



AV '25

KONFERENCE
ASFALTOVÉ VOZOVKY 2025

CONFERENCE
ASPHALT PAVEMENTS 2025

25.–26. listopadu 2025
České Budějovice, Dům kultury Metropol

25–26 November 2025
Budweis, Czech Republic,
Cultural Centre Metropol

SDRUŽENÍ
PRO VÝSTAVBU
SILNIC



Motto: Asfalt – materiál s historií pro budoucnost
Asphalt – a material with a history for the future

OBSAH | CONTENTS

Úvodní slovo	10
<i>Introductory word</i>	<i>12</i>

Témata

Topics

1. Inovace materiálů, technologií a návrhu konstrukcí asfaltových vozovek <i>Innovation of materials, new technologies and design of asphalt pavement constructions</i>	<i>14</i>
Gestor <i>Moderator:</i> prof. Dr. Ing. Michal Varaus Generální zpravodaj <i>General reporter:</i> doc. Ing. Petr Hýzl, Ph.D.	
2. Trendy ve výstavbě, správě a údržbě vozovek <i>Trends in construction, management and maintenance of pavements</i>	<i>121</i>
Gestor <i>Moderator:</i> Ing. Miloš Rosenbaum Generální zpravodaj <i>General reporter:</i> Ing. Petr Bureš; Ing. Jan David	
3. Udržitelnost, oběhové hospodářství, digitalizace <i>Sustainability, circular economy, digitalisation</i>	<i>197</i>
Gestor <i>Moderator:</i> Ing. Václav Valentin Generální zpravodaj <i>General reporter:</i> doc. Ing. Jan Valentin, Ph.D.	

Pořadatelé | Executive committee:

Sdružení pro výstavbu silnic a Česká silniční společnost, sekce Asfaltové vozovky
Road Contractors Association and Czech Road Society, Asphalt Pavements Section

Mediální partneři | Media partners:

silnice mosty



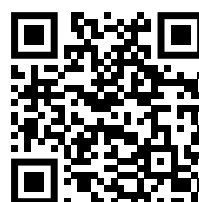
STAVEBNISERVER.com

AV '25

KONFERENCE ASFALTOVÉ VOZOVKY 2025

CONFERENCE ASPHALT PAVEMENTS 2025

Listopad 2025/*November 2025*



OBSAH

ÚVODNÍ SLOVO

Ing. Petr Svoboda 10

INTRODUCTORY WORD

Ing. Petr Svoboda 12

Téma 1

Inovace materiálů, technologií a návrhu konstrukcí asfaltových vozovek ***Innovation of materials, new technologies and design of asphalt pavement constructions***

1.1 ZKUŠENOSTI SE STANOVENÍM RESILIENT MODULU M, S POMOCÍ CYKlickÉHO CBR TESTU

Aleš Florian, VŠTE v Českých Budějovicích, Katedra stavebnictví
Lenka Ševelová, Mendelova univerzita v Brně, Lesnická a dřevařská fakulta 15

1.2 VLIV VLASTNOSTÍ VSTUPNÍHO ASFALTU NA VLASTNOSTI VÝSLEDNÉHO POLYMEREM MODIFIKOVANÉHO ASFALTU

Tomáš Koudelka, VIALAB CZ s.r.o.
Ondřej Dašek, VUT v Brně, Fakulta stavební
Petr Bureš, VIALAB CZ s.r.o.
Petr Hýzl, VUT v Brně, Fakulta stavební 23

1.3 VLASTNOSTI TRANSPARENTNÍCH POJIV

Ondřej Dašek, VUT v Brně, Fakulta stavební
Petr Hýzl, VUT v Brně, Fakulta stavební
Tomáš Koudelka, VIALAB CZ s.r.o.
Petr Bureš, VIALAB CZ s.r.o.
Filip Dostál, VIALAB CZ s.r.o.
Jakub Šedina, Ph.D., VIALAB CZ s.r.o.
Tomáš Mery, VIALAB CZ s.r.o. 32

1.4 STUDIE REOLOGICKÝCH VLASTNOSTÍ ASFALTOVÉHO POJIVA MODIFIKOVANÉHO BIOSLOŽKAMI SE DVĚMA DRUHY PŘÍRODNÍCH OLEJŮ

Stavros Kalampokis, Aristotle University of Thessaloniki, Řecko/Greece
Evangelos Manthos, Aristotle University of Thessaloniki, Řecko/Greece
Jan Valentin, ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Česká republika/Czech Republic 44

1.5 VLASTNOSTI A MECHANISMUS REAKTIVNÍCH MODIFIKÁTORŮ PRO ZVÝŠENÍ A ZLEPŠENÍ PMB PRO FLEXIBILNÍ ASFALTOVÉ VOZOVKY

Olivier Fleischel, BASF SE, Německo/Germany
Jan Scharf, Prota s.r.o., Česká republika/Czech Republic
Waldemar Schatz, BASF Polyurethane GmbH, Německo/Germany 51

1.5 PROPERTIES AND MECHANISM OF REACTIVE MODIFIERS TO ENHANCE AND UPGRADE PMBS FOR FLEXIBLE ASPHALT PAVEMENT

Olivier Fleischel, BASF SE, Německo/Germany
Jan Scharf, Prota s.r.o., Česká republika/Czech Republic
Waldemar Schatz, BASF Polyurethane GmbH, Německo/Germany 60

1.6 PŘEDPOVĚĎ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ ASFALTOVÝCH SMĚSÍ: ZÁKLADNÍ STUDIE LINEÁRNÍ A NELINEÁRNÍ REGRESE VE SROVNÁNÍ S MODELOVÁNÍM POMOCÍ NEURONOVÝCH SÍTÍ

Nicola Baldo, University of Udine, katedra inženýrství a architektury, Itálie/Italy
Fabio Rondinella, University of Udine, katedra inženýrství a architektury, Itálie/Italy
Fabiola Daneluz, University of Udine, katedra inženýrství a architektury, Itálie /Italy
Jan Valentin, ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Česká republika/Czech Republic
Pavla Vacková, ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Česká republika/Czech Republic
Marcin D. Gajewski, TU ve Varšavě, Fakulta stavební, Polsko/Poland
Jan B. Król, TU ve Varšavě, Fakulta stavební, Polsko/Poland 68

1.7 PŘESNOST MODELŮ DYNAMICKÉHO MODULU TUHOSTI ASFALTOVÉ SMĚSI S R-MATERIÁLEM STANOVENÉ 4PB-PR ZKOUŠKOU

Majda Belhaj, ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Česká republika/Czech Republic
Jan Valentin, ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Česká republika/Czech Republic
Nicola Baldo, University of Udine, Itálie/Italy 78

1.8 ASFALTOVÉ SMĚSI S VELIKOSTÍ ZRNA 32 MM PRO PODKLADNÍ VRSTVY VOZOVEK

Petr Mondschein, ČVUT v Praze, Fakulta stavební
Petr Hýzl, VUT v Brně, Fakulta stavební
Ondřej Dašek, VUT v Brně, Fakulta stavební 92

1.9 NOVÝ TYP VÝZTUŽNÝCH ARAMIDOVÝCH VLÁKEN A OVĚŘENÍ JEJICH FUNKČNOSTI

David Matoušek, CIUR a.s.
František Buráň, CIUR a.s.
Mojmír Urbánek, CIUR a.s. 99

1.10 POZNATKY Z HODNOTENIA VÄZKO-PRUŽNÉHO SPRÁVANIA SA ASFALTOVÝCH VOZOVIEK

Zsolt Boros, TPA, s.r.o., Slovenská republika/Slovakia
Jozef Komačka, TPA, s.r.o., Slovenská republika/Slovakia
Filip Buček, TPA, s.r.o., Slovenská republika/Slovakia 109

1.11 CHARAKTERISTICKÉ PORUCHY OKRUŽNÍCH KŘÍŽOVATEK A JEJICH PŘÍČINY

Milan Beck, DiS., ESLAB, spol. s r.o.
Ing. Jan Zajíček 115

Téma 2

Trendy ve výstavbě, správě a údržbě vozovek

Trends in construction, management and maintenance of pavements

2.1 PROCES VÝBĚRU OPRAV NA ÚROVNI SÍTĚ NA ZÁKLADĚ DAT O POŠKOZENÍ VOZOVKY

Adnan Mohd Said Shiyab, Macquarie University, Faculty of Science and Engineering,
Austrálie/Australia
Aya Mustafa Alwan, Macquarie University, Faculty of Science and Engineering, Austrálie/Australia . . 122

2.1 TREATMENT SELECTION PROCESS AT NETWORK LEVEL BASED ON PAVEMENT DISTRESS DATA

Adnan Mohd Said Shiyab, Macquarie University, Faculty of Science and Engineering,
Austrálie/Australia
Aya Mustafa Alwan, Macquarie University, Faculty of Science and Engineering,
Austrálie/Australia 133

2.2 TRENDY VE SPRÁVĚ, ÚDRŽBĚ A OPRAVÁCH ASFALTOVÝCH VOZOVEK

Eva Hrušková, ŘSD s. p.

Lukáš Topinka, ŘSD s. p. 145

2.3 ZHODNOCENÍ POZNATKŮ Z DLOUHODOBÉHO SLEDOVÁNÍ POKUSNÉHO ÚSEKU S ASFALTOVÝMI VRSTVAMI S 3D ROZPTÝLENOU VÝZTUŽÍ

Petr Mondschein, ČVUT v Praze, Fakulta stavební

Daniel Šmíd, ČVUT v Praze, Fakulta stavební 157

2.4 VLASTNOSTI ASFALTOVÝCH SOUVRSTVÍ VYZTUŽENÝCH SKLOVLÁKNITOU MŘÍŽÍ

Pavel Šperka, VUT v Brně, Fakulta stavební

Jan Kudrna, VUT v Brně, Fakulta stavební

Karel Spies, VUT v Brně, Fakulta stavební

Štěpán Bohuš, VUT v Brně, Fakulta stavební

Jana Kalášková, SAINT-GOBAIN ADFORS CZ s.r.o.

Jakub Valenta, VIALIT SOBĚSLAV spol. s.r.o. 163

2.5 NETYPICKÉ PORUCHY NA VOZOVKÁCH NA MOSTECH A REVIZE ČSN 73 6242 NAVRHOVÁNÍ A PROVÁDĚNÍ VOZOVEK NA MOSTECH POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

Jan Zajíček

Milan Beck, ESLAB, spol. s r.o. 174

2.6 SPECIÁLNÍ ASFALTOVÉ EMULZE A NÁRODNÍ SPECIFIKACE PRO KATIONAKTIVNÍ EMULZE

Tomáš Koudelka, VIALAB CZ s.r.o.

Petr Bureš, VIALAB CZ s.r.o.

Tomáš Mery, VIALAB CZ s.r.o. 179

2.7 STABILIZOVANÉ VÁPENNÉ MLÉKO PRO OCHRANU SPOJOVACÍHO POSTŘIKU

Bruno Marcant, ValoChem, Francie/France

Maxence Helary, ValoChem, Francie/France 187

Téma 3

Udržitelnost, oběhové hospodářství, digitalizace *Sustainability, circular economy, digitalisation*

3.1 POZNÁMKY K ZAVÁDĚNÍ ENVIRONMENTÁLNÍCH PROHLÁŠENÍ O VÝROBKU PRO ASFALTOVÉ SMĚSI

Jiří Fiedler

Filip Dostál, VIALAB CZ s.r.o.

Tomáš Koudelka, VIALAB CZ s.r.o. 198

3.2 DIGITÁLNÍ ANALÝZA ŽIVOTNÍHO CYKLU (LCA) NAPŘÍČ CELÝM HODNOTOVÝM ŘETĚZCEM

Thomas Leopoldseder, Q Point GmbH, Rakousko/Austria 204

3.2 DIGITAL LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA) ALONG THE ENTIRE VALUE CHAIN

Thomas Leopoldseder, Q Point GmbH, Rakousko/Austria 210

3.3 ČASOVÉ ŘADY VÝVOJE HLUČNOSTI RŮZNÝCH POVRCHŮ VOZOVKY

Vítězslav Křivánek, Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.

Petra Marková, Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.

Blanka Hablovičová, Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.

Josef Stryk, Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.

Aleš Peiger, Centrum dopravního výzkumu, v. v. i. 215

3.4 ŘEŠENÍ NEDOSTATKU KAMENIVA PRO DOPRAVNÍ STAVBY, VÝSTUPY ZE STUDIE DEFINUJÍCÍ STRATEGICKÉ SUROVINY

Josef Godány, Česká geologická služba	
Jan Buda, Česká geologická služba	
Michal Marek, Česká geologická služba	
Josef Večeřa, Česká geologická služba	
Marcela Hrbáčková, Těžební unie	
Pavel Kotásek, Těžební unie	
Pavel Fiala, Těžební unie	
Petr Svoboda, Sdružení pro výstavbu silnic	221

3.5 VÝROBA A POKLÁDKA ASFALTOVÉ SMĚSI S R-MATERIÁLEM ZA SNÍŽENÉ TEPLoty – PŘÍPADOVÁ STUDIE

Przemysław Ostrowski, ORLEN Asphalt, Polsko/Poland	
Wiktoria Barnowska, ORLEN Asphalt, Polsko/Poland	
Wojciech Sorociak, ORLEN Asphalt, Silesian University of Technology, Polsko/Poland	
Anna Górská, ORLEN Asphalt, Polsko/Poland	236

3.5 PRODUCTION AND PAVING OF ASPHALT MIX WITH RAP AT REDUCED TEMPERATURE – CASE STUDY

Przemysław Ostrowski, ORLEN Asphalt, Polsko/Poland	
Wiktoria Barnowska, ORLEN Asphalt, Polsko/Poland	
Wojciech Sorociak, ORLEN Asphalt, Silesian University of Technology, Polsko/Poland	
Anna Górská, ORLEN Asphalt, Polsko/Poland	243

3.6 CESTA K MAXIMÁLNÍMU VYUŽITÍ R-MATERIÁLU

Samir Irzayev, B.Sc., J. Rettenmaier & Söhne GmbH + Co KG, Německo/Germany	250
--	-----

3.6 UNLOCKING THE FULL POTENTIAL OF RAP

Samir Irzayev, J. Rettenmaier & Söhne GmbH + Co KG, Německo/Germany	257
---	-----

3.7 VYUŽITÍ ODPADNÍCH ASFALTOVÝCH IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ PŘI VÝROBĚ ASFALTOVÝCH SMĚSÍ

Zdeněk Hegr, Skanska Asphalt s.r.o.	
Petr Hýzl, VUT v Brně, Fakulta stavební	
Ondřej Dašek, VUT v Brně, Fakulta stavební	
Tomáš Chudárek, Recovera využití zdrojů a.s.	264

3.8 NÍZKOTEPLTNÉ ASFALTOVÉ ZMESI VYRÁBANÉ S PRÍSADOU LOWTHERM®4G

Peter Koval', ECT, s.r.o.	
Eva Králová, ECT, s.r.o.	272

3.9 DOSAVIDNÍ ZKUŠENOSTI S VYUŽÍVÁNÍM NÍZKOTEPLTNÍCH ASFALTOVÝCH SMĚSÍ V NĚMECKU

Horst Mocker, VARO Energy GmbH, Německo/Germany	
Eric Reim, VARO Energy GmbH, Německo/Germany	
Michael Huber, VARO Energy GmbH, Německo/Germany	
Václav Valentin, Česká republika/Czech Republic	276

3.10 VYUŽITÍ VRATNÉHO PRACHU V KONSTRUKCÍCH POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

Karel Spies, VUT v Brně, Fakulta stavební	
Dušan Stehlík, VUT v Brně, Fakulta stavební	283

3.11 METODY OPTIMALIZACE ASFALTOVÉHO OMLAZOVACÍHO PROSTŘEDKU A OSMILETÝ ZKUŠEBNÍ ÚSEK V ČESKÉ REPUBLICCE

Shahin Eskandarsefat, Iterchimica S.p.A., Itálie/Italy	288
--	-----

**3.11 ASPHALT REJUVENATOR OPTIMIZATION METHODS AND AN 8-YEAR-OLD TRIAL
SECTION IN THE CZECH REPUBLIC**

Shahin Eskandarsefat, Iterchimica S.p.A., Itálie/Italy 296

**3.12 VLIV POČTU ZRN A POVRCHU KAMENIVA NA VÝKONNOST PREDIKCE ASFALTOVÉ
SMĚSI S R-MATERIÁLEM POMOCÍ STROJOVÉHO UČENÍ**

Mert Atakan, Gazi University, Faculty of Technology, Turecko/Turkey

Kürşat Yıldız, Gazi University, Faculty of Technology, Turecko/Turkey

Jan Valentin, ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Česká republika/Czech Republic 304

SHRNUTÍ POZNATKŮ Z KONFERENCE AV'25

Petr Mondschein, ČVUT v Praze, Fakulta stavební 332

Vážení kolegové,

dovolte mi přivítat Vás jménem přípravného výboru znovu po dvou letech na tradiční a významné konferenci ASFALTOVÉ VOZOVKY 2025. Při její přípravě jsme opět kladli maximální důraz na zajištění zajímavého programu, který osloví všechny účastníky. Věříme, že Vás zaujmou příspěvky přednesené v rámci témat konference a že se v Českých Budějovicích také setkáte s partnery u jiné příležitosti než jen při řešení běžných pracovních povinností, které nám zajímavá, ale složitá práce v silničním stavitelství přináší.

Letošní motto konference „Asfalt – materiál s historií pro budoucnost“ reflektuje aktuální výzvy, kterým čelí naše odvětví – od geopolitických změn přes tlak na snižování emisí až po nutnost zavádění principů cirkulární ekonomiky. Asfaltové směsi, které jsou téměř stoprocentně recyklovatelné, představují klíčový materiál pro udržitelnou výstavbu dopravní infrastruktury.

Program konference nabídne více než čtyřicet odborných příspěvků, z nichž byly vybrány ty nejrelevantnější a nejhodnotnější. Témata se zaměří na zvýšení trvanlivosti vozovek, dostupnost a kvalitu surovin, digitalizaci procesů, nízkoteplotní technologie, nové technické normy a efektivní využití R-materiálu.

Mezi hlavními řečníky přivítáme opět Radka Mátlu, generálního ředitele ŘSD a Jiřího Hlavatého, ředitele Útvaru kvality a kontroly staveb. Předpokládáme, že zazní od největšího investora zkušenosti s realizací zkušebních úseků na nízkoteplotní asfaltové směsi, zkušenosti se zavedením nových technických norem a dalších předpisů a také zefektivnění schvalování materiálů a umožnění většího využití R-materiálu. A hlavně, že bude zachováno současné tempo výstavby i v následujících letech. K pokračování zahájených staveb a přípravě dalších jsou nutné značné finanční prostředky, předpokládám, že nyní na konci listopadu je znám rozpočet SFDI pro rok 2026 a Milan Dont ho bude moci okomentovat, stejně jako přínos metodiky SFDI vytvořených pro efektivnější spolupráci účastníků výstavby.

Tradičně zveme na konferenci zástupce silniční správy nebo profesních asociací sousedních zemí. Po vystoupení zástupců silniční správy ze Slovenska, Rakouska, Německa a představitele Slovinské asociace pro asfaltové vozovky a Maďarské asociace pro asfaltové vozovky jsme tentokrát pozvali zástupce francouzského profesního sdružení Routes de France pana Sébald Turpina, který nám představí mimo jiné, jakým způsobem je ve Francii reagováno na nutnost dekarbonizace výroby a pokládky asfaltových směsí.

O aktuálním vývoji v Evropě bude informovat Carsten Karcher, generální tajemník EAPA, a o trendech v oblasti ropných produktů Jonathan Weston ze společnosti Argus Media.

Konference Asfaltové vozovky je významným setkáním odborné sféry, renomé má rovněž v zahraničí.

Budou Vám opět k dispozici pomocné digitální nástroje k organizaci akce. Sborník konference s odbornými příspěvky je opět publikován v elektronické podobě a bude ho možné získat na webu konference www.asfaltove-vozovky.cz a v aplikaci Eventee. Delegáty konference provází v papírové podobě brožura obsahující informace o programu konference, o výstavě, ale hlavně anotace všech příspěvků, které jsou řazeny podle témat v českém a anglickém jazyce.

Informace ze všech příspěvků jsou přednášeny formou generálních zpráv. Vzhledem k velkému zájmu o vystoupení je rozsah generálních zpráv zkrácen a je zařazeno opět více vybraných odborných příspěvků. Současně je v rámci diskuze související s daným tématem umožněno vystoupení účastníků s příspěvky a dotazy z pléna. K diskuzi mohou účastníci využít mobilní aplikaci Eventee, kde budou rovněž dostupné všechny podrobnosti o programu i doprovodné výstavě. Generální zprávy budou po skončení konference k dispozici na webových stránkách Sdružení pro výstavbu silnic www.sdruzeni-silnice.cz a webových stránkách konference Asfaltové vozovky www.asfaltove-vozovky.cz.

Informace o konferenci a vybrané nejzajímavější příspěvky budou publikovány mediálními partnery konference, jimiž jsou časopisy SILNICE MOSTY, SILNIČNÍ OBZOR, Stavební server a SILNICE ŽELEZNICE, ve kterém bude přípravným výborem vybraným příspěvkům věnována samostatná příloha.

Financování takto významné konference s mezinárodní účastí a s tlumočením přednášek do/z anglického jazyka není možné bez vystavovatelů, kteří využili nabízené formy partnerství. Výstava je v roce 2025 opět rozprostřena na větší ploše.

Děkuji všem partnerům, vystavovatelům a také kolegům z přípravného výboru a pracovníkům firmy PRAGOPROJEKT, a.s., kteří konferenci připravují organizačně.

Spolu s předsedou Sdružení pro výstavbu silnic Petrem Laušmanem a předsedou České silniční společnosti Petrem Mondscheinem a celým přípravným výborem se těšíme na osobní setkání s Vámi a na inspirativní diskuze, které posunou náš obor kupředu.

Za přípravný výbor konference
Petr Svoboda

Dear colleagues,

On behalf of the Preparatory Committee, allow me to welcome you to the traditional and important conference ASPHALT PAVEMENTS 2025. In preparing for this event, we have placed maximum emphasis on ensuring an interesting program that will appeal to all participants. We believe that you will find the presentations on the conference topics interesting and that you will also meet your partners in Budweis on occasions other than just dealing with the usual work duties that our interesting but complex work in road construction brings us.

This year's conference motto, "Asphalt – a material with a history for the future," reflects the current challenges facing our industry – from geopolitical changes and pressure to reduce emissions to the need to implement the principles of the circular economy. Asphalt mixtures, which are almost 100% recyclable, are a key material for sustainable transport infrastructure construction.

The conference program will offer more than forty papers, from which the most relevant and valuable ones have been selected to be presented. The topics will focus on increasing the durability of road surfaces, the availability and quality of raw materials, the digitization of processes, low-temperature technologies, new technical standards and the effective use of RAP.

Among the main speakers, we will once again welcome Radek Mátl, Director General of the Road and Motorway Directorate, and Jiří Hlavatý, Director of the Quality and Construction Inspection Department. We expect to hear from the largest road authority about their experience with test sections using low-temperature asphalt mixes, their experience with new technical standards and other regulations, as well as the streamlining of material approval and enabling greater use of RAP. Above all, we expect that the current pace of construction will be maintained in the coming years. Considerable financial resources are needed to continue the construction projects that have already begun and to prepare for new ones. I assume that the budget of the State Fund for Transport Infrastructure for 2026 is now known at the end of November and that Milan Dont will be able to comment on it, as well as on the benefits of the SFDI methodology created for more effective cooperation among construction participants.

We traditionally invite representatives of road authorities or professional associations from neighboring countries to the conference. Following presentations by representatives of road administrations from Slovakia, Austria, Germany, and representatives of the Slovenian Asphalt Pavement Association and the Hungarian Asphalt Pavement Association, this time we have invited a representative of the French professional association Routes de France, Mr. Sébald Turpin, who will present, among other topics, how France is responding to the need to decarbonize the production and laying of asphalt mixtures.

Carsten Karcher, Secretary General of EAPA, will comment on current developments in Europe, and Jonathan Weston from Argus Media will report on trends in asphalt production.

The Asphalt Pavements Conference is an important meeting of experts and is also renowned abroad.

Digital tools to help organize the event will once again be available. The conference proceedings with technical papers will be published in electronic form and will be available on the conference website www.asfaltove-vozovky.cz and in the Eventee app. Conference delegates will receive a paper brochure containing information about

the conference program, the exhibition, and, most importantly, abstracts of all contributions, which are organized by topic in Czech and English.

Information from all papers is presented in the form of general reports. Due to the great interest of authors, the scope of the general reports has been shortened, allowing more selected presentations to be included. At the same time, participants have the opportunity to contribute and ask questions from the floor during the discussion related to the given topic. Participants can use the Eventee mobile app for the discussion, where all details about the program and accompanying exhibition will also be available. After the conference, the general reports will be available on the website of the Road Contractors Association www.sdruzeni-silnice.cz and the Asphalt Pavements conference website www.asfaltove-vozovky.cz.

Information about the conference and selected interesting contributions will be published by the conference's media partners, which are the magazines SILNICE MOSTY, SILNIČNÍ OBZOR, Stavební server and SILNICE ŽELEZNICE.

Financing such an important conference with international participation and interpretation of presentations into/from English would not be possible without the exhibitors who took advantage of the offered forms of partnership. In 2025, the exhibition will once again be spread over a larger area.

I would like to thank all partners, exhibitors, colleagues from the preparatory committee, and the staff of PRAGOPROJEKT, a.s., who are organizing the conference.

Together with Petr Laušman, Chairman of the Road Contractors Association, Petr Mondschein, Chairman of the Czech Road Society, and the entire preparatory committee, we look forward to meeting you in person and to inspiring discussions that will move our branch forward.

On behalf of the Conference Preparatory Committee

Petr Svoboda



**Inovace materiálů, technologií
a návrhu konstrukcí
asfaltových vozovek**

***Innovation of materials,
new technologies and design
of asphalt pavement constructions***

ZKUŠENOSTI SE STANOVENÍM RESILIENT MODULU M_R S POMOCÍ CYKLICKÉHO CBR TESTU

EXPERIENCE WITH THE DETERMINATION OF RESILIENT MODULUS M_R USING THE CYCLIC CBR TEST

doc. Ing. Aleš Florian, CSc., VŠTE v Českých Budějovicích, Katedra stavebnictví
Ing. Lenka Ševelová, Ph.D., Mendelova univerzita v Brně, Lesnická a dřevařská fakulta

Navrhování a posuzování konstrukčních vrstev vozovek pozemních komunikací z přírodních a recyklovaných materiálů vyžaduje pečlivé stanovení jejich fyzikálně-mechanických vlastností. Za základní parametr pro charakterizování vlastností materiálu je považován resilient modul M_r , který charakterizuje tuhost materiálu při cyklickém zatěžování. Standardní zkouškou pro jeho stanovení je cyklický triaxiální test. Alternativním řešením je cyklický CBR test, který využívá zařízení pro stanovení kalifornského poměru únosnosti. V příspěvku jsou uvedeny zkušenosti a výsledky získané jeho dlouhodobým testováním a ověřováním.

The design and assessment of road pavement structural layers made of natural and recycled materials requires careful determination of their physical-mechanical properties. The resilient modulus M_r , which characterizes the stiffness of the material under cyclic loading, is considered to be a fundamental parameter for characterizing material properties. The standard test for its determination is the cyclic triaxial test. An alternative solution is the cyclic CBR test, which uses a standard California Bearing Ratio device. The paper presents the experience and results obtained by its long-term use.

Úvod

Jedním z celosvětových trendů v navrhování vozovek a udržitelného rozvoje s ohledem na ochranu neobnovitelných zdrojů je požadavek na zpřesnění navrhování vozovek s respektováním reálných tuhostních charakteristik materiálů vystavených opakovanému zatížení silničním provozem. Metodika Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG) pro navrhování a výstavbu vozovek, kterou používá AASHTO [1], je založena na mechanicko-empirické metodě [2]. Za základní parametr pro charakterizování vlastností materiálu považuje resilient modul M_r . Jedná se o veličinu, která charakterizuje tuhost materiálu za cyklického zatěžování a poskytuje prostředek pro jeho analýzu za různých podmínek, kdy se mění např. vlhkost, objemová hmotnost nebo stav napětí. Deformační chování, tuhost a pevnost, stejně jako náhodná proměnlivost mechanických vlastností, závisí na mnoha faktorech, např. genezi, typu materiálu, míře zhutnění, vlhkosti, počtu opakovaných zatěžovacích cyklů, nebo na maximální únosnosti materiálu [3 - 5]. Resilient modul by měl tyto faktory zohledňovat [6] a měl by být získán z vhodné laboratorní zkoušky, která reálně simuluje očekávané zatížení opakovanými přejezdy dopravních prostředků a zohledňuje očekávaný stav napětí v reálné konstrukci. Současně nesmí zkouška porušit zkoušený vzorek zeminy ani překročit maximální únosnost materiálu [7, 8].

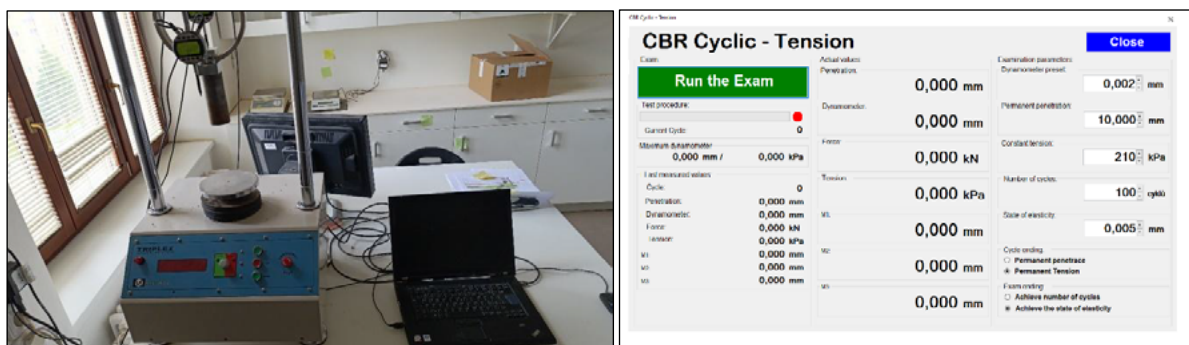
Resilient modul lze standardně získat zkouškou provedenou pomocí cyklického triaxiálního zkušebního zařízení [9]. Použití tohoto sofistikovaného zařízení je však časově a zejména finančně náročné a pro testování materiálů u vozovek nižšího dopravního zatížení obecně nevhodné. U tohoto typu vozovek metodika MEPDG umožňuje nahradit tento test jinou, jednodušší laboratorní cyklickou zkouškou. Obecně přijímaným řešením tohoto problému je cyklický CBR test, který využívá zařízení pro stanovení kalifornského poměru únosnosti [12] (dále zkouška CBR), které je ve výbavě každé geotechnické laboratoře.

Předkládaný příspěvek shrnuje výsledky dlouhodobého výzkumu deformačního chování zemin, konstrukčních materiálů konstrukce vozovky přírodního a recyklovaného původu, které jsou případně zlepšeny či upraveny např. přidáním hydraulických pojiv (dále materiálů) na Mendelově univerzitě v Brně provedeného s pomocí cyklického CBR testu a popisuje zkušenosti s jeho použitím.

Cyklický CBR test

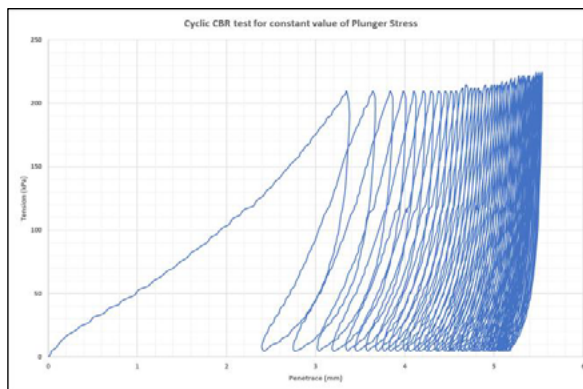
Popis zkušebního zařízení pro cyklický CBR test

Zkušební zařízení bylo vyvinuto na Mendelově univerzitě v Brně a je v ČR patentované [10]. Při cyklickém CBR testu se používá zařízení pro stanovení kalifornského poměru únosnosti v souladu s platnými normami pro přípravu vzorků [11] a pro provádění zkoušky [12], tj. penetrace se standardní rychlostí 1,27 mm/min a trnem o průměru 50 mm, obrázek 1. Ve srovnání s tradiční zkouškou CBR se ovšem používá cyklické zatěžování a hloubka penetrace pouze 2,54 mm. Aplikace opakovaného zatížení na vzorek simuluje účinek pohybujících se vozidel. Uvedený postup zároveň umožňuje oddělit nevratné plastické deformace od vratných elastických, a umožňuje tak výpočet resilient modulu. Postup cyklického zatěžování a odtěžování je automatizovaný a řízený řídicí jednotkou s příslušným softwarem (obrázek 1).



Obrázek 1: Zařízení pro stanovení kalifornského poměru únosnosti, řídicí jednotka

V prvním kroku zatěžování (cyklu) se vzorek zatíží do hloubky vniku trnu 2,54 mm a poté se odlehčí. V následujících krocích (cyklech) se provádí opakované zatěžování s hodnotou síly nastavenou na hodnotu potřebnou v prvním kroku pro průnik do hloubky 2,54 mm. Zatížení a odtížení se opakuje, dokud není splněna určitá podmínka, nejčastěji provedení předem stanoveného počtu zatěžovacích cyklů (obrázek 2).

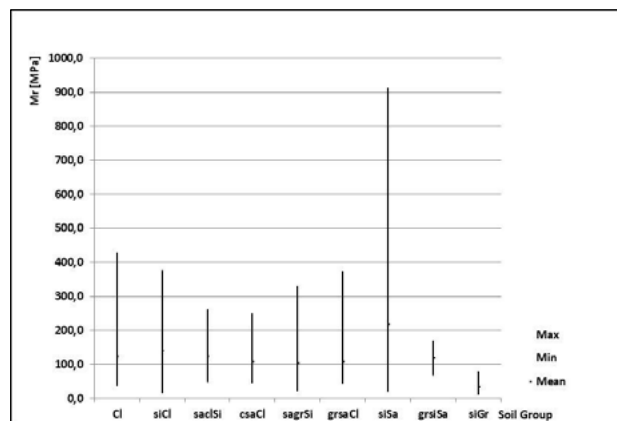


Obrázek 2: Průběh cyklického zatěžování, závislost napětí a penetrace trnu

Ověření cyklického CBR testu

Pro ověření cyklického CBR testu byl odebrán materiál z podloží celkem 11 lokalit po celé ČR. Materiál byl vždy odebrán z aktivní zóny. Celkem bylo provedeno 46 odběrů pokrývajících devět typů zemin podle USCS klasifikace [13, 14], aby bylo dosaženo reprezentativního množství získaných hodnot resilient modulu. Z každého odběru bylo vytvořeno šest testovacích vzorků a celkem tedy bylo testováno 276 vzorků. Vzorky byly zhužněny do zkušební formy pro zkoušku CBR o průměru 152 mm a výšce 117 mm pomocí Proctorovy standardní energie a za optimální vlhkosti [15]. Takto připravené vzorky byly podrobeny příslušné cyklické zkoušce a soubor šesti hodnot resilient modulu pro každý odběr byl statisticky vyhodnocen. Stejně tak byly statisticky vyhodnoceny výsledky získané pro každý jednotlivý typ materiálu. Protože počet odběrů pro jednotlivé typy byl různý, byl různý i počet vzorků.

Získané výsledky jsou uvedeny v obrázku 3, kde je pro každý typ materiálu uvedena průměrná hodnota resilient modulu spolu s jeho minimální a maximální hodnotou. Výsledky statistické analýzy ukázaly na extrémně vysokou náhodnou proměnlivost modulu. Navíc se ukázalo, že možné intervaly výskytu hodnot modulu se pro jednotlivé typy materiálu víceméně překrývají. Tato zjištění byla v protikladu s očekáváními. Je sice možné očekávat velkou náhodnou proměnlivost, neboť se jedná o nestmelené materiály, nicméně extrémnost překvapila. Ještě větším překvapením byla ovšem velká náhodná proměnlivost šesti vzorků v rámci jednoho odběru a i velké rozdíly mezi jednotlivými odběry dané třídy.

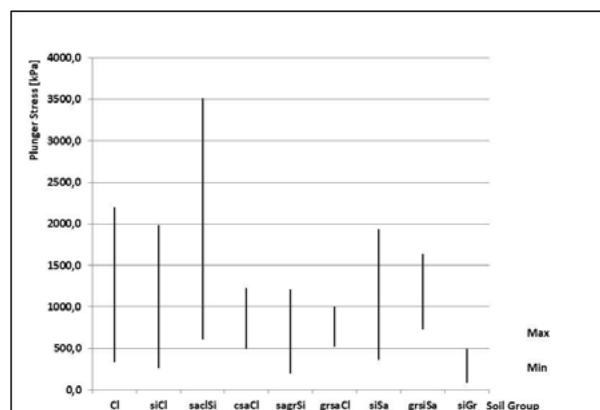


Obrázek 3: Střední hodnota, minimální a maximální hodnota modulu pro třídy materiálu

Analýza získaných výsledků

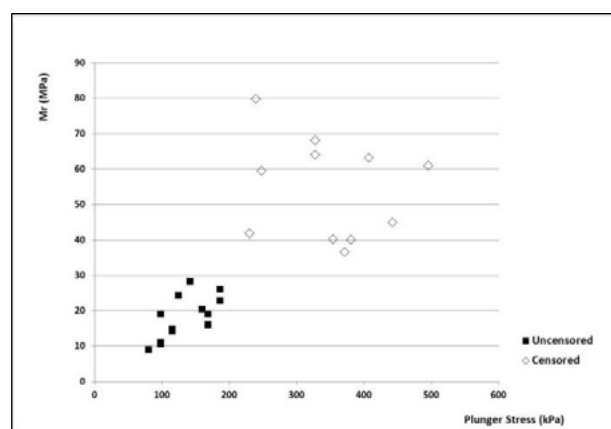
Získané výsledky byly podrobně analyzovány, přičemž se pozornost zaměřila na základní faktory mající předpokládaný vliv, jako je vlhkost, maximální objemová hmotnost sušiny a napětí na hrotu trnu při cyklické zkoušce. Reálné hodnoty vlhkosti a objemové hmotnosti jednotlivých vzorků se příliš nelišily od stanovené optimální vlhkosti a maximální objemové hmotnosti podle Proctor standard. Tyto parametry proto nebyly dále zkoumány, protože naopak byl zjištěn vliv napětí na trnu na náhodnou proměnlivost resilient modulu.

Bylo zjištěno, že jednotlivé vzorky materiálu i v rámci jednoho odběru – tj. při nominálně shodných vlastnostech – jsou testovány při často zcela rozdílných hodnotách napětí na trnu. Přitom připomeňme, že napětí na trnu je jednoznačně dáno silou, kterou v prvním cyklu – v souladu se zkouškou CBR – musíme vyvinout, aby se trn zabořil do předepsané hloubky. Pro jednotlivé vzorky jednoho odběru je ovšem tato síla velmi rozdílná, a tudíž rozdílné je i napětí na trnu. Ještě zásadnější zjištění bylo, že tato napětí dosahují často extrémních hodnot až 3 000 kPa. V obrázku 4 jsou uvedeny výsledky statistického vyhodnocení napětí na trnu pro jednotlivé třídy materiálu. Vždy je uvedena minimální a maximální hodnota napětí pro daný materiál.



Obrázek 4: Minimální a maximální hodnota napětí na trnu pro třídy materiálu

Výše uvedená zjištění mají několik závažných důsledků. Porovnáme-li hodnoty napětí na trnu s předpokládanou maximální únosností podle Terzagioho teorie, předpokládá se, že maximální hodnota se pohybuje v rámci několika stovek kPa [16] v závislosti na typu materiálu. V mnoha případech jsou ovšem tyto mezní hodnoty při cyklickém CBR testu mnohonásobně překročeny a resilient modul se tedy stanovuje pro velký počet vzorků na poškozeném porušeném materiálu. Pro každou zkoušku jakéhokoliv materiálu je však nutné, aby vzorek nebyl poškozen a aby nebyla překročena maximální únosnost materiálu [7, 8]. Důvodem, proč vzorek materiálu v našem případě vydrží tak vysokou hodnotu napětí, může být nereálné uložení vzorku ve formě CBR. Vzorek je omezen ocelovým prstencem s vysokou tuhostí, takže může odolávat hodnotám napětí vysoce překračujícím jeho únosnost. Dalším důsledkem vysokých hodnot napětí na trnu jsou také vysoké hodnoty resilient modulu, protože existuje vysoká pozitivní korelace mezi modulem a napětím [17–19]. To znamená, že pokud se provádí cyklické zatěžování s vysokými hodnotami napětí, můžeme s vysokou pravděpodobností očekávat vysoké hodnoty modulu a naopak. Tyto vysoké moduly jsou samozřejmě bezvýznamné, protože jsou získány za nereálných zatěžovacích podmínek, ale jsou v jiných studiích považovány za správné a jsou brány v úvahu. Při statistické analýze těchto údajů můžeme tudíž očekávat vysokou náhodnou proměnlivost a vyšší průměrné hodnoty ve srovnání se skutečností.



Obrázek 5: Závislost modulu na napětí na trnu, reálné a nereálné hodnoty

Ilustrativní představu o problému si můžeme udělat v obrázku 5, kde pro jeden typ materiálu jsou vyneseny hodnoty resilient modulu v závislosti na napětí na trnu, při kterém byly určeny. Z obrázku jasně vyplývá široký interval napětí, která byla použita při stanovení modulu, a také vysoká pozitivní závislost modulu na napětí. Dále jsou v obrázku plným čtvercem uvedeny ty hodnoty modulu, které byly dosaženy při napětí respektujícím maximální únosnost, a obrysem ty hodnoty, které byly stanoveny jednoznačně na porušeném vzorku, a tudíž na ně neměl být v žádném případě brán ohled a neměly být ani provedeny.

Stavební inženýři očekávají, že každý materiál je testován za podmínek, za kterých se bude nacházet ve skutečné konstrukci. V případě námi analyzovaných materiálů nikdo nemůže očekávat, že by odolaly zatížení, které vyvolalo napětí v tisících kPa. Kromě toho je zatížení vozovek omezeno normami a předpisy a ve většině zemí se pohybuje okolo 100 kN u návrhové nápravy – viz např. [20] – což znamená napětí pod pneumatikou v řádu stovek kPa, nikoliv tisíců kPa. V důsledku toho původní cyklický CBR test obecně nesplňuje základní požadavek pro stanovení deformačních charakteristik materiálů, kterým je provedení zkoušky na neporušených vzorcích a optimálně při hodnotách napětí na trnu, která odpovídají předpokládaným hodnotám napětí, která budou na materiál působit v reálné konstrukci vozovky.

Upravený cyklický CBR test

Popis zkušebního zařízení pro upravený cyklický CBR test

Na Mendelově univerzitě v Brně byl zahájen výzkum s cílem přizpůsobit původní cyklický CBR test pro provádění zkoušek na neporušených vzorcích materiálu a zejména za napětí odpovídajícím předpokládanému stavu napětí v konstrukci vozovky. Na rozdíl od standardní varianty se působící zatěžovací síla pro opakované zatěžování neurčuje v prvním zatěžovacím kroku podle proniknutí trnu do předepsané hloubky, ale podle hodnoty napětí, která se očekává v reálné konstrukci vozovky. To

znamená, že působící zatěžovací síla není závislá na hloubce penetrace, ale je definována hodnotou napětí na trnu. V naší analýze byla hodnota napětí na trnu stanovena na 210 kPa.

Pro stanovení hodnoty napětí na trnu a tím i hodnoty zatěžovací síly pro cyklické zatěžování, je v současné době jedinou správnou metodou metoda konečných prvků (MKP) [3, 21–23]. Běžně používaný předpoklad o úhlu roznášení napětí 45 stupňů je zcela nepřesný. Typický ilustrativní příklad rozložení napětí v konstrukcích vozovky je uveden na obrázku 6. Zobrazená napětí, svislá i vodorovná, byla získána ve studii [23], která použila nelineární model MKP respektující skutečné chování materiálů tvořících jednotlivé vrstvy vozovky [22].



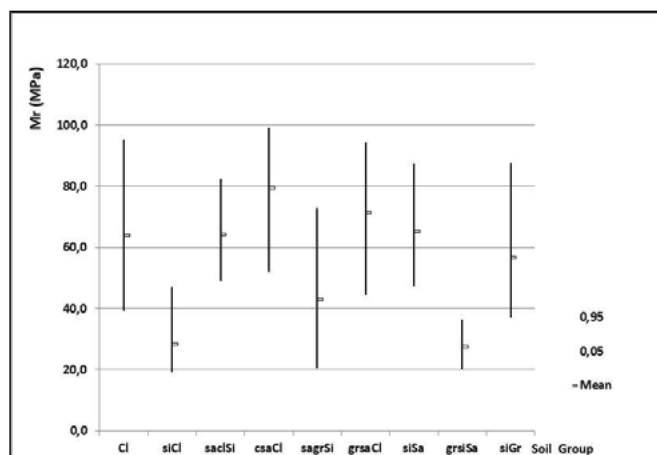
Obrázek 6: Průběh napětí v reálné vozovce získaný MKP: svislé, vodorovné napětí

Je třeba poznamenat, že zkoušený materiál se může vyskytovat v různých vrstvách konstrukce vozovky, a proto může být vystaven různému namáhání. V důsledku toho by měl být stejný materiál zkoušen za takového napětí na trnu, které odpovídá hloubce jeho uložení. Tudíž materiál může mít různý resilient modul v závislosti na hloubce uložení v konstrukci.

Ověření upraveného cyklického CBR testu

Pro ověření upravené varianty byla použita stejná metodika jako u původní varianty. Vzorky materiálu byly odebrány z aktivní zóny z celkem 11 lokalit. Celkem bylo provedeno 40 odběrů a z každého odběru bylo připraveno 6 vzorků, tj. celkem 240 vzorků. Vzorky byly zvlhčeny na optimální vlhkost a byly ztuhněny do standardní zkušební formy CBR o průměru 152 mm a výšce 117 mm pomocí energie Proctor standard podle normy ČSN EN ISO 13286-2 [11]. Takto připravené vzorky byly podrobeny příslušné cyklické zkoušce a soubor šesti hodnot modulu pro každý odběr byl statisticky vyhodnocen. Stejně tak byly statisticky vyhodnoceny výsledky získané pro jednotlivé typy materiálu. Protože počet odběrů pro jednotlivé typy byl opět různý, byl různý i počet vzorků pro daný typ materiálu.

Získané výsledky jsou uvedeny v obrázku 7, kde pro každý typ materiálu je uvedena průměrná hodnota resilient modulu spolu s kvantilem 0,05 a 0,95.



Obrázek 7: Střední hodnota, kvantily 0,05 a 0,95 modulu pro všechny třídy materiálu

Analýza získaných výsledků

Výsledky resilient modulu při testování 240 vzorků pomocí upraveného cyklického CBR testu lze porovnat s výsledky testování 276 vzorků pomocí původního testu. Všechny výsledky jsou plně kompatibilní, protože metodiky testování byly totožné. Pro přípravu vzorků byly použity stejné vzorky materiálu, stejné formy CBR se stejnými rozměry a stejným postupem hutnění, a byl použit stejný zkušební stroj. Výsledky statistické analýzy - průměrná hodnota, variační koeficient a kvantily 0,05 a 0,95 – získané při obou cyklických CBR testech pro jednotlivé typy materiálu jsou uvedeny v tabulce 1. V posledním sloupci jsou uvedeny indikativní hodnoty modulu získané cyklickou triaxiální zkouškou.

Tabulka 1: Základní statistiky resilient modulu získané oběma metodami, indikativní výsledky cyklické triaxiální zkoušky

Materiál Cyklický Test	Střední hodnota (MPa)		Variační koeficient		Kvantil 0,05 (MPa)		Kvantil 0,95 (MPa)		Triaxial (MPa) Indikativní
	Upravený	Původní	Upravený	Původní	Upravený	Původní	Upravený	Původní	
CI	63,8	123,4	0,31	0,83	31,3	39,0	96,2	371,7	20 - 134
siCI	28,2	140,8	0,34	1,08	12,2	18,7	44,2	299,4	-
saciSi	64,0	122,7	0,17	0,59	46,4	48,8	81,6	235,3	58 - 102
csaCI	79,3	106,9	0,21	0,46	52,4	51,8	106,2	205,7	11 - 84
sagrSi	42,9	101,8	0,42	0,78	13,4	24,1	72,4	271,3	-
grsaCI	71,2	107,9	0,24	0,82	43,7	44,0	98,8	310,7	-
siSa	65,2	153,4	0,22	0,67	42,0	29,9	88,3	357,6	32 - 111
grsiSa	27,4	116,9	0,19	0,24	18,7	67,4	36,1	159,3	57 - 148
siGr	56,5	32,2	0,31	0,60	27,6	10,7	85,3	64,0	88 - 141

Nejprve můžeme stručně shrnout, co lze teoreticky očekávat od statistik modulu získaných upraveným testem ve srovnání s původním. Vzhledem k tomu, že upravený test byl proveden s cyklickou zatěžovací silou stanovenou z napětí na hrotu 210 kPa, lze očekávat, že se výrazně sníží hodnoty modulu oproti původnímu testu, neboť budou vyloučeny nerealistické vysoké hodnoty modulu získané při vysokých hodnotách napětí na trnu. Pokud tyto vysoké hodnoty nejsou naměřeny, lze očekávat snížení hodnoty kvantilu 0,95, snížení náhodné proměnlivosti a snížení střední hodnoty modulu. Hodnota kvantilu 0,05 může, ale nemusí, být ovlivněna, protože závisí na nízkých hodnotách modulu a ty se získávají původním testem při nízkých hodnotách napětí na trnu, které jsou při použití upraveného testu ovlivněny minimálně.

Při porovnání hodnot kvantilu 0,95 (viz tabulka 1) je patrné výrazné snížení u všech typů materiálů výjimkou typu siGr. Hodnoty kvantilu 0,95 získané původním testem jsou 2-6krát vyšší než hodnoty získané upraveným testem. Náhodná proměnlivost měřená variačním koeficientem je rovněž výrazně snížena z intervalu 0,24–1,08 na interval 0,17–0,42. Pro jednotlivé typy zemin jsou variační koeficienty získané původním testem 2–3krát větší ve srovnání s upraveným testem. Podobné výsledky platí i pro střední hodnoty – pro všechny typy materiálů, s výjimkou typu siGr, jsou průměrné hodnoty výrazně nižší. Jsou sníženy z intervalu 32,2–153,4 MPa na interval 27,4–79,3 MPa. U jednotlivých typů materiálu jsou průměrné hodnoty získané původním testem až pětikrát vyšší než hodnoty získané upraveným testem. Při porovnání hodnot kvantilů 0,05 nejsou mezi sedmi typy patrné zásadní rozdíly, avšak u typu grsiSa jsou hodnoty kvantilů 0,05 získané upraveným testem čtyřikrát nižší ve srovnání s původním testem. Naproti tomu u typu siGr jsou hodnoty 0,05 kvantilu získané upraveným testem třikrát vyšší ve srovnání s původním testem.

Vysvětlení mírně odlišného chování typu grsiSa a zejména typu siGr je poměrně jednoduché. Porovnáme-li hodnoty napětí na trnu, při kterých byly oba materiály zkoušeny [17–19], byl typ grsiSa testován upraveným testem při podstatně nižších hodnotách a pokles hodnot modulu je proto výrazný. To výrazně ovlivňuje jak kvantily, tak i střední hodnotu. Naproti tomu typ siGr byl upraveným testem

testován při výrazně vyšších hodnotách napětí, což má za následek vyšší hodnoty modulu, které ovlivňují oba kvantily i střední hodnotu.

Moduly získané upraveným cyklickým CBR testem lze také porovnat s moduly získanými z cyklické triaxiální zkoušky. Z předchozích studií je známo, že hodnoty resilient modulu získané z cyklické triaxiální zkoušky se pohybují v nižším intervalu než hodnoty získané z původního cyklického CBR testu. V literatuře [24–27] se hodnoty modulů získané z cyklické triaxiální zkoušky pohybují v intervalech 20–90 MPa, 40–110 MPa, 55–80 MPa a 56–159 MPa. Všechny tyto hodnoty jsou plně srovnatelné s námi uváděnými hodnotami získanými z upraveného cyklického CBR testu. Pro srovnání jsou tyto hodnoty, pokud je to možné, uvedeny také v tabulce 1 jako orientační výsledky cyklické triaxiální zkoušky. Je však třeba poznamenat, že tyto orientační hodnoty byly vždy získány zkoušením pouze jednoho vzorku za různých podmínek aplikovaného napětí či vlhkosti a zejména na materiálu z různých oblastí světa.

Z provedené studie jasně vyplývá, že hodnoty resilient modulu získané původním cyklickým CBR testem jsou výrazně vyšší než hodnoty získané upraveným cyklickým CBR testem nebo cyklickou triaxiální zkouškou. Takto získaný modul neodpovídá jeho reálné hodnotě v reálné konstrukci vozovky, protože je ve srovnání se skutečností výrazně vyšší. Protože resilient modul charakterizuje tuhost materiálu, může být také tuhost celé konstrukce výrazně nadhodnocena, což může mít také vliv na návrh skladby vozovky a tloušťku konstrukčních vrstev. To následně vede k nevyhovujícím technickým parametrům konstrukce vozovky. Lze pak očekávat intenzivnější degradaci vozovek a sníženou odolnost a životnost konstrukce.

Závěr

Stávající metodiky pro navrhování vozovek jsou ve většině případů empirické nebo mechanicko-empirické a nejsou schopny přímo zahrnout potřebné znalosti o chování materiálů za různých přírodních i zatěžovacích podmínek. Materiály používané v konstrukci vozovky jsou vystaveny dynamickému a opakovanému zatížení způsobenému dopravou. Aby se zohlednil cyklický charakter zatížení materiálu a také nelineární chování materiálu, bylo provedeno mnoho experimentálních studií po celém světě, a to jak na modelech v reálném měřítku, tak na vzorcích testovaných v laboratorních podmínkách, s cílem získat informace o chování a deformaci pro adekvátní stanovení resilient modulu. Pojem resilient modul je vždy spojen s procesem opakovaného cyklického zatížení a jeho hodnota závisí na aktuálních parametrech materiálu – mj. maximální objemové hmotnosti, vlhkosti, způsobu zhuštění, počtu a velikosti zatížení a rozsahu napětí. Jeho hodnota není pro daný typ materiálu konstantní, ale mění se v určitém intervalu v závislosti na zkušebních podmínkách. Proto musí metoda stanovení resilient modulu zohledňovat výše uvedené faktory.

Na základě výzkumu provedeného na Mendelově univerzitě v Brně lze konstatovat, že metodika cyklického CBR testu v jeho upravené variantě využívající zařízení pro stanovení kalifornského poměru únosnosti pomocí stávajících CBR přístrojů je velmi vhodným postupem pro stanovení resilient modulu široké řady materiálů používaných v konstrukci vozovek, a to především v okamžiku, kdy pro cyklické zatěžování jsou použity reálné hodnoty napětí, které můžeme očekávat v reálné vozovce. Hodnoty napětí na trnu nesmí překročit únosnost materiálu, aby bylo zajištěno správné stanovení modulu. Výhodou tohoto postupu je na rozdíl od cyklické triaxiální zkoušky stejná příprava vzorků jako pro CBR zkoušku. Vzorky je možné připravovat s různým množstvím vody, při různé míře zhuštění, při různém napětí na trnu i různém počtu opakování zatížení.

Zdroje:

- [1] AASHTO. Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG); American Association of State Highway and Transportation Officials: Washington, DC, USA, 2008.
- [2] Díaz, M.M.; Pérez, I. Mechanistic-empirical pavement design guide: Features and distinctive elements. *Rev. Construcción* 2015, 14, 32–40.
- [3] Florian, A.; Ševelová, L.; Žák, J. Influence of environmental humidity on mechanical properties of natural and recycled unbound materials. *Acta Univ. Agric. Silvic. Mendel. Brun.* 2015, 63, 405–409.
- [4] Hauser, J.; Ševelová, L.; Matula, R.; Zedník, P. Optimization of low volume road pavement design and construction. *J. For. Sci.* 2018, 64, 74–85.
- [5] Nguyen, B.T.; Mohajerani, A. Resilient modulus of fine-grained soil and a simple testing and calculation method for determining an average resilient modulus value for pavement design. *J. Transp. Geotech.* 2016, 7, 59–70.

- [6] Yang, S.H.; Lin, H.D.; Kung, J.H.S.; Huang, W.H. Suction-Controlled Laboratory Test on Resilient Modulus of Unsaturated Compacted Subgrade Soils. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 2008, 134, 1375–1384.
- [7] Brinch Hansen, J. A General Formula for Bearing Capacity; Bulletin No. 11; Geoteknisk Institut, Institute Akademisk for de Tekniske Videuskaber: Copenhagen, Denmark, 1961.
- [8] Hauser, J.; Kozumplíková, A.; Ševelová, L. CBR and IBI tests for practices the design of the earth body and based layers of the road construction. In *Geotechnical Problems of Line Structures*; Slovak University of Technology in Bratislava: Bratislava, Slovakia, 2011; pp. 101–108.
- [9] CSN EN 13286-7; Unbound and Hydraulically Bound Mixtures—Part 7: Cyclic Load Triaxial Test for Unbound Mixtures. Institute for Technology Standardization. Metrology and State Testing: Prague, Czech Republic, 2004.
- [10] Sevelova, L., Hauser J., 304642 - PV 2013-673. Automatic control geotechnical equipment for measuring soil bearing capacity and methods of work with this device, Mendel University, Brno.
- [11] CSN EN ISO 13286-2; Unbound and Hydraulically Bound Mixtures—Part 2: Test Methods for the Determination of the Laboratory Reference Density and Water Content-Proctor Compaction. Institute for Technology Standardization. Metrology and State Testing: Prague, Czech Republic, 2015.
- [12] CSN EN ISO 13286-47; Unbound and Hydraulically Bound Mixtures—Part 47: Test Method for the Determination of California Bearing Ratio, Immediate Bearing Index and Linear Swelling. Institute for Technology Standardization. Metrology and State Testing: Prague, Czech Republic, 2015.
- [13] CSN EN ISO 14688-2. ~ Geotechnical Investigation and Testing-Identification and Classification of Soil—Part 2: Principles for a Classification; Institute for Technology Standardization, Metrology and State Testing: Prague, Czech Republic, 2005.
- [14] Geotechnical Investigation and Testing-Dentification and Classification of Rock—Part 1: Identification and Description; Institute for Technology Standardization, Metrology and State Testing: Prague, Czech Republic, 2004.
- [15] Unbound and Hydraulically Bound Mixtures—Part 2: Test Methods for the Determination of the Laboratory Reference Density and Water Content-Proctor Compaction; Institute for Technology Standardization, Metrology and State Testing: Prague, Czech Republic, 2015.
- [16] Hauser, J.; Kozumplíková, A.; Ševelová, L. The Influence of the Soil Treatment on the CBR Test Values. In *Proceedings of the Int. Conf. on Ground Improvement and Ground Control: Transport Infrastructure Development and Natural Hazards Mitigation-ICGI 2012*, Singapore, 30 October–2 November 2012; pp. 1623–1628.
- [17] Ševelová, L.; Florian, A.; Hruža, P. Using Resilient Modulus to Determine the Subgrade Suitability for Forest Road Construction. *Forests* 2020, 11, 1208.
- [18] Ševelová, L.; Florian, A.; Žák, J. Influence of Plunger Stress on Resilient Modulus of Forest Subgrade Soils Obtained from Cyclic CBR Test. *Forests* 2021, 12, 1456.
- [19] Florian, A.; Ševelová, L.; Žáková, K.; Žák, J. An Updated Cyclic CBR Test with Realistic Stress Values under the Plunger for Resilient Modulus Calculation. *Forests* 2023, 14, 2425.
- [20] TP 170; Design of Pavement Structures. Ministry of Transportation: Prague, Czech Republic, 2023.
- [21] Florian, A.; Ševelová, L.; Žák, J. Reliability analysis of temperature influence on stresses in rigid pavement made from recycled materials. *Acta Univ. Agric. Silvic. Mendel. Brun.* 2016, 64, 423–432.
- [22] Ševelová, L.; Florian, A. Comparison of Material Constitutive Models Used in FEA of Low Volume Roads. *Int. J. Civ. Environ. Eng.* 2013, 10, 421–425.
- [23] Florian, A.; Ševelová, L. Computer Simulation of Low Volume Roads Made from Recycled Materials. *Int. J. Civ. Environ. Eng.* 2013, 10, 744–748.
- [24] Molenaar, A.A.A. Repeated Load CBR Testing, a Simple but Effective Tool for the Characterization of Fine Soils and Unbound Materials; Delft University of Technology: Delft, The Netherlands, 2008.
- [25] Leunga, G.L.M.; Wong, A.W.G.; Wanga, Y.H. Prediction of resilient modulus of compacted saprolitic soils by CBR approach for road pavement subgrade: A re-examination. *Int. J. Pavement Eng.* 2013, 14, 403–417.
- [26] Bojacá Torres, D.C.; Campagnoli Martínez, S.X. CBR cíclico como método alternativo para la determinación del módulo resiliente en suelos blandos de subrasante. *Cienc. E Ing. Neogranadina* 2022, 2, 85–98.
- [27] Rahman, M.M.; Gassman, S.L.; Islam, K.M. Effect of Moisture Content on Subgrade Soils Resilient Modulus for Predicting Pavement Rutting. *Geosciences* 2023, 13, 103.

VLIV VLASTNOSTÍ VSTUPNÍHO ASFALTU NA VLASTNOSTI VÝSLEDNÉHO POLYMEREM MODIFIKOVANÉHO ASFALTU

THE INFLUENCE OF BASE BITUMEN CHARACTERISTICS ON POLYMER MODIFIED BITUMEN

Ing. Tomáš Koudelka, Ph.D., VIALAB CZ s.r.o.
doc. Ing. Ondřej Dašek, Ph.D., VUT v Brně, FAST, Brno
Ing. Petr Bureš, VIALAB CZ s.r.o.
doc. Ing. Petr Hýzl, Ph.D., VUT v Brně, FAST, Brno

Při výrobě polymerem modifikovaných asfaltů se využívají nemodifikované silniční asfalty, do kterých se za přesně stanovených okrajových podmínek vmíchává polymerní přísada a další látky. Vlastnosti výsledného polymerem modifikovaného asfaltu (PMB) jsou ovlivněny nejen množstvím a vlastnostmi polymerní přísady a dalších složek, ale i okrajovými podmínkami výroby a v neposlední řadě vlastnostmi vstupního silničního asfaltu. Cílem příspěvku bude popsat rozdíly ve vlastnostech výsledných polymerem modifikovaných pojiv, které byly zapříčiněny použitím různých vstupních silničních asfaltů. Chování těchto pojiv bude popsáno pomocí vhodných laboratorních zkoušek. Ukazuje se, že modifikace vstupního pojiva polymerem nezlepšuje významně některé jeho reologické parametry (např. schopnost pojiva relaxovat za nízkých teplot). Tento fakt může vést k rychlému vzniku určitých typů poruch, které se vyskytují nejen u silničních asfaltů, ale právě i u PMB.

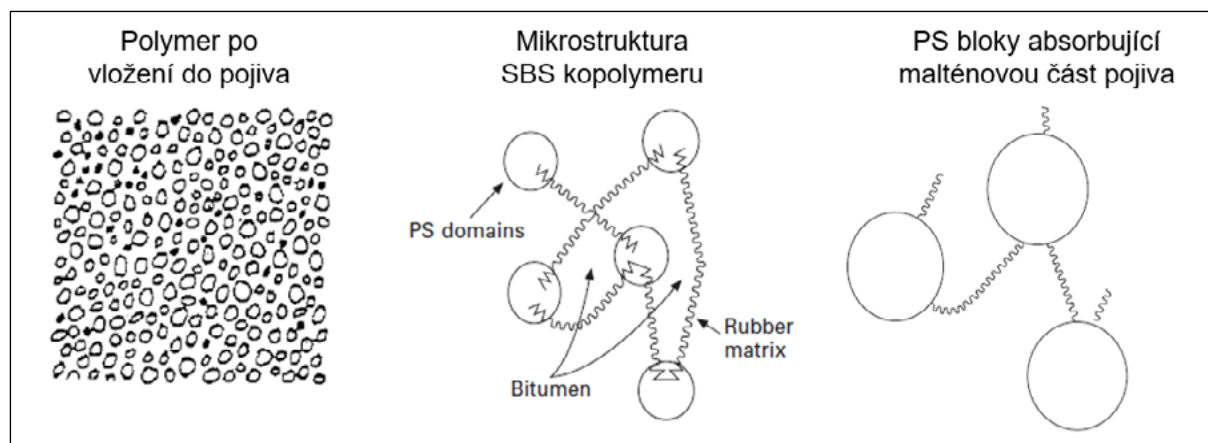
During the production of polymer modified bitumens, unmodified paving bitumens are used along with a polymer and other substances which are mixed under precisely defined boundary conditions. The characteristics of the resulting polymer modified bitumen (PMB) are influenced not only by the amount and properties of the polymer and other components, but also by the boundary conditions of production and, finally, by the characteristics of the paving bitumen. The aim of the paper is to describe the differences in properties of the resulting polymer modified bitumens that were caused by the use of various paving base bitumens. The behaviour of these binders will be described by using appropriate laboratory tests. It turns out that modification of the base binder with a polymer does not significantly improve some of its rheological parameters (e.g. the ability of the binder to relax at low temperatures). This fact can lead to the rapid development of certain types of defects that occur not only in roads with paving bitumens, but also with PMB.

Úvod

Použití polymerem modifikovaných pojiv (PMB) se datuje již od 60. a 70. let minulého století. Cílem modifikace asfaltů polymerem je především zlepšení jejich teplotní citlivosti, zvýšení koheze a elastických vlastností. Většina globálně používaných polymerů pro modifikaci asfaltových pojiv jsou elastomery, přičemž jejich současně nejrozšířenějším zástupcem je SBS (styrene-butadien-styren) kopolymer. Po vložení SBS kopolymeru do asfaltového pojiva začnou polystyrenové bloky polymeru absorbovat malténovou složku pojiva a nabývat na objemu (svůj objem zvětší až 9x). Předpokládá se, že polystyrenové bloky se aglomerují do mikrodomén, které tvoří fyzikální křížové vazby pro bloky polybutadienu, který poskytuje materiálu pružnost. Při aplikaci smykového napětí (míchání polymeru a pojiva za vysokých otáček) se nabobtnalý polymer stává mobilním a disperguje se v pojivu. Tímto způsobem následně vzniká elastomerní trojrozměrná síť. Na obrázku 1 jsou zobrazeny fáze vzniku trojrozměrné sítě v PMB. V průběhu procesu disperze polymeru, dle obrázku 1, se mění reologické vlastnosti pojiva [1, 2].

V odborné literatuře se uvádí [3], že složení asfaltového pojiva a druh kopolymeru vzájemně ovlivňují výsledné reologické vlastnosti pojiva, a jsou popsány zejména následující skutečnosti:

- Složení vstupního pojiva má zásadní vliv na vlastnosti výsledného PMB pojiva.
- Vlastnosti PMB pojiva jsou z velké části ovlivněny vlastnostmi kontinuální (asfaltové) fáze.
- Asfaltové pojivo s vysokým podílem aromatických uhlovodíků a polymer s nízkou molekulovou hmotností vytváří pojivo s nízkým bodem měknutí (polymer je velmi dobře rozpustný).



Obrázek 1: Proces disperze SBS polymeru v asfaltovém pojivu [3]

Pro specifikaci polymerem modifikovaných asfaltů se v Evropě používá harmonizovaná norma EN 14023 z roku 2010. Na základě této specifikace vznikla česká norma ČSN 65 7222-1 z roku 2017, která stanovuje požadavky na PMB v ČR. Z hlediska kategorizace pojiv a při kontrolních zkouškách je používáno především tzv. empirických zkoušek, tj. penetrace (ČSN EN 1426), bodu měknutí (ČSN EN 1427) a vratné duktility (ČSN EN 13398), které se provádějí na nezestárých pojivech. Podle normy ČSN 65 7222-1 se u PMB pojiv vyžaduje i splnění požadavků na odolnost proti krátkodobému stárnutí pomocí metody RTFOT – Rolling Thin Film Oven Test (ČSN EN 12607-1) s následným vyhodnocením změny empirických parametrů (bod měknutí a penetrace), změny hmotnosti pojiva a opětovné změření vratné duktility. Zároveň se ověřuje, že je pojivo stabilní s ohledem na skladování.

Z hlediska vývoje zkušebních metod a návrhu nové specifikace se výše uvedené parametry jeví pro hodnocení vlastností a výkonosti PMB jako zastaralé a neodpovídající vývoji na poli silničního zkušebnictví. Také v Evropě se v posledních 10 letech významně rozšířilo používání reometrů, pomocí kterých jsme schopni lépe popsat chování a odezvu materiálů na zatížení [4]. V rámci práce technické skupiny TC 336/WG 1/TG 15 byla vyvinuta specifikace [5], kde jsou uvedeny parametry, pomocí nichž lze lépe hodnotit chování asfaltových pojiv, které jsou získány pomocí měření na zařízení DSR nebo BBR.

Cílem tohoto příspěvku je popis rozdílů ve vlastnostech PMB, které byly zapříčiněny použitím různých vstupních silničních asfaltů.

Pro účely popisu vlivu modifikace SBS polymery na vlastnosti silničního asfaltu byla vybrána pojiva od dvou dodavatelů, přičemž se zkoušely gradace pojiv 50/70 i 70/100 (tabulka 1).

Tabulka 1: Přehled zkoušených pojiv

Pořadí	Rafinerie	Gradace pojiva
1.	B	50/70
2.	A	50/70
3.	B	70/100
4.	A	70/100

Příprava PMB pojiv a vstupní pojiva

Vstupní materiály byly voleny tak, aby bylo možné pojiva klasifikovat jako gradaci 25/55 (vstupní pojivo 50/70), respektive 45/80 (vstupní pojivo 70/100). V tabulce 2 jsou uvedeny výsledky kontrolních zkoušek vstupních pojiv a hodnota Flokulačního toluenového indexu (FTI) dle metodiky [6].

Pro modifikaci vstupních pojiv byl použit kopolymer di-blok na bázi styrenu a butadienu (SBS) s průměrným obsahem polystyrenu 33 %. Tento polymer je obecně doporučován i pro výrobu PMB z pojiv, která mají vyšší obsah asfalténů, a jsou tak méně kompatibilní při výrobě PMB. Při modifikaci pojiv byla použita síťovací přísada.

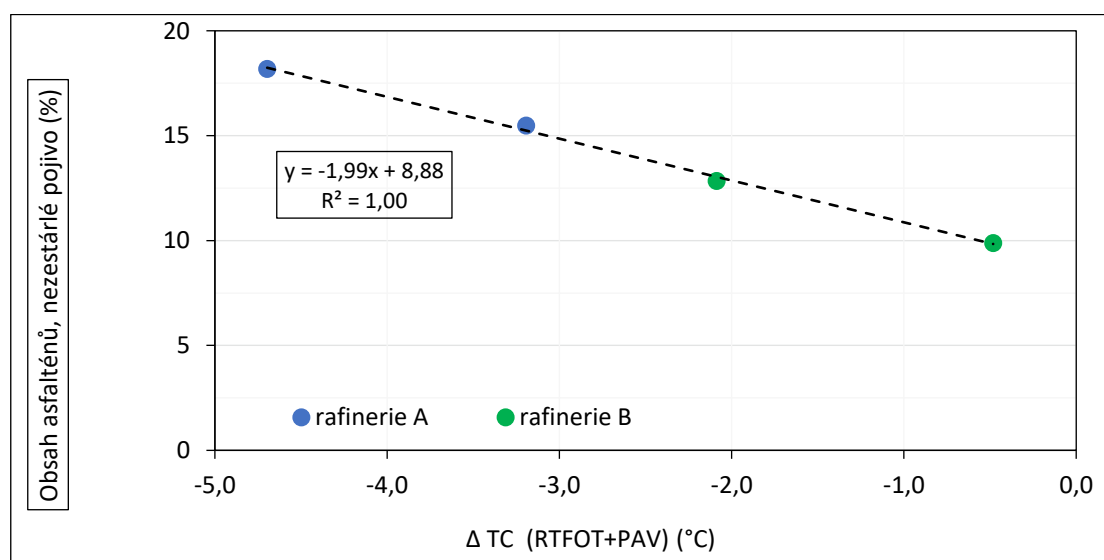
Modifikovaná pojiva byla připravena pomocí vysokostřížné míchačky Silversone L4 RT. Při výrobě bylo pojivo ohřáté na 180 °C. Po dobu 90 minut od nadávkování polymerní přísady byly otáčky nastaveny na 2 500 ot/min, přičemž po 60 minutách byla dávkována síťovací přísada. Po 90 minutách byly otáčky sníženy na 300 ot/min. Míchání skončilo po 7 hodinách (konec míchání – KM) a následně byla pojiva vložena do sušárny na 180 °C, aby se sledoval vývoj bodu měknutí po KM. Reologické zkoušky (s výjimkou zkoušek sledování zrání) proběhly na pojivech odebraných po konci míchání (7 hod).

Tabulka 2: Empirické vlastnosti vstupních pojiv a hodnoty FTI

Pořadí	Rafinerie	Gradace	Penetrace (0,1 mm)	Bod měknutí (°C)	PI (-)	FTI (-)
1.	B	50/70	60	51,2	-0,47	1,1
2.	A	50/70	62	49,4	-0,85	2,3
3.	B	70/100	89	45,2	-1,08	2,0
4.	A	70/100	82	45,6	-1,19	---

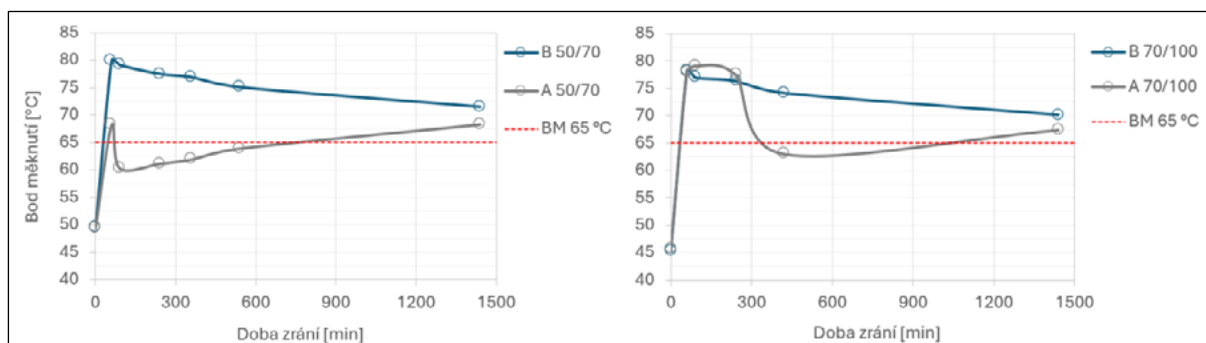
Zrání PMB při výrobě

V úvodu článku byl popsán proces zrání PMB pojiva, kdy bylo uvedeno, že reologické vlastnosti pojiva se mění v závislosti na postupu procesu disperze polymeru. V rámci tohoto článku byla změna reologických parametrů popsána pomocí zkoušky bodu měknutí. Lze pozorovat, že každé pojivo po přidání polymeru reaguje jiným způsobem (obrázek 3). Proces zrání, jak je popsán na obrázku 1, probíhá v závislosti na technologii rafinerie, ve které bylo pojivo vyrobeno, přičemž jednotlivé gradace z konkrétní rafinerie sledují podobný trend. Po přidání polymeru nastává prudký nárůst bodu měknutí u pojiv z obou rafinérií. U rafinerie A následuje poměrně výrazný pokles BM (rozpuštění polymeru) s jeho následným a postupným růstem (tvorba trojdimenzionální sítě). Protože u polymeru v kombinaci s pojivem z rafinerie A dochází k většímu počátečnímu poklesu bodu měknutí, lze usuzovat, že toto pojivo je více kompatibilní s daným polymerem a že má vyšší podíl malténové fáze než pojivo z rafinerie B. Po delší době zrání se hodnoty BM stabilizují a vzájemně se k sobě přibližují. Tento závěr lze podpořit údaji, které byly popsány v článku [7], kde byl obsah asfalténů velmi dobře korelován s hodnotami parametru ΔTC (obrázek 2). Nižší hodnoty parametru ΔTC znamenají vyšší obsah asfalténů. Modifikované pojivo, u kterého dochází k pomalejšímu poklesu BM, má vyšší obsah asfalténů. Výsledky parametru ΔTC jsou popsány dále v článku.



Obrázek 2: Hodnota parametru ΔTC po RTFOT+PAV v závislosti na obsahu asfalténů (pozn. jedná se o pojiva z jiných rafinérií, než jsou předmětem tohoto článku, avšak z obou rafinérií byla dodána pojiva gradace 50/70 a 70/100) [7]

Obrázek 3 poměrně jasně demonstruje skutečnost, že rozdíl bodu měknutí u jedné gradace může být při výrobě i 15 °C v závislosti na době odběru zkušební vzorku. Vývoj bodu měknutí, respektive reologických vlastností pojiv, záleží ale nejenom na době odběru od začátku výroby, ale rovněž na vstupním pojivu, typu polymeru, jeho množství, výrobních teplotách a dalších parametrech výroby. Z tohoto pohledu je pak důležité uvést, že záleží i na tom, v jakém bodě zrání je pojivo při industriální výrobě expedováno. V každém případě pak musí pojivo při expedici splňovat specifikační požadavky, které jsou v ČR uvedené v ČSN 65 7222-1.



Obrázek 3: Vývoj bodu měknutí u jednotlivých PMB

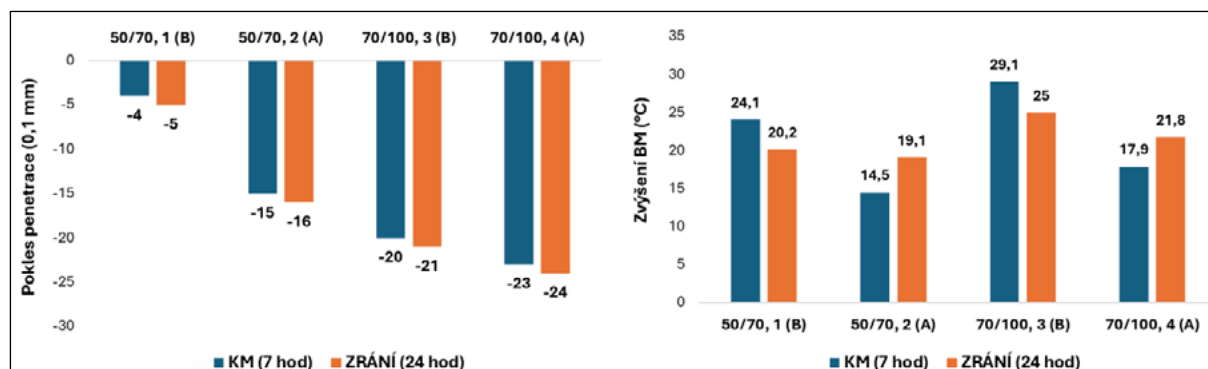
Výsledky kontrolních zkoušek vyrobených PMB

Výsledky kontrolních zkoušek pojiv jsou uvedeny v tabulce 3. Lze konstatovat, že hodnoty vratné duktility jsou srovnatelné pro obě gradace pojiva a zároveň pro obě rafinerie a zkouška tak neposkytuje žádnou informaci o tom, zda mají pojiva odlišné reologické vlastnosti, nebo ne. Naopak při zkoušce silové duktility (SD) lze pozorovat výrazné rozdíly, a to jak v počáteční síle, tak i v maximálním protažení zkušební tělíska. Pro účely porovnání byla všechna pojiva při zkoušce SD zkoušena při teplotě 10 °C. Pojiva z rafinerie A se v obou případech natáhla na delší vzdálenost a zároveň vykazovala vyšší práci při protahování z 200 mm na 400 mm (pojivo vyrobené z gradace 50/70 z rafinerie B se nenatáhlo na požadovaných 400 mm). Pojiva z rafinerie A byla více duktilní, což lze přisuzovat pravděpodobně tomu, že obsahují větší podíl malténových složek, jejichž přítomnost umožnila lepší rozpuštění polymeru (vyšší kompatibilita vstupního pojiva s polymerem). Je zajímavé si povšimnout skutečnosti, že pojiva z rafinerie A dosahovala vyšší práce i v případech, kdy měla nižší body měknutí.

Na obrázku 4 je zobrazena změna parametru penetrace a bodu měknutí během výroby PMB. Ve všech případech se stala pojiva po modifikaci tvrdší (pokles penetrace). U pojiv z rafinerie B bod měknutí postupem času klesal, zatímco u rafinerie A byl pozorován nejdříve pokles bodu měknutí (rozpuštění polymeru) a pak jeho nárůst (tvorba trojdimenzionální sítě).

Tabulka 3: Vlastnosti PMB pojiv po konci míchání (KM) a po jejich zrání

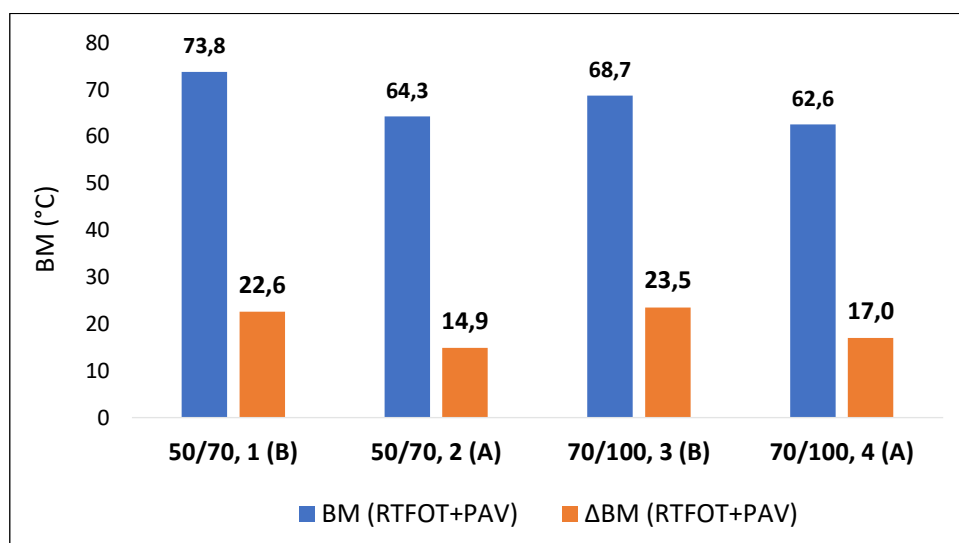
Pojivo	Zdroj	Vstup		7 hod – konec míchání			24 hod – zrání		SD, 10 °C, KM		
		BM	PEN	BM	PEN	VD	BM	PEN	max. síla	práce	protažení
		°C	0,1 mm	°C	0,1 mm	%	°C	0,1 mm	N	J/cm ²	mm
50/70	1 (B)	51,2	60	75,3	56	85	71,4	55	26,1	1,4	289
50/70	2 (A)	49,4	62	63,9	47	85	68,5	46	42,6	4,6	620
70/100	3 (B)	45,2	89	74,3	69	89	70,2	68	21,6	2,7	450
70/100	4 (A)	45,6	82	63,5	59	88	67,4	58	29,2	3,4	919



Obrázek 4: Vliv modifikace a doby zrání na empirické vlastnosti PMB

Stárnutí vstupních silničních asfaltů

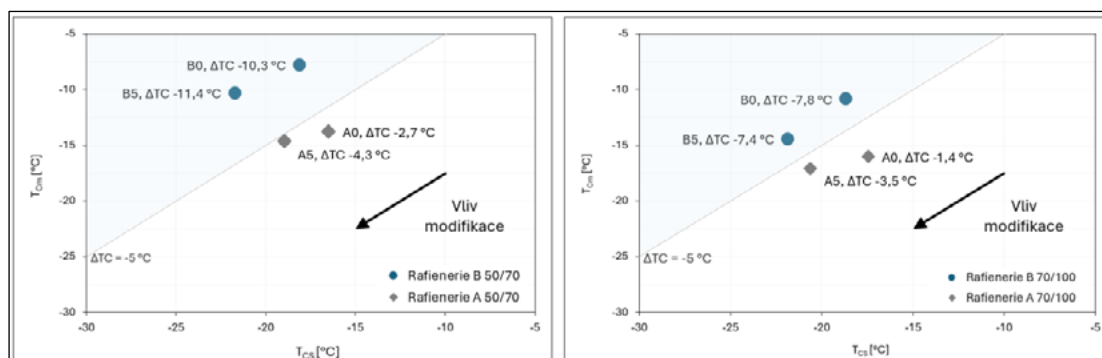
V práci [8] bylo uvedeno, že průměrné zvýšení bodu měknutí po simulaci stárnutí metodami RTFOT+PAV bylo u silničních pojiv kategorie 50/70 a 70/100 $15,8\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Průměrný bod měknutí byl $64,2\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ve stejné práci je uvedeno, že zvýšení bodu měknutí po simulaci stárnutí metodou RTFOT+PAV by mělo být nižší než $18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Výsledky zkoušek změny bodu měknutí jsou uvedeny na obrázku 5. Pojiva z rafinerie B by toto kritérium převyšovala o více než $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, v případě gradace 50/70 i 70/100. Nižší odolnost proti stárnutí je zpravidla způsobena vyšším obsahem asfalténů nebo vyšším obsahem visbreakingových zbytků, tj. nižší hodnoty parametru FTI [7, 8, 9].



Obrázek 5: Výsledky zkoušky bodu měknutí a změny bodu měknutí po simulaci stárnutí RTFOT+PAV

Nízkoteplotní charakteristiky ze zkoušky BBR

Hodnocení nízkoteplotního chování probíhalo pomocí zařízení BBR (Bending Beam Rheometer). Zkoušky byly provedeny po simulaci stárnutí metodami RTFOT+PAV. Při vystavení asfaltového pojiva degračním vlivům dochází ke zvyšování (zhoršování) tzv. kritických teplot, odvozených na základě parametrů $S_{(60)}$ a $m_{(60)}$. Bylo dokázáno, že kritická teplota určená na základě m -hodnoty, tedy schopnosti pojiva relaxovat, roste většinou rychleji než kritická teplota určená na základě $S_{(60)}$. Rozdíl kritických teplot se začal označovat parametrem ΔTC (kritická teplota pro vznik trhlin). Parametr popisuje relaxační schopnosti pojiva, které mohou přispět ke vzniku trhlin, zároveň ale nejsou způsobeny zatížením dopravou, ale jsou způsobeny například teplotními vlivy. Ukazuje se, že tento parametr rovněž dobře koreluje s obsahem asfalténů v pojivu (obrázek 2) nebo s náchylností pojiva ke stárnutí. Jako kritická hodnota ΔTC pro vznik trhlin se v literatuře většinou uvádí hodnota $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ [10].



Obrázek 6: Nízkooteplotní charakteristiky pojiv a vliv modifikace na ně, rafinerie A a B, gradace 50/70 vlevo a gradace 70/100 vpravo (modifikovaná pojiva jsou označena číslem 5)

Na obrázku 6 jsou zobrazeny nízkooteplotní charakteristiky pojiv z měření v BBR, konkrétně závislost ohybové tuhosti na kritické teplotě (oblast, kde je parametr $\Delta TC \leq -5$ °C je vyznačena světle modře). Při pohledu na výsledky je vidět, že pojiva z rafinerie B, obě gradace, jsou situována v modrém trojúhelníku, který značí oblast, kdy je parametr $\Delta TC \leq -5$ °C, tj. pojiva, která jsou náchylná na vznik trhlin. Při hodnocení pojiv dle parametru T_{cs} je vidět, že tento parametr má velmi malou rozlišovací schopnost pro roztřídění pojiv do jednotlivých gradací, i výsledky z obou rafinerií jsou srovnatelné – rozsah parametru T_{cs} byl -16,5 °C až -18,7 °C. V případě T_{cm} byla situace naopak odlišná, kdy pojiva dosahovala výsledků -7,8 °C až -16,0 °C.

Tabulka 4: Kritické parametry silničních asfaltů a modifikovaných pojiv, gradace 50/70

Označení	Gradace pojiva	Kritické parametry				
		T_{cs}	T_{cm}	T_c	ΔT_c	m při T_k S300
		°C	°C	°C	°C	-
Silniční	50/70, 1 (B)	-18,1	-7,8	-7,8	-10,3	0,253
PMB	50/70, 1 (B)	-21,7	-10,3	-10,3	-11,4	0,255
Silniční	50/70, 2 (A)	-16,5	-13,8	-13,8	-2,7	0,275
PMB	50/70, 2 (A)	-18,9	-14,6	-14,6	-4,3	0,268

Tabulka 5: Kritické parametry silničních asfaltů a modifikovaných pojiv, gradace 70/100

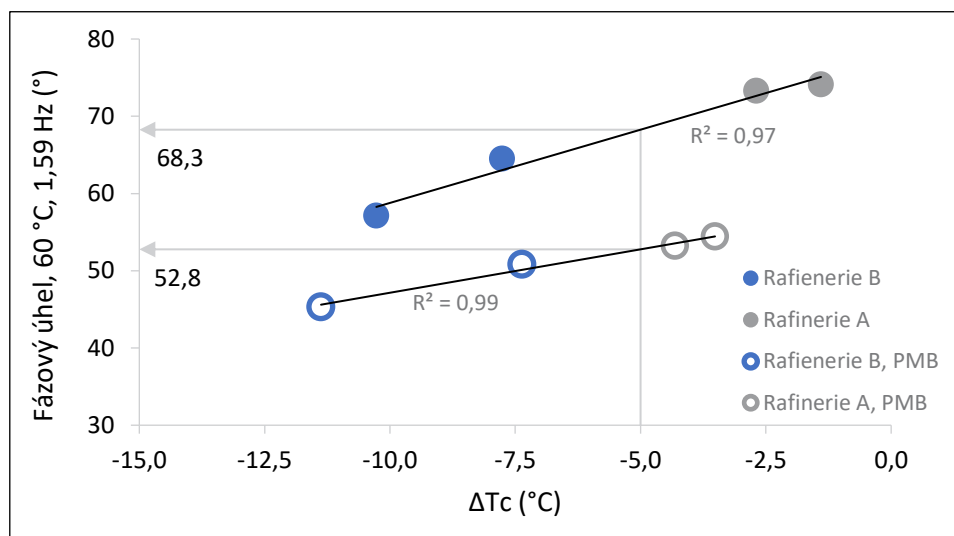
Označení	Gradace pojiva	Kritické parametry				
		T_{cs}	T_{cm}	T_c	ΔT_c	m při T_k S300
		°C	°C	°C	°C	-
Silniční	70/100, 1 (B)	-18,7	-10,9	-10,9	-7,8	0,255
PMB	70/100, 1 (B)	-21,8	-14,5	-14,5	-7,4	0,262
Silniční	70/100, 2 (A)	-17,4	-16,0	-16,0	-1,4	0,287
PMB	70/100, 2 (A)	-20,6	-17,1	-17,1	-3,5	0,273

Tabulka 6: Změna kritických parametrů vlivem modifikace

Pojivo	ΔTC_{S60}	ΔTC_{m60}	$\Delta \Delta TC$
50/70, 1 (B)	-3,6	-2,5	-1,1
50/70, 2 (A)	-2,4	-0,8	-1,6
70/100, 1 (B)	-3,1	-3,6	0,5
70/100, 2 (A)	-3,2	-1,1	-2,1

Z hlediska modifikace pojiv bylo zjištěno, že přidavek polymeru mírně snižoval tuhost pojiva (TC_s) a zároveň mírně zlepšoval schopnost pojiva relaxovat (TC_m). To znamená, že modifikace pojiv zlepšuje nízkoteplotní parametry, což je patrné z dat v tabulkách 4 a 5. Na druhou stranu vlivem modifikace nedochází ke zlepšení parametru ΔTC , ale dochází k jeho mírnému zhoršení (tabulka 6). Snižování hodnoty parametru ΔTC je obvykle spojováno s fázovou nestabilitou asfaltových pojiv a vyšší náchylností na stárnutí, tj. zvyšování tuhosti [15]. Pojiva, která byla fázově nestabilní před modifikací, jsou ještě více fázově nestabilní vlivem přidavku polymerní přísady. To znamená, že modifikací pojiv nezlepšíme jejich náchylnost na vznik trhlin hodnotenou pomocí parametru ΔTC . Tato skutečnost byla potvrzena u všech zkoušených pojiv.

Snižování parametru ΔTC bylo v literatuře dále spojeno s nižšími hodnotami fázového úhlu z měření v DSR [11]. Z hlediska výsledků zkoušek uvedených v [11] se dá konstatovat, že nižší fázový úhel za středních teplot zvyšuje riziko vzniku únavových trhlin. S hodnotou fázového úhlu samotného se dokonce uvažuje jako s hodnotícím parametrem pojiv za středních teplot (parametr teplota viskoelastického přechodu – TVE, viz návrh specifikace v [5]). Ví se, že vysoký fázový úhel značí pojivo s vyšší viskozitou. V literatuře se můžeme setkat rovněž s tvrzením, že takové pojivo má i lepší samozotavovací schopnosti (schopnost disipovat působící napětí). Příspěvek [12] poukázal na výhody vyššího fázového úhlu při nízkých teplotách než naopak. Na obrázku 7 je zachycena závislost parametru ΔTC a fázového úhlu při teplotě 60 °C a frekvenci měření 1,59 Hz. Je nutno poznamenat, že teplota 60 °C neodpovídá hodnocení při středních teplotách, kdy se hodnotí únavový parametr, nicméně i tak lze tvrdit, že mezi parametry fázového úhlu, pomocí kterého lze hodnotit schopnost pojiva disipovat energii, a parametrem ΔTC existuje těsná souvislost. Pojiva, která jsou náchylná na vznik trhlin, mají nižší hodnoty fázového úhlu. V rámci sběru dat vlastností PMB, který probíhal v ČR v letech 2018–2022, se parametr TVE nesledoval, nicméně se sledoval parametr T3 a fázový úhel při teplotě T3. Z hlediska specifikace by bylo možné riziko vzniku trhlin hodnotit právě pomocí tohoto parametru, kdy by se stanovila minimální hodnota fázového úhlu při teplotě T3.



Obrázek 5: Závislost mezi fázovým úhlem (60 °C, 1,59 Hz) a parametrem ΔTC

Závěr

Tento článek si kladl za cíl prohloubit znalosti, týkající se vlivu vlastností silničních asfaltů na vlastnosti PMB pojiv, které jsou z nich vyrobené. Na základě změřených výsledků lze konstatovat následující:

- U gradací 70/100 došlo vlivem přidavku polymeru k vyššímu poklesu penetrace než u gradací 50/70. Zráním PMB pojiva přitom nemělo významný vliv na změnu penetrace na rozdíl od změny BM. U pojiv s vyšším obsahem malténové části dochází k rozpouštění polymeru, který je charakterizován výrazným poklesem BM.
- U vstupních pojiv, která měla vyšší obsah asfalténů (nižší hodnoty parametru ΔTC , vyšší nárůsty BM a nižší fázové úhly po simulaci stárnutí), nedocházelo k výraznějšímu rozpouštění polymerní přísady, která je charakterizována poklesem bodu měknutí.

- U PMB pojiv, kde docházelo k menšímu rozpouštění polymerní přísady, byla zjištěna menší duktilita, tato pojiva se za nízkých teplot méně protahovala a vykonala menší práci, přestože měla vyšší bod měknutí.
- U vstupních pojiv, která měla vyšší hodnotu FTI, docházelo k nižšímu nárůstu BM po simulaci dlouhodobého stárnutí. Pojiva měla rovněž vyšší hodnoty parametru ΔTC a vyšší hodnoty fázového úhlu.
- Zkouška vratné duktility neposkytla žádné relevantní výsledky vzhledem k hodnocení kvality pojiva. Pomocí této zkoušky lze prokázat pouze to, zda je pojivo modifikované, nebo není, popřípadě do jaké míry.
- Vlivem modifikace došlo u pojiv ke mírnému snížení jejich ohybové tuhosti a mírnému zvýšení m -hodnoty, to znamená, že došlo ke snížení kritických teplot T_{CS} a T_{CM} .
- Vlivem modifikace došlo ke zhoršení parametru ΔTC . Vložení polymerní přísady dále zhoršovalo fázovou stabilitu pojiva. Pojiva, které mají špatnou fázovou stabilitu před modifikací, mají po modifikaci fázovou stabilitu ještě horší. To znamená, že modifikace v tomto případě nepomáhá ke zlepšení náchylnosti pojiv na vznik trhlin, které jsou způsobeny například teplotními vlivy.
- Parametr ΔTC dobře koreluje s hodnotami fázového úhlu při oscilačním měření v DSR při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz. Korelace funguje jak pro silniční asfalty, tak pro PMB pojiva.

Tento příspěvek svým charakterem navazuje na dříve publikované články a výsledky, které se věnovaly problematice hodnocení kvality asfaltových pojiv [7, 8, 13, 14]. V tomto článku byla opět demonstrována skutečnost, že pomocí současných zkušebních evropských metod (hodnocení dat a výsledků z měření na přístrojích DSR dle EN 14770 a BBR dle EN 14771) a postupů lze hodnotit kvalitu silničních asfaltů i polymerem modifikovaných pojiv. Chybějící harmonizovaná specifikace by proto neměla být překážkou pro účinné hodnocení kvality asfaltových pojiv.

Zdroje:

- [1] Airey, G.D., Rheological properties of styrene butadiene styrene polymer modified road bitumens, Fuel, Volume 82, Issue 14, October 2003, Pages 1709-1719
- [2] Aguirre, I., a kol. Storage stability of SBS/sulphur modified bitumen at high temperature: Influence of bitumen composition and structure, Construction and Building Materials, Volume 52, 15 February 2014, Pages 245-252
- [3] McNally, T. Polymer modified bitumen, Properties and characterization, Woodhead Publishing Limited, ISBN 978-0-85709-372-1 (online)
- [4] Dasek, O. Pokročilé zkoušení asfaltových pojiv E&E kongres 2024, Silnice mosty, 2024, 3, 19-24
- [5] CEN/TC 336/WG1 Bituminous binders for paving, TG 15 Complementary Performance-related Specification Framework - Draft 2 Clean version (2024-12-06), N1243
- [6] Stoklásek, S. a kol. Metodika pro hodnocení disperzní stability silničních asfaltů, Jednobodová precipitační titrace, Metodika vznikla v rámci řešení projektu TAČR TA03030381, Brno, září 2016
- [7] Koudelka, T., Bureš, P., Šedina, J., Kvalita silničních asfaltů a způsob jejího hodnocení, 2021, 1.2, 1-8 [cit. 2025-17-07]. Dostupné z: <https://asfaltove-vozovky.cz/rocniky/rocnik-2021/>
- [8] Coufalík, P. (2017) Reologické Vlastnosti Asfaltových Pojiv, Dizertační práce, Vysoké Učení Technické v Brně, Brno
- [9] Dašek, O., Coufalík, P., Hýzl, P., Stoklásek, S., Špaček, P. a Hegr, Z. (2019) Doplnující kritéria pro hodnocení vlastností silničních asfaltů a jejich vztah k trvanlivosti vozovky, 2019 [cit. 2025-17-07]. Dostupné z: <https://asfaltove-vozovky.cz/rocniky/rocnik-2019/>
- [10] "IS-240". (2019) Use of the DELTA Tc Parameter to characterize asphalt binder behaviour, State of the knowledge, Asphalt Institute, ISBN 978-1-934154-77-9
- [11] Soenen, H., Lu, X., Muehlich, U., Laukkanen, O. V. The influence of aging on binder fatigue and other fracture related binders test results, International Society for Asphalt Pavements (ISAP), Wyoming, USA, 2016
- [12] Hesp, S., Shurvell, H.F., Waste engine oil residue in asphalt cement, 7th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control, MAIREPAV 2012
- [13] Dašek, O., Coufalík, P., Hýzl, P., Stoklásek, S., Špaček, P. a Hegr, Z. (2019) Doplnující kritéria pro hodnocení vlastností silničních asfaltů a jejich vztah k trvanlivosti vozovky, konference Asfaltové vozovky 2019, článek 2-5 [cit. 2025-17-07]. Dostupné z: <https://asfaltove-vozovky.cz/rocniky/rocnik-2019/>

- [14] Koudelka, T., Dašek, O. Sběr dat pro specifikaci polymerem modifikovaných asfaltů, Silnice a Mosty 3/2024, Sdružení pro výstavbu silnic
- [15] Kriy, P., Noel, J.A., Quddus, M.R., Shirt, R.D. Rheological properties of phase-incompatible bituminous binders, 7th Eurasphalt and Eurobitume Congress

VLASTNOSTI TRANSPARENTNÍCH POJIV

PROPERTIES OF TRANSPARENT BINDERS

doc. Ing. Ondřej Dašek, Ph.D., Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební

doc. Ing. Petr Hýzl, Ph.D., Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební

Ing. Tomáš Koudelka, VIALAB CZ s.r.o.

Ing. Petr Bureš, VIALAB CZ s.r.o.

Ing. Filip Dostál, VIALAB CZ s.r.o.

Ing. Jakub Šedina, Ph.D., VIALAB CZ s.r.o.

Ing. Tomáš Mery, VIALAB CZ s.r.o.

V poslední době se na západoevropském trhu začínají prosazovat pojiva, která se označují jako syntetická, transparentní, alternativní či bio-pojiva. Tato alternativní pojiva mají v budoucnosti potenciál částečně nahradit použití konvenčních asfaltových pojiv. Nový návrh normy EN 12597 (Terminologie) tato pojiva označuje jako „clear binder“, přičemž tato pojiva nespádají do rozsahu působnosti CEN/TC 336. Z tohoto důvodu neplatí pro tato pojiva požadavky vztahující se na běžná asfaltová pojiva, ani je není možné označit značkou CE, a je tedy nutné s těmito pojivy získávat zkušenosti. Cílem příspěvku je pomocí laboratorních zkoušek popsat chování vybraných transparentních/syntetických pojiv, vyskytujících se na evropském trhu. Ukazuje se, že transparentní pojiva jsou většinou pojiva modifikovaná polymery, jejichž některé vlastnosti se podstatně liší od vlastností běžně používaných asfaltů.

