



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

**BADANIA MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O
OBNIŻONEJ TEMPERATURZE OTACZANIA**

RAPORT KOŃCOWY

Opracowano na zlecenie:
Generalna Dyrekcja Dróg
Krajowych i Autostrad
ul. Żelazna 59
00-848 WARSZAWA

Opracowali:

Prof. dr hab. inż. Józef Judycki – autor kierujący

Mgr inż. Marcin Stienss

Kierownik Katedry Inżynierii Drogowej - Prof. dr hab. inż. Józef Judycki

Gdańsk, listopad 2011

BADANIA MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE OTACZANIA – III ETAP – KOŃCOWY

SPIS TREŚCI

1. WSTĘP.....	5
1.1. PODSTAWA OPRACOWANIA.....	5
1.2. CEL I ZAKRES PRACY.....	5
1.3. OPIS PROBLEMU	6
2. PRZEGLĄD LITERATURY.....	7
2.1. KORZYŚCI WYNIKAJĄCE Z OBNIŻENIA TEMPERATURY PRODUKCJI MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH	7
2.2. SPOSOBY OBNIŻENIA TEMPERATURY PRODUKCJI MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH	8
2.3. PRZEGLĄD WYBRANYCH ŚRODKÓW DO OBNIŻANIA TEMPERATURY PRODUKCJI MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH.....	10
2.3.1. Sasobit.....	10
2.3.2. Asphaltan-B	12
2.3.3. Licomont BS 100	12
2.3.4. Rediset WMX.....	13
2.3.5. Ceca BASE RT	14
2.3.6. Zeolit	15
2.3.7. Colas 3E LT	17
2.4. PRZEGLĄD WYBRANYCH TECHNOLOGII PRODUKCJI MIESZANEK TYPU WMA W TECHNOLOGII SPIENIANIA ASFALTU.....	17
2.4.1. Shell WAM-Foam.....	17
2.4.2. Astec Double Barrel Green.....	19
2.4.3. Evotherm ET	21
2.4.4. LEA – Low Energy Asphalt.....	22
2.5. POZOSTAŁE TECHNOLOGIE.....	23
3. BADANIA LABORATORYJNE	24
3.1. CEL BADAŃ LABORATORYJNYCH	24
3.2. DOBÓR MATERIAŁÓW DO BADAŃ LABORATORYJNYCH.....	24
3.2.1 DOBÓR LEPISZCZA.....	24
3.2.2 DOBÓR DODATKÓW	24
3.2.3 DOBÓR KRUSZYWA	26
3.3 ZAKRES BADAŃ LABORATORYJNYCH	26
3.4 ZAPROJEKTOWANIE SKŁADU MIESZANKI MINERALNO-ASFALTOWEJ PRZEZNACZONEJ DO BADAŃ	27
3.5. BADANIA CECH LEPISZCZA PRZED I PO STARZENIU TFOT	31
3.6 BADANIA STABILNOŚCI MARSHALLA	40
3.7 BADANIA ODPORNOŚCI MIESZANEK NA DZIAŁANIE WODY I MROZU.....	42
3.7.1 METODYKA BADAŃA	43
3.7.1.1 PRZYGOTOWANIE PRÓBEK	43
3.7.1.1.1 ZAGĘSZCZANIE.....	43
3.7.1.1.2 KONDYCJONOWANIE	43
3.7.1.2 OPIS BADAŃA	44
3.7.1.2.1 WYTRZYMAŁOŚĆ NA POŚREDNIE ROZCIĄGANIE.....	44
3.7.1.2.2 MODUŁ SZTYWNOŚCI SPRĘŻYSTEJ PRZY POŚREDNIM ROZCIĄGANIU.....	45
3.7.1.3 OCENA I KRYTERIA ODPORNOŚCI MIESZANEK NA DZIAŁANIE WODY I MROZU	46
3.7.2 WYNIKI BADAŃ.....	47
3.7.3 ANALIZA WYNIKÓW.....	51
3.8 BADANIA WPŁYWU STARZENIA NA PARAMETRY BETONU ASFALTOWEGO.....	52
3.8.1.1 METODYKA BADAŃA	53
3.8.1.2. OCENA ODPORNOŚCI NA STARZENIE	54
3.8.2 WYNIKI BADAŃ.....	55

3.8.3 ANALIZA WYNIKÓW	61
3.9 BADANIA ODPORNOŚCI NA KOLEINOWANIE	62
3.9.1 METODYKA BADANIA	62
3.9.1.1 PRZYGOTOWANIE PRÓBEK.....	62
3.9.1.2 OPIS BADANIA.....	63
3.9.1.3 KRYTERIA OCENY.....	64
3.9.2 WYNIKI BADAŃ.....	65
3.9.3 ANALIZA WYNIKÓW	71
3.10 OKREŚLENIE ODPORNOŚCI NA SPĘKANIA NISKOTEMPERATUROWE	72
3.11 WNIOSKI OGÓLNE Z PROGRAMU BADAŃ LABORATORYJNYCH.....	76
4. BADANIA TERENOWE – ODCINEK DOŚWIADCZALNY	77
4.1. CEL BADAŃ TERENOWYCH	77
4.2 ZAKRES BADAŃ TERENOWYCH	77
4.3 GENEZA WYBORU LOKALIZACJI ODCINKA DOŚWIADCZALNEGO ORAZ CZYNNOŚCI WSTĘPNE	77
4.3 WYKONANIE ODCINKA DOŚWIADCZALNEGO.....	79
4.4 BADANIA NAWIERZCHNI I MIESZANEK Z ODCINKA DOŚWIADCZALNEGO	83
5. PODSUMOWANIE	84
6. LITERATURA.....	85

BADANIA MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH O OBNIŻONEJ TEMPERATURZE OTACZANIA – III ETAP – KOŃCOWY

1. Wstęp

1.1. Podstawa opracowania

Opracowanie wykonano na zlecenie Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad w Warszawie (GDDKiA w Warszawie) w ramach umowy nr 2572/2009 dotyczącej badań mieszanek mineralno-asfaltowych (m.m.a.) o obniżonej temperaturze otaczania.

1.2. Cel i zakres pracy

Celem opracowania jest ocena wpływu wybranych środków do obniżania temperatury produkcji i wbudowywania mieszanek mineralno-asfaltowych na ich parametry fizykomechaniczne i zachowanie się warstw z nich wykonanych w trakcie eksploatacji nawierzchni. Przeprowadzone badania laboratoryjne i terenowe miały na celu sformułowanie wytycznych dotyczących stosowania środków obniżających temperaturę produkcji i wbudowywania m.m.a. w polskich warunkach

Całość prac podzielono na następujące etapy:

- Etap I (wykonany w roku 2009) obejmował następujący zakres:
 - Przegląd literatury, przepisów i wytycznych dotyczących technologii obniżania temperatury produkcji mieszanek m.m.a.
 - Analiza dostępności środków od obniżania temperatury produkcji m.m.a.
 - Sprowadzenie wybranych środków
 - Zgromadzenie materiałów do badań laboratoryjnych – lepiszcza i kruszywa.
- Etap II (wykonany w roku 2010) polegający na przeprowadzeniu:
 - Badań laboratoryjnych asfaltów z dodatkiem środków obniżających temperaturę produkcji m.m.a.
 - Badań laboratoryjnych mieszanek mineralno-asfaltowych wytworzonych w laboratorium z asfaltami z dodatkiem środków obniżających temperaturę.
- oraz Etap III w trakcie którego:
 - Zakończono badania laboratoryjne mieszanek mineralno-asfaltowych z etapu II,
 - Wykonano odcinki doświadczalne nawierzchni z mieszanek mineralno-asfaltowych z wybranymi środkami obniżającymi temperatury wytworzenia i wbudowania.
 - Opracowano końcowy raport.

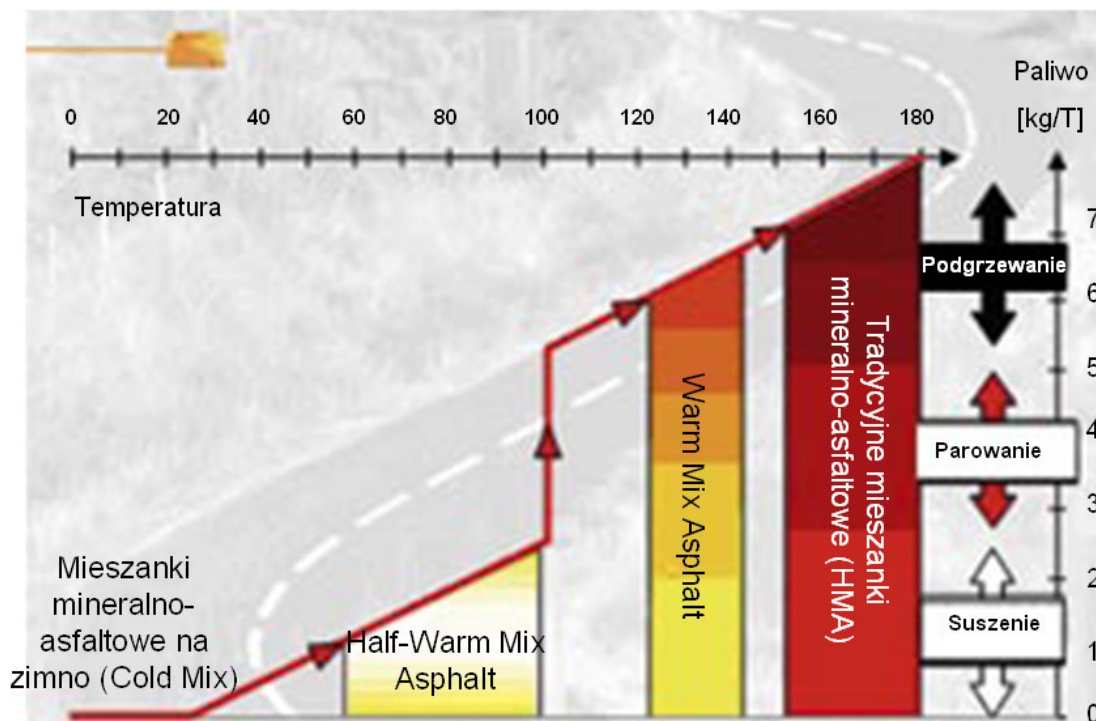
1.3. Opis problemu

Nie ulega wątpliwości, że w dzisiejszych czasach jakakolwiek gałąź techniki powinna uwzględniać w swoim działaniu nie tylko kwestie jak najlepszego rozwiązywania stawianych przez społeczeństwo zadań, ale również szeroko pojęty wpływ jaki będzie przy tym wywierać na otoczenie. Powyższe zobowiązanie dotyczy również drogownictwa. Unikanie przebiegu nowoprojektowanych tras przez tereny cenne środowiskowo, przejścia dla zwierząt, systemy oczyszczania wód opadowych spływających z powierzchni jezdni, sposoby wzmocnienia istniejącego podłoża bez konieczności wykonywania wymiany gruntu – wszystkie powyższe zagadnienia służą ochronie środowiska naturalnego. Droga przyjazna środowisku to nie tylko trasa zaprojektowana przy uwzględnieniu wyżej wymienionych kwestii; to również droga, przy budowie której zastosowano technologie oszczędzające surowce naturalne i energię, technologie zapewniające mniejszą emisję szkodliwych substancji do atmosfery. Z tego powodu powstały technologie recyklingu odzyskanych materiałów drogowych (kruszyw, destruktu asfaltowego, itp.) czy technologie pozwalające na użycie w budowlach drogowych odpadów przemysłowych (popiołów, żużli, miatu gumowego pochodzącego z opon samochodowych). Duży potencjał w zakresie zmniejszenia zużycia energii i emisji szkodliwych związków ma również sam proces wytwarzania mieszanek mineralno-asfaltowych. Wytwórnice mieszanek wyposażane są wprawdzie w coraz dokładniejsze systemy sterowania, oszczędniejsze palniki oraz filtry zapobiegające przedostawaniu się pyłów do atmosfery – stając się przy tym niewątpliwie bardziej przyjazne środowisku – jednak sama istota produkcji pozostaje niezmieniona. Wynika z tego konieczność podgrzania składników mieszanki – kruszywa i asfaltu – do odpowiedniej temperatury zapewniającej wymagane zmniejszenie lepkości asfaltu i właściwy stopień otoczenia poszczególnych ziaren kruszywa. W zależności od rodzaju produkowanej mieszanki oraz użytego rodzaju asfaltu temperatura ta zawiera się w przedziale 150 – 195 °C lub nawet 230 °C dla asfaltu lanego. Możliwość obniżenia temperatury produkcji nawet o rząd 20 – 30 °C dałaby zatem już wyraźne zmniejszenia zużycia energii. Dlatego też od już od połowy lat 90 XX wieku prowadzi się prace nad stworzeniem technologii umożliwiających wyprodukowanie, wbudowanie i zagęszczenie mieszanki mineralno-asfaltowej w temperaturze niższej niż dotychczasowo, ale o identycznych parametrach fizyko mechanicznych. W terminologii angielskiej mieszanki takie oznaczane są skrótem WMA – „warm mix asphalt” – („mieszanki mineralno-asfaltowe na ciepło”) – w odróżnieniu od tradycyjnych mieszanek HMA („hot mix asphalt”). Ogólna zasada ich produkcji opiera się na uzyskaniu odpowiednio wysokiej urabialności mieszanki bez konieczności podgrzania jej składników do dotychczas stosowanej wysokiej temperatury otaczania. Efekt ten uzyskuje się w dwojaki sposób:

- poprzez dodanie do asfaltu środków chemicznych polepszających urabialność mieszanki mineralno-asfaltowej (np. poprzez zmianę jego lepkości),
- uzyskanie spienienia asfaltu w obecności wody.

Mieszanek typu WMA nie należy utożsamiać z mieszankami mineralno-asfaltowymi na zimno („Cold Mix”), produkowanymi najczęściej na bazie emulsji asfaltowych. Zakres temperatur wytwarzania różnych rodzajów mieszanek przedstawiono na rysunku 1. Zaznaczono na nim również mieszanki rodzaju „Half-Warm Mix Asphalt”. Proces ich produkcji wykorzystuje spienianie asfaltu wraz z jednoczesnym niewielkim

podgrzaniem – poniżej temperatury parowania wody – kruszywa i/lub destruktu asfaltowego (temp. 60 – 100 °C).



Rys. 1 – Zakresy temperatury produkcji poszczególnych rodzajów mieszanek mineralno-asfaltowych [2]

2. Przegląd literatury

2.1. Korzyści wynikające z obniżenia temperatury produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych

Obniżenie temperatury produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych przynosi szereg korzyści środowiskowych i technologicznych [1, 3]. Jedną z głównych zalet jest niewątpliwie zmniejszenie zużycia energii poświęcanej na podgrzanie głównych materiałów składowych mieszanki, tj. kruszywa i asfaltu. W zależności od technologii produkcji (środki modyfikujące lepkość asfaltu, spienianie) i stosowanego paliwa w wytwórni (olej opałowy, gaz ziemny) redukcja temperatury produkowanej mieszanki o wielkość rzędu 30 °C skutkuje zmniejszeniem zużycia paliwa o 20 – 35% [3, 4]. W niektórych przypadkach, przy wykorzystaniu specjalnych technologii produkcji mieszanek WMA opierających się na procesie spieniania asfaltu (WAM-Foam, LEA) oszczędności te mogą sięgać nawet 50% [3]. Przedkłada się to na istotną redukcję emitowanego przez wytwórnię dwutlenku węgla, odpowiedzialnego za efekt cieplarniany. Przewaga mieszanek WMA nad tradycyjnymi uwidacznia się w jeszcze większym stopniu w przypadku analizy ilości emitowanych szkodliwych związków. W trakcie badań przeprowadzonych w Niemczech w trakcie produkcji mieszanki tradycyjnej oraz mieszanki WMA z dodatkiem zeolitu poziom emisji oparów i aerozoli w powietrzu zmierzony w wytwórni wynosił odpowiednio 350,7 mg/m³ – dla temperatury 168 °C – i jedynie 90,4 mg/m³ przy redukcji temperatury do 142 °C za

pomocą dodawanego środka [5]. Oznacza to ok. 75 procentowy spadek poziomu emisji szkodliwych związków, co skutkuje nie tylko poprawą jakości powietrza w sąsiedztwie samej wytwórni, trudną do oszacowania w wymiarze finansowym, lecz niewątpliwie ważną dla środowiska i okolicznych mieszkańców, ale również poprawia warunki pracy operatorów, kierowców i innych pracowników biorących udział w wykonywaniu nawierzchni. Jednocześnie niższa temperatura produkcji oznacza mniejsze starzenie technologiczne asfaltu skutkując tym samym mniejszym usztywnieniem mieszanki w trakcie eksploatacji nawierzchni. Ponadto przy stosowaniu technologii mma na ciepło można uzyskać szereg innych korzyści technologicznych, szczególnie ważnych z punktu widzenia wykonawców robót:

- wydłużenie sezonu wykonawczego, ponieważ temperatury w jakich układa i zagęszcza się mieszanki typu WMA mogą być niższe niż temperatury wbudowywania mieszanek tradycyjnych,
- wydłużenie czasu transportu z wytwórni na miejsce wbudowania bez ryzyka nie osiągnięcia właściwego poziomu zagęszczenia, wynikającego z nadmiernego ochłodzenia się mieszanki,
- skrócenie czasu niezbędnego dla ochłodzenia się nowoułożonej warstwy bitumicznej, a tym samym możliwość szybszego dopuszczenia jej do ruchu lub ułożenia kolejnej warstwy – jest to szczególnie ważne w przypadku krótkoterminowych remontów odcinków dróg silnie obciążonych ruchem (skrzyżowania i ulice w miastach) lub lotnisk.
- możliwość zwiększenia ilości destruktu asfaltowego dodawanego w trakcie recyklingu na gorąco w wytwórni, ponieważ ryzyko przegrzania błonki asfaltu znajdującej się na ziarnach destruktu jest mniejsze.
- technologie WMA pozwalają również na obniżenie temperatury produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych modyfikowanych miazgą gumową, którego dodanie do mieszanki wymusza stosowanie wyższej temperatury otaczania.

Należy jednak mieć na uwadze, że nie wszystkie wymienione korzyści można osiągnąć jednocześnie. Wbudowywanie w niskich temperaturach bądź wydłużenie czasu transportu wymaga wyprodukowania mieszanki w temperaturze normalnej przy jednoczesnym zastosowaniu technologii produkcji „na ciepło” – dodaniu środków chemicznych bądź spienienia asfaltu. Uzyskuje się wtedy dłuższe okno czasowe umożliwiające poprawne ułożenie i zagęszczenie.

2.2. Sposoby obniżenia temperatury produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych

Aby uzyskać mieszankę mineralno-asfaltową o właściwych parametrach kluczowym zagadnieniem jest dokładne otoczenie wszystkich ziaren mieszanki mineralnej błonką asfaltu o określonej grubości. Możliwe jest to jedynie w sytuacji, kiedy lepkość asfaltu w trakcie procesu otaczania jest odpowiednio mała, na poziomie ok. 0,2 Pas. Natomiast za maksymalny poziom lepkości asfaltu, przy którym następuje koniec efektywnego zagęszczania mieszanki mineralno-asfaltowej uznaje się 20 Pas [6]. Lepkość asfaltu zmniejsza się wraz ze wzrostem temperatury, a zatem w celu osiągnięcia przytoczonego wyżej poziomu 0,2 Pas należy go podgrzać do temperatury 150-195 °C. Podgrzewaniu podlega również drugi główny składnik mieszanki jakim jest kruszywo, w celu dokładnego wyeliminowania wilgoci zawartej w porach ziaren, co jest warunkiem niezbędnym dla zapewnienia odpowiedniej adhezji

pomiędzy asfaltem, a powierzchnią agregatu mineralnego. Należy jednak zaznaczyć, że podgrzewanie kruszywa do temperatury 150 – 195 °C wynika jedynie z konieczności doprowadzenia jego temperatury do poziomu temperatury asfaltu, a nie dokładnego wysuszenia, ponieważ parowanie wody z kruszywa odbywa się już w temperaturze 100 °C. Gdyby możliwe było uzyskanie odpowiednio niskiej lepkości lepiszcza asfaltowego już w temperaturze 120 – 130 °C również do tego poziomu należałoby podgrzewać kruszywo, oszczędzając tym samym ilość energii konieczną do podwyższenia temperatury mieszanki mineralnej o kolejne 30 – 40 °C. Ogólny bilans energetyczny procesu podgrzewania składników mma w trakcie produkcji można jeszcze bardziej polepszyć stosując dość proste sposoby zabezpieczania składowanego na wytwórni kruszywa przed opadami atmosferycznymi (np. stosując zadaszenia zasieków z kruszywem).

W chwili obecnej rozwijane są dwa główne kierunki obniżania temperatury mieszanek mineralno-asfaltowych:

- dodawanie do lepiszcza środków zmniejszających jego lepkość bądź działających powierzchniowo-czynnie (polepszających zwilżanie kruszywa przez asfalt),
- uzyskanie spienienia asfaltu w obecności wody.

Wśród środków modyfikujących lepkość asfaltu największą grupę stanowią różnego rodzaju dodatki organiczne o długich łańcuchach węglowodorowych, które po rozpuszczeniu charakteryzują się bardzo małą lepkością, tym samym po dodaniu do asfaltu obniżają lepkość całej mieszaniny. Pierwszym handlowo dostępnym dodatkiem działającym na powyższej zasadzie był wprowadzony w 1997 r. Sasobit [1]. Inne dodatki o podobnym działaniu to Asphaltan-B i Licomont BS 100. Skład i dokładny sposób działania pozostałych dostępnych na rynku środków chemicznych umożliwiających obniżenie temperatury mma – Rediset WMX, CECA Base RT, Colas 3E LT, Evotherm 3G, Iterlow T, QualiTherm, TLA-X, SonneWarmix – jest chroniony przez producentów w/w dodatków.

Drugi rodzaj technologii pozwalający otrzymać lepiszcze asfaltowe o mniejszej lepkości opiera się na zjawisku gwałtownego spieniania się gorącego asfaltu po dodaniu do niego wody. Pierwsze badania z asfaltem spienionym zrealizowano w 1956 r. na Uniwersytecie Iowa eksperymentując z dodawaniem do gorącego asfaltu pary wodnej w celu uzyskania lepiszcza służącego do stabilizacji gruntów [1]. W trakcie dalszego rozwoju parę wodną zastąpiono wodą. Technologia ta stała się wówczas bardziej praktyczna i w dniu dzisiejszym jest często wykorzystywana przy stabilizacji podłoża gruntowego bądź recyklingu istniejącej nawierzchni. Zastosowanie jej do produkcji mieszanek WMA jest najnowszą formą wykorzystania asfaltu spienionego.

Powyższe dwa sposoby obniżania temperatury określają również zakres niezbędnych modyfikacji wytwórni mieszanek mineralno-asfaltowych koniecznych do przeprowadzenia w przypadku chęci produkcji mieszanek WMA. W przypadku sporadycznej produkcji mieszanek WMA możliwe jest nawet ręczne podawanie środków w postaci granulek bądź proszku (Sasobit, Licomont BS 100, Asphaltan-B, Rediset WMX) wprost do mieszalnika otaczarni. Wariant ten należy jednak traktować jako prowizoryczny i możliwy do zastosowania jedynie w skali eksperymentalnej. Dla zapewnienia odpowiedniej dokładności i standardu produkcji konieczne jest

zainstalowania na wytwórni dozatorów, które będą odmierzały odpowiednie ilości w/w środków i podawały je do linii technologicznej asfaltu. Dodatki w postaci płynnej (np. CECA Base RT) mogą być dozowane za pośrednictwem instalacji przeznaczonej dla środków adhezyjnych. Natomiast adaptacja istniejącej wytwórni do standardu umożliwiającego wytwarzanie mieszanek WMA z asfaltem spienionym wiąże się z montażem komór spieniania bądź innych podzespołów umożliwiających dodawanie wody do mieszanki.

Obecnie znane technologie produkcji WMA tabelarycznie przedstawiono w tablicy 1, dzieląc je wg sposobu działania. Dodatkiem mogącym sprawić kłopot przy chęci jednoznacznego zakwalifikowania go do jednej z dwóch grup jest zeolit – minerał glinokrzemianowy dodawany do mieszanki mineralno-asfaltowej w postaci proszku. Zeolit posiada budowę krystaliczną zawierającą pomiędzy siecią kryształów do 21% wody, która po zadozowaniu zeolitu do mieszalnika otaczarni i zetknięciu z gorącym kruszywem i asfaltem zostaje uwolniona w postaci pary wodnej spieniając jednocześnie asfalt. Jednak z uwagi na brak konieczności stosowania specjalistycznego osprzętu (z wyjątkiem dozatora) można go kwalifikować jako dodatek do mieszanki mineralno-asfaltowej.

Tablica 1. – Sposoby wytwarzania mieszanek typu WMA

WAM – Warm Mix Asphalt	
<i>Dodatki do asfaltu / Specjalne lepiszcza</i>	<i>Specjalistyczne technologie produkcji / spienianie asfaltu</i>
Sasobit	Shell WAM-Foam
Asphaltan-B	ASTEC Double Barrel Green
Licomont BS 100	Evotharm ET, Evotharm DAT
Rediset WMX	LEA – Low Energy Asphalt
CECA Base RT	LEAB
Zeolit	Colas 3E DM
Colas 3E LT	Nynas LT Asphalt
Astech PER	AccuShear
Evotharm 3G	Aquablack WMA
Iterlow T	AquaFoam
QualiTherm	EcoFoam II
Sonne Warmix	Meeker Warm Mix
TLA-X Warm Mix	Terex WMA System
	TriMix Warm Injection System
	Ultrafoam GX

2.3. Przegląd wybranych środków do obniżania temperatury produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych

2.3.1. 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 [1]. Pod względem chemicznym jest to syntetyczny wosk (inaczej nazywany parafiną) produkowany metodą Fischera-Tropscha. Dla wielu polskich inżynierów, którzy wiele

słyszeli o gorszych właściwościach asfaltów parafinowych, dodawanie parafiny do asfaltu może uchodzić za herezję. Tak jednak nie jest, ponieważ różne typy parafiny mają bardzo różniące się cechy. Taki rodzaj wosku (parafiny) jakim jest Sasobit nie jest szkodliwy dla cech asfaltu [7]. 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 40 do 115 [1]. Skutkuje to wyższą temperaturą topnienia Sasobitu (98 °C) w porównaniu z naturalnymi parafinami [8]. Sasobit rozpuszcza się całkowicie w asfalcie w temperaturze powyżej 115 °C [2]. Po dodaniu do asfaltu Sasobit obniża lepkość całej mieszanki, 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 [1]. Postać handlowa Sasobitu to kuliste granulki (fotografia 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. 1 – Granulki Sasobitu

Sasobit stosowany jest zarówno w Europie, jak i Stanach Zjednoczonych oraz Kanadzie. Przy niewielkiej skali produkcji mieszanki WMA możliwe jest dodawanie Sasobitu ręcznie wprost do mieszalnika otaczarni w postaci wcześniej odważonych porcji. Przy takim sposobie dozowania – oprócz pracochłonności i małej dokładności wynikającej z możliwości wystąpienia błędu ludzkiego – zawsze występuje ryzyko nierównomiernego rozkładu Sasobitu w całej objętości mieszanki. Ponadto konieczne jest zmodyfikowanie procesu mieszania, tak aby do mieszalnika trafiał w pierwszej kolejności asfalt i drobne kruszywo tworzące mastyks – do którego dodaje się Sasobit – a dopiero na końcu kruszywo grube. Na fotografii 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 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 – Pneumatyczny dozator Sasobitu. W dolnej części widoczny ciśnieniowy przewód transportujący granulki [9]



Fot. 3 – Dozator przeznaczony do współpracy z wytwórnią o działaniu cyklicznym. Widoczne dwa zbiorniki – jeden do przechowania granulek, drugi do ich podgrzewania [17]

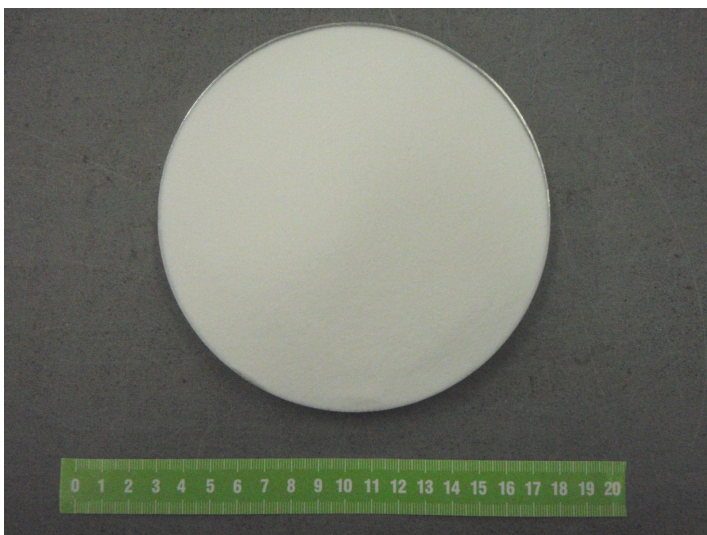
W zależności od ilości dodawanego Sasobitu umożliwia on obniżenie temperatury produkcji mieszanki mineralno-asfaltowej o 20-30 °C. W Europie, ilość dodawanego Sasobitu zawiera się zwykle w przedziale 2,5% – 3% w stosunku do masy lepiszcza asfaltowego, natomiast w Stanach Zjednoczonych wartość ta jest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

2.3.2. Asphaltan-B

Innym środkiem obniżającym temperaturę produkcji i zagęszczania mieszanek mineralno-asfaltowych działającym na takiej samej zasadzie jak Sasobit jest 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 [1]. 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.

