

dr inż. Roman Pacholak¹⁾
ORCID: 0000-0002-8136-1523

Effect of rubber granulate content on properties of SMA LA type asphalt mixtures

Wpływ zawartości granulatu gumowego na właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych typu SMA LA

DOI: 10.15199/33.2025.03.04

Abstract. This paper presents the analysis of selected properties of low-noise asphalt mixtures of SMA LA type in which part of the mineral aggregate was replaced by rubber granulate with a grain size of 1/4 mm in amounts of 5%, 10% and 15% (relative to the volume of the mixture). Highly modified bitumen 45/80-80 was used for the mineral-rubber-asphalt mixtures. The obtained results proved that the use of rubber granulate in "dry process" significantly affects on analyzed mixture parameters. It was found that a gradual increase in amount of granulate in tested mixtures reduces their durability (in particular, rutting resistance). The preliminary analysis of the test results indicate that the recommended amount of rubber aggregate added to SMA LA type mixtures in "dry process" with 45/80-80 modified bitumen should not exceed 10%.

Keywords: rubber granulate; highly modified bitumen; low-noise asphalt mixtures; dry process.

More than 300 million car tires are sold each year in Europe [1]. So it can be predicted that as many will end up in landfills. Used tires are among solid and flammable wastes, the accumulation of which in large quantities is a serious environmental problem. Most often, tires are burned for energy, but this method of disposal does not allow the full potential of this material to be realized. Moreover, during combustion it emits toxic fumes that are harmful to human health. As a result, in many countries work has begun on obtaining new and effective methods of tire recycling [2, 3].

Modern road construction aims to use as little energy and natural materials as possible. This is expected to translate into lower construction costs and reduced air pollution. The direction of using alternative by-products and waste materials, which can include used car tires, looks promising. Crumb rubber (CR) and rubber granulate (RG) can be utilized in asphalt pavements in several ways. The most commonly used technologies are „wet” and „dry”. „Wet” technology involves directly adding CR (granularity of 0.075 to 1.2 mm) to heated bitumen before mixing it with aggregate. „Dry” technology involves adding RG to the heated aggregate and binder and mixing the ingredients until a homogeneous mass is obtained.

¹⁾ Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku; roman.pacholak@pb.edu.pl

Streszczenie. W artykule przedstawiono analizę wybranych właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych typu SMA LA, w których część kruszywa mineralnego zastąpiono granulatem gumowym o uziarnieniu 1/4 mm w ilości 5, 10 i 15% w stosunku do objętości mieszanki. Do wykonania mieszanek mineralno-gumowo-asfaltowych użyto asfaltu wysokomodyfikowanego 45/80-80. Uzyskane wyniki badań dowiodły, że zastosowanie granulatu gumowego w technologii „na sucho” wpływa w sposób istotny na analizowane parametry mieszanek. Ustalono, że stopniowy wzrost ilości granulatu w badanych mieszankach przyczynia się do obniżenia ich trwałości (przede wszystkim odporności na koleinowanie). Wstępna analiza wyników badań wykazuje, że zalecana ilość kruszywa gumowego, dodawanego do mieszanek typu SMA LA w technologii „na sucho” z asfaltem modyfikowanym 45/80-80, nie powinna przekraczać 10%.
Słowa kluczowe: granulát gumowy; asfalt wysokomodyfikowany; mieszanki o obniżonym poziomie hałasu; technologia na sucho.

W Europie co roku sprzedaje się ponad 300 mln opon samochodowych [1]. Można więc przewidzieć, że tyle samo trafi na składowiska odpadów. Zużyte opony należą do odpadów stałych oraz łatwopalnych, których gromadzenie w dużej ilości stanowi poważny problem dla środowiska. Najczęściej, w celu pozyskania energii, opony są spalane, ale taki sposób utylizacji nie pozwala w pełni wykorzystać potencjału tego materiału. Ponadto podczas spalania emituje on toksyczne opary szkodliwe dla zdrowia człowieka. W związku z tym w wielu krajach rozpoczęto prace nad pozyskaniem nowych i efektywnych metod recyklingu opon [2, 3].

W nowoczesnym budownictwie drogowym dąży się do zużycia jak najmniejszej ilości energii oraz materiałów naturalnych. Ma to się przekładać na obniżenie kosztów budowy oraz redukcję zanieczyszczenia powietrza. Kierunek wykorzystania alternatywnych produktów ubocznych i materiałów odpadowych, do których można zaliczyć m.in. zużyte opony samochodowe, wygląda obiecująco. Miał oraz granulát gumowy można zutylizować w nawierzchniach asfaltowych na kilka sposobów. Najczęściej stosowane są technologie „na mokrą” i „na sucho”. Technologia „na mokrą” przewiduje bezpośrednie dodanie miału gumowego (granulacja od 0,075 do 1,2 mm) do rozgrzanego asfaltu przed zmieszaniem go z kruszywem. Technologia „na sucho” polega na dodaniu do rozgrzanego kruszywa i lepiszcza granulatu gumowego i mieszanki składników do uzyskania jednorodnej masy.

