



ADAM LIPHARDT<sup>1)</sup>  
PIOTR RADZISZEWSKI<sup>2)</sup>

## ANALYSIS OF VISCOELASTIC PROPERTIES OF BINDERS RECOVERED FROM BITUMINOUS MIXTURES CONTAINING ADDITION OF RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT

## ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI LEPKOSPĘŻYSTYCH LEPI SZCZY ODZYSKANYCH Z MIESZANEK ZAWIERAJĄCYCH DODATEK GRANULATU ASFALTOWEGO

**STRESZCZENIE.** W artykule przedstawiono badania właściwości reologicznych oraz właściwości normowych lepiszczy odzyskanych z mieszanki mineralno-asfaltowej zawierającej standardową oraz zwiększoną zawartość granulatu asfaltowego. Wykonano oznaczenia penetracji, temperatury mięknięcia, lepkości dynamicznej, zespolonego modułu sztywności oraz kąta przesunięcia fazowego. Przeprowadzono także badanie cyklicznego pełzania z odprężeniem. Ocenie poddano wpływ świeżego lepiszcza modyfikowanego na zmianę właściwości twardego lepiszcza z granulatu asfaltowego. Wykazano, że zwiększenie zawartości granulatu asfaltowego w mieszance mineralno-asfaltowej w istotny sposób wpływa na właściwości lepkospężyste mieszaniny asfaltu z granulatu ze świeżym lepiszczem asfaltowym. Stwierdzono, że zwiększenie zawartości świeżego lepiszcza w postaci polimero-asfaltu wpływa na zmianę właściwości badanej mieszaniny lepiszczy zarówno w wysokich jak i w niskich temperaturach eksploatacyjnych. Wykazano również, że ze względu na starzenie technologiczne, właściwości mieszaniny lepiszczy zasadniczo różnią się od obliczonych na podstawie obowiązujących dokumentów technicznych.

**SŁOWA KLUCZOWE:** granulatu asfaltowy, lepiszcza asfaltowe, lepkość dynamiczna, MSCR, odświeżanie lepiszcza, zespolony moduł ścinania.

**ABSTRACT.** The paper presents tests of the rheological and standard properties of binders recovered from asphalt mixtures containing respectively a standard amount and an increased amount of reclaimed asphalt pavement (RAP). The penetration grade, the softening point, the dynamic viscosity, the complex shear modulus and the phase angle were determined. Also the multiple stress creep recovery (MSCR) test was carried out. The effect of a fresh modified binder on the properties of the hard binder recovered from RAP was assessed. It has been shown that when the RAP content in the asphalt mixture is increased, this has a significant effect on the viscoelastic properties of the mixture of the binder recovered from RAP and the fresh bituminous binder. It has been found that when the fresh polymer-modified binder content is increased, the properties of the tested binder mixture change at both high and low service temperatures. It has been also shown that due to short-term ageing the properties of the binder mixture differ significantly from the ones calculated on the basis of the applicable technical documents.

**KEYWORDS:** asphalt binders, complex shear modulus, dynamic viscosity, MSCR (multiple stress creep recovery), RAP (reclaimed asphalt pavement), refreshing binders.

DOI: 10.7409/rabdim.019.003

<sup>1)</sup> Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut Dróg i Mostów, Zakład Technologii Materiałów i Nawierzchni Drogowych, Aleja Armii Ludowej 16, 00-637 Warszawa; a.liphardt@il.pw.edu.pl (✉)

<sup>2)</sup> Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut Dróg i Mostów, Zakład Technologii Materiałów i Nawierzchni Drogowych; p.radziszewski@il.pw.edu.pl

## 1. WSTĘP

Lepiszczce asfaltowe zawarte w destrukcie/granulacie jest materiałem, który podlegał procesom starzenia technologicznego i eksploatacyjnego [1-4], zatem zazwyczaj charakteryzuje się on większą sztywnością niż lepiszczce świeże stosowane w mieszance mineralno-asfaltowej. Zwiększona sztywność lepiszcza wpływa pozytywnie na odporność na deformacje trwałe w zakresie wysokich temperatur eksploatacyjnych jednocześnie pogarszając odporność na spękania powstające na skutek skurczu indukowanego termicznie [5, 6]. Destrukt asfaltowy jest bardzo cennym materiałem, który może być z powodzeniem stosowany w nowych mieszankach mineralno-asfaltowych. Określając maksymalną ilość destruktu asfaltowego możliwą do zastosowania w nowej mieszance powinno uwzględniać się parametry zestawionego lepiszcza biorąc pod uwagę ewentualne możliwości jego odświeżenia. Obecnie obowiązujące w Polsce wymagania w zakresie właściwości mieszanin lepiszczy w mieszankach z granulatem asfaltowym zakładają jedynie określenie wartości temperatury mięknięcia takiej mieszaniny [7]. Norma PN-EN 13108-1 określa również sposób wyznaczenia penetracji mieszaniny lepiszczy. Natomiast nie są brane pod uwagę właściwości funkcjonalne mieszaniny lepiszczy określane w temperaturach eksploatacyjnych i technologicznych co przy nieodpowiednim doborze proporcji obydwu lepiszczy może potencjalnie prowadzić do powstawania uszkodzeń nawierzchni. W mieszankach mineralno-asfaltowych, które w swoim składzie zawierają destrukt bądź granulak asfaltowy, w większości przypadków lepiszczce asfaltowe występuje w postaci mniej lub bardziej jednorodnej mieszaniny asfaltu świeżego oraz asfaltu pochodzącego z destruktu/granulatu [8, 9]. Proporcje obydwu lepiszczy zależą od procentowego udziału granulatu asfaltowego w mieszance mineralno-asfaltowej oraz od zawartości lepiszcza w granulacie.

W pracy przedstawiono wyniki kompleksowych badań lepiszcza odzyskanego z mieszanki mineralno-asfaltowej zawierającej granulak asfaltowy. Oceniano zarówno wpływ charakterystycznych cech lepiszcza z granulatu jak również lepiszcza świeżego na parametry mieszaniny, w szerokim zakresie temperatur technologicznych i eksploatacyjnych. W badaniach uwzględniono różne proporcje obydwu lepiszczy a uzyskane wyniki odniesiono do właściwości lepiszcza odzyskanego z mieszanki referencyjnej nie zawierającej granulatu asfaltowego.

## 1. INTRODUCTION

The asphalt binder contained in reclaimed asphalt pavement (RAP) is a binder which had undergone short-term and long-term ageing [1-4]. Consequently, it is usually characterized by greater stiffness than the fresh binder used in the asphalt mixture. The increased stiffness of the binder contributes to greater resistance to permanent deformation at high operating temperatures while weakening the resistance to cracking caused by thermally induced shrinkage [5, 6]. RAP is a highly valuable material which can well be used in new asphalt mixtures. When determining the maximum possible amount of RAP to be used in a new mixture one should take into account the parameters of the aged binder and consider refreshing it. In Poland the current requirements concerning the properties of binder mixtures to be used in asphalt mixtures with RAP specify only that the softening point of such a mixture must be determined [7]. Standard PN-EN 13108-1 also specifies how the penetration grade of a binder mixture should be determined. But the functional properties of the binder mixture at the operating and production temperatures are not taken into consideration, which, if the proportions of the two binders are improper, can lead to pavement damage. In asphalt mixtures containing RAP the bituminous binder in most cases occurs in the form of a more or less homogenous mixture of fresh binder and binder from RAP [8, 9]. The proportions of the two binders depend on the percentage of RAP in the asphalt mixture and on the binder content in the RAP.

