



MAREK IWAŃSKI<sup>1)</sup>  
GRZEGORZ MAZUREK<sup>2)</sup>

## HYDRATED LIME EFFECT ON RUTTING RESISTANCE OF SMA PAVEMENTS

### WPŁYW WAPNA HYDRATYZOWANEGO NA ODPORNOŚĆ NAWIERZCHNI SMA NA KOLEINOWANIE

**STRESZCZENIE.** W pracy zestawiono wyniki badań lepiszcza odzyskanego z wbudowanej mieszanki SMA z wapnem hydratyzowanym oraz z mieszanki kontrolnej zawierającej aminę kwasu tłuszczowego zgodnie z amerykańską procedurą MSCR określającą pełzanie lepiszcza pod obciążeniem dynamicznym. Próbkę pobrano po 12 latach eksploatacji jednej z ulic w Kielcach, w której warstwa ścieralna została wykonana z mieszanki SMA z dodatkiem wapna hydratyzowanego. Lepiszczce odzyskane otrzymano w wyniku ekstrakcji mieszanki SMA pobranej z warstwy ścieralnej w miejscach wystąpienia kolein oraz z miejsc bez kolein. Na pobranych próbach nawierzchni SMA wykonano badania odporności na koleinowanie, określając parametry  $WTS_{AIR}$  oraz  $RD_{AIR}$ . Wykorzystując test statystyczny analizy wariancji (ANOVA) dokonano oceny wpływu wapna hydratyzowanego oraz miejsca pobrania lepiszcza z nawierzchni na wyniki badań pełzania. Oceniając korelacje badań MSCR lepiszcza odzyskanego z parametrami  $WTS_{AIR}$  oraz  $RD_{AIR}$  stwierdzono pozytywny wpływ wapna hydratyzowanego na zapewnienie odporności nawierzchni SMA na koleinowanie.

**SŁOWA KLUCZOWE:** asfalt, MSCR, nawierzchnia SMA, odporność na koleinowanie, pełzanie asfaltu, polimer SBS, wapno hydratyzowane.

**ABSTRACT.** The paper summarises results of examination of binder extracted from an incorporated SMA mixture with hydrated lime, and from a control mixture containing fatty acid amine, according to the American procedure MSCR defining a creep of binder under a dynamic load. Samples were taken after 12-year operation of one of the Kielce main streets, where a wearing course of SMA mixture with addition of hydrated lime was made. Sample binder was obtained through extraction of the SMA mixture sampled from the wearing course at the locations with ruts and locations without ruts. These samples of the SMA pavement were tested for rutting resistance;  $WT_{AIR}$  and  $RD_{AIR}$  parameters were determined. Using the statistical test of analysis of variation (ANOVA) the estimation of the influence of both the hydrated lime and the location of sampling on the creep tests results were made. By estimating the correlations between the MSCR tests of the extracted binder and  $WT_{AIR}$  and  $RD_{AIR}$  parameters a positive influence of hydrated lime on the rutting resistance of the SMA pavement was concluded.

**KEYWORDS:** bitumen, bitumen creeping, hydrated lime, Multiple Stress Creep Recovery (MSCR), rutting resistance, SBS polymer, SMA pavement.

<sup>1)</sup> Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, Katedra Inżynierii Komunikacyjnej; iwanski@tu.kielce.pl (✉)

<sup>2)</sup> Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, Katedra Inżynierii Komunikacyjnej; gmazurek@tu.kielce.pl

## 1. WSTĘP

Do jednych z najbardziej istotnych uszkodzeń nawierzchni asfaltowych zalicza się deformacje trwałe, które są efektem występowania dużych obciążeń (ponadnormatywnych) pochodzących od ruchu pojazdów oraz wysokich letnich temperatur [1]. W celu ograniczenia ich oddziaływania prowadzone są badania naukowe w kilku kierunkach. Polegają one między innymi na opracowaniu odpowiednich mieszanek mineralnych, stosowaniu asfaltu o podwyższonych właściwościach fizyko mechanicznych lub jego modyfikacji za pomocą polimerów (szczególnie SBS) oraz wykorzystywaniu różnego rodzaju dodatków do mieszanki mineralno-asfaltowej. Jednym z tego rodzaju dodatków jest wapno hydratyzowane.

Idea wykorzystania wapna hydratyzowanego w technologii mieszanek mineralno-asfaltowych nie jest nowa, sięga końca XIX wieku, kiedy po raz pierwszy wapno hydratyzowane zastosowano w wykonawstwie nawierzchni asfaltowych w USA [2, 3]. Należy jednak zaznaczyć, że spektrum oddziaływania wapna hydratyzowanego zarówno na właściwości asfaltu jak i wykonanej z jego udziałem mieszanki mineralno-asfaltowej do chwili obecnej nie zostało w pełni wyjaśnione. Wapno hydratyzowane przede wszystkim wykorzystywane jest jako mineralny środek adhezyjny do mieszanek mineralno-asfaltowych zawierających kruszywa o dużej zawartości krzemionki  $\text{SiO}_2$  [4, 5] i jego rola w tym zakresie jest dość dobrze rozpoznana.

Badania w zakresie wpływu wapna hydratyzowanego na odporność mieszanek mineralno-asfaltowych na deformacje trwałe rozpoczęte zostały dopiero na początku lat 90-tych ubiegłego wieku. Prekursorem był Litte [6], który jako pierwszy zastosował wapno hydratyzowane jako środek zwiększający tego rodzaju odporność mieszanki mineralno-asfaltowej. Istotne znaczenie poznawcze miały badania wykonane we francuskim instytucie LPCP, kiedy po raz pierwszy oceniono wpływ wapna hydratyzowanego na właściwości koleinowania [7]. Należy zaznaczyć, że i w Polsce były prowadzone badania przez J. Piłata [8] dotyczące wpływu wapna hydratyzowanego (20% wapna hydratyzowanego zamiennie w wypełniaczu wapiennym) na odporność betonu asfaltowego na deformacje trwałe za pomocą metodyki pelzania w temperaturze  $40^\circ\text{C}$ . Przeprowadzone badania wykonywane były tylko w warunkach laboratoryjnych [7 - 9]. Nie zostały więc zweryfikowane rezultaty tych badań w warunkach in situ pracy mieszanek mineralno-asfaltowych – przede wszystkim betonu asfaltowego, w czasie długoletniej eksploatacji nawierzchni asfaltowej.

## 1. INTRODUCTION

Permanent deformations can be numbered among the most substantial damages resulting from heavy (above standard) loading induced by the road traffic, and high summer temperatures [1]. Some multi-directional researches to limit the effect of their influence are under way. They are aimed at working out appropriate mineral mixes, by applying bitumen of high physical-mechanical properties, or polymer (especially SBS) modified one, and the application of various additives to mineral-bitumen mixtures among other things. Hydrated lime is one of those additives.

The idea to use hydrated lime for the mineral-bitumen mixture engineering is not a new one. Its history dates back to the end of the 19th century when hydrated lime was first utilised in the U.S. [2, 3] for bitumen pavement engineering. However, it should be emphasised that the full spectrum of hydrated lime impact on not only bitumen properties, but also mineral-bitumen mixtures containing that additive has not been clearly shown so far. Hydrated lime is chiefly used as an adhesion agent for mineral-bitumen mixtures containing aggregates with a high content of silicon dioxide  $\text{SiO}_2$  [4, 5]. Its role in that scope has already been pretty well identified.

Researches into the effect of hydrated lime on the permanent deformation resistance of mineral-bitumen mixtures have been started till the early 1990s. Litte [6] was a forerunner who was the first to apply hydrated lime as a resistance booster. The tests of significant cognitive meaning carried out at the French institute LPCP were the first to confirm the influence of hydrated lime on rutting resistance characteristics [7]. It is worth noting that tests on the hydrated lime (20% hydrated lime interchangeably in a lime filler) effect on permanent deformations were also conducted in Poland by J. Piłat [8] with the use of the methodology of creeping at the temperature of  $40^\circ\text{C}$ . They were carried out only in laboratory conditions [7 - 9]. Therefore their results were not verified in situ i.e. in service conditions for bitumen-aggregate mixtures, particularly asphaltic concrete during its longstanding operation of a bitumen pavement.

The above mentioned modification of bitumen characteristics with the use of SBS polymer is one of the correction methods for permanent deformation resistance of bitumen-mineral mixtures. In case of bitumen-mineral mixtures with SBS-modified binders some researches into an additional increase in their rutting resistance were also

Jak wspomniano wcześniej, jedną z metod poprawy odporności mieszanek mineralno-asfaltowych na deformacje trwałe jest modyfikacja właściwości asfaltu za pomocą polimeru SBS. Również w przypadku mieszanek mineralno-asfaltowych z lepiszczem modyfikowanym SBS prowadzono badania w zakresie dodatkowego zwiększenia ich odporności na koleinowanie w wyniku równoczesnego zastosowania wapna hydratyzowanego i polimeru SBS lub zapewniania tej odporności przy zmniejszeniu ilości polimeru w obecności wapna. Jedne z pierwszych badań w tym zakresie zostały wykonane przez B. Brule i innych [10], który stwierdził, że zastosowanie wapna hydratyzowanego w ilości 1% w mm i 3% polimeru EVA w lepiszczu zapewnia taką samą odporność na deformacje trwałe asfaltu porowatego co zastosowanie 7% polimeru EVA. Nawierzchnia wykonana z tego rodzaju asfaltu porowatego eksploatowana była przez 17 lat na autostradzie A4 w okolicach Reims we Francji. Prowadzono również badania laboratoryjne w zakresie wpływu wapna hydratyzowanego na odporność na deformacje trwałe betonu asfaltowego z dodatkiem polimeru SBS i EVA oraz mieszanki SMA z asfaltem modyfikowanym polimerem SBS [11], które wykazały współdziałanie tych materiałów. Wyniki wykonanych badań nie zostały jednak wdrożone do wykonawstwa drogowego i brak jest bazy danych dotyczących pracy mieszanki SMA w nawierzchni asfaltowej w długim okresie eksploatacyjnym.

W związku z tym istotne jest rozpoznanie wpływu wapna hydratyzowanego na odporność na koleinowanie mieszanki SMA z asfaltem modyfikowanym polimerem SBS w długim okresie eksploatacji nawierzchni oraz określenie jego wpływu na właściwości odzyskanego lepiszcza. W 1999 roku w czasie modernizacji jednej z głównych ulic w Kielcach wykonana została warstwa ścieralna z mieszanki SMA z dodatkiem wapna hydratyzowanego. Po 12 latach eksploatacji nawierzchni stwierdzono powstanie koleiny o nieznacznej głębokości do 4 mm. W 2011 roku zostały wykonane badania odzyskanego lepiszcza z wbudowanej mieszanki SMA z wapnem hydratyzowanym oraz z mieszanki kontrolnej zawierającej aminę kwasu tłuszczowego zgodnie z amerykańską procedurą MSCR określającą pełzanie lepiszcza pod obciążeniem dynamicznym.

## 2. WYKONANIE NAWIERZCHNI SMA

Mieszanka mineralna została zaprojektowana jako SMA 0/12,8 przeznaczona na ruch KR4 zgodnie z wymaganiami wytycznych IBDiM [12], obecnie najbardziej odpowiada jej SMA 11 wg WT 2 - 2010 [13] oraz normy PN EN 13108-1.

carried out. That increase appeared from simultaneous application of hydrated lime and SBS polymer or a decrease in polymer content in the presence of lime. One of the first tests within the above mentioned scope were carried out by B. Brule and others [10] who found the same resistance to permanent deformations of porous bitumen with the use in the binder of either the 3% amount of hydrated lime or 7% amount of EVA polymer. The surfacing paved with such a porous bitumen near Reims, France remained serviceable for 17 years. Some laboratory tests were carried out within the scope of hydrated lime influence on the resistance to permanent deformations of asphalt concrete with the addition of SBS and EVA polymers, and the SMA mixture with the SBS [11] polymer modified bitumen which proved combined effects. However, the results of the performed tests were not introduced into the highway engineering. Little wonder, then, there is no database of the SMA mixture operation in bitumen pavements over long service periods.

Furthermore, it is essential to identify the hydrated lime influence on resistance to rutting of SMA pavements modified with SBS polymer throughout long service periods, and to determine its impact on properties of the extracted binder. A wearing course of the SMA mixture with hydrated lime added was made on one of the main streets in Kielce, Poland during its modernisation in 1999. After 12-year operation of the pavement the rut of up to 4 mm in depth was found. Tests of extracted binder of the placed SMA mixture with hydrated lime and the control mixture containing fatty acid amine after the American procedure MSCR determining binder creeping under the dynamic load were carried out in 2011.

## 2. EXECUTION OF SMA PAVEMENT

The mineral mix was designed as SMA 0/12.8 intended for the traffic category KR4 according to the requirements of the IBDiM guidelines [12] (its most precise equivalent is currently SMA 11 according to WT 2 - 2010 [13] and the standard PN EN 13108-1).

Aggregates of a diversified resistance to grinding and polishing, and aggregate of quartzite sandstone as the main component were used to make SMA mixture. This mineralogical composition should provide the required roughness of the SMA pavement over a long service time and an appropriate rutting resistance [14, 15] while an addition of the dolomite aggregate and Devonian limestone might be good for a bitumen adhesion to the whole

W mieszance mineralnej SMA zastosowano kruszywa o zróżnicowanej odporności na rozdrobnienie oraz polewanie przy wykorzystaniu jako głównego kruszywa z piaskowca kwarcytowego. Taki skład mineralogiczny kruszywa powinien zapewnić wymaganą szorstkość nawierzchni SMA w długim okresie eksploatacji oraz odporność na koleinowanie [14, 15]. Natomiast dodatek kruszywa dolomitowego i wapienia dewońskiego będzie wpływał korzystnie na adhezję asfaltu do całej mieszanki mineralnej w tym do kruszywa piaskowca kwarcytowego. Skład mieszanki SMA 0/12,8 opracowanej zgodnie z [12] był następujący:

- mączka wapienna 10%,
- kruszywo drobne wapienne 0/4 12%,
- kruszywo dolomitowe 2/6 15%,
- kruszywo z piaskowca kwarcytowego (frakcja 2/6,3 i 6,3/12,8) 63%.

