DAWID RYŚ[1)]
PIOTR JASKUŁA[2)]
MARIUSZ JACZEWSKI[3)]
MAREK PSZCZOŁA[4)]

APPLICATION AND EVALUATION OF M-EPDG FOR PERFORMANCE ANALYSIS OF POLISH TYPICAL FLEXIBLE AND RIGID PAVEMENTS

WDROŻENIE I OCENA METODY M-EPDG DO ANALIZY TRWAŁOŚCI POLSKICH TYPOWYCH KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI PODATNYCH I SZTYWNYCH

STRESZCZENIE. Głównym celem artykułu jest omówienie zastosowania i ocena przydatności metody M-EPDG oraz oprogramowania AASHTOware do analizy trwałości nowych nawierzchni podatnych i sztywnych zaprojektowanych zgodnie z polskimi katalogami, porównywalnymi z analogicznymi katalogami typowych nawierzchni stosowanymi w innych krajach europejskich. W tym celu określono i opisano lokalne dane wejściowe dla Polski, jak również porównano je z domyślnymi wartościami stosowanymi w USA. Parametry stanu nawierzchni uzyskane z M-EPDG zestawiono z ich granicznymi wartościami określonymi w polskim systemie Diagnostyki Stanu Nawierzchni. Stwierdzono stan dobry lub zadowalający na koniec okresu projektowego. Przeprowadzone obliczenia wykazały, że na obszarze Polski należy wyznaczyć kilka stref klimatycznych na potrzeby analizy trwałości zarówno nawierzchni podatnych, jak i sztywnych. Przedstawiona analiza może stanowić pierwszy etap w kalibracji modeli M-EPDG do warunków polskich oraz w dostosowaniu ich do użytku w planowaniu prac utrzymaniowych.

SŁOWA KLUCZOWE: beton cementowy, dane klimatyczne, metoda M-EPDG, mieszanki asfaltowe, nawierzchnie podatne, nawierzchnie półsztywne, nawierzchnie sztywne, obciążenie ruchem, projektowanie nawierzchni, rozkład obciążenia osi, trwałość nawierzchni.

ABSTRACT. The main goal of the paper is to implement and evaluate the M-EPDG and the software AASHTOware to analyse the performance of new flexible and rigid pavements designed according to the Polish catalogues, which are comparable with analogous catalogues used in other European countries. For this purpose the site-specific inputs for Poland were determined and described in the paper as well as compared to the default input data used in the USA. Performance parameters delivered from M-EPDG were compared to limits of pavement distresses given in the Polish Pavement Condition Diagnostics system and confirmed good or acceptable level of distresses at the end of design period. Analysis indicated that several climatic zones for Poland should be considered for performance analysis both of flexible and rigid structures. The presented analysis can be the first stage on the way towards calibration of the M-EPDG models for Polish conditions and their adjustment to planning of maintenance treatments.

KEYWORDS: asphalt mixtures, axle load spectra, cement concrete, climatic data, flexible, M-EPDG, pavement design, pavement performance, rigid, semi-rigid, traffic load.

DOI: 10.7409/rabdim.019.019

[1)] Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Inżynierii Drogowej i Transportowej, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk; dawrys@pg.edu.pl (✉)
[2)] Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Inżynierii Drogowej i Transportowej, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk; pjask@pg.edu.pl
[3)] Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Inżynierii Drogowej i Transportowej, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk; mariusz.jaczewski@pg.edu.pl
[4)] Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Inżynierii Drogowej i Transportowej, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk; mpszczol@pg.edu.pl

1. WSTĘP

1.1. PODSTAWOWE ZAŁOŻENIA METODY

Od przeprowadzonego w USA w latach 60. testu drogowego AASHO większość metod projektowania konstrukcji nawierzchni bazowała na określeniu liczby równoważnych osi standardowych oraz takim doborze cech materiałowych i grubości warstw, aby zapewniona była nośność adekwatna do obciążenia ruchem wyrażonym w osiach standardowych. W większości krajów europejskich konstrukcje nowych nawierzchni projektuje się na podstawie katalogów. Większość z nich została opracowana z użyciem metod mechanistyczno-empirycznych, zawierających kryterium spękań zmęczeniowych propagujących od spodu warstw asfaltowych oraz kryterium deformacji podłoża gruntowego. Podejście stosowane w katalogach zakłada, że po upływie okresu projektowego nawierzchnie znajdą się w stanie krytycznym i będą wymagały odnowy. Takie podejście nie jest zgodne z rozwijanymi intensywnie w Europie systemami zarządzania stanem nawierzchni (PMS), zgodnie z którymi istotne jest prognozowanie zmian stanu nawierzchni w kolejnych latach eksploatacji celem zaplanowania prac utrzymaniowych i oszacowania potrzebnego budżetu.

Dokument *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide* (M-EPDG) – poradnik do projektowania konstrukcji nawierzchni) dostarczył narzędzia do przewidywania stanu konstrukcji nawierzchni. Opracowano go w USA w ramach *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) [1] wraz z towarzyszącym mu oprogramowaniem komputerowym AASHTOware. W przypadku nawierzchni podatnych poradnik M-EPDG przewiduje następujące kryteria trwałości nawierzchni: 1) końcowa wartość wskaźnika równości nawierzchni *International Roughness Index* (*IRI)*, 2) spękania zmęczeniowe warstw asfaltowych propagujące od góry, 3) spękania zmęczeniowe warstw asfaltowych propagujące od dołu, 4) spękania termiczne, 5) deformacje trwałe wszystkich warstw nawierzchni włącznie z podłożem gruntowym, 6) deformacje trwałe warstw asfaltowych. Kryteria trwałości dla nawierzchni sztywnych to: 1) końcowa wartość wskaźnika *IRI*, 2) klawiszowanie (średni uskok na szczelinach poprzecznych), 3) spękania płyt. Wprowadzone w M-EPDG hierarchiczne podejście do danych wejściowych pozwala uwzględnić lokalną specyfikę konstrukcji drogowych. Zasadniczo wyróżnia się trzy poziomy dokładności danych wejściowych:

- poziom 1 – dane zapewniają największą dokładność, a zatem obarczone są najniższym poziomem niepewności i błędu;

1. INTRODUCTION

1.1. FUNDAMENTAL ASSUMPTIONS OF THE METHOD

Since the AASHO road test in the 1960's most methods of pavement structure design were based on determination of the number of equivalent standard axle loads (ESALs) and determination of material properties and layer thicknesses to ensure bearing capacity adequate to the applied traffic load. In most European countries new pavement structures are designed on the basis of catalogues. Most catalogues were developed using mechanistic-empirical methods which include fatigue bottom-up asphalt cracking criteria or sub-grade deformation criteria. The approach used in catalogues assumes that after the design period pavements will reach critical conditions and rehabilitation treatment will be required. Such approach is incompatible with Pavement Management Systems (PMS) which are currently being intensively developed in Europe. It is necessary to predict how the condition of pavement structures will change in the following years of service in order to plan pavement maintenance treatment and estimate the required budget.

The Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide M-EPDG delivered a tool for prediction of pavement structure condition. The M-EPDG was established in the USA for National Cooperative Highway Research Program NCHRP [1] and, as a result of this research programme, the software AASHTOware was developed. In the case of flexible pavements the M-EPDG provides the following performance criteria: 1) Terminal International Roughness Index (*IRI*), 2) Top-down fatigue cracks of asphalt layers, 3) Bottom-up fatigue cracks of asphalt layers, 4) Thermal cracks, 5) Permanent deformation – total for the entire pavement, 6) Permanent deformation of asphalt layers only. The performance criteria provided for rigid pavements are as follows: 1) Terminal *IRI*, 2) Faulting (average unevenness of transverse joints) and 3) Slab cracking. The hierarchical approach to design inputs introduced in the M-EPDG allows to take into consideration the local specificity of pavement structures. In general, three levels of inputs are provided:

- Level 1 inputs provide the highest level of accuracy and, thus, would have the lowest level of uncertainty or error;
- Level 2 inputs provide the intermediate level of accuracy;
- Level 3 (default) inputs provide the lowest accuracy and the calculations are performed on the basis of default values determined for American conditions.

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

- poziom 2 – dane zapewniają średni poziom dokładności;
- poziom 3 (domyślny) – dane zapewniają najniższą dokładność, a obliczenia są wykonywane na podstawie domyślnych wartości określonych w warunkach amerykańskich.

Biorąc pod uwagę, że metoda została opracowana dla materiałów oraz warunków klimatycznych i ruchowych typowych dla USA, a kalibrowana była na odcinkach testowych LTPP zlokalizowanych w Ameryce Północnej, metoda M-EPDG oraz oprogramowanie AASHTOware nie stanowią gotowych narzędzi nadających się do bezpośredniego wdrożenia w krajach europejskich. Pomimo licznych doniesień o zastosowaniu metody M-EPDG w USA i Kanadzie, wciąż brak w literaturze opisów doświadczeń z zastosowań tej metody w Europie. Przede wszystkim, aby przeprowadzić analizę zgodnie z M-EPDG na 1 poziomie dokładności, należy pozyskać lokalne dane wejściowe dotyczące ruchu, warunków klimatycznych oraz właściwości materiałów. Niniejszy artykuł ma na celu odniesienie się do tej potrzeby.

1.2. CEL BADAŃ

Głównym celem artykułu jest omówienie zastosowania i ocena przydatności metody M-EPDG oraz oprogramowania AASHTOware do analizy trwałości nowych nawierzchni podatnych i sztywnych zaprojektowanych zgodnie z polskimi katalogami typowych konstrukcji nawierzchni. W tym celu określono i zastosowano w procedurze M-EPDG dane projektowe odpowiadające polskim realiom, w tym uwzględniające warunki ruchowe i klimatyczne oraz właściwości stosowanych materiałów.

2. POLSKIE KATALOGI TYPOWYCH KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI ORAZ WYMAGANIA DOTYCZĄCE TRWAŁOŚCI NAWIERZCHNI

Katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych [2] oraz Katalog typowych konstrukcji nawierzchni sztywnych [3] są oficjalnymi dokumentami przeznaczonymi do projektowania nowych nawierzchni asfaltowych i betonowych w Polsce. Metodologia projektowania konstrukcji nawierzchni według katalogów jest oparta na wyliczeniu liczby równoważnych osi standardowych 100 kN w całym okresie projektowym. Katalog definiuje siedem kategorii ruchu – wyrażonych liczbą osi standardowych – od najniższej KR1 po najwyższą KR7. W przypadku nawierzchni podatnych i półsztywnych minimalny okres projektowy wynosi 30 lat dla autostrad/dróg ekspresowych oraz 20 lat dla pozostałych dróg. Dla nawierzchni sztywnych wynosi on 30 lat. Konstrukcje

Due to the fact that the method was developed for materials, climate and traffic conditions valid for the USA and was calibrated at LTPP test sections constructed in North America, the M-EPDG and AASHTOware is not a ready-made tool for direct implementation in European countries. In spite of many cases of implementation of the M-EPDG method in the USA and Canada there is still a lack of literature about experience from implementation of M-EPDG in European countries. To perform the analysis in accordance with the M-EPDG at Level 1 it is necessary to determine specific inputs valid for the local traffic, environmental conditions and material properties first. The paper aims to meet this necessity.

1.2. THE AIM OF INVESTIGATION RESEARCHES

The main goal of the paper is to implement and evaluate the M-EPDG and the software AASHTOware to analyse the performance of new flexible and rigid pavements designed according to the Polish catalogues of typical pavement structures. For this purpose the design data input corresponding to Polish conditions, including traffic, environment and material properties, were determined and implemented into M-EPDG protocol.

