

PAULIUS PAPLAUSKAS¹⁾AUDRIUS VAITKUS²⁾RITA KLEIZIENĖ³⁾

ANALYSIS OF FLEXIBLE PAVEMENT PERFORMANCE PREDICTION MODELS BASED ON STRUCTURAL BEHAVIOUR

ANALIZA MODELI PROGNOZOWANIA STANU TECHNICZNEGO NAWIERZCHNI PODATNYCH NA PODSTAWIE OCENY PARAMETRÓW PRACY KONSTRUKCJI

STRESZCZENIE. Warunkiem trwałości nawierzchni i zgodności z zasadami zrównoważonego rozwoju jest zapewnienie właściwego bieżącego utrzymania oraz przeprowadzanie wymaganych napraw. Programy określające priorytetowość działań w zakresie utrzymania nawierzchni opracowywane są przez organy administracji drogowej na podstawie zbieranych co kilka lat danych z inwentaryzacji stanu nawierzchni oraz przy wykorzystaniu dedykowanych metod analizy cyklu życia. Jako podstawowe narzędzie do analiz cyklu życia oraz szacowania kosztów i korzyści wykorzystuje się modele prognozowania stanu nawierzchni (ang.: *pavement performance models*, PPMs), które pomagają w ocenie aktualnego stanu technicznego oraz umożliwiają prognozowanie stopnia zniszczenia (degradacji) nawierzchni. Przedmiotem przedstawionego w artykule badania jest analiza różnych modeli PPM opisujących przyrost głębokości kolein oraz porównanie prognoz z wynikami pomiarów polowych. Uwzględniono cztery modele PPM przeprowadzając analizę na podstawie natężenia ruchu lub wieku konstrukcji nawierzchni. Modele prognozowania stanu technicznego nawierzchni zastosowano w celu oszacowania potencjalnego przyrostu głębokości koleiny na 11 odcinkach drogowych w oparciu o wyniki oceny nośności konstrukcji nawierzchni.

SŁOWA KLUCZOWE: degradacja, FWD, koleinowanie, model prognozowania stanu nawierzchni, wskaźnik krzywizny ugięcia *SCI*.

ABSTRACT. Sustainable and durable road pavement requires appropriate maintenance and repair strategies. National road authorities collect data describing pavement condition every several years and use specific life-cycle analysis methods to draw up priority plans for maintenance activities. The pavement performance models (PPMs) create a basis for the life-cycle and cost-benefit analysis as they help to evaluate pavement condition as well as to predict pavement deterioration. The objective of this research is analysing different PPMs of rut depth propagation and to compare predicted rut depth with measured during service of the road. Four PPMs were analysed during this research based on a traffic flow or construction age. The pavement performance prediction models were applied to predict the increment of rutting for eleven road sections based on their bearing capacity properties.

KEYWORDS: deterioration, FWD, surface curvature index *SCI*, pavement performance model, rutting.

DOI: 10.7409/rabdim.019.017

¹⁾ Vilnius Gediminas Technical University, Department of Road, Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius, Lithuania; paulius.paplauskas@vgtu.lt (✉)

²⁾ VGTU Road Research Institute, Linkmenų g. 28, 08217 Vilnius, Lithuania; audrius.vaitkus@vgtu.lt

³⁾ VGTU Road Research Institute, Linkmenų g. 28, 08217 Vilnius, Lithuania; rita.kleiziene@vgtu.lt

1. WPROWADZENIE

Droga jest konstrukcją inżynierską przeznaczoną do przeniesienia ruchu pojazdów oraz pieszych. Konstrukcja nawierzchni zbudowana jest z warstwy ścieralnej, wiążącej, podbudowy drogowej i podłoża gruntowego. W zależności od zastosowanych materiałów wyróżnia się nawierzchnie sztywne, półsztywne i podatne. Niezależnie od typu konstrukcji każda nawierzchnię powinna gwarantować bezpieczeństwo jej użytkownika oraz charakteryzować się równością i właściwościami antypoślizgowymi, trwałością i odpornością na uszkodzenia mechaniczne i warunki zewnętrzne, a także ekonomicznie uzasadnionymi nakładami. Stan nawierzchni ulega pogorszeniu w trakcie jej eksploatacji, co ma bezpośredni wpływ na bezpieczeństwo, komfort użytkownika oraz koszty eksploatacji. Proces degradacji konstrukcji nawierzchni zależy od szeregu czynników i zmiennych, w tym wpływu warunków zewnętrznych (opady, temperatura otoczenia, itd.), obciążeń od pojazdów (rodzaje pojazdów i ich masy całkowite, prędkości i natężenia ruchu), konstrukcji nawierzchni (rodzaj, grubości warstw i parametry materiałowe, itd.) oraz jakości wykonania (zagęszczenie, temperatura w trakcie układania, itd.). W powszechnym rozumieniu za pogorszenie stanu technicznego uważa się pojawienie się na jej powierzchni kolein, spękań – poprzecznych i podłużnych oraz siatkowych, zagłębień, garbów, płam lepiszcza oraz innych uszkodzeń mających wpływ na komfort jazdy.

W celu zapewnienia prawidłowego przebiegu procesu inwestycyjnego sporządza się programy utrzymania i realizacji. Wykorzystuje się do tego oprogramowanie do zarządzania stanem nawierzchni (PMS). Zainstalowane opcje oprogramowania PMS umożliwiają ocenę stanu drogi, racjonalny rozdział środków oraz ustalenie zarówno wymogu przeprowadzenia jak i rodzaju zabiegu utrzymaniowego w celu wskazania zasadnych ekonomicznie decyzji podejmowanych obecnie i w przyszłości.

Prognozowanie przeprowadza się korzystając z obliczeniowych modeli degradacji stanu nawierzchni stanowiących kombinację funkcji matematycznych, których zmienne (konstrukcja nawierzchni, parametry jej stanu technicznego, wiek górnych warstw konstrukcji, zastosowane standardy bieżącego utrzymania i napraw, natężenie ruchu, obciążenia komunikacyjne, parametry geometryczne, warunki klimatyczne, itd.) wyrażone są przy pomocy parametrów fizycznych lub odpowiednich współczynników. Zmienną, która występuje w każdym modelu jest czas [1, 2].