Recently, binders that are referred to as synthetic, transparent, alternative or bio-binders have begun to establish oneself on the Western European market. These alternative binders have the potential to partially replace the use of conventional asphalt binders in the future. The new draft of the EN 12597 standard (Terminology) refers to these binders as “clear binders”, while these binders do not fall within the scope of CEN/TC 336. For this reason, the requirements applicable to conventional asphalt binders do not apply to these binders. These binders cannot be CE marked, and it is therefore necessary to gain experience with these binders. The aim of the paper is to describe the behavior of selected transparent/synthetic binders on the European market using laboratory tests. It turns out that transparent binders are mostly polymer-modified binders, some of whose properties differ significantly from those of commonly used bitumens.

Úvod

V současné době probíhá nemalé množství výzkumných úkolů, v rámci kterých se vyhledávají a testují různé materiály, které mají potenciál nahradit konvenční ropná asfaltová pojiva. Pro toto použití je nutné, aby tyto nově vyvíjené materiály vykazovaly vlastnosti podobné běžným asfaltům. Viskoelastické chování je základní charakteristikou asfaltu a alternativní pojiva by jej měla vykazovat také. [1]

Další velmi významnou charakteristikou konvenčních asfaltových pojiv je jejich tendence v průběhu životnosti stárnout. Tento proces způsobuje změny ve vlastnostech. Vytrácí se viskoelastická a asfalty se stávají tužšími a křehčími, což vede k vyšší náchylnosti ke vzniku trhlin. Aby se dosáhlo zpomalení stárnutí, a tedy prodloužení životnosti vozovky, přidávají se do asfaltu polymerní modifikační přísady nebo rejuvenátory. Tyto úpravy, zpomalující stárnutí, se aplikují i v oblasti alternativních pojiv. [2]

Některé informace o alternativních pojivech je možné dohledat v odborné literatuře. Například článek [3] se zabývá syntézou polymerních pojiv z monomerů, které by v budoucnu mohly být získávány z obnovitelných zdrojů, a uvádí se, že tato polymerní pojiva mají za určitých podmínek podobné reologické chování jako silniční asfalty. Článek [4] se zabývá srovnáním reologických vlastností transparentního pojiva s vlastnostmi konvenčního ropného pojiva, přičemž obě pojiva byla navíc modifikována 5 % SBS a 2 % EVA. Z výsledků je patrné, že modifikační přísada zlepšila odolnost vůči deformaci ropného i transparentního pojiva a tato odolnost obou pojiv byla srovnatelná. Ani rozdíly v odolnosti vůči vzniku trhlin těchto pojiv nebyly významné.

Naproti tomu rešeršní práce [5] uvádí, že ve srovnání s ropným asfaltem vykazuje bio-pojivo obvykle nižší odolnost proti deformaci za vysokých teplot, ale lepší nízkoteplotní chování a vyšší odolnost proti stárnutí. Asfaltová směs s bio-pojivem podle této publikace obecně vykazuje nižší stabilitu za vysokých

teplot, vyšší odolnost proti vzniku trhlin za nízkých teplot a stabilitu ve vodě než směs stmelená konvenčním ropným asfaltem. Výkonnost bio-pojiv a směsí získaných z různých biomas se značně liší.

Rešeršní práce [6] se zabývá různými technikami extrakce biooleje a přípravou bio-modifikovaných asfaltových pojiv, technickými aspekty včetně fyzikálních vlastností různých bioolejů, vlivem přidání biooleje na výkonnost asfaltového pojiva a kompatibilitou bioolejů s konvenčními pojivy. Závěry naznačují, že bioolej může zlepšit výkonnost modifikovaných asfaltových pojiv za nízkých teplot i odolnost proti stárnutí. Vliv na výkonnost při vysokých teplotách se však liší v závislosti na zdroji biooleje a způsobu jeho přípravy. Článek dochází k závěru, že ačkoli biooleje ukazují slibné vlastnosti jako obnovitelné modifikační přísady asfaltových pojiv, je zapotřebí dalšího výzkumu k optimalizaci jejich použití a plnému pochopení jejich dlouhodobých dopadů na výkonnost pojiv a směsí.

Aktuálně platná norma EN 12597 ze srpna 2014, zabývající se terminologií asfaltů a asfaltových pojiv, pojem syntetické či transparentní pojivo nezná. V novém návrhu této normy se nově objevuje termín „clear binder“, který je definován jako syntetické pojivo, používané pro barevné povrchy a průmyslové aplikace. Zároveň je zde ale uvedeno, že tato syntetická pojiva nespádají do rozsahu působnosti CEN/TC 336. To znamená, že se na tato pojiva nevztahuje specifikace pro silniční asfalty ani polymerem modifikované asfalty. Dále nový návrh normy EN 12597 uvádí termín „bio-based binder“ či „bio-binder“ jako pojivo, ve kterém je část ropného asfaltu nahrazena materiálem odvozeným z biomasy. Podle tohoto předpisu zahrnuje materiál odvozený z biomasy mimo jiné odpadní kuchyňské rostlinné oleje, zbytky z biomasy a celulózové materiály. [7, 8]

Pro zavedení syntetických pojiv (bio-pojiv, transparentních pojiv) do běžné praxe je tedy potřeba vytvořit jejich vlastní specifikaci. Pro vytvoření takové specifikace se nabízí vycházet z nových návrhů specifikací pro konvenční ropná asfaltová pojiva, jako je například nová specifikace skupiny TG 15, která byla zřízena při CEN/TC 336/WG 1. Návrhem této skupiny je specifikovat vlastnosti asfaltových pojiv pomocí funkčních zkoušek. [9]

Cílem tohoto příspěvku je popsat laboratorní vlastnosti vybraných transparentních (syntetických) pojiv, vyskytujících se na evropském trhu, a srovnat tyto vlastnosti s běžně používaným konvenčním ropným asfaltem. Tyto vlastnosti jsou zjišťovány ve třech stádiích zestárnutí: nezestárlá pojiva, pojiva po zkoušce tepelné stálosti v tenké pohyblivé vrstvě (RTFOT) a pojiva po RTFOT a po urychleném dlouhodobém stárnutí v tlakové nádobě (PAV).

Použité zkušební metody a materiály

Pro účely tohoto příspěvku byla srovnávána čtyři alternativní pojiva s referenčním konvenčním asfaltovým pojivem na ropné bázi (celkem pět vzorků, označených 1 až 5). Tyto materiály pocházely od tří různých anonymních výrobců (označení A až C). Čtyři vzorky (včetně srovnávacího ropného č. 1) mají penetrační třídu 50/70, poslední pátý vzorek má třídu 35/50. Základní informace jsou shrnuty v tabulce 1. V rámci tohoto příspěvku má každý vzorek pojiva přiřazenou barvu, která je dodržena ve všech vyhodnoceních.

Tabulka 1: Použitá pojiva

	Číslo vzorku	Výrobce	Třída
	A1 - ref.	A	50/70
	A2	A	50/70
	B3	B	50/70
	C4	C	50/70
	C5	C	35/50

Zkoušky, použité v rámci tohoto příspěvku, je možné rozdělit na empirické zkoušky a na funkční (reologické) zkoušky. Jedná se především o tyto postupy:

- Empirické zkoušky:
 - ČSN EN 1426 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou
 - ČSN EN 1427 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička

- Funkční zkoušky:
 - ČSN EN 14770 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu – Dynamický smykový reometr (DSR)
 - ČSN EN 16659 Asfalty a asfaltová pojiva – Zkouška MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery Test)
 - ČSN EN 17643 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení teploty a fázového úhlu při ekvivalentním modulu ve smyku pomocí dynamického smykového reometru (DSR) – Zkouška BTSV
- Simulace stárnutí:
 - ČSN EN 12607-1 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu – Část 1: Metoda RTFOT
 - ČSN EN 14769 Asfalty a asfaltová pojiva – Urychlené dlouhodobé stárnutí v tlakové nádobě (PAV)

V dynamickém smykovém reometru byly nejprve podle přílohy C normy ČSN EN 14770 určeny oblasti lineárně viskoelastického chování (LVER). Tyto oblasti byly zjišťovány na nezestárých pojivech na geometrii průměru 8 mm při teplotě 10 °C a na geometrii průměru 25 mm při teplotě 60 °C, vždy při frekvenci 1,59 Hz. LVER byla navíc určena pro pojivo C5 po krátkodobém i dlouhodobém stárnutí (RTFOT + PAV), a to při teplotách 10 °C a 40 °C a frekvenci 1,59 Hz na zkušební vzorku průměru 8 mm a tloušťce 2 mm. Za hranice oblastí lineárně viskoelastického chování byla považována smyková přetvoření, odpovídající poklesu komplexního smykového modulu o 5 %.

Laboratorní zkouška v oscilačním módu v DSR byla u nezestárých poživ a u poživ po krátkodobém stárnutí RTFOT provedena ve dvou teplotních rozsazích: 40 °C až 10 °C s krokem 5 °C (geometrie 8 mm) a 70 °C až 40 °C s krokem 5 °C (geometrie 25 mm). Po krátkodobém i dlouhodobém stárnutí (RTFOT + PAV) byla pojiva oscilována v teplotním rozsahu 40 °C až 10 °C s krokem 5 °C s využitím geometrie průměru 8 mm. Při všech teplotách měření byly nastaveny oscilační frekvence v rozsahu 10 Hz až 0,1 Hz (vždy 10 hodnot v rámci každého dekádního intervalu).

Pro zjednodušení výsledků získaných oscilací v DSR je výhodné dopočítat teploty T_X a odpovídající fázové úhly δ_{TX} pro komplexní smykový modul $G^* = Y$ při frekvenci 1,59 Hz, což je podrobně popsáno v příloze D normy ČSN EN 14770. Hodnoty Y se vybírají podle tabulky 2. Teplota T ($IG^*I = Y$) se vypočítá logaritmickou interpolací a $\delta_{T(IG^*I = Y)}$ se určí lineární interpolací.

Tabulka 2: Definice teplot T0 až T4 při frekvenci 1,59 Hz podle ČSN EN 14770

Teplota	Měřicí geometrie (paralelní desky)	Hodnota $ G^* $ při 1,59 Hz (10 rad · s ⁻¹)	Stav pojiva (příprava)
T0	25 mm deska	$ G^* = 15$ kPa	Nezestárlé
T1	8 mm deska	$ G^* = 5$ MPa	ČSN EN 12607-1
T2	25 mm deska	$ G^* = 15$ kPa	ČSN EN 12607-1
T3	8 mm deska	$ G^* = 5$ MPa	ČSN EN 12607-1+ ČSN EN 14769
T4	25 mm deska	$ G^* = 15$ kPa	ČSN EN 12607-1+ ČSN EN 14769

Zkouška MSCR byla provedena při teplotě 60 °C. Stárnutí metodou RTFOT probíhalo po dobu 75 minut při teplotě 163 °C s proudem vzduchu 4 l/min. Při zkoušce stárnutí metodou PAV byla na pojiva aplikována po dobu 20 hodin zkušební teplota 100 °C při tlaku 2,1 MPa.

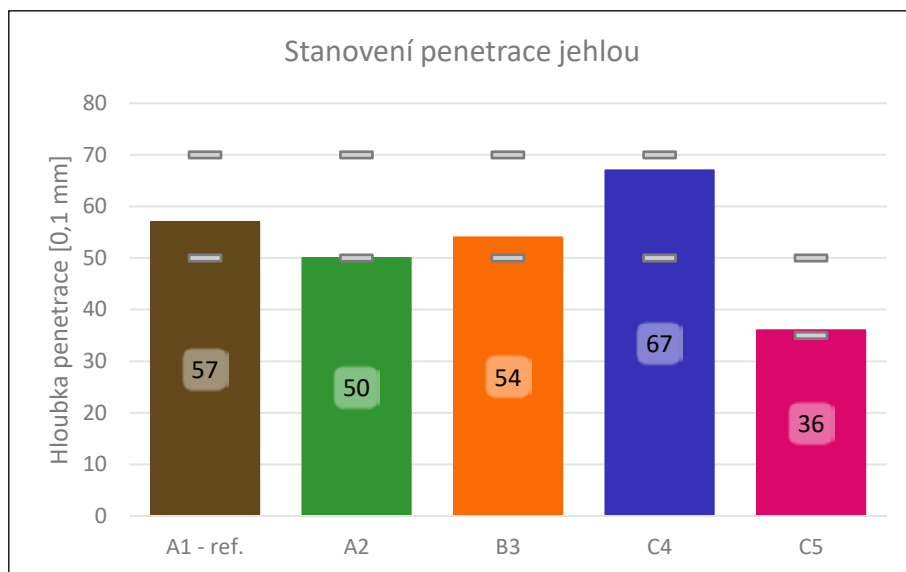
Výsledky zkoušek

V této kapitole jsou uvedeny výsledky jednotlivých laboratorních zkoušek.

Penetrace jehlou dle ČSN EN 1426

Naměřené výsledky zkoušky penetrace jehlou podle ČSN EN 1426 jsou zobrazeny v obrázku 1. Jsou zde také vyznačeny mezní hodnoty penetrace jehlou pro silniční asfalty dle normy ČSN 65 7204. Tyto hranice odpovídají penetracím uvedeným v názvech poživ, tedy pro třídu 50/70 (první čtyři vzorky) jsou meze 50 (0,1 mm) až 70 (0,1 mm) a u posledního vzorku s třídou 35/50 se jedná o interval 35 (0,1 mm) až 50 (0,1 mm).

Všechna zkoušená pojiva normovým požadavkům vyhovují, přestože vzorek A2 leží přesně na dolní hranici a vzorek C5 se jí také těsně přibližuje. Na základě nízké penetrace lze tato dvě pojiva vyhodnotit jako nejtuzší. Nejvyšší hodnotu penetrace 67 (0,1 mm) vykazuje vzorek C4, který je tedy na základě vyhodnocení této zkoušky nejměkčí.

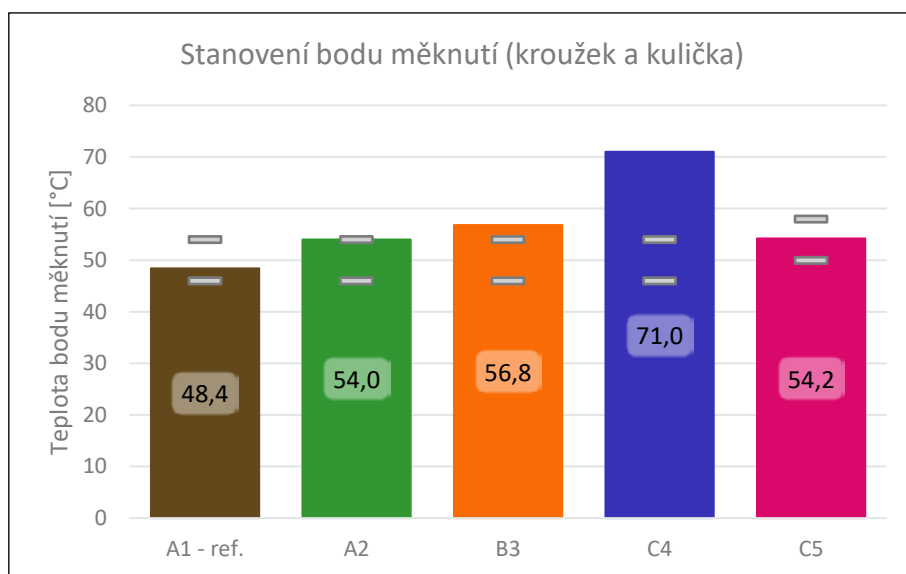


Obrázek 1: Výsledky zkoušky penetrace jehlou

Bod měknutí metodou kroužek a kulička dle ČSN EN 1427

Hodnoty bodu měknutí byly stanoveny metodou kroužek a kulička. Výsledky bodu měknutí jednotlivých pojiv shrnuje obrázek 2, kde jsou také zaznačeny meze, uvedené v normě ČSN 65 7204. U prvních čtyř vzorků, které mají třídu 50/70, je požadované rozmezí bodu měknutí 46 °C až 54 °C. U posledního vzorku třídy 35/50 to je 50 °C až 58 °C.

Vzorek A2 se pohybuje přesně na požadované horní mezi teploty bodu měknutí. Stejně tak odpovídají požadovaným hodnotám vzorky A1 a C5. Teplotu vyšší, než která je specifikační normou vyžadována, vykazují pojiva B3 a C4. Jejich bod měknutí odpovídá vyšší teplotě (u vzorku C4 dokonce o 17 °C nad horní hranici), než která je požadována pro třídu 50/70, čímž se tato pojiva svými vlastnostmi spíše přibližují polymerem modifikovaným asfaltům. Vzorek C4 je podle této zkoušky nejodolnější proti vzniku trvalých deformací.

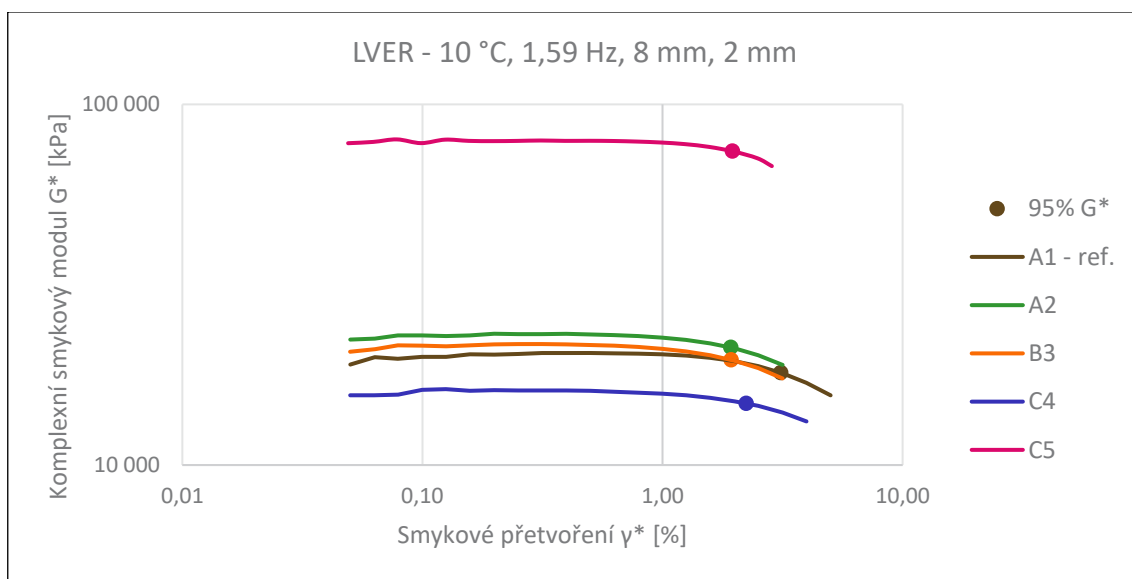
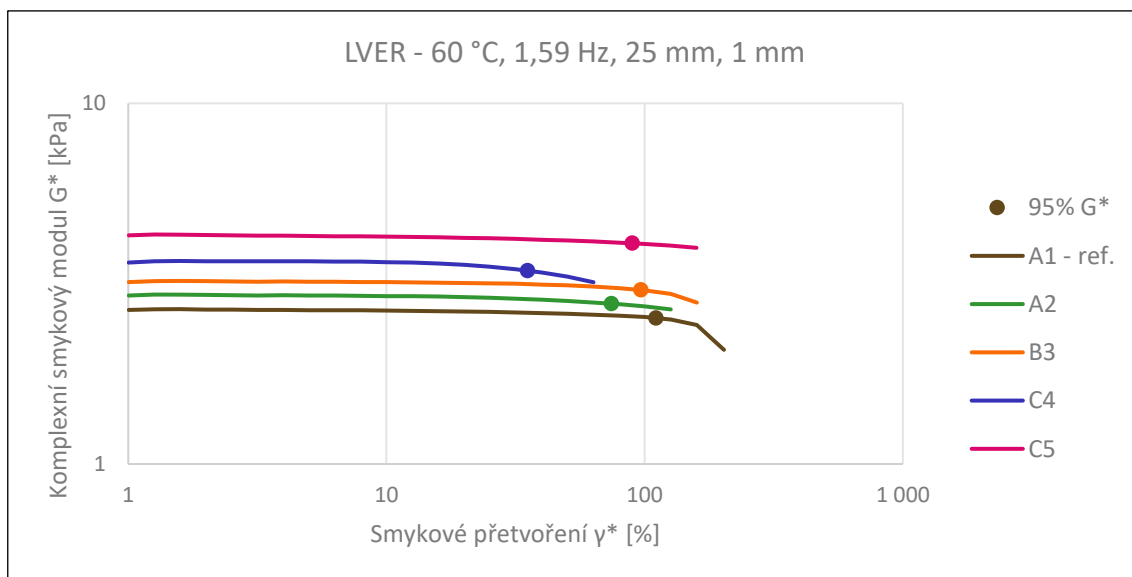


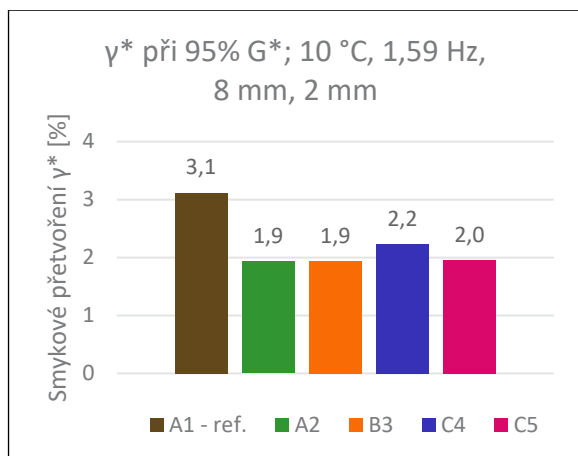
Obrázek 2: Výsledky zkoušky bodu měknutí

Oblast lineárně viskoelastického chování v DSR dle ČSN EN 14770

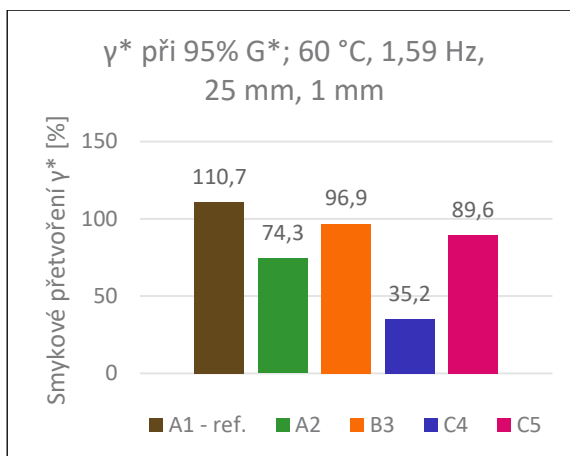
Oblasti lineárně viskoelastického chování (LVER) srovnávaných nezestárých pojiv (geometrie průměru 8 mm) jsou pro teplotu 10 °C uvedeny v obrázku 3 a pro teplotu 60 °C (geometrie průměru 25 mm) v obrázku 4. Konce oblastí lineárně viskoelastického chování jsou zaznačeny pomocí bodů v obou obrázcích a tyto mezní hodnoty smykového přetvoření pro jednotlivá zkoušená pojiva porovnávají detailně obrázky 5 a 6.

Při nižší teplotě se svým vysokým komplexním smykovým modulem od ostatních vzorků výrazně odlišuje pojivo C5, což koresponduje s jeho nižší třídou 35/50. Je tedy nejtěžší a zároveň nejvíce odolává vzniku trvalých deformací. S rostoucí teplotou se tento rozdíl stírá. Při obou teplotách dosahuje nejširší oblast lineárně viskoelastického chování srovnávací asfaltové pojivo A1. Při teplotě 10 °C jsou hranice LVER všech čtyř alternativních pojiv velmi podobné. Při vyšší teplotě (60 °C) jsou rozdíly výraznější, přičemž vzorek C4 má oblast lineárně viskoelastického chování užší než zbylá pojiva.

**Obrázek 3: Lineárně-viskoelastická oblast určená při teplotě 10 °C****Obrázek 4: Lineárně-viskoelastická oblast určená při teplotě 60 °C**



Obrázek 5 Hranice LVER při teplotě 10 °C

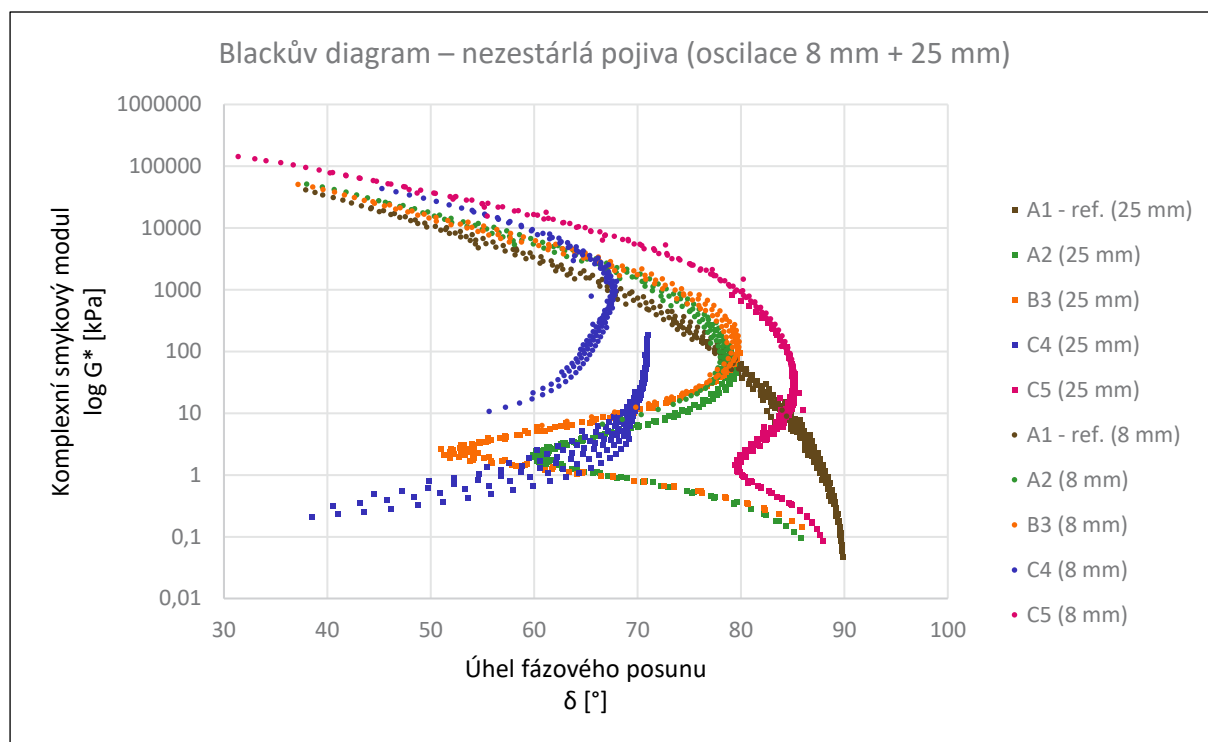


Obrázek 6 Hranice LVER při teplotě 60 °C

Zkouška LVER byla provedena také pro alternativní pojivo C5 po krátkodobém i dlouhodobém stárnutí (RTFOT + PAV), a to při teplotách 10 °C a 40 °C. Během obou měření byl vzorek průměru 8 mm zatěžován frekvencí 1,59 Hz. Za nižších teplot mívají pojiva vyšší komplexní smykový modul a stávají se tužšími. Při zkušební teplotě 10 °C došlo k porušení pojiva C5 křehkým lomem při smykovém přetvoření 1,2 % a zkouška byla ukončena. Při teplotě 40 °C došlo k dosažení hranice viskoelastické oblasti při smykovém přetvoření 4,8 %.

Oscilační zkoušky v DSR dle ČSN EN 14770

Blackovy diagramy, které zobrazují závislost komplexního smykového modulu na úhlu fázového posunu při všech zkušebních teplotách i frekvencích, jsou pro nezestárlá pojiva srovnány v obrázku 7.



Obrázek 7: Blackův diagram nezestárlých pojiv

Všechna alternativní pojiva dosahují zvlněného průběhu Blackova diagramu, což nasvědčuje tomu, že pojiva obsahují polymerní modifikační přísadu, a to i přesto, že jsou výrobci deklarována jako nemodifikovaná pojiva třídy 50/70 nebo 35/50. Pouze srovnávací ropné pojivo A1 vykazuje obloukový

průběh Blackova diagramu asymptoticky se přibližující fázovému úhlu 90° při vysokých teplotách zkoušky, což je typické pro nemodifikované asfalty.

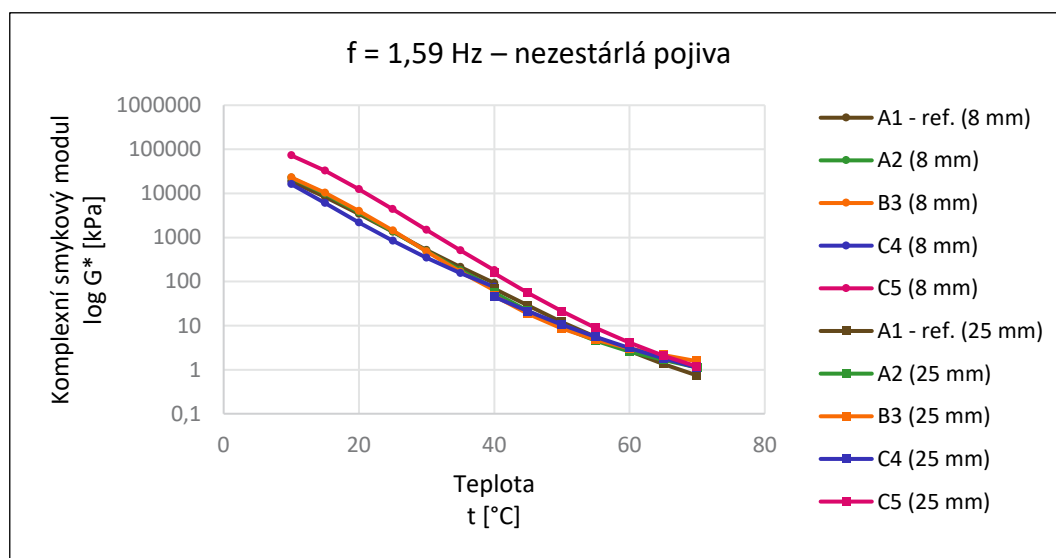
Vzorek C4 má především při vyšších teplotách nejnižší úhel fázového posunu, je tedy nejvíce elastický. Zároveň jeho nízké hodnoty fázového úhlu při vysokých zkušebních teplotách připomínají chování modifikovaných pojiv. Nejplastičtější se chovají vzorky A1 a C5. Nejvyšší komplexní smykový modul se projevuje u alternativního pojiva C5, je tedy nejtužší, což koresponduje s jeho nízkou hodnotou penetrace jehlou.

Vzorky A2 a B3 si jsou svými průběhy velmi podobné, proto je možné předpokládat, že mají podobné i složení. Určitou geometrickou podobnost s průběhy jejich Blackových diagramů vykazuje i pojivo C5, přestože u tohoto pojiva, které je více plastické, lze předpokládat nižší dávkování modifikační přísady. Naopak graf materiálu C4 se od ostatních pojiv značně liší, lze tedy říci, že pro jeho přípravu byly nejspíše použity jiné zdrojové materiály i modifikační přísady, ačkoli se jedná o stejného výrobce jako v případě pojiva C5.

U pojiva C4 je výrazné přerušení grafu v místě střídání zkušebních geometrií. Při použití geometrií průměru 8 mm dosahuje toto pojivo nižšího fázového úhlu (je elastičtější, odolnější proti smykovému přetvoření) než při stejných podmínkách, stanovených s využitím geometrií průměru 25 mm. To může být způsobeno například obsahem plastomerní přísady, případně silným vlivem historie zatěžování vzorku tohoto pojiva. Tomuto fenoménu by bylo vhodné v navazujícím výzkumu věnovat další pozornost. Nelze očekávat, že by tento neobvyklý výsledek byl dosažen kvůli chybě měření, protože podobný průběh Blackova diagramu dosahovalo toto pojivo i po zestárnutí RTFOT, přestože stárnutím pojiva se toto přerušení průběhu mírně zmenšuje.

V obrázku 8 jsou vykresleny závislosti komplexních smykových modulů na teplotě pro nezestárlá pojiva při frekvenci 1,59 Hz. Všechna pojiva mají velmi podobné průběhy, a to v obou stádiích stárnutí. Vymyká se, především při nižších teplotách, vzorek C5, který má vyšší komplexní smykový modul než ostatní pojiva, a je tedy nejtužší. S rostoucí teplotou tuhost všech vzorků klesá.

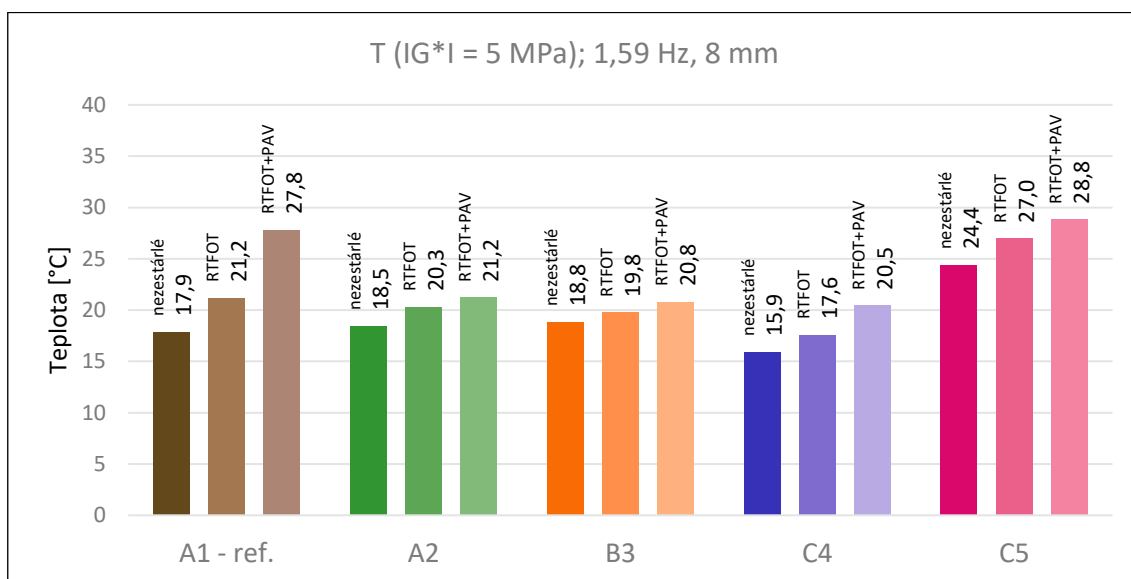
Při teplotě 40°C je v grafu zřejmý přechod způsobený změnou zkušební geometrie. Při měření na menší geometrii (průměru 8 mm) dosahují všechny vzorky mírně vyšších komplexních smykových modulů než při měření s využitím geometrie průměru 25 mm. Největšího rozdílu 40,4 kPa dosahuje nezestárlý vzorek C4.



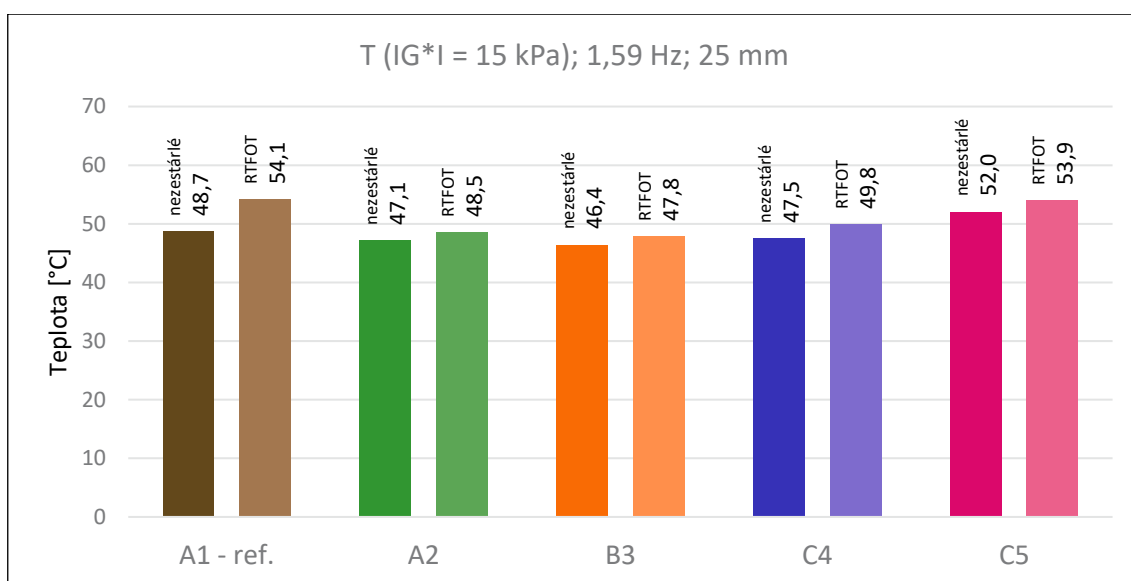
Obrázek 8: Průběh komplexních smykových modulů nezestárlých pojiv při frekvenci 1,59 Hz

Podle přílohy D normy ČSN EN 14770 lze stanovit reologické parametry TX a δ_{TX} . Teploty TX pro zkoušku na 8 mm a 25 mm geometrii jsou vyhodnoceny v obrázcích 9 a 10. Srovnávacího komplexního smykového modulu $G^* = 5 \text{ MPa}$ (průměr 8 mm) a $G^* = 15 \text{ kPa}$ (průměr 25 mm) dosahují pojiva při nižších teplotách, jsou-li nezestárlá. S postupem stárnutí hodnota reologického parametru TX narůstá. Z výsledků je ovšem patrné, že v případě transparentních pojiv je tento nárůst většinou

nižší než u srovnávacího konvenčního asfaltu, a proto je možné usuzovat, že tato alternativní pojiva stárnou méně. Nejvyšších hodnot parametru TX dosahuje vzorek C5 a blíží se srovnávacímu pojivu A1.



Obrázek 9: Reologický parametr TX (geometrie 8 mm)



Obrázek 10: Reologický parametr TX (geometrie 25 mm)

Zkouška MSCR dle ČSN EN 16659

Zkouška MSCR byla provedena na pojivech nezestárlejších a pojivech po krátkodobém stárnutí metodou RTFOT při teplotě 60 °C. Srovnání nevratných smykových poddajností (J_{nr}) a procentuálních zotavení (R) je zaznamenáno v obrázcích 11 až 14. Pro dobrou odolnost vůči trvalé deformaci je výhodné, aby pojivo mělo co nejnižší hodnotu J_{nr} a co nejvyšší hodnotu R.

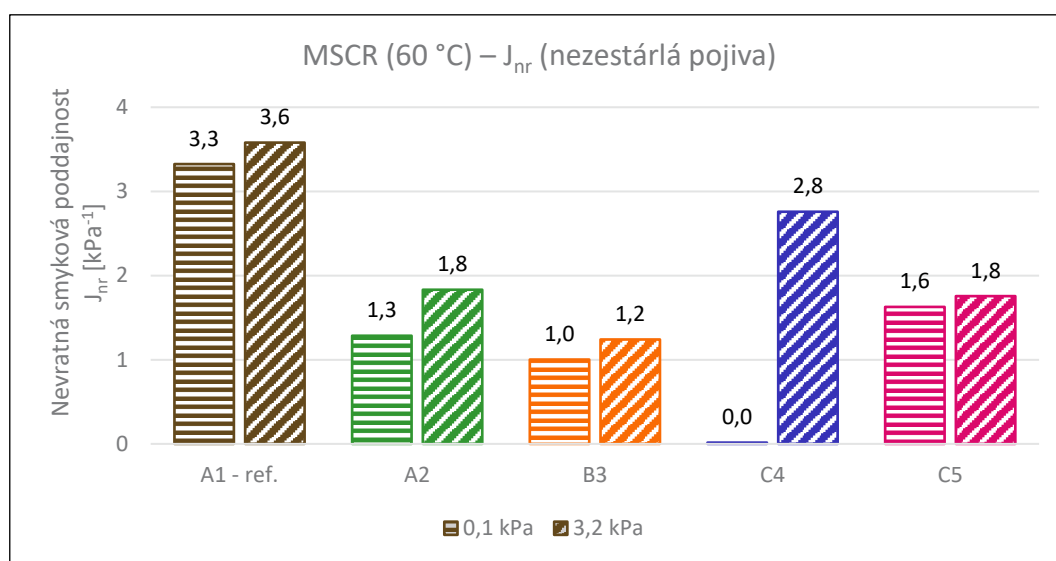
U nezestárlejších asfaltů je vzorek B3 nejvíce odolný proti opakovanému smykovému napětí, naopak referenční pojivo A1 odolává tomuto napětí nejméně. U pojiv po RTFOT dosahuje největšího smykového přetvoření vzorek A2. Nezestárlejší pojiva se přetváří až dvakrát více než pojiva po krátkodobém stárnutí. S postupujícím stárnutím se rozdíly mezi jednotlivými pojivy vytrácejí.

Nezestárlejší referenční pojivo A1 dosahuje vyšší hodnoty J_{nr} než zbylá pojiva. Po zestárnutí metodou RTFOT se tento rozdíl stírá. Při zatěžování smykovým napětím 0,1 kPa se pojiva vrací do původní

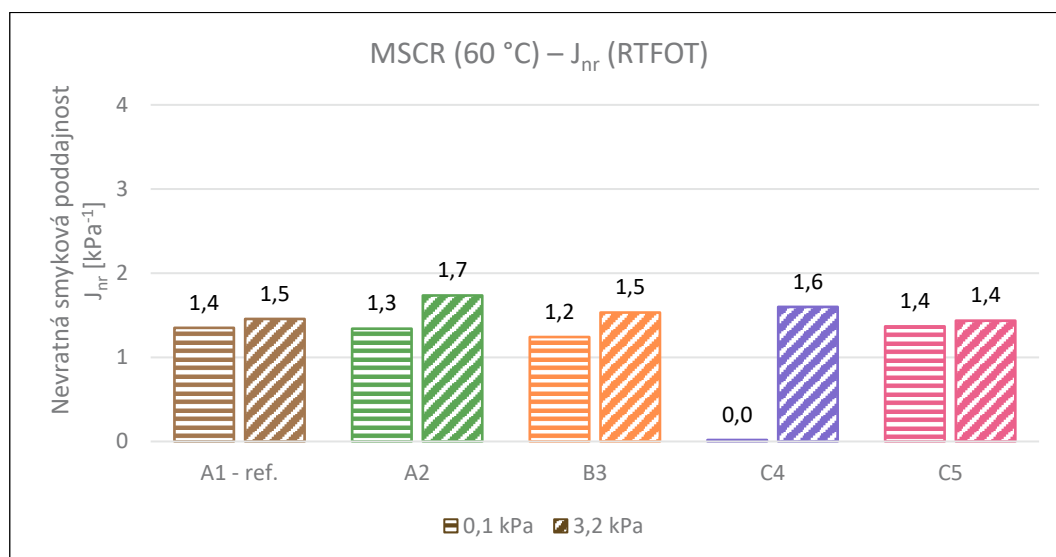
polohy více (mají menší hodnotu nevratné smykové poddajnosti) než při zatěžování smykovým napětím 3,2 kPa. Naopak nejméně na smykové zatěžování reaguje pojivo C5.

Vzorek C4 vykazuje výrazně vyšší procentuální zotavení při zatěžování smykovým napětím 0,1 kPa než ostatní pojiva, znamená to tedy, že je za těchto podmínek mnohem elastičtější. Se zvýšením zatížení na 3,2 kPa se jeho elasticita srovná na úroveň ostatních poživ.

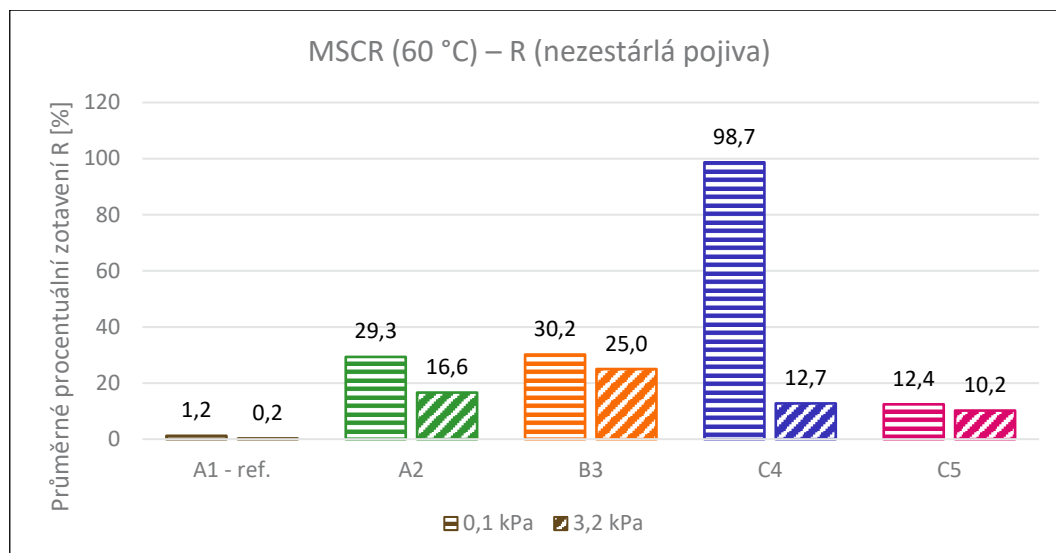
Srovnávací pojivo A1 se po smykovém přetvoření vrací do původního tvaru nejméně, což znamená, že je nejplastičtější. Naopak vzorek C4 se do stavu před deformací vrací nejvíce, je tedy nejelastičtější a zároveň nejodolnější proti smykovému přetvoření. Se zvyšujícím se zatížením se elasticita vzorku vytrácí. Stárnutí nejvíce podléhá srovnávací pojivo A1, které jako nezestárlé dosahuje výrazně vyšší hodnoty J_{nr} než ostatní pojiva, ale po zestárnutí metodou RTFOT se srovná na úroveň ostatních srovnávaných poživ.



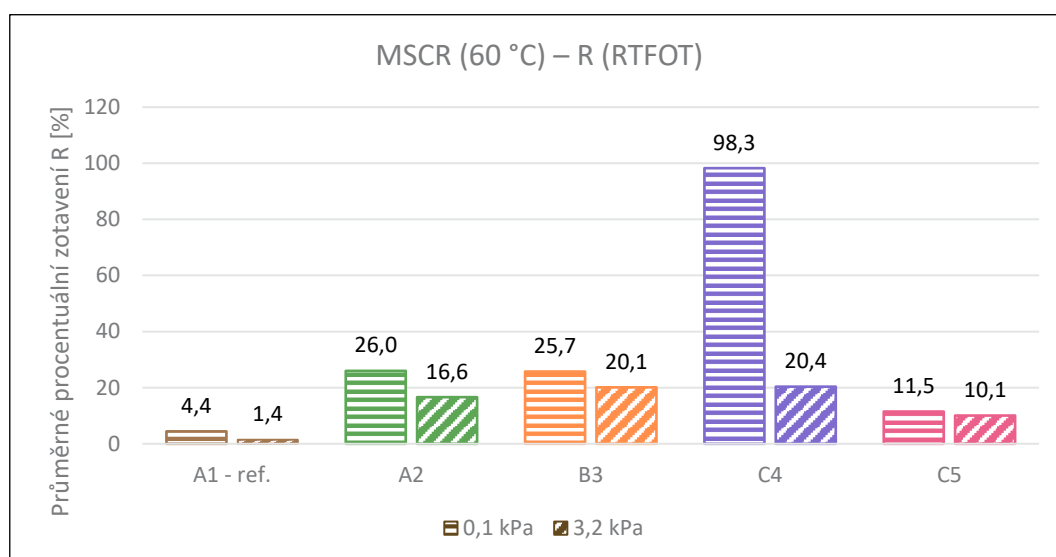
Obrázek 11: Nevratná smyková poddajnost – nezestárlá pojiva



Obrázek 12: Nevratná smyková poddajnost – pojiva po RTFOT



Obrázek 13: Procentuální zotavení – nezestárlá pojiva



Obrázek 14: Procentuální zotavení – pojiva po RTFOT

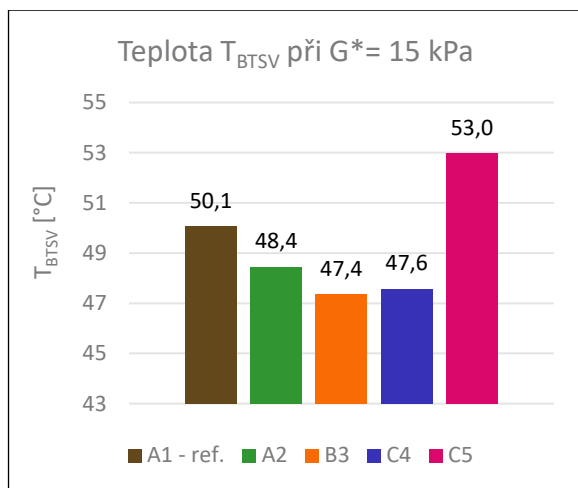
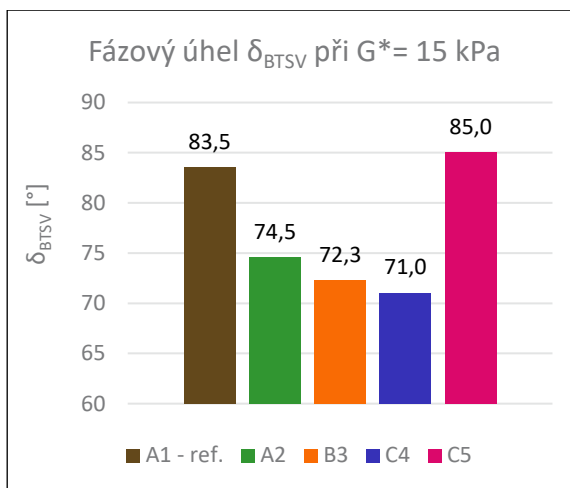
Zkouška BTSV dle ČSN EN 17643

V rámci zkoušky BTSV se hledá teplota T_{BTSV} a úhel fázového posunu δ_{BTSV} odpovídající hodnotě komplexního smykového modulu $|G^*| = 15 \text{ kPa}$. Tyto výsledky jsou srovnávány v obrázcích 15 a 16. Z průběhu zkoušky bylo patrné, že vzorek C5 má při všech teplotách vyšší komplexní smykový modul než ostatní pojiva. Je tedy nejtužší a vykazuje nejvyšší odpor proti deformaci, což koresponduje s jeho třídou 35/50. Se zvyšující se teplotou tuhost pojiv klesá.

Úhel fázového posunu vzorku C4 se s teplotou zvětšuje jen velmi mírně, teplota na jeho elasticitu (resp. plasticitu) nemá skoro žádný vliv. Naopak nejvíce se v průběhu zahřívání mění fázový úhel vzorku C5. Na začátku měření (při teplotě 20 °C) se chová více elasticky než ostatní pojiva, ale s rostoucí teplotou se rychle zvyšuje jeho plastické (přetvárné) chování.

Nejpozději (tj. při nejvyšší teplotě) dosáhne požadované hodnoty komplexního smykového modulu vzorek C5, přičemž jeho odpovídající fázový úhel je také vyšší než u ostatních vzorků. Vysoká teplota T_{BTSV} koresponduje s tím, že se jedná o tvrdé pojivo (třída 35/50).

Hodnota fázového úhlu δ_{BTSV} koreluje se stupněm modifikace pojiv. Na základě těchto výsledků se jako nejméně modifikované jeví referenční pojivo A1 a alternativní pojivo C5. Naopak nejvíce modifikované chování vykazuje vzorek pojiva C4.

Obrázek 15: Teplota T_{BTSV} pojivObrázek 16: Fázový úhel δ_{BTSV} pojiv

Závěr

Vzhledem k tomu, že se na alternativní pojiva (transparentní pojiva, syntetická pojiva, bio-pojiva) nevztahuje specifikace pro silniční asfalty ani polymerem modifikované asfalty, je pro zavedení těchto pojiv do běžné praxe potřeba vytvořit jejich vlastní specifikaci. Pro vytvoření takové specifikace se nabízí vycházet z nových návrhů specifikací pro konvenční ropná asfaltová pojiva, jako je například nová specifikace skupiny TG 15 při CEN/TC 336/WG 1, která pro specifikaci vlastností asfaltových pojiv nově využívá funkční zkoušky.

Cílem tohoto příspěvku bylo srovnat vlastnosti čtyř alternativních pojiv (transparentních pojiv, syntetických pojiv, bio-pojiv) s vlastnostmi referenčního konvenčního ropného silničního asfaltu (celkem pět vzorků pojiv, označených 1 až 5). Tato pojiva pocházela od tří různých anonymních výrobců (označení A až C). Čtyři vzorky pojiv (včetně konvenčního srovnávacího č. 1) mají třídu 50/70, poslední pátý vzorek má třídu 35/50.

Vzorek alternativního pojiva A2 je při nižších teplotách tužší (jeho hodnota penetrace jehlou se pohybuje na dolní hranici požadovaného rozpětí) než ostatní pojiva stejné třídy (50/70). Chování při nízkých teplotách vykazuje (v případě oscilačních zkoušek v DSR) velmi podobné jako vzorek B3, avšak s rostoucí teplotou se začne odlišovat – pojivo A2 se chová plastičtěji než vzorek B3.

Alternativní pojivo B3 dosahuje teploty bodu měknutí mírně vyšší, než je požadováno ČSN 65 7204. Před stárnutím je více odolné proti opakovanému zatěžování (MSCR, 60 °C) než ostatní zkoušená pojiva. Stárnutí vzorku B3 nemá příliš velký vliv na jeho chování. Při nízkých teplotách reaguje relativně hodně na teplotní změny, naopak při teplotách vyšších na ně reaguje nejméně ze všech sledovaných pojiv.

Jako nejvíce modifikované se chová alternativní pojivo C4, což dokazuje mimo jiné i jeho teplota bodu měknutí, která se pohybuje vysoko nad hodnotou požadovanou normou ČSN 65 7204 pro běžné silniční asfalty třídy 50/70. Při nižších teplotách je sice vzorek C4 nejměkčí, ale s rostoucí teplotou se vyrovnává ostatním pojivům. Vzorek je velmi elastický nezávisle na teplotě. Naopak velký vliv na něj má intenzita zatěžování. Při nižších teplotách je pojivo velmi citlivé na frekvenci zatěžování, na druhou stranu při teplotách vyšších je tato citlivost pouze malá. Stárnutí ovlivňuje vzorek C4 více než ostatní alternativní pojiva.

Alternativní pojivo C5 je jako jediné třídy 35/50. Je tedy nejtužší, čímž se především při nižších teplotách odlišuje svým chováním od ostatních vzorků. Toto pojivo je velmi citlivé na teplotní změny, a to v celém sledovaném teplotním spektru. Při nízkých teplotách vykazuje nejvíce elastické chování, ale s rostoucí teplotou se rychle stává plastickým a od teploty cca 33 °C už je nejplastičtějším ze všech srovnávaných pojiv. Za vyšších zkušebních teplot reaguje vzorek C5 mnohem citlivěji na frekvenci zatěžování než ostatní alternativní pojiva. Naopak stárnutí a intenzita zatěžování tento vzorek ovlivňují nejméně. Toto alternativní pojivo se svým chováním nejméně přibližuje chování modifikovaných asfaltů, díky čemuž se v mnohých aspektech podobá vlastnostem srovnávacího konvenčního silničního asfaltu A1.

Rozdíly mezi všemi zkoušenými pojivy se s postupujícím stárnutím stírají. Alternativní pojiva jsou stárnutím ovlivňována méně než referenční asfalt A1. Naopak jsou více citlivá na změny teploty i frekvence při nízkých teplotách. Při teplotách vyšších (mimo vzorku C5) na tyto změny reagují méně než srovnávací pojivo. Všechna sledovaná alternativní pojiva mají užší lineárně-viskoelastickou oblast oproti referenčnímu pojivu. V nezestárlém stavu odolávají lépe opakovanému zatěžování (MSCR, 60 °C), ale po krátkodobém stárnutí RTFOT se běžný asfalt A1 zlepší na jejich úroveň.

Z vyhodnocených výsledků je patrné, že alternativní pojiva se svým chováním často přibližují spíše polymerem modifikovaným asfaltům než silničnímu asfaltu, a to i přesto, že jako silniční asfalty jsou tato pojiva označována. Zajímavým zjištěním je také skutečnost, že oxidativní stárnutí není rozhodující pro změnu vlastností těchto vybraných alternativních pojiv, jako je tomu u pojiv konvenčních.

Poděkování

Příspěvek vznikl s podporou Technologické agentury ČR v rámci Národního plánu obnovy z evropského Nástroje pro oživení a odolnost, projekt CL01000060 (Snižování ropné závislosti při výrobě krytových vrstev netuhých vozovek).

Zdroje:

- [1] Souza, R.S.; Visconte, L.L.Y.; Da Silva, A.L.N.; Costa, V.G. Thermal and Rheological Formulation and Evaluation of Synthetic Bitumen from Reprocessed Polypropylene and Oil. *International Journal of Polymer Science*. 2018. DOI: 10.1155/2018/7940857
- [2] Košťálová, A. Hodnocení vlastností syntetických pojiv. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav pozemních komunikací. 2025.
- [3] Airey, G.D.; Mohammed, M.H.; Fichter, C. Rheological characteristics of synthetic road binders. *Fuel* 87. 2008. p. 1763-1775. DOI: 10.1016/j.fuel.2008.01.012
- [4] Sengoz, B.; Bagayogo, L.; Oner, J.; Topal, A. Investigation of rheological properties of transparent bitumen. *Construction and Building Materials* 154. 2017. p. 1105-1111. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.239
- [5] Zhang, Z.; Fang, Y.; Yang, J.; Li, X. comprehensive review of bio-oil, bio-binder and bio-asphalt materials: Their source, composition, preparation and performance. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)* 9(2), 2022. p. 151-166. DOI: 10.1016/j.jtte.2022.01.003
- [6] Al-Khateeb, G.G.; Alattieh, S.A.; Zeiada, W.; Castorena, C. State-of-the-Art Review on the Behavior of Bio-Asphalt Binders and Mixtures. *Molecules* 29. 2024. DOI: 10.3390/molecules29163835
- [7] ČSN EN 12597: Asfalty a asfaltová pojiva – Terminologie, 8/2014,
- [8] EN 12597: Bitumens and bituminous binders – Terminology, 10/2024
- [9] Süsser, M. Syntetická pojiva v silničním stavitelství. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta stavební. Katedra silničních staveb. 2025.

STUDIE REOLOGICKÝCH VLASTNOSTÍ ASFALTOVÉHO POJIVA MODIFIKOVANÉHO BIOSLOŽKAMI SE DVĚMA DRUHY PŘÍRODNÍCH OLEJŮ

RHEOLOGICAL INVESTIGATION OF BIO-MODIFIED BITUMEN WITH TWO TYPES OF BIO-OIL

Stavros Kalampokis, MSc., Aristotle University of Thessaloniki, Řecko/Greece

Assoc. Prof. Evangelos Manthos, Ph.D., Aristotle University of Thessaloniki, Řecko/Greece

doc. Ing. Jan Valentin, Ph.D., ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Česká republika/Czech Republic

Studie se zaměřuje na hodnocení základních a reologických vlastností biosložkami modifikovaného asfaltu se dvěma druhy přírodních olejů (kukuřičný olej a slunečnicový olej). Pro každý typ oleje byly vyrobeny tři různé blendy (1 %, 3 % a 5 % hmotnosti pojiva) s využitím referenčního pojiva 35/50 typického pro řecké silniční stavitelství. Charakteristické vlastnosti byly hodnoceny pomocí zkoušek penetrace, bodu měknutí, elastického zotavení, dynamické viskozity a skladovací stability. Reologické vlastnosti byly zkoumány pomocí dynamického smykového reometru (DSR). Odolnost proti únavě a trvalé deformaci byla zkoumána prostřednictvím faktoru únavové životnosti, faktoru trvalé deformace a hodnoty vysoké kritické teploty. Byly vypočteny dva reologické indexy stárnutí, aby se prozkoumal vliv na biosložce založeného modifikátoru na náchylnost pojiva ke stárnutí. Dvě hlavní zjištění byla, že přírodní oleje jako modifikátory zvyšují odolnost proti únavě změkčením asfaltu a také snižují jeho citlivost ke stárnutí.

The present study focuses on the evaluation of the characteristic and rheological properties of bio-modified bitumen with two types of bio-derived oil (corn oil and sunflower seed oil). For each type of oil three different blends were produced (1%, 3% and 5% by weight of bitumen) utilizing a 35/50 reference bitumen. The characteristic properties were assessed via the Penetration, Softening Point, Elastic Recovery, Dynamic Viscosity and Storage Stability tests. The rheological properties were examined via the Dynamic Shear Rheometer (DSR). The fatigue cracking, rutting and permanent deformation resistance were investigated through the fatigue cracking factor, the rutting factor and the high critical temperature, respectively. Two rheological ageing indexes were calculated to examine the impact of bio-modifiers on the ageing susceptibility of bitumen. The two main observations were that the bio-derived oils enhance the resistance to fatigue cracking by softening the bitumen and also reduce its ageing sensitivity.

Úvod

Ropný asfalt je po mnoho desetiletí nejběžnějším materiálem používaným jako pojivo pro asfaltové vozovky. Rychlý růst cen produktů na bázi ropy a jejich v řadě případů problematický dopad na životní prostředí však vedly výzkumnou komunitu k zaměření se i na jiné typy surovin a materiálových složek jako potenciálních stavebních materiálů, přičemž v posledních letech je značná pozornost věnována tzv. bio-materiálům, tedy produktům získaným z rostlinných či živočišných složek – lze je označit též jako obnovitelné přírodní (Ingrassia et al., 2020; Jiménez del Barco Carrión et al., 2023; Xie et al., 2022). Vzhledem k tomu, že bio-materiály existují na Zemi v hojném množství, existuje mnoho přísad, které by mohly být využity jako přírodní modifikátory. Původ, struktura a způsob zpracování neupravených bio-materiálů budou mít různý dopad na výsledné modifikátory (Kalampokis et al., 2024a). Typickým příkladem výše uvedeného faktu jsou řasy. Na jedné straně bylo zjištěno, že prášek získaný zpracováním řas zlepšuje soudržnost a konzistenci asfaltového pojiva tím, že jej zpevňuje (Kalampokis et al., 2024b), na straně druhé může termochemicky vyráběný bio-olej získaný z řas zlepšit únavovou životnost asfaltového pojiva (Duan et al., 2019). Dalšími příklady jsou materiály nejen z mořského prostředí, ale i ze suchozemského, jako je lignin, prasečí hnůj, odpad z datlových semen, rýžové slupky a mnoho dalších, jež lze v literatuře dnes dohledat (Zhang et al., 2019; Fini et al., 2011; Alattieh et al., 2020; Han et al., 2017).

Někteří vědci použili různé typy bio-olejů jako oživovací látky, aby částečně zmírnili stárnutí asfaltového pojiva a tím zvýšili obsah R-materiálu v následné asfaltové směsi a zlepšili její vlastnosti (Ding et al., 2021; Elkashef & Williams, 2017; Nogueira et al., 2019). Tyto oleje pocházejí z mnoha procesů, jako je pyrolýza, hydrotermální zkapalňování, proces okyselení, epoxidace atd. (Liu et al., 2020; Hosseinneshad et al., 2020; Seidel & Haddock, 2014; Podolsky et al., 2020).

Studie prezentovaná v tomto článku se zaměřuje na dva konkrétní bio-materiály v kapalném stavu, a to kukuřičný a slunečnicový olej. Rostlinné druhy, z nichž tyto oleje pocházejí, jsou rozšířené v globálním měřítku a naše znalosti o jejich vlastnostech jsou rozsáhlé. Proto byly vybrány k výzkumu jejich charakteristických fyzikálně-mechanických a reologických vlastností, včetně vlivu laboratorního stárnutí, jako dva potenciální bio-modifikátory pro konvenční silniční asfalt.

Použité materiály a zkušební metody

Materiály

Jako referenční asfaltové pojivo a určující složka pro výrobu přírodními oleji upravených blendů byl použit konvenční, nemodifikovaný silniční asfalt s penetrací 35/50 (označený jako RB). Dva typy olejů na bázi přírodních olejů použitých v této studii byly kukuřičný a slunečnicový olej, označené jako CO a SSO. Obrázek 1 ukazuje, že kukuřičný olej má žlutou barvu, zatímco slunečnicový olej je bezbarvý. Oba typy olejů byly přidány do asfaltu ve třech různých poměrech (1 %, 3 % a 5 % hmotnosti asfaltu), a to vmícháním pomocí vysokorychlostní stojanové míchačky při 2 500 otáčkách za minutu po dobu 15 minut při teplotě 150 °C. Bylo tedy zkoumáno celkem šest přírodními oleji upravených blendů a referenční asfalt. Teplota a doba míchání pojiva s přírodními oleji byly zvoleny tak, jak je uvedeno výše, aby se zabránilo nadměrnému stárnutí asfaltu během přípravné fáze, a to zejména s důrazem na omezení ztráty jeho lehkých těkavých látek. Charakteristické vlastnosti referenčního asfaltu jsou uvedeny v tabulce 1.



Obrázek 1: Kukuřičný olej (vlevo) a slunečnicový olej (vpravo)

Tabulka 1: Vybrané vlastnosti použitého referenčního asfaltu 35/50

Vlastnost	Norma	Hodnota
Penetrace při 25 °C (dmm)	EN 1426	36
Bod měknutí, KK (°C)	EN 1427	52,4
Zpětné přetvoření (%)	EN 13398	5
Kohezní energie (J/cm ²)	EN 13703	3?4
Maximální síla (N)	EN 13703	51,6
Dynamická viskozita* (Pa.s)	EN 13302	0,20

*Měřeno při 150 °C Brookfieldovým viskosimetrem.

Zkušební metody

Blends asfaltového pojiva a posuzovaných olejů byly zkoumány z hlediska charakteristických vlastností pomocí zkoušky penetrace jehlou (PEN), bodu měknutí (KK), zpětného přetvoření (ER), dynamické viskozity (η) a skladovací stability. Navíc byly pomocí dynamického smykového reometru posouzeny reologické vlastnosti a náchylnost pojiva ke stárnutí. Výše uvedené testy byly provedeny před a po krátkodobém stárnutí, konkrétně pomocí zkoušky RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) v souladu s normou EN 12607-1. Na základě výše uvedené zkoušky byly vypočítány faktory odolnosti proti únavě a odolnosti proti trvalé deformaci spolu se stanovením horní kritické teploty, aby se kvantifikovala odolnost asfaltu proti porušení únavovou trhlinou a odolnost proti negativním účinkům trvalé deformace, která souvisí s chováním asfaltového pojiva v oboru vysokých teplot. Dále byly vypočítány dva reologické indexy stárnutí na základě charakteristiky odolnosti proti únavě (označeno jako AI_{FCF}) a charakteristiky odolnosti proti trvalé deformaci (označeno jako AI_{RF}), viz rovnice (1) a (2). Nižší index stárnutí naznačuje nižší citlivost na stárnutí, a tedy lepší chování během oxidačního stárnutí asfaltu.

Rovnice (1) stanovuje index stárnutí na základě charakteristiky únavového porušení:

$$AI_{FCF} = \frac{G^* \times \sin \delta_{aged}}{G^* \times \sin \delta_{virgin}}$$

Rovnice (2) stanovuje index stárnutí pro charakteristiku používaný dle SUPERPAVE pro vymezení odolnosti proti trvalé deformaci:

$$AI_{RF} = \frac{G^*/\sin \delta_{aged}}{G^*/\sin \delta_{virgin}}$$

Výsledky a diskuse

Základní vlastnosti

Tabulky 2–3 shrnují výsledky základních sledovaných vlastností. Podle zkoušky penetrace, bodu měknutí a dynamické viskozity měly oleje při smísení s asfaltem změkčující účinek. Zejména CO-3 a CO-5 způsobily změnu penetrační třídy z 35/50 na 50/70 v souladu s normou EN 12591 (penetrace 54 a 62). Zkušební protokol laboratorního stárnutí vedl ke ztvrdnutí asfaltu, jak ukazují výsledky vzorků stárnutých metodou RTFOT. Kromě toho přírodní modifikátory výrazně neovlivnily elastické vlastnosti asfaltu. Proces stárnutí způsobil jen velmi mírné zlepšení výše uvedené vlastnosti. Téměř žádná ze směsí však nepřekročila prahovou hodnotu zpětného přetvoření 10 %, což je v případě silničního asfaltu očekávaný poznatek. Z hlediska skladovací stability lze směsi charakterizovat jako stabilní, protože rozdíl v bodu měknutí mezi horní a spodní částí tuby byl ve všech případech menší nebo roven 2 °C.

Tabulka 2: Základní vlastnosti nezestárnutých blendů asfaltových pojiv

Vlastnost	Penetrace	Bod měknutí	Zpětné přetvoření	Skladovací stabilita (ΔT)	Dynamická viskozita* (η)
	(dmm)	(°C)	(%)	(°C)	(Pa.s)
35/50 (RB)	36	52,4	5	-	0,200
CO-1	45	51,4	7	1,0	0,200
CO-3	54	48,8	5	1,2	0,200
CO-5	62	48,2	5	1,8	1,175
SSO-1	40	51,8	10	1,8	0,175
SSO-3	43	49,4	10	1,8	0,175
SSO-5	46	48,4	10	2,0	0,150

*Měřeno při 150 °C Brookfieldovým viskosimetrem.

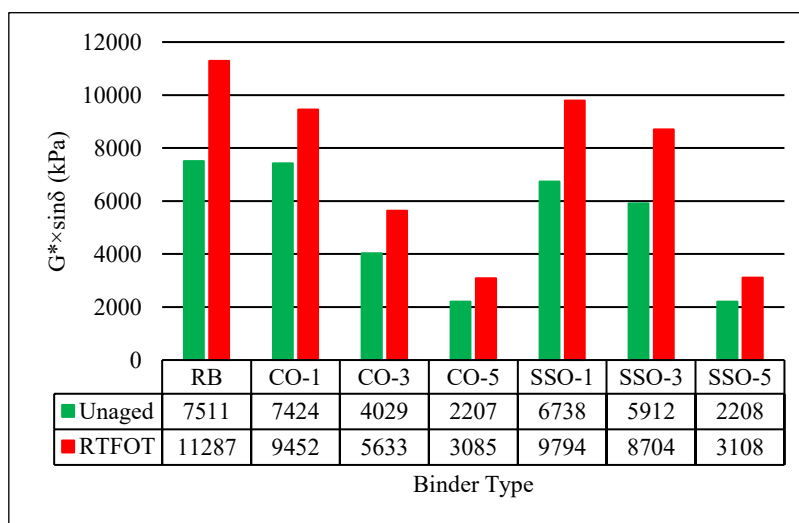
Tabulka 3: Základní vlastnosti po RTFOT zestárnutých blendů asfaltových pojiv

Vlastnost	Penetrace (dmm)	Bod měknutí (°C)	Zpětné přetvoření (%)	Dynamická viskozita* (η) (Pa.s)
35/50 (RB)	11	55,8	9	0,300
CO-1	17	53,6	10	0,275
CO-3	20	52,4	6	0,250
CO-5	26	52,0	6	0,225
SSO-1	13	55,0	10	0,275
SSO-3	15	54,6	10	0,250
SSO-5	25	51,6	11	0,225

*Měřeno při 150 °C Brookfieldovým viskosimetrem.

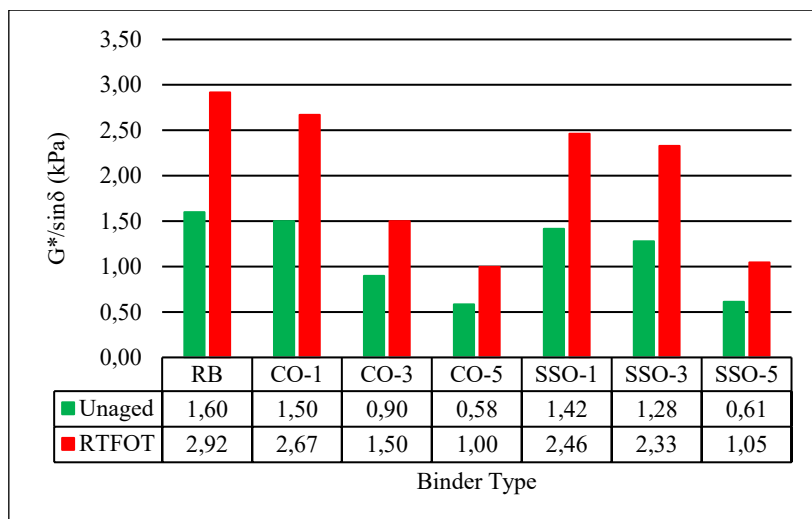
Reologické vlastnosti (stanovené na DSR)

Obrázek 2 znázorňuje výsledky charakteristiky odolnosti proti únavě ($G^* \times \sin \delta$) dle SUPERPAVE referenčního asfaltu a přírodními oleji modifikovaných blendů při teplotě 20 °C. Obecně platí, že nižší charakteristika únavového porušení souvisí s vyšší odolností proti únavovému praskání. Je zřejmé, že zvyšující se obsah bio-oleje vedl ke snížení sledované charakteristiky bez ohledu na stav stárnutí, což znamená, že oba přírodní modifikátory zlepšily únavové vlastnosti asfaltu tím, že snížily jeho křehkost. Pro sledovanou charakteristiku odolnosti proti únavě stanovené po krátkodobém stárnutí metodou RTFOT lze uvést, že pro referenční pojivo, CO-5 a SSO-5 bylo dosaženo 11 287 kPa, 3 085 kPa a 3 108 kPa. Zlepšení odolnosti proto únavě bylo výraznější v případě obou použitých přírodních olejů patrnější při dávkování vyšším než 1 %. Dále si lze všimnout, že dle očekávání byly hodnoty charakteristiky $G^* \times \sin \delta$ vyšší v případě vzorků zestárnutých metodou RTFOT. Důvodem zde je účinek stárnutí, které má negativní vliv na odolnost asfaltu proti únavovému porušení.



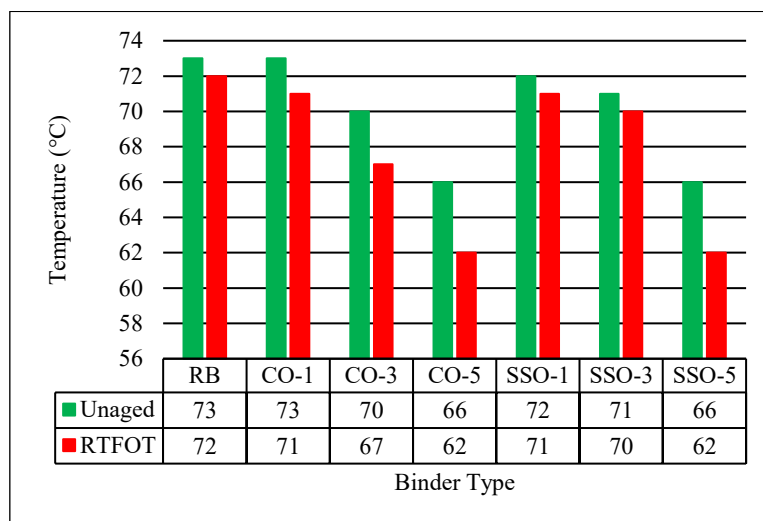
Obrázek 2: Charakteristika odolnosti proti únavě nezestárnutých a krátkodobě zestárnutých (RTFOT) blendů při teplotě 20 °C

Obrázek 3 znázorňuje charakteristiku odolnosti proti trvalé deformaci ($G^*/\sin \delta$) referenčního asfaltu a přírodními oleji modifikovaných blendů při teplotě 70 °C. Vyšší hodnota charakteristiky znamená vyšší odolnost proti trvalé deformaci. Ačkoli oleje přírodního původu způsobily snížení charakteristiky, a tím i snížení odolnosti proti šíření trvalé deformace u obou sledovaných stavů (nezestárnutý i krátkodobě zestárnutý), pokles byl v případě dávkování 1 % přírodního modifikátoru nevýznamný. Sledovaná charakteristika $G^*/\sin \delta$ dosáhla v případě nezestárnutých vzorků referenčního pojiva, CO-1 a SSO-1 hodnot 1,60 kPa, 1,50 kPa a 1,42 kPa. Kromě toho ve všech případech tato charakteristika vykazovala po krátkodobém stárnutí nárůst v důsledku ztuzujícího účinku oxidace u asfaltového pojiva, což odpovídá řadě poznatků v literatuře (Hofko et al., 2017; Pipintakos et al., 2022).



Obrázek 3: Charakteristika odolnosti proti trvalé deformaci nezestárnutých a krátkodobě zestárnutých (RTFOT) blendů při teplotě 70 °C

Obrázek 4 znázorňuje hodnoty horní kritické teploty (TC_{high}) referenčního asfaltu a blendů obsahujících přírodní modifikátory. Horní kritická teplota souvisí s chováním asfaltu v oblasti vysokých teplot, přesněji ji lze využít při posuzování odolnosti proti trvalé deformaci. Vyšší hodnota kritické teploty je spojena s větší odolností proti výše uvedenému typu poruch asfaltové vrstvy. Obrázek 4 ukazuje, že zvyšující se obsah přírodního modifikátoru měl negativní vliv na horní kritickou teplotu. Konkrétně se horní kritické teploty vzorků CO-5 a SSO-5 snížily z hodnoty 73 °C (RB) na 66 °C před provedením krátkodobého stárnutí. Pokles horních kritických teplot byl následně ještě výraznější u vzorků zestárnutých metodou RTFOT. Výrazný pokles o hodnotu 10 °C se projevil především v případě, kdy bylo do referenčního asfaltu přimícháno 5 % kukuřičného nebo slunečnicového oleje (tedy dosažení poklesu horní kritické teploty ze 72 °C na 62 °C). Tyto výsledky jsou v souladu s výsledky charakteristiky odolnosti proti trvalé deformaci popsanými výše, protože oleje přírodního původu měly na asfalt změkčující účinek. Snížení horní kritické teploty však bylo nevýznamné, pokud obsah použitých bio-modifikátorů nepřesáhl 1 %. Kontrolovaný přídavek přírodního oleje do standardního silničního asfaltu by proto mohl omezit snížení některých negativních aspektů vysokoteplotních vlastností asfaltu.

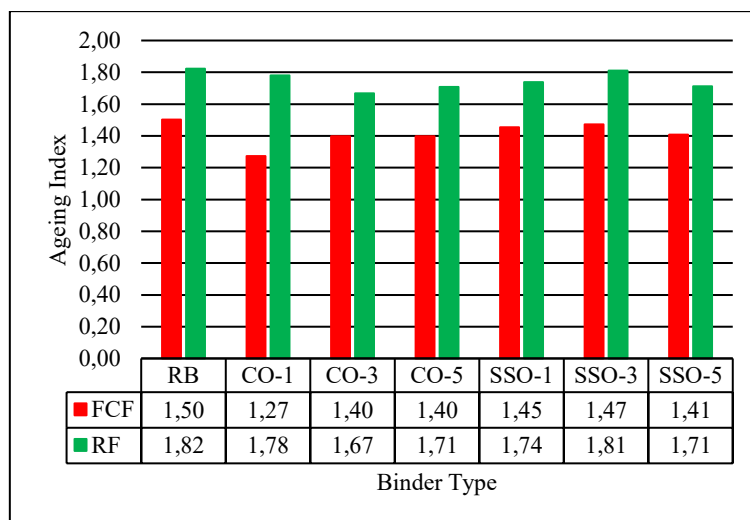


Obrázek 4: Horní kritická teplota nezestárnutých a krátkodobě zestárnutých (RTFOT) blendů

Citlivost ke stárnutí

Obrázek 5 znázorňuje indexy stárnutí založené na posouzení charakteristik odolnosti proti únavě a odolnosti proti trvalé deformaci. Je zřejmé, že oba indexy stárnutí v případě referenčního pojiva (RB) se po přidání kukuřičného i slunečnicového oleje snížily. Snížení bylo výraznější v případě blendů

modifikovaných kukuřičným olejem. Tento poznatek poukazuje na možné využití bio-olejů jako potenciálních oživovacích činidel nebo antioxidantů v asfaltovém pojivu, protože z reologického hlediska zjevně dochází k účinkům zpomalení mechanismu jeho oxidačního stárnutí.



Obrázek 5: Index stárnutí vycházející z porovnání charakteristiky odolnosti proti stárnutí (70 °C) a odolnosti proti únavě (20 °C)

Závěr

Kukuřičný a slunečnicový olej prokázaly svůj potenciál změkčovat asfaltové pojivo a zvyšovat jeho odolnost proti trhlinám, přičemž zároveň snižují jeho náchylnost ke stárnutí, což znamená, že mohou být potenciálně použity jako biologické antioxidanty nebo oživovací chemické látky. Vysokoteplotní vlastnosti asfaltového pojiva nebyly výrazně sníženy, pokud obsah přírodního modifikátoru nepřesáhl přírůstek 1 %-hm. Konečně, jejich velká kompatibilita s asfaltovým pojivem byla prokázána schopností blendů upravených přírodními oleji nevykazovat významnou segregaci při skladování simulovanou standardně při zvýšených teplotách po delší dobu (180 °C po dobu 72 h).

Poděkování

Tento výzkum byl spolufinancován Grantovou agenturou ČR, projekt č. 22-04047K.

Zdroje:

- [1] Allatieh, S., Al-Khateeb, G., Zeiada, W., & Shanableh, A. 2020. Performance assessment of bio-modified asphalt binder using extracted bio oil from date seeds waste. *International Journal Of System Assurance Engineering And Management* 11(6): 1260–1270.
- [2] Ding, H., Wang, H., Qu, X., Varveri, A., Gao, J., & You, Z, 2021. Towards an understanding of diffusion mechanism of bio-rejuvenators in aged asphalt binder through molecular dynamics simulation. *Journal of Cleaner Production* 299: 126927.
- [3] Duan, S., Muhammad, Y., Li, J., Maria, S., Meng, F., & Wei, Y. 2019. Enhancing effect of microalgae biodiesel incorporation on the performance of crumb Rubber/SBS modified asphalt. *Journal Of Cleaner Production* 237: 117725.
- [4] Elkashef, M., & Williams, R. 2017. Improving fatigue and low temperature performance of 100% RAP mixtures using a soybean-derived rejuvenator. *Construction And Building Materials* 151: 345–352.
- [5] Fini, E., Kalberer, E., Shahbazi, A., Basti, M., You, Z., Ozer, H., & Aurangzeb, Q. 2011. Chemical Characterization of Biobinder from Swine Manure: Sustainable Modifier for Asphalt Binder. *Journal Of Materials In Civil Engineering* 23(11): 1506–1513.
- [6] Han, Z., Sha, A., Tong, Z., Liu, Z., Gao, J., Zou, X., & Yuan, D. 2017. Study on the optimum rice husk ash content added in asphalt binder and its modification with bio-oil. *Construction And Building Materials*, 147: 776–789.
- [7] Hofko, B., Falchetto, A. C., Grenfell, J., Huber, L., Lu, X., Porot, L., Poulikakos, L. D., & You, Z. 2017. Effect of short-term ageing temperature on bitumen properties. *Road Materials and Pavement Design* 18: 108-117.

- [8] Hosseinneshad, S., Hung, A., Mousavi, M., Sharma, B., & Fini, E. 2020. Resistance Mechanisms of Biomodified Binders against Ultraviolet Exposure. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 8(6): 2390–2398.
- [9] Ingrassia, L. P., Lu, X., Ferrotti, G., & Canestrari, F. 2020. Chemical, morphological and rheological characterization of bitumen partially replaced with wood bio-oil: Towards more sustainable materials in road pavements. *Journal of Traffic and Transportation Engineering* 7(2): 192–204.
- [10] Jiménez del Barco Carrión, A., Lo Presti, D., Chailleux, E., & Airey, G. D. 2023. Rheological investigation on the ageing performance of bio-recycled asphalt binders and mixtures. *Road Materials and Pavement Design* 24: 538–553.
- [11] Kalampokis S., Manthos E., Konstantinidis A., Kakafikas C., & Kalapouti A. 2024. Bio-Modified Bitumen: A Comparative Analysis of Algae Influence on Characteristic Properties. *Eng* 5(1): 417–432.
Kalampokis, S., Nikolaides, A., Manthos, E., & Kotopoulos, Y. Assessment of bio-modified bitumen incorporating different biomass powders. 2024. In *Bituminous Mixtures and Pavements VIII*. Thessaloniki: CRC Press Books.
- [12] Liu, Q., Wang, C., Fan, Z., Shi, S., Zhang, Z., & Oeser, M. 2020. Feasibility analysis of bio-binder as non-petroleum alternative for bituminous materials. *Materials Research Express* 6(12): 125115.
- [13] Nogueira, R., Soares, J., & Soares, S. 2019. Rheological evaluation of cotton seed oil fatty amides as a rejuvenating agent for RAP oxidized asphalts. *Construction And Building Materials* 223: 1145–1153.
- [14] Pipintakos, G., Lommaert, C., Varveri, A., & Van den Bergh, W. 2022. Do chemistry and rheology follow the same laboratory ageing trends in bitumen? *Materials and Structures* 55(5): 146.
- [15] Podolsky, J., Saw, B., Elkashef, M., Williams, R., & Cochran, E. 2020. Rheology and mix performance of rejuvenated high RAP field produced hot mix asphalt with a soybean derived rejuvenator. *Road Materials And Pavement Design* 22(8): 1894–1907.
- [16] Seidel, J., & Haddock, J. 2014. Rheological characterization of asphalt binders modified with soybean fatty acids. *Construction And Building Materials* 53: 324–332.
- [17] Xie, M., Xu, L., Wu, K., Wen, Y., Jiang, H., & Jiang, Z. 2022. Rheology and Microstructure Properties of Asphalt Binder Modified by Spent Coffee Grounds. *SSRN Electronic Journal*.
- [18] Zhang, Y., Liu, X., Apostolidis, P., Gard, W., van de Ven, M., Erkens, S., & Jing, R. 2019. Chemical and Rheological Evaluation of Aged Lignin-Modified Bitumen. *Materials* 12(24): 4176.

VLASTNOSTI A MECHANISMUS REAKTIVNÍCH MODIFIKÁTORŮ PRO ZVÝŠENÍ A ZLEPŠENÍ PMB PRO FLEXIBILNÍ ASFALTOVÉ VOZOVKY

PROPERTIES AND MECHANISM OF REACTIVE MODIFIERS TO ENHANCE AND UPGRADE PMBS FOR FLEXIBLE ASPHALT PAVEMENT

Dr. Olivier Fleischel, BASF SE, Německo/Germany

Jan Scharf, Prota s.r.o., Česká republika/Czech Republic

Waldemar Schatz, BASF Polyurethane GmbH, Německo/Germany

Byla vyvinuta nová třída reaktivních modifikátorů asfaltu založených na chemii isokyanátů. Jejich přímé použití prostřednictvím mokrého procesu je snadno proveditelné i na obalovně. Ačkoli se systém specifikací pro polymerem modifikovaný bitumen dosud soustředí především na použití termoplastických elastomerů, kapalně reaktivní polymery vykazují slibné výsledky a již nacházejí uplatnění v mnoha evropských zemích. Zvyšující se mechanické a tepelné namáhání vozovek vede k rychlejšímu zhoršování asfaltových vrstev. Nejefektivnějším způsobem, jak těmto výzvám čelit, je transformace asfaltového pojiva a jeho modernizace směrem k materiálu s pokročilejšími technickými vlastnostmi. Cílem tohoto příspěvku je představit aktuální pokrok v oblasti nových aditiv pro výstavbu vozovek, konkrétně pro pružné asfaltové kryty, a ukázat, jak lze zlepšit jejich celkové vlastnosti — například zvýšením odolnosti vůči vysokým teplotám v letním období (efekt tepelných ostrovů).

A new class of reactive modifier based on isocyanate chemistry has been developed to modify bitumen, but direct use via a wet process is easily feasible at the asphalt mixing plant as well. Although the specification system for polymer modified bitumen revolves around the specific use of thermoplastic elastomers, liquid reactive polymers demonstrated promising results and are already in use in many European countries. The increase of mechanical and thermal stress on roads are responsible for the rapid deterioration of the asphalt layers. The most effective solution to face those challenges is the transformation of the asphalt binder and upgrading it to a material with better engineering properties. The aim of this paper is to present the advancement in the field of new additives for road construction, specifically for flexible asphalt pavement and how to enhance the overall properties, for instance, towards the rise of temperature over summertime (heat islands effect).

Úvod

Změna klimatu představuje vážnou hrozbu pro udržitelný rozvoj měst. Oteplování způsobené klimatickou změnou je v městských oblastech přibližně o 50 % až 150 % výraznější než ve venkovských oblastech, přičemž nejvíce se projevuje v jižní části Evropy. Tento jev vede ke vzniku tzv. městských tepelných ostrovů, což způsobuje výrazné zvýšení teploty na povrchu vozovek. V mnoha evropských městech se navíc očekává častější výskyt extrémních klimatických jevů. Jednou z hlavních výzev jsou mimo jiné zdravotní rizika, ale opakované vlny veder budou mít negativní dopad i na silniční infrastrukturu. Rostoucí teploty zvyšují nároky na odolnost dopravních staveb, aby se předešlo předčasnému tvorbě tzv. kolejí na povrchu vozovek. To otevírá otázku, zda současné asfaltové komunikace odpovídají budoucím požadavkům a jaké existují možnosti návrhu či výroby teplotně odolných asfaltových vozovek.

Za posledních 50 let byly zaváděny různé přísady s cílem zlepšit celkové vlastnosti bitumenu a výsledných asfaltových směsí. Zhu et al. [1] předložili částečný přehled známých způsobů modifikace bitumenového pojiva publikovaných do roku 2014. Tato publikace shrnuje pokroky i výzvy v oblasti polymerní modifikace bitumenu a pokrývá řadu aspektů do té doby popsanych v odborné literatuře. Eurobitume a Asphalt Institute zveřejnily podrobný seznam přísad používaných v bitumenových a asfaltových směsích [2], čímž poskytly širokou škálu nástrojů pro přizpůsobení vlastností bitumenu specifickým místním požadavkům.

Cílem tohoto článku je doplnit stávající poznatky a nabídnout další podrobnosti týkající se současných přístupů k reaktivní modifikaci a funkcionalizaci bitumenového pojiva.

Tabulka 1: Přehled používaných modifikátorů bitumenu a asfaltových směsí [2]

Polymery	Plniva
Modifikace bitumenu polymery je zavedenou praxí. Přírodní a syntetické polymery se používají k úpravě vlastností bitumenu od počátku 20. století. V poslední době se ke zlepšení vlastností bitumenu používá mnoho syntetických polymerů. Typické modifikátory jsou: • Termoplastické elastomery: styrenové blokované kopolymery SBS, SEBS, polyolefinové směsi, termoplastický polyuretan • Termoplasty/plastomery: polypropylen (PP), polyethylen (PE), ethylenvinylacetát (EVA) • Elastomery: přírodní kaučuk, syntetický kaučuk, polybutadien, butylkaučuk • Přírodní polymery: lignin/celulóza • Gumová drť: recyklované pneumatiky • Reaktivní elastomerní terpolymery: glycidylmethakrylátové kopolymery	Přidání speciálních plniv nebo modifikátorů se používá ke zlepšení charakteristik tuhosti a viskozity. Tato kategorie zahrnuje: • Minerální plniva (např. vápenec, popílek a jíly) • Promotory adheze (tj. hašené vápno) • Vlákna (tj. přírodní – celulóza, syntetická – polypropylen) • Přírodní asfalty (např. Trinidad Lake Asphalt, Gilsonite) • Recyklované asfaltové materiály (tj. recyklovaná asfaltová vozovka a recyklované asfaltové šindele)
Chemické modifikátory	Ředění pojiva
Chemická modifikace se často používá k řešení specifických atributů výkonu. Mezi chemické přísady patří: • Promotory adheze (např. deriváty mastných aminů, imidazolinů) • Povrchově aktivní látky, chemická mazací aditiva nebo vosky pro nízkoteplotní směsi • Sloučeniny fosforu (např. oxid fosforečný, kyselina polyfosforečná) • Elementární síra • Anhydrid kyseliny maleinové • Látky potlačující zápach, scavengery H₂S a maskovací prostředky	Přidání ředících prostředků je jednou z nejstarších metod úpravy bitumenu a zahrnuje produkty jako: • Vosky (např. syntetické, jako je Fischerův tropsch; přírodní, jako je Montan; a amidové deriváty, jako je ethylenbis-stearamid) • Biogenní přísady (např. složky na rostlinné bázi)

Z výše uvedených polymerů představují termoplastické elastomery nejrozšířenější třídu polymerů používaných pro modifikaci bitumenu. Tyto materiály zpravidla zpevňují bitumen při vysokých teplotách a zároveň zvyšují jeho pružnost při nízkých teplotách, čímž bitumenu poskytují optimální rozsah vlastností potřebný pro splnění požadovaných výkonnostních parametrů v závislosti na konkrétní aplikaci. Ačkoli se v oblasti modifikovaného bitumenu využívá více typů polymerů, elastomerní polymery, zejména styren-butadien-styren (SBS), dominují trhu jak v oblasti vozovek, tak hydroizolací. Obsah těchto polymerních přísad se obvykle pohybuje v rozmezí 1 až 8 % hmotnosti bitumenu, přičemž pro polymerem modifikovaný bitumen (PmB) určený k pokládce je běžné použití v rozmezí 3 % až 5 %.

SBS v současnosti zcela dominuje evropskému trhu s PmB. Klíčovým parametrem, který je dnes součástí specifikace pro PmB, je elastické zotavení, neboli vratná duktilita. Tato vlastnost je specifická právě pro elastomerní modifikaci pomocí SBS. Všechny technické specifikace PmB se v podstatě točí kolem této modifikace. Ačkoli odborníci v oboru často souhlasí s tím, že vratná duktilita je především nástrojem pro kontrolu kvality, stalo se zároveň i základním hodnotícím kritériem v systému norem pro PmB. Požadavek na vratnou duktilitu se odráží nejen v technických specifikacích, ale rovněž ve výběrových řízeních a zadáních projektů silniční infrastruktury, kde je často výslovně uvedena a vyžadována.

Tento rigidní rámec však omezuje vývoj inovativních přísad, které by mohly nabídnout srovnatelné technické vlastnosti výsledného asfaltu i bez dosažení vysokých hodnot vratné duktility.

Přestože SBS nadále představuje standard v oblasti polymerní modifikace bitumenu, má i své nevýhody, a stávající systém specifikací do značné míry brzdí další vývoj v oblasti alternativních modifikací. V reakci na známé problémy spojené s použitím SBS bylo provedeno mnoho výzkumů zaměřených na nové přístupy ke zlepšení vlastností bitumenového pojiva [1]. Mezi nejčastěji zkoumané strategie patří:

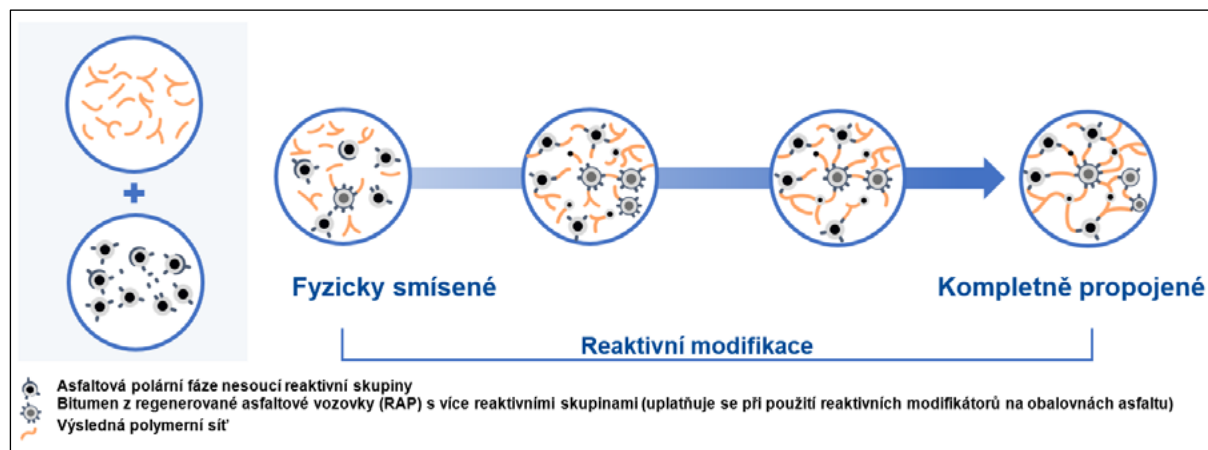
- Vulkanizace sírou – zlepšení stability při skladování a snížení separace fází.
- Přídavek antioxidantů – omezení oxidace pojiva a prodloužení jeho životnosti.
- Modifikace hydrofobním jílovým minerálem – zvýšení odolnosti vůči stárnutí a zlepšení stability při skladování.
- Použití reaktivních polymerů – zlepšení kompatibility s bitumenem a vylepšení výkonu při vysokých teplotách, zejména pokud jde o odolnost proti deformacím.

Kombinace rostoucích klimatických nároků na výkonnost asfaltových směsí a zároveň zvyšujících se nákladů na asfaltový granulát – zejména při použití hotových polymerem modifikovaných pojiv – představuje významnou výzvu pro výrobce asfaltových směsí. Situace je ještě náročnější při vysokém podílu recyklovaného asfaltu ve všech vrstvách vozovky. V těchto případech dosahuje účinek modifikace pomocí standardního polymerem modifikovaného asfaltu (PmB), který má definovaný obsah polymerů, svých technických limitů.

Vedle klasických fyzikálních směsí bitumenu a polymerů existuje další možný přístup v podobě chemické modifikace pomocí reaktivních polymerů, která je dalším způsobem zlepšení vlastností asfaltového pojiva. Tato metoda byla již odborně popsána například v příručce The Shell Bitumen Handbook, konkrétně v kapitole „The Modification of Bitumen by Reactive Chemistry“.

Reaktivní polymery jsou příkladem modifikátorů, které by neměly být vyloučeny z žádného typu použití. Reaktivní polymery tvoří chemickou vazbu se složkami bitumenu. Předpokládá se, že reaktivní polymery spíše reagují s polárními složkami bitumenu (tj. s asfaltéry), než aby fyzikálně interagovaly s koloidními fázemi bitumenu (obrázek 1).

Vzhledem k tomu, že povaha modifikace isokyanátem je zásadně odlišná od elastomerní modifikace pomocí SBS, je zjevné, že dosažení vratné duktility je obtížné. Vytvořením jemně zesíťované polymerní struktury přísadou na bázi prekurzoru polyuretanu (tj. isokyanátu, obrázek 1) lze účinně kompenzovat malé a diskrétní deformace (například ty, které vznikají na vozovkách). Naopak odolnost vůči velmi velkým deformacím (například při zkoušce elastického zotavení), které nemají praktický význam, nelze z povahy této modifikace dosáhnout.



Obrázek 1: Znázornění reaktivní modifikace bitumenu s multifunkčním reaktivním polymerem a tvorbou polymerní sítě [zdroj: BASF]

Reaktivní polymery popsané v literatuře zahrnují reaktivní polymery na bázi ethylenu (např. obsahující epoxidové skupiny) a polymery na bázi isokyanátů [3–15]. V závislosti na dávkování a na způsobu použití těchto reaktivních polymerů (tj. zda jsou použity při výrobě modifikovaného bitumenu, nebo na obalovně), však tyto typy přísad spadají do různých kategorií, nikoli pouze do jediné, jak je uvedeno v tabulce 1.

Reaktivní modifikátor, jako jsou například reaktivní polymerní isokyanáty, může současně plnit více funkcí – působí jako polymerní modifikátor, chemická přísada, kompatibilizátor plniv a zároveň má efekt ředícího činidla. Taková přísada může být využita jako:

- polymerní modifikátor pro zvýšení tuhosti bitumenového pojiva,
- promotor adheze,
- pohlcovač zápachu (např. jako lapač H_2S),
- kompatibilizátor umožňující přidání až 50 % recyklovaného asfaltu,
- modifikátor viskozity nebo zlepšovač zpracovatelnosti (s možností výroby nízkoteplotních směsí).

Již bylo publikováno mnoho studií zaměřených na reaktivní modifikátory na bázi isokyanátové chemie [7–15]. Bylo prokázáno, že reaktivní polymery na bázi isokyanátů dokážou zvýšit viskozitu, zlepšit skladovací stabilitu a odolnost vůči vyjíždění tzv. kolejí při zvýšených teplotách [8, 15]. Carrera a kol. byli první, kdo v literatuře popsal použití určitého typu reaktivního polymerního isokyanátu k zesíťování složek bitumenu in situ [15]. Za dodržení specifického postupu je možné modifikovat bitumenové pojivo polymerním isokyanátem i při nižších teplotách výroby směsi a pokládky.

Aby bylo možné vyřešit výzvy spojené se změnami klimatu a získat odolnější silniční infrastrukturu méně náchylnou k trvalým deformacím v důsledku vln veder, je možné kombinovat silné stránky polymerů SBS spolu s reaktivními polymerními modifikátory. Cílem této studie je popsat dvě zkušební pokládky:

- V centru města Trier (Německo) na jízdním pruhu vyhrazeném pro autobusovou dopravu.
- V areálu logistického a výrobního závodu významného automobilového výrobce (Německo).

Materiály a metody

Materiály

Komerčně dostupné PmB 10/40-65 a 25/55-55, zakoupené od různých dodavatelů bitumenu nebo odebrané přímo na obalovnách. Tyto PmB byly modifikovány reaktivní přísadou na bázi specifického polymerního isokyanátu (AS P101) od společnosti BASF SE, nebo bylo modifikované pojivo extrahováno z asfaltové směsi vyrobené přímo na místě. Hlavní vlastnosti přísady AS P101 jsou uvedeny v tabulce 2.

Tabulka 2: Hlavní vlastnosti doplňkové látky (AS P101)

Vlastnosti AS P101	
Chemické složení	na bázi izokyanátu
Hustota (25 °C)	1,2 g/cm ³
Fyzická podoba	černá tekutina

Metody

Evropská norma pro specifikaci bitumenu je založena na penetračním bitumenu (EN 13924 a EN 12591). U nemodifikovaného bitumenu jsou pro kategorizaci bitumenu zatím nutné dva parametry: bod měknutí Ring&Ball a penetrace jehly. Probíhá další vývoj, který zavádí nové testování, jako jsou Binder-fast-characterization-tests (BTSV). Metoda BTSV je však obvykle vhodná pro nemodifikovaný bitumen, ale v případě modifikovaného bitumenu s SBS byly často pozorovány nepřesné korelace.