The paper presents the results of comprehensive tests carried out on the binder recovered from an asphalt mixture containing RAP. The effect of the characteristics of the binder recovered from RAP and those of a fresh binder on the parameters of the mixture was assessed in a wide range of production and operating temperatures. Various proportions of the two binders were used in the tests and the test results were compared with the properties of the binder recovered from a reference mixture without RAP.

## 2. CHARACTERISTIC OF MATERIALS AND TEST METHODS

### 2.1. CHARACTERISTIC OF MATERIALS USED

The binder recovered from an AC 22 asphalt mixture was subjected to analysis. The mixture contained polymer-modified bitumen PMB 25/55-60, used as the fresh binder, virgin aggregate (in the form of limestone chip-

## 2. CHARAKTERYSTYKA MATERIAŁÓW I METODYKA BADAŃ

### 2.1. CHARAKTERYSTYKA WYKORZYSTANYCH MATERIAŁÓW

Analizom poddano lepiszcze odzyskane z mieszanki mineralno-asfaltowej typu AC 22 P. W mieszance zastosowano polimeroasfalt PMB 25/55-60 pełniący rolę lepiszcza świeżego, kruszywo doziarniające w postaci grysów, piasku oraz wypełniaczy ze skał wapiennych oraz granulatu asfaltowy pochodzący z frezowania warstwy ścieralnej i wiążącej w ilościach 0%, 20%, 40% i 60%. Podstawowe właściwości normowe charakteryzujące zastosowane lepiszcza (świeże oraz z granulatu) przedstawiono w Tabl. 1. Całkowita zawartość lepiszcza w mieszance AC22P wynosiła 3,9%, natomiast średnia zawartość asfaltu w użytym granulacie asfaltowym 4,9%.

Table 1. Properties of binders applied in tests  
Tablica 1. Właściwości lepiszczy zastosowanych w badaniach

Binder type Rodzaj lepiszcza	Binder properties / Właściwości lepiszcza						
	Pen grade at 25°C [0.1 mm] Penetracja w 25°C	Softening point [°C] Temperatura mięknienia	Breaking point [°C] Temperatura łamlności	Dynamic viscosity at a temperature [Pa·s] Lepkość dynamiczna w temperaturze			Elastic recovery at 25°C [%] Nawrót sprężysty w 25°C
				90°C	110°C	135°C	
PMB 25/55-60	35	65.0	-21.3	126.6	14.2	2.2	82
From RAP Z granulatu asfaltowego	16	68.5	-3.3	116.6	13.8	2.0	38

### 2.2. METODYKA BADAŃ

Mieszanki mineralno-asfaltowe wytworzone zostały w warunkach laboratoryjnych w technologii dozowania granulatu asfaltowego na gorąco. Wytworzono mieszanki o zawartości granulatu 0%, 20%, 40% i 60%. Mieszanki poddano procesowi ekstrakcji w celu odzyskania lepiszcza asfaltowego. Z wyekstrahowanego roztworu lepiszcza odzyskiwano asfalt przy użyciu wyparki próżniowej. Następnie asfalty odzyskane z każdej z mieszanek poddane zostały podstawowym badaniom normowym oraz funkcjonalnym w celu oceny wpływu zmiennej zawartości lepiszcza z granulatu oraz lepiszcza świeżego na właściwości mieszaniny lepiszczy. W zakresie właściwości normowych wykonano następujące oznaczenia:

- penetracji w 25°C wg PN-EN 1426:2009,
- temperatury mięknienia metodą pierścienia i kuli wg PN-EN 1427:2009,

pings, sand and fillers) and RAP coming from the milling of the wearing course and the binder course, in the amount: 0%, 20%, 40% and 60%. The basic standard quantities characterizing the binders (the fresh binder and the binder obtained from the RAP) are presented in Table 1. The total binder content in the AC 22 P mixture amounted to 3.9% while the average bitumen content in the RAP amounted to 4.9%.

### 2.2. TEST METHODS

The asphalt mixtures were produced in laboratory conditions using the hot batching of RAP. Mixtures containing: 0%, 20%, 40% and 60% of RAP were produced. The mixtures were subjected to extraction to recover the bituminous binder. A vacuum evaporator was used to recover bitumen from the extracted binder solution. Then the bitumens recovered from the particular mixtures were subjected to the basic standard and functional tests in order to assess the effect of the variable RAP binder and fresh binder content on the properties of the binder mixture. The following standard properties were determined:

- the penetration grade at 25°C acc. to PN-EN 1426:2009,
- the softening point by the ring and ball method acc. to PN-EN 1427:2009,
- the Fraass breaking point acc. to PN-EN 12593:2009,
- the dynamic viscosity at 90°C, 110°C and 135°C acc. to PN-EN 13702-2:2010.

As regards functional testing, using a dynamic shear rheometer (DSR), the following were determined:

- complex shear modulus  $G^*$  at temperatures from 10°C to 100°C acc. to PN-EN 14770:2009,
- phase angle  $\delta$  at temperatures from 10°C to 100°C acc. to PN-EN 14770:2009,
- elastic recovery  $R$  and compliance modulus  $J_{NR}$  through the multiple stress creep recovery MSCR test at the temperature of 60°C according to PN-EN 16659-02:2016.

- temperatury łamliwości metodą Fraassa wg PN-EN 12593:2009,
- lepkości dynamicznej w 90°C, 110°C oraz 135°C wg PN-EN 13702-2:2010.

W zakresie badań funkcjonalnych określone zostały przy użyciu reometru DSR:

- zespolony moduł ścinania  $G^*$  w temperaturach od 10°C do 100°C wg PN-EN 14770:2009,
- kąt przesunięcia fazowego  $\delta$  w temperaturach od 10°C do 100°C wg PN-EN 14770:2009,
- odkształcenie sprężyste  $R$  oraz moduł podatności  $J_{NR}$  w badaniu cyklicznego pełzania z odprężeniem MSCR w temperaturze 60°C wg PN-EN 16659-02:2016.

Oznaczenia zespolonego modułu ścinania oraz kąta przesunięcia fazowego wykonano przy prędkości kątowej  $\omega = 10$  rad/s oraz poziomie odkształcenia w zakresie od 0,5% do 12%.

### 3. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

#### 3.1. OCENA WŁAŚCIWOŚCI NORMOWYCH MIESZANIN LEPI SZCZY

Na potrzeby analizy wyników badań określono rzeczywisty udział lepiszcza z granulatu oraz lepiszcza świeżego w całkowitej zawartości asfaltu w mieszance. Obliczono tzw. wskaźnik zastąpienia lepiszcza świeżego obliczany jako stosunek procentowego udziału lepiszcza z granulatu do całkowitej zawartości asfaltu w mieszance [2, 10, 11]. Dla mieszanki zawierającej 20% granulatu asfaltowego udział lepiszcza z granulatu w tzw. asfalcie całkowitym wynosi 26%, dla mieszanki zawierającej 40% granulatu lepiszcze w nim zawarte stanowi 51% asfaltu całkowitego a w mieszance zawierającej 60% granulatu lepiszcze w nim zawarte stanowi aż 74% asfaltu całkowitego. W dalszej analizie wyników badań autorzy będą odnosić się do procentowych udziałów obydwu lepiszczy w całkowitej zawartości asfaltu. Zgodnie z normą PN-EN 13108-1 określono obliczeniową penetrację oraz temperaturę mięknięcia mieszaniny lepiszczy świeżego i z granulatu asfaltowego na podstawie wzorów (1) i (2). Wyniki przedstawiono w Tabl. 2.

