

dr inż. Piotr Pokorski¹⁾
ORCID: 0000-0002-8985-7400

Evaluation of the resistance of mineral-asphalt composites for bridge pavement protective layers to permanent deformation

Ocena odporności kompozytów mineralno-asfaltowych do warstw ochronnych nawierzchni mostowych na powstawanie deformacji trwałych

DOI: 10.15199/33.2025.12.25

Abstract. The article presents an evaluation of the resistance to permanent deformation of mineral-asphalt composites used in protective layers of bridge pavements, determined by uniaxial cyclic compression test. The scope of the research and analysis encompassed mineral-asphalt mixtures designed within the study plan, as well as mixtures whose compositions correspond to those incorporated into existing bridge pavement structures with concrete bridge decks in Poland. Based on the conducted analyses, equations were developed to describe the permanent deformation resistance of compactible mineral-asphalt mixtures intended for use in protective pavement layers.

Keywords: bridge pavement; permanent deformations; protective layer.

Streszczenie. W artykule zaprezentowana została ocena odporności na powstawanie deformacji trwałych kompozytów mineralno-asfaltowych do warstw ochronnych nawierzchni mostowych metodą jednoosiowego cyklicznego ściskania. Zakres badań i analiz obejmował mieszanki mineralno-asfaltowe zaprojektowane w ramach planu badań oraz mieszanki o składach zgodnych z tymi, które wbudowane zostały w Polsce w konstrukcje istniejących nawierzchni na obiektach mostowych z betonową płytą pomostową. Na podstawie przeprowadzonych analiz opracowane zostały równania opisujące odporność na powstawanie deformacji trwałych dla zagęszczalnych mieszanek mineralno-asfaltowych stosowanych do warstwy ochronnej.

Słowa kluczowe: nawierzchnie mostowe; deformacje trwałe; warstwa ochronna.

The bridge deck pavement plays a key role in ensuring the durability of the entire engineering structure. Its task is not only to meet load-bearing and serviceability requirements, but also to guarantee traffic safety and the continuity of transport connections [1]. The durability of pavements on bridge structures depends on many factors and can be considered from various perspectives.

In Poland, the main material used for bridge deck in road bridge structures is concrete: prestressed concrete is used in approximately 48% of structures; reinforced concrete in 38%; while steel is used in only about 13%. One of the most important requirements for bridge pavements is ensuring their waterproofing, which protects the load-bearing structure from water ingress and, consequently, from corrosion [2 – 4]. Waterproofing is achieved by using a protective layer in the lower part of the pavement system, made of asphalt mixtures with a low air-void content. An increased amount of asphalt binder in such mixtures improves their waterproofing, but at the same time may lead to susceptibility to permanent deformations. To limit this phenomenon, hard grades of binders

Nawierzchnia mostowa odgrywa kluczową rolę w zapewnieniu trwałości całego obiektu inżynierskiego. Jej zadaniem jest nie tylko spełnienie wymagań nośności i użytkowości, lecz także zagwarantowanie bezpieczeństwa ruchu oraz ciągłości połączeń komunikacyjnych [1]. Trwałość nawierzchni na obiektach mostowych uzależniona jest od wielu czynników i może być rozpatrywana w różnych aspektach.

W Polsce dominującym materiałem płyt pomostowych w konstrukcjach mostów drogowych jest beton: w ok. 48% przypadków stosuje się beton sprężony; w 38% – beton zbrojony, natomiast stal wykorzystywana jest jedynie w ok. 13% obiektów. Jednym z najistotniejszych wymagań dotyczących nawierzchni mostowych jest zapewnienie ich szczelności, która chroni konstrukcję nośną przed wnikaniem wody i w konsekwencji przed korozją [2 – 4]. Szczelność osiąga się dzięki zastosowaniu warstwy ochronnej w dolnej części układu nawierzchni wykonanej z mieszanek mineralno-asfaltowych o małej zawartości wolnych przestrzeni. Zwiększona ilość lepiszcza asfaltowego w takich mieszankach zwiększa ich szczelność, ale jednocześnie może powodować podatność na powstawanie deformacji trwałych. W celu ograniczenia tego zjawiska, stosuje się twarde rodzaje lepiszczy, co jednak niesie ryzyko wystąpienia innych uszko-

¹⁾ Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej; piotr.pokorski@pw.edu.pl

are used, however, this carries the risk of other types of damage – primarily fatigue and low-temperature cracking – which reduce the service life of the pavement [3 – 8]. An alternative solution is to design mixtures with a stone skeleton filled with mastic, in which binder with improved viscoelastic properties is used [7, 9, 10].

Simultaneously meeting the two requirements – waterproofing and resistance to various damage mechanisms – currently constitutes one of the most significant research challenges in bridge pavement technology. A response to this challenge may be the precise selection of composition and modeling of the properties of asphalt mixtures intended for protective layers.

Operation conditions of bridge pavement

The bridge pavement, as part of an engineering structure, operates under exceptionally demanding service conditions. It is subjected both to loads generated by vehicular traffic and to environmental impacts. It is influenced by vertical and horizontal forces, extreme temperatures, water, and chemical de-icing agents. The intensity of these loads is significantly greater than in the case of pavements laid on a road embankment. The impact of vehicle wheels induces compressive and tensile stresses in the pavement, which can lead to permanent visco-plastic deformations and to fatigue cracking of the asphalt layers. Due to the fact that majority bridge decks in Poland have a concrete structures, which are characterized by high stiffness, the level of stresses and strains in bridge pavements is higher than in road pavements, increasing the risk of damage in the form of permanent deformations [2]. The magnitude of stresses depends on the stiffness modulus of the pavement, which varies as a function of temperature, loading frequency and duration, as well as load intensity. A particularly dangerous situation occurs in summer, when pavement temperature can reach as high as 70°C, promoting the development of permanent deformations and accelerating the degradation of bridge pavements. Photographs 1a and 1b shows permanent deformations on selected bridge structures.

dzeń – przede wszystkim spękań zmęczeniowych i niskotemperaturowych, skracających żywotność nawierzchni [3 – 8]. Alternatywnym rozwiązaniem jest projektowanie mieszanek o szkieletcie grysowym wypełnionym mastyksem, w którym wykorzystuje się asfalt o ulepszonych właściwościach lepko-sprężystych [7, 9, 10].

