

INSTYTUT BADAWCZY DRÓG I MOSTÓW

ZAKŁAD TECHNOLOGII NAWIERZCHNI

Sprawozdanie końcowe z tematu TN-235:

Wyznaczenie charakterystyk starzeniowych mieszanek mineralno-asfaltowych

Kierownik Zakładu TN:

prof. dr hab. inż. Dariusz Sybilski

Zespół:

mgr inż. Wojciech Bańkowski
mgr inż. Renata Horodecka
mgr inż. Andrzej Wróbel
Krzysztof Mirski

Technicy:

Dariusz Jasiński
Teresa Gawenda
Jadwiga Migdalska
Tomasz Michalski
Jerzy Komorowski

Warszawa, listopad 2005

SPIS TREŚCI:

1.	PODSTAWA FORMALNA.....	4
2.	CEL PRACY.....	4
3.	PROGRAM PRACY	4
4.	METODYKA BADAŃ.....	6
4.1.	BADANIA ASFALTÓW.....	6
4.1.1.	PODSTAWOWE BADANIA ASFALTÓW.....	6
4.1.2.	STARZENIE TECHNOLOGICZNE /T/ METODA RTFOT.....	7
4.1.3.	STARZENIE EKSPLOATACYJNE /E/ METODA PAV.....	7
4.1.4.	ZESPOLONY MODUŁ ŚCINANIA W REOMETRZE DSR.....	8
4.2.	METODY BADAŃ MMA.....	8
4.2.1.	BADANIA PODSTAWOWE.....	8
4.2.2.	STARZENIE KRÓTKOTERMINOWE STOA.....	9
4.2.3.	STARZENIE DŁUGOTERMINOWE LTOA.....	9
4.2.4.	WODOODPORNOŚĆ (KONDYCJONOWANIE PRÓBEK).....	9
4.2.5.	WYTRZYMAŁOŚĆ NA ROZCIĄGANIE POŚREDNIE.....	10
4.2.6.	ZESPOLONY MODUŁ SZTYWNOŚCI.....	11
5.	MATERIAŁY	13
5.1.	KRUSZYWA MINERALNE.....	13
5.2.	DODATKI.....	14
5.3.	LEPISZCZA ASFALTOWE.....	14
6.	WYNIKI BADAŃ ASFALTÓW.....	15
6.1.	WŁAŚCIWOŚCI PODSTAWOWE.....	15
6.2.	ZESPOLONY MODUŁ ŚCINANIA.....	17
7.	OPRACOWANIE SKŁADÓW MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH.....	18
7.1.	MIESZANKA SMA8.....	18
7.2.	MIESZANKA BA16.....	20
7.3.	MIESZANKA BA20.....	22
8.	WYNIKI BADAŃ MIESZANEK MINERALNO-ASFALTOWYCH.....	24

8.1.	WYTRZYMAŁOŚĆ NA ROZCIĄGANIE POŚREDNIE	24
8.2.	ZESPOLONY MODUŁ SZTYWNOŚCI.....	24
8.2.1.	MIESZANKA BA20 20/30	24
8.2.2.	MIESZANKA BA20 35/50	26
8.2.3.	MIESZANKA BA20 50/70	27
8.2.4.	MIESZANKA BA20 30B.....	28
8.2.5.	MIESZANKA BA16 35/50	29
8.2.6.	MIESZANKA BA16 50/70	31
8.2.7.	MIESZANKA BA16 30B.....	32
8.2.8.	MIESZANKA SMA8 35/50.....	33
8.2.9.	MIESZANKA SMA8 50/70.....	34
8.2.10.	MIESZANKA SMA8 30B	36
8.3.	ANALIZA WPŁYWU STARZENIA NA MODUŁ ZESPOLONY MIESZANKI MINERALNO- ASFALTOWEJ W ZALEŻNOŚCI OD RODZAJU I TYPU ASFALTU	37
8.4.	ANALIZA WPŁYWU STARZENIA NA MODUŁ ZESPOLONY W ZALEŻNOŚCI OD TYPU I UZIARNIENIA MIESZANKI	39
9.	PODSUMOWANIE I WNIOSKI.....	40

1. Podstawa formalna

Pracę wykonano w IBDiM na podstawie umowy nr 678/2004, z dnia 07.04.2004 r. zawartej pomiędzy Generalną Dyрекcją Dróg Krajowych i Autostrad w Warszawie a Instytutem Badawczym Dróg i Mostów w Warszawie.

2. Cel pracy

Celem pracy jest wykonanie badań mieszank mineralno-asfaltowych z uwzględnieniem starzenia krótkoterminowego STOA i starzenia długoterminowego LTOA, co pozwoli na uzyskanie charakterystyk starzeniowych mieszank mineralno-asfaltowych.

Proces starzenia mieszanki mineralno-asfaltowej, determinują dwa etapy starzenia - technologiczny i eksploatacyjny. Starzenie technologiczne odnosi się do produkcji mieszanki mineralno-asfaltowej, jej wbudowania i zagęszczenia na drodze. W procesie starzenia technologicznego zmiany są bardzo intensywne i zachodzą, w stosunkowo krótkim czasie.

Starzenie eksploatacyjne jest procesem długotrwałym, zachodzącym podczas użytkowania nawierzchni drogowej. Starzenie eksploatacyjne, nie uwzględnia obciążenia ruchem, tylko dalsze powolne utlenianie się asfaltu pod wpływem promieniowania słonecznego i zjawisk atmosferycznych (zmiany temperatury, opady atmosferyczne). Proces ten ma ważne znaczenie dla trwałości nawierzchni drogowej.

3. Program pracy

Program pracy zgodnie z założeniami umowy został podzielony na następujące zadania:

Zadanie 1.

Zgromadzenie materiałów do badań (lepiszcze, kruszywo)

Zadanie 2.

Podstawowe badania materiałów wyjściowych

Zadanie 2.1

Badania lepiszczy:

- penetracja w 25°C,
- temperatura mięknięcia PiK,
- temperatura Fraass,

- moduł zespolony i kąt przesunięcia fazowego DSR.

Przewidziano badania czterech rodzajów lepiszczy w trzech stanach tj.

- (O) oryginalnym przed starzeniem RTFOT,
- (T) po symulacji starzenia technologicznego metodą RTFOT,
- (E) po symulacji starzenia eksploatacyjnego metodą PAV.

Przewidziane lepiszcza:

- asfalt 20/30,
- asfalt 35/50,
- asfalt 50/70,
- elastomeroasfalt DE 30B.

Zadanie 2.2

Kruszywa

Wykonanie analiz sitowych poszczególnych frakcji kruszyw.

Zadanie 3.

Badania mieszanek mineralno-asfaltowych

Zadanie 3.1

Opracowanie składów mieszanek mineralno-asfaltowych

Przewidziano badania trzech mieszanek mineralno-asfaltowych tj.: mieszanka SMA i dwa rodzaje BA z asfaltem 20/30, 35/50, 50/70 oraz elastomeroasfaltem DE 30B

Zadanie 3.2

Badania mieszanek mineralno-asfaltowych (3MMA x 4 asfalty x 3 stany):

- Stabilność, odkształcenie wg Marshalla
- Określenie zawartości wolnej przestrzeni (gęstość strukturalna, gęstość objętościowa)
- Wodoodporność (z uwzględnieniem cykli zamrażania i odmrażania oraz działania wysokiej temperatury)
- Rozciąganie pośrednie
- Zespolony moduł sztywności i kąta przesunięcia fazowego w funkcji temperatury i częstotliwości metodą ściskanie-rozciąganie MTS

Starzenie krótkoterminowe STOA

Starzenie długoterminowe LTOA

4. Metodyka badań

4.1. Badania asfaltów

4.1.1. Podstawowe badania asfaltów

Asfalty zostały poddane następującym badaniom podstawowym:

- penetracja w 25°C wg PN-EN 1426:2001,
- temperatura mięknięcia PiK wg PN-EN 1427:2001,
- temperatura łamliwości Fraassa wg PN-EN 12593:2002.

Na podstawie wyników badań zostały obliczone parametry oceny jakościowej asfaltów [1], tj.:

– **indeks penetracji PI (Pen-Pen) i PI (Pen-PiK)**, według wzoru (1):

$$PI = \frac{20 - 500A}{1 + 50A} \quad (1)$$

w którym:

A – wrażliwość temperaturowa, według wzoru (2):

$$A = \frac{\log Pen_{T_1} - \log Pen_{T_2}}{T_1 - T_2} \quad [1/^\circ C] \quad (2)$$

w którym:

Pen_{T₁} – wartość penetracji w temperaturze T₁ = 25 °C, 0,1 mm,
Pen_{T₂} – wartość penetracji w temperaturze T₂ = 15 °C lub w temperaturze mięknięcia T_{PiK}, 0,1 mm.

– **przedział plastyczności PP (T_{PiK}-T_{Fraass})**, obliczony według wzoru (3):

$$PP = T_{PiK} - T_{Fraass} \quad [^\circ C] \quad (3)$$

w którym:

T_{PiK} i T_{Fraass} – temperatura mięknięcia według metody Pierścień i Kula oraz temperatura łamliwości według Fraassa, °C.

– **spadek penetracji decPen₂₅** po odparowaniu, według wzoru (4):

$$decPen_{25} = \frac{Pen_{25} - Pen_{25}^{odp}}{Pen_{25}} * 100 \quad [\%] \quad (4)$$

w którym:

Pen_{25} i Pen_{25}^{odp} – penetracja w 25 °C przed i po odparowaniu, 0,1 mm.

– **wzrost temperatury mięknienia** po odparowaniu $incT_{PiK}$, według wzoru (5):

$$incT_{PiK} = T_{PiK}^{odp} - T_{PiK} \quad [^{\circ}C] \quad (5)$$

w którym:

T_{PiK} i T_{PiK}^{odp} – temperatura mięknienia według metody Pierścień i Kula przed i po odparowaniu, °C.

4.1.2. Starzenie technologiczne /T/ metoda RTFOT

Starzenie jest to zjawisko w czasie, którego następuje utlenianie asfaltu oraz odparowanie z niego lekkich frakcji olejowych, przez co zmieniają się właściwości lepiszcza. Starzenie /T/ zachodzi podczas produkcji i wbudowania mieszanki mineralno-bitumicznej (asfalt ma wysoką temperaturę i dużą powierzchnię styczności z powietrzem). Starzenie /T/ jest symulowane badaniem odparowalności asfaltu w cienkiej wirowanej warstwie Rolling Thin Film Oven Test – RTFOT zgodnie z metodą opisaną w normie [2].

4.1.3. Starzenie eksploatacyjne /E/ metoda PAV

Oznaczenie starzenia eksploatacyjnego wykonuje się w Pojemniku Starzenia Ciśnieniowego PAV (Pressure Aging Vessel) według metody podanej w [3]. W celu dokładnej symulacji warunków naturalnych starzenie w pojemniku PAV wykonuje się na lepiszczu, które wcześniej zostało poddane starzeniu technologicznemu w suszarce RTFOT. Tak przygotowany asfalt poddaje się oddziaływaniu temperatury 100°C oraz ciśnieniu 2,1 MPa w czasie 20 h w pojemniku PAV. Drugi etap badania starzenia eksploatacyjnego przeprowadza się w piecu próżniowym. Pod wpływem wysokiego ciśnienia panującego w komorze aparatu PAV, badane lepiszcze zostaje nasycone pęcherzykami powietrza w stopniu powodującym zmianę jego właściwości reologicznych. W celu odgazowania badanego lepiszcza poddaje się je oddziaływaniu podciśnienia 15 kPa w piecu próżniowym. W tym celu lepiszcze po starzeniu w aparacie PAV przelewa się do specjalnych pojemników i umieszcza w komorze pieca próżniowego. Proces odgazowywania lepiszcza trwa 30 min.

