]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]:					
					Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
C77	20	65	101	23,18	2,25	2,30	0,07	3%	2,25	2,38
C78		64	101	24,15	2,38					
C79		62	101	22,49	2,29					
C80	10	64	101	42,11	4,15	4,05	0,08	2%	3,99	4,15
C81		65	101	41,19	3,99					
C82		61	101	38,91	4,02					
C83	0	66	101	49,60	4,73	4,69	0,04	1%	4,65	4,73
C84		67	101	49,29	4,65					
C85		64	101	47,52	4,68					
C87	-10	66	101	44,40	4,23	4,23				

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Moduł sztywności sprężystej [MPa]							
		Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
C77	20	10 927	10 540	10 734	10 916	409	4%	10 630	11 385
C78		10 814	10 445	10 630					
C79		11 589	11 180	11 385					
C80	10	17 103	16 487	16 795	17 271	1 208	7%	16 373	18 644
C81		16 658	16 088	16 373					
C82		18 976	18 311	18 644					
C83	0	25 244	17 372	21 308	19 979	1 153	6%	19 250	21 308
C84		19 847	18 912	19 380					
C85		19 666	18 833	19 250					
C86	-10	23 267	21 834	22 551	22 562	16	0%	22 551	22 573
C87		23 039	22 106	22 573					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.6.10. Wyniki badań odporności na starzenie betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem zwykłym 50/70 i dodatkiem Rediset WMX – Próbki referencyjne

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Wysokość [mm]	Średnica [mm]	Siła niszcząca [kN]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]:					
					Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
D41	20	63	101	21,57	2,16	2,14	0,04	2%	2,10	2,16
D42		64	101	21,98	2,16					
D43		62	101	20,61	2,10					
D44	10	61	101	38,00	3,93	3,81	0,15	4%	3,64	3,93
D45		64	101	36,98	3,64					
D46		65	101	39,91	3,87					
D47	0	65	101	44,35	4,30	4,63	0,31	7%	4,30	4,90
D48		62	101	46,07	4,68					
D49		64	101	49,79	4,90					
D50	-10	66	101	50,00	4,78	4,46	0,44	10%	3,95	4,78
D51		66	101	41,39	3,95					
D52		67	101	49,48	4,65					

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Moduł sztywności sprężystej [MPa]							
		Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
D41	20	9 060	8 748	8 904	8 703	589	7%	8 040	9 166
D42		9 302	9 030	9 166					
D43		8 166	7 914	8 040					
D44	10	13 688	13 222	13 455	13 621	847	6%	12 870	14 540
D45		14 820	14 259	14 540					
D46		13 107	12 632	12 870					
D47	0	19 918	19 256	19 587	21 572	3 767	17%	19 213	25 916
D48		19 512	18 913	19 213					
D49		26 461	25 371	25 916					
D50	-10	26 564	25 309	25 937	25 121	707	3%	24 682	25 937
D51		25 328	24 164	24 746					
D52		25 190	24 173	24 682					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.6.11. Wyniki badań odporności na starzenie betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem zwykłym 50/70 i dodatkiem Rediset WMX – Próbki poddane procesowi symulowanego starzenia krótkoterminowego

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Wysokość [mm]	Średnica [mm]	Siła niszcząca [kN]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]:					
					Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
D53	20	64	101	22,44	2,21	2,15	0,05	3%	2,11	2,21
D54		64	101	21,40	2,11					
D55		63	101	21,25	2,13					
D56	10	64	101	40,90	4,03	4,04	0,19	5%	3,86	4,23
D57		64	101	42,92	4,23					
D58		63	101	38,55	3,86					
D59	0	65	101	49,85	4,83	4,84	0,27	5%	4,58	5,11
D60		63	101	45,78	4,58					
D61		61	101	49,47	5,11					

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Moduł sztywności sprężystej [MPa]							
		Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
D53	20	9 395	9 058	9 227	9 824	680	7%	9 227	10 565
D54		10 740	10 389	10 565					
D55		9 861	9 499	9 680					
D56	10	15 117	14 564	14 841	14 226	593	4%	13 657	14 841
D57		14 427	13 937	14 182					
D58		13 892	13 421	13 657					
D59	0	24 199	23 219	23 709	23 382	2 189	9%	21 048	25 390
D60		21 496	20 600	21 048					
D61		25 971	24 809	25 390					
D62	-10	23 227	22 285	22 756	26 347	3 753	14%	22 756	30 244
D63		30 912	29 576	30 244					
D64		26 532	25 552	26 042					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.6.12. Wyniki badań odporności na starzenie betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem zwykłym 50/70 i dodatkiem Rediset WMX – Próbki poddane procesowi symulowanego starzenia długoterminowego

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Wysokość [mm]	Średnica [mm]	Siła niszcząca [kN]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]:					
					Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
D77	20	64	101	24,14	2,38	2,27	0,17	7%	2,08	2,38
D78		65	101	24,43	2,37					
D79		65	101	21,43	2,08					
D80	10	63	101	41,18	4,12	4,13	0,02	1%	4,11	4,15
D81		66	101	43,49	4,15					
D82		65	101	42,42	4,11					
D83	0	64	101	43,03	4,27	4,61	0,29	6%	4,27	4,80
D84		66	101	49,64	4,74					
D85		65	101	49,24	4,80					
D86	-10	65	101	42,90	4,18	4,49	0,45	10%	4,18	4,81
D87		65	101	49,59	4,81					
D88										

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Moduł sztywności sprężystej [MPa]							
		Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
D77	20	11 011	10 628	10 820	10 633	307	3%	10 278	10 820
D78		10 996	10 605	10 801					
D79		10 466	10 090	10 278					
D80	10	15 557	15 046	15 302	16 496	1 248	8%	15 302	17 791
D81		16 709	16 082	16 396					
D82		18 102	17 479	17 791					
D83	0	18 535	17 729	18 132	18 366	236	1%	18 132	18 604
D84		19 142	18 066	18 604					
D85		19 119	17 604	18 362					
D86	-10	21 544	20 208	20 876	21 513	900	4%	20 876	22 149
D87		22 816	21 482	22 149					
D88									

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.6.13. Wyniki badań odporności na starzenie betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem zwykłym 50/70 i dodatkiem Ceca
Base RT – Próbki referencyjne

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Wysokość [mm]	Średnica [mm]	Siła niszcząca [kN]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]:					
					Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
E41	20	61	101	21,00	2,17	2,17	0,06	3%	2,12	2,23
E42		63	101	22,28	2,23					
E43		63	101	21,16	2,12					
E44	10	64	101	40,71	4,01	3,91	0,11	3%	3,80	4,01
E45		60	101	36,17	3,80					
E46		62	101	38,60	3,92					
E47	0	64	101	49,87	4,91	5,00	0,18	4%	4,88	5,21
E48		61	101	47,22	4,88					
E49		59	101	48,79	5,21					
E50	-10	64	101	48,60	4,79	4,89	0,17	3%	4,79	5,08
E51		62	101	49,96	5,08					
E52		62	101	47,13	4,79					

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Moduł sztywności sprężystej [MPa]							
		Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
E41	20	7 494	7 280	7 387	7 565	171	2%	7 387	7 728
E42		7 868	7 587	7 728					
E43		7 702	7 457	7 580					
E44	10	12 956	12 517	12 737	11 574	1 031	9%	10 770	12 737
E45		10 942	10 597	10 770					
E46		11 406	11 024	11 215					
E47	0	20 729	20 053	20 391	22 491	2 762	12%	20 391	25 619
E48		21 880	21 045	21 463					
E49		26 179	25 059	25 619					
E50	-10	19 520	18 752	19 136	22 336	3 009	13%	19 136	25 107
E51		23 299	22 233	22 766					
E52		25 683	24 531	25 107					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.6.14. Wyniki badań odporności na starzenie betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem zwykłym 50/70 i dodatkiem Ceca Base RT – Próbki poddane procesowi symulowanego starzenia krótkoterminowego

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Wysokość [mm]	Średnica [mm]	Siła niszcząca [kN]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]:					
					Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
E53	20	61	101	22,71	2,35	2,34	0,01	1%	2,32	2,35
E54		66	101	24,29	2,32					
E55		65	101	24,15	2,34					
E56	10	65	101	44,88	4,35	4,26	0,11	3%	4,14	4,35
E57		63	101	42,76	4,28					
E58		66	101	43,33	4,14					
E59	0	65	101	46,75	4,53	4,63	0,25	5%	4,45	4,92
E60		66	101	46,60	4,45					
E61		63	101	49,18	4,92					

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Moduł sztywności sprężystej [MPa]							
		Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
E53	20	8 939	8 643	8 791	8 768	200	2%	8 558	8 956
E54		9 102	8 809	8 956					
E55		8 695	8 420	8 558					
E56	10	15 731	15 135	15 433	15 355	1 239	8%	14 080	16 554
E57		16 874	16 233	16 554					
E58		14 333	13 826	14 080					
E59	0	22 164	21 217	21 691	20 247	1 266	6%	19 324	21 691
E60		19 716	18 931	19 324					
E61		20 067	19 385	19 726					
E62	-10	26 643	25 602	26 123	25 855	2 872	11%	22 858	28 584
E63		23 336	22 380	22 858					
E64		29 195	27 973	28 584					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.6.15. Wyniki badań odporności na starzenie betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem zwykłym 50/70 i dodatkiem Ceca Base RT – Próbki poddane procesowi symulowanego starzenia długoterminowego

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Wysokość [mm]	Średnica [mm]	Siła niszcząca [kN]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]:					
					Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
E77	20	65	101	22,97	2,23	2,37	0,15	6%	2,23	2,52
E78		64	101	23,94	2,36					
E79		63	101	25,21	2,52					
E80	10	65	101	44,68	4,33	4,26	0,12	3%	4,12	4,33
E81		61	101	39,90	4,12					
E82		64	101	43,79	4,31					
E83	0	64	101	49,44	4,85	4,73	0,16	3%	4,55	4,85
E84		63	101	47,57	4,80					
E85		62	101	45,05	4,55					
E86	-10	68	101	49,66	4,61	4,67	0,05	1%	4,61	4,72
E87		67	101	49,90	4,67					
E88		66	101	49,49	4,72					

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Moduł sztywności sprężystej [MPa]							
		Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
E77	20	9 686	9 384	9 535	9 899	343	3%	9 535	10 217
E78		10 135	9 756	9 946					
E79		10 390	10 044	10 217					
E80	10	14 610	14 083	14 347	15 549	1 752	11%	14 347	17 559
E81		14 998	14 485	14 742					
E82		17 903	17 214	17 559					
E83	0	18 280	16 675	17 478	17 548	286	2%	17 304	17 864
E84		18 123	17 604	17 864					
E85		17 952	16 656	17 304					
E86	-10	22 585	21 502	22 044	21 918	167	1%	21 728	22 044
E87		23 051	20 912	21 982					
E88		22 474	20 981	21 728					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.6.16. Wyniki badań odporności na starzenie betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem zwykłym 50/70 i dodatkiem zeolitu
– Próbki referencyjne