2. POLISH CATALOGUES OF TYPICAL PAVEMENT STRUCTURES AND PAVEMENT PERFORMANCE REQUIREMENTS

The Catalogue of Typical Flexible and Semi-Rigid Pavements [2] and Catalogue of Typical Rigid Pavements [3] are the official documents for the new asphalt and Portland cement concrete pavements designed in Poland. The methodology of pavement design in the catalogues is based on calculation of the number of equivalent standard axle loads (ESALs) of 100 kN in the design period. The catalogues define seven traffic categories – in terms of ESALs – from the lowest KR1 to the heaviest KR7. The minimum design period in the case of flexible and semi-rigid pavements equals 30 or 20 years, for motorways/express ways and for other roads respectively, and equals 30 years for rigid pavements. In the catalogues pavement structures are divided into upper and lower courses which are designed separately.

The catalogues present 14 different systems of lower courses of pavement. Some typical arrangements (types 4, 9 and 13) for the sub-grade classified into group G4 (the weakest) are presented in Fig. 1. In further analysis the systems given in Fig. 1 were assumed for all cases of

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

nawierzchni w katalogach podzielone są na warstwy górne i warstwy dolne nawierzchni, które projektuje się oddzielnie.

Katalogi przedstawiają 14 przypadków różnych układów dolnych warstw nawierzchni. Niektóre spośród typowych rozwiązań (typy 4, 9 i 13) przy podłożu gruntowym zaklasyfikowanym do grupy nośności G4 (najsłabsze podłoże) przedstawiono na Rys. 1. Układy dolnych warstw widoczne na Rys. 1 przyjęto w dalszej analizie dla wszystkich wariantów konstrukcji. Grubości górnych warstw typowych konstrukcji nawierzchni przedstawiono w Tabl. 1. Do dalszej analizy przyjęto nawierzchnię podatną typu A1 oraz nawierzchnie sztywne typu III i IV, jako konstrukcje powszechnie stosowane w praktyce.

structures. The thicknesses of the upper courses of typical pavement structures are presented in Table 1 and for further analysis the type A1 in the case of flexible and type III and IV in the case of rigid pavements were assumed for analysis as the structures commonly used in practice.

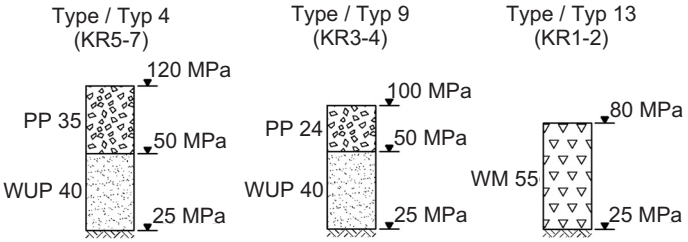

Fig. 1. Selected typical arrangements (types 4, 9 and 13) of the lower courses of pavement for G4 bearing capacity class of sub-grade (PP – sub-base with CBR ≥ 60%, WM – capping layer with CBR ≥ 25%, WUP – improved sub-grade layer with CBR ≥ 20%, all made from unbound material)
Rys. 1. Wybrane typowe warstwy dolne nawierzchni (typ 4, 9 i 13) dla podłoża o grupie nośności G4 (PP – podbudowa pomocnicza z CBR ≥ 60%, WM – warstwa mrozoochronna z CBR ≥ 25%, WUP – warstwa ulepszonego podłoża z CBR ≥ 20%, wszystkie z materiału niezwiązanego)

Table 1.Thicknesses of the upper courses of typical pavement structures given in the Polish catalogues
Tablica 1. Grubości górnych warstw typowych konstrukcji nawierzchni podane w polskich katalogach

Type Typ	Type of pavement Rodzaj nawierzchni	Pavement course Warstwa nawierzchni	Thickness of the upper courses of pavement Grubości górnych warstw nawierzchni [cm]						
			Traffic category / Kategoria ruchu						
			KR1	KR2	KR3	KR4	KR5	KR6	KR7
A1	Flexible Podatna	Asphalt layers Warstwy asfaltowe	9	12	16	20	24	28	30
		Crushed aggregate base Podbudowa z mieszanki niezwiązanej $C_{90/3}$	20	20	20	20	20	20	20
A2	Flexible Podatna	Asphalt layers Warstwy asfaltowe	9	12	16	20	24	28	30
		Crushed aggregate base Podbudowa z mieszanki niezwiązanej $C_{50/30}$	22	22	22	22	22	22	22
A3	Flexible Podatna	Asphalt layers Warstwy asfaltowe	9	12	–	–	–	–	–
		Crushed aggregate base Podbudowa z mieszanki niezwiązanej C_{NR}	25	25	–	–	–	–	–
B	Flexible Podatna	Asphalt layers and base (full depth pavement) Warstwy asfaltowe włącznie z podbudową asfaltową	14	18	22	26	30	34	36
C	Semi-rigid Półsztywna	Asphalt layers Warstwy asfaltowe	9	11	15	18	20	22	24
		Hydraulically-bound base Podbudowa z mieszanki związanej spoiwem hydraulicznym	18	20	20	22	22	24	24

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

Table 1 (cont.).Thicknesses of the upper courses of typical pavement structures given in the Polish catalogues
Tablica 1 (cd.). Grubości górnych warstw typowych konstrukcji nawierzchni podane w polskich katalogach

Type Typ	Type of pavement Rodzaj nawierzchni	Pavement course Warstwa nawierzchni	Thickness of the upper courses of pavement Grubości górnych warstw nawierzchni [cm]						
			Traffic category / Kategoria ruchu						
			KR1	KR2	KR3	KR4	KR5	KR6	KR7
D	Semi-rigid Półsztywna	Asphalt layers Warstwy asfaltowe	9	11	–	–	–	–	–
		Hydraulically treated soil base Podbudowa z gruntu stabilizowanego spoiwem hydraulicznym	18	20	–	–	–	–	–
E	Flexible Podatna	Asphalt layers Warstwy asfaltowe	8	12	12	16	–	–	–
		Mineral/cement/emulsion/ foam bitumen base Podbudowa z MCE lub mieszanki mineralnej z asfaltem spienionym	15	15	20	20	–	–	–
I	Rigid Sztywna	Cement concrete Beton cementowy	22	24	25	36	–	–	–
		Crushed aggregate base $C_{50/30}$ Podbudowa z mieszanki niezwiązanej	30	30	32	32	–	–	–
I	Rigid Sztywna	Cement concrete Beton cementowy	22	24	25	26	28	30	32
		Crushed aggregate base $C_{90/3}$ Podbudowa z mieszanki niezwiązanej	28	28	30	30	30	30	30
II	Rigid Sztywna	Cement concrete Beton cementowy	19	20	21	23	25	27	29
		Asphalt base / Podbudowa asfaltowa	8	8	8	8	10	10	10
III	Rigid Sztywna	Cement concrete Beton cementowy	–	–	–	23	25	27	29
		Cement treated base Podbudowa z mieszanki związanej spoiwem hydraulicznym	–	–	–	20	20	18	20
IV	Rigid Sztywna	Cement concrete Beton cementowy	18	19	22	–	–	–	–
		Cement treated soil base Podbudowa z gruntu stabilizowanego spoiwem hydraulicznym	18	18	18	–	–	–	–

Notes / Objaśnienia:
$C_{90/3}$ – 90% of crushed aggregate and 3% rounded / 90% ziaren przekruszonych lub łamanychi 3% całkowicie zaokrąglonych
$C_{50/30}$ – 50% of crushed aggregate and 30% rounded /50% ziaren przekruszonych lub łamanych i 30% całkowicie zaokrąglonych
C_{NR} – no requirements; it means that 100% rounded aggregate is approved / bez wymagań, tzn.dopuszcza się 100% ziaren zaokrąglonych

Sieć głównych dróg w Polsce jest regularnie inwentaryzowana i oceniana pod względem stanu nawierzchni; używa się w tym celu systemu DSN (Diagnostyka Stanu Nawierzchni) [4]. Parametry przedstawione w Tabl. 2 stosowane są w systemie DSN celem zaklasyfikowania ogólnego stanu nawierzchni do jednej z czterech klas, co pozwala zaplanować prace utrzymaniowe na sieci drogowej. Biorąc pod uwagę, że katalogi nie zakładają robót utrzymaniowych w okresie projektowym, parametry stanu nawierzchni nie powinny osiągnąć wartości krytycznych w założonym okresie. Niemniej

The main road network in Poland is regularly measured and evaluated in terms of pavement condition and the system called Pavement Condition Diagnostics (DSN – acronym for the Polish words “Diagnostyka Stanu Nawierzchni”) is used for this purpose [4]. The parameters presented in Table 2 are used in the DSN system to classify general pavement condition into one of four classes in order to schedule the maintenance of road network. In fact, catalogues do not assume structural maintenance treatments during the design period, thus the pavement conditions should not reach

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

jednak, nie istnieje w Polsce żaden dokument, który koordynowałby projektowanie z diagnostyką nawierzchni i strategią prac utrzymaniowych.

the critical condition level during the assumed design period. However, there is no document in Poland which coordinates pavement design procedure with pavement diagnostic and maintenance strategy.

Table 2. Limits of pavement distresses used in the Polish system of Pavement Condition Diagnostics (DSN)
Tablica 2. Granice stanu uszkodzeń nawierzchni stosowane w Polskim systemie Diagnostyki Stanu Nawierzchni (DSN)

Limit of pavement distress Granica stanu uszkodzeń nawierzchni	Pavement condition / Stan nawierzchni			
	Good condition Stan dobry	Acceptable condition Stan zadowalający	Poor condition, pavement treatment to be planned in near future Stan niezadowalający, planowanie zabiegów utrzymaniowych	Critical condition, pavement treatment required promptly Stan krytyczny, niezbędne niezwłoczne interwencje
Flexible and rigid pavements / Nawierzchnie podatne i sztywne				
IRI – high technical road classes A, S, GP [m/km] wysokie klasy dróg A, S, GP	< 2.0	2.0 ÷ 4.3	4.3 ÷ 5.7	> 5.7
IRI – medium and low technical road classes G, Z, L, D [m/km] średnie i niskie klasy dróg G, Z, L, D	< 3.0	3.0 ÷ 5.0	5.0 ÷ 6.6	> 6.6
Flexible pavements / Nawierzchnie podatne				
Permanent deformation – total pavement [mm] Deformacja trwała – cała nawierzchnia	< 10	10 ÷ 20	20 ÷ 30	> 30
Percent of cracked lane area or lane area covered by patches [%] Procent powierzchni spękanej lub pokrytej łatami	< 1	1 ÷ 5	5 ÷ 10	> 10
Rigid pavements / Nawierzchnie sztywne				
Percent of cracked slabs [%] Procent spękanych płyt	< 1	1 ÷ 23	23 ÷ 35	> 35

Notes / Objaśnienia:
A – motorways / autostrady, S – expressways/ drogi ekspresowe, GP/G – main roads / drogi główne, Z – collecting roads / drogi zbiorcze, L – local roads / drogi lokalne, D – access roads / drogi dojazdowe

3. OKREŚLENIE DANYCH WEJŚCIOWYCH DO METODY M-EPDG

3.1. PARAMETRY RUCHU

Metoda M-EPDG nie charakteryzuje ruchu drogowego za pomocą współczynników równoważności osi. Główne dane wejściowe opisujące obciążenie ruchem to: średni dobowy ruch w roku, struktura rodzajowa ruchu wg klas pojazdów oraz rozkłady obciążeń osi. Do pozostałych parametrów niezbędnych do opisania ruchu należą: liczba osi na pojazd, rozstaw osi, miesięczne i godzinowe współczynniki korekcyjne rozkładu natężeń. Wszystkie powyższe elementy określono na podstawie danych ze stacji ważenia pojazdów w ruchu (WIM) lub badania parametrów technicznych pojazdów [5]. Pomiędzy USA a Europą zachodzą znaczne różnice w konfiguracji osi oraz obciążeniach pojazdów. Badania przeprowadzone

3. DETERMINATION OF DESIGN INPUTS FOR M-EPDG

3.1. TRAFFIC INPUT DATA

The M-EPDG does not use Load Equivalency Factors to characterize traffic load. The main inputs which characterize traffic load are: the Annual Average Daily Traffic (AADT), vehicle class distribution and axle load spectra. Other parameters required to describe traffic characteristics include the number of axles per vehicle, axle spacing, monthly and hourly adjustment factors. All of them were determined on the basis of data from a weigh-in-motion (WIM) station or on the basis of the study of technical parameters of vehicles [5]. Vehicle axle configuration and traffic loads in the USA and Europe differ significantly. Studies performed by Zofka et al. [6] showed that vehicles

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

przez Zofkę i in. [6] pokazały, że pojazdy europejskie są bardziej agresywne niż amerykańskie ze względu na wyższe dopuszczalne obciążenia osi (do 115 kN na oś pojedynczą) oraz powszechniejsze stosowanie opon typu *super single*.

