



Aivaras Braga

**MODELS OF PAVEMENT DETERIORATION
AND THEIR ADAPTATION TO LITHUANIAN
AUTOMOBILE ROADS**

**Summary of Doctoral Dissertation
Technological Sciences, Civil Engineering (02T)**

1159

Vilnius „Technika“ 2005

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Aivaras Braga

**MODELS OF PAVEMENT DETERIORATION
AND THEIR ADAPTATION TO LITHUANIAN
AUTOMOBILE ROADS**

Summary of Doctoral Dissertation
Technological Sciences, Civil Engineering (02T)

Vilnius „Technika“ 2005

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2001 – 2005.

Scientific supervisor

Assoc Prof Dr Donatas Čygas (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T)

The dissertation is being defended at the Council of Scientific Field of Civil Engineering at Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Prof Dr Habil Romualdas Mačiulaitis (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T)

Members:

Prof Dr Habil Artūras Kaklauskas (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T)

Dr Habil Leonidas Sakalauskas (Institute of Mathematics and Informatics Technological Sciences, Informatics – 09P)

Prof Dr Habil Vytautas Stankevičius (Institute of Architecture and Construction of Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T)

Assoc Prof Dr Kazys Petkevičius (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T)

Opponents:

Prof Dr Habil Gintaris Kaklauskas (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T)

Prof Dr Habil Jonas Bareišis (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Mechanical Engineering – 09T)

The dissertation will be defended at the public meeting of the Council of Scientific Field of Civil Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at 10 a.m. on September 23, 2005.

Address: Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius-40, Lithuania

Tel.: +37052744952; +37052744956; fax +37052700112

E-mail doktor@adm.vtu.lt

The summary of the doctoral dissertation was distributed on August 22, 2005. A copy of the doctoral dissertation is available for review at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, Vilnius, Lithuania).

© Aivaras Braga, 2005

VILNIUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Aivaras Braga

**DANGŲ DEGRADACIJOS MODELIAI IR JŲ
TAIKYMAS LIETUVOS AUTOMOBILIŲ
KELIAMS**

Daktaro disertacijos santrauka
Technologijos mokslai, statybos inžinerija (02T)

Vilnius „Technika“ 2005

Disertacija rengta 2001–2005 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Mokslinis vadovas

doc. dr. Donatas Čygas (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T).

Disertacija ginama Vilniaus Gedimino technikos universiteto Statybos inžinerijos mokslo krypties taryboje:

Pirmininkas

prof. habil. dr. Romualdas Mačiulaitis (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T).

Nariai:

prof. habil. dr. Artūras Kaklauskas (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T),

habil. dr. Leonidas Sakalauskas (Matematikos ir informatikos institutas, technologijos mokslai, informatika – 09P),

prof. habil. dr. Vytautas Stankevičius (Kauno technologijos universiteto Architektūros ir statybos institutas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T),

doc. dr. Kazys Petkevičius (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T).

Oponentai:

prof. habil. dr. Gintaris Kaklauskas (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T),

prof. habil. dr. Jonas Bareišis (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – 09T).

Disertacija bus ginama viešame Statybos inžinerijos mokslo krypties tarybos posėdyje 2005 m. rugsėjo 23 d. 10 val. Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius-40, Lietuva

Tel.: +37052744952; +37052744956; faksas +37052700112

Elektroninis paštas doktor@adm.vtu.lt

Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2005 m. rugpjūčio 22 d.

Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, Vilnius, Lietuva).

VG TU leidyklos „Technika“ 1159 mokslo literatūros knyga

GENERAL DESCRIPTION OF THE WORK

Relevance of the Research

Planning road maintenance and development activities, prioritizing road construction, reconstruction and rehabilitation works, performing project economic evaluations, forecasting road operation expenditures and road user effect always requires prediction of pavement behaviour. For this purpose models of pavement deterioration are used. Commonly they are integrated in more sophisticated computational systems, known as Pavement Management systems (PMS) and Highway Development and Management systems (HDM).

The implementation of these systems started in Lithuania shortly after the Re-establishment of the Independence. This was triggered by the violent drop in financing of the road sector, forcing to change obsolete road management strategy and planning approach.

The need for project economic evaluations, transport modelling and long term pavement performance forecasts grew up after Lithuania joined the European Union and this brought the opportunity for financing road infrastructure projects from the EU funds. At present only on the Lithuanian state road network the total value of implemented projects, justified by evaluations and modelling with PMS, amounts to about 500 million Litas annually.

Any Pavement Management System is just as good as the models within it, used for pavement deterioration prediction. The performed test calculations show that prediction models, currently used for this purpose in PMS we have in Lithuania, are of doubtful accuracy and have to be improved.

The Aim and Tasks of the Research

The aim of the research is to introduce scientific methods and means of adaptation of pavement deterioration models to Lithuanian automobile roads, and perform the adaptation of the most important models, using the methodology suggested and the research data gathered.

To reach the goal the following tasks have to be completed:

- To study pavement deterioration modelling principles, to define pavement deterioration models, which are essential for pavement performance prediction under Lithuanian conditions, and to research their adaptation possibilities.

- To research parameters that influence pavement deterioration by performing their measurements and surveys on specially chosen road test sections.
- To study the survey data and to adapt the data to the models.
- To supply scientifically based methods for adaptation of the chosen models to the local conditions.
- To adapt pavement deterioration models to Lithuanian automobile roads and to perform a statistical evaluation of the adopted models.
- If the statistical analysis results show insufficient adapted model accuracy and reliability – to work out other model adaptation or pavement deterioration prediction methods and means.

The Object and Methods of Investigation

The dissertation describes the authors' investigation on pavement deterioration models, their adaptation to the local conditions methods, possibilities of pavement deterioration prediction on Lithuanian state roads with bituminous pavements. Model adaptation involves two basic stages:

- input data collection, processing and adaptation to the model;
- calibration of the model outputs by adjusting the model parameters to enhance how well the forecast and model outputs represent the changes and influences over time and under particular local conditions.

Model adaptation and adopted model evaluation were performed by incorporating theoretical, analytical and statistical-mathematical analysis methods.

Scientific Novelty and Originality of the Research

In the period from 1997 to 2003 SE Transport and Road Research Institute to the order of Lithuanian Road Administration carried out so called Bituminous Pavement Deterioration Parameters Research Project. The duration and the scale of the research make the Project one of a kind on Lithuanian scale. The author of the dissertation participated in the Project from the very beginning. The gathered research data make the basis for his dissertation, allowing him to perform detailed and scientifically validated adaptation of bituminous pavement deterioration models to the Lithuanian automobile roads for the first time. This and the new approach, introduced by the author, make the scientific novelty and originality of the dissertation.

Practical Importance of the Research

Some of the earlier announced results of this doctoral dissertation are already implemented in practice. SE Transport and Road Research Institute, which holds the leading position in Lithuania on preparation of road infrastructure investment projects and feasibility studies, according to the author's recommendations, revised pavement deterioration models used in

Lithuanian PMS DAVASEMA and introduced calculated pavement deterioration model calibration factors in their HDM-4 system. The adjustments put more confidence on precision of the pavement performance forecast and the project (economic) evaluation results generally.