W mieszance mineralnej zastosowano dodatek wapna hydratyzowanego (HL), które wprowadzano zamiennie do wypełniacza mineralnego w ilości 10, 20, 30, 40 i 50% w stosunku do masy wypełniacza. Po dokładnym wymieszaniu wapna hydratyzowanego z wypełniaczem wapiennym uzyskiwano wypełniacz mieszany, który obecnie jest charakteryzowany przez normę PN-EN 13043.

Jako lepszycze stosowano asfalt D70 (obecnie 50/70), który modyfikowano polimerem SBS Kraton 1101 CM w ilości 2, 4 i 6% w stosunku do masy asfaltu. Zawartość lepszycza zaprojektowano metodą doświadczalną, wykonując badania zawartości wolnych przestrzeni  $V_m$ , nasiąkliwości wagowej  $A$ , modułu statycznego pełzania  $E_s$ , głębokości koleiny  $RD$ , odporności na oddziaływanie wody  $WR_{wm}$  i odporności na spękania niskotemperaturowe  $R_r$  mieszanki SMA, które przedstawiono w [16].

Wpływ ilości wapna hydratyzowanego oraz polimeru SBS na właściwości mieszanki SMA oceniano za pomocą analizy statystycznej wykorzystując następujący model matematyczny [17]:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_2 \cdot x_1 + b_4 \cdot x_1^2 + b_5 \cdot x_2^2, \quad (1)$$

gdzie:

- $y$  – badany parametr mieszanki,
- $x_1$  – zawartość polimeru SBS w asfalcie [%],
- $x_2$  – zawartość wapna hydratyzowanego w wypełniaczu [%],
- $b_0 \div b_5$  – współczynniki doświadczalne.

mineral mix including the aggregate of quartzite limestone. The composition of SMA mixture 0/12.8 designed after [12] was as follows:

- lime dust 10%,
- fine lime aggregate 0/4 12%,
- dolomite aggregate 2/6 15%,
- quartzitic sandstone aggregate (fractions 2/6.3 and 6.3/12.8) 63%.

The additive of hydrate lime (HL) was brought interchangeably with the 10, 20, 30, 40 and 50% amount comparing to the filler mass to make the mineral mix. The achieved filler currently described by the standard PN-EN 13043 is the product of thorough intermixing hydrate lime with the lime filler.

Bitumen D70 (currently 50/70) modified with the 2, 4 and 6% amount of the polymer SBS Kraton 1101 CM comparing to the bitumen mass was used as a binder. The binder content was designed with the use of an experimental method providing for testing the air void content  $V_m$ , weight absorbability  $A$ , static creeping modulus  $E_s$ , rut depth  $RD$ , water resistance  $WR_{wm}$ , and resistance to low temperature cracking  $R_r$  of SMA mixtures described in [16].

The impact of hydrated lime and SBS polymer on the SMA mixture properties was examined by means of adopted mathematical model [17]:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_2 \cdot x_1 + b_4 \cdot x_1^2 + b_5 \cdot x_2^2, \quad (1)$$

where:

- $y$  – the parameter of the mixture being tested,
- $x_1$  – the content of SBS polymer in bitumen [%],
- $x_2$  – the content of hydrated lime in a filler [%],
- $b_0 \div b_5$  – experimental coefficients.

Some selected parameters describing the SMA mixture resistance to the development of permanent deformations (the rut depth  $RD$  determined for the 5 cm depth SMA slab, and the resilient modulus of tensile creep  $E_s$ ) is depicted in Fig. 1.

Wybrane parametry charakteryzujące odporność mieszanki SMA na powstanie deformacji trwałych (głębokość koleiny  $RD$ , określoną dla płyty SMA o grubości 5 cm oraz moduł sztywności pełzania  $E_s$ ) przedstawiono na Rys. 1.

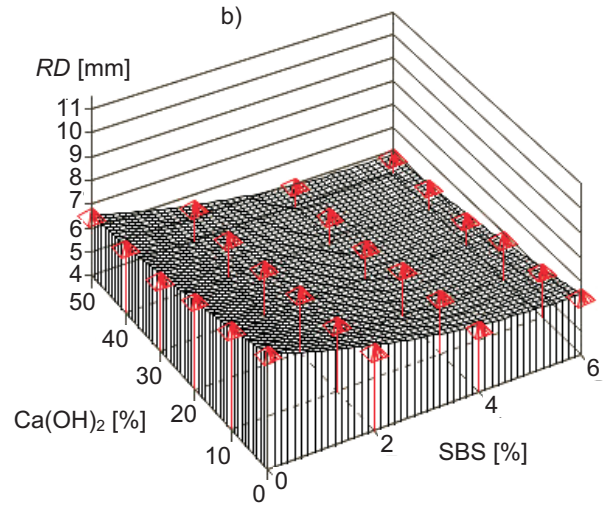
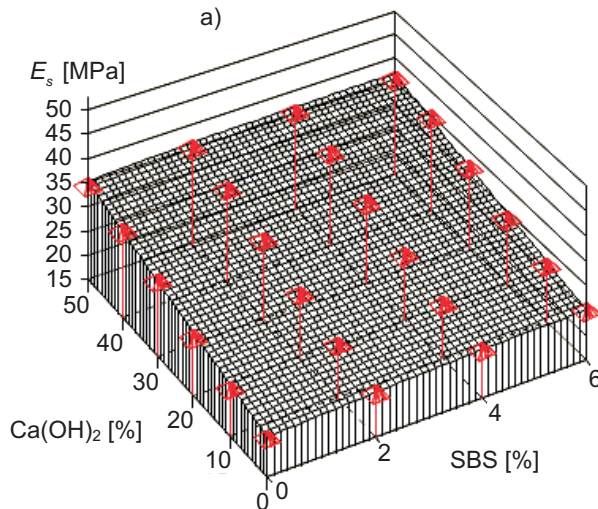


Fig. 1. Properties of SMA mixture as a function of content of hydrated lime  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  and polymer SBS: a) static creep modulus  $E_s$ , b) rutting resistance  $RD$

Rys. 1. Właściwości mieszanki SMA w funkcji zawartości wapna hydratyzowanego  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  i polimeru SBS: a) moduł statyczny  $E_s$ , b) odporność na koleinowanie  $RD$

Ocenę statystyczną wpływu istotności czynników (wapno hydratyzowane, polimer SBS) na moduł statyczny pełzania oraz głębokość koleiny na podstawie analizy wariancji (ANOVA) wpływu czynników  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  oraz SBS przedstawiono w Tabelcy 1. Praktycznie bliskie jedności wartości współczynnika  $R^2$  wskazują na prawidłowo opracowany model zależności ocenianych parametrów mieszanki SMA od analizowanych czynników. Wartości współczynników eksperymentalnych modeli regresji podano w Tabelcy 2.

Table 1.  $R^2$  coefficient values and the factors influence assessment

Tablica 1. Wartości współczynnika  $R^2$  i ocena wpływu czynników

Parameter Parametr	$R^2$	Hydrated lime Wapno hydratyzowane $\text{Ca}(\text{OH})_2$	Polimer SBS
$E_s$ [MPa]	0.9858	0.0007	0.0142
$RD$ [mm]	0.9900	< 0.0001	< 0.0001

Graniczny poziom istotności (ang.  $p$ -value) w analizie danych oznacza prawdopodobieństwo, że uzyskuje ono wartość pewnej statystyki (np. różnicy średnich) taką jak faktycznie jest obserwowana, lub bardziej oddaloną od „zera”, przy założeniu, że hipoteza zerowa jest spełniona. Jest to więc liczbowe wyrażenie istotności statystycznej.

Statistical assessment of influence significance of individual elements (hydrated lime, SBS polymer) on the static modulus of creeping and rut depth grounded on the variance analysis (ANOVA) of impact factors  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  and SBS are presented in Table 1. Practically all close to unity values of the multiplier  $R^2$  point at correctness of the elaborated relationship model of the evaluated parameters of SMA mixtures. Values of experimental regression models are presented in Table 2.

Table 2. The values of coefficients of the experimental regression models for  $E_s$  and  $RD$

Tablica 2. Współczynniki eksperymentalnych modeli regresji dla  $E_s$  i  $RD$

Parameter Parametr	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$
$E_s$ [MPa]	22.844940	0.672024	0,234423	-0.047917	-0.003114	0.000281
$RD$ [mm]	7.612083	-0,699762	-0,058227	0.058333	0.001257	0.000335

The critical level of significance also known as the  $p$ -value in data analysis denotes reaching a probability of a certain statistical value (e.g. the difference of means) as it is actually observed or a probability more distant from “zero”, assuming that the null hypothesis is true. Basically, it is a numerical depiction of statistical significance. With the assumed level of significance  $\alpha = 0.05$

Przy założonym poziomie istotności  $\alpha = 0,05$  wartość  $p$ -value  $< 0,001$  oznacza, że odrzucono hipotezę zerową stanowiącą, że nie ma istotnych różnic pomiędzy rozpatrywanymi średnimi wyników. W tym wypadku przyjmuje się hipotezę zerową wskazującą o istnieniu co najmniej dwóch poziomów średniej wyników różniące się istotnie (co wskazuje na istotny wpływ danego czynnika np.: wapno hydratyzowane lub polimer na daną cechę np.:  $E_s$  lub  $RD$ ).

W związku z tym, wpływ wapna hydratyzowanego na właściwości mieszanki SMA, zgodnie z oceną analizy wariancji dla parametru moduł sztywności pełzania  $E_s$  (Tabl. 1), jest bardziej znaczący ( $p$ -wartość = 0,0007) niż polimeru SBS ( $p$ -wartość = 0,0142). W odniesieniu dla parametru  $RD$  obydwa czynniki wskazują na silny wpływ na rozważaną cechę. Na podstawie dokonanej analizy statystycznej można stwierdzić, że obserwuje się synergizm (współdziałanie) obu zastosowanych materiałów (wapno hydratyzowane, polimer SBS) na właściwości mieszanki SMA.

Zgodnie ze stosowanymi w tym czasie w polskim drogownictwie wymaganiami, moduł sztywności pełzania mieszanki SMA powinien być wyższy od 19 MPa. Już przy zawartości 10% wapna hydratyzowanego w mieszance SMA, nawet bez zastosowania modyfikacji lepiszcza polimerem SBS jest spełnione to kryterium.

Zarówno wpływ wapna hydratyzowanego jak i polimeru SBS jest istotny w przypadku oceny odporności na powstawanie koleiny w nawierzchni SMA (Rys. 1b). Na przełomie XX i XXI wieku w Polsce badania odporności na powstawanie kolein były dopiero wdrażane w zakres badań laboratoryjnych, nie było więc kryteriów normowych oceny tej właściwości nawierzchni SMA. Badanie było wykonywane w koleinomierzu typu angielskiego. Odporność na powstawanie kolein oceniano na podstawie głębokości koleiny po 10000 cykli przejścia koła po próbnicy. Nie powinna ona być większa od 10 mm. Rezultaty badań pokazują, że niezależnie od składu mieszanki SMA spełnione jest to kryterium. Przy czym oczywiście wraz ze zwiększeniem koncentracji wapna hydratyzowanego oraz polimeru SBS w lepiszczu następuje znacząca poprawa odporności mieszanki SMA na koleinowanie – głębokość koleiny zmniejsza się.

W celu dokonania prawidłowej charakterystyki wpływu dodatku wapna hydratyzowanego i polimeru SBS na właściwości kompozytu mineralno-asfaltowego, ze względu na duże zróżnicowanie ich oddziaływania, dokonano analizy statystycznej wyników badań wykorzystując

the  $p$ -value  $< 0.001$  implies that the null hypothesis has been ruled out. It determines the lack of significant differences between investigated means of results. In these circumstances the null hypothesis is accepted as at least two levels of means of substantially different results. It points at considerable influence of a given factor e.g. hydrated lime or a polymer on characteristics in question e.g.  $E_s$  or  $RD$ .

Consequently, the influence of hydrated lime on qualities of SMA mixtures, in accordance with the assessment of variance analysis for the resilient modulus of creeping  $E_s$  (Table 1) is more significant ( $p$ -value = 0.0007) than the SBS polymer ( $p$ -value = 0.0142). With reference to the parameter  $RD$  both factors indicate powerful influence on the deliberated characteristics. Further, basing on the undertaken statistical analysis one may find the synergetic effect (co-operation) of both applied materials (hydrated lime, SBS polymer) on properties of the SMA mixture.

According to the requirements prevailing at that time in the Polish highway engineering the SMA creeping resilient modulus should be higher than 19 MPa. This criterion is already satisfied with just the 10% content of hydrated lime even without the application of the SBS polymer modified binder.

The impact of hydrated lime as well as the SBS polymer are significant in the instance of assessing the resistance to rutting SMA pavements (Fig. 1b). Researches on the rutting resistance within the scope of laboratory investigations were only introduced in Poland at the turn of the 20th and 21st centuries, so there were no standard assessment criteria for that property of SMA pavement. The tests of rutting resistance were carried out with the use of an English type wheel tracker. The research subjects were rut depths after 10000 passages across a specimen. It is common knowledge that they should not exceed 10 mm. That criterion was met by test results regardless the mixture composition. Obviously, the higher concentration of hydrated lime and the SBS polymer in the binder induces a considerable improvement in the SMA rutting resistance resulting in the rut depth decrease.

The statistical analysis of test results with the use of the SAS programme was carried out to draw up an accurate description of the impact of hydrated lime and the SBS polymer due to the significant diversification of their effects on properties of the mineral-bitumen composite. The generalised usefulness function worked out by Harrington [18] was used as an analysis criterion. It is clearly laid down as follows:

program SAS. Jako kryterium analizy przyjęto uogólnioną funkcję użyteczności opracowaną przez Harringtona [18] wyrażoną w postaci:

$$U^{\text{III}} = \exp \left[ - \sum_{i=1}^m w_i \cdot \exp \left( - \frac{y^{(i)} - y_G^{(i)}}{y_L^{(i)} - y_G^{(i)}} \right) \right], \quad (2)$$

gdzie:

- $y^{(i)}$  – badane właściwości kompozytu mineralno-asfaltowego,
- $y_L^{(i)}$  – wartość gorsza  $i$ -tej badanej właściwości,
- $y_G^{(i)}$  – wartość lepsza  $i$ -tej badanej właściwości,
- $w_i$  – wagi przypisane poszczególnym właściwościom  $y^{(i)}$ , przy czym  $0 \leq w_i \leq 1, i=1, 2, \dots, m$ .