In the late 1970s, poroelastic road surfaces (PERS), which contained at least 20% RG and at least 20% air voids, were invented and patented. Intensive research of Swedish scientists, in cooperation with the Gdansk University of Technology, on improving PERS technology yielded a pavement in the late 1990s that had up to 10 dB lower noise levels compared to asphalt concrete (AC) reference pavements [4]. Unfortunately, the promising results of noise reduction went into the background due to the pavement's low resistance to permanent deformations. In 2018, the SEPOR project was launched in Poland to further develop the technology of poroelastic road surfaces in terms of noise reduction, suppression of liquid fuel spill fires, water permeability and skid-resistant properties. This project allowed to achieve huge progress in the technology of laying PERS mixtures with the use of typical sets of road machines in real conditions [5 – 7].

Many research works have confirmed that recycled rubber improves the mechanical and physical properties of asphalt pavements, such as fatigue and low-temperature cracking resistance, service life and noise reduction [8, 9]. What's more, mixtures and bitumen with added rubber show significant benefits in terms of energy consumption and environmental impact [10, 11]. Increased RG content helps improve the flexibility of the pavement, which increases the friction coefficient, but high flexibility makes it more difficult for the tire to roll on the pavement, resulting in increased fuel consumption during driving [12]. The aspect of selecting the type of compound to be modified is important. It was found that gap-graded asphalt mixtures are more suitable for the production of rubber-asphalt mixtures, because they are able to provide a high content of air voids in the mineral „skeleton”.

The main objective of the study was to evaluate the rationality of using relatively high amounts (5, 10 and 15%) of 1/4 mm grain size RG in SMA LA asphalt mixtures in „dry” technology.

Research program

The research program included analysis of selected mechanical properties of rubber-asphalt mixtures. ITRR water and frost resistance [13], resistance to permanent deformation [14], Cantabro mass loss test [15], horizontal and vertical water permeability [16], stiffness modulus determined by IT-CY method [17] were evaluated. Highly modified bitumen 45/80-80 with high styrene-butadiene-styrene (SBS) content was used as a binder, the presence and amount of which results in the creation of a continuous polymeric phase. Pavements with such a binder have very good resistance to fatigue cracking and permanent deformation.

Rubber-asphalt mixtures, in which a part of the aggregate was replaced with RG, are at high risk of permanent deformations [7]. For this reason, gap-graded SMA8 LA mixtures were selected, which have an increased air void content and are able to provide high durability and resistance to rutting. RG of 1/4 mm grain size were added to SMA8 LA

Pod koniec lat siedemdziesiątych XX w. wynaleziono i opatentowano poroelastyczne nawierzchnie drogowe PERS, które zawierały co najmniej 20% granulatu gumowego oraz co najmniej 20% wolnych przestrzeni. Intensywne badania szwedzkich naukowców, we współpracy z Politechniką Gdańską, nad doskonaleniem technologii PERS, pozwoliły pod koniec lat dziewięćdziesiątych XX w. uzyskać nawierzchnię, która charakteryzowała się mniejszym nawet o 10 dB poziomem hałasu w porównaniu z nawierzchniami referencyjnymi z AC [4]. Niestety obiecujące wyniki redukcji hałasu przeszły na drugi plan, ze względu na niewielką odporność nawierzchni na deformacje trwałe. W 2018 r. rozpoczęto w Polsce projekt SEPOR, którego celem było dalsze rozwijanie technologii poroelastycznych nawierzchni drogowych pod kątem obniżenia hałasu, tłumienia pożarów rozlewisk paliw płynnych, wodoprzepuszczalności i właściwości przeciwpoślizgowych. Ten projekt pozwolił osiągnąć ogromny postęp w technologii układania mieszanek PERS z wykorzystaniem typowych zestawów maszyn drogowych w warunkach rzeczywistych [5 – 7].

Wiele prac badawczych potwierdziło, że guma z recyklingu poprawia właściwości mechaniczne i fizyczne nawierzchni asfaltowych, takie jak: odporność na spękania zmęczeniowe i niskotemperaturowe; żywotność oraz obniżenie poziomu hałasu [8, 9]. Ponadto mieszanki i asfalty z dodatkiem gumy wykazują znaczne korzyści pod kątem oszczędzania energii i wpływu na środowisko [10, 11]. Zwiększona zawartość granulatu gumowego pozwala poprawić elastyczność nawierzchni, co wpływa na wzrost współczynnika tarcia, ale duża elastyczność utrudnia toczenie się opony po nawierzchni, co przekłada się na zwiększenie zużycia paliwa podczas jazdy [12]. Ważny jest aspekt doboru rodzaju mieszanki, która zostanie poddana modyfikacji. Stwierdzono, że mieszanki o nieciąglym uziarnieniu bardziej nadają się do produkcji mieszanek mineralno-gumowo-asfaltowych, ponieważ są w stanie zapewnić dużą zawartość wolnych przestrzeni w „szkielecie” mineralnym.

Głównym celem badań była ocena racjonalności zastosowania stosunkowo dużej ilości (5, 10 i 15%) granulatu gumowego o uziarnieniu 1/4 mm w mieszkach mineralno-asfaltowych typu SMA LA w technologii „na sucho”.

Program badań

Program badań obejmował analizę wybranych właściwości mechanicznych mieszanek mineralno-gumowo-asfaltowych. Oznaczono ich wrażliwość na działanie wody i mrozu ITRR [13], odporność na deformacje trwałe [14], ubytek ziaren na podstawie testu Cantabro [15], wodoprzepuszczalność poziomą i pionową [16] oraz moduł sztywności oznaczony metodą IT-CY [17]. Jako lepiszcze został użyty asfalt wysokomodyfikowany 45/80-80 o dużej zawartości SBS, którego obecność i ilość powoduje powstanie ciągłej fazy polimerowej. Nawierzchnie z takim lepiszczem charakteryzują się bardzo dobrą odpornością na spękania zmęczeniowe oraz odkształcenia trwałe.