Approbation of the Research

The main findings of the dissertation were presented and discussed during the following conferences:

1. Adaptation of Pavement Performance Models to Lithuanian Automobile Roads. The 5th International Conference “Environmental Engineering”, section “Roads and Railways”, Vilnius, May 23-24, 2002.
2. Asphalt pavement research project in Lithuania. The Ninth International Conference on Asphalt Pavements, Copenhagen, August 17-22, 2002.
3. Pavement Management System of Lithuanian State Roads. International Baltic Roads Conference, Vilnius, August 24-27, 2003.
4. Need and Possibilities for Prediction of Bituminous Pavement Deterioration. National conference “Civil Engineering and Geodesy”, section of Civil Engineering, Vilnius, October 17, 2003.
5. Experience on Adaptation and Calibration of HDM-4 Pavement Deterioration Models. The 6th International Conference on Environmental Engineering, section “Roads and Railways”, Vilnius, May 26-27, 2005.

The Framework of the Doctoral Dissertation

The dissertation consists of Introduction, five chapters, general conclusions and a list of 93 references. The text of the dissertation is presented on 155 pages and modelled on a computer and printed at an interval of 1,5 lines. The work includes 54 figures and 28 tables.

THE CONTENTS OF THE DISSERTATION

The Introduction describes the necessity of predicting pavement deterioration. Also the relevance of the research, the scientific novelty and originality of the dissertation and its aim and practical importance are revealed in this chapter.

Chapter 1 titled Highway Development and Management Systems and the Use of Pavement Deterioration Models reviews pavement deterioration models in basic, their application and the need and importance for their calibration and adaptation to the local conditions.

Highway Design and Maintenance Model HDM-III is referred as one of the first PMS. It contains pavement deterioration relationships, based on

field study data from more than 30 countries. The latest version HDM-4 (Highway Development and Management Model) is suitable for evaluation of long term economic, technical, social and environmental effect of road construction, reconstruction, rehabilitation and maintenance projects. Currently HDM-4 is the best known PMS worldwide.

HDM-III and HDM-4 are known and have their application in Lithuania too. Moreover, in 1994 SE Transport and Road Institute to the order of Lithuanian Road Administration and with strong support from specialists from Great Britain P.Burgess, J. Snell and P.Aldrige developed Lithuanian PMS – DAVASEMA based on HDM-III. For about ten years now it is implemented and fully functional. Thou, it still uses original HDM pavement deterioration models with marginal adaptations to Lithuanian conditions.

Pavement deterioration is a natural process resulting in constant decrease in pavement serviceability as the effect of traffic loading, environment and pavement response. Pavement Deterioration Models give forecast on the pavement serviceability indicators in time as a function of the factors describing pavement characteristics, traffic and environment.

The influence of various factors on deterioration of road pavement is always estimated experimentally and modelled empirically. Measures and resources used for the research of the relationships should be rational and feasible. This always leads to the limited amount of factors to be studied. On the other hand, the reliability and accuracy of developed pavement deterioration models is highly subject to the duration and level of detail of studies carried out. As it was already mentioned, only the original HDM pavement deterioration models are used in DAVASEMA and in other PMS applied in Lithuanian, and those models were not adapted to the local automobile roads by any field studies.

The demand and significance of pavement behaviour forecasts and adaptation of pavement deterioration models or development of the new ones is emphasized by foreign and Lithuanian researches W. D. O. Paterson, P. Ekdahl, C. R. Bennett, V. Puodžiukas, D. Čygas.

The accuracy and reliability of the results depend on two basic issues (refer to Figure 1):

- how well the available data represent the real conditions and fit to the model;
- how well the model predictions fit the real behaviour and respond to prevailing conditions.

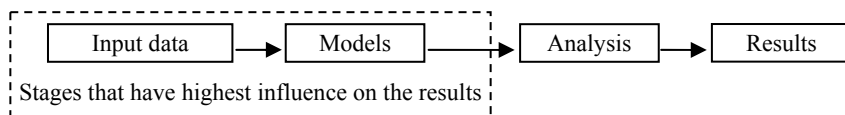


Figure 1. HDM modelling process

The aim and the tasks of the doctoral dissertation were formulated taking into consideration the significance of adaptation of the models to Lithuanian automobile roads and the peculiarities of the models and their practical application.

Chapter 2 titled *Analysis of Pavement Deterioration Models* reviews factors influencing pavement deterioration in general and particularly in Lithuania. It gives analysis of the main prediction models for pavement deterioration, included in PMS, currently used in Lithuania, and possibility of their adaptation.

Pavement deterioration is a natural process, influenced by a number of factors. The majority of these factors are random and can't be neither measured nor modelled precisely. Only in the relationships which are analyzed in this work about 60 various factors are introduced. The fact, that road pavement structure is one of the most complicated objects in research and modelling sense, makes the use of some assumptions and simplifications inevitable.

All the interacting factors, effecting pavement deterioration, could be divided into three groups, which could be further divided into subgroups:

- 1) Road: pavement structure, pavement distresses and other serviceability indicators, geometry, maintenance;
- 2) Traffic: vehicles and traffic flow;
- 3) Environment: climate, geology (hydrology), time.

Asphalt roads or roads with bituminous pavements make the majority in Lithuanian state road network (59 percent). Even 95,2 percent of the main roads have asphalt pavements. Accordingly, the investments, spent for development and maintenance of asphalt roads, make the biggest share part in the national road budget (National Program for Financing of Road Development and Maintenance). The adaptation of asphalt pavement deterioration models has an apparent priority.

Chapter presents short review of practical possibilities to perform field studies on the factors, affecting the deterioration of asphalt pavements. In Lithuania models for prediction of pavement deterioration are basically applied for planning purposes. The author states, that their cost effective use

is possible only with the data from the regular road network surveys. And the goal of the work is to improve the accuracy and reliability of those models, having constant number of participating factors and using regular equipment for their measurement.

Analysis of the distress modes led to the conclusion, that the most important factors are those affecting the appearance and progression of cracking and rutting, and leading to the increase of roughness. Roughness and cracking are classified by HDM as having high or moderate impact on PMS outcomes, so adaptation of correspondent models is of the highest priority.

Two sets of models were chosen for analysis and adaptation: 1) as described in the ISOHDM study Modelling Road User Effect In HDM-4, prepared and published by N. D. Lea International (NDLI) in 1995; currently adopted in DAVASEMA; 2) HDM-4 models, implemented within HDM-4 system (1999 edition) and as described in its documentation; originally developed by W. D. O. Paterson.

Pavement rutting progression incremental model is expressed in Equation 1 as described in HDM-4:

if $AGE \leq 1$:

$$\Delta RDM = RDO + \Delta RDPD + \Delta RDW; \quad (1)$$

else:

$$\Delta RDM = \Delta RDST + \Delta RDPD + \Delta RDW; \quad (2)$$

where: ΔRDM – total annual increase in rut depth, mm; RDO – rutting due to initial densification of newly constructed pavement bituminous layers, mm; $\Delta RDST$ – total incremental annual increase in structural deformation, mm; $\Delta RDPD$ – incremental annual increase in plastic deformation, mm; ΔRDW – incremental annual increase in pavement surface due to studded tires, mm.