W metodzie tej wartości wszystkich rozważanych kryteriów wyrażane są we wspólnej bezwymiarowej skali. Skonstruowanie takiej skali wymaga określenia dla każdego kryterium przedziału wartości zadowalających, ze wskazaniem wartości gorszej  $y_G^{(i)}$  i lepszej  $y_L^{(i)}$ . Jeżeli korzystniejsze są większe wartości badanej właściwości to  $y_G^{(i)} < y_L^{(i)}$ . Natomiast, jeżeli zaś mniejsze to  $y_G^{(i)} > y_L^{(i)}$ . Ideowy schemat kryterium użyteczności przedstawiono na Rys. 2 [17].

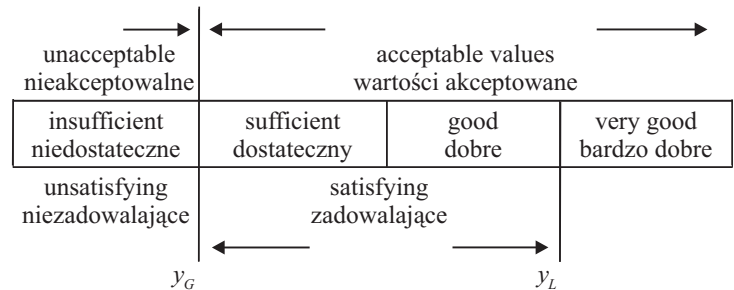
Fig. 2. Scheme of usefulness criterion  
Rys. 2. Ideowy schemat kryterium użyteczności

$$U^{\text{III}} = \exp \left[ - \sum_{i=1}^m w_i \cdot \exp \left( - \frac{y^{(i)} - y_G^{(i)}}{y_L^{(i)} - y_G^{(i)}} \right) \right], \quad (2)$$

where:

- $y^{(i)}$  – tested properties of a mineral-bitumen composite,
- $y_L^{(i)}$  – a dissatisfactory value of a property ( $i$ ),
- $y_G^{(i)}$  – a satisfactory value of a property ( $i$ ),
- $w_i$  – weights attributed to individual properties  $y^{(i)}$ , for  $0 \leq w_i \leq 1, i=1, 2, \dots, m$ .

Values of all considered criteria of this method are expressed on a common non-dimensional scale. Drawing up such a scale needs the determination of satisfactory values interval for each criterion with an appointment of dissatisfactory value  $y_G^{(i)}$ , and satisfactory one  $y_L^{(i)}$ . If higher values of the tested property are satisfactory, then  $y_G^{(i)} < y_L^{(i)}$ , but when lower ones are satisfactory, then  $y_G^{(i)} > y_L^{(i)}$ . The schematic usefulness diagram illustrates Fig. 2 [17].



Poszczególnym kryteriom oprócz przedziałów zadowalających wartości przypisuje się także nieujemne współczynniki odzwierciedlające ważność tych kryteriów. Suma wag musi być oczywiście równa 1. Przyjęcie przedziałów wartości zadowalających oraz wag dla poszczególnych cech opiera się na znajomości technicznych wymagań w przewidywanym zastosowaniu materiału.

Użyteczności  $U_i^{\text{III}}$  są liczbami z przedziału (0;1), przy czym liczby bliskie 0 odpowiadają szczególnie niekorzystnym wartościom cechy  $y^{(i)}$ , zaś bliskie 1 – najbardziej korzystnym. Zbiór wartości  $y^{(i)}$  uznanych za zadowalające przekształca się więc w przedział (0,368; 0,692). W tym przedziale użyteczności są one najbardziej czułe na zmianę wartości danej cechy. Zivorad [19] przedstawił przedziały jakościowe funkcji użyteczności w postaci tabelarycznej (Tabl. 3).

Except for intervals of satisfactory values also non-negative coefficients are also attributed to individual criteria reflecting their significance. Obviously, the weighted sum has to be equal to unity. Taking on the intervals of satisfactory values and weights for individual properties is grounded on the knowledge of technical requirements for the predicted application of a given material.

The usefulness indices  $U_i^{\text{III}}$  are numbers from the interval (0;1), next to numbers close to zero corresponding to especially dissatisfactory property values, while numbers close to unity – to the most satisfactory ones. The set of values  $y^{(i)}$  regarded as satisfactory ones is being transformed into the interval (0.368; 0.692). The value of a given property in this interval of usefulness is extremely sensitive to the change of its magnitude. Zivorad [19] presented quality intervals of the usefulness function in a tabular form (Table 3).

Table 3. Assessment of the desirability function quality [17, 19]

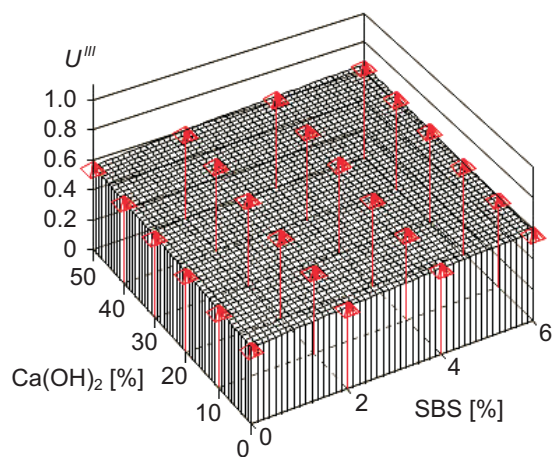
Tablica 3. Ocena jakości funkcji użyteczności [17, 19]

Quality interval / Przedział jakościowy	Meaning / Interpretacja
1.00	Perfect value / Wartość doskonała
1.00 - 0.83	Very good value representing achievement of material quality of unusual optimization properties Wartość bardzo dobra reprezentująca uzyskanie jakości materiału o niezwykłych właściwościach optymalizacyjnych
0.83 - 0.63	Value representing good quality which is above average Reprezentuje jakość dobrą powyżej przeciętnej
0.63 - 0.37	Satisfying value which is possible to assume under certain conditions Wartość satysfakcjonująca możliwa do przyjęcia w określonych warunkach
0.37 - 0.20	Unacceptable value which may increase unreliability of the optimized product Wartość nie do przyjęcia, która może zwiększyć zawodność optymalizowanego produktu

Wartość użyteczności  $U'''$  ulega znacznemu obniżeniu, jeżeli choć jedno z kryteriów przyjmuje wartości nieakceptowane (gorsze od zadowalających). Zwiększa to szanse na to, że w punkcie odpowiadającym maksymalnej użyteczności  $U'''$  wszystkie kryteria będą przyjmować wartości co najmniej zadowalające. Wyznaczenie wartości funkcji użyteczności pozwala na ocenę badanego materiału ze względu na cały zestaw przyjętych kryteriów, z uwzględnieniem ich ważności. Optymalizacja z użyciem funkcji użyteczności zawiera wiele kryteriów, aby w ostatniej fazie sprowadzić całe zadanie optymalizacji do oceny jednowymiarowej. Postać funkcji użyteczności według Harringtona przestawiono na Rys. 3.

The usefulness index  $U'''$  is subject to a sharp decrease when at least one of criteria adopts dissatisfactory (worse than satisfactory) properties. It improves chances of all criteria to approve at least satisfactory values at the point reflecting maximum usefulness  $U'''$ . Outlining values of the usefulness function enables assessment of the being tested material on account of the whole combination of accepted criteria considering their significance. The optimisation with the use of usefulness function contains many criteria but finally it comes down to the univariate assessment. Fig. 3 reveals the Harrington's version of the usefulness function.

Fig. 3. Regression model of desirability function of the SMA mixture as a function of content of hydrated lime and SBS polymer  
Rys. 3. Model regresyjny funkcji użyteczności mieszanki SMA w aspekcie ilości wapna hydratyzowanego i polimeru SBS



Na podstawie funkcji użyteczności wybrano do dalszych badań optymalny skład mieszanki SMA:

- asfalt D70 (50/70) + 4% polimeru SBS,
- wapno hydratyzowane w ilości 30% w mące mineralnej; zamiennie stosowano jako środek adhezyjny aminę kwasu tłuszczowego w ilości 0,5% w stosunku do asfaltu.

Natomiast wybrane właściwości mieszanki SMA przedstawiono w Tablicy 4 [16].

Here is the optimal composition of SMA mixture grounded on the usefulness function and selected for further testing:

- bitumen D70 (50/70) + 4% of the SBS polymer,
- hydrated lime amounted to 30% of the mineral dust, fatty acid amine amounted to 0.5% of bitumen interchangeably applied as adhesive agents.



Table 4. Selected properties of the SMA mixture  
 Tablica 4. Wybrane właściwości mieszanki SMA

Some selected exemplary characteristics of the SMA mixture shows Table 4 [16].

SMA mixture properties / Właściwości mieszanki SMA		Type of adhesive agent Rodzaj środka adhezyjnego	
		Hydrated lime Wapno hydratyzowane HL	Fatty acid amine Amina tłuszczowa A
Void fraction content / Zawartość wolnej przestrzeni	[%]	3.5	3.7
Water absorption / Nasiąkliwość wagowa	[%]	0.28	0.35
Creep stiffness modulus / Moduł sztywności pełzania	[MPa]	24.8	22.5
ITS tensile strength / Wytrzymałość na rozciąganie ITS	[MPa]	1.46	1.52
Maximal depth of a rut / Maksymalna głębokość koleiny	[mm]	5.1	5.6
Low temperature cracking resistance PANK 4302 Odporność na spękania niskotemperaturowe PANK 4302	[MPa]	2.2	3.1
Resistance according to AASHOTO T283 to / Odporność według AASHOTO T283 na:			
• water influence / oddziaływanie wody $WR_w$	[%]	89.2	86.1
• frost and water influence / oddziaływanie wody i mrozu $WR_{wm}$	[%]	79.4	77.8

### 3. WŁAŚCIWOŚCI NAWIERZCHNI SMA PO 12 LATACH EKSPLOATACJI

#### 3.1. RÓWNOŚĆ POPRZECZNA NAWIERZCHNI SMA

Na podstawie badań laboratoryjnych wykonanych w 1999 roku na ul. Żelaznej w Kielcach na jezdni wschodniej, na odcinku 350 m – zgodnie z opracowaną recepturą – została wykonana warstwa ścieralna nawierzchni z mieszanki SMA, zawierającej asfalt D70 (50/70) modyfikowany 4% polimeru SBS oraz zawierającą w składzie wypełniacza 30% wapna hydratyzowanego (HL). Natomiast w celach kontrolnych na jezdni zachodniej wykonano mieszankę SMA bez wapna hydratyzowanego, w której dla zapewnienia prawidłowej odporności na oddziaływanie wody i mrozu zastosowano tradycyjny środek adhezyjny tj. aminę kwasu tłuszczowego (A) w ilości 0,2% .

Stan nawierzchni SMA monitorowano za pomocą Systemu Oceny Stanu Nawierzchni (SOSN), wykonując każdego roku eksploatacji w okresie wiosennym pomiar głębokości koleiny za pomocą łaty i klina (Rys. 4).

Na szczególną uwagę zasługuje odporność warstwy SMA na deformacje trwałe. Po trzech latach eksploatacji nawierzchni SMA zawierającej w swoim składzie aminę kwasu tłuszczowego (A) powstała koleina o głębokości 1 mm. Natomiast na warstwie SMA z dodatkiem wapna

### 3. PROPERTIES OF SMA PAVEMENTS AFTER 12-YEAR EXPLOITATION

#### 3.1. TRANSVERSE EVENNESS OF SMA PAVEMENTS

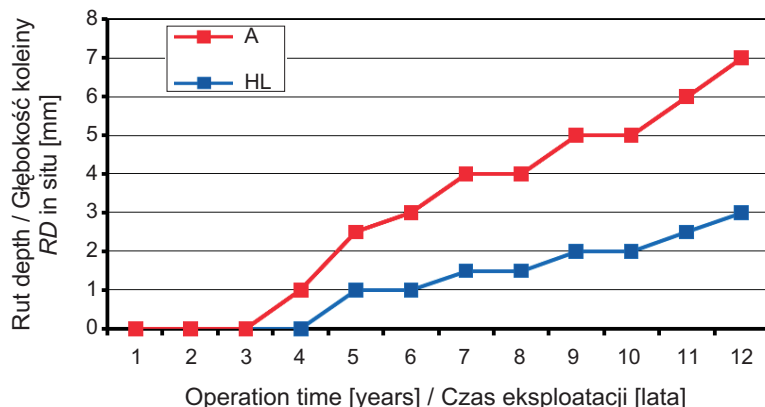
The 350-meter stretch of the south pavement of Żelazna Str. in Kielce (Poland) was paved in 1999 with a wearing course of the SMA mixture in accordance with a designed recipe grounded on the performed laboratory tests. It contained D70 (50/70) bitumen modified with the SBS polymer amounting to 4% of a binder, and hydrated lime (HL) amounting to 30% of a filler. Alternatively, for control reasons the west pavement of the street in question was paved with the SMA mixture with no hydrated lime added, but with an ordinary adhesion agent e.g. fatty acid amine (A) amounting to 0.2%.

The state of SMA pavement was monitored using the assessment system for pavement condition (the Polish abbr. SOSN stands for *System Oceny Stanu Nawierzchni*), measuring rut depths with the use of a stuff and wedge in summertime every year of its operation (Fig. 4).

