

Analiza temperatury ekwiwalentnej do projektowania nawierzchni asfaltowych w Polsce z wykorzystaniem metody AASHTO 2004

Analysis of equivalent temperature to design of asphalt pavements in Poland using the AASHTO 2004 method



Wioletta Leszczyńska

Technik budownictwa, Studentka
Politechniki Gdańskiej
Wydział Inżynierii Lądowej i
Środowiska

s177696@student.pg.edu.pl



Marek Pszczoła

Dr hab. inż. Marek Pszczoła, prof. PG
Katedra Inżynierii Drogowej i Transportowej
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

marek.pszczola@pg.edu.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono analizę temperatury ekwiwalentnej obliczanej w oparciu o kryterium spękań zmęczeniowych warstw asfaltowych z metody AASHTO 2004 oraz kryterium deformacji strukturalnych Instytutu Asfaltowego. Do obliczeń przyjęto konstrukcję nawierzchni KR5 oraz wykorzystano dane temperaturowe z 50 stacji meteorologicznych z okresu 30 lat od roku 1989 do roku 2019 włącznie udostępnione przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej. Uwzględniono wpływ zmiennego obciążenia nawierzchni ruchem pojazdów ciężkich zarówno w ciągu doby, jak i w ciągu całego roku. Przedstawiono, jak wartości temperatury ekwiwalentnej zmieniają się na terytorium Polski w zależności od lokalizacji stacji meteorologicznej. Analiza obliczeniowa wykazała zmienność temperatury ekwiwalentnej na terytorium Polski w zakresie od +14,68°C (Suwałki) do +16,99°C (Tarnów). Średnia ważona wartość temperatury ekwiwalentnej dla okresu całego roku wynosi +16,01°C i jest ona wyższa od wartości przyjętej w katalogu typowych konstrukcji podatnych i półsztywnych równej +13°C. W artykule przeprowadzono również ocenę wpływu zmiany wartości temperatury ekwiwalentnej na projektowaną grubość warstw asfaltowych konstrukcji nawierzchni.

Słowa kluczowe: Projektowanie nawierzchni; Temperatura ekwiwalentna; Trwałość zmęczeniowa; Metoda AASHTO 2004

Abstract: The paper presents the analysis of the equivalent temperature on the basis of the fatigue cracking criterion of asphalt layers according to the AASHTO 2004 method and the structural deformation of subgrade criterion according to the Asphalt Institute procedure. The calculations were made with application of the KR5 pavement structure and temperature data obtained from 50 meteorological stations and from the period of 30 years from 1989 to 2019, provided by the Institute of Meteorology and Water Management. The influence of variable traffic with heavy vehicle traffic was taken into consideration, both during the day and throughout the year. It was presented how the values of the equivalent temperature change in the territory of Poland depending on the location of the meteorological station. The computational analysis showed the variability of the equivalent temperature on the territory of Poland in the range from +14,68°C (Suwałki) to +16,99°C (Tarnow). The weighted mean value of the equivalent temperature for the entire year is +16,01°C and it is higher than the value adopted in the catalogue of typical flexible and semi-rigid structures that is equal to +13,00°C. The change in the equivalent temperature value on the designed thickness of asphalt layers of the pavement structure has been also assessed in the paper.

Keywords: Pavement design; Equivalent temperature; Fatigue life; AASHTO 2004 method

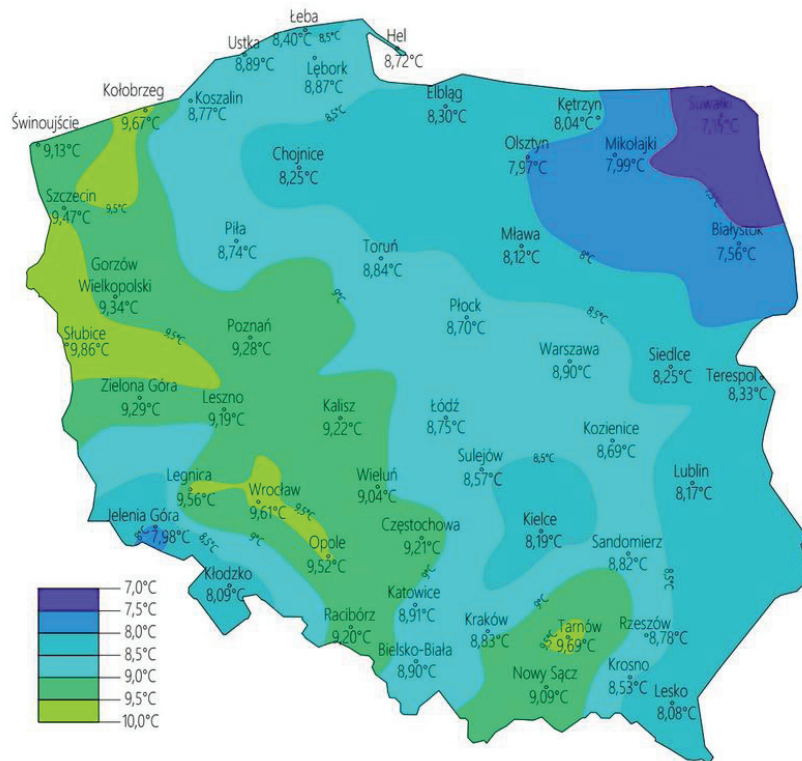
Wstęp

Zmieniający się klimat oraz zwiększone obciążenie ruchem pojazdów ciężkich powodują wzrost uszkodzeń nawierzchni drogowych. Wychodząc naprzeciw temu problemowi w Polsce i na świecie opracowywane są modele zmęczeniowe pozwalające na obliczenie trwałości zmęczeniowej nawierzchni, a tym samym konieczne staje się wyznaczenie oraz aktualizacja temperatury ekwiwalentnej do projektowania konstrukcji na-

wierzchni drogowych. Pod pojęciem temperatury ekwiwalentnej należy rozumieć stałą wartość temperatury, w której szkoda zmęczeniowa jakiej uległa by nawierzchnia w tej temperaturze jest równa sumie szkód zmęczeniowych, które powstają w ciągu roku podczas zmiennych warunków temperaturowych przy założonym obciążeniu ruchem drogowym.