W celu określenia wpływu starzenia na podstawowe właściwości asfaltów przewidziano zbadanie penetracji, temperatury mięknienia i łamliwości asfaltów przed i po starzeniu RTFOT oraz po starzeniu RTFOT+PAV.

4.1.4. Zespolony moduł ścinania w reometrze DSR

Badanie modułu zespolonego ścinania wykonuje się w reometrze dynamicznego ścinania CLS²₁₀₀ (Dynamic Shear Rheometer - DSR) zgodnie z metodą podaną w normie [4]. Wyniki oznacza się w 13 temperaturach (od 10°C do 82°C), krok co 6°C, w 6 częstotliwościach z zakresu od 0,1Hz do 40Hz. W temperaturze od 10 do 40°C stosuje się geometrię próbki 25 mm o wysokości 1000 μm, dla temperatury 46 do 82°C stosuje się geometrię próbki 8 mm o wysokości 2000 μm. Próbki termostatuje się z dokładnością do 0,1°C.

Reometr dynamicznego ścinania charakteryzuje lepkie i sprężyste zachowanie materiału i służy do pomiaru modułu zespolonego ścinania G^* oraz kąta przesunięcia fazowego δ lepiszcza [5]. Moduł G^* jest miarą całkowitej odporności lepiszcza poddanego powtarzalnemu ścinaniu na deformacje. Moduł zespolony G^* składa się z dwóch części sprężystej i lepkiej. Tangens kąta przesunięcia fazowego δ jest miarą stosunku części lepkiej do sprężystej. Dla lepiszcza doskonale sprężystego $\delta = 0^\circ$, dla materiału doskonale lepkiego $\delta = 90^\circ$. W przypadku materiałów lepkosprężystych, jakimi są lepiszcza asfaltowe wartość ta oscyluje w granicach $\delta = (0^\circ - 90^\circ)$.

4.2. Metody badań MMA

4.2.1. Badania podstawowe

Przewidziano następujące badania podstawowe w zakresie mieszanek mineralno-asfaltowych:

- ✓ Analizy sitowe wg PN-EN-933-2:2000
- ✓ Stabilność, odkształcenie wg Marshalla wg Zeszytu 64/2002 – arkusz 11
- ✓ Określenie zawartości wolnych przestrzeni wg Zeszytu 64/2002 – arkusz 09 [6]
 - oznaczenie gęstości objętościowej (dawnej gęstości) w piknometrze, z zastosowaniem czterochloroetylenu, wg Zeszytu 64/2002, arkusz 04,
 - oznaczenie gęstości strukturalnej (dawnej gęstości pozornej) mieszanki SMA metodą hydrostatyczną, wg Zeszytu 64/2002, arkusz 05

Wolną przestrzeń P_p , w zagęszczonej mieszance mineralno-asfaltowej obliczono wg równania:

$$P_p = \frac{\rho_o - \rho_s}{\rho_o} \times 100, \% V/V \quad (6)$$

ρ_o - gęstość objętościowa mieszanki mineralno-asfaltowej, g/cm³,

ρ_s - gęstość strukturalna mieszanki mineralno-asfaltowej, g/cm³.

- ✓ Spływność metodą Schellenberga wg Zeszytu 62/2001 [7]

4.2.2. Starzenie krótkoterminowe STOA

Procedurę procesu starzenia krótkoterminowego STOA przygotowano na podstawie metodyki podanej w raporcie SHRP A-383 [8]. Mieszankę mineralno-asfaltową przygotowuje się według normalnej procedury, a następnie w stanie luźnym (bez zagęszczenia) poddaje się procesowi starzenia krótkoterminowego STOA. Na metalowej formie rozkłada się mieszankę tak, aby grubość warstwy wynosiła około 1,5 cm. Następnie formę umieszcza się w suszarce z wymuszonym obiegiem, w temperaturze 135°C±1°C. Mieszankę poddaje się starzeniu w suszarce przez 4 godziny, cyklicznie mieszając co 50 minut. Po wyjęciu z suszarki mieszankę podgrzewa się do temperatury zagęszczania i formuje próbki.

Starzenie krótkoterminowe w laboratorium jest symulacją starzenia technologicznego mieszanki mineralno-asfaltowej w trakcie produkcji, wbudowania i zagęszczenia.

4.2.3. Starzenie długoterminowe LTOA

Procedurę procesu starzenia krótkoterminowego LTOA przygotowano na podstawie metodyki podanej w raporcie SHRP A-383 [8]. Starzenie długoterminowe wykonuje się na próbkach zagęszczonych i poddanych wcześniej starzeniu krótkoterminowemu STOA. Starzenie długoterminowe polega na umieszczeniu zagęszczonych próbek w suszarce z wymuszonym obiegiem, w temperaturze 85°C±1°C i wygrzewaniu przez okres 120 godzin.

Starzenie długoterminowe w laboratorium jest symulacją starzenia eksploatacyjnego nawierzchni, które polega na głównie na utlenianiu lepizcza asfaltowego.

4.2.4. Wodoodporność (kondycjonowanie próbek)

Metoda pielęgnacji próbek jest zgodna z metodą podaną w AASHTO T-283 [9]. Do badań przygotowywane są dwie grupy próbek: porównawczych (niekondycjonowanych) i badawczych (kondycjonowanych). Grupę próbek

kondycjonowanych do czasu ich zbadania przechowuje się w temperaturze pokojowej. Przed badaniem próbki umieszcza się w łaźni wodnej w temperaturze +25 °C przez $2 \pm 0,5$ h. Druga grupa próbek badawczych poddana jest pielęgnacji poprzez kolejno:

- nasycenie wodą próbek w komorze próżniowej do stopnia nasycenia pomiędzy 55-80 %; stopień nasycenia wodą N_w oblicza się wg równania:

$$N_w = \frac{(B - A)}{V(B - C)} * 100 \% \text{ (m/m)} \quad (7)$$

w którym:

N_w – stopień nasycenia, % (m/m)

A – ciężar próbki suchej w powietrzu, g

B – ciężar próbki nasyconej w powietrzu, g

C – ciężar próbki nasyconej w wodzie, g

V – zawartość wolnych przestrzeni w próbce, wyrażona liczbą dziesiętną

- zamrożenie próbek MMA w temperaturze -18 ± 3 °C przez 16 ± 18 h,
- rozmrożenie próbek MMA w łaźni z wodą o temperaturze 60 ± 1 °C i przetrzymywanie ich przez 24 ± 1 h,
- przetrzymywanie próbek MMA w łaźni z wodą o temperaturze $25 \pm 0,5$ °C przez $2 \pm 0,5$ h,
- właściwe oznaczenie wytrzymałości na rozciąganie pośrednie próbek kondycjonowanych i niekondycjonowanych.

Próbki kondycjonowane i niekondycjonowane zostały przeznaczone do badań wytrzymałości na rozciąganie pośrednie.

4.2.5. Wytrzymałość na rozciąganie pośrednie

Badanie wytrzymałości na rozciąganie pośrednie R przeprowadzono w prasie Marshalla w temperaturze 25°C. Badanie to polega na ścisaniu próbek $\varnothing=101$ mm, po tworzącej walca z prędkością 50 mm/min, przy czym nacisk jest przekazany przez listwy o szerokości 12 mm i o krzywiznie równej promieniowi próbki.

Wytrzymałość pojedynczej próbki na rozciąganie pośrednie oblicza się wg równania :

$$R = \frac{P}{\Gamma r h} \text{ MPa} \quad (8)$$

gdzie:

R – wytrzymałość na rozciąganie pośrednie, MPa

P – maksymalna siła niszcząca próbkę, MN

h – wysokość próbki, m

r – promień próbki, m.

4.2.6. Zespolony moduł sztywności

Badanie zespolonego modułu sztywności przeprowadzono zgodnie z procedurą IBDiM opracowaną na podstawie normy AASHTO TP8-94 [10]. Zamiast metody ściskania-rozciągania zastosowano metodę belki czteropunktowo zginanej, jako metody wdrożonej i stosowanej w Polsce, zawartej w normie PN-EN 12697-26. Polega ona na zginaniu próbki belkowej umieszczonym w aparacie zmęczeniowym przy stałej amplitudzie odkształcenia. Podczas badania rejestrowana jest siła, ugięcie belki, kąt przesunięcia fazowego, liczba cykli, obliczany jest moduł sztywności zginania oraz naprężenia i odkształcenia rozciągające. Warunki badania zespolonego modułu sztywności przyjęto następujące:

- temperatura: -10, 0, 10, 20, 30, 40°C,
- częstotliwość: 0,1, 0,5, 1, 2, 5, 10, 20, 30 Hz,
- odkształcenie: 50 $\mu\text{mm/mm}$.

Wynikiem badania jest moduł sztywności i kąt przesunięcia fazowego. Zespolony moduł sztywności E^* jest liczbą zespoloną, którą można opisać równaniem:

$$E^* = E' + iE'' \quad (9)$$

w którym:

$$E' = |E^*| \cos \varphi \quad (10)$$

$$E'' = |E^*| \sin \varphi \quad (11)$$

E' – część rzeczywista (sprężysta),

E'' – część urojona (lepka).

Obie składowe modułu zespolonego związane są wartością kąta przesunięcia fazowego wg równania:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{E''}{E'} \quad (12)$$

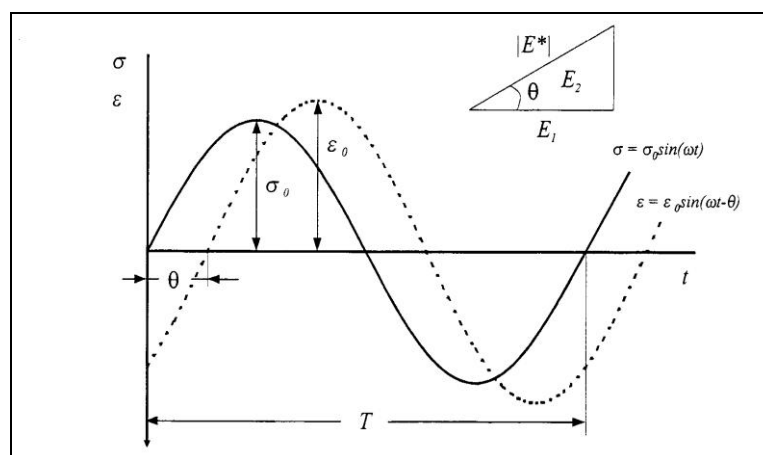
w którym:

φ - kąt przesunięcia fazowego, °.

Moduł sztywności jest wartością bezwzględną zespolonego modułu sztywności. Kąt przesunięcia fazowego stanowi informację o przewodze właściwości lepkich lub sprężystych w materiale: niższa jego wartość tym materiał bardziej sprężysty. Wartość kąta przesunięcia fazowego może wynosić od 0 (stal) do 90° (ciecze).

Kąt przesunięcia fazowego wynika z faktu, iż w ciałach lepkosprężystych odkształcenie pojawia się z pewnym opóźnieniem w stosunku do obciążenia (rys. 1). Jako kryterium oceny lepkosprężystych właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych przyjmuje się wartość tangensa kąta przesunięcia fazowego [11]:

- w materiałach lepkich $\varphi = 90^\circ$, $\operatorname{tg} \varphi = \infty$,
- w materiałach sprężystych $\varphi = 0^\circ$, $\operatorname{tg} \varphi = 0$,
- w materiałach lepkosprężystych $0^\circ < \varphi < 90^\circ$, $0 < \operatorname{tg} \varphi < \infty$.