2.3.3. Licomont BS 100

Licomont BS 100 produkowany jest przez szwajcarski koncern chemiczny Clariant. Mechanizm jego działania jest identyczny, jak w przypadku pozostałych środków o pochodzeniu organicznym. Licomont BS100 stanowiąc mieszaninę amidów kwasów tłuszczowych [3] o niewielkiej lepkości ($< 0,05$ Pas 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 [3]. Temperatura topnienia Licomontu jest nieco wyższa niż Sasobitu czy Asphaltanu-B i wynosi $141 - 146\text{ }^{\circ}\text{C}$. Licomont BS 100 występuje w postaci bardzo drobnego proszku (fotografia 4) bądź granulek, dostarczanego według uznania odbiorcy w małych, 25 kg workach bądź dużych opakowaniach 500 kg. Producent deklaruje możliwość obniżenia temperatury produkcji mieszanki mineralno-asfaltowej o $20-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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 5). Transport granulek Licomontu do zasobnika wagowego odbywa się drogą pneumatyczną.



Fot. 4 – Licomont BS 100 w postaci bardzo drobnego proszku



Fot. 5 – Zasobnik wagowy służący do odmierzania niezbędnej ilości środka – wytwórnia mas bitumicznych w Niemczech [3]

2.3.4. Rediset WMX

Firma Akzo Nobel, znana jako producent środków adhezyjnych, posiada w swojej ofercie środek obniżający temperaturę produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych o nazwie Rediset WMX. Dokładna formuła składu objęta jest tajemnicą wytwórcy. Rediset WMX pełni podwójną rolę – zarówno modyfikatora lepkości lepiscza

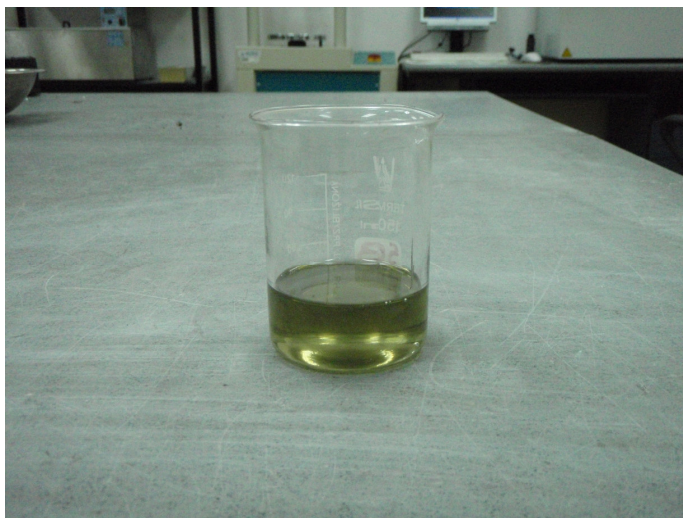
asfaltowego, jak i środka adhezyjnego polepszającego zwilżanie i przyczepność asfaltu do kruszywa [10]. Ilość dozowanego środka jest mniejsza niż w przypadku wcześniej wymienionych i wynosi od 1 do 2% w stosunku do masy lepiszcza. Pozwala to na obniżenie temperatury produkcji o 20-30 °C. Rediset WMX występuje w postaci brązowych lub żółtych płatków (fotografia 6), które można dodawać bezpośrednio do mieszanki mineralno-asfaltowej lub uprzednio do asfaltu.



Fot. 6 – Płatki Rediset WMX

2.3.5. Ceca BASE RT

Jednym z kilku dostępnych płynnych środków do obniżania temperatury produkcji i wbudowywania mieszanek mineralno-asfaltowych jest CECA Base RT, produkowana przez francuski koncern CECA. CECA Base RT jest oleistą cieczą o zielonkawej barwie (fotografia 7). Podobnie jak Rediset WMX, skład chemiczny niniejszego środka jest zastrzeżony. Cechą charakterystyczną jest bardzo niewielka ilość potrzebna do zmniejszenia temperatury produkcji mieszanki do 130 – 120 °C, która wynosi od 0,3 do 0,5 % masy asfaltu. Wbudowywanie może odbywać się wtedy z temperaturą 120 – 100 °C. CECA Base RT posiada niewątpliwą zaletę w stosunku do pozostałych środków występujących w postaci proszku bądź granulek, która polega na możliwości wykorzystania istniejącej na otaczarniach instalacji do dodawania płynnych środków adhezyjnych.



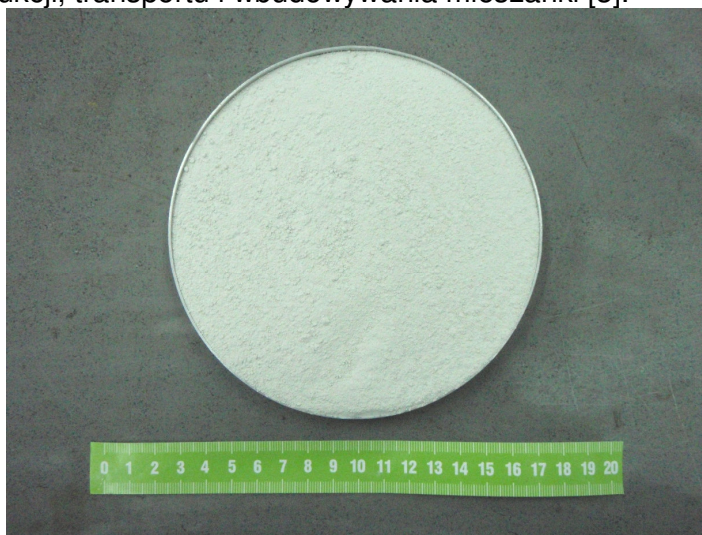
Fot. 7 – Środek CECA Base RT

2.3.6. Zeolit

Technologia produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych o obniżonej temperaturze z zastosowaniem zeolitu została opracowana przez firmę Eurovia z Francji [3]. 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 8) 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 [3].



Fot. 8 – Kryształy zeolitu w powiększeniu [9]



Fot. 9 – Zeolit w postaci dodawanej do mieszanki mineralno-asfaltowej

Zeolit dodawany jest w postaci drobnego proszku (fotografia 9) 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 otaczarni w momencie zadozowania asfaltu do kruszywa i wypełniacza. Odpowiednią ilość zeolitu otrzymuje się przy użyciu dodatkowo zainstalowanego zasobnika wagowego (fotografia 10). W otaczarniach o działaniu ciągłym zeolit dostarczany jest wprost drogą pneumatyczną z silosa (fotografia 11 i 12) do pierścienia recyklingowego, którego normalną funkcją jest dodawanie do mieszanki destruktu asfaltowego. Technologia zeolitu umożliwia obniżenie temperatury produkcji do 130 – 145 °C, a końcowa temperatura przy wbudowaniu wynosi ok. 100 °C.



Fot. 10 – Zasobnik wagowy służący do odmierzania ilości zeolitu [3]



Fot. 11 – Przewoźny silos zeolitu współpracujący z otaczarnią o działaniu ciągłym [11]



Fot. 12 – Stały silos przeznaczony do magazynowania zeolitu. U podstawy silosa widoczny jest mechanizm transportujący drogą pneumatyczną zeolit do otaczarni [11]

2.3.7. Colas 3E LT

Francuska firma wykonawcza Colas posiada w swojej ofercie opatentowane zmodyfikowane lepiszcze asfaltowe pozwalające na zmniejszenie temperatury produkcji m.m.a o 30 – 40 °C. Przygotowanie modyfikowanego lepiszcza może odbywać się zarówno jeszcze przed jego dostarczeniem do wytwórni mas bitumicznych, jak i w trakcie produkcji samej mieszanki. Z uwagi na autorski charakter niniejszej technologii w literaturze brak dokładnych informacji na jej temat.

2.4. Przegląd wybranych technologii produkcji mieszanek typu WMA w technologii spieniania asfaltu

2.4.1. Shell WAM-Foam

Współpraca koncernu Shell z norweską firmą wykonawczą Kolo-Veidekke doprowadziła do opracowania technologii WAM-Foam wykorzystującej dwa mechanizmy:

- uzyskaniu lepiszcza o odpowiedniej penetracji poprzez zmieszanie dwóch rodzajów asfaltu o znacznie różniących się twardościach (rzędu 300 i 20/30 j.pen.)
- wtryskiwaniu wody w strumień asfaltu w celu uzyskaniu jego spienienia.

W pierwszym stadium produkcji wysuszone kruszywo o temperaturze 100 – 120 °C trafia do mieszalnika otaczarni, gdzie następuje dodanie miękkiego asfaltu, który pomimo stosunkowo niskiej temperatury (100 °C) posiada wystarczająco niską lepkość, aby uzyskać wstępne pokrycie ziaren kruszywa. W drugim stadium produkcji następuje dodanie do wstępnie otoczonej mieszanki mineralnej spienionego

twardego asfaltu. Spienianie asfaltu następuje w specjalnej komorze spieniania, w której w strumień gorącego asfaltu wtryskiwana jest woda. Proporcje asfaltu miękkiego i twardego wynoszą zwykle 20/80 lub 30/70. Ilość dodawanej wody zawiera się w przedziale od 2 do 5% w stosunku do masy twardego asfaltu. Finalnym produktem jest mieszanka mineralno-asfaltowa o temperaturze 90 – 110 °C, której graniczna temperatura zagęszczenia może sięgać nawet 70 – 80 °C. Do standardu umożliwiającego produkcję mieszanek wg technologii WAM Foam można przystosować zarówno otaczarnie o działaniu cyklicznym, jak i bębnowym. W przypadku wytwórni cyklicznych normalnie używana linia asfaltu służy do dostarczania asfaltu miękkiego (fotografia 13), natomiast asfalt twardy doprowadzany jest nową, drugą linią z zainstalowaną na końcu komorą spieniania (fotografia 14).



Fot. 13 – Otaczarnia o działaniu cyklicznym z instalacją WAM-Foam. Widoczne dwie linie doprowadzenia asfaltu. Czerwonym okręgiem zaznaczono położenie komory spieniania [9]



Fot. 14 – Komora spienienia w powiększeniu [12]

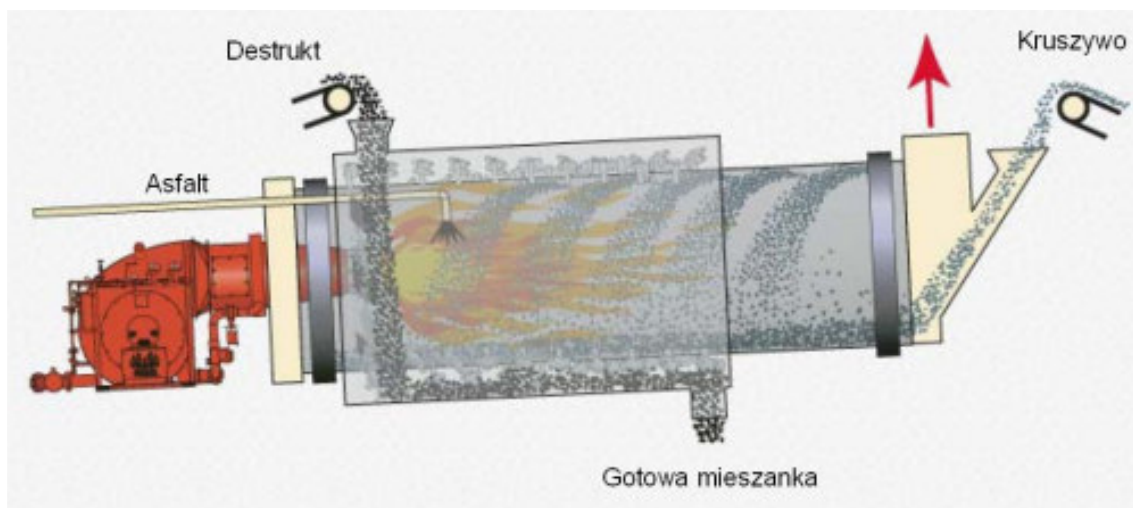
Technologia WAM-Foam pozwala niewątpliwie obniżyć temperaturę produkcji i wbudowywania mieszanki mineralno-asfaltowej w znacznie większym stopniu, niż jakkolwiek z dodatków do asfaltu. Jej wadą natomiast jest konieczność wykonania modyfikacji istniejącej wytwórni i konieczność dozowania w jednym czasie dwóch rodzajów asfaltu.

2.4.2. Astec Double Barrel Green

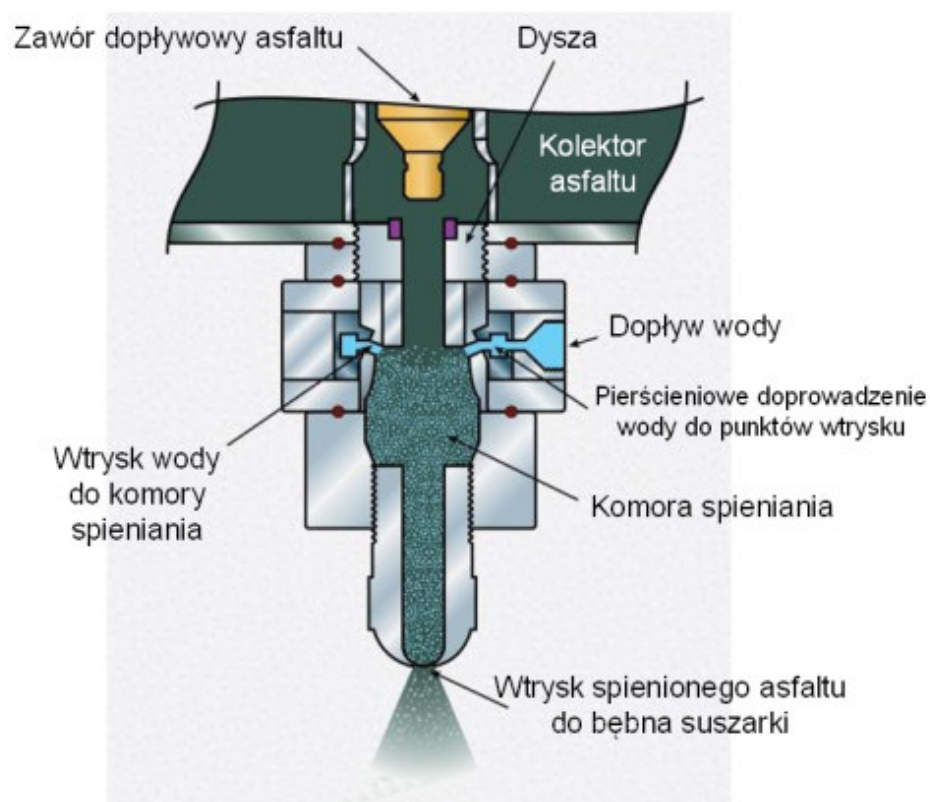
Firma ASTEC, będąca na rynku amerykańskim znanym producentem wytwórni mma, oferuje kompletny system służący do produkcji mieszanek typu WMA. Główny komponent stanowi otaczarnia o działaniu ciągłym, której bęben suszarki posiada dwupłaszczową konstrukcję (fotografia 15 i rysunek 2). Eliminuje to ryzyko przegrzania asfaltu występujące w wytwórniach ciągłych z bębnem suszarki jednopłaszczowym, ponieważ otaczanie ziaren kruszywa asfaltem odbywa się w przestrzeni pomiędzy płaszczem wewnętrznym a zewnętrznym, która jest całkowicie odseparowana od strefy oddziaływania palnika. Samo obniżenie temperatury produkcji uzyskuje się za pomocą opatentowanego zestawu dysz wtryskujących w strumień gorącego asfaltu wodę, indukując jego spienienie (rysunek 3). Zużycie wody wynosi ok. 0,5 kg na 1 tonę wyprodukowanej mieszanki, której temperaturę można w ten sposób obniżyć do 116 – 135 °C. Podobnie jak w przypadku WAM-Foam, zaletą jest stosowanie wyłącznie wody, bez konieczności zakupu dodatków chemicznych. Z drugiej strony, aby skorzystać z technologii Double Barrel Green należy kupić całą dedykowaną przez producenta wytwórnię lub przystosować już istniejącą, która musi być jednak wytwórnią o działaniu ciągłym.



Fot. 15 – Ogólny widok bębna suszarki wytwórni Astec Double Barrel Green. W centrum widoczny jest zespół dysz do wtryskiwania wody i asfaltu [12]



Rys. 2 – Dwupłaszczowy bęben suszarki Double Barrel Green, w którym otaczanie ziaren kruszywa asfaltem odbywa się w strefie odizolowanej od strefy oddziaływania palnika [13]



Rys. 3 – Konstrukcja dyszy w której dochodzi do spienienia asfaltu [13]

2.4.3. Evotherm ET

Odmienne podejście do zagadnienia spieniania asfaltu prezentuje technologia Evotherm ET opracowana przez amerykańską firmę MeadWestvaco. W metodzie tej, do gorącego kruszywa zamiast asfaltu dodawana jest specjalnie skomponowana emulsja asfaltowa [14]. Zawartość asfaltu w emulsji wynosi 70%, dodatkowo jest ona modyfikowana polimerem Styrene-Butadiene-Rubber (SBR). Woda obecna w emulsji w kontakcie z gorącym kruszywem zamienia się w parę wodną, inicjując spienienie asfaltu. Podczas produkcji kruszywo podgrzewane jest do temperatury 125 °C, zaś temperatura wyjściowa mieszanki wynosi 90 – 100 °C. Układanie i zagęszczanie odbywa się w temperaturze 70 – 90 °C. Ważny jest fakt, że do produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych z Evothermem ET nie istnieje potrzeba modyfikacji istniejącej wytwórni, ponieważ transport płynnego Evothermu ET odbywa się przewodami normalnie używanymi do pompowania asfaltu (fotografia 16 i 17). Należy jednak pamiętać, że temperatura w nich nie może przekroczyć 95 °C z uwagi na ryzyko przedwczesnego rozpadu emulsji (przed dopłynięciem do mieszalnika) [5].



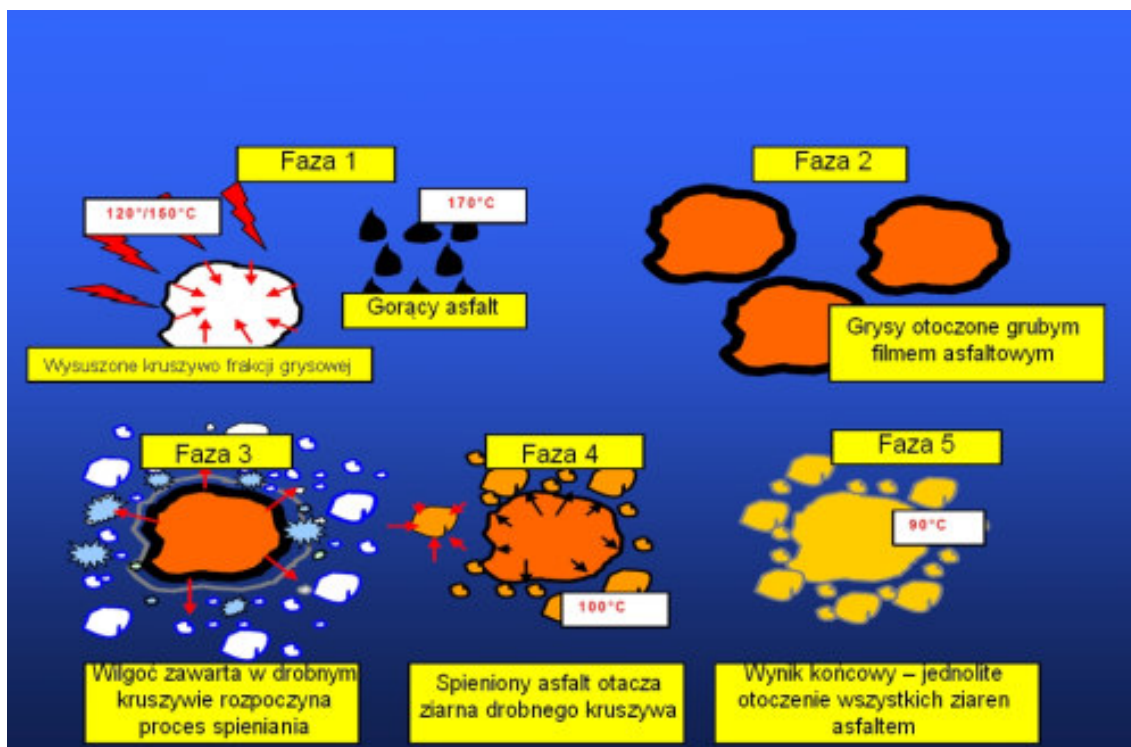
Fot. 16 – Zawory służące do przyłączenia cysterny z Evothermem ET [15]



Fot. 17 – Cysterna z emulsją Evotherm ET podłączona do instalacji pompowania asfaltu WMB [15]

2.4.4. LEA – Low Energy Asphalt

Również we Francji opracowano metodę produkcji mieszanki typu WMA z użyciem spienionego asfaltu. W rozwiązaniu proponowanym przez firmy Fairco oraz EIFFAGE Travaux Publics wykorzystywana jest wilgoć zawarta w kruszywie frakcji piaskowej. Sam proces mieszania jednego zarobu podzielono na kilka faz [16]. W pierwszej, kruszywo o uziarnieniu większym od 2 mm podgrzane do temperatury 120 – 150 °C jest otaczane gorącym asfaltem o normalnie stosowanej temperaturze 160 – 170 °C. Tuż przed zadozowaniem asfaltu do mieszalnika dodawany jest do niego specjalnie opracowany dodatek chemiczny o zastrzeżonym składzie (w ilości 0,4-0,5% w stosunku do masy asfaltu) pełniący rolę regulatora stopnia spienienia oraz środka adhezyjnego. Tym sposobem otrzymywane jest mieszanka mineralna zawierająca tylko frakcję grysową, otoczona grubym filmem asfaltowym. Następnie dodawane jest kruszywo frakcji piaskowej (wraz z wypełniaczem) o wilgotności około 3%, które inicjuje proces spienienia. Schematyczny przebieg powyższego procesu przedstawiono na rysunku 4. Technologia ta wymaga zatem wyposażenia wytwórni w oddzielną linię (dozator, taśmociąg) dostarczania do mieszalnika kruszywa frakcji piaskowej oraz wymusza ścisłą kontrolę jej wilgotności. W przypadku zbyt małej wilgotności możliwe jest jej zwiększenie prostą instalacją do skrapiania wodą (fotografia 18). Proces produkcji w otaczarniach o działaniu ciągłym różni się miejscem dodawania wilgotnego kruszywa – trafia ono do bębna suszarki przez pierścień recyklingowy służący również do dodawania destruktu asfaltowego. Końcowa temperatura mieszanki zawiera się w przedziale 90 – 100 °C.



Rys. 4 – Poszczególne fazy produkcji mieszanki typu LEA [16]



Fot. 18 – Dodatkowe zwiększanie wilgotności kruszywa frakcji piaskowej poprzez skropienie wodą [12]

2.5. Pozostałe technologie

W poprzednich punktach przedstawiono najbardziej charakterystyczne technologie produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych o obniżonej temperaturze. Na rynku występują jeszcze inne technologie, zarówno w postaci środków dodawanych do lepiszcza (Colas 3E LT, Astech PER, Evotherm 3G, Iterlow T, QualiTherm, Sonne Warmix, TLA-X Warm Mix) jak i technologii spieniania asfaltu (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), jednakże zasada ich działania jest tożsama lub podobna z już opisanymi, dlatego też w niniejszym opracowaniu ograniczono się tylko do wymienienia tych technologii.

3. BADANIA LABORATORYJNE

3.1. Cel badań laboratoryjnych

Z uwagi na mały stopień rozpowszechnienia w Polsce technologii wytwarzania mieszanek mineralno-asfaltowych o obniżonej temperaturze przyjęto, że w trakcie badań laboratoryjnych niniejszego programu zostaną przebadane sposoby polegające na dodawaniu do lepiszcza środków wpływających na jego lepkość lub oddziaływujących powierzchniowo czynnie.

Nie przeprowadzano badań mieszanek wyprodukowanych z asfaltem spienionym, z wyjątkiem mieszanek z dodatkiem zeolitu, które były łatwe do wytworzenia w warunkach laboratoryjnych. Uzyskiwanie asfaltu spienionego w warunkach laboratoryjnych jest znacznie utrudnione i wymaga specjalistycznych mieszarek wyposażonych w dyszę do spieniania asfaltu.

Przyjęto ponadto, że technologie obniżania temperatury za pomocą dodatków są pierwszym naturalnym etapem wdrażania w Polsce produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych „na ciepło”. Technologie te nie wymagają znaczących nakładów inwestycyjnych na wytwórniach mas bitumicznych (związanych z montażem instalacji spieniających).

Celem badań laboratoryjnych była ocena wpływu wybranych środków do obniżania temperatury produkcji i wbudowywania mieszanek mineralno-asfaltowych na parametry fizykomechaniczne mieszanek wyprodukowanych w warunkach laboratoryjnych.

3.2. Dobór materiałów do badań laboratoryjnych

3.2.1 Dobór lepiszcza

Z uwagi na planowane badania mieszanek przeznaczonych do warstw ścieralnych zgromadzono dwa rodzaje asfaltów, które znajdują zastosowanie w tych warstwach:

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

Oba asfalty zostały wyprodukowane w rafinerii LOTOS w Gdańsku, która jest czołowym dostawcą asfaltu w północnej Polsce. Zmagazynowana ilość pozwoliła na przeprowadzenie wszystkich badań laboratoryjnych przez cały okres trwania programu.

3.2.2 Dobór dodatków

W trakcie wyboru dodatków do asfaltu, które miały zostać wykorzystane w trakcie programu badań laboratoryjnych posłużono się następującymi kryteriami:

- przynależnością do danej grupy po względem chemicznym,
- łatwością zastosowania w warunkach laboratoryjnych, jak i w trakcie ewentualnej produkcji mieszanek w skali przemysłowej,

- dostępnością na terenie Polski w momencie rozpoczynania programu badawczego (koniec 2009 r.).

Finalnie sprowadzono i zmagazynowano następujące dodatki w ilościach:

- Sasobit ~ 100 kg
- Licomont BS 100 ~ 100 kg
- Rediset WMX ~ 100 kg
- Ceca Base RT ~ 5 kg
- Zeolit ~ 100 kg

W ten sposób w grupie badanych środków znalazł się przynajmniej jeden przedstawiciel grupy:

- parafin zawierających długie łańcuchy węglowodorowe (Sasobit),
- mieszaniny amidów kwasów tłuszczowych (Licomont BS 100),
- środka łączącego rolę modyfikatora lepkości, jak działającego powierzchniowo czynnie w postaci stałej (Rediset WMX),
- środka działającego powierzchniowo czynnie w postaci płynnej (Ceca Base RT),
- środka powodującego spienienie asfaltu po dodaniu go do mieszanki (Zeolit).

Biorąc pod uwagę niewielkie ilości dodatków potrzebnych do modyfikacji asfaltu (rzędu 2-3% dla Sasobitu, Licomontu BS 100 i Redisetu, 0,35% dla Ceca Base RT, 0,30% zeolitu w stosunku do m.m.a.) zgromadzone ilości pozwoliły na przeprowadzenie wszystkich badań laboratoryjnych przez cały okres trwania programu.

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 optymalna 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. Optymalne 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 – 0,3% w stosunku do masy mieszanki mineralno-asfaltowej,

Na końcu przyjęto jednolitą metodykę oznaczania mieszanek wyprodukowanych z poszczególnymi środkami (lub samych lepiszcz ze środkami) trwającą przez cały okres programu:

- Dla asfaltu zwykłego 50/70:
 - Mieszanka A – Asfalt zwykły 50/70 bez żadnego dodatku,
 - Mieszanka B – Asfalt zwykły 50/70 + 3% środka Sasobit,
 - Mieszanka C – Asfalt zwykły 50/70 + 3% środka Licomont BS100,
 - Mieszanka D – Asfalt zwykły 50/70 + 2% środka Rediset WMX,
 - Mieszanka E – Asfalt zwykły 50/70 + 0,35% środka Ceca Base RT,

- Mieszanka F – Asfalt zwykły 50/70 + 0,30% środka Zeolit (w stosunku do m.m.a).
- Dla asfaltu modyfikowanego 45/80-55:
 - Mieszanka G – Asfalt mod. 45/80-55 bez żadnego dodatku,
 - Mieszanka H – Asfalt mod. 45/80-55 + 3% środka Sasobit,
 - Mieszanka I – Asfalt mod. 45/80-55 + 3% środka Licomont,
 - Mieszanka K – Asfalt mod. 45/80-55 + 2% środka Rediset WMX,
 - Mieszanka L – Asfalt mod. 45/80-55 + 0,35% środka Ceca Base RT,
 - Mieszanka M – Asfalt mod. 45/80-55 + 0,30% środka Zeolit (w stosunku do m.m.a).

3.2.3 Dobór kruszywa

Do celów programu badawczego zgromadzono następujące rodzaje kruszyw:

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

Wszystkie zgromadzone kruszywa pochodziły ze Skandynawii i należały do kruszyw często stosowanych w mieszankach mineralno-asfaltowych wytwarzanych na Pomorzu.

3.3 Zakres badań laboratoryjnych

Zakres badań lepiszcz oraz mieszanek mineralno-asfaltowych obejmował:

1. Zaprojektowanie składu mieszanki mineralno-asfaltowej przeznaczonej do badań,
2. Badania cech lepiszcza:
 - penetracji wg normy PN-EN 1426:2001 „Asfalty i produkty asfaltowe. Oznaczanie penetracji igłą.”,
 - temperatury mięknięcia wg normy PN-EN 1424:2007 „Asfalty i lepiszcza asfaltowe. Oznaczanie temperatury mięknięcia. Metoda Pierścienia i Kula.”,
 - lepkości dynamicznej wg normy PN-EN 13702-2:2005 „Asfalty i lepiszcza asfaltowe. Oznaczanie lepkości dynamicznej modyfikowanych asfaltów. Część 2: Metoda współosiowych cylindrów”.