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Wysokość [mm]	Średnica [mm]	Siła niszcząca [kN]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]:					
					Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
F41	20	61	101	19,56	2,02	1,96	0,10	5%	1,85	2,02
F42		63	101	20,04	2,01					
F43		64	101	18,76	1,85					
F44	10	65	101	41,97	4,07	3,95	0,14	4%	3,80	4,07
F45		64	101	40,56	3,99					
F46		62	101	37,35	3,80					
F47	0	64	101	49,88	4,91	4,58	0,47	10%	4,04	4,91
F48		63	101	40,37	4,04					
F49		63	101	47,81	4,78					
F50	-10	64	101	50,08	4,93	4,74	0,18	4%	4,59	4,93
F51		67	101	49,98	4,70					
F52		66	101	48,03	4,59					

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Moduł sztywności sprężystej [MPa]							
		Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
F41	20	6 240	6 034	6 137	5 995	538	9%	5 400	6 447
F42		6 552	6 342	6 447					
F43		5 483	5 317	5 400					
F44	10	10 807	10 437	10 622	11 281	746	7%	10 622	12 091
F45		11 310	10 949	11 130					
F46		12 304	11 877	12 091					
F47	0	29 611	28 318	28 965	23 095	5 158	22%	19 284	28 965
F48		19 652	18 916	19 284					
F49		21 485	20 588	21 037					
F50	-10	23 208	22 159	22 684	22 771	1 114	5%	21 704	23 927
F51		22 095	21 312	21 704					
F52		24 477	23 377	23 927					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.6.17. Wyniki badań odporności na starzenie betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem zwykłym 50/70 i dodatkiem zeolitu – Próbki poddane procesowi symulowanego starzenia długoterminowego

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Wysokość [mm]	Średnica [mm]	Siła niszcząca [kN]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]:					
					Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
F53	20	65	101	21,69	2,10	2,07	0,07	3%	1,99	2,11
F54		64	101	21,47	2,11					
F55		64	101	20,23	1,99					
F56	10	64	101	41,54	4,09	4,10	0,05	1%	4,07	4,16
F57		65	101	42,85	4,16					
F58		62	101	40,00	4,07					
F59	0	64	101	49,41	4,87	4,83	0,08	2%	4,74	4,88
F60		63	101	47,38	4,74					
F61		64	101	49,73	4,88					
F62	-10	65	101	49,90	4,88	4,91	0,03	1%	4,88	4,93
F63		63	101	49,31	4,92					
F64		64	101	49,63	4,93					

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Moduł sztywności sprężystej [MPa]							
		Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
F53	20	6 576	6 375	6 476	6 812	303	4%	6 476	7 064
F54		7 011	6 784	6 898					
F55		7 178	6 949	7 064					
F56	10	13 430	12 942	13 186	13 269	332	3%	12 986	13 634
F57		13 871	13 397	13 634					
F58		13 224	12 747	12 986					
F59	0	16 838	15 866	16 352	16 287	59	0%	16 237	16 352
F60		16 899	15 642	16 271					
F61		16 756	15 718	16 237					
F62	-10	22 778	21 524	22 151	22 183	500	2%	21 700	22 698
F63		23 126	22 269	22 698					
F64		22 353	21 046	21 700					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.6.18. Wyniki badań odporności na starzenie betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 – Próbki referencyjne

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Wysokość [mm]	Średnica [mm]	Siła niszcząca [kN]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]:					
					Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
G41	20	64	101	17,89	1,77	1,75	0,05	3%	1,69	1,79
G42		62	101	16,66	1,69					
G43		64	101	18,20	1,79					
G44	10	64	101	31,63	3,12	3,14	0,22	7%	2,94	3,37
G45		66	101	30,51	2,94					
G46		64	101	34,33	3,37					
G47	0	63	101	38,50	3,85	3,74	0,51	14%	3,19	4,19
G48		65	101	43,00	4,19					
G49		65	101	33,00	3,19					
G50	-10	65	101	45,00	4,37	4,47	0,58	13%	3,94	5,09
G51		64	101	40,00	3,94					
G52		63	101	51,00	5,09					

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Moduł sztywności sprężystej [MPa]							
		Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
G41	20	4 522	3 925	4 224	4 162	213	5%	3 925	4 337
G42		4 307	4 367	4 337					
G43		3 850	4 000	3 925					
G44	10	8 095	7 794	7 945	8 224	278	3%	7 945	8 500
G45		8 365	8 089	8 227					
G46		8 660	8 339	8 500					
G47	0	12 829	12 438	12 634	13 372	662	5%	12 634	13 911
G48		14 071	13 075	13 573					
G49		14 421	13 400	13 911					
G50	-10	17 825	16 516	17 171	17 731	537	3%	17 171	18 242
G51		18 906	17 577	18 242					
G52		18 270	17 292	17 781					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.6.19. Wyniki badań odporności na starzenie betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 – Próbki poddane procesowi symulowanego starzenia krótkoterminowego

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Wysokość [mm]	Średnica [mm]	Siła niszcząca [kN]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]:					
					Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
G53	20	64	101	18,52	1,82	1,74	0,07	4%	1,67	1,82
G54		64	101	16,82	1,67					
G55		64	101	17,55	1,73					
G56	10	63	101	33,43	3,37	3,73	0,31	8%	3,37	3,92
G57		63	101	38,92	3,89					
G58		62	101	38,75	3,92					
G59	0	63	101	29,00	2,91	3,69	0,71	19%	2,91	4,30
G60		63	101	43,00	4,30					
G61		64	101	39,00	3,87					
G62	-10	63	101	44,00	4,40	4,58	0,68	15%	4,01	5,33
G63		64	101	40,50	4,01					
G64		63	101	53,00	5,33					

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Moduł sztywności sprężystej [MPa]							
		Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
G53	20	4 936	4 890	4 913	4 704	186	4%	4 559	4 913
G54		4 534	4 584	4 559					
G55		4 588	4 690	4 639					
G56	10	7 861	7 521	7 691	8 244	481	6%	7 691	8 568
G57		8 671	8 276	8 474					
G58		8 785	8 351	8 568					
G59	0	14 442	13 264	13 853	13 989	238	2%	13 850	14 263
G60		14 123	13 577	13 850					
G61		14 686	13 840	14 263					
G62	-10	17 212	16 104	16 658	17 253	679	4%	16 658	17 993
G63		17 824	16 392	17 108					
G64		18 421	17 565	17 993					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.6.20. Wyniki badań odporności na starzenie betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 – Próbki poddane procesowi symulowanego starzenia długoterminowego

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Wysokość [mm]	Średnica [mm]	Siła niszcząca [kN]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]:					
					Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
G65	20	63	101	17,58	1,75	1,79	0,06	3%	1,75	1,86
G66		63	101	17,75	1,77					
G67		62	101	18,37	1,86					
G68	10	62	101	34,11	3,47	3,35	0,11	3%	3,26	3,47
G69		65	101	33,91	3,31					
G70		64	101	32,88	3,26					
G71	0	63	101	49,82	4,98	4,80	0,20	4%	4,58	4,98
G72		65	101	49,81	4,83					
G73		64	101	46,61	4,58					
G74	-10	64	101	53,50	5,30	4,60	0,63	14%	4,07	5,30
G75		61	101	43,00	4,43					
G76		64	101	41,50	4,07					

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Moduł sztywności sprężystej [MPa]							
		Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
G65	20	6 002	6 067	6 035	5 977	160	3%	5 797	6 101
G66		5 821	5 773	5 797					
G67		6 031	6 170	6 101					
G68	10	8 946	8 763	8 855	9 198	485	5%	8 855	9 753
G69		9 092	8 884	8 988					
G70		10 019	9 486	9 753					
G71	0	15 657	14 903	15 280	14 616	602	4%	14 106	15 280
G72		14 515	13 697	14 106					
G73		14 669	14 257	14 463					
G74	-10	18 203	17 210	17 707	18 090	340	2%	17 707	18 353
G75		18 750	17 955	18 353					
G76		18 632	17 791	18 212					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.6.21. Wyniki badań odporności na starzenie betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 i dodatkiem Sasobit – Próbki referencyjne

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Wysokość [mm]	Średnica [mm]	Siła niszcząca [kN]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]:					
					Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
H41	20	101	63	18,04	1,79	1,79	0,09	5%	1,69	1,88
H42		101	63	16,84	1,69					
H43		101	63	18,86	1,88					
H44	10	101	62	32,61	3,30	3,30	0,14	4%	3,16	3,43
H45		101	64	31,81	3,16					
H46		101	63	34,05	3,43					
H47	0	101	63	32,50	3,23	3,50	0,68	19%	3,00	4,27
H48		101	63	30,00	3,00					
H49		101	64	43,00	4,27					
H50	-10	101	63	51,50	5,19	4,69	0,43	9%	4,40	5,19
H51		101	65	46,00	4,49					
H52		101	63	44,00	4,40					

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Moduł sztywności sprężystej [MPa]							
		Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
H41	20	6 985	6 857	6 921	6 890	185	3%	6 692	7 058
H42		6 723	6 660	6 692					
H43		7 112	7 003	7 058					
H44	10	11 526	11 167	11 347	11 068	447	4%	10 553	11 347
H45		10 769	10 337	10 553					
H46		11 535	11 076	11 306					
H47	0	16 571	15 636	16 104	15 659	481	3%	15 149	16 104
H48		15 746	14 552	15 149					
H49		15 901	15 545	15 723					
H50	-10	19 928	18 878	19 403	19 170	372	2%	18 742	19 403
H51		19 086	18 397	18 742					
H52		19 718	19 014	19 366					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.6.22. Wyniki badań odporności na starzenie betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 i dodatkiem Sasobit – Próbki poddane procesowi symulowanego starzenia krótkoterminowego

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Wysokość [mm]	Średnica [mm]	Siła niszcząca [kN]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]:					
					Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
H53	20	101	65	18,44	1,80	1,84	0,04	2%	1,80	1,86
H54		101	62	18,28	1,86					
H55		101	64	18,75	1,86					
H56	10	101	64	37,94	3,74	3,87	0,19	5%	3,74	4,09
H57		101	64	41,23	4,09					
H58		101	65	38,83	3,78					
H59	0	101	64	45,00	4,42	3,77	0,57	15%	3,33	4,42
H60		101	62	33,00	3,33					
H61		101	65	36,50	3,55					
H62	-10	101	64	54,00	5,36	5,26	0,33	6%	4,89	5,54
H63		101	63	55,50	5,54					
H64		101	64	50,00	4,89					

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Moduł sztywności sprężystej [MPa]							
		Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
H53	20	6 855	6 827	6 841	6 573	299	5%	6 251	6 841
H54		6 635	6 616	6 626					
H55		6 285	6 217	6 251					
H56	10	11 248	10 976	11 112	11 208	124	1%	11 112	11 348
H57		11 532	11 164	11 348					
H58		11 465	10 862	11 164					
H59	0	16 211	15 457	15 834	15 964	415	3%	15 630	16 428
H60		15 937	15 322	15 630					
H61		16 854	16 001	16 428					
H62	-10	20 130	18 653	19 392	19 433	305	2%	19 151	19 756
H63		20 103	19 409	19 756					
H64		19 620	18 682	19 151					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.6.23. Wyniki badań odporności na starzenie betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 i dodatkiem Sasobit – Próbki poddane procesowi symulowanego starzenia długoterminowego