Do analizy przedstawionej artykule przyjęto dane pozyskane ze stacji ważenia pojazdów zlokalizowanej na drodze krajowej nr 46 (50,691619N; 18,236918E). Dane zbierane od 2011 do 2016 roku obejmują 2,3 miliona pojazdów. Stacja ważenia pojazdów w ruchu usytuowana na DK46 została uznana za reprezentatywne źródło rozkładów obciążeń osi dla Polski, zapewniające wysoką dokładność pomiaru [7]. Przykładowe rozkłady obciążeń osi pojedynczych, podwójnych i potrójnych uzyskane dla najpowszechniejszej klasy pojazdu 9 (zgodnie ze stosowaną w metodzie klasyfikacją pojazdów wg FHWA [1]) przedstawiono na Rys. 2 w zestawieniu z domyślnymi rozkładami obciążeń osi zawartymi w AASHTOware. Jak widać, w Polsce występuje znacznie wyższy odsetek cięższych osi.

in Europe are more aggressive than US vehicles due to higher legal axle loads (up to 115 kN per single axle) and more common usage of super single tires.

For the analysis presented in this paper data from the WIM station on national route DK46 (50.691619N, 18.236918E) were assumed. The data, obtained for the period from the year 2011 to 2016, include 2.3 million vehicles. The WIM station DK46 was selected to represent axle load spectra for Poland and ensure high accuracy of measurements [7]. Example axle load spectra for single, tandem and tridem axles obtained for the most common vehicle class 9 (acc. to FHWA vehicle classification [1]) are given in Fig. 2 and they are compared to default axle load spectra used in AASHTOware. It is visible that a significantly higher percentage of heavier axles occurs in Poland.

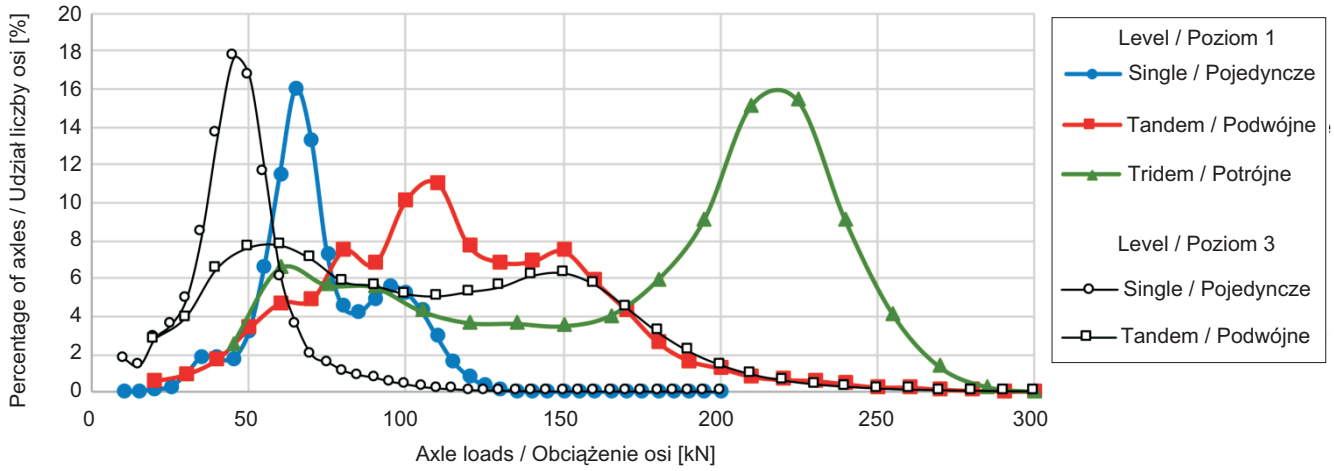

Fig. 2. Example of axle load spectra for vehicle class 9, representing 5-axle trucks with trailer or semi-trailer; comparison of data for Level 1 and 3

Rys. 2. Przykładowe spektra obciążenia osi dla klasy pojazdów 9, reprezentowanej przez 5-osiowe ciągniki siodłowe z naczepami; porównanie danych dla poziomu 1 i 3

Przedstawiony w Tabl. 3 średni dobowy ruch w roku *SDR* przyjęty do dalszej analizy był identyczny dla nawierzchni podatnych i sztywnych w poszczególnych kategoriach ruchu, od KR1 do KR7. Kategorie określono na podstawie łącznej liczby osi standardowych w okresie projektowym. Liczba osi standardowych przedstawiona w Tabl. 3 została wyliczona zgodnie z metodologią przedstawioną w obu polskich katalogach, z uwzględnieniem odmiennych współczynników równoważności osi dla nawierzchni sztywnych i podatnych. Pozostałe dane wejściowe widoczne w Tabl. 3 zostały przyjęte jako reprezentatywne dla danej kategorii ruchu. Tabl. 4 przedstawia przyjęte dane dotyczące struktury i wzrostu ruchu.

The annual average daily traffic *AADT* was the same for flexible and rigid pavements in particular traffic load categories from KR1 to KR7 and it is presented in Table 3. Traffic categories were determined on the basis of the total number of ESALs in a design period. The numbers of ESALs presented in Table 3 were calculated according to methodology given in both Polish catalogues, including different load equivalency factors for rigid and flexible pavements. The remaining design inputs presented in Table 3 were assumed to represent reasonable values in a given traffic load category. Table 4 presents the assumed traffic-specific inputs. Average numbers of axles per truck

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

Średnie liczby osi przypadające na pojazd wyznaczono na podstawie danych ze stacji ważenia (WIM) na DK46. Struktura rodzajowa ruchu została przyjęta na podstawie analizy danych z WIM oraz przeciętnej struktury ruchu pochodzącej z Generalnego Pomiaru Ruchu 2015.

were calculated on the basis of the data from the WIM station located on national route DK46. Vehicle class distribution was assumed on the basis of analysis of WIM data and the average vehicle class distribution delivered from the 2015 General Traffic Measurement.

Table 3. Design inputs assumed for particular traffic load categories
Tablica 3. Dane projektowe przyjęte dla poszczególnych kategorii ruchu

Traffic load category Kategoria ruchu	Traffic load in 10^6 100 kN ESALs Obciążenie ruchem w mln 100 kN osi standardowych		*AADT* per design lane *SDR* na pas obliczeniowy	Design period Okres projektowy [years / lata]		Assumed design lane width Przyjęta szerokość obliczeniowego pasa [m]	Assumed operational speed Przyjęta prędkość [km/h]
	Flexible Podatne	Rigid Sztywne		Flexible Podatne	Rigid Sztywne		
KR1	0.05	0.13	5	20	30	2.75	50
KR2	0.23	0.67	25	20	30	2.75	50
KR3	2.17	6.26	250	20	30	3.00	60
KR4	6.1	17.5	700	20	30	3.00	60
KR5	21.3	33.1	1400	30	30	3.50	80
KR6	51.7	80.3	3400	30	30	3.50	80
KR7	83.7	129.9	5500	30	30	3.75	80

Table 4. Traffic-specific inputs concerning class distribution and traffic growth determined for M-EPDG analysis
Tablica 4. Dane wejściowe dotyczące struktury i wzrostu ruchu drogowego przyjęte do analizy M-EPDG

Vehicle type Rodzaj pojazdu	Vehicle class FHWA Klasa pojazdu wg FHWA	Axles per truck [-] Liczba osi na pojazd			Vehicle class distribution [%] Struktura rodzajowa			Compound traffic growth [%] Procentowy wzrost ruchu
		Single Pojedyncze	Tandem Podwójne	Tridem Potrójne	KR1-KR2	KR3-KR5	KR5-KR7	
Busses / Autobusy	4	1.85	0.15	0	5	4	2	1
2 axle single truck units 2 osiowe ciężarowe, pojedyncze	5	2	0	0	60	40	10	1
3 axle single truck units 3 osiowe ciężarowe, pojedyncze	6	1	1	0	5	8	6	1
4 axle single truck units 4 osiowe ciężarowe, pojedyncze	7	0	2	0	5	8	2	1
3 or 4 axle trucks with trailers 3 lub 4 osiowe ciężarowe z przyczepą	8	2.15	0.9	0	10	13	10	4
5 axle trucks with trailers 5 osiowe ciężarowe z przyczepą	9	2	0.08	0.95	15	25	65	4
6 and more axle trucks with trailers 6 i więcej osi, ciężarowe z przyczepą	10	1.35	1.35	0.65	0	2	5	4

3.2. DANE KLIMATYCZNE

Polska leży w strefie klimatu umiarkowanego ciepłego przejściowego, charakterystycznego dla regionu Europy Środkowej. Dane klimatyczne niezbędne do wykonania analiz za pomocą M-EPDG zostały pozyskane z Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej (IMGW). W zakres danych wchodziła temperatura powietrza, prędkość wiatru, opady, wilgotność i nasłonecznienie, rejestrowane co godzinę w okresie od

3.2. CLIMATIC INPUT DATA

Poland is located in temperate warm transitional climate zone characteristic for Central Europe region. The environmental data required to perform analyses in the M-EPDG were obtained from the Institute of Meteorology and Water Management (IMGW). The data include air temperature, wind speed, precipitation, humidity and sunshine, recorded hourly in the period from January 1, 1994

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

1 stycznia 1994 roku do 31 grudnia 2017 roku. Te same dane były wykorzystane we wcześniejszych badaniach przez Pszczołę i in. [8] do wyznaczenia w Polsce stref klimatycznych na potrzeby doboru asfaltu wg rodzaju funkcjonalnego PG.

IMGW zarządza blisko 70 stacjami meteorologicznymi w całej Polsce, przy czym na potrzeby niniejszej analizy wybrano 4 stacje reprezentujące odmienne warunki klimatyczne występujące na terenie kraju. Stacje oznaczono nazwami miast, w których się znajdują:

– Białystok reprezentuje klimat z ostrymi zimami (Polska Wschodnia),
– Wrocław reprezentuje klimat z gorącymi latami (Polska Południowo-Zachodnia),
– Koszalin reprezentuje klimat o łagodnych latach i zimach, pozostający głównie pod wpływem Morza Bałtyckiego (Polska Północna),
– Łódź reprezentuje umiarkowane warunki klimatyczne (Polska Centralna).

Zestawienie warunków klimatycznych odnotowanych w przypadku poszczególnych stacji przedstawiono w Tabl. 5.

to December 31, 2017. The same data were used in previous studies performed by Pszczoła et al. [8] to determine Performance Grade climatic zones for bitumen.