Występują dwa rodzaje modeli degradacji stanu nawierzchni – bezwzględny i przyrostowy (zmienny). Modele bezwzględny

1. INTRODUCTION

Road is an engineering structure intended for vehicle and pedestrian traffic. Road pavement structure consists of surface course, base course and sub-grade. According to the materials used, road pavements are classified as rigid, semi-rigid and flexible ones. Regardless of the pavement type, pavement must be safe, smooth, skid resistant, solid, resistant to mechanical and environmental effects and low-cost. However, during road operation, pavement condition worsens, directly influencing road safety, comfort and user costs. Deterioration processes in pavement structure depend on a number of factors and variables, including environmental impact (precipitation, temperature, etc.), load impact (vehicle type, weight, speed, intensity, etc.), pavement (type, material thickness, material properties, etc.) and quality of construction works (compaction, temperature during the laying process, etc.). In pavements, structural deterioration is commonly understood as ruts, transverse and longitudinal cracks, crack networks, potholes, waves, bitumen bleeding and other defects influencing the overall decline of driving quality.

To ensure a successful road development process, road maintenance and development plans are drawn up. For this purpose Pavement Management Systems (PMSs) are used. Depending on the options installed, PMSs make it possible to assess road condition, rationally allocate funding and determine maintenance works and maintenance types, to identify what economically beneficial decisions should be made today and in future.

Forecasting is carried out by applying theoretical deterioration models – a combination of mathematical functions, the variables of which (pavement structure, parameters of pavement performance indicators, surface age, the applied maintenance and repair standards, traffic flow, traffic loads on pavement, road geometric parameters, climatic conditions, etc.) are expressed by physical dimensions or coefficients. In deterioration models there is always one variable – time [1, 2].

Deterioration models are of two types – absolute or increase (change) models. The absolute models predict road surface condition (or fatigue) at certain points of time, which is a function of the independent variables. The increase models predict increase in the parameter value during the time period [3, 4].

PMSs are capable to predict deterioration of pavement and evaluate the residual life on project level and on network level. The analysis accuracy depends on many factors,

przedstawiają stan nawierzchni drogi (lub szkody zmęczeniowe) w określonych punktach czasu jako funkcję zmiennych niezależnych. Modele przyrostowe przewidują natomiast wzrost wartości rozpatrywanego parametru w określonym przedziale czasu [3, 4].

Systemy zarządzania stanem nawierzchni (PMS) umożliwiają przeprowadzenie obliczeń w fazie projektowania oraz oceny inwestycji na poziomie lokalnym (np. wybranego odcinka drogi), jednostki administracyjnej (np. powiatu), kraju lub regionu w zależności od liczby i dokładności zebranych danych oraz posiadanego doświadczenia w zakresie dostosowywania modeli degradacji i innych modeli do warunków miejscowych. W przypadku sieci drogowych stanowią one narzędzie przydatne do ekonomicznie efektywnego planowania i realizacji zabiegów utrzymaniowych na drodze. Na pięć głównych części składowych typowego systemu PMS składają się: oceny stanu technicznego nawierzchni, baza danych zawierająca wszystkie kluczowe informacje dotyczące stanu nawierzchni, program do analizy danych, strategia decyzyjna oraz procedury realizacyjne. Zarówno analiza danych jak i proces decyzyjny wymagają zastosowania wysokojakościowych modeli prognozowania stanu uszkodzeń nawierzchni [5].

Do programu badawczego wybrano modele degradacji nawierzchni umożliwiające prognozowanie stanu zniszczeń nawierzchni zaproponowane w ramach dwóch programów badawczych: pierwszego pod nazwą „Analiza stanu technicznego infrastruktury drogowej” – PARIS (ang.: *Performance Analysis of Road Infrastructure*) oraz drugiego pod nazwą „Wdrażanie pomiarów oszczędności zużycia energii na etapach projektowania, utrzymania i użytkowania dróg” (ECRPD), który został zrealizowany przez Szwedzki Narodowy Instytut Rozwoju Dróg i Transportu (VTI). Zainicjowany przez Forum Europejskich Krajowych Laboratoriów Drogowych (FEHRL) program badawczy PARIS został zakończony w 1998 roku. W 2008 roku Instytut VTI zakończył projekt badawczy pn. „Modele degradacji dróg”, który stanowił piąty pakiet roboczy wspomnianego wyżej programu ECRPD [6]. W badaniu przeprowadzonym przez Instytut VTI przeanalizowano 7 modeli degradacji stanu nawierzchni, w tym model z uwzględnieniem koleinowania.

Przedmiotem opisanego w niniejszym artykule eksperymentu badawczego była ocena wybranych modeli degradacji nawierzchni pod kątem koleinowania oraz potwierdzenie ich przydatności do modelowania sieci drogowej na Litwie w ramach wykorzystywanego w tym kraju systemu zarządzania stanem technicznym nawierzchni.

such as the quantity and accuracy of data collected and engineering experience of adapting not only deterioration but also other models to the local conditions. The PMS is a tool used to plan and implement the maintenance activities (such as repair, rehabilitation, reconstruction) within the road network in a cost-efficient manner. Typically, PMS consists of five main parts: pavement condition studies; database containing all relevant pavement condition information; analysis plan; decision strategy; and implementation procedures. The analysis and decision-making process requires high-quality distress prediction models [5].

In this research, PPMs for predicting pavement rutting were selected from two studies – PARIS (Performance Analysis of Road Infrastructure) and The Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI) – proposed rutting model from the ECRPD project (Integration of the Measurement of Energy Conservation in Road Pavement Design, Maintenance and Utilization). The PARIS project was initiated by the Forum of European National Highway Research Laboratories (FEHRL) and was completed in 1998. In 2008, VTI concluded a study on “Road Deterioration Models”, which constituted the working package 5 of the project “Integration of the Measurement of Energy Conservation in Road Pavement Design, Maintenance and Utilisation (ECRPD)” [6]. In this study VTI has analysed 7 deterioration models, including the rutting model.

The objective of this paper is to predict the rut depth based on pavement performance models and to verify their application possibilities for network level evaluation in the PMS of Lithuania.