The complex shear modulus and the phase angle were determined at angular speed  $\omega = 10$  rad/s and at a strain level of 0.5-12%.

### 3. TEST RESULTS AND THEIR ANALYSIS

#### 3.1. ASSESMENT OF STANDARD PROPERTIES OF BINDER MIXTURES

For the analysis of the test results the actual fraction of the binder recovered from RAP actual granulate and the fresh binder fraction in the total bitumen content in the mixture were determined. The fresh binder replacement ratio - the RAP binder percentage to the total bitumen content in the mixture - was calculated [2, 10, 11]. The RAP binder fraction in the total bitumen amounted to 26% for the mixture containing 20% of RAP, to 51% for the mixture containing 40% of RAP and to as much as 74% for the mixture containing 60% of RAP. The percentages of the two binders in the total bitumen content will be referred to when analysing the test results further in this paper. The analytical penetration grade and softening point of the mixture of the fresh binder and the binder recovered from RAP were calculated from formulas (1) and (2) in accordance with standard PN-EN 13108-1. The results are presented in Table 2.

$$a \lg pen_1 + b \lg pen_2 = (a + b) \lg pen_{mix}, [0.1 \text{ mm}], \quad (1)$$

$$T_{PiK_{mix}} = a \cdot T_{PiK_1} + b \cdot T_{PiK_2}, [^\circ\text{C}], \quad (2)$$

where:

$pen_{mix}$  – mixture penetration [0.1 mm],

$T_{PiK_{mix}}$  – mixture softening point [°C],

$a$  – content of binder 1 [%],

$b$  – content of binder 2 [%],

$pen_1$  – penetration grade of binder 1 [0.1 mm],

$pen_2$  – penetration grade of binder 2 [0.1 mm],

$T_{PiK_1}$  – softening point of binder 1 [°C],

$T_{PiK_2}$  – softening point of binder 2 [°C].

Table 2. Analytical values of the penetration grade and softening point of binder mixtures  
Tablica 2. Obliczeniowe wartości penetracji i temperatury mięknięcia mieszanin lepiszczy

Property / Właściwość	Content of a RAP binder (fresh binder) [%] Zawartość lepiszcza z granulatu (lepiszcza świeżego)		
	26 (74)	51 (49)	74 (26)
Penetration of a mixture [0.1 mm] / Penetracja mieszaniny [0,1 mm]	29	23	20
Softening point of a mixture [°C] / Temperatura mięknięcia mieszaniny [°C]	65.9	66.8	67.6

$$a \log pen_1 + b \log pen_2 = (a + b) \log pen_{mix}, [0,1 \text{ mm}], (1)$$

$$T_{PiKmix} = a \cdot T_{PiK1} + b \cdot T_{PiK2}, [^{\circ}\text{C}], (2)$$

gdzie:

$pen_{mix}$  – penetracja mieszanki [0,1 mm],

$T_{PiKmix}$  – temperatura mięknięcia mieszanki [ $^{\circ}\text{C}$ ],

$a$  – udział lepiszcza 1 [%],

$b$  – udział lepiszcza 2 [%],

$pen_1$  – penetracja lepiszcza 1 [0,1 mm],

$pen_2$  – penetracja lepiszcza 2 [0,1 mm],

$T_{PiK1}$  – temperatura mięknięcia lepiszcza 1 [ $^{\circ}\text{C}$ ],

$T_{PiK2}$  – temperatura mięknięcia lepiszcza 2 [ $^{\circ}\text{C}$ ].

Dla każdego z lepiszczy odzyskanych (mieszanka lepiszcza świeżego i lepiszcza z granulatu) wykonano badania podstawowych właściwości normowych. Na Rys. 1 przedstawiono wyniki oznaczenia penetracji w temp.  $25^{\circ}\text{C}$  w porównaniu do wartości obliczonych. Otrzymane z badań wartości penetracji dla poszczególnych mieszanin są mniejsze od wartości oszacowanych na podstawie wzoru (1) przede wszystkim z uwagi na zjawisko starzenia technologicznego, które nie jest uwzględniane przy wyznaczaniu obliczeniowej wartości penetracji mieszanki asfaltów. Stwierdzono, że już przy udziale lepiszcza z granulatu wynoszącym 26% następuje wyraźny spadek penetracji mieszanki lepiszcza (o 6 jednostek) w stosunku do penetracji oznaczonej dla odzyskanego polimeroasfaltu (bez dodatku lepiszcza z granulatu). Udział lepiszcza z granulatu na poziomie 51% powoduje spadek penetracji mieszanki lepiszczy o 11 jednostek natomiast przy 74% lepiszcza z granulatu penetracja jest aż o 15 jednostek mniejsza. Zakładając, że lepiszcze stanowiące mieszankę asfaltu z granulatu i asfaltu świeżego powinno spełniać wymagania takie jak dla zastosowanego w mieszance lepiszcza świeżego po starzeniu technologicznym, można określić maksymalny udział lepiszcza z granulatu w mieszance a zarazem maksymalny udział granulatu. Przyjmując penetracje lepiszcza oryginalnego PMB 25/55-60 wynoszącą 35 [0,1 mm] oraz wymaganie w zakresie pozostałej penetracji wynoszące nie mniej niż 60% określono minimalną wartość tego parametru na poziomie  $21 \times 0,1 \text{ mm}$ . Na podstawie uzyskanych wyników badań oszacowano maksymalną ilość asfaltu z destruktu możliwą do wprowadzenia do mieszanki na około 22% co po uwzględnieniu zawartości lepiszcza w granulacie daje maksymalnie około 17% granulatu asfaltowego jako zawartość nie powodującą pogorszenia właściwości mieszanki ze względu na parametry lepiszcza. Rys. 2 przedstawia wyniki oznaczenia temperatury mięknięcia poszczególnych lepiszczy odzyskanych.

The basic standard properties of each of the recovered binders (a mixture of the fresh binder and the binder recovered from RAP) were tested. Fig. 1 shows the results of penetration at  $25^{\circ}\text{C}$  in comparison with the calculated values. The experimental penetration values for the particular mixtures are lower than the values calculated from formula (1), mainly due to the fact that accelerated ageing is not taken into account when calculating the penetration grade of a mixture of bitumens. It was found that for the RAP binder fraction amounting to 26% the penetration of the binder mixture visibly decreases (by 6 units) relative to the penetration determined for the recovered PMB (without the RAP addition). The RAP binder content of 51% decreases the penetration grade of the binder mixture by 11 units while at the RAP binder content of 74% the penetration grade is by as much as 15 units lower. Assuming that the binder being a mixture of asphalt recovered from RAP and fresh asphalt should meet the requirements as for the short-term aged fresh binder used in the mixture, one can determine the maximum content of the binder recovered from RAP, and so the maximum content of the RAP in the mixture. Assuming the penetration grade of the original PMB 25/55-60 binder, amounting to 35 [0.1 mm], and the requirement as to the other penetration, amounting to no less than 60%, the minimum value of this parameter was determined to be at the level of  $21 \times 0.1 \text{ mm}$ . On the basis of the test results the maximum amount of bitumen recovered from RAP, which could be introduced into the mixture, was estimated at about 22%. When the binder content in the RAP is taken into account, this gives maximum about 17% of RAP as the percentage not worsening the properties of the mixture due to the parameters of the binder. Fig. 2 shows the determined softening points of the particular recovered binders.