Pavement roughness progression incremental model is expressed in Equation 3 as described in HDM-4:

$$\Delta RI = K_{gp} (\Delta RI_s + \Delta RI_c + \Delta RI_r + \Delta RI_t) + \Delta RI_e; \quad (3)$$

where: ΔRI – total annual change in pavement roughness, m/km; ΔRI_s – structural component of roughness, relates to the deformation in the pavement materials under the shear stresses imposed by traffic loading, m/km; ΔRI_c – incremental change in roughness due to cracking, m/km; ΔRI_r – incremental change in roughness due to variation of rut depth, m/km; ΔRI_t – incremental change in roughness due to potholing, m/km; ΔRI_e – environmental component of roughness due to factors which include temperature and moisture fluctuations, and also foundation movements, m/km; K_{gp} – calibration factor for roughness progression.

Cracking models are presented in Figure 2, Figure 3 and Figure 4.

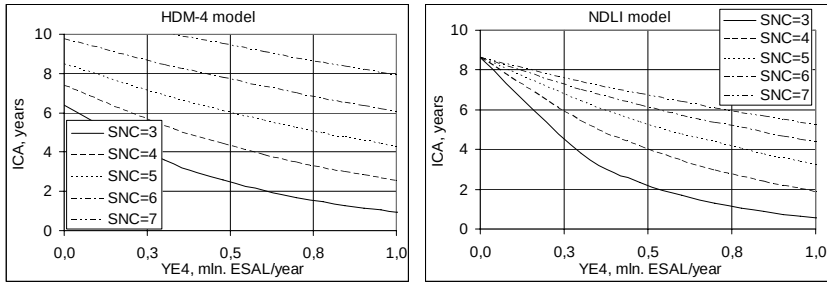


Figure 2. HDM-4 and NDLI structural cracking initiation models: ICA – time to initiation of structural cracking; YE4 – annual traffic loading; SNC – pavement modified structural number

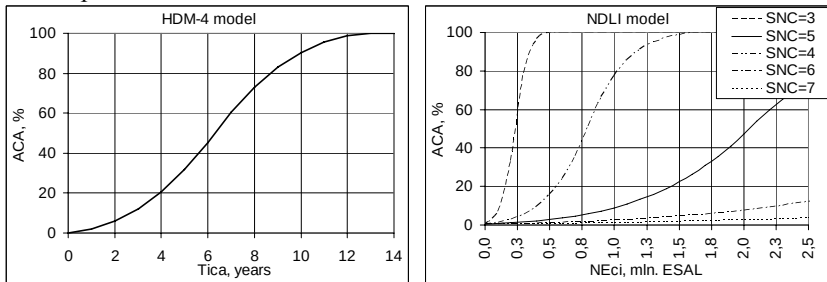


Figure 3. HDM-4 and NDLI structural cracking progression models: ACA – area of structural cracking; Tica – time since initiation of cracking; NEci – cumulative traffic loadings since initiation of cracking

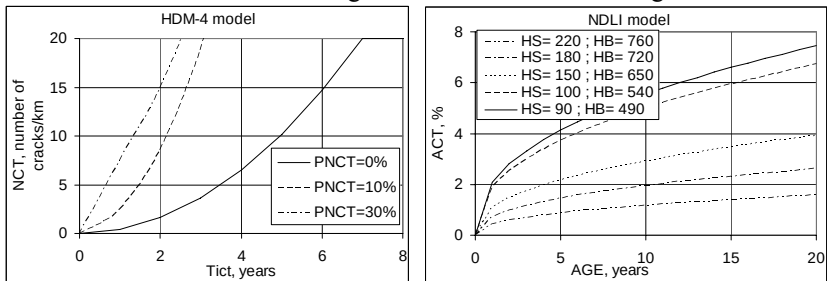


Figure 4. HDM-4 and NDLI thermal cracking progression models: NCT – number of thermal cracks per km of roads; ACT – area of thermal cracking; Tict – time since initiation of thermal cracking; AGE – time since last pavement rehabilitation; PNCT – area of thermal cracking before the last rehabilitation; HS – total thickness of bituminous layers (mm); HB – total thickness of granular base and sub-base layers (mm)

Chapter 3 titled Experimental Research describes the object, methods and means of experimental research and presents the main results of field studies. In order to determine deterioration trends of Lithuanian roads with asphalt pavements experimental research was conducted on 40 test sections on the main and national roads. The same measurement equipment and methods as for the regular road network surveys were used:

- falling weight deflectometer FWD DYNATEST 8000 for measurement of pavement deflections;
- car mounted laser profilometer DYNATEST 5051 RSP for measurement of road roughness and rut depth;
- traffic counters MARKSMAN 660;
- visual pavement distress inspections.

Chapter 4 titled *Data Processing and Adaptation For the Use With Pavement Deterioration Models* reviews the main research data processing problems, concentrating on calculation of pavement structural adequacy and evaluation of seasonal effect on it.

In HDM pavement deterioration models pavement structural adequacy (or strength) is expressed in terms of so called modified pavement structural number SNC (AASHTO, 1968). Four methods for estimation of pavement structural adequacy SNC were tested:

- AASHTO Non-destructive Test Method I – back-calculation of layer modulus – the root AASHTO method for calculation of SNC;
- AASHTO Non-destructive Test Method II – together with AASHTO design procedure is used for pavement design or evaluation of pavement strengthening needs (also in Lithuania);
- Jameson's method – G. W. Jameson developed this method in 1993 from mechanistic analysis of a wide range of flexible pavements
- HDM-4 method – simplified SNC calculation method, suggested by HDM-4 User Guide and based on the method, originally developed by Watanatada et al. for Bankelman beam testing.

Statistical comparison of these methods is given in Table 1.

Basing on the statistical comparison of the methods and taking into account recommendations from W.D.O. Patterson, Jameson's and HDM-4 methods were chosen for further analysis (carried out in Chapter 5).

For determination of average annual values of pavement structural adequacy parameters (SNC, also SN –structural number for the pavement, SNSG – structural number contribution from the subgrade and Mr – subgrade modulus) seasonal curves of transfer coefficients Kvid were set out.

The curves were equipped with reliability intervals, so the same curves could be used for determination of annual critical values too.

Table 1. Statistical comparison of SNC calculation methods

Methods compared Statistical characteristics	AASHTO NDT I vs. AASHTO NDT II	Jameson's vs. AASHTO NDT I	AASHTO NDT II vs. Jameson's	Jameson's vs. HDM-4
Sample size	35	35	35	167
Standard deviation	0,84	0,72	1,05	0,21
Average deviation, %	8,7%	-20,6%	37,9%	-0,9%
R-squared	0,73	0,84	0,58	0,89
Correlation coef.	0,85	0,92	0,76	0,95
Correlation coef. (Rohde, 1996)	0,84	0,84	0,75	n.a.

Note: n.a. – data not available.