Metodę wyznaczania temperatury ekwiwalentnej w polskich warunkach klimatycznych uwzględniającej badania zmęczeniowe przedstawili

D. Sybilski i W. Bańkowski w artykule [8]. W książce [2], która jest podsumowaniem programu badawczego w wyniku którego został opracowany nowy polski katalog [9], zespół pod kierunkiem J. Judyckiego analizował temperaturę ekwiwalentną z wykorzystaniem kryteriów zmęczeniowych Instytutu Asfaltowego, metody Shella, metody francuskiej a także przy uwzględnieniu zmiennych modułów sprężystości podłoża gruntowego. Analizę trwałości zmęczeniowej potrzebnej do wyznacze-



1. Lokalizacje stacji meteorologicznych oraz średnie wartości temperatur powietrza z okresu 30 lat (1989 – 2019)

nia temperatury ekwiwalentnej na podstawie kryterium francuskiego oraz kryterium Instytutu Asfaltowego w odniesieniu do obciążenia ruchem pojazdów ciężkich przedstawili M. Spławińska i P. Zieliński w artykule [7]. Rozważania te sugerują na odpowiednie dobranie kryterium do danego typu nawierzchni oraz ujednoczenie wartości temperatury ekwiwalentnej.

Metoda AASHTO 2004 [1] została opracowana w ramach amerykańskiego programu badawczego National Cooperative Highway Research Program w oparciu o badania wykonane na odcinkach doświadczalnych, na podstawie których opracowano modele zmęczenia szczegółowo opisane przez J. Judyckiego w

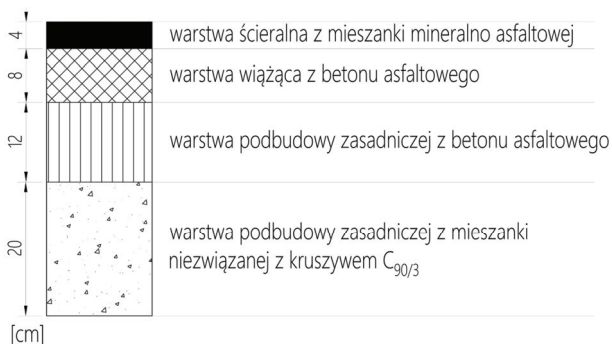
artykułach [3, 4]. W pracach prowadzonych na etapie opracowywania katalogu metoda AASHTO 2004 nie była jednak w pełni zastosowana do wyznaczenia wartości temperatury ekwiwalentnej. W tym czasie zastosowane zostały m.in. metody Instytutu Asfaltowego, metoda francuska oraz metoda firmy Shell. Analizy temperatury ekwiwalentnej prowadzone były w pierwszym etapie prac, gdy metoda AASHTO 2004 nie była jeszcze przyjęta jako podstawowa metoda obliczeń trwałości zmęczenia.

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie analizy zmienności temperatury ekwiwalentnej na terenie Polski na podstawie najnowszych danych temperaturowych oraz jej

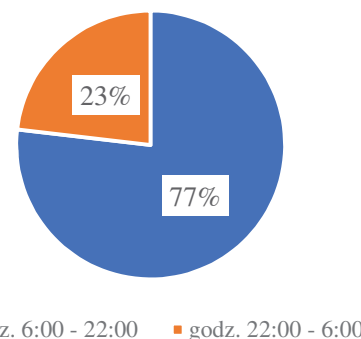
wpływ na grubość projektowanych warstw asfaltowych konstrukcji nawierzchni w oparciu o kryterium spełnień zmęzeniowych warstw asfaltowych z metody AASHTO 2004 oraz kryterium deformacji strukturalnych podłoża gruntowego według Instytutu Asfaltowego.

Analiza danych temperaturowych powietrza i wyznaczenie temperatury nawierzchni

Do dalszych analiz temperatury ekwiwalentnej wykorzystano dane meteorologiczne udostępnione przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej z okresu 30 lat, od 1 stycznia 1989 r. do 31 grudnia 2019 r. W stosunku do danych temperaturowych przyjętych do wyznaczenia temperatury ekwiwalentnej w obowiązującym katalogu [9] (okres od 1 stycznia 1981 r. do 31 grudnia 2010 r.), dane te obejmowały najbardziej aktualny, dostępny okres pomiaru temperatury w Polsce. Otrzymane dane pochodziły ze stacji meteorologicznych zlokalizowanych równomiernie na całym terytorium Polski. W początkowym etapie analizy wykluczono stacje meteorologiczne, dla których stwierdzono nieciągłość danych spowodowaną przerwami w rejestracji lub które były zlokalizowane w rejonach o ograniczonym dostępie dróg (np. wierzchołki górskie). Ostatecznie do dalszych analiz wytypowano 50 stacji meteorologicznych posiadających kompletne dane pomiaru temperatury powietrza. Zestawienie lokalizacji stacji meteorologicznych oraz wyniki średnich wartości temperatur powietrza z okresu 30 lat przedstawiono na



2. Konstrukcja nawierzchni dla kategorii ruchu KRS [9]



3. Rozkład ruchu pojazdów ciężkich w ciągu doby na drogach krajowych i wojewódzkich na podstawie danych z Generalnego Pomiaru Ruchu w roku 2015 [5, 6]

rysunku 1. Rozkład izolinii opracowano w programie graficznym stosując interpolację liniową. Uwzględniono różnicę temperatur pomiędzy sąsiednimi lokalizacjami stacji meteorologicznych oraz odległości pomiędzy nimi.