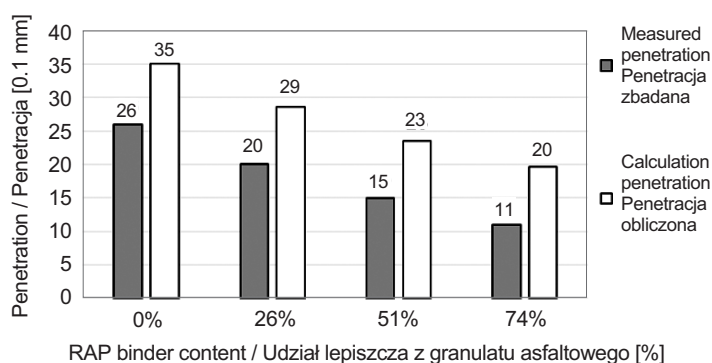


Fig. 1. Results of determining penetration grades of recovered binders

Rys. 1. Wyniki oznaczania penetracji lepiszczy odzyskanych

Oznaczone wartości temperatury mięknięcia mieszanin lepiszczy są wyższe od wartości temperatury oszacowanych wg wzoru (2) z uwagi na proces starzenia technologicznego, który podobnie jak w przypadku penetracji nie jest uwzględniany przy szacowaniu obliczeniowej temperatury mięknięcia. Stwierdzono, że zastąpienie części polimeroasfaltu lepiszczem z granulatu o niskim stopniu modyfikacji i związane z tym zmniejszenie zawartości polimeru w mieszaninie lepiszczy powoduje obniżenie temperatury mięknięcia o około 2°C przy udziale lepiszcza z destruktu w mieszaninie na poziomie 26%. Dalsze zwiększanie udziału lepiszcza z granulatu powoduje wyraźnie mniejszy spadek temperatury mięknięcia co jest efektem stosunkowo wysokiej temperatury mięknięcia twardego lepiszcza zawartego w granulacie. Należy przypuszczać, że w przypadku zastosowania granulatu zawierającego miększe lepiszcze niemodyfikowane, zaobserwowano by większe spadki temperatury mięknięcia związane ze zmniejszaniem się udziału polimeru w mieszaninie asfaltu. W zakresie spełnienia wymagań normowych dla temperatury mięknięcia określona jest jedynie wartość minimalna, którą spełniają wszystkie odzyskane lepiszcza. Rys. 3 przedstawia uzyskane wartości temperatury łamliwości wg Fraassa dla poszczególnych mieszanin lepiszczy.

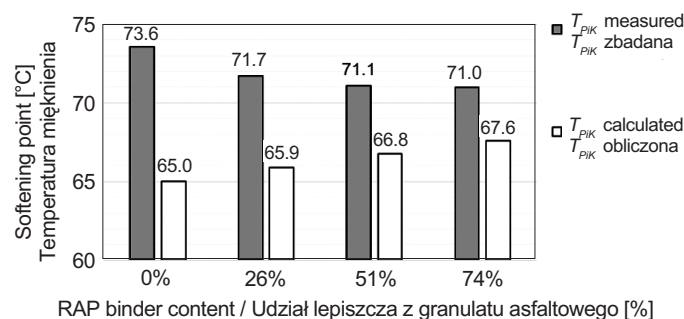


Fig. 2. Results of determining softening points of recovered binders

Rys. 2. Wyniki oznaczenia temperatury mięknięcia lepiszczy odzyskanych

Można zauważyć, że zastąpienie świeżego polimeroasfaltu postarzonego lepiszczem drogowym powoduje znaczący niekorzystny wzrost temperatury łamliwości. Jest to związane ze zwiększaniem udziału twardego asfaltu drogowego przy jednoczesnym zmniejszaniu zawartości polimeru. Ze względu na brak wymagań w zakresie temperatury łamliwości dla lepiszczy po starzeniu technologicznym nie określono spełnienia wymagań w tym zakresie dla badanych próbek. Przeprowadzono również oznaczenia lepkości dynamicznej w lepkościomierzu Brookfielda w temperaturze 90°C, 110°C oraz 135°C. Zależność oznaczonych lepkości od temperatury przedstawiono na Rys. 4.

The softening points of the binder mixtures are higher than the ones estimated using formula (2), due to accelerated aging which, similarly as in the case of penetration, is not taken into account when estimating analytical softening points. It was found that as a result of the replacement of some of the PMB with a slightly modified binder from RAP, and the consequent reduction in the polymer content in the binder mixture, the softening point decreased by about 2°C for the percentage of the RAP binder in the mixture at the level of 26%. If the fraction of the binder recovered from RAP is further increased, the softening point decreases much less, which is due to the relatively high softening point of the hard binder contained in the RAP. One can suppose that if RAP containing a softer unmodified binder were used, the softening point would drop more considerably due to the lower polymer content in the asphalt mixture. As regards the standard softening point requirements, only the minimum value is specified and all the recovered binders meet this requirement. Fig. 3 shows Fraas breaking points determined for the particular binder mixtures.

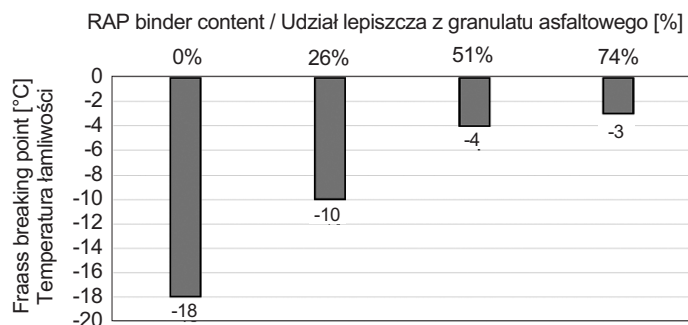


Fig. 3. Results of determining breaking points of recovered binders

Rys. 3. Wyniki oznaczenia temperatury łamliwości lepiszczy odzyskanych

One can notice that the replacement of the fresh PMB with the aged binder results in a significant disadvantageous rise of the breaking point. This is due to the fact that the hard binder content increases, whereas the polymer content decreases. Since there are no requirements as to the Fraas breaking point for binders after accelerated aging, it is not reported whether the tested samples satisfied them. Moreover, dynamic viscosity measurements were performed at 90°C, 110°C and 135°C using a Brookfield viscometer. Relationship between the determined viscosities and temperature is shown in Fig. 4.

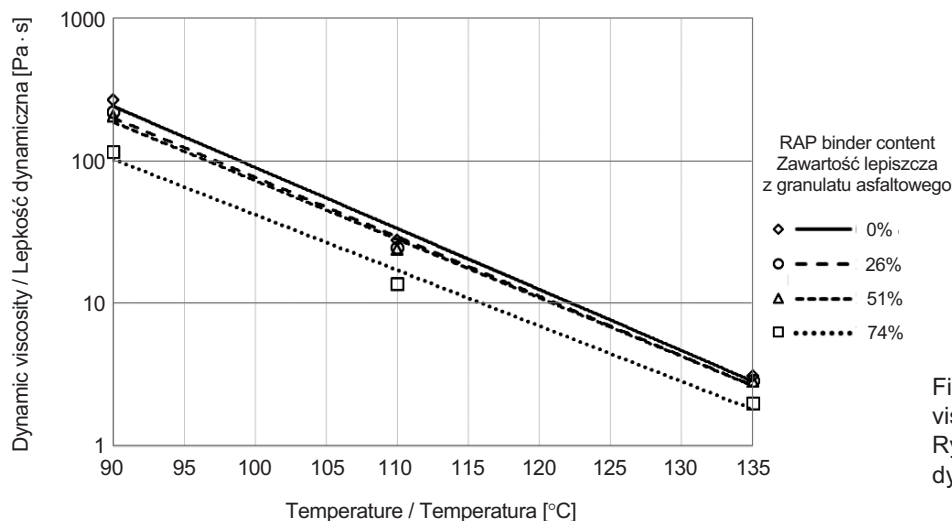


Fig. 4. Results of determining the dynamic viscosity of recovered binders  
Rys. 4. Wyniki oznaczenia lepkości dynamicznej odzyskanych lepiszczy