DSR (Anton Paar MCR 702 Multidrive a SmartPave 101) byl použit k provedení nového testu Binder-Fast-Characterization-Test (nebo BTSV podle jeho německé zkratky). Tyto testy byly vybrány za účelem posouzení účinku, který má přísada na bitumen v širokém rozsahu teplot a frekvencí. Všechny zkoušky byly provedeny v lineárním viskoelastickém rozsahu (LVE) a s měřicím systémem deska-deska (o průměru 25 mm). Pro každé pojivo byl stanoven bod měknutí Ring&Ball a charakteristické teploty T ($G^* = 15$ kPa) a odpovídající fázové úhly δ ($G^* = 15$ kPa) (Binder-fast-characterization-tests, BTSV). Test BTSV [18] byl vybrán, protože si získal popularitu v Německu a brzy by mohl nahradit německý standard, který se stále spoléhá hlavně na zkoušku penetrace jehlou a bodu měknutí. V tomto testu se měří komplexní modul smyku a fázový úhel, zatímco se teplota zvyšuje z 20 °C na 90 °C rychlostí 1,2 K/min. Zkouška se provádí s geometrií deska-deska 25 mm při konstantním oscilačním smykovém napětí 500 Pa v režimu řízeném napětím, při konstantní frekvenci 10 rad/s. Teplota a fázový úhel, při kterém komplexní modul smyku dosahuje 15 kPa, jsou parametry používané k charakterizaci pojiva. Teplotu lze považovat za horní hranici elastoplastického chování pojiva a slouží jako bod měknutí, v tomto případě stanovený reologií. Zatímco odpovídající fázový úhel (δ BTSV) poskytuje informace o poměru mezi elastickým a viskózním chováním a může sloužit jako indikátor stupně modifikace při

použití modifikátorů pojiva. V [24] jsou definovány tři úrovně modifikace: nemodifikovaná ($\delta\text{BTSV} > 75^\circ$), středně modifikovaná ($65^\circ < \delta\text{BTSV} < 75^\circ$) a vysoce modifikovaná ($\delta\text{BTSV} < 65^\circ$).

Pro zkoumání deformačního chování bitumenu byla použita metoda opakovaného zatěžování a zotavení při víceúrovňovém napětí (Multiple Stress Creep and Recovery Test – MSCRT). Zkouška MSCRT se provádí v souladu s normou DIN EN 16659. Test se realizuje pomocí reometrického zařízení DSR (Dynamic Shear Rheometer) s geometrií deska–deska o průměru 25 mm. Během měření je mezera mezi deskami nastavena na 1 mm. V Německu se MSCRT provádí při teplotě 60°C , protože tato teplota je rozhodující pro hodnocení tvorby kolejí. Vzorek bitumenu je v průběhu testu vystaven fázi zatížení (creep) trvající jednu sekundu, následované fází zotavení (recovery) v délce devíti sekund. Během zatěžovací fáze je na vzorek aplikováno smykové napětí 3,2 kPa, zatímco během fáze zotavení není aplikováno žádné napětí. Test MSCRT se skládá z celkem deseti cyklů, přičemž každý zahrnuje jednu zatěžovací a jednu zotavovací fázi. Konečnými výsledky MSCRT jsou aritmetické střední hodnoty zotavení (R) a nevratné změny J_{nr} po všech deseti fázích zatížení a zotavení. R je poměr viskoelastické deformace k maximální celkové deformaci v každém cyklu. Pomocí parametru R lze identifikovat a kvantifikovat modifikaci bitumenu polymery. J_{nr} představuje nevratnou (neregenerovanou) deformaci po úplném cyklu, vztaženou k aplikovanému smykovému napětí. Tento parametr lze využít k analýze odolnosti vůči tvorbě kolejí, neboť vykazuje dobrou korelaci s výsledky zkoušek tvorby kolejí u asfaltových směsí [17–18].

Pro klasifikaci PmB se používá metoda vratné duktility podle normy DIN EN 13398. Při této zkoušce se vzorky bitumenu natahují a následně přestřihnou. Poté se měří míra jejich zpětného smrštění (zotavení). Zkouška vratné duktility se provádí na vzorcích bitumenu odlitých do forem, jak stanovuje norma DIN EN 13398. K provedení testu se používá speciální zařízení zvané duktilometr, které umožňuje kontrolu teploty a rychlosti prodlužování během zkoušky. Zkušební teplota je 25°C a vzorky se před zkouškou temperují po dobu 90 minut. Poté jsou nataženy na délku 200 mm při konstantní rychlosti prodlužování 50,0 mm/min. Do 10 sekund po dosažení délky 200 mm se vzorek uprostřed přestřihne nůžkami, čímž vzniknou dvě bitumenové „vlákna“. Vzdálenost mezi těmito vlákny se změní po 30 minutách. Vratná duktilita R_E představuje procentuální poměr mezi vzdáleností vzniklou po přestřihnutí a původní délkou prodloužení. Pokud vzorek praskne dříve než při dosažení délky 200 mm, je možné vypočítat R_E na základě dosažené délky. Hodnota R_E se používá k odlišení polymerem modifikovaného bitumenu (PmB) od nemodifikovaného bitumenu.

Výsledky

Zkušební úseky

Konstantin Platz, Trevír (Německo, srpen 2022)

Cílem prvních laboratorních zkoušek byla vícenásobná modifikace asfaltové směsi s cílem zlepšit odolnost vůči deformacím při působení tepla a vysokého zatížení (typického například pro autobusová nádraží a logistické plochy). Možnost použití reaktivní modifikační přísady k vylepšení hotového polymerem modifikovaného pojiva PmB 25/55-55 A prokázala na úrovni bitumenu, že reologické vlastnosti základního pojiva (PmB 25/55-55 A) se významně posouvají směrem k pojivu odolnému vůči deformacím. Je možné dosáhnout charakteristických hodnot, z nichž některé výrazně převyšují hodnoty typického polymerem modifikovaného pojiva (PmB) (tabulka 3). Pro účely studie a jako srovnávací příklad byl rovněž hodnocen PmB 10/40-65, který by měl obsahovat vyšší podíl SBS polymeru.

Tabulka 3: Výsledky zkoušek asfaltového pojiva (laboratorní zkoušky)

	EP R&B ($^\circ\text{C}$)	T ($G^* = 15 \text{ kPa}$) BTSV ($^\circ\text{C}$)	Fázový úhel δ ($G^* = 15 \text{ kPa}$) – BTSV ($^\circ$)	Vratná duktilita (%)
10/40-65	72,2	66,6	66,4	69
25/55-55 (Dodavatel A)	60,4	61,0	72,7	72
25/55-55 (Dodavatel A) + 2,5 M.-% (AS P101)	74,6	70,3	62,8	72
25/55-55 (Dodavatel B)	61,0	61,2	69,2	75
25/55-55 (Dodavatel B) + 2,5 M.-% (AS P101)	81,4	71,5	55,7	77

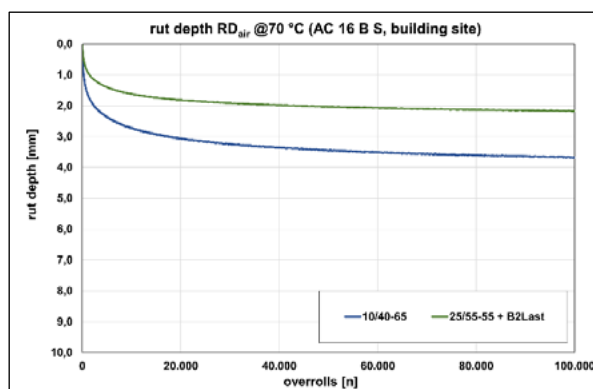
V rámci stavebního projektu „Konstantinplatz“ v Trieru (Německo) bylo v praxi realizováno řešení vícenásobné modifikace (obrázek 2). Během částečné obnovy úseku vozovky byla položena asfaltová obrusná vrstva z AC 8 D S a asfaltová ložná vrstva z AC 16 B S, přičemž obě byly vyrobeny z PmB 25/55-55 A s přídavkem 2,5 % reaktivního modifikátoru. Vzhledem k typu zatížení – tedy pomalu se pohybující autobusové dopravě — je na vozovku kladen zvláštní zátěž z hlediska dopravního namáhání a zároveň hrozí akumulace tepla v celé asfaltové konstrukci. Pokládka probíhala v srpnu 2022 po dobu 2 dnů.

Po dokončení stavebního projektu byly provedeny další zkoušky deformačního chování za tepla a chování za chladu, a to na základě vzorků asfaltové směsi AC 16 B S odebraných přímo na místě a také na směsi AC 16 B S s pojivem 10/40-65 A, která byla analogicky vyrobena během stavebních prací.



Obrázek 2: Lokality projektu „Konstantin Platz in Trier“ (zdroj: OpenStreetMap) – obrázky staveniště (AC 16 BS) [zdroj: BASF]

Pokud jde o deformační vlastnosti, výsledky dříve provedených laboratorních testů byly konzistentní s asfaltovou směsí vyráběnou ve velkém měřítku. Vícenásobně modifikovaná asfaltová směs vykazuje výrazně nižší vyjeté koleje při 70 °C, a to po celou dobu zatěžovacího cyklu než referenční směs s pojivem PmB 10/40-65 A (obrázek 3).



Obrázek 3: Porovnání testů vyjetých kolejí příslušného AC 16 BS s PmB 10/40-65 a ko-modifikovaného s AS P101

Zkušební úsek (velký výrobce automobilů, logistický areál, Německo, 2024)

Jeden z největších výrobních závodů automobilky v Německu si stanovil cíl modernizovat svou stávající infrastrukturu a projevil zájem o využití tohoto specifického reaktivního modifikátoru za účelem vylepšení běžně používaného polymerem modifikovaného bitumenu (PmB) ve svém areálu. Cílem v rámci výběrového řízení projektu byla rekonstrukce rozsáhlé autobusové stanice v závodě Dingolfing

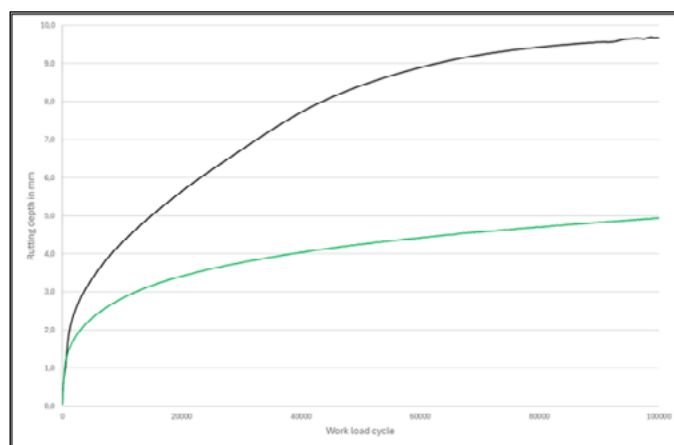
(Německo) a zároveň obnova jednoho jízdního pruhu určeného pro zásobování nákladními vozidly přímo v areálu.

Pro tento účel bylo 1 500 tun směsi AC 16 DS s obsahem 50 % recyklovaného asfaltu na bázi PmB 10/40-65 modifikováno přidáním 2,0 % přísady AS P101. Vzdálenost mezi obalovou asfaltových směsí a stavenišťem činila přibližně 120 km, přičemž asfaltová směs byla skladována po dobu minimálně 4 až 5 hodin před dalším zpracováním. Teplota při pokládce byla přibližně 160 °C, což i přes stupeň modifikace zajistilo vynikající zpracovatelnost a pokládku. Byl zaznamenán významný nárůst bodu měknutí, což je potvrzeno jak hodnotou T ($G = 15 \text{ kPa}$), tak i δ ($G = 15 \text{ kPa}$). Oba parametry ukazují, že bylo dosaženo vyššího stupně modifikace (tabulka 4). Hodnoty MSCR prokázaly, že bylo dosaženo pojiva vhodného pro extrémní dopravní zatížení a vyšší provozní namáhání.

Tabulka 4: Výsledky zkoušek asfaltového pojiva (extrahovaný bitumen ze zkušebních pokládek)

Parametry extrahovaného pojiva		PmB 10/40-65 + 50% RAP	PmB 10/40-65 + 50% RAP + 2% JAKO P101
Bod měknutí	T (°C)	64,4	86,0
BTSV ($G^* = 15 \text{ kPa}$)	T (°C)	59,72	72,4
	δ (°)	71,71	60,9
MSCRT (při 60 °C a 3,2 kPa)	Zotavení (%)	33,2	81,6
	Jnr (1/kPa)	0,821	0,018

Doplňkové zkoušky na úrovni asfaltové směsi prokázaly, že výkonnost testovaného asfaltu byla výrazně zlepšena díky vícenásobné modifikaci, a to zejména z hlediska odolnosti vůči deformacím za tepla. Zvláštní pozornost si zaslouží výrazné zlepšení výsledků zkoušek tvorby kolejí prováděných při upravené teplotě 70 °C, které potvrzují zvýšenou odolnost asfaltové směsi (obrázek 4).



Obrázek 4: Srovnání vyjetých kolejí příslušných AC 16 BS s PmB 10/40-65 a komodifikovaných s reaktivním modifikátorem AS P101

Závěr

V důsledku akumulace tepla během letních měsíců bude v dohledné době nezbytné přehodnotit namáhání vozovek a stávající návrh asfaltových směsí bude nutné nevyhnutelně upravit. Zvláštní pozornost si zaslouží městský sektor, tedy urbánní oblasti, které jsou přímo ovlivněny efektem městských tepelných ostrovů – právě zde je nutné posuzovat stávající konstrukce obzvláště kriticky. Současně s tím neustále narůstající podíl asfaltového recyklátu ve všech vrstvách vozovky, daný

společenskou snahou o zavádění cirkulární ekonomiky, klade nové požadavky na modifikaci bitumenu a asfaltu – tak, aby bylo možné dosáhnout širšího spektra požadovaných vlastností v různých teplotních profilech.

Cílem předložených zkoušek byla vícenásobná modifikace asfaltové směsi za účelem zlepšení její odolnosti vůči deformacím za tepla. Možnost použití reaktivní modifikační přísady (AS P101) k vylepšení hotového polymerem modifikovaného pojiva (PmB) prokázala na úrovni bitumenu, že reologické vlastnosti základního pojiva se výrazně posunuly směrem k asfaltové vrstvě odolné vůči deformacím.

Doplňkové zkoušky na úrovni asfaltové směsi ukázaly, že výkonnost testovaného asfaltu byla výrazně zlepšena díky vícenásobné modifikaci, a to především z hlediska odolnosti vůči deformacím při vysokých teplotách. Zvláštní důraz je třeba klást na výrazné zlepšení výsledků zkoušek tvorby kolejí, prováděných při upravené teplotě 70 °C, které potvrzují zvýšenou odolnost asfaltové směsi vůči teplotnímu zatížení.

Zdroje:

- [1] J Zhu, B Birgisson, N Kringos, *Polymer modification of bitumen: Advantages and challenges*, European Polymer Journal, 54 (2014) 18–38, <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.02.005>
- [2] A joint publication of Asphalt Institute & Eurobitume, The Bitumen Industry, A Global Perspective: Production, Chemistry, Use, Specification and Occupational Exposure, 2024, 4th edition, The-Bitumen-Industry-A-Global-Perspective-IS-230-4th-edition.pdf
- [3] J Li, Zhang Y, Zhang Y. *The research of GMA-g-LDPE modified Qinhuangdao bitumen*. Construction and Building Materials, 22(6) (2008), 1067–73, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.03.007>
- [4] L Zanzotto, J Stastna, O Vacin. *Thermomechanical properties of several polymer modified asphalts*. Applied Rheology, 10(3) (2000), 134–44, <https://doi.org/10.1515/arh-2000-0012>
- [5] SAM Hesp, TR Hoare, SD Roy. *Low-temperature fracture in reactive ethylene-terpolymer-modified asphalt binders*. International Journal of Pavement Engineering, 3(3) (2002), 153–9, <https://doi.org/10.1080/1029843021000067809>
- [6] G Polacco, J Stastna, D Biondi, F Antonelli, Z Vlachovicova, L Zanzotto. *Rheology of asphalts modified with glycidylmethacrylate functionalized polymers*. Journal of Colloid and Interface Science, 280(2) (2004), 366–73, <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.08.043>
- [7] FJ Navarro, P Partal, M García-Morales, FJ Martínez-Boza, C Gallegos. *Bitumen modification with a low-molecular-weight reactive isocyanate-terminated polymer*. Fuel 86(15) (2007), 2291–9, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.01.023>
- [8] MJ Martín-Alfonso, P Partal P, FJ Navarro, M García-Morales, C Gallegos. *Use of a MDI-functionalized reactive polymer for the manufacture of modified bitumen with enhanced properties for roofing applications*. European Polymer Journal, 44(5) (2008), 1451–61, <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2008.02.026>
- [9] MJ Martín-Alfonso, P Partal P, FJ Navarro, M García-Morales, C Gallegos. *Role of water in the development of new isocyanate-based bituminous products*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 47(18) (2008), 6933–40, <https://doi.org/10.1021/ie800243w>
- [10] FJ Navarro, P Partal, M García-Morales, MJ Martín-Alfonso, F Martínez-Boza, C Gallegos, *Bitumen modification with reactive and non-reactive (virgin and recycled) polymers: a comparative analysis*. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 15(4) (2009), 458–64, <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2009.01.003>
- [11] MJ Martín-Alfonso, P Partal, FJ Navarro, M García-Morales, JCM Bordado, AC Diogo. *Effect of processing temperature on the bitumen/ MDI-PEG reactivity*. Fuel Processing Technology, 90(4) (2009), 525–30, <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.01.007>
- [12] V Carrera, P Partal, M García-Morales, C Gallegos, A Páez. *Influence of bitumen colloidal nature on the design of isocyanate-based bituminous products with enhanced rheological properties*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 48(18) (2009), 8464–70, <https://doi.org/10.1021/ie9004404>
- [13] V Carrera, M Garcia-Morales, P Partal, C Gallegos. *Novel bitumen/ isocyanate-based reactive polymer formulations for the paving industry*. Rheologica Acta, 49(6) (2010), 563–72, <https://doi.org/10.1007/s00397-009-0399-z>
- [14] M Shivokhin, M García-Morales, P Partal, AA Cuadri, Gallegos C. *Rheological behaviour of polymer-modified bituminous mastics: a comparative analysis between physical and chemical modification*. Construction and Building Materials, 27(1) (2012), 234–40, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.055>

- [15] N Gomez, M Oeser, O Fleischel, *Chemical modification of bitumen with novel isocyanate-based additive to enhance asphalt performance*, Construction and Building Material 301 (2021) 124128 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124128>
- [16] A Alisov, Typisierung von Bitumen mittels instationärer Oszillationstheorie (2017), ISBN 978-3-932164-33-0, https://www.tu-braunschweig.de/fileadmin/Redaktionsgruppen/Institute_Fakultaet_3/ISBS/04_Forschung/Schriftenreihe_Strassenwesen/isbsheft33.pdf
- [17] J A D'Angelo, *The Relationship of the MSCR Test to Rutting*. Road Materials and Pavement Design 10 (1) (2009), 61–80, <https://doi.org/10.1080/14680629.2009.9690236>
- [18] J Zhang, LF Walubita, F Lubinda, ANM Faruk, P Karki, GS Simate. *Use of the MSCR test to characterize the asphalt binder properties relative to HMA rutting performance – A laboratory study*. Construction and Building Materials 94 (2015), 218–227, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.044>

PROPERTIES AND MECHANISM OF REACTIVE MODIFIERS TO ENHANCE AND UPGRADE PMBS FOR FLEXIBLE ASPHALT PAVEMENT

VLASTNOSTI A MECHANISMUS REAKTIVNÍCH MODIFIKÁTORŮ PRO ZVÝŠENÍ A ZLEPŠENÍ PMB PRO OHEBNOU ASFALTOVOU VOZOVKU

Dr. Olivier Fleischel, BASF SE, Germany

Jan Scharff, Prota sro, Czech Republic

Waldemar Schatz, BASF Polyurethane GmbH, Germany

A new class of reactive modifier based on isocyanate chemistry has been developed to modify bitumen, but direct use via a wet process is easily feasible at the asphalt mixing plant as well. Although the specification system for polymer modified bitumen revolves around the specific use of thermoplastic elastomers, liquid reactive polymers demonstrated promising results and are already in use in many European countries. The increase of mechanical and thermal stress on roads are responsible for the rapid deterioration of the asphalt layers. The most effective solution to face those challenges is the transformation of the asphalt binder and upgrading it to a material with better engineering properties. The aim of this paper is to present the advancement in the field of new additives for road construction, specifically for flexible asphalt pavement and how to enhance the overall properties, for instance, towards the rise of temperature over summertime (heat islands effect).

Byla vyvinuta nová třída reaktivních modifikátorů asfaltu založených na chemii isokyanátů. Jejich přímé použití prostřednictvím mokrého procesu je snadno proveditelné i na obalovně. Ačkoli se systém specifikací pro polymerem modifikovaný bitumen dosud soustředí především na použití termoplastických elastomerů, kapalně reaktivní polymery vykazují slibné výsledky a již nacházejí uplatnění v mnoha evropských zemích. Zvyšující se mechanické a tepelné namáhání vozovek vede k rychlejšímu zhoršování asfaltových vrstev. Nejefektivnějším způsobem, jak těmto výzvám čelit, je transformace asfaltového pojiva a jeho modernizace směrem k materiálu s pokročilejšími technickými vlastnostmi. Cílem tohoto příspěvku je představit aktuální pokrok v oblasti nových aditiv pro výstavbu vozovek, konkrétně pro pružné asfaltové kryty, a ukázat, jak lze zlepšit jejich celkové vlastnosti — například zvýšením odolnosti vůči vysokým teplotám v letním období (efekt tepelných ostrovů).

Introduction

Climate change poses a threat to the sustainable development of cities. The warming caused by climate change is about 50% to 150% greater in urban areas than in non-urban areas and is more pronounced in the South part of Europe. It leads to the formation of so-called urban heat islands, which results in significant temperature increases on road surfaces and many cities in Europe will experience more frequent extreme climate events. Among all, health issues are one of the major challenges, but also road infrastructure will suffer from such repeated heat waves. Indeed, these temperature rises lead to the need for more resilient transport infrastructure to avoid early rutting on the road surfaces. This brings up the question of whether today's asphalt roads meet future requirements and what possibilities exist to design or produce temperature-resistant asphalt layers.

Hence, additives were introduced to improve the overall properties of bitumen and of the resulting asphalt over the last 50 years. Zhu et al. [1] gave a non-exhaustive overview on the known modifications of bitumen binder prior to 2014. This publication gathers the advances and challenges in the field of bitumen polymer modification and covers many aspects of already published literature in this field. Furthermore, Eurobitume and the Asphalt Institute provided a complete list of additives in use in bitumen and asphalt mixes [2], and this gives already many tools to readapt the bitumen properties towards local requirements. Some aspects This paper's aim is to complement the existing know-how and to give some more details on actual search on reactive modification and functionalization of the bitumen binder.

Table 1: Overview of additives in use in bitumen and asphalt

Polymer and rubber modifiers	Fillers
Modification of bitumen with polymers is a well-established practice. Natural and synthetic polymers have been used to adjust bitumen properties since the early 20th century. More recently, many synthetic polymers have been utilized to enhance the properties of bitumen. Typical modifiers are: • Thermoplastic Elastomers (i.e. styrenic block copolymers (SBS, SEBS), polyolefin blends, thermoplastic polyurethane) • Thermoplastics/Plastomers (i.e. polypropylene (PP), polyethylene (PE), ethylene vinyl acetate (EVA)) • Elastomers (i.e. natural rubber, synthetic rubber, polybutadiene, butyl rubber) • Natural Polymers (i.e. lignin/cellulose) • Crumb Rubber (i.e. reclaimed tyres) • Reactive Elastomeric Terpolymers (i.e. glycidyl methacrylate copolymers)	The addition of special fillers or modifiers is used to improve stiffness and viscosity characteristics. This category includes: • Mineral fillers (i.e. limestone, fly ash and clay) • Adhesion promoters (i.e. hydrated lime) • Fibers (i.e. natural - cellulose, synthetic - polypropylene) • Natural asphalts (i.e. Trinidad Lake Asphalt, Gilsonite) • Recycled asphalt materials (i.e. recycled asphalt pavement and recycled asphalt shingles)
Chemical modifiers	Extending and blending agents
Chemical modification is often used to address specific performance attributes. Chemical additives include: • Adhesion promoters (e.g. fatty amine derivatives, imidazolines) • Surfactants, chemical lubricating additives or waxes for warm mix systems • Phosphorous compounds (e.g. phosphorous pentoxide, polyphosphoric acid) • Elemental sulphur • Maleic anhydride • Odor suppressants, scavengers, and masking agents	Adding extender agents is one of the oldest methods of modifying bitumen and it includes products like: • Waxes (e.g. synthetic, such as Fischer Tropsch; natural, such as Montan; and amide derivatives, such as ethylene bis-stearamide) • Biogenic additives (e.g. vegetable-based components)

[2] A joint publication of Asphalt Institute & Eurobitume, The Bitumen Industry, A Global Perspective: Production, Chemistry, Use, Specification and Occupational Exposure, 2024, 4th edition.

Of the polymers listed above, thermoplastic elastomers account for the most extensive use of polymers in bitumen modification. These products typically stiffen bitumen at high temperatures and make bitumen more flexible at low temperatures, giving bitumen the best range of properties to address desired performance characteristics depending on the end use. Although many of the polymer types listed above are used in the modified bitumen space, elastomeric polymers, such as SBS, have dominated the market for both paving and waterproofing applications. These polymeric additives generally range from 1-8% by weight of the bitumen, depending on the application, with typical levels being 3-5% by weight for Polymer modified Bitumen (PmB) used in the paving industry. SBS for PmB is indeed dominating the European market and the main requirement that now falls into the specification for PmB, the so-called elastic recovery, is specific to elastomeric modification with SBS and all specifications of PmB revolve around SBS modification. While many experts in the industry agree that the elastic recovery is a quality control test, this specific binder assessment has been included into the norm system to specify PmB. Not only into the specifications, but as well as in tenders and projects calls, one can see the requirements for elastic recovery being given and required for road infrastructure projects.

This frame limits the development of innovative additives that could have a similar performance into bitumen and asphalt, while not fulfilling the elastic recovery.

However, drawbacks exist with SBS, and the existing specification system limits further developments in the field of bitumen polymer modification. To solve some known issues many researchers have investigated diverse ways [1], like:

- sulfur vulcanization to improve storage stability
- addition of antioxidants to reduce oxidation of the bitumen binder
- adding hydrophobic clay mineral to improve storage stability and increase ageing resistance
- using reactive polymers to improve compatibility and enhance high temperature properties.

The combination of increased climate-related demands on the performance properties of asphalts and simultaneously increasing quotes of asphalt granulate - with the use of ready-to-use polymer-modified binder - represents a major challenge for asphalt mix producers. Especially, with high rates of recycled asphalt in all asphalt layers, the required level of modification of the asphalt mix reaches its limits via polymer-modified bitumen (PmB) delivered with a defined content of polymers. In addition to physical blends of bitumen and polymers, another well-known way to improve the binder properties is through chemical modification with reactive polymers, which was already disclosed in The Shell Bitumen Handbook, "The Modification of Bitumen by Reactive Chemistry".

Reactive polymers are examples that should not be excluded from any uses in bitumen. These reactive polymers are modifiers which react chemically with constituents of bitumen. It is believed that the reactive polymers will rather react with the polar fraction of bitumen (i.e. asphaltenes), rather than physically interact with the colloid phases of bitumen (Figure 1). Since the nature of an isocyanate modification is very different from an SBS elastomeric modification, the elastic recovery is obviously difficult to obtain. Providing a fine crosslinked polymeric network by modification with a polyurethane-precursor additive (Figure 1), small and discrete displacements can be compensated well (like the ones on roads), whereas withstanding very large displacements (like for the elastic recovery test) having no practical relevance cannot be achieved by the nature of the modification.

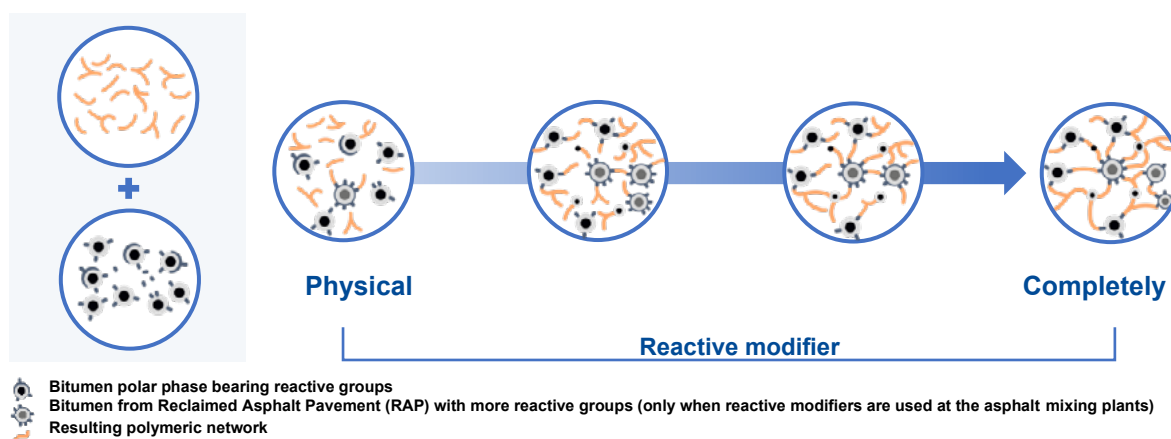


Figure 1: Representation of reactive modification of bitumen with multifunction reactive polymer and polymeric network formation. Source: BASF.

Reactive polymers described in the literature include reactive ethylene-based polymers (i.e. containing epoxy ring) and isocyanate-based polymers [3-15]. However, depending on the dosage rate and where such reactive polymers are used (to manufacture ready-made bitumen or for direct use at the asphalt mixing plant), these types of additives are falling into different categories and not only one as described in Table 1. A reactive modifier such as the polymeric reactive isocyanates are at the same time polymer modifiers, chemical additives, fillers enhancer/compatibilizer and combined the effect of extending agent. Such additive can be used as:

- polymeric modifier to stiffen the bitumen binder
- adhesion promoter
- odor suppressant (i.e. H₂S scavenger)
- Compatibilizer to add up to 50% of reclaimed asphalt
- Viscosity modifier or workability aid (possibility to produce warm mix asphalt)

Many studies were already published on reactive modifiers based on isocyanate chemistry [7-15]. It has been proven that isocyanate-based reactive polymers were able to increase the viscosity, improve the storage stability and rutting resistance of the resulting asphalt at elevated temperatures [8, 15].

Carrera *et al.* were the first to report in the literature the use of a certain type of polymeric reactive isocyanate to crosslink in-situ the bitumen constituents [15]. Moreover, following a certain process in bitumen, it is possible to modify a bitumen binder with polymeric isocyanate at lower mix production and laydown temperatures.

To solve the challenges of climate changes and to obtain a more resilient road infrastructure less prone to permanent deformation due to heat waves, it is however possible to combine the strengths of SBS polymers together with reactive polymeric modifiers. The aim of the study is to describe two paving trials: i) downtown Trier (Germany) on a lane specific to bus traffic; ii) on a logistic and manufacturing site of a large car maker (Germany).

Materials and methods

Materials

PmBs 10/40-65 and 25/55-55, commercially available, were purchased from different bitumen suppliers or collected directly at the asphalt mixing plant. Those PMBs were modified with a reactive modifying additive, based on a specific polymeric isocyanate (AS P101) obtained from BASF SE, or the modified bitumen binder was extracted from the asphalt mix produced on site. The main properties of the additive (AS P101) are listed in Table 2.

Table 2: Main properties of the additive (AS P101)

Properties AS P101	
Chemical composition	isocyanate-based
Density (25 °C)	1,2 g/cm³
Physical form	Black liquid

Methods

The European standard to specify bitumen is based on penetration grade bitumen (EN 13924 and EN 12591). For unmodified bitumen, two parameters are so far necessary to categorize bitumen: the softening point Ring&Ball and the needle penetration. Further developments are ongoing to introduce new testing like the Binder-fast-characterization-tests (BTSV). However, the BTSV method is usually well suited for unmodified bitumen, but non-accurate correlations were often observed in the case of modified bitumen with SBS.

The DSR (Anton Paar MCR 702 Multidrive and SmartPave 101) was used to run the novel Binder-Fast-Characterization-Test (or BTSV according to its German abbreviation). These tests were selected to assess the effect that the additive has on the bitumen on a wide range of temperatures and frequencies. All tests were performed within the linear visco-elastic (LVE) range, and with a plate-plate measuring system (with a diameter of 25 mm). Softening point Ring&Ball and the characteristic temperatures $T(G^* = 15 \text{ kPa})$ as well as corresponding phase angles $\delta(G^* = 15 \text{ kPa})$ (Binder-fast-characterization-tests, BTSV) were determined for each binder. The novel BTSV-test [18] was chosen since it has gained popularity in Germany and could soon replace the German specification procedure, which is still mainly relying on the needle penetration test and softening point test. In this test, the complex shear modulus and phase angle are measured while the temperature is increased from 20 °C to 90 °C at a rate of 1.2 K/min. The test is done with the 25 mm plate-plate geometry at a constant oscillatory shear stress of 500 Pa in stress-controlled mode, at a constant frequency of 10 rad/s. The temperature and phase angle at which the complex shear modulus reaches 15 kPa are the parameters used to characterize the binder. The temperature could be seen as the upper limit of the elastoplastic behavior of the binder and serves as the softening point, in this case determined through rheology. While the corresponding phase angle (δ BTSV) provides information of the ratio between elastic and viscous behavior and can serve as an indicator of the degree of modification when binder modifiers are used. In [24], three modification levels are defined: unmodified (δ BTSV > 75 °), moderately modified ($65^\circ < \delta$ BTSV < 75 °), and highly modified (δ BTSV < 65 °).

To investigate the deformation behavior of bitumen, the multiple stress creep and recovery test (MSCRT) was used. The MSCRT is carried out in accordance with DIN EN 16659. This test is performed

with a DSR and the 25 mm plate geometry. During the test the measuring gap is 1 mm. In Germany, the MSCRT is performed at 60 °C, since this is the relevant temperature for rutting. The bitumen specimen is loaded by a creep phase lasting one second and a recovery phase lasting nine seconds. During the creep phase, a shear stress of 3,2 kPa is applied and during the recovery phase there is no stress applied. In the MSCRT, a total of ten cycles are performed, each consisting of a creep and recovery phase. The final results of the MSCRT are the arithmetical mean values of the recovery (R) and the non-recoverable creep compliance (J_{nr}) of all ten loading and unloading phases. R is the ratio of the viscoelastic strain from the maximum strain for each cycle. With R a bitumen modification with polymers can be identified and quantified. J_{nr} is the non-recovered strain after a complete cycle, related to the applied shear stress. The J_{nr} parameter can be used to analyze rutting performance because it shows a good correlation with asphalt rutting tests [17-18].

To classify PmBs, the elastic recovery according to DIN EN 13398 is used. To investigate elastic recovery, the bitumen specimens are stretched and cut. The recovery of the bitumen threads is then measured. The elastic recovery test is carried out on bitumen specimens produced in casting molds as described in DIN EN 13398. For the elastic recovery test, a special device called ductilometer is used. The ductilometer is needed to control the temperature and the extension speed during the test. The temperature during the test is 25 °C and the bitumen specimens are conditioned for 90 min. After the Conditioning the specimens are stretched to a length of 200 mm at a constant extension speed of 50,0 mm/min. Within 10 seconds after reaching the extension length, the bitumen specimen is cut in the middle with a pair of scissors. This results in the formation of two bitumen threads, the distance between them is measured after 30 minutes. The elastic recovery R_E corresponds to the percentage ratio of the distance between the bitumen threads and the extension length. If the bitumen specimen fails before the extension length of 200 mm, it is possible to determine R_E with the actual extension length. R_E is used to distinguish Pmb from unmodified bitumen.

Results

Field Trials

Konstantin Platz, Trier (Germany, August 2022)

The aim of the first investigations at lab scale was the multi-modification of an asphalt mix to improve the deformation resistance under heat and high load (typical for buses station and logistic surfaces). The possibility to use a reactive-modifying additive for upgrading a ready-to-use PmB 25/55-55 A has shown at bitumen level that the rheological properties of the base bitumen (PmB 25/55-55 A) shift significantly in the direction of deformation resistant asphalt layer. Characteristic values can be achieved, some of which are significantly higher than those of a typical PmB type of binder (Table 3). For the purpose of the study and as comparative example, a PmB 10/40-65, supposedly with a higher load of SBS polymer, was evaluated as well.

Table 3: Bitumen binder test results (lab trials)

	EP R&B [°C]	T($G^* = 15$ kPa) BTSV [°C]	Phase angle δ ($G^* = 15$ kPa) - BTSV [°]	Elastic Recovery [%]
10/40-65	72,2	66,6	66,4	69
25/55-55 (Supplier A)	60,4	61,0	72,7	72
25/55-55 (Supplier A) + 2,5 M.-% (AS P101)	74,6	70,3	62,8	72
25/55-55 (Supplier B)	61,0	61,2	69,2	75
25/55-55 (Supplier B) + 2,5 M.-% (AS P101)	81,4	71,5	55,7	77

As part of the construction project "Konstantinplatz" in Trier (Germany), the concept of multi-modification was implemented in practice (Figure 2). During the partial renewal of a pavement section, an asphalt surface course made of AC 8 D S and an asphalt binder course made of AC 16 B S were produced from a PmB 25/55-55 A with an additional 2,5 % of a reactive modifier. Due to the type of loads for the road with slow-moving bus traffic, there is a particular burden on traffic's type and the risk of accumulated heat for the entire asphalt pavement. The installation took place in August 2022 for 2 days.

Following the construction project, further investigations into the deformation behavior under heat and cold behavior were carried out from the asphalt mix samples of AC 16 B S collected on site and AC 16 B S with 10/40-65 A produced analogously during the construction process.



Figure 2: „Konstantin Platz in Trier“ project location (source: OpenStreetMap) – Job site pictures (AC 16 BS), Source: BASF

Regarding the deformation properties, the results of the laboratory tests previously carried out were consistent towards the asphalt mix produced on a large scale. The multi-modified asphalt mix shows a significantly lower rutting at 70 °C, over the entire load cycle than the reference mix with the binder PmB 10/40-65 A (Figure 3).

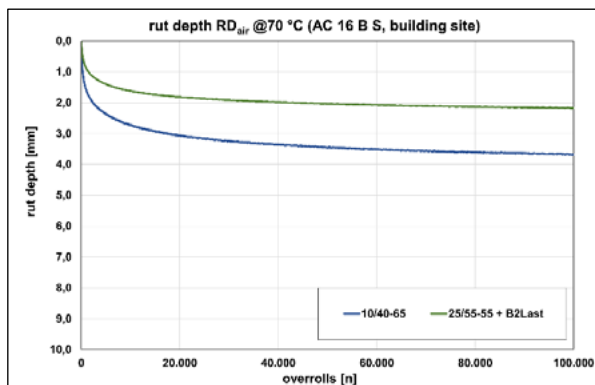


Figure 3: Comparison of the rutting tests of the respective AC 16 BS with PmB 10/40-65 and co-modified with AS P101.

Field Trial (Large auto maker, logistic site, Germany, 2024)

One of the largest manufacturing plants of a car maker in Germany had the aim to upgrade its actual infrastructure and was interested in using this specific reactive modifier to improve the typical PmB in use on their site. The purpose within the project tender was to repave their actual large bus stations area at Dingolfing site (Germany), as well as renewing one lane dedicated to trucks deliveries on site.

For this purpose, 1500 tons of AC 16 DS with 50% of Reclaimed asphalt based on a PmB 10/40-65 were modified with 2,0% of the AS P101 additive. The distance between the asphalt mixing plant and the construction site was about 120 km and the asphalt mix was stored for at least 4 to 5 hours before being handled further. The laydown temperature was approximately 160°C, leading to excellent workability and laydown despite the degree of modification.

A significant increase of the softening point can be noticed which is confirmed by the temperature T ($G^* = 15 \text{ kPa}$) as well as the phase angle δ ($G^* = 15 \text{ kPa}$), which show that a further degree of modification

has been achieved (Table 4). The MSCR values demonstrated that a binder for extreme traffic and higher load has been reached.

Table 4: Bitumen binder test results (extracted bitumen from production trials)

Parameters of extracted bitumen		PmB 10/40-65 + 50% RAP	PmB 10/40-65 + 50% RAP + 2% AS P101
Softening point	T [°C]	64,4	86,0
BTSV (G* = 15kPa)	T [°C]	59,72	72,4
	δ [°]	71,71	60,9
MSCRT (at 60°C and 3,2 kPa)	Recovery [%]	33,2	81,6
	J _{nr} [1/kPa]	0,821	0,018

The additional investigations at the asphalt level showed that the performance of the tested asphalt has been significantly improved by the multi-modification regarding the deformation resistance at heat. In particular, the significant improvements in the results of the track formation tests at an adapted temperature of 70 °C should be again emphasized (Figure 4).

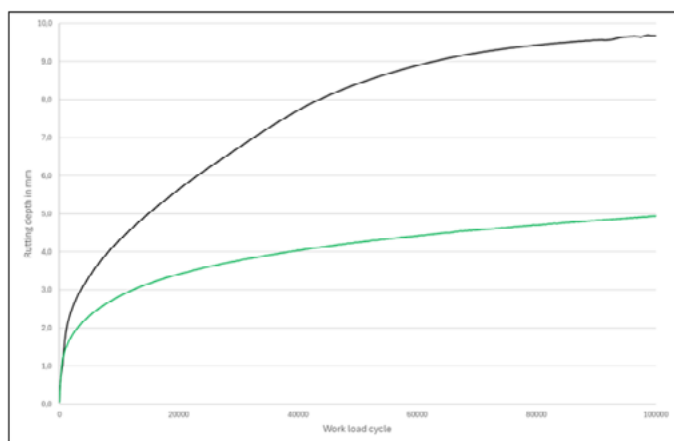


Figure 4: Comparison of the rutting tests of the respective AC 16 BS with PmB 10/40-65 and co-modified with reactive modifier AS P101.

Conclusion

Due to cumulated heat increases over summertime, stresses on roads will have to be reassessed in a foreseeable future and the existing asphalt design will inevitably have to be adapted. Especially the municipal sector (i.e. urban area) that is directly affected by the heat island effect, is to be viewed particularly critically. At the same time, the inevitably increasing proportion of asphalt granulates in all asphalt layers in the scope of a societal will to implement more circularity, makes it necessary to modify bitumen/asphalt to achieve a broader range of properties at different temperature profiles.

The aim of the investigations presented here was the multi-modification of an asphalt mix to improve the deformation resistance under heat. The possibility to use a reactive-modifying additive (AS P101) for upgrading a ready-to-use PmB has shown at bitumen level that the rheological properties of the base bitumen shift significantly in the direction of deformation resistant asphalt layer.

The additional investigations at the asphalt level showed that the performance of the tested asphalt has been significantly improved by the multi-modification regarding the deformation resistance at heat. In particular, the significant improvements in the results of the track formation tests at an adapted temperature of 70 °C should be emphasized.

References:

- [1] J Zhu, B Birgisson, N Kringos, *Polymer modification of bitumen: Advantages and challenges*, European Polymer Journal, 54 (2014) 18-38, <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.02.005>
- [2] A joint publication of Asphalt Institute & Eurobitume, The Bitumen Industry, A Global Perspective: Production, Chemistry, Use, Specification and Occupational Exposure, 2024, 4th edition, [The-Bitumen-Industry-A-Global-Perspective-IS-230-4th-edition.pdf](https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.02.005)
- [3] J Li, Zhang Y, Zhang Y. *The research of GMA-g-LDPE modified Qinhuangdao bitumen*. Construction and Building Materials, 22(6) (2008), 1067–73, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.03.007>
- [4] L Zanzotto, J Stastna, O Vacin. *Thermomechanical properties of several polymer modified asphalts*. Applied Rheology, 10(3) (2000), 134–44, <https://doi.org/10.1515/arh-2000-0012>
- [5] SAM Hesp, TR Hoare, SD Roy. *Low-temperature fracture in reactive ethylene-terpolymer-modified asphalt binders*. International Journal of Pavement Engineering, 3(3) (2002), 153–9, <https://doi.org/10.1080/1029843021000067809>
- [6] G Polacco, J Stastna, D Biondi, F Antonelli, Z Vlachovicova, L Zanzotto. *Rheology of asphalts modified with glycidylmethacrylate functionalized polymers*. Journal of Colloid and Interface Science, 280(2) (2004), 366–73, <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.08.043>
- [7] FJ Navarro, P Partal, M García-Morales, FJ Martínez-Boza, C Gallegos. *Bitumen modification with a low-molecular-weight reactive isocyanate-terminated polymer*. Fuel 86(15) (2007), 2291–9, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.01.023>
- [8] MJ Martín-Alfonso, P Partal P, FJ Navarro, M García-Morales, C Gallegos. *Use of a MDI-functionalized reactive polymer for the manufacture of modified bitumen with enhanced properties for roofing applications*. European Polymer Journal, 44(5) (2008), 1451–61, <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2008.02.026>
- [9] MJ Martín-Alfonso, P Partal P, FJ Navarro, M García-Morales, C Gallegos. *Role of water in the development of new isocyanate-based bituminous products*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 47(18) (2008), 6933–40, <https://doi.org/10.1021/ie800243w>
- [10] FJ Navarro, P Partal, M García-Morales, MJ Martín-Alfonso, F Martínez-Boza, C Gallegos, *Bitumen modification with reactive and non-reactive (virgin and recycled) polymers: a comparative analysis*. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 15(4) (2009), 458–64, <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2009.01.003>
- [11] MJ Martín-Alfonso, P Partal, FJ Navarro, M García-Morales, JCM Bordado, AC Diogo. *Effect of processing temperature on the bitumen/ MDI-PEG reactivity*. Fuel Processing Technology, 90(4) (2009), 525–30, <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.01.007>
- [12] V Carrera, P Partal, M García-Morales, C Gallegos, A Páez. *Influence of bitumen colloidal nature on the design of isocyanate-based bituminous products with enhanced rheological properties*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 48(18) (2009), 8464–70, <https://doi.org/10.1021/ie9004404>
- [13] V Carrera, M Garcia-Morales, P Partal, C Gallegos. *Novel bitumen/ isocyanate-based reactive polymer formulations for the paving industry*. Rheologica Acta, 49(6) (2010), 563–72, <https://doi.org/10.1007/s00397-009-0399-z>
- [14] M Shivokhin, M García-Morales, P Partal, AA Cuadri, Gallegos C. *Rheological behaviour of polymer-modified bituminous mastics: a comparative analysis between physical and chemical modification*. Construction and Building Materials, 27(1) (2012), 234–40, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.055>
- [15] N Gomez, M Oeser, O Fleischel, *Chemical modification of bitumen with novel isocyanate-based additive to enhance asphalt performance*, Construction and Building Material 301 (2021) 124128 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124128>
- [16] A Alisov, Typisierung von Bitumen mittels instationärer Oszillationstheorie (2017), ISBN 978-3-932164-33-0, https://www.tu-braunschweig.de/fileadmin/Redaktionsgruppen/Institute_Fakultaet_3/ISBS/04_Forschung/Schriftenreihe_Strassenwesen/isbsheft33.pdf
- [17] J A D'Angelo, *The Relationship of the MSCR Test to Rutting*. Road Materials and Pavement Design 10 (1) (2009), 61–80, <https://doi.org/10.1080/14680629.2009.9690236>
- [18] J Zhang, LF Walubita, F Lubinda, ANM Faruk, P Karki, GS Simate. *Use of the MSCR test to characterize the asphalt binder properties relative to HMA rutting performance – A laboratory study*. Construction and Building Materials 94 (2015), 218–227, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.044>

PŘEDPOVĚĎ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ ASFALTOVÝCH SMĚSÍ: ZÁKLADNÍ STUDIE LINEÁRNÍ A NELINEÁRNÍ REGRESE VE SROVNÁNÍ S MODELOVÁNÍM POMOCÍ NEURONOVÝCH SÍTÍ

MECHANICAL PERFORMANCE PREDICTION OF ASPHALT MIXTURES: A BASELINE STUDY OF LINEAR AND NON-LINEAR REGRESSION COMPARED WITH NEURAL NETWORK MODELING

prof. Nicola Baldo, Dr. Fabio Rondinella, Fabiola Daneluz, katedra inženýrství a architektury, University of Udine, Itálie

doc. Ing. Jan Valentin, Ph.D., Ing. Pavla Vacková, Ph.D., ČVUT v Praze, Fakulta stavební

prof. Marcin D. Gajewski, doc. Ing. Jan B. Król, Ph.D., TU ve Varšavě, Fakulta stavební

Přesné predikce mechanických vlastností asfaltových směsí mají zásadní význam pro zlepšení běžných postupů navrhování směsí a pro optimalizaci vlastností i životnosti vozovek. Výzkum prezentovaný v článku se zaměřuje na tuto problematiku pomocí srovnávací analýzy různých přístupů prediktivního modelování: konvenčních lineárních i nelineárních regresí a umělých neuronových sítí. První z nich jsou široce používány, ale mohou postrádat flexibilitu pro zachycení komplexních vztahů mezi zkušebními podmínkami a vyvolaným mechanickým chováním. Druhé představují slibnou alternativu díky své schopnosti úspěšně modelovat nelineární interakce mezi proměnnými. Tento výzkum porovnává přesnost predikce těchto různých modelovacích přístupů na základě experimentálních dat získaných ze čtyřbodové zkoušky (4PB-PR) provedených při několika teplotách a zatěžovacích frekvencích. Výsledky naznačují, že neuronové sítě překonávají konvenční regresní modely při zaznamenání komplexních vztahů, zdůrazňují silné stránky a omezení jednotlivých přístupů modelování a poskytují poznatky pro výběr optimálních modelů v aplikacích pro navrhování asfaltových vozovek.

Accurate predictions of asphalt mixtures' mechanical performance are crucial to improve the conventional mix-design procedures and to optimize both pavements' performance and service life. This research explores this issue by means of a comparative analysis between different modeling approaches: conventional regressions, both linear and non-linear, and artificial neural networks. The former are widely used but may lack the flexibility to capture complex relationships between testing conditions and the corresponding mechanical behavior. The latter represent promising alternatives due to their capability to successfully model non-linear interactions between variables. This research compares the predictive accuracy of these different modeling approaches using experimental data resulting from 4-point bending tests carried out under several temperatures and loading frequencies. The outcomes suggest that neural networks outperform conventional regression models in capturing complex relationships, highlighting the strengths and limitations of each modeling approach and providing insights for selecting optimal models in road pavement design engineering applications.

Úvod

Aby bylo možné určit, zda lze navrženou asfaltovou směs považovat za vhodnou pro použití v konstrukcích vozovek, je třeba vyhodnotit její mechanické chování z hlediska některých výkonových parametrů [1, 2]. Jednu z důležitých funkčních charakteristik představuje modul tuhosti, jehož experimentální stanovení vyžaduje použití nákladných laboratorních zařízení, poměrně složitých vyšetření a vyškoleného laboranta nebo operátora schopného dodržovat požadované zkušební postupy [3, 4]. V poslední době se především vědecké týmy snaží vyvinout prediktivní modely pro stanovení řady výkonových parametrů, a to jak pomocí fyzikálně založených konstitutivních rovnic, tak pomocí nefyzikálních postupů založených na datech a pravděpodobnostních úlohách. První z nich se opírají o rovnice mechaniky materiálů, zatímco druhé o techniky tzv. soft-computing¹, které nejsou závislé na

¹ Použijeme-li pro jednoduché osvětlení údaje uvedené na Wikipedii, potom soft computing představuje souhrnný pojem, který se používá k popisu takových algoritmů, které vytvářejí přibližná řešení neřešitelných problémů vysoké úrovně v informatice. Tradiční algoritmy pro tvrdé výpočty se při řešení problémů často do značné míry spoléhají na konkrétní data a matematické modely. Pojem soft computing vznikl koncem 20. století a v tomto období měkké výpočty výrazně ovlivnil revoluční výzkum ve třech oblastech. Fuzzy logika je výpočetní paradigma, které se zabývá nejistotami v datech pomocí úrovně pravdivosti namísto rigidních 0 a 1 v binárním systému. Dále neuronové sítě, což jsou výpočetní modely ovlivněné funkcemi lidského mozku. A konečně evoluční výpočet je termín, který popisuje skupiny algoritmů napodobujících přírodní procesy, jako je evoluce a přírodní výběr.

konkrétních zkoumaných jevech [5–13]. Podle kvality výchozího souboru dat, jeho variability a konkrétního cíle analýzy poskytuje odborná literatura mnoho alternativních technik soft-computing pro přístup k různým jevům [14–18]. Zaměříme-li se zejména na konstrukci vozovek, lze v rámci vědecké literatury nalézt mnoho studií, které prokazují možnost přesné predikce fyzikálně-mechanických parametrů asfaltových směsí pro účely pokládky asfaltových vozovek pomocí metodik založených na datech [19–21].

Jako příklad lze uvést několik případových studií. Pattanaik et al. [22] zavedli model založený na hřebenové regresi (L2 regularizaci) pro předpověď parametru ztráty protismykových vlastností ve směsích obsahujících ocelářskou strusku z elektrických obloukových pecí. Tiwari et al. [23] podobně navrhli predikční model založený na architektuře rozhodovacích stromů k předpovědi několika parametrů souvisejících s mechanickým chováním různých asfaltových směsí při jejich použití ve vozovkách; následně Wang et al. vyvinul [24] umělé neuronové sítě a další algoritmy strojového učení zaměřené na předpověď parametrů komplexního modulu a fázového úhlu k popisu viskoelastického chování asfaltových směsí.

Hlavním cílem studie prezentované v tomto příspěvku proto bylo ověřit možnost předpovědi tuhosti dvou různých asfaltových směsí pomocí různých metodik založených na datech, aby bylo možné charakterizovat jejich mechanické chování. Konkrétně byly zkoumány konvenční lineární regresní techniky, nelineární polynomiální regresní techniky a moderní metodiky umělých neuronových sítí s cílem určit nejvhodnější model pro splnění tohoto úkolu.

Soubor dat použitý k trénování, ověřování a testování vyvinutých modelů je výsledkem laboratorního testování čtyřbodovou zkouškou (4PB-PR), která byla provedena na dvou různých asfaltových směsích připravených ze spilitického kameniva, vápencového fileru a běžného silničního asfaltu. Tyto směsi byly testovány pro několik kombinací teplot a frekvencí zatížení, které byly považovány za reprezentativní pro zimní i letní podmínky spolu s pomalou i rychlou dopravou.

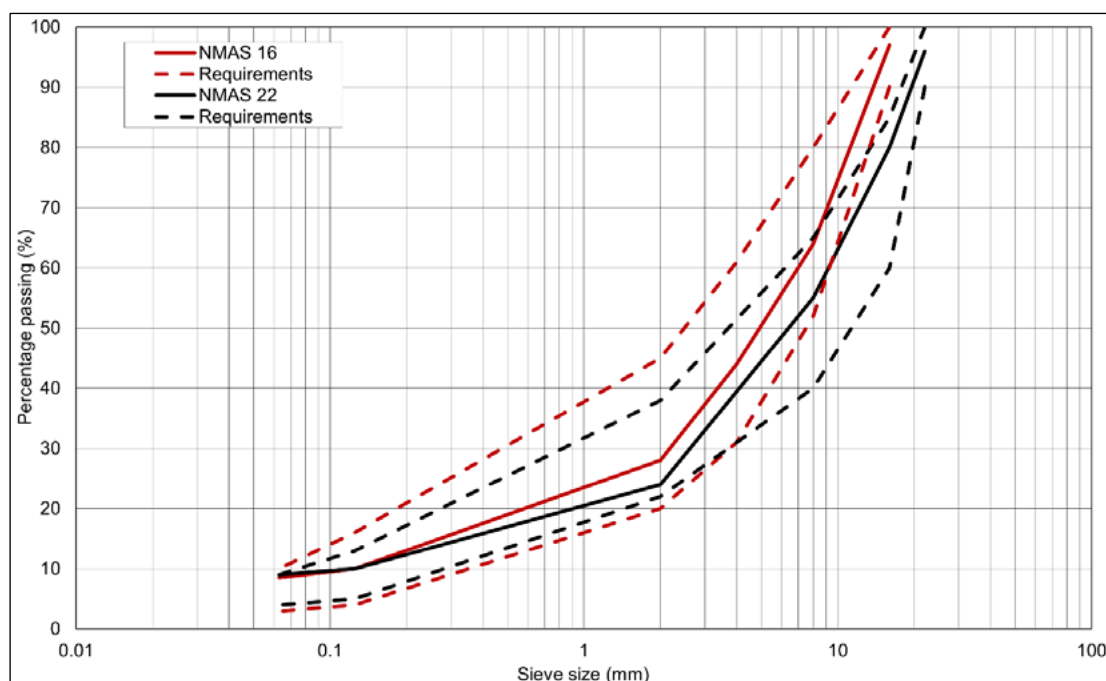
Výsledky zdůraznily, že všechny navržené metodiky strojového učení založené na datech dosáhly uspokojivých výsledků, což prokázalo jejich schopnost úspěšně modelovat interakce mezi uvažovanými proměnnými. Umělé neuronové sítě však překonaly konkurenční modely a dosáhly nejlepších parametrů jak z hlediska nejmenších chybových metrik, tak z hlediska nejvyšších korelačních koeficientů mezi předpovídanými a experimentálně pozorovanými hodnotami.

Materiály a metody

Experimentální údaje

V rámci této studie jsou zkoumány dvě alternativní asfaltové směsi. Byly připraveny ze spilitického kameniva s různou maximální jmenovitou velikostí kameniva: jedna byla určena pro ložní vrstvu a měla maximální zrno 16 mm, zatímco druhá byla určena pro podkladní vrstvu a měla maximální zrno 22 mm. Obě směsi byly připraveny s použitím vápencového fileru a silničního asfaltu, který splňoval požadavky stanovené specifikací ČSN EN 12591 [25]. Vyznačoval se penetrací při 25 °C rovnou 59 mm/10, bodem měknutí 50,6 °C a bodem lámavosti podle Fraasse -11 °C. Po krátkodobém stárnutí vykazoval asfalt zbytkovou penetraci 41 % a bod měknutí 54,2 °C.

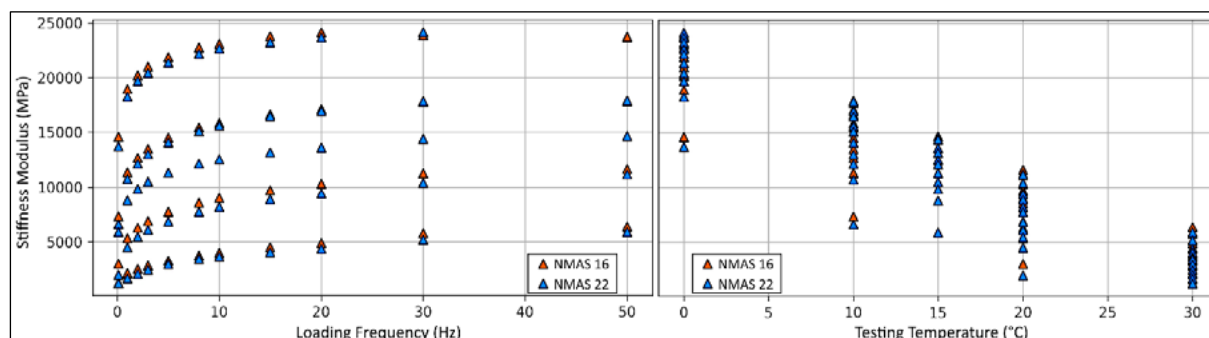
Návrh směsi byl proveden podle specifikací stanovených v rámci ČSN 73 6121 [26] a křivky zrnitosti spolu s mezními čarami zrnitosti jsou uvedeny na obrázku 1. Obě směsi byly charakterizovány také z objemového hlediska obsahem pojiva, mezerovitostí, zhuťnou objemové hmotnosti, odolností proti účinkům vody a tuhostí IT-CY při 15 °C: výsledky pro směsi ACL 16+ a ACP 22+ byly 4,5 %-hm. a 4,2 %-hm. (obsah pojiva), 5,2 % a 5,3 % (mezerovitost), 2,417 g/cm³ a 2,421 g/cm³ (objemová hmotnost), 84 % a 81 % (hodnota ITSR) a 7537 MPa a 8257 MPa (tuhost IT-CY).



Obrázek 1: Křivky zrnitosti obou směsí, vč. mezí dle ČSN 73 6121

Příloha B normy ČSN EN 12697-26 [27] poskytla veškeré podrobné informace o přístrojích a metodice, které byly použity při provádění rozsáhlé experimentální kampaně čtyřbodové zkoušky ohybem.

Vzhledem k tomu, že předpisy nestanovují hodnoty frekvence nebo teploty, které je třeba zkoušet, byly výsledky komplexního modulu tuhosti vyhodnoceny za podmínek, které skutečně reprezentovaly několik stavů, jimž je vozovka vystavena, tj. zimní a letní teploty a pomalá a rychlá doprava. Konkrétně se zkušební teploty pohybovaly v rozmezí od 0 °C do 30 °C, zatímco frekvence zatěžování se pohybovala od 0,1 Hz do 50 Hz, což vedlo k 99 pozorováním modulů tuhosti, které se zvyšovaly s rostoucí frekvencí zatěžování a snižovaly s rostoucí zkušební teplotou v rozmezí od 1 222 MPa do 24 133 MPa.



Obrázek 2: Grafické znázornění pozorovaných hodnot komplexního modulu tuhosti

Hlavním cílem následujících numerických operací bude vytvoření přesných regresních modelů schopných předpovědět závislou proměnnou komplexního modulu tuhosti na nezávisle proměnných, jako je frekvence a teplota spolu s kategoriální proměnnou, která byla účelně zvolena pro rozlišení obou posuzovaných směsí. Tento přístup by mohl umožnit komplexní mechanickou charakterizaci obou zkoumaných směsí, přičemž předpovězené hodnoty tuhosti by bylo možné snadno začlenit do běžných operací navrhování asfaltových směsí.

Výpočetní rámec

Statistická metoda konvenčně používaná k modelování vztahu mezi závislou proměnnou a jednou nebo více nezávisle proměnnými je známá jako lineární regrese. Ve své nejjednodušší podobě zahrnuje lineární regrese předpovídanou proměnnou:

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x \quad (1)$$

kde $\hat{y}$ představuje predikovanou závisle proměnnou, x je nezávisle proměnná, β_0 je konstantní člen udávající posunutí přímky po ose y a β_1 je směrnice tečny. Rozdíl mezi pozorovanou (y) a předpovídanou ($\hat{y}$) hodnotou se obvykle označuje jako ε a představuje chybu. Hlavním cílem lineárního regresního modelu je najít nejlépe odpovídající přímku nejmenších součtu čtvercových rozdílů mezi pozorovanými a předpovídanými hodnotami [28]. Tato metoda je také známá jako OLS (*Ordinary Least Squares*; metoda nejmenších čtverců) a lze ji rozšířit na vícenásobnou lineární regresi pro více nezávisle proměnných, přičemž každá proměnná přispívá koeficientem udávajícím její individuální vliv na cílovou proměnnou [29].

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i \quad (2)$$

Uvažujeme-li soubor dat m nezávislých pozorování, stává se hlavním cílem vícenásobné regrese minimalizace tzv. reziduálního součtu čtverců (RSS):

$$RSS = \sum_{j=1}^m (\beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_{i,j} - y_i)^2 \quad (3)$$

Díky jednoduchosti a dobré interpretaci lineární regrese je tato metoda široce použitelná, i když v průběhu let bylo vyvinuto několik vylepšení, konkrétně například regularizační techniky Ridge (L2) a Lasso (L1) [30]. Regularizace zvyšuje schopnost modelu generalizovat na nová data a velkého uplatnění nalezla právě v oblasti umělých neuronových sítí. Obě metody přidávají ke standardní ztrátové funkci lineární regrese penalizační člen, který pomáhá zabránit nadměrnému přizpůsobení a zlepšuje schopnost modelu generalizovat nová data. Konkrétně Ridge regrese (RR) – někdy též hřebenová – zavádí do ztrátové funkce penalizační člen L2, který představuje součet čtvercových koeficientů.

$$Ztrátová funkce_{RR} = RSS + \alpha \sum_{j=1}^m \beta_j^2 \quad (4)$$

Tento člen nutí model redukovat regresní koeficienty směrem k nule a síla regularizace je určena hyperparametrem α , který řídí kompromis mezi složitostí modelu a přizpůsobením trénovacích dat [30]. Obecně totiž strojové učení pracuje nejen s reálně naměřenými daty, ale i se souborem tzv. trénovacích dat, kterými se algoritmus/model učí a vylepšuje. Naproti tomu Lasso regrese (LR) zavádí do ztrátové funkce penalizační člen L1, který představuje součet absolutních hodnot koeficientů.

$$Ztrátová funkce_{LR} = RSS + \alpha \sum_{j=1}^m |\beta_j| \quad (5)$$

Tato regularizace umožňuje, aby se některé koeficienty staly přesně nulovými, čímž se v případě potřeby účinně provede selekce příznaků [30]. Také v tomto případě je síla regularizace určena hyperparametrem α .

Alternativní přístup vhodný k zachycení nelineárních interakcí mezi daty spočívá ve vícenásobné nelineární polynomiální regresi [31], která se často používá k modelování složitých vztahů mezi závisle proměnnou a více nezávisle proměnnými a to pomocí fitování polynomiální rovnice různých stupňů. Předpovídanou cílovou proměnnou lze reprezentovat následujícím způsobem:

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{22} x_2^2 + \dots + \beta_n x_n^k \quad (6)$$

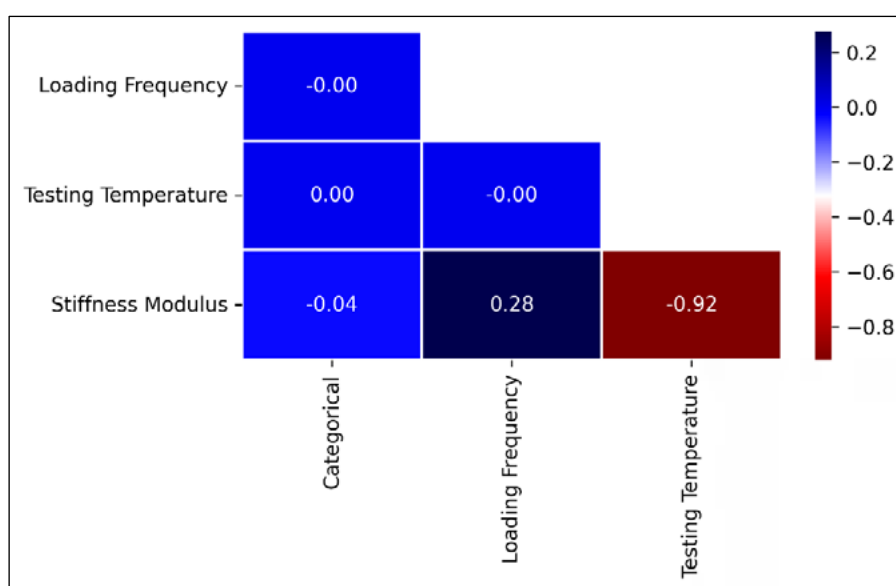
kde $\hat{y}$ je cílová proměnná, $x_1, x_2, \dots, x_n$ jsou nezávislé proměnné, $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n$ jsou koeficienty modelu a k představuje stupeň polynomu. Tento přístup poskytuje vyšší flexibilitu při přesném přizpůsobení složitých souborů dat úpravou stupně polynomu a zavedením interakčních členů [31].

V posledním desetiletí zavedení pojmu umělý neuron a následné neuronové sítě poskytly jiný přístup k řešení regresních problémů na základě algoritmů strojového učení založených na datech [32]. Na rozdíl od běžných regresních metodik, které se opírají o popsané matematické rovnice, umělé neuronové sítě (ANN) využívají vstupní, skryté a výstupní vrstvy vzájemně propojených neuronů k modelování komplexních vztahů mezi vstupy a výstupy. Toto fungování je inspirováno fungováním biologického lidského mozku a umožňuje učení složitých vzorců jako výsledek trénovacího procesu, který spočívá v iterativních úpravách vah spojení s cílem minimalizovat chybu predikce [33]. Schopnost zachytit i nelineární interakce v datech činí z ANN přesný a flexibilní nástroj: tato flexibilita však vyžaduje pečlivé ladění hyperparametrů (např. rychlosti učení, algoritmu učení, počtu skrytých neuronů a jejich

aktivační funkce), aby se předešlo problémům s nadměrným přizpůsobením se modelu, a tedy neúměrným nadhodnocením očekávané závislosti [34]. Iteraci po iteraci se výsledek výpočtů neuronového modelu určuje na základě následující rovnice:

$$f(X) = W_2[f_a(W_1X)] \quad (7)$$

Vstupní proměnné jsou reprezentovány $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, zatímco f_a představuje aktivační funkci, kterou je vybavena skrytá vrstva. W_1 a W_2 představují matice vah a zkreslení, které spojují vstupní vrstvu se skrytou, resp. skrytou vrstvu s výstupní. Jsou iterativně aktualizovány podle korekcí provedených implementovaným trénovacím algoritmem. Nejrobustnější algoritmy, stejně jako nejčastěji používané aktivační funkce, jsou dobře zdokumentovány v příslušné odborné literatuře [35-37]. Pro zmírnění rizika nadměrného přizpůsobení byl i v našem případě použit algoritmus detekce nadměrného přizpůsobení, který umožňuje postup včasného zastavení dalšího procesu učení modelu. Pokud během procesu učení přestalo skóre validace vykazovat výrazné zlepšení (definované jako standardní prahová hodnota rovná 10^{-4}) v průběhu několika po sobě jdoucích iterací, byl proces učení ukončen. Maximální počet takových po sobě jdoucích iterací byl stanoven na 20 podle doporučení v literatuře [38].



Obrázek 3: Pearsonova korelační matice pro frekvenci zatížení, teplotu zkoušky a výsledný modul tuhosti

Na obrázku 3 je znázorněna Pearsonova korelační matice za účelem vyhodnocení existujících korelací mezi uvažovanými proměnnými. Mezi frekvencí zatížení, teplotou zkoušky a kódovanou kategoriální proměnnou nebyla zjištěna žádná významná korelace: tyto úvahy umožnily, aby tyto tři proměnné byly vhodné pro následující modelovací operace. Naopak modul tuhosti vykazoval Pearsonovy korelační koeficienty rovné -0,04, 0,28 a -0,92 s kódovanou kategoriální proměnnou, frekvencí zatěžování a teplotou zkoušení.

Před zpracováním dat byla pozorování podrobena proceduře normalizace min-max: pozorování byla škálována do rozsahu 0 až +1, což pomohlo zajistit optimální fungování všech vyvinutých modelů tím, že se vyřešily problémy související s rozdíly v měřítku [39]. Datová sada byla poté rozdělena náhodným přidělením zhruba 75 % pozorování do trénovací množiny a zbývajících 25 % do testovací množiny. Trénovací množina byla dále rozdělena na sadu určenou k vlastnímu trénování modelu a na sadu ověřovací (verifikace modelu) a to na základě k-násobné křížové validace s $k=5$. Tím bylo zajištěno vyvážené vyhodnocení výsledků trénování a validace, což umožnilo optimalizaci hyperparametrů pomocí metody prohledávání mřížky, jejíž hyperparametry a rozsahy prohledávání jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 1: Mřížkové vyhledávání hyperparametrů

Model	Hyperparametr	Rozsah hledání	Vybraná hodnota
RR	α	$10^{(-4)} \div 10^5$	10^{-1}
LR	α	$10^{(-4)} \div 10^5$	10^{-3}
NLR	stupeň polynomu	2, 3, 4	2
ANN	velikost skryté vrstvy	1 ÷ 50	30
	aktivační funkce	identita, logistická, TanH	TanH
	trénovací algoritmus	LBFGS [35], SGD [36], Adam [37]	LBFGS
	maximální počet iterací	500, 1000, 5000	500

Celá metodika popsaná v tomto příspěvku, od načítání experimentálních dat až po návrh jednotlivých modelů strojového učení, byla implementována pomocí programovacího jazyka Python (verze 3.9.12).

Výsledky

Výkonnost modelů

K vyhodnocení výkonnosti modelů lineární regrese, nelineární regrese a umělých neuronových sítí byla použita úplná sada parametrů vykazující statistiky dobrou shodu. Konkrétně byly použity střední absolutní chyba (MAE) a střední absolutní procentní chyba (MAPE), které umožňují nahlédnout do průměrné velikosti chyb v absolutním i procentním vyjádření, střední kvadratická chyba (MSE) a odmocnina střední kvadratické chyby (RMSE) byly použity k další penalizaci větších chyb, Pearsonův korelační koeficient (R) a koeficient determinace (R^2) byly použity k posouzení lineární korelace mezi skutečnými a předpovídanými hodnotami, resp. procenta rozptylu cílové proměnné vysvětleného modelem. Tyto metriky společně poskytly pevný rámec pro hodnocení, který usnadnil podrobnější srovnání mezi přesností predikce a zobecňujícími schopnostmi každého zkoumaného modelu [40].

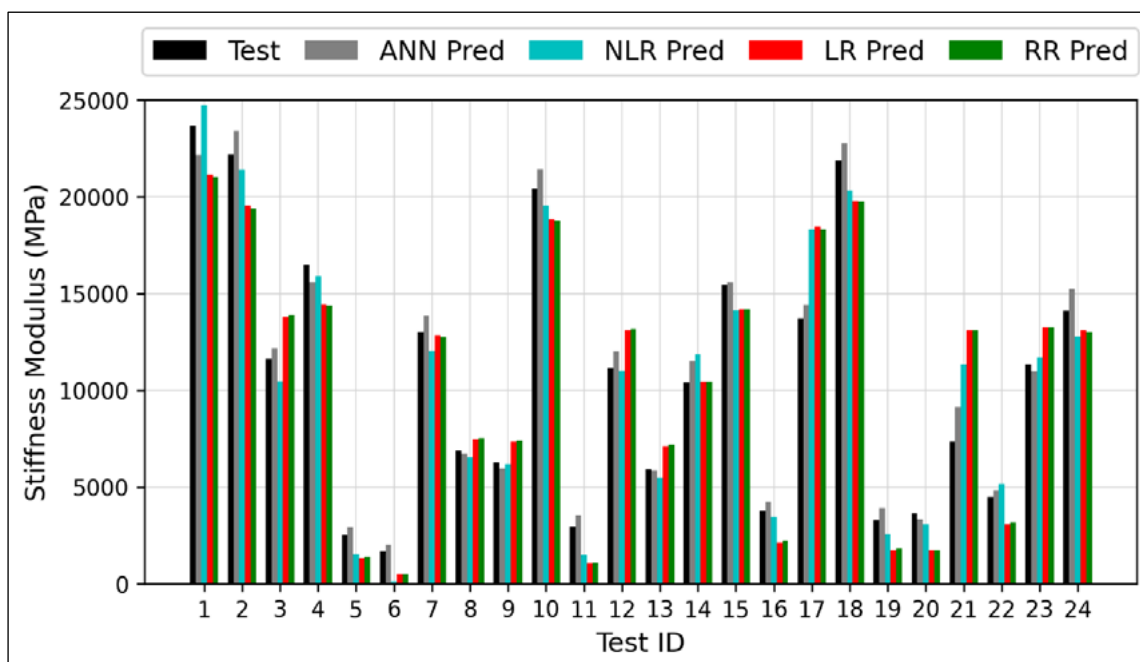
Porovnání modelů

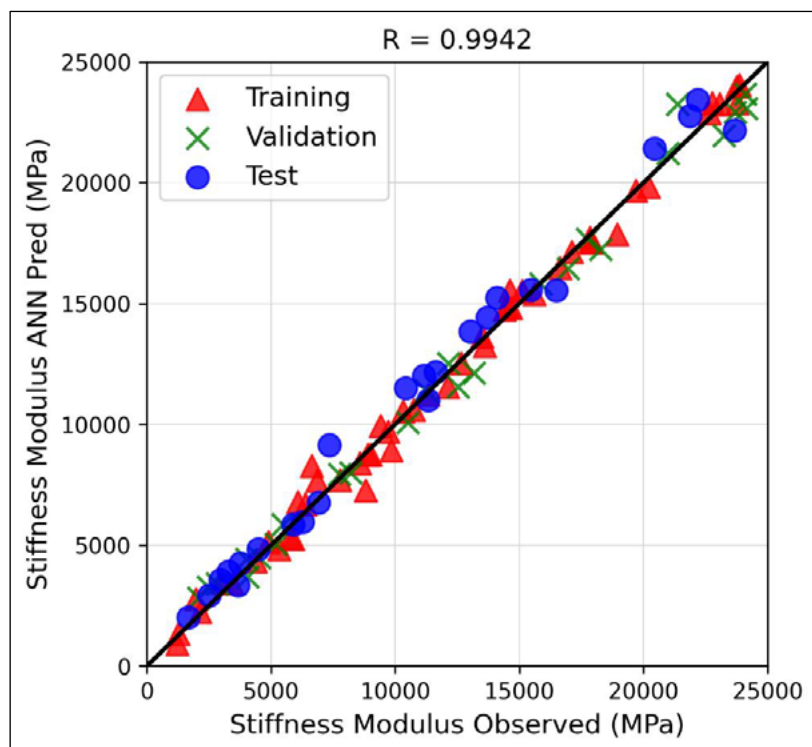
Během postupů jemného doladování modelů byly jako vstupní parametry použity teplotní a frekvenční podmínky společně s kategoriální proměnnou, která rozlišovala dvě použité hodnoty maximálního zrna kameniva ve směsi (NMAS), zatímco jako výstup byl vrácen modul tuhosti. Aby bylo možné spravedlivě porovnat výkonnost jednotlivých regresních přístupů, byly všechny vyvinuté modely trénovány a ověřeny pomocí stejných pozorování, která prošla stejnými normalizačními a křížovými validačními postupy. To umožnilo vybrat nejvhodnější metodiku modelování na základě konzistentních metrik dobré shody, které byly získány během testovací fáze a shrnuty v tabulce 2. Lze konstatovat, že všechny vyvinuté modely vykazovaly úspěšné výsledky, charakterizované MAE mezi 692,75 MPa a 1 829,35 MPa, MAPE mezi 8,77 % a 26,46 %, R mezi 0,9458 a 0,9942 a R^2 mezi 0,8917 a 0,9849. Přístupy RR a LR dosáhly téměř srovnatelného výkonu, a to jak z hlediska metrik chyb, tak i korelačních koeficientů. Výrazného zlepšení celkových metrik však bylo dosaženo použitím modelu NLR, který byl přesto překonán modelem ANN, jenž zlepšil všechny zkoumané metriky dobré shody zhruba o řád. Grafické znázornění prezentovaných poznatků lze vidět na obrázku 4. Zde byly absolutní hodnoty experimentálních pozorování a předpovědi provedené různými ML modely graficky znázorněny pomocí histogramu. Konkrétně černé histogramy představovaly experimentálně zjištěné hodnoty, z nichž byl sestaven testovací soubor, zatímco šedé, azurové, červené a zelené histogramy představovaly odpovídající hodnoty předpovězené modely ANN, NLR, LR a RR. Lze pozorovat, že šedé histogramy měly tendenci být nejbližší černým histogramům, což odpovídá vyšší spolehlivosti předpovědi provedených modelem ANN. Poté přesnost postupně klesala od modelu ANN přes model NLR až po nejjednodušší modely LR a RR. Tím byla odůvodněna volba modelu ANN jako nejvýkonnějšího přístupu, který překonal konvenční lineární a nelineární regresi.

Tabulka 2: Výkonnostní parametry jednotlivých ML modelů vyhodnocené na testovací sadě

Výkonnost parametr	ML model			
	RR	LR	NLR	ANN
MAE (MPa)	1 829,35	1 811,79	1 143,40	692,75
MAPE (%)	26,21	26,46	17,76	8,77
MSE (MPa ²)	$4,83 \cdot 10^6$	$4,80 \cdot 10^6$	$2,42 \cdot 10^6$	$6,71 \cdot 10^5$
RMSE (MPa)	2 198,33	2 190,26	1 554,98	819,48
R	0,9458	0,9466	0,9744	0,9942
R-kvadrát	0,8917	0,8925	0,9458	0,9849

Poté, co bylo ověřeno, že přístup založený na umělých neuronových sítích je nejvhodnějším přístupem k provedení zkoumané regresní úlohy, byla provedena další analýza, aby bylo možné podrobněji pochopit, jak je model přesný. Byla sestavena regresní přímka, kde byly hodnoty modulu tuhosti předpovězené pomocí ANN ve fázích trénování, ověřování a testování vyneseny do křížového grafu s odpovídajícími experimentálními hodnotami, které byly zjištěny během laboratorního šetření. Černá plná čára představovala přímku kvality (LOE), která určovala podmínku 100% přesnosti, zatímco červené, zelené a modré značky se vztahovaly k fázím tréninku, validace a testu. Pearsonův korelační koeficient uvedený v horní části diagramu se vztahuje k testovací fázi, jak lze vyčíst také z tabulky 2. Lze pozorovat, že všechny značky jsou blízko LOE, což zdůrazňuje vynikající výkonnost modelu ANN. Ve fázi trénování bylo dosaženo hodnot R 0,9968 a ve fázi validace 0,9959. Podobně i hodnoty R² dosažené během trénování a validace (0,9937 a 0,9908) dopadly o něco lépe než hodnota dosažená během testovací fáze (0,9849). To dále potvrdilo, že model správně pochopil vztah mezi uvažovanými proměnnými a dosáhl vynikajících výsledků během všech fází modelování. Je však důležité poznamenat, že všechny výsledky diskutované v této studii se týkají uvažovaného laboratorního šetření a následných modelovacích postupů. V důsledku toho údaje pocházející z různých experimentálních kampaní vyžadovat novou identifikaci nejlepších hyperparametrů a nové úvahy o dosaženém výkonu.

**Obrázek 4: Naměřené a předpovězené hodnoty modulu tuhosti**



Obrázek 5: Předpovězené hodnoty ANN (svislá osa) v porovnání s naměřenými hodnotami modulu tuhosti (vodorovná osa)

Závěry

Modul tuhosti představuje klíčový parametr při posuzování výkonnosti asfaltových směsí pro vozovky. Z tohoto důvodu je jeho pečlivé vyhodnocení důležité, i když obvykle vyžaduje použití drahé laboratorní zkušební testery a časově náročnější experimentální postupy. V tomto ohledu mohou metodiky založené na regresních technikách představovat životaschopnou alternativu, která může významně snížit pracovní zátěž laboratoře. Postupy založené na datech jsou skutečně schopny poskytovat velmi spolehlivé předpovědi, pokud jsou správně vyladěny a optimalizovány. Cílem zde prezentované studie bylo ověřit, zda konvenční lineární či nelineární regresní techniky nebo moderní a pokročilé umělé neuronové sítě představují robustní techniky pro modelování modulu tuhosti zkoumaných směsí. Tyto nástroje by tak mohly podpořit konvenční postupy navrhování směsí tradičně používané v odborné praxi a pomoci inženýrům zabývajícím se realizací asfaltových vozovek při řízení operací analýzy dat. Na základě popsanych a diskutovaných výsledků lze vyvodit následující závěry:

- v rámci dvou zkoumaných asfaltových směsí vymezených pomocí kategoriální proměnné lze modul tuhosti úspěšně předpovídat na základě teplotních a frekvenčních podmínek buď pomocí lineárních regresních technik, nelineárních regresních technik, nebo umělých neuronových sítí, a to s různou spolehlivostí a přesností;
- postup normalizace dat a k-násobná křížová validace spolu s optimalizací hyperparametrů umožnily identifikovat nejlepší výkonnost každého zkoumaného přístupu;
- ačkoli všechny vyvinuté modely dosáhly uspokojivého výkonu, ANN dosáhla během testovací fáze nejlepších metrik dobré shody, reprezentovaných MAE, MAPE a R^2 rovnajícími se 692,75 MPa, 8,77 % a 0,9849;
- o úspěšném modelování pomocí ANN svědčí i vynikající metriky výkonnosti získané také během fáze trénování a validace, které byly o něco lepší než metriky získané během testovací fáze.

Slibné výsledky získané v rámci této studie představují potenciál použitelnosti predikčního nástroje, který by mohl spolehlivě předpovídat modul tuhosti obou zkoumaných směsí na základě zkušebních podmínek souvisejících s teplotou a frekvencí zatěžování. Existuje však mnoho aspektů, které lze v rámci budoucího vývoje dále zkoumat. Například bude zajímavé rozšířit experimentální databázi tím, že se zváží další směsi a ověří se dobrá shoda a schopnost zobecnění vyvinutých predikčních modelů.

Dále by se mohly zkoumat různé strategie optimalizace hyperparametrů s cílem najít architekturu, která by mohla vést k ještě lepšímu výkonu. V neposlední řadě by se mohly zvážit různé výkonnostní parametry související s mechanickým chováním těchto směsí jako výstupy pro zlepšení mechanické charakterizace, kterou umožňují tyto modely strojového učení.

Poděkování: Tento výsledek vznikl v rámci aktivit souvisejících s projektem GA22-04047K financovaným GAČR.

Zdroje:

- [1] Gandomi A.H., Alavi A.H., Mirzahosseini M.R., Nejad F.M.: Nonlinear genetic-based models for prediction of flow number of asphalt mixtures. *J. Mater. Civ. Eng.*, 23, 2011, 248-263. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000154](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000154)
- [2] Alavi A.H., Ameri M., Gandomi A.H., Mirzahosseini M.R.: Formulation of flow number of asphalt mixes using a hybrid computational method. *Constr. Build. Mater.*, 25, 2011, 1338-1355. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.010>
- [3] Dias J.L.F., Picado-Santos L., Capitão S.: Mechanical performance of dry process fine crumb rubber asphalt mixtures placed on the Portuguese road network. *Constr. Build. Mater.*, 73, 2014, 247–254. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.110>
- [4] Pasandín A., Pérez I.: Overview of bituminous mixtures made with recycled concrete aggregates. *Constr. Build. Mater.*, 74, 2015, 151-161. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.035>
- [5] Masad E., Tashman L., Little D., Zbib H.: Viscoplastic modeling of asphalt mixes with the effects of anisotropy, damage and aggregate characteristics. *Mech. Mater.*, 37, 2005, 1242–1256. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2005.06.003>
- [6] Giunta M., Pisano A.A.: One dimensional viscoelastoplastic constitutive model for asphalt concrete. *Multidiscip. Model. Mater. Struct.*, 2, 2006, 247-264. <https://doi.org/10.1163/157361106776240761>
- [7] Erkens S.M.J.G., Liu X., Scarpas A.: 3D finite element model for asphalt concrete response simulation. *Int. J. Geomech.*, 2, 2002, 305–330. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1532-3641\(2002\)2:3\(305\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1532-3641(2002)2:3(305))
- [8] Costanzi M., Cebon D.: Generalized phenomenological model for the viscoelasticity of idealized asfalts. *J. Mater. Civ. Eng.*, 26, 2014, 399-410. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000842](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000842)
- [9] Collop A.C., McDowell G.R., Lee Y.: Use of the distinct element method to model the deformation behavior of an idealized asphalt mixture. *Int. J. Pavement Eng.*, 5, 2004, 1–7. <https://doi.org/10.1080/10298430410001709164>
- [10] Abbas A., Masad E., Papagiannakis T., Harman T.: Micromechanical modelling of the viscoelastic behaviour of asphalt mixtures using the discrete-element method. *Int. J. Geomech.*, 7, 2007, 131-139. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1532-3641\(2007\)7:2\(131\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1532-3641(2007)7:2(131))
- [11] Dondi G., Simone A., Vignali V., Manganelli G.: Numerical and experimental study of granular mixes for asfalts. *Powder Technol.*, 232, 2012, 31-40. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.07.057>
- [12] Majidifard H., Jahangiri B., Buttlar W.G., Alavi A.H.: New machine learning-based prediction models for fracture energy of asfaltových směsí. *Measurement*, 135, 2019, 438-451. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.11.081>
- [13] Ghafari S., Ehsani M., Nejad F.M.: Prediction of low-temperature fracture resistance curves of unmodified and crumb rubber modified hot mix asphalt mixes using a machine learning approach. *Constr. Build. Mater.*, 314, 2022, 125332. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125332>
- [14] Friedman J., Hastie T., Tibshirani R.: Regularization Paths for Generalized Linear Models via Coordinate Descent. *J. Stat. Softw.*, 33, 2008, 1-22.
- [15] Li Z., Liu F., Yang W., Peng S., Zhou, J.: A survey of convolutional neural networks: analysis, applications, and prospects. *IEEE Trans. Neural Netw. Learn. Syst.*, 33, 2021, 6999-7019. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2021.3084827>
- [16] Aizenbud Y., Sober B.: Approximating the span of principal components via iterative least-squares. *Appl. Comput. Harmon. Analysis (ACHA)*, 63, 2023, 84-92. <https://doi.org/10.1016/j.acha.2022.11.006>
- [17] Meng K., Gai Y., Wang X., Yao M., Sun, X.: Transfer learning for high-dimensional linear regression via the elastic net. *Knowl.-Based Syst.*, 304, 2024, 112525. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2024.112525>

- [18] Seno M.E., Zeini H.A., Imran H., Noori M., Henedy S.N., Ghazaly N.M.: Advancing in creep index of soil prediction: A groundbreaking machine learning approach with Multivariate Adaptive Regression Splines. *Results Mater*, 24, 2024, 100641. <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2024.100641>
- [19] Rondinella F., Oretto C., Abbondati F., Baldo N.: Laboratory Investigation and Machine Learning Modeling of Road Pavement Asphalt Mixtures Prepared with Construction and Demolition Waste and RAP. *Sustainability*, 15, 2023, 16337. <https://doi.org/10.3390/su152316337>.
- [20] Rondinella F., Daneluz F., Vacková P., Valentin J., Baldo N.: Volumetric Properties and Stiffness Modulus of Asphalt Concrete Mixtures Made with Selected Quarry Fillers. *Materials*, 16, 2023, 1017. <https://doi.org/10.3390/ma16031017>
- [22] Pattanaik M.L., Kumar S., Choudhary R., Agarwal M., Kumar B.: Predicting the abrasion loss of open-graded friction course mixes with EAF steel slag aggregates using machine learning algorithms. *Constr. Build. Mater*, 321, 2022, 126408. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126408>
- [23] Tiwari N., Rondinella F., Satyam N., Baldo N.: Alternative Fillers in Asphalt Concrete Mixtures: Laboratory Investigation and Machine Learning Modeling towards Mechanical Performance Prediction. *Materials*, 16, 2023, 807. <https://doi.org/10.3390/ma16020807>
- [24] Wang J., Zhang R., Wang R., Bahia H., Huang W., Wang D., Cai W.: Prediction of the fundamental viscoelasticity of asphalt mixtures using ML algorithms. *Constr. Build. Mater*, 442, 2024, 137573. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137573>
- [25] EN 12591, Bitumen and Bituminous Binders-Specifications for Paving Grade Bitumens. Brusel, Belgie, 2009.
- [26] ČSN 73 6121 (736121), Stavba vozovek Hutněné asfaltové vrstvy – Provádění a kontrola shody. Praha, 2023.
- [27] EN 12697: Část 26, Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Tuhost. Brusel, Belgie, 2019.
- [28] James G., Witten D., Hastie T., Tibshirani R.: *An Introduction to Statistical Learning with Applications in R*, Springer: New York, NY, USA, 2013.
- [29] Dismuke C., Lindrooth R.: Ordinary least squares. *Methods and designs for outcomes research*, 93, 1, 2006, 93-104.
- [30] Melkumova L. E., Shatskikh S. Y.: Comparing Ridge and LASSO estimators for data analysis. *Procedia engineering*, 201, 2017, 746-755. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.615>
- [31] Heiberger R. M., Neuwirth E., Heiberger R. M., Neuwirth E.: Polynomial regression. *A Spreadsheet Interface for Statistics, Data Analysis, and Graphics*, 2009, 269-284.
- [32] McCulloch W. S., Pitts W.: A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *Bull. Math. Biophys*, 5, 1943, 115-133.
- [33] Moayed H., Mosallanezhad M., Rashid A.S.A., Jusoh W.A.W., Muazu M.A.: A systematic review and meta-analysis of artificial neural network application in geotechnical engineering: Theorie a aplikace. *Neural Comput. Appl.* 32, 2020, 495-518. <https://doi.org/10.1007/s00521-019-04109-9>
- [34] Rondinella F., Oretto C., Abbondati F., Baldo N.: A Deep Neural Network Approach towards Performance Prediction of Bituminous Mixtures Produced Using Secondary Raw Materials. *Coatings*, 14, 2024, 922. <https://doi.org/10.3390/coatings14080922>
- [35] Berahas A. S., Nocedal J., Takác M.: A multi-batch L-BFGS method for machine learning. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2016, 29. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1605.06049>
- [36] Rumelhart D.E., Hinton G.E., Williams R.J.: Learning representations by back-propagating errors. *Nature*, 323, 1986, 533-536.
- [37] Kingma D.P., Ba J.: Adam: A Method for Stochastic Optimization. *arXiv* 2014, <https://doi.org/arXiv:1412.6980>
- [38] Kearns M., Valiant, L.: Cryptographic limitations on learning boolean formulae and finite automata. *Journal of the ACM (JACM)*, 41, 1994, 67-95. <https://doi.org/10.1145/174644.174647>.
- [39] Al-Obeidat F., Spencer B., Alfandi O.: Consistently accurate forecasts of temperature within buildings from sensor data using ridge and lasso regression. *Futur. Gener. Comput. Syst*, 110, 2020, 382-392. <https://doi.org/10.1016/j.future.2018.02.035>
- [40] Rondinella F., Daneluz F., Hofko B., Baldo N.: Improved predictions of asphalt concretes' dynamic modulus and phase angle using decision-tree based categorical boosting model. *Constr. Build. Mater*, 400, 2023, 132709. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132709>

PŘESNOST MODELŮ DYNAMICKÉHO MODULU TUHOSTI ASFALTOVÉ SMĚSI S R-MATERIÁLEM STANOVENÉ 4PB-PR ZKOUŠKOU

ACCURACY OF DYNAMIC MODULUS MODELS OF ASPHALT MIXTURES CONTAINING RECLAIMED ASPHALT DETERMINED BY 4PB-PR

Majda Belhaj, MSc., doc. Ing. Jan Valentin, Ph.D., ČVUT v Praze, Fakulta stavební,
Česká republika/Czech Republic
Prof. Nicola Baldo, Ph.D., University of Udine, Itálie/Italy

Dynamický modul pružnosti (E^*) patří mezi klíčové funkční charakteristiky pro studium vlastností asfaltových směsí a pro simulaci jejich viskoelastického chování za různých zatěžovacích a teplotních podmínek. Pokud se experimentální data využít v podobě řídicích křivek, představuje dynamický modul formu komplexní deformační charakteristiky, která dokáže přiblížit chování asfaltové vrstvy vozovky při zatížení dopravními prostředky a při změnách teplot, kterým jsou vozovkové vrstvy vystaveny. Laboratorní zkoušky ke stanovení této charakteristiky jsou však časově i finančně náročné, obzvláště pokud bychom chtěli měření provádět při větším počtu teplot s využitím širokých spekter frekvencí, které simulují různé stavy zatížení. Pro odhad hodnoty dynamického modulu proto bylo postupně formulováno několik predikčních modelů. Některé z nich jsou reologické a jiné empiricko-regresní. Tento příspěvek se zaměřuje na analýzu dvou typů predikčních modelů pro stanovení řídicí křivky dynamického modulu asfaltové směsi obsahující různý podíl asfaltového R-materiálu. Byly rovněž provedeny laboratorní experimenty k ověření přesnosti těchto modelů. Výsledky ukazují, že Witczakova sigmoidní funkce pro tvorbu řídicí křivky má nejlepší přesnost. Zobecněný Huet-Sayeghův model (2S2P1D) oproti tomu vykazuje méně přesné předpovědi hlavně v rozsahu nízkých a vysokých frekvencí.

Dynamic modulus (E^) is a fundamental mechanical parameter for studying the performance of hot mix asphalt and simulating their viscoelastic behaviour under different loading and thermal conditions. It is a primarily tool to replicate road surface behaviour under vehicle traffic loading and temperature variations. Though, laboratory testing to determine this parameter is time-consuming and costly. Several predictive models have been developed to estimate the dynamic modulus, ranging from rheological to empirical regression models. This paper is dedicated to studying two predictive models for determining the master curve of dynamic modulus of hot mix asphalt used in a regular pavement binder course containing different reclaimed asphalt content (0 %, 30 %, 40 %, and 50 %). Laboratory experiments were conducted to assess their accuracy. The results show that the Witczak's sigmoid function provides the best accuracy for the master curves, while the Generalized Huet-Sayegh (2S2P1D) model showed less accurate predictions, particularly at the range of low and high frequencies.*

Úvod

Dynamický modul (E^*) je základní vlastnost materiálu, která se používá k charakterizaci tuhosti a elastické odezvy viskoelastických materiálů, jako je například tradiční asfaltová směs [1]. Jedná se o základní parametr při navrhování a analýze silničních vozovek, protože kvantifikuje schopnost materiálu odolávat deformaci za dynamických (cyklických) zatěžovacích účinků, kterým jsou silniční konstrukce běžně vystaveny v důsledku provozu vozidel a teplotních změn. E^* se obvykle stanovuje laboratorními zkouškami a je definován jako poměr dynamického napětí (σ) k dynamickému protažení (ϵ), kterému je materiál vystaven za sinusových zatěžovacích podmínek při různých teplotách [2]. Matematicky je vyjádřen rovnicí (1).

Za uvedených podmínek – sinusové zatížení při různých teplotách – se asfaltová směs chová převážně lineárně viskoelasticky, což znamená, že reakce materiálu na sinusové napětí je sinusová s určitým fázovým zpožděním (Φ) mezi deformací a aplikovaným napětím. Na základě toho se vypočítá dynamický modul (E^*). E^* má reálnou část (E_1) a imaginární část (E_2), jak je znázorněno na obrázku 2, a poskytuje základní informace o elastickém a viskózním chování lineárně viskoelastického chování asfaltové směsi v širokém rozsahu teplot a frekvencí zatížení.

Pro výpočet tohoto modulu existují různé zkušební metody, které se liší typem zatížení v závislosti na konkrétním zkušebním protokolu. Zatížení může být aplikováno buď v tlaku (axiální zatížení) v případě

dynamické zkoušky opakovaného namáhání v příčném tahu, nebo v ohybu v případě dvoubodových a čtyřbodových zkoušek. V tomto příspěvku je pozornost věnována čtyřbodové zkoušce (podle přílohy B normy EN 12697-26), vypočten je dynamický modul pružnosti a následně vytvořena řídicí křivka. Je však známo, že dynamické zkoušky, včetně čtyřbodové zkoušky ohybem, jsou zdoluhavé a nákladné. Mnoho odborných týmů proto zkoumalo možnost předpovědi modulu pomocí různých metod s cílem získat řádovou hodnotu, kterou lze použít při návrhu vozovky [3, 4, 5, 6, 7]. Výzkumem bylo zjištěno, že existují tři hlavní metody předpovědi: (i) empirické predikční rovnice (založené na regresních analýzách), (ii) mezo-mechanická metoda predikce (založená na teorii kompozitních materiálů) a (iii) numerická simulace (založená na počítačové technologii) [8].

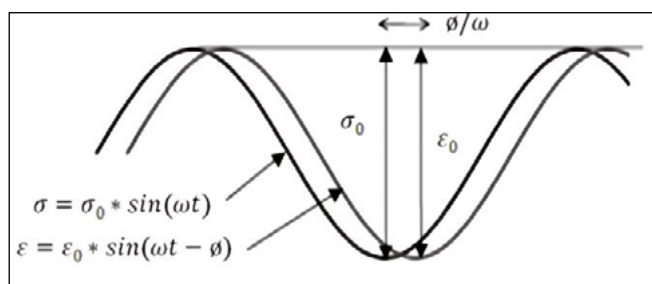
V posledních několika letech se výrazně zvýšil výzkum zaměřený na předpověď dynamického modulu pružnosti asfaltových směsí obsahujících R-materiál. Tyto studie využívají různé techniky, jako jsou empirické, mechanistické, založené na strojovém učení a zaměřené na hybridní modely, ke zvýšení přesnosti předpovědi vlastností asfaltových směsí s obsahem R-materiálu. Za všechny jmenujme alespoň několik příkladů. Wu et al. [9] představili mezo-mechanický model n-vrstvých systémů pro předpověď E^* asfaltových materiálů s R-materiálem. Pro lepší predikci bylo doporučeno zvážit rozdělení asfaltových vrstev na $N=50$ vrstev. Vzhledem k tomu, že rychlost růstu předpovězených E^* takových materiálů se výrazně snížila. Hossain a kol. v práci [10] hodnotili viskoelastické vlastnosti asfaltových pojiv s příměsí R-materiálu a studovali použití Witczakova modelu k odhadu dynamických řídicích křivek modulu asfaltových směsí obsahujících R-materiál. Došli k závěru, že Witczakův model je schopen předpovědět řídicí křivky E^* tohoto typu směsí. A konečně Dao et al. [11] použili různé algoritmy založené na strojovém učení k předpovědi dynamického modulu přetvárnosti nízkoteplotních asfaltových směsí s různým obsahem R-materiálu, jako je například support vector machine (SVM), umělá neuronová síť (ANN), regrese rozhodovacího stromu (Boosted) a regrese Gaussovým procesem (GPR). Bylo zjištěno, že algoritmus Boosted má ve srovnání s výše uvedenými algoritmy nejlepší simulaci E^* .

Witczakův statistický model [4] a Hirschův model [12] byly jedny z prvních modelů, které vyhodnocovaly dynamický modul a úhel fázového posunu při určité teplotě a napětí s ohledem na vlastnosti směsi.

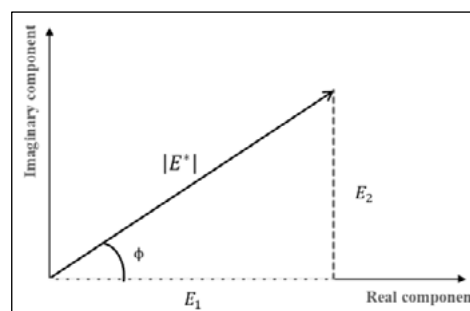
Witczakův model 1-37A a Witczakův model 1-40D [4] jsou nejoblíbenějšími modely pro předpověď komplexního modulu přetvárnosti konvenční asfaltové směsi. Tyto dva empirické regresní modely vycházejí ze sigmoidní funkce. Dobrá predikce těchto metod vedla k jejich začlenění do Mechanisticko-empirické příručky pro navrhování vozovek (MEPDG) pro navrhování vozovek.

$$|E^*| = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (1)$$

kde σ představuje dynamické napětí působící na materiál a ε je dynamické přetvoření nebo deformace materiálu.