Do wyznaczenia średniej miesięcznej temperatury nawierzchni wykorzystanej do późniejszych analiz temperatury ekwiwalentnej przyjęto, jako reprezentatywną konstrukcję nawierzchni dla kategorii ruchu KR5, typ A1 z katalogu [9].

Temperaturę w nawierzchni wyznaczono, jako średnią miesięczną wartość temperatury na głębokości 1/3 grubości warstw asfaltowych zgodnie z zależnością (1) zastosowaną także w książce [2] oraz artykule [8]. Zależność ta została również wykorzystana w procedurze wyznaczania temperatury ekwiwalentnej przyjętej do opracowania katalogu [9].

$$T_s = T_{s,p} \left(1 + \frac{1}{z+4} \right) - \frac{34}{z+4} + 6 \quad (1)$$

gdzie:

T_s – średnia miesięczna temperatura nawierzchni [°C],

$T_{s,p}$ – średnia miesięczna temperatura powietrza [°C],

z – głębokość w warstwach asfaltowych na jakiej wyznaczana jest temperatura nawierzchni mierzona od powierzchni nawierzchni [cm] [2].

W celu dokładniejszego uwzględnienia w analizie dobowego rozkładu obciążenia nawierzchni ruchem pojazdów ciężkich, do obliczenia temperatury nawierzchni przyjęto wartości średniej ważonej miesięcznej temperatury powietrza. Na podstawie wyników Generalnego Pomiaru Ruchu [5, 6] przeprowadzonych w 2015 r. przez Generalną Dyрекcyję Dróg Krajowych i Autostrad wynika, że ruch pojazdów ciężkich odbywa się głównie w ciągu dnia w godzinach od 6:00 do 22:00 (Rys. 3.). W związku z tym do dalszych analiz temperatury ekwiwalentnej przyjęto następujący podział wagowy: 0,7 dla wartości temperatur w ciągu dnia (w

Tab. 1. Średnie miesięczne ważone wartości temperatury powietrza oraz wartości średnich miesięcznych temperatur nawierzchni w latach 1989 – 2019 dla stacji meteorologicznej w Suwałkach

Suwałki	miesiąc											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Średnia miesięczna ważona temperatura powietrza [°C]	-3,54	-2,36	1,33	8,20	12,96	16,13	18,24	17,58	12,57	7,11	2,40	-1,63
Średnia miesięczna temperatura nawierzchni [°C]	-0,86	0,49	4,70	12,53	17,95	21,57	23,97	23,21	17,51	11,28	5,91	1,32

Tab. 2. Średnie miesięczne ważone wartości temperatury powietrza oraz wartości średnich miesięcznych temperatur nawierzchni w latach 1989 – 2019 dla stacji meteorologicznej w Tarnowie

Tarnów	miesiąc											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Średnia miesięczna ważona temperatura powietrza [°C]	-0,92	0,66	4,88	10,22	14,76	18,24	19,85	19,38	14,47	9,57	5,34	1,02
Średnia miesięczna temperatura nawierzchni [°C]	2,12	3,93	8,74	14,82	20,00	23,97	25,81	25,26	19,67	14,09	9,26	4,35

godz. od 6:00 do 22:00) oraz 0,3 dla temperatur w ciągu nocy (w godz. od 22:00 do 6:00).

W tabeli 1 i 2 przedstawiono przykładowe wartości średnich miesięcznych ważonych temperatur powietrza dla stacji meteorologicznych zlokalizowanych w Suwałkach i Tarnowie uwzględniające dobowy rozkład ruchu pojazdów ciężkich, a także wyznaczone na ich podstawie wartości średnich miesięcznych temperatur nawierzchni w latach 1989 – 2019.

Metoda obliczania temperatury ekwiwalentnej

Metoda obliczania temperatury ekwiwalentnej składa się z następujących etapów przyjętych w oparciu o procedurę obliczeniową zawartą w książce [2]:

1. Wytypowanie stacji meteorologicznych na terenie Polski z kompletną bazą danych temperaturowych dla rozpatrywanego okresu analizy.
2. Przyjęcie konstrukcji nawierzchni. W niniejszych analizach przyjęto konstrukcję nawierzchni dla kategorii ruchu KR5.
3. Wyznaczenie średniej miesięcznej ważonej temperatury powietrza dla poszczególnych lokalizacji

uwzględniając zmienność natężenia ruchu pojazdów ciężkich w ciągu doby.

4. Obliczenie średniej miesięcznej temperatury nawierzchni zgodnie z zależnością (1) dla rozpatrywanego okresu obliczeniowego dla każdej stacji meteorologicznej osobno.
5. Obliczenie trwałości zmęczeniowej z wykorzystaniem kryterium spękań zmęczeniowych warstw asfaltowych z metody AASHTO 2004 oraz kryterium deformacji strukturalnych podłoża gruntowego według Instytutu Asfaltowego.