Stwierdzono spadek lepkości mieszanin lepiszczy związany ze zmniejszeniem zawartości polimeroasfaltu w mieszaninie i zastąpieniem go asfaltem z granulatu o niskim stopniu modyfikacji. Obserwuje się przesunięcie prostych odpowiadających mieszaninom w kierunku prostej reprezentującej sam polimeroasfalt. Można zauważyć, iż różnica otrzymanej lepkości dla zawartości asfaltu z granulatu na poziomie 26% oraz 51% (odpowiednio 74% i 49% polimeroasfaltu) jest nieznaczna. Wyraźne zmniejszenie lepkości dynamicznej powoduje natomiast dodatek lepiszcza z granulatu na poziomie 74% (26% polimeroasfaltu). Obserwacje te wskazują na istnienie pewnej granicznej zawartości polimeroasfaltu (w badanej mieszaninie około 50%), w której polimer w lepiszczu tworzy jeszcze strukturę usieciowaną przez co lepiszcze wykazuje wysoka kohezję. Poniżej tej zawartości struktura staje się na tyle rozproszona, że polimer nie zapewnia już tak wysokiej kohezji i mieszanina ulega upłynnieniu pod wpływem lepiszcza niemodyfikowanego [12]. Mimo, iż lepiszcze z granulatu charakteryzuje się wysoką twardością, która wskazywałaby również na wysokie wartości lepkości dynamicznej, to jednak decydującą rolę w kształtowaniu tego parametru odgrywa polimeroasfalt.

### 3.2. OCENA WŁAŚCIWOŚCI FUNKCJONALNYCH MIESZANIN LEPI SZCZY

Oprócz badań normowych wykonano również badania właściwości funkcjonalnych lepiszcza takich jak zespolony moduł ścinania oraz kąt przesunięcia fazowego w funkcji temperatury. Na Rys. 5 oraz 6 przedstawiono zależność kąta przesunięcia fazowego oraz zespolonego modułu ścinania od temperatury przy uwzględnieniu różnych procentowych zawartości lepiszcza odzyskanego z granulatu asfaltowego.

It was found that the viscosity of the binder mixtures decreased due to their reduced PMB content and to the replacement of the PMB with the slightly modified asphalt from RAP. The straight lines representing the mixtures have shifted towards the straight line representing PMB alone. One can notice that the difference between the viscosity values for the RAP binder content amounting to 26% and 51% (respectively 74% and 49% of PMB) is small. Whereas dynamic viscosity substantially decreases when the addition of the binder from RAP amounts to 74% (26% of PMB). These findings indicate that there is a certain limit PMB content (about 50% in the tested mixture) at which the polymer in the binder still forms a cross-linked structure whereby the binder exhibits high cohesion. Below this limit content the structure becomes so dispersed that the polymer no longer ensures so high cohesion and the mixture liquefies under the influence of the unmodified binder [12]. Even though the binder obtained from the RAP is characterized by greater hardness, which would also indicate high dynamic viscosity, PMB plays the decisive role in the shaping of the parameter.

### 3.2. ASSESMENT OF FUNCTIONAL PROPERTIES OF BINDER MIXTURES

Besides the standard properties of the binder mixtures, also their functional properties, such as the complex shear modulus and the phase angle versus temperature, were tested. Figures 5 and 6 show phase angle and complex shear modulus versus temperature diagrams for different contents of the binder recovered from RAP.

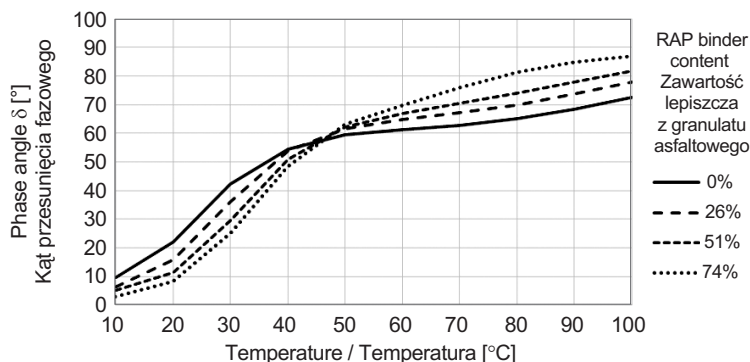


Fig. 5. Relationship between the phase angle and temperature for different RAP binder contents

Rys. 5. Zależność kąta przesunięcia fazowego od temperatury przy różnych udziałach lepiszcza odzyskanego z granulatu asfaltowego

Analizując przedstawione wykresy można stwierdzić, że wraz ze wzrostem zawartości twardego lepiszcza z granulatu wzrasta moduł sztywności mieszanin lepiszczy w zakresie temperatur od 10°C do 60°C. Powyżej 60°C różnice zmniejszają się z uwagi na wpływ lepiszcza modyfikowanego, które w tych temperaturach cechuje się wyższymi wartościami modułu sztywności. W przypadku analizy wyników kąta przesunięcia fazowego również widać wyraźny wpływ świeżego lepiszcza modyfikowanego, dla którego przyrost kąta przesunięcia fazowego następuje szybko do temperatury około 40°C do 50°C, natomiast powyżej 50°C jest już znacznie wolniejszy. Efekt ten w mniejszym stopniu jest również zauważalny w mieszaninach zawierających 26% oraz 51% lepiszcza z granulatu, które w wyraźnie mniejszym stopniu wykazuje spowolnienie przyrostu kąta przesunięcia fazowego. Można zatem stwierdzić, że w temperaturze około 45°C wszystkie analizowane lepiszcza jak również ich mieszaniny osiągają zbliżoną wartość kąta przesunięcia fazowego. Na podstawie wyników uzyskanych w badaniu w reometrze dynamicznego ścinania wykreślono również tzw. krzywe Blacka przedstawiające zależność zespolonego modułu ścinania od kąta przesunięcia fazowego (Rys. 7).

Analizując wykres zależności zespolonego modułu ścinania od kąta przesunięcia fazowego można stwierdzić wyraźną zmianę charakteru krzywych wraz ze zmianą zawartości świeżego lepiszcza modyfikowanego. Różnice pomiędzy poszczególnymi lepiszczami i ich mieszaninami są szczególnie wyraźne w wysokich temperaturach. Można zatem wnioskować, że w analizowanych przypadkach wpływ polimeru zawartego w mieszaninach lepiszczy jest największy w zakresie wysokich temperatur eksploatacyjnych. Oprócz zespolonego modułu ścinania  $G^*$  wyznaczono również jego składowe  $G1$  – część rzeczywistą oraz  $G2$  – część urojoną.

