



MAREK PSZCZOŁA¹⁾
DAWID RYS²⁾
PIOTR JASKUŁA³⁾

ANALYSIS OF CLIMATIC ZONES IN POLAND WITH REGARD TO ASPHALT PERFORMANCE GRADING

ANALIZA STREF KLIMATYCZNYCH W POLSCE Z UWZGLĘDNIENIEM KLASYFIKACJI FUNKCJONALNEJ ASFALTÓW PERFORMANCE GRADE

STRESZCZENIE. Pod koniec ubiegłego wieku w ramach amerykańskiego programu SHRP opracowano i wdrożono nowy system klasyfikacji asfaltów. Jego ideą była potrzeba lepszego dostosowania metod badań oraz wymagań dla asfaltów drogowych do rzeczywistych warunków, w jakich pracują te asfalty w nawierzchniach drogowych. Obecnie w Polsce, podobnie jak i w pozostałych krajach Unii Europejskiej, asfalty drogowe badane i klasyfikowane są głównie ze względu na wynik oznaczenia penetracji w temperaturze 25°C. Warto zaznaczyć, że ta klasyfikacja nie jest uzależniana od warunków klimatycznych, w jakich potem mają pracować asfalty w nawierzchni drogowej. W artykule przedstawiono wyniki analiz dotyczących wyznaczania zakresu temperatury pracy lepischer asfaltowych w polskich warunkach klimatycznych. Podano propozycję podziału terytorium Polski na strefy klimatyczne w zależności od wyznaczonych wartości wymaganego rodzaju funkcjonalnego Performance Grade asfaltów na podstawie danych klimatycznych z 61 stacji meteorologicznych oraz z okresu czasu minimum 20 lat. Zaproponowano dobór asfaltu w zależności od strefy klimatycznej w Polsce oraz z uwzględnieniem odpowiedniego poziomu prawdopodobieństwa, wynikającego z klasy drogi.

SŁOWA KLUCZOWE: metoda Superpave, rodzaj asfaltu, rodzaj funkcjonalny PG, strefy klimatyczne PG.

ABSTRACT. Towards the end of the last century a new system of bitumen grading was developed and implemented as part of the American Strategic Highway Research Program (SHRP). Its aim was to better adjust the testing methods and requirements for road bitumens to the actual conditions in which those bitumens serve in road pavements. Currently in Poland, similarly as in the other EU countries, road bitumens are tested and classified with regard to mainly the penetration value determined at the temperature of 25°C. It should be noted that this classification is not correlated with the climatic conditions in which the bitumens are to serve in the road pavement. This paper presents the results of analyses concerning the determination of the temperatures at which bituminous binders serve in the Polish climatic conditions. A division of the area of Poland into climatic zones depending on the required performance grades (PGs) determined for bitumens on the basis of climatic data from 61 meteorological stations for a period of minimum 20 years is presented. It is proposed to select bitumens depending on the climatic zone in Poland, taking into account the proper probability level which follows from the road class.

KEYWORDS: grade of bitumen, performance grade (PG), PG climatic zones, Superpave method.

DOI: 10.7409/rabdim.017.016

¹⁾ Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk; marek.pszczola@pg.edu.pl (✉)

²⁾ Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk; dawid.rys@pg.edu.pl

³⁾ Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk; piotr.jaskula@pg.edu.pl

1. WPROWADZENIE

W Polsce, podobnie jak i w pozostałych krajach Unii Europejskiej, asfalty drogowe badane i klasyfikowane są ze względu na wynik oznaczenia penetracji w 25°C, niezależnie od warunków klimatycznych. Zgodnie z obowiązującą normą PN-EN 12591:2010 oprócz badania penetracji asfalty drogowe klasyfikuje się również na podstawie badań temperatury mięknięcia, temperatury łamliwości Fraassa, temperatury zapłonu oraz badania rozpuszczalności. W przypadku asfaltów modyfikowanych elastomerem SBS zgodnie z normą PN-EN 14023:2011/Ap1:2014-04, poza badaniami wymienionymi powyżej, jest to również badanie nawrotu sprężystego w 25°C oraz badanie stabilności składowania. W latach 90-tych XX w. w Stanach Zjednoczonych Ameryki opracowano nowy system klasyfikacji asfaltów, którego podstawę stanowią badania funkcjonalne lepiszczy asfaltowych. Obecnie system ten wprowadzono już w większości stanów USA [1-14], a także w Kanadzie [15]. Prace badawcze były prowadzone również w innych krajach na świecie np. w Pakistanie [16], Sri Lance [17], Egipcie [18], Omanie [19] oraz Tajlandii [20].

Nowy system klasyfikacji asfaltów nazwany został Performance Grade” (PG), co można tłumaczyć, jako „rodzaj funkcjonalny”. Ideą wprowadzenia nowego systemu klasyfikowania asfaltów PG było lepsze dostosowanie typów badań i wymagań do rzeczywistych warunków, w jakich pracują lepiszcza bitumiczne w nawierzchniach drogowych. Klasyfikacja asfaltów według PG jest wynikiem obszernego programu badawczego SHRP (ang. *Strategic Highway Research Program*), zatwierdzonego przez Kongres USA w roku 1987 [21], którego celem była poprawa jakości i trwałości dróg. Jednym z podstawowych zadań programu SHRP było opracowanie nowych specyfikacji asfaltowych, w większym stopniu wiążących ze sobą badania laboratoryjne oraz rzeczywistą pracę asfaltu w nawierzchni. W wyniku prowadzonych analiz powstała metoda Superpave (ang. *Superior Performing Asphalt Pavements*). W metodzie Superpave opracowano metodykę badań laboratoryjnych lepiszczy asfaltowych, m.in. DSR test (ang. *Dynamic Shear Rheometer Test*), DTT test (ang. *Direct Tension Test*), a także BBR test (ang. *Bending Beam Rheometer Test*). Opracowane metody badań laboratoryjnych wynikały z konieczności określenia właściwości użytkowych asfaltów w zależności od temperatury pracy nawierzchni [22]. Opracowanie specyfikacji asfaltowych polegało na wyznaczeniu temperatur, w których w danej strefie klimatycznej pracuje asfalt oraz w których asfalt ten musi spełnić określone wymagania funkcjonalne.

Artykuł zawiera analizę wyznaczenia temperatur pracy lepiszczy asfaltowych w warstwach asfaltowych nawierzchni

1. INTRODUCTION

In Poland, similarly as in the other EU countries, bitumens intended for road purposes are tested and classified with regard to their penetration value at 25°C, irrespective of the climatic conditions. According to current standard PN-EN 12591:2010, road bitumens are classified not only depending on the penetration test result, but also on the basis of the results of: the Ring and Ball Softening Point test, the Fraass Breaking Point test, the Flash Point test and the Solubility test. In the case of bitumens modified with the SBS elastomer in accordance with standard PN-EN 14023:2011/Ap1:2014-04, besides the tests mentioned above also elastic recovery at 25°C and storage stability are tested. In the 1990s in the USA a new system of classifying bitumens, based on asphalt binder performance tests, was developed. By now the system has been introduced in most of the US states [1-14] and also in Canada [15]. Relevant research has also been conducted in other countries in the world, e.g. in Pakistan [16], Sri Lanka [17], Egypt [18], Oman [19] and Thailand [20].

The new system of classifying bitumens is called the Performance Grading (PG) system. The idea behind the new system of grading the performance of bitumens was to better adjust the types of tests and the requirements to the actual conditions in which bituminous binders serve in road pavements. The performance grading of bitumens is the result of the Strategic Highway Research Program (SHRP), approved by the US Congress in 1987 [21], aimed at improving the quality and durability of roads. One of the principal tasks of SHRP was to develop new bitumen specifications which would more closely correlate laboratory tests with the actual performance of bitumen in the asphalt pavement. The research resulted in the Superpave (Superior Performing Asphalt Pavements) mix design method. As part of this method a methodology for testing asphalt binders, comprising such tests as the Dynamic Shear Rheometer (DSR) Test, the Direct Tension Test (DTT) and the Bending Beam Rheometer (BBR) Test was developed. The laboratory test methods were needed in order to determine the performance of bitumens depending on the pavement service temperature [22]. The bitumen specifications were developed by determining the asphalt pavement service temperatures in the particular climatic zones, under which the bitumen must meet the specific performance requirements.

The paper discusses the determination of the service temperatures of asphalt binders in the bituminous layers of road pavements in Poland in accordance with the original SHRP methodology. An analysis of the air and pavement

w Polsce według oryginalnej metody opracowanej w ramach programu SHRP. W artykule przedstawiono analizę temperatur powietrza i nawierzchni w Polsce oraz wyznaczono mapy ze strefami temperaturowymi według PG dla poszczególnych warstw asfaltowych konstrukcji nawierzchni.

Artykuł powstał na podstawie prac prowadzonych w Katedrze Inżynierii Drogowej i Transportowej Politechniki Gdańskiej w ramach programu badawczego Rozwój Innowacji Drogowych (RID-1B) pt. „Asfalty drogowe i modyfikowane w polskich warunkach klimatycznych” [23]. Program badawczy RID-1B realizowany jest w latach 2016-2018 na zlecenie Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR) oraz Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad (GDDKiA) przez trzy instytucje: Politechnikę Warszawską (instytucja kierująca), Instytut Badawczy Dróg i Mostów oraz Politechnikę Gdańską. Celem całego programu badawczego jest kompleksowa ocena właściwości lepiszczy asfaltowych, produkowanych w Polsce, w szerokim zakresie temperatur eksploatacyjnych i technologicznych, a także weryfikacja wymagań i metod oceny lepiszczy asfaltowych stosowanych do budowy nawierzchni drogowych. Jako efekt końcowy prowadzonych badań i analiz planowane jest opracowanie wytycznych doboru właściwości asfaltu odpowiadających polskiemu warunkom klimatycznym oraz wielkości obciążenia ruchem, gdzie system klasyfikacji asfaltów według PG może być narzędziem wspomagającym.

2. RODZAJ FUNKCJONALNY PG ASFALTÓW

W artykule zastosowano tę część metody Superpave, która dotyczy określenia minimalnej i maksymalnej temperatury nawierzchni w celu klasyfikacji asfaltów w specyfikacji asfaltowej. Minimalne i maksymalne wartości temperatury nawierzchni są podstawą do przypisania rodzaju funkcjonalnego asfaltu **PG X-Y**, gdzie:

- wartość **X** odpowiada maksymalnej temperaturze pracy asfaltu w nawierzchni asfaltowej i obliczana jest, jako maksymalna średnia z najwyższych dobowych temperatur warstwy nawierzchni występujących przez kolejne, następujące po sobie 7 dni w roku,
- wartość **Y** jest najniższą temperaturą występującą w danej warstwie asfaltowej.

Minimalny okres analizy wymagany do wyznaczenia temperatur nawierzchni **X** i **Y** wynosi 20 lat. Wartości rodzaju funkcjonalnego PG podawane są z krokiem co 6°C. Klasyfikację asfaltów PG według amerykańskiej normy AASHTO M 320-10 [24] przedstawiono w Tabl. 1.

temperatures in Poland is carried out and maps of temperature zones according to PG for the particular bituminous layers of the pavement structure are plotted.

The paper is the result of research conducted in the Department of Highway and Transportation Engineering at Gdańsk University of Technology as part of the Road Innovations Development (RID-IB) research programme entitled “Paving-grade and modified bitumens in Polish climate conditions” [23]. Research programme RID-IB (2016-2018) established by the National Centre of Research and Development and the General Directorate for National Roads and Motorways has been conducted by three institutions: Warsaw University of Technology (the steering institution), the Road and Bridge Research Institute and Gdańsk University of Technology. The aim of the whole research programme is to comprehensively evaluate the properties of the bituminous binders produced in Poland, in a wide range of service and technological temperatures and to verify the requirements and methods of evaluating the bituminous binders used for road pavements. Ultimately, the research and the analyses are to result in drawing up guidelines for selecting bitumen properties appropriate for the climatic conditions and traffic loads in Poland, in which the PG system for bitumens can be a supporting tool.