The SMA resistance to permanent deformations is extremely worthy noticing. The rut of 1 mm depth developed after 3-year operation of the SMA pavement containing in its composition fatty acid amine (A). However, the similar rut on a layer with hydrated lime (HL)

hydratyzowanego (HL) koleina o takiej głębokości powstała rok później. Z każdym rokiem eksploatacji obserwowano rozwój koleiny na obu nawierzchniach SMA. Przy czym należy zaznaczyć, że wzrost głębokości kolein miał charakter zbliżony do trendu liniowego. Po 12 letnim okresie eksploatacji głębokość koleiny na warstwie SMA z wapnem hydratyzowanym wynosiła 3 mm, a w przypadku zastosowania aminy kwasu tłuszczowego 7 mm. Należy zaznaczyć, że zgodnie z SOSN nawierzchnie o takiej głębokości koleiny zaliczane są do klasy A – charakteryzującej najlepszy stan nawierzchni. Można również wnioskować, że w dalszym okresie eksploatacji zachowana zostanie bardzo duża odporność na koleinowanie warstwy SMA z wapnem hydratyzowanym oraz aminą kwasu tłuszczowego.

Fig. 4. Characteristics of the SMA pavement expressed in terms of rut depth  
Rys. 4. Charakterystyka nawierzchni SMA w zakresie głębokości koleiny



## 3.2. TEST PEŁZANIA LEPI SZCZA ODZYSKANEGO POD OBCIĄŻENIEM DYNAMICZNYM MSCR

### 3.2.1. Metodyka badań według MSCR

W badaniach wykorzystano dwa rodzaje lepiszcza odzyskanego z mieszanki SMA wbudowanej w nawierzchnię jezdni północnej i południowej ul. Żelaznej w Kielcach. Z każdej nawierzchni pobierano próbę z koleiny (RD) oraz z nawierzchni w normalnym stanie (N). Na podstawie wykonanych ekstrakcji odzyskiwano lepiszcze (asfalt D70 (50/70) z zawartością 4% polimeru SBS) z mieszanki SMA zawierającej w swoim składzie wapno hydratyzowane (HL) lub aminę kwasu tłuszczowego (A). Aby zagwarantować homogenizację odzyskanego lepiszcza mieszano je w blenderze przy zachowaniu stałej temperatury, przy 400 obr/min [19].

W celu oceny jakości odzyskanego lepiszcza w zakresie wpływu na odporność nawierzchni SMA na powstawanie deformacji trwałych, wykonano badanie MSCR (ang. *Multiple Stress Creep Recovery Test of Asphalt Binder*)

added appeared one year later. With the passage of operation time the development of rutting was observed on both pavements. It is worth noticing that the growth of rut depth was being practically linearly. After 12-year operation the rut depth on the SMA layer with hydrated lime amounted to 3 mm, when in the case of application of fatty acid amine that deformation equalled to 7 mm. The fact remains that, according to the SOSN guidelines pavements that the a.m. rut depths are numbered among the class A including the best state of pavement. One may also suppose that very high rutting resistance of the SMA layer with hydrated lime and fatty acid amine will be preserved for a long time of operation.

## 3.2. MSCR CREEPING TEST OF EXTRACTED BINDER UNDER THE DYNAMIC LOAD

### 3.2.1. MSCR methodology of testing

Two types of extracted binder from the SMA mixture placed into the north and south pavements of Żelazna Str. in Kielce, Poland were used for testing. Samples were taken of each pavement rut (RD) and the pavement in a normal condition (N). The binder i.e. bitumen D70 (50/70) with 4 per cent amount of the SBS polymer was extracted from the SMA mixture containing in its composition hydrated lime (HL) or fatty acid amine (A). Finally, they were mixed at a speed of 400 r.p.m. in a blender at the constant temperature.

The MSCR test (Multiple Stress Creep Recovery Test of Asphalt Binder) after the AASHTO TP70 methodology was carried out to obtain a quality assessment of the extracted

zgodnie z metodyką AASHTO TP70. Metoda ta pozwala ocenić wielkość podatności na pełzanie oraz relaksacji naprężeń lepiszcza użytego w mieszance w symulowanych warunkach obciążenia, zbliżonych do rzeczywistych oraz o nieliniowym charakterze lepkosprężystym asfaltu w szerokim zakresie naprężeń. Badanie wykonano zgodnie z metodyką przedstawioną w [20].

Wykonane badania lepiszcza odzyskanego z nawierzchni SMA obejmowały pomiar następujących parametrów:

- podatność na pełzanie  $J_{nr100}$  (naprężenie 100 Pa),
- podatność na pełzanie  $J_{nr3200}$  (naprężenie 3200 Pa),
- nawrót sprężysty odkształcenia  $R$  [%].

Wartości badanych parametrów zostały oszacowane na podstawie zmian odkształcenia w procesie obciążania i odciążania próbki asfaltu (Rys. 5).

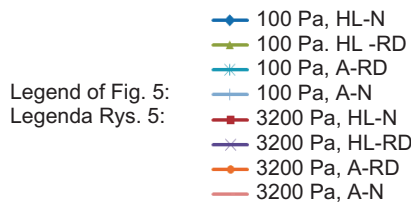
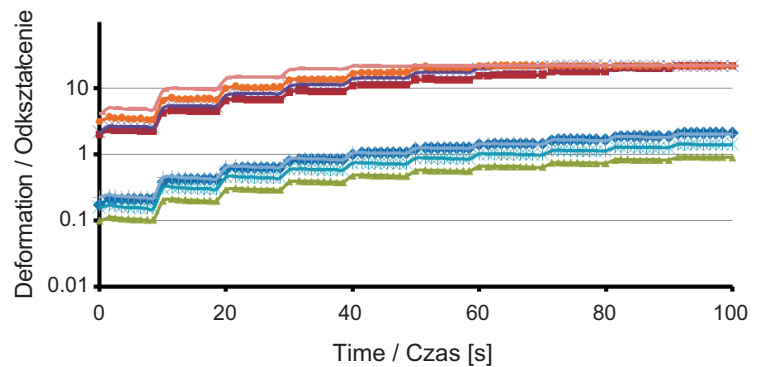


Fig. 5. Changes of strain of the binder extracted from the SMA pavement for a given dynamic stress  
Rys. 5. Zmiany odkształcenia lepiszcza odzyskanego z nawierzchni SMA dla zadanego dynamicznego naprężenia



Oznaczenia zastosowane na Rys. 5 są następujące:

- HL-N – próbka SMA z wapnem hydratyzowanym pobrana poza koleinę,
- HL-RD – próbka SMA z wapnem hydratyzowanym pobrana w koleinie,
- A-N – próbka SMA z aminą tłuszczową pobrana poza koleinę,
- A-RD – próbka SMA z aminą tłuszczową pobrana w koleinie.

Należy zwrócić uwagę, że bez względu na miejsce pobrania próbki z nawierzchni (koleina, nawierzchnia bez koleiny), lepiszcze pochodzące z mieszanki SMA z dodatkiem wapna hydratyzowanego charakteryzuje się niższym poziomem odkształcenia niż otrzymane z mieszanki SMA w której zastosowano aminę kwasu tłuszczowego. Fakt ten ma bezpośredni wpływ na poziom podatności na pełzanie lepiszcza  $J_{nr}$  określony w 100 Pa oraz 3200 Pa (Rys. 6).

binder within the scope of its influence on development of permanent deformations of SMA pavements. That method enables the assessment of creeping susceptibility and stress relaxation of a binder used for the mixture in simulated conditions of loading as near as possible to the real ones and with a non-linear viscoelastic character of bitumen in the broad range of stress. The test was carried out according to the methodology advanced in [20].

Tests of the binder extracted from the SMA pavement covered measurements of the following parameters:

- creep compliance  $J_{nr100}$  (stress of 100 Pa),
- creep compliance  $J_{nr3200}$  (stress of 3200 Pa),
- elastic strain recovery  $R$  [%].

The values of tested parameters were evaluated on the grounds of strain changes due to loading-unloading process of the bitumen specimen (Fig. 5).

The markings presented on Fig. 5 are as follows:

- HL-N – the SMA sample with hydrated lime collected outside the rut,
- HL-RD – the SMA sample with hydrated lime taken from the rut,
- A-N – the SMA sample with fatty acid amine taken outside the rut,
- A-RD – the SMA sample with fatty acid amine taken from the rut.

It should be stressed that regardless the sampling site of a pavement (a rut, a pavement free from ruts) the binder coming from the SMA mixture with hydrated lime added is distinguished by the lower level of deformations than the one extracted from the SMA mixture with fatty acid amine applied. That fact has a direct effect on the binder creep compliance level  $J_{nr}$  determined at 100 Pa and 3200 Pa (Fig. 6).

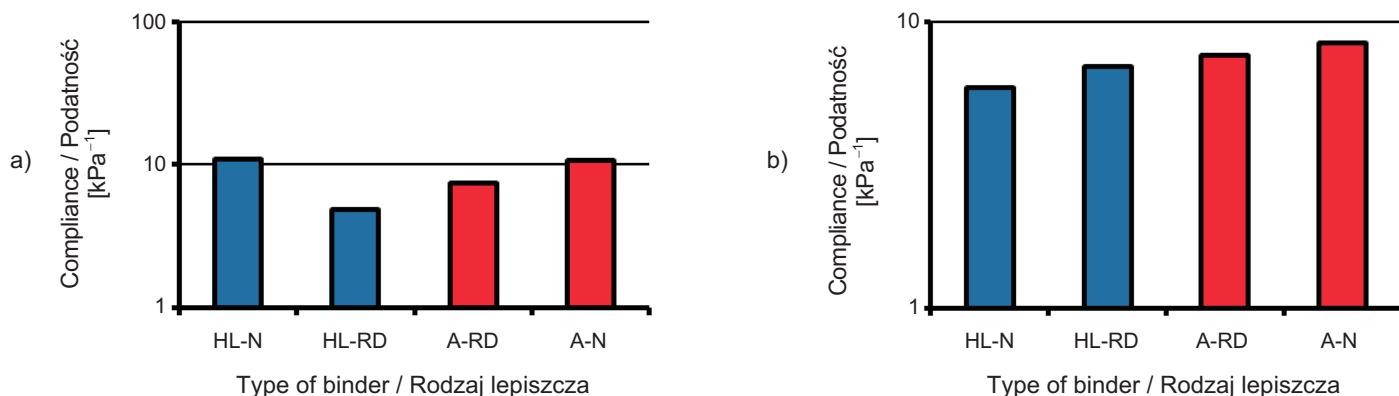


Fig. 6. Measurements results of the extracted binder creep compliance according to MSCR procedure: a)  $J_{nr}$  at 100 Pa, b)  $J_{nr}$  at 3200 Pa  
 Rys. 6. Wyniki pomiarów podatności lepiszcza odzyskanego według procedury MSCR: a)  $J_{nr}$  określony w 100 Pa, b)  $J_{nr}$  określony w 3200 Pa

Oznaczenia na Rys. 6 są zgodne z przedstawionymi w Tabelicy 4. Lepiszczce z mieszanki SMA z dodatkiem wapna hydratyzowanego ma niższy poziom podatności na pełzanie  $J_{nr}$  niż odzyskane z mieszanki SMA z dodatkiem aminy tłuszczowej. Wynik ten jest zauważalny bez względu na poziom naprężenia. Z uwagi na niewielkie różnice pomiędzy średnimi, do określenia istotnego zróżnicowania wpływu wapna hydratyzowanego na oceniany parametr lepiszcza, wykonana zostanie w dalszej części opracowania analiza wariancji oraz wynikające z niej testy porównań wielokrotnych wariancji.

Elementem uzupełniającym analizy według MSCR jest nawrót sprężysty części odkształcenia lepiszcza (Rys. 7). W odniesieniu do niskich naprężeń poziom odkształcenia lepiszcza odzyskanego z mieszanki SMA z dodatkiem wapna hydratyzowanego i aminy kwasu tłuszczowego jest na porównywalnym poziomie. W sytuacji zastosowania wysokiego poziomu naprężeń różnica jest prawie niezauważalna. W związku z tym, w celu ustalenia oddziaływania wapna hydratyzowanego na badaną charakterystykę lepiszcza odzyskanego, niezbędne było dokonanie tej analizy za pomocą oceny wariancji, którą przedstawiono w dalszej części opracowania. Fakt porównywalnego nawrotu sprężystego części odkształcenia wskazuje na korzystny wpływ obecności wapna hydratyzowanego w strukturze asfaltu D70 (50/70) modyfikowanego polimerem SBS. Obniżenie podatności na pełzanie nie spowodowało przemiany lepiszcza w kierunku materiału sprężysto-kruchoego i nie wzmocniło wystąpienia negatywnego efektu tiksotropowego asfaltu „modyfikowanego” wapnem hydratyzowanym.

Fig. 6 has the same marking as in Table 4. The binder of the SMA mixture with hydrated lime added has a lower creep compliance level  $J_{nr}$  than the one extracted from the SMA mixture with fatty amine supplied. It is noticeable regardless of the stress level. For the reason of slight differences between means, and for determining the substantial differentiation between the effect of hydrated lime on the assessed parameter of a binder, a variance analysis and resulting from it comparison tests of multiple variances will be put forward later on.

The elastic recovery of the part of binder strain (Fig. 7) is a supplementary element of the MSCR analysis. The deformation levels due to low stresses of the binder extracted from the SMA mixture with hydrated lime and fatty acid amine added remain on comparable positions. That difference is hardly noticeable when the high level of stresses is applied. In these circumstances, it was necessary to analyse the impact of hydrated lime on the examined characteristics of the extracted binder with the use of the variance assessment which is presented later on. The fact of a comparable elastic recovery of the part of deformation confirms the favourable influence of the presence of hydrated lime in the structure of bitumen D70 (50/70) modified with the SBS polymer. The decrease in the creep compliance did not cause the binder transformation into an elasto-brittle material, and it did not amplify the negative thixotropic effect of bitumen “modified” with hydrated lime.