Mieszanki mineralno-gumowo-asfaltowe, w których część kruzywa zastąpiono granulatem, są w dużym stopniu narażone na powstanie deformacji trwałych [7]. Z tego względu do badań wytypowano mieszanki typu SMA8 LA o nieciąglym uziarnie-

mixtures using „dry” technology. The amount of RG (by volume) that was substituted for part of the mineral aggregate in the mix was: 5% (designation SMA8 LA (5% RG)), 10% (designation SMA8 LA (10% RG)), and 15% (designation SMA8 LA (15% RG)).

The mixtures were designed with the following density materials:

- limestone filler (2.690 Mg/m³);
- gabbro sand (2.942 Mg/m³);
- 2/5 mm gabbro aggregate (2.966 Mg/m³);
- 5/8 mm gabbro aggregate (2.977 Mg/m³);
- 1/4 mm RG (1.150 Mg/m³).

The production temperature of the rubber-asphalt mixtures was 180°C. Before mixing, the RG was heated in an oven at 60°C for 30 minutes for surface devulcanization, and the mixture was briefly aged for 2 hours before compaction. The compaction process was carried out in a Marshall compactor (50 blows per side) and in a slab compactor at 145°C. The air void content of the designed rubber-asphalt mixtures is given in Table 1, and the particle size distribution curve is shown in Figure 1.

Table 1. Air void content of designed asphalt mixtures
V_m [%]

Tabela 1. Zawartość wolnych przestrzeni w zaprojektowanych mieszankach V_m [%]

SMA8 LA	SMA8 LA (5% RG)/SMA8 LA (5% GG)	SMA8 LA (10% RG)/SMA8 LA (10% GG)	SMA8 LA (15% RG)/SMA8 LA (15% GG)
10,4	11,4	12,8	15,7

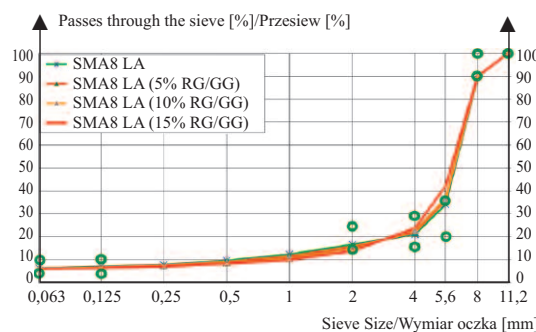


Fig. 1. The particle size distribution of rubber-asphalt mixtures

Rys. 1. Krzywe uziarnienia mieszank mineralno-gumowo-asfaltowych

niu, które wykazują zwiększoną zawartość wolnych przestrzeni i jednocześnie są w stanie zapewnić dużą trwałość i odporność na deformacje trwałe. Granulat gumowy o uziarnieniu 1/4 mm dodawano do mieszank SMA8 LA w technologii „na sucho”. Ilość granulatu, w stosunku objętościowym, którym w mieszance zastąpiono część kruszywa mineralnego, wyniosła: 5% (oznaczenie SMA8 LA (5% GG)), 10% (oznaczenie SMA8 LA (10% GG)) oraz 15% (oznaczenie SMA8 LA (15% GG)).

Mieszanki zaprojektowano z następujących materiałów o gęstości:

- mączki wapiennej (2,690 Mg/m³);
- piasku gabbrowego (2,942 Mg/m³);
- kruszywa gabbrowego 2/5 mm (2,966 Mg/m³);
- kruszywa gabbrowego 5/8 mm (2,977 Mg/m³);
- granulatu gumowego 1/4 mm (1,150 Mg/m³).

Temperatura wytwarzania mieszank mineralno-gumowo-asfaltowych wyniosła 180°C. Przed wymieszaniem granulatu gumowego podgrzewano w suszarce w temperaturze 60°C przez 30 min w celu jego powierzchniowej dewulkanizacji, a przed zagęszczeniem mieszanki poddano procesowi starzenia krótkoterminowego przez 2 h. Proces zagęszczania przeprowadzono w ubijaku Marshalla (50 uderzeń z każdej strony) oraz w zagęszczarce płytowej w temperaturze 145°C. Zawartość wolnych przestrzeni w zaprojektowanych mieszankach mineralno-gumowo-asfaltowych podano w tabeli 1, a krzywe uziarnienia przedstawiono na rysunku 1.

Test results and analysis

The results of the ITSR water and frost sensitivity test of asphalt mixtures are shown in Figure 2. The dashed line shows the minimum acceptable value of the ITSR index according to WT SMA8 LA [18]. Figure 2 shows that the RG content has a negative effect on the analyzed ITSR parameter. The tested mixtures showed satisfactory water and frost resistance and met the requirements according to [18]. However, excessive rubber aggregate content in the mix (> 15%) would significantly increase its water and frost sensitivity. When rubber-asphalt mixtures are saturated with water, the polar components of the surface free energy are significantly reduced, lowering the adhesive bonds between the mastic and rubber, leading to loosening and crushing of the mixture. The SMA8 LA reference mix has the highest water and frost resistance (ITSR = 93.7%). A gradual increase in RG content contributed to a decrease in this resistance. In

zawartość wolnych przestrzeni w zaprojektowanych mieszankach mineralno-gumowo-asfaltowych podano w tabeli 1, a krzywe uziarnienia przedstawiono na rysunku 1.