2. PERFORMANCE GRADE OF BITUMENS

In this paper the part of Superpave method dealing with determining the minimum and maximum pavement temperature for the purpose of bitumen grading as part of the specification is used. The minimum and maximum pavement temperatures are the basis for establish of bitumen performance grade **PG X-Y**, where:

- **X** corresponds to the maximum asphalt pavement service temperature and is calculated as the highest averaged daily maximum pavement temperatures occurring for 7 consecutive days in a year,
- **Y** is the lowest pavement temperature.

The minimum period to be analysed in order to determine pavement temperatures **X** and **Y** is 20 years. Asphalt performance is graded at every 6°C. The asphalt performance grading according to American standard AASHTO M 320-10 [24] is shown in Table 1.

For example, PG 58-16 means that the asphalt binder placed in a given bituminous pavement layer will perform properly in a temperature range from minimum -16°C to maximum +58°C at the specified level of probability. For the service temperature range defined as above the binder

Przykładowo, rodzaj funkcjonalny asfaltu PG 58-16 oznacza, że lepiszcze asfaltowe wbudowane w daną warstwę asfaltową nawierzchni pracować będzie poprawnie w przedziale temperatury od minimalnie -16°C do maksymalnie $+58^{\circ}\text{C}$ przy określonym poziomie prawdopodobieństwa. Dla tak zdefiniowanego zakresu temperatury pracy lepiszcze musi spełnić odpowiednie wymagania, które wynikają z testów laboratoryjnych (DSR i BBR) opracowanych w ramach programu SHRP. Przykładowo w przypadku górnej temperatury PG równej $+58^{\circ}\text{C}$ wymagane jest uzyskanie minimalnej wartości parametru $G^*/\sin\delta$, definiowanego jako iloraz modułu zespolonego oraz kąta przesunięcia fazowego i uzyskanego w badaniu w reometrze dynamicznego ścinania DSR w temperaturze badania $+58^{\circ}\text{C}$. W przypadku minimalnej temperatury, lepiszcze badane w teście reometru zginanej belki BBR musi uzyskać wymagane minimalne wartości parametrów: modułu sztywności S i współczynnika m w temperaturze badania o 10°C wyższej od minimalnej temperatury nawierzchni. Dla przykładu, jeżeli dolna wartość temperatury PG wynosi -16°C , to temperatura testu BBR, w której asfalt musi spełnić wymagania wynosi -6°C (o 10°C wyższa).

W Polsce pierwsze prace dotyczące możliwości zastosowania klasyfikacji asfaltów według metody Superpave oraz analizy rodzaju funkcjonalnego PG prowadzone były przez zespół Prof. Sybilskiego z Instytutu Badawczego Dróg i Mostów już pod koniec lat 90-tych XX w. [25-27]. Wynikiem tych prac było opracowanie stref klimatycznych stosowania danego rodzaju funkcjonalnego PG asfaltów na terytorium Polski. W analizie uwzględniono położenie warstw w konstrukcji nawierzchni i w zależności od tego dokonano zróżnicowanego doboru lepiszcza. Ponadto, przedstawiono próbę powiązania wartości rodzaju funkcjonalnego PG z takimi właściwościami asfaltu, jak temperatura mięknięcia i temperatura łamliwości. Analiza została przeprowadzona z wykorzystaniem danych pomiarowych z 59 stacji meteorologicznych w Polsce z okresu 5 lat (od 1994 do 1998). Na podstawie przeprowadzonych analiz opracowano cztery mapy, przedstawiające strefy klimatyczne w Polsce z następującymi wartościami PG asfaltów dla czterech lokalizacji w warstwach konstrukcji nawierzchni (głębokość h liczona od powierzchni warstwy ścieralnej) i dla przyjętego poziomu prawdopodobieństwa 98%:

- cienka warstwa ścieralna, $h = 0$ mm, PG 64-22, PG 64-28 i PG 64-34,
- warstwa ścieralna, $h = 20$ mm, PG 58-28 i PG 58-34,
- warstwa wiążąca, $h = 90$ mm, PG 52-22 i PG 52-28,
- warstwa podbudowy, $h = 200$ mm, PG 46-22, PG 46-28, PG 52-22 i PG 52-28.

must meet the relevant requirements obtained from the laboratory (DSR and BBR) tests developed as part of SHRP. For example, as regards the maximum PG temperature of $+58^{\circ}\text{C}$, the minimum value of parameter $G^*/\sin\delta$, defined as a ratio of the complex shear modulus to the phase angle, measured by the dynamic shear rheometer (DSR) at the test temperature of $+58^{\circ}\text{C}$, must be obtained. In the case of the minimum temperature, the binder tested in the bending beam rheometer (BBR) must score the minimum values of stiffness modulus S and m -value at the test temperature by 10°C higher than the minimum pavement temperature. For example, if the lower PG temperature is -16°C , the BBR test temperature at which the bitumen must meet the requirements amounts to -6°C (is by 10°C higher).

Table 1. PG-based classification of bitumens in accordance with AASHTO M 320-10 [24]

Tablica 1. Klasyfikacja asfaltów na podstawie rodzaju funkcjonalnego PG wg AASHTO M 320-10 [24]

Performance grade (PG) / Rodzaj funkcjonalny PG	
PG - X maximum bitumen service temperature maksymalna temperatura pracy asfaltu [$^{\circ}\text{C}$]	PG - Y minimum bitumen service temperature minimalna temperatura pracy asfaltu [$^{\circ}\text{C}$]
< 46	> -34; > -40; > -46;
< 52	> -10; > -16; > -22; > -28; > -34; > -40; > -46
< 58	> -16; > -22; > -28; > -34; > -40
< 64	> -10; > -16; > -22; > -28; > -34; > -40
< 70	> -10; > -16; > -22; > -28; > -34; > -40
< 76	> -10; > -16; > -22; > -28; > -34
< 82	> -10; > -16; > -22; > -28; > -34

In Poland the first research into the possibility of bitumen grading according to the Superpave method and the PG analysis was undertaken by Prof. Sybilski and his team from the Road and Bridge Research Institute already in the late 1990s [25-27]. As a result of this research climatic zones for the use of particular PG bitumens within Poland were established. The binder was selected depending on the location of the bituminous layer in the pavement structure. Moreover, an attempt was made to correlate PG values with such properties of bitumen as its softening point and Fraass breaking point. Measurement data from 59 Polish meteorological stations for a period of five years (1994-1998) were used in the analyses. The research resulted in four maps showing the climatic zones in Poland with PG values for the four locations in the pavement structure courses (h stands for depth from the surface of the wearing course) at the assumed probability of 98%:

- the thin wearing course, $h = 0$ mm, PG 64-22, PG 64-28 and PG 64-34,

Istotnym ograniczeniem przeprowadzonych w tamtym czasie analiz rodzaju funkcjonalnego PG asfaltów był zbyt krótki okres czasu, z którego analizowane były dane temperaturowe. Wynikał on prawdopodobnie z niepełnego dostępu do źródłowych danych meteorologicznych. Oryginalna metoda Superpave [21] zakłada, że ze względów statystycznych długość okresu czasu, wymagana do analiz temperatury powietrza nie powinna być krótsza niż 20 lat. Metoda klasyfikacji asfaltów wg rodzaju funkcjonalnego PG opisywana była również w innych publikacjach [28-30].

3. METODYKA WYZNACZENIA MAKSYMALNYCH I MINIMALNYCH WARTOŚCI TEMPERATURY DO KLASYFIKACJI PG

Zgodnie z oryginalną metodą Superpave do określenia wymaganych wartości PG na terytorium Stanów Zjednoczonych i Kanady wykorzystano dane z 6096 stacji meteorologicznych, dla których pierwotnie okres pomiaru temperatury wynosił od 20 lat do nawet 89 lat. Ze względów praktycznych i statystycznych do wyznaczania rodzaju funkcjonalnego PG ograniczono zakres analizowanych danych do maksymalnie 30 ostatnich lat. W metodzie analizy PG uwzględniono prawdopodobieństwo wystąpienia minimalnych i maksymalnych temperatur powietrza. Początkowo przyjmowano tylko 2 poziomy prawdopodobieństwa: 50% i 98%. W trakcie dalszych prac i weryfikacji metody dopuszczono stosowanie również innych poziomów prawdopodobieństwa, np. 85% oraz 95%. Prawdopodobieństwo 50% oznacza, że dana minimalna bądź maksymalna temperatura powietrza może wystąpić co drugi rok. Prawdopodobieństwo 98% oznacza, że minimalna bądź maksymalna temperatura powietrza może wystąpić raz na 50 lat. Przeliczenie temperatury powietrza na temperaturę nawierzchni oparto o teoretyczny model przepływu ciepła i zachowania energii cieplnej w nawierzchni. Wyznaczano osobno zależności dla temperatury minimalnej i maksymalnej. Model ten został zweryfikowany z pomiarami terenowymi temperatury powietrza i nawierzchni, które potwierdziły dużą zbieżność modelu teoretycznego z pomiarami w terenie, jednak badania oparto na stosunkowo niewielkiej liczbie punktów pomiarowych [31, 32]. W pierwotnej wersji metody obliczania temperatur PG nie rozróżniano poszczególnych warstw asfaltowych nawierzchni i ustalano PG dla całej nawierzchni. Temperaturę minimalną obliczano na poziomie powierzchni nawierzchni, natomiast temperaturę maksymalną przyjmowano na głębokości 20 mm poniżej powierzchni nawierzchni.

W programie badawczym LTPP-SMP (ang. *Long Term Pavement Performance - Seasonal Monitoring Program*) [33, 34]

- the wearing course, $h = 20$ mm, PG 58-28 and PG 58-34,
- the binder course, $h = 90$ mm, PG 52-22 i PG 52-28,
- the base course, $h = 200$ mm, PG 46-22, PG 46-28, PG 52-22 i PG 52-28.

A significant limitation of those analyses of bitumen PGs was too short period of measurements from which the analysed temperature data came, which was probably due to the limited access to the source meteorological data. According to the original Superpave method [21], the period of time required for the analysis of air temperatures should not be shorter than 20 years. The PG method of classifying bitumens was described also in other publications [28-30].

3. METHODOLOGY FOR DETERMINING MAXIMUM AND MINIMUM PG TEMPERATURES

In accordance with the original Superpave method, data from 6096 meteorological stations, for which the temperature measurement period was originally from 20 to as many as 89 years long, were used to determine the required PG values within the United States and Canada. For practical and statistical reasons, the range of the analysed data was limited to maximum the last 30 years. The PG analysis method took into account the probability of occurrence of minimum and maximum air temperatures. Initially only two probability levels: 50% and 98% were adopted. Later, as the method was being refined and verified, other levels of probability, e.g. 85% and 95%, were allowed. The probability of 50% means that a given maximum or minimum air temperature may occur every second year. The probability of 98% means that the maximum or minimum air temperature may occur once every fifty years. The conversion of air temperature into pavement temperature was based on a theoretical model of the heat flow and thermal energy conservation in the pavement. Relations for respectively the minimum temperature and the maximum temperature were derived separately. The model was verified through field measurements of air and pavement temperatures and was found to be in good agreement with the field measurement results, but the verification was based on a relatively small number of measuring points [31, 32]. In the initial version of the method of calculating PG temperatures no individual bituminous layers in the pavement were distinguished and a PG would be determined for the whole pavement. The minimum temperature would be calculated for the pavement surface and the maximum temperature for the depth of 20 mm below the pavement surface.

z lat 1995-1996 dokonano weryfikacji i modyfikacji oryginalnej metody Superpave w zakresie określania minimalnych i maksymalnych wartości temperatury PG [21]. Przeprowadzono również kalibrację modeli do przeliczania temperatury powietrza na temperaturę nawierzchni. Kalibracji dokonano wykorzystując dane temperaturowe powietrza i nawierzchni zebrane z 30 stacji w USA i Kanadzie, obejmujące lata pomiaru 1993-1995. Nowe modele obliczeniowe dały również możliwość oszacowania temperatury PG na dowolnej głębokości warstwy asfaltowej w nawierzchni i przy dowolnym poziomie prawdopodobieństwa. Metodyka wypracowana w ramach programu badawczego LTPP-SMP jest stosowana w USA do dnia dzisiejszego [35]. Rodzaj funkcjonalny asfaltów w USA oraz w Kanadzie określa się w praktyce na podstawie programu komputerowego LTPPBind [36], w którym wskazuje się lokalizację projektowanego odcinka drogi, poziom prawdopodobieństwa oraz głębokość w nawierzchni, na której znajduje się dana warstwa, dla której określa się PG.