Obrázek 1: Sinusový průběh napětí a deformace v čase



Obrázek 2: Grafické znázornění složek dynamického modulu včetně úhlu posunutí ϕ

Teoretická východiska – predikční modely

Witczakův model: funkce sigmoidy

Výzkum realizovaný na University of Maryland ukázal, že hlavní křivku asfaltové směsi lze reprezentovat sigmoidní funkcí. Metoda, kterou zavedli Pellinen a Witczak, spočívá v konstrukci řídicí křivky úpravou parametrů sigmoidní funkce ve vztahu k měření dynamického modulu stanoveného v laboratoři, a to metodou nelineární regrese.

$$\text{Log}(|E^*|) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta - \gamma \text{Log}(f_r)}} \quad (2)$$

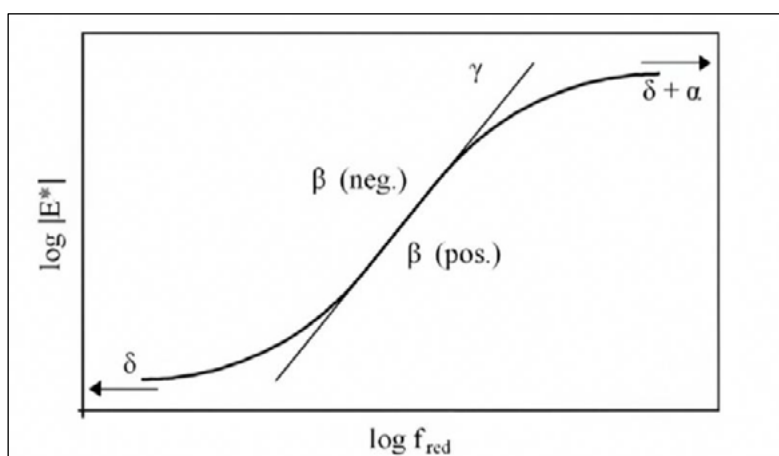
kde $|E^*|$ je dynamický modul (MPa), α, β, γ a δ jsou regresní parametry a f_r je redukovaná frekvence (Hz) definovaná následujícím vztahem.

$$f_r = a_T \times f \Leftrightarrow \text{Log}(f_r) = \text{Log}(a_T) + \text{Log}(f) \quad (3)$$

kde a_T je faktor posunutí, f je testovaná frekvence při teplotě T (Hz) a T je zkušební teplota ($^{\circ}\text{C}$).

Tento sigmoidní model se pohybuje mezi $[\text{Log}(|E^*|)]_{\min} (\delta)$ a $[\text{Log}(|E^*|)]_{\max} (\delta + \alpha)$ v závislosti na dvou tvarových matematických parametrech (β, γ) a redukované frekvenci f_r určené podle principu časově-teplotní superpozice.

V této rovnici parametr γ ovlivňuje sklon funkce (míra změny mezi maximem a minimem) a parametr β ovlivňuje horizontální polohu bodu otáčení (obr. 3). Koeficienty α a δ navíc závisí na zrnitostním složení asfaltové směsi, obsahu asfaltu a mezerovitosti. Koeficienty β a γ závisí na vlastnostech pojiva a velikosti δ a α . Stanovení těchto parametrů se jednoduše provádí pomocí funkce SOLVER v MS Excel. Postup spočívá ve volení proměnlivých hodnot parametrů tak, aby odpovídaly naměřeným údajům.

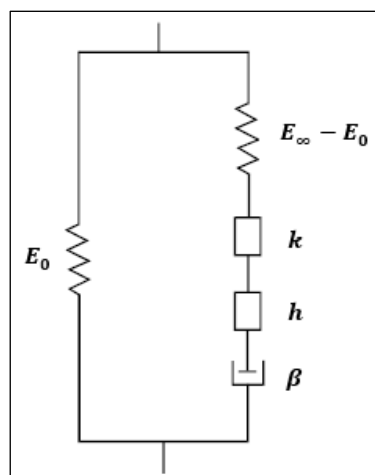


Obrázek 3: Parametrizace sigmoidní funkce [18]

V literatuře existuje mnoho metod, které pomáhají definovat faktor posunu, jako je Williamsova-Landelova-Ferryho rovnice (WLF), Arrheniova rovnice, zobecněná časově-teplotní superpozice (GTTS), empirické nebo semi-empirické metody. Nejpoužívanější dosud stále ještě je grafické stanovení. V tomto případě se izotermny převádějí horizontálně, dokud se nevejdou na sousední izotermu ve vztahu k zvolené referenční teplotě (v této studii je referenční teplota stanovena na 20°C) a s využitím principu časově-teplotní superpozice.

Zobecněný Huet-Sayeghův model (2S2P1D)

Model 2S2P1D se skládá ze dvou pružin, dvou parabolických prvků a jednoho tlumiče, odtud také název modelu. Jedná se o úpravu Huet-Sayeghova modelu s dalším lineárním tlumičem zařazeným do série s parabolickými prvky a pružinou tuhosti (viz obrázek 4). Tento model je vhodný pro charakterizaci viskoelastických vlastností asfaltových směsí a asfaltových pojiv, které při dynamickém zatížení vykazují jak pružnou, tak viskózní odezvu [19]. Tento zjednodušený model lze použít pro účely analýzy a návrhu v inženýrství asfaltových směsí k předpovědi chování materiálu za různých zatěžovacích podmínek.



Obrázek 4: Zobecněný Huet-Sayegh reologický model (2S2P1D)

Komplexní modul zobecněného Huet-Sayeghova modelu je dán následujícím výrazem:

$$E^*(i\omega) = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + \alpha (i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h} + (i\omega\tau\beta)^{-1}} \quad (4)$$

Model se skládá z devíti parametrů, z nichž šest je explicitně vyjádřeno v předchozí rovnici, a to: E_0 je vysokoteplotní tuhost, E_∞ je ryze elastický modul, α, k, h jsou charakteristiky parabolických prvků a jsou stanoveny jako $0 < k < h < 1$ a β je newtonovská viskozita tlumiče. Pokud jde o zbývající tři parametry, jsou určeny implicitně pomocí τ , časové charakteristiky, a vypočítá se následovně:

$$\ln(\tau) = a + bT + cT^2 \quad (5)$$

kde a, b, c jsou regresní konstanty reprezentující materiálové charakteristiky.

Použití materiály a laboratorní postupy

V této studii byla provedena zkouška stanovení dynamického modulu pružnosti čtyř asfaltových směsí s různým obsahem R-materiálu (0 %, 30 %, 40 % a 50 %). Zkušební data byla použita k získání parametrů obou modelů – parametrů Witczakova modelu se sigmoidou a parametrů zobecněného Huet-Sayeghova modelu (2S2P1D) a byla použita k dalšímu studiu přesnosti těchto modelů.

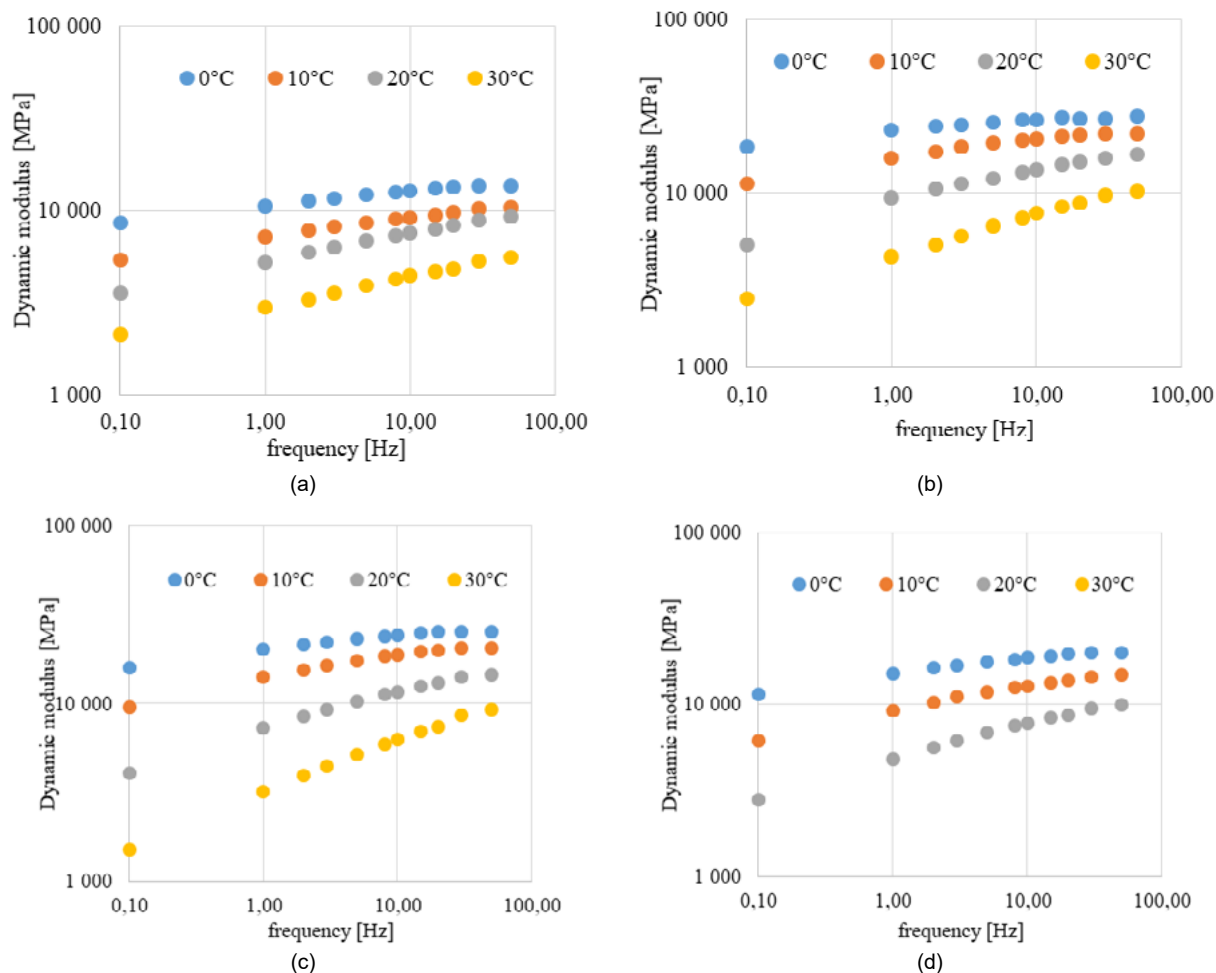
Použité asfaltové směsi měly maximální jmenovitou velikost kameniva 16 mm, jak je znázorněno na obrázku 5 – jedná se o směs typu ACL 16+ dle ČSN 73 6121. Všechny směsi měly obsah pojiva 4,5 %-hm. rozdělený mezi obsah pojiva přidávaného pojiva a asfaltu v R-materiálu. Přidané asfaltové pojivo je silniční asfalt 50/70 a to v kombinaci s rejuvenátorem použitím pro asfaltové směsi s obsahem R-materiálu > 20 %-hm. Použitý R-materiál byl odebrán ze spolupracující asfaltové obalovny a jeho třídění a požadavky se řídily požadavky dle ČSN EN 13 108-8 a ČSN 73 6141. R-materiál byl ze vstupní znovuzískané asfaltové směsi předrcen, přetříděn a uskladněn v laboratoři ve dvou frakcích: střednězrnná frakce 0/8 mm a hrubozrnná frakce 8/16 mm, přičemž obsah pojiva u jemnozrnné frakce 0/8 mm byl v rozmezí 5,0–5,6 %-hm. U hrubozrnné frakce se pohyboval na úrovni 3,9 %-hm. Penetrace asfaltového pojiva v R-materiálu se pohybuje v rozmezí 16–24 dmm a bod měknutí v intervalu 65–72 °C.

Ke zhutnění zkušebního tělesa tvaru desky s rozměry 405 mm x 300 mm x 50 mm byl použit ocelový segmentový válec podle ČSN EN 12697-33. Deska byla následně rozřezána na 5 trámčů s rozměry 405 mm x 50 mm x 50 mm.

Zkouška dynamického modulu pružnosti byla provedena podle ČSN EN 12697-26 při čtyřech teplotách: 0 °C, 10 °C, 20 °C a 30 °C a při jedenácti vybraných frekvencích: 50 Hz, 30 Hz, 20 Hz, 15 Hz, 10 Hz, 8 Hz, 5 Hz, 3 Hz, 2 Hz, 1 Hz a 0,1 Hz pro každou teplotu s použitím univerzálního testeru. Během této zkoušky je vzorek asfaltové směsi upevněn ve dvou koncových bodech a na dva středové body je aplikováno sinusové zatížení.

Výsledky experimentů – stanovení řídicí křivky

Z experimentálních dat (E_1 a E_2) se vypočítá dynamický modul pružnosti (E^*) každé asfaltové směsi a poté se vynesou do grafu jako isoterma pro každou teplotu T . Na obrázku 6 jsou vyneseny izotermické křivky pro všechny testované směsi. U směsi s 50 % RA chybí izotermická křivka při 30 °C z důvodu nelogičnosti získaných hodnot měření při této teplotě, a to při porovnání se zbývajících teplotami zkoušky.



Obrázek 5: Izotermické křivky asfaltové směsi ACL 16+ s (a) 0 % R-materiálu, (b) 30 % R-materiálu, (c) 40 % R-materiálu, (d) 50 % R-materiálu

Pomocí principu časově-teplotní superpozice byly izotermické křivky posunuty do jedné hladké křivky, tzv. řídicí křivky. To umožňuje lepší analýzu chování asfaltových směsí v rozsahu mezních podmínek. Poskytuje také vztah mezi dynamickým modulem a redukovanou frekvencí v logaritmickém měřítku. Redukovaná frekvence (ω_r) se vypočítá jako:

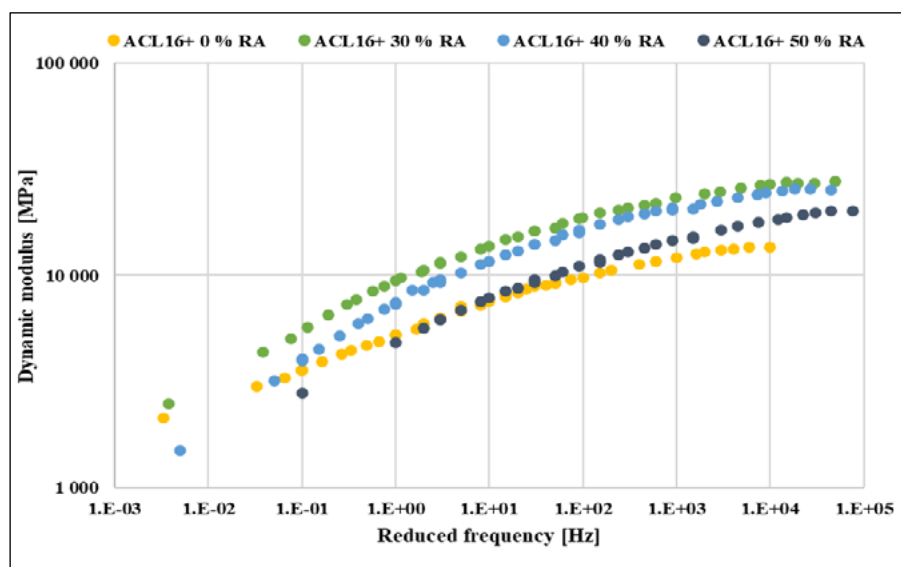
$$\omega_r = \omega \times 10^{\log a(T)} \quad (6)$$

kde ω_r je redukována frekvence při definované teplotě (Hz), ω je frekvence (Hz), $\log a(T)$ je faktor posunu a T je teplota (°K).

Faktor posunu je definován jako velikost posunu potřebná k tomu, aby se izotermická křivka při každé teplotě posunula podle definované teploty nazývané referenční teplota T_R . V tomto příspěvku je $T_R = 20^\circ\text{C}$ [20]. Tyto posuny jsou provedeny ručně prostřednictvím programu MS Excel, jak je uvedeno v tabulce 1, a následně jsou vyneseny hlavní křivky (obrázek 6).

Tabulka 1: Stanovení faktoru posunu pro asfaltové směsi s rozdílným podílem R-materiálu

R-materiál (%)	0 °C		10 °C		20 °C		30 °C	
	a(T)	log(a(T))	a(T)	log(a(T))	a(T)	log(a(T))	a(T)	log(a(T))
0	200	2,301	5	0,699	1	0	0,033	-1,481
30	980	2,991	30	1,477	1	0	0,038	-1,420
40	900	2,954	30	1,477	1	0	0,05	-1,301
50	1500	3,176	30	1,477	1	0	-	-



Obrázek 6: Řídící křivky asfaltové směsi s 0 %, 30 %, 40 % a 50 % R-materiálu

Získávání parametrů

Časově-teplotní superpozice

V modelech dynamické predikce modulů se k interpretaci vlivu teploty na vlastnosti materiálu a k predikci jejich chování při různých rychlostech zatížení používá koncept „časově-teplotní superpozice“ (TTS). Tento koncept je důležitý pro asfaltové směsi, protože vykazují významné viskoelastické chování a jsou teplotně významně citlivé. TTS (τ) je časová stupnice, která se používá k posunům izotermických křivek, jak byly uvedeny v přechozí části, a k vytvoření řídící křivky. Vypočítá se následovně:

$$\ln(\tau) = a + bT + cT^2 \quad (7)$$

kde a, b, c jsou regresní konstanty reprezentující materiálové charakteristiky.

Tabulka 2: Regresní konstanty reprezentující materiálové charakteristiky (polynom 2. stupně)

R-materiál (%)	Regresní parametry			
	a	b	c	R ²
0	2,217	-0,130	0,000301	0,98
30	2,992	-0,154	0,000235	1,00
40	2,963	-0,156	0,000440	1,00
50	3,176	-0,181	0,001109	1,00

Ve výše uvedené tabulce 2 jsou shrnuty výsledné regresní konstanty pro testované asfaltové směsi. Ukazuje se, že hodnoty „a“ a „b“ jsou si pro různé typy téhož typu směsi s různým podílem R-materiálu blízké, ale parametr „c“ se liší.

Witczakův model sigmoidní funkce

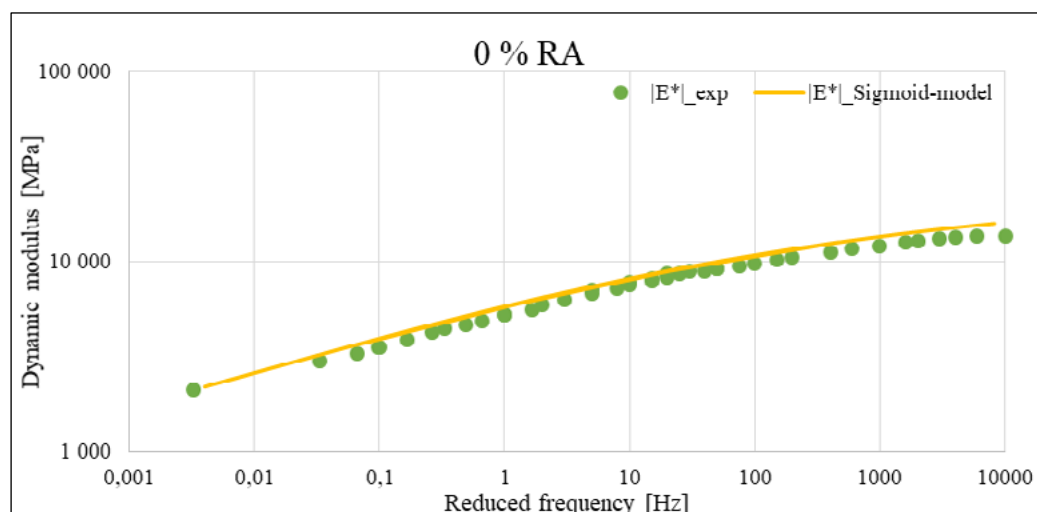
Pro vykreslení řídící křivky směsi byly regresní koeficienty α , β , γ a δ sigmoidní funkce stanoveny metodou nelineární regrese pomocí funkce SOLVER v programu MS Excel. Tyto regresní koeficienty byly stanoveny a uvedeny v tabulce 3 pro každou zkoušenou asfaltovou směs při stejné referenční teplotě $T_R = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tabulka 3: Regresní parametry sigmoidní funkce

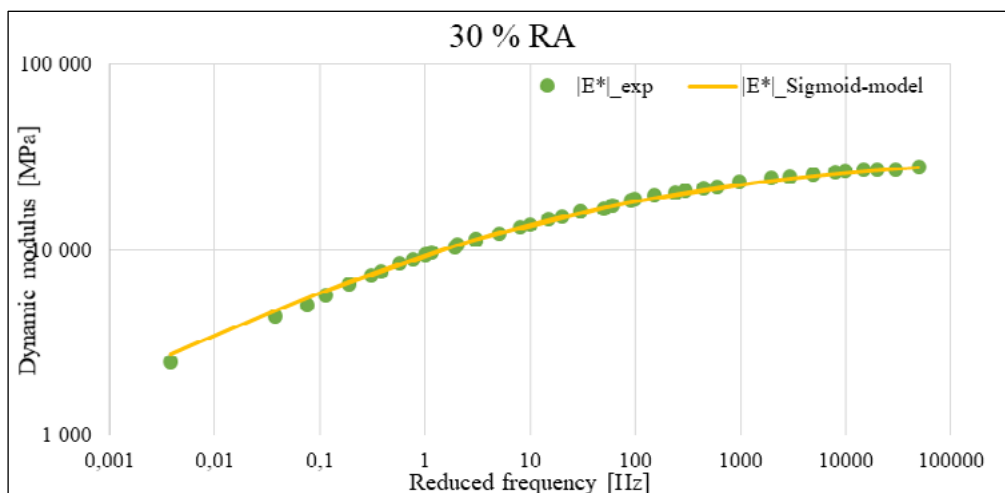
R-materiál (%)	Regresní parametry			
	δ	α	β	γ
0	2,373	2,032	-0,775	-0,361
30	2,447	2,087	-0,996	-0,451
40	0,004	4,451	-1,862	-0,473
50	1,353	3,149	-1,055	-0,373

Tyto koeficienty jsou si velmi blízké pro asfaltové směsi s 0 % a 30 % R-materiálu, ale liší se od ostatních. Rozdíl mezi těmito parametry může být způsoben tím, že přídavek 30 % R-materiálu a méně má významně menší vliv na mechanické vlastnosti asfaltových směsí ve srovnání se směsmi s vyšším obsahem regenerovaného asfaltu.

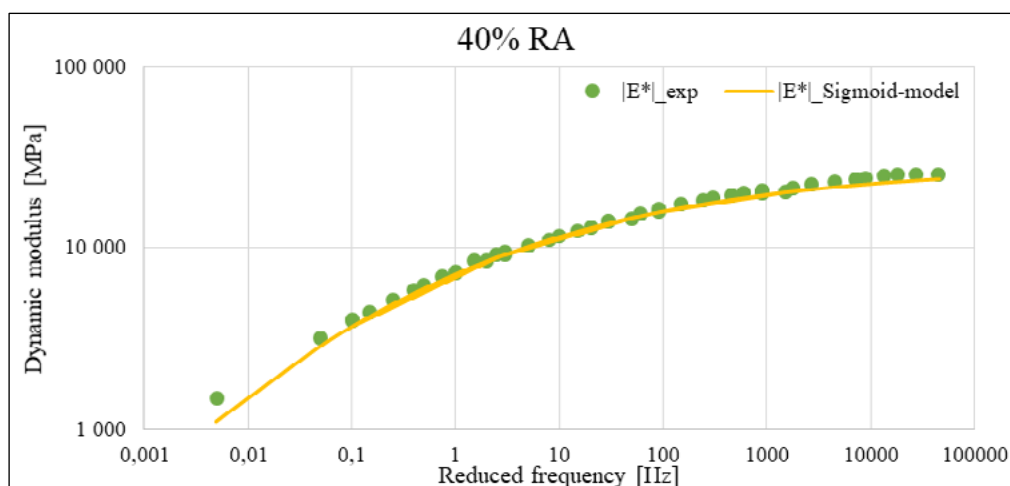
Řídící křivky $|E^*|$ pro různé testované asfaltové směsi jsou uvedeny v závislosti na redukované frekvenci pro referenční teplotu $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ na obrázcích 7–10. Vyhodnocení řídících křivek ukázalo, že dynamický modul odhadnutý sigmoidní funkcí se téměř shoduje se skutečným měřením dynamického modulu stanoveného v laboratoři. Nejhorší shoda byla dosažena u směsi s 0 % R-materiálu, kde sigmoidní model vykazoval nadhodnocený odhad hodnot dynamického modulu v celém rozsahu frekvencí, tedy i teplot.



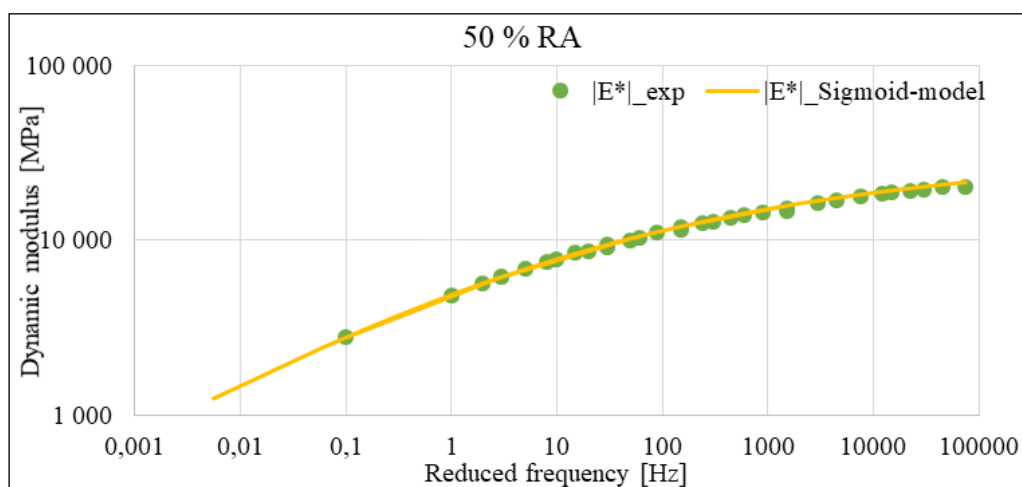
Obrázek 7: Srovnání hlavních křivek experimentálních dat s křivkami sigmoidní funkce asfaltové směsi s 0 % R-materiálu při $T_R = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$



Obrázek 8: Srovnání hlavních křivek experimentálních dat s křivkami sigmoidní funkce asfaltové směsi s 30 % R-materiálu při $T_R = 20\text{ °C}$

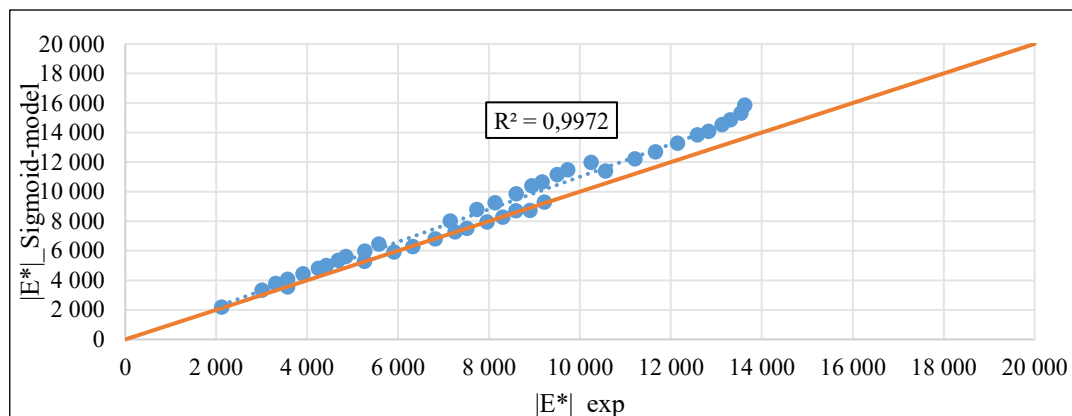


Obrázek 9: Srovnání hlavních křivek experimentálních dat s křivkami sigmoidní funkce asfaltové směsi s 40 % R-materiálu při $T_R = 20\text{ °C}$

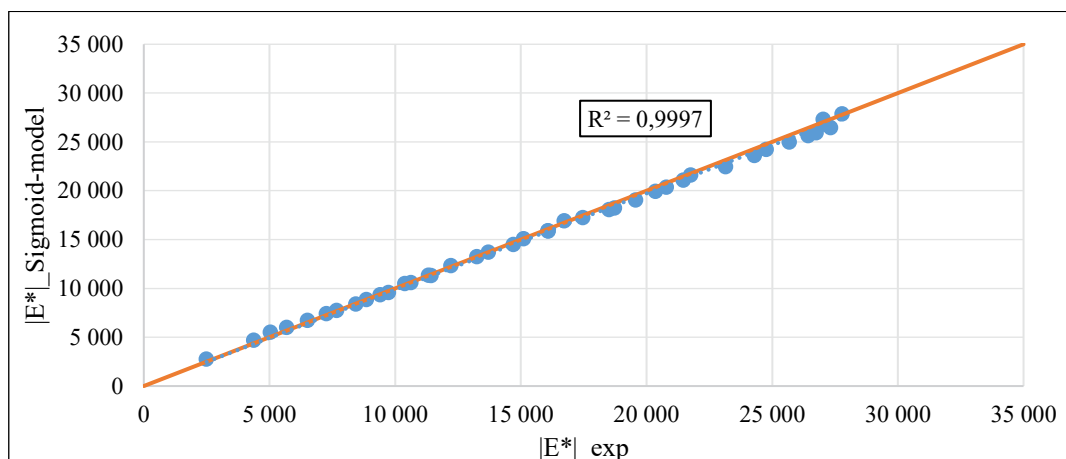


Obrázek 10: Srovnání hlavních křivek experimentálních dat s křivkami sigmoidní funkce asfaltové směsi s 50 % R-materiálu při $T_R = 20\text{ °C}$

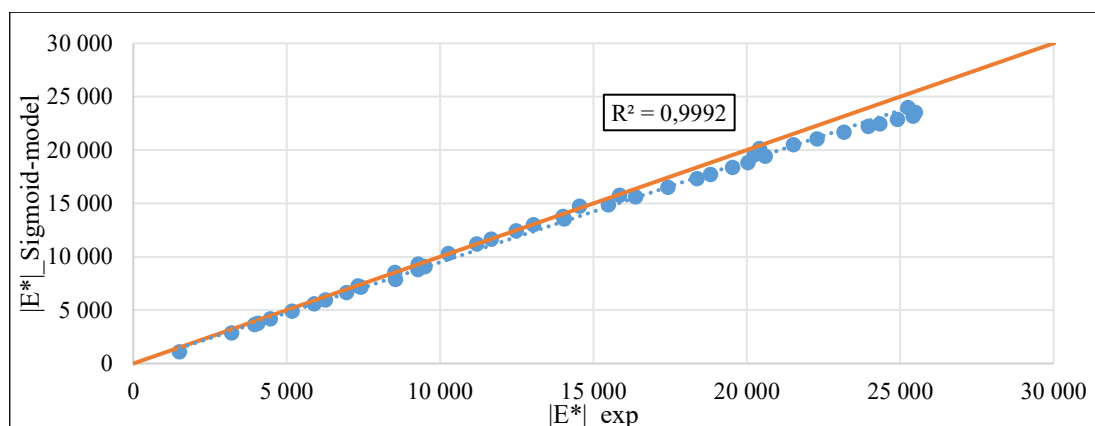
Obrázky 11–14 shrnují vypočtenou hodnotu $|E^*|$ jako funkci naměřené hodnoty $|E^*|$ všech testovaných asfaltových směsí. Obrázky ukazují dobrou přesnost a korelaci mezi naměřeným a vypočteným dynamickým modulem pro všechny testované směsi s výjimkou asfaltové směsi ber R-materiálu. Přesto se koeficient determinace R^2 u všech směsí pohybuje kolem 0,99. U všech asfaltových směsí je vidět, že všechny body leží téměř na přímce, kde $y = x$.



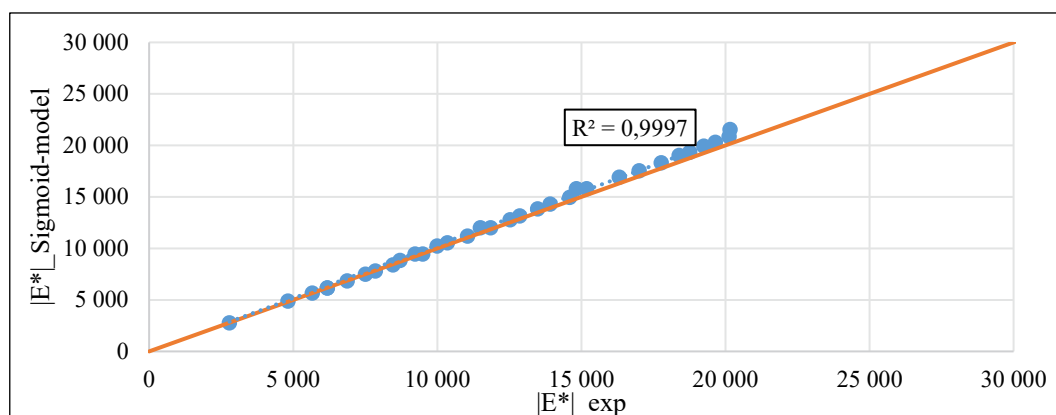
Obrázek 11: Porovnání naměřených hodnot $|E^*|_{\text{exp}}$ a vypočteného hodnot $|E^*|_{\text{sigmoid-model}}$ pro asfaltovou směs s 0 % R-materiálu (červená čára představuje funkci identity $y = x$)



Obrázek 12: Porovnání naměřených hodnot $|E^*|_{\text{exp}}$ a vypočteného hodnot $|E^*|_{\text{sigmoid-model}}$ pro asfaltovou směs s 30 % R-materiálu (červená čára představuje funkci identity $y = x$)



Obrázek 3: Porovnání naměřených hodnot $|E^*|_{\text{exp}}$ a vypočteného hodnot $|E^*|_{\text{sigmoid-model}}$ pro asfaltovou směs s 40 % R-materiálu (červená čára představuje funkci identity $y = x$)



Obrázek 14: Porovnání naměřených hodnot $|E^*|_{\text{exp}}$ a vypočteného hodnot $|E^*|_{\text{sigmoid-model}}$ pro asfaltovou směs s 50 % R-materiálu (červená čára představuje funkci identity $y = x$)

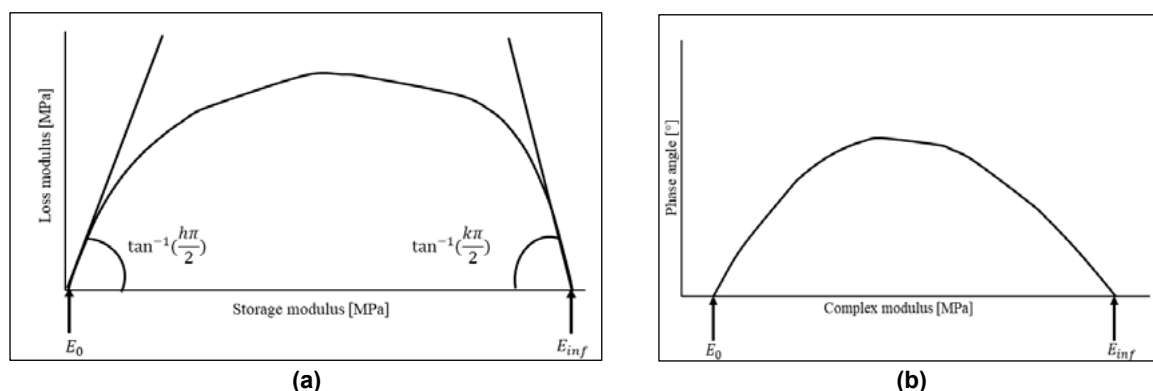
Zobecněný Huet-Sayeghův model (2S2P1D)

V případě druhého použitého modelu byly opět za účelem vykreslení řídicí křivky směsí stanoveny regresní koeficienty α , β , k a h modelu 2S2P1D. Tyto koeficienty jsou shrnuty v tabulce 4 pro každou zkoušenou asfaltovou směs při stejné referenční teplotě $T_R = 20^\circ\text{C}$.

Tabulka 4: Parametry zobecněného Huet-Sayeghova modelu

R-materiál (%)	Parametry zobecněného Huet-Sayeghova modelu					
	E_0	E_{inf}	k	h	α	β
0	760	13 966	0,157	0,539	1,469	2259955
30	1 154	27 717	0,215	0,749	2,728	2259953
40	214	26 105	0,242	0,725	3,559	2259961
50	16	23 935	0,195	0,670	4,644	2259953

Parametr k ovlivňuje levou asymetrii Cole-Cole diagramu a vertikální umístění Blackova diagramu, parametr h ovlivňuje poloměr křivek Blackova diagramu a Cole-Cole křivky, parametr α ovlivňuje výšku Cole-Cole křivky a pravou asymetrii Black diagramu a parametr β obvykle představuje rozložení relaxačních časů v materiálu a používá se k popisu celkového tvaru relaxačního spektra.

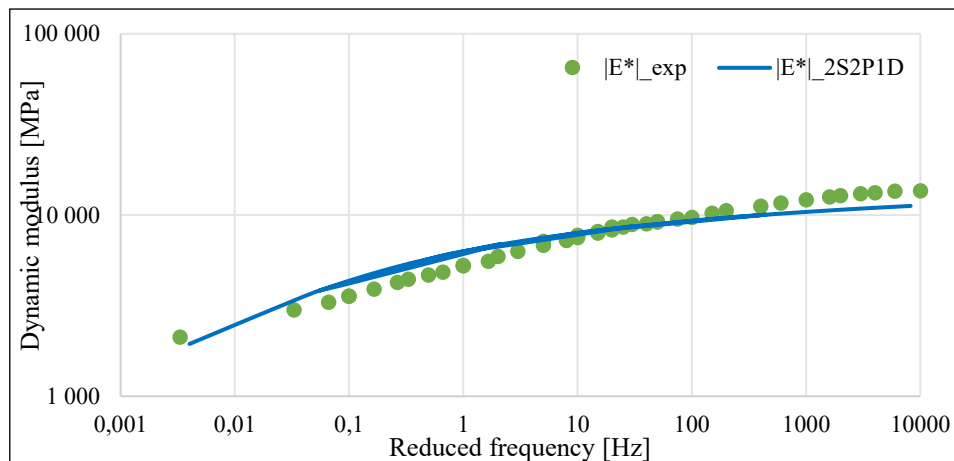


Obrázek 15: Grafické znázornění parametrů Huet-Sayeghova modelu v (a) Cole-Cole diagramu a (b) Black diagramu [21]

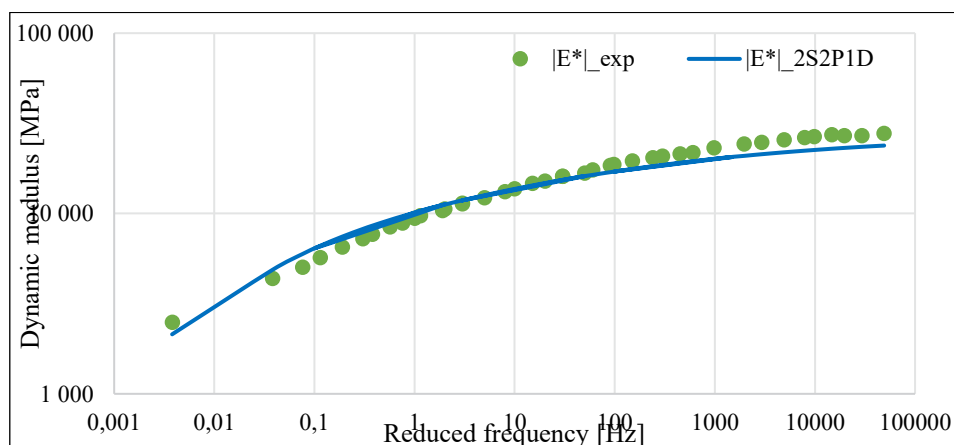
Kromě toho Cole-Cole diagram a Black diagram pomáhají při získávání mezních hodnot dynamického modulu, tj. hodnot E_0 a E_{inf} . Black diagramu, které jsou výsledkem vynesení dynamického modulu $|E^*|$ v závislosti na fázovém úhlu Φ (obrázek 15 a)). Zatímco Cole-Cole diagram (obrázek 15 b)) je znázorněním modulu E_1 a ztrátového modulu E_2 . Tyto dva diagramy jsou považovány za cenné nástroje, protože hodnotí materiály nezávisle na principu časově-teplotní superpozice.

Je zřejmé, že všechny testované asfaltové směsi mají téměř stejnou hodnotu parametru β . Je také patrné, že parametry modelu pro směsi s 30 % a 40 % R-materiálu jsou si blízké. To může být způsobeno mírným rozdílem v obsahu R-materiálu ve srovnání s ostatními posuzovanými směsmi. Na

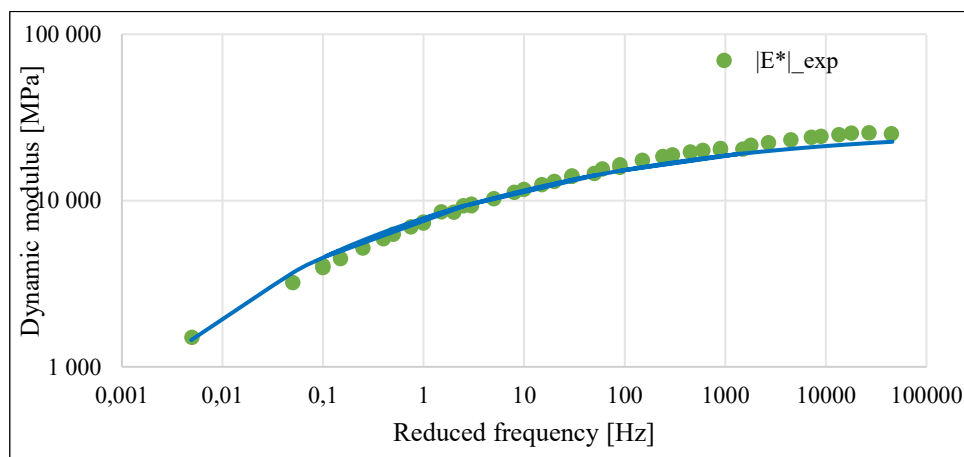
obrázcích 16-19 jsou uvedeny řídící křivky $|E^*|$ pro testované asfaltové směsi v závislosti na frekvenci pro referenční teplotu 20 °C. Jejich vyhodnocení ukázalo, že dynamický modul predikovaný zobecněným Huet-Sayeghovým modelem se liší od skutečného měření dynamického modulu v laboratoři zejména v rozsahu nízkých a vysokých frekvencí. Tyto rozdíly jsou u jednotlivých směsí odlišné. Z toho vyplývá, že model 2S2P1D nesimuluje správně lineární viskoelastické chování asfaltových směsí v daném rozsahu frekvencí a je nutná jeho úprava.



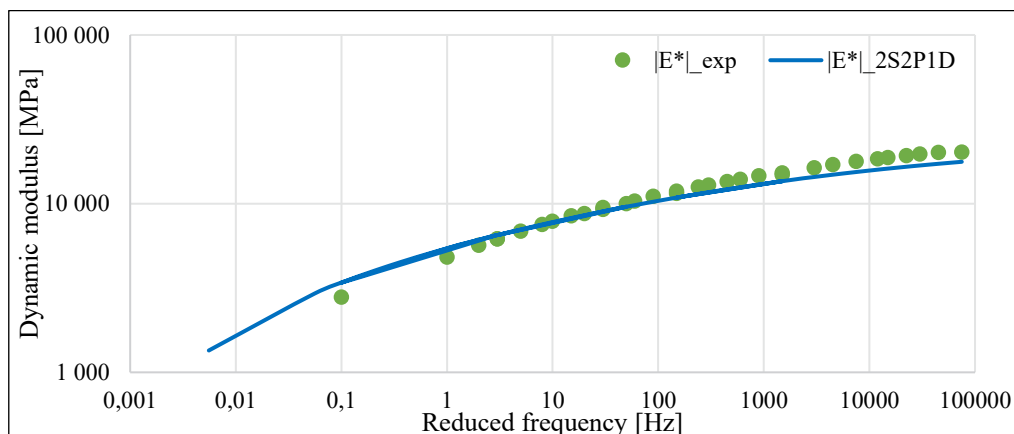
Obrázek 16: Porovnání řídících křivek experimentálních dat a zobecněného Huet-Sayeghova modelu (2S2P1D) pro asfaltovou směs s 0 % R-materiálu při $T_R = 20\text{ °C}$



Obrázek 17: Porovnání řídících křivek experimentálních dat a zobecněného Huet-Sayeghova modelu (2S2P1D) pro asfaltovou směs s 30 % R-materiálu při $T_R = 20\text{ °C}$

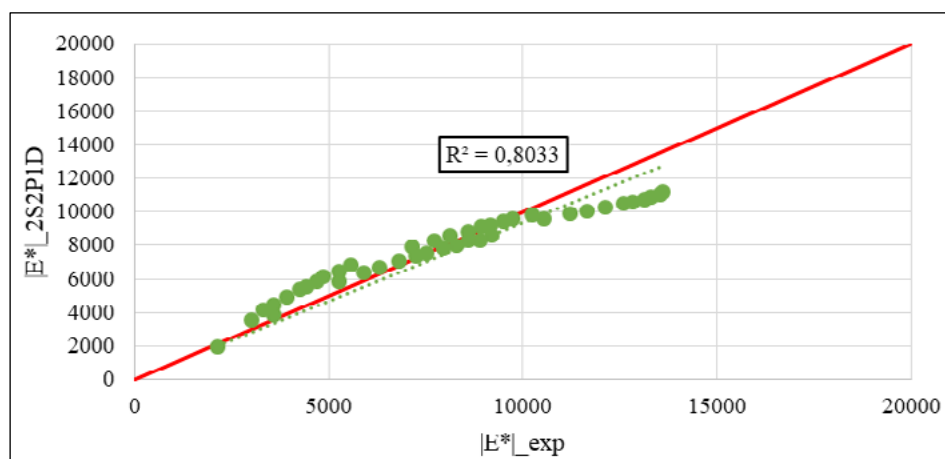


Obrázek 18: Porovnání řídících křivek experimentálních dat a zobecněného Huet-Sayeghova modelu (2S2P1D) pro asfaltovou směs s 40 % R-materiálu při $T_R = 20\text{ °C}$

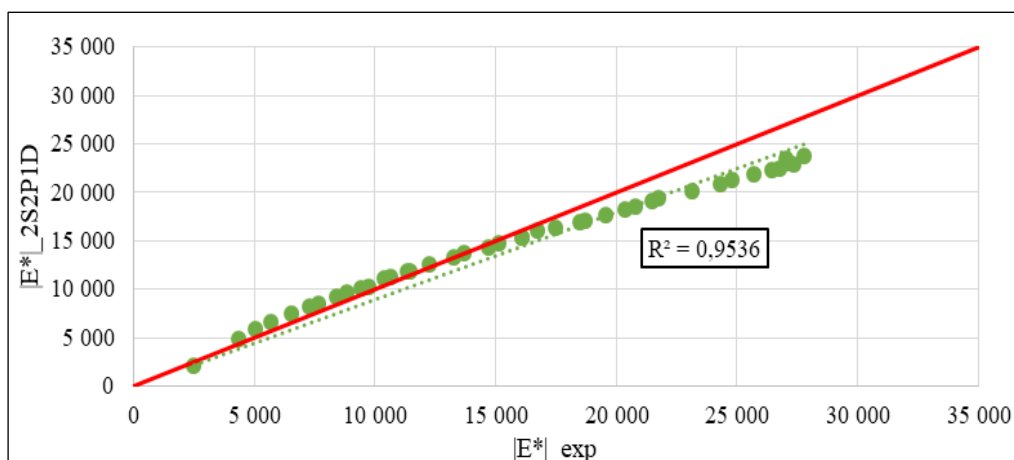


Obrázek 19: Porovnání řídicích křivek experimentálních dat a zobecněného Huet-Sayeghova modelu (2S2P1D) pro asfaltovou směs s 50 % R-materiálu při $T_R = 20\text{ °C}$

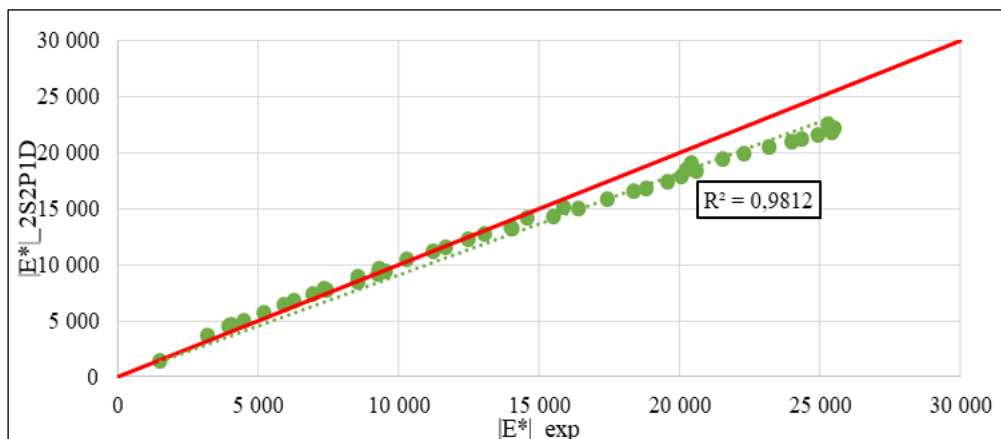
Obrázky 20–23 ukazují vypočtenou hodnotu $|E^*|$ jako funkci naměřené hodnoty $|E^*|$ pro všechny testované asfaltové směsi. Patrná je dobrá přesnost a korelace mezi experimentálními komplexními moduly a moduly odhadnutými zobecněným Huet-Sayeghovým modelem v rozsahu nízkých frekvencí. V rozsahu vysokých frekvencí jsou údaje pod přímkou funkce identity. Rozdíl však není příliš velký.



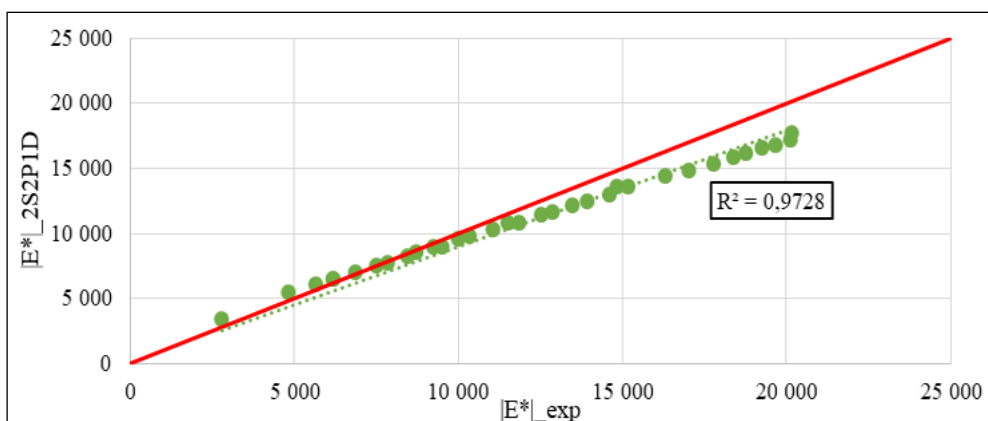
Obrázek 20: Porovnání naměřených hodnot $|E^*|_{\text{exp}}$ a vypočteného modelu $|E^*|_{\text{2S2P1D}}$ pro asfaltovou směs s 0 % R-materiálu (červená čára představuje funkci identity $y = x$)



Obrázek 21: Porovnání naměřených hodnot $|E^*|_{\text{exp}}$ a vypočteného modelu $|E^*|_{\text{2S2P1D}}$ pro asfaltovou směs s 30 % R-materiálu (červená čára představuje funkci identity $y = x$)



Obrázek 22: Porovnání naměřených hodnot $|E^*|_{\text{exp}}$ a vypočteného modelu $|E^*|_{\text{2S2P1D}}$ pro asfaltovou směs s 40 % R-materiálu (červená čára představuje funkci identity $y = x$)



Obrázek 23: Porovnání naměřených hodnot $|E^*|_{\text{exp}}$ a vypočteného modelu $|E^*|_{\text{2S2P1D}}$ pro asfaltovou směs s 50 % R-materiálu (červená čára představuje funkci identity $y = x$)

Závěr

Tato studie se zaměřila na analýzu přesnosti dvou různých typů modelů predikce modulu tuhosti asfaltové směsi – sigmoidní funkce využitá Witczakovým modelem a zobecněný Huet-Sayeghův model známý také jako model 2S2P1D. Tyto modely byly aplikovány na 4 asfaltové směsi se stejným typem kameniva se 4 různými obsahy R-materiálu (0 % RA, 30 % RA, 40 % RA a 50 % RA) o stejné zrnitosti a obsahu pojiva.

Ukázalo se, že funkce sigmoidy nejlépe charakterizuje řídicí křivku za horka prováděných asfaltových směsí s R-materiálem. Přizpůsobení závislosti naměřeného modulu na vypočteném modulu posouzené funkcí identity tento závěr potvrdilo. Všechna testovaná data dosáhla hodnot $R^2 \approx 1$ a téměř dokonalého vyrovnání podél přímky s nejlepší shodou.

Na druhé straně model 2S2P1D vykázal méně přesnou předpověď dynamické řídicí křivky, zejména v oboru nízkých a vysokých frekvencí. V těchto rozsazích má model tendenci podhodnocovat komplexní modul asfaltové směsi s R-materiálem. Přesto bylo celkové přizpůsobení poměrně dobré. Je třeba je nicméně dále analyzovat s využitím větších souborů různých směsí a pokusit se je upravit.

Poděkování: Tento výsledek vznikl v rámci aktivit souvisejících s projektem GA22-04047K financovaným GAČR.

Zdroje:

- [1] T. K. Pellinen, "Investigation of the use of dynamic modulus as an indicator of hot mix asphalt," Tempe, Arizona, USA, 2001.
- [2] M. W. Witczak, Simple performance test for superpave mix design, vol. 465, Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2002.

- [3] J. Bari, Development of a new revised version of the Witczak E* predictive models for hot mix asphalt mixtures., Arizona: Ph.D. dissertation, Arizona State University, 2005.
- [4] G. Al-Khateeb, A. Shenoy, N. Gibson and T. Harman, "A new simplistic model for dynamic modulus predictions of asphalt paving mixtures," Assoc. Asph. Paving Technol., vol. 75, 2006.
- [5] M. S. Sakhaei Far, "Development of New Dynamic Modulus (E*) Predictive Models for Hot Mix Asphalt Mixtures," North Carolina State University ProQuest Dissertations Publishing, North Carolina, 2011.
- [6] C. W. Schwartz, "Evaluation of the Witczak dynamic modulus prediction model," in Proceedings of the 84th annual meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., 2005.
- [7] H. Ceylan, C. W. Schwartz, S. Kim and K. Gopalakrishnan, "Accuracy of predictive models for dynamic modulus of hot-mix asphalt," J. Mater. Civ. Eng., vol. 21, no. 6, pp. 286-293, 2009.
- [8] G. Garcia and M. Thompson, "HMA dynamic modulus predictive models (a review)," FHWA-ICT-07-005, Illinois Center for Transportation, 2007.
- [9] C. Tóth and J. Ureczky, "Determination of master curves for asphalt mixtures by means of IT-CY tests," Period. Polytech., p. 137–142, 2010.
- [10] H. D. Benedetto, "Modelling the rheological properties of bituminous binders using the 2S2P1D Model," Constr Build Mater., vol. 38, pp. 395-406, 2013.
- [11] W. S. M. a. R. B. A. Booshehrian, "How to Construct an Asphalt Binder Master Curve and Assess the Degree of Blending between RAP and Virgin Binders," J. Mater. Civ. Eng., vol. 25, no. 12, pp. 1813-1821, 2013.
- [12] Y. E. Adams, M. Zeghal and H. M. El Hussein, "complex modulus test protocol and procedure for determining Huet-Sayegh model parameterS," NRC-CNRC, 2006.

ASFALTOVÉ SMĚSI S VELIKOSTÍ ZRNA 32 MM PRO PODKLADNÍ VRSTVY VOZOVEK

ASPHALT MIXES WITH A GRAIN SIZE OF 32 MM FOR ROAD BASE COURSES

Ing. Petr Mondschein, Ph.D., ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra silničních staveb

doc. Ing. Petr Hýzl, Ph.D., VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací

doc. Ing. Ondřej Dašek, Ph.D., VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací

Článek se zabývá problematikou nedostatku jemnozrnných frakcí kameniva při výrobě asfaltových směsí pro vozovky a představuje řešení vyvinuté v rámci projektu OPTIGRAIN. Byly navrženy a laboratorně ověřeny asfaltové směsi pro podkladní vrstvy s maximální velikostí zrna 32 mm, které umožňují širší využití dostupnějších hrubozrnných frakcí. Výsledky prokázaly, že směsi ACP 32 splňují požadované objemové a mechanicko-fyzikální parametry a vykazují vysokou odolnost vůči vodě i tvorbě trvalých deformací. Ověřena byla také možnost částečné náhrady primárního kameniva recyklovaným materiálem až do 50 %, což přispívá k udržitelnosti výstavby. Součástí projektu byla rovněž validace výrobní technologie a pokládka zkušebního úseku. Výzkum potvrdil, že směsi ACP 32 mohou být efektivně využívány jako náhrada za tradiční směsi ACP 22. Získané poznatky mají významný přínos pro hospodárnější a ekologičtější rozvoj silniční infrastruktury v České republice.

The article deals with the issue of a shortage of fine-grained aggregate fractions in the production of asphalt mixtures for road surfaces and presents a solution developed within the OPTIGRAIN project. Asphalt mixtures for base layers with a maximum grain size of 32 mm were designed and laboratory tested, allowing for wider use of more readily available coarse-grained fractions. The results showed that ACP 32 mixtures meet the required volumetric and mechanical-physical parameters and exhibit high resistance to water and permanent deformation. The possibility of partially replacing primary aggregate with recycled material by up to 50% was also verified, which contributes to the sustainability of construction. The project also included the validation of production technology and the laying of a test section. The research confirmed that ACP 32 mixtures can be effectively used as a substitute for traditional ACP 22 mixtures. The knowledge gained has a significant contribution to the more economical and environmentally friendly development of road infrastructure in the Czech Republic.

Úvod

Výstavba a údržba silniční infrastruktury v České republice každoročně vyžaduje obrovské objemy drceného kameniva. V hlavní stavební sezóně se opakovaně projevuje nedostatek určitých frakcí kameniva, zejména frakcí s maximální velikostí zrna 11 mm a 16 mm, které jsou klíčové pro výrobu asfaltových směsí pro krytové a podkladní vrstvy netuhých vozovek. Tento nedostatek způsobuje nejen technické komplikace při dodržování předepsaných receptur, ale také ekonomické problémy, neboť ceny nedostatkových frakcí dosahují rekordních hodnot. Situaci dále komplikuje fakt, že ani stále častější využívání recyklovaných materiálů nedokáže zcela eliminovat tlak na surovinové zdroje.

Projekt OPTIGRAIN (Vývoj konstrukčních vrstev vozovek s optimalizovanou zrnitostí nahrazující nedostatkové frakce kameniva) si kladl za cíl nabídnout technicky i ekonomicky efektivní řešení tohoto problému. Zaměřil se na vývoj a ověření nových typů konstrukčních vrstev vozovek – zejména štěrkodrtí (ŠD), mechanicky zpevněných zemin (MZ) a asfaltových směsí pro podkladní vrstvy (ACP). Základní princip spočíval v úpravě zrnitosti směsí tak, aby využívaly hrubozrnnější frakce kameniva, které jsou v době stavební sezóny dostupnější. Projekt tak přispívá nejen k optimalizaci materiálových zdrojů a snížení nákladů na výstavbu, ale také k udržitelnosti silničního stavitelství v podmínkách České republiky.

Vzhledem k odbornému zaměření konference je příspěvek zaměřen pouze na část projektu, která se týkala problematiky asfaltových směsí a je pouze ilustrací širokého souboru činností realizovaných v rámci projektu TAČR CK03000169 na FSV ČVUT v Praze, spadajícího do programu Doprava 2020+.

Metodika řešení projektu

Výzkumné aktivity v oblasti asfaltových směsí byly v projektu OPTIGRAIN zaměřeny na návrh, laboratorní ověření a následnou validaci směsí asfaltového betonu pro podkladní vrstvy vozovek (ACP) s maximální velikostí zrna 32 mm. Metodika zahrnovala následující kroky:

Výběr vstupních materiálů: zajištění vzorků asfaltového pojiva (zejména silničního asfaltu 50/70) a vhodných frakcí kameniva ze zdrojů v Čechách a na Moravě, využití i hrubozrnných frakcí (např. 16/32 mm), které nejsou ve stavební sezóně nedostatkové, část realizovaných návrhů byla prováděna s přidavkem recyklovaného R-materiálu do 50 %.

Laboratorní návrh směsí: sestavení zrnitostních křivek s cílem dosáhnout plynulé čáry zrnitosti, návrh variant směsí s odlišnou kombinací frakcí (např. bez frakce 8/11, bez frakce 5/8, nebo s jejich náhradou hrubšími podíly), příprava referenčních směsí s maximální velikostí zrna 22 mm pro porovnání s nově navrhovanými směsmi s maximální velikostí zrna 32 mm.

Stanovení volumetrických vlastností: stanovení maximální a zhuštěné objemové hmotnosti podle ČSN EN 12697-5 [1] a ČSN EN 12697-6 [2], stanovení mezerovitosti podle ČSN EN 12697-8 [3], optimalizace obsahu asfaltového pojiva v závislosti na zrnitosti a požadovaných vlastnostech.

Zkoušení mechanicko-fyzikálních a reologických vlastností: odolnost proti negativním účinkům vody ITSr podle ČSN EN 12697-12 [4], odolnost proti tvorbě trvalých deformací podle ČSN EN 12697-22 [5], zkoušky pevnosti v příčném tahu podle ČSN EN 12697-23 [6], stanovení modulů tuhosti a únavových parametrů podle ČSN EN 12697-26 [8] a dle ČSN EN 12697-24 [7], ověření nízkoteplotních parametrů dle ČSN EN 12697-46 [9].

Ověření technologie výroby a pokusný úsek: výroba směsí v poloprovozních podmínkách ve spolupráci s průmyslovým partnerem (Froněk spol. s r.o.), pokládka a zhuštění zkušebního úseku, odběr vzorků z pokusného úseku a jejich laboratorní analýza pro ověření shody parametrů se směsmi připravenými v laboratoři.

Vyhodnocení a metodické výstupy: porovnání výsledků nově navržených hrubozrnných směsí s referenčními směsmi typu ACP 22, zpracování metodiky návrhu asfaltových směsí s hrubší frakcí kameniva, určené k certifikaci Ministerstvem dopravy [12, 13].

Materiálové vstupy pro návrh asfaltových směsí a charakteristika složení směsí kameniva

Pro návrh asfaltových směsí s maximální velikostí zrna 32 mm byly využity standardní i alternativní suroviny, jejichž volba vycházela z cíle projektu OPTIGRAIN – nahradit nedostatkové frakce kameniva dostupnějšími hrubozrnnými frakcemi kameniva a současně prověřit možnost využití recyklovaného materiálu.

Pro přípravu směsí bylo použito silniční asfaltové pojivo třídy 50/70, které představuje běžně používaný typ v podkladních vrstvách vozovek. Toto pojivo bylo zvoleno s ohledem na požadovanou rovnováhu mezi pevností, tuhostí a dostatečnou zpracovatelností směsí. Sekundárním cílem návrhu bylo zároveň snížit celkovou spotřebu asfaltového pojiva díky hrubšímu skeletu směsí, což by mělo přinést ekonomickou úsporu v nákladech na asfaltovou směs.

Pro etapu asfaltových směsí, které byly prováděny na FSV ČVUT v Praze, byly hlavní zdroje kameniva lom Brant a lom Měrunice. Složení směsí vycházelo z kombinace běžně dostupných frakcí (0/2, 2/5, 5/8, 8/11, 11/16) a klíčové hrubé frakce 16/32 mm, případně doplněné o frakci 22/32 mm.

Při návrhu směsí s maximální velikostí zrna 32 mm byly testovány různé varianty složení směsí kameniva. Jednalo se o směsi bez frakce kameniva 8/11, kde byla tato část nahrazena hrubšími podíly kameniva, směsi bez frakcí kameniva 5/8 a 8/11, čímž se zvýšil podíl hrubozrnných frakcí, směsi s plynulou čarou zrnitosti, které měly vyváženější skelet a lepší zpracovatelnost. Součástí experimentů byla také výroba asfaltových směsí s podílem přibližně 50 % recyklovaného R-materiálu. Tento recyklát nahrazoval část primárního kameniva a cílem bylo ověřit jeho vliv na základní parametry směsí, zejména na odolnost asfaltové směsi vůči negativnímu účinku vody a trvalým deformacím.

Na základě laboratorních návrhů a zkoušek byly definovány konkrétní směsi ACP 32, jejichž částečný výčet je uveden zde:

- Bv1/32 – směs s pojivem 50/70, kamenivo z lomu Brant, bez frakce 8/11,
- Bv2/32 – směs s pojivem 50/70, kamenivo z lomu Brant, s plynulou čarou zrnitosti,
- Bv3/32 – směs s pojivem 50/70, kamenivo z lomu Brant, bez frakcí 5/8 a 8/11,

- Bv1R/32 – směs s pojivem 50/70, kamenivo z lomu Brant a cca 50 % R-materiálu, bez frakce 8/11,
- Bv2R/32 – směs s pojivem 50/70, kamenivo z lomu Brant a cca 50 % R-materiálu, s plynulou čarou zrnitosti,
- Bv3R/32 – směs s pojivem 50/70, kamenivo z lomu Brant a cca 50 % R-materiálu, bez frakcí 5/8 a 8/11,
- směs č. 1B/32, směs s maximální velikostí zrna 32 mm a asfaltovým pojivem 50/70, z lomu Brant,
- směs č. 2B/22, směs s maximální velikostí zrna 22 mm a asfaltovým pojivem 50/70, z lomu Brant,
- směs č. 3M/32, směs s maximální velikostí zrna 32 mm a asfaltovým pojivem 50/70 z lomu Měrunice,
- směs č. 4MR/32, s maximální velikostí zrna 32 mm a asfaltovým pojivem 50/70 a 40 % obsahem R-materiálu z lomu Měrunice.

Tyto varianty umožnily porovnat chování směsí s odlišným složením skeletu a s rozdílným podílem R-materiálu. Následné laboratorní a provozní ověřování mělo ukázat, které kombinace poskytují nejlepší poměr mezi technickými vlastnostmi a ekonomickou efektivitou.

Ověření možnosti využití zkušebních těles o průměru 101,5 mm pro asfaltové směsi ACP 32

Cílem této experimentální části projektu bylo prokázat či vyvrátit hypotézu, zda je možné pro výrobu zkušebních těles asfaltových směsí obsahující maximální velikost zrna 32 mm použít jejich standardní průměr tj. 101,5 mm, nebo zda je nutné pro ověřování vlastností asfaltových směsí používat zkušební tělesa o průměru 150 mm.

Pro ověření této hypotézy bylo provedeno srovnání objemových hmotností, resp. mezerovitostí a míry zhutnění na standardních asfaltových směsí a asfaltových směších obsahující kamenivo s maximální velikostí zrna 32 mm.

V rámci experimentálního porovnání vlivu velikosti zkušební tělesa a maximální velikosti zrna D v asfaltové směsi na zhutněnou objemovou hmotnost, resp. mezerovitost či míru zhutnění asfaltové směsi byly odzkoušeny dvě standardní asfaltové směsi a čtyři asfaltové směsi, které obsahovaly maximální zrno o velikosti 32 mm. Typ a složení asfaltových směsí jsou uvedeny v tabulce 1, jedná se o odlišné směsi, které byly zmíněny výše v textu příspěvku. Odzkoušena byla směs s maximální velikostí zrna 11 mm, resp. 16 mm a směsi s maximální velikostí zrna 32 mm, které se vzájemně lišily obsahem frakce kameniva 16/32. V asfaltové směsi s označením S32/1 bylo obsaženo 9,55 % frakce kameniva 16/32 a ve směsi S32/4 pak 38,20 % frakce kameniva 16/32.

Tabulka 1: Složení zkoušených asfaltových směsí pro porovnání vlivu velikosti zrna ve směsi a velikosti zkušební vzorku

Označení asfaltové směsi	Typ asfaltové směsi	Maximální velikost zrna D (mm)	Složení asfaltové směsi (%)						
			Frakce kameniva						Obsah asfaltového pojiva
S11	ACO 11+	11	JMV	0/5	0/4	4/8	8/11	---	50/70
			2,8	8,5	35,9	18,9	24,8	---	5,4
S16	ACP 16+	16	JMV	0/4	4/8	8/16	---	---	50/70
			1,9	56,3	12,4	24,8	---	---	4,6
			0/2	2/5	5/8	8/11	11/16	16/32	50/70
S32/1	ACP 32	32	14,3	14,3	19,1	19,1	19,1	9,55	4,5
S32/2	ACP 32	32	12,4	12,4	17,2	17,2	17,2	19,1	4,5
S32/3	ACP 32	32	10,5	10,5	15,3	15,3	15,3	28,7	4,5
S32/4	ACP 32	32	8,6	8,6	13,37	13,37	13,37	38,20	4,5

Výsledky volumetrických vlastností vyrobených a odzkoušených směsí jsou uvedeny v tabulce 2. Mezerovitost asfaltové směsi byla stanovena na základě normy ČSN EN 12697-8 [3], míra zhutnění pak podle ČSN 73 6160 Zkoušení asfaltových směsí. Výsledky mezerovitostí standardních směsí stanovených na zkušebních tělesech 101,5 mm a 150 mm se vzájemně lišily o 0,6 % až 2 %. Výsledky mezerovitostí směsí obsahující kamenivo frakce 16/32 stanovených na zkušebních tělesech 101,5 mm a 150 mm se vzájemně lišily o 0,2 % až 1,1 %. Výsledky míry zhutnění standardních směsí stanovených na zkušebních tělesech 101,5 mm a 150 mm se vzájemně lišily o 0,6 % až 2,1 %. Výsledky míry zhutnění směsí obsahující kamenivo frakce 16/32 stanovených na zkušebních tělesech 101,5 mm a 150 mm se vzájemně lišily o 0,2 % až 1,3 %.

Nebyla prokázána závislost mezi mezerovitostí asfaltové směsi nebo mírou zhutnění a obsahem nestandardní velikosti zrna či frakce 16/32 a velikosti zkušební vzorku, kdy směs s označením S32/4 obsahovala 38,2 % hmotnosti frakce kameniva 16/32.

Tabulka 2: Volumetrické charakteristiky zkoušených asfaltových směsí pro porovnání vlivu velikosti zrna ve směsi a velikosti zkušební vzorku

Označení asfaltové směsi	Typ asfaltové směsi	Maximální velikost zrna D (mm)	Průměr zkušební tělesa (mm)	Mezerovitost vrstvy (%)	Míra zhutnění (%)
S11	ACO 11 +	11	101,5	5,1	---
			150,0	3,1	102,1
S16	ACP 16 +	16	101,5	3,2	---
			150,0	3,8	99,4
S32/1	ACP 32	32	101,5	12,0	---
			150,0	11,7	100,5
S32/2	ACP 32	32	101,5	14,1	---
			150,0	13,1	101,1
S32/3	ACP 32	32	101,5	12,0	---
			150,0	11,8	100,2
S32/4	ACP 32	32	101,5	12,6	---
			150,0	13,7	98,7

Vybrané výsledky laboratorních experimentů asfaltových směsí s velikostí zrna 32 mm

Výsledky volumetrických vlastností vyrobených a odzkoušených směsí jsou uvedeny v tabulce 3. Hlavním cílem bylo navrhnout z obou lomů směsi tak, aby si co nejvíce odpovídaly v mezerovitosti asfaltové směsi pro podkladní vrstvy. Předpokladem pro hodnotu mezerovitosti směsi ACP 32 bylo dodržet shodný požadavek s požadovaným intervalem mezerovitosti pro zkoušku typu asfaltové směsi ACP 22 S, který definuje norma ČSN 73 6121 [10] v tabulce E.9 intervalem 4 % až 7 %.

Tento požadavek byl splněn ve čtyřech případech ze šesti. Maximální mezerovitost 8,7 % u návrhu směsi s označením Bv2/32 lze považovat jako dostačující, přihlídneme-li právě k maximální velikosti použitého zrna ve směsi. Do budoucna lze navrhnout mezerovitost těchto typů směsí mezi 4 % až 9 % pro zkoušku typu a 4 % až 10 % pro kontrolní zkoušky.

Tabulka 3: Volumetrické charakteristiky navržených asfaltových směsí s maximální velikostí zrna 32 mm

Označení asfaltové směsi	Typ asfaltové směsi	Mezerovitost asfaltové směsi (%)	Mezerovitost směsi kameniva VMA (%)	Stupeň vyplnění mezer VFB (%)
Bv1/32	ACP 32	7,9	16,6	52,4
Bv2/32	ACP 32	8,7	17,8	51,1
Bv3/32	ACP 32	6,9	15,0	54,1
Bv1R/32	ACP 32	4,3	15,4	72,1
Bv2R/32	ACP 32	5,9	16,5	64,2
Bv3R/32	ACP 32	4,5	16,0	71,9

Výsledky mechanicko-fyzikálních vlastností vyrobených a odzkoušených směsí jsou uvedeny v tabulkách 4 a 5.

Odolnost asfaltových směsí vůči vodě byla zjištěna pomocí metody využívající stanovení pevnosti v příčném tahu. Zkouška byla provedena podle ČSN EN 12697-12 [4]. Pro asfaltové směsi typu ACO a ACL jsou požadované hodnoty ITSR na úrovni 80 %. Pro směsi typu ACP žádné požadavky definované nejsou. Z námi zjištěných výsledků vyplývá, že samotné hodnoty pevností v příčném tahu jsou vyšší než běžně dosahované, což bude způsobeno větší zrnitostí směsi kameniva. A dále pak hranice ITSR 80 % byla splněna ve všech třech případech s velkou rezervou. Charakteristiky asfaltové směsi tak nejsou výrazně ovlivněny působením vody. Z tohoto pohledu je reálné využívat tento typ směsí i v konstrukcích vozovek přímo pod obrusnou vrstvu.

V tabulce 5 jsou shrnuty výsledky zkoušky pojíždění kolem. Pro asfaltové směsi typu ACP není tato zkouška předepsána. Pro asfaltové směsi typu ACL 22 S zkouška pojíždění kolem v normě ČSN 73 6121 [10] uvádí podmínku pro hodnotu maximální poměrné hloubky koleje $PRD_{AIR} = 3,0 \%$ a pro hodnotu maximálního přírůstku hloubky koleje $WTS_{AIR} = 0,05 \text{ mm}$. Všechny tři odzkoušené směsi tyto podmínky splnily s velkou rezervou. Rozdíly ve zjištěných hodnotách byly naprosto minimální. Asfaltová směs s maximální velikostí zrna 22 mm se zkouší na tloušťku desky 60 mm. Pro velikost zrna 32 mm je předepsána zkušební tloušťka desky 80 mm. Proto byla pro porovnání vlastností provedena zkouška i na asfaltové směsi s velikostí zrna 22 mm, avšak na desce o tloušťce 80 mm. Poměr mezi maximální velikostí zrna ve směsi a tloušťky zkušební desky má vliv na konečný výsledek. Tímto porovnáním jsme si však ověřili, že odolnost asfaltových směsí s velikostí zrna 32 mm vůči tvorbě trvalých deformací je velmi dobrá a tyto směsi jsou odolné vůči vzniku trvalých deformací i v kombinaci s klasickým silničním pojivem 50/70.

Pro stanovení hodnot stability a přetvoření byla využita Marshallova zkouška popsaná v ČSN EN 12697-34 [11]. Stabilitou se rozumí maximální odolnost zkušební tělesa proti deformaci, přetvořením pak deformace zkušební tělesa definovaná jako vzdálenost od průsečíku tečny a přímky základny po bod, kde je dosaženo maximální síly. Podíl těchto dvou hodnot se označuje jako míra tuhosti. Výsledky stability podle Marshalla jsou vyhovující a potvrzují dostatečnou tuhost směsí s velikostí zrna 32 mm.

Tabulka 4: Odolnost asfaltové směsi vůči negativním účinkům vody ITSR asfaltových směsí s maximální velikostí zrna 32 mm

Označení asfaltové směsi	Typ asfaltové směsi	ITSR (%)	ITS _d (kPa)	ITS _w (kPa)
Bv1/32	ACP 32	88,3	1 459	1 289
Bv2/32	ACP 32	92,4	1 527	1 411
Bv3/32	ACP 32	88,7	1 617	1 434

Tabulka 5: Odolnost asfaltové směsi vůči vzniku trvalých deformací při teplotě 50 °C

Označení asfaltové směsi	Typ asfaltové směsi	Tloušťka zkušební desky	WTS _{AIR} (mm)	PRD _{AIR} (%)
Bv1/32	ACP 32	80 mm	0,020	1,6
Bv2/32	ACP 32	80 mm	0,023	1,8
Bv3/32	ACP 32	80 mm	0,023	1,7
1B/32	ACP 32	80 mm	0,018	2,1
2B/22	ACP 22 S	60 mm	0,020	1,4
2B/22	ACP 22 S	80 mm	0,026	1,7

Tabulka 6: Marshallova zkouška navržených asfaltových směsí s maximální velikostí zrna 22 mm, resp. 32 mm

Označení asfaltové směsi	Typ asfaltové směsi	Stabilita (kN)	Deformace (mm)	Tuhost (kN/mm)
1B/32	ACP 32	14,5	6,6	2,2
2B/22	ACP 22 S	12,1	7,1	1,7
3M/32	ACP 32	13,5	6,1	2,2
4MR/32	ACP 32	12,3	6,3	2,0

Ke stanovení chování asfaltové směsi ve vozovce a stanovení chování celé konstrukce vozovky se využívá klasifikace asfaltových směsí podle modulů tuhosti. Modul tuhosti vyjadřuje vztah mezi aplikovaným maximálním napětím a při něm naměřeném maximálním přetvořením. Vzorky (6 válcových těles hutněných 2 x 50 úderů) byly deformovány v rozsahu lineárního přetvoření (pružné tuhosti) zkouškou v příčném tahu (metoda IT-CY). Podrobný postup zkoušky je uveden v ČSN EN 12697-26. Tělesa byla odzkoušena při čtyřech zkušebních teplotách (0 °C, 15 °C, 27 °C a 40 °C).

Výsledky modulů tuhosti jsou závislé na použitém kamenivu, ale i na zrnitosti směsi kameniva, resp. na maximální velikosti zrna ve směsi. Bylo zjištěno, že směsi s maximálním zrnem 32 mm vykazují mírně vyšší parametry tuhosti ve sledovaném teplotním režimu ve srovnání se směsmi s maximální velikostí zrna 22 mm.

Tabulka 7: Moduly tuhosti navržených asfaltových směsí s maximální velikostí zrna 22 mm, resp. 32 mm

Označení asfaltové směsi	Typ asfaltové směsi	Modul tuhosti v MPa při zkušební teplotě			
		0 °C	15 °C	27 °C	40 °C
1B/32	ACP 32	14 575	6 083	2 339	976
2B/22	ACP 22 S	14 682	6 386	2 321	610
3M/32	ACP 32	---	9 245	---	1 114
4MR/32	ACP 32	---	12 830	---	1 728

Závěr

Výzkum realizovaný v rámci projektu OPTIGRAIN prokázal, že asfaltové směsi s maximální velikostí zrna 32 mm jsou plnohodnotnou alternativou k tradičně používaným směsím s maximální velikostí zrna 22 mm. Jejich návrh, laboratorní ověření i následná pokusná aplikace ukázaly, že směsi ACP 32 splňují stanovené objemové i mechanicko-fyzikální parametry a ve většině případů dosahují hodnot srovnatelných, případně i lepších než referenční směsi ACP 22. Testy potvrdily vysokou odolnost těchto směsí vůči negativním účinkům vody, dobrou stabilitu a pevnost, jakož i výraznou odolnost vůči vzniku trvalých deformací. Významným přínosem je také možnost širšího využívání hrubozrnných frakcí kameniva (zejména 16/32 mm), které nejsou v hlavní stavební sezóně nedostatkové. Tím dochází k odlehčení tlaku na omezené zdroje nedostatkových frakcí a zároveň k ekonomickým úsporám díky stabilnější ceně hrubozrnných složek. Dalším pozitivním aspektem je prokázaná možnost začlenění recyklovaného materiálu až do podílu 40–50 %, což přispívá k šetrnějšímu využívání přírodních zdrojů, omezení odpadu a podpoře principů cirkulární ekonomiky.

Ověření metodiky zkoušení také ukázalo, že směsi s maximálním zrnem 32 mm lze hodnotit s využitím běžně používaných zkušebních těles o průměru 101,5 mm, aniž by docházelo k významnému zkreslení výsledků. To zjednodušuje proces ověřování těchto směsí a umožňuje jejich snadnější zavedení do praxe.

Celkově lze konstatovat, že asfaltové směsi ACP 32 představují perspektivní materiál pro podkladní vrstvy vozovek, který je možné využívat v rámci běžné výstavby i rekonstrukcí komunikací. Jejich nasazení přispívá nejen k technické spolehlivosti a dlouhodobé životnosti vozovek, ale i k hospodárnějšímu a udržitelnějšímu nakládání se surovinovými zdroji v podmínkách České republiky.

Poděkování

Příspěvek vznikl s podporou Technologické agentury ČR, projekt CK03000169 (Vývoj konstrukčních vrstev vozovek s optimalizovanou zrnitostí nahrazující nedostatkové frakce kameniva).

Zdroje:

- [1] ČSN EN 12697-5 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti, 02/2020;
- [2] ČSN EN 12697-6 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa, 03/2021;
- [3] ČSN EN 12697-8 Asfaltové směsi - Zkušební metody – Část 8: Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí, 03/2020;
- [4] ČSN EN 12697-12 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 12: Stanovení odolnosti zkušebního tělesa vůči vodě, 11/2020;
- [5] ČSN EN 12697-22+A1 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 22: Zkouška pojíždění kolem, 11/2024;
- [6] ČSN EN 12697-23 Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 23: Stanovení pevnosti v příčném tahu, 12/2018;
- [7] ČSN EN 12697-24 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 24: Odolnost vůči únavě, 06/2019;
- [8] ČSN EN 12697-26 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 26: Tuhost, 06/2023;
- [9] ČSN EN 12697-46 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 46: Nízkoteplotní vlastnosti a tvorba trhlin pomocí jednoosé zkoušky tahem, 03/2021;
- [10] ČSN 73 6121 Stavba vozovek – Hutněné asfaltové vrstvy – Provádění a kontrola shody, 03/2023;
- [11] ČSN EN 12697-34 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 34: Marshallova zkouška, 03/2021;
- [12] CK03000169-V1 Metodika návrhu, provádění a kontroly kvality velmi hrubozrnných nestmelených směsí a vrstev
- [13] CK03000169-V2 Metodika návrhu, provádění a kontroly velmi hrubých asfaltových směsí a vrstev

NOVÝ TYP VÝZTUŽNÝCH ARAMIDOVÝCH VLÁKEN A OVĚŘENÍ JEJICH FUNKČNOSTI

A NEW TYPE OF REINFORCING ARAMID FIBERS AND VERIFICATION OF THEIR FUNCTIONALITY

Ing. David Matoušek, CIUR a.s.

Ing. František Buráň, CIUR a.s.

Ing. Mojmír Urbánek, CIUR a.s.

Příspěvek pojednává o novém typu vysoce výkonné 3D rozptýlené výztuže určené pro silniční stavby. Speciální směs obsahuje vyšší podíl aramidových vláken a v asfaltové směsi účinně omezuje vznik a šíření mrazových, reflexních a únavových trhlin nebo zlepšuje odolnost proti trvalým deformacím a vyjíždění kolejí. Funkčnost vláken byla ověřena sérií laboratorních zkoušek asfaltových směsí s těmito vlákny a na konkrétních silničních stavbách.

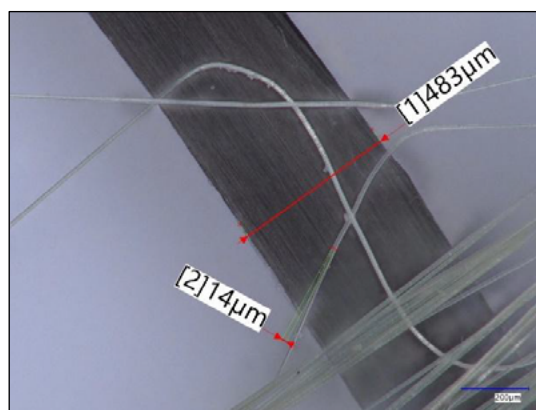
The paper discusses a new type of high-performance 3D scattered reinforcement designed for road construction. The special mixture contains a higher proportion of aramid fibers and effectively limits the formation and propagation of frost, reflection and fatigue cracks in the asphalt mixture or improves resistance to permanent deformation and formations of ruts. The functionality of the fibers was verified by a series of laboratory tests of asphalt mixtures with these fibers and on specific road construction sites.

Úvod

Vzhledem k neustále se zvyšujícímu zatížení vozovek pozemních komunikací od přejezdů těžkých nákladních vozidel (TNV) a vyšších nároků na prvky dopravní infrastruktury z hlediska nestandardního způsobu zatěžování od TNV (okružní křižovatky, předkřižovatkové úseky, stoupací pruhy, autobusové zastávky, manipulační průmyslové plochy atd.) v kombinaci s neustále se zhoršující kvalitou silničních asfaltů je pro zachování trvanlivosti asfaltových vrstev potřeba hledat inovativní a funkční řešení. Rozptýlená výztuž tvořená aramidovými vlákny takovým řešením dozajista je a potvrzuje to i její větší míra používání ve Středočeském a Jihočeském kraji. Přidáním výztužných vláken do asfaltové směsi se zvyšuje tuhost směsi, odolnost proti únavě a odolnost proti trvalým deformacím. Takto vyztužené asfaltové směsi se používají v kombinaci jak se silničními asfalty, tak s polymerem modifikovanými asfalty.

Aramidová výztužná vlákna FlexForce

Jedná se o speciální směs aramidových a polypropylenových vláken v poměru 30 % ku 70 % vyvinutou pro funkční zlepšení vlastností asfaltových směsí používaných pro stavby silnic a dálnic, a to zejména v náročných podmínkách z hlediska zatížení, tedy v úsecích s vysokou intenzitou TNV nebo v místech, kde se vyskytuje nestandardní způsob zatěžování, ať už v podobě smykových sil, přetížení jedné strany nápravy TNV vlivem odstředivé síly, účinků od častých brzdných a rozjíždějících sil atd.



Obrázek 1: Výztužná vlákna FlexForce pod mikroskopem

Aramidová vlákna fyzicky zůstávají v asfaltové vrstvě, zatímco polypropylenová vlákna se během výroby asfaltové směsi rozpustí. Jejich funkcí je zajištění rovnoměrného rozptýlení aramidových vláken ve směsi a její následná modifikace. Kombinace aramidových a polypropylenových vláken účinně omezuje vznik a šíření mrazových, reflexních a únavových trhlin a zlepšuje odolnost proti trvalým deformacím a vyjíždění kolejí. Díky vyztužení směsi vlákny dochází ke zlepšení únavových charakteristik, což je vhodné pro vozovky s vysokým dopravním zatížením. Aramidová vlákna mají obecně mnohem lepší mechanické vlastnosti než jiné typy vláken (ocelová, skelná) a jsou odolná proti teplu a ohni. Používají se v různých aplikacích, jako jsou neprůstřelné vesty, letecké komponenty a ochranné pomůcky. Aramidová vlákna použitá do směsi vláken FlexForce jsou nově vyrobená výztužná vlákna, která dosahují vynikající hodnoty modulu pružnosti E okolo 69 GPa, což je pro použití v silničních stavbách více než dostačující. Modul pružnosti je poměr mezi napětím a jím vyvolané deformace v elastické oblasti materiálu, kde je deformace dočasná. Vyšší modul znamená, že materiál je tužší a pro stejnou deformaci vyžaduje větší napětí. Jemnost vlákna je 1,7 dtex, což odpovídá 12,2 μm .

Tabulka 1: Vlastnosti výztužných vláken FlexForce

Typ vláken	Aramidová	Polypropylenová
Barva	světle žlutá	černá
Délka vláken	19 mm	19 mm
Objemová hmotnost	1,44 g/cm ³	0,91 g/cm ³
Pevnost v tahu	2 700 až 3 600 MPa	200 až 500 MPa
Bod tání	> 400 °C	165 °C až 175 °C

Vlákna FlexForce uplatňují svůj účinek přímo v asfaltové struktuře. Přidaná v malém množství, obvykle 0,2 kg na 1 t asfaltové směsi, posilují vazbu v materiálu a zajišťují rovnoměrné rozložení mechanických sil. Výsledkem je výrazně stabilnější a odolnější asfaltová vrstva, která lépe odolává provozu a povětrnostním vlivům. Trhliny, deformace a opotřebení vozovky, které se často objevují po krátké době, jsou tak výrazně sníženy. Tato technologická inovace je výhodou nejen pro ŘSD ČR, ale také pro krajské správy a údržby silnic, které následně těží z výrazně nižších nákladů na údržbu a opravy. Pozemní komunikace vyztužené vlákny FlexForce nabízejí dlouhodobá řešení, která jsou ekonomicky i ekologicky šetrná.

Ověření funkčnosti vláken laboratorními zkouškami

Pro ověření funkce výztužných vláken FlexForce byla provedena řada laboratorních zkoušek na různých typech asfaltových směsí vyrobených na obalovně i v laboratoři. Vždy byla porovnávána směs s obsahem vláken FlexForce v množství 0,2 kg na 1 t směsi s referenční směsí, která byla bez obsahu výztužných vláken. Dále byla provedena řada ověření funkčnosti v rámci zkoušek typu jednotlivých obaloven z hlediska odolnosti vůči trvalým deformacím a ITSr.

Odolnost vůči trvalým deformacím a odolnost vůči vodě

Trvalé deformace charakterizované zkouškou pojíždění kolem byly prováděny podle ČSN EN 12697-22 na malém zkušebním zařízení, a to při teplotě 50 °C pro směsi se silničním pojivem 50/70 a při teplotě 60 °C pro směsi s pojivem PMB. Odolnost vůči vodě charakterizována poměrem pevností suchých a mokřích těles v příčném tahu byla provedena podle ČSN 12697-23. Směsi uvedené v tabulce 2 byly vyrobeny na obalovně a směsi uvedené v tabulce 3 v laboratoři.

Tabulka 2: Porovnání ACO 16+ PMB 45/80-75 a ACO 16+ PMB 45/80-75 FlexForce

	Požadavek ČSN 73 6121	ACO 16+ PMB 45/80-75	ACO 16+ PMB 45/80-75 FlexForce
Max. objem. hmotnost nezhut. asf. směsi ρ_{mv} [Mg/m ³]	-	2,534	2,54
Objem. hmotnost zhut. asf. směsi ρ_{bssd} [Mg/m ³]	-	2,416	2,371
Mezerovitost V_m [%]	2,5 až 4,0	5,4	6,57
Poměr pevnosti v příčném tahu ITSR [%]	min. 80	99	80
Hloubka koleje po 10 000 cyklech	-	1,58	0,91
Max. poměrná hloubka koleje po 5000 cyklech PRD_{AIR} [%]	max. 6,0	2,4	1,4
Max. přírůstek hloubky koleje WTS_{AIR} [mm/10 ³ cyklů]	max. 0,08	0,021	0,014

Z výsledků uvedených v tabulce 2 je patrné, že přidáním 0,2 kg vláken FlexForce na 1 t asfaltové směsi dochází ke zlepšení charakteristik PRD_{AIR} a WTS_{AIR} . Rovněž došlo ke snížení hloubky koleje po 10 000 cyklech z 1,58 MM na 0,91 mm, což je o cca 42,4 %.

Tabulka 3: Porovnání ACL 16+ 50/70 a ACL 16+ 50/70 FlexForce

	Požadavek ČSN 73 6121	ACL 16+ 50/70	ACL 16+ 50/70 FlexForce
Max. objem. hmotnost nezhut. asf. směsi ρ_{mv} [Mg/m ³]	-	2,469	2,462
Objem. hmotnost zhut. asf. směsi ρ_{bssd} [Mg/m ³]	-	2,342	2,342
Mezerovitost V_m [%]	4,0 až 6,0	5,1	4,9
Poměr pevnosti v příčném tahu ITSR [%]	min. 80	83	87,1
Max. poměrná hloubka koleje po 5000 cyklech PRD_{AIR} [%]	max. 4,0	3,3	2,4
Max. přírůstek hloubky koleje WTS_{AIR} [mm/10 ³ cyklů]	max. 0,06	0,04	0,03

Přidáním vláken FlexForce do směsi ACL 16+ se silničním asfaltem 50/70 došlo opět ke zlepšení charakteristik PRD_{AIR} a WTS_{AIR} . Jak směsi ACO 16+ PMB 45/80-75 uvedené v tabulce 2, tak směsi ACL 16+ 50/70 uvedené v tabulce 3 splňují požadavek normy ČSN 73 6121, a to minimální hodnoty $ITSR_{min} = 80$ %.

Odolnost vůči trvalým deformacím a odolnost vůči vodě v rámci zkoušek typu

Výsledky byly převzaty ze zkoušek typu provedených v roce 2024, které vypracovaly různé akreditované laboratoře, jak je vidět podle označení zkoušek typu. Požadavky na poměr pevnosti v příčném tahu

a charakteristiky PRD_{AIR} a WTS_{AIR} byly splněny s dostatečnou rezervou u všech typů asfaltových směsí pro ložní i obrusné vrstvy (tabulka 3 a tabulka 4). Obdobně u všech asfaltových směsí (tabulka 3 a tabulka 4) byl splněn požadavek normy ČSN 73 6121, a to minimální hodnoty ITSR_{min} = 80 %.

Tabulka 4: Směsi ACL

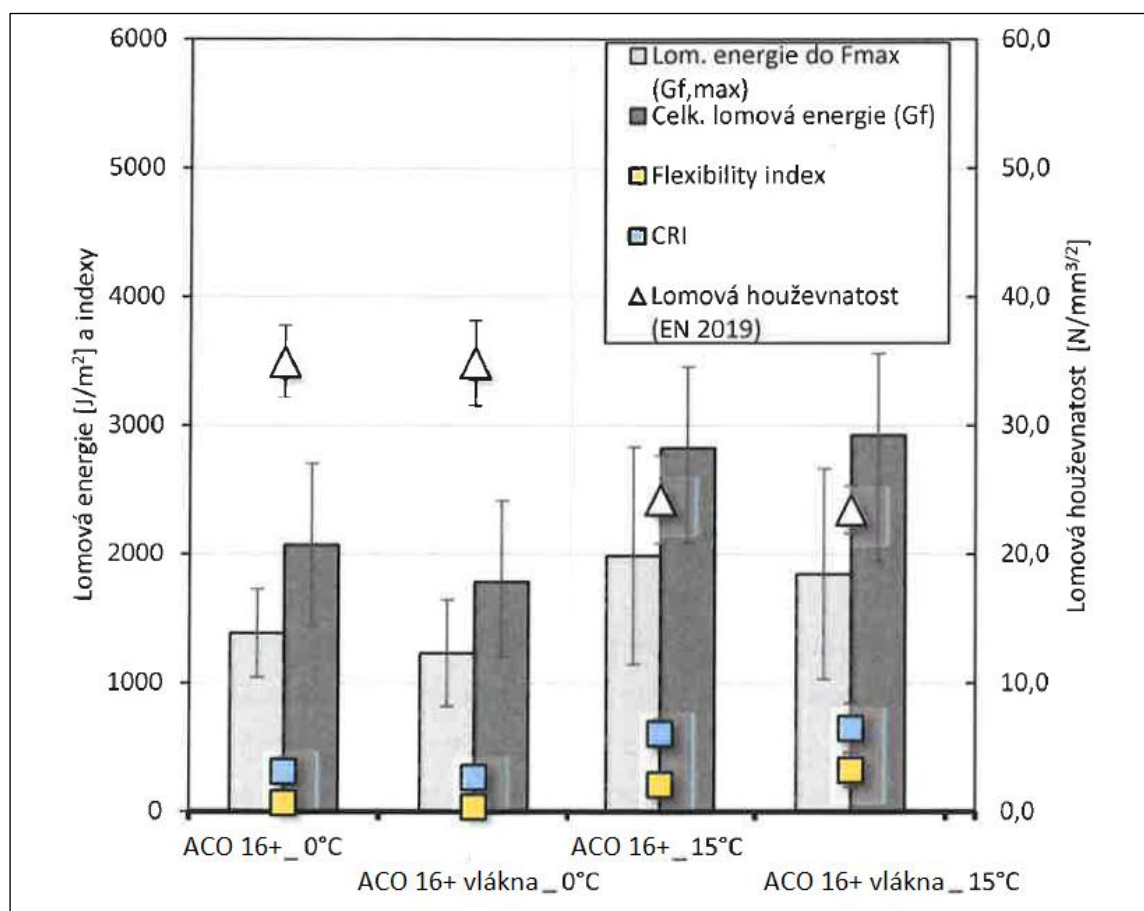
		CB24-013-JČO	PZT-033-24	PZT-078/24	ZT AT-65CB-24
	Požadavek ČSN 73 6121	ACL 22+ 50/70 FlexForce	ACL 16+ 50/70 FlexForce	ACL 16+ 50/70 FlexForce	ACL 16+ 50/70 FlexForce
Max. objem. hmotnost nezhut. asf. směsi ρ_{mv} [Mg/m ³]	-	2,482	2,476	2,485	2,462
Objem. hmotnost zhut. asf. směsi ρ_{bssd} [Mg/m ³]	-	2,362	2,365	2,355	2,342
Mezerovitost V _m [%]	4,0 až 6,0	4,8	4,5	5,2	4,9
Poměr pevnosti v příčném tahu ITSR [%]	min. 80	96,1	86	85	87,1
Max. poměrná hloubka koleje po 5000 cyklech PRD _{AIR} [%]	max. 4,0	2,1	2,3	3,3	2,4
Max. přírůstek hloubky koleje WTS _{AIR} [mm/10 ³ cyklů]	max. 0,06	0,03	0,03	0,04	0,03

Tabulka 4: Směsi ACO

		PZT-034-24	PZT-079/24	PZT-080/24	ZT AT-62CB-24
	Požadavek ČSN 73 6121	ACO 11+ PMB 45/80-65 FlexForce	ACO 11+ PMB 45/80-65 FlexForce	ACO 16+ PMB 45/80-65 FlexForce	ACO 16+ PMB 45/80-75 FlexForce
Max. objem. hmotnost nezhut. asf. směsi ρ_{mv} [Mg/m ³]	-	2,425	2,465	2,475	2,45
Objem. hmotnost zhut. asf. směsi ρ_{bssd} [Mg/m ³]	-	2,351	2,399	2,395	2,364
Mezerovitost V _m [%]	2,5 až 4,0	3,1	2,7	3,2	3,5
Poměr pevnosti v příčném tahu ITSR [%]	min. 80	91	88	86	89,2
Max. poměrná hloubka koleje po 5000 cyklech PRD _{AIR} [%]	max. 6,0	2,4	4,0	3,5	2,7
Max. přírůstek hloubky koleje WTS _{AIR} [mm/10 ³ cyklů]	max. 0,08	0,02	0,04	0,04	0,04

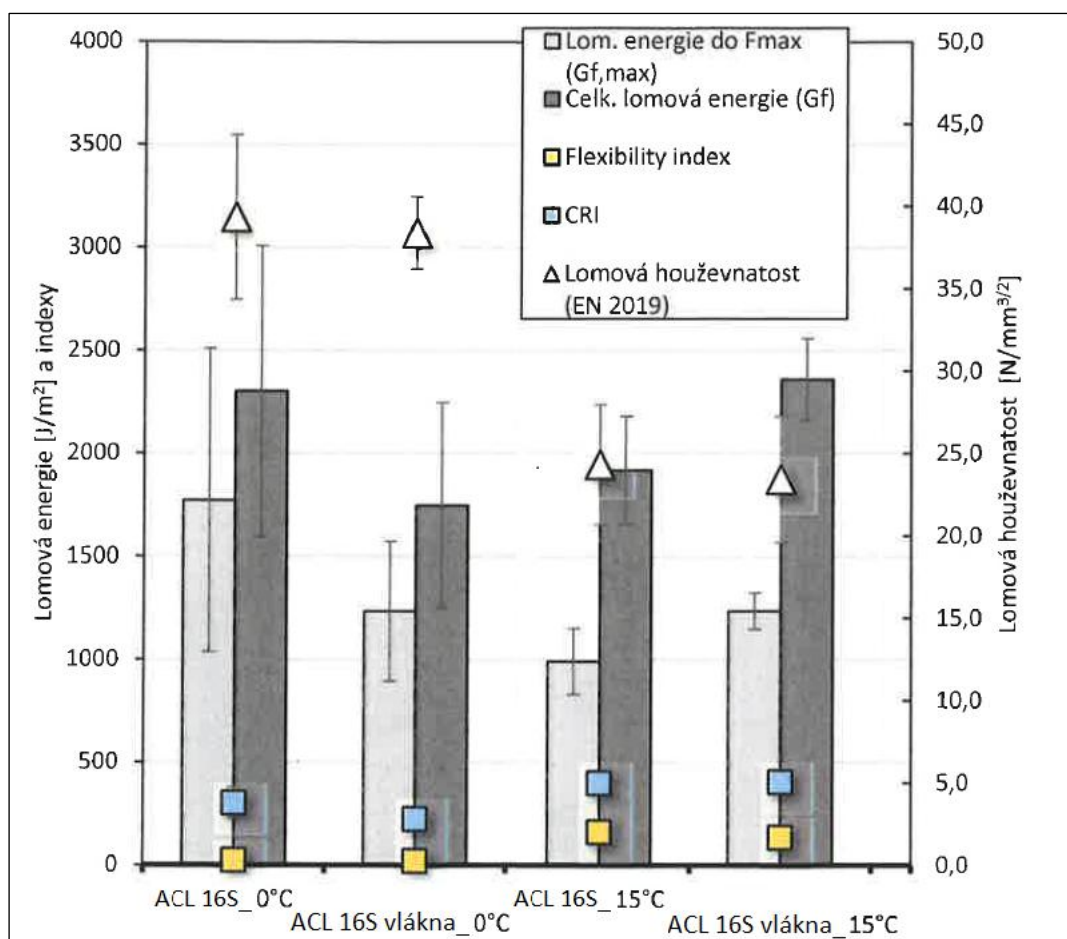
Odolnost vůči šíření trhliny

Zkouška odolnosti vůči šíření trhliny byla provedena na půlválcových tělesech podle ČSN EN 12697-44 s modifikovaným postupem využívaným dlouhá léta na ČVUT v Praze Fakultě stavební. Ze záznamů síly byla vypočtena lomová energie zkoušky a stanoveny dva indexy pro hodnocení zkoušky, a to flexibility index (FI: G_f/m) a crack resistance index (CRI: G_f/F_{max}). Půlválcová zkušební tělesa byla zkoušena při teplotě 0 °C a 15 °C.