Spełnienie jednocześnie dwóch wymagań – szczelności oraz odporności na różne mechanizmy zniszczenia – stanowi obecnie jedno z najważniejszych wyzwań badawczych technologii nawierzchni mostowych. Odpowiedzią na to wyzwanie może być precyzyjny dobór składu oraz modelowanie właściwości mieszanek mineralno-asfaltowych, przeznaczonych do warstw ochronnych.

Warunki pracy nawierzchni mostowej

Nawierzchnia mostowa, jako część konstrukcji inżynierskiej, pracuje w wyjątkowo wymagających warunkach eksploatacyjnych. Podlega zarówno obciążeniom generowanym przez ruch pojazdów, jak i oddziaływaniom środowiskowym. Wpływają na nią siły pionowe i poziome, ekstremalna temperatura, woda oraz środki chemiczne stosowane do odładzania. Intensywność tych obciążeń jest znacznie większa niż w przypadku nawierzchni układanych na korpusie drogowym. Oddziaływanie kół pojazdów wywołuje naprężenia ściskające i rozciągające w nawierzchni, które mogą prowadzić do powstawania deformacji trwałych o charakterze lepko-plastycznym oraz do spękań zmęczeniowych warstw asfaltowych. Ze względu na dominację w Polsce konstrukcji pomostów betonowych, charakteryzujących się dużą sztywnością, poziom naprężeń i odkształceń w nawierzchni mostowej jest wyższy niż na nawierzchni drogowej, co zwiększa ryzyko wystąpienia uszkodzeń w postaci deformacji trwałych [2]. Wielkość naprężeń zależy od modułu sztywności nawierzchni, który jest zmienny w funkcji temperatury, częstotliwości i czasu działania obciążenia oraz jego intensywności. Szczególnie groźna sytuacja występuje latem, kiedy temperatura nawierzchni może wynosić nawet 70°C, co sprzyja powstawaniu odkształceń trwałych i przyspiesza proces degradacji nawierzchni mostowych. Na fotografii 1a i b przedstawiono deformacje trwałe na wybranych obiektach mostowych.



Photo 1. Bridge structure on: a) DW 264; b) DW 251
Fot. 1. Obiekt mostowy na: a) DW 264; b) DW 251

Materials and research plan

It was planned to design, and subsequently test and analyze, compactible mixtures. The study did not include self-compacting mastic asphalt mixtures due to their entirely different aggregate gradation and the type of hard asphalt binders used. The idea of research plan was to maximize the variation in aggregate gradation of asphalt mixtures and to apply such an amount of asphalt binder as to ensure the required waterproofing of mixtures intended for the protective layer (low air void content). The study included both mixtures with a developed stone-on-stone skeleton (gradation limit points typical of SMA mixtures) and mixtures without a stone skeleton (gradation limit points typical of AC mixtures). The limit points for AC and SMA mixtures served as the starting reference for determining the aggregate gradations of the mixtures included in the research plan, which encompassed the analysis of 27 asphalt mixtures intended for the protective layer of bridge pavement. These mixtures were differentiated in terms of mineral composition and asphalt binder content. As part of the research plan, nine mineral mixtures were designed, fully covering the area defined by the limit points of the aggregate gradation curves for asphalt concrete (AC 11) and stone mastic asphalt (SMA 11). To ensure high waterproofing, all mixtures were kept at a constant filler content (particle size below 0.063 mm) of 11%, which falls within the upper limits of the gradation limit points for both AC 11 and SMA 11. The variable parameter was the sand fraction content – set at three levels: 12%, 23%, and 34%. A second differentiating factor in the composition was the ratio of coarse aggregates 8/11 to 2/8, also set at three levels: 0.3, 1.0, and 1.7. As a result, the mineral mixtures, with varying sand contents and coarse aggregate ratios, covered the entire field between the extreme values of the gradation limit points (Figure 1). The graph also includes examples of industrially produced gradation curves for AC, SMA, and MA mixtures. The SMA 11 mixture is marked with a dark red line, the AC 11 with a red line, and the mastic asphalt MA 11 with a pink line. Analysis of the curves shows that industrially produced SMA 11 and AC 11 mixtures have gradations close to the selected mixtures designed in the research. In turn, the MA 11 mixture matches one of the designed mixtures in the range of the 2.0 – 11.2 mm fraction, but below the 2.0 mm sieve – due to the significantly higher filler content – its gradation curve lies above those of the mixtures included in the research plan.