Ostatecznie metodyka przyjęta do wyznaczania rodzaju funkcjonalnego PG asfaltów, na podstawie danych klimatycznych w Polsce według oryginalnej metody Superpave [21] i jej późniejszej modyfikacji LTPP-SMP [33, 34], obejmowała:

1. Przyjęcie okresu analizy danych 30 lat (lata od 1986 do 2015) i pozyskanie dla tego okresu danych temperaturowych ze stacji meteorologicznych zlokalizowanych na terytorium Polski. Okres dostępnych danych nie mógł być krótszy niż 20 lat.
2. Analizę jakościową uzyskanych danych temperatury powietrza z poszczególnych stacji meteorologicznych i wykluczenie stacji meteorologicznych, dla których dane te okazały się niekompletne lub też sama lokalizacja stacji jest nieprzydatna (np. stacje zlokalizowane na szczytach górskich).
3. Wyznaczenie minimalnych wartości temperatury powietrza (najniższych zarejestrowanych) w ciągu każdego analizowanego roku.
4. Wyznaczenie maksymalnych wartości średniej 7-dniowej z najwyższych dobowych wartości temperatury powietrza występujących przez 7 kolejnych, następujących po sobie dni w ciągu każdego analizowanego roku.
5. Przyjęcie różnych poziomów prawdopodobieństwa: 50%, 80%, 85%, 90%, 95%, 98%.
6. Wyznaczenie występowania maksymalnych wartości średnich i odchyłeń standardowych dla maksymalnych rocznych 7-dniowych najwyższych wartości temperatury powietrza oraz minimalnych rocznych wartości temperatury powietrza w całym okresie analizy danych (min. 20 lat).

As part of the Long Term Pavement Performance - Seasonal Monitoring Program (LTPP-SMP) [33, 34] for the years 1995-1996 the original Superpave method was verified and modified as regards the determination of minimum and maximum PG temperatures [21]. Also the models for converting air temperature into pavement temperature were calibrated. The calibration was based on air and pavement temperature data collected from 30 stations in the USA and Canada, covering the measurement period 1993-1995. New computational models made it possible to estimate PG temperatures at any bitumen layer depth in the pavement and at any level of probability. The methodology developed as part of LTPP-SMP is used in the USA to this day [35]. In practice the Performance Grades of bitumens in the USA and Canada are determined using the LTPPBind computer program [36], in which one indicates the location of the considered road section, the level of probability and the depth at which the course for which the PG is to be determined is situated in the pavement.

In Poland the methodology ultimately adopted for determining the PG of bitumens on the basis of climatic data in accordance with the original Superpave method [21] and its later modified version LTPP-SMP [33, 34], covered:

1. The adoption of a data analysis period of 30 years (1986-2015) and the acquisition of temperature data for this period from meteorological stations located within Poland's borders. The available data measurement period could not be shorter than 20 years.
2. The qualitative analysis of the air temperature data obtained from the particular meteorological stations for which the data were found to be incomplete or whose location was useless for the purpose (e.g. meteorological stations located on mountain peaks).
3. The determination of the (lowest recorded) minimum air temperatures for a considered year.
4. The determination of the maximum values of the 7-day average of the highest daily air temperatures occurring for 7 consecutive days in the course of each analysed year.
5. The adoption of different levels of probability: 50%, 80%, 85%, 90%, 95% and 98%.
6. The determination of the occurrence of the maximum averages and standard deviations for the maximum annual 7-day highest air temperatures and the minimum annual air temperatures in the whole data analysis period (minimum 20 years).
7. Checking whether the air temperature distributions are normal distributions.

7. Sprawdzenie czy rozkłady wartości temperatury powietrza są rozkładami normalnymi.
8. Określenie głębokości analizy dla danej warstwy asfaltowej w konstrukcji nawierzchni. Do określania temperatury minimalnej przyjmowano głębokość, na której występuje górna powierzchnia danej warstwy asfaltowej, natomiast do obliczenia temperatury maksymalnej przyjmowano głębokość 20 mm poniżej górnej powierzchni danej warstwy asfaltowej.
9. Wyznaczenie wartości rodzaju funkcjonalnego PG X-Y maksymalnych (X) i minimalnych (Y) wartości temperatury w danej warstwie w nawierzchni przy wykorzystaniu zależności obliczeniowych (1) i (2).
10. Na podstawie uzyskanych wartości maksymalnych (X) i minimalnych (Y) zaklasyfikowanie asfaltów w przedziałach co 6°C, zgodnie z wymaganiami normy AASHTO M 320-05 [21].
11. W przypadku zwiększonego obciążenia ruchem możliwe podniesienie maksymalnej (X) wartości temperatury PG.

Maksymalna średnia 7-dniowa najwyższa temperatura nawierzchni

Do obliczenia górnej (maksymalnej) temperatury PG w danej warstwie asfaltowej zastosowano następującą zależność [34, 35]:

$$T_{\max}^d = 54,32 + 0,78 \cdot T_{\text{air}} - 0,0025 \cdot \phi^2 + -15,14 \cdot \log_{10}(d + 25) + z(9 + 0,61 \cdot \sigma_{\text{air}}^2)^{0,5}, \quad (1)$$

gdzie:

- T_{\max}^d – maksymalna temperatura w nawierzchni na głębokości d , górna wartość PG [°C],
- T_{air} – średnia obliczona z maksymalnych średnich 7-dniowych najwyższych wartości temperatury powietrza wyznaczonych w poszczególnych latach [°C],
- ϕ – szerokość geograficzna stacji meteorologicznej [°],
- d – głębokość obliczeniowa temperatury warstwy, zgodnie z Rys. 1 [mm],
- σ_{air} – odchylenie standardowe obliczone z maksymalnych średnich 7-dniowych najwyższych wartości temperatury powietrza wyznaczonych w poszczególnych latach [°C],
- z – wielkość statystyczna, wynikająca z rozkładu normalnego wartości temperatury, np. $z = 0$ dla $P = 50\%$, $z = 0,84$ dla $P = 80\%$ oraz $z = 2,05$ dla $P = 98\%$.

8. Specifying at what depth in the pavement structure the bituminous layer is to be analysed. The depth at which the top surface of a given bituminous layer is situated was adopted for determining the minimum pavement temperature, whereas the depth of 20 mm below the top surface of the given bituminous layer was used to calculate the maximum pavement temperature.
9. The calculation of the PG X-Y values for the maximum (X) and minimum pavement temperatures (Y) in a given pavement course from relations (1) and (2).
10. The grading of bitumens at 6°C intervals in accordance with the AASHTO M 320-05 standard [21] on the basis of the calculated maximum (X) and minimum (Y) values.
11. In the case of increased traffic loading, the maximum value (X) of the PG temperature can be increased.

Maximum 7-day averaged daily the highest pavement temperature

The following relation was used to calculate the upper (maximum) PG temperature in a given bituminous layer [34, 35]:

$$T_{\max}^d = 54.32 + 0.78 \cdot T_{\text{air}} - 0.0025 \cdot \phi^2 + -15.14 \cdot \log_{10}(d + 25) + z(9 + 0.61 \cdot \sigma_{\text{air}}^2)^{0.5}, \quad (1)$$

where:

- T_{\max}^d – the maximum pavement temperature at depth d in the pavement, the upper PG value [°C],
- T_{air} – the mean value calculated from the maximum 7-day averaged daily the highest air temperatures for the particular years [°C],
- ϕ – the latitude of the meteorological station [°],
- d – the design depth of the layer temperature, according to Fig. 1 [mm],
- σ_{air} – the standard deviation calculated from the maximum 7-day averaged daily the highest air temperatures for the particular years [°C],
- z – a statistical quantity resulting from the normal distribution of the temperature values, e.g. $z = 0$ for $P = 50\%$, $z = 0,84$ for $P = 80\%$ and $z = 2,05$ for $P = 98\%$.

Minimum pavement temperature

The following relation was used to calculate the lower (minimum) PG temperature in a given bituminous layer [34, 35]:

Minimalna temperatura nawierzchni

Do obliczenia dolnej (minimalnej) temperatury PG w danej warstwie asfaltowej zastosowano następującą zależność [34, 35]:

$$T_{\min}^d = -1,56 + 0,72 \cdot T_{\text{air}} - 0,004 \cdot \phi^2 + 6,26 \cdot \log_{10}(d + 25) - z(4,4 + 0,52 \cdot \sigma_{\text{air}}^2)^{0,5}, \quad (2)$$

gdzie:

T_{\min}^d – minimalna temperatura w nawierzchni na głębokości d , górna wartość PG [°C],

T_{air} – średnia obliczona z minimalnych wartości rocznych temperatury powietrza [°C],

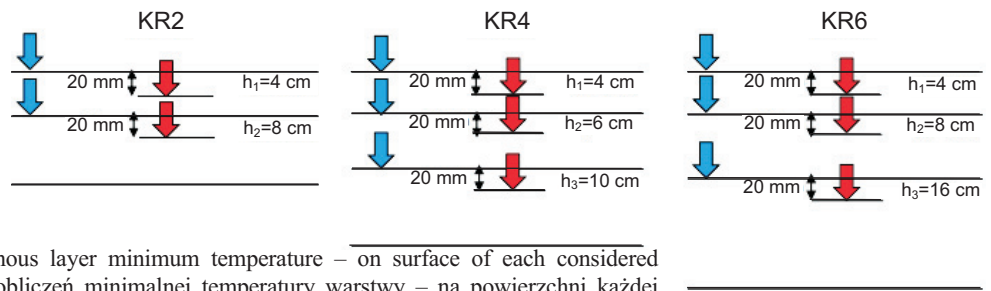
ϕ – szerokość geograficzna stacji meteorologicznej [°],


d – głębokość obliczeniowa temperatury warstwy, zgodnie z Rys. 1 [mm],

σ_{air} – odchylenie standardowe obliczone z minimalnych rocznych wartości temperatury powietrza w poszczególnych latach [°C],

z – wielkość statystyczna, wynikająca z rozkładu normalnego temperatury, wartości analogicznie jak dla temperatury maksymalnej.

Głębokość obliczeniową temperatury warstwy d należy dobierać zgodnie ze schematem pokazanym na Rys. 1.



 location for calculations of bituminous layer minimum temperature – on surface of each considered bituminous layer / lokalizacja dla obliczeń minimalnej temperatury warstwy – na powierzchni każdej analizowanej warstwy asfaltowej


 location for calculations of maximum 7-day averaged the highest temperature of bituminous layer – 20 mm below surface of each considered bituminous layer / lokalizacja dla obliczeń maksymalnej średniej 7-dniowej najwyższej temperatury warstwy – na głębokości 20 mm poniżej powierzchni każdej analizowanej warstwy

Fig. 1. Assumption of depth d for calculation of PG temperature for particular pavement courses depending on traffic class

Rys. 1. Sposób przyjmowania głębokości d do obliczania temperatury PG dla poszczególnych warstw nawierzchni w zależności od kategorii ruchu

Do analizy rozkładu temperatury na grubości warstw asfaltowych przyjęto typowe konstrukcje nawierzchni zgodnie z Katalogiem Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych [37] – typ A1 (z podbudową zasadniczą z mieszanki niezwiązanej z kruszywem $C_{90/3}$). W przypadku ruchu lekkiego, jako reprezentatywną, przyjęto typową konstrukcję nawierzchni dla kategorii ruchu KR2 (analizowane PG dla warstw asfaltowych: ścieralnej i wiążącej), dla ruchu średniego – KR4 (analizowane PG dla warstw asfaltowych:

$$T_{\min}^d = -1,56 + 0,72 \cdot T_{\text{air}} - 0,004 \cdot \phi^2 + 6,26 \cdot \log_{10}(d + 25) - z(4,4 + 0,52 \cdot \sigma_{\text{air}}^2)^{0,5}, \quad (2)$$

where:

T_{\min}^d – the minimum pavement temperature at depth d [°C],

T_{air} – the mean calculated from the minimum annual air temperatures [°C],

ϕ – the latitude of the meteorological station [°],

d – the design depth of the layer temperature, according to Fig. 1 [mm],

σ_{air} – the standard deviation calculated from the minimum annual air temperatures in the particular years [°C],

z – a statistical quantity resulting from the normal distribution, the values the same as for the maximum temperature calculations.