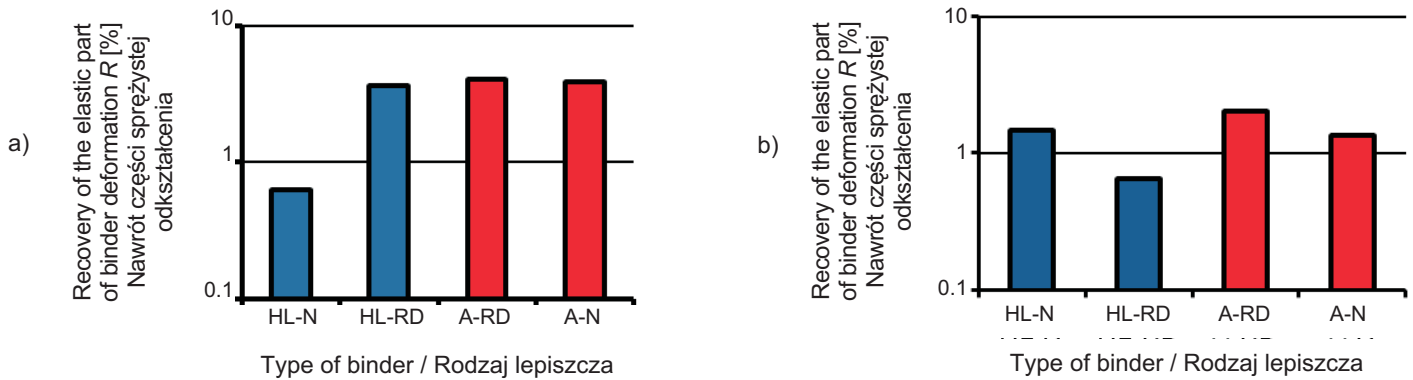


Fig. 7. Measurements results of recovery of the elastic part of deformation of the extracted binder according to MSCR procedure: a)  $R$  at 100 Pa, b)  $R$  at 3200 Pa

Rys. 7. Wyniki pomiarów nawrotu części sprężystej odkształcenia lepiszcza odzyskanego według procedury MSCR:

a)  $R$  określony w 100 Pa, b)  $R$  określony w 3200 Pa

### 3.2.2. Ocena podatności na pełzanie lepiszcza odzyskanego według MSCR

Wyniki oceny istotności wpływu badanych czynników (rodzaj środka – wapno hydratyzowane, amina kwasu tłuszczowego oraz lokalizacja – koleina, poza koleiną – nie odkształcona nawierzchnia) oraz dystrybucja wyników średniej zmian podatności na pełzanie  $J_{nr}$  lepiszcza odzyskanego dla małych naprężeń (100 Pa) oraz wysokich naprężeń (3200 Pa) w temperaturze 60°C przedstawiono w Tablicach 5 i 6 oraz na Rys. 8 i 9. Dystrybucję wyników przedstawiono przy wykorzystaniu wykresów Box-Whisker. Natomiast oddziaływanie czynnika ocenianego, mającego wpływ na rozkład cechy, wyróżniono kolorem czerwonym.

### 3.2.2. Creep compliance assessment of extracted binder in accordance with MSCR

Table 5 and Table 6 together with Fig. 8 and Fig. 9 present the assessment results of impact significance of the tested agents (a type of an agent – hydrated lime, fatty acid amine, and its location – the rut, outside the rut i.e. beyond the deformed pavement), the result distribution of changes to the creep compliance  $J_{nr}$  of the extracted binder at low stresses (100 Pa) and high stresses (3200 Pa) at the temperature of 60°C. The result distribution is depicted with the use of the Box-Whisker's diagrams, while the impact of examined agent influencing the distribution of a feature is marked with a red colour.

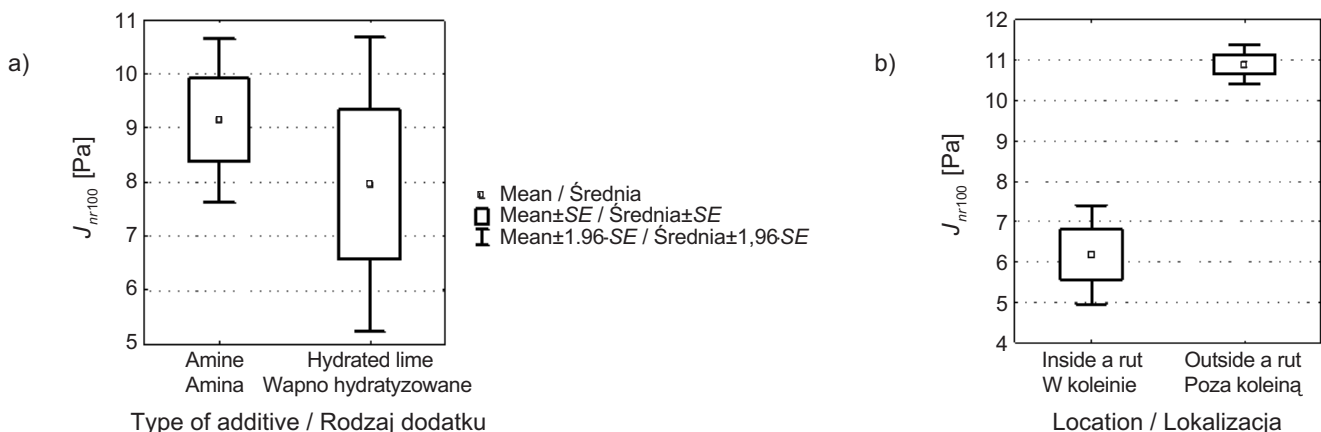


Fig. 8. Results distribution of the extracted binder creep compliance parameter  $J_{nr100}$  with respect to examined factors at a temperature 60°C: a) type of additive, b) location

Rys. 8. Dystrybucja wyników względem badanych czynników parametru podatności lepiszcza odzyskanego  $J_{nr100}$  w temperaturze 60°C: a) względem rodzaju dodatku, b) względem lokalizacji

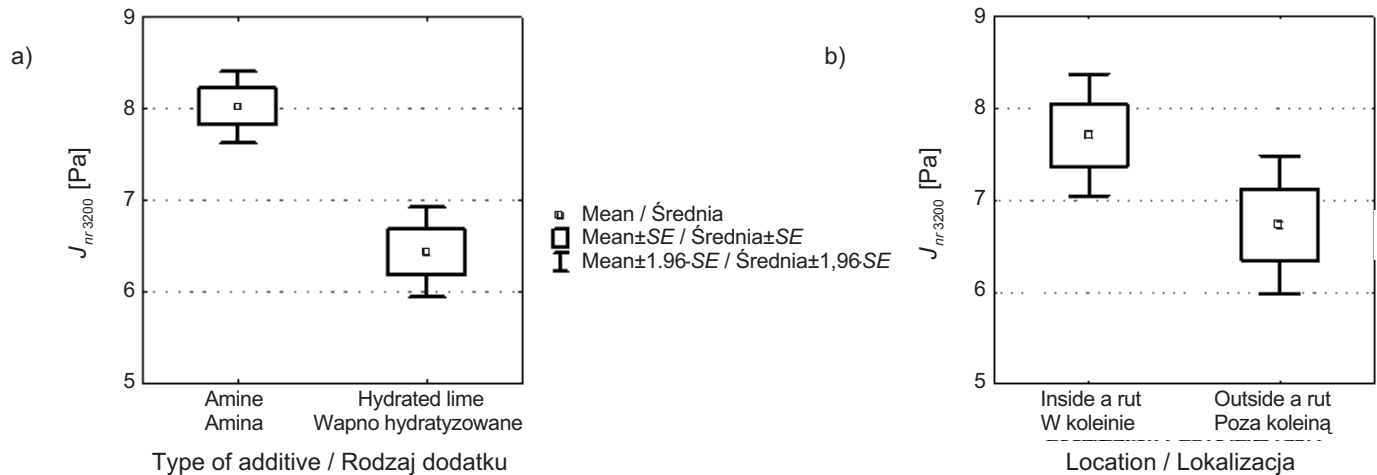


Fig. 9. Results distribution of the extracted binder creep compliance parameter  $J_{nr3200}$  with respect to examined factors at a temperature 60°C: a) type of additive, b) location

Rys. 9. Dystrybucja wyników względem badanych czynników parametru podatności lepszczca odzyskanego  $J_{nr3200}$  w temperaturze 60°C: a) względem rodzaju dodatku, b) względem lokalizacji

Table 5. The evaluation of influence of the significance of the tested factors on the creep compliance of the extracted binder  $J_{nr100}$  at temperature 60°C

Tablica 5. Ocena istotności wpływu badanych czynników na podatność lepszczca odzyskanego  $J_{nr100}$  w temperaturze 60°C

Effect Efekt	Univariate significance tests / Jednowymiarowe testy istotności (Univariate), $DV$ Parameterization with sigma limits / Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Type III effective hypothesis decomposition / Typ III dekompozycja efektywnych hipotez				
	Degrees of freedom Stopnie swobody	$J_{nr100}$ [Pa] SS	$J_{nr100}$ [Pa] MS	$J_{nr100}$ [Pa] F	$J_{nr100}$ [Pa] p
Type of additive / Rodzaj dodatku	1	4.2376	4.23760	11.0246	0.010535
Location / Lokalizacja	1	66.8494	66.84936	173.9170	0.000001
Type of additive * Location Rodzaj dodatku * Lokalizacja	1	6.1562	6.15617	16.0160	0.003939
Error / Błąd	8	3.0750	0.38437		
Total / Suma całkowita	12	956.4712			

Table 6. The evaluation of influence of the significance of the tested factors on the creep compliance extracted binder  $J_{nr3200}$  at temperature 60°C

Tablica 6. Ocena istotności wpływu badanych czynników na podatność lepszczca odzyskanego  $J_{nr3200}$  w temperaturze 60°C

Effect Efekt	Univariate significance tests / Jednowymiarowe testy istotności (Univariate), $DV$ Parameterization with sigma limits / Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Type III effective hypothesis decomposition / Typ III dekompozycja efektywnych hipotez				
	Degrees of freedom Stopnie swobody	$J_{nr3200}$ [Pa] SS	$J_{nr3200}$ [Pa] MS	$J_{nr3200}$ [Pa] F	$J_{nr3200}$ [Pa] p
Type of additive / Rodzaj dodatku	1	7.5593	7.559278	244.7854	0.000000
Location / Lokalizacja	1	2.8611	2.861096	92.6483	0.000011
Type of additive * Location Rodzaj dodatku * Lokalizacja	1	0.0316	0.031565	1.0221	0.341610
Error / Błąd	8	0.2471	0.030881		
Total / Suma całkowita	12	636.6666			

W Tablicy 5 przedstawiono wyniki analizy wariancji wraz z odpowiednimi charakterystykami składowymi. Wśród nich znajdują się: suma kwadratów odchyień od średniej (ang. *Sum of Square*, *SS*), błąd średniokwadratowy (ang. *Mean of Square*, *MS*), *F* – statystyka, która jest rozkładem ilorazu dwóch niezależnych zmiennych losowych *chi-kwadrat*, z których każda podzielona jest przez właściwą dla niej liczbę stopni swobody i *p-wartość* – graniczny poziom istotności pozwalający przeprowadzić testowanie dla dowolnego poziomu istotności. Wartości *p-wartość* < 0,05 oznaczają istotny wpływ danej cechy w danym eksperymencie i są one oznaczone kolorem czerwonym.

Na Rys. 8 oraz 9 zobrazowano wielkości określające wartość średniej arytmetycznej wyników (ang. *Mean*), błąd standardowy średniej (ang. *Standard Error*, *SE*) oraz 95% przedział ufności dla średniej (oznaczony jako  $Mean \pm 1,96 \cdot SE$ ). Wyniki analizy wariancji dla cechy  $J_{nr100}$  (Tabl. 5) wskazują na istotny wpływ czynników: rodzaj dodatku (*p-wartość* = 0,0106) i lokalizacja (*p-wartość* = 0,001) z uwagi na uzyskane wartości krytyczne rozważanych czynników tj. gdy *p-wartość* < 0,05. Znacznie bardziej istotny wpływ rozważanych czynników okazał się mieć znaczenie w odniesieniu dla zastosowania wyższego poziomu naprężeń ścinających  $J_{nr3200}$ . Dla tego parametru uzyskane wartości *p-wartość* są znacznie poniżej 0,05. W obu przypadkach oceny podatności na pełzanie dla niskich  $J_{nr100}$  oraz wysokich  $J_{nr3200}$  naprężeń analiza wariancji ujawniła istotny jest wpływ zarówno rodzaju dodatku (wapno hydratyzowane, amina kwasu tłuszczowego) jak i miejsca nawierzchni, z którego odzyskano lepiszcze (koleina, normalna nawierzchnia). Efekt interakcji jest istotny jedynie w odniesieniu do podatności  $J_{nr100}$  dla niskich naprężeń (*p-wartość* = 0,0039). Natomiast zarówno dla niskich jak i wysokich naprężeń poziom podatności na pełzanie dla lepiszcza odzyskanego z mieszanki SMA z dodatkiem wapna hydratyzowanego jest niższy w przedziale od 11% do 20% w stosunku do lepiszcza z mieszanki SMA z dodatkiem aminy tłuszczowej. Efekt lokalizacji spowodował, że niższy poziom podatności na pełzanie zanotowano w przypadku lepiszcza odzyskanego w koleinie przy niskich naprężeniach ścinających  $J_{nr100}$ . W sytuacji zastosowania wysokich naprężeń efekt był odwrotny, tym razem niższą podatność uzyskały lepiszcza pobrane poza koleinę. Fakt ten może być uzależniony od stanu jakości asfaltu w szczególności ze zróżnicowanym tempem starzenia w zależności od miejsca jego wbudowania/użytkowania oraz typu inhibitora starzenia.

Table 5 depicts results of the variance analysis together with appropriate component characteristics. The following data can be found among them: sums of deviations from the mean squares, i.e. *SS* (Sums of Squares), the mean-square error, i.e. *MS* (Mean of Square), *F* statistics making the quotient distribution of two independent (*chi-squared*) random variables, each of them divided by the appropriate degree of freedom, and *p-value* – the critical significance level which enables carrying out testing at any significance level. A *p-value* < 0.05 (marked with a red colour) denotes considerable impact of a particular feature in a given experiment.