Powyższe cechy określono dla lepiszcz przed i po starzeniu w cienkiej warstwie TFOT według normy PN/C-04138. Z uwagi na charakter działania środka zeolitu – spienianie asfaltu poprzez wodę przechodzącą w parę przy zetknięciu się kryształów zeolitu z gorącym kruszywem (efekt ten trwa 2-3 godziny) – nie przeprowadzono dla lepiszczy z zeolitem (oznaczenie F i M) badań właściwości asfaltu.
3. Badanie stabilności Marshalla,
4. Badania odporności mieszanek na działanie wody i mrozu wg normy PN-EN12697-12 i informacji podanych w Wymaganiach Technicznych „Nawierzchnie asfaltowe na drogach publicznych” WT-2 2008.

5. Badania wpływu starzenia na parametry betonu asfaltowego. Badanie to jest nieznormalizowane. Przeprowadzono je według metody pośredniego rozciągania ITSM (IT-CY) w przedziale temperatur -10°C , 0°C , $+10^{\circ}\text{C}$, $+20^{\circ}\text{C}$. Badaniom poddano próbki po starzeniu krótko i długoterminowym według procedury SHRP zmodyfikowanej przez Ar-Rabti i Judyckiego w Politechnice Gdańskiej. Podobnie jak w przypadku badań właściwości asfaltu, z uwagi na charakter działania zeolitu w mieszance mineralno-asfaltowej próbek mieszanek F i M nie poddawano starzeniu krótkoterminowemu.
6. Badania odporności na koleinowanie według normy PN-EN 12697-22 w małym aparacie (metoda B, w powietrzu) oraz według normy brytyjskiej BS598,
7. Opracowanie i analizę wyników badań.

3.4 Zaprojektowanie składu mieszanki mineralno-asfaltowej przeznaczonej do badań

Przed rozpoczęciem części laboratoryjnej programu konieczne było przyjęcie rodzaju oraz zaprojektowanie składu mieszanki mineralno-asfaltowej, która pozostawałaby niezmienna przez cały okres trwania badań laboratoryjnych. 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 wybrano beton asfaltowy do warstwy ścieralnej. Przemawiały za tym następujące uwarunkowania:

- warstwa ścieralna jest ostatnią, wierzchnią warstwą nawierzchni, która jest bezpośrednio narażona 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 wykonywania na wczesne ochłodzenie, a tym samym na niedostateczne zagęszczenie,
- 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,
- 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, mogących mieć wpływ na uzyskiwane wyniki,
- beton asfaltowy do warstwy ścieralnej jest mieszanką stosowaną przez zarządców dróg wszystkich szczebli (drogi krajowe, wojewódzkie, powiatowe, gminne).

W początkowej fazie planowano przeprowadzić badania na mieszance betonu asfaltowego AC 11S dla ruchu KR3-KR4 opisanego w Wymaganiach Technicznych

„WT-2. Nawierzchnie asfaltowe na drogach publicznych 2008”, które obowiązywały w czasie etapu projektowania recepty do badań. Jednakże po kilku nieudanych próbach zaprojektowania składu i wykonania próbnych zarobów według wymagań podanych w WT-2 2008¹ zdecydowano o zaprojektowaniu dotychczas stosowanego betonu asfaltowego o uziarnieniu 0/12,8 mm do warstwy ścieralnej dla ruchu KR3-KR6 według normy PN-S-96025:2000. Badania odporności na działanie wody i mrozu oraz koleinowania przeprowadzono jednak zgodnie z normami serii PN-EN i stosując odpowiednie dla nich kryteria. Jako lepiszcze użyto asfalt zwykły 50/70 oraz modyfikowany 45/80-55. Do asfaltów nie dodawano środka adhezyjnego, aby nie miał on wpływu na wyniki badań.

Do zaprojektowania i produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych użyto grysów granitowych pochodzenia skandynawskiego, ze Szwecji i Norwegii. Ponadto zastosowano piasek łamany z Norwegii oraz wypełniacz wapienny firmy Nordkalk. Kruszywa te są powszechnie stosowane w Polsce północnej.

Zaprojektowaną mieszankę mineralną do warstwy ścieralnej przedstawiono w tablicy 2.

Tablica 2. Uziarnienie mieszanki mineralnej 0/12,8 mm do warstwy ścieralnej z betonu asfaltowego wg normy PN-S-96025:2000

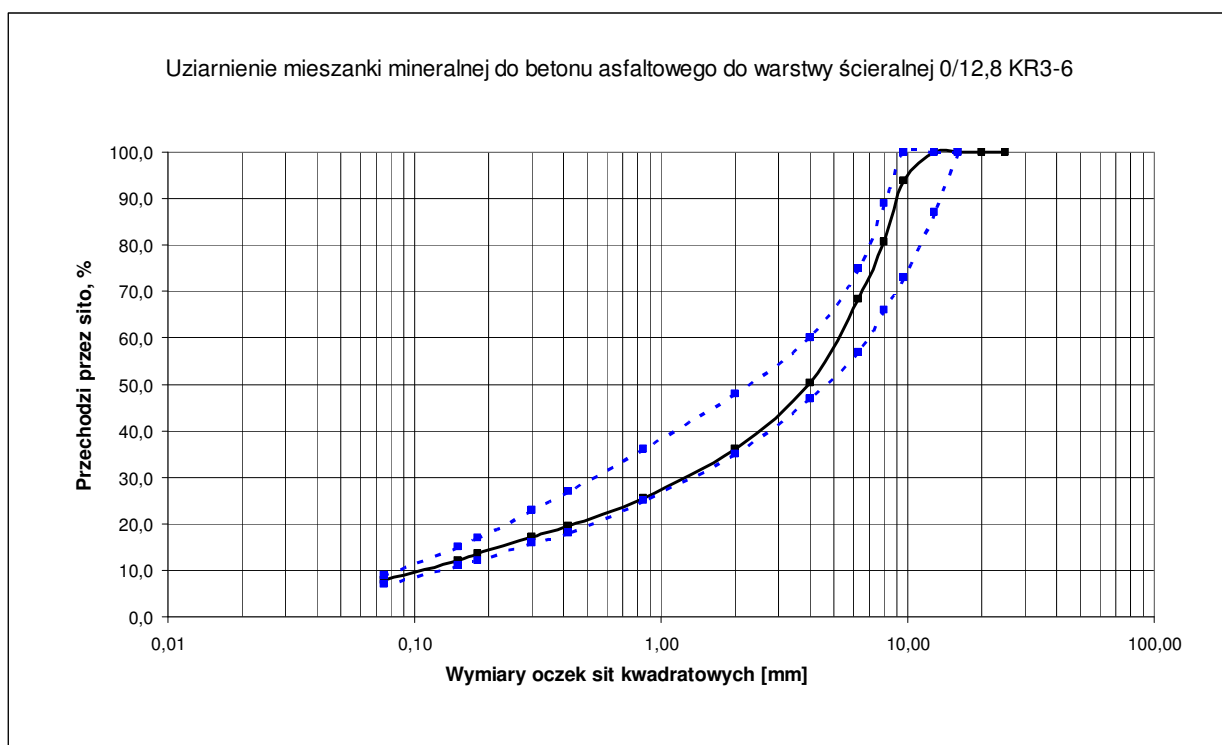
Sito # [mm]	Dolna krzywa graniczna wg normy PN-S-96025:2000	Górna krzywa graniczna wg normy PN-S-96025:2000	Rzędne krzywej uziarnienia
25,0	100	100	100,0
20,0	100	100	100,0
16,0	100	100	100,0
12,8	87	100	100,0
9,6	73	100	93,8
8,0	66	89	80,6
6,3	57	75	68,4
4,0	47	60	50,2
2,0	35	48	36,1
0,85	25	36	25,6
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

Zawartości poszczególnych materiałów mineralnych w mieszance mineralnej przedstawiono w tablicy 3, zaś krzywą uziarnienia mieszanki na rysunku 5.

¹ Wytyczne WT2 – 2008 okazały się nie dopracowane i wkrótce po wydaniu zostały zmienione. W międzyczasie rozpoczęto badania i były one już zaawansowane.

Tablica 3. Zawartość procentowa materiałów mineralnych w mieszance mineralnej betonu asfaltowego 0/12,8 mm KR3-KR6 do warstwy ścieralnej wg normy PN-S-96025:2000

Materiał	Zawartość [%]
Grys 8/11	22
Grys 5/8	22
Grys 2/5	24
Piasek łamany 0/2	26
Mączka	6
Suma	100



Rys. 5 – Krzywa uziarnienia mieszanki mineralnej betonu asfaltowego 0/12,8 mm KR3-KR6 do warstwy ścieralnej wg normy PN-S-96025:2000

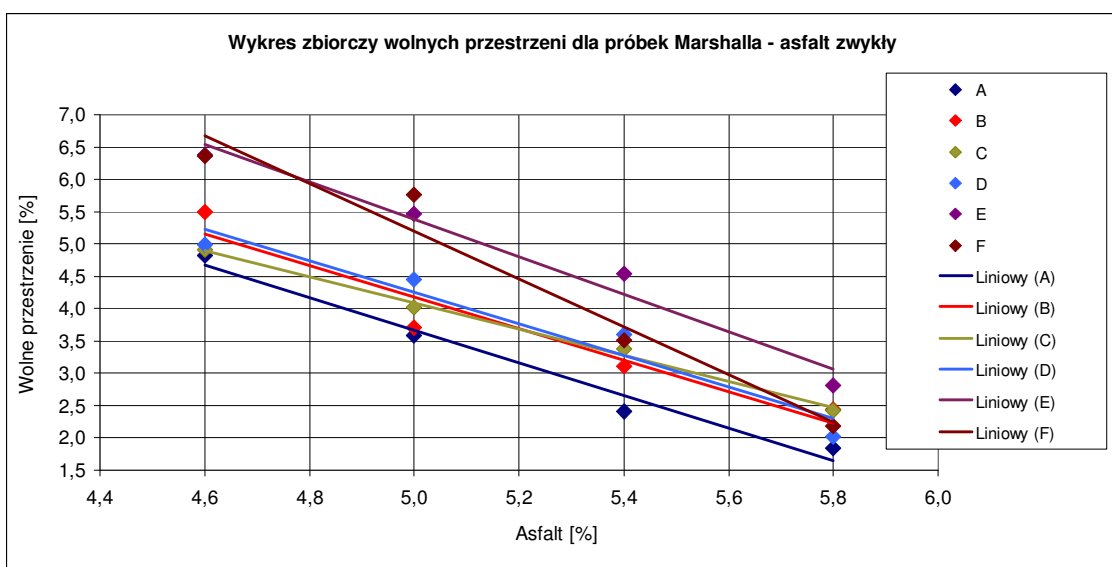
Następnie wykonano zaroby próbne dla mieszanek bez dodatków oraz z dodatkami. Zastosowano 4 różne zawartości asfaltu:

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

Po wykonaniu próbek zbadano zawartość wolnych przestrzeni oraz stabilność (por. punkt 3.6). W tablicach 4 oraz 5 przedstawiono zawartości wolnych przestrzeni w zależności od ilości asfaltu. Zależności graficzne dotyczące tych wielkości przedstawiono na rysunkach 6 oraz 7.

Tablica 4. Zawartość wolnych przestrzeni w próbkach Marshalla dla różnych zawartości asfaltu – mieszanki z asfaltem zwykłym 50/70

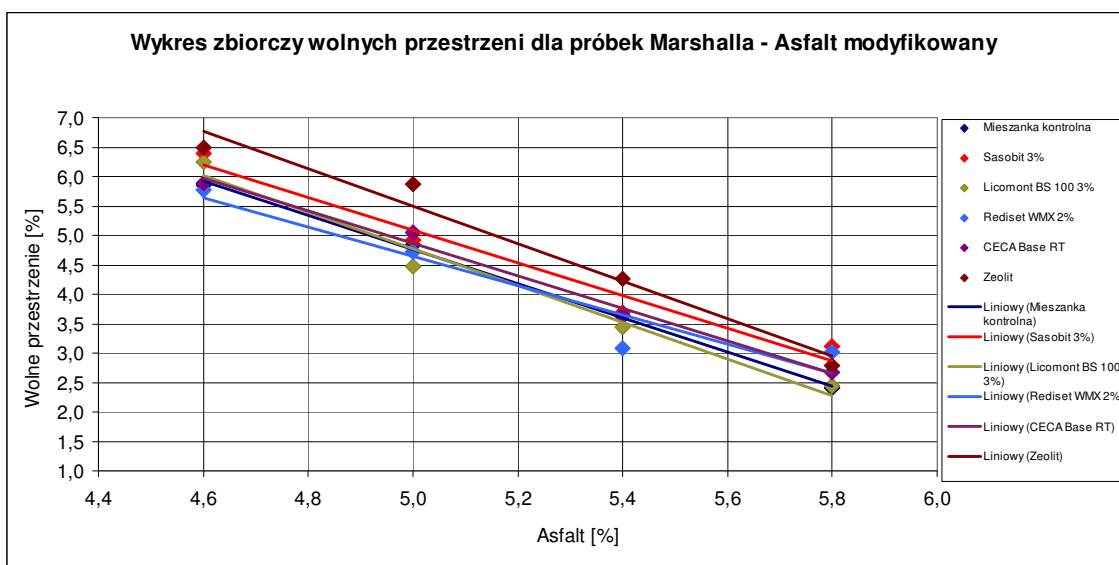
Rodzaj mieszanki	Zawartość wolnych przestrzeni przy zawartości asfaltu [%]:			
	4,60	5,00	5,40	5,80
A	4,8	3,6	2,4	1,8
B	5,5	3,7	3,1	2,4
C	4,9	4,0	3,4	2,4
D	5,0	4,5	3,6	2,0
E	6,4	5,5	4,5	2,8
F	6,4	5,8	3,5	2,2



Rys. 6 – Wykres zawartości wolnych przestrzeni w próbkach Marshalla – mieszanka z asfaltem zwykłym 50/70

Tablica 5. Zawartość wolnych przestrzeni w próbkach Marshalla dla różnych zawartości asfaltu – mieszanki z asfaltem modyfikowanym

Rodzaj mieszanki	Zawartość wolnych przestrzeni przy zawartości asfaltu [%]:			
	4,60	5,00	5,40	5,80
G	5,9	4,8	3,6	2,4
H	6,4	4,9	3,7	3,1
I	6,2	4,5	3,5	2,4
K	5,8	4,7	3,1	3,0
L	5,9	5,0	3,6	2,7
M	6,5	5,9	4,3	2,8



Rys. 7 – Wykres zawartości wolnych przestrzeni w próbkach Marshalla – mieszanka z asfaltem modyfikowanym 45/80-55

Optymalną zawartość asfaltu dla mieszanek produkowanych w dalszym etapie badań przyjęto na podstawie zawartości wolnych przestrzeni. Kierowano się zasadą, że ilość asfaltu powinna zapewniać w mieszance odniesienia (mieszanka A z asfaltem zwykłym 50/70 oraz mieszanka G z asfaltem modyfikowanym 45/80-55) zawartość wolnych przestrzeni na poziomie 3-4%. Przyjęte zatem następujące ilości asfaltu:

- dla mieszanek z asfaltem zwykłym – 5,3 %
- dla mieszanek z asfaltem modyfikowanym – 5,4%

Powyższe zawartości asfaltu występują we wszystkich dalszych etapach badań.

3.5. Badania cech lepiszcza przed i po starzeniu TFOT

Celem badań asfaltów było określenie ich podstawowych właściwości takich jak:

- penetracja,
- temperatura mięknięcia według metody pierścienia i kuli,
- lepkość dynamiczna.

Badania zostały przeprowadzone dla asfaltów czystych oraz z dodatkami obniżającymi temperaturę, w obu przypadkach zarówno przed, jak i po starzeniu w cienkiej warstwie TFOT.

Procedury badawcze były zgodne z następującymi normami:

- PN-EN 1426:2001 „Asfalty i produkty asfaltowe Oznaczanie penetracji igłą.”
- PN-EN 1424:2007 „Asfalty i lepiszcza asfaltowe. Oznaczanie temperatury mięknięcia. Metoda Pierścień i Kula”.
- PN-EN 13702-2:2005 „Asfalty i lepiszcza asfaltowe. Oznaczanie lepkości dynamicznej modyfikowanych asfaltów. Część 2: Metoda współosiowych cylindrów”.

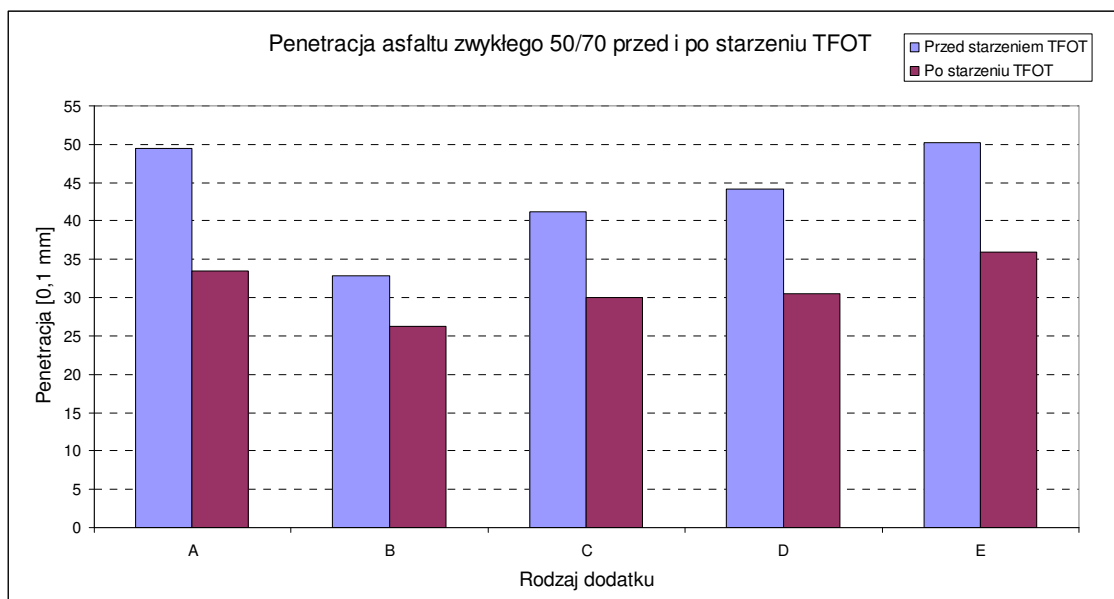
Lepkość dynamiczną badano w lepkościomierzu firmy „Brookfield Engineering Labs, współpracującym z programem komputerowym Rheocalc. Badanie lepkości polega na pomiarze oporu badanej cieczy podczas obracania w niej wrzeciona. Zastosowano wrzeciona o następujących parametrach:

- 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.

Wyniki badania penetracji, temperatury mięknięcia PiK oraz lepkości przedstawiono w tablicach 6 – 12. Zależności graficzne dotyczące niniejszych parametrów pokazano na rysunkach 8 – 15.

Tablica 6. Wyniki badania penetracji asfaltu zwykłego 50/70 czystego i z dodatkami przed i po starzeniu TFOT.

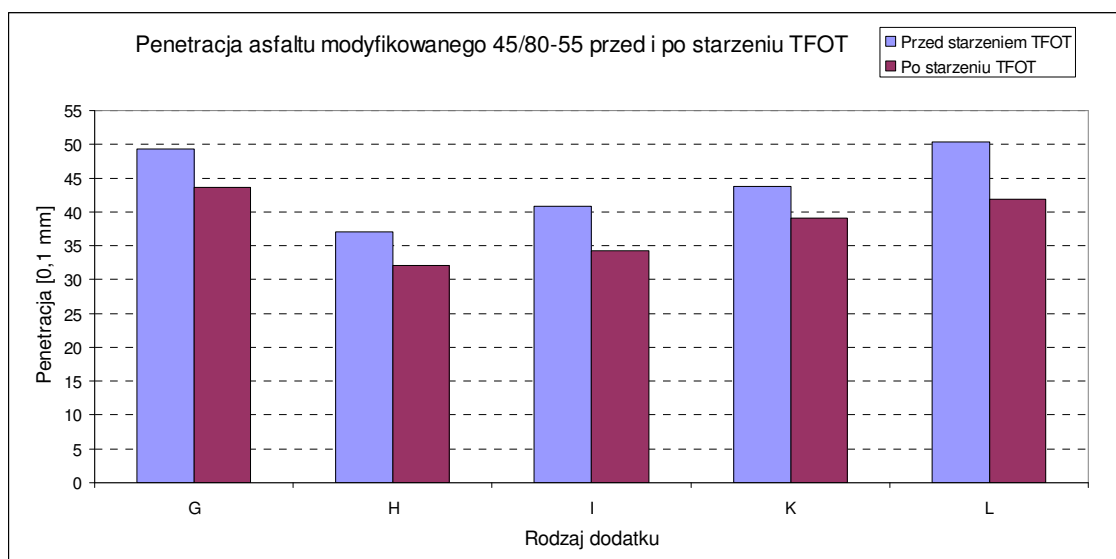
Rodzaj asfaltu i dodatku	Penetracja przed starzeniem TFOT [0,1 mm]	Penetracja po starzeniu TFOT [0,1 mm]	Spadek [%]
A	49,4	33,4	32,4%
B	32,9	26,3	19,9%
C	41,2	30,0	27,1%
D	44,2	30,6	30,8%
E	50,2	36,0	28,3%



Rys. 8 – Wyniki badania penetracji asfaltu zwykłego 50/70 czystego i z dodatkami przed i po starzeniu TFOT.

Tablica 7. Wyniki badania penetracji asfaltu modyfikowanego 45/80-55 czystego i z dodatkami przed i po starzeniu TFOT.

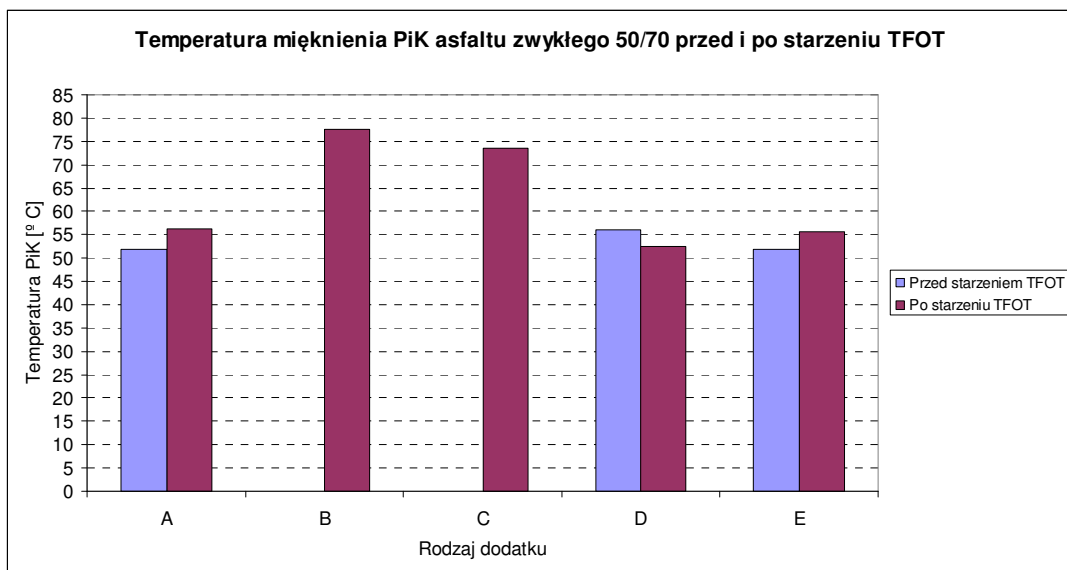
Rodzaj asfaltu i dodatku	Penetracja przed starzeniem TFOT	Penetracja po starzeniu TFOT	Spadek [%]
G	49,3	43,6	11,7%
H	37,0	32,2	13,1%
I	40,8	34,3	15,9%
K	43,8	39,1	10,7%
L	50,3	41,9	16,7%



Rys. 9 – Wyniki badania penetracji asfaltu modyfikowanego 45/80-55 czystego i z dodatkami przed i po starzeniu TFOT.

Tablica 8. Wyniki badania temperatury mięknięcia według metody PiK dla asfaltu zwykłego 50/70 czystego i z dodatkami przed i po starzeniu TFOT.

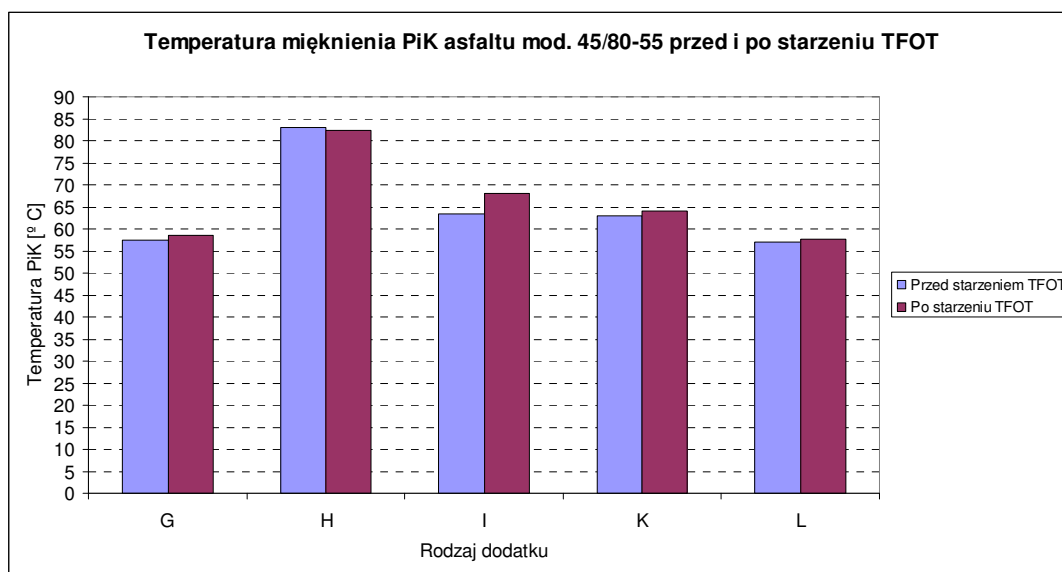
Rodzaj asfaltu i dodatku	Temperatura PiK przed starzeniem TFOT	Temperatura PiK po starzeniu TFOT	Wzrost [%]
A	51,8	56,3	8,7%
B	zerwanie	77,5	-
C	zerwanie	73,5	-
D	56,0	52,5	-6,3%
E	51,8	55,8	7,7%



Rys. 10 – Wyniki badania temperatury mięknięcia PiK asfaltu zwykłego 50/70 przed i po starzeniu TFOT

Tablica 9. Wyniki badania temperatury mięknięcia PiK asfaltu modyfikowanego 45/80-55 czystego i z dodatkami przed i po starzeniu TFOT

Rodzaj asfaltu i dodatku	Temperatura PiK przed starzeniem TFOT	Temperatura PiK po starzeniu TFOT	Wzrost [%]
G	57,5	58,5	1,7%
H	83,0	82,3	-0,9%
I	63,5	68,0	7,1%
K	63,0	64,0	1,6%
L	57,0	57,8	1,3%



Rys. 11 – Wyniki badania temperatury mięknięcia PiK asfaltu modyfikowanego 45/80-55 czystego i z dodatkami przed i po starzeniu TFOT

Tablica 10. Wyniki badania lepkości dynamicznej asfaltów zwykłego 50/70 i modyfikowanego 45/80-55 (czystych i z dodatkami) przed starzeniem TFOT

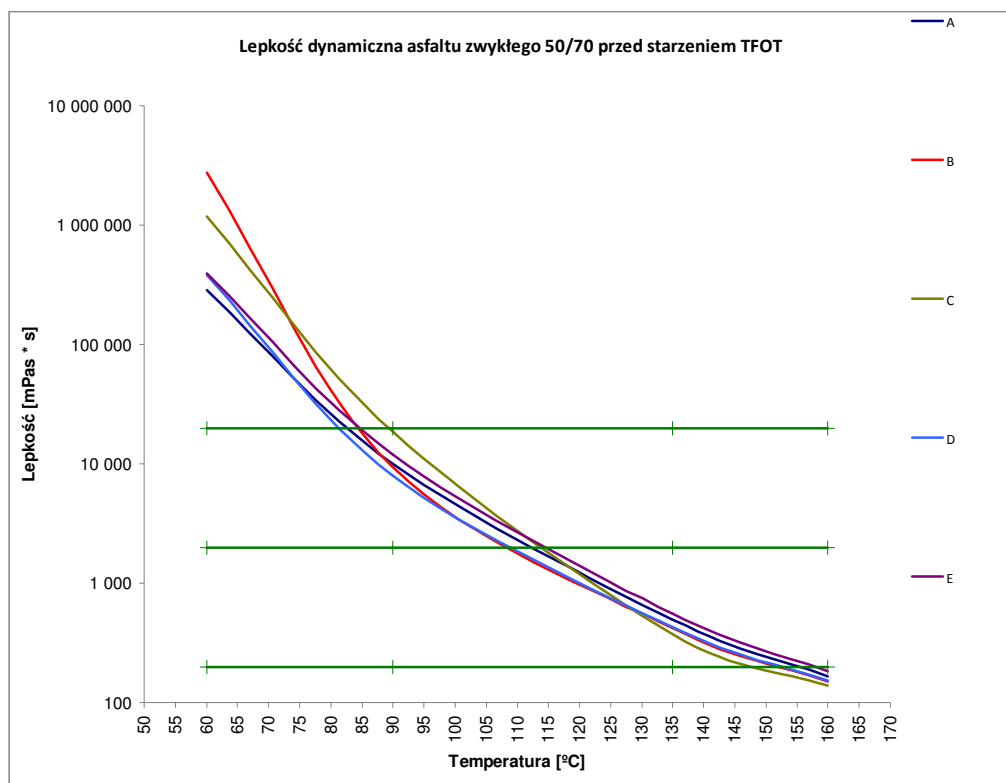
Rodzaj asfaltu	Lepkość dynamiczna w temperaturze przed i po TFOT [mPas * s]			
	60	90	135	160
A	283 743	10 005	495	165
B	2 757 273	9 380	418	151
C	1 171 394	18 600	377	138
D	383 258	7 923	426	153
E	394 945	11 946	557	182
G	2 176 667	29 720	1 225	407
H	*	35 110	929	299
I	1 511 591	47 483	820	302
K	4 932 273	30 903	1 161	401
L	2 424 091	24 000	1 048	361