Design layer temperature depth d should be selected in accordance with the chart shown in Fig. 1.

Typical pavement structures, according to the Catalogue of Typical Flexible and Semi-Rigid Pavement Structures [37], i.e. type A1 (with the base course made of unbound aggregate mixture with aggregate type $C_{90/3}$) were used in the analysis of the temperature distribution along the depth of the bituminous layers. For light traffic the pavement structure typical of traffic class KR2 was adopted (PG analysed for the asphalt courses: the wearing course and the binder course). KR4 was adopted for medium traffic

ścieralnej, wiążącej i podbudowy) oraz dla ruchu ciężkiego – KR6 (analizowane PG dla warstw asfaltowych: ścieralnej, wiążącej i podbudowy).

4. ANALIZA ROZKŁADU TEMPERATURY POWIETRZA W POLSCE

4.1. DANE POMIAROWE WYKORZYSTANE DO ANALIZY

Dane temperaturowe wymagane do obliczenia rodzaju funkcjonalnego PG asfaltów uzyskano z Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej (IMGW). Dane te obejmowały wszystkie dostępne stacje meteorologiczne zlokalizowane na terytorium Polski oraz okres pomiaru danych klimatycznych od 1 stycznia 1986 roku do 31 grudnia 2015 roku. Pierwotnie dane dotyczące temperatury powietrza pochodziły z ponad 70 stacji meteorologicznych i zostały przekazane przez IMGW w ponad 140 plikach tekstowych. Na podstawie weryfikacji danych pierwotnych wykluczono z dalszych prac te stacje meteorologiczne, które posiadały zbyt duże braki danych w analizowanym okresie od 1986 do 2015 r. lub dla których okres pomiarowy był krótszy od wymaganych minimum 20 lat. Wykluczono również te stacje meteorologiczne, które są zlokalizowane na szczytach górskich (np. szczyt Kasprowego Wierchu). Ostatecznie do dalszych analiz przyjęto 61 stacji meteorologicznych zlokalizowanych równomiernie na terytorium Polski, których lokalizację przedstawiono na Rys. 2. Dodatkowo, dane temperaturowe zastosowane zostały również do analiz temperatury podczas zimy, które zawarto w publikacji [38].



(PG analysed for the asphalt courses: the wearing course, the binder course and the base course) and KR6 for heavy traffic (PG analysed for the asphalt courses: the wearing course, the binder course and the base course).

4. ANALYSIS OF AIR TEMPERATURES IN POLAND

4.1. MEASUREMENT DATA USED FOR ANALYSIS

The temperature data required to calculate the PGs of bitumens were obtained from the Institute of Meteorology and Water Management (IMGW). The data covered all the accessible meteorological stations located within Poland's borders and the climatic data measurement period from 1 January 1986 to 31 December 2015. Originally, the air temperature data came from over 70 meteorological stations and were received from IMGW in the form of over 140 text files. As a result of original data verification the meteorological stations in whose data there were too large gaps in the analysed period of 1986-2015 or in the case of which the measurement period was shorter than the required minimum 20 years were excluded from further investigations. The meteorological stations located on the mountain peaks were also excluded (e.g. peak of mountain Kasprowy Wierch). Ultimately, 61 meteorological stations uniformly located within Poland were selected for further analyses. The locations of the stations are shown in Fig. 2. Moreover, the temperature data were also used to analyse pavement temperatures in winter conditions [38].

At each of the meteorological stations, air temperatures were measured at the elevation of 2 m above the ground level. The measurement would be recorded at every hour or at every 3 hours. A database was created from the received and verified data. The database contained altogether 12 million measurement records. Using the database the minimum and maximum air temperatures in the consecutive years from 1986 to 2015 were determined.

Fig. 2. Location of meteorological stations adopted for PG analyses, marked on the map by • round bullet symbols
Rys. 2. Lokalizacja stacji meteorologicznych przyjętych do analiz rodzaju funkcjonalnego PG, wskazanych na mapie zaznaczeniem w postaci • okrągłych punktatorów

Temperatura powietrza mierzona była na każdej stacji meteorologicznej na wysokości 2 m od powierzchni terenu. Pomiar był zapisywany z częstością co 1 lub co 3 godziny. Z otrzymanych i zweryfikowanych danych stworzono bazę danych zawierającą łącznie ponad 12 mln rekordów pomiarowych. Z bazy tej wyznaczono minimalne i maksymalne wartości temperatury powietrza w kolejnych latach od 1986 do 2015 r.

4.2. MINIMALNA TEMPERATURA POWIETRZA

Minimalna wartość temperatury powietrza wyznaczana była jako najniższa zarejestrowana temperatura powietrza w każdym analizowanym roku. Przykład dla stacji w Białymstoku w 1987 r. pokazano na Rys. 3. Analogicznie wskazano minimalne wartości temperatury powietrza pomierzone dla wszystkich 61 stacji meteorologicznych w latach 1986-2015.

Przykład występowania minimalnych rocznych wartości temperatury powietrza w kolejnych latach dla stacji w Białymstoku przedstawiono na Rys. 4. Do równania (1) przyjmuje się średnią z minimalnych wartości temperatury powietrza z okresu 30 lat, w przypadku stacji w Białymstoku jest to wartość $T_{air} = -22,2^{\circ}\text{C}$. Odchylenie standardowe z analizowanych wartości w okresie 30 lat wyniosło w rozpatrywanym przypadku $\sigma_{air} = 4,8^{\circ}\text{C}$. Na Rys. 5 przedstawiono mapę z wynikami obliczeń średniej z minimalnych wartości temperatury powietrza dla poszczególnych stacji meteorologicznych w Polsce. Przedział temperatury minimalnej wynosi od -11°C w pasie nadmorskim do -22°C na Podlasiu i Lubelszczyźnie.

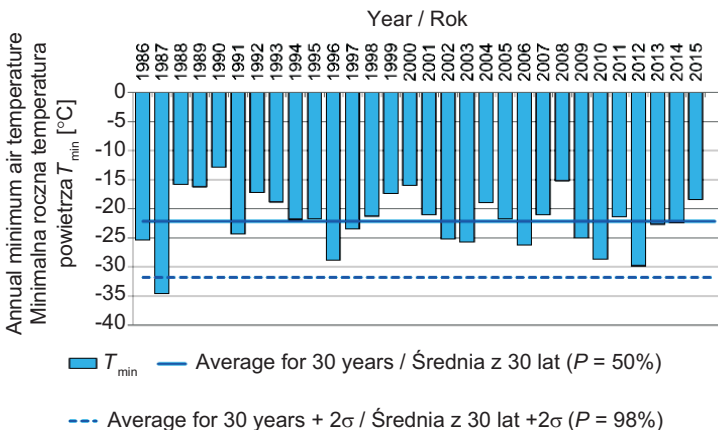


Fig. 4. Exemplary bar chart showing annual minimum air temperatures in years 1986-2015, meteorological station in Białymstok
Rys. 4. Przykładowe zestawienie rocznych minimalnych wartości temperatury powietrza w latach 1986 - 2015, stacja meteorologiczna w Białymstoku

4.2. MINIMUM AIR TEMPERATURES

The minimum air temperature value was determined as the lowest recorded air temperature in each of the analysed year. An example for the meteorological station in Białymstok in 1987 is shown in Fig. 3. The minimum air temperatures for all the 61 stations for all the years in the 1986-2015 period were similarly indicated.

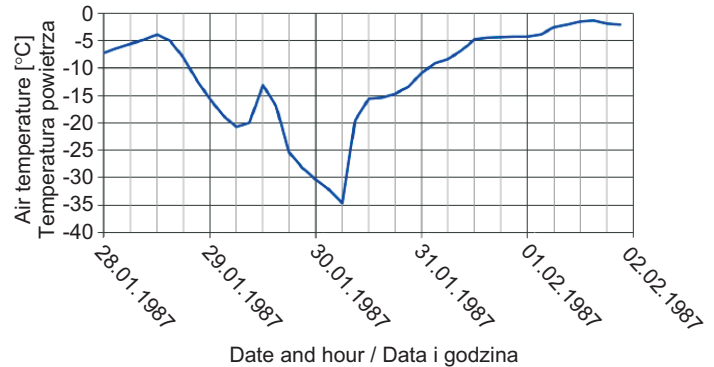


Fig. 3. Example of how annual minimum air temperature is determined - year 1987, Białymstok, $T_{min,1987} = -34,6^{\circ}\text{C}$, 30.01.1987 hr. 5:00 am

Rys. 3. Przykład sposobu wyznaczenia rocznej minimalnej temperatury powietrza - rok 1987, Białymstok, $T_{min,1987} = -34,6^{\circ}\text{C}$, 30.01.1987 r. godz. 5:00

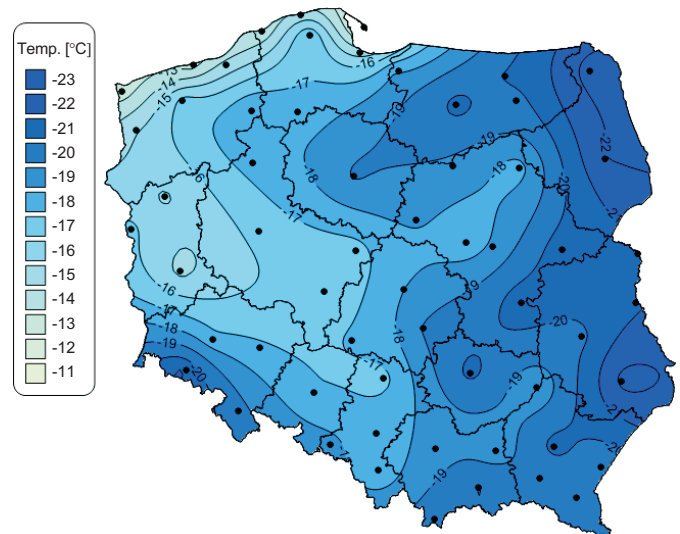


Fig. 5. Climatic zones in Poland determined on basis of averages of annual minimum air temperatures

Rys. 5. Strefy klimatyczne w Polsce wyznaczone na podstawie średnich z minimalnych rocznych wartości temperatury powietrza

An example of the occurrence of the minimum annual air temperatures in the consecutive years for the meteorological station in Białymstok is shown in Fig. 4. An average of

4.3. MAKSYMALNA TEMPERATURA POWIETRZA

Maksymalne wartości temperatury powietrza wyznaczano, jako średnią ruchomą z obliczanej najwyższej temperatury powietrza w ciągu następujących po sobie 7 kolejnych dni. Schemat sposobu wyznaczania średniej maksymalnej temperatury powietrza przedstawiono na Rys. 6. Na schemacie posłużono się danymi ze stacji w Białymstoku obejmującymi najcieplejszy okres w roku 1987. Na Rys. 6 punktami oznaczono maksymalne dobowe wartości temperatury powietrza, przy czym zaciemnionymi punktami oznaczono te wartości dobowej maksymalnej temperatury, które dały maksymalną średnią z 7-dniowych najwyższych wartości temperatury powietrza.

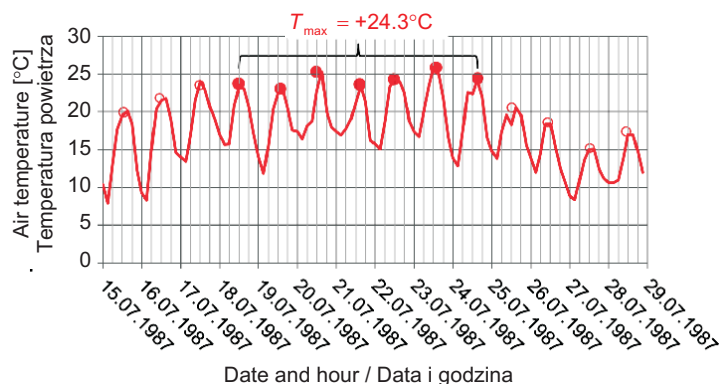


Fig. 6. Example of how annual maximum 7-day average of the highest air temperatures is determined - Białystok, period from 18 to 24 July 1987

Rys. 6. Przykład sposobu wyznaczania rocznej maksymalnej średniej 7-dniowej z najwyższych wartości temperatury powietrza - Białystok, okres od 18 do 24 lipca 1987 r.