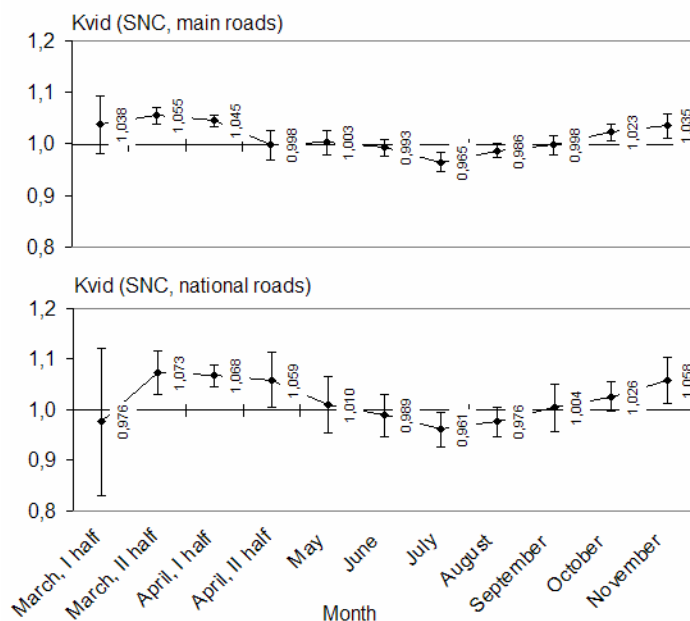


Figure 5. Seasonal curves of seasonal factors for calculation of the mean annual value of SNC for the main and national roads (with 99,9% reliability intervals)

The analysis of the seasonal variation of pavement structural adequacy parameters and seasonal curves proved that pavement structures of

the national roads are more subject to seasonal changes than of the main roads. This is obviously shown by wider reliability limits for seasonal curves of national roads, meaning wider variation in structural adequacy during one year.

For data storing, sorting, processing and analysis purposes a specialized database, working within MS Access, was programmed (Figure 6). Equipped with the special queries, this database is suitable for simple model calibration tasks (as described in Chapter 5).

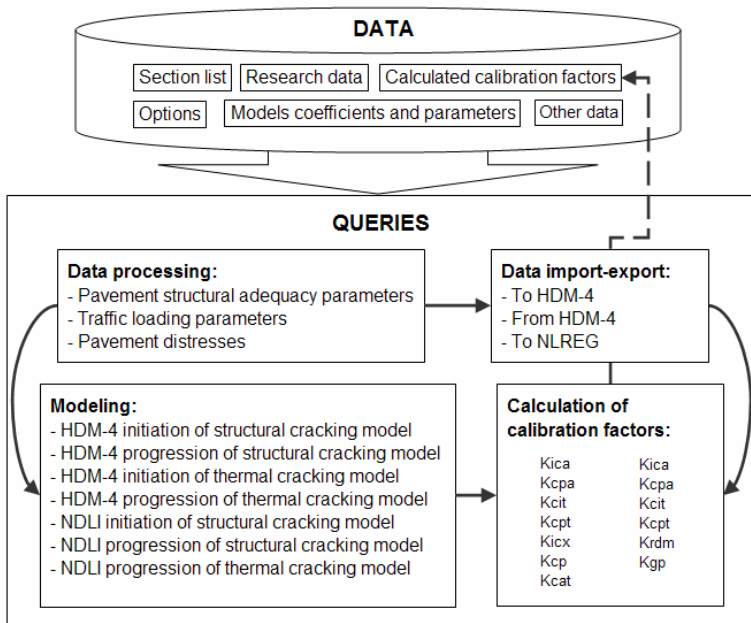


Figure 6. Structure of created database

Chapter 5 titled *Adaptation of Pavement Deterioration Models To Lithuanian Conditions* is the most important part of this doctoral dissertation, describing the suggested methodology for calibration and adaptation of pavement deterioration models and the results achieved.

First of all, the models were tested using pavement structural adequacy calculation results, received by using different calculation methods (Jameson's and HDM-4). It was determined that better model adaptation accuracy and reliability is likely to be achieved using critical annual

structural adequacy values, calculated by Jameson's method. These values were applied in the final model calibration and adaptation analysis.

Model accuracy and reliability requirements were set basing on the accuracy and reliability of the original HDM deterioration models announced by their developers (Table 2).

Table 2. Desirable level of accuracy and reliability for calibrated models

Cracking initiation models	Cracking progression models	Other models
$SIQF \leq 0,36$; $\beta \geq 2,0$;	$V \leq 50\%$; $S \leq 1,2$; $R^2 \geq 60\%$;	$V \leq 40\%$; $R^2 \geq 75\%$.

Note: *SIQF* – semi-interquartile factor; β – Weibull distribution parameter beta; V – coefficient of variance; S – standard deviation; R^2 – R-squared.

Four model calibration and adaptation algorithms of different complexity were suggested:

- 1) model calibration, with modelling, performed with the original HDM-4 software;
- 2) model calibration, with modelling, performed with the queries of the created database;
- 3) model calibration with statistical optimization;
- 4) detailed model adaptation with statistical optimization.

The last two were specially developed for cracking models. As the results of cracking initiation (both structural and thermal) model calibration has influence on cracking progression model calibration (and vice versa), it was stated that these models must be calibrated as one. Therefore cracking initiation expression was inserted into cracking progression model. The new expression has two unknown quantities (two calibration factors) and can be solved by applying optimization methods. The goal of optimization is to minimize model deviations, and the particular model expression makes limiting function.

Method No 1 gave satisfactory accuracy and reliability results for roughness model ($V=17\%$; $R^2=0,87$), therefore this model was eliminated from the further analysis. Statistical parameters of other models were not tolerable, but adaptation of rutting model was also finished at this early stage ($V=21\%$; $R^2=0,60$) due to the lack of data ($n=13$). Correlation charts of roughness progression and rutting progression models, calibrated to Lithuanian conditions, are presented in Figure 7.

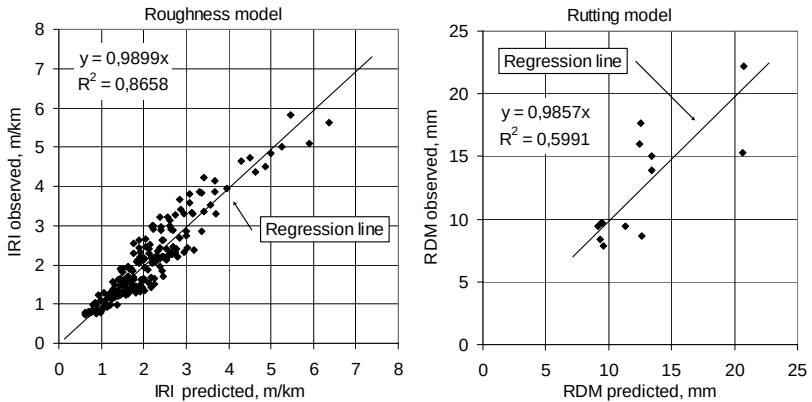


Figure 7. Correlation charts of roughness progression and rutting progression models

All four model calibration and adaptation algorithms were tested on cracking models.

Received model accuracy and reliability results correspond to the level of complexity of the algorithm applied. The best results were received using optimization methods. Correlation charts of HDM-4 and NDLI structural cracking models, calibrated to Lithuanian conditions using optimization methods, are presented in Figure 8.

Detailed adaptation results for cracking models are presented in figures (Figure 9 – Figure 12) and in equations (Equation 4 – Equation 8).