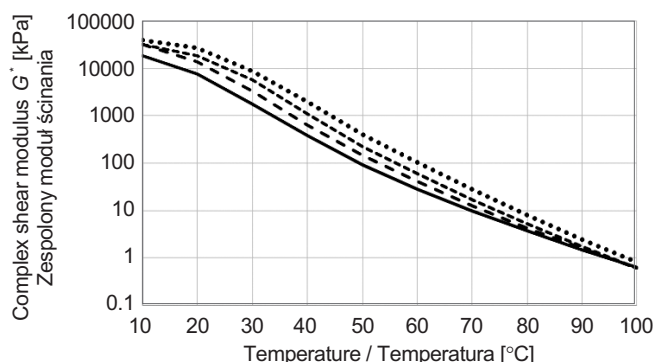


Fig. 6. Relationship between the complex shear modulus and temperature for different RAP binder contents

Rys. 6. Zależność zespolonego modułu ścinania od temperatury przy różnych udziałach lepiszcza odzyskanego z granulatu asfaltowego

An analysis of the diagrams shows that as the content of the hard binder from RAP increases, so does the stiffness modulus of the binder mixtures in the temperature range of 10-60°C. Above 60°C the differences decrease owing to the influence of the modified binder which at so high temperatures is characterized by higher stiffness modulus values. The effect of the fresh modified binder is also clearly visible in the case of the phase angle - the latter increases quickly up to the temperature of 40-50°C, whereas above 50°C the increase is considerably slower. To a lesser degree this effect is also visible in the mixtures containing 26% and 51% of the binder from RAP, but this time the slowdown in phase angle increase is distinctly smaller. Therefore it can be concluded that at the temperature of about 45°C all the tested binders and their mixtures are characterized by a similar phase angle value. Moreover, Black curves, showing the dependence between the complex shear modulus and the phase angle, were plotted (Fig. 7).

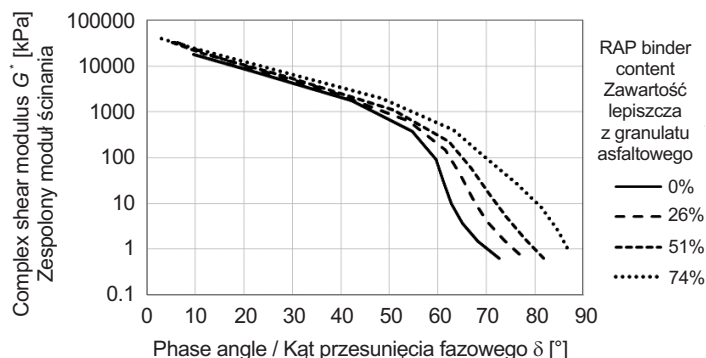
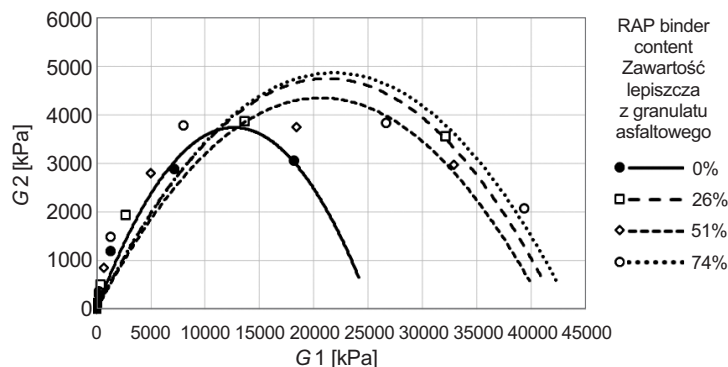


Fig. 7. Relationship between the complex shear modulus and phase angle for different RAP binder fractions

Rys. 7. Zależność zespolonego modułu ścinania od kąta przesunięcia fazowego przy różnych udziałach lepiszcza odzyskanego z granulatu asfaltowego



Składowe te wyznacza się z zależności [1]:  $G^* = G1 + G2 = |G^*| \cos \delta + i |G^*| \sin \delta$ . Dla wyznaczonych wartości modułów  $G1$  oraz  $G2$  utworzono wykres przedstawiający zależność części urojonej od części rzeczywistej zespolonego modułu ścinania (Rys. 8). Zarówno najmniejszy (26%) jak i największy (74%) dodatek lepiszcza z granulatu powoduje istotne zwiększenie części rzeczywistej modułu zespolonego w stosunku do świeżego polimeroasfaltu co świadczy o zwiększeniu sztywności lepiszcza i przesunięciu jego właściwości z zakresu stanu lepkosprężystego w kierunku stanu sprężystego. Lepiszczka odzyskane poddano również badaniu cyklicznego pełzania z odprężeniem  $MSCR$  w temperaturze  $60^\circ\text{C}$ . Wartości wyznaczonych w badaniu odkształcenia sprężystego  $R$  oraz modułu podatności  $J_{NR}$  dla naprężenia 0,1 oraz 3,2 kPa przedstawiono na Rys. 9-12.



The complex shear modulus-phase angle diagram shows a marked change in the character of the curves as the fresh modified bitumen content changes. The differences between the particular binders and their mixtures are especially visible at high temperatures. Thus one can conclude that in the analysed cases the effect of the polymer contained in the binder mixtures is the strongest in the range of high operating temperatures. Besides complex shear modulus  $G^*$ , also its components:  $G1$  – the real part and  $G2$  – the imaginary part were determined. The components are calculated from the following relation [1]:  $G^* = G1 + G2 = |G^*| \cos \delta + i |G^*| \sin \delta$ . For the calculated modulus  $G1$  and  $G2$  a diagram of the dependence between the imaginary part and real part of the shear modulus was drawn (Fig. 8). Both the smallest (26%) and largest (74%) addition of the binder recovered from RAP result in a significant increase in the imaginary part of the complex modulus in comparison with the fresh polymer-modified bitumen, which indicates that the stiffness of the binder has increased and its properties have shifted from the viscoelastic range towards the elastic state. The recovered binders were also subjected to the multiple stress creep recovery  $MSCR$  test at the temperature of  $60^\circ\text{C}$ . The determined values of elastic recovery  $R$  and compliance modulus  $J_{NR}$  for the stress of 0.1 and 3.2 kPa are presented in Figs 9-12.

Fig. 8. Relationship between the imaginary part of complex modulus and the real part of complex modulus for different RAP binder fractions

Rys. 8. Zależność części urojonej modułu zespolonego od jego części rzeczywistej przy różnych udziałach lepiszcza odzyskanego z granulatu asfaltowego

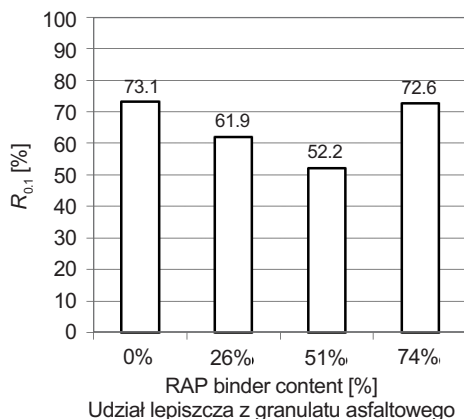


Fig. 9. Comparison of values of the parameter  $R$  for individual binders recovered at the stress of 0.1 kPa

Rys. 9. Porównanie wartości parametru  $R$  dla poszczególnych lepiszczy odzyskanych przy naprężeniu 0,1 kPa