The IMGW institute administers almost 70 meteorological stations around Poland and for the analysis presented in this paper 4 meteorological stations were selected to represent different climatic conditions in Poland. Stations are named after the cities in which they are located:

– Białystok represents severe cold winter conditions (Eastern Poland),
– Wrocław represents hot summer conditions (South-Western Poland),
– Koszalin represents mild winter and summer conditions that are mainly influenced by the Baltic Sea (Northern Poland),
– Łódź represents moderate environmental conditions (Central Poland).

The climate summary for particular stations is given in Table 5.

Table 5. Summary of climatic conditions for meteorological stations used in the analysis
Tablica 5. Zestawienie warunków klimatycznych dla wybranych stacji meteorologicznych wykorzystanych w analizie

IMGW Station (city name) Stacja IMGW (miasto)		Wrocław	Białystok	Koszalin	Łódź
Latitude Szerokość geograficzna	[deg.]	N 51.109	N53.124	N 54.188	N 51.756
Longitude Długość geograficzna	[deg.]	E 17.036	E 23.154	E 16.176	E 19.444
Mean annual air temperature Średnia roczna temperatura powietrza	[°C]	9.6	7.6	8.8	8.7
Mean annual precipitation Średnia roczna suma opadów	[mm]	545.0	601.6	780.4	587.4
Freezing index Indeks mrozowy	[°C · days] [°C · dni]	191.6	388.2	160.2	266.9
Average annual number of freeze/thaw cycles Średnia roczna liczba cykli zamarzania-odmrażania	[-]	71.3	68.0	49.9	61.4
Number of wet days Liczba dni deszczowych	[-]	156.5	163.9	178.1	165.2

3.3. WŁAŚCIWOŚCI MATERIAŁÓW

Założono, że właściwości materiałów odpowiadają właściwościom przyjętym podczas projektowania typowych konstrukcji nawierzchni na potrzeby polskich katalogów, opisanym szczegółowo w [2, 3, 9]. Wybrane właściwości warstw asfaltowych i niezwiązanych przedstawiono w Tabl. 6. Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie podaną w Tabl. 6, jak

3.3. MATERIAL PROPERTIES

It was assumed that properties of the materials correspond to properties assumed for design of typical pavement structures for the Polish catalogues, which are given in detail in [2, 3, 9]. The selected properties of asphalt layers and unbound layers are given in Table 6. The indirect tensile strength given in Table 6, creep compliance and master

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

również krzywe pełzania i krzywe wiodące mieszanek mineralno-asfaltowych (Rys. 3 i 4), przyjęto na podstawie wcześniejszego badania przeprowadzonego na Politechnice Gdańskiej [10, 11]. Jak widać, mieszanki stosowane w Polsce są w niskich temperaturach sztywniejsze niż mieszanki opisane wartościami domyślnymi (Rys. 3 i 4). Jest to spowodowane głównie użyciem dużo twardszego lepiszcza w typowej mieszance mineralno-asfaltowej oraz odmiennym składem mieszanki. Różnice te wynikają z bardzo wysokich polskich wymagań w zakresie odporności na koleinowanie.

curves of asphalt mixtures (Fig. 3 and 4) were assumed after the previous research performed at the Gdańsk University of Technology [10, 11]. It is visible that asphalt mixtures used in Poland are stiffer at low temperatures than mixtures described by the default values (Fig. 3 and 4). It is mainly caused by much harder bitumen used in typical asphalt mixtures and different composition of the mixture. These differences are the result of very high requirements in terms of rutting properties of the asphalt mixtures in Poland.

Table 6. Selected properties of asphalt layers
Tablica 6. Wybrane właściwości warstw asfaltowych

Layer / Warstwa	Mixture designation Oznaczenie mieszanki	Asphalt binder (EN standard and PG) Rodzaj asfaltu (wg EN i PG)	Air voids [%] Wolne przestrzenie	Effective binder content (v/v) [%] Zawartość asfaltu	Indirect tensile strength at –10°C [MPa] Wytrzymałość na pośrednie rozciąganie w temp. –10°C
Wearing course / Ścieralna	AC 11S KR1-2	50/70 (PG 64-22)	2.5	14	3.5
Binder course / Wiążąca	AC 16W KR1-2	50/70 (PG 64-22)	6	11	3.0
Wearing course / Ścieralna	SMA 11 KR 3-7	45/80-55 (PG 76-22)	3	16	4.1
Binder course / Wiążąca	AC 16W KR 3-7	35/50 (PG 70-22)	6	11	4.2
Asphalt base / Podbudowa	AC 22P KR 3-7	35/50 (PG 70-22)	7	10	5.1

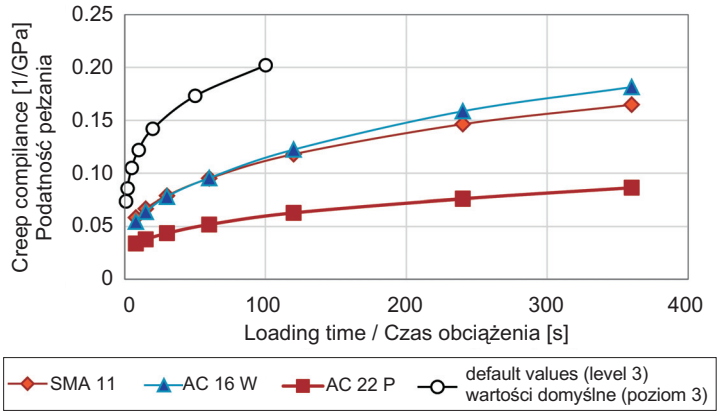

Fig. 3. Example of creep compliance at -10°C for asphalt mixtures designed acc. to Polish standards (Level 1) in comparison with default creep compliance curve (Level 3), mixtures tested acc. to procedure [12]
Rys. 3. Przykład krzywej pełzania w temperaturze -10°C dla mieszanek mineralno-asfaltowych zaprojektowanych zgodnie z polskimi wymaganiami (poziom 1) w porównaniu do domyślnej krzywej pełzania (poziom 3), mieszanki badane wg procedury opisanej w [12]

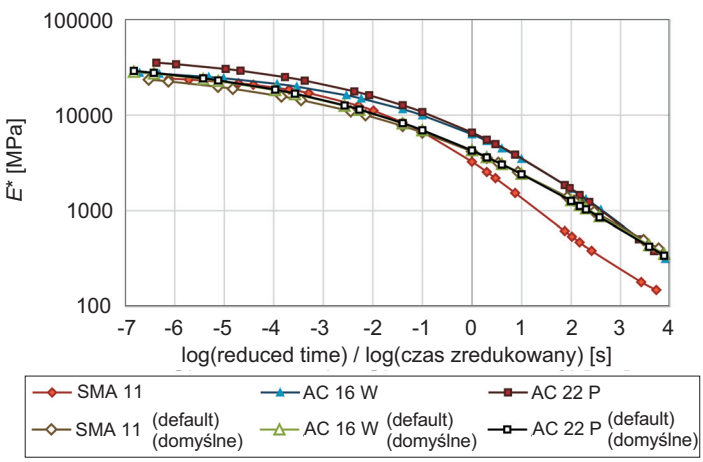

Fig. 4. Example of master curves for asphalt mixtures designed acc. to Polish standards (Level 1) in comparison with default master curves (Level 3), mixtures tested acc. to procedure [13]
Rys. 4. Przykład krzywych wiodących dla mieszanek mineralno-asfaltowych zaprojektowanych według polskich wymagań (poziom 1) w porównaniu do domyślnych krzywych wiodących (poziom 3), mieszanki badane wg procedury opisanej w [13]

Parametry projektowe płyt z betonu cementowego oraz pozostałych materiałów związanych cementem przyjęto wg polskiego katalogu. Ich podsumowanie przedstawiono w Tabl. 7. Bardziej szczegółowe dane dotyczące materiałów związanych cementem zostały przedstawione w [14, 15].

The design properties of Portland cement concrete slabs and remaining cement treated materials were assumed in accordance with the Polish catalogue and they are summarized in Table 7. More detailed data concerning cement treated materials are given in [14, 15].

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

Table 7. Design properties of Portland cement concrete and cement treated base layers
Tablica 7. Parametry projektowe nawierzchni betonu cementowego oraz podbudowy związanej cementem

Layer Warstwa	Material Materiał	Traffic load category Kategoria obciążenia ruchem	28-day elastic modulus Moduł sprężystości po 28 dniach [MPa]	28-day tensile strength Wytrzymałość na rozciąganie po 28 dniach [MPa]
Portland cement concrete Beton cementowy	C35/45	KR5-7	34 500	5.5
	C30/37	KR1-4	32 500	4.5
Cement treated base Podbudowa związana cementem	C8/10	KR5-7	15 100	–
	C5/6	KR3-4	7 200	–
	C3/4	KR1-2	4 800	–

Nawierzchnie sztywne przeznaczone do obsługi ruchu lekkiego (KR1-2) są niedyblowane, zaś do ruchu średniego i ciężkiego (KR3-7) – dyblowane. Zgodnie z praktyką polską, założono średnicę dybla równą 25 mm oraz rozstaw dybli równy 250 mm. Dyble o zbliżonych średnicach stosowane są w Niemczech.

Tabl. 8 przedstawia wybrane właściwości podbudowy niższych warstw nawierzchni wykonanych z materiałów niezwiązanych, jak również podłoża. Analizy M-EPDG zostały przeprowadzone dla niekorzystnych warunków gruntowych (glina) i zwierciadła wody gruntowej zlokalizowanego 1,8 m poniżej dolnej płaszczyzny konstrukcji nawierzchni.

Rigid pavements for light traffic KR1-2 are undoweled, while for medium and high traffic KR3-7 they are doweled. Following the usual Polish practice, it was assumed that dowel diameter equals 25 mm and spacing between dowels equals 250 mm. Similar dowel diameters are used in Germany.

Table 8 presents selected properties of the base and lower courses, which are made of unbound materials and sub-grade. The M-EPDG analyses were performed for adverse sub-grade conditions (clay) and water-table 1.8 m below the bottom of the pavement structure.