Rysunek 1 Ilustracja kąta przesunięcia fazowego

5. Materiały

5.1. Kruszywa mineralne

Do wykonania mieszanek mineralno-asfaltowych zastosowano kruszywa:

- granitowe z kopalni Graniczna,
- bazaltowe z kopalni Wilków,
- mączkę wapienną „MOWAP” Wapiewo.

Uziarnienie kruszyw przedstawione zostało w tablicy 1.

Tablica 1. Zestawienie uziarnienia kruszyw mineralnych

Sito # [mm]	Mączka wapienna	Granit 0/2 mm	Bazalt 2/5 mm	Bazalt 5/8 mm	Bazalt 8/11 mm	Granit 11/16 mm	Granit 16/25 mm
20,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	21,1
16,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,2	53,3
12,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	53,7	22,0
9,5	0,0	0,0	0,0	0,2	33,2	30,9	3,2
8,00	0,0	0,0	0,0	6,8	38,9	3,1	0,2
6,30	0,0	0,1	0,0	29,5	21,6	1,3	0,1
4,00	0,0	0,1	13,0	57,6	5,1	0,4	0,0
2,00	0,0	10,5	79,3	4,6	0,5	0,1	0,0
0,84	0,0	33,1	5,8	0,6	0,1	0,0	0,0
0,42	0,0	25,3	0,6	0,1	0,1	0,0	0,0
0,30	0,0	11,3	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0
0,18	0,4	11,8	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0
0,15	0,8	2,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,075	10,8	3,8	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0
<0,075	88,0	1,8	0,8	0,4	0,3	0,3	0,1
	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

5.2. Dodatki

Do wykonania mieszanek mineralno-asfaltowych zastosowano następujące dodatki:

- ✓ ARBOCEL – stabilizator, dodatek do mieszanki mineralnej,
- ✓ TERAMIN 14 C– środek adhezyjny, dodatek do asfaltu.

5.3. Lepiszcza asfaltowe

Zgodnie z przyjętymi założeniami pracy do przygotowania mieszanek mineralno-asfaltowych zastosowano następujące asfalty:

- asfalt 20/30 producent BP Polska
- asfalt 35/50 producent Grupa Lotos
- asfalt 50/70 producent Grupa Lotos
- elastomeroasfalt DE 30B producent BP Polska

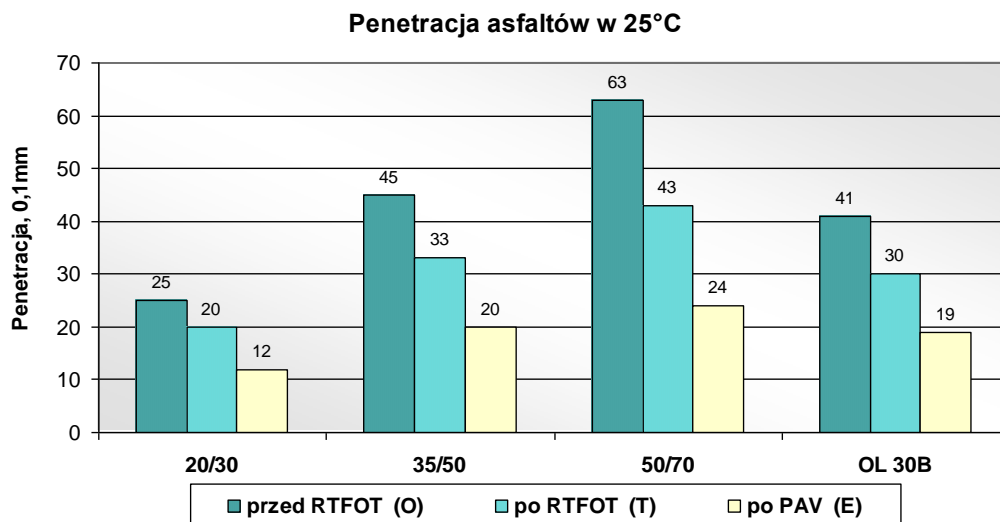
6. Wyniki badań asfaltów

6.1. Właściwości podstawowe

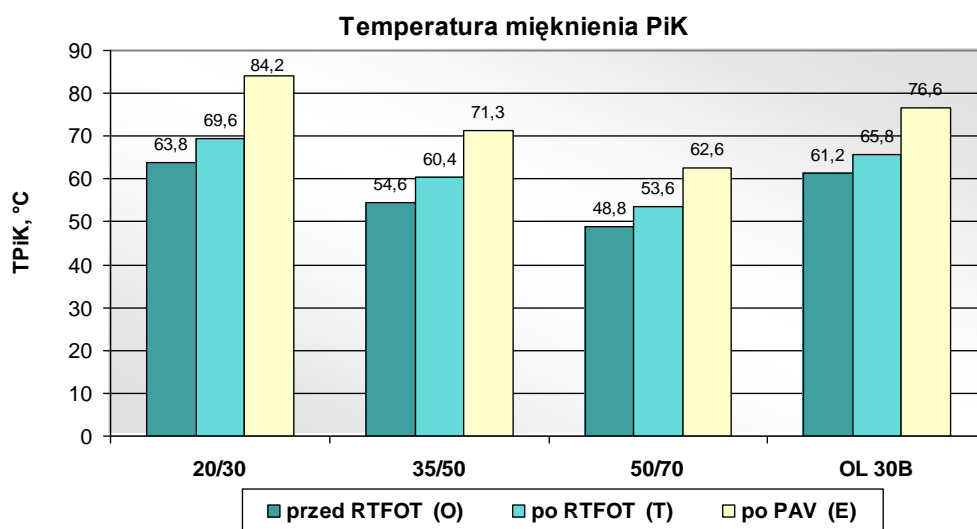
W tablicy 2 oraz na rysunkach 2-4 przedstawiono wyniki badań podstawowych lepiszczy.

Tablica 2. Właściwości asfaltów

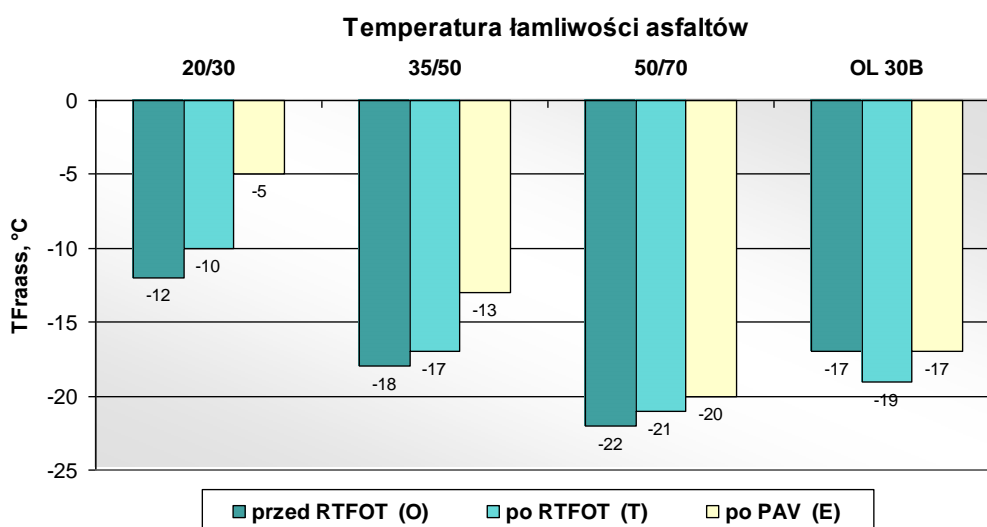
WŁAŚCIWOŚCI	RODZAJ LEPISZCZA			
	20/30	35/50	50/70	DE30B
Przed starzeniem (O)				
Penetracja w 15°C, 0,1 mm	11	19	23	18
Penetracja w 25°C, 0,1 mm	25	45	63	41
Temperatura mięknięcia PiK, °C	63,8	54,6	48,8	61,2
Temperatura łamliwości, °C	-12	-18	-22	-17
PI (Pen-Pen)	0,78	0,44	-0,59	0,76
PI (Pen-PiK)	0,21	-0,36	-0,96	0,78
PP (TPiK-TFraass), °C	76	73	71	78
Po starzeniu RTFOT (T)				
Zmiana masy po RTFOT, %	-0,097	0,014	0,009	0,006
Penetracja w 25°C, 0,1 mm	20	33	43	30
Temperatura mięknięcia PiK, °C	69,6	60,4	53,6	65,8
Temperatura łamliwości, °C	-10	-17	-21	-19
PI (Pen-PiK)	0,73	0,15	-0,68	0,92
PP (TPiK-TFraass), °C	80	77	75	85
Spadek Pen25, %	20,0	26,7	31,7	26,8
Wzrost TPiK, °C	5,8	5,8	4,8	4,6
Po starzeniu PAV (E)				
Penetracja w 25°C, 0,1 mm	12	20	24	19
Temperatura mięknięcia PiK, °C	84,2	71,3	62,6	76,6
Temperatura łamliwości, °C	-5	-13	-20	-17
PI (Pen-PiK)	1,81	0,99	-0,08	1,66
PP (TPiK-TFraass), °C	89	84	83	94
Spadek Pen25, %	40,0	39,4	44,2	36,7
Wzrost TPiK, °C	14,6	10,9	9,0	10,8
Całkowity spadek Pen25, %	52,0	55,6	61,9	53,7
Całkowity wzrost TPiK, °C	20,4	16,7	13,8	15,4



Rysunek 2 Penetracja w 25°C asfaltów w trzech stanach O, T, E



Rysunek 3 Temperatura mięknięcia asfaltów w trzech stanach O, T, E



Rysunek 4 Temperatura łamliwości asfaltów w trzech stanach O, T, E

6.2. Zespolony moduł ścinania

Szczegółowe wyniki badań modułu zespolonego ścinania zostały przedstawione w załączniku 1 w tablicach 1-4, natomiast graficzną interpretację wyników przedstawiono na rysunkach od 1 do 7.

Moduł zespolony G^* określa zależność naprężenia ścinającego od odkształcenia ścinającego. Krzywa Blacka zależności modułu zespolonego G^* od kąta przesunięcia fazowego δ jest bardzo ważnym elementem analizy asfaltów. Krzywe Blacka każdego badanego asfaltu w trzech stanach (O), (T), (E) charakteryzują się regularnym przebiegiem malejącym. W załączniku 1 na rysunkach 8-15 przedstawiono analizę wpływu starzenia na zespolony moduł ścinania i kąt przesunięcia fazowego.

Analizując wyniki badań modułu zespolonego ścinania G^* oraz kąta przesunięcia fazowego można stwierdzić, że:

- starzenie powoduje wzrost modułu G^* i obniżenie wartości kąta przesunięcia fazowego, wyjątek stanowią wyniki asfaltu najtwardszego po RTFOT gdzie zależność jest odwrotna,
- elastomeroasfalt jest najbardziej wrażliwy na starzenie RTFOT, natomiast po starzeniu PAV wykazuje mniejsze zmiany w wynikach DSR niż pozostałe asfalty,
- im wyższa temperatura badania tym większy przyrost modułu G^* po starzeniu,
- wzrost modułu G^* po starzeniu RTFOT jest podobny dla wszystkich badanych asfaltów, dopiero po starzeniu PAV widać wyraźne różnice: im twardszy asfalt tym mniejszy wzrost modułu G^* ,
- wpływ starzenia na zmianę kąta przesunięcia fazowego z uwzględnieniem twardości asfaltu i temperatury badania jest zmienny.