Tablica 11. Wyniki badania lepkości dynamicznej asfaltów zwykłego 50/70 i modyfikowanego 45/80-55 (czystych i z dodatkami) po starzeniu TFOT

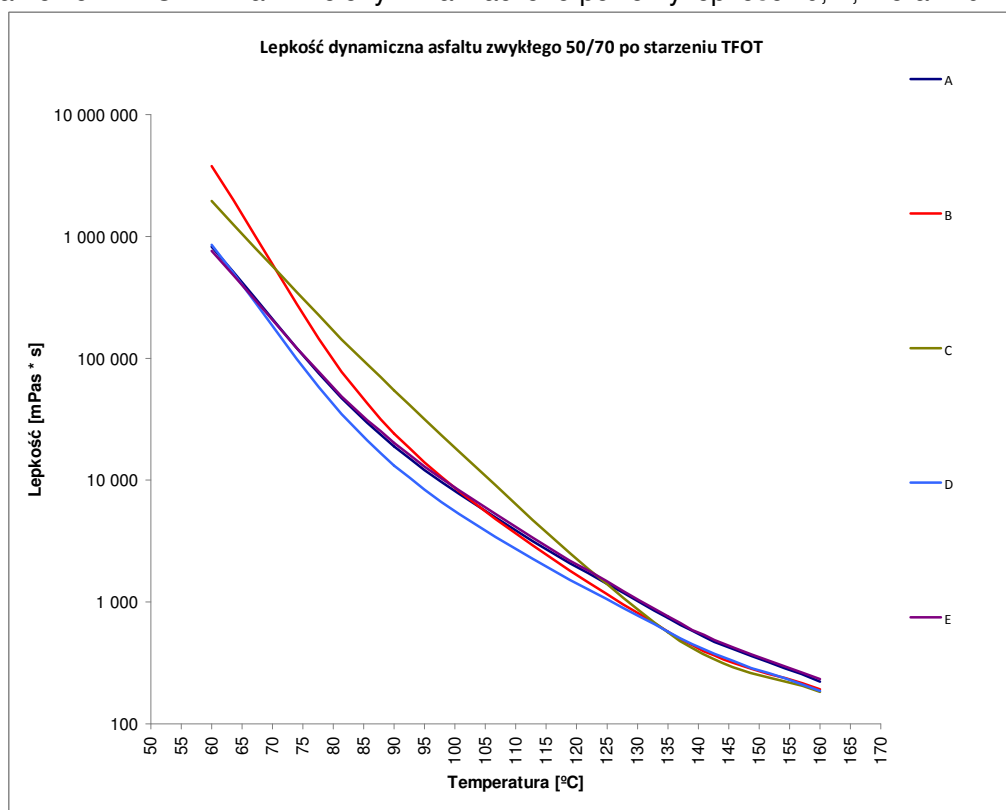
Rodzaj asfaltu	Lepkość dynamiczna w temperaturze przed i po TFOT [mPas * s]			
	60	90	135	160
A	825 091	18 962	736	224
B	3 796 364	23 949	568	192
C	1 956 136	54 121	565	184
D	857 934	13 203	576	185
E	758 333	20 091	760	232
G	1 280 909	26 997	1 045	327
H	*	47 741	1 181	350
I	7 819 091	76 908	951	316
K	3 216 364	34 260	1 463	454
L	1 392 045	30 167	1 228	379

Tablica 12. Procentowa zmiana lepkości dynamicznej asfaltów zwykłego 50/70 i modyfikowanego 45/80-55 (czystych i z dodatkami) przed i po starzeniu TFOT

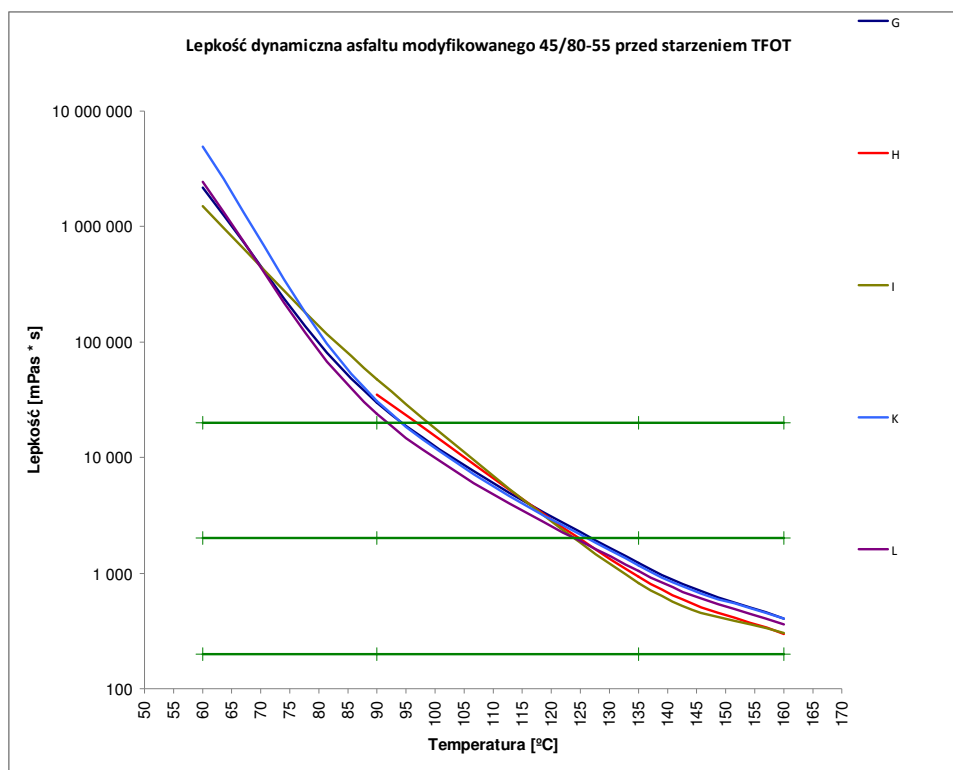
Rodzaj asfaltu	Procentowa zmiana lepkości dynamicznej po starzeniu TFOT [%] w temperaturze			
	60	90	135	160
A	291%	190%	149%	136%
B	138%	255%	136%	126%
C	167%	291%	150%	134%
D	224%	167%	135%	121%
E	192%	168%	137%	127%
G	59%	91%	85%	80%
H	*	136%	127%	117%
I	517%	162%	116%	105%
K	65%	111%	126%	113%
L	57%	126%	117%	105%



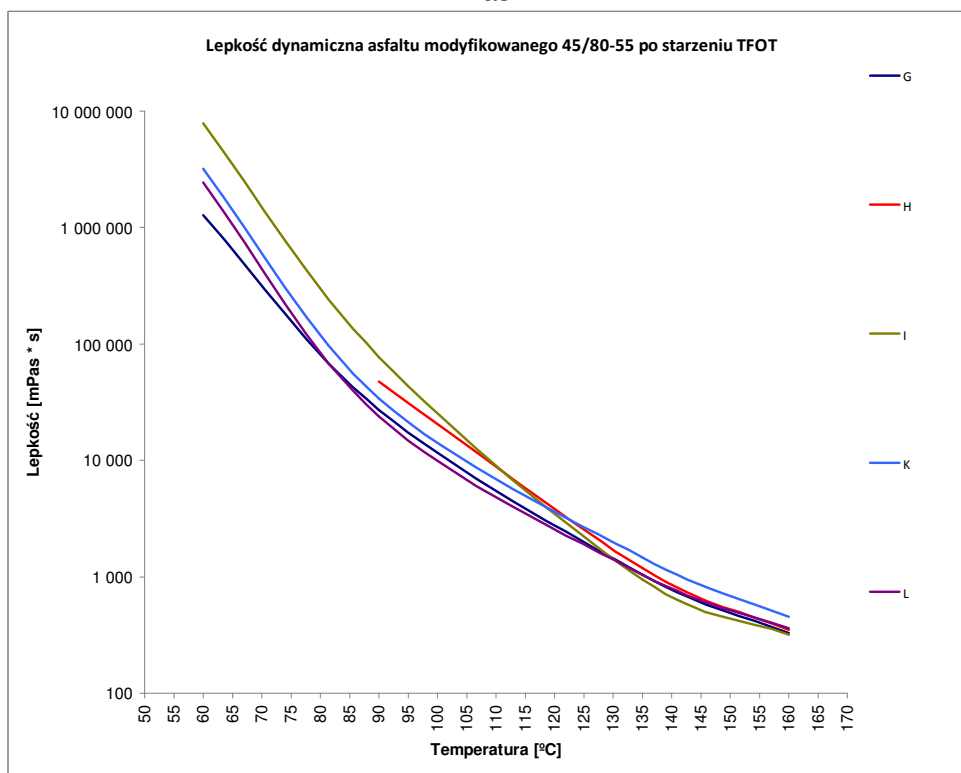
Rys. 12 – Lepkość dynamiczna asfaltu zwykłego 50/70 (czystego i z dodatkami) przed starzeniem TFOT. Liniami zielonymi zaznaczono poziomy lepkości: 0,2 , 2 oraz 20 Pas.



Rys. 13 – Lepkość dynamiczna asfaltu zwykłego 50/70 (czystego i z dodatkami) po starzeniu TFOT



Rys. 14 – Lepkość dynamiczna asfaltu modyfikowanego 45/80-55 (czystego i z dodatkami) przed starzeniem TFOT. Liniami zielonymi zaznaczono poziomy lepkości: 0,2 , 2 oraz 20 Pas.



Rys. 15 – Lepkość dynamiczna asfaltu modyfikowanego 45/80-55 (czystego i z dodatkami) po starzeniu TFOT

Wnioski z przeprowadzonych badań cech lepiszcza przed i po starzeniu w cienkiej warstwie TFOT:

- Niektóre środki obniżające temperaturę produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych istotnie wpływają na badane parametry asfaltu. Największy wpływ skutkujący utwardzeniem asfaltu (zmniejszenie penetracji, zwiększenie temperatury mięknięcia P_{IK}) wykazał środek z grupy parafin – Sasobit – oraz przedstawiciel grupy mieszanin amidów kwasów tłuszczowych – Licomont BS 100, zwłaszcza jeśli chodzi o wielkość penetracji. Mniejszy wpływ wykazał środek Rediset WMX. Natomiast zastosowanie płynnego środka Ceca Base RT działającego powierzchniowo-czynnie praktycznie nie wpłynęło na penetrację i temperaturę mięknięcia asfaltów.
- Wykryty wpływ poszczególnych środków na parametry asfaltów uwiadcza się i posiada podobny charakter zarówno dla asfaltu zwykłego 50/70, jak i modyfikowanego 45/80-55, aczkolwiek z inną intensywnością.
- Nie zaobserwowano znaczącego wpływu środków obniżających temperaturę na zwiększenie intensywności starzenia asfaltów w teście TFOT, jednakże starzenie TFOT w mniejszym stopniu wpływało na parametry asfaltu modyfikowanego, niż zwykłego.
- Spadek penetracji dla asfaltu zwykłego 50/70 czystego i z dodatkami po starzeniu TFOT zawierał się w przedziale 19,9 – 32,4% natomiast dla asfaltu modyfikowanego 45/80-55 czystego i z dodatkami przedział ten był mniejszy i zawierał się w granicach 10,7 – 16,7%.
- Zmiana temperatury mięknięcia P_{IK} po starzeniu TFOT była bardzo zróżnicowana i wymaga komentarza. Oddziaływanie dodatków na asfalt zwykły i na asfalt modyfikowany było istotnie różne. W przypadku asfaltu czystego i z dodatkami stwierdzono:
 - Typ A (asfalt czysty bez dodatków) i typ E (dodatek Ceca Base RT) – wzrost T_{PIK} o rząd 8%,
 - Typ B (dodatek Sasobit) i C (dodatek Licomont) – znaczne utwardzenie po starzeniu i wzrost T_{PIK} do 73 – 78°C,
 - Typ D (dodatek Rediset WMX) – zmiękczenie po starzeniu i wyraźny spadek T_{PIK} .
- W przypadku asfaltu modyfikowanego 45/80-55 czystego i z dodatkami stwierdzono:
 - Typ G (bez dodatków), typ K (dodatek Rediset WMX) i typ L (Ceca Base RT) – bardzo mały wzrost T_{PIK} o 1 – 2%
 - Typ H (dodatek Sasobit) – nieznaczny spadek T_{PIK} o około 1%,
 - Typ I (dodatek Licomont) znaczny wzrost o 7,1%

Opisane zmiany są dość trudne do wyjaśnienia. Ich wyjaśnienie wymagałoby znajomości składu chemicznego dodatków, które są zastrzeżone. Wymagałoby też przeprowadzenia analiz chemicznych. Małe zmiany temperatury mięknięcia asfaltu modyfikowanego czystego i z dodatkami po starzeniu mogą wiązać się ze zmianami struktury tego polimeroasfaltu, a nawet degradacją polimeru w czasie intensywnego długotrwałego wygrzewania w cienkiej warstwie. Trudno jest wyjaśnić działanie środka Rediset WMV (inne dla asfaltu zwykłego i modyfikowanego). Jego skład jest zastrzeżony. Z analizy zmian lepkości asfaltów po dodaniu środków obniżających temperaturę produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych wynika, że możliwy do uzyskania stopień zmniejszenia temperatury otaczania i

zagęszczania określony na podstawie krzywych zmian lepkości jest niewielki i w najlepszym przypadku – dla środka Licomont BS 100 dodawanego do asfaltu zwykłego 50/70 – mógłby sięgać jedynie ok. 10 °C, zaś dla pozostałych kombinacji innych dodatków i asfaltów jedynie kilka °C. Nie pokrywa się to z doświadczeniami w pełnej skali opisanymi w literaturze, gdzie wielokrotnie uzyskiwano dobre rezultaty produkując i wbudowując mieszankę w temperaturach niższych o 20 – 30 °C w stosunku do temperatur normalnych. Wynika z tego, że zjawisko poprawy urabialności i zagęszczalności mieszanek mineralno-asfaltowych z dodatkami chemicznymi jest bardziej złożone i nie jest odpowiedzialna za niego jedynie lepkość lepiszcza. Ponadto lepkości charakterystyczne dla pompowania asfaltu, otaczania kruszywa i zagęszczania były wyprowadzone empirycznie dla asfaltów zwykłych i mogą nie nadawać się do asfaltów modyfikowanych i asfaltów z dodatkami.

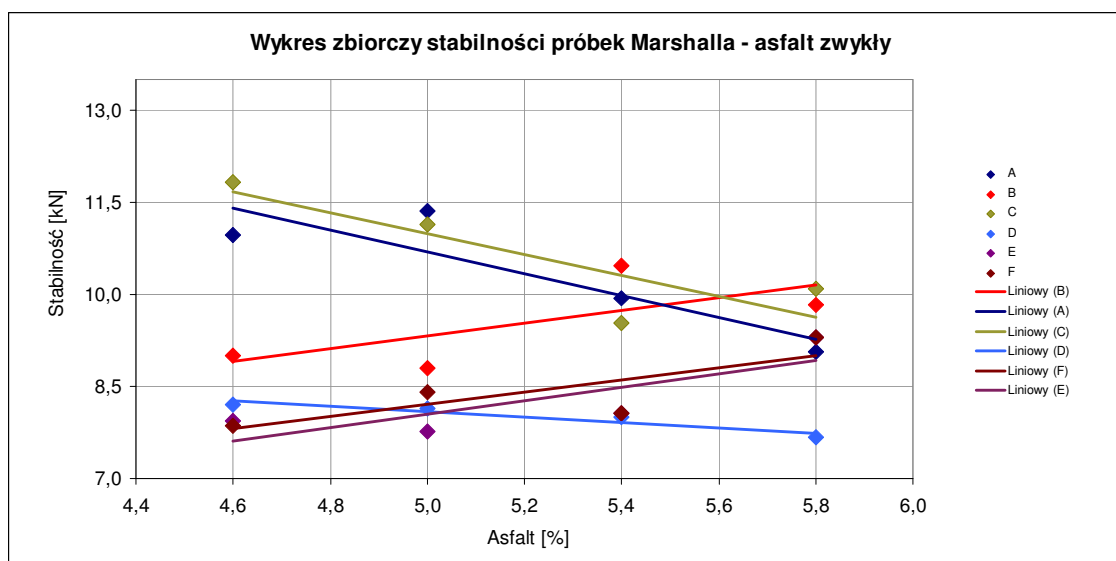
Wobec uzyskania niejednoznacznych rezultatów w trakcie prób określenia właściwych temperatur otaczania i zagęszczania na podstawie wyników badania lepkości dla dalszego etapu badań laboratoryjnych przyjęto temperaturę produkcji mieszanek z dodatkami obniżającymi temperaturę na podstawie danych z literatury – jako 135 °C. Mieszanki A i G z asfaltami czystymi bez dodatków produkowano w 160 °C

3.6 Badania stabilności Marshalla

Do analizy wyników badań stabilności Marshalla wykorzystano wyniki uzyskane w trakcie wykonywania pierwszych próbnich zarobów mieszanek, które wykonano z różnymi zawartościami asfaltów. Osiągnięte stabilności próbek wykonanych z asfaltem zwykłym 50/70 i odpowiednimi dodatkami zamieszczono w tablicy 13 oraz na rysunku 16. Stabilności próbek wykonanych z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 znajdują się tablicy 14 oraz na rysunku 17.

Tablica 13. Stabilność próbek Marshalla wykonanych z asfaltem zwykłym 50/70 oraz z dodatkami obniżającymi temperaturę

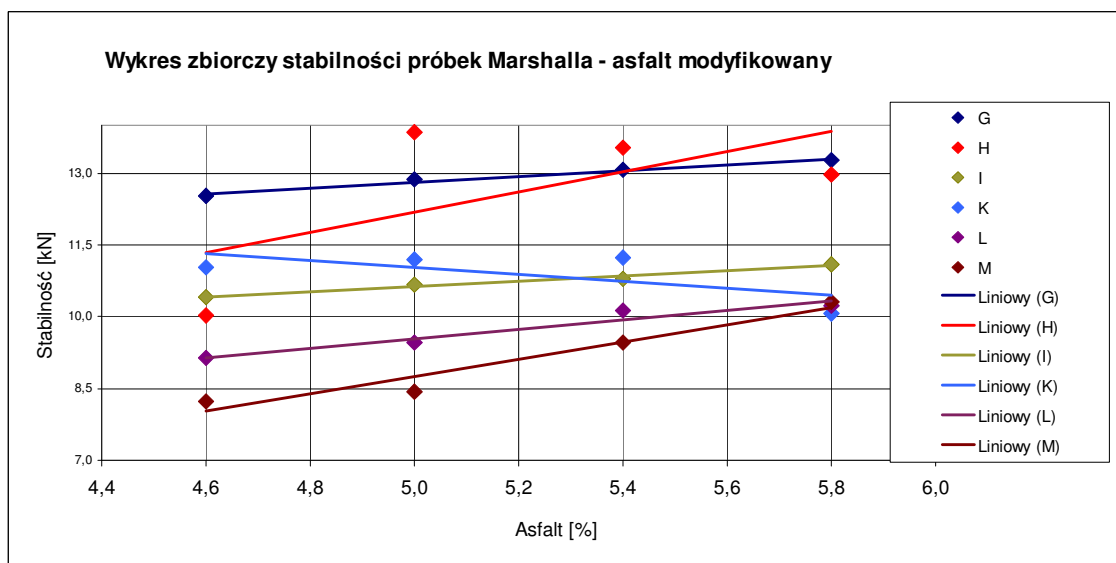
Rodzaj asfaltu	Stabilność przy zawartości asfaltu [kN]:			
	4,60%	5,00%	5,40%	5,80%
A	11,0	11,6	9,9	9,1
B	9,0	8,8	10,5	9,8
C	11,8	11,1	9,5	10,1
D	8,2	8,1	8,0	7,7
E	7,9	7,8	8,1	9,3
F	7,9	8,4	9,1	9,0



Rys. 16 – Wykres stabilności próbek Marshalla wykonanych z asfaltem zwykłym 50/70 oraz z dodatkami obniżającymi temperaturę

Tablica 14. Stabilność próbek Marshalla wykonanych z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 oraz z dodatkami obniżającymi temperaturę.

Rodzaj asfaltu	Stabilność przy zawartości asfaltu [kN]:			
	4,60%	5,00%	5,40%	5,80%
G	12,5	12,9	13,1	13,3
H	10,0	13,9	13,5	13,0
I	10,4	10,7	10,8	11,1
K	11,0	11,2	11,2	10,1
L	9,1	9,5	10,1	10,2
M	8,2	8,4	9,5	10,3



Rys. 17 – Wykres stabilności próbek Marshalla wykonanych z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 oraz z dodatkami obniżającymi temperaturę.

Wnioski z przeprowadzonych badań:

- Wpływ środków obniżających temperaturę produkcji mieszank mineralno-asfaltowych na parametr stabilności jest niejednoznaczny.
- Generalnie, mieszanki oznaczone literami B-F (dla asfaltu zwykłego 50/70) oraz H-M (dla asfaltu modyfikowanego 45/80-55) i produkowane z dodatkami w temperaturze niższej (135 °C) w stosunku do temperatury produkcji mieszank referencyjnych 160 °C (oznaczonych literami A i G) posiadają mniejszą stabilność, przy czym najmniejszy spadek stabilności odnotowały mieszanki produkowane ze środkiem Sasobit oraz Licomont BS 100 (litery B i H oraz C i I), które przez swój skład powodują usztywnienie asfaltu. Najmniejszą stabilność posiadały mieszanki wyprodukowane ze środkiem Rediset WMX, Ceca Base RT oraz zeolit, które nie zmieniają parametrów lepiszcza. Może to oznaczać, że niższa temperatura produkcji mieszanki wpływa pozytywnie na zmniejszenie starzenia asfaltu, przez co stabilność takiej mieszanki jest mniejsza. Uzyskany spadek stabilności przez obniżenie temperatury produkcji w pewnym stopniu jest niwelowany przez usztywniające działanie środków Sasobit i Licomont BS 100.

3.7 Badania odporności mieszank 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 deformacji, prowadząc do całkowitej degradacji nawierzchni.

Badanie odporności betonów asfaltowych na działanie wody oraz łącznie wody i mrozu polegało na określeniu i ocenie wybranych cech mechanicznych po przejściu odpowiednich cykli kondycjonowania, symulujących warunki atmosferyczne panujące na drodze. Dla betonów asfaltowych wykonanych z zastosowaniem ocenianych asfaltów oraz dodatków obniżających temperaturę zbadano moduły sztywności sprężystej i wytrzymałość na pośrednie rozciąganie przed i po poddaniu niszczącemu oddziaływaniu wody i mrozu.

Badania odporności betonów asfaltowych na działanie wody i mrozu przeprowadzono opierając się na procedurach normy europejskiej PN-EN 12697-12 oraz – z uwagi na okres prowadzonych badań, przed momentem publikacji Wymagań Technicznych WT-2 2010 – wskazań zawartych w Wymaganiach Technicznych „Nawierzchnie asfaltowe na drogach publicznych” WT-2 2008.

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.

Kondycjonowanie, symulujące warunki atmosferyczne, panujące na drodze w laboratorium, polegało na nasycaniu próbek betonu asfaltowego wodą, poddawaniu

go cyklowi zamrażania i odmrażania oraz poddaniu przedłużonemu oddziaływaniu wody w podwyższonej temperaturze.

3.7.1 Metodyka badania

3.7.1.1 Przygotowanie próbek

3.7.1.1.1 Zagęszczanie

Mieszanki z asfaltami bez dodatków obniżających temperaturę – oznaczone literami A i G – wytwarzano w mechanicznej mieszarce, w temperaturze 160°C, natomiast w przypadku mieszanek z dodatkami – oznaczonymi odpowiednio literami B, C, D, E i F oraz H, I, K, L i M – temperatura produkcji wynosiła 135°C. Następnie formowano próbki jak do badania Marshalla (D=101 mm, H=63,5 mm), używając normowego ubijaka Marshalla. Ilość uderzeń wynosiła 35 uderzeń na stronę. Łącznie wytwarzano 10 próbek dla każdej mieszanki mineralno-asfaltowej.

Uformowane próbki dzielono na trzy grupy, tak by każda miała zbliżoną średnią gęstość pozorną i zbliżoną zawartość wolnych przestrzeni. Każdą grupę próbek (minimum 3 próbki) poddawano odpowiednim metodom przygotowania – kondycjonowania próbek. Próbkę z najbardziej odchyloną wartością gęstości pozornej odrzucano i nie wykorzystywano do dalszych badań.

3.7.1.1.2 Kondycjonowanie

Bez kondycjonowania

Próbki serii kontrolnej, bez kondycjonowania 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 wszystkich próbek z danej serii, po około 180 godzinach wg PN-EN12697-12.

Kondycjonowanie (odporność na działanie wody i mrozu)

Dla każdego rodzaju mieszanek przygotowano dwie serie próbek kondycjonowanych 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 próbek wodą o temperaturze 20°C i przechowywaniu ich w komorze próżniowej o ciśnieniu bezwzględnym 67 hPa przez 30 min. Następnie próbki obmierzano (wysokość i średnicę) i sprawdzono czy próbki nie zwiększyły swojej objętości. Jeżeli zwiększyły swoją objętość o więcej niż 2%, takie próbki odrzucano.

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.

3.7.1.2 Opis badania

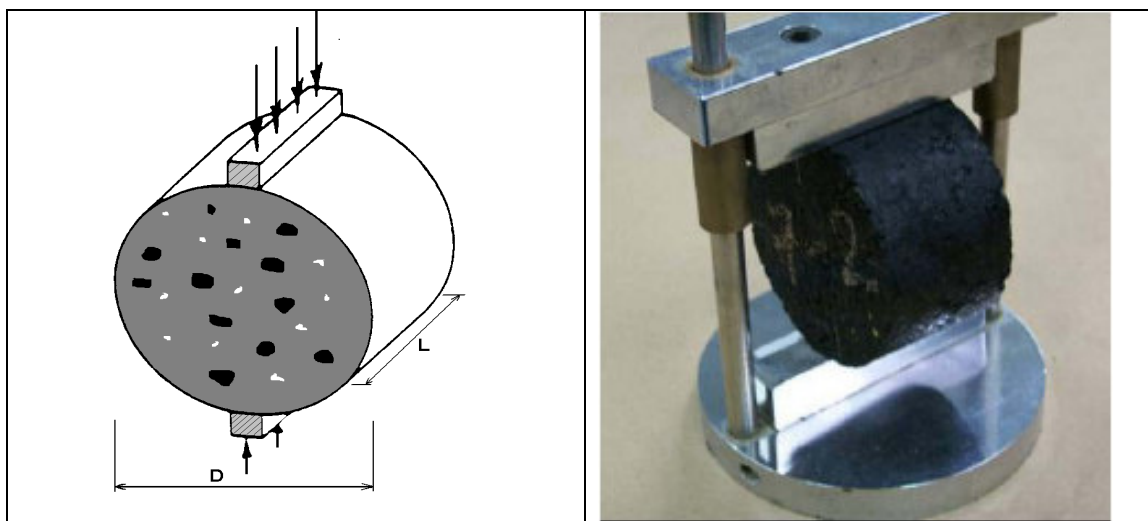
Bezpośrednio przed każdym badaniem wszystkie próbki przechowywano w kąpeli wodnej przez 2 godziny w temperaturze 20°C.

Każdą próbkę badano dwukrotnie:

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

3.7.1.2.1 Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie

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. Podczas badania monitorowano siłę obciążającą. Schemat badania przedstawiono na rysunku 18.



Rys.18 – Schemat i widok badania wytrzymałości przy rozciąganiu pośrednim.

Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie wyznaczano na podstawie zależności:

$$R = \frac{2 * P}{\pi * D * h}$$

gdzie:

R – wytrzymałość na pośrednie rozciąganie [MPa],

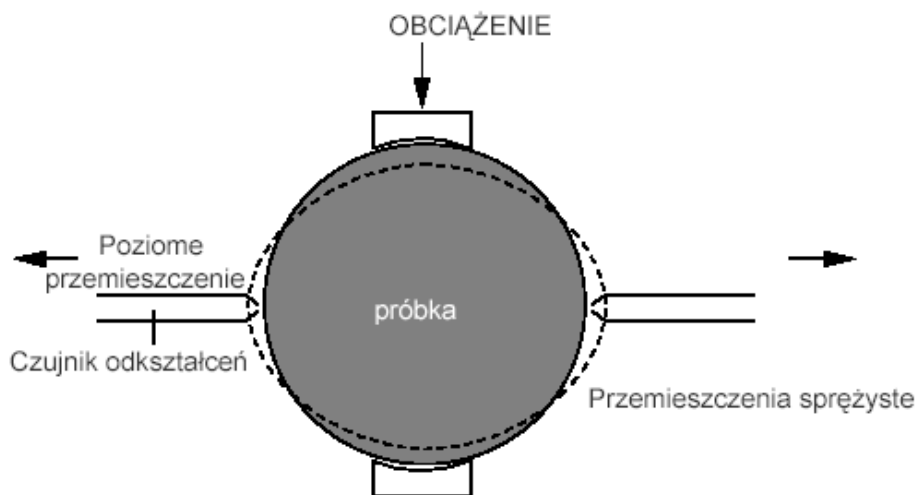
P – siła niszcząca [MN],

D – średnica próbki [m],

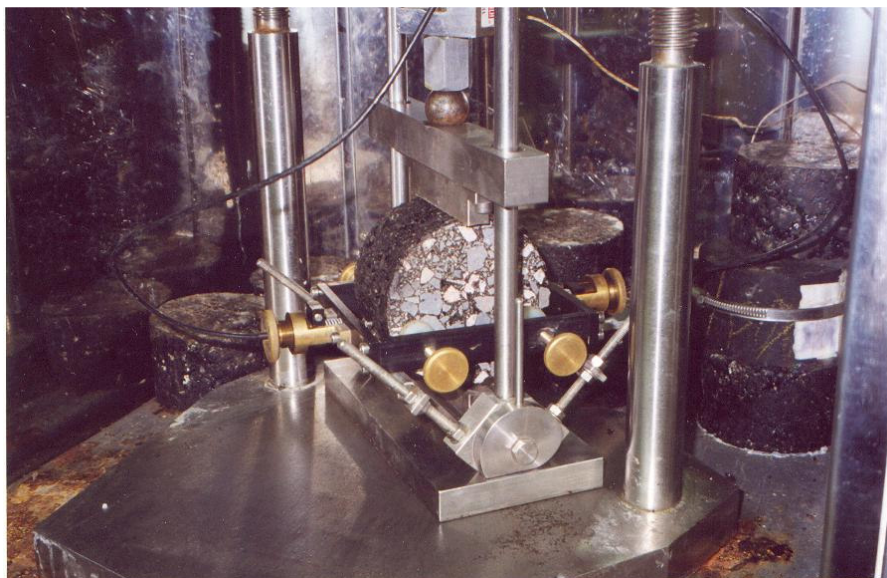
h – wysokość próbki [m].