In the research plan, it was decided to use one type of binder, namely the polymer-modified binder PMB 45/80-55. Its content was selected based

Materiały i plan badań

Zaplanowano zaprojektowanie oraz poddanie dalszym badaniom i analizie mieszanki zagęszczalne. W badaniach nie uwzględniono samozagęszczalnych mieszanek typu asfalt lany ze względu na ich zupełnie odmienny skład uziarnienia oraz rodzaj stosowanych twardych lepiszczy asfaltowych. Ideą planu badań było maksymalne zróżnicowanie składu ziarnowego mieszanek mineralno-asfaltowych oraz zastosowanie takiej ilości lepiszcza asfaltowego, która zapewni wymaganą szczelność mieszanek do warstwy ochronnej (mała zawartość wolnych przestrzeni). W badaniach uwzględniono zarówno mieszanki z wytworzonym szkieletem grysowym (punkty graniczne uziarnienia jak w przypadku mieszanki typu SMA) oraz mieszanki bez szkieletu mineralnego (punkty graniczne uziarnienia jak mieszanki typu AC). Punkty graniczne mieszanek typu AC i SMA stanowiły punkt wyjścia i podstawę do wyznaczenia składów uziarnienia mieszanek uwzględnionych w planie badań, który obejmował analizę 27 mieszanek mineralno-asfaltowych przeznaczonych do warstwy ochronnej nawierzchni mostowej. Różnicowano je pod względem składu mineralnego oraz ilości lepiszcza asfaltowego. W ramach prac zaprojektowano 9 mieszanek mineralnych, które w pełni odwzorowywały pole wyznaczone przez punkty kontrolne krzywych uziarnienia betonu asfaltowego (AC 11) oraz mieszanki mastyksowo-grysowej (SMA 11). W celu zapewnienia dużej szczelności, we wszystkich mieszankach utrzymano stałą zawartość frakcji kruszywa (wymiar ziarna poniżej 0,063 mm) na poziomie 11%, mieszczącą się w górnych granicach punktów kontrolnych uziarnienia w przypadku AC 11 i SMA 11. Jako parametr zmienny przyjęto ilość frakcji piasku – trzy poziomy: 12%, 23% i 34%. Drugim czynnikiem różnicującym skład był stosunek udziału grysów 8/11 do 2/8, określony także na trzech poziomach: 0,3; 1,0 i 1,7. Dzięki temu mieszanki mineralne, o zróżnicowanej zawartości frakcji piasku i zmiennym stosunku grysów, pokrywały całe pole zawarte między skrajnymi wartościami punktów granicznych uziarnienia (rysunek 1). Na wykresie naniesiono również przykłady krzywych z produkcji przemysłowej dla mieszanek typu AC, SMA i MA. Mieszanek SMA 11 oznaczono linią ciemnoczerwoną, AC 11 linią czerwoną, natomiast asfalt lany MA 11 – linią różową. Analiza krzywych pokazuje, że mieszanki SMA 11 i AC 11 z produkcji przemysłowej mają uziarnienie zbliżone do wybranych mieszanek zaprojektowanych w badaniach. Z kolei mieszanka MA 11, w zakresie frakcji 2,0 – 11,2 mm, odpowiada jednej z zaprojektowanych mieszanek, jednak poniżej sita 2,0 mm – ze względu na znacznie większą zawartość wypełniacza – jej krzywa uziarnienia znajduje się wyżej niż w przypadku mieszanek ujętych w planie badań.

W planie badań zdecydowano się zastosować jeden rodzaj lepiszcza asfaltowego, a mianowicie polimeroasfalt PMB 45/80-55. Dobranie jego zawartości wykonano na podstawie analizy

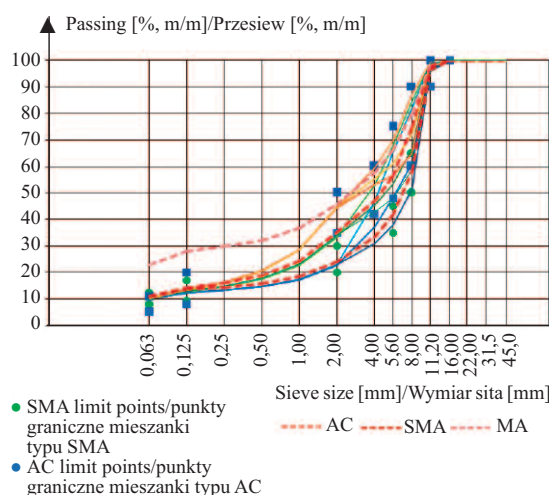


Fig. 1. Mineral mixture design

Rys. 1. Projekt mieszanek mineralnych

on an analysis of the asphalt film thickness calculated for various types of asphalt mixtures used in asphalt bridge pavements. The binder content was set at three levels: 5%, 6%, and 7%.

The resistance of asphalt mixtures to permanent deformation was tested using different methods depending on the type of mixture. For asphalt concrete (AC) and stone mastic asphalt (SMA), the primary test is the small-size wheel-tracking test in accordance with PN-EN 12697-22 [11–18]. For mastic asphalt (MA) the resistance to permanent deformation are testing by indentation using cube or Marshall specimens according to PN-EN 12697-20. My preliminary studies and the experience of other research centers indicate that it is technically impossible to properly conduct measurements using these methods for bridge pavement mixtures (mixtures with increased impermeability due to the higher asphalt binder content). In wheel-tracking tests performed on asphalt mixtures for protective layers, under standard test conditions the material undergoes excessive deformation under the load of the measuring wheel, resulting in non-representative results. To assess the resistance to permanent deformation of bridge pavement mixtures, one may also apply wheel-tracking tests on the entire layer system (protective layer + wearing course). Another possible method is the flow number test, used primarily for mixtures with high air-void content (base layer) [19].

Based on my preliminary studies and the experience of other researchers, it was found that a **universal** method for assessing resistance to permanent deformation of mixtures used in structural layers of bridge pavements is **the uniaxial cyclic compression test** [20 – 22].