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Wysokość [mm]	Średnica [mm]	Siła niszcząca [kN]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]:					
					Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
H77	20	101	65	20,34	1,97	1,97	0,02	1%	1,95	2,00
H78		101	64	19,68	1,95					
H79		101	63	19,83	2,00					
H80	10	101	65	34,95	3,41	3,43	0,11	3%	3,33	3,54
H81		101	65	36,22	3,54					
H82		101	64	33,65	3,33					
H83	0	101	64	49,65	4,86	4,75	0,26	5%	4,46	4,94
H84		101	64	49,76	4,94					
H85		101	65	45,74	4,46					
H86	-10	101	64	57,00	5,62	5,03	0,76	15%	4,17	5,62
H87		101	63	41,50	4,17					
H88		101	64	53,50	5,29					

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Moduł sztywności sprężystej [MPa]							
		Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
H77	20	9 175	9 120	9 148	8 963	166	2%	8 825	9 148
H78		8 780	8 870	8 825					
H79		8 941	8 889	8 915					
H80	10	9 008	8 852	8 930	9 321	428	5%	8 930	9 778
H81		9 342	9 169	9 256					
H82		10 272	9 283	9 778					
H83	0	16 736	15 960	16 348	16 255	158	1%	16 073	16 348
H84		16 495	15 651	16 073					
H85		16 683	16 005	16 344					
H86	-10	19 312	18 036	18 674	18 440	266	1%	18 151	18 674
H87		19 034	17 955	18 495					
H88		18 784	17 518	18 151					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.6.24. Wyniki badań odporności na starzenie betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 i dodatkiem Licomont BS100 – Próbki referencyjne

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Wysokość [mm]	Średnica [mm]	Siła niszcząca [kN]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]:					
					Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
I41	20	101	65	17,42	1,70	1,63	0,08	5%	1,53	1,70
I42		101	62	14,96	1,53					
I43		101	63	16,58	1,65					
I44	10	101	64	32,71	3,25	3,18	0,06	2%	3,14	3,25
I45		101	63	31,15	3,14					
I46		101	62	31,06	3,15					
I47	0	101	63	48,66	4,84	4,81	0,05	1%	4,76	4,85
I48		101	63	48,31	4,85					
I49		101	63	47,84	4,76					
I50	-10	101	62	47,50	4,83	4,84	0,02	0%	4,83	4,87
I51		101	63	48,50	4,87					
I52		101	63	48,50	4,84					

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Moduł sztywności sprężystej [MPa]							
		Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
I41	20	5 732	5 777	5 755	5 494	490	9%	4 929	5 798
I42		4 876	4 981	4 929					
I43		5 756	5 839	5 798					
I44	10	10 166	9 784	9 975	10 114	234	2%	9 975	10 384
I45		10 507	10 261	10 384					
I46		10 146	9 817	9 982					
I47	0	16 146	15 242	15 694	15 231	467	3%	14 760	15 694
I48		15 617	14 858	15 238					
I49		15 108	14 412	14 760					
I50	-10	19 307	18 318	18 813	19 361	584	3%	18 813	19 976
I51		19 871	18 716	19 294					
I52		20 641	19 310	19 976					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.6.25. Wyniki badań odporności na starzenie betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 i dodatkiem Licomont BS100 – Próbki poddane procesowi symulowanego starzenia krótkoterminowego

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Wysokość [mm]	Średnica [mm]	Siła niszcząca [kN]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]:					
					Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
I53	20	101	65	15,73	1,53	1,60	0,10	6%	1,53	1,72
I54		101	65	17,64	1,72					
I55		101	64	15,76	1,56					
I56	10	101	64	31,62	3,10	3,28	0,20	6%	3,10	3,50
I57		101	63	35,14	3,50					
I58		101	63	32,29	3,24					
I59	0	101	64	44,50	4,40	4,23	0,16	4%	4,10	4,40
I60		101	63	42,00	4,18					
I61		101	63	41,00	4,10					
I62	-10	101	64	42,00	4,16	4,69	0,66	14%	4,16	5,43
I63		101	64	45,50	4,50					
I64		101	64	55,00	5,43					

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Moduł sztywności sprężystej [MPa]							
		Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
I53	20	5 204	5 280	5 242	5 064	221	4%	4 817	5 242
I54		5 084	5 183	5 134					
I55		4 757	4 877	4 817					
I56	10	8 909	8 652	8 781	9 211	493	5%	8 781	9 749
I57		9 939	9 558	9 749					
I58		9 274	8 934	9 104					
I59	0	14 570	13 628	14 099	14 617	617	4%	14 099	15 300
I60		14 838	14 064	14 451					
I61		15 839	14 760	15 300					
I62	-10	19 608	18 204	18 906	19 384	605	3%	18 906	20 065
I63		19 862	18 498	19 180					
I64		20 799	19 330	20 065					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.6.26. Wyniki badań odporności na starzenie betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 i dodatkiem Licomont BS100 – Próbki poddane procesowi symulowanego starzenia długoterminowego

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Wysokość [mm]	Średnica [mm]	Siła niszcząca [kN]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]:					
					Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
177	20	101	64	17,17	1,70	1,63	0,06	4%	1,58	1,70
178		101	64	16,53	1,63					
179		101	64	16,03	1,58					
180	10	101	63	28,34	2,85	2,96	0,12	4%	2,85	3,09
181		101	63	30,89	3,09					
182		101	64	30,05	2,96					
183	0	101	64	44,00	4,35	3,89	0,42	11%	3,55	4,35
184		101	66	39,00	3,75					
185		101	65	36,50	3,55					
186	-10	101	65	35,00	3,40	4,00	0,58	15%	3,40	4,57
187		101	64	41,00	4,03					
188		101	64	46,50	4,57					

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Moduł sztywności sprężystej [MPa]							
		Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
177	20	7 000	6 868	6 934	6 326	546	9%	5 876	6 934
178		6 237	6 102	6 170					
179		5 872	5 879	5 876					
180	10	9 183	8 983	9 083	9 326	449	5%	9 051	9 845
181		10 053	9 636	9 845					
182		9 225	8 876	9 051					
183	0	13 569	12 779	13 174	14 699	1 324	9%	13 174	15 567
184		15 903	15 230	15 567					
185		15 727	14 983	15 355					
186	-10	17 302	16 605	16 954	17 557	638	4%	16 954	18 224
187		17 561	17 428	17 495					
188		18 658	17 790	18 224					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.6.27. Wyniki badań odporności na starzenie betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 i dodatkiem Rediset WMX – Próbki referencyjne

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Wysokość [mm]	Średnica [mm]	Siła niszcząca [kN]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]:					
					Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
K41	20	101	64	14,63	1,44	1,52	0,07	5%	1,44	1,59
K42		101	64	15,42	1,53					
K43		101	64	16,11	1,59					
K44	10	101	65	29,36	2,83	2,94	0,13	5%	2,83	3,09
K45		101	65	29,87	2,90					
K46		101	64	31,17	3,09					
K47	0	101	64	49,24	4,86	4,86	0,04	1%	4,83	4,90
K48		101	65	49,85	4,83					
K49		101	64	49,85	4,90					
K50	-10	101	64	48,00	4,71	4,07	0,59	15%	3,53	4,71
K51		101	64	36,00	3,53					
K52		101	65	41,00	3,99					

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Moduł sztywności sprężystej [MPa]							
		Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
K41	20	4 116	4 242	4 179	4 407	204	5%	4 179	4 572
K42		4 586	4 558	4 572					
K43		4 417	4 521	4 469					
K44	10	8 882	8 534	8 708	8 657	313	4%	8 322	8 942
K45		8 452	8 191	8 322					
K46		9 022	8 862	8 942					
K47	0	14 607	13 607	14 107	14 295	369	3%	14 057	14 720
K48		15 352	14 088	14 720					
K49		14 460	13 653	14 057					
K50	-10	17 596	16 530	17 063	18 100	1 253	7%	17 063	19 493
K51		18 544	16 944	17 744					
K52		20 145	18 840	19 493					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.6.28. Wyniki badań odporności na starzenie betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 i dodatkiem Rediset WMX – Próbki poddane procesowi symulowanego starzenia krótkoterminowego

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Wysokość [mm]	Średnica [mm]	Siła niszcząca [kN]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]:					
					Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
K53	20	101	63	16,18	1,61	1,63	0,07	4%	1,58	1,71
K54		101	64	17,41	1,71					
K55		101	64	16,11	1,58					
K56	10	101	64	33,09	3,26	3,16	0,13	4%	3,01	3,26
K57		101	64	30,47	3,01					
K58		101	64	32,59	3,20					
K59	0	101	64	38,00	3,75	4,12	0,33	8%	3,75	4,36
K60		101	64	43,50	4,26					
K61		101	65	45,00	4,36					
K62	-10	101	64	37,00	3,65	4,28	0,56	13%	3,65	4,72
K63		101	64	45,50	4,47					
K64		101	65	48,50	4,72					

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Moduł sztywności sprężystej [MPa]							
		Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
K53	20	4 964	5 024	4 994	5 003	155	3%	4 853	5 163
K54		5 155	5 170	5 163					
K55		4 838	4 867	4 853					
K56	10	8 743	8 056	8 400	8 879	566	6%	8 400	9 504
K57		8 932	8 536	8 734					
K58		9 681	9 327	9 504					
K59	0	15 171	14 243	14 707	14 212	594	4%	13 553	14 707
K60		13 989	13 117	13 553					
K61		14 803	13 950	14 377					
K62	-10	19 438	18 132	18 785	18 569	205	1%	18 377	18 785
K63		19 255	17 498	18 377					
K64		19 049	18 042	18 546					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.6.29. Wyniki badań odporności na starzenie betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 i dodatkiem Rediset WMX – Próbki poddane procesowi symulowanego starzenia długoterminowego

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Wysokość [mm]	Średnica [mm]	Siła niszcząca [kN]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]:					
					Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
K77	20	101	64	18,08	1,78	1,75	0,03	2%	1,72	1,78
K78		101	64	17,57	1,74					
K79		101	65	17,69	1,72					
K80	10	101	64	33,71	3,31	3,29	0,06	2%	3,22	3,33
K81		101	65	34,53	3,33					
K82		101	64	32,51	3,22					
K83	0	101	64	46,00	4,55	4,22	0,30	7%	3,98	4,55
K84		101	65	41,00	3,98					
K85		101	65	42,50	4,15					
K86	-10	101	62	49,00	4,95	4,73	0,63	13%	4,02	5,23
K87		101	64	41,00	4,02					
K88		101	65	53,50	5,23					

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Moduł sztywności sprężystej [MPa]							
		Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
K77	20	5 682	5 625	5 654	5 836	248	4%	5 654	6 119
K78		6 145	6 093	6 119					
K79		5 739	5 734	5 737					
K80	10	8 691	8 530	8 611	9 055	429	5%	8 611	9 468
K81		9 574	9 361	9 468					
K82		9 243	8 930	9 087					
K83	0	14 673	13 765	14 219	13 767	419	3%	13 391	14 219
K84		13 711	13 070	13 391					
K85		13 902	13 481	13 692					
K86	-10	17 958	17 280	17 619	17 289	286	2%	17 117	17 619
K87		17 479	16 755	17 117					
K88		17 574	16 686	17 130					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.6.30. Wyniki badań odporności na starzenie betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 i dodatkiem Ceca Base RT – Próbki referencyjne