3.7.1.2.2 Moduł sztywności sprężystej przy pośrednim rozciąganiu

Badanie modułu sztywności sprężystej przy pośrednim rozciąganiu przeprowadzono w urządzeniu Nottingham Asphalt Tester (NAT) zgodnie instrukcją urządzenia i z BSI DD 231:1993. Wykonywano test przy kontrolowanym naprężeniu. Podczas pięciokrotnego dynamicznego obciążenia próbek $\phi 100$ i $h=60-65$ mm mierzone są przemieszczenia wzdłuż osi poziomej próbki, na poziomie płaszczyzny poziomej przechodzącej przez oś próbki prostopadłą do kierunku obciążenia. Obciążenie polegało na wywarciu 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 19.



Rys. 19 – Schemat badania modułu sztywności sprężystej przy pośrednim rozciąganiu.



Fot. 19 – Widok próbki podczas badania modułu sztywności sprężystej

Moduł sztywności sprężystej S wyznaczano z następującej zależności:

$$S = \frac{P * (v + 0,2732)}{\delta_H * h}$$

gdzie:

S – moduł sztywności sprężystej [MPa],

P – siła pionowa [MN],

v – współczynnik Poissona,

δ_H – przemieszczenie poziome [m],

h – wysokość próbki [m].

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

3.7.1.3 Ocena i kryteria odporności mieszanek na działanie wody i mrozu

Odporność na działanie wody i mrozu charakteryzowana jest przez otrzymany moduł sztywności oraz wytrzymałość na pośrednie rozciąganie, określane przez:

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

Wskaźnik modułu sztywności sprężystej (RMR) zdefiniowano jako:

$$RMR = \frac{S_2}{S_1} * 100\%$$

gdzie:

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

Wskaźnik wytrzymałości na pośrednie rozciąganie (ITSR) zdefiniowano jako:

$$ITSR = \frac{R_2}{R_1} * 100\%$$

gdzie:

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

Im mieszanka uzyskuje mniejsze wartości RMR i ITSR, tym jest bardziej wrażliwa na działanie wody i mrozu.

Według normy europejskiej PN-EN 12697-12 kryterium podawane jest tylko dla wskaźnika wytrzymałości ITSR, nie jest zaś podawane dla wskaźnika modułu sztywności sprężystej. Wymagania Techniczne „WT-2. Nawierzchnie asfaltowe na drogach krajowych 2008” podawały, że dla betonu asfaltowego do warstwy ścieralnej wskaźnik ITSR nie powinien być mniejszy niż 90%. Taki sam minimalny poziom wskaźnika ITSR obowiązuje w obecnie aktualnych Wymaganiach Technicznych WT-2 2010, jednakże należy pamiętać o zmienionej procedurze kondycjonowania oraz innej temperaturze badania próbek (25°C zamiast 15°C).

3.7.2 Wyniki badań

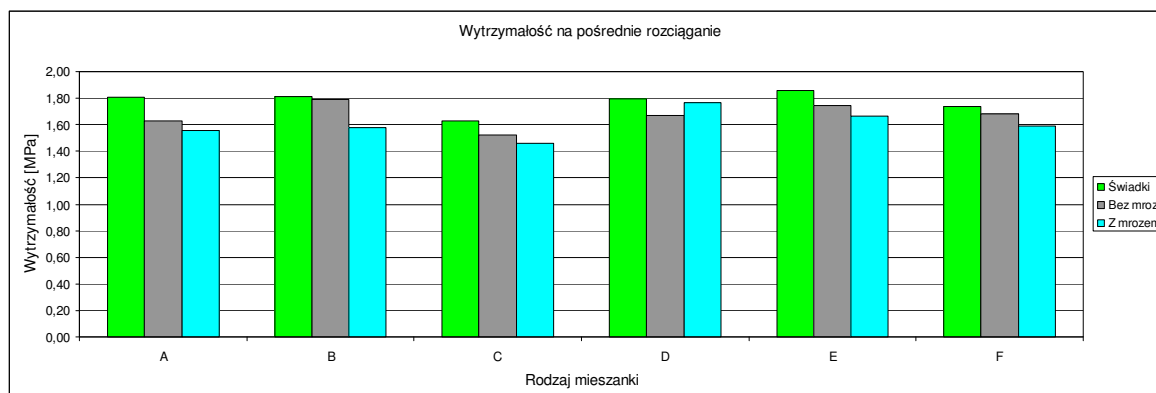
Wyniki badań wytrzymałości na pośrednie rozciąganie, modułów sztywności sprężystej i ich wskaźników przedstawiono w tablicach 15-18 oraz na rysunkach 20-27.

Tablica 15. Zestawienie wyników badań wytrzymałości na pośrednie rozciąganie oraz wskaźników ITSR betonów asfaltowych z asfaltem zwykłym 50/70 (czystym i z dodatkami) w badaniu odporności na działanie wody i mrozu wykonanym wg metody PN-EN 12697-12 oraz informacji podanych w WT-2 2008

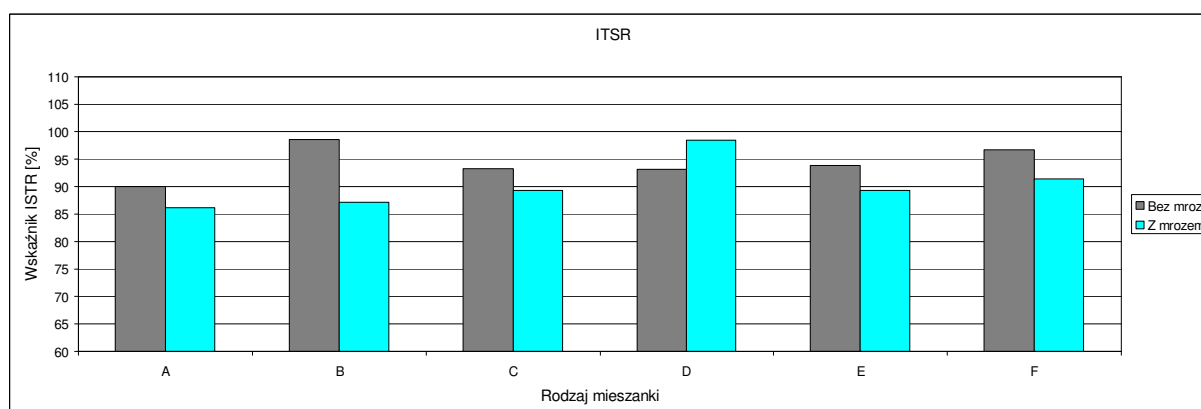
Rodzaj mieszanki	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie świadków [MPa]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie próbek bez cyklu zamrażania [MPa]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie próbek z cyklem zamrażania [MPa]	Wskaźnik wytrzymałości ITSR dla próbek bez cyklu zamrażania	Wskaźnik wytrzymałości ITSR dla próbek z cyklem zamrażania
A	1,81	1,63	1,56	90,0%	86,1%
B	1,81	1,79	1,58	98,6%	87,1%
C	1,63	1,52	1,46	93,3%	89,2%
D	1,79	1,67	1,76	93,1%	98,4%
E	1,86	1,75	1,66	93,9%	89,3%
F	1,74	1,68	1,59	96,8%	91,5%

Tablica 16. Zestawienie wyników badań modułów sztywności sprężystej oraz wskaźników RMR betonów asfaltowych z asfaltem zwykłym 50/70 (czystym i z dodatkami) w badaniu odporności na działanie wody i mrozu wykonanym wg metody PN-EN 12697-12 oraz informacji podanych w WT-2 2008

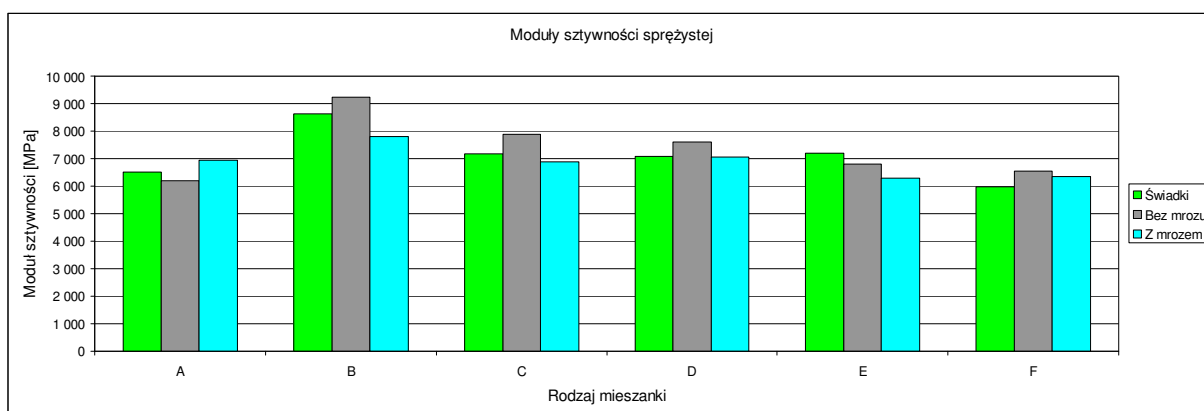
Rodzaj mieszanki	Moduł sztywności sprężystej świadków [MPa]	Moduł sztywności sprężystej próbek bez cyklu zamrażania [MPa]	Moduł sztywności sprężystej próbek z cyklem zamrażania [MPa]	Wskaźnik modułu sztywności sprężystej RMR dla próbek bez cyklu zamrażania	Wskaźnik modułu sztywności sprężystej RMR dla próbek z cyklem zamrażania
A	6500	6191	6952	95,2%	106,9%
B	8624	9225	7791	107,0%	90,3%
C	7172	7892	6896	110,0%	96,2%
D	7073	7587	7064	107,3%	99,9%
E	7210	6805	6279	94,4%	87,1%
F	5986	6537	6331	109,2%	105,8%



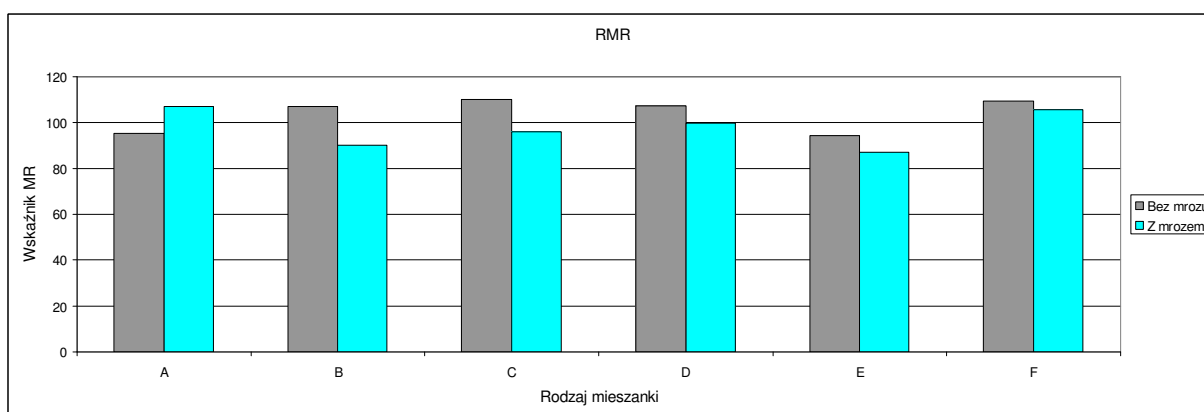
Rys. 20 – Wyniki badań wytrzymałości na pośrednie rozciąganie betonów asfaltowych z asfaltem zwykłym 50/70 (czystym i z dodatkami)



Rys. 21 – Zestawienie wskaźników ITSr wytrzymałości na pośrednie rozciąganie betonów asfaltowych z asfaltem zwykłym 50/70 (czystym i z dodatkami)



Rys. 22 – Wyniki badań modułów sztywności sprężystej betonów asfaltowych z asfaltem zwykłym 50/70 (czystym i z dodatkami)



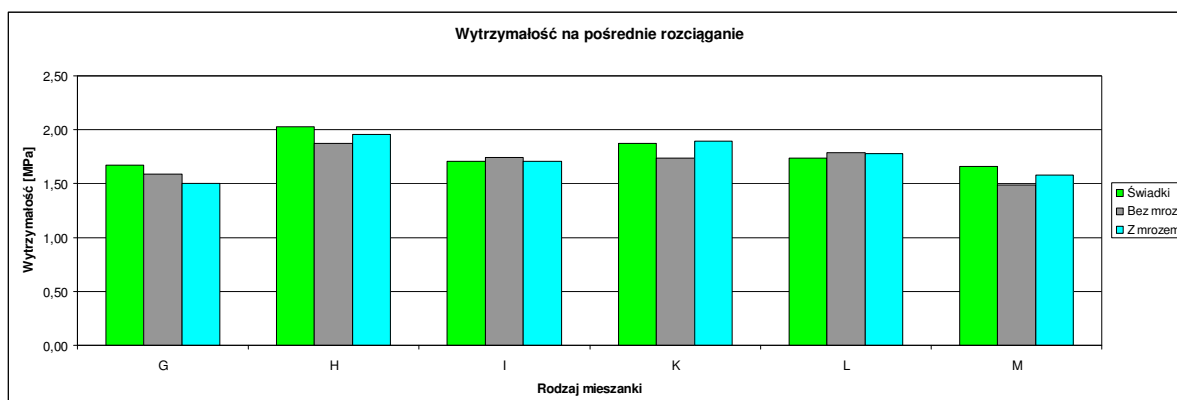
Rys. 23 – Zestawienie wskaźników RMR modułów sztywności sprężystej betonów asfaltowych z asfaltem zwykłym 50/70 (czystym i z dodatkami)

Tablica 17. Zestawienie wyników badań wytrzymałości na pośrednie rozciąganie oraz wskaźników ITSR betonów asfaltowych z asfaltem modyfikowanym 45-80/55 (czystym i z dodatkami) w badaniu odporności na działanie wody i mrozu wykonanym wg metody PN-EN 12697-12 oraz informacji podanych w WT-2 2008

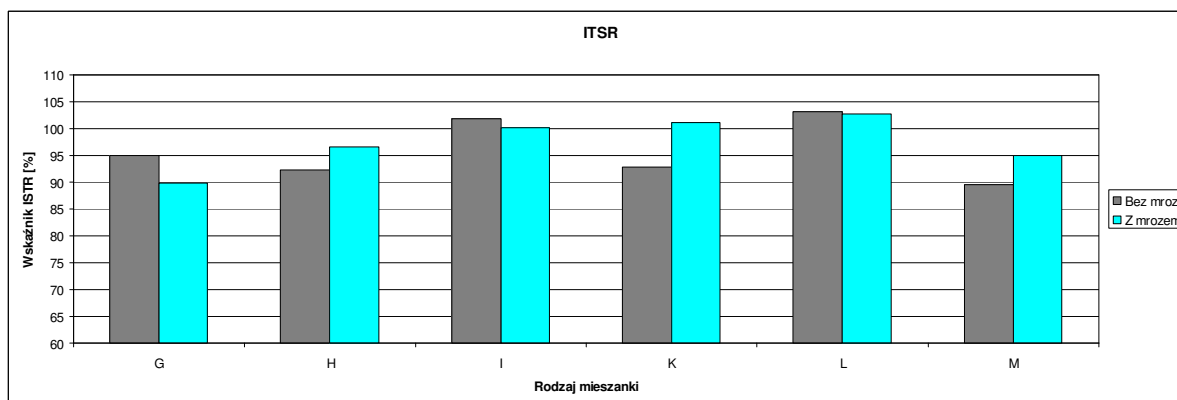
Rodzaj mieszanki	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie świadków [MPa]	Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie próbek bez cyklu zamrażania [MPa]	Wytrzymałość na pośrednie próbek z cyklem zamrażania [MPa]	Wskaźnik wytrzymałości ITSR dla próbek bez cyklu zamrażania	Wskaźnik wytrzymałości ITSR dla próbek z cyklem zamrażania
G	1,67	1,59	1,50	95,0%	89,9%
H	2,03	1,87	1,96	92,3%	96,5%
I	1,71	1,74	1,71	101,9%	100,1%
K	1,87	1,74	1,89	92,8%	101,1%
L	1,74	1,79	1,78	103,2%	102,7%
M	1,66	1,49	1,58	89,6%	95,0%

Tablica 18. Zestawienie wyników badań modułów sztywności sprężystej oraz wskaźników RMR betonów asfaltowych z asfaltem modyfikowanym 45-80/55 (czystym i z dodatkami) w badaniu odporności na działanie wody i mrozu wykonanym wg metody PN-EN 12697-12 oraz informacji podanych w WT-2 2008

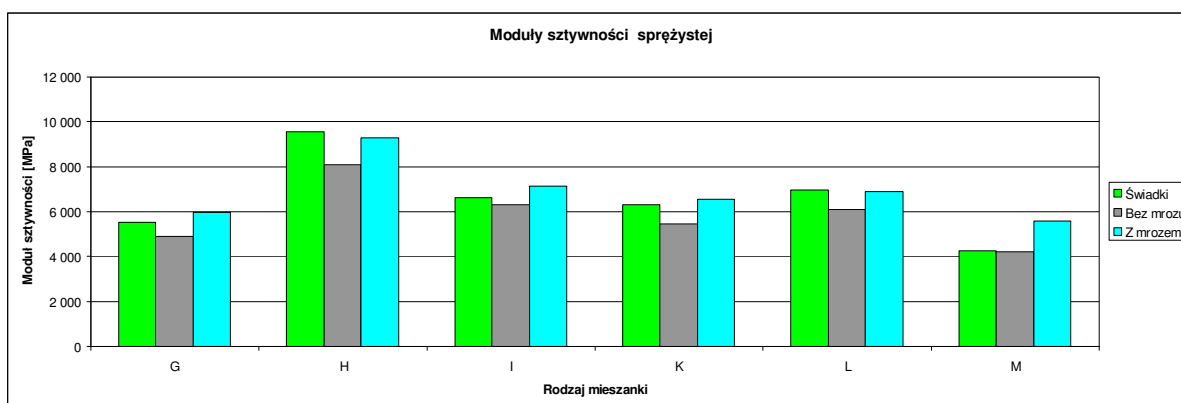
Rodzaj mieszanki	Moduł sztywności sprężystej świadków [MPa]	Moduł sztywności sprężystej próbek bez cyklu zamrażania [MPa]	Moduł sztywności sprężystej próbek z cyklem zamrażania [MPa]	Wskaźnik modułu sztywności sprężystej RMR dla próbek bez cyklu zamrażania	Wskaźnik modułu sztywności sprężystej RMR dla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



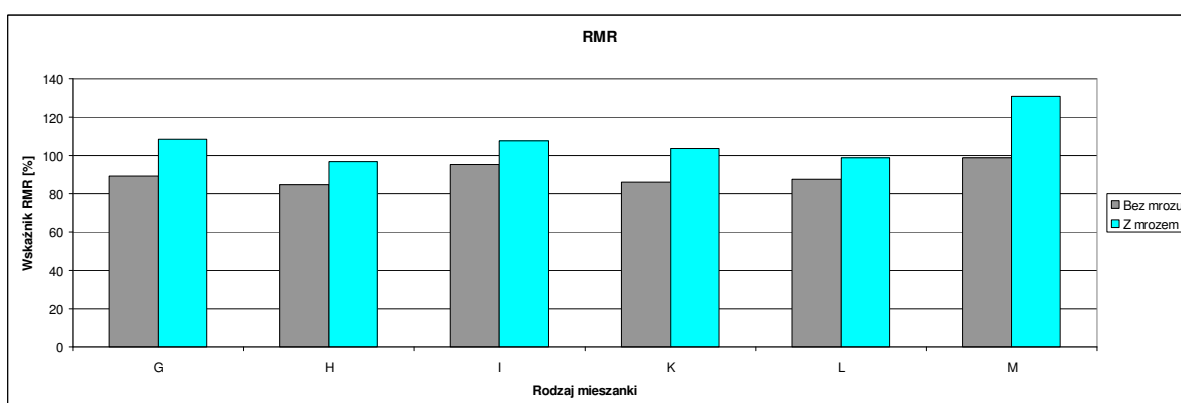
Rys. 24 – Wyniki badań wytrzymałości na pośrednie rozciąganie betonów asfaltowych z asfaltem modyfikowanym 45-80/55 (czystym i z dodatkami)



Rys. 25 – Zestawienie wskaźników ITSr wytrzymałości na pośrednie rozciąganie betonów asfaltowych z asfaltem modyfikowanym 45-80/55 (czystym i z dodatkami)



Rys. 26 – Wyniki badań modułów sztywności sprężystej betonów asfaltowych z asfaltem modyfikowanym 45-80/55 (czystym i z dodatkami)



Rys. 27 – Zestawienie wskaźników RMR modułów sztywności sprężystej betonów asfaltowych z asfaltem modyfikowanym 45-80/55 (czystym i z dodatkami)

3.7.3 Analiza wyników

- Żaden ze środków obniżających temperaturę produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych nie wpłynął negatywnie na zachowanie mieszanek pod kątem odporności na działanie wody i mrozu, pomimo niższej temperatury produkcji i zagęszczania.
- W przypadku mieszanek z asfaltem zwykłym 50/70 przekroczenie wymaganego progu ITSR = 90% dla próbek z cyklem zamrażania udało się uzyskać jedynie dla mieszanek wytworzonych ze środkiem Rediset WMX oraz zeolitem (litery D i F), 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 równym 86,1%. Pozostałe mieszanki z innymi środkami uzyskały poziom wskaźnika ITSR bliski poziomowi 90% (87,1 – 89,3%).
- Również w przypadku mieszanek z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 wartość ITSR po cyklu zamrażania dla próbek wyprodukowanych tylko z czystym asfaltem modyfikowanym była najniższa (89,9%). Wskaźniki ITSR po cyklu zamrażania dla wszystkich mieszanki z asfaltem modyfikowanym i dodatkami obniżającymi temperaturę przekroczyły wymagany poziom 90%.

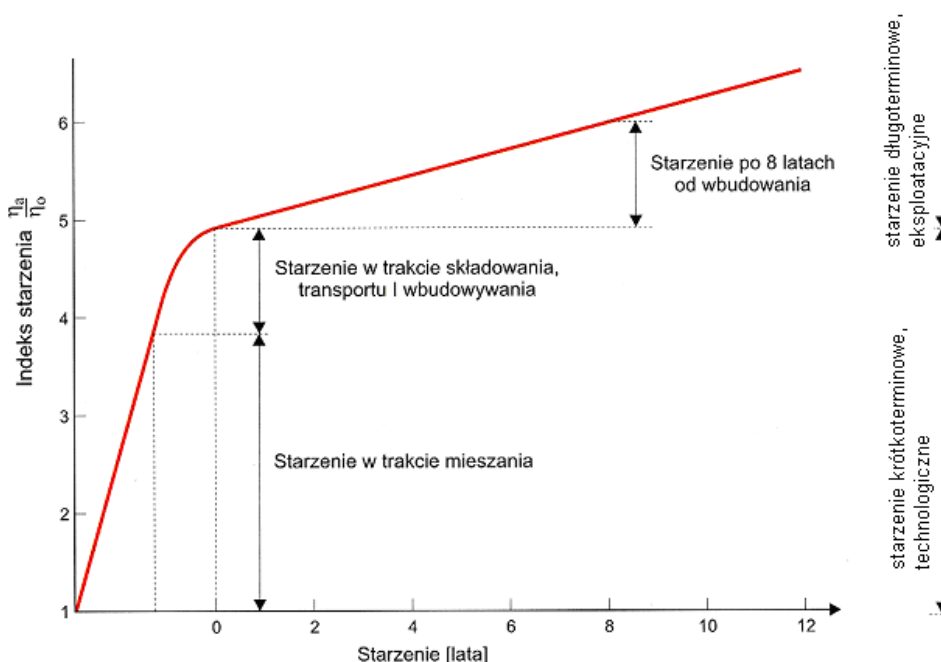
- Uzyskane rezultaty pokazują, że wprowadzenie do składu mieszanki dodatku modyfikującego lepkość bądź działającego powierzchniowo czynnie pozwala nie tylko na obniżenie temperatury produkcji, ale również zapewnia lepsze otoczenie ziaren kruszywa lepiszczem zwiększając tym samym odporność na działanie wody i mrozu, bez dodatkowych tradycyjnych środków adhezyjnych.
- W przypadku badania wskaźników RMR modułów sztywności sprężystej z cyklem zamrażania zarówno w przypadku asfaltu zwykłego 50/70, jak i modyfikowanego 45/80-55 dla asfaltów czystych oraz z dodatkiem zeolitu osiągnięto największe przesztywnienie. Dla pozostałych kombinacji wskaźnik RMR po cyklu zamrażania zawierał się w przedziale 87,1 – 107,6%.

3.8 Badania wpływu starzenia na parametry betonu asfaltowego

Starzenie mieszanek mineralno-asfaltowych jest procesem dość skomplikowanym. Wiąże się ono ze zmianą właściwości asfaltu w wyniku działania podwyższonej temperatury, promieni ultrafioletowych oraz czasu. W wyniku zmian właściwości asfaltu zmieniają się również cechy mieszanek mineralno-asfaltowych. Mieszanki mineralno-asfaltowe stają się sztywniejsze i bardziej kruche, przez co stają się bardziej podatne na spękania, mniej odporne na działanie niskich temperatur oraz podatne na uszkodzenia powierzchniowe.

Proces starzenia mieszanek mineralno-asfaltowych można podzielić na dwa etapy. Etap pierwszy to starzenie podczas wytwarzania, transportu i wbudowywania mieszanek mineralno-asfaltowych. Nosi on nazwę starzenia krótkoterminowego. Etap drugi to starzenie mieszanek mineralno-asfaltowych podczas eksploatacji nawierzchni. Nosi on nazwę starzenia długoterminowego.

Proces starzenia mieszanek mineralno-asfaltowych ilustruje rysunek 28.



Rys. 28 – Proces starzenie asfaltu w mieszance mineralno-asfaltowej w czasie wytwarzania, wbudowywania i eksploatacji.

3.8.1.1 Metodyka badania

Do badań przygotowano próbki betonu asfaltowego według trzech schematów:

Próbki niestarzone (N.S) – 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 (S.K.S) – próbki z betonu asfaltowego poddanego procesowi starzenia krótkoterminowego według procedury podanej w dalszej części tego punktu. Próbki te w pracy oznaczono jako próbki po starzeniu krótkoterminowym (S.K.S). Starzenie krótkoterminowe mieszanki mineralno-asfaltowej symuluje zmiany, jakie zachodzą podczas produkcji, transportu, wbudowania i zagęszczania mieszanki mineralno-asfaltowej

Próbki po starzeniu długoterminowym w suszarce (S.D.S) – 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 (S.D.S). Starzenie długoterminowe mieszanki mineralno-asfaltowej symuluje zmiany, jakie zachodzą podczas eksploatacji nawierzchni.

Starzenie krótkoterminowe i długoterminowe przeprowadzono według procedury, opracowanej w Katedrze Inżynierii Drogowej Politechniki Gdańskiej przez Ar-Rabtiego i Judyckiego, na podstawie badań prowadzonych w ramach amerykańskiego programu badawczego SHRP (Strategic Highway Research Program).

Starzenie krótkoterminowe (S.K.S) przeprowadzono wg następującej procedury:

1. Mieszanekę wytwarzano w mechanicznej mieszarce, w temperaturze odpowiadającej temperaturze otoczenia przez dany rodzaj asfaltu. W przypadku mieszanek z asfaltami bez dodatków środków obniżających temperaturę (mieszanki A i G) było to 160 °C, natomiast w przypadku mieszanek ze środkami obniżającymi temperaturę było to 135 °C.
2. Luźną (niezagęszczoną) mieszanekę mineralno-asfaltową rozkładano w formach tak, aby grubość warstwy wynosiła około 1,5 cm.
3. Formy z mieszaneką przetrzymywano w suszarce z wymuszonym nawiewem, w temperaturze +135°C, przez 4 godziny.
4. Po zakończeniu tego okresu mieszanekę A i G (bez dodatku środków obniżających temperaturę) podgrzewano do temperatury zagęszczenia i formowano próbki do dalszych badań (próbki walcowe w ubijaku Marshalla). Dla mieszanek ze środkami obniżającymi temperaturę przystępowano od razu do formowania i zagęszczania próbek.

Starzenie długoterminowe (S.D.S) przeprowadzono wg następującej procedury:

1. Próbki przygotowano z betonu asfaltowego poddanego procesowi starzenia krótkoterminowego.
2. Próbki zabezpieczono przed rozpadnięciem się lub deformacjami pod własnym ciężarem drobnoziarnistą siatką miedzianą poprzez owinięcie próbek po bokach.