Maksymalne wartości temperatury (maksymalne średnie 7-dniowe z najwyższych wartości temperatury powietrza) analogicznie do minimalnych wartości temperatury wyznaczano w każdym roku osobno. Przykładowe ich zestawienie dla roku 1987 w stacji Białystok pokazano na Rys. 7. Średnia temperatura maksymalna w latach 1986-2015 wyniosła $T_{air} = +28^{\circ}\text{C}$, a odchylenie standardowe z okresu 30 lat wyniosło $\sigma_{air} = 2,2^{\circ}\text{C}$. Przy poziomie prawdopodobieństwa 50% maksymalna temperatura powietrza przyjmowana do obliczenia PG-X wynosi $+28^{\circ}\text{C}$, natomiast przy poziomie prawdopodobieństwa 98% temperatura powietrza wynosi $+32,4^{\circ}\text{C}$.

Mapę z wynikami obliczeń maksymalnych wartości temperatury powietrza dla poszczególnych stacji meteorologicznych w Polsce przedstawiono na Rys. 8. Przedział maksymalnych wartości temperatury wynosi od $+24^{\circ}\text{C}$ w pasie

the minimum air temperatures for the period of 30 years is substituted into equation (1). For the Białystok station this average is $T_{air} = -22.2^{\circ}\text{C}$. In the considered case, the standard deviation of the values analysed in the period of 30 years amounted to $\sigma_{air} = 4.8^{\circ}\text{C}$. Fig. 5 shows a map of the averages calculated from the minimum air temperatures for the particular meteorological stations in Poland. The minimum temperatures range from -11°C in the coastal belt to -22°C in the Podlasie region and in the Lublin region.

4.3. MAXIMUM AIR TEMPERATURES

The maximum air temperatures were determined as a moving average of the calculated highest air temperatures during 7 consecutive days. A diagram illustrating the way in which the average maximum air temperatures are calculated is shown in Fig. 6. The Białystok station data for the warmest period in 1987 were used in the diagram. In Fig. 6 circles mark the maximum daily air temperatures, with shaded circles marking the maximum daily temperature values which yielded the maximum average of the 7-day highest air temperatures.

Similarly as in the case of the minimum temperatures, the maximum temperatures (the maximum 7-day averages of the highest air temperatures) were determined separately for each of the years. An exemplary comparison of Białystok station the maximum temperatures for 1987 is shown in Fig. 7. The average maximum temperature in the years 1986-2015 was $T_{air} = +28^{\circ}\text{C}$ and the standard deviation for the 30-year period amounted to $\sigma_{air} = 2.2^{\circ}\text{C}$. At the probability level of 50% the maximum air temperature used to calculate PG-X is $+28^{\circ}\text{C}$, whereas at the probability level of 98% it amounts to $+32.4^{\circ}\text{C}$.

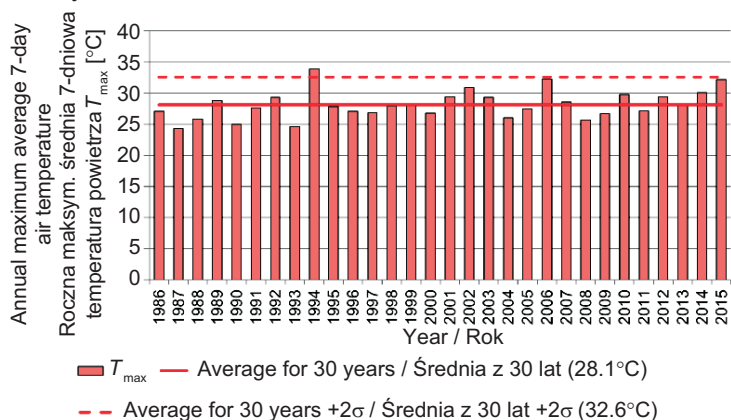


Fig. 7. Exemplary bar chart showing annual maximum 7-day air temperature averages, meteorological station in Białystok
Rys. 7. Przykładowe zestawienie rocznych maksymalnych 7-dniowych średnich wartości temperatury powietrza, stacja meteorologiczna w Białymstoku

nadmorskim do +30°C na znacznym obszarze części centralnej i południowej Polski.

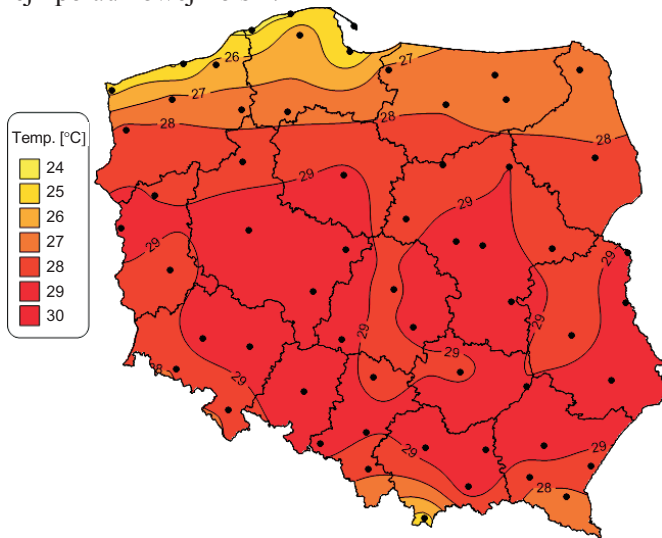


Fig. 8. Climatic zones in Poland determined on basis of maximum 7-day averages of the highest air temperatures

Rys. 8. Strefy klimatyczne w Polsce wyznaczone na podstawie maksymalnych wartości średnich 7-dniowych obliczonych z najwyższych wartości temperatury powietrza

4.4. DOBÓR POZIOMU PRAWDOPODOBIEŃSTWA

W metodzie Superpave [21] założono, że roczne minimalne wartości temperatury powietrza i maksymalne wartości średnie 7-dniowe z najwyższych wartości temperatury powietrza zebrane z okresu lat 1986-2015 zmieniają się w sposób zgodny z rozkładem normalnym. Autorzy artykułu przeprowadzili ocenę statystyczną, która potwierdziła to założenie dla analizowanych danych temperaturowych z polskich stacji meteorologicznych. Ważną kwestią do rozwiązania był również dobór poziomu prawdopodobieństwa P dla danych klas technicznych dróg w Polsce. Według metody Superpave odpowiedni poziom prawdopodobieństwa oznacza ryzyko wystąpienia temperatury, która może przekroczyć wartość projektowaną (minimalną lub średnią 7-dniową maksymalną).

Dobór właściwego poziomu prawdopodobieństwa dla danej klasy technicznej drogi powinien uwzględniać aspekt ryzyka wystąpienia temperatur bardziej niekorzystnych i wynikających z tego konsekwencji dla stanu nawierzchni, ale również aspekt ekonomiczny i możliwości technologiczne produkcji asfaltów spełniających wymagania dla danych wartości PG. Przyjęcie większego poziomu prawdopodobieństwa powoduje konieczność produkcji droższych asfaltów (np. asfaltów modyfikowanych), ale jednocześnie będzie skutkowało mniejszym prawdopodobieństwem powstania

A map of the maximum air temperatures calculated for the particular meteorological stations in Poland is shown in Fig. 8. The maximum temperatures range from +24°C in the coastal belt to +30°C over a considerable area of the central and southern part of Poland.

4.4. SELECTION OF PROBABILITY LEVEL

According to the Superpave method [21], the annual minimum air temperatures and the maximum of the 7-day averaged the highest air temperatures collected from the period of 1986-2015 change consistently with the normal distribution. The authors of the paper carried out a statistical evaluation which confirmed the above assumption for the analysed temperature data coming from the Polish meteorological stations. Another important matter to be settled was the selection of probability level P for the particular technical classes of roads in Poland. According to the Superpave method, a certain level of probability means a risk that a temperature exceeding the design temperature (the minimum temperature or the maximum average 7-day temperature) will occur.

In order to select a probability level proper for a given technical road class one should take into account not only the risk that more adverse temperatures, and so adverse consequences for pavement condition, may occur, but also the economic aspect and the capability to produce bitumens meeting the requirements specific for the given PG values. The adoption of a higher probability level necessitates the production of more expensive bitumens (e.g. modified bitumens), but low-temperature cracking and rutting are less likely to occur. At Gdańsk University of Technology the PG of asphalt was analysed for different probability levels: 50%, 80%, 85%, 90%, 95% and 98%. The effect of the adopted probability level on, among other things, the current availability of bitumens on the Polish market was examined. Also a survey of literature on the use of different probability levels and different PGs depending on the asphalt pavement course in the USA having a similar climate as the one in Poland was carried out. For example, in Michigan [5] different PG values can be used depending on the location of the considered course in the pavement, as shown in Table 2.

Initially, the following probability levels for determining bitumen PGs were proposed for Poland:

- $P = 98\%$ for motorways and expressways,
- $P = 80\%$ for the other roads with traffic class KR3-KR7,
- $P = 50\%$ for the other roads with traffic class KR1-KR2.

spekań niskotemperaturowych i kolein. Podczas prac prowadzonych na Politechnice Gdańskiej analizowano rodzaj funkcjonalny PG asfaltów dla różnych poziomów prawdopodobieństwa: 50%, 80%, 85%, 90%, 95%, 98%. Ocenie poddano m.in. wpływ przyjętego poziomu prawdopodobieństwa na obecną dostępność asfaltów na polskim rynku. Wykonano również studia literatury w zakresie stosowania różnych poziomów prawdopodobieństwa oraz różnych wartości PG w zależności od warstwy nawierzchni asfaltowej dla stanów w USA o zbliżonym klimacie do Polski. Przykładowo, w takich stanach jak Michigan [5] dopuszcza się zróżnicowanie wartości PG w zależności od lokalizacji warstwy w nawierzchni. Przykład ten przedstawiono w Tabl. 2.

Wstępnie zaproponowano, aby przyjąć dla Polski następujące poziomy prawdopodobieństwa do wyznaczenia rodzaju funkcjonalnego asfaltów:

- $P = 98\%$ dla autostrad i dróg ekspresowych,
- $P = 80\%$ dla pozostałych dróg o kategorii ruchu KR3-KR7,
- $P = 50\%$ dla pozostałych dróg o kategorii ruchu KR1-KR2.

5. WYZNACZENIE STREF KLIMATYCZNYCH MINIMALNYCH I MAKSYMALNYCH WARTOŚCI TEMPERATURY NAWIERZCHNI NA TERYTORIUM POLSKI

Na podstawie przeprowadzonych prac wyznaczono strefy klimatyczne w Polsce, dla których określono rodzaje funkcjonalne PG asfaltów. Strefy wyznaczono osobno dla poszczególnych klas dróg i odpowiadających im poziomów prawdopodobieństwa, oraz osobno dla poszczególnych warstw asfaltowych: ścieralnej, wiążącej i podbudowy. Strefy klimatyczne doboru rodzaju funkcjonalnego PG dla autostrad i dróg ekspresowych przedstawiono na Rys. 9-11. Dla pozostałych dróg, o kategorii ruchu KR3-KR7 strefy pokazano na Rys. 12-14, natomiast dla dróg o kategorii ruchu KR1-KR2 na Rys. 15-16.

W Tabl. 3-5 zestawiono wartości rodzaju funkcjonalnego PG asfaltów dla wszystkich warstw nawierzchni uzyskane odpowiednio dla: autostrad i dróg ekspresowych ($P = 98\%$), pozostałych dróg o średnim i dużym obciążeniu ruchem KR3-KR7 ($P = 80\%$) oraz pozostałych dróg o małym obciążeniu ruchem KR1-KR2 ($P = 50\%$). W zestawieniu zamieszczono razem wyniki otrzymane dla wszystkich stref klimatycznych i wszystkich warstw nawierzchni. Wartości zaznaczone w ramce oznaczają wymagane wartości PG asfaltów, które mają być zastosowane do warstwy ścieralnej.