Table 8. Selected properties of unbound layers and sub-grade
Tablica 8. Wybrane właściwości niezwiązanych warstw nawierzchni oraz podłoża gruntowego

Layer Warstwa	Material Materiał	CBR [%]	Elastic modulus [MPa] Moduł sprężystości	Liquid limit [%] Granica płynności	Plasticity index [%]/ Wskaźnik plastyczności
Unbound base Podbudowa z mieszanki niezwiązanej	Crushed aggregate 0/31.5 Kruszywo łamane 0/31,5	60 (KR1-2)	400	–	–
		80 (KR3-7)			
Sub-base Podbudowa pomocnicza	Natural aggregate 0/63 Kruszywo naturalne 0/63	60	250	–	–
Capping layer (Frost-protective layer) Warstwa mrozoochronna	Gravel Żwir	35	200	–	–
Capping layer Warstwa mrozoochronna	Sandy gravel Żwir piaszczysty	20	120	–	–
Sub-grade class G4 Podłoże z grupy G4	Clay/ Glina	2	27	26	15

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

4. ANALIZA TYPOWYCH NAWIERZCHNI POLSKICH Z UŻYCIEM METODY M-EPDG ZA POMOCĄ AASHTOware

4.1. USZKODZENIA WYBRANYCH NAWIERZCHNI PODATNYCH I SZTYWNYCH PO UPŁYWIE OKRESU PROJEKTOWEGO

Mimo, że polski Katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych zawiera liczne warianty konstrukcji, zdecydowanie najpopularniejszym rozwiązaniem dla nawierzchni podatnej jest konstrukcja typu A1 (Tabl. 1), w której warstwy asfaltowe leżą na podbudowie z kruszywa mineralnego o grubości 20 cm – stąd do dalszej analizy wybrano właśnie tę konstrukcję. Analogicznie, w przypadku nawierzchni sztywnych najpowszechniejsze są typy III i IV, z podbudową wykonaną z mieszanek związanych cementem. Niższe warstwy nawierzchni oraz ulepszone podłoże przyjęto jak w rozwiązaniach z niezwiązaną podbudową pomocniczą oraz/lub niezwiązaną warstwą mrozoochronną, co odpowiada następującym konstrukcjom z obu katalogów [2, 3]: typ 4 (KR5-7, Rys. 1), typ 9 (KR3-4) oraz typ 13 (KR1-2). Wszystkie dane wejściowe opisano w rozdziale 3. Rys. 5 i 6 przedstawiają podsumowanie uszkodzeń prognozowanych w analizie M-EPDG dla typowych polskich nawierzchni podatnych i sztywnych. W zestawieniu zawarto konstrukcje reprezentatywne dla każdej z kategorii ruchu, od KR1 do KR7. Wszystkie wykresy przedstawione na Rys. 5 i 6 odzwierciedlają stan nawierzchni na koniec okresu projektowego, który wynosi 20 lat w przypadku nawierzchni podatnych dla kategorii ruchu od KR1 do KR4 oraz 30 lat w przypadku pozostałych nawierzchni podatnych i wszystkich nawierzchni sztywnych. Zaprezentowano zarówno średnie prognozowane wartości parametrów stanu nawierzchni (przy poziomie niezawodności równym 50%), jak również wartości na poziomach niezawodności 70% oraz 90%. Poziom niezawodności można interpretować jako odsetek inwestycji, na których uszkodzenia wystąpią w wyliczonym lub niższym wymiarze. Przykładowo, poziom niezawodności równy 70% oznacza, że w 7 na 10 przypadków uszkodzenia osiągną co najwyżej wyliczone wartości. Według przewodnika AASHTO [1], zalecany poziom niezawodności wynosi 50% dla ruchu lekkiego i dróg lokalnych, 70% dla dróg zbiorczych oraz 90% dla dróg głównych, ekspresowych i autostrad. Poziomy stanu nawierzchni wg systemu DSN [4] są również zaznaczone na Rys. 5 i 6, o ile dany rodzaj uszkodzeń wyliczony przez M-EPDG posiada swoją analogię w systemie DSN. Należy zauważyć, że wszelkie prognozy uszkodzeń pochodzące z M-EPDG są dokonywane bez uwzględnienia ew. zabiegów utrzymaniowych, jak wymiana warstwy ścieralnej czy frezowanie płyt betonowych.

4. ANALYSIS OF POLISH TYPICAL STRUCTURES WITH THE USE OF M-EPDG METHOD

4.1. DISTRESSES OF SELECTED FLEXIBLE AND RIGID PAVEMENTS AFTER DESIGN PERIOD

The Polish Catalogue of Typical Flexible and Semi-Rigid Pavements includes numerous variants of pavement structures, but the type A1 (see Table 1) with asphalt layers laid on 20 cm of unbound base made from crushed aggregate is definitely the most common type of flexible pavement structure in Poland, thus it was selected for further analysis. Analogously, in the case of rigid pavements types III and IV with base made of cement treated mixtures are the most common. The lower courses of pavement and improved sub-grade layer were assumed as structure with unbound sub-base and/or unbound capping layer, representing the following structures from the catalogues [2, 3]: type 4 (KR5-7, see Fig. 1), type 9 (KR3-4) and type 13 (KR1-2). All design data inputs are described in section 3. Fig. 5 and 6 include the summary of the distresses predicted by the M-EPDG analysis of typical Polish flexible and rigid structures respectively. Representative structures for each of traffic load categories from KR1 to KR 7 are included. All charts presented in Fig. 5 and 6 represent pavement conditions at the end of design period, which equals 20 years for flexible pavement with traffic load categories from KR1 to KR4, and 30 years for the remaining flexible pavements and all the rigid pavements. Not only the mean predicted distress (50%), but also the distresses at 70% and 90% reliability levels are presented. The reliability level, in other words, expresses the percentage of projects which will result in a given or lower level of distresses. For example, the reliability equal to 70% means that 7 out of 10 projects will exhibit at most the calculated level of distresses. According to AASHTO guide [1] recommended reliability equals 50% for light traffic and local pavements, 70% for collecting roads and 90% for main roads and expressway/motorways. The pavement conditions limits according to the Polish DSN [4] system are also shown in Fig. 5 and 6, under assumption that a given type of pavement distress delivered from M-EPDG is also included in DSN. It should be noticed that all distresses predicted in M-EPDG do not include maintenance treatments like replacement of wearing course or grinding of concrete slabs.

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

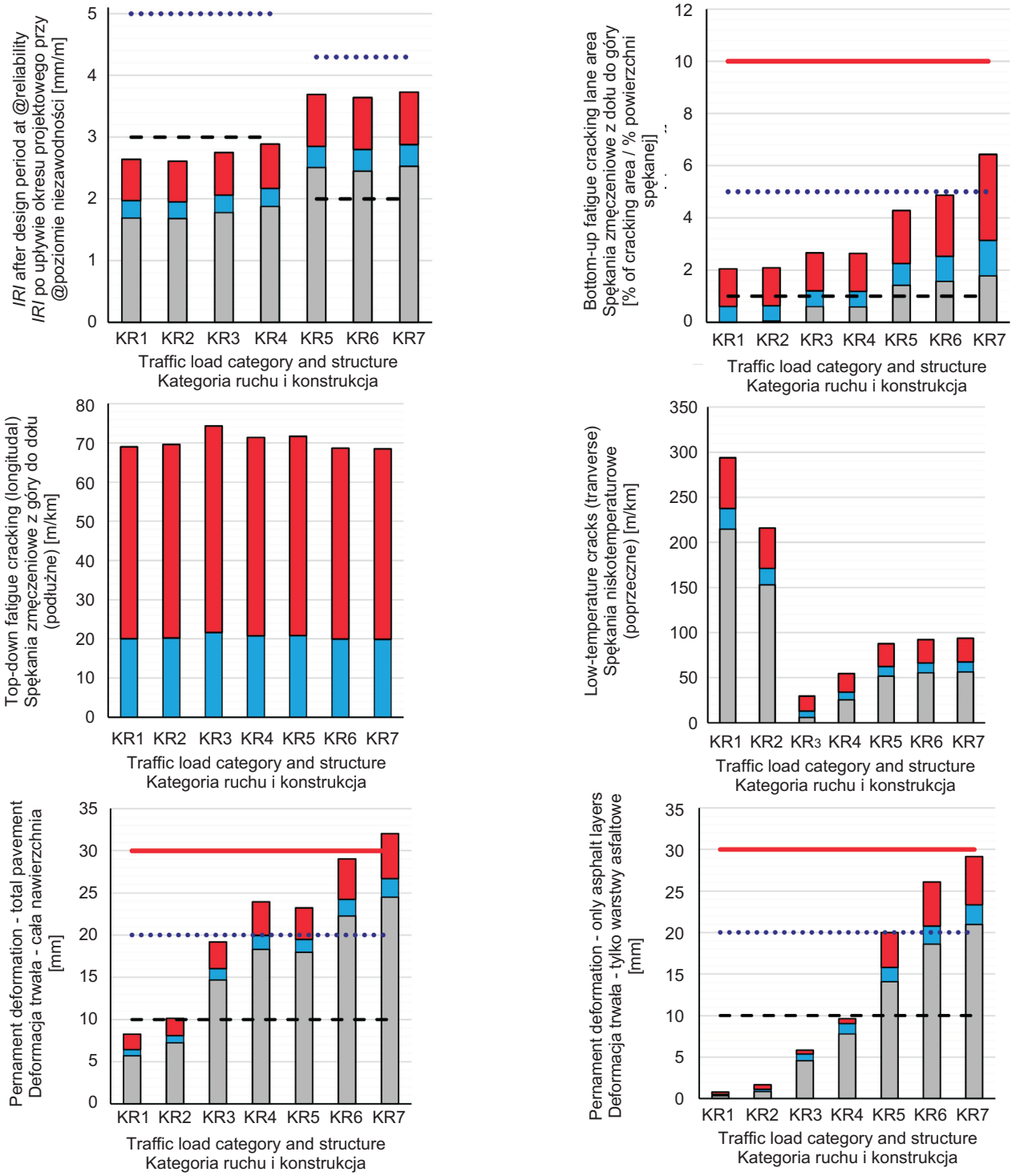

Fig. 5. Predicted distresses of typical flexible pavements after design period (20 or 30 years) atreliability 50%, 70% and 90%
Rys. 5. Prognozowane uszkodzenia nawierzchni podatnych po upływie okresu eksploatacji (20 lub 30 lat) i przy poziomie niezawodności 50%, 70% oraz 90%

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

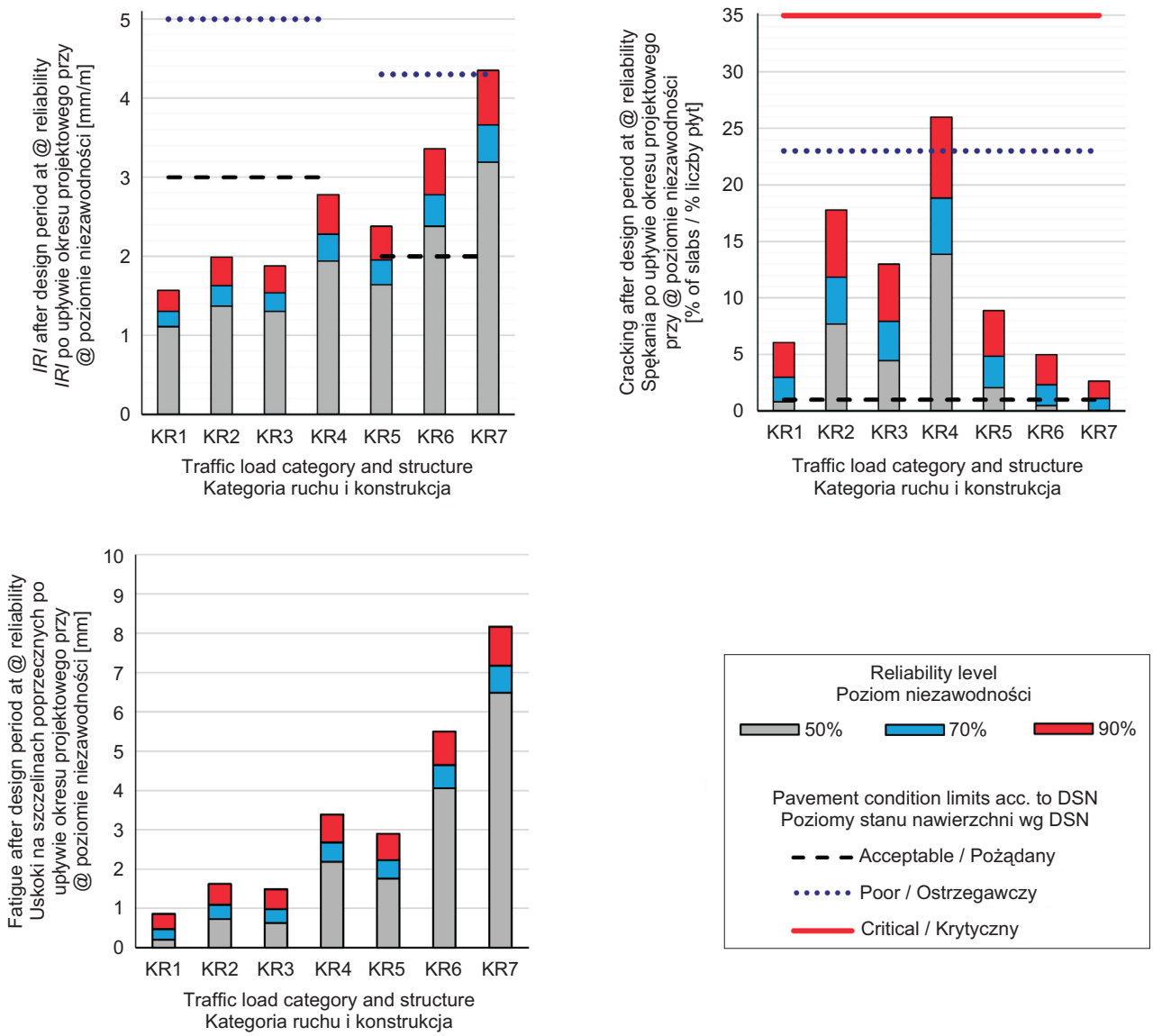

Fig. 6. Distresses of typical rigid pavements after 30-year design period at reliability of 50%, 70% and 90%
Rys. 6. Prognozowane uszkodzenia nawierzchni sztywnych po upływie okresu eksploatacji (30 lat) i przy poziomie niezawodności 50%, 70% oraz 90%