Obrázek 1: Charakteristiky odolnosti vůči šíření trhliny směsi typu ACO 16+

Porovnání směsi ACO 16+ PMB 45/80-75 bez vláken a s vlákny FlexForce přináší zjištění, že u směsi ACO 16+ s vlákny v případě obou zkušebních teplot poklesla lomová houževnatost a lomová energie do F_{max} . Celková lomová energie a oba indexy byly při 0 °C nižší a při 15 °C mírně vyšší než u referenční směsi ACO 16+ bez vláken.

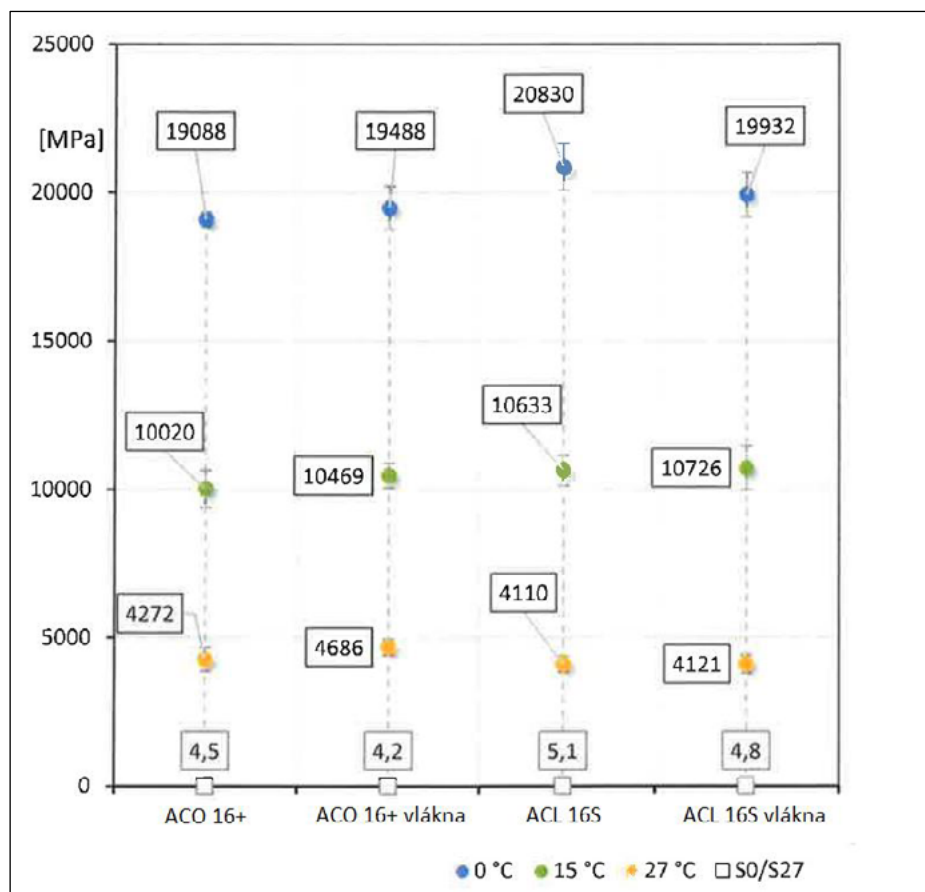


Obrázek 2: Charakteristiky odolnosti vůči šíření trhliny směsí typu ACL 16S

Zkoušení asfaltových směsí ACL 16 S PMB 25/55-60 bez vláken a s vlákny FlexForce přineslo obdobná zjištění jako u směsí ACO 16+ PMB 45/80-75.

Tuhost stanovená metodou IT-CY

Moduly tuhosti byly stanoveny nedestruktivní metodou IT-CY podle ČSN EN 12697-26. Jedná se o opakované namáhání v příčném tahu na válcových zkušebních tělesech.

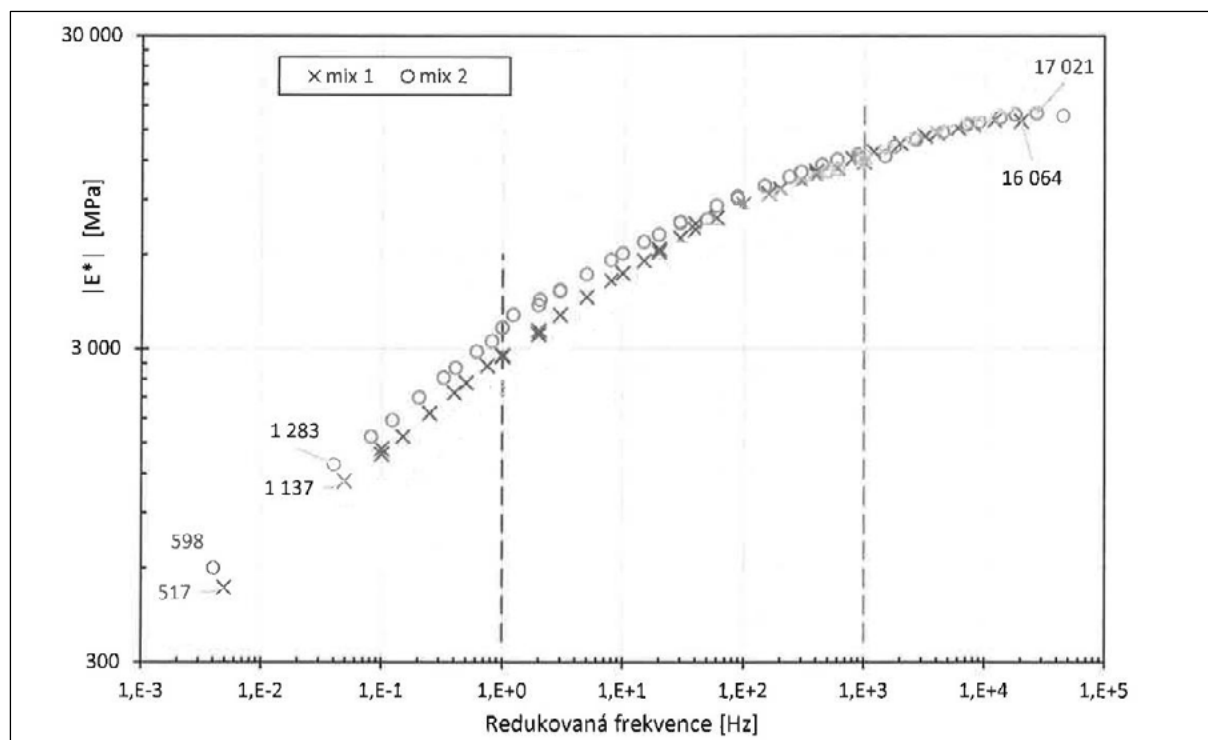


Obrázek 3: Moduly tuhosti směsí typu ACO 16+ a ACL 16S

Z výsledků uvedených na obrázku 3 lze odvodit, že směsi bez vláken a směsi s vlákny dosáhly podobné tuhosti, ať už se jedná o směsi ACO 16+ PMB 45/80-75, nebo ACL 16S PMB 25/55-60. Dále lze říci, že u obou směsí s vlákny došlo ke zlepšení teplotní citlivosti, která se vypočítá jako poměr modulu tuhosti při 0 °C k modulu tuhosti při 27 °C. Toto zjištění podporují i výsledky obdržené v minulosti s obdobnými typy výztužných vláken.

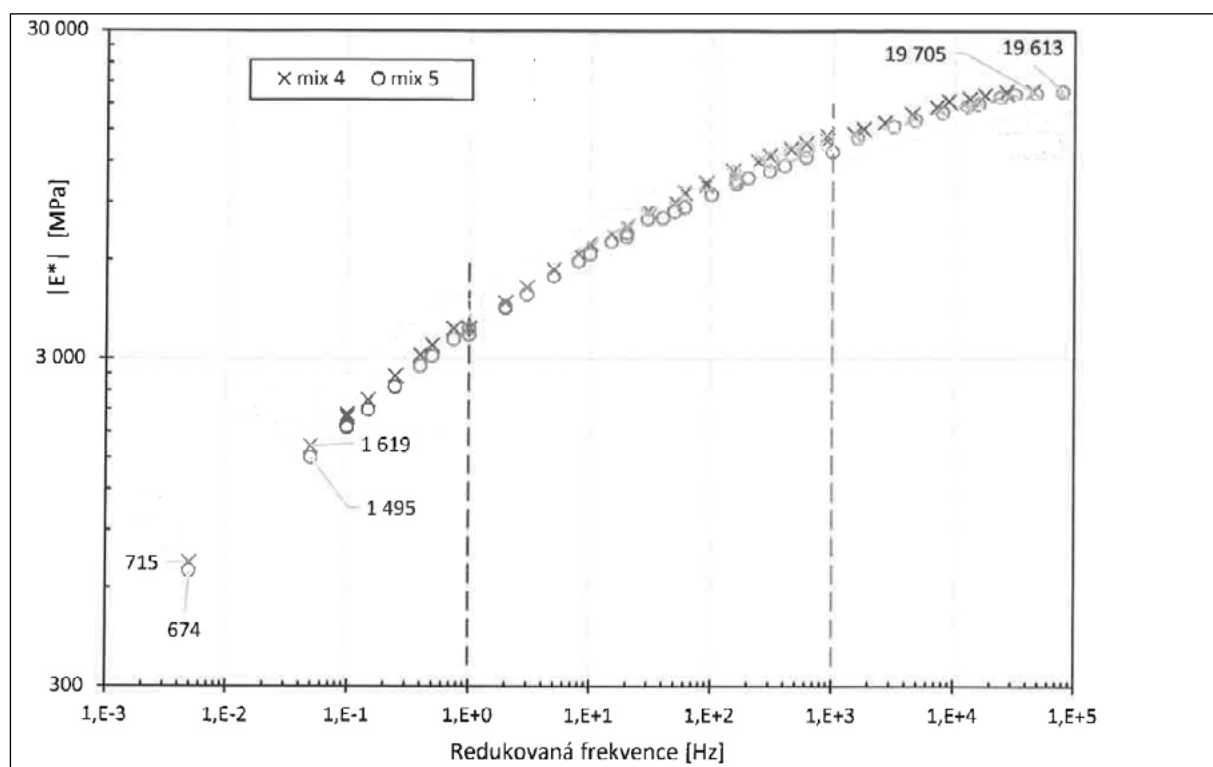
Dynamický modul tuhosti stanovený metodou 4 PB-PR

Dynamické moduly tuhosti (E^*) byly stanoveny pomocí čtyřbodové ohybové zkoušky na trámečcích podle přílohy B normy ČSN EN 12697-26. Zkouška poskytuje přehled o viskoelastickém chování asfaltové směsi při opakovaném zatěžování v ohybu a simuluje reálné podmínky vyvolané dopravou. Zkouška doplňuje zkoušku IT-CY tím, že zachycuje odezvu trámečku při cyklickém zatěžování. Zkoušení probíhalo při čtyřech teplotách (0 °C, 10 °C, 20 °C a 30 °C) a jedenácti zatěžovacích frekvencích (50 Hz, 30 Hz, 20 Hz, 15 Hz, 10 Hz, 8 Hz, 5 Hz, 3 Hz, 2 Hz, 1 Hz a 0,1 Hz). Oblast nízkých teplot (vysokých frekvencí) je na vodorovné ose definována jako vyšší než 1 000 Hz, oblast středních teplot je v rozmezí 1 Hz až 1 000 Hz a oblast vysokých teplot (nízkých frekvencí) začíná pod 1 Hz. Pro indikaci omezení tvorby trvalých deformací je žádoucí, stejně jako u metody IT-CY, aby měla směs co nejvyšší tuhost v oblasti vysokých teplot. Z hlediska minimalizace rizika mrazových trhlin je pak naopak výhodná nízká tuhost směsi při nízkých teplotách. Obecně řečeno by směs měla mít co nejnižší teplotní citlivost.



Obrázek 4: Řídicí křivky dynamického modulu tuhosti směsí ACO 16+; svislé čárkované čáry vymezují hranice teplotních oblastí

Tomuto chování se nejlépe blíží směs ACO 16+ s PMB 45/80-75 a výztužnými vlákny FlexForce. U referenční směsi bez vláken došlo ke zřetelnému poklesu tuhosti v oblasti středních a vyšších teplot. V oblasti nízkých teplot byl u obou směsí dynamický modul tuhosti velice podobný.



Obrázek 5: Řídicí křivky dynamického modulu tuhosti směsí ACL 16S; svislé čárkované čáry vymezují hranice teplotních oblastí

Při porovnání směsí ACL 16S PMB 25/55-60 s vlákny FlexForce a bez vláken FlexForce je vidět, že obě směsi mají podobný průběh řídicích křivek dynamického modulu tuhosti. Směs ACL 16S s vlákny měla v celém rozsahu teplot / frekvencí nižší dynamický modul tuhosti než směs bez vláken. Výsledky koreluji s tuhostí naměřenou metodou IT-CY, kde však rozdíly mezi směsmi nebyly tak výrazné.

Ověření funkčnosti na konkrétních silničních stavbách

V roce 2024 a 2025 proběhlo ověření funkčnosti výztužných vláken FlexForce v rámci zkoušek typu asfaltových směsí a zejména pak jejich použitím v množství 0,2 kg na 1 t asfaltové směsi v asfaltových vrstvách konkrétních realizovaných silničních staveb. Z významnějších se jednalo o:

- Silnice II/107, Všemchomy (skladba vozovky ACO 16S, ACL 16+ FlexForce); návrh směsi VIALAB CZ s.r.o., výroba Pražská obalovna Herink, s.r.o., a pokládka EUROVIA CZ a.s.



Obrázek 6: Umístění stavby a pohled na hutnicí sestavu v akci

- Vojenské letiště Kbely (ACL 22S PMB 25/55-65 RC + FlexForce, ACO 11S PMB 25/55-65 RC + FlexForce); návrh směsi, výroba a pokládka POZEMNÍ KOMUNIKACE BOHEMIA a.s.
- Silnice II/175, průtah obcí Blatná a průtah obcí Skaličany (ACO 11+PMB 45/80-65 + FlexForce); návrh směsi ESLAB, spol. s r.o., výroba Strakonická obalovna a pokládka SWIETELSKÝ stavební s.r.o.
- Silnice II/163, Černá v Pošumaví – Milná (ACL 16S PMB 25/55-60 + FlexForce); návrh směsi TPA ČR, s.r.o., výroba Jihočeská obalovna, spol. s r.o. a pokládka STRABAG a.s.
- Silnice II/165 Markov–Ktiš (ACL 16+ PMB 45/80-65 RC, R20 (20 % recyklátu) + FlexForce, ACO 11+ PMB 45/80-65 RC, (20 % recyklátu) + FlexForce); návrh směsi TPA ČR, s.r.o., výroba Obalovna Těšovice (STRABAG Asfalt s.r.o.) a pokládka STRABAG a.s.



Obrázek 7: Hutnění asfaltové vrstvy ACO 11+ včetně detailu na zhutněnou asfaltovou směs

Závěr

Dosavadní zkušenosti z konkrétních silničních staveb a výsledky provedených zkoušek v rámci ověření funkčnosti výztužných aramidových vláken FlexForce v asfaltových vrstvách vozovek jednoznačně potvrzují pozitivní vliv přidání 0,2 kg vláken do 1 t asfaltové směsi na odolnost proti trvalým deformacím. Došlo ke snížení jak maximální poměrné hloubky koleje po 5000 cyklech PRD_{AIR} , tak maximálního přírůstku hloubky koleje WTS_{AIR} u obou typů zkoušených asfaltových směsí s vlákny ACL 16+ 50/70 a ACO 16+ PMB 45/80-75. Toto konstatování podporují i charakteristiky PRD_{AIR} a WTS_{AIR} změřené v rámci zkoušek typu provedených v roce 2024. Požadavky normy ČSN 73 6121 na tyto parametry byly splněny s dostatečnou rezervou u všech typů asfaltových směsí pro ložní i obrusné vrstvy. Obdobně u všech asfaltových směsí byl splněn požadavek na minimální hodnotu odolnosti vůči vodě $ITSR_{min} = 80 \%$.

Z výsledků stanovení tuhosti metodou IT-CY vyplývá, že jak směs ACO 16+ PMB 45/80-75, tak směs ACL 16S PMB 25/55-60 po přidání vláken dosahují podobných tuhostí jako směs bez vláken. U směsi ACO 16+ s vlákny došlo k mírnému nárůstu modulu tuhosti při 0°C , 15°C i 27°C . U obou směsí s vlákny došlo ke snížení teplotní citlivosti, což je žádaný účinek.

Měření dynamického modulu tuhosti stanoveného metodou 4PB-PR ukazuje, že výztužná aramidová vlákna FlexForce mohou mít pozitivní vliv na tuhost. U směsi ACO 16+ PMB 45/80-75 došlo přidáním vláken k zvýšení tuhosti v oblasti středních a vyšších teplot a ke snížení teplotní citlivosti. Naproti tomu směs ACL 16S PMB 25/55-60 bez vláken měla podobný průběh řídících křivek dynamického modulu tuhosti jako směs s vlákny s tím rozdílem, že směs ACL 16S s vlákny měla v celém rozsahu teplot/frekvencí nižší dynamický modul tuhosti. Výsledky koreluje s tuhostí naměřenou metodou IT-CY.

Posledním zkoušeným parametrem byla odolnost vůči šíření trhliny. Jak u směsi ACO 16+ PMB 45/80-75, tak u směsi ACL 16S PMB 25/55-60 byl po přidání vláken zjištěn pokles lomové houževnatosti při teplotě 0°C a 15°C a pokles lomové energie do F_{max} při 0°C . U směsi ACO 16+ PMB 45/80-75 s vlákny byla celková lomová energie a oba indexy (Flexibility index a CRI) při 0°C nižší a při 15°C mírně vyšší než u směsi bez vláken. Obdobně tomu bylo u směsi ACL 16S PMB 25/55-60 s vlákny, kdy celková lomová energie byla při 0°C rovněž nižší a při 15°C vyšší, ale Flexibility index a CRI byly nižší při obou teplotách. Výsledky odolnosti vůči šíření trhliny jsou tak nejednoznačné a stálo by za to je doplnit o měření nízkoteplotních vlastností, např. jednoosou zkouškou tahem s rovnoměrným řízeným poklesem v zařízení označovaném jako TSRST podle ČSN EN 12697-46.

Zdroje:

- [1] Vliv výztužných vláken FlexForce na vybrané vlastnosti asfaltové směsi typu ACO 16+ a ACL 16S, Souhrnná výzkumná zpráva, autoři Ing. Peter Gallo, Ph.D. a doc. Ing. Jan Valentin, Ph.D., 2025
- [2] Zkoušky typu asfaltové směsi PZT-078/24, PZT-079/24 a PZT-080/24, zpracoval Milan Kareš a schválil Ing. Václav Neuvirt, CSc. (VIAKONTROL, spol. s r.o.), 2024
- [3] Zkoušky typu asfaltové směsi PZT-033-24 a PZT-034-24, zpracoval a schválil Petr Martschini (ESLAB spol. s r.o.), 2024
- [4] Zkoušky typu asfaltové směsi ZT AT/65CB/24 a ZT AT/62CB/24, Ing. Aleš Balík (SKANSKA Asphalt s.r.o.), 2024
- [5] Zkouška typu asfaltové směsi CB24-013-JČO, TPA ČR s.r.o., 2024

POZNATKY Z HODNOTENIA VÄZKO-PRUŽNÉHO SPRÁVANIA SA ASFALTOVÝCH VOZOVIEK

KNOWLEDGE FROM THE EVALUATION OF VISCO-ELASTIC BEHAVIOUR OF ASPHALT PAVEMENTS

Ing. Zsolt Boros, TPA, s.r.o., Slovenská republika/Slovakia

prof. Dr. Ing. Jozef Komačka, TPA, s.r.o., Slovenská republika/Slovakia

Ing. Filip Buček, TPA, s.r.o., Slovenská republika/Slovakia

Príspevok opisuje výsledky hodnotenia väzko-pružného správania sa vozoviek na základe časového oneskorenia priehybu za pôsobiacou silou, ktoré bolo stanovené z meraní deflektometrom FWD. Hodnoty časového oneskorenia sú prezentované rôzne teplotné podmienky a intenzitu zaťaženia. Z vyhodnotení meraní vykonaných počas výstavby vozovky vyplynulo, že po pridaní asfaltových vrstiev sa menia hodnoty časového oneskorenia dovtedy zrealizovanej časti vozovky. Merania na pokusnom úseku potvrdili, že hodnoty časového oneskorenia ovplyvňuje doba trvania zaťažovacieho impulzu. Vplyv teploty ani opakovaného zaťaženia sa neprejavil, čo bolo potvrdené aj vyhodnotením 11 ročných meraní na piatich dlhodobo sledovaných úsekoch cestnej siete SR.

The paper describes the results of evaluation of linear-elastic behaviour of pavements based on the time delay of deflection behind the applied force, which was determined from FWD deflectometer measurements. The time delay values are presented for different temperature conditions and intensity of traffic load. From the evaluations of measurements made during the construction of a pavement, it was found, the time lag values of the previously implemented portion of pavement change after the addition of asphalt layers. The measurements on an experimental section confirmed that the time delay values are influenced by the duration of the loading pulse. The influence of temperature and repeated loading was not evident, which was also confirmed by the evaluation of 11 years of measurements on five long-term monitored sections of Slovak road network.

Úvod

Asfaltové vrstvy vozoviek pozemných komunikácií musia odolávať účinkom zaťaženia od vozidiel pri variabilných klimatických podmienkach. Preto je potrebné pri návrhu asfaltovej zmesi do príslušnej vrstvy vozovky brať do úvahy kombinovaný vplyv týchto faktorov a návrh asfaltovej zmesi urobiť tak, aby nevznikali nežiadúce poškodenia vrstvy a celej vozovky.

Vhodnosť zloženia asfaltovej zmesi pre danú lokalitu sa obvykle preukazuje jej vlastnosťami pri dvoch protichodných teplotných podmienkach (nízke zimné a vysoké letné teploty). Tieto vlastnosti sú dominantne ovplyvnené parametrami asfaltu, ako jednej zo zložiek asfaltovej zmesi. Výber vhodného asfaltového spojiva je veľmi dôležitý a je naň kladený dôraz v rôznych metódach návrhu asfaltovej zmesi [1, 2, 3]. Cieľom je predísť dvom hlavným typom poškodení asfaltových vozoviek, a to trhlinám pri nízkych teplotách [4] a trvalým deformáciám (koľajam) vznikajúcim pri vysokých teplotách asfaltových zmesí v letnom období. Vhodnosť asfaltu z hľadiska odolnosti asfaltovej zmesi proti vzniku trvalých deformácií sa v súčasnosti zvyčajne posudzuje na základe výsledkov skúšky asfaltu v šmykovom dynamickom reometri. Fázový uhol, stanovený z časového oneskorenia medzi pôsobiacou silou a vznikajúcou deformáciou skúšobnej vzorky, sa považuje za parameter reprezentujúci väzko-pružné správanie sa asfaltu. Spolu s komplexným modulom v šmyku umožňuje rozlišovať náchylnosť asfaltu na plastickú (trvalú) deformáciu.

Fázový uhol a komplexný modul sa používajú nielen pri hodnotení väzko-pružného správania sa asfaltu, ale aj asfaltových zmesí. Tieto parametre sa stanovujú pomocou rôznych skúšobných metód (jednoosové alebo trojosové skúšky na valcových vzorkách alebo skúšky tuhosti a únavy na vzorkách rôznych tvarov). Hodnoty komplexného modulu a fázového uhla sa menia v závislosti od frekvencie zaťaženia a skúšobnej teploty. Výsledky výskumov poukazujú na skutočnosť, že hodnoty fázového uhla narastajú so zvyšujúcou sa teplotou alebo znižujúcou sa frekvenciou. Vo výskume [5] bolo ale preukázané, že pri teplote 40 °C a 54 °C hodnota fázového uhla so zvyšujúcou sa teplotou klesala.

Pri laboratórnych skúškach zameraných na stanovenie parametrov charakterizujúcich väzko-pružné správanie sa asfaltové zmesi pre vrstvy skúšajú samostatne, čo nezodpovedá reálnym podmienkam vo vozovke, kedy všetky asfaltové vrstvy spolupôsobia. Okrem toho, vo vozovke sú asfaltové vrstvy podopreté podkladovými vrstvami a podložími. Taktiež zaťaženie generované kolesom (kolesami)

prechádzajúcich vozidiel vytvára stav napätia, ktorý sa líši od stavu používaného pri laboratórnych skúškach. Vzhľadom na to je otázkou, aké je správanie celého asfaltového krytu a aký je vplyv väzko-pružného správania sa asfaltových vrstiev na správanie celej vozovky.

Na preskúmanie (overenie) tejto skutočnosti je potrebná zaťažovacia skúška vozovky v rámci ktorej je potrebné v rovnakej časovej osi zaznamenať priebeh pôsobiacej sily a odozvy vozovky. Takýto typ skúšky umožňujú deflektometre s padajúcim závažím (FWD). Dostupnosť týchto zariadení bola podnetom na výskum, ktorý mal za cieľ:

1. analyzovať, či časový záznam z merania FWD poskytuje dostatočné údaje na získanie vstupov na určenie fázového uhla vozovky (t. j. časového oneskorenia priehybu za pôsobiace silou), a ak áno, navrhnúť vhodnú metodiku na určenie potrebných vstupov;
2. na základe meraní FWD vyhodnotiť:
 - a) časové oneskorenie priehybu za pôsobiace silou a fázový uhol vozovky pred a po zhotovení asfaltových vrstiev a jeho zmenu;
 - b) vplyv doby trvania zaťažovacieho impulzu, teploty asfaltových vrstiev a opakovaného zaťaženia (únava).

Obsahom článku je prezentácia riešenia, zistení a z nich vyplývajúcich záverov vzťahujúcich sa na bod 2, pričom sa použili výstupy týkajúce sa bodu 1, publikované v [6].

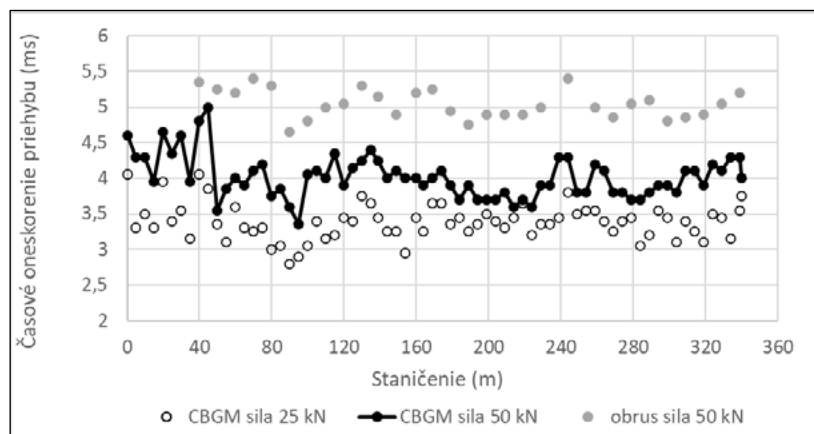
Zmena po zhotovení asfaltových vrstiev

Charakteristiky väzko-pružného správania sa vozovky boli stanovené pre polotuhú vozovku zloženú z troch asfaltových vrstiev s celkovou hrúbkou 200 mm (40 mm SMA 11 PMB 45/80-75, 60 mm AC 16 PMB 25/55-65, 100 mm AC 22 CA 35/50), ležiacich na 200 mm cementom stmelenej vrstve (CBGM = SC). Pod ňou sa nachádzalo podložie, ktorého horná vrstva v hrúbke 400 mm bola upravená/zlepšená pridaním vápna.

Merania sa uskutočnili pomocou deflektometra FWD Kuab po dvoch etapách výstavby vozovky:

- (a) na vrstve CBGM po 7 dňoch od jej polozenia (použité zaťažovacie sily 25 kN a 50 kN);
- (b) na obrusnej vrstve 3 mesiace po položení vrstvy CBGM (zaťažovacia sila 50 kN).

Na základe časových oneskorení priehybu za pôsobiace silou pri meraniach v oboch etapách (obrázok 1) možno konštatovať rozdielnosť hodnôt po dĺžke úseku, medzi meraniami na vrstve CBGM pri silách 25 kN a 50 kN a tiež aj rozdiel medzi meraniami na vrstve CBGM a obrusnej asfaltovej vrstve.



Obrázok 1: Časové oneskorenia maximálnych hodnôt sily a priehybu

Najväčšie časové oneskorenia pre merania na obrusnej vrstve možno považovať za prejav vplyvu väzko-pružného správania sa asfaltových vrstiev na celkové správanie sa asfaltovej vozovky. Rozdiely voči meraniam na vrstve CBGM (cca 1–1,5 ms) znamenajú rozdiel vo fázových uhloch cca 4–6 stupne (pri predpoklade priemernej zaťažovacej doby FWD Kuab 45 ms), pričom fázový uhol celej asfaltovej vozovky pre priemernú hodnotu časového oneskorenia 5 ms je 20 stupňov (podľa vzťahu uvedeného v [7] pre zaťažovací impulz v tvare polovice sínusoidy – podobný tvaru zaťažovacieho impulzu deflektometra FWD). Táto hodnota zodpovedá ekvivalentnej frekvencii zaťažovacieho impulzu FWD Kuab (podľa [8] je to 10 Hz až 15 Hz) a priemernej teplote asfaltových vrstiev pri meraní (13 °C až 15 °C).

Pri porovnaní s hodnotami fázového uhla stanovenými pre tieto okrajové podmienky laboratórnymi skúškami (19° až 24° podľa [9] a [10]; 10° až 16° podľa [11] a [12]) možno konštatovať relatívne dobrú zhodu.

Vplyv teploty a únavy pri rôznej dobe zaťažovacieho impulzu

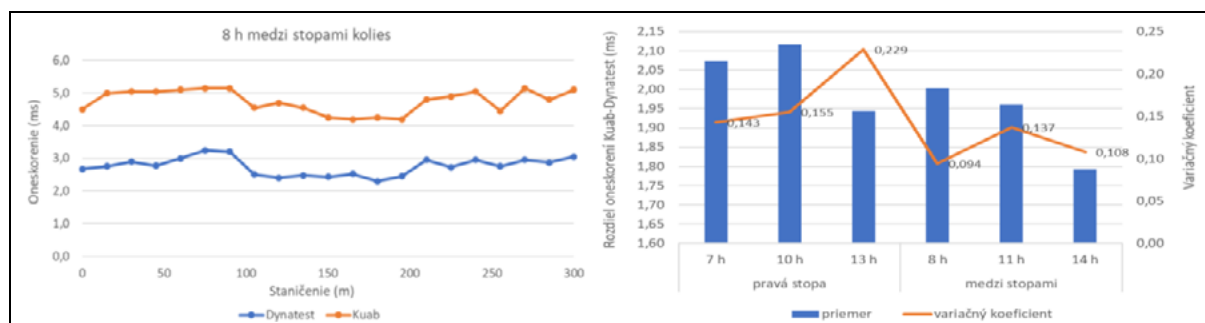
Vozovka 300 m dlhého úseku smerovo rozdelenej rýchlostnej cesty bola diagnostikovaná deflektometrami FWD Kuab a Dynatest, ktoré majú rozdielnú dobu trvania zaťažovacieho impulzu (cca 45 ms vs 25 ms). V pozdĺžnom a priečnom smere bol pri všetkých meraniach mierny rozdiel v polohe diagnostikovaných bodov (aj pri meraní tým istým FWD počas opakovaných meraní v rámci dňa).

Keďže úsek je v prevádzke už veľa rokov a intenzita ťažkých nákladných vozidiel je pomerne veľká (viac ako 5 500 TNV/24 h), merania boli vykonané tak, aby sa dal vyhodnotiť aj vplyv dlhodobého zaťaženia (únavy). Preto sa obomi deflektometrami meralo v stope pravého kolesa prechádzajúcich vozidiel aj medzi stopami kolies. V každej stope sa merania vykonali trikrát za deň pri rôznych teplotách povrchu asfaltovej vozovky (tabuľka 1), čo umožnilo sledovať vplyv teploty. Vzdialenosť deflektometrov počas merania v rámci daného časového intervalu bola minimálna, aby sa merania v danom bode vykonali pri rovnakej teplote.

Tabuľka 1: Časové intervaly meraní a teplota povrchu vozovky

Pozícia	Stopa pravého kolesa			Medzi stopami kolies		
Čas meraní	7.00–8.00	10.00–11.00	13.00–14.00	8.00–8.30	11.00–11.30	14.00–14.30
Teplota povrchu (°C)	20–22	28–31	34–40	23–27	30–33	37–42

Časové oneskorenie maxima priehybu za maximom sily bolo väčšie pri meraniach deflektometrom Kuab (obrázok 2 vľavo). Rozdiely v oneskorení boli približne rovnaké pri meraniach vo všetkých časových intervaloch a oboch meraných stopách (obrázok 2 vpravo), pričom hodnoty variačných koeficientov sú výrazne pod hodnotou 0,3–0,35 považovanou v oblasti techniky za rozhranie medzi homogénnym a nehomogénnym súborom hodnôt.



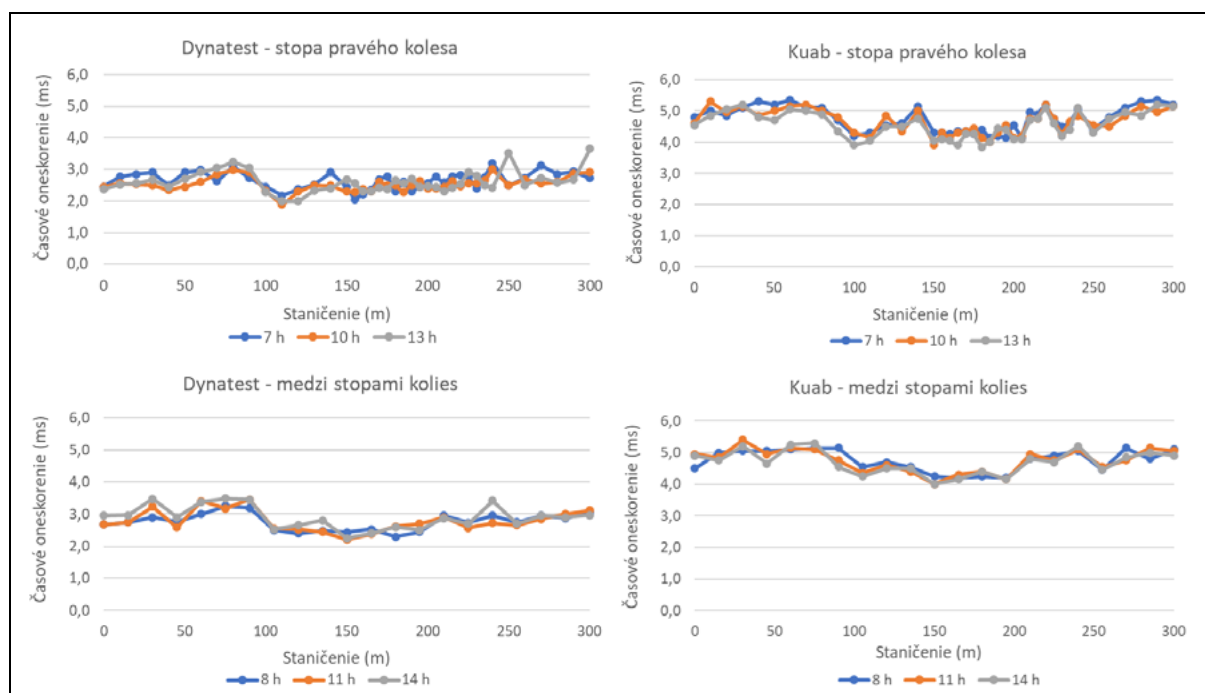
Obrázok 2: Rozdiely časových oneskorení pri meraniach FWD Kuab a Dynatest a ich variabilita

Na základe vyhodnotení meraní možno konštatovať, že kratšie trvanie zaťažovacieho impulzu pri Dynateste (t. j. väčšia frekvencia zaťažovacieho impulzu) má za následok kratšie časové oneskorenie maxima sily a priehybu – pružnejšie správanie vozovky.

Rozdielna teplota asfaltových vrstiev počas meraní v rámci dňa sa neprejavila na hodnotách časových oneskorení. Ich hodnoty sú v jednotlivých časoch merania približne rovnaké (obrázok 3), hoci priemerná teplota asfaltových vrstiev stanovená podľa [13] bola v rozsahu 22 °C až 31 °C (stopa pravého kolesa na začiatku úseku), resp. 26 °C až 38 °C (medzi stopami kolies na konci úseku). To je v rozpore s poznatkami o vplyve teploty na hodnoty fázového uhla (pri rovnakej zaťažovacej frekvencii je to v podstate vplyv na zmenu časového oneskorenia medzi pôsobiacou silou a vznikajúcou deformáciou) vyplývajúcimi z laboratórnych skúšok asfaltových zmesí.

Obrázok 3 taktiež dokladuje, že pri oboch deflektometroch sú v stope pravého kolesa časové oneskorenia medzi maximom zaťažovacej sily a priehybom v osi zaťaženia v rovnakom rozsahu, ako

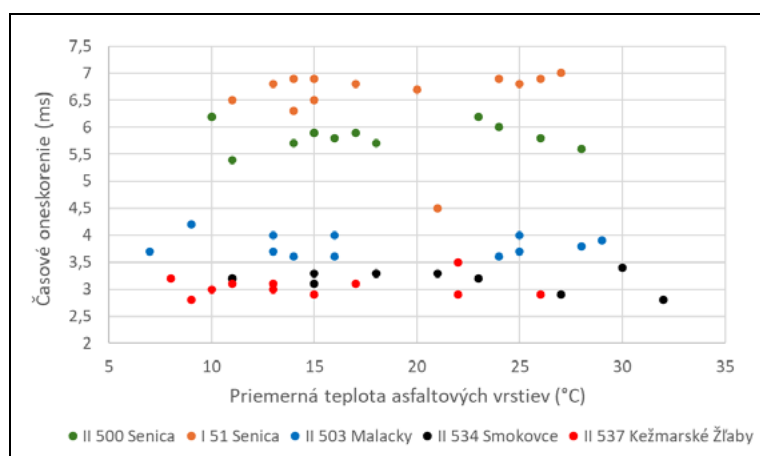
pri meraniach medzi stopami kolies. To znamená, že opakované zaťaženie vozovky (únava) nemá vplyv na zmenu hodnôt časových oneskorení. Rovnaké závery vyplývajú z laboratórnych skúšok únavy asfaltových zmesí (časové oneskorenie medzi pôsobiacou silou a vznikajúcou deformáciou je počas skúšania jednej vzorky pri danej frekvencii a teplote takmer konštantné).



Obrázok 3: Vplyv teploty a únavy na časové oneskorenia pri meraniach FWD Kuab a Dynatest

Vplyv teploty a opakovaného zaťažovania bol vyhodnocovaný aj z opakovaných meraní FWD Kuab, ktoré Slovenská správa ciest vykonáva na dlhodobo sledovaných úsekoch už od roku 2005. Hodnoty časového oneskorenia medzi maximom zaťažovacej sily a priehybom v osi zaťaženia pre päť úsekov s rôznou geografickou polohou a klimatickými podmienkami (obrázok 4) potvrdzujú vyššie uvedené zistenia vyplývajúce z meraní na pokusnom úseku rýchlostnej komunikácie.

Hodnoty časových oneskorení na jednotlivých úsekoch sa nemenia s priemernou teplotou asfaltových vrstiev, ale pohybujú sa v úzkom rozsahu (cca 0,5 ms). Pri priemernej dobe trvania zaťažovacieho impulzu FWD Kuab rovnaj 45 ms to znamená rozdiel vo fázových uhloch do 2 stupňov. To je diametrálny rozdiel v porovnaní s vplyvom teploty na charakteristiky väzko-pružného správania sa asfaltových zmesí pri skúškach v laboratóriu na vzorkách z asfaltových zmesí.



Obrázok 4: Časové oneskorenia na dlhodobo sledovaných úsekoch

Časové oneskorenia na obrázku 4 sú stanovené z meraní v období rokov 2010 až 2021. Počas 11 rokov prevádzky nedošlo ani na jednom úseku k výraznejšej zmene časových oneskorení. Je teda možné konštatovať, že únava asfaltových vrstiev vozoviek vplyvom opakovaného zaťažovania kolesami prechádzajúcich vozidiel nemá vplyv na zmenu väzko-pružného správania sa asfaltových vozoviek.

Z obrázku 4 je taktiež zrejмый rozdiel v hodnotách časových oneskorení na jednotlivých úsekoch. Keďže nedochádza k zmenám časových oneskorení vplyvom opakovaného zaťaženia ani vplyvom teploty asfaltových vrstiev, dá sa uvažovať o tom, že každá vozovka má svoje charakteristiky väzko-pružného správania sa, ktoré sú dané jej zložením a vlastnosťami jej vrstiev a tie si udržiava od zhotovenia počas celého obdobia svojej životnosti. Rôzne konštrukcie vozoviek majú teda rozdielne väzko-pružné správanie, čo môže mať vplyv na rýchlosť vzniku jej poškodenia. Pri vozovkách na obrázku 4 je maximálny rozdiel v časových oneskoreniach medzi vozovkami cca 3,5 ms (II/537 a I/51). Pri rovnakej dobe trvania zaťažovacieho impulzu FWD Kuab (45 ms) to znamená rozdiel v hodnotách fázového uhla až 14 stupňov. Takýto rozdiel sa pri porovnávaní a hodnotení väzko-pružného správania sa asfaltových zmesí považuje za významný.

Záver

Z vyhodnotení meraní zameraných na sledovanie väzko-pružného správania sa asfaltových vozoviek vyplynuli nasledujúce zistenia:

- Keďže väzko-pružné správanie sa hydraulicky stmelených materiálov (v danom prípade vrstvy CBGM) by nemalo závisieť od teploty, väčšie časové oneskorenie maxima zaťažovacej sily a priehybu zaznamenané pri meraní na obrusnej vrstve (v porovnaní s meraním na vrstve CBGM) by malo odrážať viskóznejšie správanie sa asfaltových zmesí, ktoré dominantne predurčuje väzko-pružné správanie sa asfaltovej vozovky.
- Doba trvania zaťažovacieho impulzu ovplyvňuje časové oneskorenie sily a priehybu, z čoho sa dá usudzovať, že pri rôznych rýchlostiach pohybujúcich sa vozidiel bude väzko-pružné správanie sa asfaltových vozoviek rozdielne.
- Teplota a opakované zaťaženie (únava) asfaltových vrstiev nemá významný vplyv na časové oneskorenia charakterizujúce väzko-pružné správanie sa asfaltových vozoviek.
- Každá vozovka má svoje charakteristiky väzko-pružného správania sa, ktoré si udržiava od zhotovenia počas celého obdobia svojej životnosti.
- Rôzne konštrukcie vozoviek majú rozdielne väzko-pružné správanie, pričom rozdiely môžu byť významné.
- Na základe hodnôt časových oneskorení maximálnej pôsobiacej sily a priehybu v osi zaťaženia a predpokladanej priemernej doby zaťažovacieho impulzu deflektometra Kuab (45 ms) sa hodnoty fázových uhlov testovaných vozoviek pohybovali v rozsahu 12° až 28°, čo zodpovedá rozsahom zisteným v rámci laboratórnych skúšok asfaltových zmesí.

Zdroje:

- [1] AASHTO M 320, 2017. Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder. Washington, DC: American Association of State Highways and Transportation Officials.
- [2] Asphalt Institute, 2003. Superpave performance graded asphalt binder specification and testing: Superpave series No.1 (Third Revision). Asphalt Institute.
- [3] Hunter, R. N. et al., 2015. The Shell Bitumen Handbook (Sixth edition).
- [4] Mugume, R., Kakoto, D., 2020. *Effect of Inappropriate Binder Grade Selection on Initiation of Asphalt Pavement Cracking*. Sustainability 2020, 12(15), 6099, doi.org/10.3390/su12156099.
- [5] Clyne, T. et al., 2003. *Dynamic and resilient modulus of MN/DOT asphalt mixtures*. Final report MN/RC – 2003-09.
- [6] Boros, Z., Komačka, J., 2022. *Indication of viscoelastic behaviour of asphalt pavements using FWD time history data*. Bearing capacity of roads, railways and airfields. Trondheim, CRC Press/Balkema, Volume III, pp. 45-53. ISBN 978-1-032-12044-7, DOI: 10.1201/9781003222880.
- [7] Biligiri, K. P., Kaloush, K., Uzan, J. (2010). *Evaluation of asphalt mixtures' viscoelastic properties using phase angle relationships*. International Journal of Pavement Engineering, 11(2), 143–152. doi:10.1080/10298430903033354
- [8] Ligang L. (2011). *Backcalculation of asphalt concrete complex modulus curve by layered viscoelastic solution*. Dissertation thesis. Michigan State University, 2011. ISBN 9781124597003112459700X. doi.org/doi:10.25335/rbfr-0g22.
- [9] Clyne, T.R., Li, X., Marasteanu, M.O., Skok, E.L. (2003). *Dynamic and resilient modulus of*

- MN/DOT asphalt mixtures*. Report MN/RC – 2003-09. University of Minnesota. 2003.
- [10] Ambassa, Z. (2013). *Vers la modélisation du comportement a la fatigue des chaussées bitumineuses routieres sous chargement réel*. PhD thesis. Université de Limoges. 2013.
- [11] Guo, L., Xu, Q., Zeng, G., Wu, W., Zhou, M., Yan, X., Zhang, X., Wei, J. (2021). *Comparative Study on Complex Modulus and Dynamic Modulus of High-Modulus Asphalt Mixture*. *Coatings* 2021, 11, 1502. <https://doi.org/10.3390/coatings11121502>.
- [12] Xu, Q., Solaimanian, M. (2009). *Modelling linear viscoelastic properties of asphalt concrete by the Huet–Sayegh model*. *International Journal of Pavement Engineering*, 2009, vol. 10, No. 6, pp. 401–422.
- [13] TP 031 (1/2009) Meranie a hodnotenie únosnosti asfaltových vozoviek pomocou zariadenia FWD KUAB. Technické podmienky. MDPT SR, 2009.

CHARAKTERISTICKÉ PORUCHY OKRUŽNÍCH KŘÍŽOVATEK A JEJICH PŘÍČINY

CHARACTERISTIC FAILURES AT ROUNDABOUTS AND THEIR CAUSES

Milan Beck, DiS, ESLAB, spol. s r.o.
Ing. Jan Zajíček

Na okružních křižovatkách, se často vyskytují charakteristické a opakující se poruchy, které zpravidla vznikají z obdobných a předvídatelných příčin. Tyto poruchy lze do určité míry eliminovat nebo zmírnit odlišným přístupem k návrhu konstrukce vozovek, než jaký je někdy v praxi uplatňován.

At roundabouts—particularly small and mini roundabouts—characteristic and recurring structural failures frequently occur, typically resulting from similar and predictable causes. These issues can be partially eliminated or mitigated by adopting an alternative approach to pavement design compared to the methods commonly applied in standard road engineering practice.

Úvod

Okružní křižovatky, zejména malé a mini, jsou běžnou, avšak konstrukčně specifickou součástí dopravní infrastruktury. Jejich hlavními přínosy jsou zvýšení bezpečnosti a zlepšení plynulosti dopravy. V praxi se však ukazuje, že prostorové uspořádání, návrh konstrukce vozovky i různorodý přístup k technickému řešení vedou ke vzniku typických a často se opakujících poruch. Tyto poruchy je možné významně omezit, a tím prodloužit životnost vozovek, pokud jsou při návrhu respektovány určité konstrukční zásady. Přestože tato řešení mohou vést k mírnému nárůstu investičních nákladů, v delším časovém horizontu přinášejí významné úspory na opravách a omezení dopravního provozu.

Návrh okružních křižovatek je standardizován prostřednictvím ČSN 73 6102, TP 135 a TP 170. Tyto předpisy umožňují volbu adekvátní konstrukce dle reálného způsobu zatěžování. V praxi však často dochází k tomu, že projektanti volí konstrukce vozovek podle katalogových listů určených pro běžné lineární zatížení, což není vzhledem ke specifickému charakteru namáhání okružních křižovatek vhodné a je to v rozporu s principy uvedenými v TP 170. Dalším významným problémem je neodborné zasahování ze strany některých účastníků schvalovacího procesu, jako jsou zástupci Policie ČR, pracovníků odborů dopravy nebo městští architekti. Projektant je často nucen zapracovat jejich připomínky do projektové dokumentace, ačkoliv tyto zásahy bývají v přímém rozporu s principy trvanlivosti a funkčnosti konstrukce. Závažným faktem zůstává, že tito účastníci nenesou za své zásahy žádnou odpovědnost, přestože jejich vliv má přímý dopad na vznik vad a zkrácení životnosti vozovky.

Charakteristické poruchy lze zjednodušeně rozdělit do dvou vzájemně se prolínajících oblastí:

1. poruchy na středovém prstenci, srpovitých krajnicích a napojení na vozovku okružního pásu;
2. poruchy vozovky okružního pásu.

Poruchy na středovém prstenci, srpovitých krajnicích a napojení na vozovku okružního pásu

Jedním z nejvýznamnějších faktorů ovlivňujících životnost vozovky v oblasti středového prstence je výškový rozdíl mezi prstencem a navazující vozovkou. V praxi není výjimkou rozdíl výšek až 150 mm, což ve spojení s nevhodně zvoleným typem obrub, jejich uložením a nedostatečným dimenzováním konstrukčních vrstev vede k urychlené degradaci okrajových částí vozovky.

Revize TP 135 z roku 2017 odstranila znění, které v předchozí verzi z roku 2005 jednoznačně požadovalo navrhování středového prstence, srpovitých krajnic a směrovacích ostrůvků na stejné zatížení jako přilehlá vozovka. Toto doporučení přitom vycházelo z logického předpokladu, že prstenec je běžně pojížděn směrodatným (nákladním) vozidlem, a měl by proto být navržen jako plnohodnotná konstrukce vozovky. Nicméně v běžné praxi není tato skutečnost zohledňována a konstrukce vozovky prstence je obvykle poddimenzována a není schopná odolat dopravnímu zatížení od těžkých nákladních vozidel. Provádění vozovky středového prstence s krytem z kamenné dlažby je více architektonický prvek než funkční řešení. To s sebou nese celou řadou konsekvencí do návrhu vozovky, kdy často

projektant nereflektuje požadavky TP 170. Dlážděné kryty mají zpravidla větší návrhovou tloušťku, ale katalogové skladby z TP 170 umožňují jejich použití pouze do třídy dopravního zatížení TDZ IV. Proto je nezbytné provádět návrh a posouzení vozovky výpočtem dle TP 170, pokud má být dlážděná konstrukce použita i při vyšším zatížení, nebo lze v určitých případech využít katalogových listů pro zastávky BUS.



Obrázek 1: Poruchy nevhodně navrženého středového prstence z drobných kostek



Obrázek 2: Poruchy na styku prstence a vozovky



Obrázek 3: Poruchy nevhodných obrub na styku prstence a vozovky

Doporučení:

- Vyhýbat se použití dlážděných krytů v prstencích u okružních křižovatek s dopravním zatížením vyšším než TDZ V.
Vše středových prstencích i srpovitých krajnicích preferovat konstrukce s asfaltobetonovým (AC) nebo cementobetonovým (CB) krytem.
- Omezit výškový rozdíl mezi vozovkou a prstencem a srpovitou krajnicí max. na 40 mm.
- Používat na styku prstence a vozovky vysoké obruby s výškou ≥ 400 mm uložené do betonového lože minimálně pevnosti C 15/20 při tloušťce lože min. 150 mm nebo uložené do lože z MCB tloušťky min. 200 mm. Alternativně je možné použít speciální T-obruby uložené do betonového lože min. tloušťky 100 mm z C 15/20 nebo lože z MCB tloušťky min. 150 mm.

Takto realizované obruby současně při použití hydraulicky stmelených vrstev v konstrukci obou přilehlých vozovek mají dostatečnou prostorovou stabilitu a odolnost vůči namáhání od TV.

Pro zvýšení odolnosti nepevněné krajnice na vjezdu a výjezdu z okružní křižovatky je vhodné navrhovat zpevnění z betonových tvarovek uložených do masivního betonového lože minimální tloušťky 200–250 mm z C15/20 tak, jak je to běžné v zahraničí.



Obrázek 4: Zpevnění krajnice betonovými tvarovkami s nerovným povrchem

Poruchy vozovky okružního pásu

Při průjezdu těžkého nákladního vozidla okružní křižovatkou vzniká odlišné namáhání na rozdíl od běžné lineární dopravy. Při průjezdu okružní křižovatkou vlivem odstředivých sil dochází k asymetrickému zatížení zejména na vnější stopě nápravy, které může dosahovat až dvojnásobku běžného zatížení na nápravu, než je předpoklad TP 170 – 100 kN. Dalším nezanedbatelným faktorem je vliv smykových namáhání, tedy účinků od brzdících/rozjíždějících se vozidel či smykových namáhání vyvolaných především dvoj/trojnápravami návěsových souprav při průjezdu okružní křižovatkou.



Obrázek 5: Poruchy prstence, obrub a vozovky jízdního pásu



Obrázek 6: Poruchy obrub a vozovky jízdního pásu

Jak bylo zmíněno, konstrukce vozovky je specificky namáhána, a proto je nutný odlišný přístup k jejímu návrhu oproti běžným vozovkám. Přestože se může zdát, že uvedená opatření vedou k předimenzování konstrukce, opak je pravdou. Tato doporučení je vhodné aplikovat i na přilehlé úseky větví v dominantních směrech dopravního proudu těžkých vozidel, tj. v délce cca 50 m před a za okružní křižovatkou. Doporučujeme, aby v případě TDZ II. a vyšší projektant a správce vždy zvažili možnost realizace cementobetonového krytu dle ČSN 73 6123-1, a to jako CB II. v celém příčném profilu.



Obrázek 7: Vozovka okružní křižovatky s CB krytem – ČR



Obrázek 8: Vozovka okružní křižovatky s CB krytem a monolitickým obrubníkem – USA

V případě netuhé vozovky s asfaltovým souvrstvím je pak jedním ze základních předpokladů fungování vozovky v jízdním pásu i prstenci použití hydraulicky stmelené horní podkladní vrstvy. Zásadně nedoporučujeme používání nestmelené vrstvy typu ŠD nebo MZK pod AC souvrstvím. Jedním z řady teoreticky možných řešení je použití vrstvy SC C 5/6 o min. tl. vrstvy 150 mm anebo vrstvy SC C 3/4 v min. tl. 180 mm dle ČSN 73 6124-1 či adekvátních. Použití vyšší pevnosti vrstvy C 8/10 je možné, ale s výrazně vyššími riziky vzniku samovolných kontrakčních trhlin a následného vzniku reflexních trhlin v asfaltovém krytu vozovky. Samozřejmě lze realizovat i hydraulicky stmelené recyklované vrstvy typu RS C nebo RS CA dle ČSN 73 6147 či hydraulicky stmelené vrstvy SH, SS, SP dle typu pojiva a podmínek ČSN 73 6124-1.

Neméně důležité je použití vhodných a maximálně odolných asfaltových vrstev, které dokážeme vyrobit a realizovat. Zásadní uplatnění zde najdou směsi s vysokým modulem tuhosti VMT 22 PMB dle normy ČSN 73 6120, ale vždy při použití s modifikovanými pojivy. Pro obrusnou vrstvu je vhodné použití směsi ACO 16 + s vysoce modifikovanými pojivy například PMB 45/80-75 nebo PMB 45/80-80, případně speciální pojiva HIMA dle ČSN 73 6121. U obou vrstev krytu v případě TDZ IV. a více doporučujeme aplikaci rozptýlené výztuže z aramidových vláken pro zvýšení tuhosti vrstvy a odolnosti vůči smykovému namáhání tak, jak je doporučeno v TP 170. V případě třívrstvých vozovek na okružních křižovatkách s vysokým dopravním zatížením doporučujeme užití třívrstvé vozovky se dvěma vrstvami VMT například 2 x 80 mm, přičemž ložní a obrusná vrstva by měly odpovídat kvalitě vrstev ve dvouvrstevném systému.

Závěr

Výše uvedená doporučení a poznatky týkající se návrhu okružních křižovatek bychom rádi dále promítli do připravovaného dodatku k TP 135 a podrobili odborné diskuzi. Věříme, že tato opatření povedou ke zlepšení stavu, zvýšení odolnosti a trvanlivosti konstrukcí okružních křižovatek. Zároveň lze konstatovat, že uvedené principy návrhu lze aplikovat na jakýkoliv typ okružní křižovatky bez ohledu na její velikost nebo umístění.

2.

**Trendy ve výstavbě, správě
a údržbě vozovek**

***Trends in construction, management
and maintenance of pavements***

PROCES VÝBĚRU OPRAV NA ÚROVNI SÍTĚ NA ZÁKLADĚ DAT O POŠKOZENÍ VOZOVKY

TREATMENT SELECTION PROCESS AT NETWORK LEVEL BASED ON PAVEMENT DISTRESS DATA

Adnan Mohd Said Shiyab, Civil Engineering Department, Faculty of Science and Engineering
Macquarie University, Australia/Austrálie

Aya Mustafa Alwan, Statistics department, Faculty of Science and Engineering, Macquarie
University, Australia/Austrálie

Tato studie si klade za cíl vyvinout zdokonalenou metodologii pro výběr oprav vozovky na síťové úrovni a stanovení ročních požadavků na údržbu a rekonstrukci, a to s ohledem na efektivní únosnost vozovky vyjádřenou konstrukčním (strukturním) číslem (SN structural number), výhradně za použití dat z vizuální inspekce poškození. Základním principem je, že vznik trhlin a deformací vede k měřitelnému snížení tloušťky vrstvy vozovky, čímž následně klesá efektivní plocha průřezu a modul vozovky.

Pro dosažení tohoto cíle bylo provedeno rozsáhlé hodnocení stovek úseků vozovek v Dubaji (SAE) dokumentující různé typy poškození, jejich závažnost a rozsah. Na základě těchto dat bylo efektivní konstrukční číslo pro každý úsek vozovky určeno pomocí empirické metody v americkém předpisu AASHTO 1993, jak je specifikováno v Sekci 5, Tabulka 5.2.

Byly vyvinuty statisticky validní prediktivní modely, které prokázaly vysoký koeficient determinace (R^2) při $\alpha = 0,05$. Tyto modely naznačují, že efektivní únosnost vozovky lze odhadnout na základě typu poškození, rozsahu a celkového indexu kvality vozovky. Ta může zahrnovat i další ukazatele stavu, jako jsou měření podélné nerovnosti povrchu vozovky pomocí Mezinárodního indexu nerovnosti (IRI) a měření protismykových vlastností vozovky a vyhodnocení pomocí mezinárodního indexu tření (IFI), pokud jsou taková data k dispozici.

Prediktivní modely, vyvinuté v této studii, nabízejí významné výhody odborníkům zabývajícím se správou vozovek a plánováním údržby, neboť poskytují spolehlivou a efektivní metodu pro predikci zhoršování únosnosti vozovek, posouzení jejich zbytkové (ještě očekávané) životnosti a požadavků na údržbu a opravy na síťové úrovni. Tento přístup eliminuje potřebu nákladných terénních průzkumů a destruktivních i nedestruktivních zkoušek.

This study seeks to develop a refined methodology for pavement treatment selection at network level and determination of annual maintenance and rehabilitation requirements considering the effective structural capacity of pavement quantified by the Structural Number (SN), using exclusively visual distress data. The underlying principle is that the onset of micro-cracking and deformation leads to a measurable reduction in pavement layer thickness, consequently diminishing the effective cross-sectional area and pavement modulus. To achieve this objective, an extensive evaluation was conducted on hundreds of pavement sections in Dubai – UAE, documenting various distress types, severities, and quantities. Based on this data, the effective structural number for each pavement section was determined using the empirical AASHTO 1993 method, as specified in Section 5, Table 5.2. Statistically valid predictive models, demonstrating a high Coefficient of Determination (R^2) at $\alpha = 0.05$, were developed. These models indicate that the effective structural capacity of pavement can be estimated based on distress type, extent, and the overall pavement quality index, which may incorporate other condition indicators such as roughness measurements via the International Roughness Index (IRI), and friction measurements via International Friction Index (IFI), where such data is available. The prediction models developed in this study, offer substantial advantages to pavement management system engineers and maintenance planners by providing a reliable and efficient method for predicting structural deterioration and assessing the remaining pavement structural life and maintenance requirements at the network level. This approach eliminates the need for costly field investigations and both destructive and non-destructive testing.

Úvod

Plánovači údržby silnic se primárně zabývají stanovením dopravního zatížení, vyjadřovaného počtem přejezdů návrhové nápravy (ESAL – Equivalent Single Axle Load), které vozovka dokáže snést po zbývajících léta své životnosti (dobou, po kterou je vozovka schopna zajistit požadovanou únosnost).

Řešení této otázky prostřednictvím systému správy vozovek je klíčové pro plánování budoucích potřeb údržby a rekonstrukcí (M&R Maintenance and Reconstruction) a vývoj roční plánované údržby. Podle Americké asociace státních dálničních a dopravních úředníků (AASHTO) je únosnost vozovky definována jako „počet přejezdů návrhových náprav, které vozovka unese před dosažením specifikovaného stupně strukturního nebo funkčního poškození“ [1]. Navzdory zdánlivě uspokojivému povrchovému stavu mohou mnohé vozovky vykazovat závažné nedostatky únosnosti, které mohou vést k budoucímu rychlému zhoršování jejich stavu vlivem kombinovaných účinků dopravního zatížení a environmentálních faktorů.

V rámci systémů pro správu vozovek je predikce zbytkové životnosti základním aspektem, který umožňuje plánovačům a technikům údržby silnic činit informovaná rozhodnutí ohledně ročních požadavků na údržbu a rekonstrukce pro přidělení finančních prostředků. Několik výzkumníků navrhlo zjednodušené a modifikované přístupy, založené na rozsahu poškození, k odhadu únosnosti vozovky a požadované tloušťky nových vrstev vozovky [2, 3]. Jiné studie zavedly mechanisticko-empirické a pravděpodobnostní metody pro návrh nových vrstev, které zohledňují dopravní zatížení, klimatické podmínky, stávající stav vozovky a materiálové vlastnosti asfaltové směsi nové vrstvy [4, 5, 6]. Modely založené na výkonosti byly rovněž využity k odhadu efektivní strukturní únosnosti pomocí ekvivalentních převodních koeficientů odvozených z výkonových křivek založených na deterministickém prediktivním modelu AASHTO [7].

Nejuznávanější manuál poškození, podrobně popisující různé typy poškození asfaltových vozovek pro silnice i letiště, byl vyvinut U.S. Army Corps of Engineers (Sborem inženýrů americké armády) [8]. Tento manuál byl později přijat Federální leteckou správou (FAA) a Americkou společností pro zkoušení a materiály (ASTM) pod označením ASTM D5340-03 pro letištní vozovky a ASTM D6433-03 pro silnice a parkoviště. Odborníci na vozovky identifikovali přibližně 19 běžných typů poškození u asfaltových vozovek. Mezi ty nejčastěji pozorované ve studované oblasti patří podélné a příčné trhliny, síťové trhliny, mozaikové trhliny, vyjeté koleje, výtluky, hrboly, místní poklesy a ztráta hmoty. Poškození jako síťové trhliny a vyjeté koleje jsou často připisovány dopravnímu zatížení, zatímco vystupování pojiva na povrch vozovky obvykle vyplývá z nesprávného návrhu asfaltové směsi.

Cíle studie

Tato studie vyvíjela systematickou metodologii pro odhad efektivní únosnosti silničních sítí stanovením vztahu mezi konstrukčním číslem SN a pozorovanými daty o poškození. Specifické cíle jsou následující:

1. **Zavedení spolehlivé a praktické metody posuzování**, která zahrnuje efektivní, dostupný a vizuálně založený přístup k hodnocení únosnosti a zbytkové životnosti netuhých vozovek.
2. **Definování prahových hodnot poškození pro údržbu a rekonstrukce** stanovením přesných limitů poškození pro řízení údržbových a rekonstrukčních zásahů, s využitím jak indexu stavu vozovky, tak efektivního konstrukčního čísla vozovky.
3. **Zlepšení praktické aplikace navrhovaného rámce** poskytnutím doporučení pro optimální implementaci vyvinuté metodiky při hlášení strukturní integrity provozovaných silničních sítí ve velkém měřítku.

Přístup studie

Tato studie zahrnovala sběr a analýzu dat o poškození ze stovek úseků netuhých vozovek v Dubajském emirátu – SAE. Úsek vozovky je definován jako souvislá délka vozovky vykazující jednotné charakteristiky z hlediska konstrukce, dopravních vzorců, historie výstavby, stavu, klasifikace vozovky, odvodňovacích systémů a návrhu krajnice [9]. Každý úsek vozovky slouží jako nejmenší jednotka pro výběr vhodných opatření údržby, opravy a rekonstrukce. Soubor dat zahrnoval úseky vozovek vykazující rozmanitou škálu stavů, stáří, skladby vozovky, stavebních materiálů a úrovní dopravního zatížení. Shromážděná data byla systematicky tabelována a analyzována, přičemž pro každý úsek vozovky byly zaznamenány specifické parametry:

- **Efektivní konstrukční číslo (SN_{eff}):** Efektivní konstrukční číslo pro každý úsek vozovky bylo vypočteno na základě doporučení uvedených v Tabulce 5.2 metody AASHTO, která přiřazuje hodnoty koeficientů různým vrstvám vozovky podle pozorovaného rozsahu trhlin [1].

- **Data o poškození:** Byly provedeny vizuální inspekce k identifikaci klíčových vad přispívajících ke zhoršování stavu vozovky. Primární posuzované typy poškození zahrnovaly síťové trhliny, vystupování pojiva na povrch, vyjeté koleje, výtluky, ztrátu hmoty, podélné a příčné trhliny a poklesy.
- **Index stavu:** Nově vyvinutý Index kvality vozovky (PQI – Pavement Quality Index) byl vypočten pro každý úsek vozovky. Tento index byl odvozen na základě typu povrchového poškození, závažnosti poškození, hustoty poškození a přidělených vah poškození. PQI byl vypočten s použitím výše uvedených devíti typů poškození [10]. Po zpracování byla data o poškození začleněna do systému hospodaření s vozovkami k určení hodnoty PQI pro každý úsek vozovky. Navíc byla do výpočtu PQI integrována data o nerovnostech, měřená pomocí Mezinárodního indexu nerovnosti (IRI). Klasifikační rozsahy PQI byly: **100–85** vynikající, **85–70** velmi dobrý, **70–55** dobrý, **55–40** uspokojivý a **< 40** špatný.

Koncept degradace vozovky

Degradace únosnosti vozovky je neodmyslitelně spjata s šířením trhlin a dalších závad v jejích vrstvách. Výkonnost vozovky je přímo spojena s jejím fyzickým stavem, včetně přítomnosti trhlin, rozpadu a jiných forem poškození, které negativně ovlivňují její únosnost nebo vyžadují údržbové zásahy [1]. Jak je znázorněno na obrázku 1, vznik trhlin a deformací vede k významnému snížení tloušťky vrstvy vozovky, čímž následně klesá efektivní plocha průřezu a modul pružnosti vozovky. Pokles modulu pružnosti vozovky lze kvantifikovat pomocí rázových zkoušek.

Vliv dopravního zatížení na chování vozovky

Postupem času kumulativní dopravní zatížení zhoršuje degradaci vozovky, zvyšuje náchylnost k trhlinám a k vyjetí kolejí. Zpočátku vykazují konstrukce vozovky pružné chování, kde úrovně napětí a deformace zůstávají v přijatelných mezích. Jakmile však tato napětí překročí kritickou prahovou hodnotu, vozovka se již nechová pružně, dochází k trvalým deformacím, zejména při nadměrném zatížení. Tyto nedostatky únosnosti vozovky se projevují vznikem vad na povrchu, jako jsou trhliny, vyjeté koleje a zvlnění vozovky.

Posouzení na základě průhybu

Historicky byl maximální průhyb na povrchu od zatížení považován za klíčový ukazatel únosnosti vozovky a podloží [11, 12]. K měření průhybu se běžně používá dynamický rázový průhyboměr (FWD), přičemž tato měření slouží jako základ pro zpětný výpočet modulů pružnosti jednotlivých vrstev vozovky pomocí teorie lineárně pružného, vrstevnatého poloprostoru. Odhadované moduly jsou následně použity k predikci zbytkové životnosti vozovky, vyjádřené buď v letech, nebo v počtu přejezdů návrhových náprav.

Omezení možností posuzování na základě průhybu

Následný výzkum ukázal, že samotný průhyb je nedostatečný pro předpověď únosnosti vozovky. Většina výpočtů týkajících se zbytkové životnosti vozovky od opakovaného zatěžování silněji koreluje s napětím a deformací než s hodnotami průhybu. Navíc hodnoty průhybu klesají úměrně s hloubkou pod povrchem vozovky, zatímco napětí a deformace klesají úměrně s druhou mocninou hloubky pod povrchem vozovky. Tento rozdíl naznačuje, že povrchový průhyb není optimálním parametrem pro posouzení efektivní únosnosti na síťové úrovni. Hodnoty průhybů na povrchu vozovky jsou vhodné pro výpočet dalších charakteristik vrstev vozovky, včetně modulu, plochy průřezu a zakřivení.

Alternativní metodiky posouzení únosnosti

Postup návrhu vozovek AASHTO zavedl koncept konstrukčního čísla (SN) jako měřítko pevnosti vozovky. SN slouží jako index reprezentující celkovou integritu konstrukce vozovky. Poskytuje zjednodušené, avšak komplexní posouzení její únosnosti [13]. Mezi různými typy poškození, které přispívají ke konstrukčnímu a funkčnímu selhání vozovky, jsou uznávány jako nejkritičtější vyjeté koleje a síťové trhliny. Jejich výskyt je široce považován za primární mechanismus porušení u netuhých vozovek. Korelace mezi degradací vozovky a únosností je založena na principu, že s rozvojem trhlin

a dalších vad klesá celková únosnost vozovky. Výkonnost vozovky je neodmyslitelně spojena s jejím fyzickým stavem, charakterizovaným přítomností trhlin, rozpadu a jiných forem poškození, které zhoršují její schopnost snášet dopravní zatížení nebo vyžadují údržbové zásahy [1].

Jak je znázorněno na obrázku 1, vznik trhlin a deformací vede k postupnému snižování tloušťky vrstvy vozovky, čímž následně klesá efektivní plocha průřezu a modul vozovky. Tento pokles modulu vozovky lze kvantitativně posoudit pomocí rázových zkoušek, které poskytují cenné informace o integritě a zbytkové životnosti vozovky.

Prediktivní modelování degradace vozovky

V každém systému hospodaření s vozovkami je nezbytné udržovat přesné a aktuální záznamy o stavu vozovky a typech poškození. Různé okolnosti však mohou zpozdit plánované průzkumy stavu vozovky, což může narušit shromažďování dat. Pro řešení tohoto problému jsou užitečné prediktivní modely schopné odhadnout budoucí stav vozovky a nárůst poškození pod vlivem dopravního a environmentálního zatížení – zejména pro kritické typy poškození, jako jsou síťové trhliny a vyjeté koleje. Pokud nelze průzkumy stavu provést podle plánu, systém hospodaření s vozovkami (PMS – Pavement Management System) se může spolehnout na deterministické prediktivní modely vyvinuté na základě terénních dat na úrovni sítě.

Prediktivní modely pro vývoj poškození

Několik modelů, navržených výzkumníky, může sloužit jako alternativy pro predikci jak síťových trhlin, tak hloubky vyjetých kolejí s použitím různých parametrů [14]:

Model síťových trhlin:

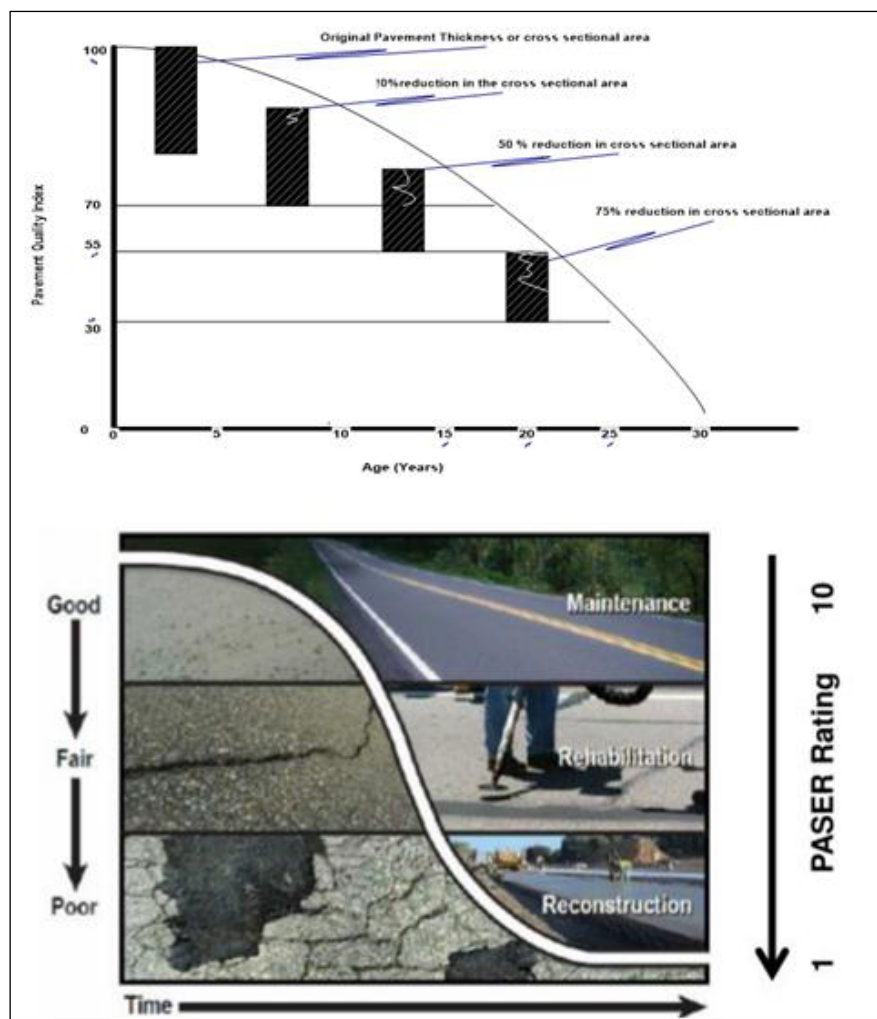
$$C = 21,600 (N) (SN) - SN \quad (1)$$

Model vyjetých kolejí:

$$R = 4.98 (Y)^{0.166} (S_a N)^{-0.5} (N)^{0.13} \quad (2),$$

kde:

- C = celková plocha trhlin (m/km/pruh),
- N = minulé dopravní zatížení v přejezdech návrhové nápravy (ESAL, miliony),
- R = hloubka vyjeté koleje (mm),
- Y = stáří vozovky od výstavby nebo posledního zesílení,
- S_a = celková porušená plocha (m/km/pruh),
- SN = konstrukční číslo vozovky.



Obrázek 1: Ilustrace znázorňující koncept snížení plochy příčného řezu vozovky v důsledku dopravního zatížení a stárnutí

(Termíny v obrázku: Počáteční tloušťka vozovky nebo plocha příčného řezu, 10% snížení plochy příčného řezu, 50% a 75% snížení plochy příčného řezu, index kvality vozovky, doba od zahájení provozu (roky), dobrý-vyhovující-špatný, rating podle Passera, doba, údržba, oprava rekonstrukce)

Hloubku vyjetých kolejí lze také předpovídat pomocí dalších modelů, jako je ten od **Neila et al.** [15]:

$$RD = 0,026 + 0,000191(ESAL) \quad (3),$$

kde:

- R = hloubka vyjeté koleje v mm,
- ESAL = minulé dopravní zatížení, počet přejezdů návrhové nápravy ESAL (miliony).

Nebo podle následujícího modelu [16]:

$$RD = 1,44 \times 10^{-6} * N^{0,23} * \mu\varepsilon^{1,536} \quad (4),$$

kde:

- RD = hloubka vyjeté koleje v mm,
- N = minulé dopravní zatížení, počet přejezdů návrhové nápravy ESAL (miliony),
- $\mu\varepsilon$ = naměřená trvalá deformace (mikrostrain, tj. 10^{-6}).

Zhoršení stavu a oprava

Stupeň a typ zhoršení stavu vozovky ovlivňuje hodnoty koeficientů vrstev přiřazených jejích materiálům z měření průhybů. Obecně jsou tyto hodnoty nižší než ty přiřazené stejným materiálům v nové konstrukci vozovky [1], s výjimkou případů, kdy se u nestmelených materiálů neprojevují žádné známky degradace. Zhoršení fyzického stavu a únosnosti postupně roste: s růstem procenta trhlin a vyjetých kolejí klesá

schopnost vozovky odolávat dalšímu opakování dopravního zatížení. Toto zhoršení přetrvává, dokud vozovka nedosáhne pokročilého stadia poškození charakterizovaného velkým množstvím trhlin a vyjetými koleji. V tomto okamžiku se asfaltová vrstva chová jako nestmelený materiál, což způsobuje zrychlení degradace, signalizující porušení a vyžadující zásadní opravu nebo rekonstrukci.

Výpočet efektivního konstrukčního čísla

Až do současnosti se některé metodiky návrhu vozovek spoléhají na empirické přístupy, jako jsou ty uvedené v metodách **AASHTO 1993** [1] a TRL, kde jsou vztahy mezi vstupními parametry návrhu – jako jsou dopravní zatížení, vlastnosti materiálů, skladba vrstev a environmentální podmínky – a režimy porušení vozovky stanoveny experimentálně, praktickými zkušenostmi nebo kombinací obojího. Empirické rovnice slouží ke korelování měřitelných charakteristik vozovky s dlouhodobým chováním, což umožňuje predikci.

Tato sekce se zaměřuje na manuál AASHTO 1993, který poskytuje základní rovnici pro návrh netuhé vozovky. Tato široce přijímaná rovnice, formulovaná s použitím imperiálního systému jednotek, používaného dříve ve Velké Británii a dodnes v USA, slouží jako klíčová reference při posuzování únosnosti vozovek. Jednotlivé parametry ve vzorci jsou uvedeny v příloze A. Rovnice (5) má následující tvar:

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R \times S_0 + 9,36 \times \log_{10}(SN + 1) - 0,20 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5}\right)}{0,4 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5,19}}} + 2,32 \times \log_{10}(M_R) - 8,07$$

Efektivní konstrukční číslo (SN_{eff}) pro opravený úsek vozovky po (n) letech provozu je určeno podle pokynů uvedených v **Tabulce 5.2 metody AASHTO**. Tato metoda poskytuje hodnoty koeficientů pro různé vrstvy vozovky – **asfaltové a nestmelené podkladní vrstvy** na základě rozsahu a závažnosti **poškození konstrukce**, zejména **únavových trhlin**, pozorovaných v jednotlivých úsecích vozovky. Pro úseky vozovek s **cementem stmelenou podkladní vrstvou (CTB – cement-treated base)** závisí přidělený koeficient vrstvy na hodnotách **pevnosti v prostém tlaku (UCS – Unconfined Compressive Strength)**, v souladu s doporučeními AASHTO. **Tabulka 1** představuje odhadované koeficienty vrstev pro vozovky v provozu, kategorizované podle jejich **stavu, typu poškození, závažnosti a rozsahu**.

Tabulka 1: Koeficienty vrstev pro vrstvy vozovek v provozu na základě stavu poškození [1]

Materiál vozovky	Stav poškození	Koeficient vrstvy
Asfaltové vrstvy	Malé nebo žádné únavové trhliny a pouze nízká závažnost příčných trhlin	0,35 – 0,44
	Méně než 10 % únavových trhlin nízké závažnosti a/nebo méně než 5 % příčných trhlin střední a vysoké závažnosti	0,25 – 0,35
	Více než 10 % únavových trhlin nízké závažnosti a/nebo více než 5-10 % příčných trhlin střední a vysoké závažnosti a/nebo méně než 10 % únavových trhlin střední závažnosti	0,20 – 0,30
	Více než 10 % únavových trhlin střední závažnosti a/nebo více než 5-10 % příčných trhlin střední a vysoké závažnosti a/nebo méně než 10 % únavových trhlin vysoké závažnosti	0,14 – 0,20
Cementem stmelená podkladní vrstva (CTB)	Z grafu korelace koeficientů vrstev s různými parametry pevnosti a tuhosti pro CTB pro hodnoty UCS v mezích 1,38 až 5,52 MPa	0,13 – 0,22
Nestmelená horní podkladní vrstva	Žádné známky pumpování jemných částic vzhůru, degradace, zvlhčení nebo kontaminace vrstvy jemnými částicemi	0,10 – 0,14
Nestmelená dolní podkladní vrstva	Některé známky, pumpování jemných částic vzhůru degradace, zvlhčení nebo kontaminace vrstvy jemnými částicemi	0,00 – 0,10

Tabulka 1 sloužila jako reference pro odhad koeficientů asfaltových a nestmelených vrstev. Stav nestmelených vrstev byl posouzen na základě přítomnosti specifických poškození, která by mohla naznačovat nedostatečnou únosnost nebo zhoršení stavu nestmelených vrstev související s jejich vlhkostí, jako jsou plošné deformace v asfaltových vrstvách, únavové trhliny vysoké závažnosti, místní poklesy a deformace vysoké závažnosti. Pro nově vybudované **asfaltové vrstvy** nebo stávající vozovky **ve vynikajícím stavu** bez viditelného poškození byl přidělen koeficient vrstvy **0,44**. **Ložním a podkladním asfaltovým vrstvám** vozovek byl přidělen koeficient vrstvy **0,42** na základě jejich vlastností a očekávané výkonnosti.

Vývoj prediktivního modelu konstrukčního indexu

Shromážděná data byla systematicky analyzována s cílem stanovit korelace mezi klíčovými parametry. Byl identifikován, statisticky testován a validován optimální model popisující vztah mezi **konstrukčním číslem (SN)** a **indexem stavu** porovnáním **skutečných** a **predikovaných** hodnot **SN_{eff}** na základě vyvinutých modelů.

Pro odvození nej přesnějších prediktivních modelů spojujících **zhoršení únosnosti s poklesem fyzického stavu** byly aplikovány různé matematické funkce a transformace, aby se sladily s celkovým trendem pozorovaným v datovém souboru. Analýza dat byla provedena pomocí statistického balíčku **SPSS** [17], což vedlo k identifikaci nejlépe odpovídajících modelů, které odpovídají následujícím matematickým výrazům obsahujícím přirozené logaritmy:

$$SN_{eff} / SN_0 = 0,302 \ln(PQI_x / PQI_0) + 0,982 \quad \text{nebo}$$

$$SN_{eff} / SN_0 = 0,302 \ln(PQI_x / 100) + 0,982 \quad R^2 = 0,761 \quad (6)$$

Další model, který se může hodit pro hodnocení úseků vozovek, má podobu mocninné funkce:

$$SN_{eff} / SN_0 = 0,992 (PQI_x / PQI_0)^{0,383} \quad \text{nebo}$$

$$SN_{eff} / SN_0 = 0,992 (PQI_x / 100)^{0,383} \quad R^2 = 0,760 \quad (7),$$

kde:

SN_{eff} = efektivní konstrukční číslo vozovky,

SN₀ = původní konstrukční číslo vozovky po uvedení do provozu (věk 0) a určené pomocí rovnice,

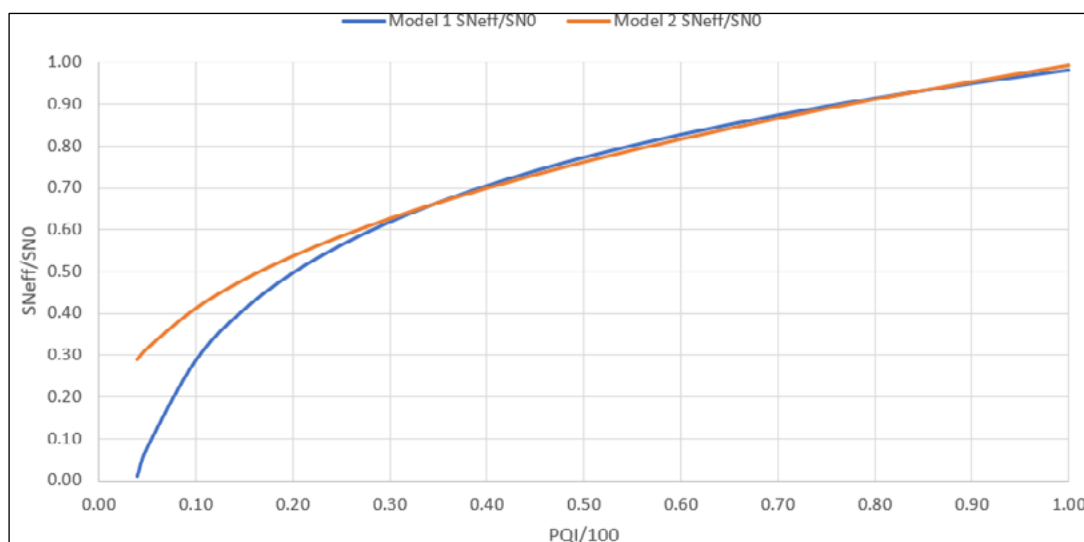
$$SN_0 = a_1 D_1 + a_2 m_2 D_2 + a_3 m_3 D_3,$$

kde **a1** = koeficient asfaltové vrstvy, **a2** = koeficient pro podkladní cementem stmelenu vrstvu, **a3** = koeficient pro nestmelenou vrstvu, **m2** a **m3** = koeficient odvodnění pro materiál horní a dolní nestmelené podkladní vrstvy, **PQI_x** = index kvality úseku vozovky na škále od 0 do 100 v čase x, **PQI₀** = index kvality vozovky ve stáří nula, který je standardně = 100. Nejlépe odpovídající křivky pro výše uvedené modely jsou znázorněny na obrázku 2.

Jak je znázorněno na tomto obrázku, charakteristiky vyvinutých modelů naznačují, že **koeficient determinace (R²)**, který kvantifikuje podíl variability v datovém souboru vysvětlený statistickým modelem, je přibližně **0,76**. Tato **míra shody** naznačuje, že vyvinutý model vykazuje přijatelnou úroveň prediktivní přesnosti pro svou aplikaci v systémech správy vozovek. Navíc je tento index snadno vypočitatelný a může sloužit jako **nezávislý ukazatel stavu** nebo být bezproblémově integrován do **celkového indexu kvality vozovky (OPQI)**. OPQI zahrnuje více parametrů stavu vozovky, včetně **mezinárodního indexu nerovnosti (IRI)** a **mezinárodního indexu tření (IFI)**, což zvyšuje jeho celkové hodnotící schopnosti. (Pozn. překladatele: mezinárodní index IFI slouží k harmonizaci a srovnání výsledků měření protismykových vlastností získaných různými měřicími zařízeními po celém světě.)

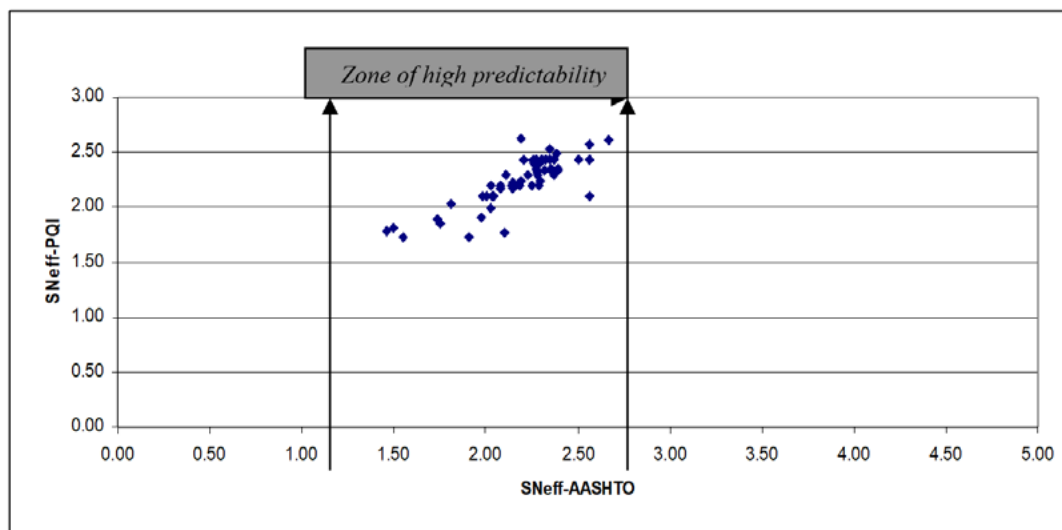
Aplikace vyvinutých modelů

Implementace vyvinutých modelů v **rovnících 6 a 7** je ilustrována na obrázku 3. Predikované **konstrukční číslo (SN)**, založené na datech o poškození s využitím **parametru Indexu kvality vozovky (PQI)**, se úzce shoduje s hodnotami získanými ze skutečných měření poškození a odhadnutých koeficientů vrstev přiřazených různým vrstvám vozovky. Většina predikovaných hodnot spadá pod trendovou čáru s přibližným sklonem **45 stupňů**, což naznačuje silnou prediktivní schopnost modelu.



Obrázek 2: Vztah mezi efektivním konstrukčním číslem a indexem kvality vozovky

Vyvinutý model je zvláště účinný pro odhad **únosnosti vozovky** na **málo až středně zatížených komunikacích**, jako jsou **místní a sběrné komunikace**, kde se **návrhové konstrukční číslo pohybuje v rozmezí od 1,6 do 3,5**. Po výpočtu **efektivního konstrukčního čísla (SN_{eff})** pro každý úsek vozovky pomocí tohoto modelu lze určit **efektivní únosnost** – vyjádřenou v **počtu přejezdů návrhových náprav (ESAL)** – a **zbytkovou životností (RL – Remaining Life)**. Tento deterministický model nabízí praktickou alternativu pro hodnocení únosnosti vozovky **na síťové úrovni** bez nutnosti rozsáhlých **průhybových zkoušek**. Navíc lze přesnost a spolehlivost modelu **každoročně zlepšovat** začleněním nově shromážděných dat získaných z průzkumů na úrovni projektu, čímž se zajistí neustálé zpřesňování a použitelnost v systémech správy vozovek.

Obrázek 3: Predikované SN_{eff} na základě dat o poškození vs. vypočtené SN_{eff} pomocí metody AASHTO

(Termín v obrázku: Oblast, kde je předpověď věrohodná)

Proces výběru oprav a rekonstrukcí vozovky

Na základě zjištění této studie úseky vozovek s indexem kvality vozovky (PQI) v rozmezí **40 až 70**, což představuje optimální rozsah hodnot pro opravy, vyžadují rozsáhlé zásahy, jako je frézování a pokládka nové vrstvy, překrytí novou vrstvou, recyklace obrusné vrstvy na místě za horka, nebo částečnou rekonstrukci, pokud podíl trhlin a porušených míst spadá do **10 % až 17 %** celkové plochy vozovky. V průměru je úsek vozovky považován za neúnosný, pokud trhliny a porušená místa přesáhnou **18 % až 20 %** celkové plochy úseku. V takovém případě je vyžadována úplná rekonstrukce.

Z ekonomického hlediska je oprava všech porušených ploch nepraktická, neboť vede ke zvýšené nerovnosti povrchu. V takových případech je nezbytná rozsáhlá rekonstrukce. Analýza terénních dat naznačuje, že úsek vozovky blížící se prahové hodnotě porušení typicky vykazuje:

- **přibližně 7 % únavových trhlin vysoké závažnosti,**
- **kolem 5 % trhlin střední závažnosti.**

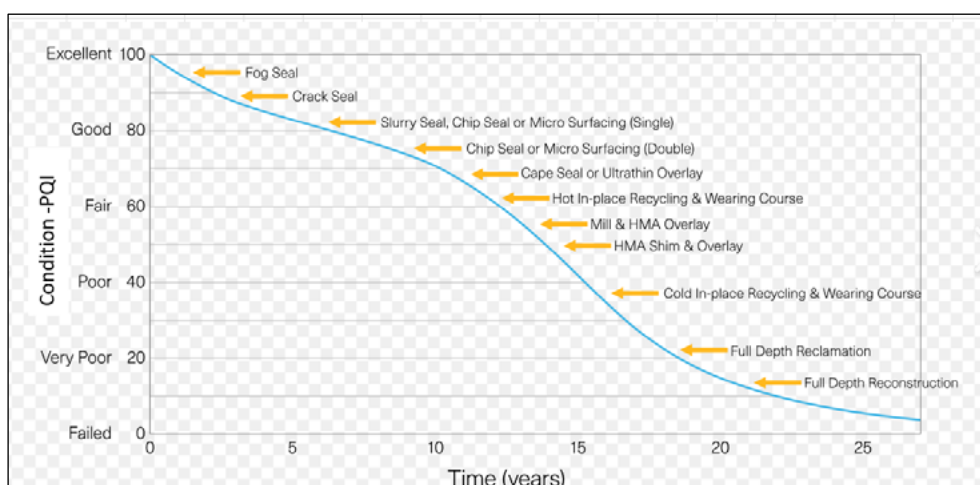
Navíc, úseky, kde **středně a vysoce závažné trhliny kolektivně přesahují 10 % celkové plochy vozovky**, jsou považovány za úseky na konci své životnosti. Tyto limity zhoršení byly odvozeny z reprezentativních terénních dat a mohou být periodicky kalibrovány na základě zpětné vazby od terénních posádek a srovnávacích hodnocení mezi predikcemi generovanými systémem správy vozovek (PMS) a skutečnými stavy vozovek pozorovanými na vybraných kontrolních úsecích.

Poměr únosnosti, který je odhadován na základě naměřené hodnoty PQI pro vozovku, se používá k nastavení spouštěcích hodnot pro tyto strukturní parametry. Tabulka 2 níže uvádí navrhované spouštěcí hodnoty pro proces výběru oprav s použitím dat z hlediska SN_{eff}/SN_0 a zbytkové životnosti (RSL).

Tabulka 2: Navrhované spouštěcí hodnoty pro proces výběru oprav s použitím strukturních dat

SN_{eff}/SN_0	Rozsah PQI	Zbytková životnost (roky)	Typ opravy
> 0,95	> 95	> 19	Běžná údržba – utěsnění povrchu
0,90 – 0,95	90K95	17–19	Běžná údržba – utěsnění trhlin
0,70 – 0,90	70–90	15–17	Údržba – kalová vrstva (Slurry Seal), nátěr (Chip Seal) nebo mikrokoberec (Microsurfacing)
0,60 – 0,70	60–70	12–15	Oprava – překrytí novou vrstvou (Functional Overlay), recyklace za horka na místě a obrusná vrstva
0,50 – 0,60	50–60	9–12	Oprava – frézování a překrytí (Mill and Overlay)
0,40 – 0,50	40–50	7–9	Oprava – zesílení více než 50 mm tloušťky
0,25 – 0,40	30–40	5–7	Částečná rekonstrukce – recyklace za studena včetně obrusné vrstvy
0,10 – 0,25	5–25	3–5	Kompletní rekonstrukce v plné hloubce

Obrázek 4 ukazuje různé typy oprav, které lze aplikovat v různých podmínkách pro udržení funkčnosti a únosnosti vozovky před dosažením stádia úplné rekonstrukce.



Obrázek 4: Příklad typů oprav vybraných na základě stavu vozovky

(Termíny v obrázku: utěsnění povrchu, utěsnění trhlin, kalová vrstva, nátěr nebo jednovrstvý mikrokoberec, nátěr nebo dvouvrtvý mikrokoberec, nátěr + kalový zákryt nebo překrytí velmi tenkou vrstvou, recyklace za horka na místě + obrusná vrstva, frézování a nové asfaltové vrstvy, vyrovnávací asfaltová vrstva + nová vrstva, recyklace za studena na místě + obrusná vrstva, rekonstrukce, úplná rekonstrukce, výborný, dobrý, vyhovující, špatný, velmi špatný, havarijní, stav kvality PQI, doba (roky))

Závěry

Z této studie lze vyvodit následující závěry:

1. **Informace o poškození vozovky** zůstávají primárním ukazatelem stavu vozovky a slouží jako spolehlivý zdroj pro odhad efektivní únosnosti provozovaných vozovek na úrovni sítě.
2. **Sít'ové trhliny a vyjeté koleje** jsou klíčové typy poškození, které lze využít k posouzení efektivní únosnosti a identifikaci způsobů selhání vozovky.
3. **Koncepce konstrukčního čísla (SN)** nadále představuje nákladově efektivní a spolehlivou metodu pro kvantifikaci pevnosti stávajících systémů vozovek.
4. **Výběr úpravy** lze efektivně dosáhnout výpočtem zbytkové životnosti vozovky na základě Indexu kvality vozovky (PQI) a efektivního konstrukčního čísla.
5. **Vyvinuté prediktivní modely** poskytují efektivní a spolehlivý přístup k hodnocení únosnosti vedlejších komunikací. Nabízejí dostupnou a nákladově efektivní alternativu pro odhad zbytkové životnosti vozovky, překonávající tradiční destruktivní a nedestruktivní metody posuzování z hlediska praktičnosti a cenové dostupnosti.
6. **Integrace do systémů správy vozovek** umožňuje využít vyvinutou metodu pro hlášení stavu vozovek, identifikaci potřeb údržby a stanovení požadavků na opravy.
7. **Zvýšení prediktivní schopnosti modelu** lze dosáhnout začleněním dalších dat o úsecích vozovek, zejména z vysoce zatížených silnic, pro zlepšení přesnosti a použitelnosti.

Zdroje:

- [1] AASHTO (1993). AASHTO guide for the design of pavement structures. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- [2] Zhou, F., Hu, S., & Scullion, T. (2010). Advanced asphalt overlay thickness design and analysis system. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 79, 597–634.
- [3] Fwa, T. F., Sinha K.C and Reverson J., 1988. Highway routine maintenance programming at network level. Journal of transportation Engineering, ASCE, Vol.114, No. 5.
- [4] Maji, A., Singh, D., & Chawla, H. (2016). Developing probabilistic approach for asphaltic overlay design by considering variability of input parameters. Innovative Infrastructure Solutions, 1(1), 43. doi:10.1007/s41062-016-0046-3.
- [5] Nobakht, M., Sakhaeifar, M. S., & Newcomb, D. (2016). Development of rehabilitation strategies based on structural capacity for composite and flexible pavements. Journal of Transportation Engineering Part A: Systems, 143(4), 04016016.
- [6] Le, V. P., Lee, H. J., Flores, J. M., Baek, J., & Park, H. M. (2017). Development of a simple asphalt concrete overlay design scheme based on mechanistic – Empirical approach. Road Materials and Pavement Design, 18(3), 630–645. doi:10.1080/14680629.2016.1182059.
- [7] Abaza, K. A. (2005). Performance-based models for flexible pavement structural overlay design. Journal of Transportation Engineering, 131(2), 149–159.
- [8] Shahin, MY & Schmidt, J (1998). Pavement condition analysis and development of initial M&R prioritization for local agencies', International Conference on Managing Pavements, 4th, 1998, Durban, South Africa, University of Pretoria, Department of Civil Engineering, Pretoria, pp. 323–348.
- [9] Shahin MY (1994), Pavement management for airports, roads, and parking lots, Chapman and Hall, New York-USA.
- [10] Shiyab, A. M. S. H. (2007). Optimum use of flexible pavement condition indicators in pavement management systems. A PhD thesis, Curtin University of Technology – Perth, WA, Australia.
- [11] Hass, R., Hudson, W.R. and Zaniewski, J., (1993). Modern pavement management System. Krieger Publishing, Florida. USA.
- [12] Hass, R (1995), 'Principles and application of pavement management', International Conference on Roads and Airfield Pavement Technology, 2nd, 1995, vol. 1, Singapore, Center for Transportation Research, National University of Singapore, Singapore, pp.1–34.
- [13] Pologruto, M. (2001). Procedure for use of falling weight deflectometer to determine the AASHTO layer coefficients, Transportation Research Record, no.1764, Transportation Research Board, pp 11–19.
- [14] Fwa, T. F., Sinha K.C and Reverson J., 1988. Highway routine maintenance programming at network level. Journal of transportation Engineering, ASCE, Vol.114, No.5 pp539-554.

- [15] Neil C. Krutz and Mary Stroup-Gardiner, 1993. Relationship between permanent deformation of asphalt concrete pavement and moisture sensitivity. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No.1259 TRB, National Research Council, Washington D.C., pp 181–187.
- [16] Hans Ertman Larsen and per ullidtz (1998). Development of improved mechanistic deterioration models for flexible pavement. In Proceeding 4th International Conference on Managing Pavements, 4, International Convention Center – ICC, Durban, South Africa, pp 583–596.
- [17] Statistical Package for Social Science (SPSS), 2003, Version 11, SPSS Inc., Chicago, Illinois, USA.

Dodatek A

Níže je uvedena návrhová rovnice AASHTO 1993 pro odhad konstrukčního čísla flexibilní vozovky na základě tloušťky a stavu stávajících vrstev.

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R \times S_0 + 9,36 \times \log_{10}(SN + 1) - 0,20 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5}\right)}{0,4 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5,19}}} + 2,32 \times \log_{10}(M_R) - 8,07$$

kde:

Z_R = směrodatná odchylka,

W_{18} = předpovězený počet přejezdů návrhových náprav 80 kN (18 000 lb) ESAL,

S_0 = kombinovaná střední chyba předpovědi dopravního zatížení a předpovědi výkonnosti,

SN = konstrukční číslo (index který indikuje požadovanou celkovou tloušťku vozovky),

$DPSI$ = rozdíl mezi návrhovým počátečním indexem použitelnosti p_0 a návrhovým konečným indexem použitelnosti p_t ,

M_R = modul pružnosti podloží [psi] převod na MPa se provede vynásobením 145.

Konstrukční číslo SN může být vyjádřeno ve tvaru:

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3 + \dots$$

kde:

a_i = koeficient i-té vrstvy,

D_i = tloušťka i-té vrstvy [inch] převod na mm se provede vynásobením 25,4,

m_i = drenážní koeficient i-té vrstvy.