7. Opracowanie składów mieszanek mineralno-asfaltowych

7.1. Mieszanka SMA8

Projekt mieszanki SMA o uziarnieniu 0/8 mm wykonano zgodnie z normą PN-S-96025:2000, z przeznaczeniem do warstwy ścieralnej dla kategorii ruchu od KR3 do KR6. Skład mieszanki opracowano w trzech wariantach, tj. z trzema asfaltami: 35/50, 50/70, DE30B.

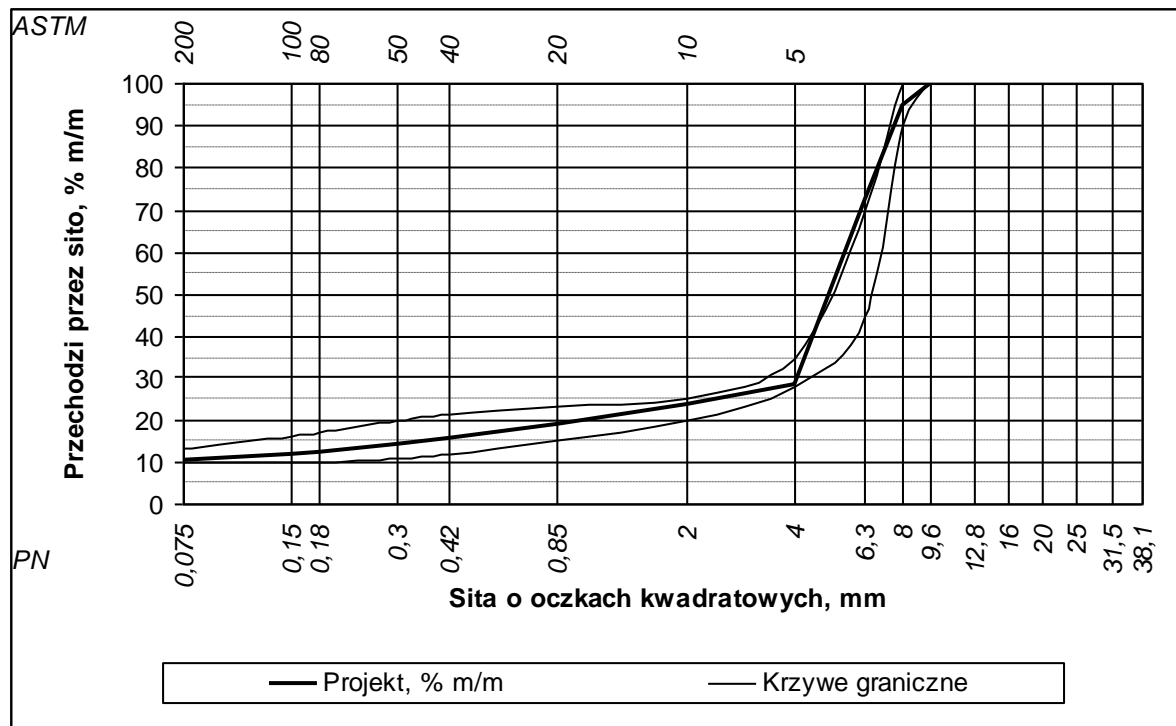
W dalszej części pracy przyjęto odpowiednie oznaczenia: S8 35/50, S8 50/70, S8 30B.

Tablica 3. Skład mieszanki mineralnej i mineralno-asfaltowej SMA8

Składnik	MM	MMA
	% m/m	% m/m
Mączka wapienna	12,0	10,92
Granit 0/2 mm	13,0	12,17
Bazalt 5/8 mm	70,0	65,55
Bazalt 8/11 mm	5,0	4,68
Asfalt	-	6,38
Arbocel	-	0,28
Teramin 14C	-	0,02
SUMA	100	100

Tablica 4. Uziarnienie mieszanki mineralnej

Sito, #mm	Skrócony odsiew % m/m	Odsiew % m/m	Przesiew % m/m	Krzywa dolna % m/m	Krzywa górna % m/m
12,50			100	100	100
9,60		1,8	98,2	100	100
8,00		6,7	91,5	90	100
6,30		21,8	69,7	45	70
4,00		40,7	29,0	28	35
2,00	75,6	4,6	24,4	20	25
0,85		4,8	19,6	15	23
0,42		3,4	16,2	12	21
0,30		1,5	14,7	11	20
0,18		1,6	13,1	10	17
0,15		0,4	12,7	10	16
0,075	13,6	1,9	10,8	10	13
<0,075	10,8	10,8			



Rysunek 5 Wykres uziarnienia SMA8

Tablica 5. Właściwości mieszanek SMA

Lp.	Cecha	Jednostka	S8 35/50	S8 50/70	S8 DE30B
1.	Gęstość objętościowa	g/cm ³	2,592	2,595	2,587
2.	Gęstość strukturalna	g/cm ³	2,517	2,524	2,508
3.	Wolna przestrzeń	% v/v	2,9	2,7	3,0
4.	Stabilność	kN	7,3	5,6	10,0
5.	Odkształcenie	mm	4,2	4,1	5,6
6.	Spływność wg Schelenberga	% (m/m)	0,05	0,06	0,04

7.2. Mieszanka BA16

Projekt mieszanki betonu asfaltowego BA o uziarnieniu 0/16 mm wykonano zgodnie z normą PN-S-96025:2000, z przeznaczeniem do warstwy ścieralnej dla kategorii ruchu od KR3 do KR6. Skład mieszanki opracowano w trzech wariantach, tj. z trzema asfaltami: 35/50, 50/70, DE30B.

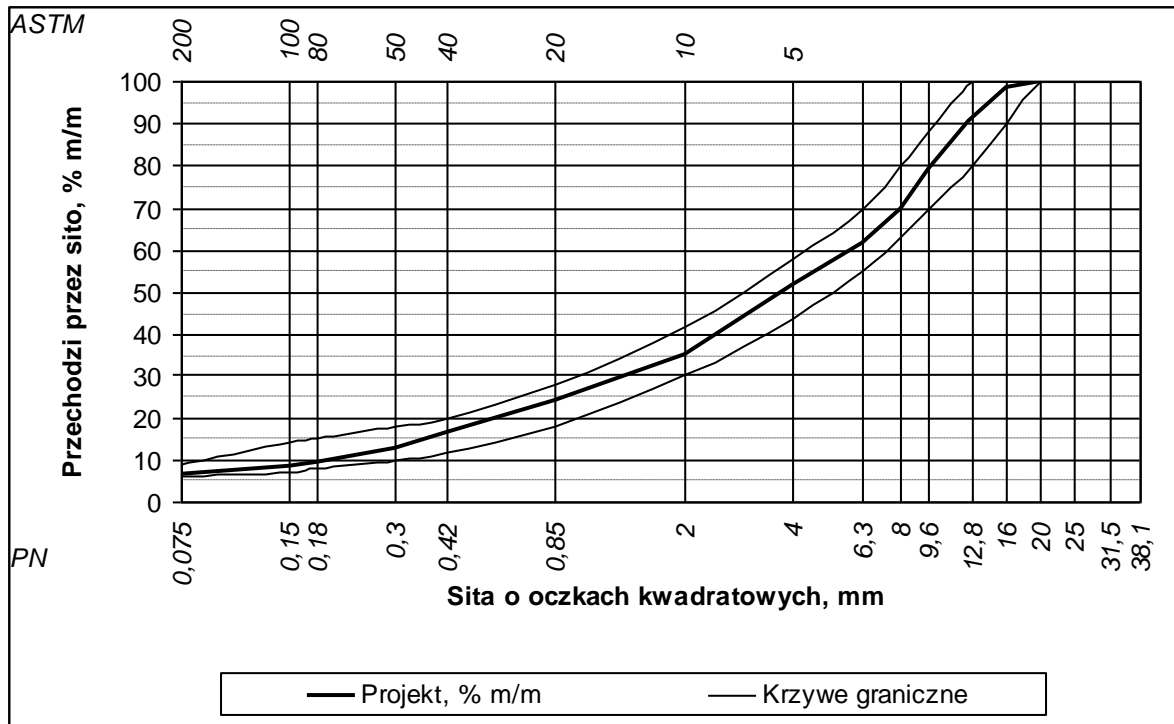
W dalszej części pracy przyjęto odpowiednie oznaczenia: BA16 35/50, BA16 50/70, BA16 30B.

Tablica 6. Skład mieszanki mineralnej i mineralno-asfaltowej BA16

Składnik	MM	MMA
	% m/m	% m/m
Mączka wapienna	7,00	6,19
Granit 0/2 mm	30,00	28,58
Bazalt 2/5 mm	16,00	15,24
Bazalt 5/8 mm	12,00	11,43
Bazalt 8/11 mm	20,00	19,06
Granit 11/16 mm	15,00	14,29
Asfalt	-	5,18
Teramin 14C	-	0,02
SUMA	100	100

Tablica 7. Uziarnienie mieszanki mineralnej

Sito, #mm	Skrócony odsiew % m/m	Odsiew % m/m	Przesiew % m/m	Krzywa dolna % m/m	Krzywa górna % m/m
20,00			100,0	100	100
16,00		1,5	98,5	90	100
12,50		8,1	90,4	80	100
9,60		11,3	79,1	70	88
8,00		9,1	70,0	63	80
6,30		8,1	61,9	55	70
4,00		10,1	51,8	44	58
2,00	64,8	16,6	35,2	30	42
0,85		11,0	24,2	18	28
0,42		7,8	16,4	12	20
0,30		3,5	12,9	10	18
0,18		3,7	9,3	8	15
0,15		0,7	8,5	7	14
0,075	28,6	2,0	6,6	6	9
<0,075	6,6	6,6			



Rys. 1. Wykres uziarnienia BA16

Tablica 8. Właściwości mieszanek BA16

Lp.	Cecha	Jednostka	BA16 35/50	BA16 50/70	BA16 30B
1.	Gęstość objętościowa	g/cm ³	2,585	2,589	2,582
2.	Gęstość strukturalna	g/cm ³	2,502	2,515	2,498
3.	Wolna przestrzeń	% v/v	3,2	2,8	3,3
4.	Stabilność	kN	13,3	11,7	8,0
5.	Odształcenie	mm	4,7	3,7	3,7

7.3. Mieszanka BA20

Projekt mieszanki betonu asfaltowego BA o uziarnieniu 0/20 mm wykonano zgodnie z normą PN-S-96025:2000, z przeznaczeniem do warstwy wiążącej dla kategorii ruchu od KR3 do KR6. Skład mieszanki opracowano w czterech wariantach, tj. z czterema asfaltami: 20/30, 35/50, 50/70, DE30B.