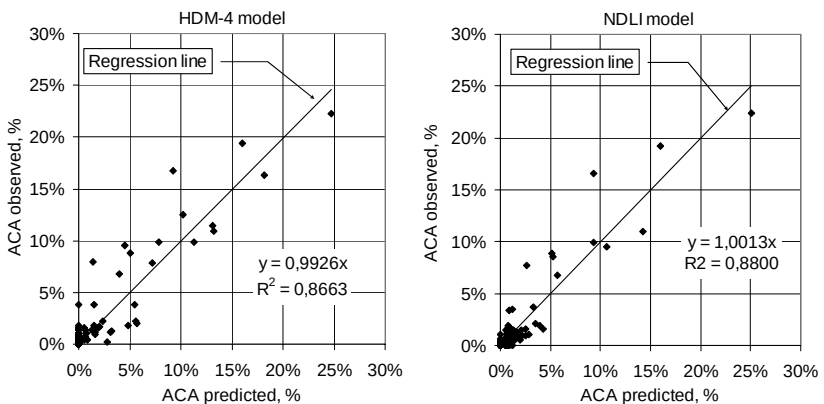


Figure 8. Correlation charts of HDM-4 and NDLI structural cracking models

Table 3. Models calibration results

Pavement deterioration model	Road type	Calibration factor	Defined value	S	V
HDM-4 structural cracking	Main	Kcia	0,99	0,02	0,02
		Kcpa	0,94	0,08	0,09
	National	Kcia	0,46	0,01	0,03
		Kcpa	0,92	0,04	0,04
NDLI structural cracking	Main	Kicx	0,91	0,02	0,02
		Kcp	0,48	0,05	0,11
	National	Kicx	0,00	-	-
		Kcp	0,77	0,04	0,05
Rutting (HDM-4)	All	Krdm	1,46	0,31	0,21
Roughness (NDLI)	All	Kgp	0,80	0,14	0,17

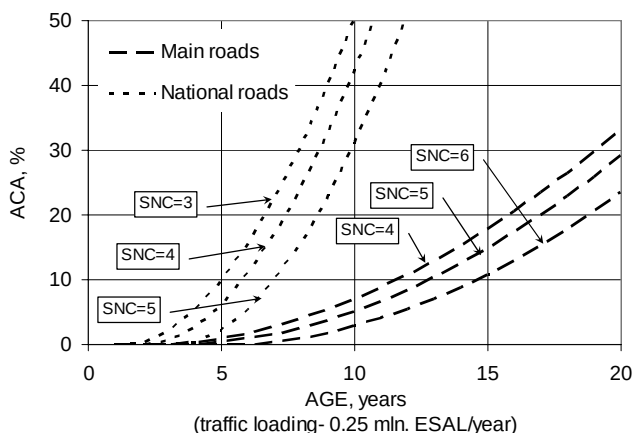


Figure 9. Adopted structural cracking model, based on the original HDM-4 model (model statistics: n=197; S=1,05; R²=0,90):

$$ACA = \max\left(\left(\frac{Kcpa}{CDS^2} \cdot a_0 \cdot a_1 \cdot 1,195 (AGE - CDS^2 \cdot 0,418 \cdot \exp(0,422 \cdot (SNC + \frac{YE4}{SNC^2}))))\right)^{1/(1,195 \cdot a_1)}, 0\right); \quad (4)$$

where: Kcpa – model calibration factor, for Lithuanian main roads Kcpa=0,45; for national roads – Kcpa=1,17; CDS – construction defect indicator; a₀, a₁ – coefficients (as defined in HDM-4).

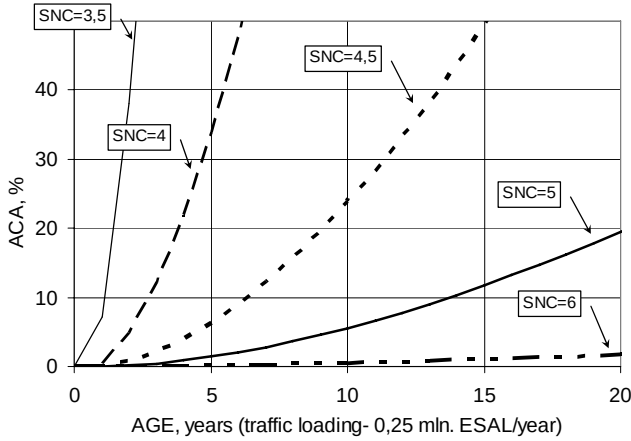


Figure 10. Adopted structural cracking model, based on the original NDLI model (model statistics: $n=193$; $S=1,124$; $R^2=0,86$):

$$ACA = (72679 \cdot 0,59 \cdot \max(\text{NE-} \\ \text{-YE4 } 0,682 \exp(1,642 \text{ YE4/SNC}^2); 0) \cdot \text{SNC}^{-6,234})^{1/0,59}, \quad (5)$$

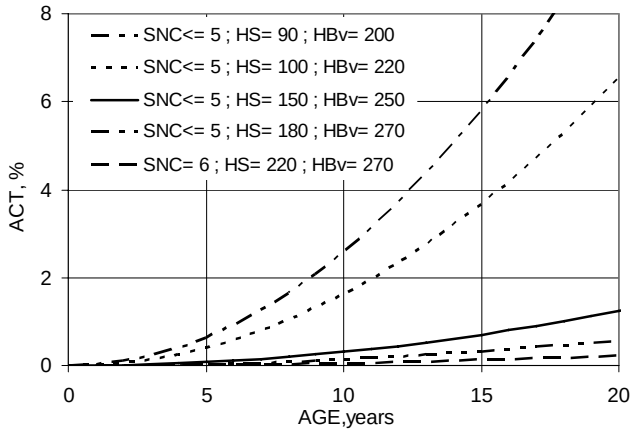


Figure 11. Adopted thermal cracking model, based on the original HDM-4 model (model statistics: $n=114$; $S=0,161$; $R^2=0,57$):

$$ACT = 1/20 / (CDS^{2,66} \cdot 27,79 \cdot \text{AGE}^2 / (9,10E-25 \cdot \text{HBv}^{10,53} + 4,56E-7 \cdot \text{HS}^{4,125} + 3,66E-44 \cdot \text{SNC}^{58,94})) \quad (6)$$

where: HBv – total thickness of granular base layers, mm.

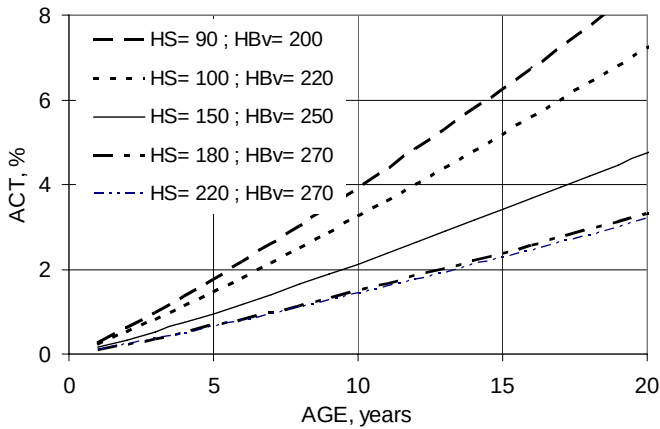


Figure 12. Adopted thermal cracking model, based on the original NDLI model (model statistics: $n=131$; $S=0,111$; $R^2=0,78$):

$$ACT=50 \cdot AGE^{1,156} / (0,452 \cdot 10^a); \quad (7)$$

where:

$$a=0,417+3,191 \cdot YE4^{0,375}+0,00013 \cdot FI+4,2832E-10 \cdot HBv^{3,747}+6,14E-6 \cdot (HS/25,4) \cdot AVIS^{1,444}; \quad (8)$$

FI – Freezing Index, °C days; AVIS – asphalt viscosity, Pa s.