Wyniki badań i ich analiza

Wyniki wrażliwości na działanie wody i mrozu ITSR mieszank mineralno-gumowo-asfaltowych przedstawiono na rysunku 2. Linia przerywaną pokazano minimalną dopuszczalną wartość wskaźnika ITSR wg WT SMA8 LA [18]. Z rysunku 2 wynika, że zawartość granulatu gumowego wpływa niekorzystnie na analizowany parametr ITSR. Badane mieszanki wykazały zadowalającą odporność na działanie wody i mrozu oraz spełniły wymagania wg [18]. Natomiast nadmierna zawartość kruszywa gumowego w mieszance (> 15%) znacznie zwiększyłaby jej wrażliwość na działanie wody i mrozu. Po nasączeniu mieszank mineralno-gumowo-asfaltowych wodą, polarne składniki swobodnej energii powierzchniowej ulegają znacznemu zmniejszeniu, obniżając wiązania adhezyjne między mastyksem a gumą, co prowadzi do rozluźnienia i kruszenia mieszanki. Największą odpornością na działanie wody i mrozu charakteryzuje się mieszanka referencyjna typu SMA8 LA (ITSR = 93,7%). Stopniowy wzrost zawartości granulatu przyczynił się do zmniejszenia tej odporności.

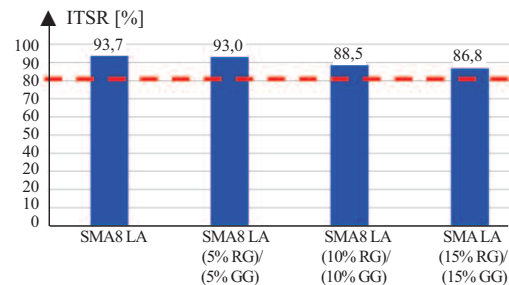


Fig. 2. Water and frost sensitivity of SMA8 LA rubber-asphalt mixtures

Rys. 2. Wrażliwość na działanie wody i mrozu mieszank mineralno-gumowo-asfaltowych SMA8 LA

SMA8 LA (15% RG) rubber-asphalt mixtures, the resistance was $ITSR = 86.8\%$, which was 7.4% lower compared to the reference mixture.

Figure 3 shows the rut depth of rubber-asphalt mixtures in the rutting resistance test, obtained at 60°C after 10,000 cycles of wheel passing under load in a small apparatus. The values of wheel tracking slope (WTS) and percentage of rut depth (PRD) are summarized in Table 2.

The SMA8 LA reference mix has a permanent deformation depth of 1.44 mm and a WTS value of 0.04 mm/1000 cycles. It obtained the most favorable resistance to permanent deformation among the analyzed mixtures (Figure 3, Table 2). Worse but similar results were shown by SMA8 LA (5% RG) mixtures with a rut depth of 2.69 mm and a WTS value of 0.09 mm/1000 cycles, and SMA8 LA (10% RG) with a rut depth of 4.44 mm and a WTS value of 0.14 mm/1000 cycles. Mentioned rubber-asphalt mixtures meet the requirements [18], according to which the WTS value ≥ 0.15 mm/1000 cycles. The SMA8 LA (15% RG) mix has the highest susceptibility to rutting, with a rut depth of 10.16 mm and a WTS value of 0.56 mm/1.000 cycles (a 1300% increase in the WTS value compared to the reference mix).

The challenge with rubber-asphalt mixtures is the tendency for the grains to strip from the pavement. This is a process that usually occurs after 5 – 7 years of service but in the case of flexible pavements it occurs much earlier. It begins with the stripping of the first aggregate or rubber grain, creating a void, followed by a „domino effect” and the loss of more and more grains at an accelerating rate. The Cantabro test is used to evaluate the grain loss of porous asphalt (PA) mixtures, but the authors [19] consider it appropriate to perform the Cantabro test for other types of mixtures as well. The test involves calculating the grain loss after 300 revolutions in a Los Angeles drum without metal balls. The results of the test are shown in Figure 4.

Analysis of the data clearly confirms the effect of granule content on grain loss. The SMA8 LA (15% RG) mix with the highest RG content is the most susceptible to raveling. The increase in grain loss was 519% compared to the SMA8 LA reference mix. Despite the lack of a grain loss limit for rubber-

W mieszankach mineralno-gumowo-asfaltowych SMA8 LA (15% GG) odporność wyniosła $ITSR = 86,8\%$, a więc była o 7,4% mniejsza w porównaniu z mieszanką referencyjną.

Na rysunku 3 przedstawiono krzywe deformacji mieszanek mineralno-gumowo-asfaltowych w badaniu odporności na koleinowanie, uzyskane w temperaturze 60°C po 10 000 cykli przejścia koła pod obciążeniem w małym aparacie. Wartości nachylenia wykresu koleinowania WTS (*Wheel Tracking Slope*) oraz procentowej głębokości koleiny PRD (*Percentage of Rut Depth*) zestawiono w tabeli 2.