2. EXPERIMENTAL RESEARCH

2.1. PLAN

The experimental research is planned to estimate the road surface deterioration models taking into account the the damage to the pavement structure.. The results of the experimental research evaluate the applicability of rutting deterioration models for forecasting the condition of roads in Lithuania. The methodology of the experimental research is as follows:

- Selection of the experimental research sections.
- Information about the history of a test section.
- Collection of historical data about road pavement performance from the Road Databank.
- Measurement of road pavement performance indices in the field.

2. BADANIA DOŚWIADCZALNE

2.1. PROGRAM BADAŃ

Badanie miało na celu ocenę modeli degradacji stanu nawierzchni drogowej w następstwie powstających na drodze uszkodzeń w postaci kolein. Wyniki badań doświadczalnych pozwalają ocenić przydatność modeli degradacji nawierzchni z uwzględnieniem zjawiska koleinowania do prognozowania stanu technicznego dróg na Litwie. Przyjęto następującą metodologię badań:

- Wybór odcinków badawczych.
- Zebranie informacji o historii wytypowanego odcinka badawczego.
- Pobranie z bazy danych drogowych odpowiednich informacji archiwalnych, dotyczących stanu technicznego nawierzchni w przeszłości.
- Przeprowadzenie terenowych pomiarów parametrów stanu technicznego nawierzchni.
- Wyznaczenie wskaźnika koleinowania (głębokości ugięcia nawierzchni) *SCI300*.
- Wyznaczenie poziomu degradacji stanu nawierzchni drogowej przy wykorzystaniu wskaźników przyrostu głębokości koleiny.
- Porównanie prognozowanych i zmierzonych wskaźników koleinowania.

Przy wyborze odcinków dróg przeznaczonych do badań uwzględniono kategorię drogi, czas jaki upłynął od jej przebudowy lub remontu oraz uzyskane w wyniku pomiarów wartości wskaźników stanu technicznego nawierzchni. Do badań wytypowano 11 odcinków drogi o długości od 800 m do 1 km (1 – na drodze krajowej, 7 – na autostradach i 3 – na drogach regionalnych), przy czym na przynajmniej 4 odcinkach przeprowadzono pomiary wskaźników stanu technicznego nawierzchni przed jej przebudową lub generalnym remontem.

Wykorzystano dwa zestawy danych dotyczących stanu badanej nawierzchni: pierwszy – zawierający informacje archiwalne z litewskiej bazy LAKIS (system archiwizacji danych drogowych) oraz drugi – zawierający dane z pomiarów inwentaryzacyjnych przeprowadzonych w czerwcu 2016 r. przy wykorzystaniu mobilnego laboratorium badań drogowych RST28. To mobilne laboratorium posiada wielofunkcyjne urządzenie (zwane profilografem laserowym) wykonujące pomiar profilu podłużnego nawierzchni za pomocą 19 czujników laserowych w technologii „wiredframe”, polegającej na wizualnym odwzorowaniu rzeczywistego obrazu badanego obiektu. System RST28 pozwala wyznaczyć

- Determination of the *SCI300*.
- Determination of road pavement deterioration changes using the rutting depth indicators.
- Comparison of the predicted and measured indicators.

The selection of road sections for the experiment has taken into account road category, time of reconstruction or major repairs and data of performance indicators obtained during measurements. Eleven test sections were selected for the experiment in which at least 4 performance indicator measurements were taken after reconstruction or major works: 1 – national road, 7 – motorways and 3 – highways, from 800 m to 1 km long.

The pavement performance data consisted of two parts: the first part included historical data obtained from LAKIS (Lithuanian Road Databank), and the second part included data from the measurement, which was carried out in June 2016 with the mobile road research laboratory RST28. The RST28 device is a laser profilometer, which measures pavement profile with 19 lasers using the wired frame method consisting in visual presentation of the real image of the pavement surface. RST28 allows to determine pavement roughness, rut depth, the amount of cracks and defects and averaged them to a 20-metre step. The pavement deflection data of analyzed roads was measured with Falling Weigh Deflectometer (FWD) after the last rehabilitation and stored in LAKIS.

2.2. EQUIVALENT STANDARD AXLE LOAD

There are various types of vehicles, vehicle loads and axles interacting with road pavement. The traffic flow effect to pavement structure is analyzed by converting number of vehicles passes to the Equivalent Standard Axle Load of 10 t (ESAL). It was assumed that the standard axle is the axle with dual tires and a 100 kN load homogeneously distributed over the axle, indicated by *N100* [6]. *N100* is calculated by the following equation:

$$N100(j) = ADTT(j) \cdot 365 \cdot n \cdot 0.33, \quad (1)$$

where:

ADTT – Average Daily Truck Traffic per lane,

j – index for the year (*j* = 1 for the year with new pavement and *j* = *n* for the year with the next maintenance activity),

n – coefficient of axles per heavy vehicle (*n* = 4.2 under Lithuanian conditions),

0.33 – correction factor of the heavy vehicle axles convert to the *N100*, estimated by VTI [6].

parametry techniczne nawierzchni m.in. takie jak: równość, głębokość kolein, liczbę spękań oraz obliczyć ich wartości średnie w przypadku 20-metrowych odcinków pomiarowych. Z archiwum litewskiego systemu informacji drogowej LAKIS uzyskano również dane z pomiarów wykonanych w ramach oceny technicznej badanych odcinków drogi ugięciomierzem FWD. Pomiary te zostały przeprowadzone po okresie ostatnich zabiegów konserwacyjnych stanu nawierzchni na wybranych do badań odcinkach drogowych.

2.2. LICZBA OSI OBLICZENIOWYCH

Wpływ ruchu drogowego na nawierzchnię jezdni zależy od typu pojazdów, ich obciążenia i nacisku przypadającego na osie. Oddziaływanie pojazdów na konstrukcję nawierzchni analizuje się przeliczając liczbę przejazdów na równoważne standardowe obciążenie osi 10 t (ang. *Equivalent Standard Axle Load*, ESAL). Przyjęto założenie, że oś standardowa $N100$ [6] jest osią zastępczą wyposażoną w podwójne koła o obciążeniu 100 kN rozłożonym równomiernie na całej jej długości. Liczbę standardowych osi równoważnych (obliczeniowych) $N100$ oblicza się z następującego wzoru:

$$N100(j) = ADTT(j) \cdot 365 \cdot n \cdot 0,33, \quad (1)$$

gdzie:

$ADTT$ – średnie dobowe natężenie ruchu pojazdów ciężarowych przypadające na pas,

j – współczynnik uwzględniający okres eksploatacji nawierzchni ($j = 1$ w przypadku roku położenia nowej nawierzchni oraz $j = n$ w przypadku roku, w którym wykonano kolejny remont nawierzchni),

n – średnia liczba osi równoważnych w przeliczeniu na pojazd ciężki (na drogach litewskich $n = 4,2$),

0,33 – współczynnik korekcyjny ustalony przez Instytut VTI, umożliwiający przeliczanie typowej osi na standardową oś obliczeniową $N100$ [6].