To evaluate the resistance to permanent deformation of asphalt mixtures used in the protective layer of bridge pavements, uniaxial cyclic compression tests were conducted according to PN-EN 12697-25 [23]. The test determines two key parameters: cumulative axial strain and creep rate. The uniaxial cyclic compression method (Method A) involves repeatedly applying a constant compressive load to the specimen. The test may be conducted at various temperatures, with 50°C being the most commonly used. The standard procedure includes 3600 cycles, each consisting of one second of loading and one second of unloading. Five specimens of each asphalt mixture were tested, allowing representative results to be obtained. Figure 2 presents an example of a single test result along with the determined final parameters.

Asphalt mixture composition models

Based on the laboratory tests, analysis of the results, and the calculations performed, parameters such as the final cumulative axial strain and the creep rate –

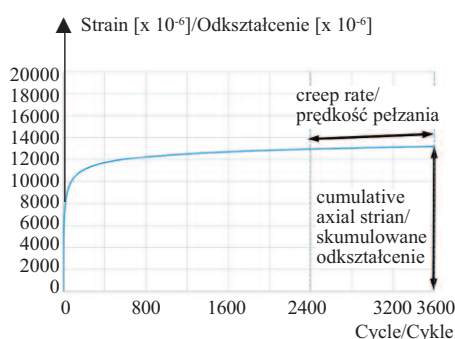


Fig. 2. Cyclic compression test result

Rys. 2. Wynik badania cyklicznego ściskania

grubości błonki asfaltowej obliczonej w przypadku różnego typu mieszank mineralno-asfaltowych, wykorzystywanych do asfaltowych nawierzchni mostowych. W badaniach przyjęto zawartość lepiszcza na trzech poziomach: 5, 6 i 7%.

Odporność mieszank mineralno-asfaltowych na deformacje trwale badano różnymi metodami w zależności od ich rodzaju. W przypadku betonu asfaltowego AC i mieszanki mastyksu grynowego SMA podstawowym badaniem jest test przeprowadzany w małym koleinomierzu zgodnie z PN-EN 12697-22 [11 – 18]. W przypadku asfaltu lanego MA wymagania dotyczą odporności badanej metodą penetracji stemplem wg PN-EN 12697-20. Moje badania wstępne oraz doświadczenia innych ośrodków badawczych wskazują na brak możliwości technicznych właściwego przeprowadzenia pomiaru tymi metodami w przypadku mieszank do nawierzchni mostowych (mieszanki o zwiększonej szczelności przez zastosowanie zwiększonej ilości lepiszcza asfaltowego). W przypadku badania mieszank mineralno-asfaltowych do warstwy ochronnej w koleinomierzu, przy standardowych warunkach pomiarowych następuje nadmierne odkształcenie materiału pod obciążeniem koła pomiarowego i nie uzyskuje się miarodajnego wyniku. W celu określenia odporności na deformacje trwale mieszank mostowych można także zastosować badanie koleinowania całego pakietu warstw (warstwa ochronna + warstwa ścieralna). Kolejną metodą jest badanie flow number, mające zastosowanie przede wszystkim do mieszank o dużej zawartości wolnych przestrzeni (warstwa podbudowy) [19].

Na podstawie moich badań wstępnych oraz doświadczeń innych ośrodków stwierdzono, że **uniwersalną** metodą, która umożliwi ocenę odporności na deformacje trwale mieszank do warstw konstrukcyjnych nawierzchni mostowych, jest **metoda jednoosiowego cyklicznego ściskania** [20 – 22].

W celu oceny odporności na powstawanie deformacji trwałych mieszank mineralno-asfaltowych, stosowanych w warstwie ochronnej nawierzchni mostowych, wykonano badania cyklicznego ściskania zgodnie z PN-EN 12697-25 [23]. W ramach testu wyznaczane są dwa kluczowe parametry – skumulowane odkształcenie oraz prędkość pełzania. Metoda cyklicznego jednoosiowego ściskania (metoda A) polega na wielokrotnym przykładaniu do próbki stałego obciążenia naprężającego. Badanie można prowadzić w różnej temperaturze, przy czym najczęściej stosowana jest temperatura 50°C. Standardowa procedura obejmuje 3600 cykli, z których każdy składa się z jednej sekundy obciążenia i jednej sekundy odciążenia. Badaniu poddano pięć próbek każdej mieszanki mineralno-asfaltowej, co pozwoliło na uzyskanie

reprezentatywnych wyników. Na rysunku 2 zaprezentowano przykładowy wynik pojedynczego testu wraz z wyznaczonymi parametrami końcowymi.

Modele składu mieszanki mineralno-asfaltowej

Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych i analizy wyników oraz wykonanych obliczeń uzyskano parametry, takie jak skumulowane odkształcenie końcowe oraz prędkość pełzania, które otrzymano w badaniu cyklicznego ściskania, opisujące 27 mieszank mineralno-asfaltowych pod względem odpor-

obtained from the cyclic compression test – were determined to characterize the resistance to permanent deformation of the 27 asphalt mixtures. A summary of the results is presented in Table 1, which also includes the air voids content determined for each of the tested asphalt mixtures.

As a result of the statistical analysis, equations describing the resistance to permanent deformation were obtained:

$$y_1 = 84,204.6 - 24,622.8 x_1 = 1838.4 x_1^2 - 1343.4 x_2 + 309,0 x_1 x_2 \quad (1)$$

$$y_2 = -0,784966 + 0,190305 x_1 \quad (2)$$

where:

y_1 – cumulative axial strain [$\times 10^{-6}$];

y_2 – creep rate [-];

x_1 – binder content relative to mineral mix density [%/(m/m)];

x_2 – sand content (size 0,063 – 2,0 mm) [%/(m/m)].

Equations (1) and (2) are applicable for mixtures with a binder content of 5–7% and for mixtures with a filler content (at the level of 11%).