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Wysokość [mm]	Średnica [mm]	Siła niszcząca [kN]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]:					
					Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
L41	20	101	64	17,94	1,78	1,64	0,13	8%	1,51	1,78
L42		101	65	16,75	1,64					
L43		101	64	15,29	1,51					
L44	10	101	65	30,31	2,95	3,10	0,13	4%	2,95	3,19
L45		101	65	32,80	3,17					
L46		101	65	32,64	3,19					
L47	0	101	64	42,50	4,21	3,86	0,83	22%	2,91	4,47
L48		101	65	30,00	2,91					
L49		101	65	46,00	4,47					
L50	-10	101	65	51,50	4,96	5,27	0,27	5%	4,96	5,47
L51		101	66	56,00	5,39					
L52		101	65	56,00	5,47					

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Moduł sztywności sprężystej [MPa]							
		Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
L41	20	4 801	4 793	4 797	4 436	393	9%	4 018	4 797
L42		4 441	4 547	4 494					
L43		3 995	4 040	4 018					
L44	10	7 979	7 638	7 809	7 965	169	2%	7 809	8 144
L45		8 336	7 951	8 144					
L46		8 062	7 825	7 944					
L47	0	14 591	13 510	14 051	14 351	641	4%	13 915	15 087
L48		14 360	13 469	13 915					
L49		15 523	14 651	15 087					
L50	-10	18 796	17 740	18 268	18 397	170	1%	18 268	18 590
L51		18 879	17 788	18 334					
L52		19 117	18 063	18 590					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.6.31. Wyniki badań odporności na starzenie betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 i dodatkiem Ceca Base RT – Próbki poddane procesowi symulowanego starzenia krótkoterminowego

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Wysokość [mm]	Średnica [mm]	Siła niszcząca [kN]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]:					
					Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
L53	20	101	65	17,18	1,67	1,73	0,08	5%	1,67	1,82
L54		101	64	18,42	1,82					
L55		101	64	17,17	1,70					
L56	10	101	64	33,96	3,36	3,61	0,22	6%	3,36	3,74
L57		101	63	37,57	3,74					
L58		101	64	37,87	3,73					
L59	0	101	63	44,00	4,39	4,52	0,14	3%	4,39	4,66
L60		101	63	45,00	4,51					
L61		101	62	45,50	4,66					
L62	-10	101	65	52,00	5,07	5,08	0,77	15%	4,32	5,86
L63		101	64	59,00	5,86					
L64		101	62	42,50	4,32					

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Moduł sztywności sprężystej [MPa]							
		Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
L53	20	4 208	4 253	4 231	4 286	96	2%	4 231	4 397
L54		4 368	4 426	4 397					
L55		4 214	4 248	4 231					
L56	10	7 631	7 480	7 556	8 472	906	11%	7 556	9 367
L57		8 716	8 268	8 492					
L58		9 505	9 229	9 367					
L59	0	14 495	13 913	14 204	13 956	238	2%	13 730	14 204
L60		14 343	13 528	13 936					
L61		14 134	13 325	13 730					
L62	-10	14 254	18 562	16 408	18 213	1 581	9%	16 408	19 350
L63		19 554	18 209	18 882					
L64		19 831	18 869	19 350					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.6.32. Wyniki badań odporności na starzenie betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 i dodatkiem Ceca Base RT – Próbki poddane procesowi symulowanego starzenia długoterminowego

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Wysokość [mm]	Średnica [mm]	Siła niszcząca [kN]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]:					
					Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
L77	20	101	64	18,21	1,80	1,84	0,03	2%	1,80	1,86
L78		101	65	19,13	1,86					
L79		101	64	18,71	1,85					
L80	10	101	66	39,04	3,72	3,59	0,11	3%	3,53	3,72
L81		101	63	35,27	3,54					
L82		101	64	35,59	3,53					
L83	0	101	65	46,00	4,43	4,23	0,43	10%	3,73	4,52
L84		101	65	46,50	4,52					
L85		101	64	38,00	3,73					
L86	-10	101	63	50,10	5,03	5,04	0,07	1%	4,98	5,11
L87		101	64	50,17	4,98					
L88		101	64	52,00	5,11					

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Moduł sztywności sprężystej [MPa]							
		Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
L77	20	5 113	5 170	5 142	4 967	153	3%	4 861	5 142
L78		4 868	4 854	4 861					
L79		4 828	4 966	4 897					
L80	10	8 592	8 278	8 435	7 707	871	11%	6 742	8 435
L81		8 011	7 874	7 943					
L82		6 815	6 669	6 742					
L83	0	14 181	13 017	13 599	13 158	404	3%	12 807	13 599
L84		13 309	12 305	12 807					
L85		13 430	12 705	13 068					
L86	-10	17 028	16 070	16 549	16 754	410	2%	16 487	17 226
L87		17 702	16 749	17 226					
L88		16 811	16 163	16 487					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.6.33. Wyniki badań odporności na starzenie betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 i dodatkiem zeolitu – Próbki referencyjne

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Wysokość [mm]	Średnica [mm]	Siła niszcząca [kN]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]:					
					Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
M41	20	101	65	18,25	1,76	1,67	0,11	7%	1,54	1,76
M42		101	65	15,84	1,54					
M43		101	66	18,08	1,72					
M44	10	101	70	33,60	3,04	3,06	0,10	3%	2,97	3,18
M45		101	65	30,63	2,97					
M46		101	66	33,45	3,18					
M47	0	101	64	48,90	4,84	4,87	0,02	0%	4,84	4,88
M48		101	65	49,90	4,88					
M49		101	64	49,90	4,88					
M50	-10	101	65	50,00	4,89	4,83	0,15	3%	4,66	4,95
M51		101	66	49,00	4,66					
M52		101	65	51,00	4,95					

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Moduł sztywności sprężystej [MPa]							
		Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
M41	20	6 351	6 435	6 393	6 115	374	6%	5 690	6 393
M42		5 727	5 653	5 690					
M43		6 286	6 240	6 263					
M44	10	7 954	7 768	7 861	7 663	191	2%	7 480	7 861
M45		7 729	7 569	7 649					
M46		7 560	7 399	7 480					
M47	0	13 529	12 478	13 004	13 688	601	4%	13 004	14 126
M48		14 600	13 652	14 126					
M49		14 328	13 542	13 935					
M50	-10	17 737	16 447	17 092	16 850	567	3%	16 202	17 256
M51		16 536	15 868	16 202					
M52		17 736	16 775	17 256					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.6.34. Wyniki badań odporności na starzenie betonu asfaltowego 0/12,8 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 i dodatkiem zeolitu – Próbki poddane procesowi symulowanego starzenia długoterminowego

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Wysokość [mm]	Średnica [mm]	Siła niszcząca [kN]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]:					
					Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
M53	20	101	66	16,76	1,59	1,63	0,03	2%	1,59	1,66
M54		101	60	15,74	1,66					
M55		101	61	15,69	1,63					
M56	10	101	65	33,13	3,23	3,29	0,05	2%	3,23	3,33
M57		101	65	33,77	3,30					
M58		101	66	35,11	3,33					
M59	0	101	64	49,82	4,91	4,74	0,15	3%	4,65	4,91
M60		101	66	49,02	4,66					
M61		101	64	47,25	4,65					
M62	-10	101	65	50,10	4,87	4,87	0,08	2%	4,78	4,95
M63		101	65	51,00	4,95					
M64		101	66	50,10	4,78					

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Moduł sztywności sprężystej [MPa]							
		Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
M53	20	5 877	5 943	5 910	6 209	391	6%	5 910	6 652
M54		6 055	6 076	6 066					
M55		6 661	6 642	6 652					
M56	10	7 957	7 801	7 879	8 276	344	4%	7 879	8 485
M57		8 626	8 304	8 465					
M58		8 615	8 354	8 485					
M59	0	14 397	13 672	14 035	13 950	98	1%	13 843	14 035
M60		14 376	13 568	13 972					
M61		14 177	13 509	13 843					
M62	-10	17 165	16 117	16 641	17 097	436	3%	16 641	17 510
M63		18 213	16 806	17 510					
M64		17 641	16 639	17 140					

**ZAŁĄCZNIK 7 – WYNIKI BADAŃ ODPORNOŚCI NA DEFORMACJE
TRWAŁE BETONÓW ASFALTOWYCH WYTWORZONYCH W
WARUNKACH LABORATORYJNYCH**

Tablica Z.7.1. Wyniki badań odporności na deformacje trwałe dla poszczególnych próbek mieszanki z asfaltem zwykłym 50/70 czystym i z dodatkami w brytyjskim koleinomierzu kołowym wg BS598

Rodzaj dodatku		Nr próbki	Głębokość koleiny po 1900 przejściach [mm]	
			Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie
A	-	A/1	2,56	2,59
		A/2	2,61	
B	Sasobit	B/1	1,65	1,68
		B/2	1,70	
C	Licomont BS 100	C/1	2,21	2,12
		C/2	2,02	
D	Rediset WMX	D/1	2,75	2,96
		D/2	3,17	
E	Ceca Base RT	E/1	2,79	3,07
		E/2	3,35	
F	zeolit	F/1	4,11	4,18
		F/2	4,25	

Tablica Z.7.2. Wyniki badań odporności na deformacje trwałe dla poszczególnych próbek mieszanki z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 czystym i z dodatkami w brytyjskim koleinomierzu kołowym wg BS598

Rodzaj dodatku		Nr próbki	Głębokość koleiny po 1900 przejściach [mm]	
			Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie
G	-	G/1	1,80	1,75
		G/2	1,70	
H	Sasobit	H/1	1,10	1,10
		H/2	1,10	
I	Licomont BS 100	I/1	1,40	1,65
		I/2	1,90	
K	Rediset WMX	K/1	0,42	0,95
		K/2	1,47	
L	Ceca Base RT	L/1	3,00	3,10
		L/2	3,20	
M	zeolit	M/1	2,50	2,45
		M/2	2,40	

Tablica Z.7.3. Wyniki badań odporności na deformacje trwałe dla poszczególnych próbek mieszanki z asfaltem zwykłym 50/70 czystym i z dodatkami w europejskim koleinomierzu kołowym wg PN-EN 12697-22 metoda B

Rodzaj dodatku	Nr próbki	Głębokość koleiny RD ₁₀₀₀₀ [mm]		Prędkość przyrostu koleiny WTS _{AIR} [mm/1000/p]		Proporcjonalna głębokość koleiny PRD _{AIR} [%]		
		Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	
A	-	A/3	15,01	15,01	0,88	0,83	38%	38%
		A/4	15,00		0,78		38%	
B	Sasobit	B/3	4,82	4,34	0,14	0,11	12%	11%
		B/4	3,85		0,08		10%	
C	Licomont BS 100	C/3	4,29	3,92	0,13	0,10	11%	10%
		C/4	3,55		0,06		9%	
D	Rediset WMX	D/3	6,56	6,80	0,22	0,22	16%	17%
		D/4	7,04		-		18%	
E	Ceca Base RT	E/3	5,70	7,91	0,19	0,28	14%	20%
		E/6	10,11		0,36		25%	
F	zeolit	F/3	15,00	15,00	1,90	1,90	38%	38%

Tablica Z.7.4. Wyniki badań odporności na deformacje trwałe dla poszczególnych próbek mieszanki z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 czystym i z dodatkami w europejskim koleinomierzu kołowym wg PN-EN 12697-22 metoda B