Sumaryczne roczne wyniki liczby standardowych osi równoważnych $N100$ obliczone odpowiednio dla każdego odcinka badawczego oraz okres użytkowania poszczególnych odcinków zestawiono na Rys. 1.

2.3. TRWAŁOŚĆ NAWIERZCHNI

Wśród wielu parametrów wykorzystywanych do określania trwałości nawierzchni przy użyciu metody FWD wymienić można: zmodyfikowaną liczbę strukturalną (SNC), skorygowaną liczbę strukturalną (SNP), moduł elastyczności E , wskaźnik D_0 (stosowany na Litwie) oraz wskaźnik ugięcia nawierzchni, zw. także wsk. koleinowania (SCI). W przypadku obliczeń opartych na każdej z tych metod wykorzystuje się

The cumulative (total) $N100$ for each test section in the year of analysis and the age of each test section are given in Fig. 1.

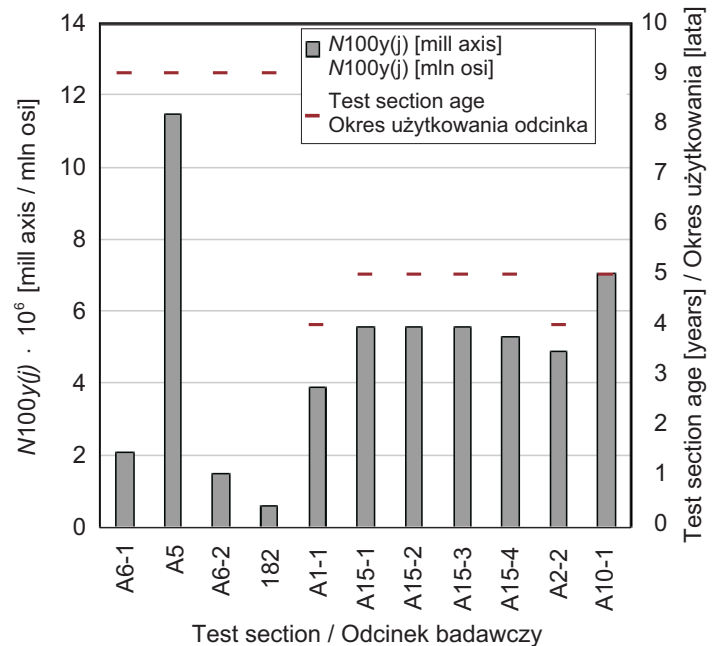


Fig. 1. The cumulative sum of $N100$ and the age of each test section
Rys. 1. Sumaryczna liczba standardowych osi obliczeniowych $N100$ oraz okres użytkowania badanych odcinków nawierzchni

2.3. PAVEMENT STRENGTH

Among the many methods to describe pavement strength are modified structural number of the pavement (SNC) or Adjusted Structural Number (SNP), E -modulus, D_0 (Lithuanian method) and Surface Curvature Index (SCI). All these methods use FWD data for the calculations. This research uses the $SCI300$ method to get pavement strength value in three deterioration models for rutting prediction, evaluating pavement strength within the $SCI300$ parameter. The $SCI300$ measure was accepted and defined in the PARIS project: $SCI300$ is defined as the difference between the central deflection directly under the load and deflection at 300 mm distance from the load ($d_0 - d_{300}$) measured by the FWD with a 50 kN load [7].

$SCI300$ was normalized to a reference temperature of 20°C and calculated by the following equation:

$$SCI300 = d_0 - d_{300}, \quad (2)$$

where:

d_0 – deflection at the center of load [μm];

d_{300} – deflection at 300 mm distance from the load [μm].

parametry uzyskane z pomiarów ugięciomierzem FWD. W celu oceny trwałości nawierzchni w badaniach wykorzystano trzy modele prognozowania degradacji nawierzchni na skutek koleinowania, w których zastosowano metodę wskaźnika *SCI300*. Wskaźnik ten przyjęto i zdefiniowano w programie badawczym PARIS jako różnicę między ugięciem nawierzchni zmierzonym w badaniu FWD w punkcie bezpośrednio pod środkiem przyłożonego obciążenia o wartości 50 kN oraz ugięciem zarejestrowanym w odległości 300 mm od niego ($d_0 - d_{300}$) [7].

Aby obliczyć wskaźnik *SCI300*, dane z pomiarów ugięciomierzem FWD należy odnieść do warunków odpowiadających temperaturze równoważnej 20°C. Wartość wskaźnika *SCI300* oblicza się z następującego wzoru:

$$SCI300 = d_0 - d_{300}, \quad (2)$$

gdzie

d_0 – ugięcie nawierzchni w środku obciążenia [μm];

d_{300} – ugięcie w odległości 300 mm od środka obciążenia [μm].

Wskaźnik *SCI300* wraz z algorytmem jego przeliczenia do temperatury równoważnej został szczegółowo opisany w pracy instytutu VTI dotyczącej „Modelu degradacji nawierzchni” [6]. W pracy tej podano również zalecane wartości wskaźnika *SCI300*, przypisane odpowiednio do kategorii drogi oraz natężenia ruchu. Przykładowo dla drogi regionalnej ze średnim dobowym natężeniem ruchu pojazdów ciężkich w roku *AADTheavy* na poziomie od 801 do 1600 wymagana wartość wskaźnika *SCI300* powinna mieścić się w przedziale od 70 do 90, a w przypadku drogi regionalnej o średnim dobowym natężeniu ruchu pojazdów ciężkich *AADTheavy* powyżej 1601 wartość wskaźnika *SCI300* musi być mniejsza lub równa 70. Wszystkie wartości parametru *SCI300* określone na podstawie badań trwałości nawierzchni wyznaczonych odcinków drogowych były zgodne z tymi z zaleceniami. W Tabl. 1 zestawiono wartości wskaźnika *SCI300* uzyskane dla każdego odcinka badawczego oraz podano dodatkowe informacje uzupełniające, dotyczące klas trwałości nawierzchni i grubości jej warstw asfaltowych.