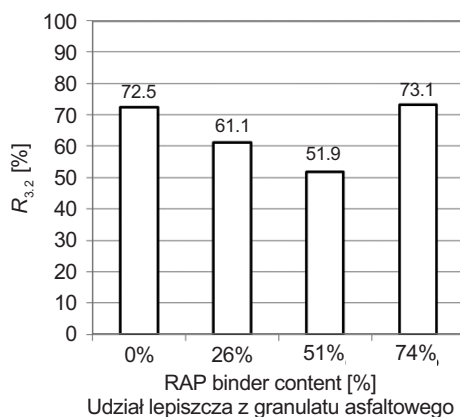


Fig. 10. Comparison of values of the parameter  $R$  for individual binders recovered at the stress of 3.2 kPa

Rys. 10. Porównanie wartości parametru  $R$  dla poszczególnych lepiszczy odzyskanych przy naprężeniu 3,2 kPa

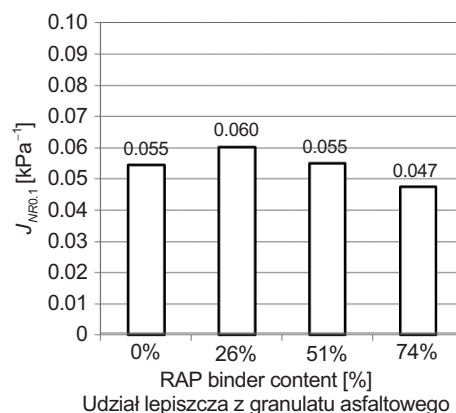


Fig. 11. Comparison of values of the parameter  $J_{NR}$  for individual binders recovered at the stress of 0.1 kPa

Rys. 11. Porównanie wartości parametru  $J_{NR}$  dla poszczególnych lepiszczy odzyskanych przy naprężeniu 0,1 kPa

Analizując uzyskane wartości odkształcenia sprężystego  $R$  zarówno przy naprężeniu 0,1 kPa jak i 3,2 kPa stwierdzono, że zwiększanie do pewnego poziomu zawartości lepiszcza z destruktu o niskim stopniu modyfikacji powoduje pogorszenie właściwości sprężystych co objawia się spadkiem wartości parametru  $R$ . Jednak przy największym analizowanym udziale lepiszcza z destruktu wynoszącym 74% mała zawartość polimeru jest kompensowana dużą sztywnością twardego lepiszcza z granulatu. Zaobserwowano wzrost modułu podatności JNR związany ze zmniejszeniem zawartości polimeru w mieszaninie asfaltów przy udziale lepiszcza z granulatu wynoszącym 26%. Dalsze zwiększanie udziału lepiszcza z granulatu kosztem polimeroasfaltu powoduje spadek modułu podatności z uwagi na zwiększanie się sztywności mieszaniny za sprawą twardego lepiszcza z granulatu. Wyznaczone wartości parametrów  $R$  oraz  $J_{NR}$  przy naprężeniu 3,2 kPa naniesiono na wykres pozwalający ocenić stopień modyfikacji asfaltu polimerem (Rys. 13). Zgodnie z normą AASHTO MP 19-10 punkty leżące powyżej krzywej wyznaczonej równaniem  $y = 29,371x - 0,2633$  charakteryzują lepiszcza o wystarczającym stopniu modyfikacji [13].

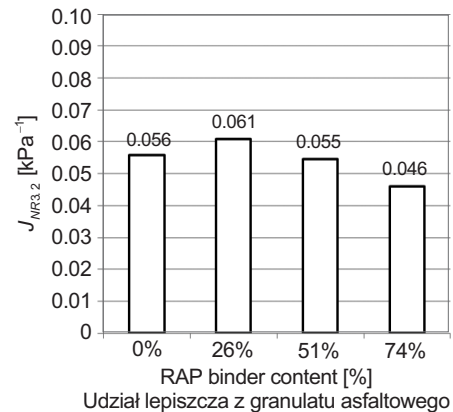


Fig. 12. Comparison of values of the parameter  $J_{NR}$  for individual binders recovered at the stress of 3.2 kPa  
Rys. 12. Porównanie wartości parametru  $J_{NR}$  dla poszczególnych lepiszczy odzyskanych przy naprężeniu 3,2 kPa

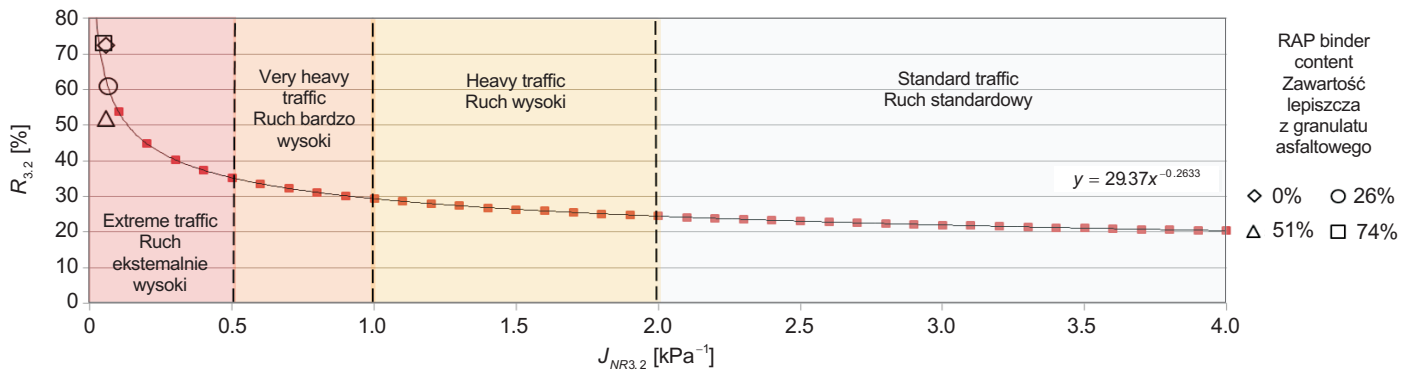


Fig. 13. Assessment of the effectiveness degree of binder modification based on the percentage dependency of elastic strain on the irreversible part of compliance modulus  
Rys. 13. Ocena stopnia efektywności modyfikacji lepiszcza na podstawie funkcji zależności procentowego odkształcenia sprężystego od nieodwracalnej części modułu podatności

Spośród badanych mieszanin jedynie ta zawierająca 51% lepiszcza z granulatu (odpowiednio 49% PMB 25/55-60) wykazała niedostateczny stopień modyfikacji. Z kolei mieszanina o jeszcze mniejszej zawartości polimeroasfaltu, zawierająca 74% niemodyfikowanego lepiszcza z destruktu wykazała teoretycznie dużo wyższy stopień modyfikacji co w rzeczywistości jest efektem zwiększonej twardości lepiszcza z granulatu, a nie wystarczającej ilości polimeru. W przypadku lepiszczy niemodyfikowanych o większej twardości poddanych dodatkowo procesom starzenia technologicznego położenie punktów ponad krzywą nie zawsze może być interpretowane jako wyznacznik odpowiedniego

An analysis of the values of elastic recovery  $R$  shows for the stress of both 0.1 kPa and 3.2 kPa that when the little modified RAP binder content is increased to a certain level, the elastic properties deteriorate, which manifests itself in a lower parameter  $R$ . However, at the highest analysed RAP binder content of 74% the low polymer content is compensated for by the great stiffness of the hard binder recovered from RAP. At the RAP binder content of 26% in the asphalt mixture, compliance modulus  $J_{NR}$  increased due to the lower polymer content in the asphalt mixture. When the RAP binder content is further increased at the expense of PMB, the compliance modulus

poziomu modyfikacji lepiszcza ze względu na inne właściwości funkcjonalne.