GENERAL CONCLUSIONS

1. The analysis of the latest HDM pavement deterioration models, implemented in PMS used in Lithuania (HDM-III, HDM-4 and DAVASEMA), shows that the most important are roughness, cracking and rutting models. Their calibration and adaptation to Lithuanian automobile roads have to be carried out first.

2. The effective use of pavement deterioration models for planning purposes is only possible if their sufficient prediction precision could be reached with the data from the regular road network surveys only. It is impossible to make analysis of all factors participating in road deterioration process or influencing it, so only the most important of them – traffic, pavement structure and distresses – were measured and studied during the experimental research, which was carried out during 6 years on 40 test sections on the main and national roads.

3. Specialized database was developed and implemented for research data analysis, processing and adaptation to the model. It was stated that in this stage the main attention has to be paid to the calculation of pavement

structural adequacy parameters and to their seasonal variation. This statement was proved by sensitivity test, which shows that some model results can differ up to 2,3 times and even more due to the use of different seasonal adjustment methods. Four structural adequacy calculation methods and two of their seasonal adjustment methods were analyzed and tested.

4. Three asphalt pavement deterioration model calibration algorithms and one model detailed adaptation method was developed and tested. During the testing, detailed adaptation and statistical evaluation of roughness, rutting and cracking models to Lithuanian automobile roads were carried out.

5. Desirable level of accuracy and reliability for adapted models was adopted from the authors of the models (Table 2). Model calibration and adaptation results show that model accuracy and reliability is equivalent to the complexity of calibration or adaptation method applied. The best results were achieved by applying the developed model detailed adaptation method with statistical optimization.

6. The final results show that the desirable level of accuracy and reliability of pavement deterioration models can be reached by applying adequate data adaptation and model calibration methods, including those suggested by the author. The doctoral dissertation proves that it is possible to achieve sufficient precision of asphalt pavement deterioration forecasts on Lithuanian roads with the input data from the regular road network surveys only, if the models calibrated and adopted by the author are used.

PUBLICATIONS

In accordance with the material from the dissertation, the following publications were written and published:

1. Braga A. Adaptation of Pavement Performance Models To Lithuanian Conditions. In: Proceedings of the 5th International Conference “Environmental Engineering”, section “Roads and Railways”, Vilnius, May 23-24, 2002. Vilnius: Technika, 2002, p 84, 190 (in Lithuanian).
2. Braga A., Puodžiukas V. Asphalt pavement research project in Lithuania. In: Proceedings of the Ninth International Conference on Asphalt Pavements, Vol.1, Copenhagen, August 17-22, 2002 (on CD).
3. Braga A., Čygas D. Adaptation of pavement deterioration models to Lithuanian automobile roads. *Journal of Civil Engineering and Management*, Vol VIII, No. 3. Vilnius: Technika, 2002, p 214-220.

4. Braga A., Čygas D., Laurinavičius A., Puodžiukas V. Investigation of road pavement deterioration trends in Lithuania. *Journal of Civil Engineering and Management*, Vol IX, No 1. Vilnius: Technika, 2003, p 3-9.
5. Braga A., Čygas D., Puodžiukas V. Experience on adaptation and calibration of HDM-4 pavement deterioration models. Proceedings of the 6th International Conference on Environmental Engineering Vol 2, Vilnius, May 26-27, 2005. Vilnius: Technika, 2005, p 664-668.

BENDRAS DISERTACIJOS APRAŠYMAS

Darbo aktualumas

Planuojant automobilių kelių priežiūrą ir plėtrą, nustatant automobilių kelių tiesimo, rekonstrukcijos ir remontų prioritetus, įvertinant ir pagrindžiant projektus ekonominiu aspektu, prognozuojant kelių eksploatacines ir kelio naudotojų išlaidas, neišvengiamai susiduriama su būtinybe prognozuoti kelių dangos būklę. Tuo tikslu naudojami kelių dangų degradacijos (KDD) modeliai, kurie dažniausiai būna integruoti į sudėtingesnes dangų būklės valdymo, kelių priežiūros ir plėtros planavimo sistemas.

Lietuvoje šios sistemos atsirado ir pradėtos diegti iš karto po nepriklausomybės atgavimo, kai ženkliai sumažėjęs valstybinio kelių sektoriaus finansavimas privertė keisti nusistovėjusį požiūrį į kelių priežiūros ir plėtros planavimą.

Ekonominių skaičiavimų, transporto modeliavimų ir ilgalaikių dangų degradacijos prognozių poreikis dar labiau išaugo Lietuvai įstojus į Europos Sąjungą ir atsiradus projektų finansavimo iš ES paramos fondų galimybei. Šiuo metu skaičiavimais su PMS sistemomis vien tik Lietuvos valstybinės reikšmės keliuose pagrindžiama darbų už apytiksliai 500 mln. litų sumą.

Bet kokia kelių dangos būklės valdymo sistema yra tik tiek gera, kiek geri yra joje naudojami modeliai, skirti dangos būklės prognozei. Atlikti bandomieji skaičiavimai rodo, kad šiuo metu naudojamų KDD modelių tinkamumas Lietuvos automobilių kelių būklei prognozuoti yra abejotinas. Todėl, šių modelių pritaikymas Lietuvos sąlygoms yra būtinas.

Darbo tikslas ir uždaviniai

Darbo tikslas – pasiūlyti metodus ir priemones dangų degradacijos modelių pritaikymui Lietuvos automobilių keliams ir, panaudojant eksperimentinių tyrimų duomenis bei sukurtą metodiką, atlikti svarbiausių ir reikšmingiausių modelių pritaikymą.

Darbo tikslui pasiekti buvo suformuluoti šie spęstini uždaviniai:

- Išanalizuoti patobulintų dangų degradacijos modeliavimo principus ir pačių modelių struktūrą, nustatyti iš jų svarbiausius, reikalingus kelio dangos būklės prognozavimui Lietuvos sąlygomis ir ištirti jų pritaikymo galimybes ir metodus.
- Ištirti kelio dangos degradaciją apibūdinančius parametrus ir kitus tam turinčius įtakos faktorius eksperimentiniuose kelių ruožuose, atliekant tų parametrų matavimus ir skaičiavimus.