2.4. RUT DEPTH DETERIORATION MODELS

Badania prowadzono wykorzystując cztery różne modele degradacji (pogorszenia jakości) stanu nawierzchni. Dwa z nich zostały wykorzystane podczas realizacji projektu badawczego PARIS, a dwa pozostałe zostały opracowane dla potrzeb projektu ECRPD. W projekcie PARIS pierwszy z dwóch modeli uwzględniający zjawisko zwiększania głębokości kolein (PARIS 1) zdefiniowany został jako stosunek głębokości

VTI’s study on “Road Deterioration Models” [6] gives an elaborate description of *SCI300* and its adjustment to the temperature. Also, the study presents the recommended *SCI300* values by road type and traffic flow (for example - Highway with *AADTheavy* in the range 801-1600 (vehicle per day) must have *SCI300* value between 70 μm and 90 μm , or Highway with *AADTheavy* more than 1601 must have *SCI300* value less than or equal to 70). All the test sections meet the mentioned *SCI300* recommendations. Table 1 gives the *SCI300* values for each test section and additional information about the class of pavement structure and asphalt thickness.

Table 1. The *SCI300* value for each test section
Tabela. 1. Wartości wskaźnika *SCI300* dla każdego odcinka badawczego

TS	RT	RCC	AT [mm]	<i>SCI300</i> [μm]
A5	HW	AM	260	29.221
A1	HW	II	320	81.536
A2	HW	II	200	47.651
A6-1	MW	I	180	41.325
A6-2	MW	III	150	70.543
A10	MW	II	200	49.831
A15-1	MW	III	175	42.264
A15-2	MW	III	175	54.892
A15-3	MW	III	175	54.394
A15-4	MW	III	175	59.988
182	NR	III	100	85.142

TS – test section / odcinek badawczy
RT – road type / kategoria drogi
RCC – class of pavement structure / klasa drogi
AT – asphalt thickness / grubość warstw asfaltowych
SCI300 – Surface Curvature Index_300 (value normalized to the reference temperature of 20°C) / wskaźnik ugięcia nawierzchni_300 (wartość przeliczona na temperaturę równoważną 20°C)
HW – highway / droga regionalna
MW – motorway / autostrada

2.4. RUT DEPTH DETERIORATION MODELS

The experiment was carried out by analysing four types of PPMs. Two models were applied from the PARIS project, and the other two models were applied from the ECRPD project.

koleiny do całkowitej liczby standardowych osi obliczeniowych wyrażonych w mln osi [7]:

$$RR_{ESAL} = \frac{RD_{last}}{MESAL_{last}}, \quad (3)$$

gdzie:

RR_{ESAL} – współczynnik wyrażający zależność między koleinowaniem a liczbą tzw. osi obliczeniowych (ESAL),

RD_{last} – głębokość koleiny zmierzona podczas ostatniego pomiaru,

$MESAL_{last}$ – sumaryczna liczba osi obliczeniowych wyrażonych w milionach ESAL w okresie od oddania do użytkowania nowej nawierzchni lub wykonania ostatniej konserwacji (naprawy) do czasu przeprowadzenia pomiaru.

W przypadku braku danych pomiarowych dotyczących głębokości koleiny można ją obliczyć w przybliżeniu z następującego wzoru [7]:

$$y = 0,05 + 0,93x, \quad (4)$$

gdzie:

y – obliczoną głębokość koleiny;

x – sumaryczna liczba osi obliczeniowych wyrażonych w milionach ESAL od okresu oddania do użytkowania nawierzchni lub wykonania ostatniej konserwacji (naprawy) do czasu przeprowadzenia pomiaru.

Korzystając z drugiego modelu, nazwanego PARIS 2, który opiera się na ściślejszej zależności między głębokością koleiny a okresem użytkowania (wiekiem) górnej warstwy nawierzchni głębokość tę można obliczyć z następującego wzoru:

$$y = -0,02 + 1,05x, \quad (5)$$

gdzie:

y – obliczoną głębokość koleiny;

x – okres użytkowania (wiek) nawierzchni liczony od okresu oddania jej do użytkowania lub konserwacji (naprawy) do czasu wykonania ostatniego pomiaru.

Obydwa modele stanu degradacji nawierzchni (PPMs), czyli PARIS 1 i PARIS 2 służące do przewidywania głębokości kolein znalazły praktyczne zastosowanie do analizy nawierzchni podatnych. W projekcie PARIS zaproponowano również modele opracowane z myślą o podobnym zastosowaniu w odniesieniu do nawierzchni półsztywnych.

W projekcie ERCPD do prognozowania przyrostu głębokości koleiny wykorzystano model złożony, zaproponowany przez

The rutting propagation model of PARIS project (see as PARIS 1) is a ratio between the rut depth and cumulative ESALs in millions [7]:

$$RR_{ESAL} = \frac{RD_{last}}{MESAL_{last}}, \quad (3)$$

where:

RR_{ESAL} – rutting relationship for ESALs,

RD_{last} – rut depth during the last measurement,

$MESAL_{last}$ – cumulative millions of ESALs during the last measurement since construction or last overlay.

The rut depth can be approximately calculated (according equation 4), if the rut depth measurement were not performed [7]:

$$y = 0.05 + 0.93x, \quad (4)$$

where:

y – calculated rut depth,

x – cumulative millions of ESALs during the last measurement since construction or last overlay.

The rutting propagation model of PARIS project (see as PARIS 2) is a ratio between the rut depth and the age of pavement surface, the rut depth can be calculated as follows (PARIS 2 model) [7]:

$$y = -0.02 + 1.05x, \quad (5)$$

where:

y – calculated rut depth,

x – age of pavement surface during the last measurement since construction or last overlay.

Both PPMs for rutting propagation PARIS 1 and PARIS 2 were developed to predict rut depth for flexible pavements. The PARIS project also presents different models for semi-rigid pavements.