Fig. 8 and Fig. 9 illustrate quantities determining values of the arithmetic mean of results *M*, standard error *SE* and the 95% confidence interval for the mean (marked as  $Mean \pm 1.96 \cdot SE$ ). The results of the variance analysis for the feature  $J_{nr100}$  (Table 5) point out the considerable impact of two factors: the additive type (*p-value* = 0.0106) and location (*p-value* = 0.001) due to the obtained critical values of considered factors coming down to *p-value* < 0.05. A much more extensive impact of considered factors turned out to be significant with reference to the application of the higher level of shear stresses  $J_{nr3200}$ . The obtained results of *p-value* for that parameter are considerably below 0.05. In both cases of the creep compliance for low stresses  $J_{nr100}$  and for high ones  $J_{nr3200}$  the variance analysis revealed powerful impact of not only the type of an additive, but the origin site of the extracted bitumen (a rut, standard pavement) as well. The interaction effect is noticeable only with reference to the compliance  $J_{nr100}$  for low stresses (*p-value* = 0.0039). However, the creep compliance level of the bitumen extracted from the SMA mixture with hydrated lime added both at low and high stresses is lower than for the SMA mixture with fatty amine added within the interval from 11% to 20%. The location effect caused the lower level of creep compliance of a binder extracted from the ruts at low shear stresses  $J_{nr100}$ . The application of high stresses brought about an opposite effect. This time binders collected outside the rut achieved a lower compliance. It may depend on the bitumen quality level, particularly on the diversified aging rate depending on its placement/operation site and type of an aging inhibitor. That effect is much better visible (the interaction effect – type additive\*location) for low shear stresses (*p-value* = 0.0039). For high shear stresses  $J_{nr3200}$  applied to the sample, the binder had probably turned into the Newtonian liquid, so the synergy effect was insignificant differently to the shear

Efekt ten jest znacznie bardziej widoczny (efekt interakcji – rodzaj dodatku\*lokalizacja) dla małych naprężeń ścinających  $J_{nr100}$  ( $p$ -wartość = 0,0039). Dla wysokich naprężeń ścinających  $J_{nr3200}$  przyłożonych do próbki, lepiszcze prawdopodobnie przeszło w stan cieczy newtonowskiej, o szcążkowej lepkości strukturalnej, i efekt współdziałania czynników był znikomy odmiennie do poziomu naprężeń ścinających 100 Pa. Uzyskane wyniki wskazują na złożoność tego zjawiska.

### 3.2.3. Ocena nawrotu sprężystego odkształcenia lepiszcza odzyskanego według MSCR

Wyniki oceny istotności wpływu badanych czynników i dystrybucję wyników średniej zmian nawrotu sprężystego odkształcenia  $R$  dla małych naprężeń (100 Pa) oraz wysokich naprężeń (3200 Pa) w temperaturze 60°C w zależności od poziomu czynników przedstawiono w Tablicach 7 i 8 oraz na Rys. 10 i 11.

stress level at 100 Pa. The achieved results indicate the complexity of this phenomenon.

### 3.2.3. Assessment of elastic recovery of extracted binder according to MSCR

Tables 7 and 8 along with Figures 10 and 11 convey results of the significance assessment of influence of tested elements, and distribution of changes in mean results of elastic recovery  $R$  at low stresses (100 Pa), and high ones (3200 Pa) at the temperature of 60°C depending on the level of elements.

Table 7. The evaluation of significance of the influence of the tested factors on the elastic recovery from deformation of the extracted binder  $R_{100}$  at temperature 60°C  
Tablica 7. Ocena istotności wpływu badanych czynników na nawrót sprężysty odkształcenia lepiszcza odzyskanego  $R_{100}$  w temperaturze 60°C

Effect Efekt	Univariate significance tests / Jednowymiarowe testy istotności (Univariate), $DV$ Parameterization with sigma limits / Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Type III effective hypothesis decomposition / Typ III dekompozycja efektywnych hipotez				
	Degrees of freedom Stopnie swobody	$R_{100}$ [%] $SS$	$R_{100}$ [%] $MS$	$R_{100}$ [%] $F$	$R_{100}$ [%] $p$
Type of additive / Rodzaj dodatku	1	9.8826	9.882611	120.4370	0.000004
Location / Lokalizacja	1	8.0575	8.057458	98.1943	0.000009
Type of additive*Location Rodzaj dodatku*Lokalizacja	1	6.2420	6.242001	76.0698	0.000023
Error / Błąd	8	0.6565	0.082056		
Total / Suma całkowita	12	139.1790			

Table 8. The evaluation of significance of the influence of the tested factors on the elastic recovery from deformation of the extracted binder  $R_{3200}$  at temperature 60°C  
Tablica 8. Ocena istotności wpływu badanych czynników na nawrót sprężysty odkształcenia lepiszcza odzyskanego  $R_{3200}$  w temperaturze 60°C

Effect Efekt	Univariate significance tests / Jednowymiarowe testy istotności (Univariate), $DV$ Parameterization with sigma limits / Parametryzacja z sigma-ograniczeniami Type III effective hypothesis decomposition / Typ III dekompozycja efektywnych hipotez				
	Degrees of freedom Stopnie swobody	$R_{3200}$ [%] $SS$	$R_{3200}$ [%] $MS$	$R_{3200}$ [%] $F$	$R_{3200}$ [%] $p$
Type of additive / Rodzaj dodatku	1	1.14912	1.149123	57.34863	0.000065
Location / Lokalizacja	1	0.02124	0.021235	1.05977	0.333383
Type of additive*Location Rodzaj dodatku*Lokalizacja	1	1.61948	1.619481	80.82250	0.000019
Error / Błąd	8	0.16030	0.020038		
Total / Suma całkowita	12	25.77004			



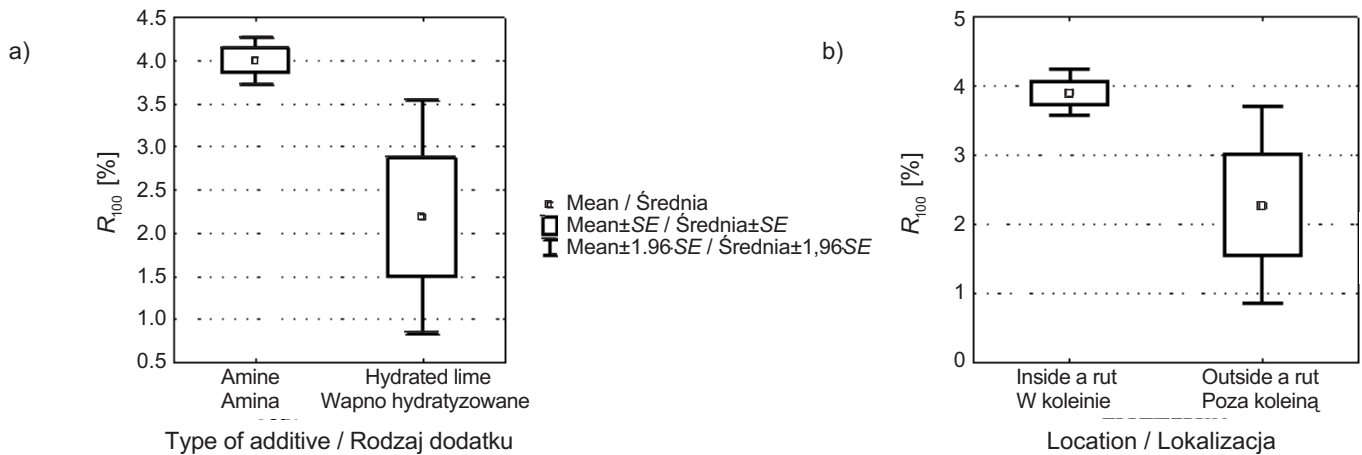


Fig. 10. Results distribution of the extracted binder elastic recovery part of deformation  $R_{100}$  with respect to examined factors at a temperature 60°C: a) type of additive, b) location

Rys. 10. Dystrybucja wyników względem badanych czynników nawrotu sprężystego odkształcenia lepiszcza odzyskanego  $R_{100}$  w temperaturze 60°C: a) względem rodzaju dodatku, b) względem lokalizacji

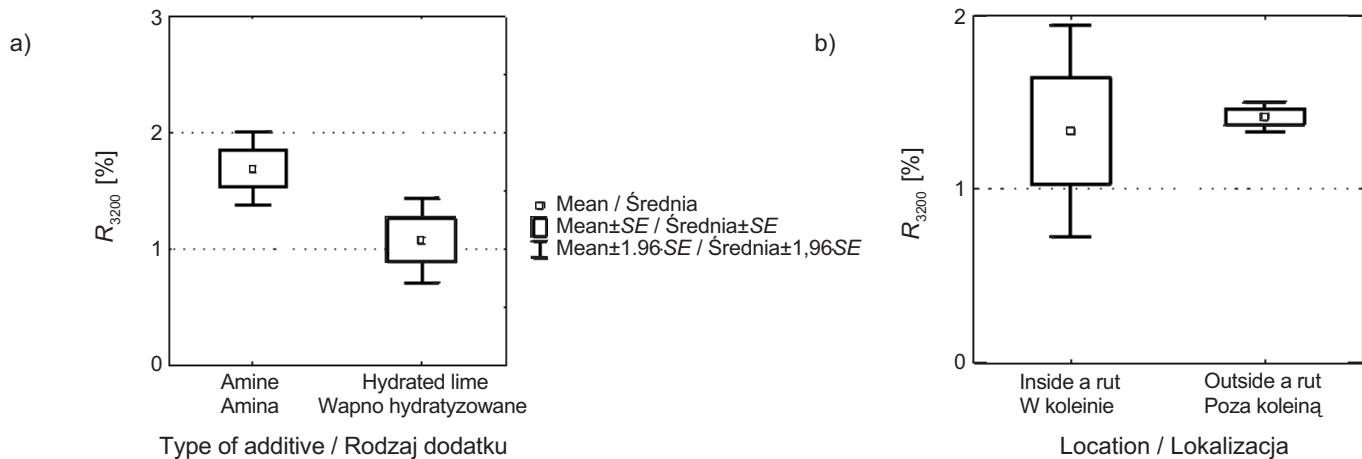


Fig. 11. Results distribution of the extracted binder elastic recovery part of deformation  $R_{3200}$  with respect to examined factors at a temperature 60°C: a) type of additive, b) location

Rys. 11. Dystrybucja wyników względem badanych czynników nawrotu sprężystego odkształcenia lepiszcza odzyskanego  $R_{3200}$  w temperaturze 60°C: a) względem rodzaju dodatku, b) względem lokalizacji

Oznaczenia na Rys. 10 i 11 są zgodne z oznaczeniami umieszczonymi na Rys. 7 i 8. Analiza wariancji wykazała, że efekt czynnika: „rodzaj dodatku” oraz interakcja pomiędzy „rodzajem dodatku” i „lokalizacją” ma istotny wpływ na rozkład parametru nawrotu sprężystego odkształcenia lepiszcza odzyskanego z mieszanki SMA bez względu na poziom naprężenia. W obu wypadkach nawrót sprężysty odkształcenia nie przekracza 5% i pomimo ich istotnego zróżnicowania, wielkość zróżnicowania w odniesieniu do wartości początkowej próbki wynosi 2%. W tym zakresie odzyskane lepiszcze z mieszanki SMA z dodatkiem aminy

The marking of Fig. 10 and Fig. 11 is in accordance with that of Fig. 7 and Fig. 8. The variance analysis showed the considerable impact of the “type of additive” and “location” on the distribution of elastic recovery of the extracted bitumen from SMA mixture irrespective of the stress level. In both cases the elastic recovery of deformation does not exceed 5%, and in spite of their significant diversification, the diversity quantity with reference to the initial value of the sample amounted to 2%. Within that scope the extracted bitumen from SMA mixture with the addition of fatty amine is distinguished by a higher

tłuszczowej charakteryzuje się wyższym poziomem nawrotu sprężystego odkształcenia niż w mieszance SMA z wapnem hydratyzowanym. W odniesieniu do lokalizacji (koleina, normalna nawierzchnia) zróżnicowanie było istotne statystycznie tylko dla małych naprężeń ścinających i wyższy poziom nawrotu sprężystego odkształcenia uzyskało lepsze w koleinie, co koreluje z poprzednimi wnioskami dotyczącymi szybkości starzenia asfaltu. W odniesieniu do wysokich naprężeń ścinających (3200 Pa) efekt lokalizacji nie odegrał istotnej różnicy, co może mieć związek z naruszeniem struktury asfaltu D70 (50/70) modyfikowanego 4% polimeru SBS.

Można więc stwierdzić, że dozowanie wapna hydratyzowanego w ilości 30% do wypełniacza zawartego w mieszance SMA może znacznie poprawić odporność asfaltu na powstawanie odkształceń trwałych, nadając mieszance mineralno-asfaltowej bardziej sprężysty charakter pracy w temperaturze 60°C, uznawanej za najwyższą temperaturę nawierzchni w okresie lata.

### 3.3. ODPORNOŚCI NA KOLEINOWANIE MIESZANKI SMA

Odporność na powstanie deformacji trwałych nawierzchni SMA została określona zgodnie z wymaganiami PN-EN 12697-22 metoda B na próbkach o średnicy 250 mm wyciętych z warstwy nawierzchni SMA o grubości 4 cm. W celu określenia jej charakterystyki pobierano próby zarówno w koleinie nawierzchni (RD) jak i na nie skoleinowanej (N) nawierzchni SMA. Przebieg badania odporności na odkształcenia trwałe nawierzchni SMA wykonano zgodnie z metodyką określoną w [13].

Na podstawie makroskopowych obserwacji w czasie badań koleinowania można było stwierdzić, że na próbkach pobranych z warstwy SMA z aminą tłuszczową, niezależnie od miejsca ich pobrania, wyraźnie widać powstałą koleinę po procesie 10000 cykl obciążenia. Natomiast oddziałujące obciążenie cykliczne na próbkach pobranych z warstwy SMA z wapnem hydratyzowanym spowodowało nieznaczne tylko zaznaczenie koleiny. Interpretację graficzną uzyskanych wyników badań odporności na powstawanie deformacji trwałych warstwy nawierzchni SMA z wapnem hydratyzowanym oraz aminą kwasu tłuszczowego przedstawiono na Rys. 12.

Dla kategorii ruchu występującej na ulicy Żelaznej w Kielcach odporność mieszanki SMA na deformacje trwałe charakteryzowana jest przez nachylenie wykresu koleinowania – przyrost głębokości koleiny  $WTS_{AIR} = 0,30$  mm/1000 cykli oraz głębokość koleiny  $RD_{AIR}$  = „deklarowana” [26]. Analiza

level of the elastic recovery than in the SMA mixture with hydrated lime. The diversification with reference to the location (a rut, a standard pavement) was statistically significant only for low shear stresses. The rut binder achieved higher levels of elastic recovery of deformation corresponding with the former conclusions on ageing speed. The location effect did not play an essential role with reference to the high shear stresses (3200 Pa) what can be related to the structural disturbance of the bitumen D70 (50/70) modified with 4% SBS polymer.