Prognozowane wartości parametrów stanu nawierzchni przedstawione na Rys. 5 i 6 świadczą o tym, że typowe konstrukcje zapewniają zadowalający stan nawierzchni w całym okresie projektowym. Czynnikami o bardzo dużym znaczeniu dla ogólnej trwałości nawierzchni wydają się być odkształcenia trwałe oraz spękania termiczne (Rys. 5). Wyrażony procentowo udział powierzchni spękanej ze względu na propagujące od spodu warstw asfaltowych spękania zmęczeniowe wynosił od 2% do 6,2%. Obliczony udział spękań jest niższy niż 10% przyjęty w metodologii kalibracji przedstawionej przez Judyckiego [17]. Wynika to z faktu, że w przypadku metody M-EPDG obliczenia uszkodzeń zmęczeniowych

The predicted distresses shown in Fig. 5 and 6 imply that typical structures ensure acceptable pavement condition during the whole design period. The permanent deformations and thermal cracking seem to have the major impact on overall flexible pavement performance (Fig. 5). The percentage of cracked lane area due to AC bottom-up fatigue cracking equals from 2% to 6.2%,which is a lower value than the 10% assumed in the calibration methodology presented by Judycki [17]. In the case of M-EPDG, fatigue damage calculations take into account varying axle load, pavement temperature conditions and material properties, while in previous mechanistic-empirical design

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

uwzględniają zmienne wartości obciążeń osi, temperatury nawierzchni oraz parametrów materiałów, podczas gdy dotychczasowe metody mechanistyczno-empiryczne zakładały stałe wartości obciążenia równoważnej osi standardowej, temperatury ekwiwalentnej oraz typowych parametrów materiałowych. Różnice w obu metodologiach prowadzą do nieco odmiennych wyników obliczeń. Spękania zmęczeniowe propagujące od góry są bardzo niewielkie przy poziomie niezawodności 50%, co oznacza, że może być konieczna dalsza kalibracja modelu. Przewidziane spękania niskotemperaturowe stanowią typowe uszkodzenie nawierzchni w przypadku cienkich konstrukcji dla kategorii ruchu KR1 i KR2, a wynikają z następujących czynników: 1) użycie asfaltów niemodyfikowanych w warstwie ścieralnej dla lekkiego ruchu (KR1-2), podczas gdy dla pozostałych kategorii stosuje się asfalty modyfikowane polimerami; 2) zjawisko przepływu ciepła w konstrukcji prowadzi do szybszego wychłodzenia cieńszych nawierzchni w okresie zimowym [18]. Jak widać na Rys. 5, deformacje trwałe cieńszych konstrukcji (dla kategorii od KR1 do KR4) wynikają głównie z odkształcenia podłoża i materiałów niezwiązanych, zaś w przypadku grubszych konstrukcji (kategorie KR5 do KR7) deformacje trwałe związane są z odkształceniami plastycznymi warstw asfaltowych.

W przypadku nawierzchni sztywnych głównym typem uszkodzenia cieńszych konstrukcji (KR1-KR4) jest pękanie płyt betonowych. Grubsze nawierzchnie z kolei są mniej narażone na pękanie, lecz bardziej podatne na klawiszowanie, które prowadzi do pogorszenia równości podłużnej. Problem uskoków na szczelinach poprzecznych wynika ze stosunkowo małej średnicy dybli stosowanych w Polsce (25 mm). Badania przeprowadzone w USA pokazały, że zastosowanie dybli o średnicach 32 mm lub 38 mm zwiększa odporność na klawiszowanie [19].

Spadek równości nawierzchni (wzrost wartości *IRI*) stanowi parametr, który można wykorzystać do porównania ogólnego stanu nawierzchni podatnych i sztywnych. Wartość *IRI* po upływie okresu projektowego nawierzchni dla ruchu lekkiego i średniego (KR1-KR4) mieści się w granicy wyznaczającej stan pożądany, a w przypadku nawierzchni dla ruchu ciężkiego mieści się w zakresie oznaczającym stan ostrzegawczy – z wyjątkiem nawierzchni sztywnej dla kategorii KR7, która osiągnęła stan krytyczny.

4.2. SPADEK RÓWNOŚCI NAWIERZCHNI PODATNYCH I SZTYWNYCH W KOLEJNYCH LATACH EKSPLOATACJI

Ze względu na możliwość stosowania różnych okresów projektowych w przypadku nawierzchni podatnych i sztywnych, approaches constant values of equivalent axle load, equivalent temperature and typical material properties were used. These differences in methodologies imply differences in calculation results. Top-down fatigue cracking is very low at 50% reliability and increases with reliability level, which means that the calculation model may require further calibration. The predicted low-temperature cracking is a typical pavement failure in the case of thin pavements for traffic load categories KR1 and KR2 and results from the following aspects: 1) neat bitumen is applied for wearing course for light traffic load categories KR1-2 while for remaining traffic load categories polymer modified bitumens are used, 2) the phenomenon of heat flow in pavement structure leads to faster cooling of thinner pavements during winter periods[18]. Fig. 5 shows that permanent deformation of thinner structures from KR1 to KR4 results mainly from deformation of sub-grade and unbound materials, while in the case of thick structures from KR5 to KR7 permanent deformations are mainly caused by plastic deformations of asphalt layers.

In the case of rigid structures the main distress of thinner structures (KR1-KR4) is cracking of concrete slabs. On the other hand, thicker structures are more resistant to cracking but more susceptible to faulting, which results in deterioration in longitudinal pavement evenness. The problem of faulting arises from relatively small diameter of dowels used in Poland (25 mm). The research conducted in the USA revealed that application of dowel bars with diameters of 32 or 38 mm increases resistance to faulting [19].

The loss of pavement evenness (increase in the *IRI* value) is a parameter that may be used to compare overall performance of flexible and rigid pavements. The value of *IRI* after design period for low and medium traffic load categories KR1-KR4 is within the limit of acceptable condition and for heavy traffic load categories it is within the limit indicating poor condition, except for the rigid structure for KR7 traffic.

4.2. INCREASE OF INFLEXIBLE AND RIGID PAVEMENT ROUGHNESS IN SUCCESSIVE YEARS

Because different design periods can be used for flexible and rigid pavements, the comprehensive comparison of deterioration process of structure expressed by the increase in *IRI* was performed for 40 years of analysis. The results are presented in Fig. 7. The initial *IRI* was assumed as 1.0 mm/m. The values of calculated *IRI* in consecutive 10-year periods till 40 years of service are presented

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

przeprowadzono szczegółową analizę postępującego przyrostu wskaźnika *IRI* w okresie 40 lat. Wyniki przedstawiono na Rys. 7. Za początkową wartość *IRI* przyjęto 1,0 mm/m. Wyliczone wartości *IRI* po kolejnych przedziałach 10-letnich, aż do osiągnięcia 40 lat eksploatacji, są zaprezentowane osobno dla nawierzchni sztywnych i podatnych. Przyrost *IRI* po założonym okresie projektowym zaznaczono kreskowaną częścią słupka.

separately for rigid and flexible pavements. The increase in *IRI* after the design period is marked by crosshatched series.

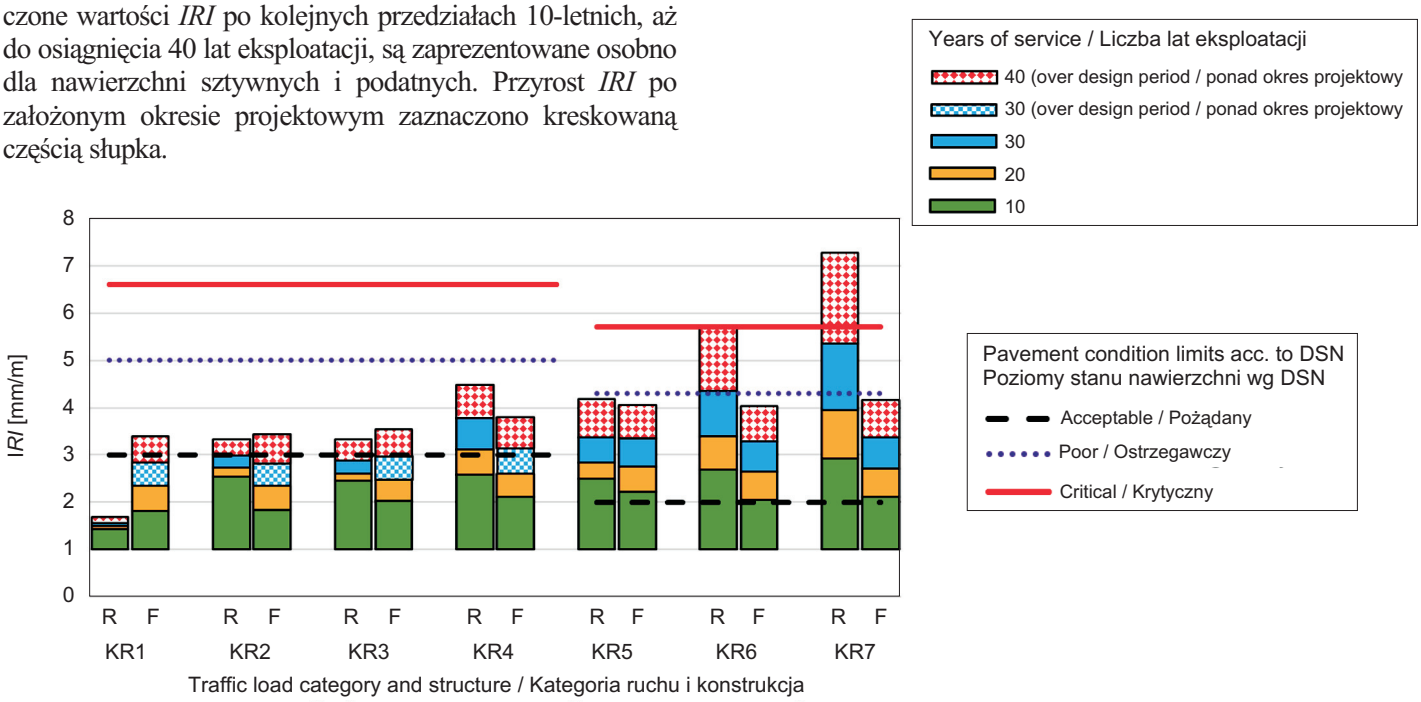

Fig. 7. Deterioration of pavement evenness (increase in *IRI*) in consecutive four decades at 90% reliability level for rigid (R) and flexible (F) pavements

Rys. 7. Pogorszenie równości podłużnej (wzrost *IRI*) w kolejnych czterech dekadach przy poziomie niezawodności 90% dla nawierzchni sztywnych (R) i podatnych (F)

Nawierzchnie sztywne wykazują dobrą trwałość w porównaniu do podatnych w przypadku konstrukcji dla bardzo lekkiego ruchu (KR1), lecz ze wzrostem obciążenia ruchem różnica ta zanika. Po 30 i 40 latach eksploatacji zarówno nawierzchnie podatne, jak i sztywne, wykazują zbliżony poziom *IRI* dla konstrukcji KR2, KR3 i KR5. W przypadku konstrukcji sztywnych dla kategorii ruchu KR4, KR6 i KR7 po 30 latach eksploatacji równość podłużna spada gwałtownie, co jest związane z klawiszowaniem. Tymczasem w analogicznym okresie spadek równości dla nawierzchni podatnych jest znacznie mniej intensywny.