Mieszanka referencyjna SMA8 LA charakteryzuje się deformacją trwałą o głębokości 1,44 mm i wartością WTS 0,04 mm/1000 cykli. Uzyskała ona najkorzystniejszą odporność na powstawanie deformacji trwałych spośród analizowanych mieszanek (rysunek 3, tabela 2). Gorsze, ale zbliżone wyniki wykazały mieszanki SMA8 LA (5% GG) o głębokości koleiny 2,69 mm i wartości WTS 0,09 mm/1000 cykli oraz SMA8 LA (10% GG) o głębokości koleiny 4,44 mm i wartości WTS 0,14 mm/1000 cykli. Wymienione mieszanki mineralno-gumowo-asfaltowe spełniają wymagania [18], wg których wartość $WTS \geq 0,15$ mm/1000 cykli. Największą podatnością na koleinowanie charakteryzuje się mieszanka SMA8 LA (15% GG) o głębokości koleiny 10,16 mm i wartości WTS 0,56 mm/1000 cykli (wzrost wartości nachylenia wykresu koleinowania WTS o 1300% w odniesieniu do mieszanki referencyjnej).

Wyzwaniem w przypadku mieszanek mineralno-gumowo-asfaltowych jest podatność na wykruszenie ziaren z nawierzchni.

Jest to proces, który zwykle zachodzi po 5 – 7 latach eksploatacji, lecz w nawierzchniach elastycznych następuje znacznie wcześniej. Zaczyna się on od oderwania pierwszego ziarna kruszywa lub gumy, tworząc pustkę, po czym następuje „efekt domina” i utrata coraz większej liczby ziaren w coraz szybszym tempie. Test Cantabro służy do oceny ubytku ziaren mieszanek z asfaltu porowatego PA, ale autorzy [19] uważają za właściwe wykonywanie testu Cantabro również w przypadku innych rodzajów mieszanek. Badanie polega na obliczeniu ubytku ziaren po 300 obrotach w bębnie Los Angeles bez użycia metalowych kul. Rezultaty testu przedstawiono na rysunku 4.

Analiza danych w sposób jednoznaczny potwierdza wpływ zawartości granulatu na ubytek ziaren. Najbardziej narażona na efekt odrywania się ziaren jest mieszanka SMA8 LA (15% GG) o największej zawartości granulatu. Wzrost ubytku ziaren wyniósł 519% w porównaniu z mieszanką referencyjną SMA8 LA. Pomimo braku wartości granicznego ubytku ziaren miesz-

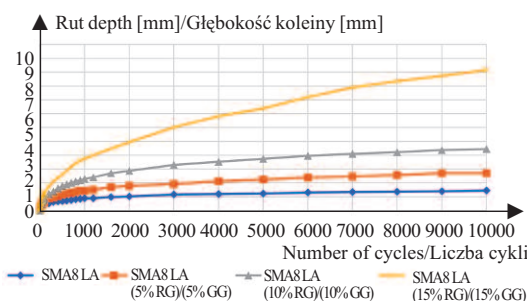


Fig. 3. Rut depth of designed SMA8 LA rubber-asphalt mixtures

Rys. 3. Głębokość koleiny zaprojektowanych mieszanek mineralno-gumowo-asfaltowych SMA8 LA

Table 2. Average WTS and PRD values of the analyzed rubber-asphalt mixtures

Tabela 2. Średnie wartości WTS i PRD analizowanych mieszanek mineralno-gumowo-asfaltowych

Type of mixture/ Typ mieszanki	Mean values/ Wartość średnia	Standard deviation/ Odchylenie standardowe	Coefficient of variation/ Współczynnik zmienności
WTS [mm/10³]			
SMA8 LA	0,04	0,001	0,035
SMA8 LA (5% RG)/(5% GG)	0,09	0,006	0,071
SMA8 LA (10% RG)/(10% GG)	0,14	0,018	0,127
SMA8 LA (15% RG)/(15% GG)	0,56	0,091	0,165
PRD [%]			
SMA8 LA	3,60725	0,165817	0,045968
SMA8 LA (5% RG)/(5% GG)	6,7275	0,639932	0,095122
SMA8 LA (10% RG)/(10% GG)	11,105	1,025305	0,092328
SMA8 LA (15% RG)/(15% GG)	10,155	1,944544	0,191486

asphalt mixtures in standards and technical requirements, some works suggest acceptable values of no more than 30% [20]. It is notable that all the analyzed mixtures met this requirement. This is probably influenced by the selected binder, in which a continuous polymer network is formed due to the high SBS content, which ultimately leads to a strong bond between the bitumen and the rubber aggregate.

Asphalt mixture is an anisotropic material. Its internal structure can change in different directions. To solve the problem of anisotropy, the water permeability of rubber-asphalt mixtures in the vertical and horizontal directions was determined. For this purpose, the constant water level method was used, which involves applying a constant water column of 300 mm to the surfaces of cylindrical samples over a controlled period of time. The test makes it possible to evaluate the internal structure of the tested mixtures, which determines the material's ability to absorb noise and drain water from the pavement during rainfall (reducing the aquaplaning phenomenon). According to [16], the vertical and horizontal water permeability of open-graded mixtures (which can also include SMA8 LA mixtures) is usually $0.5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s} \div 3.5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$. The results of the study are shown in Figure 5.