The ERCPD uses a composite model developed by the VTI for rut depth propagation. It consists of two parts: rut depth due to structural deformation of pavement layers from the heavy vehicles and rut depth due to wearing of the surface layer from the light vehicles with studded tires. The first part of the ERCPD model evaluates cumulative ESALs from the last rut depth measurement to the pavement construction or last overlay and SCI300. The second part of the model evaluates deterioration effect of the light traffic with studded tires during winter season.

Instytut VTI. Powyższy model zakłada, że na zmianę głębokości koleiny decydujący wpływ mają dwie zasadnicze przyczyny: pierwsza zasadnicza – związana z odkształceniami w strukturze warstw nawierzchni wywołanymi ruchem pojazdów ciężkich oraz druga dodatkowa – spowodowana zużyciem warstwy ścieralnej nawierzchni przez pojazdy lekkie wyposażone w opony z kolcami. W pierwszym etapie przetwarzania danych model ERCPD analizuje sumaryczną liczbę osi obliczeniowych ESALs (od okresu oddania nawierzchni do użytku lub jej konserwacji do czasu przeprowadzenia ostatniego pomiaru) oraz ugięcie nawierzchni $SCI300$ powstałe na skutek działania na nią obciążenia. W drugim etapie model uwzględnia wpływ na koleinowanie ruchu w okresie okresu zimowym pojazdów lekkich wyposażonych w opony z kolcami.

Aktualnie na Litwie brak jest jednak oficjalnych danych statystycznych dotyczących liczby pojazdów wyposażonych w opony z kolcami, nie przeprowadzono także badań pod kątem ich wpływu na stan nawierzchni drogowej. Ze względu na brak tych danych obliczenia wykonuje się stosując opcję: 1 – z pominięciem wpływu pojazdów lekkich wyposażonych w opony z kolcami, czyli w oparciu o wariant uproszczony tylko do pierwszej części modelu zaproponowanego przez Instytut VTI (oznaczony w pracy skrótem VTI) lub 2 – z uwzględnieniem wpływu pojazdów lekkich wyposażonych w opony z kolcami (przyjmując udział tych pojazdów na poziomie 33%), czyli w oparciu o pełny model Instytutu VTI (oznaczony w niniejszej pracy symbolem VTI+). Model VTI stosowany do prognozowania głębokości kolein przedstawia równanie (6):

$$rut_d(j) = 10^{\left(\frac{\log_{10}(0,9533) \cdot N100y(j) \cdot a^{\frac{1}{b}}}{\frac{1}{b} + 0,0209} \right)}, \quad (6)$$

gdzie:

$rut_d(j)$ – głębokość koleiny na skutek deformacji trwałej [mm];

$$a = 0,0001579 \cdot SCI300 + 0,03432;$$

$$b = 0,0005695 \cdot SCI300 + 0,2965;$$

$N100y(j)$ – sumaryczna liczba osi obliczeniowych ESALs w okresie od wykonanej konserwacji nawierzchni do roku j , w którym zaplanowano kolejną.

Głębokość ugięcia nawierzchni w modelu VTI+ oblicza się jako sumę odkształcenia koleiny wywołanego liczbą osi obliczeniowych $N100$ oraz odkształcenia na skutek ścierania jej powierzchni oponami z kolcami:

$$rut_st(j) = rut_d(j) \cdot k_{rutd} + rut_st(j) \cdot k_{rutst}, \quad (7)$$

gdzie:

In Lithuania, no official statistics are available about vehicles with studded tires, and no study has investigated their impact on the pavement surface. Owing to the lack of data it is considered that calculations are made in two steps: 1 – without the impact of light vehicles with studded tires – the first part of VTI's proposed model (here referred to as VTI) and 2 – with the impact of light vehicles with studded tires (accepted 33% of light vehicles with studded tires) – its full proposed VTI's model (here referred to as VTI+). The VTI model for rut depth deterioration is given in equation (6):

$$rut_d(j) = 10^{\left(\frac{\log_{10}(0,9533) \cdot N100y(j) \cdot a^{\frac{1}{b}}}{\frac{1}{b} + 0,0209} \right)}, \quad (6)$$

where:

$rut_d(j)$ – rut depth from deformation [mm];

$$a = 0,0001579 \cdot SCI300 + 0,03432;$$

$$b = 0,0005695 \cdot SCI300 + 0,2965;$$

$N100y(j)$ – cumulative ESALs from the last done maintenance activity until the j^{th} year of the planned maintenance activity.

VTI+ is estimated as the sum of the $N100$ deformation and the wear of studded tires:

$$rut_st(j) = rut_d(j) \cdot k_{rutd} + rut_st(j) \cdot k_{rutst}, \quad (7)$$

where:

$rut_st(j)$ – rut depth in year j ,

$rut_d(j)$ – rut depth from deformation from the new pavement until the j^{th} year after maintenance activity (6),

$rut_st(j)$ – total additional rut depth from light vehicles with studded tires from the new pavement until the j^{th} year after maintenance activity (8),

k_{rutd} – deformation correction factor for regional conditions (default value = 1),

k_{rutst} – studded tire wear correction factor for regional conditions (default value = 1).

Total additional rut depth from light vehicles with studded tires $rut_st(j)$ is calculated by the following equation:

$$rut_st(j) = \sum light(j) \cdot \frac{r_st}{100} \cdot \frac{Nw}{12}, \quad (8)$$

where:

$rut_st(j)$ – total additional rut depth from light vehicles with studded tires from the new pavement until the j^{th} year after maintenance activity;

- rut_j – głębokość koleiny w roku j ;
- $rut_d(j)$ – głębokość koleiny wywołana deformacjami trwałymi w okresie od roku wykonania nowej nawierzchni do roku j po jej konserwacji (6),
- $rut_st(j)$ – dodatkowa sumaryczna zmiana głębokości koleiny wywołana ścieraniem warstwy górnej przez pojazdy lekkie wyposażone w opony z kolcami w okresie od roku wykonania nowej nawierzchni do roku j po jej konserwacji (8),
- k_{rutd} – współczynnik korekty odkształcenia trwałego uwzględniający warunki lokalne (wartość domyślna = 1),
- k_{rutst} – współczynnik korekty pogłębienia koleiny wskutek ścierania przez pojazdy lekkie wyposażone w opony z kolcami (wartość domyślna = 1).