Rodzaj dodatku	Nr próbki	Głębokość koleiny RD ₁₀₀₀₀ [mm]		Prędkość przyrostu koleiny WTS _{AIR} [mm/1000/p]		Proporcjonalna głębokość koleiny PRD _{AIR} [%]		
		Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Dla pojedynczej próbki i	Średnia w grupie	
G	-	G/3	4,40	4,40	0,11	0,09	11%	11%
		G/4	4,40		0,06		11%	
H	Sasobit	H/3	3,40	3,20	0,08	0,08	9%	8%
		G/4	3,00		0,07		8%	
I	Licomont BS 100	I/3	3,60	3,55	0,06	0,06	9%	9%
		I/4	3,50		0,05		9%	
K	Rediset WMX	K/3	1,42	2,26	0,04	0,06	4%	6%
		K/4	3,10		0,07		8%	
L	Ceca Base RT	L/3	7,60	6,65	0,17	0,15	19%	17%
		L/4	5,70		0,12		14%	
M	zeolit	M/3	5,55	5,10	0,16	0,14	14%	13%
		M/4	4,64		0,12		12%	

Tablica Z.8.1. Wytrzymałość na zginanie, odkształcenie graniczne oraz moduł sztywności betonu asfaltowego z asfaltem zwykłym 50/70 określony metodą zginania belki trójpunktowej w temperaturze -20 °C

Numer próbki	$\sigma_{\text{graniczne}}$ [MPa]	$\epsilon_{\text{graniczne}}$ [‰]	Moduł [MPa]
A03	6,74	0,97	7 460
A04	6,99	0,80	13 466
A05	6,89	0,70	10 267
A06	7,14	0,88	11 092
A07	6,75	0,68	11 772
A08	6,84	0,53	11 727
A09	7,02	0,89	11 273
A10	7,49	0,91	13 042
Średnia	6,98	0,80	11 262
Odchylenie standardowe	0,25	0,15	1851
Współczynnik zmienności	4%	19%	16%
Wartość minimalna	6,74	0,53	7 460
Wartość maksymalna	7,49	0,97	13 466

Tablica Z.8.2. Wytrzymałość na zginanie, odkształcenie graniczne oraz moduł sztywności betonu asfaltowego z asfaltem zwykłym 50/70 z dodatkiem Sasobitu metodą zginania belki trójpunktowej w temperaturze -20 °C

Numer próbki	$\sigma_{\text{graniczne}}$ [MPa]	$\epsilon_{\text{graniczne}}$ [‰]	Moduł [MPa]
B06	6,54	0,64	10 411
B07	6,10	0,87	8 393
B08	6,57	0,77	8 104
B10	6,69	0,86	14 229
Średnia	6,47	0,79	10 284
Odchylenie standardowe	0,26	0,11	2823
Współczynnik zmienności	4%	13%	27%
Wartość minimalna	6,10	0,64	8 104
Wartość maksymalna	6,69	0,87	14 229

Tablica Z.8.3. Wytrzymałość na zginanie, odkształcenie graniczne oraz moduł sztywności betonu asfaltowego z asfaltem zwykłym 50/70 z dodatkiem Licomont BS100 określony metodą zginania belki trójpunktowej w temperaturze -20 °C

Numer próbki	$\sigma_{\text{graniczne}}$ [MPa]	$\epsilon_{\text{graniczne}}$ [‰]	Moduł [MPa]
C03	6,73	0,80	8 043
C04	7,14	0,79	11 932
C05	6,78	0,69	11 089
C06	7,05	0,88	10 691
C07	6,72	0,68	11 692
C09	6,79	0,88	9 165
C10	6,59	0,80	11 879
Średnia	6,83	0,79	10 642
Odchylenie standardowe	0,19	0,08	1496
Współczynnik zmienności	3%	10%	14%
Wartość minimalna	6,59	0,68	8 043
Wartość maksymalna	7,14	0,88	11 932

Tablica Z.8.4. Wytrzymałość na zginanie, odkształcenie granicznego oraz moduł sztywności betonu asfaltowego z asfaltem zwykłym 50/70 z dodatkiem Rediset WMX określony metodą zginania belki trójpunktowej w temperaturze -20°C

Numer próbki	$\sigma_{\text{graniczne}}$ [MPa]	$\epsilon_{\text{graniczne}}$ [‰]	Moduł [MPa]
D01	7,85	0,83	8 879
D02	7,52	0,90	11 183
D04	7,55	0,78	10 775
D06	6,84	0,65	12 320
D07	7,29	0,79	11 980
D08	6,52	0,66	13 365
D09	7,07	0,68	11 990
Średnia	7,23	0,75	11 499
Odchylenie standardowe	0,46	0,09	1421
Współczynnik zmienności	6%	13%	12%
Wartość minimalna	6,52	0,65	8 879
Wartość maksymalna	7,85	0,90	13 365

Tablica Z.8.5. Wytrzymałość na zginanie, odkształcenie graniczne oraz moduł sztywności betonu asfaltowego z asfaltem zwykłym 50/70 z dodatkiem Ceca Base RT określony metodą zginania belki trójpunktowej w temperaturze -20°C

Numer próbki	$\sigma_{\text{graniczne}}$ [MPa]	$\epsilon_{\text{graniczne}}$ [‰]	Moduł [MPa]
E01	6,03	0,82	8 990
E02	6,35	0,81	11 519
E03	6,96	0,81	10 578
E04	6,22	0,66	11 980
E09	7,19	0,90	12 030
Średnia	6,55	0,80	11 019
Odchylenie standardowe	0,50	0,09	1275
Współczynnik zmienności	8%	11%	12%
Wartość minimalna	6,03	0,66	8 990
Wartość maksymalna	7,19	0,90	12 030

Tablica Z.8.6. Wytrzymałości na zginanie, odkształcenie graniczne oraz moduł sztywności betonu asfaltowego z asfaltem zwykłym 50/70 z dodatkiem zeolitu określony metodą zginania belki trójpunktowej w temperaturze -20°C

Numer próbki	$\sigma_{\text{graniczne}}$ [MPa]	$\epsilon_{\text{graniczne}}$ [‰]	Moduł [MPa]
F01	6,44	0,88	8 047
F02	7,23	0,83	12 832
F03	6,46	0,70	11 710
F04	6,61	0,70	11 051
F06	6,12	0,75	11 530
F07	7,00	0,86	11 851
F08	7,22	0,86	14 980
F09	6,22	0,56	11 780
Średnia	6,66	0,77	11 723
Odchylenie standardowe	0,43	0,11	1922
Współczynnik zmienności	7%	14%	16%
Wartość minimalna	6,12	0,56	8 047
Wartość maksymalna	7,23	0,88	14 980

Tablica Z.8.7. Wytrzymałość na zginanie, odkształcenie graniczne oraz moduł sztywności betonu asfaltowego z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 określony metodą zginania belki trójpunktowej w temperaturze -20 °C

Numer próbki	$\sigma_{\text{graniczne}}$ [MPa]	$\epsilon_{\text{graniczne}}$ [‰]	Moduł [MPa]
G01	8,34	1,07	7 990
G02	6,39	1,07	9 460
G03	6,71	1,00	9 124
G04	7,64	0,89	10 059
G05	7,77	0,81	12 636
G06	7,07	1,11	10 792
G07	7,36	1,14	8 606
G08	6,53	0,81	8 370
G09	7,38	0,90	9 960
Średnia	7,24	0,98	9 666
Odchylenie standardowe	0,63	0,13	1 426
Współczynnik zmienności	9%	13%	15%
Wartość minimalna	6,39	0,81	7 990
Wartość maksymalna	8,34	1,14	12 636

Tablica Z.8.8. Wytrzymałość na zginanie, odkształcenie graniczne oraz moduł sztywności betonu asfaltowego z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 z dodatkiem Sasobitu określony metodą zginania belki trójpunktowej w temperaturze -20 °C

Numer próbki	$\sigma_{\text{graniczne}}$ [MPa]	$\epsilon_{\text{graniczne}}$ [‰]	Moduł [MPa]
H01	7,70	0,88	9 261
H03	7,89	0,81	12 253
H04	7,07	0,83	14 269
H05	7,21	0,90	13 230
H08	7,48	0,82	11 905
Średnia	7,47	0,85	12 183
Odchylenie standardowe	0,34	0,04	1 875
Współczynnik zmienności	5%	5%	15%
Wartość minimalna	7,07	0,81	9 261
Wartość maksymalna	7,89	0,90	14 269

Tablica Z.8.9. Wytrzymałość na zginanie, odkształcenie graniczne oraz moduł sztywności betonu asfaltowego z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 z dodatkiem Licomont BS100 określony metodą zginania belki trójpunktowej w -20 °C

Numer próbki	$\sigma_{\text{graniczne}}$ [MPa]	$\epsilon_{\text{graniczne}}$ [‰]	Moduł [MPa]
I04	6,76	0,85	11 009
I05	6,84	0,93	8 096
I07	7,21	0,72	12 650
I08	7,13	0,75	10 590
I09	7,11	0,82	10 687
I10	7,69	1,01	10 349
Średnia	7,12	0,85	10 564
Odchylenie standardowe	0,33	0,11	1 463
Współczynnik zmienności	5%	13%	14%
Wartość minimalna	6,76	0,72	8 096
Wartość maksymalna	7,69	1,01	12 650

Tablica Z.8.10. Wytrzymałość na zginanie, odkształcenie graniczne oraz moduł sztywności betonu asfaltowego z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 z dodatkiem Rediset WMX określony metodą zginania belki trójpunktowej w -20 °C

Numer próbki	$\sigma_{\text{graniczne}}$ [MPa]	$\epsilon_{\text{graniczne}}$ [‰]	Moduł [MPa]
K02	6,85	0,83	10 149
K03	6,13	0,76	11 382
K04	7,34	0,99	11 429
K06	6,30	0,68	10 883
K07	6,70	0,65	12 960
K10	6,44	0,60	14 100
Średnia	6,63	0,75	11 817
Odchylenie standardowe	0,44	0,14	1 450
Współczynnik zmienności	7%	19%	12%
Wartość minimalna	6,13	0,60	10 149
Wartość maksymalna	7,34	0,99	14 100

Tablica Z.8.11. Wytrzymałość na zginanie, odkształcenie graniczne oraz moduł sztywności betonu asfaltowego z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 z dodatkiem Ceca Base RT określony metodą zginania belki trójpunktowej w -20 °C

Numer próbki	$\sigma_{\text{graniczne}}$ [MPa]	$\epsilon_{\text{graniczne}}$ [‰]	Moduł [MPa]
L03	6,82	1,03	9 157
L04	6,34	0,89	9 183
L05	6,71	0,84	9 760
L06	5,86	0,85	8 311
L07	5,86	0,68	10 817
L08	7,15	0,87	11 539
L09	7,22	0,97	14 359
Średnia	6,56	0,88	10 447
Odchylenie standardowe	0,56	0,11	2 039
Współczynnik zmienności	9%	13%	20%
Wartość minimalna	5,86	0,68	8 311
Wartość maksymalna	7,22	1,03	14 359