Table 2. Illustration of how PG changes depending on probability level and bituminous layer location in pavement [5]

Tablica 2. Przykład zróżnicowania PG w zależności od poziomu prawdopodobieństwa oraz lokalizacji warstwy w nawierzchni [5]

Depth in pavement Głębokość w nawierzchni [cm]	Adopted level of probability Przyjęty poziom prawdopodobieństwa P [%]					
	50	60	70	80	90	98
0	PG	PG			PG	PG
2.5	64-22	64-22	PG		70-22	70-22
5.0	PG		64-22	PG		
7.5	64-16	PG	PG	64-22	PG	PG
10.0		64-16	64-16		64-22	64-22
12.5					PG	
15.0	PG	PG	PG	PG	58-22	
17.5	58-16	58-16	58-16	58-16	PG	PG
20.0					58-16	58-22

5. DETERMINATION OF CLIMATIC ZONES OF MINIMUM AND MAXIMUM PAVEMENT TEMPERATURES WITHIN POLAND'S BORDERS

As a result of the research climatic zones in Poland were determined and assigned bitumen PGs. The zones were determined separately for the particular road classes and the corresponding probability levels and separately for the particular asphalt courses: the wearing course, the binder course and the base course. The climatic zones for the selection of PGs for motorways and expressways are presented in Figs. 9-11. The zones for the other roads with traffic class KR3-KR7 are shown in Figs. 12-14, while the ones for the traffic class KR1-KR2 roads are shown in Figs. 15-16.

Tables 3-5 show PG values for all the pavement courses in respectively: motorways and expressways ($P = 98\%$), the other roads with medium and heavy traffic loading KR3-KR7 ($P = 80\%$) and the other roads with light traffic loading KR1-KR2 ($P = 50\%$). Altogether the tables show the results for all the climatic zones and all the pavement courses. The boxed values are the required PG values to be applied to the wearing course. Tables 3-5 can be used to determine the demand for the paving-grade bitumens satisfying the Superpave classification requirements in Poland.

Zestawienie przedstawione w Tabl. 3-5 może posłużyć do określenia zapotrzebowania na produkcję asfaltów drogowych, które będą spełniać wymagania klasyfikacji Superpave w Polsce.

Table 3. Bitumen PG values for motorways and expressways, $P = 98\%$

Tablica 3. Wartości rodzaju funkcjonalnego PG asfaltów dla autostrad i dróg ekspresowych, $P = 98\%$

		High temperature / Wysoka temperatura PG-X			
		46	52	58	64
Low temperature Niska temperatura	-10				
	-16	PG 46-16			
	-22	PG 46-22	PG 52-22	PG 58-22	
	-28	PG 46-28	PG 52-28	PG 58-28	
	-34		PG 52-34	PG 58-34	
	-40				

Note / Uwaga:
the range of PGs for the wearing course has been boxed in the tables 3-5
w tablicach 3-5 w ramce zaznaczono zakres PG do warstwy ścieralnej

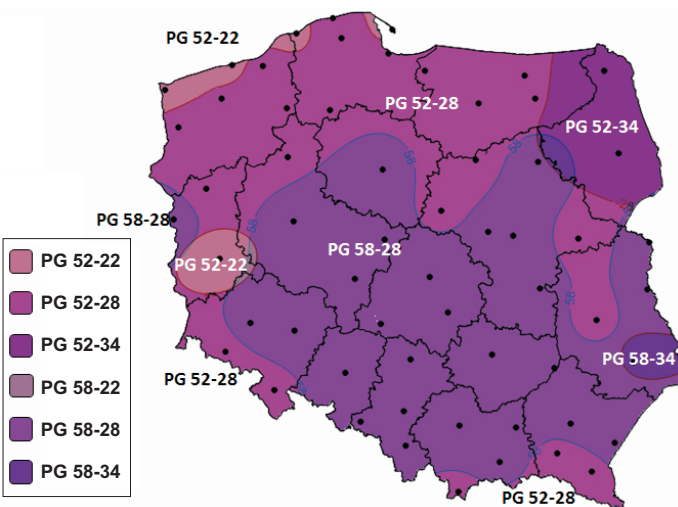


Fig. 9. Climatic zones for selecting PG of bitumens for motorways and expressways, wearing course ($P = 98\%$)

Rys. 9. Strefy klimatyczne doboru rodzaju funkcjonalnego PG asfaltów dla autostrad i dróg ekspresowych, warstwa ścieralnej ($P = 98\%$)

Table 4. Bitumen PG values for other roads with KR3-KR7, $P = 80\%$

Tablica 4. Wartości rodzaju funkcjonalnego PG asfaltów dla pozostałych dróg KR3-KR7, $P = 80\%$

		High temperature / Wysoka temperatura PG-X			
		46	52	58	64
Low temperature Niska temperatura	-10				
	-16	PG 46-16			
	-22	PG 46-22	PG 52-22		
	-28		PG 52-28		
	-34				
	-40				

Table 5. Bitumen PG values for other roads with KR1-KR2, $P = 50\%$

Tablica 5. Wartości rodzaju funkcjonalnego PG asfaltów dla pozostałych dróg KR1-KR2, $P = 50\%$

		High temperature / Wysoka temperatura PG-X			
		46	52	58	64
Low temperature Niska temperatura	-10	PG 46-10			
	-16	PG 46-16	PG 52-16		
	-22	PG 46-22	PG 52-22		
	-28				
	-34				
	-40				

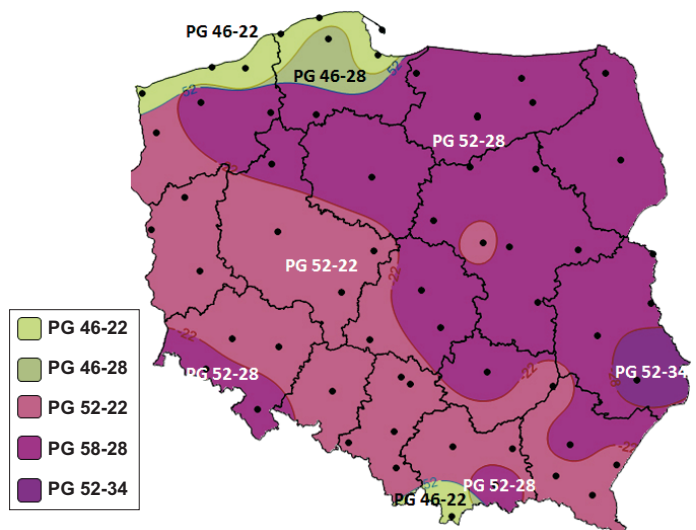


Fig. 10. Climatic zones for selecting PGs of bitumens for motorways and expressways, binder course ($P = 98\%$)

Rys. 10. Strefy klimatyczne doboru rodzaju funkcjonalnego PG asfaltów dla autostrad i dróg ekspresowych, warstwa wiążąca ($P = 98\%$)

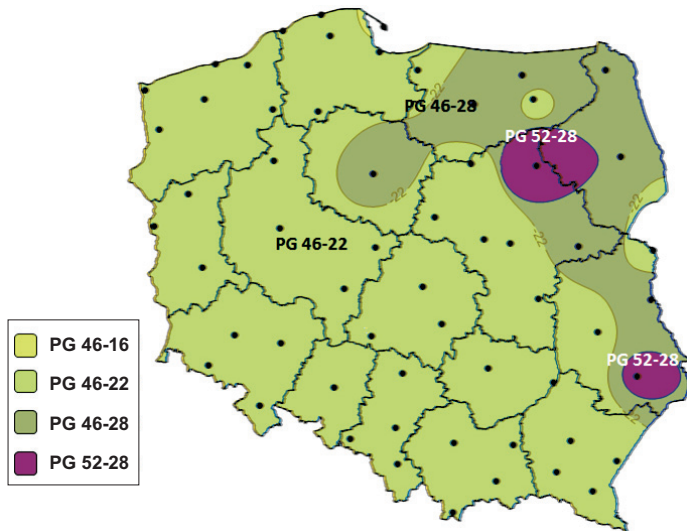


Fig. 11. Climatic zones for selecting PGs of bitumens for motorways and expressways, base course ($P = 98\%$)
 Rys. 11. Strefy klimatyczne doboru rodzaju funkcjonalnego PG asfaltów dla autostrad i dróg ekspresowych, warstwa podbudowy ($P = 98\%$)

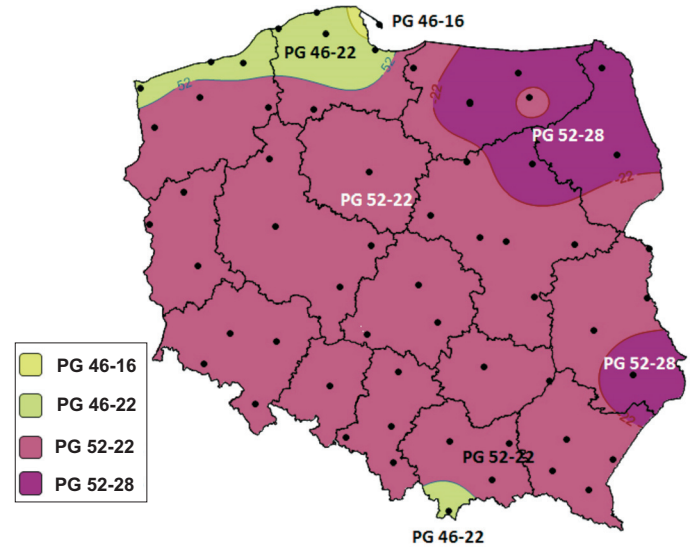


Fig. 12. Climatic zones for selecting PGs of bitumens for other roads with traffic class KR3-KR7, wearing coarse ($P = 80\%$)
 Rys. 12. Strefy klimatyczne doboru rodzaju funkcjonalnego PG asfaltów dla pozostałych dróg o kategorii ruchu KR3-KR7, warstwa ścieralna ($P = 80\%$)

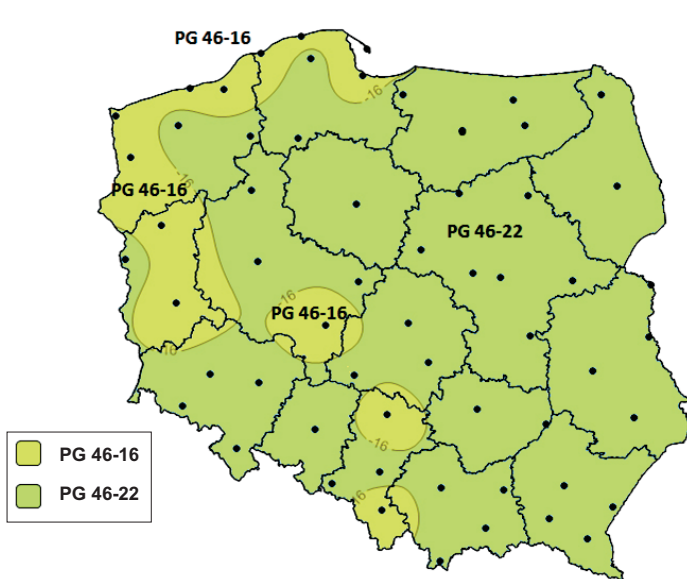


Fig. 13. Climatic zones for selecting PGs of bitumens for other roads with traffic class KR3-KR7, binder coarse ($P = 80\%$)
 Rys. 13. Strefy klimatyczne doboru rodzaju funkcjonalnego PG asfaltów dla pozostałych dróg o kategorii ruchu KR3-KR7, warstwa wiążąca ($P = 80\%$)

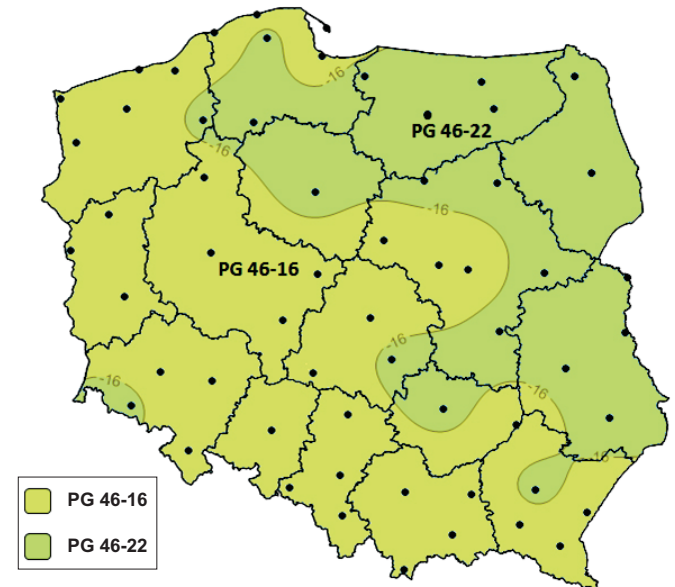


Fig. 14. Climatic zones for selecting PGs of bitumens for other roads with traffic class KR3-KR7, base course ($P = 80\%$)
 Rys. 14. Strefy klimatyczne doboru rodzaju funkcjonalnego PG asfaltów dla pozostałych dróg o kategorii ruchu KR3-KR7, warstwa podbudowy ($P = 80\%$)