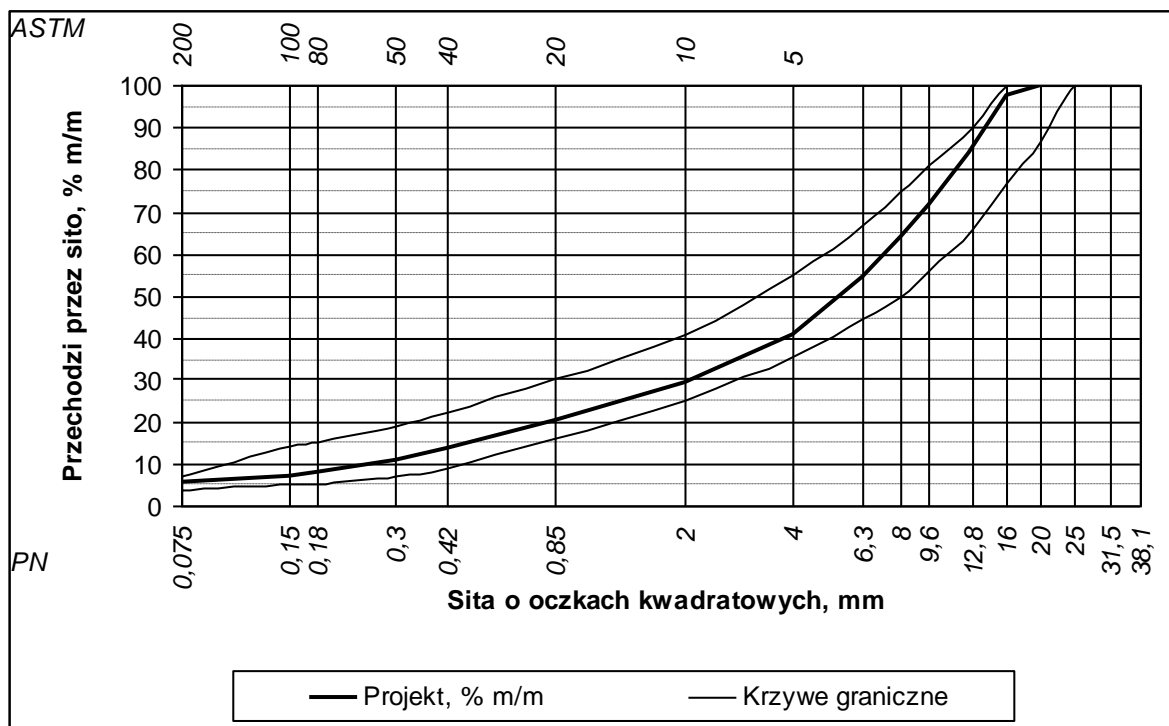
W dalszej części pracy przyjęto odpowiednie oznaczenia: BA20 20/30, BA20 35/50, BA20 50/70, BA20 30B.

Tablica 9. Skład mieszanki mineralnej i mineralno-asfaltowej

Składnik	MM	MMA
	% m/m	% m/m
Mączka wapienna	6,00	5,32
Granit 0/2 mm	25,00	23,91
Bazalt 2/5 mm	10,00	9,56
Bazalt 5/8 mm	20,00	19,12
Bazalt 8/11 mm	14,00	13,39
Granit 11/16 mm	25,00	23,91
Asfalt	-	4,79
Teramin 14C	-	0,01
SUMA	100	100

Tablica 10. Uziarnienie mieszanki mineralnej

Sito, #mm	Skrócony odsiew % m/m	Odsiew % m/m	Przesiew % m/m	Krzywa dolna % m/m	Krzywa górna % m/m
25,00			100,0	100	100
20,00			100,0	87	100
16,00		2,6	97,5	77	100
12,50		13,4	84,0	66	90
9,60		12,4	71,6	56	81
8,00		7,6	64,0	50	75
6,30		9,3	54,7	45	67
4,00		13,7	41,0	36	55
2,00	70,6	11,6	29,4	25	41
0,85		9,1	20,3	16	30
0,42		6,5	13,8	9	22
0,30		2,9	11,0	7	19
0,18		3,0	7,9	5	15
0,15		0,6	7,3	5	14
0,075	23,7	1,7	5,6	4	7
<0,075	5,6	5,6			



Rys. 2. Wykres uziarnienia BA20

Tablica 11. Właściwości mieszanek BA20

Lp.	Cecha	Jednostka	BA20 30B	BA20 35/50	BA20 50/70	BA20 20/30
1.	Gęstość objętościowa	g/cm ³	2,578	2,581	2,587	2,597
2.	Gęstość strukturalna	g/cm ³	2,469	2,475	2,487	2,482
3.	Wolna przestrzeń	% v/v	4,2	4,1	3,9	4,4
4.	Stabilność	kN	14,7	13,8	10,2	16,2
5.	Odształcenie	mm	5,1	3,8	3,5	3,7

8. Wyniki badań mieszanek mineralno-asfaltowych

8.1. Wytrzymałość na rozciąganie pośrednie

W załączniku 2 przedstawiono wyniki obliczeń wytrzymałości na rozciąganie pośrednie poszczególnych mieszanek mineralno-asfaltowych z uwzględnieniem wpływu kondycjonowania i starzenia:

- tablica 1 zawiera wyniki badań,
- tablica 2 zawiera względne porównanie wyników pod względem wpływu procesów starzenia,
- tablica 3 zawiera względne porównanie wyników pod względem wpływu kondycjonowania,
- rysunki 1-10 przedstawiające wyniki dla poszczególnych mieszanek mineralno-asfaltowych.

Analizując zebrane wyniki badań można przedstawić następujące obserwacje:

- wytrzymałość na rozciąganie pośrednie próbek poddanych starzeniu jest większa od wytrzymałości próbek w stanie oryginalnym,
- różnice w wytrzymałości mieszanek po starzeniu krótkoterminowym i długoterminowym są niewielkie, jeżeli porównać ze wzrostem wytrzymałości względem mieszanek w stanie oryginalnym,
- mieszanki poddane kondycjonowaniu charakteryzowały się mniejszą wytrzymałością na rozciąganie pośrednie.

8.2. Zespolony moduł sztywności

8.2.1. Mieszanka BA20 20/30

W załączniku 3 przedstawiono wyniki badań i obliczeń dotyczących mieszanki BA20 20/30:

- tablica 1 zawiera wyniki badań modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego w zależności od temperatury i częstotliwości obciążenia,
- rysunek Z.1 przedstawia wykres Blacka,
- rysunek Z.2 przedstawia wykres Cole-Cole,

- rysunki Z.3-6 przedstawiają opracowane krzywe wiodące modułu sztywności w temperaturach -10, +10, +30 oraz +60°C [12],
- rysunki Z.7-10 przedstawiają wykresy kąta przesunięcia fazowego w temperaturach -10, +10, +30 oraz +60°C,
- rysunki Z.11-13 przedstawiają wykresy $\text{tg}\phi$ w temperaturach -10, +10 oraz +40°C,
- rysunki Z.14-15 przedstawiają wykresy $\text{tg}\phi$ w częstotliwości 10 i 1 Hz.

Analizując wyniki badań można stwierdzić, że:

- mieszanki po starzeniu krótko i długoterminowym charakteryzują się wyższym modułem sztywności i mniejszym kątem przesunięcia fazowego niezależnie od temperatury i częstotliwości badania,
- w temperaturze -10°C wpływ starzenia krótkoterminowego na moduł sztywności i kąt przesunięcia fazowego jest niewielki,
- w wyższej temperaturze wartości modułu sztywności są wyraźnie zależne od stanu mieszanki – widać wyraźne różnice w wynikach mieszanki w stanie oryginalnym i po starzeniu krótkoterminowym oraz pomiędzy wynikami po starzeniu krótko i długoterminowym,
- im wyższa temperatura badania tym większy wpływ starzenia na moduły sztywności: np. w temperaturze -10°C starzenie krótkoterminowe powoduje wzrost modułu o maksymalnie 5%, w temperaturze 10°C wzrost ten wynosi od 15 do 45%, a w temperaturze 30 i 40°C moduł sztywności mieszanek po starzeniu jest już nawet 2,5 razy większy,
- wpływ starzenia, zarówno krótko i długoterminowego, na moduł sztywności jest bardziej zauważalny niż wpływ na wartość kąta przesunięcia fazowego,
- różnice pomiędzy modułami sztywności po starzeniu krótko i długoterminowym zwiększają się wraz ze wzrostem temperatury,
- różnice pomiędzy wartościami kąta przesunięcia fazowego po starzeniu krótko i długoterminowym są niewielkie (za wyjątkiem temperatury -10°C),
- mieszanka w stanie oryginalnym wykazuje bardziej lepkie zachowanie niż mieszanki po starzeniu, widać to na wykresie Blacka, wykresie Cole-Cole, na wykresach kąta przesunięcia fazowego oraz na wykresach $\text{tg}\phi$ w temperaturze powyżej 0°C,

- im wyższa częstotliwość badania tym mniejsza wartość $\text{tg}\phi$ oraz mniejsze różnice tej wielkości pomiędzy mieszankami po starzeniu i w stanie oryginalnym.

8.2.2. Mieszanka BA20 35/50

W załączniku 3 przedstawiono wyniki badań i obliczeń dotyczących mieszanki BA20 35/50:

- tablica 2 zawiera wyniki badań modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego w zależności od temperatury i częstotliwości obciążenia,
- rysunek Z.16 przedstawia wykres Blacka,
- rysunek Z.17 przedstawia wykres Cole-Cole,
- rysunki Z.18-21 przedstawiają opracowane krzywe wiodące modułu sztywności w temperaturach -10, +10, +30 oraz +60°C,
- rysunki Z.22-25 przedstawiają wykresy kąta przesunięcia fazowego w temperaturach -10, +10, +30 oraz +60°C,
- rysunki Z.26-28 przedstawiają wykresy $\text{tg}\phi$ w temperaturach -10, +10 oraz +40°C,
- rysunki Z.29-30 przedstawiają wykresy $\text{tg}\phi$ w częstotliwości 10 i 1 Hz.

Analizując wyniki badań można stwierdzić, że:

- mieszanki po starzeniu krótko i długoterminowym charakteryzują się wyższym modułem sztywności i mniejszym kątem przesunięcia fazowego niezależnie od temperatury i częstotliwości badania,
- różnice w wynikach mieszanek po starzeniu krótko i długoterminowym są niewielkie, jeżeli porównać je z różnicami mieszanek po starzeniu a mieszanek w stanie oryginalnym,
- im wyższa temperatura badania tym większy wpływ starzenia na moduły sztywności: np. w temperaturze -10°C starzenie powoduje wzrost modułu o maksymalnie 21%, w temperaturze 10°C wzrost ten wynosi od 10 do 80%, a w temperaturze 30 i 40°C moduł sztywności mieszanek po starzeniu jest już nawet 2-3 razy większy,
- im wyższa temperatura badania tym mniejszy wpływ starzenia na kąt przesunięcia fazowego,

- wpływ starzenia, zarówno krótko i długoterminowego, na moduł sztywności jest bardziej zauważalny niż wpływ na wartość kąta przesunięcia fazowego,
- w temperaturze od -10 do $+20^{\circ}\text{C}$ różnice w wynikach modułu sztywności mieszanek po starzeniu krótko i długoterminowym były nieduże, dopiero w temperaturze $+30$ i $+40^{\circ}\text{C}$ moduł sztywności mieszanki po starzeniu długoterminowym był wyraźnie większy,
- mieszanka w stanie oryginalnym wykazuje bardziej lepkie zachowanie niż mieszanki po starzeniu, widać to na wykresie Blacka, wykresie Cole-Cole, na wykresach kąta przesunięcia fazowego oraz na wykresach $\text{tg}\phi$, przy czym różnica ta jest widoczna szczególnie w temperaturze powyżej 0°C ,
- im wyższa częstotliwość badania tym mniejsza wartość $\text{tg}\phi$ (wyjątek w temperaturze 40°C) oraz mniejsze różnice tej wielkości pomiędzy mieszankami po starzeniu i w stanie oryginalnym.

8.2.3. Mieszanka BA20 50/70

W załączniku 3 przedstawiono wyniki badań i obliczeń dotyczących mieszanki BA20 50/70:

- tablica 3 zawiera wyniki badań modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego w zależności od temperatury i częstotliwości obciążenia,
- rysunek Z.31 przedstawia wykres Blacka,
- rysunek Z.32 przedstawia wykres Cole-Cole,
- rysunki Z.33-36 przedstawiają opracowane krzywe wiodące modułu sztywności w temperaturach -10 , $+10$, $+30$ oraz $+60^{\circ}\text{C}$,
- rysunki Z.37-40 przedstawiają wykresy kąta przesunięcia fazowego w temperaturach -10 , $+10$, $+30$ oraz $+60^{\circ}\text{C}$,
- rysunki Z.41-43 przedstawiają wykresy $\text{tg}\phi$ w temperaturach -10 , $+10$ oraz $+40^{\circ}\text{C}$,
- rysunki Z.44-45 przedstawiają wykresy $\text{tg}\phi$ w częstotliwości 10 i 1 Hz.