W obliczeniach trwałości zmęczeniowej z wykorzystaniem kryterium spękań zmęczeniowych warstw asfaltowych z metody AASHTO 2004 w pierwszej kolejności za pomocą programu BANDS 2.0. wyznaczono wartości modułów sztywności mieszank mineralno-asfaltowych do poszczególnych warstw asfaltowych nawierzchni w zakresie temperatur od -20°C do 30°C z krokiem co 5°C. W tym celu obliczono wartości modułów sztywności lepiszczy asfaltowych 35/50 (dla warstwy podbudowy asfaltowej i warstwy wiążącej) oraz 50/70 (dla warstwy ścieralnej). Następnie wyznaczono moduły sztyw-

ności mieszanek mineralno-asfaltowych uwzględniając w obliczeniach wartości objętościowej zawartości wolnych przestrzeni oraz zawartości asfaltu przyjęte na podstawie tablicy 10.4 w książce [2].

W kolejnym etapie obliczano wartość odkształcenia rozciągającego na spodzie pakietu warstw asfaltowych oraz odkształcenia pionowego na powierzchni podłoża gruntowego wykorzystując program BISAR 3.0. Wartości te zostały wyznaczone przy uwzględnieniu obliczonych wcześniej wartości modułów sztywności mieszanek mineralno-asfaltowych, przyjętej wartości modułu sprężystości podbudowy zasadniczej z mieszanki niezwiązanej z kruszywem C90/3 ($E=400$ MPa) oraz przyjętej stałej wartości modułu sprężystości podłoża gruntowego ($E_0=120$ MPa) na powierzchni dolnych warstw konstrukcji nawierzchni i warstwy ulepszonego podłoża gruntowego.

Następnym etapem obliczeń było wyznaczenie trwałości zmęczeniowej w każdej temperaturze spośród przyjętego wcześniej zakresu temperatur. Obliczenia przeprowadzono z wykorzystaniem kryterium spękań zmęczeniowych warstw asfaltowych według metody AASHTO 2004 oraz kryterium deformacji strukturalnych podłoża gruntowego według kryterium Instytutu Asfaltowego, które zostało zastosowane także podczas prac do katalogu. Trwałość zmęczeniową warstw asfaltowych, stanowiącą liczbę powtarzalnych obciążeń do momentu wystąpienia spękań zmęczeniowych widocznych na powierzchni nawierzchni obliczono z zależności (2) przyjmując dopuszczalną ilość spękań jako 15% całkowitej powierzchni pasa ruchu. Poniższą zależność przyjęto z artykułu [4] i sprovedzono z jednostek imperialnych do jednostek metrycznych.

$$N_f = D_{FC} \cdot 7,3557 \cdot (10^{-6}) \cdot C \cdot k'_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{3,9492} \left(\frac{1}{E}\right)^{1,281} \quad (2)$$

gdzie:

N_f - liczba powtarzalnych obciążeń do wystąpienia spękań siatkowych

na 15% całkowitej powierzchni pasa ruchu [-];

D_{FC} - szkoda zmęczeniowa wywołana na spodzie warstw [-]

$$D_{FC} = 10^{\ln\left(\frac{100}{FC_{bottom}} - 1\right) \cdot \frac{1}{C'^2} - 2} \quad (3)$$

Zależność (3) otrzymano z przekształcenia zależności (6.7) szczegółowo opisanej

w książce [2] w podrozdziale 6.2.2.5.

C - współczynnik zależny od zawartości objętościowych asfaltu i wolnych przestrzeni w mieszance mineralno - asfaltowej [-];

$$C = 10^M \quad (4)$$

$$M = 4,84 \cdot \left(\frac{v_b}{v_a + v_b} - 0,69\right) \quad (5)$$

gdzie:

v_a - objętościowa zawartość wolnych przestrzeni [%];

v_b - objętościowa zawartość asfaltu pomniejszona o asfalt zaabsorbowany

w porach kruszywa [%];

k'_1 - parametr określony w procesie kalibracji, zależny od grubości warstwy asfaltowej oraz typu spękań [-]

Spękania typu „z dołu do góry”:

$$k'_1 = \frac{1}{0,000398 + \frac{0,003602}{1 + e^{(11,02 - 3,49 \cdot h_{ac})}}} \quad (6)$$

gdzie:

h_{ac} - sumaryczna grubość wszystkich warstw asfaltowych [cale];

ε_t - odkształcenie rozciągające na spodzie warstw asfaltowych przyjętej konstrukcji nawierzchni [-];

E - moduł sztywności warstwy asfaltowej [MPa];

Trwałość zmęczeniową z uwagi na deformacje strukturalne podłoża gruntowego obliczono na podstawie kryterium Instytutu Asfaltowego:

$$N_{f,p} = \left(\frac{\varepsilon_{zz}}{1,05 \cdot 10^{-2}}\right)^{-\frac{1}{0,223}} \quad (7)$$

gdzie:

$N_{f,p}$ - liczba dopuszczalnych obciążeń osi standardowych do wystąpienia krytycznych deformacji trwałych podłoża gruntowego [-];

ε_{zz} - odkształcenia na górnej powierzchni podłoża gruntowego [-];

6. Wyznaczenie funkcji wielomianowej określającej zależność trwałości zmęczeniowej od temperatury nawierzchni.

Na podstawie otrzymanych wartości z zależności (2) i (7), jako wynikową trwałość zmęczeniową przyjmowano wartość niższą spośród dwóch kryteriów dla danej temperatury obliczeniowej. W głównej mierze decydowało kryterium spękań zmęczeniowych warstw asfaltowych. Niższą wartość trwałości zmęczeniowej otrzymaną z kryterium deformacji strukturalnych uzyskano jedynie dla temperatur nawierzchni $+25^\circ\text{C}$ i $+30^\circ\text{C}$. Zależność obliczonych wartości trwałości zmęczeniowej od temperatury nawierzchni opisano funkcją wielomianową czwartego stopnia $N(T)$, którą przedstawiono na rysunku 4.