Tablica Z.8.12. Wytrzymałość na zginanie, odkształcenie graniczne oraz moduł sztywności betonu asfaltowego z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 z dodatkiem zeolitu określony metodą zginania belki trójpunktowej w temperaturze -20 °C

Numer próbki	$\sigma_{\text{graniczne}}$ [MPa]	$\epsilon_{\text{graniczne}}$ [‰]	Moduł [MPa]
M01	8,75	1,31	6 010
M02	8,15	1,15	8 740
M05	7,49	0,94	12 653
M07	7,64	1,07	10 857
M09	8,94	1,12	11 838
M10	7,11	0,87	9 266
Średnia	8,01	1,08	9 894
Odchylenie standardowe	0,73	0,16	2 414
Współczynnik zmienności	9%	15%	24%
Wartość minimalna	7,11	0,87	6 010
Wartość maksymalna	8,94	1,31	12 653

**ZAŁĄCZNIK 9 – WYNIKI BADAŃ ODPORNOŚCI NA DZIAŁANIE
WODY I MROZU MIESZANKI SMA ZASTOSOWANEJ NA ODCINKU
DOŚWIADCZALNYM**

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.9.1. Wyniki badań odporności na działanie wody i mrozu SMA 0/11 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55

Rodzaj grupy	Nr próbki	Wysokość średnia [mm]	Średnica średnia [mm]	Siła niszcząca [kN]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]			
					Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności
Próbki referencyjne	1	61,8	101,0	14,46	1,47	1,34	0,12	9%
	7	64,0	101,0	12,79	1,26			
	14	64,6	101,0	13,10	1,28			
Kondycjonowanie bez cyklu zamrażania	2	63,7	101,0	13,38	1,32	1,31	0,08	6%
	5	63,8	101,0	12,33	1,22			
	10	65,4	101,0	14,32	1,38			
Kondycjonowanie z cyklem zamrażania	3	62,8	101,0	13,75	1,38	1,33	0,05	4%
	8	64,2	101,0	13,21	1,30			
	11	65,0	101,0	13,42	1,30			

Tablica Z.9.2. Wyniki badań odporności na działanie wody i mrozu SMA 0/11 mm z asfaltem mod. 45/80-55 i dodatkiem Ceca Base

Rodzaj grupy	Nr próbki	Wysokość średnia [mm]	Średnica średnia [mm]	Siła niszcząca [kN]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]			
					Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności
Próbki referencyjne	3	60,8	101,0	15,40	1,60	1,27	0,33	26%
	9	64,1	101,0	13,02	1,28			
	13	62,7	101,0	9,37	0,94			
Kondycjonowanie bez cyklu zamrażania	1	62,0	101,0	12,83	1,30	1,21	0,13	11%
	4	62,6	101,0	12,46	1,25			
	10	63,7	101,0	10,73	1,06			
Kondycjonowanie z cyklem zamrażania	6	61,4	101,0	14,45	1,48	1,37	0,10	7%
	12	61,9	101,0	13,18	1,34			
	14	64,0	101,0	13,15	1,30			

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.9.3. Wyniki badań odporności na działanie wody i mrozu SMA 0/11 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 i dodatkiem Viatop Plus CT40

Rodzaj grupy	Nr próbki	Wysokość średnia [mm]	Średnica średnia [mm]	Siła niszcząca [kN]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]			
					Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności
Próbki referencyjne	3	64,4	101,0	12,65	1,24	1,26	0,02	1%
	11	63,0	101,0	12,65	1,27			
	14	62,0	101,0	12,47	1,27			
Kondycjonowanie bez cyklu zamrażania	2	64,4	101,0	13,06	1,28	1,22	0,05	4%
	8	60,8	101,0	11,54	1,20			
	12	62,8	101,0	11,83	1,19			
Kondycjonowanie z cyklem zamrażania	4	61,8	101,0	12,53	1,28	1,16	0,21	18%
	6	60,9	101,0	12,32	1,28			
	9	65,7	101,0	9,58	0,92			

Tablica Z.9.4. Wyniki badań odporności na działanie wody i mrozu SMA 0/11 mm z asfaltem mod. 45/80-55 i dodatkiem Rediset

Rodzaj grupy	Nr próbki	Wysokość średnia [mm]	Średnica średnia [mm]	Siła niszcząca [kN]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]			
					Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności
Próbki referencyjne	2	64,9	101,0	13,83	1,34	1,23	0,13	11%
	7	62,4	101,0	10,71	1,08			
	12	61,2	101,0	12,28	1,26			
Kondycjonowanie bez cyklu zamrażania	10	62,5	101,0	12,69	1,28	1,19	0,11	9%
	11	63,3	101,0	12,24	1,22			
	14	63,6	101,0	10,73	1,06			
Kondycjonowanie z cyklem zamrażania	8	63,3	101,0	13,15	1,31	1,32	0,05	4%
	13	63,0	101,0	13,74	1,37			
	15	65,6	101,0	13,33	1,28			

**ZAŁĄCZNIK 10 – WYNIKI BADAŃ ODPORNOŚCI NA
STARZENIE MIESZANKI SMA ZASTOSOWANEJ NA
ODCINKU DOŚWIADCZALNYM**

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.10.1. Wyniki badań odporności na starzenie SMA 0/11 mm z asfaltem mod. 45/80-55 – Próbki referencyjne

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Wysokość [mm]	Średnica [mm]	Siła niszcząca [kN]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]:					
					Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
GO31	20	67	101	23,55	2,22	2,17	0,05	2%	2,11	2,22
GO32		67	101	22,40	2,11					
GO33		69	101	24,01	2,18					
GO34	10	69	101	37,01	3,40	3,32	0,08	2%	3,23	3,40
GO35		67	101	35,43	3,33					
GO36		67	101	34,25	3,23					
GO37	0	67	101	44,90	4,24	4,49	0,23	5%	4,24	4,71
GO38		67	101	49,91	4,71					
GO39		67	101	48,24	4,52					
GO40	-10	67	101	54,88	5,18	4,41	0,73	17%	3,72	5,18
GO41		67	101	46,16	4,34					
GO42		67	101	39,64	3,72					
GO43	-20	67	101	41,03	3,87	4,47	0,61	14%	3,87	5,08
GO44		67	101	47,14	4,45					
GO45		68	101	54,52	5,08					

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Moduł sztywności sprężystej [MPa]							
		Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
GO31	20	6 464	6 557	6 511	6 402	175	3%	6 201	6 511
GO32		6 586	6 405	6 496					
GO33		6 209	6 193	6 201					
GO34	10	10 498	10 120	10 309	9 969	584	6%	9 294	10 309
GO35		9 356	9 232	9 294					
GO36		10 379	10 228	10 304					
GO37	0	10 247	10 223	10 235	9 764	411	4%	9 482	10 235
GO38		9 553	9 411	9 482					
GO39		9 567	9 581	9 574					
GO40	-10	18 347	17 904	18 126	19 038	1 357	7%	18 126	20 597
GO41		18 581	18 203	18 392					
GO42		20 571	20 623	20 597					
GO43	-20	23 404	22 734	23 069	22 494	504	2%	22 128	23 069
GO44		22 618	21 951	22 285					
GO45		21 866	22 389	22 128					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.10.2. Wyniki badań odporności na starzenie SMA 0/11 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 – Próbki poddane procesowi symulowanego starzenia długoterminowego

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Wysokość [mm]	Średnica [mm]	Siła niszcząca [kN]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]:					
					Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
GO1	20	69	101	23,06	2,11	2,09	0,03	2%	2,05	2,11
GO2		68	101	22,16	2,05					
GO3		68	101	22,73	2,11					
GO4	10	68	101	33,99	3,13	2,94	0,18	6%	2,78	3,13
GO5		68	101	30,18	2,78					
GO6		72	101	33,00	2,90					
GO7	0	64	101	42,56	4,19	3,99	0,25	6%	3,71	4,19
GO8		69	101	40,48	3,71					
GO9		70	101	45,20	4,06					
GO10	-10	67	101	23,20	2,20	4,66	-	-	-	-
GO11		68	101	29,25	2,63					
GO12		68	101	50,15	4,66					
GO13	-20	69	101	48,34	4,44	4,55	0,73	16%	3,88	5,34
GO14		67	101	40,96	3,88					
GO15		69	101	57,98	5,34					

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Moduł sztywności sprężystej [MPa]							
		Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
GO1	20	6 231	6 311	6 271	6 006	253	4%	5 768	6 271
GO2		5 756	5 779	5 768					
GO3		6 122	5 839	5 981					
GO4	10	9 152	9 148	9 150	9 235	443	5%	8 841	9 714
GO5		9 067	8 614	8 841					
GO6		9 827	9 601	9 714					
GO7	0	14 963	15 231	15 097	14 529	843	6%	13 560	15 097
GO8		13 698	13 422	13 560					
GO9		14 816	15 041	14 929					
GO10	-10	18 069	17 712	17 891	18 003	115	1%	17 891	18 120
GO11		18 278	17 721	18 000					
GO12		18 389	17 851	18 120					
GO13	-20	26 012	26 880	26 446	24 545	1 712	7%	23 124	26 446
GO14		22 810	23 437	23 124					
GO15		24 345	23 785	24 065					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.10.3. Wyniki badań odporności na starzenie SMA 0/11 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 i dodatkiem Ceca Base
RT – Próbki referencyjne

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Wysokość [mm]	Średnica [mm]	Siła niszcząca [kN]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]:					
					Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
LO31	20	101	69	18,97	1,75	1,74	0,05	3%	1,68	1,79
LO32		101	68	19,43	1,79					
LO33		101	69	18,34	1,68					
LO34	10	101	67	35,02	3,29	3,17	0,17	5%	2,98	3,29
LO35		101	68	34,82	3,23					
LO36		101	73	34,37	2,98					
LO37	0	101	65	45,11	4,36	4,34	0,03	1%	4,31	4,36
LO38		101	66	45,19	4,31					
LO39		101	67	46,27	4,35					
LO40	-10	101	69	31,79	2,93	3,70	1,00	27%	2,93	4,83
LO41		101	68	35,99	3,36					
LO42		101	67	51,17	4,83					
LO43	-20	101	69	42,30	3,84	4,21	0,39	9%	3,84	4,62
LO44		101	68	49,51	4,62					
LO45		101	68	44,60	4,16					

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Moduł sztywności sprężystej [MPa]							
		Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
LO31	20	4 806	4 766	4 786	5 504	866	16%	4 786	6 466
LO32		5 000	7 931	6 466					
LO33		5 317	5 206	5 262					
LO34	10	8 501	8 386	8 444	8 956	444	5%	8 444	9 217
LO35		9 137	9 296	9 217					
LO36		9 185	9 229	9 207					
LO37	0	11 728	11 982	11 855	11 472	342	3%	11 199	11 855
LO38		11 023	11 374	11 199					
LO39		11 142	11 581	11 362					
LO40	-10	17 253	16 758	17 006	16 822	239	1%	16 551	17 006
LO41		16 616	17 201	16 909					
LO42		16 847	16 255	16 551					
LO43	-20	21 310	19 669	20 490	20 981	851	4%	20 490	21 964
LO44		21 033	19 947	20 490					
LO45		21 577	22 350	21 964					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.10.4. Wyniki badań odporności na starzenie SMA 0/11 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 i dodatkiem Ceca Base RT – Próbki poddane procesowi symulowanego starzenia długoterminowego