Analizując wyniki badań można stwierdzić, że:

- mieszanki po starzeniu krótko i długoterminowym charakteryzują się wyższym modułem sztywności i mniejszym kątem przesunięcia fazowego niezależnie od temperatury i częstotliwości badania,

- różnice w wynikach mieszanek po starzeniu krótko i długoterminowym są niewielkie, jeżeli porównać je z różnicami mieszanek po starzeniu a mieszanek w stanie oryginalnym,
- im wyższa temperatura badania tym większy wpływ starzenia na moduł sztywności: np. w temperaturze -10°C starzenie powoduje wzrost modułu o około 15-35%, a w temperaturze 30 i 40°C moduł sztywności mieszanek po starzeniu jest już 2-3 razy większy,
- im wyższa temperatura badania tym mniejszy wpływ starzenia na kąt przesunięcia fazowego,
- wpływ starzenia, zarówno krótko i długoterminowego, na moduł sztywności jest bardziej zauważalny niż wpływ na wartość kąta przesunięcia fazowego,
- w temperaturze od -10 do $+20^{\circ}\text{C}$ różnice w wynikach modułu sztywności mieszanek po starzeniu krótko i długoterminowym były nieduże, dopiero w temperaturze $+30$ i $+40^{\circ}\text{C}$ moduł sztywności mieszanki po starzeniu długoterminowym był wyraźnie większy,
- mieszanka w stanie oryginalnym wykazuje bardziej lepkie zachowanie niż mieszanki po starzeniu, widać to na wykresie Blacka, wykresie Cole-Cole, na wykresach kąta przesunięcia fazowego oraz na wykresach $\text{tg}\phi$, przy czym różnica ta jest widoczna szczególnie w temperaturze powyżej 0°C ,
- im wyższa częstotliwość badania tym mniejsza wartość $\text{tg}\phi$ (wyjątek w temperaturze 40°C) oraz mniejsze różnice tej wielkości pomiędzy mieszankami po starzeniu i w stanie oryginalnym.

8.2.4. Mieszanka BA20 30B

W załączniku 3 przedstawiono wyniki badań i obliczeń dotyczących mieszanki BA20 30B:

- tablica 4 zawiera wyniki badań modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego w zależności od temperatury i częstotliwości obciążenia,
- rysunek Z.46 przedstawia wykres Blacka,
- rysunek Z.47 przedstawia wykres Cole-Cole,
- rysunki Z.48-51 przedstawiają opracowane krzywe wiodące modułu sztywności w temperaturach -10 , $+10$, $+30$ oraz $+60^{\circ}\text{C}$,

- rysunki Z.52-55 przedstawiają wykresy kąta przesunięcia fazowego w temperaturach -10, +10, +30 oraz +60°C,
- rysunki Z.56-58 przedstawiają wykresy $\text{tg}\phi$ w temperaturach -10, +10 oraz +40°C,
- rysunki Z.59-60 przedstawiają wykresy $\text{tg}\phi$ w częstotliwości 10 i 1 Hz.

Analizując wyniki badań można stwierdzić, że:

- mieszanki po starzeniu krótko i długoterminowym charakteryzują się wyższym modułem sztywności i mniejszym kątem przesunięcia fazowego niezależnie od temperatury i częstotliwości badania,
- różnice w wynikach mieszanek po starzeniu krótko i długoterminowym zwiększają się wraz ze wzrostem temperatury badania,
- w temperaturze -10 i 0°C różnice w wynikach modułu sztywności mieszanki w stanie oryginalnym i po starzeniu krótkoterminowym są niewielkie (do ok. 8%),
- im wyższa temperatura badania tym większy wpływ starzenia na moduły sztywności: np. w temperaturze -10°C starzenie powoduje wzrost modułu o maksymalnie 17%, a w temperaturze 30 i 40°C moduł sztywności mieszanek po starzeniu jest już nawet 1,5-2 razy większy,
- różnice pomiędzy wartościami kąta przesunięcia fazowego po starzeniu krótko i długoterminowym są stosunkowo niewielkie i zależą od temperatury badania,
- wpływ starzenia, zarówno krótko i długoterminowego, na moduł sztywności jest bardziej zauważalny niż wpływ na wartość kąta przesunięcia fazowego,
- mieszanka w stanie oryginalnym wykazuje bardziej lepkie zachowanie niż mieszanki po starzeniu, widać to na wykresie Blacka, wykresie Cole-Cole, na wykresach kąta przesunięcia fazowego oraz na wykresach $\text{tg}\phi$, przy czym różnica wzrasta wraz z temperaturą,
- im wyższa częstotliwość badania tym mniejsza wartość $\text{tg}\phi$ (wyjątek w temperaturze 40°C).

8.2.5. Mieszanka BA16 35/50

W załączniku 3 przedstawiono wyniki badań i obliczeń dotyczących mieszanki BA16 35/50:

- tablica 5 zawiera wyniki badań modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego w zależności od temperatury i częstotliwości obciążenia,
- rysunek Z.61 przedstawia wykres Blacka,
- rysunek Z.62 przedstawia wykres Cole-Cole,
- rysunki Z.63-66 przedstawiają opracowane krzywe wiodące modułu sztywności w temperaturach -10, +10, +30 oraz +60°C,
- rysunki Z.67-70 przedstawiają wykresy kąta przesunięcia fazowego w temperaturach -10, +10, +30 oraz +60°C,
- rysunki Z.71-73 przedstawiają wykresy $\text{tg}\phi$ w temperaturach -10, +10 oraz +40°C,
- rysunki Z.74-75 przedstawiają wykresy $\text{tg}\phi$ w częstotliwości 10 i 1 Hz.

Analizując wyniki badań można stwierdzić, że:

- mieszanki po starzeniu krótko i długoterminowym charakteryzują się wyższym modułem sztywności i mniejszym kątem przesunięcia fazowego niż mieszanka w stanie oryginalnym niezależnie od temperatury i częstotliwości badania,
- różnice w wynikach mieszanek po starzeniu krótko i długoterminowym są niewielkie, jeżeli porównać je z różnicami mieszanek po starzeniu a mieszanek w stanie oryginalnym,
- im wyższa temperatura badania tym większy wpływ starzenia na moduły sztywności: np. w temperaturze -10°C starzenie powoduje wzrost modułu o maksimum 18%, w temperaturze 10°C wzrost ten wynosi od 22 do 85%, a w temperaturze 30 i 40°C moduł sztywności mieszanek po starzeniu jest już nawet 2-4 razy większy,
- wpływ starzenia na kąt przesunięcia fazowego w temperaturze -10 i +40°C jest większy niż w pozostałych temperaturach,
- wpływ starzenia, zarówno krótko i długoterminowego, na moduł sztywności jest bardziej zauważalny niż wpływ na wartość kąta przesunięcia fazowego,
- różnice w wynikach mieszanek po starzeniu krótko i długoterminowym zwiększają się wraz ze wzrostem temperatury badania,
- mieszanka w stanie oryginalnym wykazuje bardziej lepkie zachowanie niż mieszanki po starzeniu, widać to na wykresie Blacka, wykresie Cole-Cole, na

wykresach kąta przesunięcia fazowego oraz na wykresach $\text{tg}\phi$, przy czym różnica ta jest widoczna szczególnie w temperaturze powyżej 0°C ,

- im wyższa częstotliwość badania tym mniejsza wartość $\text{tg}\phi$ (wyjątek mieszanka w stanie oryginalnym w temperaturze 40°C).

8.2.6. Mieszanka BA16 50/70

W załączniku 3 przedstawiono wyniki badań i obliczeń dotyczących mieszanki BA16 50/70:

- tablica 6 zawiera wyniki badań modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego w zależności od temperatury i częstotliwości obciążenia,
- rysunek Z.76 przedstawia wykres Blacka,
- rysunek Z.77 przedstawia wykres Cole-Cole,
- rysunki Z.78-81 przedstawiają opracowane krzywe wiodące modułu sztywności w temperaturach -10 , $+10$, $+30$ oraz $+60^{\circ}\text{C}$,
- rysunki Z.82-85 przedstawiają wykresy kąta przesunięcia fazowego w temperaturach -10 , $+10$, $+30$ oraz $+60^{\circ}\text{C}$,
- rysunki Z.86-88 przedstawiają wykresy $\text{tg}\phi$ w temperaturach -10 , $+10$ oraz $+40^{\circ}\text{C}$,
- rysunki Z.89-90 przedstawiają wykresy $\text{tg}\phi$ w częstotliwości 10 i 1 Hz.

Analizując wyniki badań można stwierdzić, że:

- mieszanki po starzeniu krótko i długoterminowym charakteryzują się wyższym modułem sztywności i mniejszym kątem przesunięcia fazowego niezależnie od temperatury i częstotliwości badania,
- różnice w wynikach mieszanek po starzeniu krótko i długoterminowym są niewielkie, jeżeli porównać je z różnicami mieszanek po starzeniu a mieszanek w stanie oryginalnym,
- im wyższa temperatura badania tym większy wpływ starzenia na moduły sztywności: np. w temperaturze -10°C starzenie powoduje wzrost modułu o maksymalnie około 25%, a w temperaturze 30 i 40°C moduł sztywności mieszanek po starzeniu jest już 2-3,5 razy większy,
- wpływ starzenia, zarówno krótko i długoterminowego, na moduł sztywności jest bardziej zauważalny niż wpływ na wartość kąta przesunięcia fazowego,

- w temperaturze od -10 do $+10^{\circ}\text{C}$ różnice w wynikach modułu sztywności mieszanek po starzeniu krótko i długoterminowym były nieduże, dopiero w temperaturze powyżej $+20^{\circ}\text{C}$ moduł sztywności mieszanki po starzeniu długoterminowym był wyraźnie większy, przy czym różnica jest wprost proporcjonalna do temperatury,
- mieszanka w stanie oryginalnym wykazuje bardziej lepkie zachowanie niż mieszanki po starzeniu, widać to na wykresie Blacka, wykresie Cole-Cole, na wykresach kąta przesunięcia fazowego oraz na wykresach $\text{tg}\phi$, przy czym różnica ta wzrasta wraz z temperaturą,
- im wyższa częstotliwość obciążenia w danej temperaturze tym mniejsza wartość $\text{tg}\phi$ oraz mniejsze różnice tej wielkości pomiędzy mieszankami po starzeniu i oryginalnymi (wyjątek w temperaturze 40°C).

8.2.7. Mieszanka BA16 30B

W załączniku 3 przedstawiono wyniki badań i obliczeń dotyczących mieszanki BA16 30B:

- tablica 7 zawiera wyniki badań modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego w zależności od temperatury i częstotliwości obciążenia,
- rysunek Z.91 przedstawia wykres Blacka,
- rysunek Z.92 przedstawia wykres Cole-Cole,
- rysunki Z.93-96 przedstawiają opracowane krzywe wiodące modułu sztywności w temperaturach -10 , $+10$, $+30$ oraz $+60^{\circ}\text{C}$,
- rysunki Z.97-100 przedstawiają wykresy kąta przesunięcia fazowego w temperaturach -10 , $+10$, $+30$ oraz $+60^{\circ}\text{C}$,
- rysunki Z.101-103 przedstawiają wykresy $\text{tg}\phi$ w temperaturach -10 , $+10$ oraz $+40^{\circ}\text{C}$,
- rysunki Z.104-105 przedstawiają wykresy $\text{tg}\phi$ w częstotliwości 10 i 1 Hz.