The developed permanent deformation resistance models were subjected to a validation process. This consisted of comparing the parameters obtained from the cumulative axial strain and creep rate models with the results of laboratory cyclic compression tests performed on mixtures used on bridge structures in Poland. For the purposes of validation, information was collected on the locations of the structures and on the mix

ności na deformacje trwałe. Zbiorcze zestawienie wyników przedstawiono w tabeli 1, a dodatkowo zamieszczono także wyniki zawartości wolnych przestrzeni w każdej z badanych mieszanek mineralno-asfaltowych.

W wyniku przeprowadzonej analizy statystycznej otrzymano równania opisujące odporność na powstawanie deformacji trwałych:

$$y_1 = 84,204.6 - 24,622.8 x_1 = 1838.4 x_1^2 - 1343.4 x_2 + 309,0 x_1 x_2 \quad (1)$$

$$y_2 = -0,784966 + 0,190305 x_1 \quad (2)$$

gdzie:

y_1 – skumulowane odkształcenie [$\times 10^{-6}$];

y_2 – prędkość pełzania [-];

x_1 – zawartość lepiszcza w stosunku do gęstości MM [%/(m/m)];

x_2 – zawartość frakcji piaszczystej (wymiar kruszywa 0,063 – 2,0 mm) [%/(m/m)].

Równania (1) i (2) mają zastosowanie w przypadku mieszanek o zawartości lepiszcza 5 – 7% oraz mieszanek z dużą zawartością frakcji kruszywa (na poziomie 11%).

Opracowane modele odporności na deformacje trwałe zostały poddane procesowi walidacji. Polegał on na porównaniu parametrów uzyskanych z modeli skumulowanego odkształcenia oraz prędkości pełzania z wynikami badań laboratoryjnych cyklicznego ściskania mieszanek zastosowanych na obiektach mostowych w Polsce. Na potrzeby walidacji pozyskano informacje dotyczące lokalizacji obiektów oraz receptur mieszanek mineralno-asfaltowych stosowanych w warstwach ochronnych,

Table 1. Summary of results of resistance to permanent deformation

Tabela 1. Zbiorcze zestawienie wyników odporności na powstawanie deformacji trwałych

Mixture code/ Nr mieszanek	Sand content [%]/Zawartość frakcji piaszczystej [%]	Grit ratio [-]/Stosunek gryso- wy [-]	Binder content [%]/Zawartość lepiszcza [%]	Cumulative axial strain [$\times 10^{-6}$]/Skumulowane odkształcenie końcowe [$\times 10^{-6}$]	Cumulative axial strain std. deviaton [$\times 10^{-6}$]/Odchylenie std. skumulowanego odkształcenia [$\times 10^{-6}$]	Creep rate [-]/Prędkość pełzania [-]	Creep rate std. deviaton/Odchylenie std. prędkości pełzania [-]	Air voids content [%]/Zawartość wolnych przestrzeni [%]	Air voids content std. de-viaton/Odchylenie std. zawartości wolnych przestrzeni [%]
1	12	1,7	5	7544	58	0,17	0,004	3,6	0,13
2	12	1,7	6	8167	73	0,17	0,004	1,6	0,06
3	12	1,7	7	8231	77	0,22	0,007	1,3	0,05
4	34	0,3	5	9508	128	0,15	0,004	3,7	0,12
5	34	0,3	6	12124	366	0,33	0,008	1,8	0,06
6	34	0,3	7	22736	354	0,74	0,012	1,5	0,06
7	23	1	5	7842	76	0,17	0,004	2,7	0,11
8	23	1	6	8733	72	0,31	0,008	1,5	0,05
9	23	1	7	19942	520	0,62	0,013	0,8	0,09
10	23	0,3	5	9262	205	0,21	0,007	3,6	0,14
11	23	0,3	6	11600	99	0,29	0,008	1,9	0,06
12	23	0,3	7	14754	443	0,33	0,008	1,4	0,05
13	12	0,3	5	8964	77	0,39	0,008	3,2	0,13
14	12	0,3	6	11526	231	0,5	0,011	2,2	0,11
15	12	0,3	7	14150	530	0,5	0,012	1,4	0,04
16	23	1,7	5	7967	66	0,14	0,004	2,6	0,13
17	23	1,7	6	13185	229	0,34	0,008	1,9	0,05
18	23	1,7	7	21537	501	0,63	0,013	0,9	0,11
19	34	1,7	5	8542	80	0,16	0,004	3	0,12
20	34	1,7	6	13557	590	0,35	0,008	1,2	0,05
21	34	1,7	7	26278	466	0,87	0,014	0,7	0,09
22	12	1	5	7591	77	0,19	0,004	3,4	0,13
23	12	1	6	7963	76	0,21	0,007	2,8	0,11
24	12	1	7	8352	97	0,21	0,007	2	0,1
25	34	1	5	8718	74	0,15	0,005	3,3	0,12
26	34	1	6	9733	103	0,24	0,08	1,3	0,05
27	34	1	7	21171	481	0,71	0,015	0,6	0,09

designs of the asphalt mixtures used in the protective layers, obtained from both road authorities and construction companies. Mixtures selected for analysis came from bridges whose pavements remained in good technical condition (with no significant damage) within 5 – 20 years after opening to traffic. In total, 31 asphalt mixtures used in protective layers on concrete bridge decks were tested. In accordance with the assumptions adopted in the research plan, only mixtures with the polymer-modified binder PMB 45/80-55, binder content of $4.5 \div 8.0\%$, and air void content of $1.0 \div 3.3\%$ were used for model validation. These included SMA 11, SMA 8, and a stone-mastic mixture with increased mastic content and a maximum aggregate size of 11 mm.