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Wysokość [mm]	Średnica [mm]	Siła niszcząca [kN]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]:					
					Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
LO1	20	101	63	17,90	1,80	1,77	0,07	4%	1,70	1,82
LO2		101	64	17,28	1,70					
LO3		101	65	18,65	1,82					
LO4	10	101	66	35,63	3,38	3,31	0,11	3%	3,18	3,38
LO5		101	65	34,62	3,37					
LO6		101	66	33,07	3,18					
LO7	0	101	66	48,37	4,63	4,46	0,23	5%	4,21	4,63
LO8		101	66	47,93	4,56					
LO9		101	67	44,71	4,21					
LO10	-10	101	68	43,27	3,99	4,42	0,61	14%	3,99	5,12
LO11		101	65	53,09	5,12					
LO12		101	68	44,83	4,16					
LO13	-20	101	66	52,65	5,04	4,62	0,56	12%	3,99	5,04
LO14		101	67	51,31	4,85					
LO15		101	69	43,46	3,99					

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Moduł sztywności sprężystej [MPa]							
		Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
LO1	20	5 360	5 484	5 422	5 157	281	5%	4 862	5 422
LO2		4 955	4 768	4 862					
LO3		5 142	5 233	5 188					
LO4	10	9 346	9 205	9 276	9 353	128	1%	9 276	9 501
LO5		9 379	9 185	9 282					
LO6		9 581	9 420	9 501					
LO7	0	15 443	15 579	15 511	14 971	475	3%	14 620	15 511
LO8		14 971	14 269	14 620					
LO9		15 153	14 412	14 783					
LO10	-10	17 589	18 051	17 820	18 053	203	1%	17 820	18 194
LO11		17 947	18 341	18 144					
LO12		17 904	18 484	18 194					
LO13	-20	22 669	22 119	22 394	22 395	393	2%	22 004	22 789
LO14		22 294	21 713	22 004					
LO15		23 318	22 259	22 789					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.10.5. Wyniki badań odporności na starzenie SMA 0/11 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 i dodatkiem ViaTop Plus CT40 (odpowiednik Sasobitu) – Próbki referencyjne

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Wysokość [mm]	Średnica [mm]	Siła niszcząca [kN]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]:					
					Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
HO34	10	101	68	33,31	3,08	3,30	0,25	8%	3,08	3,57
HO35		101	68	38,22	3,57					
HO36		101	67	34,47	3,24					
HO37	0	101	67	43,23	4,05	3,75	0,56	15%	3,10	4,09
HO38		101	66	43,07	4,09					
HO39		101	69	33,89	3,10					
HO40	-10	101	67	45,95	4,35	3,85	0,44	11%	3,54	4,35
HO41		101	69	38,80	3,54					
HO42		101	67	38,73	3,65					
HO43	-20	101	68	32,74	3,04	3,04	0,00	0%	3,04	3,04
HO44		101	68	32,89	3,04					

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Moduł sztywności sprężystej [MPa]							
		Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
HO31	20	7 159	6 901	7 030	7 361	329	4%	7 030	7 688
HO32		7 746	7 629	7 688					
HO33		7 520	7 213	7 367					
HO34	10	9 905	9 633	9 769	10 334	753	7%	9 769	11 189
HO35		11 259	11 118	11 189					
HO36		10 129	9 962	10 046					
HO37	0	14 067	14 198	14 133	12 605	1 478	12%	11 183	14 133
HO38		12 252	12 746	12 499					
HO39		11 103	11 262	11 183					
HO40	-10	16 624	16 030	16 327	16 454	110	1%	16 327	16 526
HO41		16 280	16 772	16 526					
HO42		16 272	16 743	16 508					
HO43	-20	20 425	21 094	20 760	21 144	544	3%	20 760	21 529
HO44		21 892	21 166	21 529					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.10.6. Wyniki badań odporności na starzenie SMA 0/11 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 i dodatkiem ViaTop Plus CT40 (odpowiednik Sasobitu) – Próbki poddane procesowi symulowanego starzenia długoterminowego

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Wysokość [mm]	Średnica [mm]	Siła niszcząca [kN]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]:					
					Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
HO1	20	101	67	21,01	1,99	1,84	0,15	8%	1,69	1,99
HO2		101	66	19,30	1,83					
HO3		101	68	18,18	1,69					
HO4	10	101	68	33,19	3,09	3,04	0,22	7%	2,80	3,23
HO5		101	66	33,71	3,23					
HO6		101	69	30,76	2,80					
HO7	0	101	67	44,06	4,13	4,03	0,09	2%	3,97	4,13
HO8		101	67	42,34	3,97					
HO9		101	66	41,96	3,98					
HO10	-10	101	67	49,33	4,61	4,42	0,23	5%	4,17	4,61
HO11		101	68	44,81	4,17					
HO12		101	69	48,86	4,48					
HO13	-20	101	69	46,26	4,26	4,40	0,14	3%	4,26	4,53
HO14		101	67	47,04	4,43					
HO15		101	68	48,63	4,53					

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Moduł sztywności sprężystej [MPa]							
		Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
HO1	20	7 178	7 261	7 220	7 088	159	2%	6 912	7 220
HO2		7 079	6 745	6 912					
HO3		7 183	7 082	7 133					
HO4	10	10 300	10 030	10 165	10 570	351	3%	10 165	10 784
HO5		10 902	10 665	10 784					
HO6		10 815	10 708	10 762					
HO7	0	15 880	15 662	15 771	14 901	793	5%	14 220	15 771
HO8		14 100	14 339	14 220					
HO9		14 518	14 906	14 712					
HO10	-10	18 909	19 543	19 226	18 388	961	5%	17 339	19 226
HO11		17 074	17 603	17 339					
HO12		18 277	18 923	18 600					
HO13	-20	22 630	21 518	22 074	22 248	352	2%	22 017	22 654
HO14		22 099	23 209	22 654					
HO15		21 661	22 373	22 017					

BADANIE I ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI FIZYKOMECHANICZNYCH MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE PRODUKCJI

Tablica Z.10.7. Wyniki badań odporności na starzenie SMA 0/11 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 i dodatkiem Rediset WMX – Próbki referencyjne

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Wysokość [mm]	Średnica [mm]	Siła niszcząca [kN]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]:					
					Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
K31	20	101	69	19,50	1,78	1,75	0,09	5%	1,66	1,83
K32		101	68	19,75	1,83					
K33		101	69	18,21	1,66					
K34	10	101	70	33,80	3,05	3,03	0,04	1%	2,98	3,06
K35		101	70	32,90	2,98					
K36		101	69	33,37	3,06					
K37	0	101	69	48,53	4,43	4,29	0,27	6%	3,98	4,47
K38		101	68	48,01	4,47					
K39		101	67	42,51	3,98					
K40	-10	101	68	36,49	3,39	3,61	0,21	6%	3,39	3,81
K41		101	68	41,36	3,81					
K42		101	72	41,55	3,62					
K43	-20	101	69	41,63	3,82	4,08	0,29	7%	3,82	4,40
K44		101	70	48,47	4,40					
K45		101	71	45,47	4,02					

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Moduł sztywności sprężystej [MPa]							
		Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
K31	20	5 019	5 101	5 060	5 171	116	2%	5 060	5 292
K32		5 200	5 125	5 163					
K33		5 362	5 221	5 292					
K34	10	8 461	8 316	8 389	8 960	499	6%	8 389	9 314
K35		9 469	9 158	9 314					
K36		9 231	9 122	9 177					
K37	0	11 869	12 195	12 032	12 620	511	4%	12 032	12 949
K38		12 704	13 056	12 880					
K39		12 828	13 069	12 949					
K40	-10	15 732	16 269	16 001	16 602	772	5%	16 001	17 473
K41		17 194	17 752	17 473					
K42		15 782	16 885	16 334					
K43	-20	21 827	21 040	21 434	20 819	1 091	5%	19 560	21 465
K44		20 802	22 127	21 465					
K45		19 935	19 185	19 560					

Tablica Z.10.8. Wyniki badań odporności na starzenie SMA 0/11 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 i dodatkiem Rediset WMX – Próbki poddane procesowi symulowanego starzenia długoterminowego

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Wysokość [mm]	Średnica [mm]	Siła niszcząca [kN]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa]:					
					Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
K1	20	101	67	21,03	1,97	1,97	0,05	3%	1,92	2,02
K2		101	68	21,80	2,02					
K3		101	69	20,89	1,92					
K4	10	101	68	32,92	3,05	3,00	0,04	1%	2,96	3,05
K5		101	69	32,37	2,98					
K6		101	68	32,11	2,96					
K7	0	101	67	42,16	3,98	4,07	0,10	2%	3,98	4,17
K8		101	69	44,27	4,07					
K9		101	67	43,98	4,17					
K10	-10	101	66	50,04	4,80	4,69	0,15	3%	4,58	4,80
K11		101	69	50,04	4,58					
K12		101	68	28,55 28,55	2,63 2,63					
K13	-20	101	66	30,64	2,91	3,79	0,79	21%	2,91	4,43
K14		101	67	47,36	4,43					
K15		101	69	44,24	4,02					

Numer próbki	Temperatura badania [°C]	Moduł sztywności sprężystej [MPa]							
		Położenie pierwsze - 0°	Położenie drugie - 90°	Średnia z dwóch położeń	Średnia w grupie	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności	Wartość minimalna	Wartość maksymalna
K1	20	6 336	6 302	6 319	6 053	248	4%	5 829	6 319
K2		5 969	6 052	6 011					
K3		5 851	5 806	5 829					
K4	10	8 917	8 528	8 723	9 150	380	4%	8 723	9 449
K5		9 476	9 421	9 449					
K6		9 304	9 255	9 280					
K7	0	14 748	15 252	15 000	14 676	728	5%	13 842	15 186
K8		15 013	15 358	15 186					
K9		13 602	14 082	13 842					
K10	-10	16 595	17 278	16 937	17 811	894	5%	16 937	18 723
K11		18 093	17 452	17 773					
K12		18 318	19 127	18 723					
K13	-20	21 406	22 195	21 801	21 818	486	2%	21 341	22 312
K14		22 855	21 769	22 312					
K15		21 018	21 663	21 341					

**ZAŁĄCZNIK 11 – WYNIKI BADAŃ ODPORNOŚCI NA
DEFORMACJE TRWAŁE MIESZANKI SMA ZASTOSOWANEJ NA
ODCINKU DOŚWIADCZALNYM**

Tablica Z.11.1. Wyniki badań odporności na deformacje trwałe poszczególnych próbek SMA 0/11 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 czystym i z dodatkami w europejskim koleinomierzu kołowym wg PN-EN 12697-22 metoda B – Próbki formowane i zagęszczane w laboratorium

Rodzaj mieszanki	Nr próbki	Głębokość koleiny RD ₁₀₀₀₀ [mm]		Prędkość przyrostu koleiny WTS _{AIR} [mm/1000/p]		Proporcjonalna głębokość koleiny PRD _{AIR} [%]	
		Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie
45/80-55	1405/1	2,74	2,84	0,05	0,050	6,85	7,09
	1405/2	2,93		0,05		7,33	
45/80-55 + 0,35% Ceca Base RT	1407/1	2,68	2,84	0,04	0,045	6,70	7,10
	1407/2	3,00		0,05		7,50	
45/80-55 + 0,5% Viatop	1408/1	2,01	1,78	0,04	0,025	5,03	4,44
	1408/2	1,54		0,01		3,85	
45/80-55 + 2% Rediset WMX	1406/1	2,78	2,67	0,05	0,045	6,95	6,66
	1406/2	2,55		0,04		6,38	