Dodatkową sumaryczną zmianę głębokości koleiny wskutek ścierania powierzchni przez pojazdy lekkie wyposażone w opony z kolcami $rut_st(j)$ oblicza się z następującego wzoru:

$$rut_st(j) = \sum light(j) \cdot \frac{r_st}{100} \cdot \frac{Nw}{12}, \quad (8)$$

$rut_st(j)$ – dodatkowa sumaryczna zmiana głębokości koleiny na skutek ścierania nawierzchni przez pojazdy lekkie wyposażone w opony z kolcami w okresie od roku wykonania nowej nawierzchni do roku j po jej konserwacji,

- $light(j)$ – natężenie ruchu pojazdów lekkich,
- r_st – udział pojazdów lekkich wyposażonych w opony z kolcami w całkowitym natężeniu ruchu w okresie zimowym [%],
- Nw – liczba miesięcy okresu zimowego,
- wst – wskaźnik korekcyjny zmiany głębokości koleiny od pojazdów lekkich, $wst = 2.3E-06$ [mm/poj.].

3. WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

Wyniki prognozowanej głębokości koleiny dla każdego z wybranych do badań odcinków drogowych otrzymano korzystając z czterech modeli degradacji nawierzchni (PPMs), a następnie porównano je na wykresach z wartościami uzyskanymi z pomiarów doświadczalnych (Rys. 2). Pierwsze cztery z badanych odcinków drogowych wykonane zostały w 2008 roku, tj. około 8-9 lat przed ostatnim przeprowadzonym pomiarem kolein. Pozostałe odcinki badawcze wykonane zostały w roku 2012 lub 2013, co oznacza, że były

- $light(j)$ – light traffic flow,
- r_st – percentage of light vehicles with studded tires during winter months [%],
- Nw – number of winter months per year,
- wst – light vehicle specific rut wear, $wst = 2.3E-06$ [mm/veh].

3. RESULTS AND DISCUSSION

Four PPMs were applied to calculate rut depth and its propagation for each analyzed road section. The first four test sections were built in 2008, about 8-9 years ago before last measurement. The remaining test sections were built in 2012 or 2013 and are now 4 or 5 years old on last measurement day. The analysis results of the road A5 are presented with the measured rut depths in the field (Fig. 2).

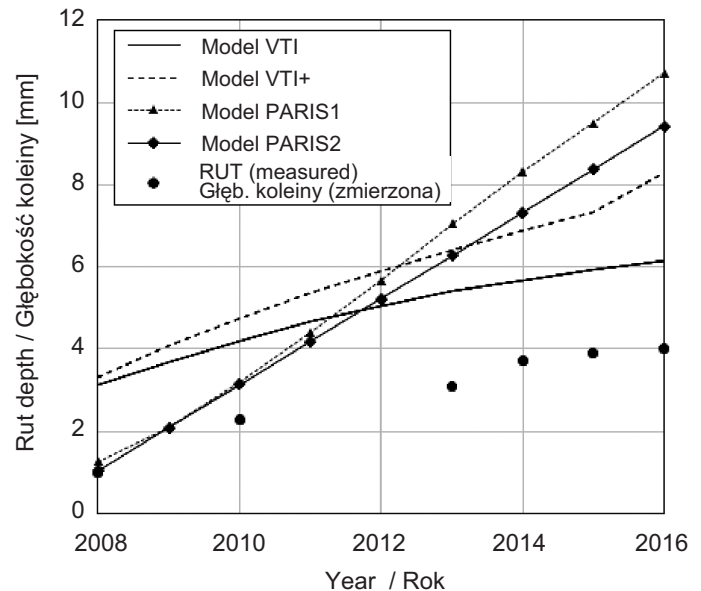


Fig. 2. Results of rut depth in the test section of the road A5
Rys. 2. Prognozowane z wykorzystaniem różnych modeli wyniki głębokości koleiny oraz wartość zmierzona na nawierzchni odcinka badawczego drogi A5

Root mean square error $RMSE$ was chosen to identify the most appropriate for PPMs of Lithuania conditions. The smaller $RMSE$ values are, the closer predicted and observed values are. The $RMSE$ values for predicted rut depth based on PPMs are presented in Table 2.

The smallest differences between the simulated values of road pavement rut depth and estimated rut depth values on a test stretch are obtained using the PARIS1 pavement rutting performance model – 6 times out of 11. During result

oddane do użytku odpowiednio 4 lub 5 lat przed ostatnimi pomiarami stanu technicznego nawierzchni.

Przy wyborze najbardziej odpowiedniego w przypadku Litwy modelu degradacji stanu nawierzchni, stosowanego do prognozowania głębokości kolein, wykorzystano współczynnik zwany pierwiastkiem błędu średniokwadratowego *RMSE*. Im współczynnik ten osiąga mniejsze wartości tym wielkości prognozowane i zmierzone w warunkach rzeczywistych są bardziej zbliżone do siebie. W Tabl. 2 zestawiono obliczone wartości współczynnika *RMSE*, uzyskane przy zastosowaniu 4 różnych modeli degradacji nawierzchni w odniesieniu do głębokości kolein na badanych odcinkach drogowych.

Table 2. *RMSE* value for modelled rut depth
Tablica 2. Wartość pierwiastka błędu średniokwadratowego *RMSE* dla prognozowanych głębokości kolein

Test section Odcinek badawczy	Root mean square error value <i>RMSE</i> acc. to the model Pierwiastek błędu średniokwadratowego <i>RMSE</i> wg modelu				Best result with Najlepszy wynik
	VTI	VTI+	PARIS1	PARIS2	
A5	2.09	3.22	4.36	3.49	VTI
A1	4.20	4.30	0.80	0.80	PARIS1
A2	1.19	1.28	1.13	1.24	PARIS1
A6-1	1.01	2.23	1.25	4.07	VTI
A6-2	1.93	1.38	5.12	0.97	PARIS2
A10	0.96	0.67	0.53	0.86	PARIS1
A15-1	1.98	2.08	0.90	0.91	PARIS1
A15-2	2.52	2.63	0.97	0.95	PARIS2
A15-3	2.85	2.96	1.08	1.09	PARIS1
A15-4	3.12	3.24	1.09	1.19	PARIS1
182	1.12	2.11	2.33	3.99	VTI

Wykorzystując model PARIS1 sporządzono dla wybranych odcinków testowych prognozy koleinowania nawierzchni na skutek jej użytkowania przez okres 20 lat (Rys. 3). W wybranym modelu założono niezmienną trwałość nawierzchni w przedziale czasowym obejmującym badania, równą wartości uzyskanej z pomiaru przeprowadzonego zaraz po jej modernizacji (remoncie). Powyższe założenie wynikało z nieuwzględnienia w zastosowanym modelu wpływu zniszczenia nawierzchni od obciążeń *SCI300* oraz wskutek propagacji spękań zmęczeniowych, które są głównymi czynnikami powodującymi spadek trwałości nawierzchni podczas jej użytkowania.