Based on the obtained mix designs, the asphalt mixtures were reproduced under laboratory conditions and then tested for permanent deformation resistance using the uniaxial cyclic compression method. The mixtures were produced according to the compositions used in practice; the same types of aggregate mixtures (basalt or gabbro), the same gradation curve compositions, and identical amounts of PMB 45/80-55 were used. Each mixture was prepared using materials identical in type and quantity to those contained in the original mixtures. Figures 2a and 2b present examples of bridge structures used in the model validation.



zarówno od zarządców dróg, jak i od firm wykonawczych. Do analizy wybrano mieszanki pochodzące z mostów, których nawierzchnie pozostawały w dobrym stanie technicznym (bez oznak istotnych uszkodzeń) w okresie 5 – 20 lat od oddania do użytkowania. Łącznie zbadano 31 mieszanek mineralno-asfaltowych ułożonych w warstwach ochronnych na pomostach betonowych. Zgodnie z założeniami przyjętymi w planie badań do walidacji modelu wykorzystano tylko mieszanki z polimeroasfalem PMB 45/80-55 o zawartości lepiszcza $4,5 \div 8,0\%$ i zawartości wolnych przestrzeni $1,0 \div 3,3\%$. Były to mieszanki typu SMA 11, SMA 8 i mieszanka mastykowo-grysowa o zwiększonej zawartości mastyksu o uziarnieniu do 11 mm.

Na podstawie pozyskanych receptur mieszanek mineralno-asfaltowych odtworzono je w warunkach laboratoryjnych, a następnie poddano testom odporności na deformacje trwałe metodą cyklicznego jednoosiowego ściskania. Mieszanki zostały wykonane zgodnie z składami zawartymi w badaniach typu; użyto tego samego rodzaju mieszanek kruszywa (bazalt lub gabbro), tych samych kompozycji krzywych uziarnienia oraz identycznych ilości polimeroasfaltu PMB 45/80-55. W każdej z mieszanek zastosowano takie materiały, jakie były w mieszankach oryginalnych (ilość i rodzaj poszczególnych składników). Na fotografiach 2a i 2b przedstawiono przykładowe obiekty mostowe wykorzystane w walidacji modelu.



Fot. 2. Bridge structure over the A1 motorway (a); roadway of the Grota-Rowecki Bridge in Warsaw (b)
Fot. 2. Obiekt mostowy nad autostradą A1 (a); łącznica mostu Grota-Roweckiego w Warszawie (b)

For all 31 asphalt mixtures, specimens were prepared for permanent deformation resistance testing and examined according to the adopted method. The results calculated from the models and those obtained from the cyclic compression tests are presented in Table 2. Validation was carried out by comparing the model outputs with the laboratory results. Figures 3 and 4 show the cumulative axial strain and creep rate values obtained from the model and from laboratory testing.

Based on the statistical analysis, it was found that the results obtained from the models are consistent with those obtained for the laboratory-produced mixtures that reproduced the mix designs used in pavement structures on existing bridge objects. A determination coefficient of $R^2 = 0.89$ was obtained for the final cumulative axial strain and $R^2 = 0.96$ for the creep rate.

W przypadku wszystkich pozyskanych 31 składów mieszanek mineralno-asfaltowych, przygotowane zostały próbki do badania odporności na deformacje trwałe i przebadane zgodnie z przyjętą metodą. Wyniki obliczone z modeli oraz określone na podstawie badania metodą cyklicznego ściskania przedstawiono w tabeli 2. Walidacja dokonana została przez porównanie wyników z modelu z wynikami badania laboratoryjnego. Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono zbiorczo wartości skumulowanego odkształcenia i prędkości pełzania uzyskane z modelu oraz z badań laboratoryjnych.

Na podstawie przeprowadzonej analizy statystycznej stwierdzono, że wyniki uzyskane z modeli są zbliżone z wynikami uzyskanymi w przypadku mieszanek wykonanych w laboratorium o składzie zgodnym ze składem zawartym w recepturach mieszanek mineralno-asfaltowych, które zostały zastosowane w konstrukcjach nawierzchni na istniejących obiektach mostowych. Otrzymano współczynnik determinacji $R^2 = 0,89$ w przypadku skumulowanego odkształcenia końcowego oraz $R^2 = 0,96$ w przypadku prędkości pełzania.

Table 2. Summary of results from laboratory tests and those calculated from the model equations

Tabela 2. Zestawienie wyników z badań laboratoryjnych i obliczonych z równań modelu

Mixture code/ Nr mieszanki	Laboratory test results/Wyniki badania laboratoryjnego			Model results/Wyniki obliczone z modelu		
	cumulative axial strain [$\times 10^{-6}$]/ skumulowane odkształcenie końcowe [$\times 10^{-6}$]	creep rate [-]/ prędkość pełzania [-]	air voids content [%]/ zawartość wolnych przestrzeni [%]	cumulative axial strain [$\times 10^{-6}$]/ skumulowane odkształcenie końcowe [$\times 10^{-6}$]	creep rate [-]/ prędkość pełzania [-]	air voids content [%]/ zawartość wolnych przestrzeni [%]
1	11612	0,2	2,9	12898	0,19	2,8
2	12655	0,19	2,8	12943	0,19	2,8
3	11938	0,2	2,7	12943	0,19	2,8
4	13121	0,21	3,1	12966	0,19	2,8
5	13775	0,24	2,9	13568	0,20	2,7
6	13098	0,23	2,8	13105	0,20	2,7
7	10126	0,19	3,3	11303	0,15	3,3
8	11342	0,36	2,0	10586	0,38	1,8
9	9677	0,348	2,1	10586	0,38	1,8
10	11689	0,42	2,1	12083	0,45	1,5
11	10965	0,396	2,0	12510	0,47	1,4
12	11300	0,36	2,0	11365	0,39	1,7
13	10754	0,348	1,9	11365	0,39	1,7
14	9435	0,36	2,2	9837	0,39	1,8
15	8966	0,348	2,0	9550	0,41	1,8
16	11984	0,432	2,1	11099	0,49	1,5
17	10341	0,408	2,2	11894	0,51	1,5
18	8750	0,36	2,1	8873	0,38	2,0
19	9832	0,42	2,3	10096	0,47	1,7
20	7983	0,36	2,8	8987	0,45	1,8
21	8020	0,36	3,0	7801	0,43	2,0
22	13177	0,372	2,8	12611	0,45	1,5
23	8366	0,36	2,2	8429	0,43	1,9
24	10623	0,348	2,7	10706	0,36	1,9
25	15034	0,51	1,5	14939	0,57	1,3
26	16067	0,54	1,4	15980	0,60	1,3
27	12366	0,58	1,4	11736	0,55	1,5
28	14942	0,59	1,5	14614	0,64	1,5
29	13800	0,52	1,4	13540	0,53	1,4
30	18297	0,64	1,0	17052	0,68	1,5
21	12466	0,59	1,2	12238	0,57	1,5