After all, the statement about hydrated lime batching amounting to 30% of the filler contained in the SMA mixture, substantially improving the bitumen resistance to permanent deformation, therefore giving the mineral-bitumen mixture more elastic character of work at the temperature of 60°C, widely regarded as the highest one during the summertime, is fully justified.

### 3.3. RUTTING RESISTANCE OF SMA MIXTURES

Basically, the resistance to permanent deformations of SMA pavements was determined in accordance with requirements of PN-EN 12697-22, method B, on samples with a diameter of 250 mm cut out of the 4 cm thick SMA pavement layer. Samples to determine their characteristics were taken both from the pavement rut (RD), and from the pavement free from ruts (N). The course of the test of rutting resistance to permanent deformation of the SMA pavement followed in accordance with methodology provided in [13].

During the macroscopic observations while carrying out rutting tests it was possible to find the clear presence of ruts after 10000 load cycles on samples taken of the SMA layer with fatty acid amine, regardless the sampling site. However, the similar loading on the layer of SMA pavement with hydrated lime caused only slight rutting. The graphic interpretation of the collected test results of the resistance to permanent deformation of the SMA pavement layer with hydrated lime and fatty acid amine is seen in Fig. 12.

The resistance to permanent deformation of the SMA mixture for the traffic category provided for Żelazna Street in Kielce is distinguished by the slope of the rutting diagram (an increase in the rut depth) at  $WTS_{AIR} = 0.30$  mm/1000 cycles and the rut depth  $RD_{AIR}$  = “declared” [26]. The analysis of the obtained test results lead to the statement that the SMA mixture remain resistant to development of permanent

uzyskanych wyników badań pozwala stwierdzić, że po okresie 12 lat eksploatacji mieszanka SMA jest w dalszym ciągu odporna na powstawanie deformacji trwałych. Badania materiałowe potwierdzają uzyskane wyniki badań powierzchniowych w zakresie powstałej koleiny na nawierzchni SMA, które przedstawiono wcześniej.

deformations after 12-year operation. Materials testing confirm the obtained and presented earlier results of surface tests within the scope of development of rutting on the surface of SMA pavement.

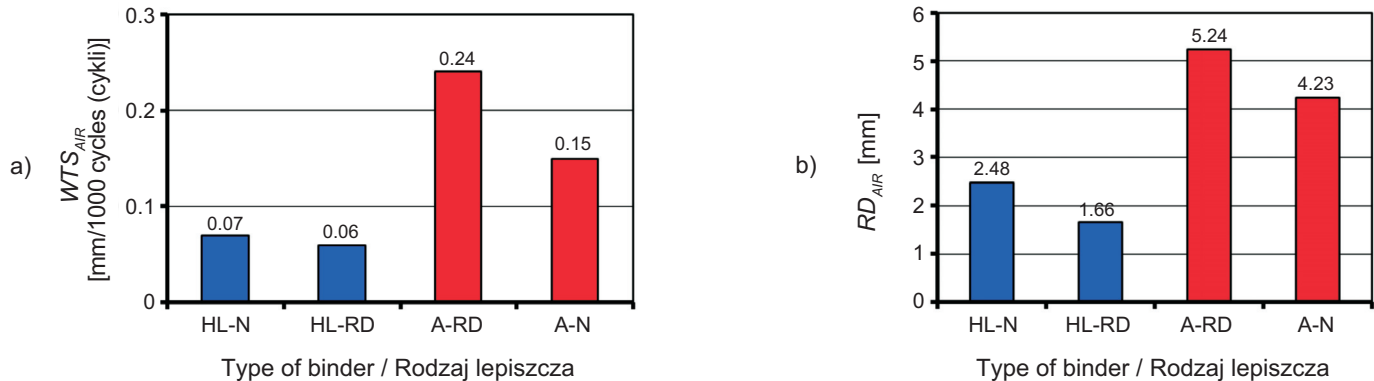


Fig. 12. The resistance of the SMA pavement to permanent deformations: a)  $WTS_{AIR}$ , b)  $RD_{AIR}$   
Rys.12. Odporność nawierzchni SMA na deformacje trwałe: a)  $WTS_{AIR}$ , b)  $RD_{AIR}$

Zastosowanie wapna hydratyzowanego w mieszance SMA zapewniło jej bardzo dużą odporność na powstawanie deformacji trwałych  $WTS_{AIR}$ . Należy podkreślić, że w praktyce laboratoryjnej bardzo rzadko uzyskuje się odporność mieszanek mineralno-asfaltowych na deformacje trwałe o tak małej wartości wskaźnika  $WTS_{AIR}$ . Na podstawie uzyskanych wyników można również wnioskować, że proces wykonawstwa nawierzchni (układania i zagęszczania warstwy) jest w warunkach rzeczywistych – na budowie bardziej skuteczny niż w laboratorium. W związku z tym wbudowana mieszanka SMA charakteryzuje się korzystniejszymi właściwościami fizyczno-mechanicznymi niż wykonana w warunkach laboratoryjnych.

Największą odpornością na deformacje trwałe  $WTS_{AIR}$  charakteryzuje się nawierzchnia SMA zawierająca wapno hydratyzowane badana w koleinie, a następnie na nawierzchni w normalnym stanie. Duża odporność na deformacje trwałe tego rodzaju nawierzchni SMA świadczyć może nie tylko o znaczącej roli dodatku wapna jako środka adhezyjnego ale również jako nano-dyspersyjnego materiału [30], ze względu na mniejszą granulację cząstek wapna hydratyzowanego w porównaniu do wypełniacza a tym samym znacznie większą jego powierzchnię właściwą. Wapno hydratyzowane spełnia więc rolę materiału wzmacniającego i zmieniającego korzystnie strukturę wewnętrzną mieszanki SMA w porównaniu do

The application of hydrated lime to the SMS mixture provided it with a very high resistance to the permanent deformation  $WTS_{AIR}$ . It should be emphasized that the resistance to permanent deformations of mineral-bitumen mixtures with such a low value of index  $WTS_{AIR}$  is very seldom achieved in the laboratory practice. The obtained results may also lead to the conclusion that the execution of pavement works (placement and compaction of layer) is more effective in actual conditions i.e. on work site than in laboratory circumstances.

The samples taken from ruts of SMA pavement containing hydrated lime are characterised by the highest resistance to permanent deformations  $WTS_{AIR}$ . They are followed by the specimen from the pavement in a ground state. The high resistance to permanent deformation of that type of SMA pavement may indicate not only significant role of lime as an adhesive agent but also as a nano-dispersing substance [30], on account of lower granulation of hydrated lime particles in comparison with the binder; thereby its much larger specific surface. Accordingly, hydrated lime plays a role of a strengthening material, and favourably changing the internal structure of SMA mixture compared with the fatty acid amine. The SMA pavement with the fatty acid amine in a rut is characterised by the lowest resistance to development of rutting. That area of pavement singled out with the highest

aminy kwasu tłuszczowego. Najmniejszą odpornością na powstawanie deformacji trwałych charakteryzuje się nawierzchnia SMA z aminą kwasu tłuszczowego w koleinie. Nawierzchnia w tym miejscu charakteryzowała się największą zawartością wolnych przestrzeni [15], najprawdopodobniej związaną z początkiem destrukcyjnego oddziaływania wody i mrozu. W związku z tym, w czasie procesu cyklicznego obciążenia próbki pobranej z nawierzchni, nastąpiło jej dogęszczenie w wyniku czego powstało tak duże odkształcenie – koleina ( $WTS_{AIR} = 0,24$ ) w porównaniu z pozostałymi badaniami. Należy jednak zaznaczyć, że w dalszym ciągu nawierzchnia SMA z aminą kwasu tłuszczowego w koleinie jest odporna na powstawanie odkształceń, ponieważ spełnione są wymagania normowe ( $WTS_{AIR} = 0,3$ ). Zachowana jest więc w dalszym ciągu trwałość nawierzchni SMA w zakresie jej odporności na powstawanie deformacji trwałych.

#### 4. KORELACJA WYNIKÓW BADAŃ LEPISZCZA ODZYSKANEGO MSCR I ODPORNOŚCI NA KOLEINOWANIE MIESZANKI SMA

Parametry lepiszcza wyznaczone metodą MSCR w większości przypadków charakteryzują się wysokim poziomem korelacji z wynikami odporności na koleinowanie mieszanki mineralno-asfaltowej. Tym samym umożliwiają wyjaśnienie związków pomiędzy parametrami procesu pełzania asfaltu z różnego rodzaju dodatków, czy modyfikatorów pod obciążeniem cyklicznym, a cechami mechanicznymi mieszanek mineralno-asfaltowych. Wśród parametrów MSCR badanego lepiszcza najlepszym dopasowaniem odznaczał się parametr  $J_{nr}$  (podatność na pełzanie) oraz  $R$  (nawrót sprężystości odkształcenia) dla wysokich naprężeń ścinających (3200), które odzwierciedlały efekt inicjacji powstawania deformacji plastycznej, podobnie jak w trakcie testów koleinowania opisywane parametrami  $WTS_{AIR}$  oraz  $RD_{AIR}$ .

W celu ustalenia znaczenia przydatności testów dynamicznego ścinania lepiszcza dokonano oceny korelacji pomiędzy cechami mieszanki SMA uzyskanymi w testach koleinowania ( $WTS_{AIR}$  i  $RD_{AIR}$ ) oraz parametrami pełzania lepiszcza odzyskanego według MSCR. Analizując wyniki badań oceniono korelację z uwzględnieniem wszystkich przypadków zastosowanego środka. Wyniki współzależności pomiędzy parametrem  $WTS_{AIR}$  oraz  $RD_{AIR}$  według PN-EN 12697-22 i podatnością  $J_{nr100}$  oraz  $J_{nr3200}$  określono przy pomocy regresji liniowej, wraz z podaniem zakresu przedziału ufności, przedstawiono na Rys. 13.

content of voids [15], almost certainly because of the beginning of destructive impact of water and frost. Consequently, the additional compaction of the sample taken from the pavement in the course of its cyclic loading process resulted with a vast deformation in comparison with other test results – the rut ( $WTS_{AIR} = 0.24$ ). However, it should be noted that the SMA pavement with fatty acid amine in the rut remains resistant to development of deformations as long as the standard requirements ( $WTS_{AIR} = 0.3$ ) are satisfied. In other words, the SMA pavement durability within the scope of resistance to permanent deformations is preserved.

#### 4. CORRELATION BETWEEN TEST RESULTS OF THE MSCR EXTRACTED BINDER AND RUTTING RESISTANCE OF SMA MIXTURES

Binder parameters determined in accordance with the MSCR method are chiefly distinguished by the high level of correlation to test results of rutting resistance of a mineral-bitumen mixture. Naturally, it supplies an explanation for connections between parameters of either the creeping process of bitumen with various sorts of additives or modifiers under cyclic loading, and mechanical characteristics of mineral-bitumen mixtures. Among the MSCR parameters of the being tested binder, the parameter  $J_{nr}$  (creep compliance), and  $R$  (elastic recovery of deformation) under high shear stresses (3200 Pa) which reflected the initiation effect of plastic strain like in the course of rutting tests described with parameters  $WTS_{AIR}$  and  $RD_{AIR}$ , were characterized by the best adjustment.

The assessment of correlation between features of SMA mixture obtained during rutting tests ( $WTS_{AIR}$  and  $RD_{AIR}$ ), and creep parameters of the extracted binder according to MSCR was carried out in order to clarify the usefulness meaning of the filler dynamic shear. The correlation took into consideration all cases regarding the adopted agent was used for the analysis of test results. Figure 13 shows results of correlation between parameters  $WTS_{AIR}$  and  $RD_{AIR}$  after PN-EN 12697-22, and compliances  $J_{nr100}$  and  $J_{nr3200}$  determined with the use of the linear regression including appropriate confidence level.

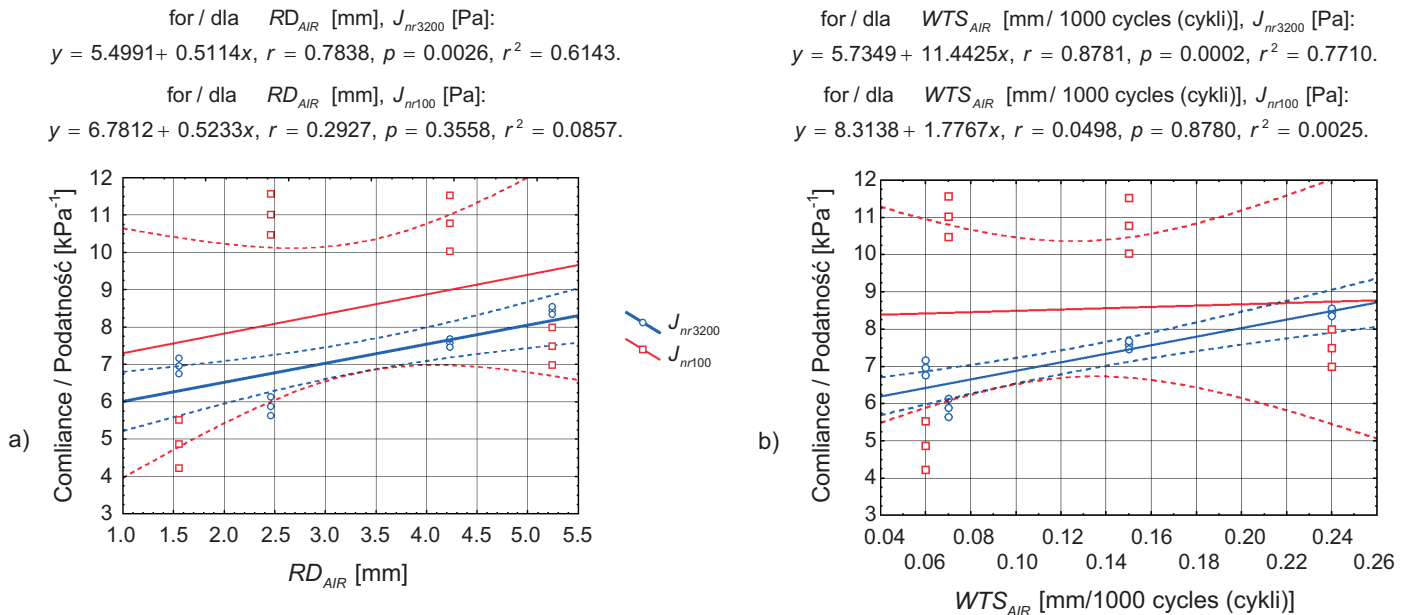


Fig. 13. The correlation between rutting process parameters of the SMA pavement and results of the creep compliance of the extracted binder ( $J_{nr100}$ ,  $J_{nr3200}$ ) according to MSCR procedure: a)  $RD_{AIR}$ , b)  $WTS_{AIR}$

Rys. 13. Korelacja parametrów procesu koleinowania nawierzchni SMA z wynikami podatności lepiszcza odzyskanego ( $J_{nr100}$ ,  $J_{nr3200}$ ) według procedury MSCR: a)  $RD_{AIR}$ , b)  $WTS_{AIR}$

Wyniki analizy wskazują, że najlepszą korelację uzyskano dla wysokiego poziomu naprężeń  $J_{nr3200}$ , przy dużej zbieżności wyników badań. Korelacja ta ma związek z przejściem lepiszcza odzyskanego w stan nieliniowego odkształcenia i naruszenia struktury, który ma miejsce w trakcie badań koleinowania. Dla niskich naprężeń  $J_{nr100}$  nie udało się uzyskać istotnych związków korelacyjnych.