It was found that the water permeability of rubber-asphalt mixtures is affected by the amount of RG in the mixture and the direction of water flow (except for the SMA8 LA mixture, where the direction of flow had no significant effect). RG has an expanding effect on the “skeleton” of the mineral aggregate, increasing the content of air voids and improving water permeability in both directions. The value of horizontal water permeability of the SMA8 LA reference mix was $1.71 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$, whereas the rubber-asphalt mix with the highest granular content SMA8 LA (15% RG) was already $2.19 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ (28% increase). It should be noted that the rubber aggregate causes a freer flow of water in the horizontal direction, which is confirmed by studies conducted using X-ray tomography [21].

The magnitude of the stiffness modulus is an important parameter defining the properties of asphalt mixtures and is always taken into account in the mixture design. Stiffness modulus was determined at 5°C, 15°C and 25°C using the IT-CY indirect tensile method. The specimens were loaded according to a Haversine-type curve. The horizontal displacement of the cylindrical specimens was 5 μm, and the value of Poisson's ratio was taken as $\nu = 0.35$. The average values of stiffness modulus are shown in Figure 6.

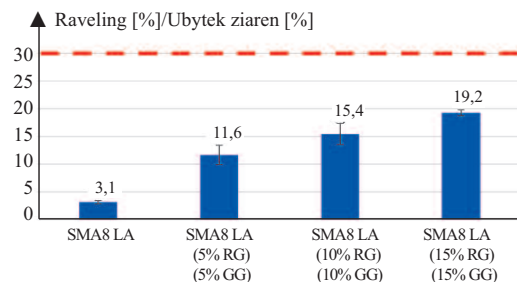


Fig. 4. Raveling of designed SMA8 LA rubber-asphalt mixtures in Cantabro test

Rys. 4. Ubytek ziaren zaprojektowanych mieszanek mineralno-gumowo-asfaltowych SMA8 LA w teście Cantabro

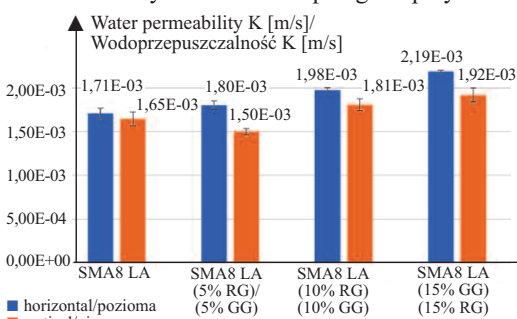


Fig. 5. Horizontal and vertical water permeability of the designed SMA8 LA rubber-asphalt mixtures

Rys. 5. Wodoprzepuszczalność pozioma i pionowa zaprojektowanych mieszanek mineralno-gumowo-asfaltowych SMA8 LA

nek mineralno-gumowo-asfaltowych w normach i wymaganiach technicznych, niektóre prace sugerują dopuszczalne wartości nie wyższe niż 30% [20]. Warto zaznaczyć, że wszystkie z analizowanych mieszanek spełniły ten warunek. Prawdopodobnie ma na to wpływ wybrane lepiszcze, w którym dzięki dużej zawartości SBS powstaje ciągła sieć polimerowa, co ostatecznie prowadzi do silnego wiązania asfaltu z kruszywem i gumą.

Mieszanka mineralno-asfaltowa jest materiałem anizotropowym. Jej wewnętrzna struktura może mieć zmienność kierunkową. W celu rozwiązania problemu anizotropowości, określono wodoprzepuszczalność mieszanek mineralno-gumowo-asfaltowych w kierunku pionowym i poziomym. W tym celu użyto metody stałego poziomu wody, która polega na przyłożeniu do powierzchni cylindrycznych próbek stałego słupa wody wysokości 300 mm w kontrolowanym czasie. Badanie pozwala ocenić strukturę wewnętrzną badanych mieszanek, która decyduje o zdolności materiału do pochłaniania dźwięków oraz odprowadzenia wody z nawierzchni w czasie opadów deszczu (ograniczenie zjawiska aquaplaningu). Zgodnie z [16] wodoprzepuszczalność pionowa i pozioma mieszanek o strukturze otwartej (do których można również zaliczyć mieszanki SMA8 LA) wynosi zwykle $0.5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s} \div 3.5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$. Rezultaty badań przedstawiono na rysunku 5.

Stwierdzono, że na wodoprzepuszczalność mieszanek mineralno-gumowo-asfaltowych wpływają ilość granulatu gumowego w mieszance oraz kierunek przepływu wody (poza mieszanką SMA8 LA, w przypadku której kierunek przepływu nie miał istotnego wpływu). Granulat gumowy działa rozpychająco na „szkielet” z kruszywa mineralnego, zwiększając zawartość wolnych przestrzeni oraz poprawiając wodoprzepuszczalność w obu kierunkach. Wartość wodoprzepuszczalności poziomej mieszanki referencyjnej SMA8 LA wyniosła $1,71 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$, natomiast mieszanki mineralno-gumowo-asfaltowej z największą zawartością granulatu SMA8 LA (15% GG) już $2,19 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ (wzrost o 28%). Warto zaznaczyć, że kruszywo gumowe tworzy bardziej swobodny przepływ wody w kierunku poziomym, co potwierdzają badania przeprowadzone za pomocą rentgenowskiej tomografii komputerowej [21].