Aplikace této rovnice pro vozovku se třemi vrstvami: obrusná, podkladní a nestmelená vrstva:

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3$$

TREATMENT SELECTION PROCESS AT NETWORK LEVEL BASED ON PAVEMENT DISTRESS DATA

PROCES VÝBĚRU OPRAV NA ÚROVNI SÍTĚ NA ZÁKLADĚ DAT O POŠKOZENÍ VOZOVKY

Adnan Mohd Said Shiyab, Civil Engineering Department, Faculty of Science and Engineering Macquarie University, Australia

Aya Mustafa Alwan, Statistics department, Faculty of Science and Engineering, Macquarie University, Australia

This study seeks to develop a refined methodology for pavement treatment selection at network level and determination of annual maintenance and rehabilitation requirements considering the effective structural capacity of pavement quantified by the Structural Number (SN), using exclusively visual distress data. The underlying principle is that the onset of micro-cracking and deformation leads to a measurable reduction in pavement layer thickness, consequently diminishing the effective cross-sectional area and pavement modulus. To achieve this objective, an extensive evaluation was conducted on hundreds of pavement sections in Dubai – UAE, documenting various distress types, severities, and quantities. Based on this data, the effective structural number for each pavement section was determined using the empirical AASHTO 1993 method, as specified in Section 5, Table 5.2. Statistically valid predictive models, demonstrating a high Coefficient of Determination (R^2) at $\alpha = 0.05$, were developed. These models indicate that the effective structural capacity of pavement can be estimated based on distress type, extent, and the overall pavement quality index, which may incorporate other condition indicators such as roughness measurements via the International Roughness Index (IRI), and friction measurements via International Friction Index (IFI), where such data is available. The prediction models developed in this study, offer substantial advantages to pavement management system engineers and maintenance planners by providing a reliable and efficient method for predicting structural deterioration and assessing the remaining pavement structural life and maintenance requirements at the network level. This approach eliminates the need for costly field investigations and both destructive and non-destructive testing.

Tato studie si klade za cíl vyvinout zdokonalenou metodologii pro výběr oprav vozovky na síťové úrovni a stanovení ročních požadavků na údržbu a rekonstrukci, a to s ohledem na efektivní únosnost vozovky vyjádřenou konstrukčním (strukturním) číslem (SN structural number), výhradně za použití dat z vizuální inspekce poškození. Základním principem je, že vznik trhlin a deformací vede k měřitelnému snížení tloušťky vrstvy vozovky, čímž následně klesá efektivní plocha průřezu a modul vozovky.

Pro dosažení tohoto cíle bylo provedeno rozsáhlé hodnocení stovek úseků vozovek v Dubaji (SAE) dokumentující různé typy poškození, jejich závažnost a rozsah. Na základě těchto dat bylo efektivní konstrukční číslo pro každý úsek vozovky určeno pomocí empirické metody v americkém předpisu AASHTO 1993, jak je specifikováno v Sekci 5, Tabulka 5.2.

Byly vyvinuty statisticky validní prediktivní modely, které prokázaly vysoký koeficient determinace (R^2) při $\alpha = 0,05$. Tyto modely naznačují, že efektivní únosnost vozovky lze odhadnout na základě typu poškození, rozsahu a celkového indexu kvality vozovky. Ta může zahrnovat i další ukazatele stavu, jako jsou měření podélné nerovnosti povrchu vozovky pomocí Mezinárodního indexu nerovnosti (IRI) a měření protismykových vlastností vozovky a vyhodnocení pomocí mezinárodního indexu tření (IFI), pokud jsou taková data k dispozici.

Prediktivní modely, vyvinuté v této studii, nabízejí významné výhody odborníkům zabývajícím se správou vozovek a plánováním údržby, neboť poskytují spolehlivou a efektivní metodu pro predikci zhoršování únosnosti vozovek, posouzení jejich zbytkové (ještě očekávané) životnosti a požadavků na údržbu a opravy na síťové úrovni. Tento přístup eliminuje potřebu nákladných terénních průzkumů a destruktivních i nedestruktivních zkoušek.

Introduction

Road's maintenance planners are primarily concerned with determining the additional load, measured in Equivalent Single Axle Loads (ESAL), that pavement can withstand in its remaining service years before reaching structural failure. Addressing this question through a pavement management system is crucial for planning future maintenance and rehabilitation (M&R) needs and developing annual work programs. According to the American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), structural capacity is defined as "the number of standard axles that pavement can carry before experiencing a specified degree of structural or functional distress" (AASHTO, 1993). Despite appearing to be in satisfactory surface condition, many pavements may exhibit severe structural deficiencies, leading to rapid deterioration under the combined effects of traffic loading and environmental factors.

Within pavement management systems, the prediction of remaining structural life is a fundamental aspect that enables road maintenance planners and engineers to make informed decisions regarding annual M&R requirements and budget allocations. Several researchers have proposed simplified and modified approaches based on the extent of structural distress to estimate pavement strength and the required resurfacing thickness (Zhou, Hu, & Scullion, 2010; Fwa et al., 1988). Other studies have introduced mechanistic-empirical and probabilistic methods for designing balanced asphalt overlays that consider traffic loading, climatic conditions, existing pavement conditions, and material properties of the overlay mix (Maji & Chawla, 2016; Nobakht et al., 2016; Le, Lee et al., 2017). Performance-based models have also been utilized to estimate effective structural capacity using equivalency conversion factors derived from performance curves based on AASHTO's deterministic prediction model (Abaza, 2005).

The most widely recognized distress manual detailing various types of flexible pavement distress for both roads and airports was developed by the U.S. Army Corps of Engineers (Shahin, 1998). This manual was later adopted by the Federal Aviation Administration (FAA) and the American Society for Testing and Materials (ASTM) under designations ASTM D5340-03 for airport pavements and ASTM D6433-03 for roads and parking lots. Pavement experts have identified approximately 19 common types of distress in flexible pavements. Among those observed most frequently in the study area are alligator cracking, rutting, potholes, shoving, weathering/ravelling, longitudinal and transverse cracking, and depressions. Distresses such as alligator cracking and rutting are often attributed to traffic loading, while bleeding typically results from improper mix design.

Study Objectives

1. This study aims to develop a systematic methodology for estimating the effective structural capacity of pavement networks by establishing a relationship between the structural number and observed distress data. The specific objectives are as follows:
 1. **Introducing a Reliable and Practical Assessment Method** which include an efficient, accessible, and visually based approach for evaluating the structural capacity and remaining service life of flexible pavements.
 2. **Defining Structural Failure Thresholds for Maintenance and Rehabilitation** by establishing precise failure limits to guide maintenance and rehabilitation interventions, utilizing both pavement condition index and an effective pavement structural number.
 3. **Enhancing the Practical Application of the Proposed Framework** by Providing recommendations for the optimal implementation of the developed methodology in reporting the structural integrity of in-service pavement networks at a large scale.

Study approach

This study involved the collection and analysis of distress data from hundreds of flexible pavement sections across Dubai Emirate-UAE. A pavement section is defined as a continuous length of roadway exhibiting uniform characteristics in terms of structure, traffic patterns, construction history, condition, pavement classification, drainage systems, and shoulder design (Shahin, 1994). Each pavement section serves as the smallest management unit for selecting appropriate maintenance and rehabilitation treatments. The dataset encompassed pavement sections exhibiting a diverse range of conditions, ages, structural compositions, construction materials, and

traffic levels. The collected data were systematically tabulated and analysed, with specific parameters recorded for each pavement section:

- **Effective Structural Number (S_{Neff}):** The effective structural number for each pavement section was calculated based on the guidelines provided in Table 5.2 of the AASHTO method, which assigns coefficient values to various pavement layers according to the extent of cracking observed (AASHTO, 1993).
- **Distress Data:** Visual inspections were conducted to identify key defects contributing to pavement structural deterioration. The primary distress types assessed included alligator cracking, bleeding, rutting, potholes, patching, shoving, weathering and ravelling, longitudinal and transverse cracking, and depressions.
- **Condition Index:** A newly developed Pavement Quality Index (PQI) was calculated for each pavement section. This index was derived based on surface distress type, distress severity, distress density, and assigned distress weights. The PQI was computed using the aforementioned nine distress types (Shiyab, 2007). Once processed, the distress data were incorporated into the pavement management system to determine the PQI value for each pavement section. Additionally, roughness data, measured using the International Roughness Index (IRI), were integrated into the PQI calculation. The PQI classification ranges were ;**100-85: Excellent**, **85-70: Very Good**, **70-55: Good**, **55-40: Fair** and **Below 40: Poor**

Pavement deterioration Concept

The degradation of pavement structural capacity is intrinsically linked to the propagation of cracks and other structural defects within its layers. The structural performance of a pavement is directly associated with its physical condition, including the presence of cracking, ravelling, and other forms of distress that negatively impact its load-bearing capacity or necessitate maintenance interventions (AASHTO, 1993). As illustrated in Figure 1, the initiation of micro-cracking and deformations leads to a significant reduction in pavement layer thickness, subsequently diminishing the effective cross-sectional area and pavement modulus. The decline in pavement modulus can be quantified through deflection testing.

Impact of Traffic Loading on Pavement Behaviour

Over time, cumulative traffic loading exacerbates pavement deterioration, increasing susceptibility to cracking and rutting. Initially, pavement structures exhibit elastic behaviour, where stress and strain levels remain within tolerable limits. However, once these stresses surpass the critical threshold, the pavement transitions to a plastic state, undergoing permanent deformation under excessive loading. These structural deficiencies manifest as surface defects such as cracking, rutting, and shoving.

Deflection-Based Assessment

Historically, maximum surface deflection under load was regarded as a key indicator of pavement structural condition (Hass et al., 1993; Hass, 1995). The Falling Weight Deflectometer (FWD) is commonly used to measure deflection, with these measurements serving as the basis for back-calculating the effective modulus of individual pavement layers using multi-layered linear elastic theory. The estimated modulus is subsequently used to predict the pavement's remaining service life, expressed either in years or in equivalent standard axle load repetitions.

Limitations of Deflection-Based Assessment

Subsequent research has revealed that deflection alone is an inadequate predictor of pavement structural capacity. Most calculations related to pavement remaining life and load repetitions correlate more strongly with stress and strain rather than with deflection values. Additionally, deflection values decrease proportionally with pavement depth, whereas stress and strain decrease proportionally with the square of pavement depth. This discrepancy indicates that surface deflection is not an optimal parameter for assessing effective structural capacity at the network level. Instead, deflection data are better suited for calculating other pavement layer characteristics, including modulus, cross-sectional area, and curvature.

Alternative Structural Assessment Methodologies

The AASHTO pavement design procedure introduced the concept of the Structural Number (SN) as a measure of pavement strength. The SN serves as an index representing the overall structural integrity of a pavement, providing a simplified yet comprehensive assessment of its load-bearing capacity (Pologruto, 2001). Among the various distress types that contribute to structural and functional pavement failure, rutting and alligator cracking are recognized as the most critical. Their occurrence is widely considered the primary failure mechanism in flexible pavement systems. The correlation between pavement deterioration and structural capacity is based on the principle that as cracks and other structural defects develop, the overall load-bearing capability of the pavement declines. The structural performance of a pavement is inherently linked to its physical condition, characterized by the presence of cracking, ravelling, and other forms of distress that impair its ability to support traffic loads or necessitate maintenance interventions (AASHTO, 1993).

As illustrated in Figure 1, the initiation of micro-cracking and deformation leads to a gradual reduction in pavement layer thickness, subsequently decreasing the effective cross-sectional area and pavement modulus. This decline in pavement modulus can be quantitatively assessed through deflection testing, which provides valuable insights into the structural integrity and remaining service life of the pavement.

Predictive Modelling for Pavement Deterioration

In any pavement management system, maintaining accurate and up-to-date records of pavement condition and distress types is essential. However, various circumstances may delay scheduled pavement condition surveys, potentially disrupting data collection. To address this issue, predictive models capable of estimating future pavement condition and distress progression under traffic and environmental loading—particularly for critical distress types such as alligator cracking and rutting—are of significant interest. If condition surveys cannot be conducted as scheduled, the pavement management system (PMS) can rely on deterministic prediction models developed based on network-level field data.

Predictive Models for Distress Progression

Several models proposed by researchers can serve as alternatives for predicting both alligator cracking and rut depth using different parameters (Fwa et al., 1998):

Alligator Cracking Model:

$$C = 21,600(N) (SN)^{-SN} \quad 1$$

Rutting Model:

$$R = 4.98(Y)^{0.166} (SN)^{-0.5} (N)^{0.13} \quad 2$$

Where:

- (C) = total area of cracking (m/km/lane)
- (N) = past traffic loading in Equivalent Single Axle Loads (ESAL, millions)
- (R) = rut depth (mm)
- (Y) = pavement age since construction or last overlay
- (S) = total area disintegrated (m/km/lane)
- (SN) = pavement structural number

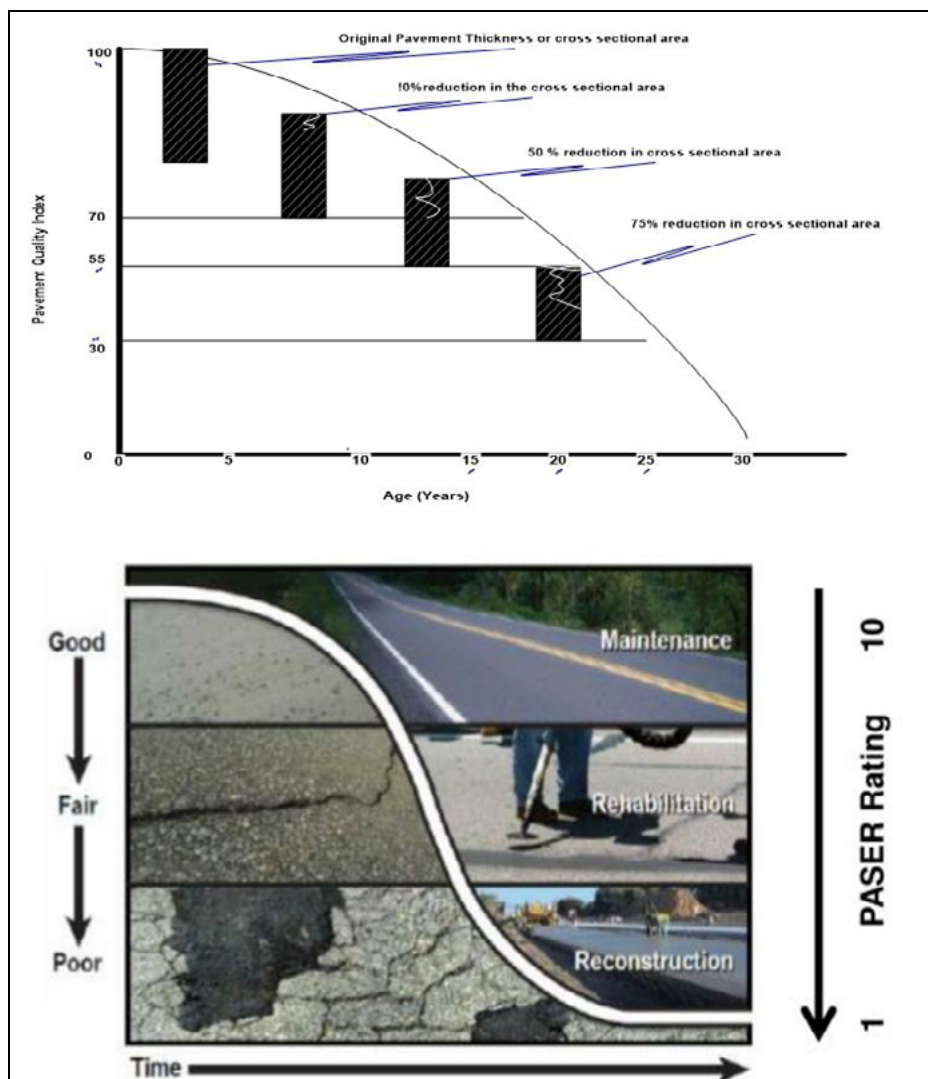


Figure 1: An Illustration shows the concept of the reduction in pavement cross sectional area as a result of traffic loading and aging

Additionally, rutting can be predicted using other models, such as Neil et al. (1993):

$$RD = 0.026 + 0.000191 \text{ (ESAL)} \quad 3$$

Where:

R = rut depth in mm

ESAL = past traffic loading in ESAL (millions).

Or by the following model (Hans Ertman et al, 1998)

$$RD = 1.44 \cdot 10^{-6} \cdot N^{0.23} \cdot \mu\epsilon^{1.536} \quad 4$$

Where:

RD = rut depth in mm

N = past traffic loading in ESAL (millions)

$\mu\epsilon$ = measured plastic strain (microstrain)

Structural Deterioration and Rehabilitation

The degree and type of deterioration present in pavement influence the layer coefficient values assigned to its materials through deflection testing. Generally, these values are lower than those assigned to the same materials in new pavement construction (AASHTO, 1993), except in cases where unbound materials exhibit no signs of degradation. The deterioration of physical condition and

structural capacity follows a proportional trend: as the percentage of cracks and rutting increases, the pavement's ability to withstand additional traffic load repetitions declines. This deterioration persists until the pavement reaches an advanced stage of distress, characterized by severe cracking and rutting. At this point, the asphalt-bound layer behaves as an unbound material, causing an accelerated rate of deterioration, signalling structural failure and necessitating major repair or rehabilitation.

Effective Structural Number calculation

Till present time, some pavement design methodologies rely on empirical approaches, such as those outlined in the **AASHTO 1993** and TRL methods, where relationships between design inputs—such as traffic loads, material properties, layer configurations, and environmental conditions—and pavement failure modes are established through experimentation, practical experience, or a combination of both. Empirical equations serve to correlate measurable pavement characteristics with long-term performance outcomes, allowing for predictive

This section focuses on the 1993 AASHTO Guide, which provides a fundamental design equation for flexible pavements. This widely adopted equation, formulated using the imperial unit system, serves as a key reference in pavement structural capacity assessment. The equation is expressed as follows:

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R \times S_o + 9.36 \times \log_{10}(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \times \log_{10}(M_R) - 8.07$$

5

The **Effective Structural Number (SN_{eff})** for a rehabilitated pavement section after (n) years of service is determined following the guidelines outlined in **Table 5.2 of the AASHTO method**. This method provides coefficient values for various pavement layers—including **asphalt, granular base, and granular subbase**—based on the extent and severity of **structural distresses**, particularly **fatigue cracking**, observed in each pavement section. For pavement sections with a **cement-treated base (CTB)**, the assigned layer coefficient depends on **Unconfined Compressive Strength (UCS) values**, in accordance with AASHTO recommendations. **Table 1** presents the estimated layer coefficients for in-service pavements, categorized according to their **condition, distress type, severity, and extent**

Table 1: Layer coefficients for the in- service pavement layers based on distress condition (AASHTO 1993)

Pavement material	Distress condition	Layer coefficient
Asphalt Surface	Little or no alligator (fatigue) cracking and only low severity transverse cracking	0.35-0.44
	Less than 10% low severity alligator cracking and /or less than 5% medium and high transverse cracking	0.25-0.35
	More than 10% low severity alligator cracking and /or more than 5-10% medium and high severity transverse cracking, and or less than 10% medium severity alligator cracking	0.20-0.30
	More than 10% medium severity Alligator cracking and /or more than 5-10% medium and high severity transverse cracking, and or less than 10% high severity alligator cracking	0.14-0.20
Cement treated base-CTB	From a correlation chart that relates structural layer coefficients to various strength and stiffness parameters for CTBs. The target UCS varies, from 1.38 MPa to 5.52 MPa.	0.13 to 0.22
Granular Base, or Subbase	No evidence of pumping, degradation, wetting, or contamination with fines	0.10-0.14
Granular Base, or Subbase	Some evidence of pumping, degradation, wetting or contamination with fines	0.00-0.10

Table 1 served as a reference for estimating the layer coefficients of asphalt base and subbase materials. The condition of the granular base and subbase was assessed based on the presence of specific distresses that could indicate structural weaknesses or moisture-related deterioration, such as depressions, high-severity alligator cracking, potholes, and high-severity shoving. For newly constructed **dense-graded asphalt layers** or pavements in **excellent condition** with no visible distress, a **layer coefficient of 0.44** was assigned. Meanwhile, pavements built using **Dense Bituminous Macadam (DBM)** were assigned a **layer coefficient of 0.42** based on their structural properties and expected performance.

Development of structural index prediction model

The collected data were systematically analysed to establish correlations between key parameters. The optimal model describing the relationship between the **structural number (SN)** and the **condition index** was identified, statistically tested, and validated by comparing the **actual** and **predicted** values of **S_{eff}** based on the developed models.

To derive the most accurate predictive models linking **structural deterioration** with **physical condition decline**, various mathematical functions and transformations were applied to align with the overall trend observed in the dataset. The data analysis was conducted using the **SPSS statistical package (SPSS, 2003)**, leading to the identification of the best-fit models, which conform to the following mathematical natural logarithmic form expressions:

$$SN_{eff}/SN_0 = 0.302 \ln (PQI_x/PQI_0) + 0.982 \quad \text{or}$$

$$SN_{eff}/SN_0 = 0.302 \ln (PQI_x/100) + 0.982 \quad R^2=0.761 \quad 6$$

Another model that can fit the performance data of the pavement sections takes the power function form:

$$SN_{eff}/SN_0 = 0.992 (PQI_x/PQI_0)^{0.383} \quad \text{or}$$

$$SN_{eff}/SN_0 = 0.992 (PQI_x/100)^{0.383} \quad R^2=0.760 \quad 7$$

where:

S_{eff} = effective pavement structural number, **S₀** = original pavement structural number at age=0 and determined using the equation **S₀=a1D1+a2m2D2+a3m3D3**.

where **a1**=Asphalt layer coefficient, **a2**: layer coefficient for the base/cement treated base, **a3**= layer coefficient for subbase, **m2** and **m3**= drainage coefficient for the base subbase material, **PQI_x**= pavement quality index of the pavement section on scale from 0-100 at time x, **PQI₀**= pavement quality index at zero age and it is by default =100. The best data fit lines for the above models are shown in is shown in Figure 2.

As shown in this figure, the characteristics of the developed models indicate that the **coefficient of determination (R²)**, which quantifies the proportion of variability in the dataset explained by the statistical model, is approximately **0.76**. This **goodness-of-fit measure** suggests that the developed model demonstrates an acceptable level of predictive accuracy for its application in pavement management system modules. Additionally, this index is straightforward to compute and can serve as an **independent condition indicator** or be seamlessly integrated into the **Overall Pavement Quality Index (OPQI)**. The OPQI incorporates multiple pavement condition metrics, including the **International Roughness Index (IRI)** and the **International Friction Index (IFI)**, enhancing its overall assessment capabilities.

Application of the Developed Models

The implementation of the developed models in **Equations 6 and 7** is illustrated in **Figure 3**. The predicted **Structural Number (SN)**, based on distress data utilizing the **Pavement Quality Index (PQI) parameter**, closely aligns with the values obtained from actual distress measurements and the estimated layer coefficients assigned to various pavement layers. The majority of the predicted values fall along a trend line with an approximate **45-degree inclination**, indicating strong model predictability.

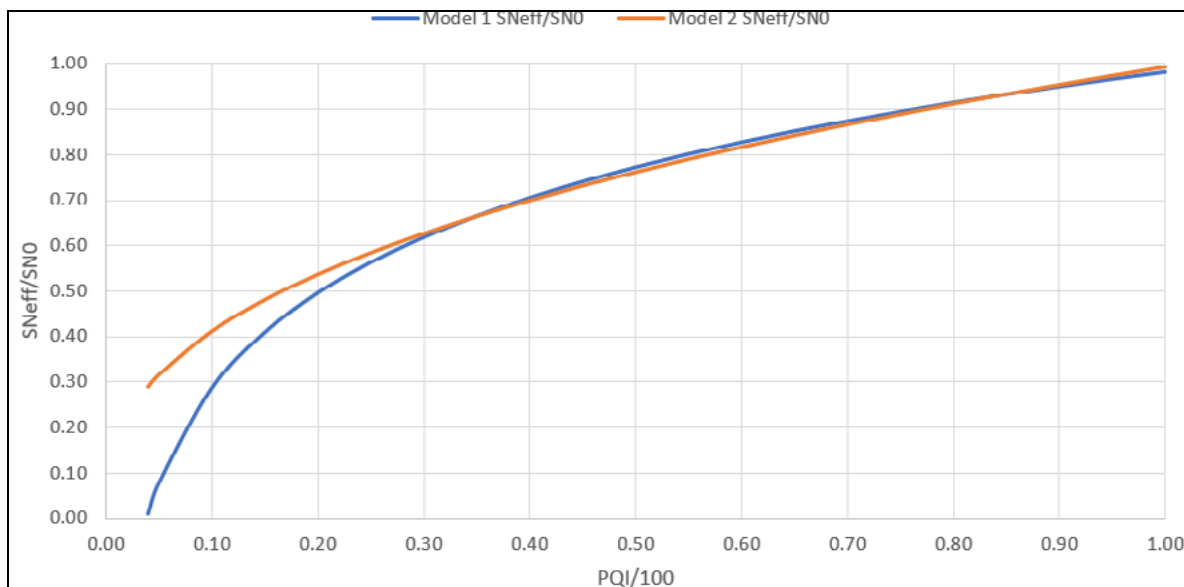


Figure 2: The relationship between the effective structural number and the pavement quality index

The developed model is particularly effective for estimating **structural capacity** in **low- to medium-trafficked roads**, such as **local and collector roads**, where the **design Structural Number** ranges from **1.6 to 3.5**. Upon calculating the **effective Structural Number (SNeff)** for each pavement section using this model, the **effective structural capacity**—expressed in terms of **Equivalent Single Axle Loads (ESALs)**—and the **Remaining Life (RL)** can be determined. This deterministic model offers a practical alternative for evaluating pavement structural capacity at the **network level** without requiring extensive **deflection testing**. Additionally, the model's accuracy and reliability can be **enhanced annually** by incorporating newly collected data obtained from **project-level investigations**, ensuring continuous refinement and applicability in pavement management systems.

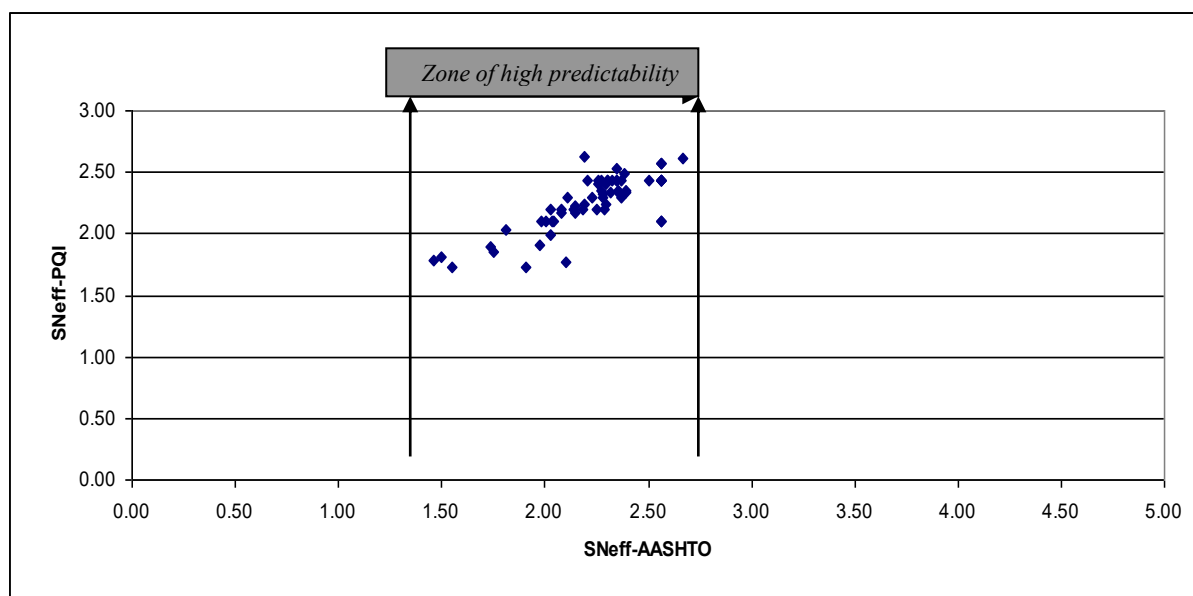


Figure 3: Predicted SNeff based on distress data against calculated SNeff using AASHTO method

Pavement treatment selection process

Based on the findings of this study, pavement sections with a Pavement Quality Index (PQI) ranging between **40 and 70**, which represents the optimal threshold for rehabilitation, require extensive intervention such as mill and inlay, Functional Overlay, Hot in place Asphalt recycling for wearing course or partial reconstruction if the proportion of cracking and patching falls within **10% to 17%** of the total pavement area.

On average, a pavement section is considered structurally failed if cracking and patching exceed **18-20 %** of the total section area and in this case, Full reconstruction treatment is required. From an economic standpoint, patching all cracked areas is impractical, as it leads to increased surface roughness; in such cases, major rehabilitation becomes necessary. Analysis of field data suggests that a pavement section approaching the failure threshold typically exhibits:

- **Approximately 7% high-severity fatigue cracking**
- **Around 5% medium-severity cracking**

Moreover, sections where **medium- and high-severity cracking collectively exceed 10% of total pavement area** are considered to be at the end of their service life. These deterioration limits were derived from representative field data and can be periodically calibrated based on feedback from field crews and comparative assessments between PMS-generated predictions and actual pavement conditions observed in selected control sections.

The structural capacity ratio, which is estimated based on the measured PQI value for the pavement, is used to establish trigger values for these structural parameters. Table 2 below shows the trigger values suggested for treatment selection process using structural data in terms of SN_{eff}/SN_0 and RSL.

Table 2: The trigger values suggested for treatment selection process using structural data

SN_{eff}/SN_0	PQI Range	Remaining Structural Life (years)	Treatment type
>0.95	>95	>19	Corrective Maintenance-Fog Seal
0.90-0.95	90-95	17-19	Corrective Maintenance-Crack seal
0.70-0.90	70-90	15-17	Routine Maintenance- Slurry seal, Chip Seal, or Microsurfacing
0.60-0.70	60-70	12-15	Rehabilitation- Functional Overlay, Hot in place Asphalt recycling for wearing course only
0.50-0.60	50-50	9-12	Rehabilitation- Mill and Overlay
0.40-0.50	40-50	7-9	Rehabilitation- Structural Overlay – More than 50mm thick
0.25-0.40	30-40	5-7	Partial Reconstruction- Cold in Place Recycling including the wearing course
0.10-0.25	5-25	3-5	Full depth Reconstruction

Figure 4 Shows different treatments that can be applied at different conditions to maintain the functional and structural capacities of the pavement before reaching the full reconstruction stage.

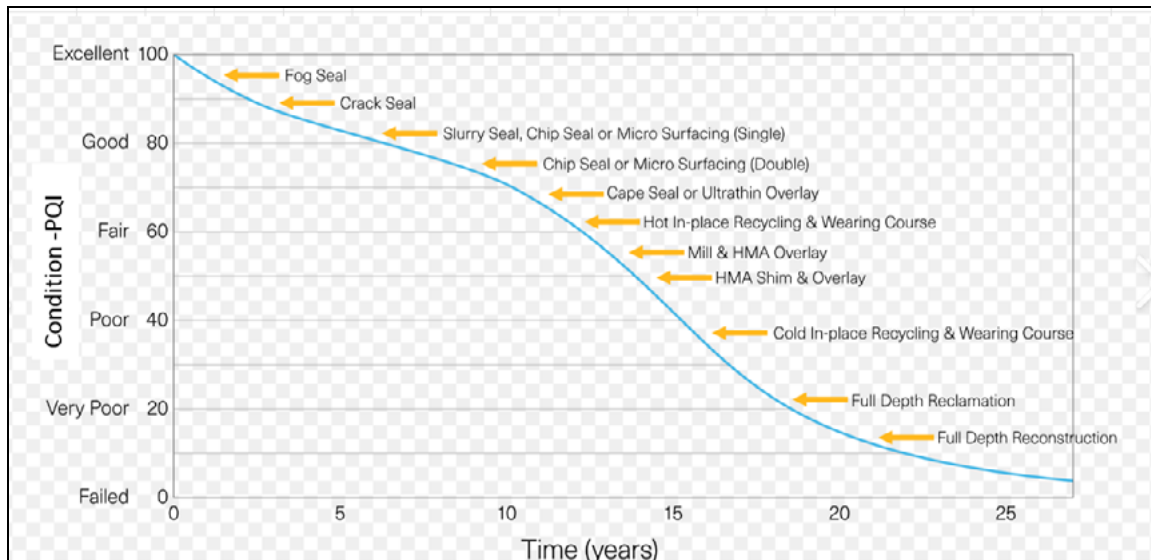


Figure 4: An Illustration shows treatment type selected based on pavement condition

CONCLUSIONS

The following conclusions can be drawn from this study:

1. **Pavement distress information** remains the primary indicator of pavement condition and serves as a reliable source for estimating the effective structural capacity of in-service pavements at the network level.
2. **Alligator cracking and rutting** are key distress types that can be utilized to assess the effective structural capacity and identify pavement failure modes.
3. **The Structural Number (SN) concept** continues to be a cost-effective and dependable method for quantifying the strength of existing pavement systems.
4. **Treatment selection** can be effectively achieved by calculating the remaining pavement life based on the Pavement Quality Index (PQI) and effective structural number.
5. **Developed predictive models** provide an effective and reliable approach for evaluating the structural capacity of minor roads. They offer an accessible and cost-efficient alternative for estimating pavement remaining life, outperforming traditional destructive and non-destructive assessment methods in terms of practicality and affordability.
6. **Integration into pavement management systems** allows the developed method to be leveraged for reporting pavement conditions, identifying maintenance needs, and determining rehabilitation requirements.
7. **Enhancing model predictability** can be achieved by incorporating additional pavement section data, particularly from highly trafficked roads, to refine accuracy and applicability.

References:

1. AASHTO (1993). *AASHTO guide for the design of pavement structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
2. Zhou, F., Hu, S., & Scullion, T. (2010). Advanced asphalt overlay thickness design and analysis system. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 79, 597–634.
3. Fwa, T. F., Sinha K.C and Reversion J., 1988. Highway routine maintenance programming at network level. *Journal of transportation Engineering*, ASCE, Vol.114, No.5.
4. Maji, A., Singh, D., & Chawla, H. (2016). Developing probabilistic approach for asphaltic overlay design by considering variability of input parameters. *Innovative Infrastructure Solutions*, 1(1), 43. doi:10.1007/s41062-016-0046-3.
5. Nobakht, M., Sakhaeifar, M. S., & Newcomb, D. (2016). Development of rehabilitation strategies based on structural capacity for composite and flexible pavements. *Journal of Transportation Engineering Part A: Systems*, 143(4), 04016016.
6. Le, V. P., Lee, H. J., Flores, J. M., Baek, J., & Park, H. M. (2017). Development of a simple asphalt concrete overlay design scheme based on mechanistic – Empirical approach. *Road Materials and Pavement Design*, 18(3), 630–645. doi:10.1080/14680629.2016.1182059.

7. Abaza, K. A. (2005). Performance-based models for flexible pavement structural overlay design. *Journal of Transportation Engineering*, 131(2), 149–159.
8. Shahin, MY & Schmidt, J (1998). Pavement condition analysis and development of initial M&R prioritization for local agencies', *International Conference on Managing Pavements*, 4th, 1998, Durban, South Africa, University of Pretoria, Department of Civil Engineering, Pretoria, pp.323-348.
9. Shahin MY (1994), *Pavement management for airports, roads, and parking lots*, Chapman and Hall, New York-USA.
10. Shiyab, A. M. S. H. (2007). *Optimum use of flexible pavement condition indicators in pavement management systems*. A PhD thesis, Curtin University of Technology- Perth, WA, Australia.
11. Hass, R., Hudson, W.R. and Zaniewski, J., (1993). Modern pavement management System. Krieger Publishing, Florida. USA.
12. Hass, R (1995), 'Principles and application of pavement management', *International Conference on Roads and Airfield Pavement Technology*, 2nd, 1995, vol. 1, Singapore, Center for Transportation Research, National University of Singapore, Singapore, pp.1-34.
13. Pologruto, M. (2001). Procedure for use of falling weight deflectometer to determine the AASHTO layer coefficients, *Transportation Research Record*, no.1764, Transportation Research Board, pp11-19.
14. Fwa, T. F., Sinha K.C and Reversion J., 1988. Highway routine maintenance programming at network level. *Journal of transportation Engineering*, ASCE, Vol.114, No.5 pp539-554.
15. Neil C. Krutz and Mary Stroup-Gardiner, 1993. Relationship between permanent deformation of asphalt concrete pavement and moisture sensitivity. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No.1259 TRB, National Research Council, Washington D.C., pp 181-187.
16. Hans Ertman Larsen and per ullidtz (1998). Development of improved mechanistic deterioration models for flexible pavement. In *Proceeding 4th International Conference on Managing Pavements*, 4, International Convention Center -ICC, Durban, South Africa, PP 583-596.
17. AASHTO (1993). *AASHTO guide for the design of pavement structures*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
18. Statistical Package for Social Science (SPSS), 2003, Version 11, SPSS Inc., Chicago, Illinois, USA.

Appendix A

The AASHTO 1993 design equation for estimating flexible pavement structural number based on existing layers thickness and condition are shown below.

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R \times S_o + 9.36 \times \log_{10}(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \times \log_{10}(M_R) - 8.07$$

Where:

Z_R = standard normal deviate W_{18} = predicted number of 80 KN(18,000 lb)ESALS

S_o = combined standard error of the traffic prediction and performance prediction

SN = Structural Number (an index that is indicative of the total pavement thickness required)

ΔPSI

= difference between the initial design serviceability index, p_o , and the design terminal serviceability index, p_t

M_R = Subgrade resilient modulus in psi. To convert to MPa, multiply by 145

The structural number, SN can be expressed in general terms as follows:

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3 + \dots$$

a_i = i^{th} layer coefficient Where:

D_i = i^{th} layer thickness in inches. To convert from mm to inches divide by 25.4

$m_i = i^{th}$ layer drainage coefficient

The application of this formula for example in the case of a 3 layer pavement would be

$$SN = a_1 D_1 + a_2 m_2 D_2 + a_3 m_3 D_3$$

Where:

a_1, a_2, a_3

= Layer coefficients representative of the Surface, Base, and Granular Subbase Course layer

m_2, m_3 = Drainage coefficient for the Base and Granular Subbase layers.

D_1, D_2, D_3 = Required thickness of Surface, Base and Granular Subbase layers

TRENDY VE SPRÁVĚ, ÚDRŽBĚ A OPRAVÁCH ASFALTOVÝCH VOZOVEK

TRENDS IN THE MANAGEMENT, MAINTENANCE AND REPAIR OF ASPHALT ROADS

Ing. Eva Hrušková, ŘSD s. p.
Ing. Lukáš Topinka, ŘSD s. p.

Tento článek se zabývá komplexním přístupem k údržbě a opravám asfaltových vozovek a současně představuje možnosti zavádění inovativních asfaltových směsí s cílem zvýšit jejich životnost, kvalitu a udržitelnost. Pozornost je věnována moderním technologiím, efektivnímu hospodaření s vozovkou a využití bilančních dat pro optimalizaci plánování oprav. Článek popisuje faktory ovlivňující životnost vozovek, možnosti jejího prodloužení a hodnotí různé údržbové technologie, včetně sanace výtluků v zimním období prostřednictvím variant studených balených směsí a jejich efektivity v různých provozních podmínkách. Současně je představen přehled inovativních asfaltových směsí, jako jsou RBL, SMA L, NTAS a regenerační postřiky. Jsou popsány principy jejich fungování, výhody a potenciální oblasti využití. Cílem článku je poskytnout ucelený přehled o současných trendech a technologiích v oblasti údržby a oprav asfaltových vozovek včetně jejich propojení s digitálním světem a podpořit zavádění inovativních materiálů a postupů v dopravním stavitelství. Tímto přístupem se usiluje o dlouhodobou udržitelnost, vyšší bezpečnost a kvalitu dopravní infrastruktury.

This article addresses a comprehensive approach to the maintenance and repair of asphalt pavements while simultaneously presenting opportunities for the introduction of innovative asphalt mixtures aimed at increasing their service life, quality, and sustainability. Attention is given to modern technologies, efficient pavement management, and the use of balance data to optimize repair planning. The article describes factors influencing pavement durability, possibilities for its extension, and evaluates various maintenance technologies, including pothole repairs during winter using different types of cold mix asphalt and their effectiveness under diverse operating conditions. In addition, an overview of innovative asphalt mixtures such as RBL, SMA L, NTAS, and rejuvenation sprays is presented. The principles of their performance, advantages, and potential areas of application are discussed. The aim of the article is to provide a comprehensive overview of current trends and technologies in the field of asphalt pavement maintenance and repair, including their integration with the digital environment, and to support the implementation of innovative materials and practices in road construction. This approach strives to achieve long-term sustainability, improved safety, and higher quality of transport infrastructure.

Úvod

Vzhledem k rozsahu a strategickému významu dálniční a silniční sítě, kterou má Ředitelství silnic a dálnic s. p. (ŘSD s. p.) ve své správě, je pro zajištění plynulého a bezpečného provozu nezbytné trvalé udržení jejich dobrého technického stavu prostřednictvím údržby a oprav. Tyto činnosti zahrnují jak běžnou a souvislou údržbu, tak opravy v různém rozsahu – od lokálních zásahů až po komplexní rekonstrukce silničního tělesa. Za účelem prodloužení životního cyklu vozovek, zvýšení efektivity údržby i oprav a s ohledem na zajištění trvalé udržitelnosti je využití inovativních technologií a materiálů nezbytné.

Pravidelný monitoring stavu proměnných parametrů vozovek umožňuje včas identifikovat poruchy, jako jsou trhliny, deformace nebo ztráta drsnosti, a přijímat adekvátní opatření.

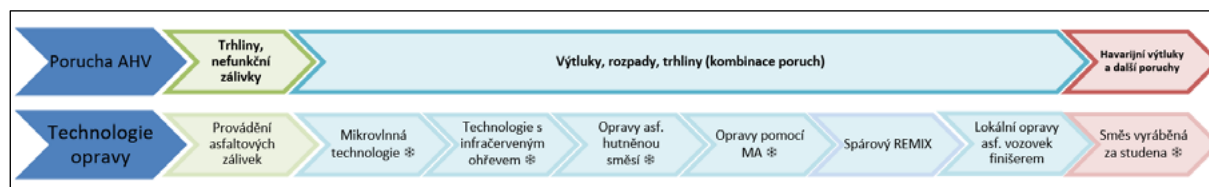
Cílem údržby je nejen prodloužení životnosti vozovek, ale i minimalizace nákladů spojených s jejich obnovou. Preventivní zásahy, jako jsou regenerační postřiky či po rozšíření prvních poruch sanace trhlin nebo pravidelná sanace výtluků a včasná aplikace celoplošné opravy vozovky v minimální hloubce dle stavu poškození, slouží k oddálení nutnosti rozsáhlejších rekonstrukcí. Opravy, ať už běžné, nebo havarijní, se provádějí v souladu s technickými standardy, metodickými pokyny a v návaznosti na plán údržby, oprav a investic, který ŘSD každoročně aktualizuje. Důraz je kladen na efektivní využití finančních prostředků, časovou koordinaci s ostatními stavebními činnostmi a minimalizaci dopravních omezení.

Níže se budeme zabývat základními principy, postupy a nástroji používanými při údržbě a opravách AB vozovek pod správou ŘSD s. p., včetně popisu jednotlivých technologií, procesů rozhodování a aktuálně

platných standardů. Současně poukážeme na význam systematického přístupu k péči o vozovky z hlediska udržitelnosti, hospodárnosti a bezpečnosti silniční infrastruktury včetně využívání moderních technologií a směsí.

Posloupnost údržbových technologií v rámci životního cyklu vozovky

V rámci plánování údržby a efektivity využití jednotlivých technologií se ŘSD zabývá vhodností použití a posloupností jednotlivých technologií v rámci životního cyklu vozovky včetně toho, zda je technologie vhodná pro letní nebo zimní období, nebo konkrétní typ vozovky.



Obrázek 1: Posloupnost údržbových technologií

Součástí nastavených pravidel pro údržbu vozovek je i zjednodušený graf životního cyklu vozovky, který zobrazuje vadu a technologii vhodnou pro opravu této vady (obrázek 1).

Níže jsou popsány některé technologie, jejich specifika a různé varianty používané na komunikacích ve správě ŘSD s. p.

Oprava vozovek mikrovlnnou technologií

Tato technologie spočívá v šetrném ohřátí povrchu vozovky mikrovlnným zářením. Asfaltové pojivo na hranici neporušené vozovky a výtluku tak změkne, ale nepoškodí se. Pak se do výtluku přidá nová předeřtá asfaltová směs odpovídající poškozené části silnice a následně se vše zhuťne. Výhodou této technologie je absence vzniku pracovní spáry, proto je velmi vhodná pro opravy vozovek na mostech nebo poruch vozovek v záruční době. Lze ji také použít v případě potřeby opravy ojedinělé poruchy. Tuto technologii je možné použít až do teplot -10°C .

Oprava výtluků pomocí MA

Technologie oprav asfaltových vozovek litým asfaltem MA (na dálnicích a silnicích I. tříd jsou obvykle používány dvě směsi: MA I 11 PMB a MA I 16 PMB) je vhodná jak pro opravy výtluků, tak pro plošné opravy.

Pokládka se doporučuje maximálně ve dvou vrstvách, přičemž je možné použít geomříž, která snižuje tahová napětí v asfaltovém krytu a tím zvyšuje odolnost proti znovu objevení poruchy. Jednovrstvé vysprávkování se obvykle provádějí v tloušťkách 35 mm, 40 mm nebo 45 mm. U dvouvrstvé vysprávkování může být například skladba 2×40 mm, vždy je nutné respektovat maximální normové tloušťky vrstev. Výhodou této technologie je její rychlost a trvanlivost. Za určitých podmínek ji lze použít také v zimním období.



Obrázek 2: Kotlík pro litý asfalt (MA)



Obrázek 3: Pokládka MA

Technologii je možné v zimním období (až do $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$) realizovat díky tzv. kotlíkům. Tyto ohřívací kotle musí být uzavřené, s pojistným ventilem, s nepřímým ohřevem (např. přes olejovou vanu) a termostatickou regulací a s nuceným mícháním. V ohřívacím kotli je rozpuštěno potřebné množství kusů litého asfaltu, kterým se provede oprava vad. Jeho zásobu je nutné zajistit v dostatečném předstihu před ukončením provozu obaloven (začátkem zimy). Tu lze v potřebném množství skladovat (např. nalitý na pískovém podloží) i bez nutnosti zastřešených prostor.

Asfaltové směsi pro použití za studena

Technologie se používá zejména pro dočasné opravy výtluků, havarijních poruch na vozovce. V rámci těchto oprav rozlišujeme tři kategorie typu směsi a jejich technologických vlastností:

- Asfaltová směs pro použití za studena, která může obsahovat emulgátory nebo rozpouštědla.
 - Tento typ směsi je určen zejména k neodkladnému odstranění závad ve sjízdnosti s předpokladem následné trvalé opravy. Použití se předpokládá v letní sezoně, min. uvažovaná teplota pro zajištění zpracovatelnosti bez nutnosti temperace či rozhřívání směsi je $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Velikost výtluhu by neměla být větší jak 1 m^2 .
- Modifikovaná asfaltová směs pro použití za studena bez rozpouštědel.
 - Tato směs díky svému složení umožňuje aplikaci i za nízkých teplot až do $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ bez nutnosti temperace nebo předehřívání, což ji činí ideální volbou pro zimní údržbu komunikací. Směs je určena k okamžitému odstranění závad ve sjízdnosti s předpokladem následné trvalé opravy. V letních měsících nachází uplatnění i na velmi zatížených úsecích, jako jsou jízdní stopy s vysokou intenzitou nákladní dopravy nebo úseky s pomalým či stojícím provozem. Aplikovat ji obvykle lze na výtluhy až do velikosti 3 m^2 .
- Reaktivní asfaltová směs pro použití za studena s polymery na bázi vody.
 - Reaktivní asfaltová směs s polymery na bázi vody (bez obsahu rozpouštědel) představuje moderní technologii určenou k rychlému a trvalému odstranění lokálních závad ve sjízdnosti vozovek. Tento typ směsi je určen zejména k neodkladnému odstranění ojedinělých poruch nebo závad ve sjízdnosti s předpokladem provedení vysprávký jako trvalé, vždy ale s nutností ošetření podkladu a pracovní spáry. Použití se předpokládá v průběhu celého roku, ale vždy s ohledem na klimatické podmínky (použití při teplotách těsně nad $0\text{ }^{\circ}\text{C}$), s velikostí výtluhu prakticky bez omezení.

Zapojení digitalizace do procesu údržby a oprav vozovek

S postupujícím rozvojem digitálních systémů ŘSD využívá několik nástrojů pro zvýšení efektivity údržby a oprav. Pro sběr poruch na pozemních komunikacích, prohlídky, evidenci záruk je využíván systém CEV – Centrální Evidence Vad. Pro vizualizaci stavu sítě, plánování oprav vozovek a mostů pak systém SHV – Systém hospodaření s vozovkou. Mezi největší výzvy digitalizace této části činnosti ŘSD patří komplexita a správnost dat. Informace o stavu a údržbě pozemních komunikací jsou tvořeny množstvím

různorodých dat z různých zdrojů. ŘSD měří a vyhodnocuje proměnné parametry vozovek pravidelně v cyklu 1–2 roky tak, aby mělo přehled o stavu sítě včetně možnosti optimalizace výpočetního jádra a optimalizace předpokládané degradační křivky v závislosti na stáří vozovek a poslední použité technologii opravy prostřednictvím bilanční aplikace.

Identifikace a řešení potenciálních problémů je mnohem efektivnější než následné řešení poruch. Prediktivní údržba vyžaduje sběr a analýzu kvalitních dat.

Centrální evidence vad

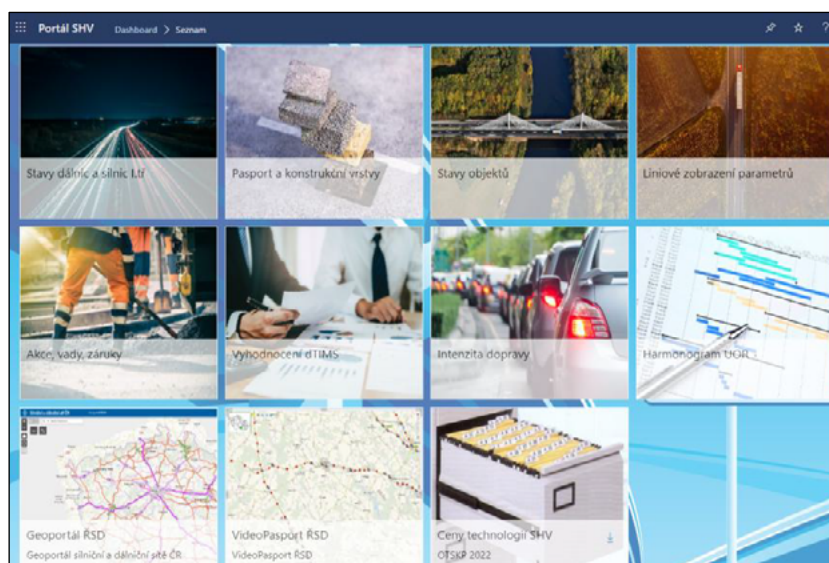
Prostřednictvím centrální evidence vad je zajištěna primárně jednotná evidence prohlídek vykonaných na pozemních komunikacích (modul Vady, modul Hlavní prohlídka, modul Mosty) a vad zjištěných při jejich provádění (modul Vady, modul Mosty). Dále je zajištěna jednotná evidence staveb a stavebních objektů na pozemních komunikacích (modul Záruky) a v souvislosti s tím jednotná evidence předmětů a rozsahu záruk a záručních dob (modul Záruky).

Systém hospodaření s vozovkou

SHV je informační a expertní systém, který poskytuje aktuální a objektivní přehled o stavu silniční sítě a vybraných stavebních objektů, jako jsou vozovky, mosty, propustky či zdi.

Slouží k optimalizaci a zefektivnění plánování souvislé údržby a oprav, přičemž jeho hlavním přínosem je průkazné a hospodárné využívání finančních prostředků na opravy majetku. Díky rozsáhlému množství dat a jejich analýze umožňuje standardizovat a kontrolovat rozhodovací procesy. Systém navíc pracuje s predikcí vývoje stavu komunikací v daném časovém horizontu a při ekonomických kalkulacích zohledňuje dostupný objem finančních prostředků.

ŘSD s. p. spravuje celkem 9 588,59 km vozovek. Z toho 8 401,74 km vozovek je s asfaltovým povrchem – na dálnicích 2 097,59 km a na silnicích I. třídy 6 304,15 km. Průměrné GPI všech komunikací je 2,09.



Obrázek 4: Portál SHV

Síťová úroveň SHV je zaměřena na dlouhodobé plánování. Poskytuje přehled o aktuálním stavu jednotlivých silnic a dálnic ve správě ŘSD s. p., včetně všech měřených a vyhodnocených parametrů i záznamů o poruchách. Umožňuje sledovat historický vývoj a predikovat stav komunikací i jejich parametrů v horizontu až 12 let, což je klíčové pro strategické plánování oprav vozovek a mostů. Dále zobrazuje konstrukční skladbu jednotlivých komunikací a odhaduje finanční náklady na opravy v budoucích letech s ohledem na aktuální stav, stáří, poslední zásahy a očekávanou degradaci. Součástí je i plánování budoucích oprav, které může probíhat na základě automaticky generovaných návrhů.

Projektová úroveň SHV slouží k evidenci základních údajů o jednotlivých akcích navržených na síťové úrovni, zejména k zaznamenávání plánovaných a realizovaných technologií.

Tabulka 1: Technologie oprav AB vozovek v SHV

Povrch	Podrobná technologie – popis
AB	Regenerační postřik
	Obnova protismykových vlastností AB vozovky
	Mikrokoberec dvouvrstvý na AB vozovce
	Výměna obrusné vrstvy – SMA
	Výměna krytu – SMA + ACL
	Výměna AHV - I. tř. (3 vrstvy)
	Výměna AHV – Dálnice (4 vrstvy)
	Výměna AHV vč. podkladní vrstvy SROSM
	Výměna AHV vč. podkladní vrstvy SC
	Výměna AHV vč. podkladní vrstvy MZK
	Výměna vozovky – na pláš
	Výměna vozovky vč. AZ

Bilanční analýza se zabývá těmito oblastmi:

- technologie opravy – ověření vhodnosti a efektivity navržených technologických postupů,
- cena opravy – porovnání kalkulovaných a skutečně dosažených nákladů,
- degradační model – zpřesnění modelu degradace konstrukcí na základě reálně naměřených dat.

Na základě vlastních zkušeností či v kombinaci s návrhem systému SHV správce naplánuje opravu vozovky s technologií dle diagnostického průzkumu vhodnou pro daný úsek, čímž se dostáváme k optimalizaci a možnostem využití škály asfaltových směsí, přičemž některé z nich se prozatím realizují jako pilotní projekty s vidinou jejich porovnání se standardně zavedenými směsmi a následným vyhodnocením.

Zavádění nových asfaltových směsí

Zavádění inovativních asfaltových směsí představuje zásadní krok v modernizaci silniční infrastruktury, který reaguje na rostoucí požadavky na kvalitu, trvanlivost a udržitelnost dopravních staveb. Nové směsi jsou výsledkem výzkumu a vývoje zaměřeného na zlepšení mechanických vlastností vozovek, prodloužení jejich životnosti a zároveň na minimalizaci negativních dopadů na životní prostředí. V souladu s cíli Green Deal a evropskými klimatickými strategiemi se klade důraz na snižování emisí skleníkových plynů, energetické náročnosti výroby a spotřeby primárních surovin. Inovativní směsi tak často využívají recyklované materiály, umožňují pokládku při nižších teplotách.

Vysoce výkonové asfaltové směsi umožňují zvýšení trvanlivosti vozovky při snížení celkové tloušťky AHV nebo zesílení vozovky bez nutnosti navýšení nivelety vozovky. Jsou definovány normou ČSN 73 6120.

ACP RBL (asfaltový beton pro podkladní vrstvy se zvýšeným obsahem pojiva, rich bottom layers)

Směsi typu ACP RBL představují specifickou variantu asfaltového betonu určeného pro podkladní vrstvy vozovek. Jejich charakteristickým znakem je zvýšený obsah asfaltového pojiva, který je zpravidla o minimálně 0,5 % vyšší než u běžných směsí. Díky tomuto konstrukčnímu řešení vykazují směsi ACP RBL podstatně lepší odolnost vůči únavě materiálu, čímž přispívají k významnému prodloužení životnosti celé konstrukce vozovky. [1]

Základní funkcí ACP RBL je efektivní přenos a rozložení napětí vyvolaného dopravním zatížením a současně omezení vzniku únavových trhlin na spodní hranici podkladní vrstvy. Právě tyto trhliny patří mezi nejčastější iniciační mechanismy degradace konstrukce a jejich vznik zpravidla vede k urychlené poruše celého vozovkového systému. Použití ACP RBL je proto obzvláště vhodné na komunikacích s vysokou intenzitou dopravy či s pomalu se pohybujícími dopravními proudy, kde jsou vozovky dlouhodobě vystaveny významnému namáhání. [3]

Směsi ACP RBL se doporučují zejména pro vozovky s dopravním zatížením třídy S, I a II, a to především na nestmelených podkladních vrstvách. V méně zatížených úsecích je jejich použití možné pouze na základě technického posouzení [1].

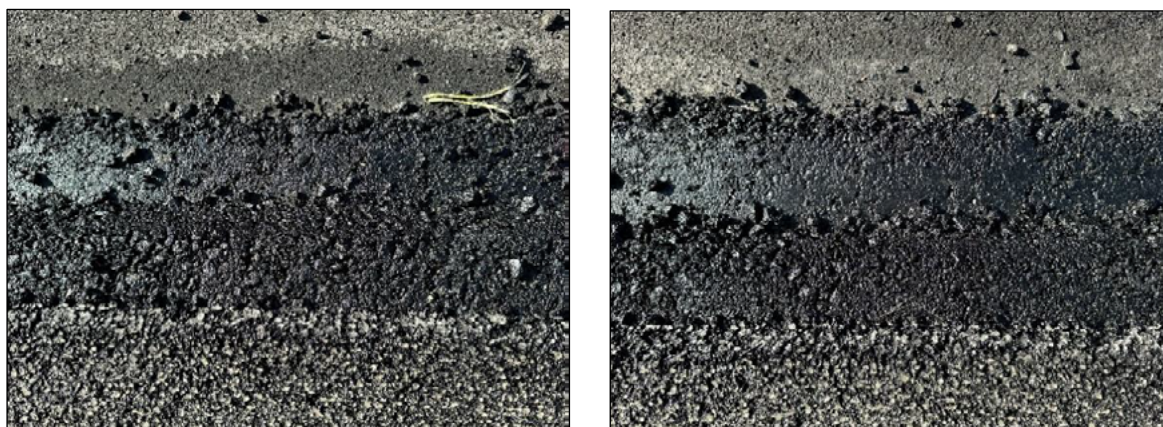
Díky vyššímu obsahu pojiva mají směsi ACP RBL lepší reologické vlastnosti, což přispívá k vyšší pružnosti a odolnosti vůči trvalým deformacím. Výsledkem je nižší riziko poruch a nižší náklady na údržbu během životního cyklu vozovky. ŘSD na základě návrhu projektanta používá tuto směs na vybraných stavbách a v rámci několika oprav realizovalo kombinaci kdy na části vozovky byla použita standardní směs ACP a na druhé části ACP RBL za účelem sledování vývoje obou úseků v rámci životního cyklu vozovky.

SMA L (asfaltový koberec mastixový pro ložní vrstvy – zrno až 22 mm)

SMA L je speciální typ asfaltové směsi určený pro ložní vrstvy vozovek, který využívá mastixovou strukturu s vysokým podílem hrubého kameniva (až 80 %), minerálního prachu (filleru), asfaltového pojiva a stabilizačních vláken [4]. Tato směs je navržena tak, aby poskytovala vysokou odolnost vůči trvalým deformacím, zejména ve formě vyjetých kolejí, které jsou častým problémem u silnic s vysokým dopravním zatížením.

Díky své kompaktní a stabilní struktuře SMA L výrazně zvyšuje odolnost vrstvy proti vzniku a šíření trhlin, čímž přispívá k prodloužení životnosti celé konstrukce vozovky. Tato směs rovněž umožňuje snížení tloušťky obrusné vrstvy bez ztráty funkčnosti, nebo naopak zvýšení provozní výkonnosti vozovky při zachování stejné tloušťky [4].

SMA L je vhodné použít pro všechny třídy dopravního zatížení, ale nejčastěji se používá na silnicích s intenzivní dopravou, kde je kladen důraz na dlouhodobou výkonnost a minimální údržbu.



**Obrázek 5: Směs SMA 22L a ACL 22S na stavbě D11 – oprava AB vozovky
v km 25,4000 – 21,640 L**

NTAS

Nízkoteplotní asfaltové směsi (NTAS) představují technologii, která umožňuje výrobu a pokládku asfaltových směsí při teplotách nižších o 20–50 °C oproti běžným horkým směsím. Tato technologie přináší řadu výhod – zejména snížení spotřeby energie, nižší emise CO₂ a výparů škodlivin a lepší pracovní podmínky pro obsluhu. NTAS rovněž přispívají k menšímu stárnutí pojiva a snazší zhutnitelnosti směsi. Přestože v zahraničí, například ve Francii nebo USA, jejich využití roste, v České republice je jejich rozšíření zatím omezené kvůli chybějící poptávce, absenci bonifikace a požadavkům na certifikaci přísad. Přesto se očekává, že tlak na ekologičtější výstavbu povede k širšímu uplatnění této technologie i u nás [2].

Mezi hlavní metody výroby patří přidávání organických přísad (např. vosky) a chemických přísad, které usnadňují zpracování směsi. Tyto přísady buď snižují viskozitu asfaltu, nebo zlepšují jeho přilnavost ke kamenivu, čímž umožňují efektivní obalení kameniva i při nižších teplotách. Výsledkem je směs, která se snadněji hutní, má nižší energetickou náročnost a zároveň přispívá ke snížení emisí a zlepšení pracovního prostředí [2].

Na několika úsecích silnic I. třídy po celé České republice byly při plánovaných opravách nízkoteplotní asfaltové směsi již použity. Tyto směsi, určené pro celoplošnou pokládku všech asfaltových vrstev, byly aplikovány v souladu s normou ČSN 73 6120, příloha I. Cílem je nejen zvýšení kvality opravovaných vozovek, ale také snížení energetické náročnosti a emisní zátěže při výrobě a pokládce asfaltu.

Přehled realizovaných oprav

I/27 Přeštice, x Dukelská (Správa Plzeň)

Tabulka 2: Navrhovaná technologie opravy

TECHNOLOGIE OPRAVY VOZOVKY;			
OBRUSNÁ VRSTVA Z ASF. KOBERCE MASTIXOVÉHO MODIFIKOVANÉHO	SMA 11S PMB 25/55-65-NT	TL. 40mm	ČSN 73 6121
SPOJOVACÍ POSTŘÍK MODIFIKOVANOU EMULZÍ	PS-CP		ČSN 73 6129
V MNOŽSTVÍ ZBYTKOVÉHO ASFALTU 0,35 kg/m ²			
ASFALTOVÁ LOŽNÍ VRSTVA	ACL 16S PMB 25/55-60-NT	TL. 70mm	ČSN 73 6121
SPOJOVACÍ POSTŘÍK MODIFIKOVANOU EMULZÍ	PS-CP		ČSN 736129
V MNOŽSTVÍ ZBYTKOVÉHO ASFALTU 0,35 kg/m ²			
ASFALTOVÁ PODKLADNÍ VRSTVA	VMT 22 PMB 25/55-60	TL. 90mm	ČSN 73 6121
OPRAVA ZBÝVAJÍCÍCH TRHLIN A SPÁR PODLE TP 115			
OČIŠTĚNÍ POVRCHU, VÝBĚR MÍST K PŘÍPADNÝM LOKÁLNÍM OPRAVÁM			
FRÉZOVÁNÍ STÁVAJÍCÍCH ASF. VRSTEV V PRŮMĚRNÉ TL. 190 mm			
TL. CELKEM		TL.200mm	

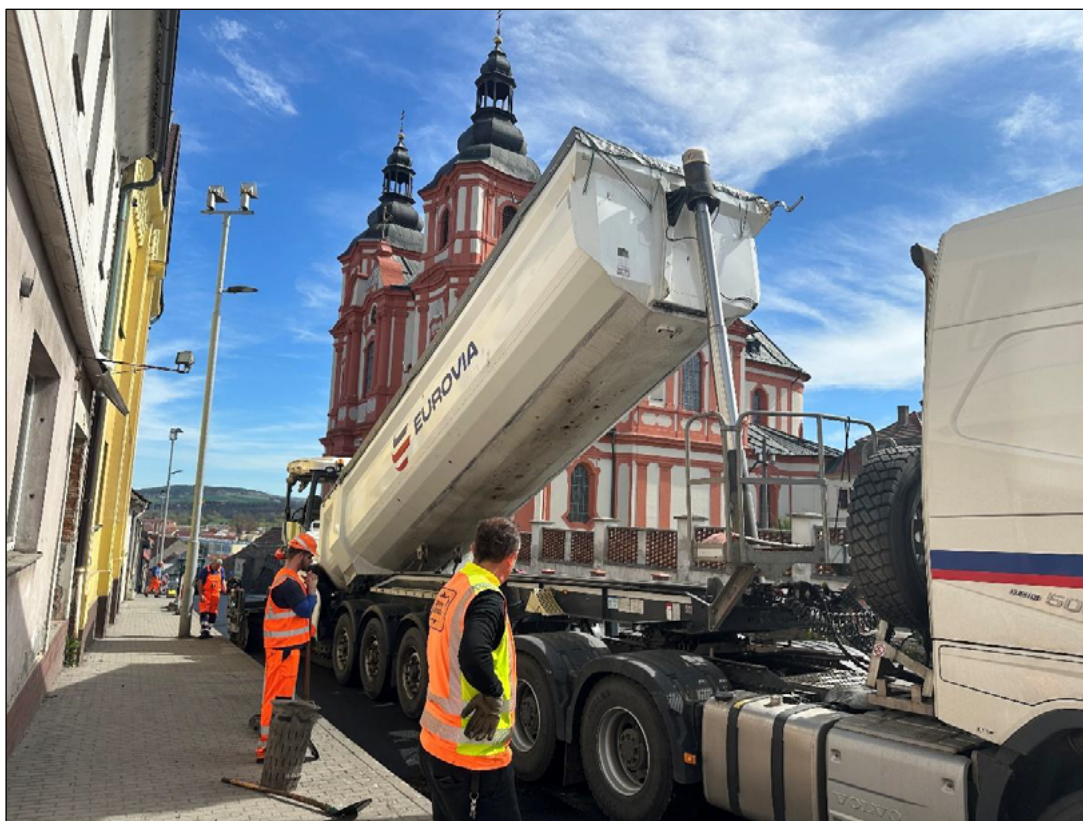
Směs byla navržena a připravena kompletně na obalovně zhotovitele, nedocházelo tedy k dodatečnému přidávání a dávkování přísad. První etapy pokládky byly realizovány s teplotou směsi odpovídající spíše běžnému SMA, následně teploty již odpovídaly rozmezí pro NTAS. Energetická úspora přípravy směsi na obalovně bude v blízké době vyhodnocována.

I/10 Kořenov, most 10-076 (Správa Liberec)

Tabulka 3: Navrhovaná technologie opravy

KONSTRUKCE VOZOVKY			
ASF. BETON PRO OBRUSNÉ VRSTVY	ACO 11+ NT, PmB 45/80-65	40 mm	ČSN 73 6121, ČSN EN 13108-1
POSTŘÍK SPOJOVACÍ, EMULZNÍ MOD.	PS-CP	0.30 kg/m ²	ČSN 73 6129, ČSN EN 13808
ASF. BETON PRO LOŽNÍ VRSTVY, MOD.	ACL 22S NT, PmB 25/55-60	70 mm	ČSN 73 6121, ČSN EN 13108-1
POSTŘÍK SPOJOVACÍ, EMULZNÍ MOD.	PS-CP	0.60 kg/m ²	ČSN 73 6129, ČSN EN 13808
KONSTRUKCE VOZOVKY CELKEM		110 mm	

Směs NTAS byla připravována prostřednictvím tekuté přísady přímo na obalovně. Z důvodu malého objemu zásobníku tekuté přísady nebylo dodrženo dávkované množství.



Obrázek 6: Pokládka SMA 11S NT v intravilánu na stavbě I/27 Přeštice x Dukelská

Na základě zkušeností z uvedených realizací lze konstatovat, že oproti uvedeným výhodám této technologie je také třeba zohlednit její možná rizika, a to zejména v případě technologické nekázně zhotovitele. Mezi ta, patří zejména dodržení teploty směsi při výrobě i pokládce, zajištění a dodržení požadovaného dávkování v případě doplňování přísad na obalovně a zajištění dostatečné tepelné izolace směsi při dopravě.

Prodloužení životnosti vozovky

Regenerační a konzervační postřiky

Asfaltové směsi použité na povrchu vozovek podléhají v průběhu času přirozenému stárnutí, které je způsobeno především klimatickými vlivy. Tento proces vede ke vzniku poruch a závad, jež se nejčastěji objevují na povrchu obrusné vrstvy. Společně s mechanickým opotřebením vlivem dopravy se jedná o hlavní faktory, které zkracují životnost asfaltových krytů.

Účinným řešením, jak těmto problémům předcházet, je včasná regenerace stávajícího asfaltového pojiva nebo aplikace konzervačních postřiků.

Regenerační postřik

Regenerační postřik slouží jako preventivní opatření, jehož cílem je zpomalit vznik plošných poruch způsobených stárnutím asfaltového pojiva. Tento proces je přirozeným důsledkem dlouhodobého působení klimatických vlivů – zejména oxidace vzdušným kyslíkem a expozice slunečnímu záření – a dále také intenzivního dopravního zatížení, které vede k mechanickému opotřebení. Kombinace těchto faktorů postupně snižuje účinnost asfaltového pojiva a vede ke vzniku poruch na povrchu obrusné vrstvy.

Aplikace vhodného regeneračního postřiku zlepšuje přilnavost asfaltového pojiva ke kamenivu, omezuje jeho křehkost a tím posiluje odolnost vozovky, zejména proti účinkům nízkých teplot. Nanesením postřiku v tenké vrstvě dochází k obnovení elasticity a ke zvětšení účinné tloušťky původního pojiva.

Na rozdíl od konzervačních postřiků regenerační postřik nevytváří uzavřenou vrstvu, která by bránila pronikání vody do konstrukce vozovky. Současně nijak negativně neovlivňuje protismykové vlastnosti povrchu, což je klíčové z hlediska bezpečnosti silničního provozu.

Konzervační postřik

Konzervační postřik představuje preventivní technologii, jejímž cílem je zpomalit stárnutí asfaltového pojiva v obrusné vrstvě vozovky. Tento proces je vyvolán zejména oxidačními reakcemi, které postupně mění strukturu pojiva a zhoršují jeho vlastnosti.

Aplikací konzervačního prostředku vzniká na povrchu vozovky tenká uzavírací vrstva. Ta vyplňuje mikrotrhliny, doplňuje úbytek asfaltového pojiva způsobený provozním zatížením a zároveň omezuje pronikání povrchové vody do konstrukce. Díky tomu se významně zpomaluje proces stárnutí a zvyšuje odolnost obrusné vrstvy vůči klimatickým i provozním vlivům.

Konzervační postřik nijak nemění vlastnosti původního asfaltového pojiva a neovlivňuje protismykové parametry povrchu. Naopak může přispět k mírnému snížení hluchosti vozovky, což má pozitivní dopad na komfort provozu.

Na komunikacích ve správě ŘSD s. p. je aplikace regeneračních postřiků prováděna, aplikovány jsou postřiky s rychleštěpnou kationaktivní asfaltovou emulzí nebo kationaktivní asfaltovou emulzí vyrobenou z deasfaltovaného vakuového zbytku. Požadavky na jejich aplikaci a kvalitativní požadavky materiál včetně zkušebnictví upravuje metodika M3 s. p. Metodika také stanovuje, kdy je vhodné použít regenerační a kdy konzervační postřik. Konzervační postřiky se na komunikacích ŘSD s. p. zatím plošně neprovádějí.

Tabulka 4: Orientační popis poruch pro realizaci preventivní údržby

Povrch obrusné vrstvy	Regenerační postřik	Konzervační postřik
Výtluky	<i>ne</i>	<i>ne</i>
Otevřené spáry	<i>ne</i>	<i>nutná sanace před prováděním</i>
Příčné nebo podélné trhliny	<i>ne</i>	<i>nutná sanace před prováděním</i>
Ztráta asfaltového tmelu	<i>mírná lokální ztráta</i>	<i>výraznější ztráta ve větší ploše</i>
Výraznější projevy stárnutí asfaltového pojiva	<i>ne</i>	<i>ano</i>
Ztráta (vylupování) zrn kameniva	<i>místně, nepravidelně</i>	<i>ano</i>
Mikrotrhliny	<i>ano</i>	<i>ano</i>
Výrazné trvalé deformace	<i>ne</i>	<i>ne</i>



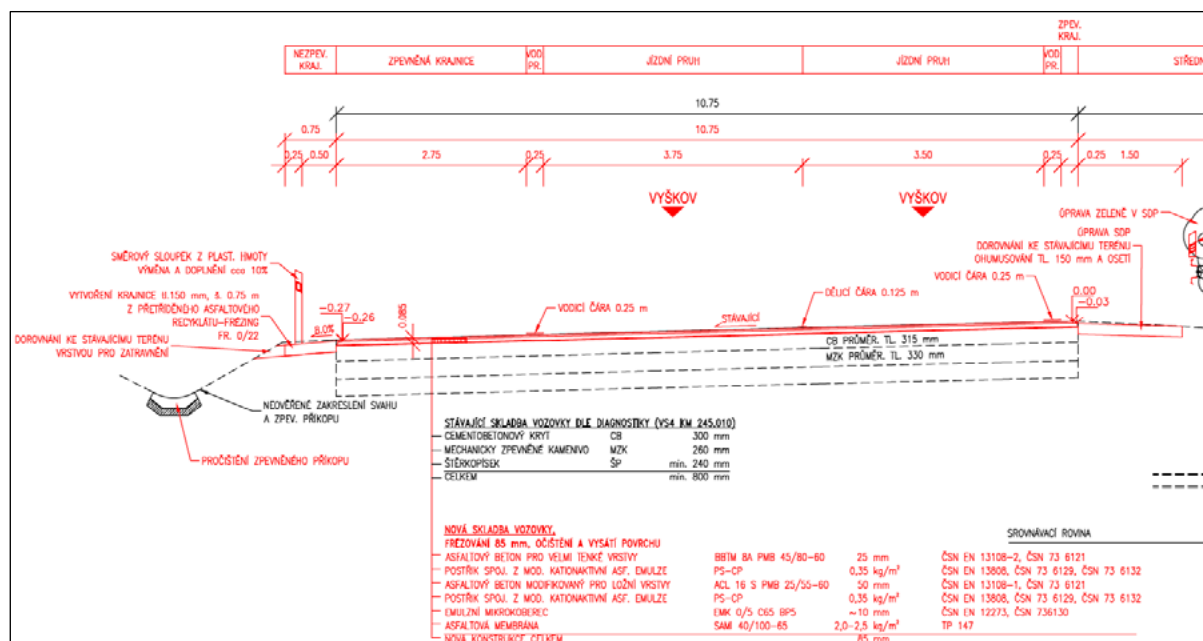
Obrázek 7: Aplikace regeneračního postřiku

Blacktopping

Tato technologie opravy spočívá v pokládce jedné nebo více nových asfaltových vrstev na stávající CB vozovku. Blacktopping zamezuje pronikání vody do stávající CB vozovky, prodlužuje její životnost za relativně nízkých finančních nákladů v porovnání s pokládkou nové CB vozovky. Technologie se používá v místech, kde je únosnost stávající vozovky vyhovující a na CB vozovce jsou převážně povrchové poruchy.

D1 oprava CB vozovky v km 241,5-246 L+P

V letošním roce (2025) proběhla oprava dálnice D1 za použití této technologie v km 240,2 -245,6 L+P, kde vozovka vykazovala již značné poruchy, typu trhliny, výtluky na spárách. Z tohoto důvodu byla zvolena technologie Blacktopping s pokládkou více vrstev a asfaltovou membránou SAMI. Očekává se prodloužení životnosti vozovky min. o 10 let.



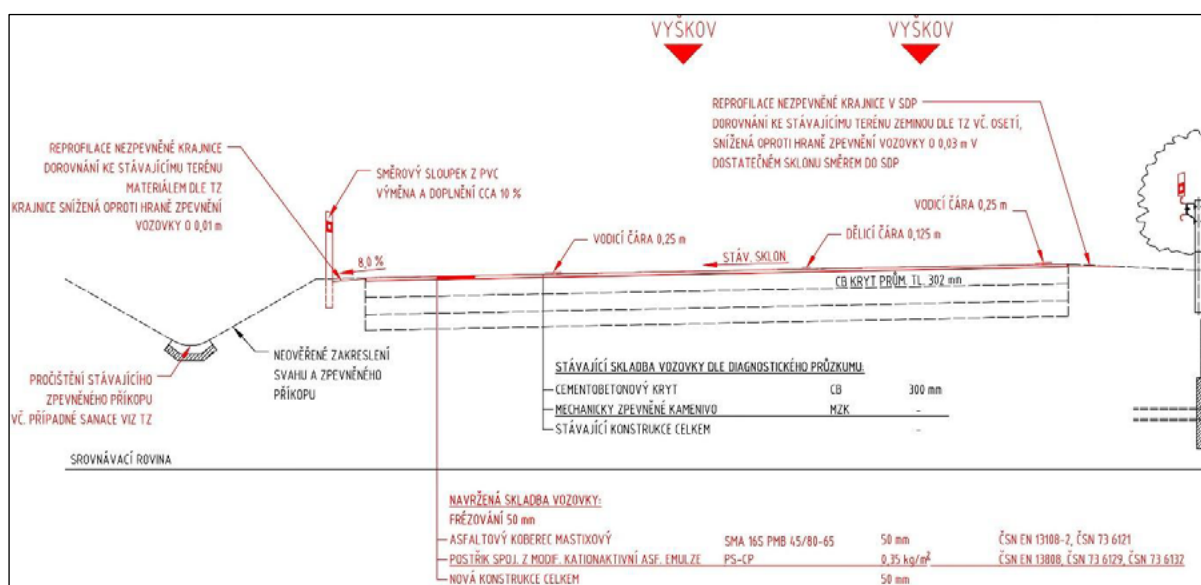
Obrázek 8: VPR znázorňující vyfrézování 85 mm stávající CB desky a nahrazení novým asfaltovým souvrstvím

Realizovaná technologie opravy spočívala v odfrézování stávající konstrukce vozovky v tloušťce 85 mm. Na očištěný a připravený povrch byla následně aplikována asfaltová membrána typu SAMI a poté provedeno položení emulzního mikrokoberce (EMK), který zajišťuje utěsnění povrchu a zlepšení soudržnosti vrstev. Na tyto podkladní vrstvy byla následně provedena pokládka ložní asfaltové vrstvy ACL 16 S o tloušťce 50 mm, která byla zakončena aplikací obrusné vrstvy BBTM 8A o tloušťce 25 mm. Součástí opravy byla i sanace poruch vozovky, která se prováděla v závislosti na jejich rozsahu a charakteru několika způsoby:

- Jednoduché a ojedinělé trhliny byly sanovány metodou frézování drážky s následným zalitím asfaltovou záplavkou za horka, čímž byla zajištěna jejich vodotěsnost a zabráněno dalšímu šíření.
- Lokální drobné poruchy byly opravovány pomocí plastbetonu, zatímco rozsáhlejší lokální defekty byly sanovány litým asfaltem, který zajišťuje vysokou odolnost vůči zatížení i povětrnostním vlivům.
- V případech, kdy byla na jedné desce identifikována větší koncentrace poruch (např. rozsáhlejší trhliny, výtluky či celkový rozpad povrchu), byla provedena výměna celé desky, případně její části



Obrázek 9: EMK a SAMI vrstva před pokládkou ACL



Obrázek 10: VPR znázorňující vyfrézování 50 mm stávající CB desky a nahrazení asfaltovým kobercem mastixovým SMA 16S ve stejné mocnosti (zachování nivelety)

Mikrokoberec

Emulzní mikrokoberec je tenkovrstvá asfaltová úprava vozovek, která se aplikuje za studena a slouží k ochraně a obnově povrchových vrstev komunikací. Tato technologie je efektivní metodou pro prodloužení životnosti silnic, zlepšení jejich protiskluzových vlastností a vyplnění mikrotrhlin, čímž přispívá k celkové kvalitě a bezpečnosti dopravy.

Závěr

Údržba a opravy asfaltobetonových vozovek představují nezastupitelnou součást péče o silniční a dálniční síť, která je z hlediska bezpečnosti dopravy, plynulosti provozu i hospodárného využívání veřejných prostředků strategicky významná. Zkušenosti z praxe jednoznačně ukazují, že preventivní a včasné zásahy, prováděné v souladu s aktuálním technickým stavem a životním cyklem vozovky, mají zásadní vliv na prodloužení její životnosti a zároveň na snížení nákladů spojených s následnými rozsáhlými rekonstrukcemi.

Významným nástrojem v této oblasti je Systém hospodaření s vozovkou (SHV), který integruje data z různých zdrojů, využívá prediktivní modely vývoje stavu vozovek a mostních objektů, umožňuje vytvářet strategie oprav podložené principy životního cyklu. Díky tomu je možné plánovat opravy s ohledem na technickou efektivitu, ekonomickou optimalizaci i dlouhodobou udržitelnost.

Neméně důležitá je i správná volba a časová posloupnost použitých technologií. Postupné využívání sanací trhlin, mikrokoberců či výměny obrusných vrstev v počátečních fázích degradace a jejich následné nahrazování zásahy vyšší intenzity v pozdějších fázích životního cyklu, představuje osvědčený způsob, jak efektivně oddálit nutnost kompletní výměny konstrukce vozovky. Technologické postupy, jako je použití litých asfaltů v zimním období, směsí vyráběných za studena, mikrovlnné technologie či infračerveného ohřevu dále rozšiřují možnosti kvalitních a operativních oprav i v náročných klimatických podmínkách.

Inovativní asfaltové směsi představují významný posun v oblasti výstavby, správy a údržby vozovek. Zavádění směsí typu ACP RBL, SMA L či NTAS ukazuje, že moderní technologie dokážou efektivně reagovat na rostoucí nároky na kvalitu, životnost a udržitelnost silniční infrastruktury. Tyto směsi přinášejí nejen zlepšení mechanických a reologických vlastností konstrukcí, ale také přispívají ke snižování energetické náročnosti a emisní zátěže, což je v souladu s evropskými klimatickými cíli.

Praktické zkušenosti z realizací v České republice potvrzují jejich technické i provozní přínosy a naznačují, že širší uplatnění lze očekávat především na komunikacích s vysokou intenzitou dopravy. Další rozvoj a standardizace těchto technologií bude záviset na ekonomických podmínkách, legislativní podpoře a také na postupné změně přístupu investorů i zhotovitelů. V konečném důsledku se tak inovativní asfaltové směsi mohou stát jedním z klíčových nástrojů pro zajištění dlouhodobě udržitelné dopravní infrastruktury.

Celkově lze konstatovat, že systematický, datově podložený a metodicky standardizovaný přístup k údržbě a opravám AB vozovek spolu se zaváděním nových materiálů a technologií včetně aplikace způsobů pro prodloužení životnosti vozovek je nezbytným předpokladem pro efektivní správu dopravní infrastruktury. Přináší nejen vyšší úroveň hospodárnosti a transparentnosti, ale také zajišťuje prodloužení životnosti komunikací, snížení dlouhodobých nákladů na jejich obnovu a zejména udržení vysoké úrovně bezpečnosti a spolehlivosti silniční dopravy na dálniční a silniční síti ve správě ŘSD s. p.

Zdroje:

- [1] Bureš, P., Fiedler, J. Asfaltový beton se zvýšeným obsahem pojiva pro podkladní vrstvy (ACP RBL). Online. In: Sdružení pro výstavbu silnic. [cit. 2025-06-12].
- [2] Koudelka, T., Dašek, T. (2024) Nízkoteplotní asfaltové směsi, Silnice Mosty 2024, č. 1, str. 14–20.
- [3] Simkovič, L. Využití asfaltových směsí typu rbl. diplomová práce. Brno: VUT v Brně, 2018.
- [4] Pfeiferová, M. Nové směry v oblasti asfaltových koberců mastixových. Diplomová práce. Brno: VUT v Brně, 2012.

ZHODNOCENÍ POZNATKŮ Z DLOUHODOBÉHO SLEDOVÁNÍ POKUSNÉHO ÚSEKU S ASFALTOVÝMI VRSTVAMI S 3D ROZPTÝLENOU VÝZTUŽÍ

EVALUATION OF FINDINGS FROM LONG-TERM MONITORING OF AN EXPERIMENTAL SECTION WITH ASPHALT LAYERS CONTAINING 3D FIBERS

Ing. Petr Mondschein, Ph.D., ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra silničních staveb
Bc. Daniel Šmíd, ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra silničních staveb

Příspěvek shrnuje šestileté zkušenosti z dlouhodobého sledování pokusného úseku silnice II/201, kde byly aplikovány asfaltové směsi s 3D rozptýlenou výztuží. Úsek byl rozdělen do sedmi částí, zahrnujících čtyři různé typy vláken, plošnou 2D výztuž a referenční úseky bez výztuže. Cílem sledování bylo porovnání účinků jednotlivých technologií v reálných podmínkách, které nelze plně ověřit v laboratoři. Hodnocení zahrnovalo pasportizaci poruch, měření nerovností, laboratorní zkoušky i měření únosnosti zařízením FWD. Pro vyhodnocení výsledků byl využit vícekritériální přístup, který umožnil objektivnější porovnání odlišných technologií. Výsledky ukazují, že 3D i 2D výztuž mají technické opodstatnění a mohou pozitivně ovlivnit životnost a odolnost vozovek. Šestileté sledování však nelze považovat za dostatečně dlouhé pro jednoznačné závěry, relevantní bude až horizont deseti let.

The paper summarizes six years of experience from long-term monitoring of a test section of road II/201, where asphalt mixtures with 3D dispersed reinforcement were applied. The section was divided into seven parts, including four different types of fibers, flat 2D reinforcement, and reference sections without reinforcement. The aim of the monitoring was to compare the effects of individual technologies in real conditions, which cannot be fully verified in the laboratory. The evaluation included the registration of defects, measurement of unevenness, laboratory tests, and measurement of bearing capacity using FWD equipment. A multi-criteria approach was used to evaluate the results, which allowed for a more objective comparison of different technologies. The results show that both 3D and 2D reinforcement are technically justified and can positively influence the service life and durability of roadways. However, six years of monitoring cannot be considered sufficient for definitive conclusions; a ten-year horizon will be more relevant.

Úvod

Efektivní hospodaření se zdroji v silničním stavitelství představuje nadále zásadní výzvu, jejíž řešení spočívá mimo jiné v širším využívání různých typů modifikovaných asfaltových směsí. Cílem není pouze snižování materiálové náročnosti, ale také zlepšování fyzikálně-mechanických vlastností nově vyvíjených kompozitů. V asfaltových směsích pro pozemní komunikace se již běžně uplatňují polymerní kompozity, sklo, pryž či průmyslové zbytky [1]. Tyto složky často fungují jako výztuž a přidávají se přímo při výrobě asfaltové směsi. Výsledky mnoha výzkumů ukazují, že tyto materiály mohou zásadně zlepšit vlastnosti směsí – zvyšují modul tuhosti, zlepšují únavovou odolnost a snižují náchylnost k trvalým deformacím. Vzniká tak tzv. 3D výztuž. Například studie [2] prokázala, že přídavek skleněných vláken o průměru 0,5 mm až 0,71 mm a délce 10 mm až 12 mm v množství 5 % hmotnosti směsi výrazně zlepšuje její chování při vysokých teplotách, zvyšuje tuhost, odolnost vůči tvorbě kolejí, omezuje mrazové trhliny a zlepšuje odolnost směsi proti vodě. Podobné závěry přináší i studie [3], podle níž dávkování 1,5 % až 5 % skleněných vláken do asfaltových směsí vedlo ke zvýšení mechanických parametrů a ke snížení rizika tvorby mikrotrhlin. Rozptýlená výztuž z kompozitních odpadů tak představuje inovativní řešení, které spojuje technické, ekonomické i environmentální přínosy a má potenciál výrazně podpořit udržitelný rozvoj silniční infrastruktury.

Cílem tohoto příspěvku je shrnutí reálných zkušeností s chováním asfaltových směsí, které byly modifikovány odlišnými typy 3D rozptýlené výztuže, z pokusného úseku, který byl realizován v rámci projektu SFDI Nové technologie.

Tento příspěvek rozšiřuje poznatky, které byly prezentovány na konferenci Asfaltové vozovky 2021 [9]. Zaměřuje se na hodnocení výkonnosti jednotlivých typů 3D vláken s porovnáním s referenčním vzorkem, tzn. s podúsekem, který byl realizován bez výztužení (0), (6) a s podúsekem, kde byla položena plošná 2D výztuž (4).

Použití 3D výztuže na pokusném úseku

Pokusný úsek na silnici II/201 byl realizován v roce 2017. Jeho celková délka je 1 626 m, začátek úseku se nachází na konci obce Hodyně, konec úseku je na křižovatce se silnicí III/201 29 (obrázek 1). Staničení úseku je ve směru Hodyně–Karlovice. Rozdělen je na sedm podúseků: prvních 60 m je ve skladbě referenčního úseku, další mají délku od 257 m do 287 m s použitím různé technologie výztužení. V celém úseku byla obrusná vrstva realizována jednotně asfaltovou směsí typu ACO 11 S PMB 45/80-60 s 50 % R-materiálu. V ložní vrstvě byla referenčním materiálem asfaltová směs ACL 22 S PMB 25/55-60 s 60 % R-materiálu. V jednotlivých úsecích byla ověřena účinnost čtyř různých vláken rozptýlených ve směsi: syntetické vlákno, aramidové vlákno, polyesterové vlákno získané zpětnou recyklací z odpadní suroviny a polyamidové vlákno. Poslední podúsek byl realizován s nevyztuženou asfaltovou směsí, ale s technologií plošné výztuže se skelným vláknem. Délky pokusných sekcí a informace o realizovaných technologiích jsou uvedeny v tabulce 1.



Obrázek 1: Situace pokusného úseku

Tabulka 1: Rozdělení pokusných sekcí

Úsek	Staničení	Délka úseku (m)	Obrusná vrstva	Ložní vrstva
ref.	km 0,000 – km 0,060	60	ACO 11 S PMB 45/80-60 + 50 % R-materiálu	ACL 22 S PMB 25/55-60 + 60 % R-materiálu s 3D výztuží (1) (2) (3) (5)
(1)	km 0,060 – km 0,347	287		
(2)	km 0,347 – km 0,620	273		
(3)	km 0,620 – km 0,877	257		
2D	km 0,877 – km 1,134	257		
(5)	km 1,134 – km 1,400	266		
ref.	km 1,400 – km 1,626	226		

Úsek bez výztužení byl realizován jako srovnávací. Umožní porovnat chování výztužných prvků a technologií se standardním řešením. Životnost úpravy a její schopnost zabránit šíření trhlin byly porovnány v kombinaci: standardní konstrukce – 3D výztuž, standardní konstrukce – plošná výztuž, 3D výztuž – plošná výztuž. Cílem bylo:

- srovnání účinku plošné výztuže (2D výztuž) s rozptýlenou výztuží v asfaltové směsi (3D výztuž) v ložní vrstvě netuhých vozovek;
- porovnání životnosti celoplošných oprav krytů asfaltových vozovek s použitím různých typů výztuží a výztužných prvků, které je nemožné ověřit v laboratorních podmínkách;

- porovnání výkonnosti 2D a 3D technologie vyztužení v eliminaci vzniku reflexních trhlin;
- srovnání výkonnosti odlišných výrobků;
- ověření použitelnosti produktů ve standardních podmínkách výroby asfaltových směsí.

Vzhledem k dohodě se zadavatelem a dodavateli konkrétních vláken bylo rozhodnuto, že výsledky budou prezentovány jako slepé. I tak je přínosné seznámit odbornou veřejnost s šestiletými zkušenostmi z pokusného úseku.

Zhodnocení stavu

Od pokládky pokusného úseku v roce 2017 probíhalo kontinuální hodnocení jeho stavu až do roku 2023. V roce 2018 bylo provedeno zhodnocení stavu pokusného úseku a zkušebních sekcí na základě osobní prohlídky, pasportizace poruch (TP 82), měření nerovností povrchu vozovky (ČSN 73 6175) a souboru laboratorních prací na odebraných vývrtech. Měření nerovností na úseku bylo ještě zopakováno v letech 2021 a 2022. V letech 2019, 2020, 2021 a 2023 bylo kromě uvedeného provedeno na pokusném úseku měření únosnosti zařízením FWD (VIAKONTROL s.r.o.).

Moduly pružnosti stanovené FWD

V letech 2019, 2020 a 2023 bylo provedeno bodové měření únosnosti konstrukce rázovým zařízením FWD v kroku 25 m. Měřen byl pravý i levý jízdní pruh. Pro výpočet modulů pružnosti byl celý pokusný úsek posuzován pro jednotlivé zkušební sekce samostatně.

Naměřené deformace přímo pod bodem zatížení a zpětně stanovené hodnoty modulu pružnosti asfaltových vrstev, nestmelených vrstev a podloží na základě měření z let 2019, 2020, 2021 a 2023 jsou shrnuty v tabulce 2. Prvním vodítkem pro posouzení celkové únosnosti vozovky může být velikost deformace pod zatěžovací deskou. Z tohoto hlediska vyšel v roce 2019 nejlépe úsek (5) a referenční úsek, v roce 2020 opět úsek (5), v roce 2021 znovu úsek (5) a referenční úsek a v roce 2023 úsek (4). Pokud se úseky posuzují podle nejvyšších hodnot zpětně dopočítaného modulu pružnosti z měření zařízením FWD, pak v období 2019–2023 dosahoval nejlepších výsledků referenční úsek (0). Z pohledu teoretického počtu přejezdů TNV za návrhové období se jako nejlepší ukázal v roce 2019 referenční úsek (0) spolu s úsekem (5), v roce 2020 úsek (5) a referenční úsek (6), v roce 2021 úsek (5) a v roce 2023 pokusná část úseku (4).

Vzhledem k rozdílné skladbě konstrukce vozovky jednotlivých úseku, což prokazuje i rozdílná tloušťka asfaltem stmelených vrstev, není zcela objektivní hodnotit jednotlivé úseky celkovou únosností, resp. relativním porušením nebo centrálním průhybem ze zařízení FWD. Vhodnější je použít technologie hodnotit poklesem, resp. vzrůstem parametrů měření provedených v letech 2019 a 2020, 2019 a 2021, resp. 2019 a 2023.

Z ukázky hodnocení a porovnání výkonnosti jednotlivých podsekcí, kvality jednotlivých podúseků je zřejmé, že vhodnějším porovnáním technologií zabudovaných v pokusném úseku je využití VÍCEKRITERIÁLNÍHO vyhodnocení.

Multikriteriální hodnocení pokusného úseku

Multikriteriální neboli vícekritériální rozhodování a hodnocení označuje situace, kdy je třeba posuzovat a rozhodovat na základě více kritérií současně. Tento přístup byl velmi vhodný právě pro vyhodnocení zkoušek na sledovaném úseku u obce Hodyně, kde byly k dispozici výsledky několika různých testů a měření. Každý z nich může sloužit jako samostatné kritérium, avšak jejich přímé srovnání je obtížné. Proto je nezbytné výsledky sjednotit a zpracovat je prostřednictvím multikriteriálního hodnocení.

Tento postup má dvě základní složky: stanovení vah jednotlivých kritérií a volbu funkce, pomocí níž se provede konečné vyhodnocení. Existuje mnoho přístupů k určení vah i k výběru hodnotící funkce. V rámci tohoto hodnocení byla k odhadu vah použita metoda Fullerova trojúhelníku a pro finální vyhodnocení princip dílčí funkce užitku.

Princip dílčí funkce užitku umožňuje komplexně hodnotit jednotlivé alternativy tím, že převádí obtížně porovnatelné výsledky na bezrozměrné hodnoty. V našem případě byla využita lineární funkce užitku, která každému výsledku přiřadila konkrétní reálné číslo bez jednotky. Platí přitom, že čím vyšší je tato hodnota, tím větší preferenci daný výsledek představuje.

Tabulka 2: Vyhodnocení % poklesu zpětně stanovených modulů pružnosti a % nárůstu centrálního průhybu z měření únosnosti zařízením FWD mezi roky 2019, 2020 a 2023

Úsek	Tloušťka asfaltem stmelených vrstev (mm)	Rok měření	85 % kvantil průhyb v místě 0 (μm)	TNV lim	Relativní porušení	Moduly pružnosti (MPa)		
						Asfaltem stmelené vrstvy	Nestmelené vrstvy	Podloží
(0)	130	2019	403	15 778 947	1,367	10 887	59	142
		2020	435 (108%)	2 837 059	1,284	9 510 (87%)	47	139
		2021	348 (86%)	23 644 681	0,603	10 675 (98%)	111	142
		2023	295 (73%)	23 809 036	0,150	13 625 (125%)	118	170
(1)	130	2019	403	3 077 644	0,462	9 088	80	103
		2020	516 (128%)	1 077 868	1,213	8 591 (95%)	48	77
		2021	392 (97%)	4 324 475	0,344	10 389 (114%)	105	101
		2023	344 (85%)	8 179 312	0,164	11 396 (125%)	97	106
(2)	170	2019	394	3 416 295	0,970	4 334	92	77
		2020	488 (124%)	648 419	2,216	4 229 (98%)	50	55
		2021	355 (90%)	4 413 547	0,488	5 276 (122%)	106	81
		2023	369 (94%)	3 663 032	0,356	5 648 (130%)	65	82
(3)	210	2019	300	6 363 745	0,205	4 598	78	131
		2020	407 (136%)	1 470 264	0,891	3 459 (75%)	39	102
		2021	274 (91%)	13 895 086	0,094	6 155 (134%)	91	140
		2023	305 (102%)	6 533 183	0,320	4 644 (101%)	47	140
(4)	160	2019	295	6 163 174	0,236	6 601	125	135
		2020	373 (126%)	3 410 887	0,394	5 407 (82%)	69	96
		2021	250 (85%)	25 675 077	0,058	9 527 (144%)	175	123
		2023	249 (84%)	59 196 186	0,023	7 811 (118%)	96	131
(5)	160	2019	277	13 167 897	0,117	7 351	234	117
		2020	336 (121%)	5 710 825	0,244	7 631 (104%)	104	81
		2021	208 (75%)	98 552 573	0,014	12 342 (167%)	273	123
		2023	281 (101%)	18 292 611	0,089	9 261 (126%)	165	116
(6)	180	2019	274	7 315 121	0,211	5 864	125	139
		2020	361 (132%)	4 420 561	0,560	5 687 (97%)	51	108
		2021	205 (75%)	61 319 138	0,023	8 677 (148%)	184	112
		2023	275 (100%)	10 342 038	0,027	6 748 (115%)	116	140

Tabulka 3: Výsledné váhy kritérií sledovaných parametrů

Pořadí	Kritérium	Váha
1.	Změna průhybu FWD 2019-2021	0,096939
2.	Změna modulu pružnosti FWD 2019-2021	0,096939
3.	Změna průhybu FWD 2020-2021	0,086735
4.	Změna modulu pružnosti FWD 2020-2021	0,086735
5.	Podélná nerovnost LS 2022	0,076531
6.	Podélná nerovnost PS 2022	0,076531
7.	Modul tuhosti 15 °C 2020	0,066327
8.	Modul tuhosti 27 °C 2020	0,066327
9.	Modul tuhosti 40 °C 2020	0,045918
10.	Změna modulu pružnosti FWD 2019-2020	0,045918
11.	Modul tuhosti 0 °C 2020	0,045918
12.	Změna průhybu FWD 2019-2020	0,040816
13.	Podélná nerovnost LS 2021	0,035714
14.	Podélná nerovnost PS 2021	0,035714
15.	Modul tuhosti 27 °C 2018	0,030612
16.	Modul tuhosti 15 °C 2018	0,030612
17.	Podélná nerovnost LS 2020	0,015306
18.	Podélná nerovnost PS 2020	0,015306
19.	Modul tuhosti 40 °C 2018	0,005102
20.	Modul tuhosti 0 °C 2018	0,000000

Tabulka 4: Multikriteriální vyhodnocení pokusného úseku

Pořadí	Úsek	CELKEM F(X)	%
1.	(5) km 1,134 – km 1,400	23,8	100,0
2.	(2D) km 0,877 – km 1,134	23,1	97,1
3.	(1) km 0,060 – km 0,347	19,5	81,9
4.	(2) km 0,347 – km 0,620	19,0	79,8
5.	(REF) km 1,400 – km 1,626	14,7	61,8
6.	(3) km 0,620 – km 0,877	12,5	52,5

Aby mohl princip dílčí funkce užítu správně fungovat, je nutné stanovit váhy jednotlivých zkoušek. Pro tento účel byla zvolena metoda Fullerova trojúhelníku. Ta se uplatňuje zejména při větším množství kritérií a její podstata spočívá v párovém porovnávání jednotlivých kritérií. Z každé dvojice se vybere to,

kteří má vyšší význam; pokud jsou kritéria stejně důležitá, označí se obě. Následně se určí počet označení pro každé kritérium a vypočítá se i celkový počet provedených porovnání.

V tabulce 3 jsou uvedena jednotlivá kritéria a spočítané váhy kritérií, dle kterých byly hodnoceny jednotlivé pokusné sekce úseku Hodyně.

Z provedeného vícekritériálního hodnocení, které je uvedeno v tabulce 4, vyplývá, že nejvyšší výkonnosti dle zvolených kritérií dosáhl podúsek s označením (5). Mírně horšího výsledku za technologickým řešením s 3D rozptýlenou výztuží dosáhl úsek, kde byla zabudována 2D skelná výztuž. Vyšší výkonnosti než referenční úsek dosáhly podúseky s 3D rozptýlenou výztuží (1) a (2). Podúsek s 3D rozptýlenou výztuží (3) neprokázal zlepšení v porovnání s referenčním úsekem.

Závěr

Tento příspěvek prezentuje šestileté zkušenosti z pokusného úseku, na němž byly aplikovány asfaltové směsi s 3D rozptýlenou výztuží. V rámci úseku byly použity čtyři typy výztužných vláken, plošná 2D výztuž a referenční nevyztužený úsek. Na základě dosud provedených analýz lze konstatovat, že jak 3D rozptýlená, tak plošná výztuž mají své technické opodstatnění.