7. Wyznaczenie trwałości zmęczeniowej dla danego miesiąca.

Wykorzystując otrzymaną zależność trwałości zmęczeniowej od temperatury nawierzchni opisaną funkcją wielomianową czwartego stopnia oraz na podstawie średniej miesięcznej temperatury nawierzchni z okresu 30 lat obliczono wartość trwałości zmęczeniowej w danym miesiącu dla każdej lokalizacji stacji meteorologicznej oddzielnie.

8. Obliczanie rocznej trwałości zmęczeniowej.

Na podstawie zależności (8) obliczono roczną trwałość zmęczeniową dla każdej z przyjętych lokalizacji. Wartość ta uwzględnia zmienny rozkład ruchu w ciągu roku przyjęty na podstawie założeń opisanych w książce [2]. Największe obciążenie ruchem przyjęto dla miesięcy letnich: czerwiec, lipiec, sierpień (procentowy udział ruchu dla każdego z miesięcy w ciągu roku wynosi 10%), najmniej

sze dla okresu zimowego: grudzień, styczeń, luty (6,67%) oraz średnie obciążenie ruchem w miesiącach: marzec, kwiecień, maj, wrzesień, październik, listopad (8,33%).

$$N_{rok} = \frac{100}{\left(\frac{\%ruch_1}{N_1} + \frac{\%ruch_2}{N_2} + \dots + \frac{\%ruch_n}{N_n}\right)} \quad (8)$$

gdzie:

N_{rok} – trwałość zmęczeniowa konstrukcji nawierzchni w okresie całego roku [-],

$\%ruch_n$ – procentowy udział ruchu w stosunku do całego roku w danym miesiącu [%],

N_n – trwałość zmęczeniowa obliczona w danym miesiącu z zależności $N(T)$, [-],

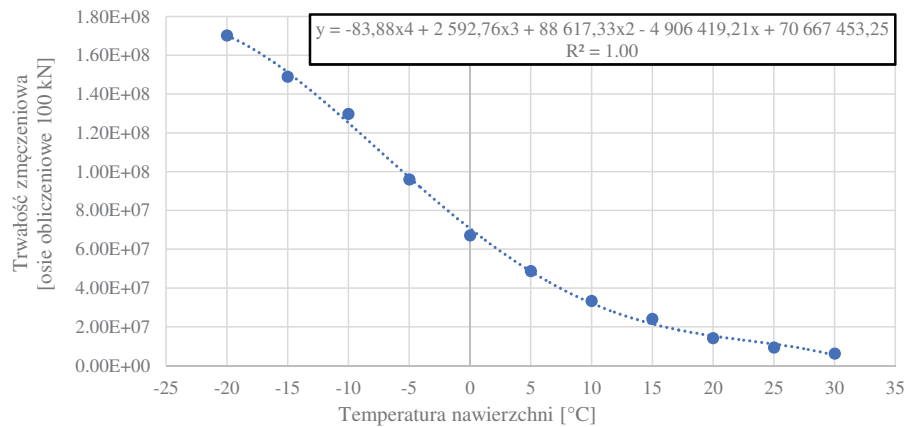
n – numer miesiąca [2].

9. Obliczenie wartości temperatury ekwiwalentnej.

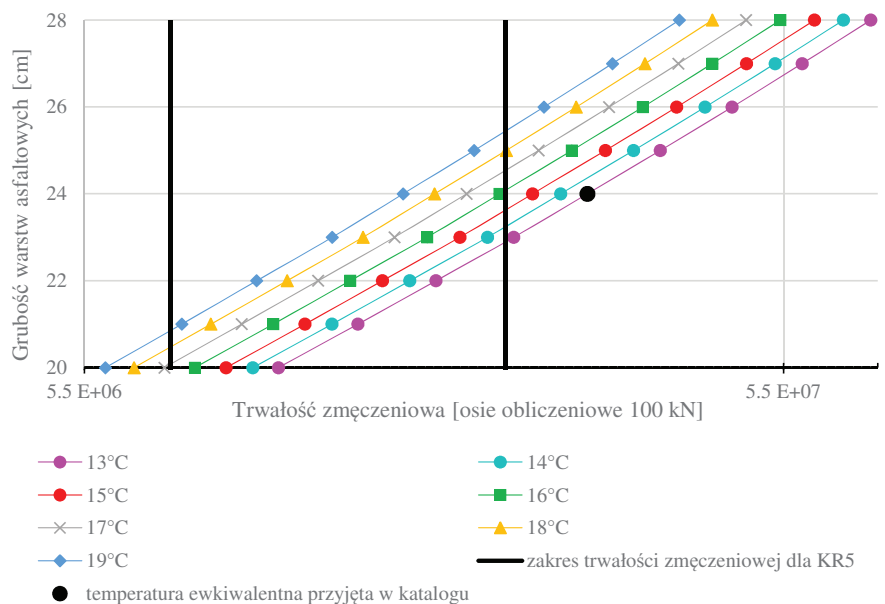
Wykorzystując obliczone wartości rocznych trwałości zmęczeniowych uzyskane z zależności (8) rozwiązano dla każdej z lokalizacji stacji meteorologicznej wielomian czwartego stopnia. Otrzymano w ten sposób wartość temperatury ekwiwalentnej, w której szkoda zmęczeniowa powstała w analizowanej nawierzchni jest równa sumie szkód zmęczeniowych, jakie powstają w różnych temperaturach w ciągu całego roku.