Wielkość modułu sztywności stanowi istotny parametr definiujący właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych i zawsze jest brana pod uwagę przy projektowaniu ich składu. Moduł sztywności oznaczono w temperaturze 5 oraz 15 i 25°C metodą rozciągania pośredniego IT-CY. Próbkę obciążano wg krzywej typu haversine. Przemieszczenie poziome próbek walcowych wyniosło 5 μm, a wartość współczynnika Poissona przyjęto jako $\nu = 0,35$. Średnie wartości modułu sztywności przedstawiono na rysunku 6.

The correspondence of the trend line (Figure 6) with the actual relaxation function is coincidental and purely local (in the analyzed temperature range of 5 – 25°C). The average values of the stiffness modulus show variability depending on the type of rubber-asphalt mixture and the test temperature. Increasing the temperature drastically reduces the stiffness modulus of the specimens. The addition of a higher amount of rubber aggregate also contributes to a reduction in stiffness modulus values, e.g., at 15°C, SMA8 LA asphalt mixtures have a modulus of 1955 MPa, while the same mixtures with the addition of 15% granulate SMA8 LA (15% RG) showed an average value of 387 MPa (80% decrease). This shows that the elasticity of rubber-asphalt mixtures has increased, which can effectively improve their resistance to low-temperature cracking [22].

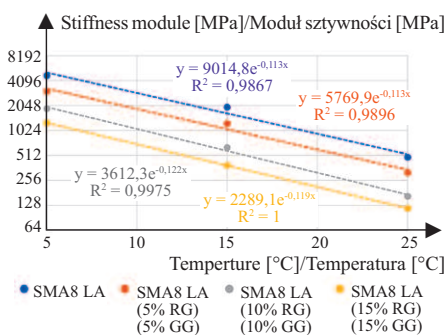


Fig. 6. Stiffness modules determined by the IT-CY method of the designed SMA8 LA rubber-asphalt mixtures at 5; 15 and 25°C

Rys. 6. Moduł sztywności określony metodą IT-CY zaprojektowanych mieszank mineralno-gumowo-asfaltowych SMA8 LA w temperaturze 5; 15 i 25°C

Zgodność linii trendu (rysunek 6) z rzeczywistą funkcją relaksacji jest przypadkowa i ma charakter wyłącznie lokalny (w analizowanym przedziale temperatury 5 – 25°C). Średnie wartości modułu sztywności wskazują na ich zróżnicowanie w zależności od rodzaju mieszanki mineralno-gumowo-asfaltowej oraz temperatury badania. Wzrost temperatury drastycznie zmniejsza moduł sztywności próbek. Dodanie większej ilości kruszywa gumowego również przyczynia się do redukcji wartości modułów sztywności, np. w temperaturze 15°C mieszanki mineralno-asfaltowe SMA8 LA cechują się modułem 1955 MPa, a te same mieszanki z dodatkiem 15% granulatu SMA8 LA (15% GG) wykazały średnią wartość 387 MPa (spadek o 80%). Świadczy to o zwiększeniu elastyczności mieszank mineralno-gumowo-asfaltowych, co może skutecznie poprawić ich odporność na powstanie spękań niskotemperaturowych [22].

Summary

Based on the conducted research and analysis, it was found that rubber granulate of 1/4 mm grain size added in the “dry” technology significantly affects the functional properties of SMA8 LA asphalt mixtures. The higher content of granules reduces the resistance of the aggregate to raveling from the pavement, increases water and frost sensitivity, significantly reduces resistance to permanent deformation

Based on a preliminary analysis of the test results, it was concluded that **the maximum recommended amount of rubber granulate in SMA8 LA mixtures with 45/80-80 bitumen should not exceed 10%** (by volume). Mixtures with 5% and 10% rubber granulate content meet all requirements and can be used in pavement layers loaded with KR5 – KR6 traffic.

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz stwierdzono, że granulaty gumowy o frakcji 1/4 mm dodawany w technologii „na sucho” wpływa istotnie na właściwości funkcjonalne mieszank mineralno-asfaltowych typu SMA8 LA. Większa zawartość granulatu obniża odporność na odrywanie się kruszywa z nawierzchni, zwiększa wrażliwość na działanie wody i mrozu oraz w dużym stopniu osłabia odporność mieszanki na powstawanie deformacji trwałych.

Na podstawie wstępnej analizy wyników badań stwierdzono, że **maksymalna rekomendowana ilość granulatu gumowego w mieszankach typu SMA8 LA z asfaltem 45/80-80 nie powinna przekraczać 10%** (w stosunku objętościowym). Mieszanki o zawartości granulatu gumowego 5% i 10% spełniają wszystkie stawiane wymagania i mogą być stosowane w warstwach ścieralnych konstrukcji nawierzchni drogowej, obciążonej ruchem KR5 – KR6.

The research was financed within the framework of the research work No. WZ/WB-III/7/2023 carried out at the Białystok University of Technology from the grant of the Ministry of Science and Higher Education.