Analizując wyniki badań można stwierdzić, że:

- mieszanki po starzeniu krótko i długoterminowym charakteryzują się wyższym modułem sztywności i mniejszym kątem przesunięcia fazowego niezależnie od temperatury i częstotliwości badania,

- różnice w wynikach mieszanek po starzeniu krótko i długoterminowym zwiększają się wraz ze wzrostem temperatury badania,
- w temperaturze -10°C różnice w wynikach modułu sztywności mieszanki w stanie oryginalnym i po starzeniu krótkoterminowym są niewielkie (do ok. 2%),
- im wyższa temperatura badania tym większy wpływ starzenia na moduły sztywności: np. w temperaturze -10°C starzenie powoduje wzrost modułu o maksymalnie 11%, a w temperaturze 30 i 40°C moduł sztywności mieszanek po starzeniu jest już nawet 1,5-2,5 razy większy,
- różnice pomiędzy wartościami kąta przesunięcia fazowego po starzeniu krótko i długoterminowym są stosunkowo niewielkie i zależą od temperatury badania,
- wpływ starzenia, zarówno krótko i długoterminowego, na moduł sztywności jest lepiej zauważalny niż wpływ na wartość kąta przesunięcia fazowego,
- mieszanka w stanie oryginalnym wykazuje bardziej lepkie zachowanie niż mieszanki po starzeniu, widać to na wykresie Blacka, wykresie Cole-Cole, na wykresach kąta przesunięcia fazowego oraz na wykresach $\text{tg}\phi$, przy czym różnica wzrasta wraz z temperaturą,
- im wyższa częstotliwość badania tym mniejsza wartość $\text{tg}\phi$ (wyjątek w temperaturze 40°C),
- w temperaturze -10°C mieszanka po starzeniu krótkoterminowym charakteryzuje się bardzo zbliżonymi właściwościami do mieszanki w stanie oryginalnym (moduł sztywności, $\text{tg}\phi$).

8.2.8. Mieszanka SMA8 35/50

W załączniku 3 przedstawiono wyniki badań i obliczeń dotyczących mieszanki SMA8 35/50:

- tablica 8 zawiera wyniki badań modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego w zależności od temperatury i częstotliwości obciążenia,
- rysunek Z.106 przedstawia wykres Blacka,
- rysunek Z.107 przedstawia wykres Cole-Cole,
- rysunki Z.108-111 przedstawiają opracowane krzywe wiodące modułu sztywności w temperaturach -10 , $+10$, $+30$ oraz $+60^{\circ}\text{C}$,
- rysunki Z.112-115 przedstawiają wykresy kąta przesunięcia fazowego w temperaturach -10 , $+10$, $+30$ oraz $+60^{\circ}\text{C}$,

- rysunki Z.116-118 przedstawiają wykresy $\text{tg}\phi$ w temperaturach -10 , $+10$ oraz $+40^{\circ}\text{C}$,
- rysunki Z.119-120 przedstawiają wykresy $\text{tg}\phi$ w częstotliwości 10 i 1 Hz.

Analizując wyniki badań można stwierdzić, że:

- mieszanki po starzeniu krótko i długoterminowym charakteryzują się wyższym modułem sztywności i mniejszym kątem przesunięcia fazowego niezależnie od temperatury i częstotliwości badania,
- różnice w wynikach mieszanek po starzeniu krótko i długoterminowym są niewielkie, jeżeli porównać je z różnicami mieszanek po starzeniu a mieszanek w stanie oryginalnym, przy czym wzrastają wprost proporcjonalnie do temperatury,
- w niskiej temperaturze (od -10 do 0°C) różnice w wynikach modułów sztywności mieszanek mineralno-asfaltowych po starzeniu krótko i długoterminowym są nieznaczne,
- im wyższa temperatura badania tym większy wpływ starzenia na moduły sztywności: np. w temperaturze -10°C starzenie powoduje wzrost modułu o około 10-20%, a w temperaturze 30 i 40°C moduł sztywności mieszanek po starzeniu jest już 2-3 razy większy,
- wpływ temperatury na zmianę po starzeniu kąta przesunięcia fazowego nie jest jednoznaczny,
- wpływ starzenia, zarówno krótko i długoterminowego, na moduł sztywności jest bardziej zauważalny niż wpływ na wartość kąta przesunięcia fazowego,
- mieszanka w stanie oryginalnym wykazuje bardziej lepkie zachowanie niż mieszanki po starzeniu, widać to na wykresie Blacka, wykresie Cole-Cole, na wykresach kąta przesunięcia fazowego oraz na wykresach $\text{tg}\phi$, przy czym różnica ta jest widoczna szczególnie w temperaturze powyżej 0°C ,
- im wyższa częstotliwość badania tym mniejsza wartość $\text{tg}\phi$ oraz mniejsze różnice tej wielkości pomiędzy mieszankami po starzeniu i w stanie oryginalnym (wyjątek w temperaturze 40°C).

8.2.9. Mieszanka SMA8 50/70

W załączniku 3 przedstawiono wyniki badań i obliczeń dotyczących mieszanki SMA8 50/70:

- tablica 9 zawiera wyniki badań modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego w zależności od temperatury i częstotliwości obciążenia,
- rysunek Z.121 przedstawia wykres Blacka,
- rysunek Z.122 przedstawia wykres Cole-Cole,
- rysunki Z.123-126 przedstawiają opracowane krzywe wiodące modułu sztywności w temperaturach -10, +10, +30 oraz +60°C,
- rysunki Z.127-130 przedstawiają wykresy kąta przesunięcia fazowego w temperaturach -10, +10, +30 oraz +60°C,
- rysunki Z.131-133 przedstawiają wykresy $\text{tg}\phi$ w temperaturach -10, +10 oraz +40°C,
- rysunki Z.134-135 przedstawiają wykresy $\text{tg}\phi$ w częstotliwości 10 i 1 Hz.

Analizując wyniki badań można stwierdzić, że:

- mieszanki po starzeniu krótko i długoterminowym charakteryzują się wyższym modułem sztywności i mniejszym kątem przesunięcia fazowego niezależnie od temperatury i częstotliwości badania,
- różnice w wynikach mieszanek po starzeniu krótko i długoterminowym są niewielkie, jeżeli porównać je z różnicami mieszanek po starzeniu a mieszanek w stanie oryginalnym, przy czym wzrastają wprost proporcjonalnie do temperatury,
- w niskiej temperaturze (od -10 do 0°C) różnice w wynikach modułów sztywności mieszanek mineralno-asfaltowych po starzeniu krótko i długoterminowym są nieznaczne,
- im wyższa temperatura badania tym większy wpływ starzenia na moduły sztywności: np. w temperaturze -10°C starzenie powoduje wzrost modułu o około 10-30%, a w temperaturze 30 i 40°C moduł sztywności mieszanek po starzeniu jest już 2-5 razy większy,
- wpływ temperatury na zmianę po starzeniu kąta przesunięcia fazowego nie jest jednoznaczny,
- wpływ starzenia, zarówno krótko i długoterminowego, na moduł sztywności jest bardziej zauważalny niż wpływ na wartość kąta przesunięcia fazowego,
- mieszanka w stanie oryginalnym wykazuje bardziej lepkie zachowanie niż mieszanka po starzeniu, widać to na wykresie Blacka, wykresie Cole-Cole, na

wykresach kąta przesunięcia fazowego oraz na wykresach $\text{tg}\phi$, przy czym różnica ta jest widoczna szczególnie w temperaturze powyżej 0°C ,

- im wyższa częstotliwość badania tym mniejsza wartość $\text{tg}\phi$ oraz mniejsze różnice tej wielkości pomiędzy mieszankami po starzeniu i stanie oryginalnym (wyjątek w temperaturze 40°C).

8.2.10. Mieszanka SMA8 30B

W załączniku 3 przedstawiono wyniki badań i obliczeń dotyczących mieszanki SMA8 30B:

- tablica 10 zawiera wyniki badań modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego w zależności od temperatury i częstotliwości obciążenia,
- rysunek Z.136 przedstawia wykres Blacka,
- rysunek Z.137 przedstawia wykres Cole-Cole,
- rysunki Z.138-141 przedstawiają opracowane krzywe wiodące modułu sztywności w temperaturach -10 , $+10$, $+30$ oraz $+60^{\circ}\text{C}$,
- rysunki Z.142-145 przedstawiają wykresy kąta przesunięcia fazowego w temperaturach -10 , $+10$, $+30$ oraz $+60^{\circ}\text{C}$,
- rysunki Z.146-148 przedstawiają wykresy $\text{tg}\phi$ w temperaturach -10 , $+10$ oraz $+40^{\circ}\text{C}$,
- rysunki Z.149-150 przedstawiają wykresy $\text{tg}\phi$ w częstotliwości 10 i 1 Hz.

Analizując wyniki badań można stwierdzić, że:

- mieszanki po starzeniu krótko i długoterminowym charakteryzują się wyższym modułem sztywności i mniejszym kątem przesunięcia fazowego niezależnie od temperatury i częstotliwości badania,
- różnice w wynikach mieszanek po starzeniu krótko i długoterminowym są niewielkie, jeżeli porównać je z różnicami mieszanek po starzeniu a mieszanek w stanie oryginalnym, przy czym wzrastają wprost proporcjonalnie do temperatury,
- w niskiej temperaturze -10°C różnice w wynikach modułów sztywności mieszanek mineralno-asfaltowych po starzeniu krótko i długoterminowym są nieznaczne,
- im wyższa temperatura badania tym większy wpływ starzenia na moduły sztywności: np. w temperaturze -10°C starzenie powoduje wzrost modułu o około

3-7%, a w temperaturze 30 i 40°C moduł sztywności mieszanek po starzeniu jest już 1,5-2 razy większy,

- wpływ temperatury na zmianę po starzeniu kąta przesunięcia fazowego nie jest jednoznaczny,
- wpływ starzenia, zarówno krótko i długoterminowego, na moduł sztywności jest bardziej zauważalny niż wpływ na wartość kąta przesunięcia fazowego,
- mieszanka w stanie oryginalnym wykazuje bardziej lepkie zachowanie niż mieszanki po starzeniu, widać to na wykresie Blacka, wykresie Cole-Cole, na wykresach kąta przesunięcia fazowego oraz na wykresach $\text{tg}\phi$, przy czym różnica ta jest widoczna szczególnie w temperaturze powyżej 0°C,
- im wyższa częstotliwość badania tym mniejsza wartość $\text{tg}\phi$ oraz mniejsze różnice tej wielkości pomiędzy mieszankami po starzeniu i w stanie oryginalnym (wyjątek w temperaturze 40°C).

8.3. Analiza wpływu starzenia na moduł zespolony mieszanki mineralno-asfaltowej w zależności od rodzaju i typu asfaltu

Analizę przeprowadzono na przykładzie mieszanki BA20 z asfaltami drogowymi 20/30, 35/50 i 50/70 oraz elastomeroasfaltem 30B. Przeanalizowano wyniki w trzech temperaturach: -10, 10 i 40°C, w dwóch częstotliwościach: 1 i 10Hz. W załączniku 3 na rysunkach 151-162 przedstawiono wykresy modułów sztywności, kąta przesunięcia fazowego oraz procentowych zmian tych wielkości.