Wszystkie przedstawione w pracy wyniki badań są wiarygodne i potwierdzają tezę, że na Litwie mniejszą głębokość kolein

analysis difference of each year in a timeline were analysed and not only the last year when last measurement was done. Results for all test sections are shown in Table 2. Also, all models have a correlation of more than 0.9 in all tested sections between measured and modelled values.

With PARIS1 model forecasts were made for all test sections for 20 years period (Fig. 3). All forecasts were based on the assumption that pavement strength would not change during the entire study period and that it would be equal to the value that was measured after reconstruction. This assumption was made because the current research does not include modelling of pavement strength *SCI300* and cracking, which is the main factor for the decreasing strength over time.

All the results are logical, representing the current tendencies under Lithuanian conditions – pavements with less cracking, surface defects and with strong base have smaller rut depth.

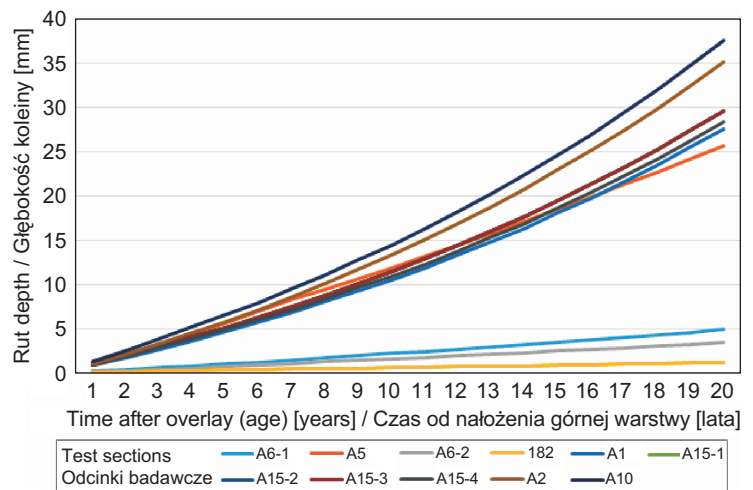


Fig. 3. Results of rut depth for all test sections for the 20-year life period

Rys. 3. Głębokości kolein na odcinkach testowych po 20 latach użytkowania górnej warstwy nawierzchni

4. CONSLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

1. All models have a correlation of more than 0.9 in all measured road sections with modelled values. VTI model showed the highest correlation between the modelled and the measured values in five cases from 11 test sectors.
2. The best result of this analysis is reached with PARIS 1 model – the smallest differences established between modelled and measured values.

mają nawierzchnie dróg o mniejszej intensywności spękań powierzchniowych, z mniejszą liczbą uszkodzeń strukturalnych oraz zbudowane na solidnej podbudowie.

4. WNIOSKI I ZALECENIA

1. Wszystkie przedstawione w pracy modele prognozowania degradacji nawierzchni charakteryzują się wysokim (powyżej 0,9) współczynnikiem korelacji pomiędzy wartościami zmierzonymi na badanych odcinkach dróg a przewidywanymi według modelu. Najlepszą zgodność wartości przewidywanych na podstawie modelu oraz zmierzonych uzyskano w przypadku pięciu z 11 badanych odcinków nawierzchni stosując model VTI.
 2. Najmniejsze różnice między wartościami uzyskanymi w wyniku modelowania oraz z pomiarów uzyskano przy zastosowaniu modelu PARIS 1, który okazał się najbardziej efektywny.
 3. Aby zwiększyć dokładność prognozowania głębokości koleiny należy oszacować tzw. wskaźnik krzywizny ugięcia *SCI300*, który uwzględnia deformację nawierzchni na skutek zmniejszenia jej trwałości.
 4. W celu uzyskania większej dokładności prognozowanych parametrów koleiny zaleca się stosowanie w modelu PPM współczynników kalibracji ustalonych dla poszczególnych klas konstrukcji nawierzchni.
3. For the better prediction of rut depth deterioration, it is necessary to evaluate the *SCI300* – increase in the rut depth owing to the weakening of pavement strength.
 4. To increase the accuracy of the PPMs of rut depth, it is recommended to determine the calibration coefficients for every class of pavement structure.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Braga A.*: Dangu degradacijos modeliai ir jų taikymas Lietuvos automobilių keliams. Daktaro disertacija. Technologijos mokslai, statybos inžinerija-02T, Vilnius, 2005
- [2] *Ferreira A. Picado-Santosb A., Wuc Z., Flintsch G.*: Selection of pavement performance models for use in the Portuguese PMS. International Journal of Pavement Engineering, **12**, 1, 2011, 87-97
- [3] *Morosiuk G., Riley M.J., Odoki J.B.*: Modelling road deterioration and works effects. HDM-4, Vol. **6**, Version 2, PIARC, Paris, 2004
- [4] *Skar A., Holst M.L., Larsen J., Baltzer S., Mollerup M.*: Pavement performance models 2. Validation of performance models. NordFoU, Denmark, 2014
- [5] *Svensson M.*: Modelling pavement performance based on data from the Swedish LTPP database: predicting cracking and rutting. Department of Highway Engineering, Division of Highway and Railway Engineering, Stockholm, 2013
- [6] *Hammarström U., Göransson N.G., Yahya M.R.*: Road deterioration models. Linköping: ECRPD, 2008
- [7] *Sweere G.T.H., Dohmen L.J.M., Jämsä H., Potter J.F., Waterbouwkunde D.W.E.*: Paris performance analysis of road infrastructure in Europe. EC, Luxembourg, 1998