*Received: 05.08.2024
Revised: 27.09.2024
Published: 21.03.2025*

Badania sfinansowano w ramach pracy badawczej nr WZ/WB-III/7/2023 realizowanej w Politechnice Białostockiej z dotacji Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

*Artykuł wpłynął do redakcji: 05.08.2024 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 27.09.2024 r.
Opublikowano: 21.03.2025 r.*

Literatura

- [1] Riekstins A, Baumanis J, Barbars J. Laboratory investigation of crumb rubber in dense graded asphalt by wet and dry processes. *Construction and Building Materials*. 2021; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123459>.
- [2] Malus M, Bojda J, Sienkiewicz M, Szot W, Bouyahyi M, Yang L, Navarro FJ, AlSayegh M, Daadoush R, Soliman M, Duchateau R, Jasinska-Walc L. Advancing sustainable hybrid bitumen systems: A compatibilization solution by functionalized polyolefins for enhanced crumb rubber content in bitumen. *Journal of Cleaner Production*. 2024; <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140615>.

- [3] Rodríguez-Fernández I, Baheri FT, Cavalli MC, Poulikakos LD, Bueno M. Microstructure analysis and mechanical performance of crumb rubber modified asphalt concrete using the dry process. *Construction and Building Materials*. 2020; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119662>.
- [4] Świączko-Zurek B, Goubert L, Ejsmont J, Ronowski G. *Poroelastic Road Surfaces - State of The Art*. 2018.
- [5] Jaskula P, Szydłowski C, Stiens M, Rys D, Jaczewski M, Pszczola M. Durable poroelastic wearing course SEPOR with highly modified bitumen. *Transportation Research Procedia*. 2020; <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.02.080>.

- [6] Jaskula P, Ejsmont J, Stienss M, Ronowski G, Szydłowski C, Swieczko-Zurek B, Rys D. Initial field validation of poroelastic pavement made with crumb rubber, mineral aggregate and highly polymer-modified bitumen. *Materials*. 2020; <https://doi.org/10.3390/ma13061339>.
- [7] Jaskula P, Ejsmont J, Gardziejczyk W, Mioduszewski P, Stienss M, Motylewicz M, Szydłowski C, Gierasimiuk P, Rys D, Wasilewska M. Bitumen-Based Poroelastic Pavements: Successful Improvements and Remaining Issues. *Materials*. 2023; <https://doi.org/10.3390/ma16030983>.
- [8] Rodríguez-Fernández I, Cavalli MC, Poulikakos L, Bueno M. Recyclability of Asphalt Mixtures with Crumb Rubber Incorporated by Dry Process: A Laboratory Investigation. *Materials*. 2020; <https://doi.org/10.3390/ma13122870>.
- [9] Pacholak R, Plewa A, Gardziejczyk W. Wpływ lepszycy modyfikowanych na właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych o obniżonym poziomie hałasu w ujemnych temperaturach. *Materiały Budowlane*. 2023; <https://doi.org/10.15199/33.2023.08.05>.
- [10] Wang T, Xiao F, Zhu X, Huang B, Wang J, Amirkhanian S. Energy consumption and environmental impact of rubberized asphalt pavement. *Journal of Cleaner Production*. 2018; <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.086>.
- [11] Bueno M, Haag R, Heeb N, Mikhailenko P, Boesiger L, Poulikakos L. Functional and environmental performance of plant-produced crumb rubber asphalt mixtures using the dry process. *Materials and Structures*. 2021; <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01790-y>.
- [12] Yu M, Wu G, Kong L, Tang Y. Tire-pavement friction characteristics with elastic properties of asphalt pavements. *Applied Sciences*. 2017; <https://doi.org/10.3390/app7111123>.
- [13] Wytyczne techniczne WT-2. Nawierzchnie asfaltowe na drogach krajowych. Część I. Mieszanki mineralno-asfaltowe. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad. Warszawa, 2014.
- [14] PN-EN 12697-22+A1:2024-05. Mieszanki mineralno-asfaltowe. Metody badań. Część 22: Koleinowanie.
- [15] PN-EN 12697-17:2017-03. Mieszanki mineralno-asfaltowe. Metody badań. Część 17: Ubytek ziaren w próbkach porowatego asfaltu.
- [16] PN-EN 12697-19:2020-07. Mieszanki mineralno-asfaltowe. Metody badań. Część 19: Wodoprzepuszczalność próbek.
- [17] PN-EN 12697-26+A1:2023-03. Mieszanki mineralno-asfaltowe. Metody badań. Część 26: Sztywność.
- [18] Wytyczne Techniczne SMA8 LA. Mieszanka mastyksowo-grysowa SMA8 LA do warstwy ścieralnej grubości 3 cm, obciążonej ruchem KR5-KR6, o polepszonych właściwościach akustycznych. Podlaski Zarząd Dróg Wojewódzkich w Białymstoku. 2013.
- [19] Sangiorgi C, Tataranni P, Simone A, Vignali V, Lantieri C, Dondi G. Stone mastic asphalt (SMA) with crumb rubber according to a new dry-hybrid technology: A laboratory and trial field evaluation. *Construction and Building Materials*. 2018; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.128>.
- [20] Baumgardner GL, Hemsley JM, Jordan III W, Howard IL. Laboratory evaluation of asphalt mixtures containing dry added ground tire rubber and a processing aid. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 2012.
- [21] Masad E, Al Omari A, Chen HC. Computations of permeability tensor coefficients and anisotropy of asphalt concrete based on microstructure simulation of fluid flow. *Computational Materials Science*. 2007; <https://doi.org/10.1016/j.comatsci.2007.01.015>.
- [22] Duan K, Wang C, Liu J, Song L, Chen Q, Chen Y. Research progress and performance evaluation of crumb-rubber-modified asphalts and their mixtures. *Construction and Building Materials*. 2022; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129687>.