Tablica Z.11.2. Wyniki badań odporności na deformacje trwałe poszczególnych próbek SMA 0/11 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 czystym i z dodatkami w europejskim koleinomierzu kołowym wg PN-EN 12697-22 metoda B – Próbki odwiercone z nawierzchni

Rodzaj mieszanki	Nr próbki	Głębokość koleiny RD ₁₀₀₀₀ [mm]		Prędkość przyrostu koleiny WTS _{AIR} [mm/1000/p]		Proporcjonalna głębokość koleiny PRD _{AIR} [%]	
		Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie	Dla pojedynczej próbki	Średnia w grupie
45/80-55	1437	2,34	3,46	0,02	0,045	5,44	7,49
	1438	4,58		0,07		9,54	
45/80-55 + 0,35% Ceca Base RT	1423	2,34	3,45	0,03	0,055	5,85	8,35
	1426	4,56		0,08		10,86	
45/80-55 + 0,5% Viatop	1431	2,10	3,00	0,02	0,030	5,12	7,10
	1432	3,90		0,04		9,07	
45/80-55 + 2% Rediset WMX	1466	2,95	2,51	0,05	0,035	7,38	6,26
	1467	2,06		0,02		5,15	

**ZAŁĄCZNIK 12 – WYNIKI BADAŃ ODPORNOŚCI NA SPEKANIA
NISKOTEMPERATUROWE MIESZANKI SMA ZASTOSOWANEJ NA
ODCINKU DOŚWIADCZALNYM**

Tablica Z.12.1. Wyniki badań wytrzymałości na zginanie, odkształcenia granicznego oraz modułu sztywności SMA 0/11 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 metodą zginania belki trójpunktowej w temperaturze -20 °C

Numer próbki	$\sigma_{\text{graniczne}}$ [MPa]	$\epsilon_{\text{graniczne}}$ [‰]	Moduł [MPa]
1405-1	7,72	1,86	6 739
1405-2	7,87	1,38	6 862
1405-3	6,65	1,92	6 022
1405-4	7,20	0,95	9 126
1405-5	6,01	1,78	7 021
Średnia	7,09	1,58	7 154
Odchylenie standardowe	0,77	0,41	1 167
Współczynnik zmienności	11%	26%	16%
Wartość minimalna	6,01	0,95	6 022
Wartość maksymalna	7,87	1,92	9 126

Tablica Z.12.2. Wyniki badań wytrzymałości na zginanie, odkształcenia granicznego oraz modułu sztywności SMA 0/11 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 i dodatkiem Ceca Base RT metodą zginania belki trójpunktowej w temperaturze -20 °C

Numer próbki	$\sigma_{\text{graniczne}}$ [MPa]	$\epsilon_{\text{graniczne}}$ [‰]	Moduł [MPa]
1407-1	6,44	0,91	9 522
1407-2	6,75	1,44	5 767
1407-3	6,67	1,72	9 792
1407-4	7,37	1,55	9 944
1407-5	6,41	1,38	5 669
Średnia	6,73	1,40	8 139
Odchylenie standardowe	0,39	0,30	2 215
Współczynnik zmienności	6%	22%	27%
Wartość minimalna	6,41	0,91	5 669
Wartość maksymalna	7,37	1,72	9 944

Tablica Z.12.3. Wyniki badań wytrzymałości na zginanie, odkształcenia granicznego oraz modułu sztywności SMA 0/11 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 i dodatkiem Viatop Plus CT40 metodą zginania belki trójpunktowej w temperaturze -20 °C

Numer próbki	$\sigma_{\text{graniczne}}$ [MPa]	$\epsilon_{\text{graniczne}}$ [‰]	Moduł [MPa]
1408-1	5,32	0,92	8 713
1408-2	6,55	1,34	9 844
1408-3	7,53	1,45	9 441
1408-4	7,93	1,25	10 231
1408-5	6,92	1,75	7 096
Średnia	6,85	1,34	9 065
Odchylenie standardowe	1,01	0,30	1 236
Współczynnik zmienności	15%	23%	14%
Wartość minimalna	5,32	0,92	7 096
Wartość maksymalna	7,93	1,75	10 231

Tablica Z.12.3. Wyniki badań wytrzymałości na zginanie, odkształcenia granicznego oraz modułu sztywności SMA 0/11 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 i dodatkiem Rediset WMX metodą zginania belki trójpunktowej w temperaturze -20 °C

Numer próbki	$\sigma_{\text{graniczne}}$ [MPa]	$\varepsilon_{\text{graniczne}}$ [‰]	Moduł [MPa]
1406-1	6,95	0,69	8 407
1406-2	7,79	1,77	5 611
1406-3	7,01	1,17	8 103
1406-4	7,28	1,42	8 929
1406-5	6,48	1,39	8 456
Średnia	7,10	1,29	7 901
Odchylenie standardowe	0,48	0,40	1 314
Współczynnik zmienności	7%	31%	17%
Wartość minimalna	6,48	0,69	5 611
Wartość maksymalna	7,79	1,77	8 929

**ZAŁĄCZNIK 13 – WYNIKI BADAŃ ZAGĘSZCZENIA MIESZANKI
SMA ZASTOSOWANEJ NA ODCINKU DOŚWIADCZALNYM**

Tablica Z.13.1. Wyniki badań gęstości objętościowej, wolnych przestrzeni i wskaźników zagęszczenia mieszanki mastyksu grysowego 0/11 mm z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 (czystym i z dodatkami) wbudowanego na odcinka doświadczalnym

Rodzaj mieszanki	Nr próbki	Gęstość pozorna [g/cm ³]	Gęstość właściwa [g/cm ³]	Gęstość pozorna z Marshalla [g/cm ³]	V _v w próbce [%]	V _v średnia [%]	I _s w próbce [%]	I _s średni [%]
45/80-55	1 435	2,316	2,450	2,369	5,46%	4,70%	97,8%	98,56%
	1 436	2,325	2,450	2,369	5,09%		98,2%	
	1 439	2,364	2,450	2,369	3,52%		99,8%	
	1 440	2,334	2,450	2,369	4,72%		98,5%	
45/80-55 + 0,35% Ceca Base RT	1 424	2,357	2,450	2,361	3,81%	4,42%	99,8%	99,18%
	1 425	2,316	2,450	2,361	5,49%		98,1%	
	1 427	2,343	2,450	2,361	4,37%		99,2%	
	1 428	2,352	2,450	2,361	4,00%		99,6%	
45/80-55 + 0,5% Viatop Plus CT40	1 429	2,328	2,450	2,358	4,99%	4,69%	98,7%	99,03%
	1 430	2,368	2,450	2,358	3,34%		100,4%	
	1 433	2,308	2,450	2,358	5,80%		97,9%	
	1 434	2,337	2,450	2,358	4,62%		99,1%	
45/80-55 + 2% Rediset WMX	1 464	2,384	2,450	2,368	2,68%	2,39%	100,7%	100,99%
	1 465	2,390	2,450	2,368	2,46%		100,9%	
	1 468	2,391	2,450	2,368	2,41%		101,0%	
	1 469	2,401	2,450	2,368	1,99%		101,4%	

**ZAŁĄCZNIK 14 – ANALIZA ISTOTNOŚCI RÓŻNIC WYNIKÓW
BADAŃ MODUŁÓW SZTYWNOŚCI BETONÓW ASFALTOWYCH
PO STARZENIU DŁUGOTERMINOWYM W TEMPERATURZE 10 °C**

Tablica Z.14.1. Obliczenie wartości testowych hipotezy zakładającej przy prawdopodobieństwie ufności $P = 90\%$ istotną różnicę modułów sztywności betonów asfaltowych z asfaltem zwykłym 50/70 w temperaturze 10°C po starzeniu długoterminowym

Rodzaj dodatku		A	B	C	D	E	F
		-	Sasobit	Licomont BS100	Rediset WMX	Ceca BaseRT	zeolit
Liczba pomiarów w grupie n_i	n	3	3	3	3	3	3
Wartość średnia w grupie x_i	x	15 467	18 161	17 271	16 496	15 549	13 269
Odchylenie standardowe w grupie x_i	s	1 485	615	1 208	1 248	1 752	332
Wariancja w grupie s_i^2	s^2	2 204 428	377 820	1 458 368	1 556 330	3 068 076	110 243
s_i^2/n		734 809	125 940	486 123	518 777	1 022 692	36 748
Różnice wartości średnich	A		-2 694	-1 804	-1 029	-82	2 198
	B			890	1 665	2 612	4 892
	C				775	1 722	4 002
	D					947	3 227
	E						2 280
	F						
Obliczone wartości testowe	A		2,904	1,633	0,919	0,062	2,502
	B			1,138	2,074	2,437	12,129
	C				0,773	1,402	5,535
	D					0,763	4,330
	E						2,215
	F						
Prawdziwość hipotezy o istotnej różnicy modułów dla prawdopodobieństwa ufności $P = 90\%$ ($k = 4, t = 2,132$)	A		<u>TAK</u>	NIE	NIE	NIE	<u>TAK</u>
	B			NIE	NIE	<u>TAK</u>	<u>TAK</u>
	C				NIE	NIE	<u>TAK</u>
	D					NIE	<u>TAK</u>
	E						<u>TAK</u>
	F						

Tablica Z.14.1. Wartości testowe hipotezy zakładającej przy prawdopodobieństwie ufności $P = 90\%$ istotną różnicę modułów sztywności betonów asfaltowych z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 w temperaturze 10°C po starzeniu długoterminowym

Rodzaj dodatku		G	H	I	K	L	M
		-	Sasobit	Licomont BS100	Rediset WMX	Ceca BaseRT	zeolit
Liczba pomiarów w grupie n_i	n	3	3	3	3	3	3
Wartość średnia w grupie x_i	x	9 198	9 321	9 326	9 055	7 707	8 276
Odchylenie standardowe w grupie x_i	s	485	428	449	429	871	344
Wariancja w grupie s_i^2	s^2	234 781	182 782	201 896	184 364	758 334	118 401
s_i^2/n		78 260	60 927	67 299	61 455	252 778	39 467
Różnice wartości średnich	G		-123	-128	144	1 492	922
	H			-5	266	1 615	1 045
	I				271	1 620	1 050
	K					1 348	779
	L						-570
	M						
Obliczone wartości testowe	G		0,329	0,335	0,384	2,593	2,688
	H			0,014	0,761	2,883	3,298
	I				0,756	2,863	3,213
	K					2,405	2,451
	L						1,054
	M						
Prawdziwość hipotezy o istotnej różnicy modułów dla prawdopodobieństwa ufności $P = 90\%$ ($k = 4, t = 2,132$)	G		NIE	NIE	NIE	<u>TAK</u>	<u>TAK</u>
	H			NIE	NIE	<u>TAK</u>	<u>TAK</u>
	I				NIE	<u>TAK</u>	<u>TAK</u>
	K					<u>TAK</u>	<u>TAK</u>
	L						NIE
	M						