4.3. WPŁYW WARUNKÓW KLIMATYCZNYCH NA PRZYROST USZKODZEŃ PODCZAS OKRESU PROJEKTOWEGO I PO JEGO ZAKOŃCZENIU

Analizy przedstawione na Rys. 5-7 przeprowadzono dla umiarkowanych warunków klimatycznych, odwzorowanych przez zapisy stacji meteorologicznej w Łodzi. W celu określenia wpływu lokalnych warunków klimatycznych na wyliczone wartości uszkodzeń, poddano analizie konstrukcje

Rigid structures exhibit good performance for the low-volume structure (KR1) in comparison to flexible pavements, however with increase in traffic load the difference decreases. After 30 and 40 years of service both rigid and flexible pavements exhibit similar level of roughness for structures KR2, KR3 and KR5. In the case of rigid structures for traffic load category KR4, KR6 and KR7 after 30 years of design life longitudinal roughness increases rapidly, which is caused by faulting, while the analogous increment for flexible pavements is much less intensive.

4.3. EFFECT OF CLIMATIC CONDITIONS ON INCREASE IN PAVEMENT DISTRESSES DURING AND AFTER DESIGN PERIOD

Analyses presented in Fig. 5-7 were performed for moderate climatic conditions represented by station Łódź. In order to evaluate the impact of local climatic conditions on calculated distresses, structures for moderate traffic load category KR4 and for four various weather stations were assumed. The selected stations are described in details in section 3.2. In the case of flexible pavements results of

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

nawierzchni dla kategorii ruchu KR4, przyjmując dane z czterech różnych stacji meteorologicznych. Wybrane stacje zostały szczegółowo opisane w p. 3.2. W przypadku konstrukcji podatnych przyrost najważniejszych parametrów stanu nawierzchni – *IRI*, spękań propagujących od dołu, łącznej głębokości koleiny oraz łącznej długości spękań termicznych – w ciągu 40 lat został przedstawiony na Rys. 8. Rozwój spękań, średniego uskoku na szczelinach poprzecznych i wzrost *IRI* dla nawierzchni sztywnej przedstawiono na Rys. 9. Wszystkie obliczenia przedstawione na Rys. 8 i 9 przeprowadzono dla poziomu niezawodności 90%.

increase in the main distresses: longitudinal roughness *IRI*, bottom-up cracking, total rut depth and total length of thermal cracks during the 40 years of analysis are presented in Fig. 8. Development of cracking, faulting and increase in *IRI* for rigid pavement is presented in Fig. 9. All calculations presented in Fig. 8 and 9 represent 90% level of reliability.

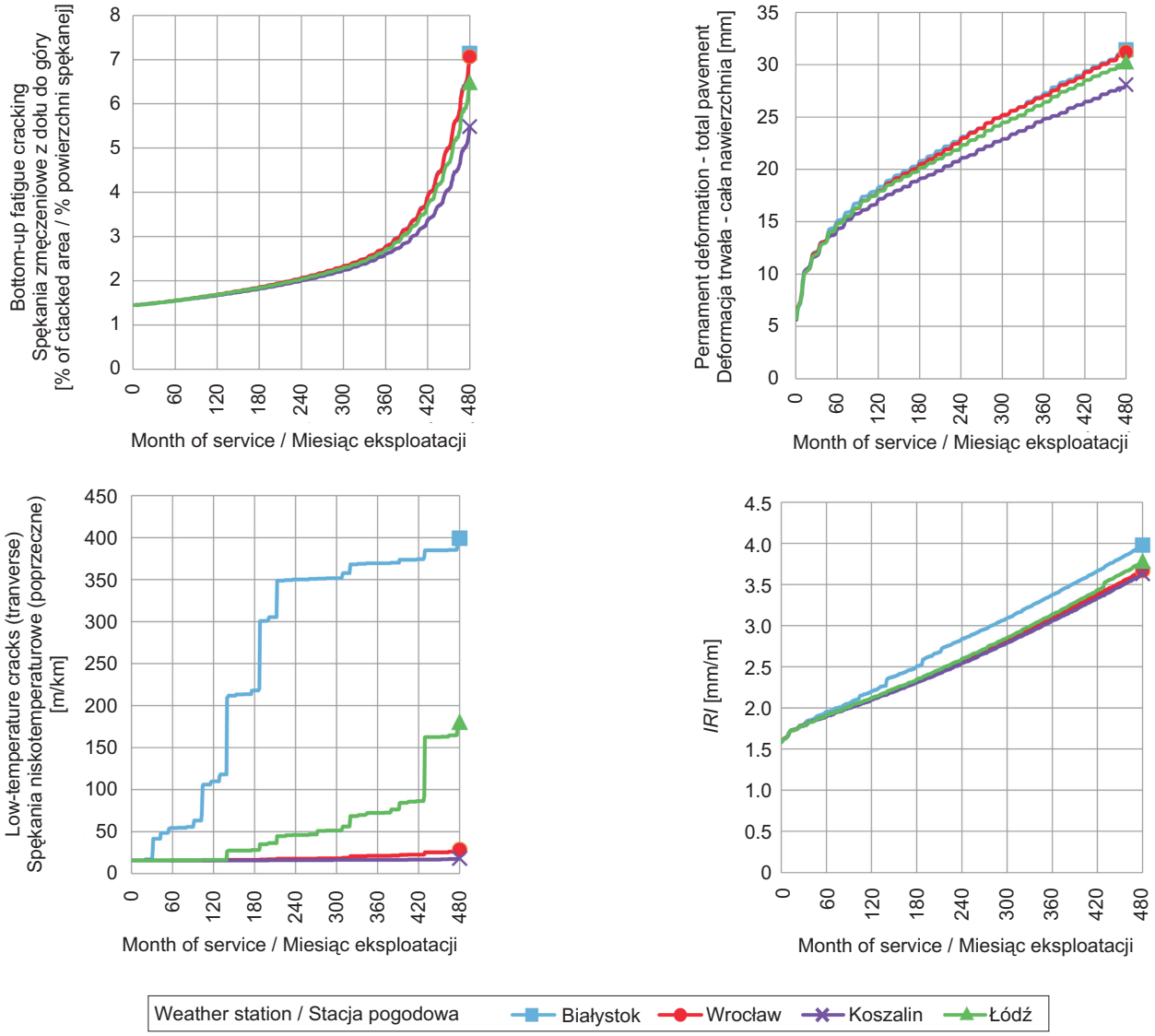

Fig. 8. Impact of the road localization on the development of flexible pavement distresses, structure KR4 type A1, 90% of reliability, 40-year analysis

Rys. 8. Wpływ lokalizacji drogi na przyrost uszkodzeń nawierzchni podatnych, konstrukcja KR4 typ A1, poziom niezawodności 90%, analiza obejmująca okres 40-letni

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

Różnice w łącznej głębokości koleiny oraz spękaniach propagujących od dołu prognozowanych dla poszczególnych regionów są zauważalne, lecz niezbyt znaczące, zwłaszcza przed upływem 20 lat eksploatacji. Warunki klimatyczne panujące w danym regionie mają z kolei istotny wpływ na liczbę spękań niskotemperaturowych. Na wschodzie Polski przyrost spękań niskotemperaturowych w ciągu 20 lat eksploatacji jest 7 razy wyższy niż w Polsce Centralnej i blisko 10 razy wyższy niż na Wybrzeżu czy na zachodzie kraju. Znaczne spękania niskotemperaturowe przyczyniają się do szybszego obniżenia równości nawierzchni (wzrostu *IRI)*.

The differences in predicted total rut depth and bottom-up cracking between particular climatic regions are noticeable but not very significant, especially before 20 years of service. In contrast, climatic region significantly affects the number of low-temperature cracks. In the east part of Poland increment of low-temperature cracks in 20 years of service is 7 times higher than in the central part of Poland and almost 10 times higher than in the coastal and west part of the Polish territory. Higher amount of low-temperature cracks contributes to faster deterioration of pavement evenness (increase in *IRI)*.

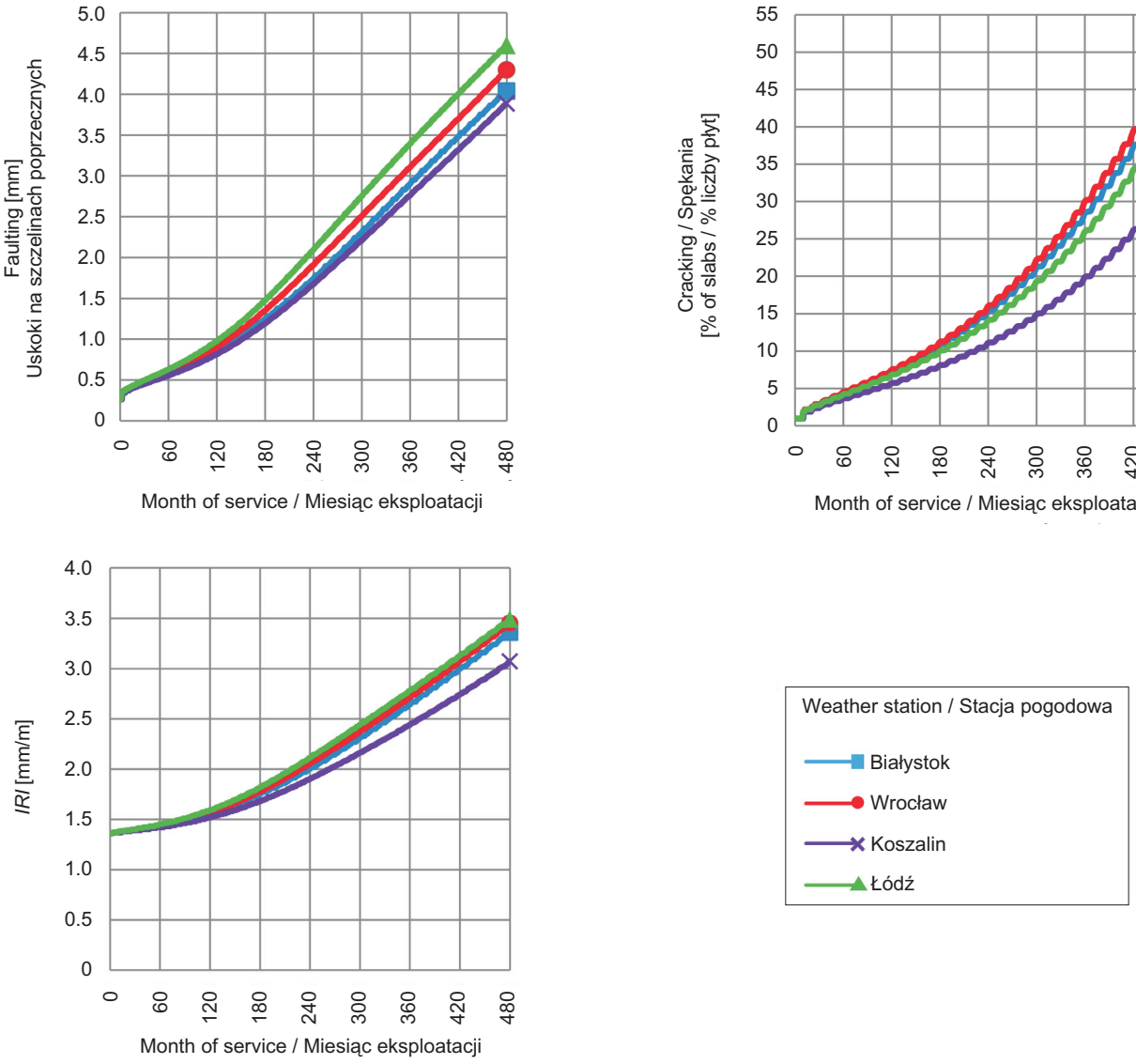

Fig. 9. Impact of the roadlocalization on the development of rigid pavement distresses,structure KR4 type IV, 90% of reliability, 40-year analysis