Řada laboratorních studií, disertačních, diplomových a bakalářských prací či výzkumných projektů přináší množství pozitivních výsledků, které potvrzují příznivý efekt vyztužování asfaltových směsí. Laboratorní podmínky však neumožňují komplexně simulovat všechny reálné vlivy. Proto je nezbytné ověřovat účinnost výztužných vláken na skutečných pokusných úsecích, kde lze zohlednit další okrajové podmínky, jako je technologie výroby směsi na obalovně, doba míchání, míra rozptýlení vláken v asfaltové směsi či odolnost konstrukčních vrstev vůči šíření trhlin. Tyto aspekty nelze v laboratorním prostředí vždy spolehlivě modelovat.

Čtenáře může napadnout otázka, proč výsledky nejsou prezentovány konkrétněji. Hlavním důvodem je skutečnost, že přínosy vyztužování se projevují především v dlouhodobém horizontu. Zásadní výhodou 3D výztuže v asfaltových směsích není okamžitý výrazný nárůst tuhosti či odolnosti proti tvorbě trvalých deformací, ale především dlouhodobé efekty, které se projevují prodlouženou životností, postupně rostoucí tuhostí konstrukce a sníženým výskytem trhlin ve vozovce. Pokusný úsek nebyl realizován jako novostavba, ale v rámci opravy silnice II. třídy. Chování jednotlivých částí je proto ovlivněno řadou okrajových podmínek, například skladbou vozovkových vrstev, směrovými a výškovými poměry trasy a dalšími faktory. Z tohoto důvodu není možné mezi sebou jednoduše porovnávat jednotlivé naměřené hodnoty, ale je nezbytné sledovat a vyhodnocovat dlouhodobé trendy. Dosavadní šestileté sledování nelze považovat za dostatečně dlouhé pro jednoznačné vyhodnocení. Jako adekvátní se jeví až období deseti let, kdy bude možné seriózně porovnat všechny uplatněné technologie, a to včetně ekonomického zhodnocení.

Realizace pokusného úseku byla umožněna díky podpoře SFDI v rámci programu NOVÉ TECHNOLOGIE a dlouhodobě byla podporována Správou a údržbou silnic Plzeňského kraje, p. o., kterým tímto náleží poděkování.

Zdroje:

- [1] Kovalev, Ya. N., Alexandrov D. Yu. Conceptual Fundamentals for Technology of Sand Disperse-Reinforced Asphalt Concrete. 2019, vol. 18(4), pp. 269–273. ISSN 2414-0392. Dostupné z: doi:10.21122/2227-1031-2019-18-4-269-273
- [2] Qilin, Y., Hong, B., Lin, J., Wang, D., Zhong, J., Oeser M. Study on the reinforcement effect and the underlying mechanisms of a bitumen reinforced with recycled glass fiber chips. Journal of Cleaner Production. 2020, pp. 251. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2019.119768
- [3] Ciont, N., Pop N., Iliescu M. structural analysis of cold in-place recycled asphalt mixtures, with added glass fibre. In: energy and clean technologies conference proceedings, SGEM 2016, vol II. Bulgaria: STEF92 Technology LTD, 1 Andrey Lyapchev BLVD, Sofia, 1797, Bulgaria, 2016, pp. 133–140. ISBN 978-619-7105-64-3. ISSN 1 314–2 704

VLASTNOSTI ASFALTOVÝCH SOUVRSTVÍ VYZTUŽENÝCH SKLOVLÁKNITOU MŘÍŽÍ

PROPERTIES OF ASPHALT LAYERS REINFORCED WITH FIBREGLASS GRID

Ing. Pavel Šperka, Ph.D., VUT v Brně, Fakulta stavební
prof. Ing. Jan Kudrna, CSc., VUT v Brně, Fakulta stavební
Ing. Karel Spies, VUT v Brně, Fakulta stavební
Ing. Štěpán Bohuš, Ph.D., VUT v Brně, Fakulta stavební
Jana Kalášková, SAINT-GOBAIN ADFORS CZ s.r.o.
Ing. Jakub Valenta, VIALIT SOBĚSLAV spol. s.r.o.

Vyztužování asfaltových vrstev pomocí geosyntetik lze použít z důvodu omezení vývoje a šíření trhlin ve vozovce či pro vyztužení a zesílení pokleslých okrajů vozovek. Pro správnou funkci geosyntetika ve vozovce je důležité zajistit kvalitní spojení asfaltových vrstev. Příspěvek se zaměřuje na výsledky zkoušky spojení vrstev a funkční zkoušky odolnosti vůči únavě na zkušebních tělesech strukturálně vyztužených samolepicí sklovláknitou geomříží a porovnává je s výsledky referenčního souvrství bez vyztužného materiálu. Vyztužné mříže byly umístěny pod tenkou asfaltovou vrstvou tl. 30 mm. Důležitou součástí příspěvku je vyhodnocení přínosu použití vyztužné geomříže v asfaltovém souvrství na možné prodloužení životnosti vozovky, popř. zvýšení počtu přejezdů těžkých nákladních vozidel.

Reinforcement of asphalt geosynthetics can be used to reduce the formation and propagation of cracks in the pavement or to reinforce and for strengthen lowered pavement edges. For the right function of geosynthetics in pavement, it is important to have a good bond connection between the asphalt layers. The paper is focused on the results of the Leutner shear test and the functional resistance to fatigue test on test specimens structurally reinforced with self-adhesive fibreglass geogrid. Reinforcement grids were situated under a thin asphalt layer 30 mm. The results of the geogrid reinforced layers are compared with the results of the layers without reinforcement material. The important part of this paper is to verify the effect of the reinforcing geogrid on increasing the service life of the pavement and increasing the number of HGV crossings.

Úvod

Pro zajištění silnic v požadovaném stavu je důležité neustále hledat nové možnosti řešení, které přispívají k prodloužení životnosti vozovek či provedených oprav, a to za současné úspory finančních nákladů. Ve stávajících netuhých vozovkách se vyskytuje celá řada poruch, přičemž jednou z kritických poruch jsou trhliny. Ty mohou být nejrůznějšího původu a druhu a mohou prostupovat celou tloušťkou asfaltových vrstev. Časté jsou trhliny mrazové a reflexní, příčné a podélné a také trhliny na pracovních spárách. Nejzávažnější jsou trhliny síťové, které bývají znakem ztráty únosnosti celé vozovky a mohou vést k plošným deformacím celé vozovky. Tyto poruchy obvykle vyžadují celkovou rekonstrukci vozovky pro zvýšení únosnosti celé vozovky. Další, často se vyskytující poruchou zejména vozovek krajových komunikací, jsou poklesy okrajů vozovky a s nimi spojené trhliny. Vznik těchto poruch je zapříčiněn nedokonalé provedením rozšířením vozovky v minulosti a současným vysokým dopravním zatížením pojezdy těžkých nákladních vozidel. Pro oddálení šíření trhlin do nových asfaltových vrstev existuje několik způsobů sanace vozovek poruch, které jsou popsány v TP 115 [1]. Při běžném způsobu překrytí trhlin asfaltovou vrstvou však postupem času dochází k jejich dalšímu prostupování na povrch vozovky. Zajímavou možností pro omezení vývoje a šíření trhlin v asfaltových vozovkách je použití vyztužných geomříží či geokompozitů vkládaných mezi asfaltové vrstvy. V současné době je k dispozici celá řada geosyntetických sklovláknitých výrobků vhodných pro použití v silničním stavitelství.

Na Fakultě stavební VUT v Brně byl v letech 2020–2023 řešen výzkumný projekt TA ČR CK 01000033 s názvem – „Prodloužení životnosti vozovek krajových a místních komunikací pomocí inovativních asfaltových vrstev s využitím vysokopevnostních kompozitních materiálů“ [2]. Tento projekt byl orientován mj. na vývoj inovativních sklovláknitých geosyntetických materiálů a ověření použití těchto materiálů v asfaltových vozovkách. Na předchozích konferencích Asfaltové vozovky byly publikovány výsledky citovaného projektu zaměřené na spojení vrstev se sklovláknitými geosyntetiky. Zatímco příspěvek z roku 2021 se orientuje na posouzení jednotlivých faktorů, které mají vliv na kvalitu spojení vyztužených vrstev [3], tak příspěvek z roku 2023 [4] je zaměřen na výsledky spojení vrstev ze zkušebního úseku v Soběslavi, kde byly geosyntetické materiály použity pod tenkou obrusnou vrstvou tl. 30 mm.

Jedním ze zajímavých zjištěných přínosů byl nárůst smykové síly na spojení vrstvy vyztužené sklovláknitou geomříží v průběhu času, ke kterému mohlo dojít vlivem účinků dopravního zatížení.

Hlavním cílem tohoto příspěvku je, na základě výsledků funkční zkoušky odolnosti vůči únavě, dokumentovat přínos použití vyztužené sklovláknité geomříže v asfaltové vozovce a její vliv na omezení šíření trhlin a možné prodloužení životnosti vozovky.

Použití sklovláknitých vyztužných materiálů mezi asfaltovými vrstvami

Při používání geosyntetik je důležité pochopení

Používání vyztužných materiálů vyžaduje jak pochopení základních principů jejich působení v konstrukci vozovky, tak i dodržování přesných zásad a technické kázně při jejich aplikaci na stavbách. Bez toho nelze dosáhnout ideálních výsledků. Rozdílný přístup je třeba zvolit již při instalaci geosyntetik. Samolepicí geomříže se aplikují na hladký asfaltový povrch nové či mírně opotřebované asfaltové vrstvy (obrázek 1) a následně se na geomříž provede spojovací postřík. Geokompozity se používají zejména na frézované povrchy a aplikují se do čerstvě naneseného spojovacího postříku. Dalším, v současnosti používaným materiálem, jsou geokompozity s integrovanou asfaltovou vrstvou, které lze instalovat zcela bez použití spojovacího postříku, a to jak na nové asfaltové vrstvy, tak i na frézované povrchy.

V ČR se používání geosyntetik řídí technickými podmínkami MD TP 147 „Užití asfaltových membrán a vyztužných prvků v konstrukci vozovky“ [5]. Vzhledem k tomu, že tento dokument je v platnosti již od roku 2010, probíhá v současné době revize předpisu, která zohlední aktuální poznatky z oblasti geosyntetik a v současnosti používané materiály a způsoby jejich použití ve vozovce.

Dalším materiálem, který je možné využít při použití geosyntetik, je certifikovaná metodika: „Metodika k využití vysokopevnostních kompozitních materiálů pro opravy a zesilování netuhých vozovek asfaltovými vrstvami a pro údržbu tenkovrstvými opatřeními“ [6]. Tento dokument řeší zejm. způsob instalace, specifikaci sklovláknitých vyztuží, doporučení na dávkované množství a druh spojovacího postříku a další důležité aspekty při realizaci oprav silnic nižších tříd s maximálním dopravním zatížením do 500 TNV/24 hodin. Nedílnou součástí metodiky jsou vzorové technologické listy pro návrhy oprav vozovek s použitím vyztužných materiálů. Vzorové technologické listy s návrhy oprav jsou obsaženy také v inovovaných TP 87 „Navrhování údržby a oprav netuhých vozovek“ připravených k vydání v tomto roce [7].



Obrázek 1: Vlevo – pohled na instalovanou samolepicí geomříž na povrch vozovky, vpravo – detail pokládky asfaltové vrstvy na geomříž

Použité zkušební metody

Smyková zkouška pevnosti spojení vrstev

Běžně používanou metodou pro ověření spojení vrstev v ČR je tzv. Leutnerova smyková zkouška, která se provádí dle normy ČSN 12697-48 [8]. Pomocí této metody je posuzována odolnost souvrství proti účinkům vodorovných smykových napětí na styku dvou konstrukčních vrstev vozovky. Zkouška se provádí na jádrovém vývrtu, který se umístí do speciálního přípravku v zatěžovacím lisu, kde je zatěžován silou působící kolmo na vývrt v místě rozhraní vrstev, při konstantní rychlosti posunu čelistí 50 mm/min a při zkušební teplotě 20 °C. Jsou zaznamenávány narůstající smyková síla a posun vrstvy, výsledkem zkoušky je maximální smyková síla, resp. smyková pevnost na rozhraní mezi vrstvami.

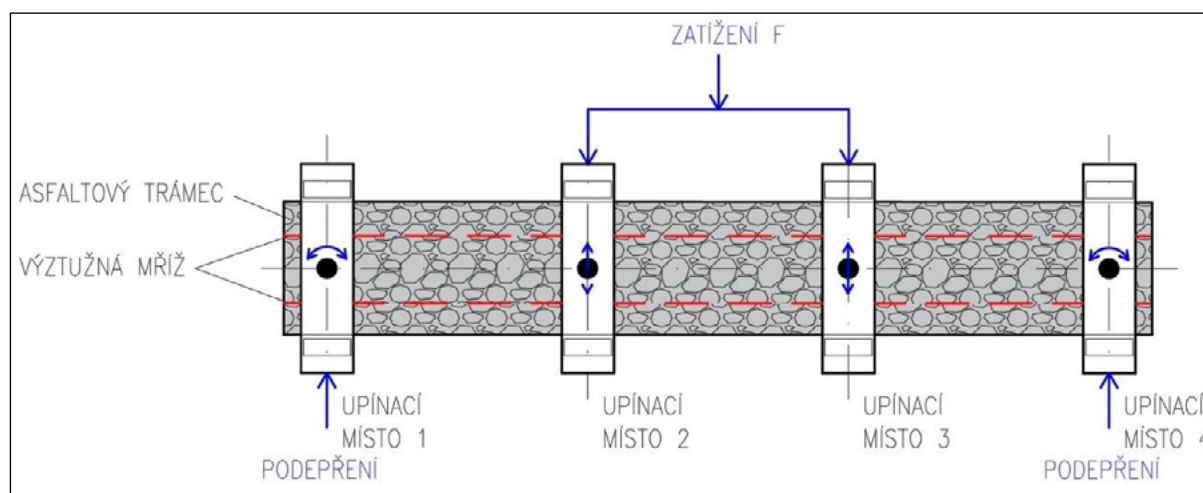
Vzhledem k použití geomříží bylo posouzení spojení vrstev prováděno na jádrových vývrtech průměru 150 mm, které zajišťují dostatečně velkou plochu obsahující výztužný prvek. Minimální požadovaná hodnota na spojení mezi obrusnou a ložní vrstvou je 15 kN (0,85 MPa), dle normy ČSN 73 6121 [9].

Stanovení odolnosti asfaltových souvrství vůči únavě

Pro posouzení únavové odolnosti asfaltového souvrství s výztužnou geomříží či referenčních souvrství, byla použita čtyřbodová zkouška ohybem na tělesech tvaru trámečků – metoda 4PB, dle normy ČSN EN 12697-24 [10].

Během zkoušky jsou ve vertikálním směru periodicky zatěžovány dva střední zatěžovací body trámečku ohybem (aplikované sinusové zatížení) za současného upnutí konců trámečku (obrázek 2), přičemž zatížení působí ve třetinách vzdálenosti mezi body upnutí 1 a 4. Tím je vytvořen konstantní ohybový moment ve střední třetině zkušebního tělesa. Při zkoušce se zaznamenává síla působící na trámec, průhyb uprostřed trámce a fázový úhel mezi silou a průhybem. Z těchto veličin se stanovuje komplexní modul tuhosti. Zkouška byla provedena při zkušební teplotě 10 °C a zatěžovací frekvenci 10 Hz, v souladu s normou ČSN EN 13-108-20 ed. 2 [11]. Zatěžování probíhalo v módu „strain control“, tedy za řízeného konstantního přetvoření zkušebních trámců s postupně se snižující silou z důvodu porušování trámců. Zkouška byla ukončena při poklesu počáteční hodnoty modulu tuhosti na 50 %, čímž se považuje zkušební trámec za unavený. Relativní přetvoření ε_i zkušebních trámečků a počty cyklů N_i , při kterých došlo k poklesu modulu tuhosti trámečků na polovinu, se zobrazují v logaritmickém měřítku ve Wöhlerově diagramu. Počáteční přetvoření jednotlivých těles byla nastavována tak, aby finální hodnoty počtu cyklů N_i při dosažení 50 % modulu tuhosti pokryly celý rozsah Wöhlerova diagramu, tj. od 10 000 do 10 000 000 počtu zatěžovacích cyklů. Následně lze pomocí lineární regrese mezi dekadickými logaritmy N_i a ε_i vykreslit únavovou křivku. Výsledkem zkoušky stanovení odolnosti vůči únavě je parametr poměrného přetvoření ε_6 při 1 000 000 zatěžovacích cyklů.

Nutno uvést, že použitý způsob vyhodnocení zkoušky (dle normy ČSN EN 12697-24 [10]), se standardně používá pro trámce bez výztužení. V případě vložení výztužného prvku lze předpokládat, že při poklesu modulu tuhosti na polovinu počáteční hodnoty není zcela dosažen celkový potenciál působení výztuže [12]. Ve světové literatuře je tato zkouška rozšířena o vyhodnocení zohledňující vyšší míru únavy, při které jsou zkušební tělesa více poškozeny mikrotrhlinami a výrazněji se projevují funkce výztužení: metody „Energy ratio“ nebo Simplified Flex Point (SFP) [13].



Obrázek 2: Schematický náčrt umístění zkušebního trámce v upínacím přípravku při provádění zkoušky odolnosti vůči únavě metodou 4PB

Použité materiály

Asfaltová směs

Pro výrobu zkušebních těles byla použita asfaltová směs typu asfaltový beton pro obrusné vrstvy ACO 8, resp. v příp. zkušebních těles pro stanovení spojení vrstev byla použita také směs asfaltového betonu pro obrusné vrstvy ACO 11+. Vlastnosti asfaltových směsí jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1: Vlastnosti použitých asfaltových směsí

Vlastnost asfaltové směsi	Jednotka	Asfaltový beton pro obrusné vrstvy	
		ACO 8	ACO 11+
Obsah asfaltu	%	6,1	5,9
Objemová hmotnost	kg/m ³	2434	2401
Maximální objemová hmotnost	kg/m ³	2532	2476
Mezerovitost směsi	%	3,87	3,03

Samolepicí sklovláknitá výztužná geomříž

Ve zkušebních souvrstvích byla použita sklovláknitá výztužná geomříž TAV 1 SAM, od výrobce SAINT-GOBAIN ADFORS CZ s.r.o. Hlavní funkcí této geomříže je zajištění výztužné funkce ve vozovce, kdy je působící napětí absorbováno a distribuováno v ploše jednotlivými filamenti mříže.

Matrice výrobků je tvořena z pletené mřížkové struktury vyrobené z vysokopevnostního skelného vlákna dle normy ČSN EN 15381 [14] s polymerním povlakem pokrývajícím všechny pramence (tzv. coating). Tento polymerní povlak je způsob povrchové úpravy chránící jednotlivá skelná vlákna výrobku proti poškození během instalace výrobku a při pokládce a hutnění asfaltové vrstvy, zároveň zajišťuje lepší přilnavost asfaltu ke skelným vláknům. Mříž má na spodní straně samolepicí vrstvu citlivou na tlak umožňující snadnou aplikaci na novou nově položenou asfaltovou vrstvu, resp. na starší asfaltové povrchy. Lepidlo se aktivuje tlakem válce na položenou mříž, čímž se zajistí fixace na povrchu a urychlí se celkový proces pokládky. Podrobné vlastnosti použité geomříže TAV 1 SAM jsou uvedeny v tabulce 2.

Tabulka 2: Vlastnosti použité samolepicí sklovláknité geomříže

Vlastnosti	Jednotka	TAV 1 SAM (samolepicí sklovláknitá mříž)	Zkušební metoda
Velikost ok mříže (osově)	mm	25 x 25	-
Plošná hmotnost	g/m ²	205	ČSN EN ISO 9864 [15]
Bod tání ochranného povlaku svazku skelných vláken	°C	> 220	ČSN EN ISO 3146 [16]
Síla v tahu do porušení (MD x VMD) ¹⁾	kN/bm	≥ 50 x 50	ČSN EN ISO 10319 [17]
Síla v tahu při protažení 2 % (MD x VMD) ¹⁾	kN/bm	≥ 36 x 36	ČSN EN ISO 10319 [17]
Protažení do porušení (MD x VMD) ¹⁾	%	2,5 ± 0,5 x 2,5 ± 0,5	ČSN EN ISO 10319 [17]
Zbytková síla v tahu do porušení po poškození hutněním (MD x VMD) ¹⁾	kN/bm	≥ 40 x 40	ČSN EN ISO 10722 [18]
Přilnavost k povrchu v tahu	N	≥ 150	ČSN EN 13596 [19]

Poznámky: ¹⁾MD – ve směru pokládky geomříže (podélný směr), VMD – kolmo ke směru pokládky geomříže (příčný směr)

Asfaltová emulze pro spojovací postřik

Do spojovacího postřiku zkušebních těles pro zkoušku spojení vrstev a odolnost vůči únavě byly použity kationaktivní modifikovaná asfaltová emulze C60BP4 s 60% obsahem asfaltu, od výrobce VIALIT Soběslav spol. s.r.o. Pro výrobu asfaltové emulze byl použit silniční asfalt gradace 70/100.

Použitá zkušební tělesa

Při přípravě zkušebních těles bylo třeba nejprve vyrobit zkušební desky, které byly zhutněny v laboratoři pomocí segmentového zhutňovače, dle normy ČSN EN 12697-33 [20]. Z vyrobených desek byly následně odvrtány jádrové vývrtky, resp. byly vyřezány a zabroušeny zkušební trávce.

Zkušební tělesa pro zkoušku spojení vrstev

Souvrství zkušebních desek sestávalo z následujících vrstev:

- spodní vrstva z asfaltového betonu pro obrusné vrstvy ACO 11+ tl. 40 mm;
- samolepicí sklovláknitá geomříž TAV 1 SAM, resp. v příp. referenčního souvrství bez geomříže;
- spojovací postřík z kationaktivní asfaltové emulze C60BP4, v množství 0,3 kg/m² zbytk. asfaltu;
- horní vrstva z asfaltového betonu pro obrusné vrstvy ACO 11 +, resp. ACO 8, tl. 40 mm, položená a zhutněná po vyštěpení asfaltové emulze.

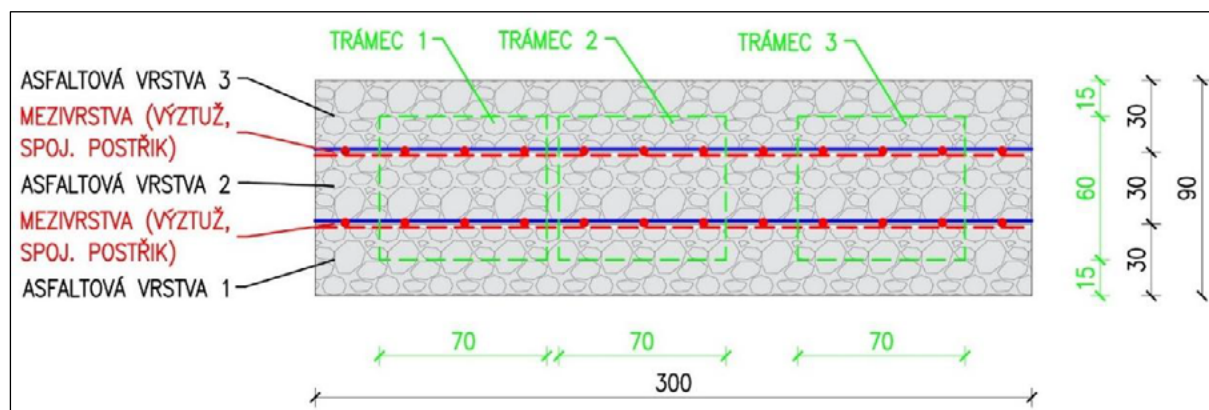
Z takto vyrobených desek byly následně odvrtány jádrové vývrtky průměru 150 mm (3 vývrtky z jedné desky). Pro každé souvrství bylo vyrobeno a odzkoušeno celkem 6 jádrových vývrtů. Míra zhutnění vrstev jádrových vývrtů se pohybovala v rozmezí $(100 \pm 1) \%$.

Zkušební tělesa pro zkoušku stanovení odolnosti vůči únavě

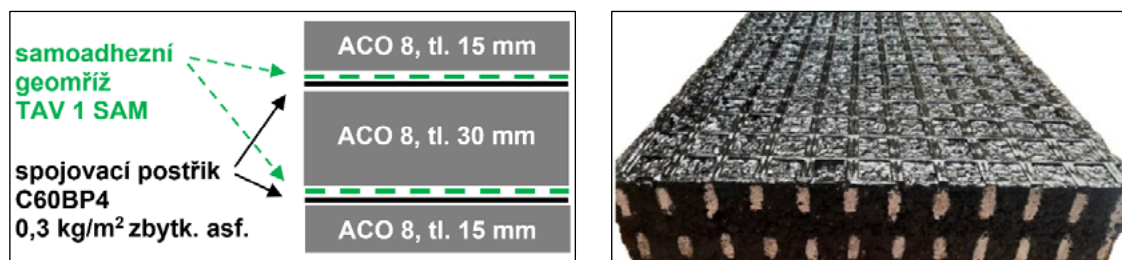
Souvrství zkušebních desek se skládalo ze tří asfaltových vrstev:

- spodní vrstva (asfaltová vrstva 1) z asfaltového betonu pro obrusné vrstvy ACO 8, tl. 30 mm;
- samolepicí sklovláknitá geomříž TAV 1 SAM (v příp. referenčního souvrství bez geomříže);
- spojovací postřík z kationaktivní asfaltové emulze C60BP4, v množství 0,3 kg/m² zbytk. asfaltu;
- střední vrstva (asfaltová vrstva 2) z asfaltového betonu pro obrusné vrstvy ACO 8, tl. 30 mm, položená po vyštěpení asfaltové emulze;
- samolepicí sklovláknitá geomříž TAV 1 SAM (v příp. referenčního souvrství bez geomříže);
- spojovací postřík z kationaktivní asfaltové emulze C60BP4; v množství 0,3 kg/m² zbytk. asfaltu;
- horní vrstva (asfaltová vrstva 3) z asfaltového betonu pro obrusné vrstvy ACO 8, tl. 30 mm, položená po vyštěpení asfaltové emulze.

Z vyrobených desek byly následně vyřezány a zabroušeny zkušební trávce (vždy 3 ks z jedné desky, viz obrázek 3), o rozměrech 70 mm (šířka) x 60 mm (výška) x 395 mm (délka), přičemž finální tloušťka asfaltových vrstev v trávci po zabroušení byla: 15 mm / 30 mm / 15 mm (viz obrázek 4 vlevo). Původní krajní vrstvy (horní a spodní vrstva) byly zhutněny v tl. 30 mm z důvodu zajištění minimální požadované tl. hutněné vrstvy. Detail na aplikovanou výztužnou geomříž na asfaltovou vrstvu 2) je zachycen na obrázku 4 vpravo. Vyztužené zkušební trávce obsahovaly 2 výztužné geomříže umístěné symetricky vzhledem ke středové ose trávce. Důvodem je cyklické namáhání trávce střídavým tahem a tlakem se sinusovým průběhem (obě krajní asfaltové vrstvy jsou při zkoušce střídavě namáhány tahovými účinky). Podobný způsob symetrického umístění 2 geosyntetik ve zkušebních trávci při zkoušce 4PB používala v dizertační práci také I. M. Arsenie [21] a byl použit také v rámci francouzského projektu SolDuGri [22].



Obrázek 3: Schematický příčný řez zkušební deskou s výztužnou sklovláknitou geomříží s vyznačením jednotlivých trávců



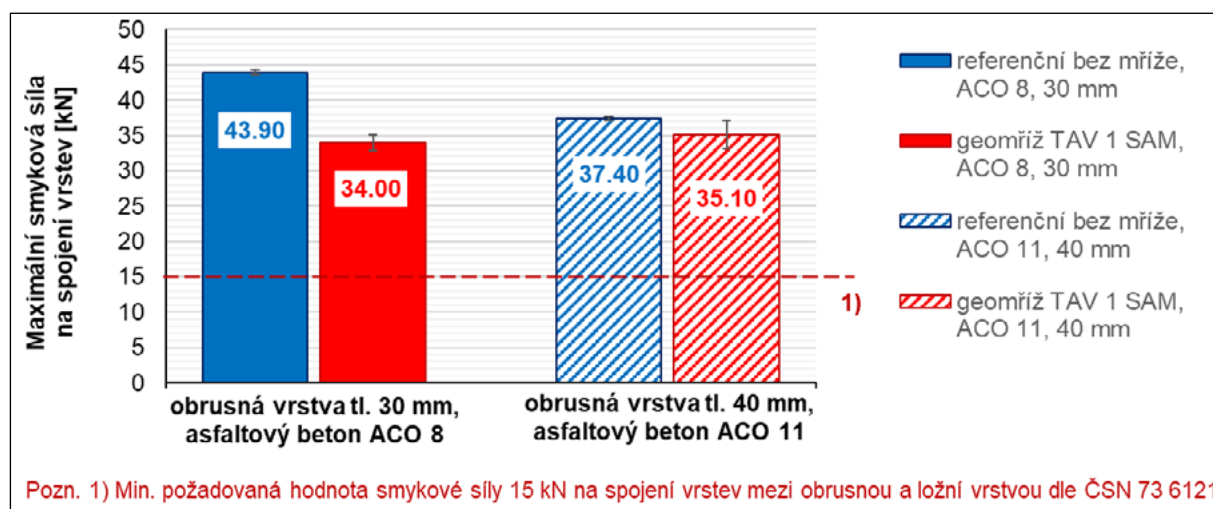
Obrázek 4: Vlevo – schematický příčný řez zkušebního trávce pro zkoušku stanovení odolnosti vůči únavě, vpravo – samolepicí mříž TAV 1 SAM instalovaná na střední asfaltové vrstvě 2

Celkový počet vyrobených a zkoušených trámů byl 18 ks, přičemž u vyztuženého souvrství byla odolnost vůči únavě vyhodnocena z výsledků 16 trámů z důvodu poškození 2 trámů vlivem aplikace vysoké počáteční zatěžovací síly (vznikly problémy se zkušebním přístrojem na počátku měření). Míra zhutnění zkušebních těles se pohybuje ve většině případů v rozmezí $(100 \pm 1) \%$, s výjimkou 2 zkušebních těles z referenčního souvrství, na kterých byla dosažena nepatrně vyšší míra zhutnění, a to konkrétně 101,3 %, resp. 101,6 %. Průměrná mezerovitost zkušebních těles se pohybovala v rozmezí od 3,0 % do 4,6 %.

Výsledky provedených zkoušek

Spojení vrstev

Kvalitní spojení vrstev je vždy důležitým parametrem pro zajištění správné funkce výztužných mříží v asfaltových vozovkách. První část výzkumné práce tak byla zaměřena na zkoušení spojení jádrových vývrtů z vrstev vyztužených samolepicí geomříží TAV 1 SAM a porovnání výsledků s výsledky vývrtů z referenčních souvrství, tedy bez výztužné geomříže. Důležitým úkolem také bylo ověřit spojení vrstev při použití tenké obrusné vrstvy tl. 30 mm z asfaltové směsi ACO 8, která byla použita ve zkušebních tělesech pro stanovení odolnosti vůči únavě. Průměrné hodnoty stanovených smykových sil na spojení vrstev jsou graficky uvedeny v obrázku 5.



Obrázek 5: Vliv odlišné zrnitosti a tloušťky asfaltové obrusné vrstvy na spojení vrstev

Z uvedených výsledků vyplývají tyto dílčí závěry:

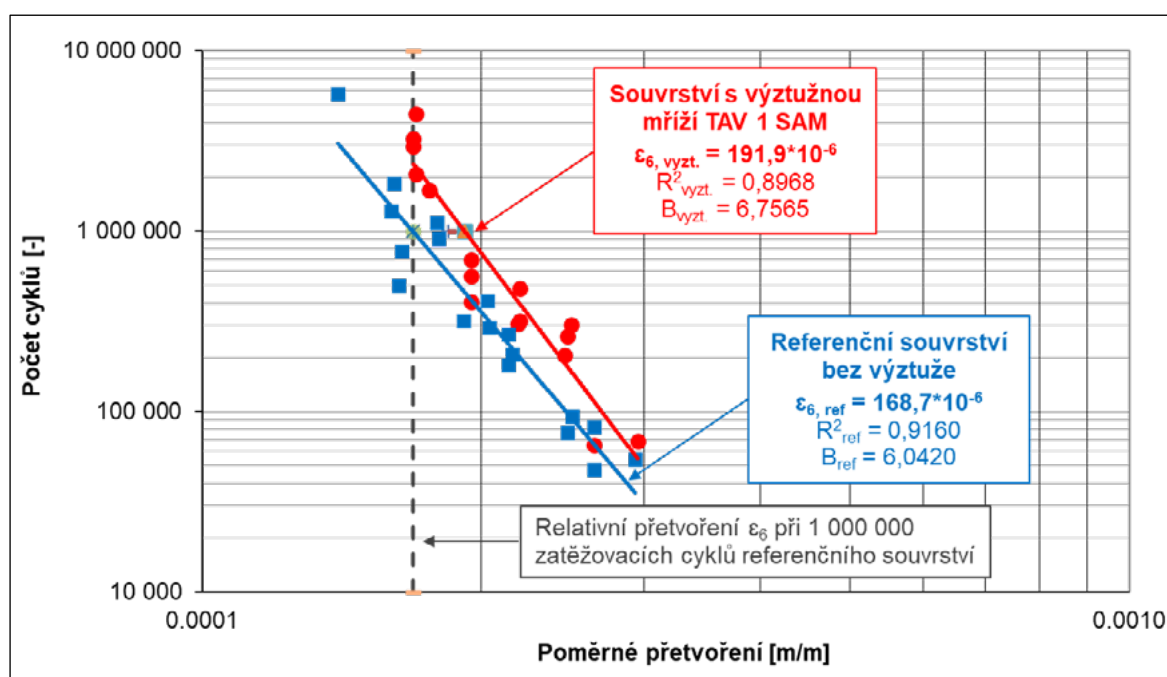
- Použití tenké obrusné vrstvy ze směsi ACO 8 tl. 30 mm nemělo negativní vliv na spojení vrstev se samolepicí geomříží TAV 1 SAM a posuzované souvrství dosáhlo téměř srovnatelných hodnot smykových sil jako souvrství s obrusnou vrstvou ACO 11+ tl. 40 mm.
- Vlivem použití samolepicí výztužné geomříže TAV 1 SAM došlo oproti referenčním souvrstvím k mírnému snížení smykové síly, a to o cca 6 % v případě horní vrstvy tl. 40 mm ze směsi ACO 11+, resp. o cca 23 % v příp. horní tenké vrstvy tl. 30 mm ze směsi ACO 8. Směrodatné odchylky jednotlivých výsledků vyztužených souvrství se samolepicí geomříží jsou však větší, než směrodatné odchylky dílčích výsledků referenčních souvrství bez výztužné mříže.

- V rámci všech posuzovaných souvrství zhuťněných v laboratoři bylo dosaženo velmi kvalitního spojení vrstev, kdy nejenže minimální požadovaná hodnota spojení vrstev mezi obrusnou a ložní vrstvou dle ČSN 73 6121 [9] byla splněna, ale byla také výrazně překročena.
- Potvrdily se již dříve publikované výsledky na konferenci Asfaltové vozovky 2023 [4] ze zkušebního úseku v Soběslavi, kde bylo dokumentováno, že i při použití sklovláknitých geosyntetik pod tenkou asfaltovou vrstvou tl. 30 mm, v kombinaci s asfaltovou emulzí s vyšším podílem asfaltu, lze dosáhnout velmi kvalitního spojení asfaltových vrstev. V případě sekce se samolepicí geomříží TAV 1 SAM byla průměrná smyková síla 26,1 kN (vývrty odebrány 1 měsíc po realizaci), resp. 35,9 kN (vývrty odebrané 22 měsíců po realizaci úseku), což bezpečně přesáhlo minimální požadovanou hodnotu spojení vrstev 15 kN.

Odolnost asfaltových souvrství vůči únavě

Za účelem ověření účinku použití výztužné sklovláknité mříže na omezení šíření trhlin a prodloužení životnosti prováděných oprav byly provedeny únavové zkoušky zkušebních trámčů. Výsledky provedených zkoušek odolnosti vůči únavě jsou zobrazeny graficky ve Wöhlerově diagramu na obrázku 6. Uvedené výsledky dokumentují:

- Přínos použití výztužné sklovláknité geomříže na zvýšení odolnosti vůči únavě – zatímco u referenčního nevyztuženého souvrství bylo dosaženo hodnoty poměrného přetvoření $\epsilon_{6, \text{ref}} = 168,7 \cdot 10^{-6}$ (při 1 milionu zatěžovacích cyklů), u souvrství s geomříží TAV 1 SAM bylo dosaženo hodnoty $\epsilon_{6, \text{vyzt.}} = 191,9 \cdot 10^{-6}$. Použitím výztužné geomříže tak došlo ke zvýšení parametru ϵ_6 o hodnotu $\Delta\epsilon_6 = 23,2$, tedy přibližně o 14 %.
- Nárůst počtu zatěžovacích cyklů souvrství s výztužnou geomříží – na základě porovnání počtu cyklů obou posuzovaných souvrství při relativním přetvoření ϵ_6 referenčního souvrství lze vyvodit jednoduchý závěr: pokud by zkušební těleso při daném zatížení dosáhlo konce zkoušky únavy po 1 milionu zatěžovacích cyklů, vyztužené těleso s geomříží TAV 1 SAM by pak dosáhlo konce zkoušky únavy po 2,39 milionech zatěžovacích cyklech.
- Byla dosažena poměrně silná korelace měřených hodnot, koeficienty determinace výsledků obou posuzovaných souvrství jsou téměř shodné: $R^2 \approx 0,9$.
- Sklony únavových přímk obou posuzovaných souvrství jsou velmi podobné: u referenčního souvrství je $B_{\text{ref.}} = 6,0420$, u souvrství s geomříží TAV 1 SAM je $B_{\text{vyzt.}} = 6,7565$.



Obrázek 6: Wöhlerův diagram s výsledky prováděné zkoušky odolnosti vůči únavě

Na fotografiích (obrázek 7) je dokumentován povrch zkušebních těles po ukončení zkoušky odolnosti vůči únavě. Z těchto fotografií je patrný rozdíl mezi povrchem boční stěny vyztuženého a nevyztuženého

zkušebního trámce, kde u vyztuženého trámce došlo k zastavení trhliny na rozhraní asfaltových vrstev u vyztužné mříže, zatímco u nevyztuženého trámce došlo k prostupu trhliny po celé výšce trámce.



Obrázek 7: Vlevo – zkušební trámce po provedení zkoušky odolnosti vůči únavě (nahore trámec s výztuží, dole trámec bez výztuže s trhlinou přes celou výšku), vpravo – detail trhliny vyztuženého trámce

Přínos použití sklovláknité vyztužné geomříže

Výsledky zkoušky odolnosti vůči únavě lze přímo aplikovat při návrhu vozovky: stanovené parametry poměrných přetvoření souvrství s geomříží TAV 1 SAM $\varepsilon_{6,vyzt.}$ a referenčního souvrství $\varepsilon_{6,ref}$ byly poníženy o dílčí součinitele rozptylu γ_{up} na hodnoty $\varepsilon_{6,5}$ (viz tabulka 3). Následně byly tyto hodnoty $\varepsilon_{6,5}$ dosazeny do rovnice 1 pro výpočet mezního počtu opakování zatížení dle TP 170 [23]. Nutno uvést, že byl použit základní vztah, který neuvažuje dílčí součinitele spolehlivosti, tyto součinitele však je možno při vzájemném porovnání laboratorně stanovených výsledků zanedbat. Vypočtené teoretické zvýšení hodnoty mezního počtu opakování zatížení uvádí následující tabulka 3. Na základě uvedené hodnoty mezního počtu opakování zatížení (v rovnici 1) lze konstatovat, že použití samolepicí sklovláknité geomříže TAV 1 SAM umožňuje zvýšit počet přejezdů o cca 144 %. Tento výsledek znamená, že vyztužené asfaltové souvrství, při stejném přetvoření a stejné tloušťce vrstev, je teoreticky schopno při použití ve vozovce odolat účinkům více než dvojnásobného počtu přejezdů nákladních automobilů. To je velmi přínosný výsledek z hlediska hospodárnosti návrhů vozovek a jejich oprav.

Tabulka 3: Vypočtené parametry ze zkoušky odolnosti vůči únavě

	Jednotka	Referenční souvrství bez výztuže	Souvrství s mříží TAV 1 SAM
Poměrné přetvoření ε_6 při $1 \cdot 10^6$ zatěžovacích cyklů ¹⁾	$\cdot 10^{-6}$ m/m	168,7	191,9
Koeficient determinace R^2	-	0,9160	0,8968
Sklon únavové přímky B	-	6,0420	6,7565
Koeficient rizika K_r	-	0,8977	0,9006
Dílčí součinitel rozptylu únavové zkoušky γ_{up}	-	1,1140	1,1104
Poměrné přetvoření $\varepsilon_{6,5}$ při 1 milionu zatěžovacích cyklů snížené o součinitel rozptylu γ_{up} ¹⁾	$\cdot 10^{-6}$ m/m	151,4	172,8
Teoretické zvýšení hodnoty mezního počtu opakování zatížení N při použití geomříže TAV 1 SAM	$\cdot 10^6$ m/m	1,00	2,44

Poznámky: ¹⁾Zkouška odolnosti vůči únavě byla prováděna při teplotě $t = 10$ °C a frekvenci $f = 10$ Hz.

$$N = 10^6 \cdot \left(\frac{\varepsilon_6}{\varepsilon_{ij}} \right)^B \quad \Delta N = 10^6 \cdot \left(\frac{\varepsilon_{6,5, \text{mříž TAV 1 SAM}}}{\varepsilon_{6,5, \text{referenční}}} \right)^B \quad \Delta N = 10^6 \cdot \left(\frac{172,8}{151,4} \right)^{6,7565} = 2,44 \cdot 10^6$$

Kde je: N mezní počet opakování zatížení (-),
 ΔN teoretické zvýšení mezního počtu opakování zatížení vlivem použité geomříže,
 $\varepsilon_{6,5}$ poměrné přetvoření při 10^6 zatěžovacích cyklů snížené o součinitel rozptylu (m/m),
 B sklon únavové přímky: $B = -1/b$ (-).

Rovnice 1: Mezní počet opakování zatížení vozovky dle [23] s dosazením stanovených hodnot poměrného přetvoření $\varepsilon_{6,5}$

Závěr

Příspěvek shrnul část poznatků získaných v rámci výzkumného projektu TA ČR CK01000033 [2]. Na základě výsledků provedených zkoušek je možné formulovat tyto hlavní závěry:

- V laboratoři a také in situ byla ověřena aplikace a funkčnost sklovláknité samolepicí geomříže TAV 1 SAM pod tenkou asfaltovou vrstvou ACO 8 tl. 30 mm:
 - Bylo dosaženo velmi kvalitního spojení vrstev zkušebních těles zhutněných segmentovým zhutňovačem v laboratoři. Posuzovaná souvrství nejenže splňují minimální požadovanou hodnotu normy ČSN 73 6121 [9], ale tento požadavek také výrazně překračují.
 - Průměrná smyková síla na spojení vrstev vývrtů s geomříží při použití tenké obrusné vrstvy ACO 8 tl. 30 mm byla téměř totožná se smykovou silou na vývrtech s obrusnou vrstvou ACO 11 tl. 40 mm.
 - Byla potvrzena dřívější pozitivní zkušenost s použitím geomříže pod tenkou asfaltovou vrstvou ACO 8 ze zkušebního úseku v Soběslavi, kde bylo dosaženo vysokých hodnot smykové síly na spojení vrstev [19].
 - Souvrství s výztužnou geomříží dosáhlo v porovnání se souvrstvími referenčními (bez výztuže) horšího spojení vrstev.
- Byl prokázán pozitivní účinek použití sklovláknité samolepicí geomříže TAV 1 SAM na zvýšení odolnosti souvrství vůči únavě:
 - Vlivem vyztužení došlo k nárůstu poměrného přetvoření ε_6 o hodnotu $\Delta \varepsilon_6 = 23,2$, tedy přibližně o 14 %.
 - Lze vyjádřit, že pokud by zkušební referenční těleso (bez výztužné mříže) při daném zatížení dosáhlo konce únavové zkoušky po 1 milionu zatěžovacích cyklů, těleso s geomříží TAV 1 SAM by dosáhlo konce zkoušky po cca 2,39 milionu cyklů.
- Přínos vyztužení byl dokumentován výpočtem mezního počtu opakování zatížení: použití samolepicí sklovláknité geomříže TAV 1 SAM teoreticky umožňuje zvýšení počtu přejezdů až o 144 %. Tento výsledek znamená, že asfaltová vozovka vyztužená geomříží může být schopna při stejném přetvoření a při stejných tloušťkách vrstev, odolat více než dvojnásobnému počtu přejezdů těžkých nákladních automobilů.
- Nutno zdůraznit, že kritickým momentem při používání výztužných geomříží v reálných podmínkách je jejich aplikace. Nesprávně provedená instalace těchto materiálů může vést k následným technologickým problémům a ke zhoršení spojení vrstev, což může v konečném důsledku technologii vyztužování zbytečně poškozovat. V současné době je dokončována revize technických podmínek TP 147 [5], ve kterých budou všechny aktuální poznatky o geosyntetikách zapracovány, a jak správci pozemních komunikací, tak i projektanti a zhotovitelé dopravních staveb získají aktuální nástroj pro návrh a použití výztužných prvků v konstrukci vozovky.

Závěrem je třeba dodat, že v rámci výzkumného projektu TA ČR CK01000033 [2] bylo realizováno několik zkušebních úseků s instalovanými výztužnými sklovláknitými prvky. Stav těchto úseků je nadále předmětem monitoringu a reálný přínos výztuží je tak nadále in situ ověřován.

Poděkování:

Příspěvek vznikl s finanční podporou Technologické agentury České republiky v rámci programu DOPRAVA 2020+ v rámci projektu CK01000033 „Prodloužení životnosti vozovek krajských a místních komunikací pomocí inovativních asfaltových vrstev s využitím vysokopevnostních kompozitních materiálů“ [2].

Zdroje:

- [1] TP 115 Opravy trhlin na vozovkách s asfaltovým krytem. Ministerstvo dopravy Odbor infrastruktury, 2009.
- [2] TA ČR CK01000033 Prodloužení životnosti vozovek krajských a místních komunikací pomocí inovativních asfaltových vrstev s využitím vysokopevnostních kompozitních materiálů: příjemce VUT v Brně, další řešitelé SAINT-GOBAIN ADFORS s.r.o., VIALIT SOBĚSLAV spol. s.r.o. (doba řešení 2020-2023).
- [3] ŠPERKA, Pavel, Dominik SADIL, Jan KUDRNA, Josef HOLOMEK, Štěpán BOHUŠ, Jakub VALENTA a Svatopluk STOKLÁSEK. Faktory ovlivňující kvalitu vyztužených asfaltových vrstev. Sborník Konference asfaltové vozovky 2021. Praha: PRAGOPROJEKT, a.s., 2021. ISBN 978-80-906809.
- [4] ŠPERKA, Pavel, Jan KUDRNA, Petr VESELÝ, Karel SPIES, Štěpán BOHUŠ a Jakub VALENTA. Asfaltové vrstvy s vyztužnými sklovláknitými mřížemi. Sborník Konference asfaltové vozovky 2023. Praha: PRAGOPROJEKT, a.s., 2023. ISBN: 978-80-906809-9-9.
- [5] TP 147 Užití asfaltových membrán a vyztužných prvků v konstrukci vozovky. Ministerstvo dopravy, Odbor silniční infrastruktury, 2010.
- [6] KUDRNA, Jan; Pavel ŠPERKA, Karel SPIES, Štěpán BOHUŠ, Jana KALÁŠKOVÁ a Jakub VALENTA. Metodika k využití vysokopevnostních kompozitních materiálů pro opravy a zesilování netuhých vozovek asfaltovými vrstvami: Návrh a provedení oprav netuhých vozovek krajských a místních komunikací s využitím vyztužných mezivrstev. 2024, 29 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací, Veveří 95, 602 00, Brno. (metodika certifikovaná uplatněná).
- [7] TP 87 Navrhování údržby a oprav netuhých vozovek. Ministerstvo dopravy, 2010.
- [8] ČSN EN 12697-48. Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 48: Spojení vrstev. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2023.
- [9] ČSN 73 6121. Stavba vozovek - Hutněné asfaltové vrstvy - Provádění a kontrola shody. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2023.
- [10] ČSN EN 12697-24. Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 24: Odolnost vůči únavě. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.
- [11] ČSN EN 13108-20 ED.2. Asfaltové směsi - Specifikace pro materiály - Část 20: Zkoušky typu. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2018.
- [12] ŠPERKA, Pavel. Asfaltové vozovky vyztužené sklovláknitými mřížemi. Brno, 2024. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí prof. Ing. Jan Kudrna, CSc.
- [13] OREŠKOVIĆ, Marko; BOHUŠ, Štěpán; VIRGILI, Amedeo a CANESTRARI, Francesco. Simplified Methodology for Fatigue Analysis of Reinforced Asphalt Systems. Online. Materials and Structures. 2024, roč. 57, č. 34, s. 1-15. ISSN 1871-6873. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1617/s11527-024-02305-1>. [cit. 2025-07-28].
- [14] EN 15381:2008. Geotextiles and geotextile-related products - Characteristics required for use in pavements and asphalt overlays. Brussels: European committee for standardization, 2008.
- [15] ČSN EN ISO 9864. Geosyntetika - Metody zkoušení pro zjišťování plošné hmotnosti geotextilií a výrobků podobných geotextiliím. Praha: Český normalizační institut, 2005
- [16] ČSN EN ISO 3146. Plasty - Stanovení tavného chování (teplota tání nebo rozsah teplot tání) semikrystalických polymerů kapilární tubicí a polarizačním mikroskopem. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2022.
- [17] ČSN EN ISO 10319. Geosyntetika - Tahová zkouška na širokém proužku. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [18] ČSN EN ISO 10722. Geosyntetika - Indexová metoda zkoušení pro vyhodnocení mechanického poškození při opakovaném zatěžování - Poškození způsobené zrnitým materiálem (laboratorní zkušební metoda). Česká agentura pro standardizaci, 2020.
- [19] ČSN EN 13596. Hydroizolační pásy a fólie - Hydroizolace betonových mostovek a ostatních pojížděných betonových ploch - Stanovení přilnavosti v tahu. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [20] ČSN EN 12697-33 +A1. Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 33: Příprava zkušebních těles zhutňovačem desek. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2023.
- [21] ARSENIE, Ioana Maria, Cyrille CHAZALLON, Jean-Louis DUCHEZ a Pierre HORNYCH. Laboratory characterisation of the fatigue behaviour of a glass fibre grid-reinforced asphalt

- concrete using 4PB tests. Road Materials and Pavement Design [online]. 2016, 18(1), 168-180 [cit. 2021-02-15]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1163280>
- [22] FIEDLER, Jiří. Poznatky z vyztužování asfaltových vozovek geosyntetiky ve Francii. Silnice mosty. Praha: Sdružení pro výstavbu silnic, 2021, 2021(4), 31-35. ISSN 1804-8684.
- [23] TP 170 Navrhování vozovek pozemních komunikací. Ministerstvo dopravy České republiky, 2024.

NETYPICKÉ PORUCHY NA VOZOVKÁCH NA MOSTECH A REVIZE ČSN 73 6242 NAVRHOVÁNÍ A PROVÁDĚNÍ VOZOVEK NA MOSTECH POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

ATYPICAL FAILURES ON ROADS ON BRIDGES AND REVISION OF ČSN 73 6242 DESIGN AND CONSTRUCTION OF PAVEMENTS ON ROAD BRIDGES

Ing. Jan Zajíček
Milan Beck, DiS., ESLAB, spol. s r.o.

Přítomnost hydroizolačního systému pod asfaltovými vrstvami mostních vozovek zvyšuje účinky působení vody na tyto asfaltové vrstvy. Při vzájemné kombinaci některých nepříznivých vlivů se tak mohou začít tvořit velmi zvláštní netypické poruchy. To nakonec urychlilo provedení revize ČSN 73 6242.

The presence of a waterproofing system under the asphalt layers of bridge pavements increases the effects of water on these asphalt layers. When some adverse effects are combined, very strange atypical pavements failures can begin to form. This eventually accelerated the revision of ČSN 73 6242.

Úvod

Na mostních vozovkách se v poslední době stále více setkáváme s netypickými poruchami, které začínají být vážný problém. Obvykle to začíná výrony vody (obrázek 1) nebo boulemi, ze kterých se tlačí voda (obrázek 2).



Obrázek 1: Výrony vody na mostní vozovce



Obrázek 2: Boule na mostní vozovce

Na povrchu pak zůstávají nánosy šedého povlaku (obrázek 3) a nakonec vše končí poklesem a rozpadem obrusné vrstvy (obrázek 4).



Obrázek 3: Nánosy šedého povlaku



Obrázek 4: Pokles a rozpad obrusné vrstvy

Přitom žádné opravy výměnou krytu nepomohou (obrázek 5). Zpočátku to vypadalo jako velká záhada. Jak se může vozovka propadat, když je pod asfaltovými vrstvami betonová mostovka?

Protože poruchy mají lokální charakter, nekvalitní asfaltovou směsí to být nemůže. Není přece možné, aby asfaltová směs dovážená po desítkách tun byla nekvalitní jen na několika plochách kolem 1 m² obsahujících desítky kg směsi. Podezření na nedostatečnou přilnavost izolace se též nepotvrdilo, na některých mostech se prováděly výřezy a izolace všude držela. Teprve až po zkušenostech asi s 20 mosty nastal konec dohadů a bylo možné zhodnotit fakta.



Obrázek 5: Opravy výměnou asfaltového krytu jsou neúčinné

Průvodním jevem poruch všude bylo:

- nespojení asfaltových vrstev,
- zjevný přetlak vody, nahromaděné ve vozovce,
- totálně erodovaná rozpadlá ložní vrstva,
- nerovná mostovka (zjištěno georadarem).

Výsledky pátrání po příčinách

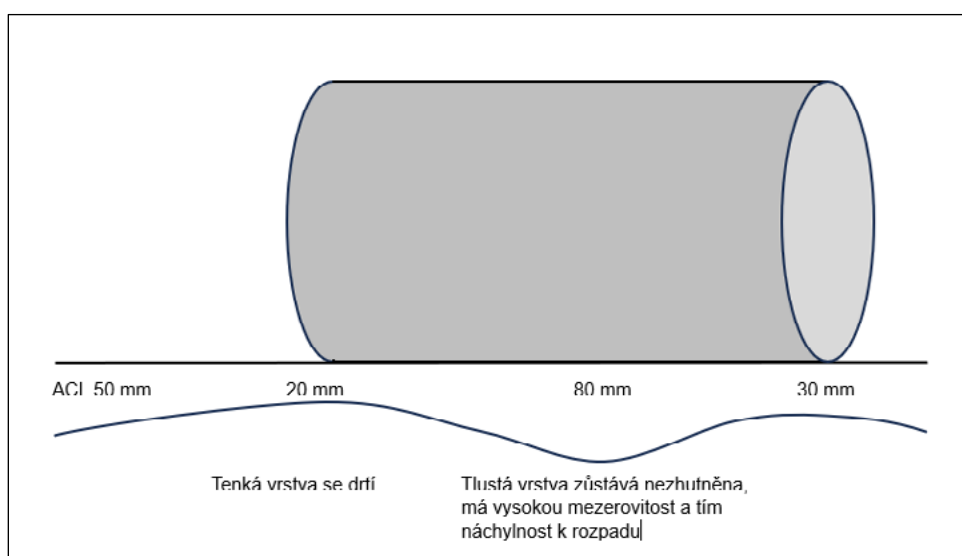
Na první pohled se to zdálo jasné. NEKVALITNÍ SPOJENÍ → VODA → PORUCHY.

Tato hypotéza má ale problém, voda nad izolací není vadou, proto tam přece ta izolace je. To by pak musely být poruchy na všech mostech, kde se voda ve vozovce prozradí tím, že vytéká z odvodňovacích trubek. Takže nezbývalo nic jiného než pátrat dál.

Nakonec výsledkem pátrání bylo, že prvotní příčinou poruch je posloupnost těchto událostí:

- Výskyt nerovností na mostovce, které se kopírují do izolace a ochranné vrstvy.
 - o K tomu přispívá disharmonie mezi ČSN 73 6242 a ČSN 73 6121, nerovnosti mostovky se měří pod 2 m latí (max. 8 mm), zatímco ložní a obrusná vrstva pod 4m latí (max. 8 mm/4 mm).
 - o Na některých mostech byly zjištěny nerovnosti násobně větší.
- Ložní vrstva pokládána na nerovný podklad má proměnlivou tloušťku, což znemožňuje její rovnoměrné a správné hutnění.
- Válec jedoucí po čerstvě položené ložní vrstvě:
 - o nad překrytými hrby příliš tenkou vrstvu drtí, protože je vystavena vysokým bodovým tlakům, navíc směs segreguje,
 - o nad překrytými prohlubněmi nemá šanci vrstvu zhutnit, když okraj jeho běhounu se opírá o vyšší okraje prohlubně (obrázek 6).
- Vrstva nad prohlubní tak zůstává prakticky nezhutněna a další dějství jsou pak následující.
- Ložní vrstva je buď mechanicky poškozena, nebo má vysokou mezerovitost a vyšší propustnost pro vodu.
- Vlivem nerovností izolačního systému se mění sklonové poměry a dochází k nedostatečným nebo opačným spádům.
- Voda zachycená izolací je tak nucena „téct do kopce“, což znesnadňuje její odchod do odvodňovacího systému mostu.
- Prohlubně nerovného izolačního systému mostu vyplněné mezerovitou ložní vrstvou se tak stávají trvalým rezervoárem vody.

- Mezerovitá ložní vrstva nemá vůči vodě potřebnou odolnost, protože asfaltové pojivo obalující zrna velmi tenkou vrstvou mění své vlastnosti natolik, že vlivem působení vody snadno degraduje a z povrchu zrn se odlupuje.
- Vše se ještě zhoršuje vlivem působení mrazu, který na mostě působí shora i ze spodu, zatímco běžnou vozovku její podloží ze spodu v zimě „ohřívá“.
- Nahromaděná voda atakuje rozhraní vrstev až se do něj natlačí, čímž naruší spojení a vytvoří kluznou plochu.
- Vlivem dopravního zatížení se voda při stlačení vrstvy opakovaně vytlačí tam a zpět, čímž dochází k nežádoucímu „pumpování“.
- Ložní vrstva se tak začne vlivem snížené odolnosti proti vodě a mechanickému namáhání vlivem „pumpování“ rozpadat.
- Uvolněná zrna kameniva a jemný prach jsou vodou vyplavovány na povrch, což vysvětluje vznik nánosů šedého povlaku na povrchu vozovky a proč v blízkosti styku ložní a obrusné vrstvy vznikají kaverny.
- Vlivem toho všeho nakonec dochází i k rozpadu obrusné vrstvy, která je vystavena extrémním deformacím, protože ztrácí v ložní vrstvě potřebnou oporu.



Obrázek 6: Vrstvu nad prohlubní nelze zhutnit

V místě poruch byly zjištěny kaverny vzniklé ztrátou hmoty degradované ložní vrstvy. Ta byla na některých mostech původně považována za směs bláta a spojovacího postřiku, protože nikdo nevěřil, že toto kdysi mohla být vrstva ACL 16 S (obrázky 7 a 8).

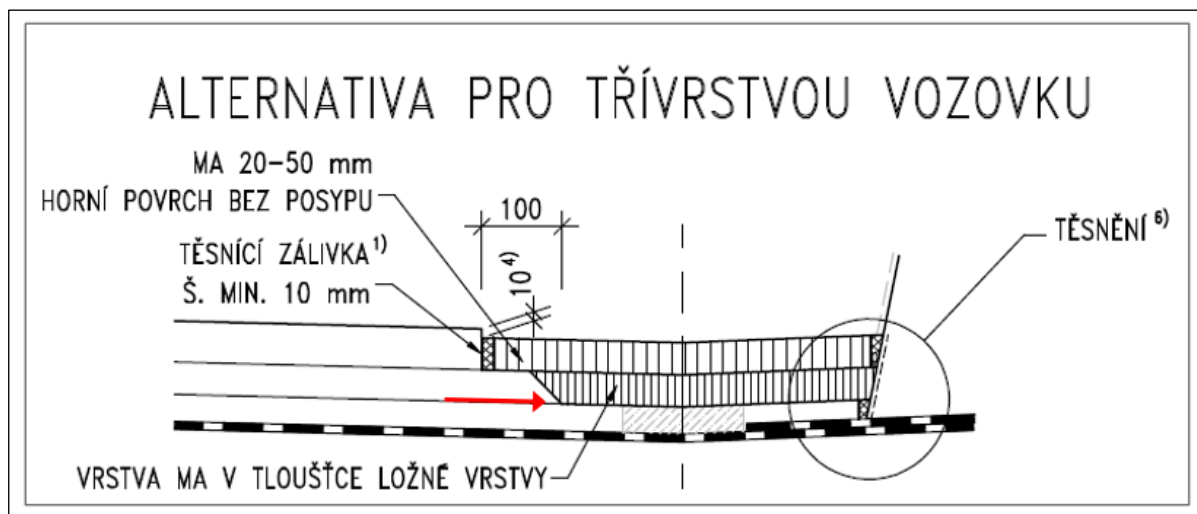


Obrázek 7: Kaverna po rozpadlé asfaltové vrstvě



Obrázek 8: Degradovaná vrstva ACL 16 S

Další problém je VL 4 – Mosty, 403.41; 406.12 (obrázek 9), kde většina vody teče již po MA a odtoku do drenážního polymerbetonu brání další vrstva z MA nad drenáží. Přitom stávající ČSN 73 6242 v čl. 4.3.1.8.1 upozorňuje, že: „Pokud je ochranná vrstva navržena z MA, je nutné zajistit odvedení vody z jejího povrchu, a to navržením vsakovací vrstvy z drenážního betonu na výši ochranné vrstvy.“



Obrázek 9: Vrstva MA brání odtoku vody do drenážního systému

Další vlivy, které mohou na rozpad asfaltových vrstev působit:

- Poněkud propustnější směsi ohrusné vrstvy SMA než dříve používané AC.
- Předávkování spojovací postřik, vytvářející vodotěsný prostor pod ohrusnou vrstvou (vznik puchýřů).
- Přehnané čištění asfaltových vrstev vodou před pokládkou dalších vrstev představuje přísun extrémního množství vody do konstrukce mostní vozovky, se kterým si žádný odvodňovací systém v krátkém čase neporadí.
- Je potřeba si uvědomit, že pohyb vody je velmi pomalý, protože je brzděn kapilárními silami.

Další problémy související s pokládkou asfaltových vrstev u mostních závěrů

Jde o napojení na přechodovou desku mostu v AC vrstvách. Při malých tloušťkách asfaltových vrstev na šikmém napojení „do vytracena“ dojde k segregaci až rozdělení směsi na jednotlivá samostatná zrna (obrázek 10).



Obrázek 10: Segregovaná a rozděšená směs při ukončení na šikmé ploše

Pak to může dopadnout jako na obrázku 11.



Obrázek 11: Charakteristické poruchy v okolí mostního závěru na přechodové desce

Revize ČSN 73 6142

V roce 2024 začala revize normy ČSN 73 6242 Navrhování a provádění vozovek na mostech pozemních komunikací, ve které byly provedeny úpravy s cílem uvedeným poruchám zabránit:

- Jakékoliv dodatečné vyrovnávky prováděné až hutněnými asfaltovými vrstvami vedou ke vzniku poruch, a proto je nezbytné udělat rovnou již mostovku.
- Pokud technologie provedení mostovky splnění požadavků na rovnost jejího povrchu neumožňuje, musí se již v projektu navrhnout jedno z možných opatření:
 - o vyrovnávací vrstva,
 - o broušení,
 - o drenážní žebra (zejména při opravách).
- Ve všech případech se jedná o standardní operaci, která musí být zahrnuta v projektové dokumentaci, a nelze ji tak považovat za opravu vady.
- Nové požadavky na rovnost mostovky:
 - o Původní požadavek byl max. 8 mm v podélném i příčném směru; měřeno latí o délce 2 m.
 - o Nový požadavek zavádí měření latí o délce 4 m.
 - o Navazující požadavky na rovnost ochranné vrstvy pak vycházejí z požadavků ČSN 73 6122.

Tabulka 1: Nové požadavky na kontrolní zkoušky rovnosti mostovky, ochranné a ložní vrstvy

Vlastnost			Požadavek	Zkouška	Min. četnost
Povrch mostovky a vyrovnávací vrstvy					
Nerovnost povrchu	V podélném směru	Všechny komunikace ^a	max. 12 mm	ČSN 73 6175	Průběžně
	V příčném směru	Komunikace čtyř a vícepruhové směrově rozdělené ^a	max. 12 mm		po 5 m
		Komunikace dvoupruhové ^b	max. 12 mm		
Povrch ochranné vrstvy a ložní vrstvy krytu vozovky					
Nerovnost povrchu	V podélném směru	Všechny komunikace ^a	max. 8 mm ^d	ČSN 73 6175	Průběžně
	V příčném směru	Komunikace čtyř a vícepruhové směrově rozdělené ^a	max. 8 mm ^d		po 5 m
		Komunikace dvoupruhové ^b	max. 4 mm ^d		

^a Měří se latí o délce 4 m; ^b Měří se latí o délce 2 m

Dále se musí provést oprava vzorového listu VL 4 – Mosty, 403.41; 406.12.

SPECIÁLNÍ ASFALTOVÉ EMULZE A NÁRODNÍ SPECIFIKACE PRO KATIONAKTIVNÍ EMULZE

SPECIAL ASPHALT EMULSIONS AND NATIONAL SPECIFICATIONS FOR CATIONIC EMULSIONS

Ing. Tomáš Koudelka, Ph.D., VIALAB CZ s.r.o.

Ing. Petr Bureš, VIALAB CZ s.r.o.

Tomáš Mery, VIALAB CZ s.r.o.

Požadavky na asfaltové emulze jsou v České republice specifikovány v ČSN 73 6132 (Stavba vozovek – Kationaktivní asfaltové emulze). V tomto předpisu jsou uvedeny požadavky na standardní typy emulzí, u kterých není většinou požadováno dosažení specifických vlastností. Mezi specifické požadavky může přitom patřit například úroveň modifikace pojiva, tokové chování emulze po aplikaci nebo i obsah pojiva v závislosti na zamýšleném použití. Například v případě geokompozitů se ukazuje, že je výhodnější použít emulze s vyšší obsahem pojiva než 60 % (maximální obsah pojiva pro spojovací postřiky) nebo u emulzí používaných na površích s vyšším sklonem je vhodné specifikovat minimální hodnoty dynamické viskozity. V tomto článku jsou popsány zkušenosti s praktickou aplikací speciálních emulzí, které nejsou specifikované v ČSN 73 6132. Jedná se o emulze navržené pro použití v kombinaci s geokompozity a emulze vhodné pro použití jako adhezní můstek na povrchy s vyšším sklonem. V závěru článku je uveden návrh na změnu ČSN 73 6132 týkající se emulzí pro spojovací postřiky.

Requirements related to bituminous emulsions in the Czech Republic are specified in ČSN 73 6132 (Road Building – Cationic bituminous emulsions). This document specifies requirements for standard types of emulsions, which are not usually required to achieve specific characteristics. Specific requirements may include, for example, the level of binder modification, the flow behaviour (viscosity) of the emulsion after application or even the binder content depending on the intended use. For example, in the case of geocomposites, it is preferable to use emulsions with a binder content higher than 60 % (maximum binder content for tack coat in ČSN 73 6132), or for emulsions used on higher slope surfaces, it is desirable to specify minimum dynamic viscosity values. This article describes experience with the practical application of special emulsions which are not specified in ČSN 73 6132. These are emulsions designed for geocomposites and emulsions suitable for use on higher slope surfaces as adhesive bridge. The article concludes with a proposal for an amendment to ČSN 73 6132 relating to emulsions for tack coats.

Úvod

Asfaltové emulze jsou uváděny na trh jako harmonizovaný výrobek splňující požadavky normy (ČSN) EN 13808:2013. V ČR stanovuje národní požadavky na kationaktivní asfaltové emulze (KAE) norma ČSN 73 6132:2021. V tomto dokumentu jsou stanoveny požadavky na jednotlivé druhy KAE podle zamýšleného účelu použití.

Asfaltové emulze jako takové jsou často asociovány s běžnými aplikacemi, jako je například spojovací postřik mezi asfaltové souvrství, emulze pro provádění recyklací za studena na místě nebo infiltrační postřik. Tyto druhy KAE lze považovat z hlediska dosavadních zkušeností za standardní a požadavky na jejich výkonnost jsou v současnosti dostatečné. V poslední době však vznikla potřeba použití také emulzí, které v normě ČSN 73 6132 specifikované nejsou nebo u kterých nejsou v normě uvedeny všechny vhodné metody pro jejich návrh a posouzení z hlediska jejich zamýšleného použití. V článku [1] byla popsána problematika okamžité přilnavosti a chování při štěpení rychlešterných KAE a možnosti jejího posouzení pomocí postupu, který je popsán v EN 16346 (tento postup není v ČSN 73 6132 uveden). V článku [2] je uvedeno, že při použití některých druhů KAE může dojít ke zrychlení prací při aplikaci geokompozitů nebo může být dosaženo kvalitnějšího spojení vyztužených asfaltových vrstev. V článku [3] je uvedeno, jak by bylo možné vylepšit specifikaci rychlešterných KAE pro nátěry z hlediska jejich funkční specifikace. Tyto emulze jsou často skladovány na střediscích správy a údržby, kdy je KAE často skladována bez míchání ve stacionární nádrži, v tomto případě se tak nabízí zkoušet například tendenci k sedimentaci KAE, která se však v normě ČSN 73 6132 nepožaduje. Z výčtu výše zřejmě vyplývá, že by bylo vhodné normu ČSN 73 6132 revidovat a uvést do souladu s nejnovějšími poznatky a požadavky.

Tento článek si klade za cíl popis zkušeností s aplikací speciálních KAE, které byly získány během realizace speciálních technologií na stavbách v roce 2024. Jednalo se o dvě stavby, pro které bylo nutné navrhnout KAE s konkrétními požadavky tak, aby funkční chování KAE během realizace odpovídalo potřebám dané stavby. Budou popsány tyto realizace:

- emulze pro aplikaci geokompozitů na dálniční vozovce s vysokým TDZ;
- emulze pro vytvoření adhezního můstku mezi UHPC a litým asfaltem.

Emulze pro aplikaci geokompozitů na dálniční vozovce s vysokým TDZ

Při opravách a výstavbě vozovek se v některých případech používají geokompozity. Geokompozit je sdružený materiál, který obsahuje geomříž a geotextilii. Tento typ výrobku se ve vozovkách používá zejména z důvodů omezení šíření reflexních trhlin ze spodních vrstev vozovky. Aplikace geokompozitů při pokládce asfaltového souvrství s sebou přináší vložení cizího prvku, který může významně narušit spolupůsobení jednotlivých vrstev a v konečném důsledku životnost vozovky nikoli prodloužit, ale naopak zkrátit. Proto je při aplikaci geokompozitů naprosto zásadní, aby byla zajištěna jejich správná aplikace. Jde zejména o jejich přilepení k podkladu, kdy klíčovou roli hraje právě množství, typ použitý KAE a dále pak typ a druh geokompozitu.

Při pohledu do normy ČSN 73 6132:2021 lze konstatovat, že emulze pro použití v kombinaci s geomkopozity definována není. Jsou definovány pouze emulze pro standardní spojovací postřik (PS), kdy jsou definovány KAE s nominálním obsahem pojiva 50 % až 60 %, s poměrně širokým rozsahem štěpitelnosti (třída 2 až 5 dle ČSN EN 13808, tj. < 110 až > 170), a s požadavkem na BM, který splňují všechny druhy vstupních PMB pro KAE dle ČSN 65 7222-1 nebo i silniční asfalty gradace 70/100, 100/150 i 160/220. S trochou nadsázky by se dalo říci, že takové požadavky splňuje každá rychloštěpná KAE na trhu.

Návrhy KAE pro použití s geokompozity

Při laboratorních návrzích KAE bylo pracováno s KAE, která obsahovala maximální dávkování pojiva pro PS dle ČSN 73 6132 (tj. 60 %) i s KAE, která měla obsah pojiva na úrovni 65 %. Ve všech případech se pracovalo s KAE, která byla modifikovaná. Použité vstupní pojivo bylo PMB 45/80-50 E podle ČSN 65 7222-1. Při návrzích KAE se měnilo její složení tak, aby se vyzkoušel nejenom vliv obsahu pojiva, ale také vliv hodnoty štěpitelnosti v závislosti na způsobu aplikace. Zároveň se zkoušely i geokompozity s různou plošnou hmotností textilie nebo pevností v tahu. Použité geokompozity byly složeny ze sklovláknité mříže, potažené polymerem a vrstvy netkané textilie. Počáteční zkoušky přilnavosti byly provedeny na povrchu typu asfaltový beton s MTD 0,77 mm dle ČSN EN 13036-1 (nefrézovaný povrch) a MTD 1,08 mm povrch frézovaný jemným bubnem. Zkouška přilnavosti byla vždy prováděna kalibrovanou váhou (mincířem) na ploše 1 m². Výsledky zkoušek jsou uvedeny v tabulkách 1 a 2.

Z prvotních výsledků vyplynulo, že při příliš nízkém dávkování v případě emulze, která rychleji štěpí (125), není možné geokompozit v některých případech aplikovat. Zároveň bylo zjištěno, že při teplotě aplikace 18 °C a následným deštěm po aplikaci (cca 6 hodin po nanesení KAE) nedošlo k dostatečnému vyštěpení KAE a přilnavost k povrchu tak byla negativně ovlivněna (obrázek 1 vpravo). Při aplikaci bylo rovněž zjištěno, že při použití emulze s vyšším obsahem pojiva (65 %) došlo k lepšímu přilnutí geokompozitu k povrchu. Z hlediska použitého geokompozitu se geokompozit s lehčím vlysem přichycoval k vyfrézovanému povrchu lépe. Geokompozit CG100L kopíroval povrch hůře než CG50L.

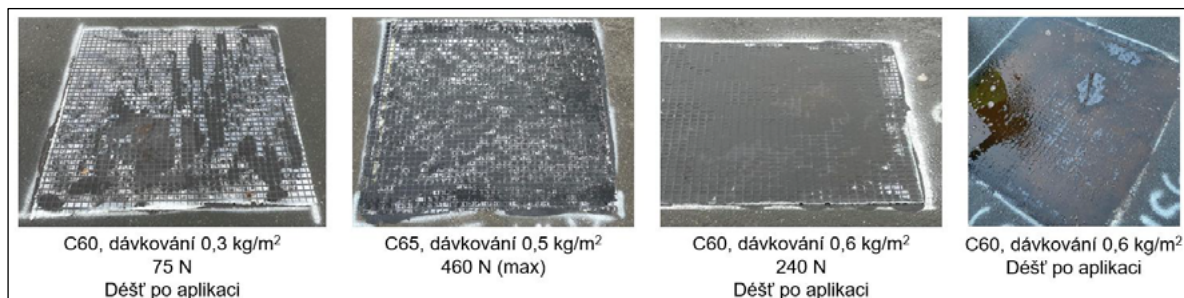
Tabulka 1: Výsledky zkoušek přilnavosti, různé KAE a různá dávkovaná množství, geokompozit CG100L, MTD 0,77 mm

Materiál	Emulze	Štěpitelnost -	T. ovzduší (°C)	T. podkladu (°C)	Dávkované množství (kg/m ²)	Přilnavost (N/m ²)
CG100L	C60BP4	192	18	15	0,3	75*
CG100L	C60BP4	192	18	15	0,6	240*
CG100L	C65BP4	125	15	9	0,3	nešlo aplikovat
CG100L	C65BP4	125	15	9	0,5	460

* Několik hodin po aplikaci pršelo

Tabulka 2: Výsledky zkoušek přilnavosti, KAE C65BP4, geokompozit CG100L a CG50L, MTD 1,08 mm (frézovaný povrch jemným bubnem)

Materiál	Emulze	Štěpitelnost -	T. ovzduší (°C)	T. podkladku (°C)	Dávkované množství (kg/m ²)	Přilnavost, (N/1 m ²)
CG50L	C65BP4	183	18	16	0,5	480
CG100L	C65BP4	183	21	18	0,5	380

**Obrázek 1: Příklady aplikace geokompozitů**

Na základě předběžných výsledků zkoušek byla pro další postup zvolena KAE C65BP4, jejíž vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 3. V této tabulce jsou rovněž uvedeny požadavky na PS z ČSN 73 6132:2021.

Tabulka 3: Vlastnosti KAE navržené pro použití s geokompozity, porovnání s požadavky na KAE pro PS v ČSN 73 6132

Vlastnost	Norma		Návrh	ČSN 73 6132
Obsah pojiva	ČSN EN 16849	%	64,9 (tř. 7)	max 60 (tř. 6)
Zbytek na síť	ČSN EN 1429	%	0,03 (tř. 4)	≤ 0,5 (tř. 4)
Chování při štěpení	ČSN EN 13075-1	-	176 (tř. 4)	max. 230 (tř. 2-5)
Tendence k sedimentaci	ČSN EN 12847	%	3,6 (tř. 2)	NR
Bod měknutí	ČSN EN 13074-1, ČSN EN 1427	°C	57,6 (tř. 3)	≥ 35 (tř. 8)
Penetrace	ČSN EN 13074-1, ČSN EN 1426	0,1 mm	54 (tř. 3)	≤ 220 (tř. 5)
Vratná duktilita	ČSN EN 13074-1, ČSN EN 13398	%	75 (tř. 4)	NR
Koheze (Vialit)	ČSN EN 13074-1,2, ČSN EN 13588	J/cm ²	1,1 (tř.4)	≥ 0,7 (tř. 5)

*NR – Není požadováno

Pro navazující zkoušky in situ byly vybrány tyto materiály:

- C65BP4 (SBS modifikovaná rychloštěpná KAE dle ČSN EN 13808, PMB 45/80-50 E),
- CG50L (Kompozitní výztužný systém do asfaltu dle ČSN EN 15381, 17 g vlys).

Cílem navazujících zkoušek in situ bylo mimo jiné ověřit vliv použití ochranného postřiku z vápenného mléka (viz ČSN 73 6129) a vliv aplikace geokompozitů, tj. zda má při aplikaci vliv skutečnost, zda je geokompozit pouze přitlačen, nebo dojde k proklepání a použití např. koštěte při ruční pokládce. Výsledky zkoušek ze zkušebního úseku jsou uvedeny v tabulce 4 a fotky z aplikace jsou zobrazeny na obrázku 2.

Tabulka 4: Výsledky industriálních zkoušek z pokusného úseku, MTD 2,3 mm

Označení místa odběru:	1	1-1	2	2-2	4	4-4
Výztužný prvek:	CG50L	CG50L	CG50L	CG50L	CG50L	CG50L
Zbytkové pojivo (kg/m ²):	0,7	0,9	0,7	0,9	0,7	0,9
Vápenné mléko	ano	ano	ne	ne	ne	ne
Způsob aplikace	proklepání	proklepání	proklepání	proklepání	pouze přitlačen	pouze přitlačen
Přilnavost geokompozitu (N/m ²)	520	510	520	500	420	520
Spojení vrstev, ČSN 73 6160* (kN)	23,6	19,7	21,5	18,8	16,1	18,0

*Zkoušky spojení vrstev byly provedeny na vývrtech o průměru 150 mm

Z výsledků v tabulce 4 vyplynulo, že způsob aplikace geokompozitu a množství KAE má vliv na spojení vrstev. Pokud dojde u geokompozitu pouze k jeho přitlačení a není zajištěno dostatečné vtlačení KAE do geotextilie, tak dojde ke zhoršení spojení vrstev. Pokud dojde k vyššímu dávkování KAE, než je optimum, tak dojde ke zhoršení spojení vrstev. Při použití vápenného mléka bylo spojení vrstev vyšší, než v případě, kdy vápenné mléko použito nebylo.



Obrázek 2: Industriální aplikace, zkušební úsek pro zkoušky geokompozitů

Na obrázku 3 je zobrazena realizace geokompozitů na komunikaci dálničního typu. Jako první krok se aplikuje KAE, následně geokompozit, který je pomocí mechanizace zatlačen do aplikované KAE, aby došlo k penetraci vlysu. V posledním kroku, po vyštěpení KAE, se aplikuje vápenný postřik. Doporučení k aplikaci geokompozitů a volbě KAE jsou uvedena v tabulce 5.



Obrázek 3: Realizace na stavbě dálničního typu

Tabulka 5: Poznatky a doporučení z aplikace geokompozitů

Skutečnost	Vliv
KAE s vyšším obsahem pojiva	Méně vody, která může být uzavřena pod geokompozitem, lepší přilnutí geokompozitu k podkladu.
KAE s delší štěpitelností	Dostatečný čas pro aplikaci a pro penetraci KAE do geotextilie, což vede k lepším hodnotám spojení vrstev.
KAE a její dávkování	Závislé na povrchu (MTD), malá dávka znamená nepřilnutí nebo nemožnost aplikace prvku, zatímco vysoká dávka může způsobit naopak pokles spojení vrstev.
Použití vápenného mléka	Pozitivní vliv na spojení vrstev.
Způsob přichycení geokompozitů	Vliv průsaku KAE má pozitivní vliv na hodnoty spojení vrstev, pokud je geokompozit na KAE pouze položen a nedojde k jeho dostatečné penetraci KAE, tak se zhoršuje spojení vrstev.
Klimatické podmínky	Děšť i několik hodin po aplikaci výrazně snižuje přilnavost prvku k podkladu. Proces štěpení při dobrých klimatických podmínkách může trvat i více než 24 hodin, a proto se doporučuje provádět pokládku asf. směsí nejdříve následující den po aplikaci geokompozitu.

Emulze pro aplikaci adhezního můstku na mostech

Během rekonstrukce mostů je možné použít technologie UHPC (ultra high performance concrete), která může sloužit jako vrstva zvyšující únosnost, životnost konstrukce a zároveň jako vyrovnávací vrstva. Při rekonstrukci mostu, kde došlo k aplikaci technologie speciální KAE, se stalo, že vlivem složitosti rekonstrukce mostu a novosti technologie UHPC došlo k určitým posunům v harmonogramu. Z toho důvodu se přistoupilo k použití inovativního řešení v podobě adhezního nátěru (můstku), který se standardně nepoužívá. Navržené konstrukční řešení s aplikací litého asfaltu přímo na mostovku z UHPC nepatří mezi standardní řešení (viz ČSN 73 6242) a doposud s ním nebyly žádné zkušenosti. Při návrhu se vycházelo z informací uvedených v článku [4], kde je uvedeno, že UHPC slouží i jako hydroizolační vrstva.

Během laboratorních zkoušek byla navržena dvě možná řešení pro provedení spojení vrstev UHPC a litého asfaltu. V prvním případě se jednalo o použití kationaktivních asfaltových emulzí (KAE), v druhém pak o použití modifikovaných asfaltů (PMB). V prvním kroku došlo k ověření základních vlastností navržených materiálů, zatímco v následující části projektu byly navržené materiály zkoušeny přímo na zkušebním poli.

Navržené emulze lze dle ČSN EN 13808:2013 klasifikovat jako C60BP4 a C65BP4. Použitá asfaltová pojiva byly polymerem modifikované asfalty, které lze dle ČSN EN 14023:2010 jako PMB 45/80-50 a PMB 40/100-75. Použité materiály a jejich specifikace jsou uvedeny v tabulce 6.

Tabulka 6: Zvolené materiály pro ověření jejich vhodnosti pro použití jako adhezní můstek

Obchodní název	Označení
Polybitume GE	PMB 45/80-50
Polybitume EX	PMB 40/100-75
Emultech FE	C60BP4
Emultech FE65	C65BP4

Navržené asfaltové emulze jsou SBS modifikované emulze, které jsou navrženy tak, aby nezpůsobovaly korozi betonové výztuže (neobsahují HCL). Pojiva Polybitume se vyznačují dobrou homogenitou, elasticitou, adhezivitou a dlouhou skladovací stabilitou.

Asfaltové emulze byly navrženy tak, aby se posoudil zejména vliv obsahu pojiva v KAE při její aplikaci na vrstvu UHPC. Pro PS je dle ČSN 73 6132:2021 možné použít KAE s maximálním obsahem pojiva 60 %. Přesto byla navržena i KAE (Emultech FE65), která měla obsah pojiva vyšší, a to z toho důvodu, že obsahuje méně vody, a lze tak předpokládat, že při použití této emulze bude příznivější (rychlejší) průběh štěpení. Dále byla použita přísada modifikující viskozitu emulzí v závislosti na smykové rychlosti (emulzi lze snadno aplikovat, po nástřiku ale nedochází ke stékání emulze v případě vyššího sklonu podkladu).

PMB pojiva byla volena s ohledem na stupeň modifikace, kdy PMB 45/80-50 je nízce modifikovaný asfalt, zatímco pojivo PMB 40/100-75 je vysoce modifikovaný asfalt používaný například na SAMI vrstvy.

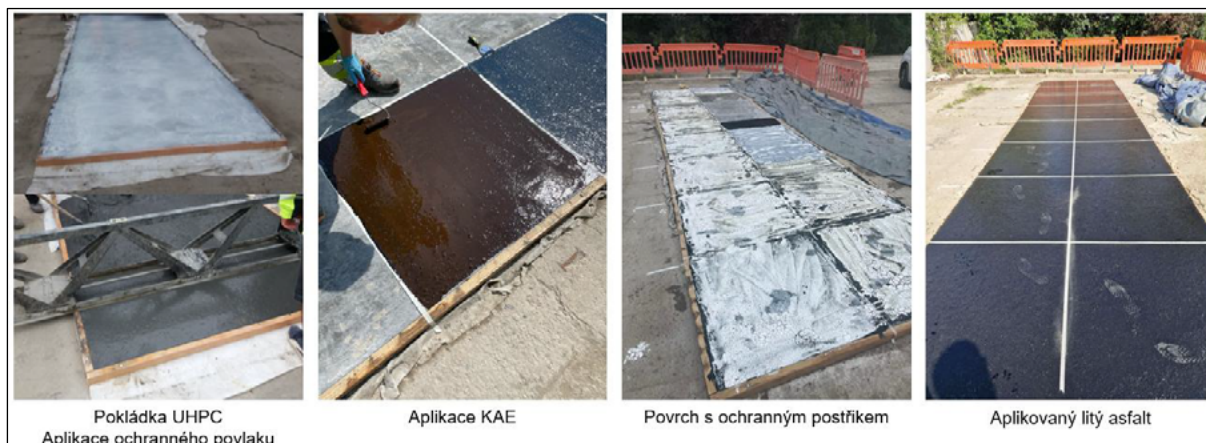
Poznatky ze zkušebního úseku

Zkušební úsek byl vytvořen z UHPC betonu simulujícího mostovku mostu a následně rozdělen na 16 čtverců o rozměrech $\approx 1 \text{ m}^2$, přičemž 4 čtverce byly provedeny tak, že z nich nebyl odstraněn ochranný povlak UHPC (parafinový nástřik, který je hydrofobní). Tímto způsobem byl vyzkoušen nejenom vlastní materiál, který má sloužit jako přechodový můstek mezi UHPC a litým asfaltem, ale i vliv stavu podkladu na aplikaci KAE nebo PMB. Zkušební pole je zobrazeno na obrázku 4.

Asfaltové emulze byly nanášeny při teplotě, která odpovídala teplotě okolí, tj. cca 30°C , zatímco asfaltová pojiva byla nanášena při teplotě min. 190°C . Po zajištění dostatečné doby na vyštěpení emulzí (rychlost štěpení emulzí je závislá na mnoha faktorech, jako je například okolní teplota, vzdušná vlhkost i vlhkost podkladu, teplota vlastní emulze, obsah pojiva aj.) a vychladnutí asfaltové membrány byl aplikován separační postřik z vápenného mléka v konstantním množství $0,25 \text{ kg/m}^2$. Takto ošetřený povrch byl po odpaření vody z vápenného mléka přikryt plachtou a připraven na následnou aplikaci litého asfaltu.

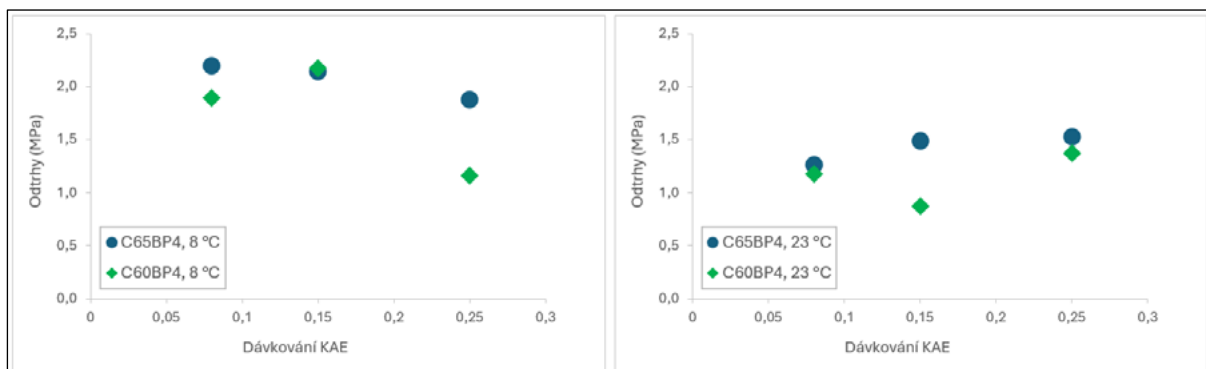
Po aplikaci litého asfaltu došlo s odstupem několika dní k odběru vývrtů o průměru 150 mm s návrtem 50 mm až do vrstvy UHPC a následnému dodání vzorků do laboratoří. Na těchto vývrtech byla následně provedena zkouška pevnosti v tahu povrchových vrstev dle přílohy B, ČSN 73 6242 asfaltu.

Z hlediska výsledků zkoušek pevnosti v tahu lze konstatovat, že všechny zkoušené varianty splnily požadavek normy ČSN 73 6242 na minimální hodnotu přilnavosti v tahu pro izolační systém podle tabulky 4, ČSN 73 6242. Nicméně například řešení aplikace pojiva PMB 45/80-50 bylo vyhodnoceno jako nevhodné, protože pojivo mělo při aplikaci litého asfaltu tendenci probublávat a následně i ovlivnit vlastnosti litého asfaltu a tuto skutečnost výsledky zkoušky pevnosti v tahu nepodchytí, a proto je vždy nutné posuzovat nejenom výsledky samotné, ale zejména i chování materiálů při provádění prací. Např. bylo zjištěno, že při aplikaci KAE na ošetřený povrch má emulze tendenci stékat z povrchu. Z toho důvodu je potřeba z UHPC před aplikací KAE důkladně odstranit parafinový nástřík.

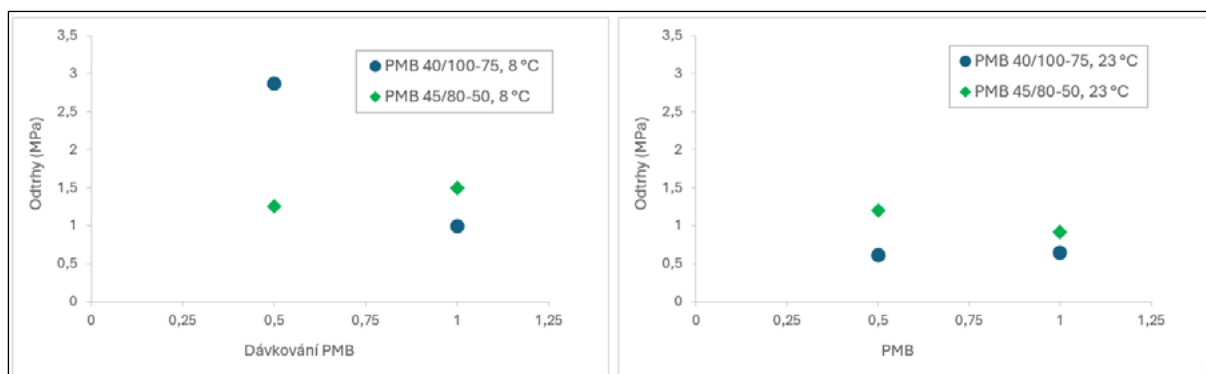


Obrázek 4: Zkušební pole pro posouzení vlastností KAE a PMB jako adhezního můstku

Na obrázku 5 jsou zobrazeny výsledky přilnavosti v tahu při porovnání emulzí C65BP4 a C60BP4 a na obrázku 6 výsledky pro PMB 40/100-75 a PMB 45/80-50. Na obrázcích vlevo je uvedeno srovnání pro teplotu 8 °C, zatímco na obrázcích vpravo 23 °C. S KAE, která měla vyšší obsah asfaltu, bylo dosaženo v průměru vyšších hodnot napětí při porušení. U PMB 40/100-75 byl zase pozorován výrazný vliv dávkování pojiva. Při dávkování 0,5 kg a teplotě 8 °C byla např. hodnota více než dvojnásobná oproti PMB 45/80-50. Přestože v průměru výsledky PMB 45/80-50 nevypadají špatně, tak toto pojivo bylo vyřazeno jako vhodné pro aplikaci, protože změkčovalo litý asfalt, tj. zvyšovalo se číslo tvrdosti a jeho přírůstek.

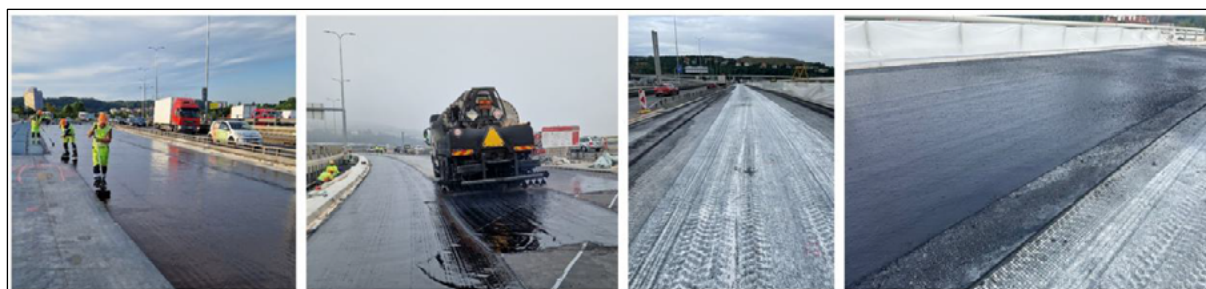


Obrázek 5: Výsledky zkoušek přilnavosti v tahu, KAE, 8 °C a 23 °C, očištěný povrch



Obrázek 6: Výsledky zkoušek přilnavosti v tahu, PMB, 8 °C a 23 °C, očištěný povrch

Při zhodnocení všech výsledků vyplynulo, že z hlediska použití KAE byla nejvhodnější varianta C65BP4 při dávkování zbytkového pojiva na úrovni 0,2 kg/m². Z hlediska dávkování PMB 40/100-75 bylo dostatečné dávkování na úrovni 0,5 kg/m², vyšší dávkování hodnoty zhoršovalo. Na obrázku 7 jsou zobrazeny fotky z realizace, vlevo je zobrazena aplikace KAE, následuje aplikace PMB a ochranného postřiku a vpravo je pak finální vrstva litého asfaltu.



Obrázek 7: Průběh prací, aplikace KAE, PMB, ochranného postřiku a litého asfaltu na mostě

Vlastnosti navržené KAE C65BP4 jsou uvedeny v tabulce 7. Emulzi bylo nutné navrhnout tak, aby při aplikaci nedocházelo k jejímu stékání, protože sklon podkladu byl až 6 %. Proto má emulze Emultech FE65 výrazně vyšší viskozitu než emulze Emultech FE (viskozita při teplotě 40 °C a při smykové rychlosti 2s⁻¹ je < 100 mPa.s).

Tabulka 7: Vlastnosti KAE navržené pro použití jako adhezni můstek, porovnání s požadavky na KAE pro PS v ČSN 73 6132

Vlastnost	Norma		Návrh	ČSN 73 6132
Obsah pojiva	ČSN EN 16849	%	65,0 (tř. 7)	max 60 (tř.6)
Zbytek na síť	ČSN EN 1429	%	0,04 (tř. 4)	≤ 0,5 (tř. 4)
Chování při štěpení	ČSN EN 13075-1	-	161 (tř. 4)	max. 230 (tř. 2-5)
Tendence k sedimentaci	ČSN EN 12847	%	3,0 (tř. 2)	NR
Stanovení pH	ČSN EN 12850	-	6,6	neuvedeno
Dynamická viskozita, 2s ⁻¹	ČSN EN 13302 (40 °C)	mPa.s	661 (tř. 11)	NR
Dynamická viskozita, 50s ⁻¹	ČSN EN 13302 (40 °C)	mPa.s	138 (tř. 11)	NR
Bod měknutí	ČSN EN 13074-1, ČSN EN 1427	°C	52,4 (tř. 4)	≥ 35 (tř. 8)
Penetrace	ČSN EN 13074-1, ČSN EN 1426	0,1 mm	54 (tř. 3)	≤ 220 (tř. 5)
Vratná duktilita	ČSN EN 13074-1, ČSN EN 13398	%	58 (tř. 5)	NR
Koheze (Vialit)	ČSN EN 13074-1,2, ČSN EN 13588	J/cm ²	1,1 (tř. 4)	≥ 0,7 (tř. 5)

Závěr

V rámci tohoto článku byly představeny návrhy asfaltových emulzí, které nejsou specifikované v národní normě pro specifikaci KAE ČSN 73 6132:2021 a jejichž některé vlastnosti se oproti standardním KAE odlišují. Jedná se o emulze vhodné pro použití s geokompozity a o emulze vhodné pro použití na

mostech. Obě emulze lze zařadit mezi emulze pro spojovací postřiky. Na základě výsledků z pokusných úseků a také z následných realizací lze doporučit následující:

- Zavést možnost použití KAE pro PS s vyšším obsahem pojiva než 60 %. Pro PS pro geokompozity lze dle údajů v literatuře uvažovat i s vyšším obsahem pojiva než 65 %.
- Třída štěpitelnosti pro KAE pro geokompozity by měla být tř. 4 nebo tř. 5. Třída štěpitelnosti pro KAE pro adhezní můstek by měla být tř. 3 nebo tř. 4.
- Bod měknutí zpětně získaného pojiva (ČSN EN 13074-1) z KAE pro geokompozity a KAE pro adhezní můstek by měl být minimálně 46 °C až 50 °C.
- Koheze zpětně získaného pojiva (ČSN EN 13074-1) z KAE pro geokompozity a KAE pro adhezní můstek by měl být minimálně 1,0 J/cm².
- Dynamická viskozita u emulze pro KAE pro aplikaci jako adhezní můstek by měla odpovídat alespoň třídě 11.

V tomto článku bylo prakticky demonstrováno, jak by měl probíhat návrh nestandardních materiálů, kdy nejdříve dojde k laboratorním návrhům a ověření jejich základních návrhových parametrů, následně dojde k realizaci zkušebního úseku, kde se ověří nebo vyvrátí předpoklady z laboratoře, a následně se provede realizace na stavbě. V našem případě bychom rádi vyzdvihli spolupráci s firmou Eurovia – závod Kolín a dalšími partnery, kteří se podíleli na projektech.

Zdroje:

- [1] Koudelka, T., Bureš, P., Komínek, Z., Mery, T. Posuzování přilnavosti pomocí TS/PRen 16346 a vývoj asfaltových rychleštěpných emulzí [online]. 2019, 2019, 8, 1-10 [cit. 2025-17-07]. Dostupné z: <https://asfaltove-vozovky.cz/rocniky/rocnik-2019/>
- [2] Šperka, P., Kudrna, J., Veselý, P., Spies, K., Bohuš, Š., Valenta, J. Asfaltové vrstvy s výstužnými sklovláknitými mřížemi [online]. 2025, 2023, 8, 1–10 [cit. 2025-17-07]. Dostupné z: <https://asfaltove-vozovky.cz/rocniky/rocnik-2023/>
- [3] Koudelka, T. Asfaltové emulze, nastavení požadavků pro výběrová řízení v ČR [online]. 2025, 2023, 8, 1–14 [cit. 2025-17-07]. Dostupné z: <https://asfaltove-vozovky.cz/rocniky/rocnik-2023/>
- [4] Vráblík, L., Coufal, R., Vítek, J., Využití UHPC při rekonstrukci Barrandovského mostu v Praze, Silnice mosty 2025, 1, 31–33

STABILIZOVANÉ VÁPENNÉ MLÉKO PRO OCHRANU SPOJOVACÍHO POSTŘIKU

STABILIZED LIME MILK FOR TACK COAT PROTECTION

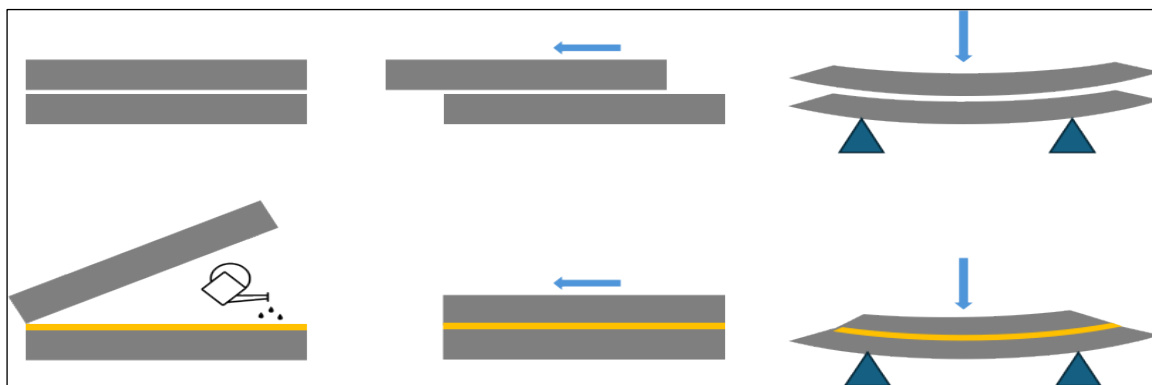
Bruno Marcant, Maxence Hellary, ValoChem, Francie/France

Mechanické vlastnosti vozovky závisí na úplném přenesení napětí mezi jednotlivými asfaltovými vrstvami. Pro zajištění dokonalého spojení vrstev hrají klíčovou roli asfaltové emulze. V průběhu pokládky však může těžká stavební technika pojíždět po spojovacím postřiku, což často způsobí částečné nebo plošné odtržení spojovacího postřiku a jeho přilepení na pneumatiky vozidel. Tím účinnost pevnosti ve spojení klesá, snižuje se trvanlivost vozovky, a navíc dochází ke znečišťování vozovek asfaltem v okolí staveniště. Ošetření povrchu spojovacího postřiku vápenným mlékem je nákladově efektivním řešením pro zachování plné účinnosti tohoto postřiku. Tato technologie byla vyvinuta v posledních 15 let ve Francii a Belgii, kde je široce (a v mnoha případech povinně) využívána. Úspěšně je prováděna také ve Španělsku, Itálii, Německu, Rakousku, Švýcarsku nebo v Polsku a dále se rychle rozvíjí. Příspěvek popisuje výhody této technologie a následně je zaměřen na její použití na stavbách, včetně použití inovativního vápenného mléka s prodlouženou skladovací stabilitou. V závěru je představena nová zkušební metoda s využitím DSR, která byla vyvinuta společností ValoChem pro optimalizaci dávkovaného množství vápenného hydrátu.