Analizując wyniki w temperaturze -10°C można stwierdzić, że:

- wyniki modułu sztywności mieszanek mineralno-asfaltowych w stanie oryginalnym i po starzeniu krótkoterminowym różnią się od siebie nieznacznie, dopiero po starzeniu długoterminowym obserwuje się znaczny wzrost modułu sztywności,
- przyrost modułu sztywności po starzeniu długoterminowym jest wprost proporcjonalny do twardości asfaltu,
- mieszanki mineralno-asfaltowe z asfaltem 30B charakteryzowały się korzystnie najmniejszym przyrostem modułu sztywności, zmiany kąta przesunięcia fazowego były zbliżone do zmian w przypadku mieszanek z asfaltem 35/50 i 50/70,

- wartości kąta przesunięcia fazowego są mało zróżnicowane, można zauważyć, że mieszanka mineralno-asfaltowa z najtwardszym asfaltem charakteryzowała się wyraźnie najmniejszym kątem przesunięcia fazowego (najbardziej sprężyste zachowanie) i największym spadkiem kąta przesunięcia fazowego po starzeniu długoterminowym,

Analizując wyniki w temperaturze +10°C można stwierdzić, że:

- moduł sztywności mieszanki mineralno-asfaltowej zależy wprost proporcjonalnie od twardości asfaltu, niezależnie od stanu mieszanki mineralno-asfaltowej i częstotliwości obciążenia,
- zmiany modułu sztywności po starzeniu krótkoterminowym są małe w porównaniu ze zmianami po starzeniu długoterminowym,
- kąt przesunięcia fazowego zależy odwrotnie proporcjonalnie od twardości asfaltu, jednocześnie im twardszy asfalt tym większy spadek kąta przesunięcia fazowego po starzeniu,
- moduł sztywności i kąt przesunięcia fazowego mieszanek z asfaltem 30B były zbliżone do wyników mieszanki z asfaltem 35/50,
- mieszanka z elastomeroasfaltem 30B odznaczała się relatywnie najmniejszymi zmianami modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego po starzeniu,
- mieszanka mineralno-asfaltowa z asfaltem 20/30 uzyskała największe przyrosty modułu sztywności po starzeniu,

Analizując wyniki w temperaturze +40°C można stwierdzić, że:

- moduł sztywności mieszanki mineralno-asfaltowej zależy wprost proporcjonalnie od twardości asfaltu, niezależnie od stanu mieszanki mineralno-asfaltowej i częstotliwości obciążenia,
- moduł sztywności i kąt przesunięcia fazowego mieszanek z asfaltem 30B były zbliżone do wyników mieszanki z asfaltem 35/50,
- mieszanki z elastomeroasfaltem 30 B charakteryzowały się najmniejszą wrażliwością na starzenie w zakresie zmian modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego
- im twardsze lepiszczce tym mniejszy przyrost modułu sztywności i większy spadek kąta przesunięcia fazowego po starzeniu krótkoterminowym, po starzeniu długoterminowym zależność ta nie jest już jednoznaczna.

8.4. Analiza wpływu starzenia na moduł zespolony w zależności od typu i uziarnienia mieszanki

Analizę przeprowadzono na przykładzie mieszanek SMA8, BA16 i BA20 z asfaltem 35/50. Przeanalizowano wyniki w trzech temperaturach: -10, 10 i 40°C, w dwóch częstotliwościach: 1 i 10Hz. W załączniku 3 na rysunkach 163-174 przedstawiono wykresy modułów sztywności, kąta przesunięcia fazowego oraz procentowych zmian tych wielkości.

Analizując wyniki w temperaturze -10°C można stwierdzić, że:

- mieszanki charakteryzują się zróżnicowanymi wartościami modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego,
- mieszanka SMA jest bardziej wrażliwa na starzenie krótkoterminowe: przyrost modułu sztywności oraz spadek wartości kąta przesunięcia są większe niż w przypadku mieszanek BA,
- mieszanka SMA jest bardziej wrażliwa na starzenie długoterminowe w zakresie zmian kąta przesunięcia: spadek wartości kąta przesunięcia jest większy niż w przypadku mieszanek BA, natomiast przyrost modułu sztywności jest mniejszy,
- wpływ starzenia krótkoterminowego jest różny dla mieszanek BA16 i BA20, natomiast zmiany w wynikach modułu zespolonego tych mieszanek po starzeniu długoterminowym są do siebie zbliżone,

Analizując wyniki w temperaturze +10°C można stwierdzić, że:

- mieszanki charakteryzują się zróżnicowanymi wartościami modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego,
- mieszanka SMA niezależnie od, częstotliwości obciążenia i stanu mieszanki charakteryzuje się niższym modułem sztywności i większym kątem przesunięcia fazowego,
- po starzeniu krótkoterminowym największe zmiany modułu zespolonego zaszły w mieszance SMA a najmniejsze w mieszance BA20,
- największy wpływ starzenia długoterminowego zaobserwowano w mieszance BA16, a najmniejszy w mieszance BA20.

Analizując wyniki w temperaturze +40°C można stwierdzić, że:

- mieszanki charakteryzują się zróżnicowanymi wartościami modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego,

- mieszanka SMA niezależnie od częstotliwości obciążenia i stanu mieszanki charakteryzuje się niższym modułem sztywności i większym kątem przesunięcia fazowego,
- mieszanka SMA jest bardziej wrażliwa na starzenie niż mieszanka BA20, a mniej niż mieszanka BA16,
- mieszanka BA16 jest bardziej podatna na starzenie niż mieszanka BA20.

9. Podsumowanie i wnioski

W ramach niniejszej pracy przeprowadzono szerokie badania wpływu starzenia krótko i długoterminowego na właściwości asfaltów (zespolony moduł ścinania) oraz właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych (zespolony moduł sztywności, wytrzymałość na rozciąganie pośrednie). Przedstawione wyniki badań mieszanek mineralno-asfaltowych stanowią charakterystykę wpływu procesów starzenia na ich podstawowe właściwości. Wśród najważniejszych wniosków z pracy należy wymienić następujące:

asfalty

- im twardszy asfalt tym większy względny przyrost modułu G^* po starzeniu PAV (większe usztywnienie),
- zmiany modułu G^* po starzeniu RTFOT są zbliżone dla wszystkich asfaltów, wyraźne różnice są widoczne dopiero po starzeniu PAV,
- elastomeroasfalt po starzeniu RTFOT wykazuje większe zmiany w wynikach DSR, a po starzeniu PAV najmniejsze: ulega mniejszemu usztywnieniu (mniejszy wzrost modułu G^*) i mniejszej utracie części lepkiej (mniejszy spadek kąta przesunięcia fazowego),

mieszanki mineralno-asfaltowe

- na skutek procesu starzenia następuje wzrost wytrzymałości na rozciąganie pośrednie,
- wyniki badania wytrzymałości na rozciąganie pośrednie po kondycjonowaniu wskazują na różnice we wpływie starzenia na właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych w porównaniu z próbkami niekondycjonowanymi,

- w temperaturze -10°C mieszanki z asfaltem 30B wyróżniają się w porównaniu z mieszankami z asfaltami drogowymi najmniejszym przyrostem modułu sztywności po starzeniu długoterminowym i przy jednocześnie zbliżonych wartościach zmiany kąta przesunięcia fazowego,
- w wyższej temperaturze mieszanki z asfaltem 30B charakteryzują się mniejszymi zmianami wartości modułu sztywności i kąta przesunięcia fazowego po starzeniu,
- wpływ procesu starzenia na zmianę modułu sztywności (usztynwienie) i zmianę kąta przesunięcia fazowego (bardziej sprężyste zachowanie) zależy od rodzaju asfaltu: im twardszy asfalt tym większe zmiany,
- im wyższa temperatura badania tym większy względny przyrost modułu sztywności po starzeniu krótkoterminowym i długoterminowym,
- wpływ starzenia zależy również od częstotliwości obciążenia: im niższa częstotliwość tym większy względny przyrost modułu sztywności i mniejszy spadek kąta przesunięcia fazowego,
- wpływ starzenia, zarówno krótko i długoterminowego, na moduł sztywności jest bardziej zauważalny niż wpływ na wartość kąta przesunięcia fazowego,
- w niskiej temperaturze starzenie długoterminowe nie powoduje znacznego zwiększenia modułu sztywności w porównaniu do starzenia krótkoterminowego (SMA35/50, 30B),
- mieszanka typu SMA jest bardziej wrażliwa na starzenie niż beton asfaltowy BA20 z tym samym lepiszczem,
- mieszanka BA16 jest bardziej podatna na starzenie niż mieszanka BA20.

Przedstawione wnioski świadczą o tym, że wpływ procesu starzenia na właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych jest złożony i zależy od różnych czynników: od rodzaju i typu asfaltu, typu mieszanki mineralno-asfaltowej oraz warunków badania (temperatura, częstotliwość). Badania próbek poddanych kondycjonowaniu do badań wodoodporności wskazują, że analiza wpływu procesu starzenia powinna również uwzględniać wpływ oddziaływania wody i niskiej temperatury. Ocena wpływu procesu starzenia na właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych i wykonanych z nich nawierzchni zależy od cechy jaką rozpatrujemy. Można założyć, że usztynwienie mieszanki mineralno-asfaltowej (większy moduł sztywności, większa wytrzymałość na rozciąganie) spowoduje zwiększenie odporności

na koleinowanie oraz zwiększenie nośności nawierzchni. Z drugiej strony z uwagi na większą „kruchość” mieszanki i mniej „lepkie” zachowanie (mniejszy kąt przesunięcia fazowego) można spodziewać się gorszej odporności na spękania (niskotemperaturowe, odbite) oraz mniejszej trwałości zmęczeniowej. Z tego powodu praca powinna być kontynuowana w celu określenia wpływu starzenia na właściwości funkcjonalne (koleinowanie, zmęczenie, odporność niskotemperaturowa) oraz oceny wpływu zmienności podstawowych właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych na podatność na starzenie.

-
- 1** Sybilski D.: „Jakościowa ocena funkcjonalna asfaltów drogowych”, Prace IBDiM 4/1990
 - 2** PN-EN 12607-1:2004 Asfalty i produkty asfaltowe. Odporność na twarzenie RTFOT
 - 3** ASTM D6521-00 Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV)
 - 4** AASHTO TP5-98 - Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)
 - 5** Sybilski D.: „Zastosowanie metod SHRP do oceny nawierzchni dróg w Polsce”, Studia i materiały IBDiM Zeszyt 50/2000
 - 6** Zawadzki J., Chałaczkiwicz E., Pałys M., Skierczyński P: “Procedury badań do projektowania składu i kontroli mieszanek mineralno-asfaltowych”. Informacje, Instrukcje – Zeszyt 64, IBDiM, Warszawa 2002
 - 7** Zawadzki J., Pałys M., Sybilski D.: “Zasady wykonywania nawierzchni z mieszanki SMA”. Informacje, Instrukcje – Zeszyt 62, IBDiM, Warszawa 2001
 - 8** SHRP A-383: „Selection of Laboratory Aging Procedures for Asphalt-Aggregate Mixtures” - 1994
 - 9** AASHTO T-283: „Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage” - 1993
 - 10** AASHTO TP8-94:” Standard test method for determining the fatigue life of compacted hot mix asphalt (HMA) subjected to repeated flexural bending”
 - 11** Pellinen T.K.: „Investigation of the use of dynamic modulus as an indicator of hot-mix asphalt performance,, Arizona State University, 2001
 - 12** Sybilski D.: ”Wyznaczanie krzywej wiodącej mieszanki mineralno-asfaltowej”, IV Międzynarodowa Konferencja "Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe", Kielce 1998