3. Umieszczono próbki w suszarce z wymuszonym nawiewem.
4. Próbkę przetrzymywano przez 5 dni w temperaturze +85 °C.
5. Po tym czasie próbki poddano badaniom laboratoryjnym.

Z uwagi na charakter działania zeolitu (mieszanki o literach F i M) – spieniania asfaltu poprzez wodę zawartą w porach minerału jakim jest zeolit – i ryzyko utraty stanu spienienia w trakcie 4 godzinowego starzenia krótkoterminowego próbki mieszanek wykonanych z użyciem zeolitu poddawano tylko starzeniu długoterminowemu.

Widok próbek przygotowanych do starzenia długoterminowego przedstawiono na fotografii 20.



Fot. 20 – Widok próbek walcowych przygotowanych do starzenia długoterminowego

3.8.1.2. Ocena odporności na starzenie

Wpływ starzenia w pośrednim rozciąganiu określono poprzez wyznaczenie wskaźnika modułu sztywności. Wskaźnik ten miał posłużyć do porównania zmian zachodzących w badanych betonach asfaltowych podczas procesów starzenia. Wskaźnik ten zdefiniowano następująco:

Wskaźnik modułu sztywności sprężystej:

$$W_s = \frac{S_s}{S_{NS}}$$

gdzie:

W_s - wskaźnik modułu sztywności,

S_S - moduł sztywności sprężystej po starzeniu krótkoterminowym lub długoterminowym,

S_{NS} - moduł sztywności sprężystej próbek nie starzonych.

Badania modułów sztywności sprężystej wykonywano dla 4 temperatur: -10, 0, +10 oraz +20 °C. Dla każdej kombinacji 3 zmiennych – temperatury, rodzaju starzenia oraz danego składu – badano 3 próbki. Temperaturą miarodajną w tym badaniu jest temperatura +20°C. Badania w pozostałych temperatury stanowiły głębszą analizę danych.

3.8.2 Wyniki badań

Tablica 19. Zestawienia średnich wartości modułów sztywności sprężystej w różnych temperaturach dla próbek z betonu asfaltowego z asfaltem zwykłym 50/70 (czystym i z dodatkami)

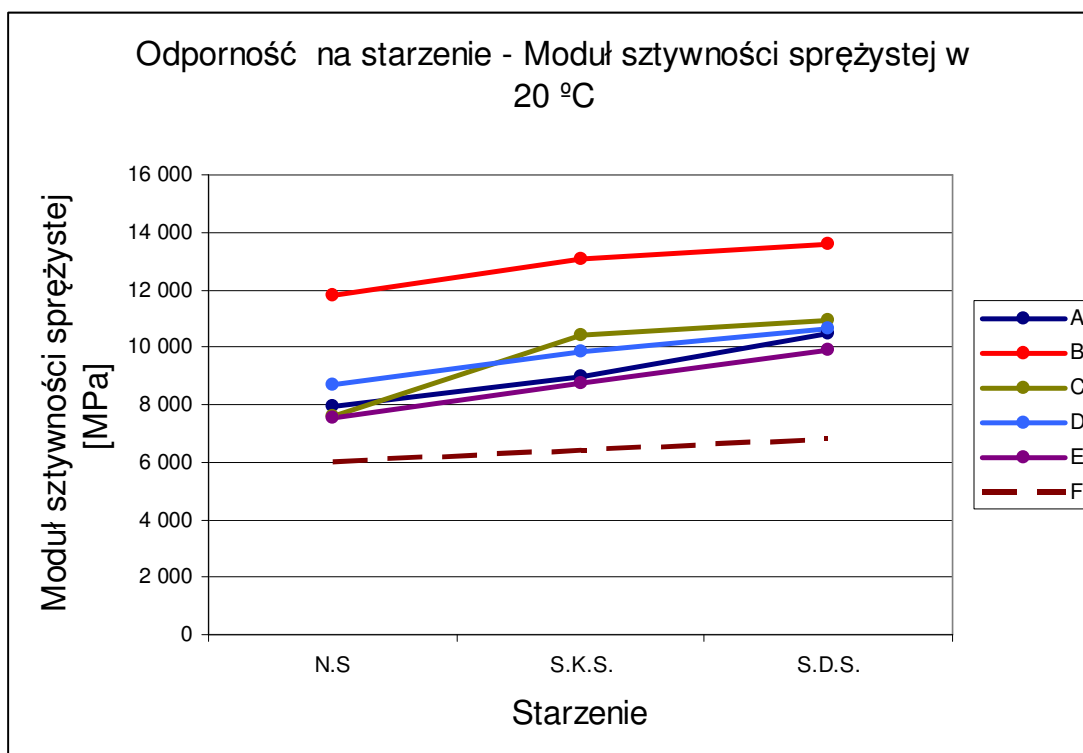
Rodzaj próbek	Temperatura badania modułu sztywności [°C]	Moduł sztywności sprężystej dla danego rodzaju asfaltu					
		A	B	C	D	E	F
Grupa kontrolna N.S.	20	7 939	11 803	7 584	8 703	7 565	5 995
	10	14 168	17 473	13 717	13 621	11 574	11 281
	0	19 901	21 081	20 771	21 572	22 491	23 095
	-10	24 540	27 400	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	15 041	14 342	21 918	22 183

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

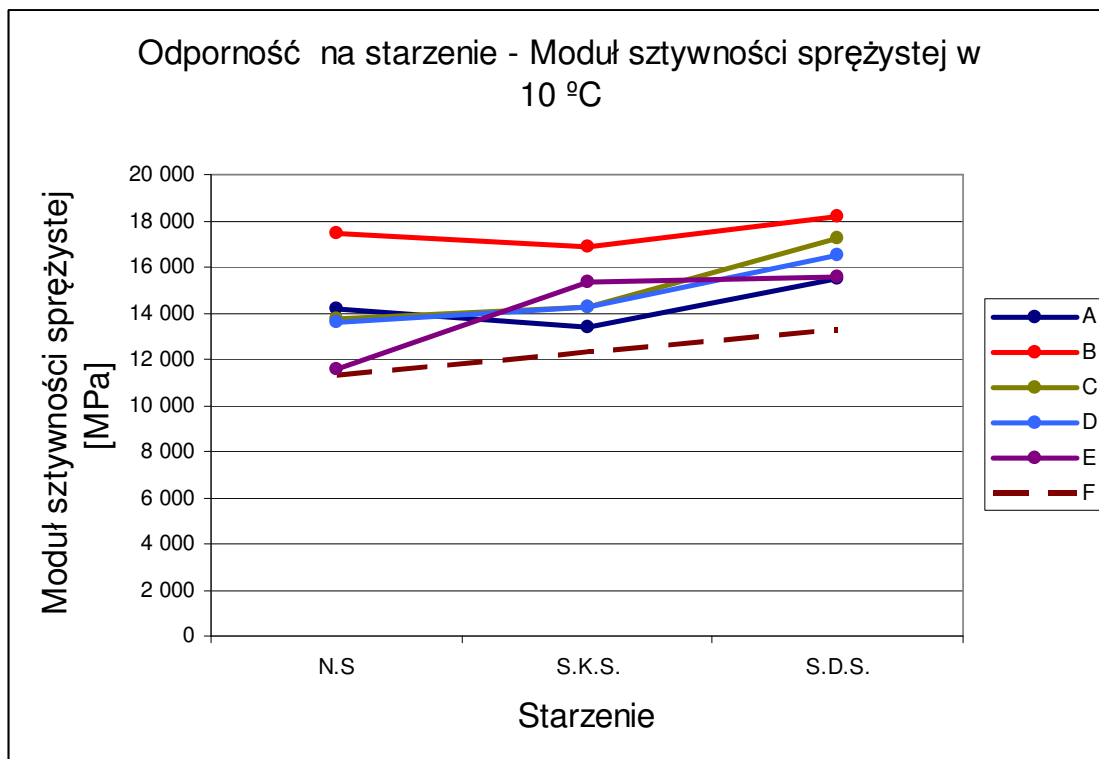
Tablica 20. Zestawienia średnich wartości wskaźników modułów sztywności sprężystej w różnych temperaturach dla próbek z betonu asfaltowego z asfaltem zwykłym 50/70 (czystym i z dodatkami)

Rodzaj wskaźnika WS	Temperatura badania modułu sztywności [°C]	Wskaźnik WS dla danego rodzaju asfaltu					
		A	B	C	D	E	F
Starzenie krótkoterminowe 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	0,67	0,57	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	0,61	0,54	0,85	-

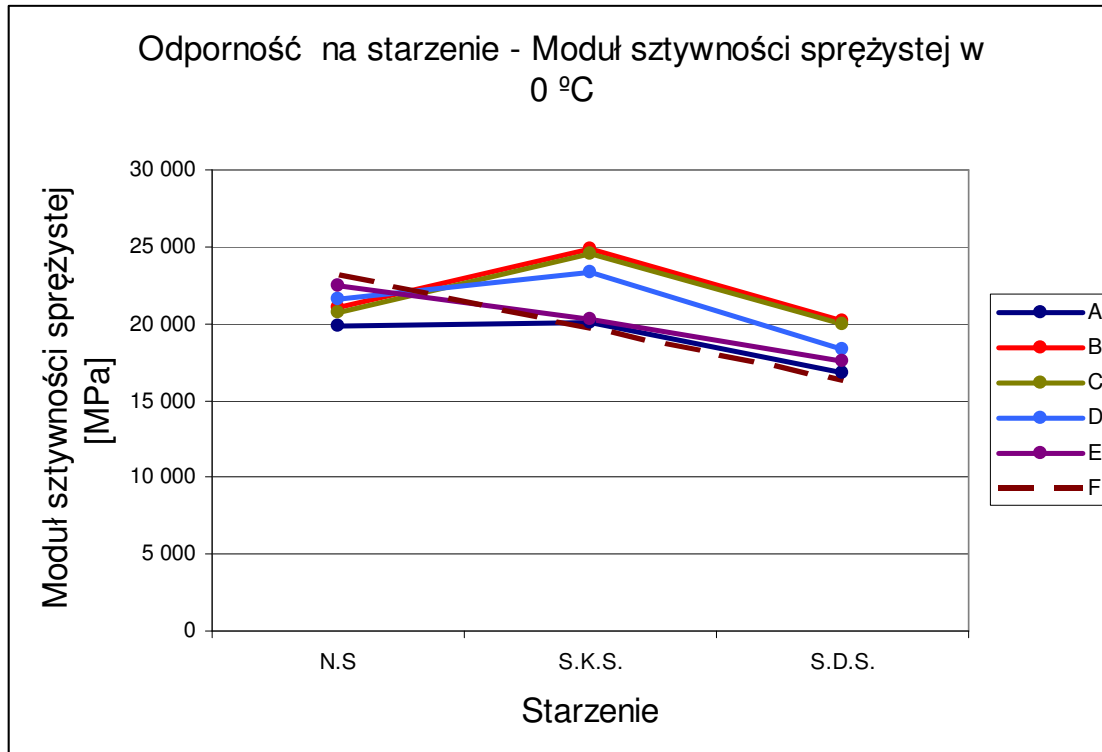
N.S. – nie starzone S.K.S. – starzenie krótkoterminowe w suszarce S.D.S. – starzenie długoterminowe w suszarce



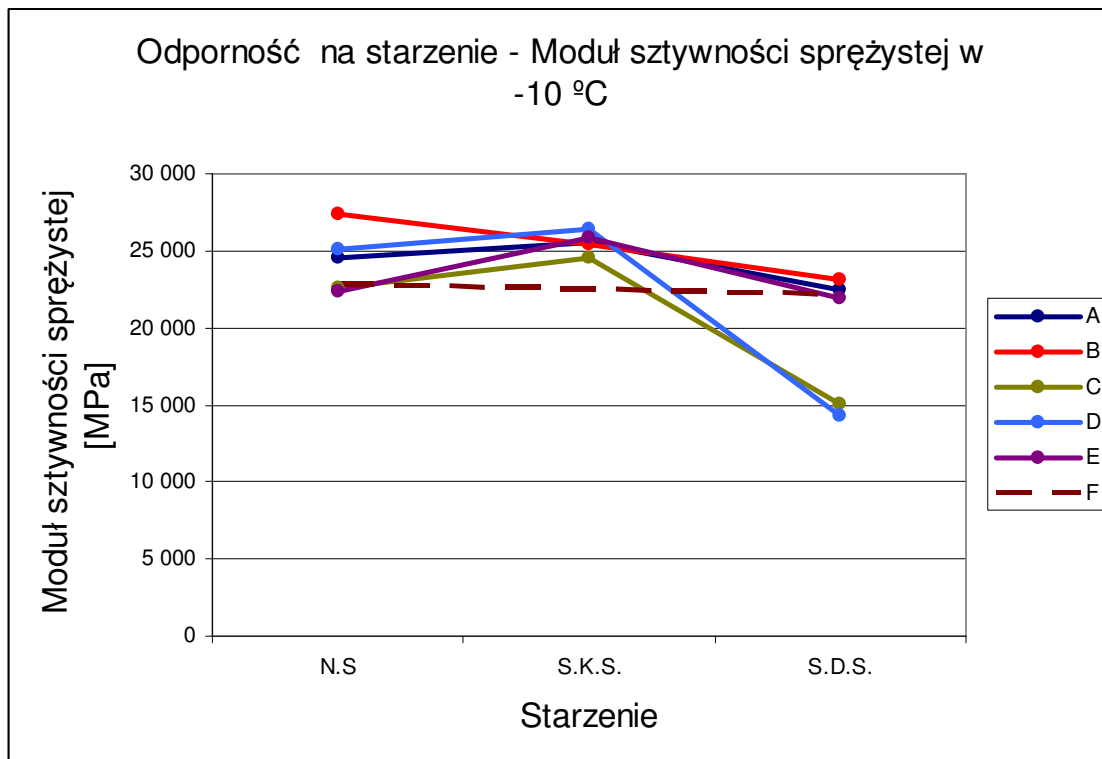
Rys. 29 – Zestawienie średnich wartości modułów sztywności próbek z betonu asfaltowego z asfaltem zwykłym 50/70 (czystym i z dodatkami) w temperaturze 20 °C



Rys. 30 – Zestawienie średnich wartości modułów sztywności próbek z betonu asfaltowego z asfaltem zwykłym 50/70 (czystym i z dodatkami) w temperaturze 10 °C



Rys. 31 – Zestawienie średnich wartości modułów sztywności próbek z betonu asfaltowego z asfaltem zwykłym 50/70 (czystym i z dodatkami) w temperaturze 0 °C



Rys. 32 – Zestawienie średnich wartości modułów sztywności próbek z betonu asfaltowego z asfaltem zwykłym 50/70 (czystym i z dodatkami) w temperaturze -10 °C

Tablica 21. Zestawienia średnich wartości modułów sztywności sprężystej w różnych temperaturach dla próbek z betonu asfaltowego z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 (czystym i z dodatkami)

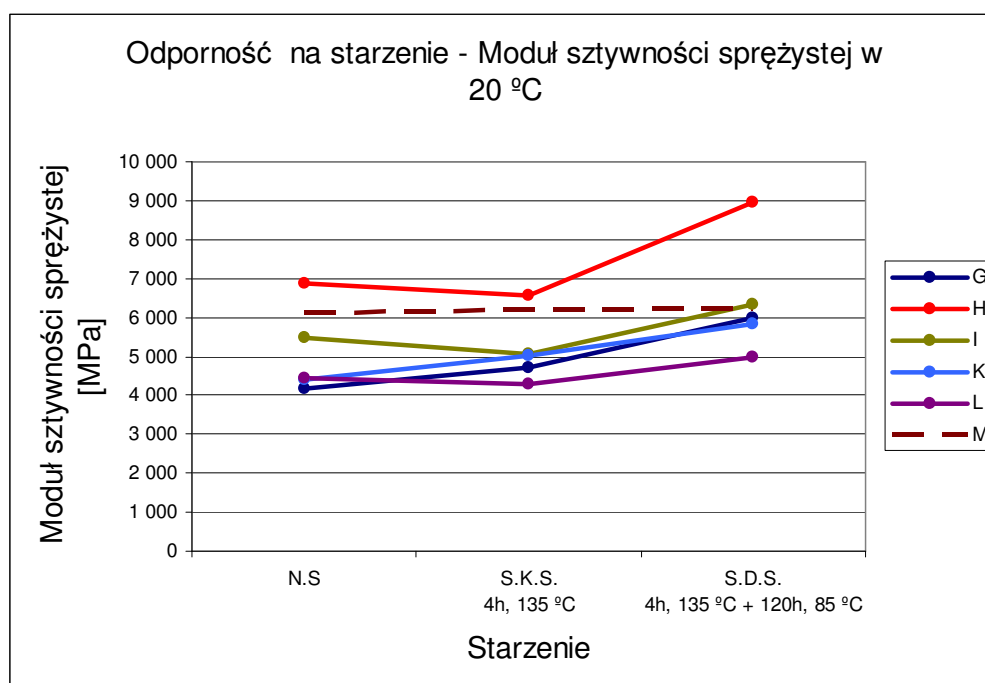
		Moduł sztywności sprężystej dla danego rodzaju asfaltu					
Rodzaj próbek	Temperatura badania modułu sztywności [°C]	G	H	I	K	L	M
N.S.	20	4 162	6 890	5 494	4 407	4 436	6 115
	10	8 224	11 068	10 114	8 657	7 965	7 663
	0	13 372	15 659	15 231	14 295	14 351	13 688
	-10	17 731	19 170	19 361	18 100	18 397	16 850
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	-
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

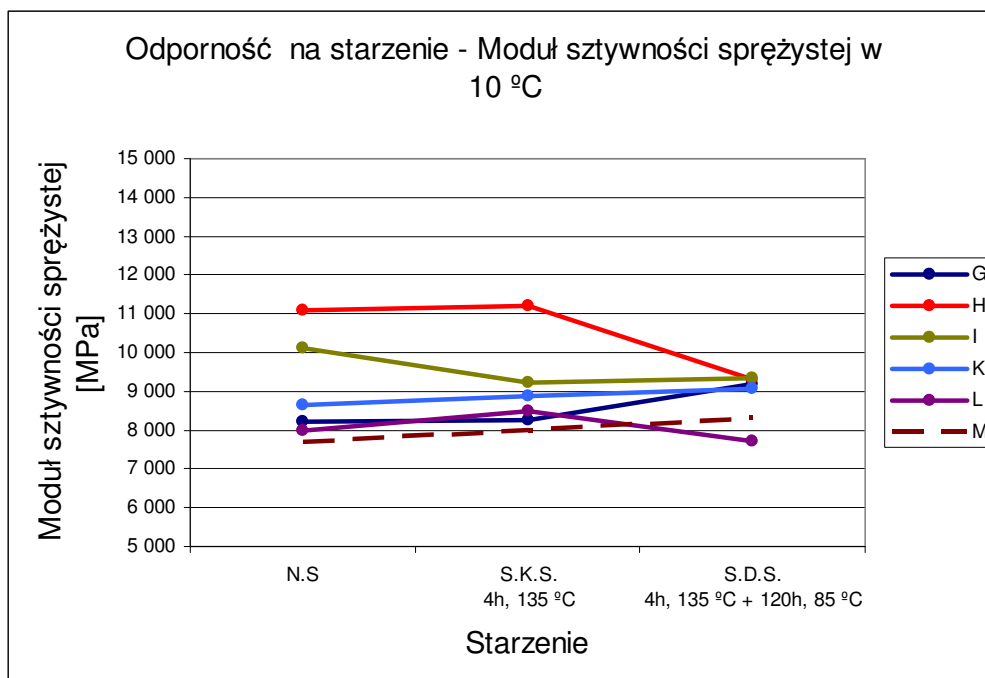
Tablica 22. Zestawienia średnich wartości wskaźników modułów sztywności sprężystej w różnych temperaturach dla próbek z betonu asfaltowego z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 (czystym i z dodatkami)

Rodzaj wskaźnika WS	Temperatura badania modułu sztywności [°C]	Wskaźnik WS dla danego rodzaju asfaltu					
		G	H	I	K	L	M
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	1,01
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	1,04	1,02	1,01	0,97	0,94	-
	-10	1,05	0,95	0,91	0,93	0,92	-

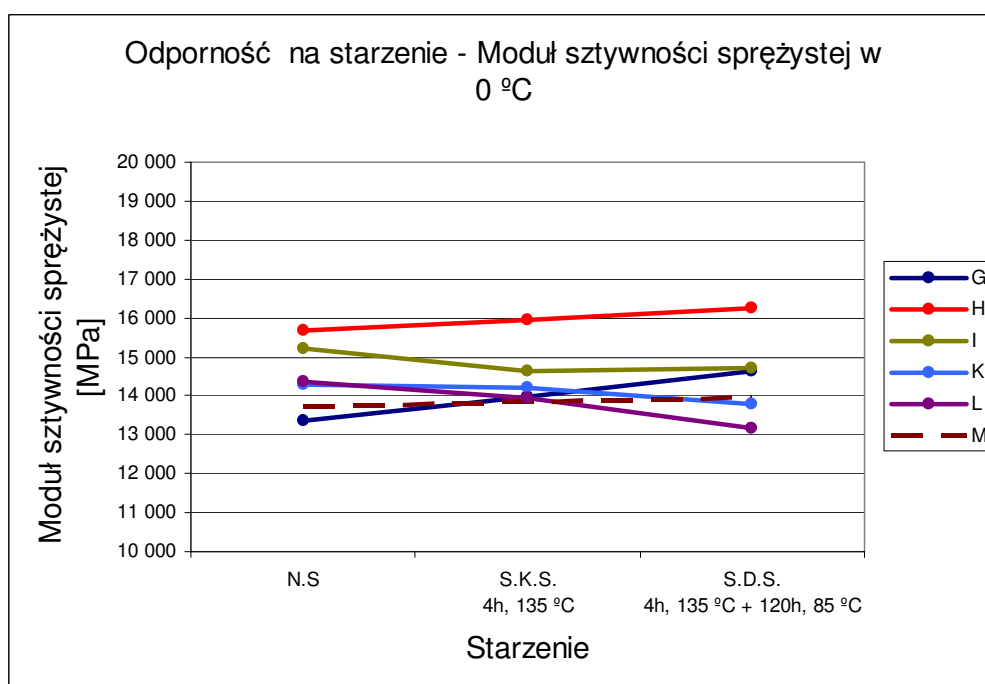
N.S – nie starzone S.K.S - starzenie krótkoterminowe w suszarce S.D.S- starzenie długoterminowe w suszarce



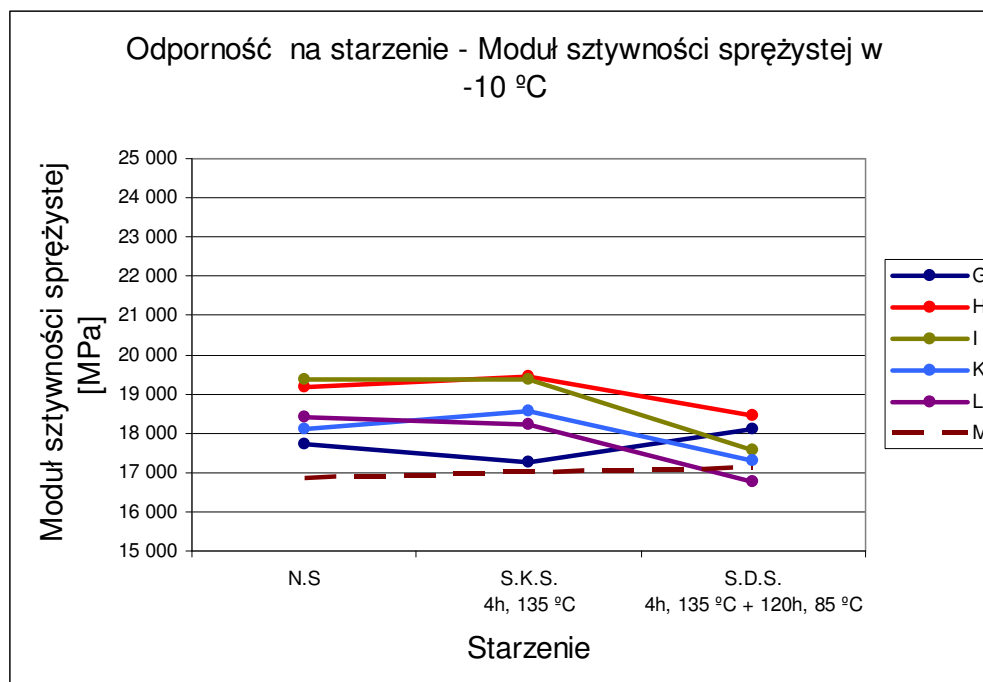
Rys. 33 – Zestawienie średnich wartości modułów sztywności próbek z betonu asfaltowego z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 (czystym i z dodatkami) w temperaturze 20 °C



Rys. 34 – Zestawienie średnich wartości modułów sztywności próbek z betonu asfaltowego z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 (czystym i z dodatkami) w temperaturze 10 °C



Rys. 35 – Zestawienie średnich wartości modułów sztywności próbek z betonu asfaltowego z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 (czystym i z dodatkami) w temperaturze 0 °C



Rys. 36 – Zestawienie średnich wartości modułów sztywności próbek z betonu asfaltowego z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 (czystym i z dodatkami) w temperaturze -10 °C

3.8.3 Analiza wyników

- W większości przypadków największe wartości modułów sztywności uzyskano dla asfaltów z dodatkiem Sasobitu (oznaczenie literowe B lub H) oraz Licomontu BS 100 (oznaczenie literowe C lub I), niezależnie od temperatury badania i rodzaju lepiszcza (asfalt zwykły lub modyfikowany). Wyniki te dobrze korelują się z badaniami lepiszcz wraz z dodatkami, które pokazały usztywniające cechy Sasobitu i Licomontu BS 100.
- Najmniejsze wartości modułów sztywności uzyskano dla mieszanek zawierających zeolit.
- Nie zaobserwowano znaczącego wpływu starzenia na zmiany parametrów betonów asfaltowych z poszczególnymi środkami. Wskaźniki WS dla mieszanek wyprodukowanych z dodatkami obniżającymi temperaturę nie przewyższały znacząco wskaźników WS dla mieszanek wyprodukowanych z czystym asfaltem zwykłym 50/70 lub modyfikowanym 45/80-55
- Zaobserwowano natomiast zauważalną różnicę pomiędzy wpływem starzenia na wartości modułów sztywności sprężystej w temperaturach 20 i 10°C – gdzie był on większy, niż w przypadku wpływu starzenia na wartości modułów sztywności sprężystej w temperaturach 0 i -10°C, gdzie był on mniej wyraźny. Zależność taka istniała zarówno dla asfaltów czystych, jak i z dodatkami obniżającymi temperaturę.
- W temperaturze -10°C stwierdzono po procesie starzenia długoterminowego zmniejszenie sztywności po starzeniu w przypadku asfaltu zwykłego 50/70 (czystego i ze wszystkimi dodatkami). Było to szczególnie widoczne przy dodatku Licomont BS100 i Rediset WMX, kiedy po starzeniu odnotowano

spadek modułu o około 30 – 50%. Jest to zjawisko wyjątkowe i wymaga dalszej analizy. Zwykle po starzeniu mieszanka usztywnia się i jej moduły rosną, a tutaj było odwrotnie. W przypadku asfaltów modyfikowanych polimerem SBS tego zjawiska nie stwierdzono.

- Uzyskane wyniki pokazują, że samo dodanie do lepiszcza środka mającego obniżyć temperaturę produkcji nie wpływa na wzrost efektu starzenia całej mieszanki mineralno-asfaltowej, jednakże niektóre środki pochodzenia organicznego (Sasobit, Licomont BS 100) mogą spowodować wzrost sztywności w ujęciu ogólnym. Podobne zależności zaobserwowano w trakcie badania samych lepiszcz.

3.9 Badania odporności na koleinowanie

Brak odporności mieszanek mineralno-asfaltowych na deformacje trwałe objawia się koleinami lepkoplastycznymi w nawierzchni. Mieszanki mineralno-asfaltowe odporne na deformacje trwałe muszą charakteryzować się odpowiednią sztywnością w podwyższonych temperaturach pracy nawierzchni.

3.9.1 Metodyka badania

Badanie odporności betonu asfaltowego na koleinowanie polegało na określeniu następujących cech w koleinomierzu kołowym:

a) brytyjskim wg normy BS598:

- głębokości koleiny po 1900 cyklach przejść koła w 60 °C,

b) europejskim wg normy PN-EN 12697-22:

- głębokości koleiny po 10000 cyklach przejść koła w 60 °C,
- proporcjonalnej głębokości koleiny w 60 °C,
- prędkości przyrostu koleiny w 60 °C.

3.9.1.1 Przygotowanie próbek

Mieszanke mineralno-asfaltową wytwarzano w mieszarce mechanicznej i nie poddawano starzeniu krótkoterminowemu. Mieszanki referencyjne A i G wytwarzano w temperaturze 160 °C, natomiast mieszanki z asfaltami z dodatkami środków obniżających temperaturę wytworzono w temperaturze 135 °C.

Do badania koleinowania w koleinomierzu kołowym wg normy BS598 i wg normy PN-EN 12697-22 wykonano próbki o wymiarach 305x305x40 mm, które zagęszczano w formie stalowej zautomatyzowaną zagęszczarką walcową (fotografia 21). W każdym badaniu koleinowania zbadano po 2 próbki dla każdego rodzaju betonu asfaltowego z danym dodatkiem (2 próbki wg normy BS598 i 2 próbki wg normy PN-EN 12697-22).