Wyniki obliczeń temperatury ekwiwalentnej dla przyjętych lokalizacji stacji meteorologicznych i ich analiza

W wyniku przeprowadzonych obliczeń otrzymano 50 wartości temperatury ekwiwalentnej uzależnionych od występujących temperatur powietrza w danej lokalizacji stacji meteorologicznej. Otrzymane wyniki przedstawiono w sposób graficzny na rysunku 5. Podobnie, jak w przypadku analizy średnich wartości temperatur powietrza rozkład izolinii opracowano w programie graficznym stosując interpolację liniową, uwzględniając przy tym różnicę temperatur pomiędzy sąsiadującymi lo-



4. Zależność trwałości zmęczeniowej od temperatury nawierzchni $N(T)$ w zakresie temperatur od -20°C do 30°C dla konstrukcji nawierzchni dla kategorii ruchu KR5



6. Zależność grubości warstw asfaltowych od trwałości zmęczeniowej przy zmiennej temperaturze ekwiwalentnej dla konstrukcji nawierzchni KR5

kalizacjami stacji meteorologicznych oraz odległości pomiędzy nimi.

Warto zauważyć, że rozkład wartości temperatury ekwiwalentnej zasadniczo pokrywa się ze strefami przemarzania gruntu w Polsce. Najniższą wartość temperatury ekwiwalentnej otrzymano w stacji meteorologicznej zlokalizowanej w Suwałkach ($+14,68^{\circ}\text{C}$), natomiast najwyższą w Tarnowie ($+16,99^{\circ}\text{C}$). Różnica pomiędzy skrajnymi wartościami wynosi $2,31^{\circ}\text{C}$ i przekłada się to na grubość projektowanych warstw asfaltowych konstrukcji nawierzchni co opisano w dalszej części niniejszego artykułu. W celu wyznaczenia jednej wartości temperatury ekwiwalentnej dla całego terytorium Polski, podobnie jak podczas prac do katalogu [9] zastosowano średnią ważoną war-

tość temperatury ekwiwalentnej, gdzie wagą był procent terytorium Polski o określonej głębokości przemarzania gruntu:

- 0,8 m – obszar 29,5% terytorium,
- 1,0 m – obszar 57,1% terytorium,
- 1,2 m – obszar 10,9% terytorium,
- 1,4 m – obszar 2,5% terytorium.

Zestawienie wyznaczonych wartości temperatur ekwiwalentnych pogrupowanych w zależności od strefy przemarzania gruntu oraz średnią ważoną wartość temperatury ekwiwalentnej dla Polski przedstawiono w tabeli 3.

Średnia ważona wartość temperatury ekwiwalentnej dla Polski zaokrąglona do pełnych stopni wynosi 16°C i jest wyższa od temperatury ekwiwalentnej przyjętej w katalogu

Tab. 3. Zestawienie wyznaczonych wartości temperatur ekwiwalentnych oraz średnia ważona wartość temperatury ekwiwalentnej dla Polski

Procent terytorium Polski o danej głębokości przemarzania	Lokalizacja stacji meteorologicznej	Temperatura ekwiwalentna dla kategorii ruchu KR5 [°C]
29,5% (0,8m)	Chojnice	15,10
	Stubice	16,85
	Szczecin	16,92
	Poznań	16,55
	Leszno	16,46
	Legnica	16,77
	Kalisz	16,52
	Kłodzko	15,16
	Gorzów Wielkopolski	16,45
	Jelenia Góra	15,05
	Koszalin	15,36
	Wrocław	16,85
	Zielona Góra	16,32
	Piła	15,99
	Świnoujście	16,17
	Ustka	15,15
57,1% (1,0m)	Kołobrzeg	16,53
	Rzeszów	16,37
	Sandomierz	16,28
	Olsztyn	15,21
	Opole	16,79
	Płock	16,01
	Mława	15,54
	Łódź	16,14
	Częstochowa	16,35
	Lublin	15,64
	Kraków	16,35
	Bielsko-Biała	15,90
	Terespol	16,01
	Racibórz	16,49
	Łeba	14,90
	Tarnów	16,99
	Siedlce	15,78
	Sulejów	16,01
	Elbląg	15,26
	Katowice	16,24
Kielce	15,76	
Kozienice	16,29	
Łęborg	15,24	
Wieluń	16,33	
Hel	15,20	
Toruń	16,25	
Warszawa	16,43	
10,9% (1,2m)	Mikołajki	15,32
	Lesko	15,24
	Nowy Sącz	16,34
	Kętrzyn	15,23
	Krosno	15,80
2,5% (1,4m)	Białystok	15,08
	Suwałki	14,68
Średnia ważona wartość temperatury ekwiwalentnej dla Polski		16,01

[9] o 3°C. Dla lepszego zobrazowania definicji temperatury ekwiwalentnej, warto zaznaczyć, iż nie należy jej mylić ze średnią temperaturą powietrza w ciągu roku. Wartości te różnią się istotnie między sobą, co można zauważyć porównując rysunki 1 i 5.

Analiza wpływu zmiany temperatury ekwiwalentnej na projektowaną grubość warstw asfaltowych nawierzchni

Temperatura ekwiwalentna, która jest w sposób bezpośredni związana z trwałością zmęczeniową konstrukcji nawierzchni jest wymagana do projektowania grubości warstw asfaltowych nawierzchni. W niniejszych analizach dotyczących wpływu zmiany temperatury ekwiwalentnej na grubość pakietu warstw asfaltowych przyjęto zmienną grubość warstwy podbudowy asfaltowej. Na rysunku 6 przedstawiono wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej dla analizowanych grubości warstw asfaltowych przy zmiennych wartościach temperatury ekwiwalentnej. Na rysunku zaznaczono też przyjętą w katalogu [9] wartość temperatury ekwiwalentnej (+13°C), która zapewnia wymaganą trwałość zmęczeniową nawierzchni asfaltowej dla kategorii ruchu KR5.