Kolejnym etapem była analiza korelacji zależności parametrów  $WTS_{AIR}$  oraz  $RD_{AIR}$  mieszanki SMA w zależności od nawrotu sprężystego odkształcenia lepiszcza odzyskanego  $R_{100}$  oraz  $R_{3200}$  (Rys. 14). Na podstawie dokonanej analizy ustalono podobną współzależność jak w przypadku testów z wykorzystaniem podatności. Wynik ten potwierdza wysoką korelację pomiędzy cechami pełzania lepiszcza odzyskanego dla wysokiego poziomu naprężeń (3200 Pa) i parametrami testu koleinowania mieszanki SMA.

#### 4. WNIOSKI

Na podstawie wykonanych badań terenowych na nawierzchni SMA oraz laboratoryjnych odzyskanego lepiszcza i koleinowania warstwy ścieralnej nawierzchni SMA, można sformułować następujące wnioski:

The analysis results revealed the best co-relation achieved for the high level of stress  $J_{nr3200}$  with a great similarity of test results. There is the relationship between that correlation and transition of the extracted binder to the state of nonlinear deformation and disarrangement of structure which takes place in the course of rutting tests. No significant correlation connections were found for low stresses  $J_{nr100}$ .

The another stage was the analysis of connection correlation between parameters  $WTS_{AIR}$  and  $RD_{AIR}$  of the SMA mixture depending on the elastic recovery of extracted binder  $R_{100}$  and  $R_{3200}$  (Fig. 14). The undertaken analysis proved the similar co-relation as in the case of tests with the use of compliance. That result confirmed the high co-relation between creep characteristics of the extracted bitumen under high level stress (3200 Pa) and parameters of the rutting test of SMA mixture.

#### 4. CONCLUSIONS

The following conclusions can be drawn basing on the results of the carried out site investigations into SMA pavements and laboratory tests of extracted binders, and rutting of the SMA wearing course:

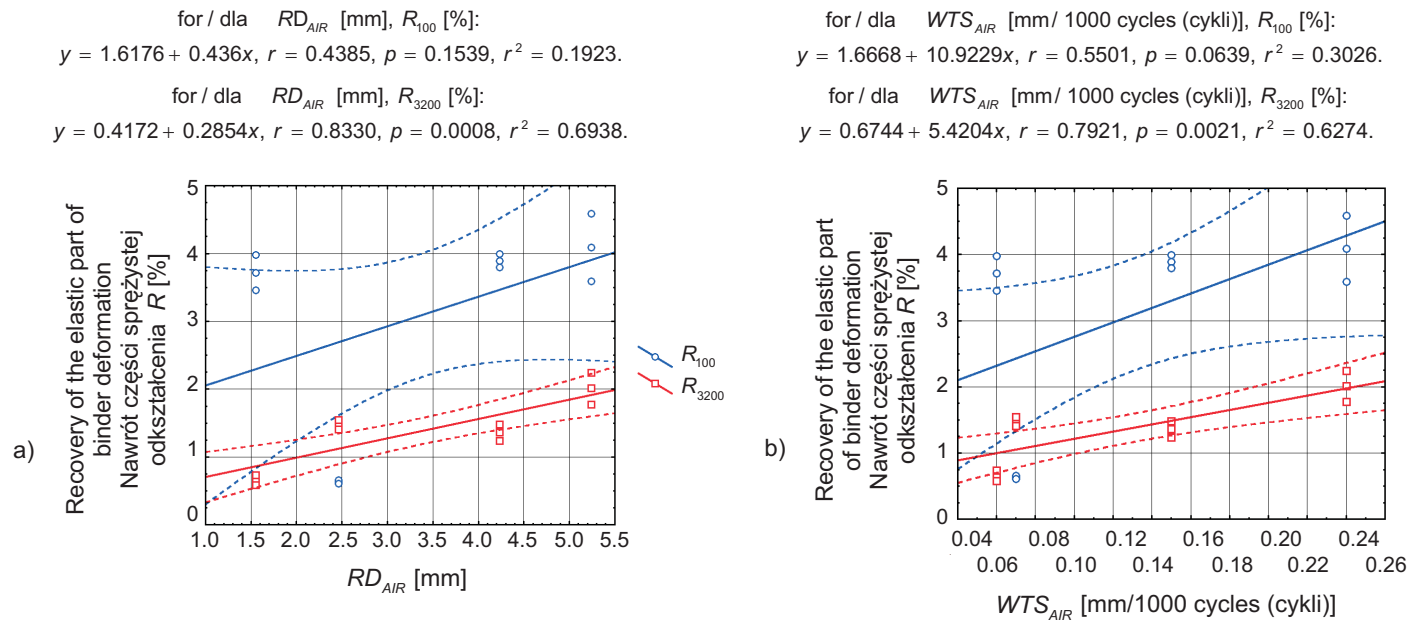


Fig. 14. The correlation between rutting process parameters of the SMA pavement and results of the elastic recovery of deformation of the extracted binder ( $R_{100}$ ,  $R_{3200}$ ) according to MSCR procedure: a)  $RD_{AIR}$ , b)  $WTS_{AIR}$

Rys. 14. Korelacja parametrów procesu koleinowania nawierzchni SMA z wynikami nawrotu sprężystego odkształcenia lepiszcza odzyskanego ( $R_{100}$ ,  $R_{3200}$ ) według procedury MSCR: a)  $RD_{AIR}$ , b)  $WTS_{AIR}$

- Zastosowanie wapna hydratyzowanego w mieszance SMA zapewnia poprawę odporności warstwy ścieralnej nawierzchni na deformacje trwałe w długim okresie jej eksploatacji (12 lat).
  - Lepiszczce odzyskane (asfalt D70 - 50/70 modyfikowany 4% SBS) z warstwy ścieralnej wykonanej z mieszanki SMA z dodatkiem wapna hydratyzowanego charakteryzuje się niską podatnością na pełzanie  $J_{nr}$  ( $J_{nr100}$  i  $J_{nr3200}$ ) w odniesieniu do zastosowania aminy kwasu tłuszczowego według procedury MSCR. Fakt ten może wskazywać na strukturyzujący charakter wapna oraz na podwyższenie poziomu lepkości dynamicznej lepiszcza.
  - Warstwa nawierzchni SMA z dodatkiem wapna hydratyzowanego charakteryzuje się większą odpornością na koleinowanie określane parametrami  $WTS_{AIR}$  i  $RD_{AIR}$  warstwy SMA o grubości 4 cm, niż w przypadku kiedy jego nie zawierała.
  - Wykazano synergię wapna hydratyzowanego i polimeru SBS w zakresie odporności warstwy nawierzchni SMA na okleinowanie.
  - Stwierdzono silną korelację pomiędzy parametrami podatności lepiszcza odzyskanego  $J_{nr}$  i nawrotu sprężystego części odkształcenia  $R$  w badaniu MSCR oraz
- The application of hydrated lime to SMA mixtures provides the wearing courses with higher resistance to permanent deformations during their long service life (12 years).
  - The extracted binder (bitumen D70 - 50/70 modified with 4% of SBS) from a wearing course made of the SMA mixture with the addition of hydrated lime is distinguished by the low creep compliance  $J_{nr}$  (namely  $J_{nr100}$  and  $J_{nr3200}$ ) with reference to the use of fatty acid amine in accordance with the MSCR procedure. It may indicate the structuring character of lime and an increase in the level of binder dynamic viscosity.
  - The SMA layer with hydrated lime added is noted for the higher rutting resistance described by the parameters  $WTS_{AIR}$  and  $RD_{AIR}$  for the four centimeters depth SMA layer than in the case when it did not contain.
  - The synergy effect between hydrated lime and the SBS polymer within the scope of rutting resistance of the SMA pavement was demonstrated.
  - The strong co-relation between  $J_{nr}$  parameters of the extracted binder and elastic recovery of the part of deformation  $R$  in the MSCR test as well as rutting SMA layers described by the parameters  $WTS_{AIR}$  and  $RD_{AIR}$  was observed. In these circumstances, the application

koleinowania warstwy nawierzchni SMA, charakteryzowanego parametrami  $WTS_{AIR}$  i  $RD_{AIR}$ . W związku z tym, zastosowanie tego typu oznaczenia (MSCR) daje możliwość dokładnego prognozowania parametrów mechanicznych w wyniku oceny cech lepiszcza i jednocześnie ujawnia wysoki poziom strukturyzacji asfaltu przy pomocy wapna hydratyzowanego.

of that type of determination (MSCR) opens up an opportunity to accurate forecasting mechanical parameters as a result of an assessment of binder characteristics, and at the same time reveals the high structuring level by hydrated lime.

## BIBLIOGRAFIA / REFERECES

- [1] *Pilat J., Radziszewski P.*: Nawierzchnie asfaltowe. WKiŁ. Warszawa, 2010
- [2] *Kennedy T.W.*: Use of Hydrated Lime in Asphalt Paving Mixtures. National Lime Association, Bulletin No. 325, 1984
- [3] *Boyton R.S.*: Chemistry and Technology of Lime and Limestone. 2<sup>nd</sup> ed. New York, USA, Wiley-Interscience, 1980
- [4] *Judycki J., Jaskuła P.*: Badania odporności betonu asfaltowego na oddziaływanie wody i mrozu. Drogownictwo, **LII**, 12, 1997, 374-378
- [5] *Luxemburg F.*: Limite Hydrate as an Additive to Improve the Adhesion of Bitumen to the Aggregates. Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Conference “Durable and Save Road Pavements”, Kielce, 15-16 May 1996, 296-302
- [6] *Seebaly P.E., Litte D.N., Epps J.A.*: The Benefits of Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt. Arlington, USA. 2006
- [7] *Verhasselt A., Verhelst F., Sainton A.*: Modification du bitume et des enrobes bitumineux par ajout de chaux hydratee. Proc. 19<sup>eme</sup> Congres Belge de la Route, Genval, September 2001
- [8] *Pilat J., Kalabińska M., Radziszewski P.*: Mieszanki mineralno-asfaltowe z dodatkiem miazgu gumowego i wapna hydratyzowanego. Materiały Budowlane, 11, 2000, 60-62
- [9] *Santon A., Puiatti D., Walter D.*: Modification du bitume et des enrobes bitumineux par ajout de chaux hydratee. Revue Generale des Routes et Aerodromes, **770**, 1999, 3-10
- [10] *Hicks R.G., Schulz T.V.*: Life Cycle Costs for Lime in Hot Mix Asphalt. National Lime Association, **3**, 2003, Arlington, USA
- [11] *Cramer P., Herz G., Radenberd M.*: Kalhydrat: Eine Alternative zur Modifizierungdes Bindermittels. Asphalt, **36**, 6, 2001, 17-25
- [12] *Mechowski T., Palys M., Sybilski D.*: Zasady wykonywania nawierzchni z mieszanki SMA (ZW-SMA 95). IBDiM, Seria I, **49**, 1995
- [13] WT-2 2010: Nawierzchnie asfaltowe na drogach krajowych. Wymagania Techniczne. Załącznik Nr 2 do Zarządzenia Nr 102, GDDKiA, Warszawa, 2010
- [14] *Iwański M.*: Szorstkość nawierzchni w aspekcie uziarnienia mieszanki mastyksowo-grysowej SMA. X Międzynarodowa Konferencja „Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe”, Kielce, 11-12 maja 2004, 51-58
- [15] *Sybilski D., Mechowski T.*: Ocena trwałości mieszanek mineralno-asfaltowych z różnymi kruszywami. Prace IBDiM, 3-4, 1998, 63-107
- [16] *Iwański M., Mazurek G.*: Durability of SMA pavement with hydrated lime. Paper No. 0355. Proceedings of 5<sup>th</sup> Euroasphalt and Eurobitume Congress, 13-15 June, Istanbul, 2012
- [17] *Piasta Z., Lenarcik A.*: Applications of statistical multi-criteria optimisation in design of concretes, in: A. M. Brandt (red.): Optimization methods for material design of cement-based composites. E & FN Spon, London, New York, 1998, 150-166
- [18] *Harrington E.C.*: The desirability function. Industrial Quality Control, **21**, 10, 1965, 494-498
- [19] *Zivorad R. Lazić*: Design of Experiments in Chemical Engineering. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004
- [20] *Iwański M., Mazurek G.*: Synthetic Wax Effect on the Resilient Stiffness Modulus of Asphalt Concrete. Road and Bridges - Drogi i Mosty, **11**, 3, 2012, 233-248