Fot. 21 – Zagęszczarka walcowa wykorzystana do wykonania próbek do koleinowania (na zdjęciu brak formy)

3.9.1.2 Opis badania

Koleinowanie w koleinomierzu brytyjskim wg BS598

Badanie koleinowania przeprowadzono w koleinomierzu *Wheel Tracker* produkcji angielskiej firmy Cooper Research Ltd. Badanie wykonano zgodnie z normą BS598 „Sampling and examination of bituminous mixtures for roads and other paved areas: Part 110, Methods of test for the determination of wheel tracking rate, 1996”. Badanie polegało na pomiarze głębokości koleiny, wywołanej przemieszczaniem się stalowego koła w gumowej osłonie o znormalizowanych wymiarach i obciążeniu, po tym samym śladzie. Warunki badania były następujące:

- | | |
|--|---------------|
| • Szerokość koła | 50 mm, |
| • Średnica zewnętrzna | 200 mm, |
| • Obciążenie kołem | 520 N, |
| • Częstotliwość | 21 cykli/min, |
| • Całkowita droga przejścia koła po próbce | 230 mm, |
| • Czas trwania badania | 45 min, |
| • Temperatura badania | 60°C. |



Fot. 22 – Widok próbki podczas badania koleinowania (w pracy badano próbki prostopadłościowe, inne niż fotografii)

Koleinowanie w koleinomierzu europejskim wg PN-EN 12697-22

Badanie koleinowania przeprowadzono w tym samym koleinomierzu produkcji angielskiej firmy Cooper Research Ltd. po dostosowaniu go do wymagań normy PN-EN 12697-22. Badanie wykonano zgodnie z normą PN-EN12697-22, metoda B, w powietrzu. Badanie polegało na pomiarze stopnia przyrostu koleiny oraz maksymalnej głębokości koleiny, wywołanej przemieszczaniem się stalowego koła w gumowej osłonie o znormalizowanych wymiarach i obciążeniu, po tym samym śladzie. Warunki badania były następujące:

- | | |
|--|---------------|
| • Szerokość koła | 50 mm, |
| • Średnica zewnętrzna | 200 mm, |
| • Obciążenie kołem | 700 N, |
| • Częstotliwość | 27 cykli/min, |
| • Całkowita droga przejścia koła po próbce | 230 mm, |
| • Czas trwania badania 10000 cykli | 370 minut, |
| • Temperatura badania | 60 °C. |

3.9.1.3 Kryteria oceny

Koleinowanie wg normy BS598

Specyfikacje brytyjskie z 1998 „*Specification for Highway Works (MCHW1) and Notes for Guidance on the Specification for Highway – Clause 943*” podają, że dla ruchu ciężkiego i bardzo ciężkiego maksymalna głębokość koleiny badanej w temperaturze 60 °C nie może być większa od 7,0 mm.

Koleinowanie wg normy PN-EN 12697-22, metoda B, w powietrzu

Wymagania Techniczne „WT-2. Nawierzchnie asfaltowe na drogach krajowych 2010” podają, że:

- dla betonu asfaltowego do warstwy ścieralnej dla ruchu ciężkiego KR3-KR4:

- prędkość przyrostu koleiny WTS_{AIR} nie powinna być większa niż 0,5 mm/1000 cykli,
- proporcjonalna głębokość koleiny PRD_{AIR} nie powinna być większa niż deklarowana przez producenta.
- dla betonu asfaltowego do warstwy ścieralnej dla ruchu ciężkiego KR5-KR6:
 - prędkość przyrostu koleiny WTS_{AIR} nie powinna być większa niż 0,3 mm/1000 cykli,
 - proporcjonalna głębokość koleiny PRD_{AIR} nie powinna być większa niż deklarowana przez producenta.

3.9.2 Wyniki badań

W tablicy 23 przedstawiono wyniki badania koleinowania (głębokość koleiny) według brytyjskiej normy BS598 dla mieszanki z asfaltem zwykłym 50/70. Graficznie przedstawiono je na rysunku 37.

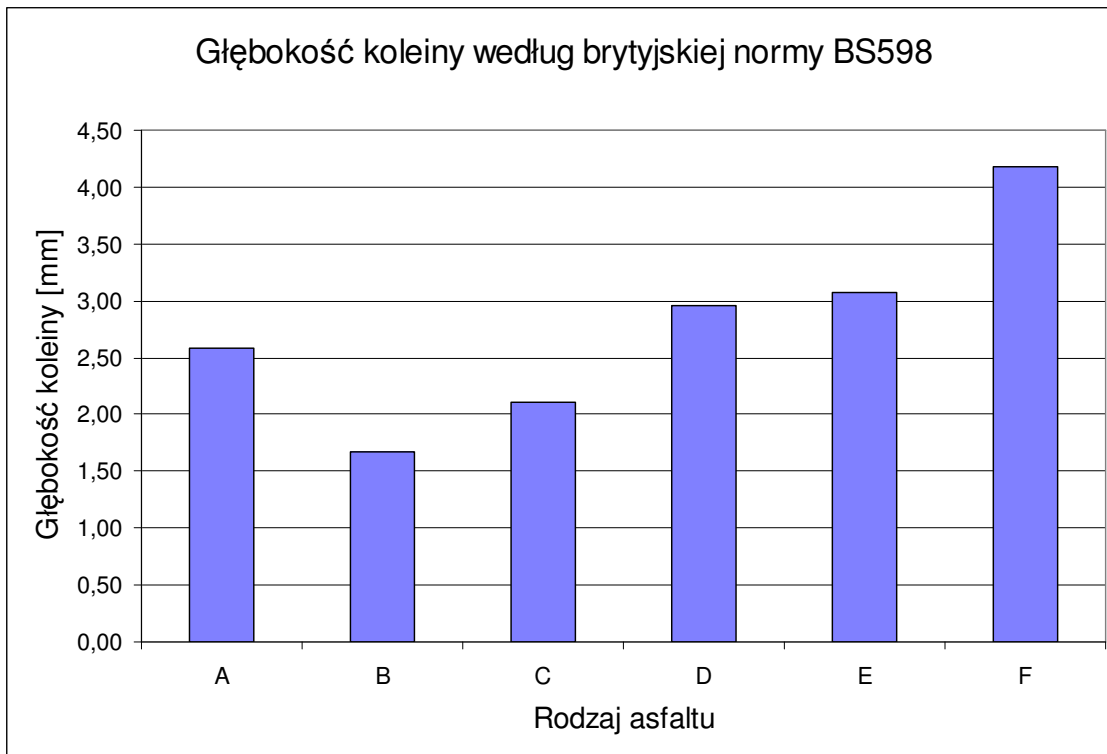
W tablicy 24 przedstawiono wyniki badania koleinowania (głębokość koleiny) według brytyjskiej normy BS598 dla mieszanki z asfaltem modyfikowanym 45/80-55. Graficznie przedstawiono je na rysunku 38.

W tablicy 25 przedstawiono wyniki badania koleinowania (głębokość koleiny, procentowa głębokość koleiny, prędkość przyrostu koleiny) według normy PN-EN 12697-22 dla mieszanki z asfaltem zwykłym 50/70. Graficznie przedstawiono je na rysunkach 39-41.

W tablicy 26 przedstawiono wyniki badania koleinowania (głębokość koleiny, procentowa głębokość koleiny, prędkość przyrostu koleiny) według normy PN-EN 12697-22 dla mieszanki z asfaltem modyfikowanym 45/80-55. Graficznie przedstawiono je na rysunkach 42-44.

Tablica 23. Wyniki badań z brytyjskiego koleinomierza kołowego w temperaturze 60 °C, wg BS598 dla próbek mieszanki z asfaltem zwykłym 50/70 (czystym i z dodatkami)

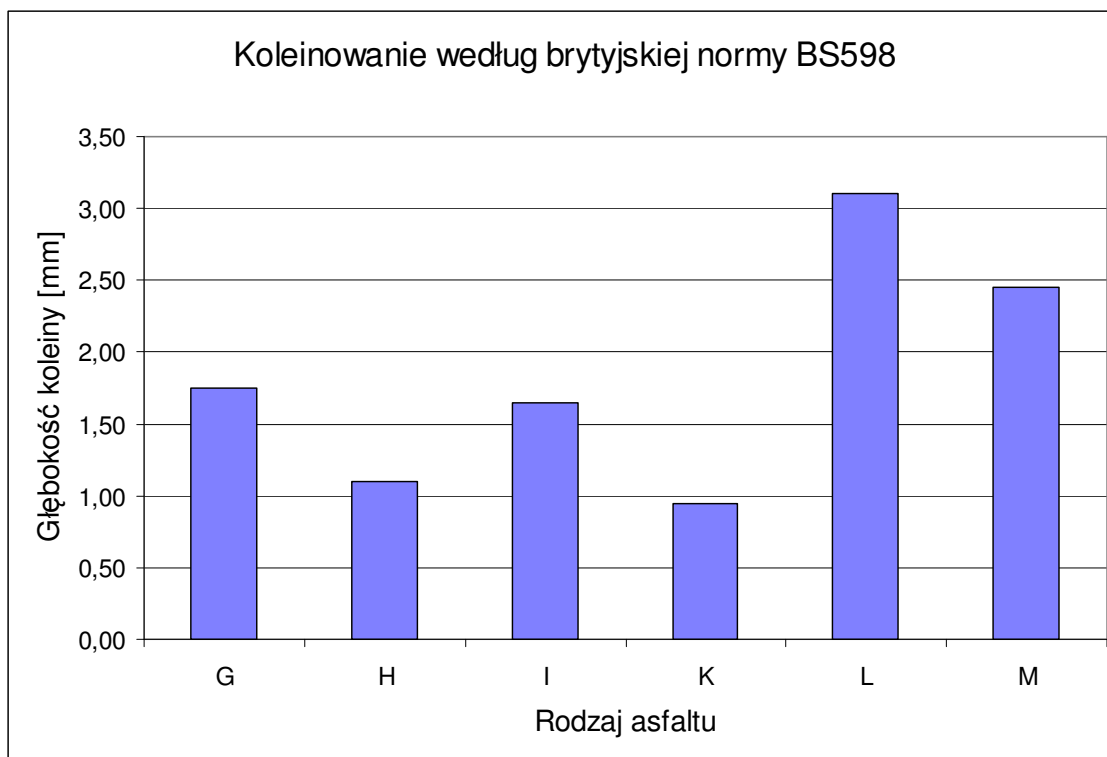
Asfalt	Nr próbki	Głębokość koleiny po 1900 przejściach [mm]	
		Wyniki	Średnia
A	A/1	2,56	2,59
	A/2	2,61	
B	B/1	1,65	1,68
	B/2	1,70	
C	C/1	2,21	2,12
	C/2	2,02	
D	D/1	2,75	2,96
	D/2	3,17	
E	E/1	2,79	3,07
	E/2	3,35	
F	F/1	4,11	4,18
	F/2	4,25	



Rys. 37 – Wyniki badań głębokości koleiny z brytyjskiego koleinomierza kołowego dla próbek mieszanki z asfaltem zwykłym 50/70, temperatura 60 °C, wg BS598

Tablica 24. Wyniki badań z brytyjskiego koleinomierza kołowego w temperaturze 60 °C, wg BS598 dla próbek z mieszanki z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 (czystym i z dodatkami)

Asfalt	Nr próbki	Głębokość koleiny po 1900 przejściach [mm]	
		Wyniki	Średnia
G	G/1	1,80	1,75
	G/2	1,70	
H	H/1	1,10	1,10
	H/2	1,10	
I	I/1	1,40	1,65
	I/2	1,90	
K	K/1	0,42	0,95
	K/2	1,47	
L	L/1	3,00	3,10
	L/2	3,20	
M	M/1	2,50	2,45
	M/2	2,40	

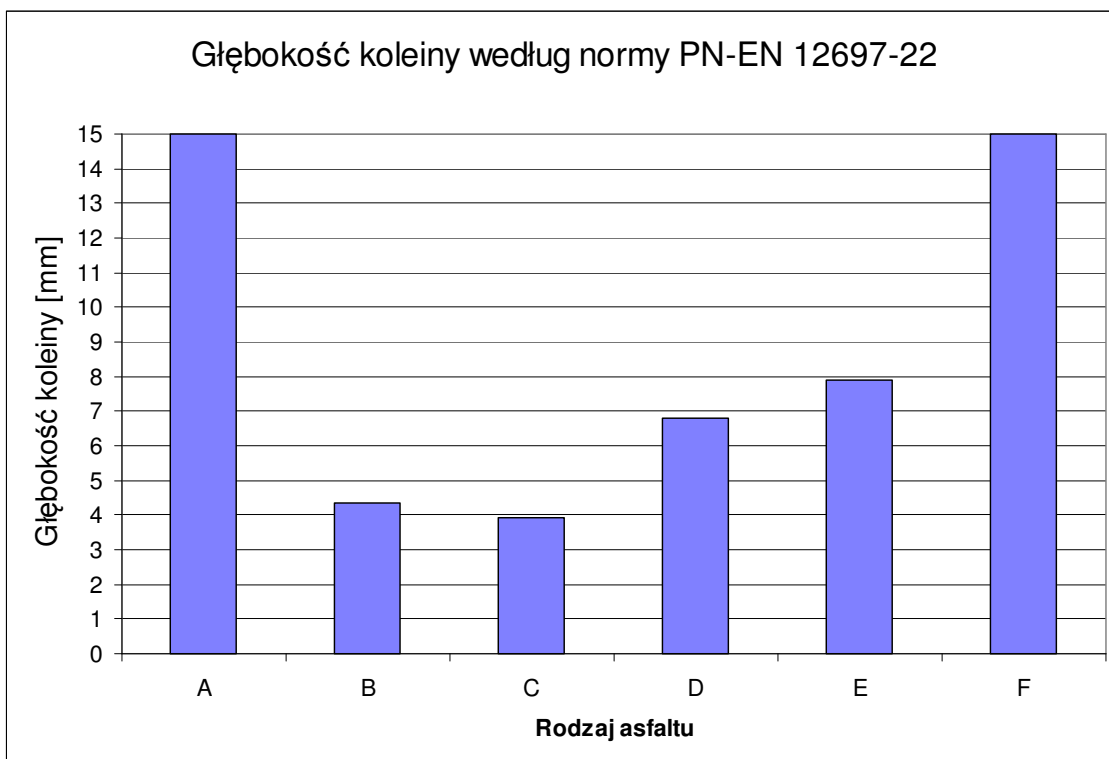


Rys. 38 – Wyniki badań głębokości koleiny z brytyjskiego koleinomierza kołowego dla próbek mieszanki z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 (czystym i z dodatkami), temperatura 60 °C, wg BS598

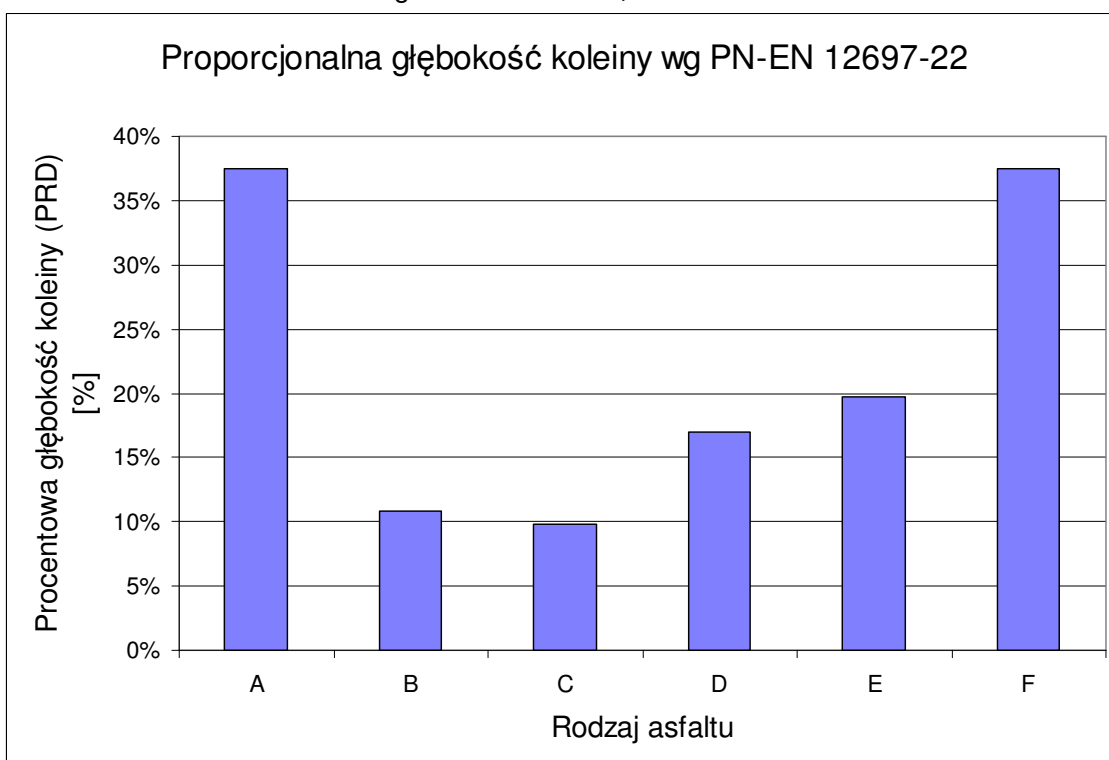
Tablica 25. Wyniki badań z europejskiego koleinomierza kołowego dla próbek mieszanki z asfaltem zwykłym 50/70 (czystym i z dodatkami), temperatura 60 °C, wg PN-EN12697-22, metoda B

Asfalt	Nr próbki	Głębokość koleiny RD ₁₀₀₀₀ [mm]		Prędkość przyrostu koleiny WTS _{AIR} [mm/1000/p]		Proporcjonalna głębokość koleiny PRD _{AIR} [%]	
		Wyniki	Średnia	Wyniki	Średnia	Wyniki	Średnia
A	A/3	15,01	15,01	0,88	0,83	38%	38%
	A/4	15,00		0,78		38%	
B	B/3	4,82	4,34	0,14	0,11	12%	11%
	B/4	3,85		0,08		10%	
C	C/3	4,29	3,92	0,13	0,10	11%	10%
	C/4	3,55		0,06		9%	
D	D/3	6,56	6,80	0,22	0,22	16%	17%
	D/4	7,04		*		18%	
E	E/3	5,70	7,91	0,19	0,28	14%	20%
	E/6	10,11		0,36		25%	
F	F/3	15,00	15,01	1,90	1,89	38%	38%
	F/4	15,01		1,88		38%	

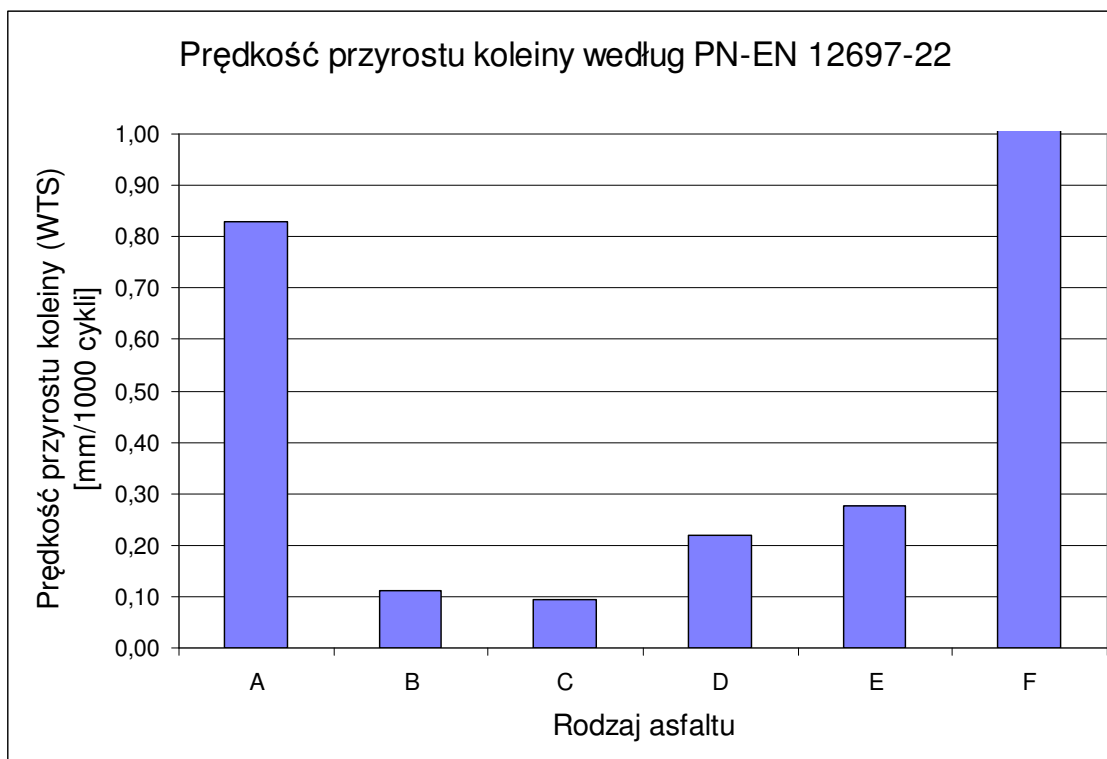
* awaria sprzętu



Rys. 39 – Wyniki badań głębokości koleiny z europejskiego koleinomierza kołowego dla próbek mieszanki z asfaltem zwykłym 50/70, temperatura 60°C, wg PN-EN12697-22, metoda B



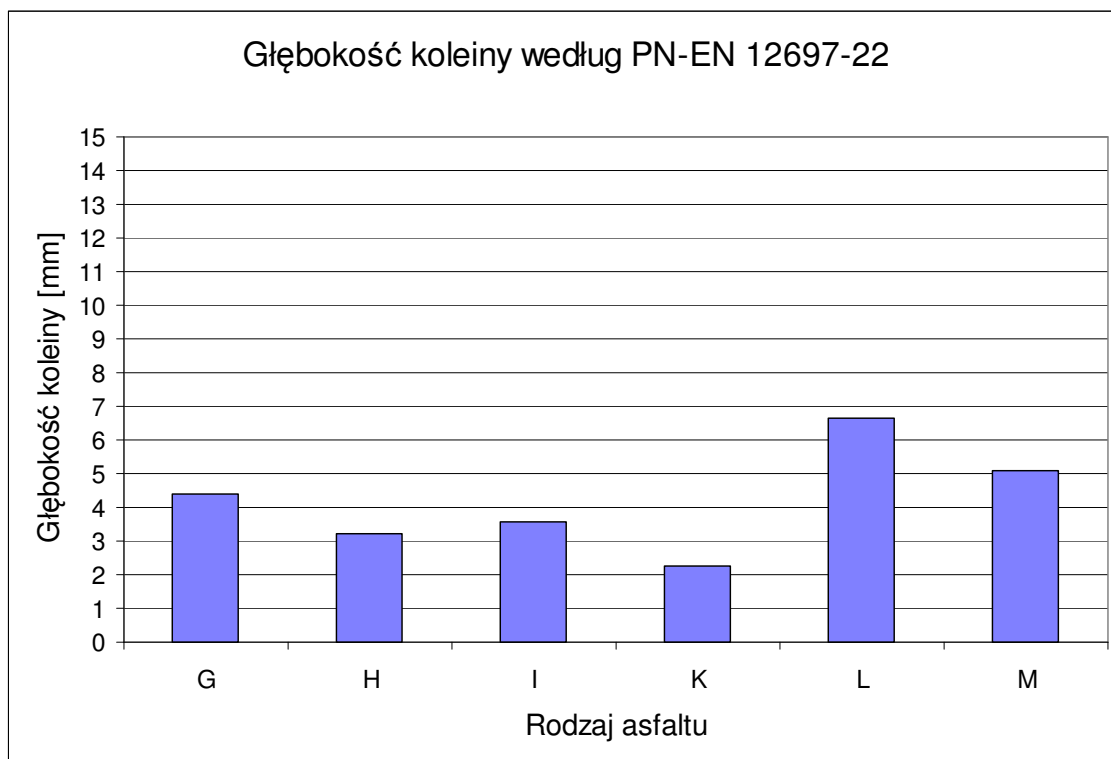
Rys. 40 – Wyniki badań procentowej głębokości koleiny z europejskiego koleinomierza kołowego dla próbek mieszanki z asfaltem zwykłym 50/70 (czystym i z dodatkami), temperatura 60°C, wg PN-EN12697-22, metoda B



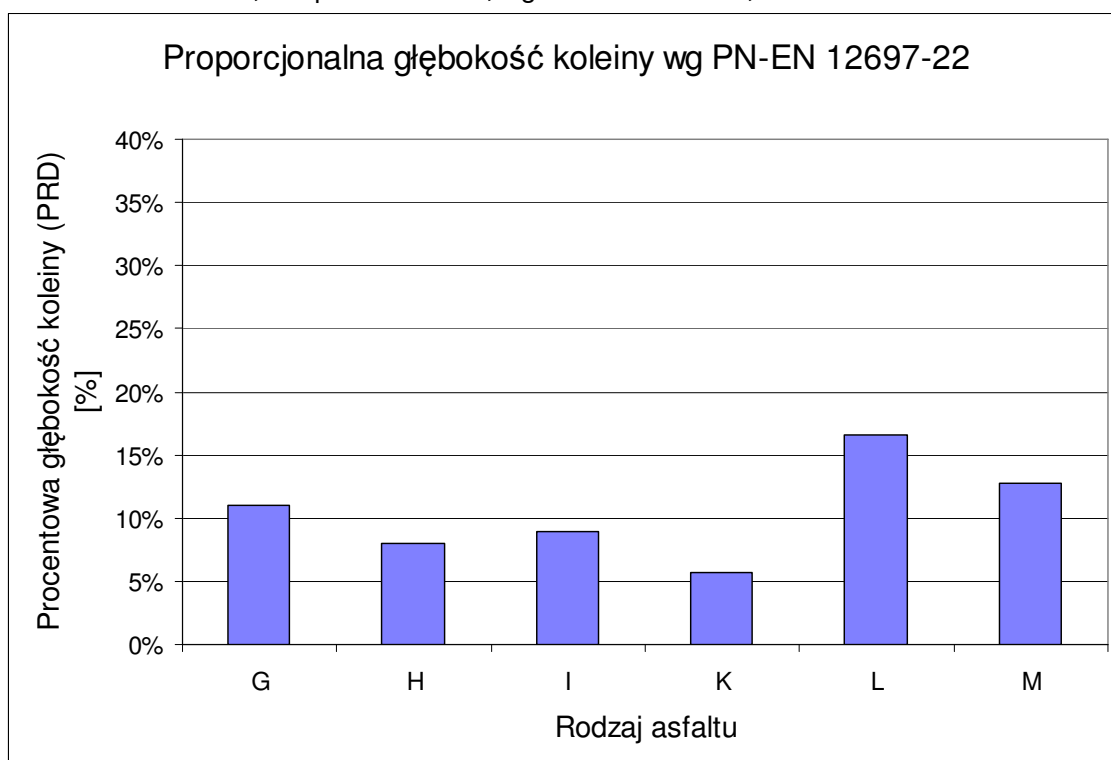
Rys. 41 – Wyniki badań prędkości przyrostu koleiny z europejskiego koleinomierza kołowego dla próbek mieszanki z asfaltem zwykłym 50/70 (czystym i z dodatkami), temperatura 60°C, wg PN-EN12697-22, metoda B

Tablica 26. Wyniki badań z europejskiego koleinomierza kołowego dla próbek mieszanki z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 (czystym i z dodatkami), temperatura 60°C, wg PN-EN12697-22, metoda B

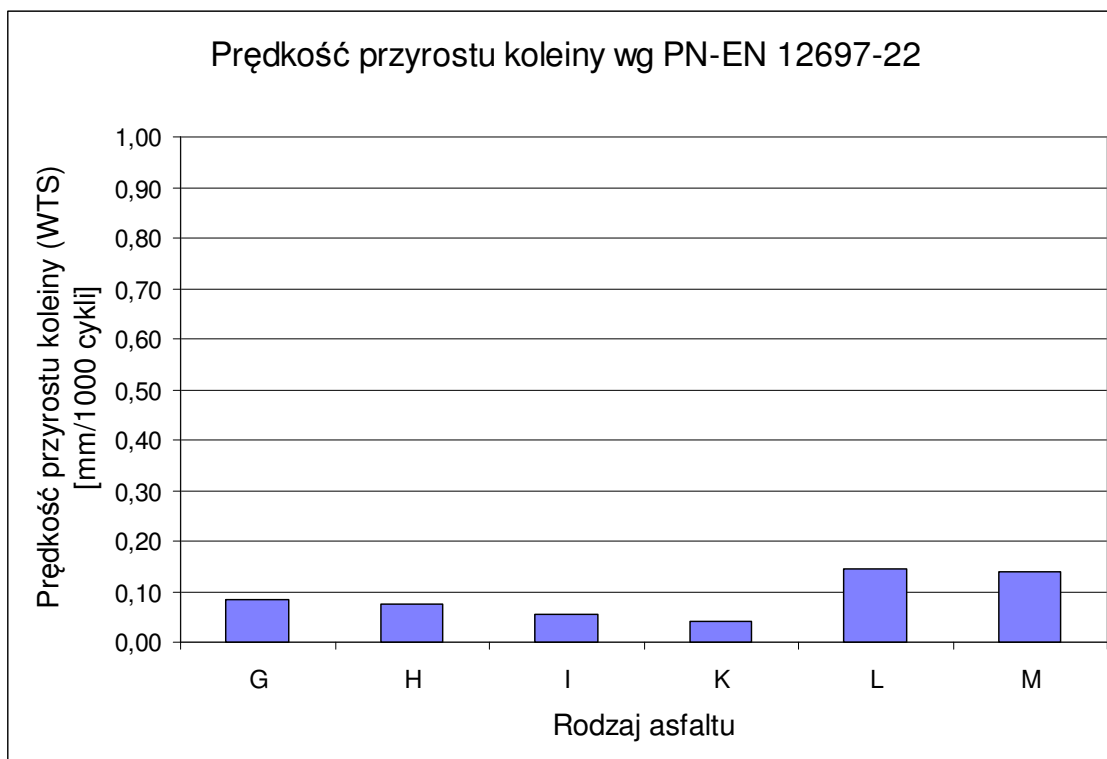
Asfalt	Nr próbki	Głębokość koleiny RD_{10000} [mm]		Prędkość przyrostu koleiny WTS_{AIR} [mm/1000/p]		Proporcjonalna głębokość koleiny PRD_{AIR} [%]	
		Wyniki	Średnia	Wyniki	Średnia	Wyniki	Średnia
G	G/3	4,40	4,40	0,11	0,09	11%	11%
	G/4	4,40		0,06		11%	
H	H/3	3,40	3,20	0,08	0,08	9%	8%
	H/4	3,00		0,07		8%	
I	I/3	3,60	3,55	0,06	0,06	9%	9%
	I/4	3,50		0,05		9%	
K	K/3	1,42	2,26	0,04	0,06	4%	6%
	K/4	3,10		0,07		8%	
L	L/3	7,60	6,65	0,17	0,15	19%	17%
	L/4	5,70		0,12		14%	
M	M/3	5,55	5,10	0,16	0,14	14%	13%
	M/4	4,64		0,12		12%	