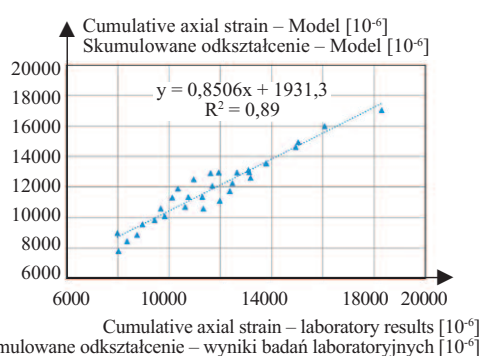


Fig. 3. Summary of cumulative strain values obtained from the model and laboratory tests

Rys. 3. Zestawienie wartości skumulowanego odkształcenia uzyskanych z modelu i z badań laboratoryjnych

Conclusions

The working conditions of pavement on bridge structures differ significantly from those on the road embankment, both in terms of the loads generated by vehicle traffic and the influence of climatic factors. These loads are more destructive

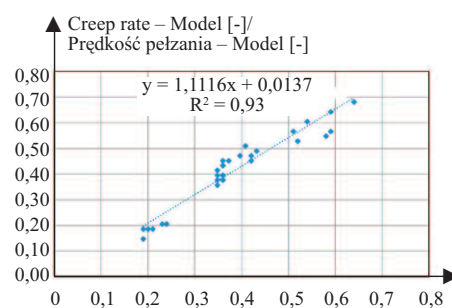


Fig. 4. Summary of creep rate values obtained from the model and laboratory tests

Rys. 4. Zestawienie wartości prędkości pełzania uzyskanych z modelu i z badań laboratoryjnych

Podsumowanie

Warunki pracy nawierzchni na obiektach mostowych różnią się znacznie od występujących na korpusie drogowym, zarówno pod względem oddziaływań generowanych przez ruch pojazdów, jak i wpływu czynników klimatycznych. Obciążenia te mają bardziej de-

in the case of bridges, which places much higher durability requirements on the pavement.

Depending on the type of asphalt mixture, different methods are used to assess its resistance to permanent deformation. For mixtures used in the structural layers of bridge pavements, the uniaxial cyclic compression method is applied, which is particularly effective for evaluating mixtures with a high mastic content. The equations developed on the basis of analyses allow the calculation of two key parameters: final cumulative axial strain and creep rate. The validation of the obtained relationships for asphalt mixtures used in the structural layers of bridge pavements on engineering structures in Poland confirmed their accuracy.

The applicability of the developed equations describing resistance to permanent deformation is limited to asphalt mixtures with a high filler content (at the level of 11%), with a binder content of 5–7%, and only in the case of polymer-modified asphalt PMB 45/80-55. The next planned stage of research is to expand the study to include other types of asphalt binders, incorporate the wearing course, conduct extended testing on full layer systems, and determine requirement levels for parameters evaluating the resistance to permanent deformation of bridge pavement layers.

The publication was financed by a subsidy from the dean of the Faculty of Civil Engineering of the Warsaw University of Technology.

Received: 28.07.2025

Revised: 08.09.2025

Published: 23.12.2025

strukcyjny charakter w przypadku mostów, co stawia przed nawierzchnią znacznie większe wymagania dotyczące trwałości.

W zależności od rodzaju mieszanki mineralno-asfaltowej stosuje się różne metody oceny jej odporności na deformacje trwałe. W przypadku mieszanek do warstw konstrukcyjnych nawierzchni na obiektach mostowych zastosowanie znajduje metoda jednoosiowego cyklicznego ściskania, która sprawdza się przede wszystkim w ocenie mieszanek o dużej zawartości mastyksu asfaltowego. Opracowane na podstawie analiz równania pozwalają na obliczenie dwóch kluczowych parametrów – końcowego odkształcenia skumulowanego oraz prędkości pełzania. Przeprowadzona walidacja uzyskanych zależności dotyczących mieszanek mineralno-asfaltowych, zastosowanych w warstwach konstrukcyjnych nawierzchni mostowych na obiektach inżynierskich w Polsce, potwierdziła ich poprawność. Wykorzystanie opracowanych równań odporności na powstawanie deformacji trwałych ograniczone jest do mieszanek mineralno-asfaltowych z dużą zawartością frakcji kruszywa (na poziomie 11%) i o zawartości lepiszcza 5 – 7% oraz tylko w przypadku polimeroasfaltu PMB 45/80-55. Planowanym kolejnym etapem badań jest ich rozszerzenie o innego rodzaju lepiszcza asfaltowe, uwzględnienie warstwy ścierniczej, wykonanie rozszerzonych badań w pakietach warstw oraz określenie poziomu wymagań dotyczących parametrów oceny odporności na powstawanie deformacji trwałych warstw nawierzchni mostowych. Publikacja została sfinansowana z subwencji dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej.