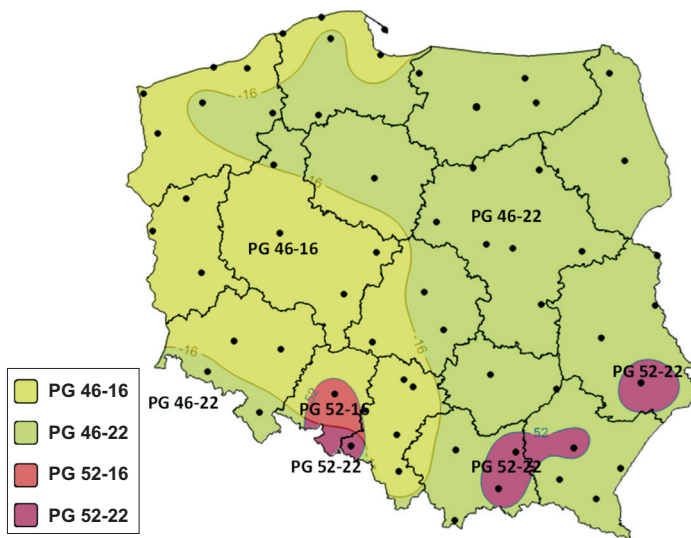


Fig. 15. Climatic zones for selecting PGs of bitumens for other roads with traffic class KR1-KR2, wearing coarse ($P = 50\%$)
Rys. 15. Strefy klimatyczne doboru rodzaju funkcjonalnego PG asfaltów dla pozostałych dróg o kategorii ruchu KR1-KR2, warstwa ścieralna ($P = 50\%$)

6. PODNIESIENIE GÓRNEJ WARTOŚCI TEMPERATURY PG-X ZE WZGLĘDU NA OBCIĄŻENIE RUCHEM DROGOWYM

W metodzie Superpave [21] zwiększone obciążenie ruchem drogowym jest uwzględniane poprzez podniesienie górnej temperatury PG-X, co wynika z wpływu, jaki ma ta temperatura na zwiększenie ryzyka powstania deformacji trwałych warstw asfaltowych. W zależności od przewidywanego ruchu projektowego oraz średniej prędkości pojazdów górna wartość temperatury PG-X jest podnoszona o 1 lub 2 poziomy, czyli odpowiednio o 6°C lub 12°C . Możliwość podniesienia wartości PG-X zależy od decyzji Zarządcy Drogi. W roku 2012 w ramach kontynuacji prac nad klasyfikacją asfaltów w AASHTO MP 19 [39], zaproponowano rozszerzony zapis PG uwzględniający wyniki badań z testu MSCR (ang. *Multiple Stress Creep Recovery*). Zapis ten do tradycyjnego oznaczenia PG X-Y dodaje oznaczenie literowe intensywności ruchu:

- PG X-Y S – oznacza ruch standardowy poniżej 10 mln ESAL oraz standardowe obciążenie ruchem,
- PG X-Y H – oznacza ruch ciężki 10 - 30 mln ESAL lub ruch powolny,
- PG X-Y V – oznacza ruch bardzo ciężki powyżej 30 mln ESAL lub postój pojazdów,
- PG X-Y E – oznacza ruch ekstremalnie ciężki powyżej 30 mln ESAL oraz postój pojazdów.

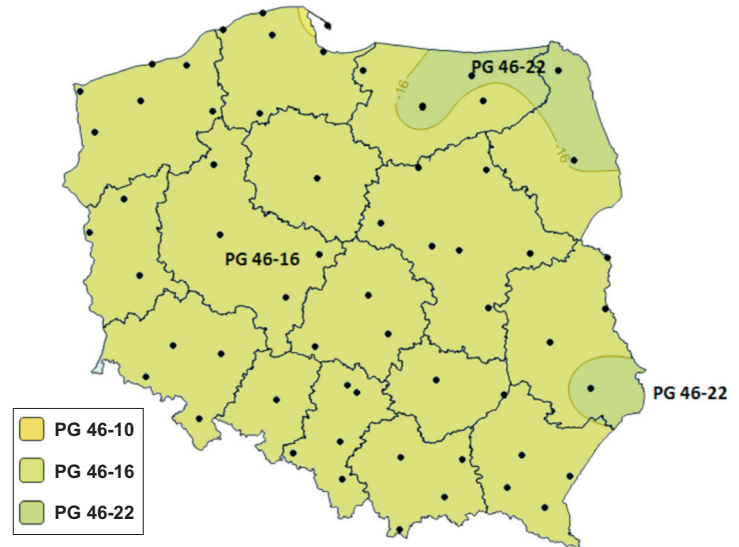


Fig. 16. Climatic zones for selecting PGs of bitumens for other roads with traffic class KR1-KR2, binder course ($P = 50\%$)
Rys. 16. Strefy klimatyczne doboru rodzaju funkcjonalnego PG asfaltów dla pozostałych dróg o kategorii ruchu KR1-KR2, warstwa wiążąca ($P = 50\%$)

6. RAISING OF UPPER TEMPERATURE PG-X BECAUSE OF TRAFFIC LOADING

The Superpave method [21] takes into account increased traffic loading by raising upper temperature PG-X since the latter increases the risk of the permanent deformation of the bituminous layers. Depending on the forecasted design traffic and the average speed of vehicles, the upper value of temperature PG-X is increased by 1 or 2 levels, i.e. by 6°C or 12°C . It is the Road Authority which decides whether the value of PG-X should be increased. In 2012 as part of the continued work on the grading of bitumens an extended notation of PG, incorporating the results of the Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test, was proposed in AASHTO MP 19 [39]. In this notation a letter symbol representing traffic density is added to the PG X-Y designation:

- PG X-Y S – stands for standard traffic below 10 million ESAL and standard traffic loading,
- PG X-Y H – stands for heavy traffic of 10-30 million ESAL or slow traffic,
- PG X-Y V – stands for very heavy traffic above 30 million or traffic standstill,
- PG X-Y E – stands for extremely heavy traffic above 30 million ESAL or traffic standstill.

Przedstawiony powyżej nowy zapis klasyfikacji asfaltów zgodnie z AASHTO MP 19 nie jest jeszcze powszechnie stosowany w USA i podobnie jak aplikacja badania asfaltów MSCR jest obecnie w fazie rozwoju. Dlatego w Tabl. 6 przedstawiono tradycyjny sposób wskazany w metodzie Superpave, zalecany do podniesienia górnego poziomu temperatury PG-X ze względu na obciążenie drogi ruchem drogowym. Tabl. 6 zawiera również sugestie autorów niniejszego artykułu, co do dostosowania oryginalnych wskazań do polskich warunków przez wpisanie odpowiednich kategorii ruchu obowiązujących w Polsce.

The new notation of asphalt grades in accordance with AASHTO MP 19 is not yet commonly used in the USA and the MSCR test application is currently under development. Therefore the well-established Superpave way of raising the upper level of temperature PG-X due to traffic loading is presented in Table 6, which also includes the relevant traffic classes being in force in Poland, whereby the present authors suggest a need to adjust the original recommendations to the Polish conditions.

Table 6. Raising upper PG-X temperature because of traffic loading
Tablica 6. Podniesienie górnej temperatury PG-X ze względu na obciążenia ruchem

Division of design traffic acc. to Superpave million ESAL (in Poland - million 100 kN axles) Podział ruchu projektowego wg Superpave mln ESAL (odniesienie do PL - mln osi 100 kN)	Traffic classes acc. to Polish catalogue Kategorie ruchu wg polskiego katalogu	Raising PG-X value because of: Podniesienie wartości PG-X ze względu na:		
		Normal traffic Normalny ruch pojazdów	Slow traffic Powolny ruch pojazdów	Traffic standstill Postój pojazdów
< 0.3 (<0.12)	KR1 - KR2	-	-	+ 1 level + 1 poziom
0.3 ÷ 30 (0.12 - 12.3)	KR3 - KR4		+ 1 level + 1 poziom	+ 2 levels + 2 poziomy
> 30 (>12.3)	KR5 - KR7	+ 1 level + 1 poziom	+ 1 level + 1 poziom	+ 2 levels + 2 poziomy

Dobór wymaganego rodzaju funkcjonalnego asfaltu PG powinien zatem uwzględniać zarówno wpływ klimatu w danym regionie, jak i obciążenie ruchem na danej drodze. Należy zwrócić uwagę, że dla obciążenia nawierzchni ruchem co najmniej kategorii KR5 zaleca się zawsze podnieść górną temperaturę PG-X o co najmniej jeden poziom, czyli o 6°C. Przykładowo rodzaj funkcjonalny asfaltu do warstwy ścieralnej, drogi ekspresowej o obciążeniu ruchem KR6, która byłaby budowana w okolicach Gdańska odczytamy z Rys. 9, jako PG 52-28. Uwzględniając wymagania przedstawione w Tabl. 6 należałoby podnieść wartość PG 52 o jeden poziom (o 6°C) do poziomu PG 58, co skutkuje rodzajem funkcjonalnym asfaltu dla tej drogi PG 58-28. Jednak należy wyraźnie zaznaczyć, że zgodnie z metodą Superpave podniesienie poziomu PG z 52 do 58 nie jest obligatoryjne i ostatecznie zależałoby od decyzji Zarządcy Drogi.

When selecting the proper bitumen PG one should take into account both the effect of the climate in the given region and the traffic load on the considered road. One should note that for pavement traffic loading of at least class KR5 it is recommended to always raise the upper PG-X temperature by at least one level, i.e. by 6°C. For example, the PG of bitumen for the wearing course of an expressway with traffic loading KR6 to be built near Gdańsk can be read off Fig. 9, as PG 52-28. Considering the requirements presented in Table 6, PG 52 should be increased by one level (by 6°C) to PG 58, resulting in bitumen PG 58-28 for this road. However, it should be emphasized that according to the Superpave method raising the level of PG from 52 to 58 is not obligatory and ultimately depends on the Road Authority's decision.

7. CONCLUSIONS

7. WNIOSKI

1. W artykule przedstawiono metodykę, a także wyniki analiz rodzaju funkcjonalnego PG asfaltów dla Polski z uwzględnieniem metody Superpave opracowanej w ramach amerykańskiego programu SHRP oraz jej modyfikacji w programie badawczym LTPP-SMP. Przedstawione wyniki analiz mogą być przydatnym i skutecznym

1. A bitumen performance grading methodology and the results of PG analyses carried out for bitumens in Poland, taking into account the Superpave method developed as part of the American Strategic Highway Research Program (SHRP) and its modification under the Long Term Pavement Performance - Seasonal Monitoring Program (LTPP-SMP), have been presented. The analytical results can be an effective tool for the performance grading

narzędziem w ocenie funkcjonalnej asfaltów oraz w doborze tych asfaltów do warstw nawierzchni w polskich warunkach klimatycznych.