#### 4. WNIOSKI

Na podstawie analizy wyników przeprowadzonych badań stwierdzono, że proporcje lepiszcza z granulatu oraz świeżego lepiszcza w postaci polimeroasfaltu w różnym stopniu mogą wpływać zarówno na niskotemperaturowe jak i wysokotemperaturowe właściwości mieszanin tych lepiszczy. W szczególności sformułowano następujące wnioski:

1. Wpływ obecności polimeroasfaltu w badanych mieszaninach jest szczególnie wyraźny w eksploatacyjnych i technologicznych wysokich wartościach temperatury charakteryzowanych lepkością dynamiczną oraz zespolonym modulem sztywności.
2. Twarde lepiszcze uzyskane z granulatu asfaltowego zmodyfikowane nawet niewielką ilością polimeroasfaltu odznacza się dobrymi właściwościami w wysokich eksploatacyjnych wartościach temperatury.
3. Zastąpienie świeżego lepiszcza w postaci polimeroasfaltu twardym asfaltem uzyskanym z granulatu asfaltowego powoduje znaczne pogorszenie właściwości niskotemperaturowych już przy 20% dodatku granulatu do mieszanki mineralno-asfaltowej.
4. W przypadku analizowanej mieszaniny właściwości sprężyste opisywane nawrotem w badaniu MSCR przy zmniejszeniu zawartości polimeroasfaltu kompensowane są poprzez twarde lepiszcze z granulatu asfaltowego.
5. Przy projektowaniu mieszanek mineralno-asfaltowych z granulatem celowym jest ograniczenie ilości wprowadzanego granulatu na podstawie oceny właściwości zawartego w nim lepiszcza oraz możliwości jego ewentualnego odświeżenia.
6. Oszacowanie temperatury mięknięcia mieszaniny lepiszczy na podstawie wzoru z normy PN-EN 13108-1 nie daje wystarczających informacji na temat istotnych właściwości mieszaniny lepiszczy.
7. Dopuszczając stosowanie większych ilości granulatu asfaltowego do mieszanek mineralno-asfaltowych istnieje konieczność określenia wymagań dla lepiszczy odzyskanych z mieszanek z granulatem (destruktem) asfaltowym również z uwzględnieniem procesu starzenia technologicznego.

decreases because of the increasing stiffness of the mixture due to the hard binder from RAP. The values of  $R$  and  $J_{NR}$  determined at the stress of 3.2 kPa were marked on a diagram for assessing the degree of asphalt modification with the polymer (Fig. 13). According to standard AASHTO MP 19-10, points lying above the curve determined from equation  $y = 29,371x - 0,2633$  characterize sufficiently modified binders [13].

From among the tested mixtures only the one containing 51% of the binder recovered from RAP (49% PMB 25/55-60) showed an insufficient degree of modification. The mixture with an even lower PMB content, containing 74% of unmodified binder recovered from RAP, showed theoretically a much higher degree of modification, which actually is not the result of the inadequate amount of the polymer, but the result of the increased hardness of the binder from RAP. In the case of harder unmodified binders subjected to short-term production ageing, the location of the points above the curve not always can be interpreted as indicating a proper binder modification level for other functional properties.

#### 4. CONCLUSIONS

The results of the tests show that the proportions of the binder from RAP and the fresh binder in the form of polymer-modified bitumen can affect to a different degree the low-temperature and high-temperature properties of the mixtures of the binders. The following detailed conclusions have been drawn:

1. The effect of the presence of polymer-modified bitumen in the tested mixtures is particularly visible at high operating and production temperatures characterized by dynamic viscosity and the complex shear modulus.
2. The hard binder recovered from RAP, modified with even a small amount of PMB, has good properties at high service temperatures.
3. The replacement of the fresh polymer-modified binder with the hard bitumen recovered from RAP results in a considerable deterioration in the low-temperature properties already at a 20% addition of RAP to the asphalt mixture.
4. In the case of the analysed mixture, when the PMB content is decreased, the elastic properties (described by the elastic recovery in the MSCR test) are compensated for by the hard binder from RAP.

## INFORMACJE DODATKOWE

Artykuł jest rozszerzoną wersją referatu wygłoszonego na konferencji „Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe”, zorganizowanej podczas targów budownictwa drogowego „Autostrada-Polska” Kielce 2018.

## REFERENCES / BIBLIOGRAFIA

- [1] *Pilat J., Radziszewski P.*: Nawierzchnie asfaltowe. WKŁ, Warszawa 2010
- [2] *Copeland A.*: Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice. Research Report FHWA-HRT-11-021, 2011
- [3] *Radziszewski P.*: Zmiany właściwości lepkosprężystych lepiszczy modyfikowanych i mieszanek mineralno-asfaltowych w wyniku procesu starzenia. Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok 2007
- [4] *Radziszewski P.*: Wpływ modyfikacji polimerem SBS na właściwości reologiczne lepiszczy asfaltowych. *Polimery*, **53**, 7-8, 2008, 559-563
- [5] *You Z., Mills-Beale J., Fini E., et al.*: Evaluation of Low-Temperature Binder Properties of Warm-Mix Asphalt, Extracted and Recovered RAP and RAS, and Bioasphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **23**, 11, 2011, 1569-1574
- [6] *Ma T., Bahia H.U., Mahamoud E., et al.*: Estimating Allowable RAP in Asphalt Mixes to Meet Target Low Temperature PG Requirements. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, **79**, 2010, 473-496
- [7] WT-2 2014 - część 1: Mieszanki mineralno-asfaltowe, Wymagania techniczne. GDDKiA, Warszawa, 2014
- [8] *Liphardt A., Radziszewski P., Król J.*: Binder Blending Estimation Method in Hot Mix Asphalt with Reclaimed Asphalt. *Procedia Engineering*, **111**, 2015, 502-509
- [9] *Kriza P., Granta D.L., Velozab B.A., et al.*: Blending and diffusion of reclaimed asphalt pavement and virgin asphalt binders. *Road Materials and Pavement Design*, **15**, 2014, 78-112

5. When designing asphalt mixtures with RAP, the introduced amount of the latter should be limited on the basis of an assessment of the properties of the binder it contains and the possibility of refreshing the binder.
6. The estimation of the softening point of a mixture of binders by means of the formula given in standard PN-EN 13108-1 does not provide enough information about the essential properties of the binder mixture.
7. If the use of larger amounts of RAP in asphalt mixtures is to be allowed, it is necessary to specify requirements for binders recovered from mixtures with RAP, taking into account short-term ageing.

## ACKNOWLEDGEMENT

The article is an extended version of the paper presented at the conference “Durable and safe road pavements”, organized during the international fair of road construction industry “Autostrada-Polska” Kielce 2018.

- [10] *West R., Willis J.R., Marasteanu M.*: Improved Mix Design, Evaluation, and Materials Management Practices for Hot Mix Asphalt with High Reclaimed Asphalt Pavement Content. NCHRP Report 752, Transportation Research Board, Washington, 2013
- [11] *Liphardt A., Radziszewski P., Król J.*: Influence of polymer modified binder content from RAP on stone mastic asphalt rutting resistance, *Procedia Engineering*, **153**, 2016, 407-413
- [12] *Król J.*: New method of analysis of polymer modified bitumen microstructure. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **7**, 4, 2008, 23-46
- [13] *Król J., Matraszek K.*: Właściwości wysokotemperaturowe lepiszczy asfaltowych w badaniu cyklicznego pęczania z odprężeniem (MSCR). *Drogownictwo*, **10**, 2012, 321-324