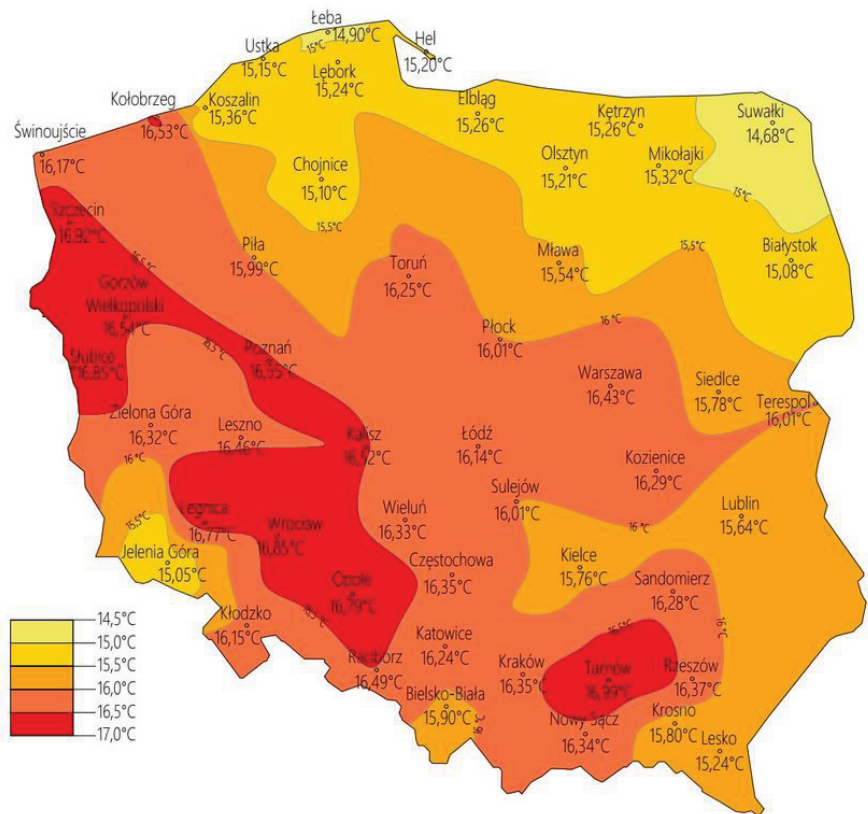
W wyniku przeprowadzonych obliczeń wartości temperatur ekwiwalentnych, można stwierdzić, że w zależności od lokalizacji, grubość warstw asfaltowych nawierzchni na terenie Polski może być przyjęta z zakresu od 24 cm (Suwałki +14,68°C, po zaokrągleniu +15°C) do 25 cm (Tarnów +16,99°C, po zaokrągleniu +17°C). Oznacza to różnicę w grubości warstw asfaltowych wynoszącą 1 cm. Jednak po uwzględnieniu tolerancji wykonawczych można przyjąć jednakową wartość grubości warstw asfaltowych (25 cm), co uzasadnia określenie jednej wartości temperatury ekwiwalentnej dla całego terytorium Polski przy przyjętym rozkładzie wartości jak na rysunku 5. Dalszy wzrost średnich wartości temperatur powietrza w Polsce i na świecie może

spowodować istotny wzrost wartości temperatur ekwiwalentnych, a w konsekwencji konieczność zwiększenia projektowanych grubości warstw asfaltowych. Na podstawie przeprowadzonych analiz wynika, że dla obecnie obowiązującej w katalogu [9] wartości temperatury ekwiwalentnej równej $+13^{\circ}\text{C}$, grubość warstw asfaltowych bez uwzględnienia tolerancji wykonawczych (dodatkowy 1 cm), która spełnia wymaganą trwałość zmęczeniową konstrukcji nawierzchni dla KR5 wynosi 23 cm. Odnosząc się do wyznaczonej w niniejszym artykule średniej ważonej wartości temperatury ekwiwalentnej dla Polski ($+16^{\circ}\text{C}$), grubość warstw asfaltowych powinna wynosić 25 cm. Świadczy to o różnicy 2 cm, która sugeruje potrzebę aktualizowania temperatury ekwiwalentnej do projektowania konstrukcji nawierzchni na przestrzeni lat. Warto także zauważyć, że wraz ze wzrostem temperatury ekwiwalentnej maleje trwałość zmęczeniowa nawierzchni.

Podsumowanie i wnioski

Temperatura ekwiwalentna do projektowania konstrukcji nawierzchni drogowych zmienia się wraz ze zmianą temperatury powietrza. Jest ona istotna ze względu na projektowanie konstrukcji nawierzchni, ponieważ definiuje się ją, jako stałą wartość temperatury, w której szkoda zmęczeniowa jakiej uległaby nawierzchnia w tej temperaturze jest równa sumie szkód zmęczeniowych, które powstają w ciągu roku podczas zmiennych warunków temperaturowych przy założonym obciążeniu ruchem drogowym. Dlatego wartość tą należy systematycznie aktualizować na podstawie najnowszych dostępnych danych temperaturowych.