- Atlikti eksperimentinių tyrimų rezultatų analizę ir pritaikymą naudojimui HDM kelių dangų degradacijos modeliuose.
- Pasiūlyti dangų degradacijos modelių pritaikymo Lietuvos sąlygomis metodus.
- Pritaikyti pasirinktus dangų degradacijos modelius Lietuvos automobilių keliams. Statistiškai įvertinti pritaikytų modelių tikslumą ir patikimumą.
- Esant nepatenkinamam dangų degradacijos prognozių su pritaikytais modeliais tikslumui ir patikimumui, pasiūlyti kitus modelių pritaikymo metodus arba parinkti geriau Lietuvos sąlygoms tinkančias kelių dangų degradacijos priklausomybes.

Tyrimo objektas ir metodai

Disertacijoje nagrinėjami automobilių kelių dangų degradacijos modeliai, jų pritaikymo vietos sąlygoms metodai, galimybės prognozuoti asfaltbetonio dangų degradaciją Lietuvos valstybinės reikšmės automobilių keliuose. Modelių pritaikymą sudaro tokie pagrindiniai etapai:

- duomenų surinkimas, jų apdorojimas ir pritaikymas dangų degradacijos modeliams;
- modelių pritaikymas esamoms sąlygoms nustatant jų kalibravimo koeficientus arba dangų degradacijos parametrų tarpusavio priklausomybes.

Modelių pritaikymui autorius naudoja teorinius, analitinius, statistinės analizės ir matematinio modeliavimo metodus.

Mokslinis darbo naujumas ir originalumas

Darbo tyrimų pagrindą sudaro 1997 – 2003 metais Lietuvos Automobilių kelių direkcijos užsakymu VĮ Transporto ir kelių tyrimo instituto vykdytos tyrimų programos “Dangų irimo parametrų nustatymas įvairių tipų juodoms dangoms”, kurioje tiesiogiai dalyvavo ir disertacijos autorius, rezultatai. Tokios trukmės ir tokio masto tyrimai Lietuvos automobilių keliuose atlikti pirmą kartą, o sukaupta unikali tyrimų medžiaga leidžia pirmą kartą atlikti išsamų ir moksliai pagrįstą dangų degradacijos modelių pritaikymą Lietuvos automobilių keliams. Tai, o kartu autoriaus pasiūlyti nauji duomenų analizės ir modelių pritaikymo metodai sudaro šio darbo mokslinį naujumą ir originalumą.

Praktinė darbo nauda

Kai kurie anksčiau paskelbti šio darbo rezultatai jau yra įdiegti praktikoje. VĮ Transporto ir kelių tyrimo institutas, kuris neabejotinai pirmąja Lietuvoje kelių investicinių projektų ruošime, pagal autoriaus

rekomendacijas pataise kai kuriuos DAVASEMA sistemoje naudojamus modelius, o sistemose HDM-III ir HDM-4 jau naudoja autoriaus pasiūlytus kelių dangų degradacijos modelių kalibravimo koeficientus. Tai leidžia tiksliau prognozuoti kelio dangos būklę bei planuoti remonto ir kitus darbus valstybinės reikšmės automobilių keliuose.

Darbo aprobavimas ir autoriaus publikacijos

Pagrindiniai darbo rezultatai paskelbti ir svarstyti 4 tarptautinėse ir 1 respublikinėje mokslinėje konferencijoje. Disertacijos tema publikuoti 5 mokslo darbai, 2 iš jų – Mokslo ir studijų departamento patvirtinto leidinių sąrašo žurnaluose.

Darbo struktūra ir apimtis

Disertaciją sudaro įvadas, penki skyriai, bendrosios išvados, 93 pavadinimų literatūros šaltinių sąrašas. Disertacijos tekstas sumaketuotas kompiuteriu ir išspausdintas 1,5 intervalo eilėtarpiu 155 puslapiuose. Darbe yra 54 paveikslai ir 28 lentelės.

Įvade pagrindžiamas automobilių kelių dangos būklės prognozavimo poreikis, pristatomas tyrimų objektas ir priemonės, darbo tikslas ir uždaviniai, darbo aktualumas, mokslinis naujumas ir originalumas.

Pirmame skyriuje pristatomos dangų būklės valdymo, kelių priežiūros ir plėtros planavimo sistemos, kuriose dažniausiai ir sutinkame dangų degradacijos modelius.

Kelio dangos degradacija – tai jos eksploatacinių savybių praradimas veikiant automobilių eismui, klimato ir aplinkos veiksniams bei laikui, kuris pasireiškia įvairių defektų ir pažaidų atsiradimu. Kelio dangos degradacijos modeliai prognozuoja dangos eksploatacinių savybių kitimą laike, kaip funkciją nuo minėtų faktorių, veikiančių dangos konstrukciją, o taip pat nuo pačios konstrukcijos techninių parametrų bei kitų veiksnių.

Apžvelgiama dangų būklės valdymo, kelių priežiūros ir plėtros planavimo sistemų raida pasaulyje ir Lietuvoje bei jų taikymo sritys. Aprašomi sistemose naudojami dangų degradacijos modeliai, konstatuojama jų pritaikymo vietos sąlygoms svarba, apžvelgiamos modelių pritaikymo Lietuvos automobilių keliams galimybės.

Antrame skyriuje apžvelgti veiksniai, įtakojantys kelio dangos degradaciją bendrai ir ypatingai Lietuvos sąlygomis. Tokių veiksnių gausa ir įvairovė (vien analizuojamuose modeliuose jų dalyvauja apie 60) neleidžia jų visų detaliai ištirti ir įvertinti. Tačiau, dangų degradacijos prognozė

dažniausiai taikytina planavimo etape, todėl prieita išvados, kad efektyvus dangų degradacijos modelių taikymas galimas tik jeigu yra galimybė pasiekti pakankamą jų prognozės tikslumą ir patikimumą naudojant tik reguliariai visame valstybinės reikšmės automobilių kelių tinkle vykdomų automobilių eismo ir kelių eksploatacinių charakteristikų tyrimų duomenis, bei duomenis apie kelių dangos konstrukciją.

Įvertinant kelių su asfaltbetonio dangomis svarbą Lietuvos automobilių kelių tinkle, tolimesnei analizei pasirinkti asfaltbetonio dangų degradacijos modeliai. Skyriuje detalai išnagrinėti Lietuvoje žinomi ir praktiškai pritaikyti pagrindiniai asfaltbetonio dangų degradacijos modeliai, prognozuojantys plyšius, provėžas ir dangos nelygumą.

Trečias skyrius skirtas supažindinti su eksperimentinių tyrimų objektu, naudota tyrimų metodika bei priemonėmis.

Tyrimų metu buvo vykdomi stebėjimai ir matavimai 40-yje pasirinktų ruožų, esančių magistraliniuose ir krašto reikšmės keliuose. Du kartus metuose buvo atliekami: kelio dangos nelygumo ir provėžų gylio matavimai su lazeriniu profilometru DYNATEST 5051 RSP; tamprių kelio dangos įlinkių matavimai su deflektometru FWD DYNATEST 8000; automobilių eismo intensyvumo skaičiavimai su skaičiuokliais-klasifikatoriais MARKSMAN 660; pažaidų stebėjimai vizualiai. Kitų reikalingų duomenų nustatymui buvo naudotasi Lietuvos valstybinės reikšmės kelių informacinės sistemos, techninių projektų ir kitų šaltinių duomenimis.