2. Zaletą opracowanej metodyki było zebranie i przeanalizowanie danych meteorologicznych ze wszystkich dostępnych stacji IMGW w Polsce (z wyłączeniem szczytów górskich), działających nieprzerwanie w okresie od 20 do 30 lat, do roku 2015 włącznie. Pozwoliło to na wyznaczenie minimalnych i maksymalnych średnich 7-dniowych z najwyższych wartości temperatury powietrza dla każdej stacji i każdego analizowanego roku, równomiernie na terytorium Polski. Na podstawie tych danych określono przedziały temperatury pracy nawierzchni asfaltowych z określonym prawdopodobieństwem wynikającym z klasyfikacji dróg.
3. Przeprowadzone badania i analizy uwzględniające rozkład temperatury na głębokości warstw asfaltowych nawierzchni, pozwoliły na obliczenie rodzaju funkcjonalnego PG asfaltów dla poszczególnych warstw: ścieralnej, wiążącej i podbudowy. Podana propozycja podziału terytorium Polski na strefy klimatyczne w zależności od wyznaczonych wartości rodzaju funkcjonalnego asfaltów na podstawie danych klimatycznych może być bardzo przydatna w projektowaniu nawierzchni drogowych w zależności od ich lokalizacji.
4. Zaproponowane w metodzie Superpave oraz zastosowane w analizach uwzględnienie różnych poziomów prawdopodobieństwa pozwala na uwzględnienie ryzyka, które wynika z możliwości wystąpienia ekstremalnych wartości temperatur nawierzchni. Jest to szczególnie istotne z uwagi na odpowiedni dobór rodzaju asfaltu w celu przeciwdziałania powstawaniu trwałych deformacji nawierzchni oraz spękań niskotemperaturowych. Ostatecznie zaproponowano następujące poziomy prawdopodobieństwa do określenia stref klimatycznych doboru rodzaju funkcjonalnego PG w Polsce:
 - $P=98\%$ dla autostrad i dróg ekspresowych,
 - $P=80\%$ dla pozostałych dróg o kategorii ruchu KR3-KR7,
 - $P=50\%$ dla pozostałych dróg o kategorii ruchu KR1-KR2.

Zaproponowane poziomy prawdopodobieństwa mogą zostać przyjęte przez Zarządcę Drogi lub zmienione w zależności od akceptowanego poziomu ryzyka związanego z możliwością wystąpienia deformacji trwałych lub spękań niskotemperaturowych nawierzchni. Przyjęcie wyższego poziomu prawdopodobieństwa oznacza mniejsze ryzyko powstania wspomnianych uszkodzeń nawierzchni, lecz podnosi koszty inwestycji.

of bitumens and the matching of the bitumens to the pavement courses in the Polish climate conditions.

2. The methodology's advantage is that the meteorological data were collected from all the accessible IMGW stations (excluding the ones located on mountain peaks) in Poland, uninterruptedly operating for 20-30 years to 2015 inclusive, and analysed. It allowed to calculate the minimum temperature and maximum 7-day averaged of the highest air temperature for each of the meteorological stations and each of the years for the whole area of Poland. On the basis of these data, the service temperature ranges for asphalt pavements were determined with a certain probability resulting from the classification of roads.
3. As a result of the studies and the analyses, taking into account the distribution of temperature along the depth of the asphalt pavement structure, the performance grades of bitumens for the wearing course, the binder course and the base course layers were determined. The proposed division of the area of Poland into climatic zones according to the bitumen PG values determined on the basis of the climatic data can be useful in the design of road pavements depending on their location.
4. Through the use of the different probability levels proposed by the Superpave method in the analyses, the risk associated with the possible occurrence of extreme pavement temperatures is taken into account. This is particularly important for the selection of a proper kind of bitumen in order to prevent permanent deformations and low-temperature cracking of the pavement. Ultimately, the following levels of probability were proposed for determining the climatic zones for PG selection in Poland:
 - $P=98\%$ for motorways and expressways,
 - $P=80\%$ for the other roads with traffic class KR3-KR7,
 - $P=50\%$ for the other roads with traffic class KR1-KR2.

The proposed probability levels can be accepted by the Road Authority or altered depending on the accepted level of risk associated with the probability of occurrence of permanent deformations or low-temperature cracking. The adoption of a higher probability level means a lower risk of such damage to the pavement, but it increases the investment costs.
5. When selecting an bitumen PG one take into account not only the climate, but also the pavement's traffic loading. But the decision about raising the upper value of temperature PG-X ultimately rests with the Road Authority.

5. Dobór rodzaju funkcjonalnego asfaltów oprócz klimatu może dodatkowo uwzględniać obciążenie nawierzchni ruchem. Jednak decyzja o podniesieniu wartości górnej temperatury PG-X należy ostatecznie do Zarządcy Drogi.

PODZIĘKOWANIE

Analizy i prace przed powstaniem niniejszej publikacji prowadzono przy dużym wsparciu *Ś.P. Prof. dr hab. Józefa Judyckiego* wybitnego specjalisty i naukowca z zakresu reologii asfaltów i nawierzchni drogowych, za co autorzy pragną wyrazić swoją wdzięczność.

INFORMACJE DODATKOWE

Praca naukowa została sfinansowana ze środków budżetowych w ramach programu badawczego Rozwój Innowacji Drogowych (RID-1B) pt. „Asfalty drogowe i modyfikowane w polskich warunkach klimatycznych”, realizowanego w latach 2016-2018 na zlecenie Narodowego Centrum Badań i Rozwoju oraz Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] Asphalt Binder and Mix Specification Update Reference Guide. Iowa Department of Transportation, Asphalt Paving Association of Iowa, 2016
- [2] *Santucci L.*: Performance Graded (PG) Polymer Modified Asphalts in California. Technology Transfer Program, University of California Berkeley, 2006
- [3] Guideline for the Design and Use of Asphalt Pavements for Colorado Roadways, 2nd Edition. Colorado Asphalt Pavement Association, 2006
- [4] Pavement Technology Advisory - Performance Graded Binder Materials for Hot Mix Asphalt - PTA-D4. Design, Construction and Materials, Illinois Department of Transportation, Bureau of Materials and Physical Research, 2005
- [5] Local Agency Programs, Hot Mix Asphalt (HMA) Selection Guidelines. Michigan Asphalt Pavement Association, 2009
- [6] Comprehensive Guide to PG Asphalt Binder Selection in Minnesota. Minnesota Asphalt Pavement Association, 2008
- [7] *Sebaaly P.E., Lake A., Epps J.A., Charmot S., Gopal V.*: Characterization of Nevada's Binders and Low Temperature Properties of Mixtures using SHRP Tests, Part II Characterization of Nevada's Binders using SuperPave Technology. Nevada Department of Transportation, Research Report No RDT99-002, 1999

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to express profound gratitude to late *Prof. Józef Judycki* – an outstanding specialist and researcher in the field of the rheology of bitumens and road pavements – for his great support in carrying out the analyses and research leading to this publication.

ADDITIONAL INFORMATION

This research was funded from the budget of the 2016-2018 Road Innovations Development (RID-IB) research programme entitled “Paving-grade and modified bitumens in Polish climate conditions” established by the National Centre of Research and Development and the General Directorate for National Roads and Motorways.

- [8] *Xie N., Shi X.*: Evaluation of Plus Grades of Performance Graded (PG) Asphalt Binder. Research Bureau, New Mexico Department Of Transportation, Report NM14-MS-01-008, 2014
- [9] *Leahy R.B., Cramer S.B.*: Superpave Binder Implementation. Final Report SPR 353, Oregon State University, 1999
- [10] *Prowell B.D.*: Selection and Evaluation of Performance-Graded Asphalt Binders for Virginia. Virginia Transportation Research Council, Virginia Department of Transportation and the University of Virginia, Report No. VTRC 99-R21, 1999
- [11] *Leahy R.B., Briggs R.N.*: Superpave - Washington DOT's Assessment and Status. Washington Department of Transportation, Report No. WA-RD 486.1, 1999
- [12] Guide for Specifying Asphalt Pavements for Local Governments. Asphalt Pavement Association of Indiana, 2009
- [13] *Nam K., Bahia H.U.*: Development of Guidelines for PG Binder Selection for Wisconsin. Research Study No. 0092-01-01, University of Wisconsin - Madison, Wisconsin Department of Transportation, 2004
- [14] *Floyd J., Golden K., McMurry R.*: Standard Specifications Construction of Transportation Systems. Georgia Department of Transportation, 2013
- [15] *Mills B.N., Tighe S.L., Andrey J., Smith J.T., Huen K.*: Climate Change Implications for Flexible Pavement Design and Performance in Southern Canada. Journal of Transportation Engineering, ASCE, **135**, 10, 2009

- [16] *Mirza M.W., Zahid A., Rizvi M.A.*: Temperature Zoning of Pakistan for Asphalt Mix Design. *Pakistan Journal of Engineering and Applied Sciences*, **8**, 2011, 49-60
- [17] *Mampearachchi W.K., Mhirani G.S., Binduhewa B.W.P., Lalithya G.D.D.*: Review of asphalt binder grading systems for hot mix asphalt pavements in Sri Lanka. *Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka*, **40**, 4, 2012, 311-320
- [18] *Khedr S., Saady M., Khafagy M.*: Development of asphalt binder Performance Grades. Proceedings of the 2nd Australasia and South East Asia Structural Engineering and Construction Conference, Bangkok, Thailand, 2014, 393-398
- [19] *Hassan F.H., Al-Nuaimi A., Al-Oraimi S., Jafar T.M.A.*: Development of asphalt binder performance grades for Omani climate. *Construction and Building Materials*, **22**, 8, 2008, 1684-1690
- [20] *Charoentham N., Kanitpong K.*: Development of a Performance Grading System for Asphalt Binders used in Thailand. *Asian Transport Studies*, **2**, 2, 2012, 121-138
- [21] Superpave Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing. Asphalt Institute, Superpave Series No. 1 (SP-1), 1995
- [22] *Sarnowski M.*: Rheological properties of road bitumen binders modified with SBS polymer and polyphosphoric acid. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **14**, 1, 47-65
- [23] *Jaskuła P., Pszczola M., Judycki J., Ryś D., Dołycki B., Jaczewski M.*: Asfalty drogowe i modyfikowane w polskich warunkach klimatycznych. Zadanie 1: Ocena warunków klimatycznych polski w aspekcie doboru rodzaju funkcjonalnego asfaltu do warstw nawierzchni drogowych. Raport badawczy z Zadania 1, grantu RID nr: OT1-1B/PW-PG-IBDiM, Politechnika Gdańska, 2016
- [24] AASHTO M 320-10: Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder. American Association of State Highway and Transportation Officials, 2010
- [25] *Sybilski D., Mirski K.*: Dobór asfaltu do nawierzchni w polskich warunkach klimatycznych z uwzględnieniem procedur SHRP/Superpave. VI Międzynarodowa Konferencja „Trwałe i Bezpieczne Nawierzchnie Drogowe”, Kielce, 9-10 maja, 2000
- [26] *Sybilski D.*: Zastosowanie metod SHRP do oceny nawierzchni dróg w Polsce. *Studia i materiały, Zeszyt 50, IBDiM*, Warszawa, 2000
- [27] *Sybilski D.*: Evaluation of low temperature properties of bituminous binders and asphalt mixtures. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **3**, 2, 2004, 87-119
- [28] *Pilat J., Radziszewski P.*: Nawierzchnie asfaltowe. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2004
- [29] *Błażejowski K., Styk S.*: Technologia warstw asfaltowych. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2004
- [30] *Gawęł I., Kalabińska M., Pilat J.*: Asfalty drogowe. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2001
- [31] *Solaimanian M., Bolzan P.*: Analysis of the Integrated Model of Climatic Effects on Pavements. Report No. SHRP-A-637, Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington, D.C., 1993
- [32] *Solaimanian M.*: Development of SHRP Asphalt Research Program Climatic Databases. Report SHRP-A-685, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C., 1994
- [33] *Mohseni A.*: LTPP Seasonal Asphalt Concrete (AC) Pavement Temperature Models. Federal Highway Administration, Report FHWA-RD-97-103, 1998
- [34] LTPP Data Analysis: Improved Low Pavement Temperature Prediction. Federal Highway Administration, Report No. FHWA-RD-97-104, 1998
- [35] The Asphalt Binder Handbook. Asphalt Institute, Manual Series No. 26 (MS-26), 2011
- [36] FHWA Program LTPPBind: <https://www.fhwa.dot.gov/Research/tfhrc/programs/infrastructure/pavements/ltp/install.cfm>, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration
- [37] Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych. GDDKiA, Zarządzenie nr 31 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 16.06.2014 r.
- [38] *Pszczola M., Judycki J., Ryś D.*: Evaluation of pavement temperatures in Poland during winter conditions. *Transportation Research Procedia*, **14**, 2016, 738-747
- [39] AASHTO MP 19: Performance-Graded Asphalt Binder using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test, American Association of State Highway and Transportation Officials, 2012