Rys. 9. Wpływ lokalizacji drogi na przyrost uszkodzeń nawierzchni sztywnych, konstrukcja KR4 typ IV, poziom niezawodności 90%, analiza obejmująca okres 40-letni

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

Jak widać na Rys. 9, wpływ warunków klimatycznych na uszkodzenia nawierzchni sztywnych jest związany głównie z naprężeniami termicznymi generowanymi przez różnice temperatur między górną a dolną powierzchnią płyty betonowej, co przyczynia się do tendencji wyginania się płyt. Zgodnie z Rys. 9 najniższy poziom uszkodzeń zaobserwowano dla stacji w Koszalinie. Nawierzchnia sztywna na terenie Koszalina wykazuje o 30% mniej spękanych płyt, o 20% niższy średni uskok na szczelinie poprzecznej oraz o 17% niższą wartość *IRI* na koniec okresu projektowego (30 lat) niż analogiczne konstrukcje zlokalizowane w innych częściach Polski. Koszalin leży na Wybrzeżu, a zatem odnotowuje się tam najniższą dobową i roczną zmienność temperatury powietrza.

5. WNIOSKI

Analizy przeprowadzone z użyciem M-EPDG wykazały, że wszystkie rozpatrzone polskie typowe konstrukcje zapewniają zadowalający stan nawierzchni w całym okresie projektowym. Znaczący wpływ na ogólny stan nawierzchni podatnych mają deformacje trwałe warstw asfaltowych oraz spękania termiczne. Pogorszenie stanu nawierzchni sztywnych wynika głównie z powstania uskoków między płytami.

W analizie obejmującej 40 lat eksploatacji nawierzchnie sztywne wykazują dobrą trwałość w porównaniu do podatnych w przypadku konstrukcji dla bardzo lekkiego ruchu (KR1). Po 30 i 40 latach eksploatacji zarówno nawierzchnie sztywne jak i podatne wykazują zbliżony poziom *IRI* w przypadku konstrukcji dla ruchu KR2, KR3 i KR5. W przypadku nawierzchni sztywnych dla ruchu ciężkiego KR6 i KR7, po 30 latach dochodzi do gwałtownego spadku równości podłużnej, co związane jest ze zjawiskiem klawiszowania. W analogicznym okresie spadek równości dla nawierzchni podatnych jest znacznie mniej intensywny.

Analiza wpływu klimatu na trwałość nawierzchni wykazała, że w Polsce można przyjąć jedną strefę klimatyczną na potrzeby analiz odkształceń trwałych oraz spękań zmęczeniowych. Z kolei ze względu na spękania niskotemperaturowe Polska powinna zostać podzielona na kilka stref w celu optymalizacji składu mieszanki mineralno-asfaltowej z uwzględnieniem sztywności lepiszcza i jego odporności na spękania termiczne. Zależnie od lokalizacji mogą wystąpić nawet siedmiokrotne różnice w ilości obliczonychspękań niskotemperaturowych. Według analiz nawierzchnie sztywne zlokalizowane na Wybrzeżu, na obszarze o niższych dziennych i rocznych wahaniach temperatury powietrza, wykazałyby o 30% mniej spękanych płyt oraz o 20% niższy średni uskok na szczelinie poprzecznej po upływie okresu projektowego (30 lat) niż analogiczne konstrukcje zlokalizowane w innych częściach kraju.

As shown in Fig. 9, the effect of climatic conditions on distress level of rigid structures is mostly related to thermal stresses caused by differences in temperature on the top and bottom of concrete slabs, which contribute to the phenomenon of slab wrapping. According to Fig. 9, the lowest level of pavement failure is observed for station Koszalin. Rigid pavement localized in Koszalin exhibits 30% less cracked slabs, 20% lower average faulting and 17% lower value of *IRI* after the design period (30 years) than analogous structures localized in other parts of Poland. Koszalin is a city localized near the sea coast and exhibits the lowest fluctuations in daily and annual air temperatures.

5. CONCLUSIONS

The M-EPDG analyses showed that all the considered Polish typical structures ensure acceptable pavement condition during the whole design period. The asphalt layers rutting and thermal cracking have the major impact on overall performance of flexible structures. Deterioration of the overall condition of rigid pavements occurs mostly due to faulting.

Rigid structures exhibit good performance for very low volume structures (KR1) in comparison to flexible pavements in 40 years of analysis. After 30 and 40 years of service both rigid and flexible pavements express similar level of roughness for structures for KR2, KR3 and KR5 categories. In the case of rigid structures for heavy traffic load categories KR6 and KR7 after 30 years of design life longitudinal roughness increases rapidly, which is caused by the phenomenon of faulting, while the analogous increment of roughness for flexible pavements is much less intensive.

Analysis of the impact of climate on pavement performance indicates that in Poland a single climatic zone can be assumed in terms of permanent deformation and fatigue cracking. In contrast, regarding low-temperature cracking, Poland should be divided into several zones with asphalt mixtures optimization with consideration for bitumen stiffness and its resistance to low-temperature cracking. Depending on the location, the amount of low-temperature cracking may vary by as much as 7 times. According to analyzes, rigid pavement localized in the coastal area with lower fluctuations in daily and annual air temperatures exhibits 30% less cracked slabs and 20% lower average faulting after the design period (30 years) than analogous structures localized in other parts of Poland.

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl

Metoda M-EPDG może stanowić bardzo użyteczne narzędzie do projektowania nawierzchni drogowych, prognozowania uszkodzeń i planowania działań utrzymaniowych, wskazane jest jednak przeprowadzenie dalszych kalibracji terenowych modelów zastosowanych w M-EPDG celem poprawienia dokładności obliczeń w warunkach polskich.

REFERENCES / BIBLIOGRAFIA

[1] Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures. Final Report, NCHRP 1-37A. AASHTO, ARA Inc. and ERES Consultants Division, 2004

[2] Catalog of Typical Flexible and Semi-Rigid Pavements, (in Polish). GDDKiA, 2014, Ordinance of General Director for National Roads and Motorways, No. 31, 16.06.2014, https://www.gddkia.gov.pl/userfiles/articles/z/zarzadzenia-generalnego-dyrektor_13901/zarzadzenie%2031%20zalacznik.pdf

[3] Catalog of Typical Rigid Pavements, (in Polish). GDDKiA, 2014, Ordinance of General Director for National Roads and Motorways, No. 30, 16.06.2014, https://www.gddkia.gov.pl/userfiles/articles/z/zarzadzenia-generalnego-dyrektor_13901/zarzadzenie%2030%20zalacznik.pdf

[4] Pavement Condition Diagnostics (DSN), guide and reports, (in Polish). GDDKiA, 2015, Ordinance of General Director for National Roads and Motorways, No. 34, 30.04.2015 https://www.gddkia.gov.pl/userfiles/articles/z/zarzadzenia-generalnego-dyrektor_17474/zarzadzenie%2034%20zalacznik%20wytyczne%20stosowania.pdf

[5] *Ryś D.*, *Judycki J.*, *Jaskuła P.*: Determination of vehicles load equivalency factors for polish catalogue of typical flexible and semi-rigid pavement structures. Transportation Research Procedia, 14, 2016, 2382-2391, DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.272

[6] *Zofka A.*, *Urbanik A.*, *Maliszewski M.*, *Bańkowski W.*, *Sybilski D.*: Site Specific Traffic Inputs for Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide in Poland. Transportation Research Board 93rd Annual Meeting, Washington, 2014

[7] *Ryś D.*: Investigation of Weigh-in-Motion Measurement Accuracy on the Basis of Steering Axle Load Spectra. Sensors, **19**, 15, 2019, 3272, DOI: 10.3390/s19153272

[8] *Pszczoła M.*, *Ryś D.*, Jaskuła P.: Analysis of climatic zones in Poland with regard to asphalt performance grading. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **16**, 4, 2017, 245-264, DOI: 10.7409/rabdim.017.016

[9] *Judycki J.*, *Jaskuła P.*, *Pszczoła M.*, *Ryś D.*, *Jaczewski M.*, *Alenowicz J.*, *Dołżycki B.*, *Stienss M.*: Analysis and Design of Flexible and Semi-Rigid Pavements (in Polish) WKiŁ, Warsaw, 2014

While the M-EPDG can be a very useful tool for pavement structure design, distress prediction and maintenance treatment scheduling, further field calibrations of models used in the M-EPDG should be performed in order to increase the accuracy of performance calculations for Poland.

[10] *Pszczoła M.*, *Jaczewski M.*, *Rys D.*, *Jaskuła P.*, *Szydłowski C.*: Evaluation of Asphalt Mixture Low-Temperature Performance in Bending Beam Creep Test. Materials, **11**, 1, 2018, 100, DOI: 10.3390/ma11010100

[11] *Jaczewski M.*, *Judycki J.*, *Jaskuła P.*: Asphalt concrete subjected to long-time loading at low temperatures - Deviations from the time-temperature superposition principle. Construction and Building Materials, **202**, 2019, 426-439, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.049

[12] *Judycki J.*: Non-linear viscoelastic behaviour of conventional and modified asphaltic concrete under creep. Materials and Structures, **25**, 1992, 95-101

[13] Refining the Simple Performance Tester for Use in Routine Practice. NCHRP Report 614, Project No. 9-29, Transportation Research Board, Washington, 2008

[14] *Krawczyk B.*, *Szydło A.*, *Mackiewicz P.*, *Dobrucki D.*: Assessment criteria of the recycled aggregate cement bound bases. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **18**, 2, 2019, 109-126, DOI: 10.7409/rabdim.019.007

[15] *Pełczyńska K.*, *Gajewski M.*: Review of selected fatigue criteria for hydraulic bound layers in road pavements. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **17**, 3, 2018, 227-248, DOI:10.7409/rabdim.018.015

[16] *Mackiewicz P.*: Finite-element analysis of stress concentration around dowel bars in jointed plain concrete pavement. Journal of Transportation Engineering, **141**, 6, 2015, 06015001

[17] *Judycki J.*: Construction and calibration of fatigue cracking models of asphalt layers of road pavements in mechanistic-empirical method AASHTO 2004. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **10**, 4, 2011, 31-53

[18] *Mieczkowski P.*: The heat exchange in the edge area - The problem of hot mix asphalt compaction. Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, **10**, 3, 2015, 207-215

[19] *Khazanovich L.*, *Darter M. I.*, *Thomas H.Y.*: Mechanistic-Empirical Model to Predict Transverse Joint Faulting. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1896, 2004, 34-45

MOST WIEDZY Downloaded from mostwiedzy.pl