Artykuł wpłynął do redakcji: 28.07.2025 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 08.09.2025 r.

Opublikowano: 23.12.2025 r.

Literature

- [1] Dziennik Ustaw z 20 lipca 2022 r. pozycja 1518 pt *Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z 24 czerwca 2022 r. w sprawie przepisów techniczno-budowlanych dotyczących dróg publicznych*.
- [2] Piłat J, Kowalski K. Nawierzchnie asfaltowe i betonowe na obiektach mostowych. Seminarium „Nawierzchnie, izolacje i inne elementy wyposażenia mostów” Warszawa 2007, str. 49-52.
- [3] Madaj A, Wołowicki W. Budowa i utrzymanie mostów. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2001.
- [4] Fu J, Shen A, Zhang H. Study on the Influence and Law of Waterproof System Design Factors on the Typical Stress of Bridge Deck Pavement. *Coatings*. 2021; 11 (12): 1540.
- [5] Widyatmoko I, Elliott RC, Read JM. Development of Heavy-Duty Mastic Asphalt Bridge Surfacing, Incorporating Trinidad Lake Asphalt and Polymer Modified Binders. *Road Materials and Pavement Design*. 2005; <https://doi.org/10.1080/14680629.2005.9690016>.
- [6] Sybilski D. Bitumiczne nawierzchnie mostowe. *Drogownictwo*. 1994; 9.
- [7] Radziszewski P, Piłat J, Sarnowski M, Król J, Kowalski K. Nawierzchnie asfaltowe na obiektach mostowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2016.
- [8] Zou G, Xu X, Li J, Yu H, Wang C, Sun J. The Effects of Bituminous Binder on the Performance of Gussasphalt Concrete for Bridge Deck Pavement. *Materials*. 2020; <https://doi.org/10.3390/ma13020364>.
- [9] Mieczkowski P. Mastyks grysowy SMA jako warstwa izolacyjna pod nawierzchnie bitumiczne na obiektach inżynierskich/Splittmastix as an insulation for roads pavements on the engineering objects. VI Międzynarodowa Konferencja „Trwałe i bezpieczne nawierzchnie drogowe”. Kielce. 9-10 maja 2000, s. 151-156.
- [10] Budziński B, Mieczkowski P, Sarnowski M. Doświadczenia w Zastosowaniu Technologii SMA-MA.; Kraków, 2016.
- [11] Mahan HM. Behavior of permanent deformation in asphalt concrete pavements under temperature variation. Article 1, Volume 6, Issue 1, Winter 2013, p. 62-73.
- [12] Ksaibati K, Miller T, Farrar M. Laboratory Evaluation of Rutting in Asphalt Pavements. U. S. Report of University Transportation Centre Program, Department of Transportation, Washington, DC 1996.

- [13] Walubita F, Fuentes L, Lee S, Dawd I, Enad M. Comparative evaluation of five HMA rutting-related laboratory test methods relative to field performance data: DM, FN, RLPD, SPST, and HWTT, *Construction and Building Materials*, Volume 215, 2019, Pages 737-753, ISSN 0950-0618.
- [14] Tran N, Timm D, Robbins M, Powell B. Mix Design, Laboratory Performance Evaluation and Structural Pavement Analysis and Design. NCAT Report 10-05, Auburn 2010.
- [15] Alkuime H, Kassem E. Comprehensive evaluation of wheel-tracking rutting performance assessment tests. *Int. J. Pavement Res. Technol.* 2020; <https://doi.org/10.1007/s42947-020-0265-z>.
- [16] Ling J, Wei F, Chen H, Hongduo Z. Accelerated Pavement Testing for Rutting Evaluation of Hot-Mix Asphalt Overlay under High Tire Pressure. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements/Volume 146 Issue 2 – June 2020*.
- [17] Graziotin M, Peres W, Jorge A. Comparison of Low-Volume Road Pavement Performance with Results of Accelerated Pavement Testing. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*. 2473.10.3141/2473-05.
- [18] Zhang J, Alvarez A, Lee S, Torres A, Walubita L. Comparison of flow number, dynamic modulus, and repeated load tests for evaluation of HMA permanent deformation. *Construction and Building Materials*. 2013; 44, p. 391–398.
- [19] Mejłun Ł, Jaskuła P. Odporność na deformacje trwałe betonu asfaltowego przeznaczonego do warstwy ścierniczej z różnymi asfaltami na podstawie badania Flow Number *Drogownictwo*. 2019 nr 7-8, p. 196-202
- [20] Pokorski P, Radziszewski P, Sarnowski M. Odporność na deformacje trwałe asfaltowych nawierzchni mostowych, *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury, JCEEA*, 2016, vol. 33, nr 63/1/2, p. 429-436.
- [21] Radziszewski P, Sarnowski M, Pokorski P. Assessment of resistance to permanent deformations of asphalt mixes of low air void content, *Open Engineering*. 2021, vol. 11, nr 1, p. 1244-1251.
- [22] Judycki J, Dołżycki B. Behaviour of asphalt concrete in cyclic and static compression creep test with and without lateral confinement. *Road Materials and Pavements design*. Volume 9 – No 2/2008, p. 207 – 225
- [23] PN-EN 12697-25 Mieszanki mineralno-asfaltowe – Metody badań mieszanek mineralno-asfaltowych na gorąco – Część 25: Badanie cyklicznego, jednoosiowego ściskania.