W niniejszym artykule przeprowadzono analizę temperatury ekwiwalentnej do projektowania nawierzchni asfaltowych w Polsce na podstawie najnowszych dostępnych danych temperaturowych od roku 1989 do roku 2019 włącznie. Rozkład śred-



5. Temperatura ekwiwalentna do projektowania nawierzchni dla przyjętych stacji meteorologicznych w Polsce

nych rocznych temperatur powietrza uzyskanych z dostępnych danych z okresu 30 lat zasadniczo pokrywa się z obecnie obowiązującymi strefami przemarzania gruntu w Polsce.

Analizy obliczeniowe wykazały, że wartość temperatury ekwiwalentnej jest zmienna na terenie Polski. Użyte skrajne wartości temperatur ekwiwalentnych (Suwałki $+14,68^{\circ}\text{C}$ oraz Tarnów $+16,99^{\circ}\text{C}$) wyznaczonych w oparciu o kryteria zmęczeniowe różnią się o $2,31^{\circ}\text{C}$ w zależności od lokalizacji stacji meteorologicznej. Uzasadnia to możliwość przyjęcia jednej wartości temperatury ekwiwalentnej dla całego terytorium Polski.

Wyznaczona średnia ważona wartość temperatury ekwiwalentnej dla Polski, gdzie wagą jest procent terytorium Polski o określonej głębokości przemarzania gruntu wynosi $+16^{\circ}\text{C}$. Oznacza to możliwość zaprojektowania grubości warstw asfaltowych równej 25 cm w całej Polsce dla analizowanej kategorii ruchu KR5 i przy uwzględnieniu tolerancji wykonawczych.

Analiza średniej ważonej temperatury ekwiwalentnej dla Polski ($+16^{\circ}\text{C}$)

wyznaczonej w oparciu o najnowsze dane temperaturowe oraz obecnie obowiązującej wartości w katalogu [9] ($+13^{\circ}\text{C}$) wskazuje na konieczność zwiększenia grubości warstw asfaltowych konstrukcji nawierzchni dla kategorii ruchu KR5 o 2 cm, nie uwzględniając przy tym tolerancji wykonawczych. Dalszy wzrost średnich wartości temperatur powietrza w Polsce i na świecie może spowodować istotny wzrost wartości temperatur ekwiwalentnych, a w konsekwencji konieczność zwiększenia projektowanych grubości warstw asfaltowych.

Wyznaczonych wartości temperatur ekwiwalentnych w niniejszym artykule nie należy wprost porównywać z wartością przyjętą w katalogu [9], ponieważ zostały one obliczone na podstawie danych temperaturowych z innego okresu czasowego oraz do ich wyznaczenia skorzystano z różnych kryteriów i założeń.

Niniejszy artykuł powstał w projekcie badawczo-dydaktycznym pt. „Szkoła Orłów” realizowanym w ramach Programu Operacyjnego: Wiedza, Eduka-

cja, Rozwój, współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego POWR.03.01.00-00-P015/18 i ogłoszonego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Podziękowania

Autorzy pragną wyrazić swoje podziękowanie Instytutowi Meteorologii i Gospodarki Wodnej za udostępnienie danych temperaturowych ze stacji meteorologicznych w Polsce.

Podziękowania kierują również w stronę Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego, za możliwość uczestnictwa w projekcie badawczo-dydaktycznym pt. „Szkoła Orłów”. ◀

Materiały źródłowe

[1] Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. Final Report, Part 3 - Design and Analysis,

NCHRP, TRB, NRC, March 2004.

[2] Judycki J. i inni. Analizy i projektowanie konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2014.

[3] Judycki J. Modele spękań zmęczeniowych warstw asfaltowych nawierzchni drogowych w mechanistyczno-empirycznej metodzie AASHTO 2004. Drogownictwo, 2011, nr 11, str. 343-347.

[4] Judycki J. Budowa i kalibracja modeli spękań zmęczeniowych warstw asfaltowych nawierzchni drogowych w mechanistyczno-empirycznej metodzie AASHTO 2004, Roads and Bridges - Drogi i Mosty, 2011, Nr 4, str. 31-53.

[5] Opoczyński K. Podsumowanie wyników GPR 2015 na zamiejskiej sieci dróg wojewódzkich. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, 2016.

[6] Opoczyński K. Synteza wyników GPR 2015 na zamiejskiej sieci dróg krajowych. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, 2016.

[7] Spławińska M., Zieliński P. Wpływ natężenia ruchu pojazdów ciężkich na trwałość konstrukcji nawierzchni drogowej. Drogownictwo, 2015, nr 3, str. 98-104.

[8] Sybilski D., Bańkowski W. Temperatura równoważna nawierzchni asfaltowej ze względu na zmęczenie w polskich warunkach klimatycznych. Drogownictwo, 2004, nr 6, str. 179-184.

[9] Załącznik do zarządzenia Nr 31 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 16.06.2014r. Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych.

REKLAMA



CZAS NA INNOWACYJNE BUDOWNICTWO

Oferujemy profesjonalne usługi z zakresu:

- budowy infrastruktury komunikacyjnej, sieci instalacyjnych i obiektów hydrotechnicznych,
- wykonywania pomiarów geodezyjnych, tworzenia map do celów projektowych, wytyczenia budynku i sieci.



**W BUDOWNICTWIE WYBIERZ FIRME,
KTÓREJ MOŻESZ ZAUFAĆ**

Zobacz, co już wybudowaliśmy
i dla kogo pracowaliśmy:
www.gm-roads.pl

Biuro:

ul. Krzemieniecka 47,
54-613 Wrocław

Budownictwo inżynieryjne:

tel.: (71) 300 12 40
e-mail: info@gm-roads.pl

Geodezja:

tel.: 697 660 932
e-mail: m.wozniak@gm-roads.com

Siedziba firmy:

ul. Wrocławska 41, Łażany
58-130 Żarów