Ketvirtame skyriuje aprašomas pirmas asfaltbetonio dangų degradacijos modelių pritaikymo etapas – eksperimentinių tyrimų duomenų apdorojimas ir pritaikymas naudojimui modeliuose. Įvardintos dvi pagrindinės problemos: 1) kelio dangos konstrukcijos stiprumo rodiklio, taip vadinamo modifikuoto struktūrinio skaičiaus SNC, skaičiavimas naudojant dangos įlinkių matavimų duomenis ir 2) šio rodiklio sezoniskumo įvertinimas.

Skyriuje išanalizuoti 4 SNC skaičiavimo metodai ir pateiktas jų statistinis vertinimas. Sezoniskumo įvertinimui sudarytos sezoninės kreivės, leidžiančios nustatyti vidutinę metinę arba kritinę metinę SNC vertę.

Šiame etape buvo sukurta specializuota duomenų bazė, turinti užklausų modulį ir vykdanči duomenų saugojimo, rūšiavimo, apdorojimo bei nesudėtingo modelių kalibravimo uždavinius. Atlikta eksperimentinių tyrimų rezultatų analizė leido detalizuoti asfaltbetonio dangų degradacijos tendencijas Lietuvos automobilių keliuose.

Penktas skyrius yra svarbiausia šio mokslinio darbo dalis, kurioje pateikiama asfaltbetonio dangų degradacijos modelių kalibravimo ir detalaus pritaikymo metodika ir rezultatai.

Pasiūlyti ir išbandyti 4 modelių pritaikymo metodai, kurie sudaryti atsižvelgiant į modelių tikslumui keliamus reikalavimus ir turimas technines galimybes. Pateikti pasiūlymai metodų praktiniam taikymui.

Degradacijos modelių pritaikymo rezultate gauti analizuotų modelių kalibravimo koeficientai, kurie gali būti taikomi HDM-4 ir DAVASEMA sistemose, bei naujos plyšių modelių matematinės išraiškos kurias galima įdiegti lietuviškoje DAVASEMA sistemoje.

BENDROSIOS IŠVADOS

1. Išnagrinėti naujausi iš žinomų HDM kelių dangų degradacijos modelių, kurie yra įdiegti Lietuvoje plačiausiai naudojamose DVS sistemose HDM-III, HDM-4 ir DAVASEMA. Nustatyta, kad svarbiausi yra dangos nelygumo, plyšių atsiradimo ir vystymosi, bei provėžų modeliai kurių pritaikymą Lietuvos automobilių keliams su asfaltbetonio dangomis reikia atlikti pirmiausiai.

2. Nustatyta, kad efektyvus KDD modelių taikymas galimas tik jeigu yra galimybė pasiekti pakankamą prognozės tikslumą ir patikimumą naudojant modeliuose tik reguliariai visame Lietuvos automobilių kelių tinkle vykdomų tyrimų duomenis. Visus kelio dangos degradaciją veikiančius veiksnius ištirti eksperimentiniais tyrimais ir įvertinti dangų degradacijos modeliuose yra praktiškai neįmanoma, o ir netikslinga. Todėl, eksperimentinių tyrimų metu, kurie 6 metus buvo vykdomi 40-yje pasirinktų kelių ruožų Lietuvos valstybinės reikšmės magistraliniuose ir krašto keliuose, buvo ištirti svarbiausi dangos degradaciją nusakantys parametrai ir ją veikiantys veiksniai: dangos nelygumas, provėžų gylis, plyšių kiekis bei jų išsivystymo laipsnis, automobilių eismo intensyvumas ir apkrovos, dangos konstrukcijos sluoksnių storiai ir medžiagos, dangos konstrukcijos stiprumas.

3. Sukurta specializuota duomenų bazė, vykdanči duomenų saugojimo ir apdorojimo funkcijas. Atlikta eksperimentinių tyrimų rezultatų analizė ir jų pritaikymas naudojimui KDD modeliuose. Atliekant eksperimentinių tyrimų rezultatų pritaikymą pagrindinė įvardinta problema – kelio dangos konstrukcijos stiprumo nustatymas ir sezoniskumo įtakos jam įvertinimas. Sezoniskumo įvertinimo svarbą patvirtino ir atliktas modelių kalibravimo jautrumo testas, kuris parodė, kad taikant skirtingus sezoniskumo įvertinimo metodus modelių prognozės rezultatas gali skirtis 2,3 karto ir daugiau. Darbe išanalizuoti keturi kelio dangos konstrukcijos stiprumo skaičiavimo metodai bei sudarytos metodikos ir pateiktos rekomendacijos jų praktiniam taikymui.

Taip pat pasiūlyti du sezoninio poveikio kelių dangos konstrukcijos stiprumui įvertinimo metodai.

4. Įvertinus KDD modelių pritaikymui keliamus reikalavimus ir turimas technines galimybes, darbe pasiūlyti trys modelių kalibravimo metodai ir vienas detalaus pritaikymo metodas. Pasiūlyti metodai išbandyti atliekant pasirinktų dangų degradacijos modelių pritaikymą Lietuvos sąlygomis ir įvertinti statistiškai.

5. Išanalizavus originalių HDM modelių autorių naudotus tikslumo vertinimo metodus ir kriterijus nustatytas siektinas pritaikytų modelių tikslumo lygis. Modelių pritaikymo rezultatai parodė, kad visų modelių pakankamą tikslumą galima pasiekti atliekant autoriaus pasiūlytą tų modelių *detalų pritaikymą statistinio optimizavimo metodais*. Tiksliausių modelių kalibravimo rezultatus taip pat duoda optimizavimo metodų taikymas.

6. Apibendrinant visą darbą galima konstatuoti, kad taikant atitinkamus modelių pritaikymo metodus galima su optimaliomis sąnaudomis pasiekti reikiamą arba artimą jam modelių pritaikymo tikslumo ir patikimumo lygį. Atlikta analizė įrodo, kad turint tik reguliariai visame Lietuvos automobilių kelių tinkle vykdomų tyrimų duomenis bei Lietuvos automobilių kelių informacinėje sistemoje saugomus duomenis ir naudojant darbe pasiūlytus kalibruotus arba modifikuotus HDM dangų degradacijos modelius, galima prognozuoti dangų degradaciją Lietuvos sąlygomis su tokiu tikslumu, kuris yra pakankamas prognozės rezultatų taikymui planavimo lygmenyje.

Aivaras Braga

**MODELS OF PAVEMENT DETERIORATION AND THEIR
ADAPTATION TO LITHUANIAN AUTOMOBILE ROADS**

**Summary of Doctoral Dissertation
Technological Sciences, Civil Engineering (02T)**

Aivaras Braga

**DANGŲ DEGRADACIJOS MODELIAI IR JŲ TAIKYMAS
LIETUVOS AUTOMOBILIŲ KELIAMS**

**Daktaro disertacijos santrauka
Technologijos mokslai, statybos inžinerija (02T)**

SL 136. 2005 08 09. 1,75 apsk. leid. 1. Tiražas 100 egz.
Leido Vilniaus Gedimino technikos universiteto leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, LT–10223 Vilnius-40
Spausdino UAB „Biznio mašinų kompanija“, Gedimino per. 60, LT–011101
Vilnius