Rys. 42 – Wyniki badań głębokości koleiny z europejskiego koleinomierza kołowego dla próbek mieszanki z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 (czystym i z dodatkami), temperatura 60°C, wg PN-EN12697-22, metoda B



Rys. 43 – Wyniki badań procentowej głębokości koleiny z europejskiego koleinomierza kołowego dla próbek mieszanki z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 (czystym i z dodatkami), temperatura 60°C, wg PN-EN12697-22, metoda B



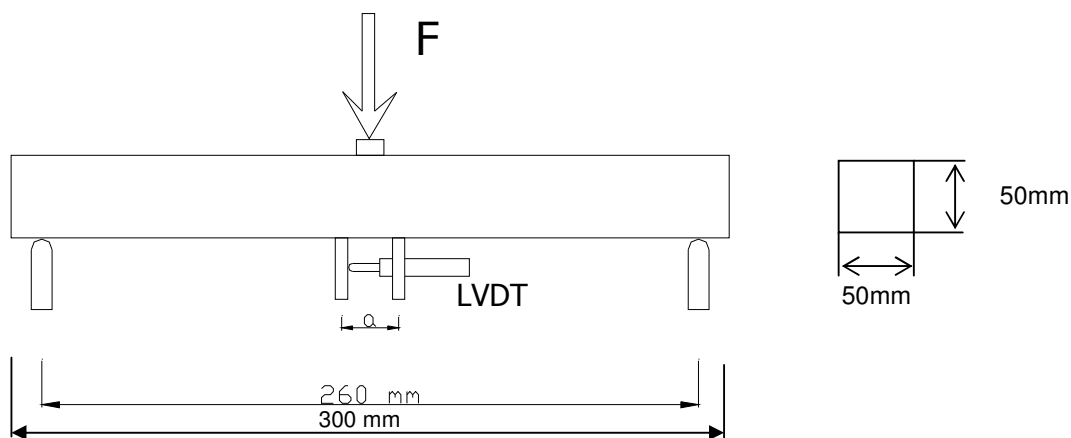
Rys. 44 – Wyniki badań prędkości przyrostu koleiny z europejskiego koleinomierza kołowego dla próbek mieszanki z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 (czystym i z dodatkami), temperatura 60 °C, wg PN-EN12697-22, metoda B

3.9.3 Analiza wyników

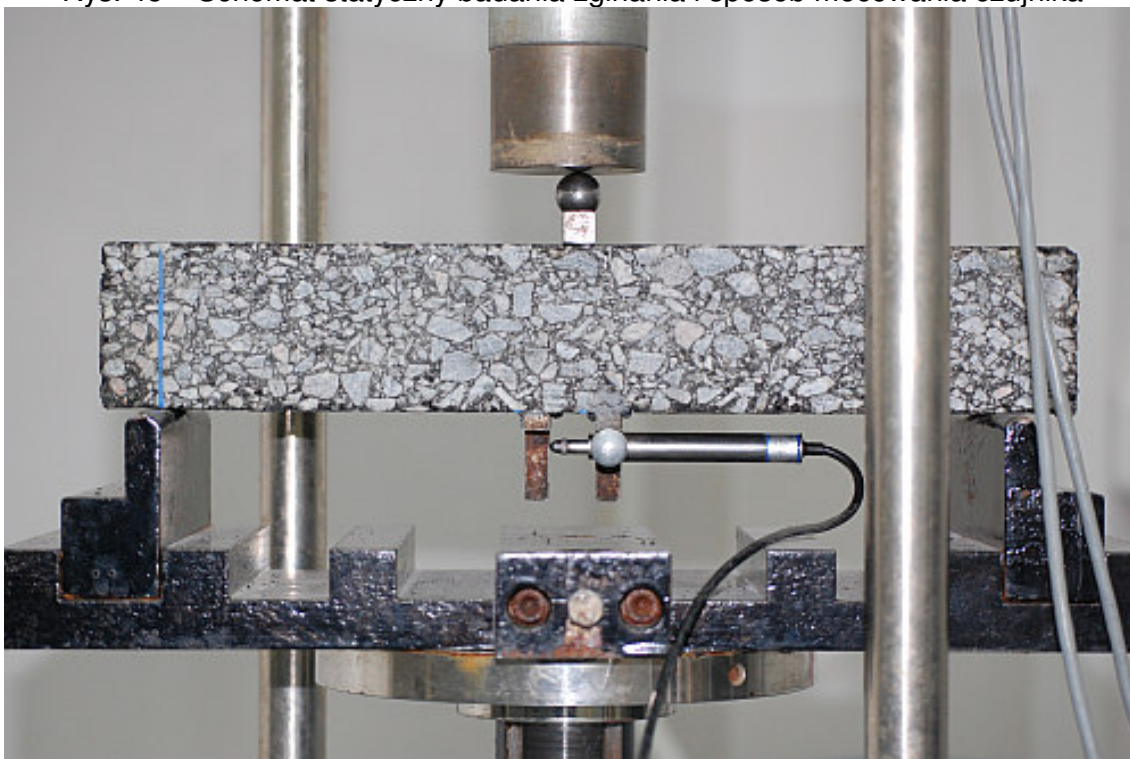
- Wyniki badań koleinowania (dla obu metod badawczych) pokazują wyraźny pozytywny wpływ środków z grupy wosków (Sasobit) oraz mieszaniny amidów kwasów tłuszczowych (Licomont BS 100) na odporność na deformacje trwałe. Wpływ ten jest szczególnie widoczny w przypadku mieszanek z asfaltem zwykłym.
- Dla 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, 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.
- 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.

3.10 Określenie odporności na spękania niskotemperaturowe

Określenie odporności na spękania niskotemperaturowe nie jest w Polsce badaniem znormalizowanym. Badanie to przeprowadzono według procedury opracowanej na Politechnice Gdańskiej, polegającej na zginaniu belki wolnopodpartej, obciążonej siłą skupioną w środku rozpiętości, o wymiarach 50x50x300 mm, w prasie ze stałym przesuwem tłoka wynoszącym 1,25 mm/min. Rejestruje się zależność pomiędzy przykładaną siłą a wywoływanym odkształceniem próbki. Schemat urządzenia przedstawiono rysunku 45, zaś widok ogólny próbki w trakcie badania na fotografii 23.



Rys. 45 – Schemat statyczny badania zginania i sposób mocowania czujnika



Fot. 23 – Widok próbki z mieszanki mineralno-asfaltowej w trakcie badania trójpunktowego zginania

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów określono:

- Odształcenie graniczne,
- Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu.

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

$$\varepsilon_{\text{gran}} = \frac{p_{\text{max}}}{e} \times \frac{c}{a}$$

$$R_{\text{rz}} = \frac{3}{2} \frac{F_{\text{max}} l}{b h^2}$$

gdzie:

- $\varepsilon_{\text{gran}}$ - 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 belki w środku jej rozpiętości [MPa].

Ocena badanych betonów asfaltowych przeprowadzona została w oparciu o odkształcenie graniczne i wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu.

W każdej serii badano po 10 próbek, odrzucając wyniki niemiarodajne (np. pęknięcie belki poza bazą pomiarową czujnika LVDT).

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

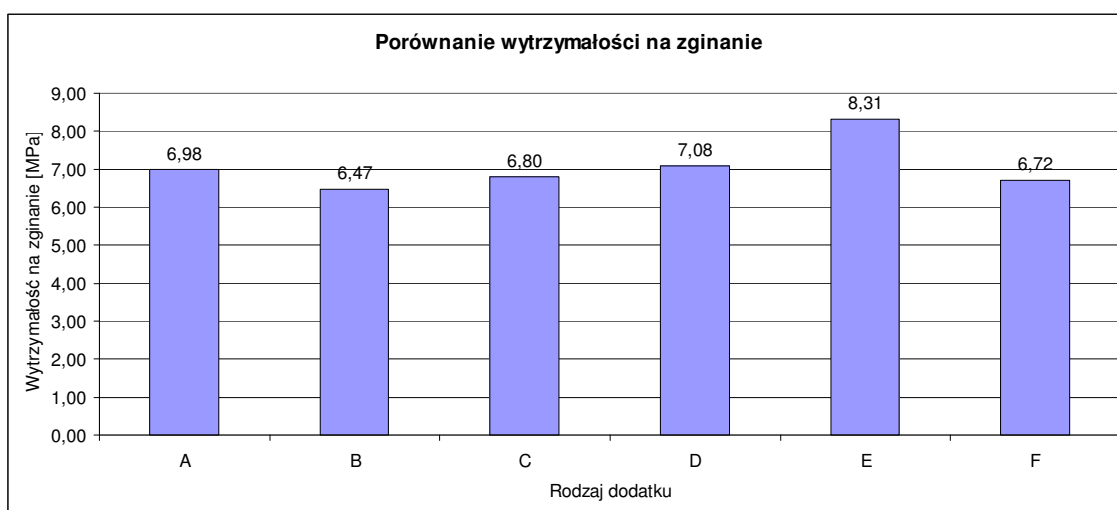
Wyniki badań wytrzymałości na zginanie przedstawiono w tablicach 27-28 oraz na rysunkach 46-49

Tablica 27. Wyniki badań trójpunktowego zginania betonu asfaltowego z asfaltem zwykłym 50/70 (czystym i z dodatkami)

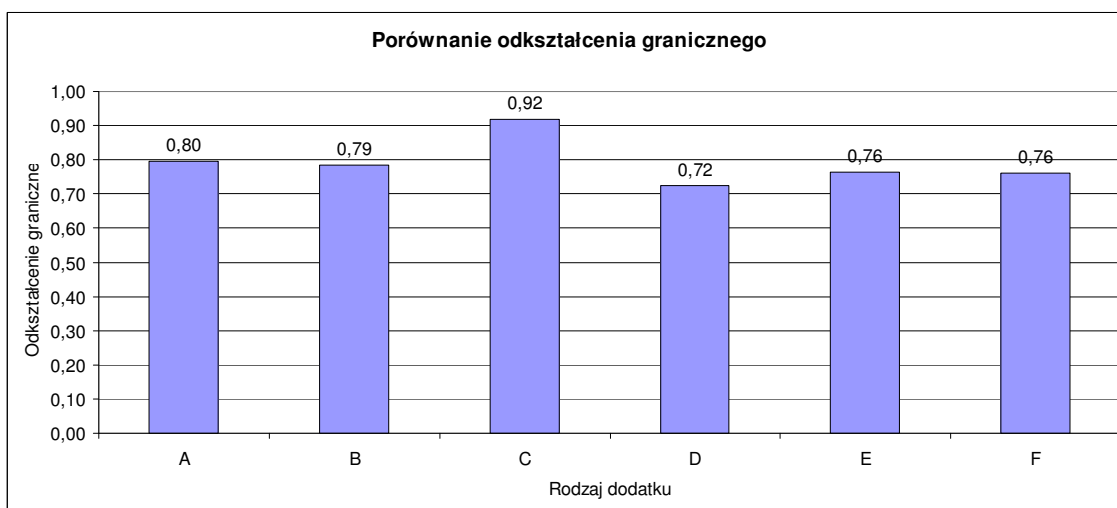
Rodzaj mieszanki	Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu [MPa]	Odształcenie graniczne [%]
A	6,98	0,80
B	6,47	0,79
C	6,80	0,92
D	7,08	0,72
E	8,31	0,76
F	6,72	0,76

Tablica 28. Wyniki badań trójpunktowego zginania betonu asfaltowego z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 (czystym i z dodatkami)

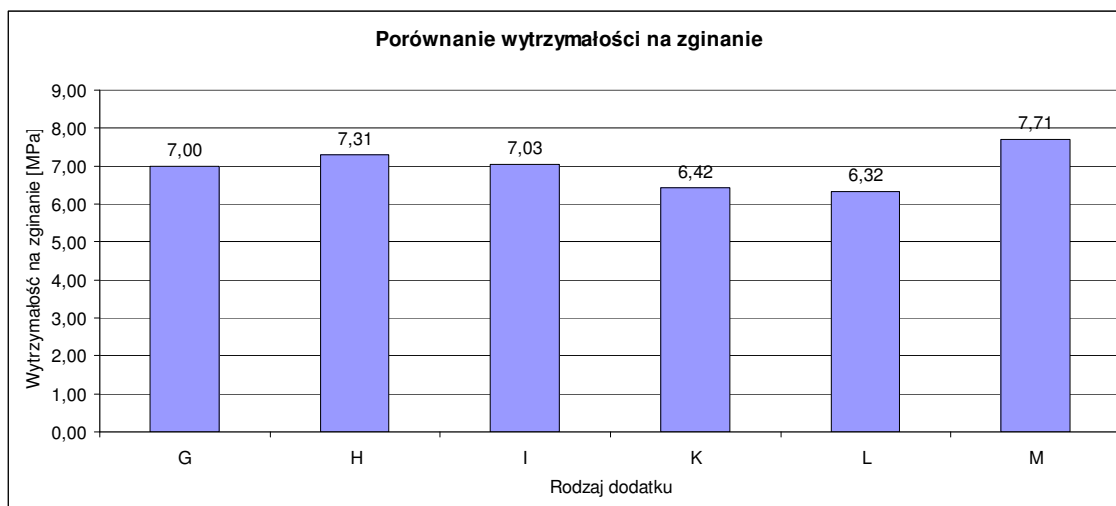
Rodzaj mieszanki	Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu [MPa]	Odkształcenie graniczne [%]
G	7,00	0,87
H	7,31	0,80
I	7,03	0,81
K	6,42	0,72
L	6,32	0,83
M	7,71	1,11



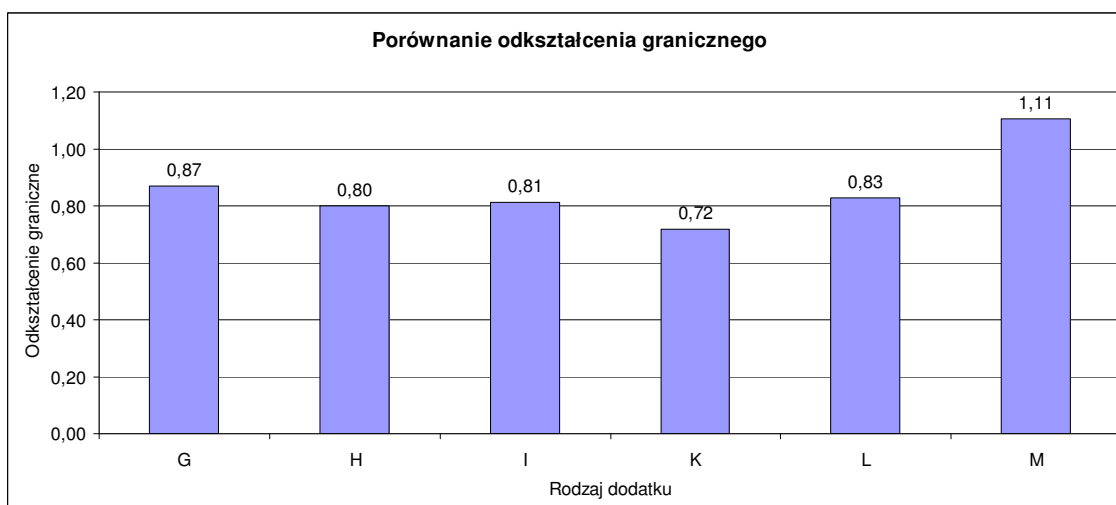
Rys. 46 – Porównanie wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu dla próbek wytworzonych z asfaltem zwykłym 50/70 (czystym i z dodatkami)



Rys. 47 – Porównanie odkształcenia granicznego przy zginaniu dla próbek wytworzonych z asfaltem zwykłym 50/70 (czystym i z dodatkami)



Rys. 48 – Porównanie wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu dla próbek wytworzonych z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 (czystym i z dodatkami)



Rys. 49 – Porównanie odkształcenia granicznego przy zginaniu dla próbek wytworzonych z asfaltem modyfikowanym 45/80-55 (czystym i z dodatkami)

Wnioski z przeprowadzonych badań:

- W przypadku mieszanek z asfaltem zwykłym 50/70 żaden z dodatków nie spowodował znaczącego spadku wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu lub odkształcenia granicznego w stosunku do mieszanki referencyjnej z czystym asfaltem zwykłym 50/70. Odnotowane różnice w większości mieszczą się w granicach błędu pomiaru. Jedynie w przypadku mieszanki z dodatkiem środka Ceca Base RT (oznaczenie literą E) uzyskano nieco większą wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu, natomiast dla środka Licomont BS 100 (oznaczenie literą C) uzyskano największą wartość średniego odkształcenia granicznego.

- 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 (oznaczenie literą M).
- 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, jednakże temat ten wymaga dalszych badań i weryfikacji w rzeczywistych warunkach terenowych.

3.11 Wnioski ogólne z programu badań laboratoryjnych

- Zjawisko łatwiejszego otaczania ziaren kruszywa przez asfalty z dodatkami oraz poprawa urabialności gotowej mieszanki pozwalająca na obniżenie temperatury produkcji i wbudowania jest złożone i nie związane wprost z lepkością asfaltu.
- 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.
- Należy jednak pamiętać, że 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, ale z drugiej jednak strony nadmierne przesztywnienie lepiszcza (a w konsekwencji całej mieszanki mineralno-asfaltowej) może skutkować przedwczesnymi spękaniami nawierzchni o charakterze niskotemperaturowym. 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.
- Środki oddziałujące powierzchniowo-czynnie, takie jak Rediset WMX oraz Ceca Base RT w znacznie mniejszym stopniu, lub w ogóle nie wpływają na zachowanie samego lepiszcza, co w połączeniu z mniejszą temperaturą produkcji mieszanek z nimi wykonanymi (a tym samym niższym starzeniem technologicznym) skutkowało nieco niższymi wartościami parametrów takimi jak stabilność czy odporność na koleinowanie.
- 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.

4. BADANIA TERENOWE – ODCINEK DOŚWIADCZALNY

4.1. 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.

4.2 Zakres badań terenowych

Podczas prac przygotowawczych przed przystąpieniem do wykonywania odcinka doświadczalnego konieczne było zweryfikowanie recepty mieszanki mineralno-asfaltowej przeznaczonej do wbudowania.

W trakcie samego wykonywania odcinka doświadczalnego prowadzono stały nadzór nad produkcją i wbudowywaniem mieszanek oraz pobrano niezbędną ilość materiału do przeprowadzenia następującego zakresu badań laboratoryjnych:

- odporność na działanie wody i mrozu mieszanki wytworzonej w wytwórni,
- odporność na starzenie,
- odporność na koleinowanie,
- odporność na spękania niskotemperaturowe.

Ponadto przyjęto, że po wykonaniu nawierzchni zostaną przeprowadzone następujące badania terenowe:

- określenie zawartości wolnych przestrzeni i wskaźników zagęszczeń,
- określenie równości poprzecznej i podłużnej nawierzchni,
- przeprowadzona zostanie ocena wizualna, powtarzana następnie w cyklicznych odstępach.

4.3 Geneza wyboru lokalizacji odcinka doświadczalnego oraz czynności wstępne

Podobnie jak w przypadku badań laboratoryjnych uznano, że najlepszym rozwiązaniem będzie zastosowanie doświadczalne mieszanek 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). 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.

Powyższe ustalenia określiły jednoznacznie pozostałe warunki i okoliczności wykonania odcinka, tj.:

- Wykonawcę – firmę BUDIMEX SA, realizującą przebudowę całego Węzła Karczemki,
- Wytwórnę mas bitumicznych – należącą do firmy Masfalt Sp. z o.o. i położoną w miejscowości Stara Piła k/Gdańska, realizującą dostawy mieszanek 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 oraz badania równości poprzecznej i podłużnej).

Z uwagi na fakt, iż recepta tradycyjnej mieszanki mastyksu grysowo-asfaltowego SMA przeznaczonej do wbudowania na obszarze całego przebudowywanego Węzła Karczemki były już zaprojektowane (również przez Laboratorium Badań Drogowych Politechniki Gdańskiej) zdecydowano jedynie o jej niewielkiej modyfikacji, polegającej tylko na wprowadzeniu do składu dodatków obniżających temperaturę, bez zmian ilościowych kruszywa czy zawartości lepiszcza. Następnie wykonano badania typu w zakresie przewidzianym przez szczegółową specyfikację techniczną obowiązującą na kontrakcie przebudowy Węzła Karczemki. Po uzyskaniu pozytywnych wyników potwierdzających możliwość zastosowania dodatków opracowano formalnie zmodyfikowane recepty i przekazano je wraz z programem odcinka doświadczalnego do zatwierdzenia wykonawcy, tj. firmie BUDIMEX S.A.

Jednocześnie prowadzono rozmowy z firmą Masfalt Sp. z o.o. określające warunki techniczne produkcji mieszanek z dodatkami obniżającymi temperaturę, mając na względzie możliwości techniczne wytwórni. Na tym samym etapie uznano, że z powodu wielkości powierzchni przydzielonego obszaru jezdni na odcinek doświadczalny oraz spodziewane trudności przy dozowaniu niektórych dodatków obniżających temperaturę nie będzie możliwe wyprodukowanie i wbudowanie mieszanek ze wszystkimi dodatkami sprawdzanymi na etapie badań laboratoryjnych. Biorąc pod uwagę wymienione uwarunkowania do realizacji 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),
- Ceca Base RT w postaci płynnej, dodawany ręcznie do wagi asfaltu przed zadozowaniem lepiszcza,

- Rediset WMX w postaci stałych granulek, które planowano zadozować kilkanaście godzin przed rozpoczęciem produkcji wprost do zbiornika asfaltu na wytwórni.

Następnie podjęto rozmowy z przedstawicielami handlowymi wybranych środków w celu sprowadzenia ich na wytwórnię. Łącznie pozyskano następujące ilości poszczególnych dodatków, wystarczające na wyprodukowanie każdorazowo ok. 300 ton mieszanki, 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.

Jednocześnie przyjęto – na podstawie informacji podanych w dostępnej literaturze – że w przypadku 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.

W całości działań uwzględniono również konieczność pobrania próbek oraz oznaczenia odcinków, na których zostanie wbudowana normalna mieszanka SMA, będąca referencyjną mieszanką porównawczą.

4.3 Wykonanie odcinka doświadczalnego

Prace nad odcinkiem doświadczalny trwały w następujących dniach:

- 22 listopad 2011 r. – wbudowanie mieszanki 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 nastąpiła pewna zmiana w lokalizacji poszczególnych fragmentów z poszczególnymi środkami w stosunku do pierwotnie zakładanych. Finalne umiejscowienie mieszanki z danym środkiem pokazano na załączonych do raportu planie orientacyjnym i sytuacyjnym.

Niestety przed wykonaniem ostatniego fragmentu odcinka – ze środkiem Rediset WMX – okazało się, że nie ma możliwości uprzedniego zadozowania dodatku do zbiornika asfaltu na wytwórni (co planowano wykonać w godzinach wieczornych 23 listopada 2011 r.) z uwagi na brak odpowiedniego poziomu lepiszcza w zbiorniku asfaltu na wytwórni, wynikającego z nieco większej niż zakładano produkcji mieszanki w ciągu poprzedzających dni. Zdecydowano się zatem na próbę dozowania dodatku Rediset wprost do wagi asfaltu, podobnie jak uczyniono to z dodatkiem płynnym Ceca Base RT. 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.

Na fotografiach 24-29 przedstawiono prace przy wykonywaniu odcinka doświadczalnego.



Fot. 24 – Pierwszy załadunek samochodu ciężarowego mieszanką SMA wyprodukowaną ze środkiem Ceca Base RT



Fot. 25 – Widok mieszanki SMA wyprodukowanej ze środkiem Ceca Base RT po załadunku do skrzyni samochodu ciężarowego



Fot. 26 – Rozkładanie mieszanki SMA wyprodukowanej ze środkiem Ceca Base RT równocześnie przez dwie rozkładarki



Fot. 27 – Przygotowane do pobrania próbek mieszanki foremki stalowe



Fot. 28 – Jeden z pomiarów temperatury mieszanki w trakcie układania



Fot. 29 – Rozkładanie mieszanki SMA wyprodukowanej ze środkiem ViaTop Plus CT 40 równocześnie przez dwie rozkładarki

W trakcie układania mieszanek panowały następujące warunki otoczenia:

- 22 listopada – temperatura powietrza 7°C, temperatura podłoża 4°C,

- 23 listopada – temperatura powietrza 4°C, temperatura podłoża 3°C,
- 24 listopada – temperatura powietrza 2°C, temperatura podłoża 3°C.

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

4.4 Badania nawierzchni i mieszanek z odcinka doświadczalnego

Z powodu wykonania odcinka doświadczalnego tuż przed terminem oddania sprawozdania końcowego z programu badawczego nie zdążono wykonać badań i opracować wyników. Zostaną one przekazane aneksem do niniejszego sprawozdania w najszybszym terminie po ich wykonaniu, jak również opracowane na podstawie uzyskanych doświadczeń wytyczne dotyczące produkcji i wbudowywania.

5. PODSUMOWANIE

W trakcie programu badawczego wykonano studia literatury, szczegółowe badania laboratoryjne 5 dodatków obniżających temperaturę produkcji mieszanek mineralno-asfaltowych oraz odcinek doświadczalny z wybranymi 3 dodatkami.

Żaden z badanych laboratoryjnie dodatków nie spowodował pogorszenia właściwości mieszanek. Wydaje się, że w początkowym okresie wdrażania technologii mieszanek mineralno-asfaltowych o obniżonej temperaturze produkcji i wbudowania przewagę będą posiadały dodatki mogące być niezawodnie i dokładnie dozowane w trakcie wytwarzania mieszanek bez ponoszenia nakładów finansowych. W chwili obecnej cechy takie posiadają środki płynne – np. Ceca Base RT – mogące być dozowane instalacją płynnych środków adhezyjnych lub dodatki w postaci połączonej z włóknem celulozowym-stabilizatorem mastyksu (ale tylko dla warstw ścieralnych SMA) – np. Viatop Plus CT 40. Zastosowanie na pełną skalę środków w postaci granulek, proszku bądź płatków – np. Sasobit, Licomont BS 100, Rediset WMX lub Zeolit – wymaga zakupu specjalnych dozatorów bądź modyfikacji każdorazowo całej ilości asfaltu występującego w zbiorniku wytwórni, co przy (przynajmniej początkowo) niewielkim procentowym udziale mieszanek „na ciepło” w sumarycznej produkcji mieszanek wszystkich rodzajów wydaje się być nieuzasadnione.

Pełne informacje i doświadczenia związane z produkcją i wbudowaniem mieszanek z dodatkami obniżającymi temperaturę zostaną przekazane aneksem do raportu końcowego po przeprowadzeniu badań oraz oceny odcinka doświadczalnego.

6. LITERATURA

1. Button J. W., Estakhri C., Wismatt A.: *A Synthesis of Warm-Mix Asphalt*. Texas Transportation Institute, The Texas A&M University System, 2007,
2. Olard F.: LEA® (Low Energy Asphalts): *A new generation of half-warm mix asphalts. The experience of EIFFAGE Travaux Publics*. EIFFAGE Travaux Publics Research & Development Department, LEA-CO Technical Committee, 2007,
3. D'Angelo J., Corrigan M., Harman T., Jones W., Newcomb D., Prowell B. i inni: *Warm-Mix Asphalt: European Practice*. Report No. FHWA-PL-08-007, 2008,
4. Valery L., Beghin A.: *Les enrobés tièdes. Séminaire "Route durable"*, Saint-Médard-en-Jalles, 2008,
5. Barthel W., Marchand J.P., Devivere M.: *Warm Asphalt Mixes by Adding a Synthetic Zeolite*. Proceedings of the 22nd World Road Congress, PIARC, Durban South Africa, 2003,
6. Błażejowski K., Styk S.: *Technologia warstw asfaltowych*. WKŁ, 2004,
7. Thorsten Butz: *Warm Asphalt Mix - Technologies, Research and Experience*. Materiały konferencyjne I Polskiego Kongresu Drogowego, Warszawa, 2006,
8. Edwards Y.: *Swedish Experience of modified binders and asphalt mixtures*. Proceedings of 5th International Transport Conference, Wuppertal, 2008,
9. Corrigan M.: *Warm Mix Asphalt Technology*. AASHTO Standing Committee on Highways Technical Meeting, Nashville, 2005,
10. Naidoo P.: *Akzo Nobel - Rediset Warm-Mix Solutions*. Materiały informacyjne firmy Akzo Nobel,
11. Soliman S., Żymełka D.: *Warm Mixes with Zeolite*. Materiały konferencji "Drogi przyjazne środowisku", Warszawa, 2008.
12. Jones H.W.: *Warm Mix Asphalt Scan Tour*. 48th Annual Asphalt Conference, Idaho, 2008,
13. Materiały informacyjne firmy ASTEC dostępne na stronie www.astecinc.com
14. Button J. W., Estakhri C., Wismatt A.: *A Synthesis of Warm-Mix Asphalt*. Texas Transportation Institute, The Texas A&M University System, 2007,
15. Hurley G., Prowell B.: *Evaluation of Evotherm for Use in Warm Asphalt Mixes*, NCAT Report No. 06-02, Auburn University, Auburn, 2006.
16. Hurley G., Prowell B.: *Evaluation of Warm Mix Asphalt Technologies*. Auburn University, Auburn.
17. Materiały informacyjne firmy Benninghoven dostępne na stronie www.benninghoven.com