Mechanical performance of pavement relies on the complete transmission of stresses between its different layers. To ensure this, tack coat emulsions play a key role in bonding the layers together. However, during laydown, heavy equipment may drive over the tack coat, causing their tires to tear away all or part of it. This compromises the bonding efficiency, reducing pavement durability and leading to bitumen-based soiling around the job site. Spraying lime milk on top of the tack coat is a cost-efficient solution to preserve it. This technology has been developed over the past 15 years in France and Belgium, where it is widely used and often mandatory. It has also been successfully applied in Spain, Italy, Germany, Austria, Switzerland, and Poland, and is quickly developing. The advantages of this technology will be described, followed by a focus on its application on job sites, including the use of an innovative lime milk with extended stability. Finally, we will introduce a new method based on Dynamic Shear Rheology, which we have developed to optimize the quantity of lime milk applied.

Spojovací postřik a trvanlivost vozovky

Mechanická výkonnost vozovky závisí na úplném přenesení napětí mezi jejími jednotlivými vrstvami (obrázek 1). Tohoto přenosu napětí se dosahuje dokonalým spojením jednotlivých konstrukčních vrstev.



Obrázek 1: Mechanická výkonnost vozovky závisí na úplném přenesení napětí mezi jejími jednotlivými vrstvami

Několik studií prokázalo, že nedokonalá nebo špatná přilnavost mezi vrstvami vede k významnému zkrácení životnosti vozovky. Peattie [1] například identifikoval množství problémů se spojením vrstev u nových staveb ve Velké Británii v 70. letech, které vedly k předčasnému selhání vozovky. Na kvantitativním základě Roffe a Chaignon [2] odhadli, že v případě chybějícího spojení se životnost vozovky snížila o 60 %, a podobné hodnoty uvádějí i další studie, například studie Browna a Bruntona [3].

V roce 2003 vedlo předčasné selhání testovací dráhy NCAT [4] k vyšetřování, které prokázalo, že příčinou byla separace vrstev, i když byla pro spodní vrstvu použita směs typu RBL.

Obvykle se spojení vrstev zajišťuje nanesením adhezního spojovacího postřiku. Ten může být proveden jak z asfaltu, asfaltu s přísadou fluxantu nebo nejčastěji z asfaltové emulze (většinou kationové). Asfalt může být modifikovaný, nebo nemodifikovaný.

Kalifornské ministerstvo dopravy nedávno vydalo revidované pokyny pro provádění spojovacích postřiků [5] a k tomuto tématu lze najít i několik dalších technických dokumentů [6].

K charakterizaci spojení mezi vrstvami se používá několik testů, a to buď v laboratoři nebo přímo v místě provádění [7]:

- Torque Bond Test (TBT; zkouška pevnosti v tahu)
- Shear Bond test (SBT; zkouška pevnosti ve smyku)
- Tensile Adhesion Test (TAT; zkouška přilnavosti v tahu)

V rámci francouzského národního projektu DVDC, který řeší dlouhodobou životnost vozovek, byl v roce 2019 vyvinut a úspěšně ověřen systém pro měření tahové pevnosti in-situ [8].

Jedním z častých problémů, se kterými se na staveništi setkáváme, jsou pojezdy těžké staveništní techniky po spojovacím postřiku, kde hrozí riziko, že pneumatiky odtrhnou tenkou vrstvu nástriku nebo její část. Obrázky 2 a 3 ukazují typické příklady. Pokud k takové situaci dojde, spojovací postřik se výrazně zhorší a účinnost spojení vrstev se výrazně sníží, což má negativní vliv na trvanlivost vozovky.



Obrázek 2: Častým problémem na staveništi jsou pojezdy těžké staveništní techniky po spojovacím postřiku



Obrázek 3: Častým problémem na staveništi jsou pojezdy těžké staveništní techniky po spojovacím postřiku

Když tento problém vznikne, musí se pracovníci současně vypořádat i se znečištěním asfaltem na vozovkách v okolí staveniště. To pro dodavatele znamená další náklady.

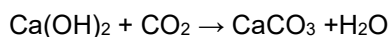
Vápenné mléko jako ochrana spojovacího postřiku

Používané technologie

K ochraně spojovacího postřiku je k dispozici několik technologií [9]:

- použití tvrdého asfaltu pro výrobu emulze spojovacího postřiku: tato technologie funguje dobře při mírných teplotách, ale má omezenou účinnost při vysokých teplotách v létě,
- nastříkání tenké vrstvy vody (400 až 1 000 g/m²). V důsledku rychlého odpařování v létě je nutné nepřetržité stříkání, což není proveditelné,
- nástřik vápenného mléka (asi 11 g/m² vápenného hydrátu).

V roce 1996 byly podány 2 patenty, které navrhovaly nanášení bílého produktu na povrch spojovacího postřiku, aby se snížila jejich teplota a tím i jejich přilnavost k pneumatikám [10, 11]. Ačkoli bylo uváděno několik minerálních přísad, vápenné mléko se ukázalo jako preferované řešení díky své nízké ceně a široké dostupnosti. Po nanesení na povrch se voda odpaří a vápenný hydrát se spojí s CO₂ přítomným ve vzduchu a vytvoří tenkou vrstvu bílého CaCO₃, přičemž uvolní další molekulu vody:



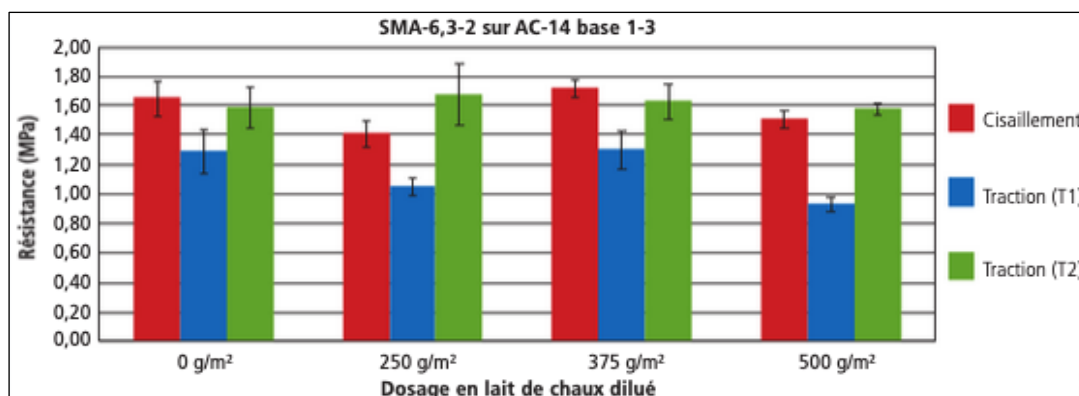
Několik let se tato technologie příliš neujala. K dispozici byly pouze vápenná mléka s obsahem sušiny do 30 %, což výrazně zvyšovalo náklady na dopravu vody. Tyto produkty měly také poměrně velmi vysokou viskozitu a rychlou sedimentaci, což ztěžovalo manipulaci s nimi.

V roce 2005, kdy se na trhu objevilo nové vápenné mléko s 45% obsahem sušiny, se francouzský provozovatel dálnic SANEF rozhodl tuto technologii zavést k ochraně spojovacích vrstev. K aplikaci produktu přizpůsobili rozstřikovače solanky, které se v létě nepoužívaly. Postupně byla aplikace optimalizována a bylo zjištěno, že 45% vápenné mléko je třeba zředit vodou v poměru 1:10 a poté aplikovat v množství cca 250 g/m². Tento úspěch rychle napodobily další firmy zabývající se pokládkou asfaltových vrstev ve Francii a dnes většina projektů výstavby silnic v zemi vyžaduje aplikaci ochranné vrstvy a ukládá značné pokuty, pokud je staveniště znečištěno zbytky asfaltu.

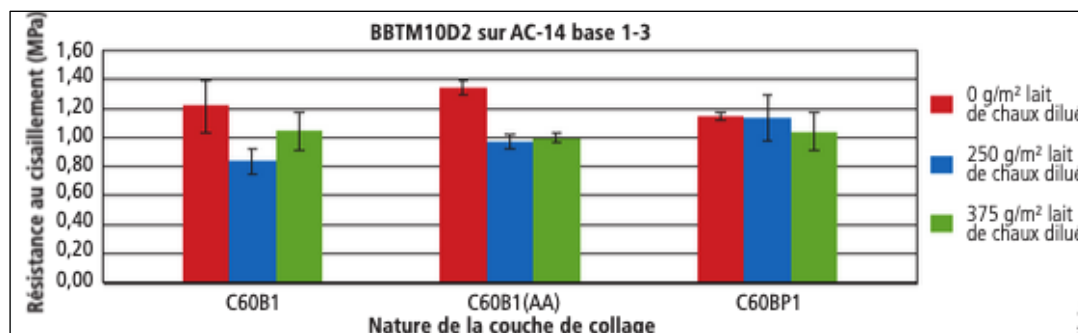
Další evropské země, jako Belgie, Německo, Rakousko a Polsko, přijaly také tuto technologii a její používání se stále rozšiřuje. V některých případech se používá nižší ředění, což zvyšuje náklady, ale podle studie může tato aplikace zlepšit přilnavost až o 10 % [12].

Antiadhezivní vlastnosti neovlivňují pevnost ve spojení

V roce 2015 byla zveřejněna studie, která porovnává pevnost spojení s vápenným mlékem a bez něho [13]. Na vzorcích vyrobených v laboratoři byly provedeny jak zkoušky přilnavosti v tahu (TAT), tak zkoušky pevnosti ve smyku (SBT). Obrázky 4 a 5 ukazují, že spojení mezi vrstvami je zachováno, i když je použito dávkování vápenného mléka ve výši až 500 g/m². Tyto výsledky také potvrzují, že dávkování 250 g/m² je plně dostačující.

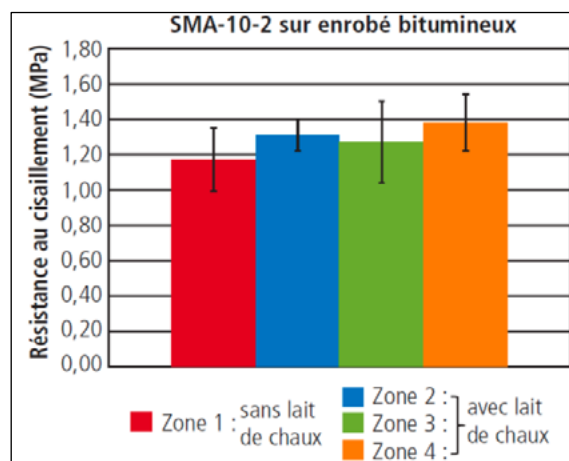


Obrázek 4: Vliv postřiku vápenným mlékem z pohledu zkoušek TAT a SBT při různém dávkování – směs SMA



Obrázek 5: Vliv postřiku vápenným mlékem z pohledu zkoušek TAT a SBT při různém dávkování – směs BBTM

Zkoušky SBT byly provedeny také na vzorcích jádrových vývrtů z vozovky (obrázek 6). Na základě výsledků bylo možné vyvodit stejné závěry - spojení je účinné, i když je na spojovací postřiku nanесena antiadhezní vrstva vápenného mléka.



Obrázek 6: Vliv postřiku vápenným mlékem z pohledu zkoušky SBT – směs SMA – zkušební tělesa N25 (Belgie)

Antiadhezivní vlastnosti neovlivňují pevnost ve spojení

Princip

Jak již bylo zmíněno, na základě empirických sledování na stavbě bylo zjištěno, že optimální dávka je 250 g/m² zředěného 45 % suchého extraktu vápenného hydrátu v poměru 1:10 (1 dílek 45 % vápenného mléka na 9 dílků vody).

Naším cílem bylo dále navrhnout laboratorní test, který umožní ověřit toto sledování.

Pro dosažení a vyhodnocení antiadhezivního účinku vápenného mléka na asfalt bylo rozhodnuto provést reologickou zkoušku na přístroji DSR při teplotě 25 °C s použitím geometrie PP25. Princip je velmi jednoduchý – po lehkém stlačení spojovacího postřiku s využitím dané geometrie měříme tahovou sílu potřebnou k jeho odtržení.

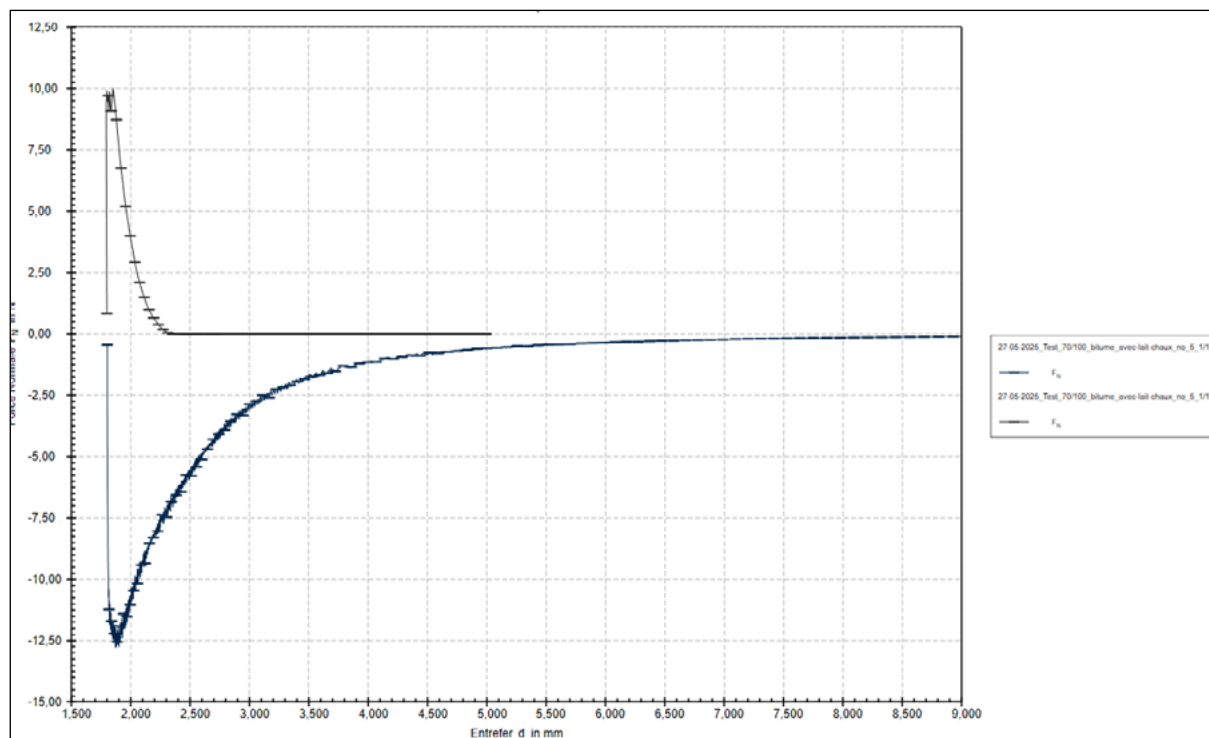
Postup spočívá nejprve v nalití vzorků asfaltu do silikonových forem, které se nechají dvě hodiny sušit při pokojové teplotě. Poté se na povrch rovnoměrně nastříká zředěný roztok vápenného mléka, a to nejméně třikrát, aby bylo zajištěno rovnoměrné pokrytí. Vzhledem k hydrofobní povaze asfaltu je někdy nutné přijmout další opatření, jako je např. zvýšení počtu postřiků, mírné ponoření povrchu nebo předběžné vysušení tenké vrstvy horkovzdušnou pistolí, aby se zlepšila přilnavost vápenného mléka. Po aplikaci se potažené vzorky nechají dvě hodiny sušit na vzduchu a poté se zcela vysuší horkovzdušnou pistolí nastavenou na 80 °C. Obrázek 7 ukazuje příklad výsledného vzorku před měřením DSR.

Pokud jde o samotné měření, mezera DSR se nastaví na 5 mm, aby bylo možné dosáhnout tepelné rovnováhy bez kontaktu po dobu 10 minut. Poté se použije konstantní rychlost s poklesem 10 μm/s, aby

bylo dosaženo kontaktu. Když se dosáhne normálové síly 10 N, geometrie se znehybní. Poté dojde k posunu nahoru konstantní rychlostí 15 $\mu\text{m/s}$ a výsledná záporná normálová síla se zaznamená jako indikátor adheze (obrázek 8). Čím nižší je síla, tím menší je adheze. Každé měření se opakuje nejméně třikrát, aby byla zajištěna opakovatelnost.



Obrázek 7: Vzorek před měřením na přístroji DSR

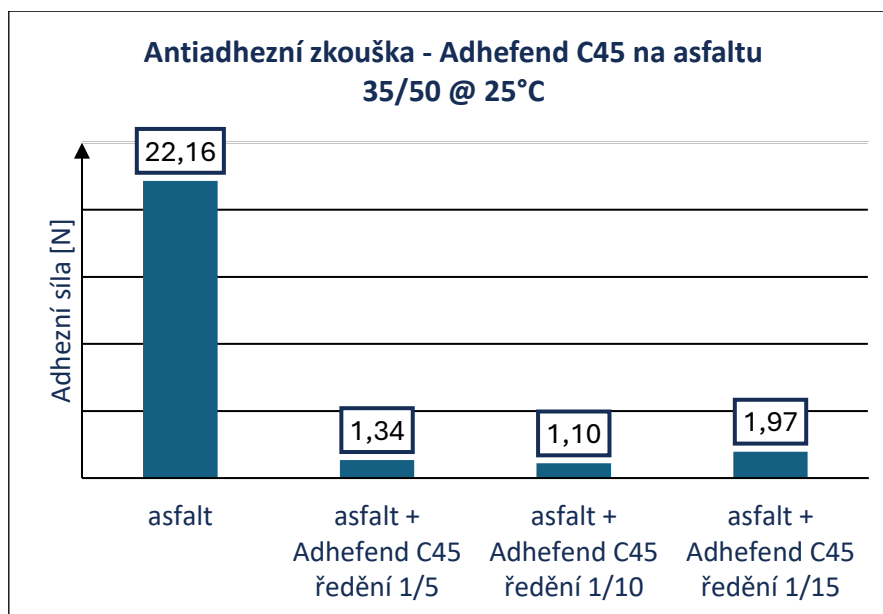


Obrázek 8: Měření na přístroji DSR

Vliv ředění vápenného mléka

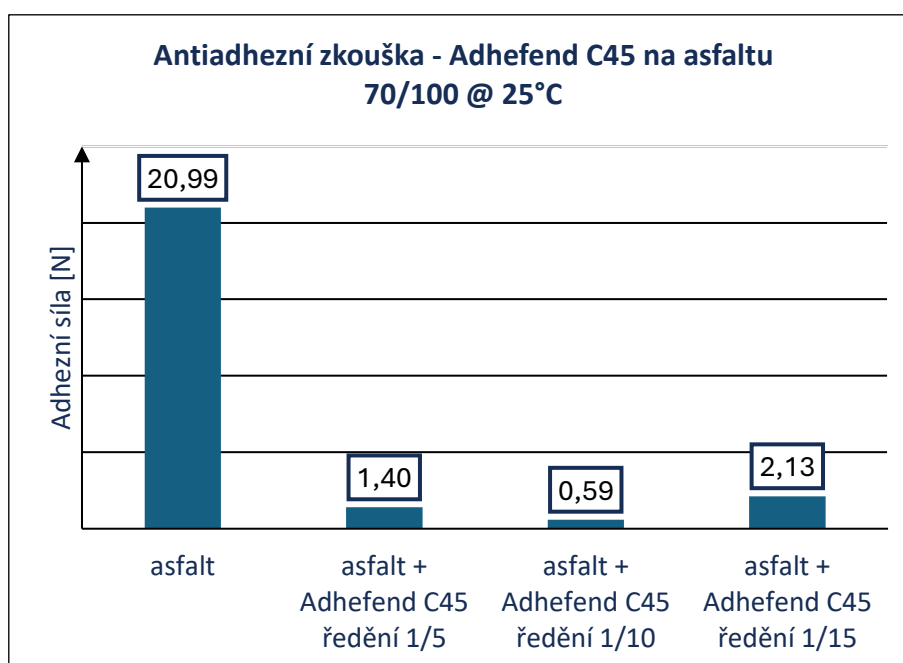
Pro účely této práce bylo použito vápenné mléko Adhefend™ C45 s 45% obsahem sušiny.

Obrázek 9 ukazuje vliv ředění vápenného mléka na čistý asfalt 35/50. Bez ošetření vápenným mlékem byla naměřena normálová síla 22,2 N. Po ošetření vápenným mlékem Adhefend™ C45 zředěným v poměru 1:10 a naneseným v množství přibližně 250 g/m² klesla normálová síla na 1,1 N, což odpovídá 95% snížení adheze.



Obrázek 9: Vliv ředění na adhezní sílu při 25 °C – silniční asfalt 35/

V případě asfaltu 70/100 (obrázek 10) bez ošetření vápenným mlékem byla naměřena normálová síla 21 N, po ošetření vápenným mlékem normálová síla klesla na 0,6 N, což představuje 97% snížení adheze.

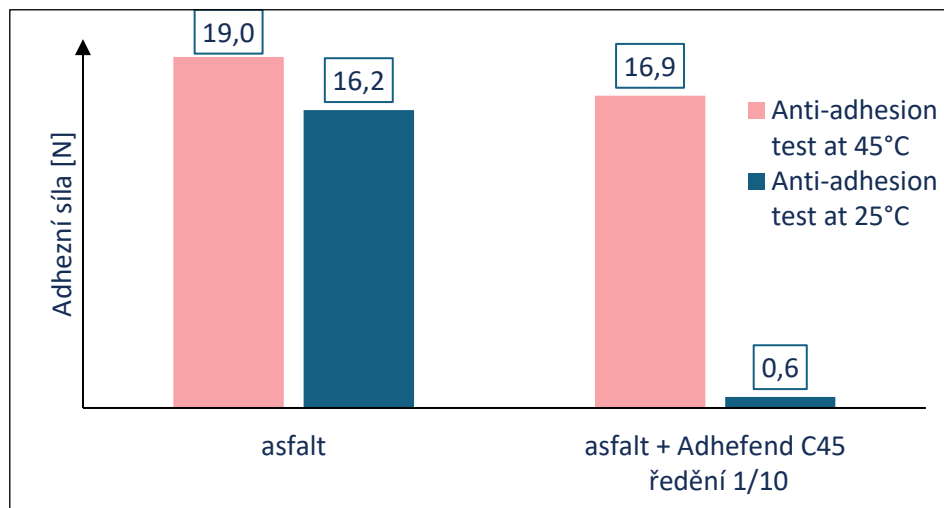


Obrázek 10: Vliv ředění na adhezní sílu při 25 °C – silniční asfalt 70/100

Měření ukazují, že v obou případech lze použít i nižší ředění (1:5). Při ředění nad 1:10 (až 1:15) je v obou případech zaznamenán nárůst adheze, a proto nedoporučujeme v takovém poměru ředit. Tyto výsledky jasně dokládají, že ředění 1:10, které bylo empiricky zjištěno na stavbě, skutečně odpovídá optimální účinnosti.

Vliv teploty

Na obrázku 11 je porovnán antiadhezivní účinek vápenného mléka zředěného v poměru 1:10 a naneseného v množství 250 g/m² při dvou teplotách. Podle předpokladu, snížení adheze je nižší při vyšší teplotě. Nicméně 45 °C je poměrně vysoká teplota – v reálném použití jsou naměřené teploty povrchu vozovky při nanášení vápenného mléka < 35 °C, a to i v regionech s poměrně vysokými teplotami, jako jsou například jih Francie (obrázek 16).

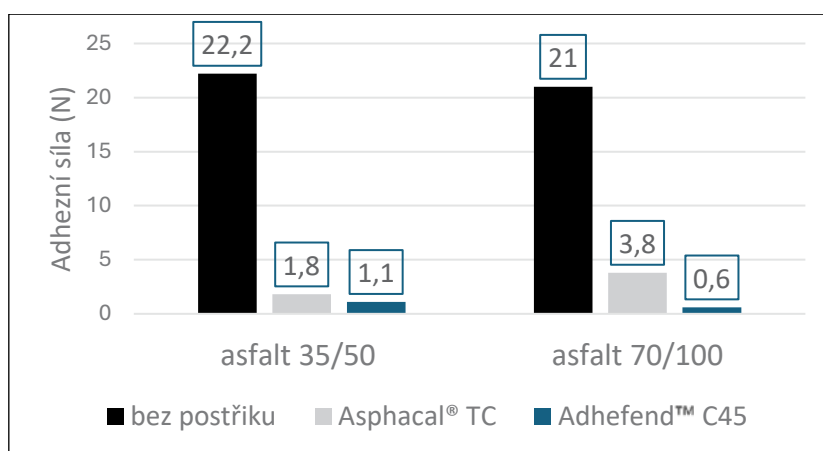


Obrázek 11: Vliv teploty na adhezní sílu – silniční asfalt 70/100

Porovnání Adhefend™ C45 a Asphacal® TC

Asphacal® TC je referenční vápenné mléko s 45% obsahem sušiny, které se pro tuto aplikaci hojně používá již 20 let. Adhefend™ C45 je nové vápenné mléko s 45% obsahem sušiny, které bylo speciálně vyvinuto pro zlepšení skladovatelnosti a omezení problémů se sedimentací.

Oba produkty jsou porovnány z hlediska adhezních vlastností na obrázku 12. Používá se ředění 1:10 a aplikační dávka 250 g/m². Oba výrobky se chovají podobně, pokud jde o snížení adheze.



Obrázek 12: Porovnání vlivu Asphacal® a Adhefend™ na adhezní sílu při 25 °C

Průmyslové využití vápenného mléka

Specifikace

Ačkoli je tato technologie ve Francii hojně využívána (každý rok se realizuje až 120 milionů m²), nebyly pro tuto technologii stanoveny dosud žádné specifikace. Naopak Španělsko vydalo specifikace v technické poznámce [14], a to jak s požadavky na chemické, tak i fyzikální charakteristiky (tabulka 1 a tabulka 2). Vápenné mléko používané pro tuto aplikaci v jiných zemích Evropy tyto specifikace splňuje. Výrobek je tedy všeobecně přijímán jako evropský standard.

Tabulka 1: Chemická specifikace vápenného mléka pro ochranu spojovacího postřiku

CARACTERÍSTICA ⁽¹⁾	UNIDAD	CL 90-S
Contenido en CaO+MgO	%	≥ 90
Contenido en MgO	%	≤ 5 ⁽²⁾
Contenido en CO ₂	%	≤ 4
Contenido en SO ₃	%	≤ 2
Contenido en cal útil (Ca(OH) ₂) ⁽³⁾	%	≥ 80
Estabilidad de volumen ⁽⁴⁾	mm	≤ 2
Tamaño de partícula (retenido acumulado):		
Tamiz 0,2 mm	%	≤ 2
Tamiz 0,09 mm	%	≤ 7 ⁽⁵⁾

(1) Los valores para CaO, MgO, CO₂ y SO₃ corresponden al producto exento de agua libre y agua combinada.
 (2) Se admite un 7% siempre que cumpla la estabilidad de volumen.
 (3) Pueden requerirse valores más altos de cal útil.
 (4) Según apartado 6.4.2.1 de la Norma UNE-EN 459-2.
 (5) Se permite un retenido de hasta el 15% siempre que se cumpla el ensayo de estabilidad indicado en el apartado 6.4.2 de la norma UNE-EN 459-2.

Tabulka 2: Fyzikální specifikace vápenného mléka pro ochranu spojovacího postřiku

CARACTERÍSTICA	UNIDAD	ESPECIFICACIÓN
Solución concentrada:		
Contenido en sólido ⁽¹⁾	%	> 44
Viscosidad a 20°C y 100 r.p.m. ⁽²⁾	mPa s	200 - 400
Lechada diluida		
Contenido en sólido ⁽²⁾	%	≤ 6
Tamaño de partícula:		
Residuo sobre tamiz de 0,032 mm ⁽³⁾	%	≤ 0,1

(1) Según norma UNE-EN 459-2.
 (2) Según norma ISO 2555.
 (3) Aplicando la norma UNE – EN 1429 y con 1 kg de lechada de cal que se va a emplear y tamizando en húmedo bajo un chorro de agua de 1 cm de diámetro y un caudal de 4 litros por minuto.

Postřikové zařízení



Obrázek 13: Různé typy strojů pro provádění postřiku vápenným mlékem

Požadavky na vybavení jsou poměrně omezené:

- schopnost ředit 45% extrakt vápenného mléka vodou (šaržový nebo kontinuální proces),
- schopnost postřiku ředěného produktu v množství 250 g/m²,

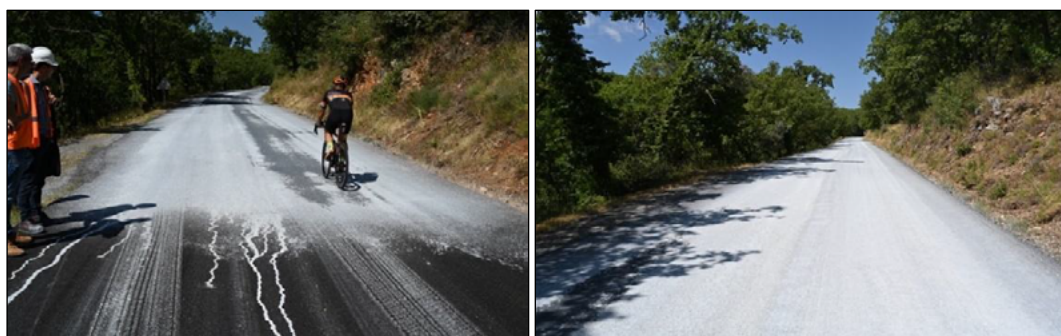
- integrovaný systém čištění trysek včetně vysokotlakého vstřikování vody (doporučuje se denní čištění na konci pracovního dne),
- mechanické míchání nebo nepřetržitá recirkulace koncentrovaného vápenného mléka, pokud dochází k rychlé sedimentaci.

Další využití

Ačkoli ochrana pomocí antiadhezního nátěru je historicky nejčastějším způsobem použití této technologie, klimatické změny podporují i další možný způsob použití – omezení ztráty makrotextury tzv. „pocení“ asfaltové obrusné vrstvy/nátěru během horkých dnů. Jak již bylo zmíněno, nanesení vápenného mléka na povrch vozovky výrazně snižuje její teplotu, a tím i riziko pocení povrchu asfaltové vozovky. Těsně před příchodem vysokých teplot se vápenné mléko nastříká na riziková místa, kde bude působit přibližně 10 dní, pokud nebude pršet. Obvykle se pro tuto aplikaci koncentrované vápenné mléko ředí v poměru 1:2 a nanáší v množství 100 g/m². Obrázky 14, 15 a 16 ukazují příklad aplikace z 1. 8. 2025 ve francouzském regionu Var, nedaleko St. Tropez.



Obrázek 14: Provádění postřiku Adhefend™ C45



Obrázek 15: Postřik vápenným mlékem během vysoušení (vlevo) a finální stav po vysoušení (vpravo)



Obrázek 16: Teplota povrchu při provádění před aplikací postřiku vápenným mlékem (vlevo) a po nástřiku vápenného mléka Adhefend™ C45 (vpravo)

Shrnutí

Postřik vápenným mlékem je nákladově efektivní a technicky účinné řešení pro zachování pevnosti spojení mezi vrstvami asfaltové vozovky. V důsledku vlastností vápenného hydrátu, které snižují lepivost spojovacího postřiku při jeho pojíždění, se omezuje riziko, že pneumatiky těžké techniky odtrhnou celou spojovací vrstvu nebo její část, což by v konečném důsledku vedlo ke snížení trvanlivosti vozovky i nákladným opatřením k odstranění zbytků asfaltu, které znečišťují celé staveniště a okolní komunikace.

I když výrazně snižuje přilnavost pneumatik k povrchu spojovacího postřiku, nemá žádný vliv na jeho adhezní vlastnosti, a v některých případech je dokonce může zlepšit.

V laboratoři jsme vyvinuli novou metodu s využitím dynamického smykového reometru, abychom mohli kvantifikovat úroveň snížení lepivosti povrchu při postřiku vápenným mlékem. Tímto způsobem jsme potvrdili empiricky optimální dávkování a ředění, které bylo zjištěno v terénu, a současně prokázali vliv teploty vozovky na přilnavost s porovnáním různých koncentrací vápenného hydrátu, který pro tuto aplikaci dodáváme.

Závěrem jsme uvedli specifikace produktu, různé typy zařízení, které lze použít, a představili novou rozšiřující se aplikaci, která souvisí se změnou klimatu a zvyšuje kontrolu roztékání asfaltu během horkých dnů.

Zdroje:

- [1] K.R. Peattie, "The incidence and investigation of slippage failures", The performance of Rolled Asphalt Road Surfacing, The Institute of Civil Engineers, London, 1980
- [2] J.C. Roffe and F. Chaignon, "Characterisation tests on bond coats, worldwide study, impact test recommendations", 3rd Int. Conference of Bituminous Mixtures and Pavements, Thessaloniki, Greece, Nov. 2002
- [3] S.F. Brown and J.M. Brunton, "The influence of bonding between bituminous layers", The Journal of the Institution of Highways and Transportation, Vol 31(5), 16-17, 1984
- [4] J. Willis and D. Timm, "Forensic investigation of debonding in rich-bottom pavement", National Center for Asphalt Technology Report 06-04, 2006
<https://www.eng.auburn.edu/research/centers/ncat/files/technical-reports/rep06-04.pdf>
- [5] "Tack Coat Guidelines", Caltrans 2024
- [6] A. Destree and P.P. Brichant, "Les émulsions cationiques bitumineuses en tant que couches de collage. Recommendations pratiques de mise en œuvre", BRRC Dossier 14, 2012
- [7] M.H. Sutanto, "Assessment of bond between asphalt layers", Ph. D Thesis, Univ. Nottingham, 2009
- [8] A. Dony, I. Koutiri, E. Godard, L. Brissaud, B. Pouteau, A. Millien, S. Ollier, "Evaluation du dispositif de mesure de collage des couches d'enrobés in-situ par torsion", Projet DVDC, LC/18/DVDC/40, 2019
- [9] A. Destree, "Les techniques de protection de la couche de collage et leurs effets sur l'adhésion intercouche", RGRA 963, 2019
- [10] A. Sainton and D. Bourdrel, "Procédé de traitement après répandage de couche sd'accrochage à base d'émulsions de bitume ainsi que véhicule permettant la mise en œuvre de ce procédé", FR2748283 B1, 1996
- [11] J.P. Serfass, J. Samanos, H. Tessonneau, "Couche de liant circulaire et son procédé de préparation", EP0829579 B1, 1996
- [12] D. Malasiewicz, "Asphal TC, tack coat solution", Romanian Road Congress, 2022
- [13] D. Lesueur, P. Leconte, Y. Brosseaud, A. Destree, CH. Mabile, G. Ragot, "Emploi de lait de chaux Asphal TC en protection des couches d'accrochage", RGRA 925, 2015
- [14] "Para el proyecto y la ejecución de lechadas de cal como sistema de protección de riegos de adherencia", NOTA TÉCNICA NT 01/2020, DGC, 2020

3



**Udržitelnost, oběhové hospodářství,
digitalizace**

***Sustainability, circular economy,
digitalisation***

POZNÁMKY K ZAVÁDĚNÍ ENVIRONMENTÁLNÍCH PROHLÁŠENÍ O VÝROBKU PRO ASFALTOVÉ SMĚSI

NOTES ON THE IMPLEMENTATION OF ENVIRONMENTAL PRODUCT DECLARATIONS FOR ASPHALT MIXTURES

Ing. Jiří Fiedler

Ing. Filip Dostál, VIALAB CZ s.r.o.

Ing. Tomáš Koudelka Ph.D., VIALAB CZ s.r.o.

V projektu TA ČR „Snižování ropné závislosti při výrobě krytových vrstev netuhých vozovek“ se řešitelé věnují i problematice environmentálního prohlášení o výrobku (EPD). Ta je aktuální vzhledem k nařízení CPR, publikovanému v prosinci 2024 v Úředním věstníku EU, které zavádí povinnost uvádět environmentální charakteristiky stavebních výrobků. Tyto údaje mají být součástí EPD. Zavedení EPD pro asfaltové směsi je složitější než u jiných stavebních materiálů. Přístupy evropských zemí k jejich zavádění a pravidlům produktových kategorií se zatím liší. Projekt proto provádí rešerši stavu implementace EPD v několika evropských zemích, USA a Austrálii a zkoumá i problémy, které se při zavádění vyskytují. Stručný přehled rozdílů a potíží je v příspěvku popsán a může sloužit jako vodítko pro státní správu i silničářské firmy při hledání vhodného postupu v České republice.

As part of the TA ČR project “Reducing Oil Dependency in the Production of Surface Layers of Flexible Pavements”, researchers are also addressing the issue of the Environmental Product Declaration (EPD). This is relevant due to the CPR regulation, published in the Official Journal of the EU in December 2024, which requires declaring environmental characteristics of construction products within an EPD. Implementing EPDs for asphalt mixtures is more complex than for other construction materials. Approaches to their implementation and to product category rules still vary across European countries. The project includes a review of the current state of EPD implementation in several European countries, the USA, and Australia, and examines challenges that arise. A summary of the main differences and issues is presented in the paper and may serve as guidance for public authorities and road construction companies when defining a suitable approach in the Czech Republic.

Úvod

V rámci výzkumného projektu TA ČR „Snižování ropné závislosti při výrobě krytových vrstev netuhých vozovek“ se řešitelé zabývají i problematikou environmentálního prohlášení o výrobku (EPD). Přístupy evropských zemí k zavádění EPD a pravidel produktových kategorií se zatím liší. Proto byla v rámci tohoto projektu TA ČR provedena v loňském roce rešerše současného stavu implementace EPD v několika evropských zemích, v USA a v Austrálii. V tomto textu jsou shrnuty jen základní informace z provedené rešerše. Proto se zde nezmiňujeme o situaci v některých zemích, které byly v rešerši zahrnuty.

V Evropské unii se postupuje podle normy EN 15804+A2 (Udržitelnost staveb – Environmentální prohlášení o produktu – Základní pravidla pro produktovou kategorii stavebních produktů) z roku 2019. Informace k udržitelnosti u asfaltových směsí a pojiv a také o EN 15804+A2 jsou uvedeny v článku [1].

Při hodnocení složek asfaltových směsí se u asfaltů vycházelo většinou z inventury životního cyklu (Life cycle inventory LCI) vypracované sdružením Eurobitume v roce 2020. Ta byla nedávno použita při vypracování předpisů pro asfaltové směsi v některých evropských zemích. Například v Irsku od dubna 2024 vstoupila v platnost nová pravidla: Complementary Product Category Rules for Bituminous Mixtures (c-PCR Bituminous Mixtures), DN-PAV-03077, January 2024 [2], podle kterých by se EPD pro asfaltové směsi mělo provádět.

V březnu 2025 vydal Eurobitume nový dokument s názvem „The Eurobitume Life Cycle Assessment 4.0 for bitumen“ [3]. Nové hodnocení v analýze životního cyklu (LCA) vedlo k více než dvojnásobnému zvýšení hodnoty potenciálu globálního oteplování GWP₁₀₀ pro asfalt. To bude mít vliv také na velikost GWP₁₀₀ pro asfaltové směsi. Proto je v tomto textu uvedeno také několik informací z citované zprávy Eurobitume. Novým hodnocením Eurobitume se výrazně zmenšil rozdíl mezi hodnotou GWP uvažovanou při LCA v USA a v Evropě. Nové hodnocení Eurobitume odpovídá také poznatkům z kanadské práce o porovnávání LCI pro asfalty z roku 2024 [4]. V ní se konstatuje, že dříve publikované údaje o uhlíkové stopě byly pravděpodobně podhodnoceny.

V době psaní tohoto textu nebylo ještě známo, jak budou nové hodnoty GWP pro asfalty zohledněny v připravované evropské normě „Road materials — Environmental product declarations — Product category rules complementary to EN 15804 for bituminous mixtures“.

EPD v Norsku

Norsko bylo jednou z prvních evropských zemí, kde se zavedla pravidla produktové kategorie (Product category rules PCR) a vydávala EPD pro asfaltové směsi. Norské sdružení výrobců asfaltových směsí (člen EAPA) má program pro stanovení EPD u asfaltových směsí. Jednotliví výrobci, kteří jsou členy sdružení, mohou program používat. Od roku 2019 se v Norsku postupně zvětšuje počet výběrových řízení, kde se kromě ceny zohledňuje i uhlíková stopa.

Nabídka s nejnižší uhlíkovou stopou (ve fázích A1 až A5 dle normy EN 15804+A2) je v Norsku považována za výchozí cenovou referenci. Ostatní nabídky s vyšší uhlíkovou stopou jsou následně penalizovány podle předem stanoveného vzorce. Výsledná hodnota, která kombinuje cenu a environmentální dopad, určuje vítěze výběrového řízení. To znamená, že zakázku může získat i firma, která nabídla vyšší cenu, pokud má zároveň výrazně nižší uhlíkovou stopu – a po korekci se její nabídka stane ekonomicky a ekologicky nejvýhodnější. Norské zkušenosti s tímto přístupem, včetně konkrétních metod penalizace emisí CO₂, jsou detailně popsány ve studii [5].

Nižší uhlíková stopa se v Norsku hlavně dosahovala použitím R-materiálu a biopojiv pro fázi A1 a použitím nízkoteplotních asfaltových směsí NTAS (WMA) spolu s dalšími opatřeními ve fázi A3. Vliv fází A2, A4 a A5 byl menší. V Dánsku má být norský model ověřován od roku 2024. V budoucnu se v Norsku uvažuje zohlednit při zadávání zakázek, zdali použité materiály prodlužují životnost vozovek. Zatím je však problém, jak při LCA správně zohlednit trvanlivost (durability).

EPD ve Francii

Na webové stránce sdružení Routes de France (<https://www.routesdefrance.com>) jsou v sekci o LCA dokumenty nazvané „Modules d'informations environnementales (MIE)“. Po rozkliknutí na jednotlivé soubory se objeví dokumenty odpovídající EPD a PCR s environmentálními požadavky normy EN 15804+A1. Tyto dokumenty nesou označení ICV (Inventaire de cycle de vie), tj. inventarizační analýza životního cyklu. ICV jsou z roku 2021. Obsahují generická data pro pět různých typů asfaltových směsí.

Ve Francii jsou v souladu s normami NF EN 15804+A1 a NF EN 15804+A2 vydávány pro stavební materiály dokumenty označované jako „Fiches de déclarations environnementales et sanitaires (FDES)“, tedy environmentální a zdravotní prohlášení o produktu. Tyto dokumenty jsou ověřovány a publikovány prostřednictvím databáze spravované sdružením Inies (<https://www.inies.fr/>), které sdružuje firmy a odborné instituce v oblasti udržitelné výstavby.

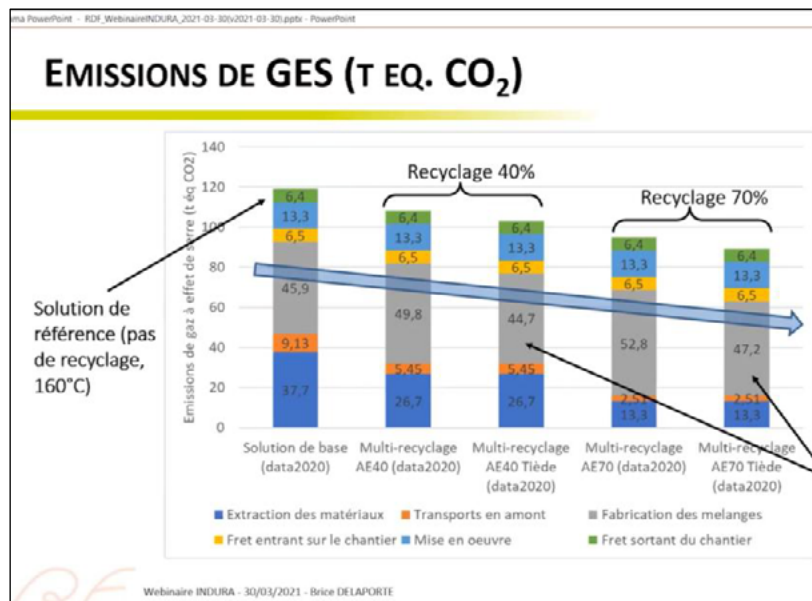
Na webu Inies jsou k dispozici jak generické FDES pro asfaltové směsi, vypracované na žádost sdružení Routes de France, tak i FDES pro konkrétní výrobky. Mezi nimi najdeme například směsi s obsahem biopojiv, připravené přímo pro jednotlivé výrobce. Tyto směsi vykazují nižší hodnoty potenciálu globálního oteplování (GWP).

V časopise RGRA byl v dubnu 2024 publikován článek [6]. V něm se vysvětluje, jak nová EN 15804 z roku 2019 znevýhodňuje asfaltové směsi s biopojivy. Zatím není jasné, zda budou směsi s biopojivy posuzovány podle této obecné normy, nebo zda bude na základě budoucího PCR pro silniční infrastrukturu posuzování odlišné. Tato problematika byla popsána i v příspěvku [7], předneseném na kongresu Eurasphalt & Eurobitume v roce 2024. Stručná informace o [6] a [7] byla uvedena v časopise Silnice mosty [8].

Ve Francii byl vyvinut software SEVE pro environmentální porovnání variant. Ten se může využívat při zadávání veřejných zakázek. Hodnotí se 4 povinné kvantitativní ukazatele. Potenciál globálního oteplování (t CO₂ eq.), spotřeba energie (megajoule MJ), spotřeba zdrojů (t) a přeprava materiálů (t.km). Další dva ukazatele jsou volitelné (spotřeba vody a biodiversita). Ty mají být používány v projektech, kde jsou i zemní práce. V manuálu SEVE z roku 2022 pro verzi 4,0 se uvažuje pro silniční asfalty s hodnotou GWP (označenou „Climate change“) 247 CO₂ ekv., podle příručky Eurobitume z roku 2012.

V rámci rozsáhlého francouzského výzkumného programu MURE o opakované recyklaci byly dvě dílčí zprávy týkající se použití softwaru SEVE. Na webové stránce pnmure.fr je také webinář, na němž byly shrnuty informace k EPD a LCA získané v projektu MURE. Na obrázku 1 z prezentace B. Delaporte [9] je porovnání potenciálu globálního oteplování pro použité technologie. U nízkoteplotních směsí byla

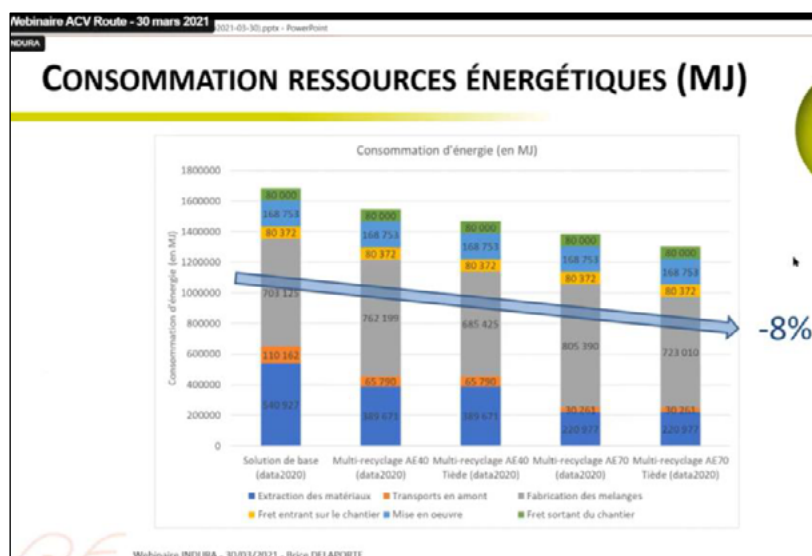
výrobní teplota snížena o 30 °C. Vyšší obsah R-materiálu snižuje celkový GWP. Je to hlavně menším GWP ve fázi A1. Ve fázi A3 je při vyšším obsahu R-materiálu GWP mírně vyšší, ale vliv GWP ve fázi A1 převládá. (Graf demonstruje, že vyšší obsah R-materiálu a nižší výrobní teplota významně snižují uhlíkovou stopu asfaltových směsí, zejména díky menší zátěži v ranných fázích životního cyklu (A1 – těžba surovin). I když se ve fázi výroby A3 emise mírně zvyšují s vyšším podílem R-materiálu, přínos recyklace celkově převažuje.)



Obrázek 1: Potenciál globálního oteplování pro použité technologie [9]

Termíny v obrázku: *emissions de GES* – emise skleníkových plynů, *solution de reference (pas de recyclage 160 °C)* – referenční směs (bez R-materiálu 160 °C), *emissions de gaz a effet de serre* – emise skleníkových plynů, *solution de base* – základní případ, *multirecyclage* – opakovaná recyklace, *AE40 (Tiede)* – 40 % R-materiálu, *nízkoteplotní směs*, *AE70* – 70 % R-materiálu, *extraction des matériaux* – těžba surovin, *transport en amont* – doprava na obalovnu, *fabrication des melanges* – výroba směsi, *fret entrant sur le chantier* – doprava směsi na staveniště, *mise en oeuvre* – pokládka směsi, *fret sortant du chantier* – doprava ze staveniště

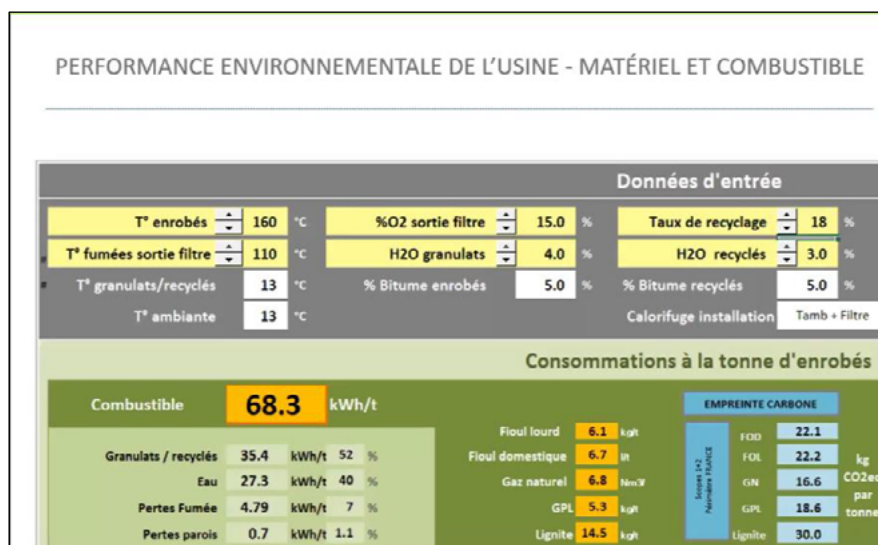
Podobné je to i celkovou spotřebovanou energií, jak je vidět na obrázku 2.



Obrázek 2: Spotřeba energií pro použité technologie [9]

Termíny v obrázku 2: *consommation ressources energetiques* – spotřeba energie, ostatní termíny jako v obrázku 1

Na obrázku 3 z prezentace Anne de Bortoli [10] na zmíněném semináři je příklad s údaji o spotřebované energii při výrobě jedné směsi, na kterém je také spotřebovaná energie a emise CO₂ ekv. pro různá paliva. Je vidět, že pro uhelný prach (označený lignite) jsou hodnoty CO₂ ekv. o cca polovinu vyšší než pro ostatní paliva.



Obrázek 3: Spotřebované energie při výrobě směsi a emise CO₂ ekv. pro různá paliva [10]

Termíny v obrázku 3: performance environnementale de l'usine – materiál a paliva, enrobés – obalovaná směs, fumées sortie filtres – výpary na výstupu z filtrů, H₂O granulats – vlhkost kameniva, taux de recyclage – dávkování R-materiálu, Bitume enrobés – obsah asfaltu ve směsi, temperature ambiante – teplota ovzduší, calorifuge installation – tepelná izolace zařízení, tamb + filtre – buben a filtry, consommations a la tonne d'enrobés – spotřeba na tunu obalované směsi, combustibles – paliva, eau – voda, pertes fumée – ztráty výpary, pertes parois – ztráty přes stěny, empreinte carbone – uhlíková stopa, fioul lourd – těžký topný olej, fioul domestique – topný olej, gaz naturel – zemní plyn, GPL – zkapalněný plyn, lignite – hnědé uhlí

EPD v Německu

V Německu vypracovává EPD pro stavební materiály organizace „Institut Bauen und Umwelt“ (IBU ibu-epd.com/). Na webové stránce IBU je databáze již vydaných EPD ibu-epd.com/veroeffentlichte-epds/. Spolkové ministerstvo pro bydlení, rozvoj měst a výstavby (BMWSB) spravuje databázi pro hodnocení životního cyklu budov oekobaudat.de/. V databázi jsou jak hodnocení dle EN 15804+A1, tak i nová EN 15804+A2. Informace týkající se 6 druhů asfaltových směsí lze získat po zadání kategorie Asphalt. Kromě celkového potenciálu GWP jsou uvedeny i jeho složky. Těmi jsou biogenní (GWP biogenic), fosilní (GWP fossil) a z využívání půdy a změn ve využívání půdy (GWP-luluc, tj. „land use and land use change“). Majitelem dat pro asfaltové směsi je firma Sphera solutions sphera.com/. Firma Sphera vypracovala také materiál pro novou verzi LCA pro asfalty, který byl podkladem pro dokument vydaný Eurobitume v březnu 2025. Údaje o asfaltových směsích lze v databázi oekobaudat nalézt na <https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?lang=de&uuid=f34786e7-0953-4085-9f3d-955481cdd4ea&version=20.23.050>

Na kongresu Eurasphalt & Eurobitume 2024 byl v sekci o udržitelnosti článek německých autorů [11] o porovnání posouzení životního cyklu (LCA), EPD pro pět druhů asfaltových směsí a vliv použitého paliva. Článek vychází z konkrétních údajů při výrobě směsí v pěti německých obalovnách firmy Eurovia v Německu. Základní informace o tomto textu již byly uvedeny v článku [8]. Proto je zde neuvádíme. Pouze upozorňujeme, že pro LCA se použil program SimaPro verze 9.4 a databáze ecoinvent verze 3.8 (ecoinvent.org/database/). Proto autorům vyšly odlišné hodnoty GWP než podle databáze Sphera.

Porovnání PCR v různých zemích

Předpisy LCA, PCR a EPD jsou sice velmi podobné, ale přesto existují mezi nimi některé rozdíly. Bylo na ně upozorněno v holandské doktorské práci [12]. V této práci je obsažena srovnávací tabulka (obrázek 4) porovnávající moduly při LCA použité v sedmi různých předpisech. Jsou jimi předpis USA,

EU (dle původní EN15804), holandský, norský, švédský, australský a belgický. Pro každý z těchto předpisů je uvedeno, zda je konkrétní modul životního cyklu povinný (M), nebo volitelný (O).

Civil engineering works assessment information																				
Civil engineering works life cycle information																Outside system				
A1-A3			A4-A5		B1-B8								C1-C4				D			
Production			Constr.		Maintenance, rehabilitation, and use								End-of-Life				Benefits and loads			
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	C1	C2	C3	C4	D			
US-PCR	M	M	M																	
EU-PCR	M	M	M																	
NL-PCR	M	M	M	M	M	M	O	O					M	M	M	M		M		
NO-PCR	M	M	M	M	O	O		O					M	M	M	M		M		
SE-PCR	M	M	M	O	O	O	O	O	O				O	O	O	O		O		
AU-PCR	M	M	M	O	O	O	O	O	O				O	O	O	O		O		
BE-PCR	M	M	M	M	O	O	O	O	O				M	M	M	M		M		

Where M = Mandatory and O = Optional

Obrázek 4: Porovnání modulů v PCR v 7 různých předpisech (upraveno dle [12])

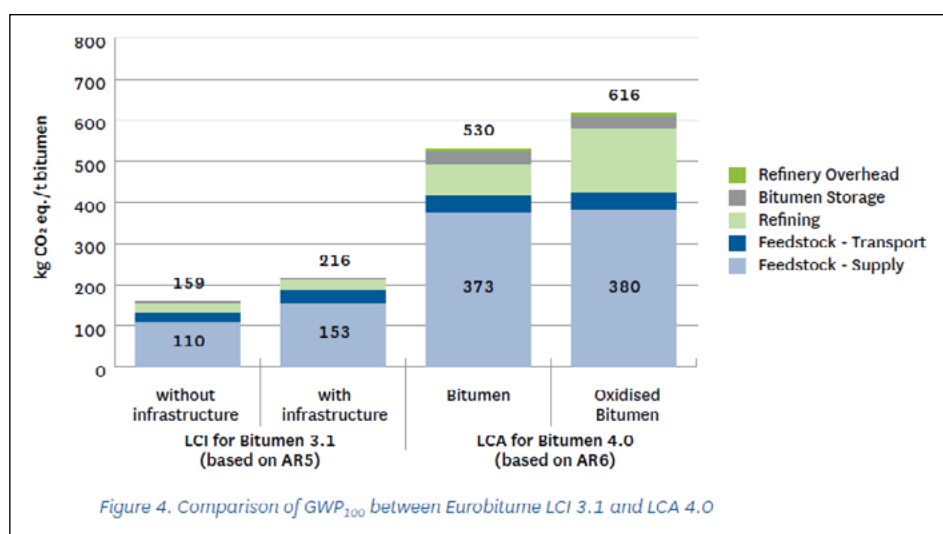
Modul B1 je povinný pouze v holandském předpisu. Ostatní předpisy modul B buď nezahrnují, nebo je jen volitelný. V [12] se k tomu konstatuje:

„Ve většině případů výrobci asfaltových směsí nemají žádný vliv na vstupy pro EPD nad rámec jejich výrobního procesu. Například trvanlivost asfaltové vrstvy nezávisí pouze na kvalitě výroby materiálu a stavebních procesů, ale také na vnějších faktorech, jako je dopravní zatížení, podmínky prostředí a skladbě vozovky.“

To, že se modul B v některých předpisech neuvažuje vůbec, je ovšem problematický přístup. V modulu A vychází často příznivější potenciál globálního oteplování GWP pro směs, která se během užívání bude chovat hůře. Při nižším obsahu asfaltového pojiva bude mít horší životnost z hlediska odolnosti proti únavě. Při porovnání směsi s nemodifikovanými asfalty bude chování horší než směsi s modifikovanými, i když její GWP bude lepší. Při tomto přístupu by se, z hlediska GWP, v extrémním případě jevila nejvhodnější vozovka bez asfaltových směsí, jen s nestmelenými materiály, mající nejnižší GWP. Její životnost by ale byla velmi malá.

Dopad nové hodnoty GWP pro asfalty v ACL vydané Eurobitume v roce 2025

Porovnání ukazatele GWP₁₀₀ mezi Eurobitume LCI 3.1 a LCA 4.0 je uvedeno na obrázku 5.



Obrázek 5: Porovnání 33složek hodnot GWP₁₀₀ podle Eurobitume LCI 3.1 a LCA 4.0 [3]

Termíny v obrázku 5: refinery overhead – režijní náklady v rafinerii, bitumen storage – skladování asfaltu, refining – rafinace, feedstock transport – doprava suroviny, feedstock supply – získání suroviny, without infrastructure – bez infrastruktury, with infrastructure – s infrastrukturou

V závěru zprávy organizace Eurobitume se uvádí, že hlavním faktorem ovlivňujícím zvýšení hodnoty indikátoru GWP₁₀₀ (potenciál globálního oteplování za 100 let) je změna v databázi údajů o ropě a jejím původu. Nová verze databáze Managed LCA Content (MLC) 2024.1 od společnosti Sphera, použitá v rámci metodiky LCA 4.0, výrazně zlepšuje přesnost modelování ropných produktů. Zlepšení spočívá zejména v podrobnějším vyhodnocení emisí metanu a v geograficky přesnějším průměrování dat o těžbě a zpracování ropy. Tyto úpravy vedly k realističtějšímu, ale zároveň vyššímu vyčíslení emisní zátěže spojené s výrobou asfaltových poživ. Podrobnější informace o zprávě Eurobitume byly uvedeny v literatuře [13].

Závěr

Implementace environmentálních prohlášení o výrobku (EPD) pro asfaltové směsi je v kontextu nového evropského nařízení CPR a normy EN 15804+A2 aktuálním a složitým tématem. Z provedené rešerše vyplývá, že přístupy k EPD a pravidlům produktových kategorií se v jednotlivých zemích liší – ať už jde o metodiku výpočtu, využívané databáze či zapojení EPD do výběrových řízení.

Zásadním faktorem, který bude mít dopad na posuzování asfaltových směsí, je nová analýza LCA 4.0 pro asfaltové pojivo publikovaná Eurobitume v roce 2025. Výrazné zvýšení hodnoty GWP₁₀₀ v důsledku přesnějšího modelování emisí z těžby ropy a zohlednění metanu posouvá emisní profil asfaltu na vyšší úroveň, čímž se stírá dosavadní rozdíl mezi evropskými a severoamerickými hodnotami. Tento vývoj zpochybňuje spolehlivost dříve vydaných EPD založených na starších datech a poukazuje na nutnost pravidelné revize hodnot i transparentního uvádění datových zdrojů.

Pro Českou republiku bude zásadní vytvořit konzistentní národní rámec pro zpracování a uplatňování EPD, který bude reflektovat aktuální evropský vývoj, ale zároveň zohlední místní výrobní podmínky, materiálovou základnu a dostupnost dat. Pokud má EPD sloužit jako skutečný nástroj pro podporu udržitelného rozhodování, je třeba zajistit nejen přesnost výpočtů, ale také jejich schopnost zohlednit dlouhodobou trvanlivost konstrukcí a potenciál pro recyklaci. Bez tohoto komplexního přístupu hrozí, že se EPD stane pouze formální administrativní povinností namísto účinného nástroje pro řízení environmentálních dopadů v silničním stavitelství.

Zdroje:

- [1] Koudelka T. Fiedler J. Informace k udržitelnosti u asfaltových směsí a poživ, Silnice mosty 2023, č. 2, str. 36–43
- [2] Complementary Product Category Rules for Bituminous Mixtures (c-PCR Bituminous Mixtures), DN-PAV-03077, January 2024
- [3] The Eurobitume Life Cycle Assessment 4.0 for bitumen. Eurobitume 2025. ISBN: 978-2-39068-070-3. Available on-line at: <https://eurobitume.eu/wp-content/uploads/2025/03/EB-LCA-4.0-2025.pdf>
- [4] de Bortoli A., Rahimy O., Annie Levasseur A. Environmental life-cycle impacts of bitumen: Systematic review and new Canadian models, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920924003961>
- [5] Even K. Sund, Thor A. Lunaas, Innovative Pavement Contracts to Reduce CO2-emissions https://www.academia.edu/87265223/Innovative_Pavement_Contracts_to_Reduce_CO2_emissions
- [6] Grosshenny V., Geisler F., Le Guern Y. Le développement des produits biosources peut-il être freiné par la norme actuelle de comptabilisation du carbone biogénique?, RGRA 2024,
- [7] Geisler F. Environmental Product Declarations of asphalt mixes: EN-15804, limitations and perspectives, Eurasphalt&Eurobitume, 2024
- [8] Fiedler J. Udržitelnost na kongresu Eurasphalt&Eurobitume, Silnice mosty 2024, Č. 3, str.13–18
- [9] Delaporte B. Effet du recyclage sur l'impact environnemental, <https://pnmure.fr/replay-webinaire-acv-chantiers-routiers-30-mars-2021/>
- [10] de Bortoli A. Impact environnemental des infrastructures routières, <https://pnmure.fr/replay-webinaire-acv-chantiers-routiers-30-mars-2021/>
- [11] Shokri M., Johannsen K., et al. Assessment of the environmental impact of fuel type and asphalt recycling during asphalt production, Eurasphalt & Eurobitume, 2024
- [12] Moins B. Sustainability assessment of roads containing reclaimed asphalt pavement (RAP), 2024, <https://repository.uantwerpen.be/docstore/d:irua:24192>, https://www.researchgate.net/publication/382115394_Sustainability_assessment_of_roads_containing_reclaimed_asphalt_pavement_RAP_Decision_support_based_on_LCA_LCCA_during_road_design
- [13] Fiedler J. Informace o novém posuzování životního cyklu asfaltů dle Eurobitume. Silnice mosty 2025, č. 2, str. 29

DIGITÁLNÍ ANALÝZA ŽIVOTNÍHO CYKLU (LCA) NAPŘÍČ CELÝM HODNOTOVÝM ŘETĚZCEM

DIGITAL LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA) ALONG THE ENTIRE VALUE CHAIN

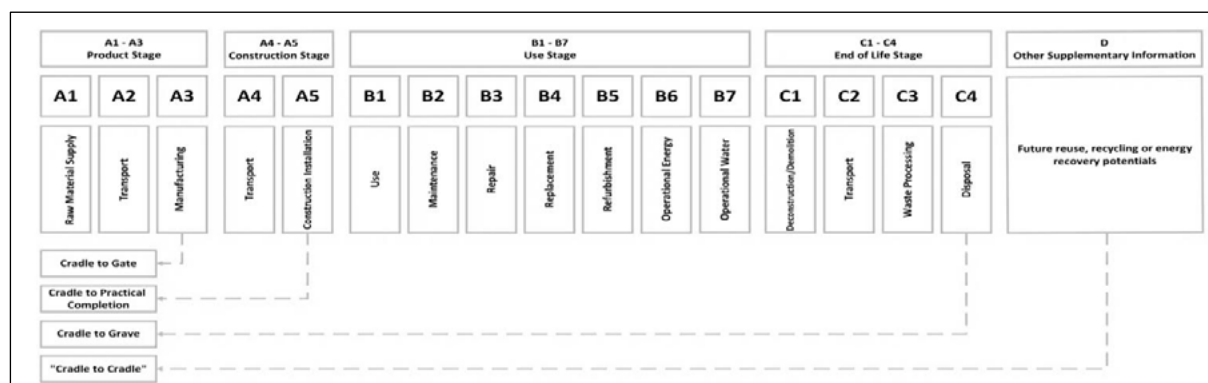
Dr. Thomas Leopoldseder, Q Point GmbH, Austria/Rakousko

Rostoucí povinnost zpracovávat posouzení životního cyklu staveb vyžaduje řešení, která na jedné straně zjednoduší proces tvorby a na druhé straně nebudou vyžadovat velké administrativní úsilí. Digitální řešení mohou pomoci shromáždit, analyzovat a shrnout všechny informace potřebné pro LCA ve fázích A1 až A5 a C1 až C3. Článek přibližuje, jaká řešení lze k tomuto účelu použít. Výchozím bodem pro přípravu jsou hodnoty EPD vstupních materiálů a informace o dopravě těchto materiálů do obaloven asfaltových směsí. Údaje z řídicího systému lze použít ke stanovení environmentálního dopadu na základě aktuálně vyráběných množství asfaltové směsi. Environmentální dopad dopravy asfaltové směsi, pokládka a hutnění lze rovněž digitálně zaznamenat a analyzovat. Na základě těchto automaticky shromážděných informací je pak velmi snadné vytvořit hodnocení životního cyklu asfaltové obalovny nebo vlastní stavby.

Increasing obligations to draw up a life cycle assessment require solutions that make the process of creating on the one hand simple and on the other hand without major administrative effort. Digital solutions can help to collect, analyse and summarise all the information required for the LCA in phases A1 – A5 and C1 – C3. The paper shows which solutions can be used for this purpose. The starting point for the preparation are the EPDs values of the raw materials and information about the transport of the raw materials to the asphalt mixing plant. Data from the control system can be used to determine the environmental impact based on the actual asphalt mix production quantities. The environmental impact of asphalt transport, paving and compaction can also be digitally recorded and analysed. It is then very easy to create a life cycle assessment for the mixing plant or construction site based on this automatically collected information.

Úvod

S rostoucími environmentálními a regulačními požadavky rychle roste poptávka po komplexním hodnocení životního cyklu (LCA) u infrastrukturních projektů. Výstavba asfaltových vozovek čelí specifickým výzvám, pokud jde o poskytování spolehlivých dat o vlivu na životním prostředí při současném zachování nákladové efektivity. Digitální řešení nabízejí slibnou cestu vývoje – umožňují automatizované, transparentní a přesné hodnocení LCA v celém hodnotovém řetězci, zejména v raných fázích životního cyklu A1 až A5 a C1 až C3 tak, jak je definuje norma EN 15804+A1.



Obrázek 1: Fáze životního cyklu podle normy EN 15804 [1]

Termíny v obrázku: výrobní etapa, etapa provádění, etapa užívání, konec životnosti, další doplňující informace; budoucí opětovné použití, recyklace nebo užitný, energetický potenciál; od kolébky k bráně, od kolébky k praktickému použití, od kolébky k hrobu, od kolébky ke kolébce, A1 – dodávka surovin, A2 – doprava, A3 – výroba, A4 – doprava, A5 – provádění prací, B1 – užívání, B2 – údržba, B3 – oprava, B4 – nahrazení, B5 – renovace, B6 – provozní energie, B7 – provozní voda, C1 – odstranění, demolice, C2 – doprava, C3 – zpracování odpadu, C4 – likvidace

Význam jednotlivých fází LCA A1 až A5, C1 až C3

Pro hodnocení životního cyklu LCA jsou důležité zejména fáze A1 až A5, které zahrnují procesy výroby stavebních produktů a dílčí kroky stavebního procesu, a dále fáze C1 až C3, přičemž pro jednotlivé fáze lze uvést jejich vymezení níže:

- A1: dodané materiálové vstupy
- A2: doprava materiálových vstupů na obalovnu
- A3: výroba asfaltové směsi
- A4: doprava asfaltové směsi na stavbu
- A5: proces pokládky
- C1: zpětné získání asfaltové směsi v podobě znovuzískané asfaltové směsi
- C2: přeprava znovuzískané asfaltové směsi do recyklačního závodu / na obalovnu
- C3: úprava na R-materiál a jeho opětovné použití ve výrobním procesu

Při výstavbě asfaltových vozovek tyto fáze obvykle představují většinu dopadů na životní prostředí, jako jsou emise CO₂ z výroby asfaltové směsi, spotřeba energie při míchání asfaltové směsi a spotřeba paliva při dopravě a pokládce.

Digitální sběr dat a environmentální analýza pro EPD

Environmentální prohlášení o výrobku (EPD) poskytuje standardizované soubory údajů o dopadech různých materiálů a výrobků na životní prostředí. Tyto dopady zahrnují mimo jiné:

- potenciál globálního oteplování (GWP) - emise ekvivalentu CO₂
- potenciál acidifikace (AP) – vliv na kyselý dešť a okyselování půdy
- potenciál eutrofizace (EP) – vliv na eutrofizaci vodních útvarů/zdrojů
- potenciál poškozování ozonové vrstvy (ODP) – vliv na ozonovou vrstvu
- fotochemický potenciál tvorby ozonu (POCP) – tvorba přízemního ozonu (smogu)
- spotřeba primární energie – spotřeba obnovitelných a neobnovitelných zdrojů energie

Ačkoli je parametr GWP relevantní především v průmyslu asfaltových výrobků a hmot, v kompletní analýze je třeba vyhodnotit i ostatní ovlivňující faktory.

Dodané materiálové vstupy (A1)

EPD vstupních materiálů výroby asfaltové směsi, jako je asfaltové pojivo, filer a kamenivo, lze získat z různých databází, které lze použít jako výchozí krok výpočtu. K dispozici je také řada výpočetních modelů pro stanovení jednotlivých hodnot EPD v závislosti na konkrétní surovině/vstupním materiálu a výrobním postupu. Pozitivní vliv na celkovou environmentální bilanci má použití znovuzískané asfaltové směsi jako suroviny.

Tabulka 1: Příklad EPD pro 1 kg přísady Anova® 1815 (rejuvenátor společnosti Cargill) [2]

	A1	A2	A3	Total A1-A3
Core mandatory impact indicators (TRACI)				
Global warming potential (kg CO ₂ eq.)	6.43E-01	7.15E-05	8.91E-04	6.44E-01
Ozone depletion (kg CFC-11 eq.)	6.43E-08	1.16E-11	3.26E-11	6.44E-08
Eutrophication (kg N eq.)	1.90E-03	5.86E-08	1.18E-06	1.90E-03
Acidification (kg SO ₂ eq.)	2.24E-03	5.97E-07	3.70E-06	2.25E-03
Photochemical oxidation (POCP) (kg C ₂ H ₄ eq.)	1.62E-05	5.61E-08	1.76E-07	1.64E-05
Additional optional impact categories (TRACI)				
Abiotic depletion, element (ADPE) (kg Sb eq.)	2.95E-07	5.70E-10	3.21E-09	2.99E-07
Carcinogenics (CTUh)	1.92E-08	2.15E-12	7.51E-12	1.93E-08
Ecotoxicity (CTUe)	5.48E+00	4.73E-05	2.26E-04	5.48E+00
Fossil fuel depletion (MJ surplus)	6.60E-01	1.07E-04	2.43E-04	6.60E-01
Non carcinogenics (CTUh)	1.55E-07	8.11E-12	7.42E-11	1.55E-07
Respiratory effects (kg PM _{2.5} eq.)	5.83E-04	7.72E-08	4.69E-06	5.88E-04
Smog (kg O ₃ eq.)	4.01E-02	1.62E-05	3.24E-05	4.01E-02

Termíny v tabulce: základní povinné ukazatele dopadu (TRACI), potenciál globálního oteplování (kg CO₂), poškozování ozonové vrstvy (kg CFC-11), eutrofizace (kg N), acidifikace (kg SO₂), fotochemická oxidace POCP (kg C₂H₄), potenciální další vlivové kategorie (TRACI), abiotické vyčerpání, prvky (ADPE) (kg Sb), karcinogeny (CTUh), ekotoxická (CTUe), spotřeba fosilních paliv (MJ surplus), nekarcinogenní látky (CTUh), respirační vliv (kg PM_{2.5}), smog (kg O₃)

Doprava materiálových vstupů a výsledného výrobku (A2 a A4)

Moderní telematické systémy vozového parku zaznamenávají vzdálenosti, zatížení a spotřebu paliva nákladních vozidel přepravujících materiály z místa výroby vstupních materiálů do obalovny nebo z obalovny na místo stavby (A2). Při přepravě asfaltové směsi na staveniště (A4) mohou být podpořeny i dalšími speciálními nástroji, jako je Q Transport, které zaznamenávají nejen vzdálenost, ale poskytují i cenné informace o vlastní stavbě a variantách přepravních tras.

Tyto údaje lze využít pro výpočet dopadu dopravy na životní prostředí na základě vzdálenosti a hodnot EPD na jeden km v závislosti na technologii pohonu nákladního vozidla (naftové/benzinové, elektrické, vodíkové apod.).

Údaje o kontrole výroby ze zařízení na výrobu asfaltových směsí (A3)

Hodnoty emisí při výrobě asfaltové směsi závisí na řadě faktorů. Energetickou náročnost a emise ovlivňuje nejen použitý zdroj energie, ale také teplota asfaltové směsi při výrobě, způsob výroby v případě výroby nízkoteplotní asfaltové směsi, pořadí dávkování jednotlivých složek, množství kameniva a R-materiálu a množství vyrobené v jedné výrobní šarži. Moderní plánovací systémy, jako je Q Plant, pomáhají plánovat a optimalizovat výrobní program na základě digitálních objednávek. Řídicí systémy závodu pak mohou poskytnout aktuální údaje o spotřebě energie. Řešení „Business Intelligence“ i algoritmus umělé inteligence a statistiky pak lze využít ke zjištění informací o vztahu mezi výrobním programem a spotřebou energie, emisemi a dalšími relevantními dopady na životní prostředí.

Na základě těchto výsledků lze vypočítat hodnoty relevantní pro EPD asfaltových směsí.

Tabulka 2: Příklad vypočtených faktorů dopadu [3]

Impact category		Unit	AG - Pen. Bitumen			
			Raw materials A1	Transports to site A2	Production A3	Sum A1-A3
Global Warming (GWP)	Fossil	Kg CO ₂ ,eq	1,32E+01	1,84E+00	6,25E+00	2,13E+01
	Biogenic	Kg CO ₂ ,eq	1,41E-01	5,23E-03	4,66E-01	6,12E-01
	Land use and LU Change	Kg CO ₂ ,eq	7,57E-03	7,83E-04	3,16E-02	3,99E-02
	Total	Kg CO₂,eq	1,34E+01	1,84E+00	6,75E+00	2,20E+01
Acidification		Kg SO ₂ ,eq	9,99E-02	4,18E-03	4,25E-02	1,47E-01
Eutrophication Freshwater		Kg PO ₄ ,eq	2,15E-03	3,85E-04	1,39E-03	3,92E-03
Photochemical Ozone Formation		Kg C ₂ H ₄ ,eq	6,49E-02	2,80E-03	4,41E-02	1,12E-01
Resource use, minerals and metals		kg Sb,eq	7,01E-05	7,16E-06	2,18E-05	9,90E-05
Resource use, fossils		MJ	2,26E+03	2,78E+01	1,02E+02	2,39E+03
Ozone depletion		kg CFC11,eq	3,68E-07	4,23E-07	1,29E-06	2,08E-06

Termíny v tabulce: silniční asfalt, kategorie, Jednotka, Vstupní materiál, doprava na obalovnu A2, Výroba A3, Celkem A1 až A3, globální oteplení (GWP), fosilní, biogenické, využití půdy a území, celkem, acidifikace, eutrofizace čerstvé vody, fotochemický potenciál tvorby ozonu, spotřeba minerálních a kovových zdrojů, spotřeba fosilních zdrojů, poškozování ozonové vrstvy

Monitoring při vlastní pokládce (A5)

Osazení finišerů a válců systémem GPS a senzory (např. Q Machines) lze nejen měřit a dokumentovat teplotu během rozprostírání a hutnění asfaltové směsi, ale také optimalizovat počet pojezdů. Tyto údaje se také používají k dokumentování vzdálenosti, kterou stroje na staveništi urazily. Pomocí těchto údajů a odpovídající spotřeby paliva nebo hodnot uvedených v EPD a vztažených k hodině provozu stavebních strojů lze určit dopad na množství produkovaných emisí.

Integrovaná správa dat pro spolehlivý a efektivní výpočet EPD při výstavbě vozovek

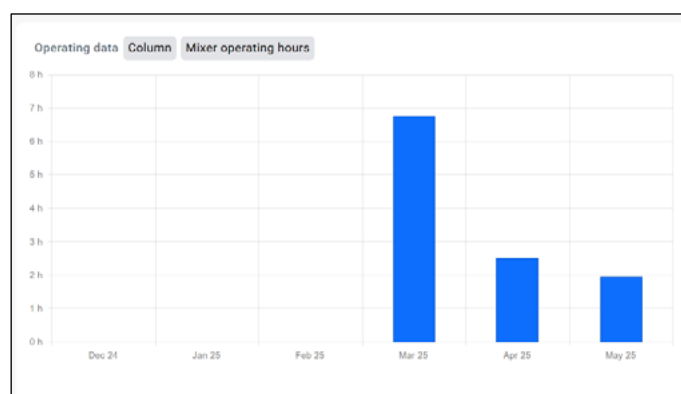
Po identifikaci zdrojů dat a shromáždění relevantních údajů je dalším důležitým krokem integrace těchto dat. Pro minimalizaci problémů s rozhraním a zajištění bezproblémových pracovních postupů je velmi výhodné využívat integrované softwarové řešení pro sběr, analýzu a vykazování dat. Jedním z příkladů takového řešení je softwarová platforma Q Point.

Centralizovaná kmenová data s Q Directories

Q Directories slouží jako centrální platforma pro správu a distribuci klíčových kmenových dat obaloven asfaltových směsí. To zahrnuje obecné informace o zařízeních i podrobné údaje o konkrétních výrobcích, které jsou ve výrobním programu. Pro další rozšíření těchto informací lze ukládat další data. Tato centralizace výrazně zjednodušuje definování a přiřazování hodnot sledovaných údajů environmentálního prohlášení o výrobku (EPD), a to pro každý jednotlivý výrobek. Vzhledem k tomu, že stavební firmy mají přímý přístup k těmto standardizovaným údajům, mohou je snadno začlenit do vlastních environmentálních výpočtů a do projektové dokumentace.

Data vztažená k výrobě asfaltové směsi s Q Plant

Integrací systému Q Plant s řídicím systémem obalovny lze automaticky zaznamenávat živá výrobní data. To umožňuje docílit dvojí výhody: jednak lze získat podrobnou analýzu výroby a jednak může propojení poskytovat data pro systémy založené na BI a AI, přičemž je vytvořen robustní základ pro ověřování a validaci hodnot EPD udržovaných v hlavních datech. Tato úroveň integrace zajišťuje, že hodnoty uvedené EPD nejsou pouze teoretické, ale mají oporu ve skutečných výrobních procesech.



Obrázek 2: Příklad vypočtených faktorů dopadu [zdroj: Q Point]

Termíny v obrázku: operační data, sloupec, provozní hodiny mišeru

Transparentnost hodnotového řetězce s Q Site a Q Transport

Při správě objednávek asfaltové směsi a časových plánů jejich dodávek prostřednictvím řešení Q Site (to představuje řešení společnosti Q Point určené pro stavební společnosti) lze vypočítat plánované hodnoty EPD v celém hodnotovém řetězci. Podpůrné údaje, jako jsou emise související s dopravou na jeden kilometr, lze snadno ukládat a udržovat v rámci platformy. Q Transport mezitím sleduje pohyb nákladních vozidel v reálném čase. To umožňuje přepočítávat hodnoty získané z EPD na základě skutečných přepravních tras a vzdáleností, čímž se zvyšuje přesnost a transparentnost sledovaných procesů.



Obrázek 3: Digitální informace o dopravě [zdroj: Q Point]

Monitorování činnosti v místě stavby pomocí Q Machines

Q Machines je flexibilní řešení, které lze s minimálním úsilím namontovat na jakýkoli finišer nebo hutnicí válec. Pomocí integrované technologie založené na GPS dochází k zaznamenání ujeté vzdálenosti a provozních hodin během rozprostírání a hutnění. Díky tomuto měření v reálném čase lze snadno vypočítat příslušné hodnoty požadované v EPD, což zajišťuje zohlednění všech činností procesu výstavby v environmentálních zprávách.



Obrázek 4: Informace o digitálním zhutňování (zdroj: Q Point)

Pokrytí životního cyklu včetně recyklace (fáze C1–C3)

Q Plant i Q Site nabízejí další možnosti plánování, které podporují též integraci procesů recyklace asfaltových vrstev. Díky tomu je možné spolehlivě vypočítat hodnoty potřebné pro EPD nejen pro fáze výroby a zabudování asfaltové směsi (A1–A5), ale také data, jež se týkají konce životního cyklu asfaltové vrstvy (C1–C3). Systém tak pokrývá i přepravu vyfrézovaného R-materiálu do recyklačního centra.

Výhody

Sběr dat pro hodnocení LCA je složitý proces. S využitím vhodných softwarových řešení, jako je systém Q Point, je získání všech potřebných údajů snadné a přináší řadu výhod:

- *Efektivita*: ruční sběr dat je nahrazen systémovým zajištěním dat v reálném čase
- *Přesnost*: použití reálných měření zvyšuje spolehlivost výsledků
- *Transparentnost*: každá fáze je sledovatelná a zdokumentovaná
- *Modelování scénářů*: poskytování těchto dat externím nástrojům BI, AI a simulačním nástrojům umožňuje snadno simulovat různé scénáře na základě skutečných hodnot
- *Dodržování předpisů a komunikace*: digitální hodnocení LCA lze použít ve zprávách o udržitelnosti a při environmentální certifikaci.

Pomocí představeného uceleného systému je možné vypočítat oddělené hodnocení LCA pro obalovnu, pro dopravu, ale také pro celou stavbu.

Výzvy a výhled do budoucnosti

Navzdory danému potenciálu je nezbytné vyřešit několik problémů:

- Standardizace dat*: Systémy často používají různé formáty a struktury. Pomocí společné datové platformy lze tuto problematiku snadno vyřešit, ale další analýzy v externích systémech vyžadují následnou standardizaci.
- Vlastnictví dat*: Je třeba stanovit jasná pravidla pro to, kdo data vlastní a sdílí. To znamená, že je zapotřebí všeobecné porozumění mezi různými členy hodnotového řetězce, aby se všechna data dostala do jedné linie.

- c. *Školení, osvojení si znalostí a adaptace*: Uživatelé musí být školení, aby mohli efektivně interpretovat a používat výsledky analýz životního cyklu (LCA). Pro rozumnou interpretaci a hodnocení je důležité znát, jak byla data získána a jaké interpretace jsou tedy přípustné. Nefiltrované zveřejnění těchto informací proto může vést k nepravdivým či mylným tvrzením či závěrům.

Integrace nástrojů umělé inteligence, vč. strojového učení do nástrojů výpočtu LCA, pravděpodobně umožní prediktivní modelování a automatickou optimalizaci environmentální výkonnosti v budoucích projektech. Lze očekávat, že v kombinaci s regulatorním tlakem a politikou zeleného zadávání veřejných zakázek se digitální hodnocení LCA stane standardní praxí při realizaci různých typů infrastrukturních projektů.

Zdroje:

- [1] EN 15804+A2 Update and What it Means for EPDs. Circular ecology. Available at: <https://circularecology.com/en-15804-a2-epd-update.html>
- [2] Cargill Anova® 1815 Rejuvenator EPD: Environmental Product Declaration (EPD). Available at: https://asphaltepd.org/static/core/upstream_epds/cargill/20230125_Verified_EPD_Anova_1815_Rejuvenator.pdf
- [3] Environmental product declaration. Sandahls grus & asfalt AB. Available at: <https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/faa06e46-e635-4040-55fa-08dab597e315/Data>

DIGITAL LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA) ALONG THE ENTIRE VALUE CHAIN

DIGITÁLNÍ ANALÝZA ŽIVOTNÍHO CYKLU (LCA) NAPŘÍČ CELÝM HODNOTOVÝM ŘETĚZCEM

Dr. Thomas Leopoldseder, Q Point GmbH, Vienna, Austria

Increasing obligations to draw up a life cycle assessment require solutions that make the process of creating on the one hand simple and on the other hand without major administrative effort. Digital solutions can help to collect, analyse and summarise all the information required for the LCA in phases A1 - A5 and C1 - C3. The paper shows which solutions can be used for this purpose. The starting point for the preparation are the EPDs values of the raw materials and information about the transport of the raw materials to the asphalt mixing plant. Data from the control system can be used to determine the ecological impact based on the actual production quantities. The environmental impact of asphalt transport, paving and compaction can also be digitally recorded and analysed. It is then very easy to create a life cycle assessment for the mixing plant or construction site based on this automatically collected information.

Rostoucí povinnost vypracovat posouzení životního cyklu vyžaduje řešení, která na jedné straně zjednoduší proces tvorby a na druhé straně nebudou vyžadovat velké administrativní úsilí. Digitální řešení mohou pomoci shromáždit, analyzovat a shrnout všechny informace potřebné pro LCA ve fázích A1 až A5 a C1 až C3. Článek a prezentace ukazují, jaká řešení lze k tomuto účelu použít. Výchozím bodem pro přípravu jsou hodnoty EPD surovin a informace o dopravě surovin do mísiřny asfaltu. Údaje z řídicího systému lze použít ke stanovení ekologického dopadu na základě skutečných výrobních množství. Vliv dopravy asfaltu, pokládky a hutnění na životní prostředí lze rovněž digitálně zaznamenat a analyzovat. Na základě těchto automaticky shromážděných informací je pak velmi snadné vytvořit hodnocení životního cyklu mísiřny nebo staveniště.

Introduction

With rising environmental and regulatory requirements, the demand for comprehensive life cycle assessments (LCAs) in infrastructure projects is growing rapidly. Asphalt road construction faces particular challenges in delivering reliable environmental data while maintaining cost-efficiency. Digital solutions offer a promising path forward: they enable automated, transparent, and accurate LCAs across the entire value chain, particularly in the early life cycle stages A1 to A5 and C1 – C3 as defined by EN 15804.

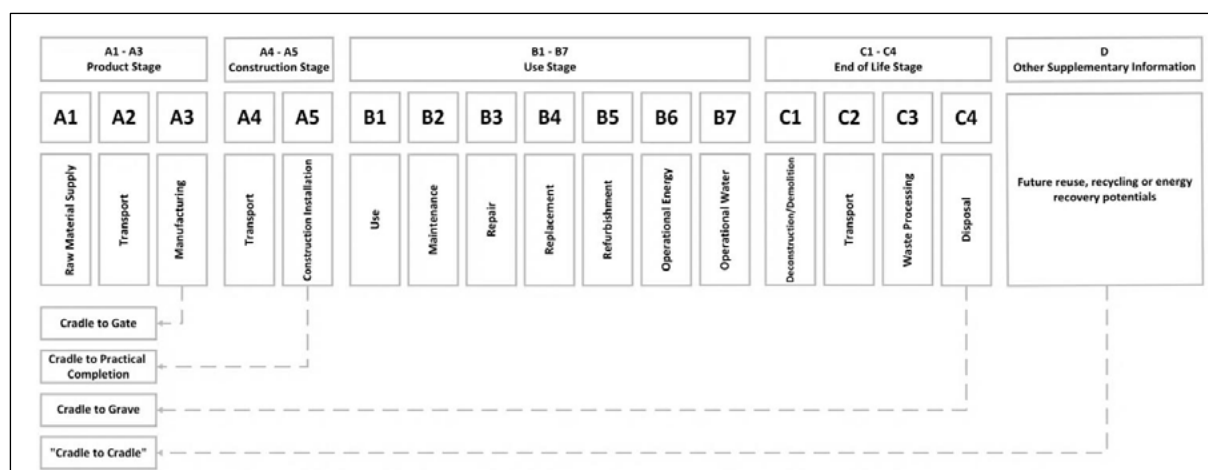


Figure 1: Life cycle stages according to EN 15804 [source: <https://circularecology.com/en-15804-a2-epd-update.html>]

Relevance of LCA Stages A1–A5, C1–C3

Especially the stages A1 to A5 which cover the product and construction process life cycle and C1 – C3 are relevant for the LCA:

- A1: Raw material supply
- A2: Transport to the asphalt plant
- A3: Manufacturing of asphalt
- A4: Transport to the construction site
- A5: Construction and installation processes
- C1: Reclaiming of asphalt as RAP
- C2: Transport of RAP to recycling plant / asphalt plant
- C3: Re-using of asphalt in the production process

In asphalt road construction, these phases typically account for the majority of environmental impacts, such as CO₂ emissions from bitumen production, energy usage during asphalt mixing, and fuel consumption in transport and paving operations.

Digital data collection and Environmental Analysis EPDs

Environmental Product Declarations (EPDs) provide standardized datasets on environmental impacts of different materials. These impacts include, among others:

- Global warming potential (GWP) - CO₂ emissions
- Acidification potential (AP) - effects on acid rain and soil acidification
- Eutrophication potential (EP) - effects on eutrophication of water bodies
- Ozone depletion potential (ODP) - effects on the ozone layer
- Photochemical ozone creation potential (POCP) - formation of ground-level ozone (smog)
- Primary energy consumption - consumption of renewable and non-renewable energy sources

Although the GWP parameter is primarily relevant in the asphalt industry, all other influencing factors must also be evaluated in a complete analysis.

Raw materials as starting point (A1)

EPDs for raw materials such as bitumen, fillers, and aggregates can be received from various databases, which can be used as a starting point for the calculation. There are also a variety of calculation models for calculating individual EPD values depending on the specific raw material and production situation available.

The use of recycled asphalt as a raw material has a particularly positive effect on the overall eco-balance.

	A1	A2	A3	Total A1-A3
Core mandatory impact indicators (TRACI)				
Global warming potential (kg CO ₂ eq.)	6.43E-01	7.15E-05	8.91E-04	6.44E-01
Ozone depletion (kg CFC-11 eq.)	6.43E-08	1.16E-11	3.26E-11	6.44E-08
Eutrophication (kg N eq.)	1.90E-03	5.86E-08	1.18E-06	1.90E-03
Acidification (kg SO ₂ eq.)	2.24E-03	5.97E-07	3.70E-06	2.25E-03
Photochemical oxidation (POCP) (kg C ₂ H ₄ eq.)	1.62E-05	5.61E-08	1.76E-07	1.64E-05
Additional optional impact categories (TRACI)				
Abiotic depletion, element (ADPE) (kg Sb eq.)	2.95E-07	5.70E-10	3.21E-09	2.99E-07
Carcinogenics (CTUh)	1.92E-08	2.15E-12	7.51E-12	1.93E-08
Ecotoxicity (CTUe)	5.48E+00	4.73E-05	2.26E-04	5.48E+00
Fossil fuel depletion (MJ surplus)	6.60E-01	1.07E-04	2.43E-04	6.60E-01
Non carcinogenics (CTUh)	1.55E-07	8.11E-12	7.42E-11	1.55E-07
Respiratory effects (kg PM _{2.5} eq.)	5.83E-04	7.72E-08	4.69E-06	5.88E-04
Smog (kg O ₃ eq.)	4.01E-02	1.62E-05	3.24E-05	4.01E-02

Figure 2: Example of EPD for 1 kg of Anova® 1815 Rejuvenator (= asphalt recycling agent produced by Cargill) [source:

https://asphaltpd.org/static/core/upstream_epds/cargill/20230125_Verified_EP_D_Anova_1815_Rejuvenator.pdf

Transport monitoring (A2 and A4)

Modern fleet telematics systems record distances, loads, fuel consumption of trucks transporting materials from quarries to mixing plants (A2). Especially for the transport of the asphalt to the construction site (A4), can be supported by special tools like Q Transport, recording not only the distance but giving also valuable information about the construction and the routes.

This data can be used for calculating the environmental impact of the transport based on the distance and the EPD values per km, depending on the drive technology of the truck (fuel, electric, hydrogen, ...).

Production control data from the asphalt plant (A3)

The emission values during production depend on a variety of factors. Not only the energy source used, but also the temperature of the asphalt during production, the type of production in case of low-temperature asphalt, the sequence of production batches, the quantity of aggregates and RAP and the production quantities produced in a production batch influence the energy requirement and the emissions. Modern planning systems, such as Q Plant, help to plan and optimise the production programme on the basis of digital orders. The plant control systems can then provide the actual data on energy consumption. Business intelligence solutions and AI and statistic algorithm can then be used to determine information about the relationship between the production program and the energy consumption, the emissions and other relevant environmental impacts.

Based on that results EPD values of the asphalt products can be calculated.

Impact category		Unit	AG - Pen. Bitumen			
			Raw materials A1	Transports to site A2	Production A3	Sum A1-A3
Global Warming (GWP)	Fossil	Kg CO ₂ ,eq	1,32E+01	1,84E+00	6,25E+00	2,13E+01
	Biogenic	Kg CO ₂ ,eq	1,41E-01	5,23E-03	4,66E-01	6,12E-01
	Land use and LU Change	Kg CO ₂ ,eq	7,57E-03	7,83E-04	3,16E-02	3,99E-02
	Total	Kg CO₂,eq	1,34E+01	1,84E+00	6,75E+00	2,20E+01
Acidification		Kg SO ₂ ,eq	9,99E-02	4,18E-03	4,25E-02	1,47E-01
Eutrophication Freshwater		Kg PO ₄ ,eq	2,15E-03	3,85E-04	1,39E-03	3,92E-03
Photochemical Ozone Formation		Kg C ₂ H ₄ ,eq	6,49E-02	2,80E-03	4,41E-02	1,12E-01
Resource use, minerals and metals		kg Sb,eq	7,01E-05	7,16E-06	2,18E-05	9,90E-05
Resource use, fossils		MJ	2,26E+03	2,78E+01	1,02E+02	2,39E+03
Ozone depletion		kg CFC11,eq	3,68E-07	4,23E-07	1,29E-06	2,08E-06

Figure 3: Example of calculated impact factors [source: <https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/faa06e46-e635-4040-55fa-08dab597e315/Data>]

Construction site monitoring (A5)

By equipping pavers and rollers with GPS systems and sensors (such as Q Machines), not only the temperature during paving and compaction can be measured and documented, but the number of passes can also be optimised. This data is also used to document the distance travelled by the machines on the construction site. With the help of this data and the corresponding fuel consumption or an EPD value per operating hour of the machines, the impact on emissions can be determined.

Integrated Data Management for Reliable and Efficient EPD Calculation in Road Construction

Once data sources have been identified and relevant data collected, the next critical step is integration. To minimize interface issues and ensure seamless workflows, it is highly beneficial to utilize an integrated software solution for data collection, analysis, and reporting. A prime example of such a solution is the Q Point software platform.

Centralized Master Data with Q Directories

Q Directories serves as a central platform for managing and distributing key master data of asphalt plants. This includes general plant information as well as detailed data on the specific products that can be manufactured. Additional metadata can be stored to further enrich this information. This centralization significantly simplifies the definition and assignment of Environmental Product Declaration (EPD) values for each product. Since construction companies have direct access to this standardized data, they can easily incorporate it into their own environmental calculations and project documentation.

Production-Based Data with Q Plant

By integrating Q Plant with the asphalt plant's control system, live production data can be captured automatically. This enables a two-fold benefit: it allows for detailed production analysis, can provide data for BI and AI systems and provides a robust foundation to verify and validate the EPD values maintained in the master data. This level of integration ensures that EPD values are not only theoretical but grounded in actual production processes.

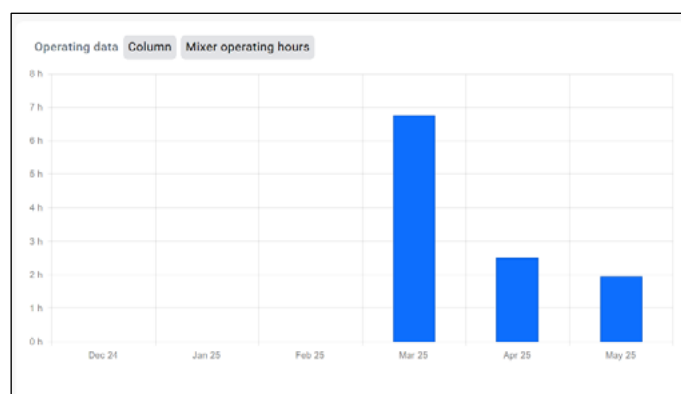


Figure 4: Example of calculated impact factors [source: Q Point]

Value Chain Transparency with Q Site and Q Transport

When asphalt orders and delivery schedules are managed via Q Site—Q Point's solution for construction companies—planned EPD values can be calculated across the entire value chain. Supporting data, such as transport-related emissions per kilometer, can be easily stored and maintained within the platform. Meanwhile, Q Transport enables real-time tracking of truck movements. This allows the recalculation of EPDs based on actual transport routes and distances, enhancing accuracy and transparency.



Figure 5: Digital transport information [source: Q Point]

On-Site Activity Monitoring with Q Machines

Q Machines is a flexible solution that can be mounted on any paver and roller with minimal effort. Using integrated GPS technology, it records distances traveled and operating hours during paving and

compaction processes. This real-time measurement makes it straightforward to calculate the corresponding EPD values, ensuring that on-site activities are fully accounted for in environmental reporting.



Figure 6: Digital compaction information [source: Q Point]

Lifecycle Coverage Including Recycling (Phases C1–C3)

Both Q Plant and Q Site offer additional planning capabilities that support the recycling process. As a result, it becomes possible to reliably calculate EPD values not only for the production and use phases (A1–A5), but also for the end-of-life stages (C1–C3) of the asphalt lifecycle. Especially the transport of the recycling material to the recycling plant can be covered by this system.

Advantages

The collection of data for a LCA is a complex process. With the use of suitable software solutions like the Q Point system it is very easy to get all this data and a lot of advantages arise:

- Efficiency: Manual data collection is replaced by system-based, real-time data feeds
- Accuracy: Use of real measurements increases reliability of results
- Transparency: Every stage is traceable and documented
- Scenario modeling: Providing that data to external BI, AI and simulation tools it is easy to simulate different scenarios based on real values.
- Compliance and communication: Digital LCAs can be used in sustainability reports, and certifications

With this method it is possible to calculate separate LCA for the asphalt plant, for the transport but also for the whole asphalt construction.

Challenges and future outlook

Despite the potential, several challenges must be addressed:

- Data standardization: Systems often use different formats and structures. By using one platform this topic can easily be solved but further analyses in external systems need still standardization.
- Data ownership: Clear rules are needed on who owns and shares the data. This means that a common understanding of the different members of the value chain is needed, to get all the data into the line.
- Training and adoption: Users need training to interpret and use LCA results effectively. For a reasonable interpretation and evaluation, it is important to know how the data was obtained and which interpretations are therefore permissible. Unfiltered disclosure of this information can therefore lead to false statements.

The integration of AI and machine learning into LCA tools will likely allow predictive modeling and automatic optimization of environmental performance in future projects. Combined with regulatory pressure and green procurement policies, digital LCAs are expected to become standard practice in infrastructure delivery.

ČASOVÉ ŘADY VÝVOJE HLUČNOSTI RŮZNÝCH POVRCHŮ VOZOVKY

NOISE LEVELS AND THEIR CHANGES OVER TIME FOR DIFFERENT ROAD SURFACES

Ing. Vítězslav Křivánek, Ph.D., Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.

Ing. Petra Marková, Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.

Ing. Blanka Hablovičová, Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.

Ing. Josef Stryk, Ph.D., Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.

Mgr. Aleš Peiger, Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.

V příspěvku jsou představeny vybrané nejnovější výsledky z národního měření hlučnosti povrchů vozovek metodou CPX. Pravidelný sběr dat proměnného parametru vozovky (hlučnosti) pro další využití je na CDV realizován více než dekádu. Dílčí aktivity momentálně pokračují v rámci výzkumného projektu TA ČR č. CK04000058. Výsledky byly, jsou a budou využity na národní úrovni v TKP 7, na mezinárodní úrovni v připravovaném předpise „Characterisation of the acoustic properties of road surfaces“ i při přípravě podkladů pro zcela nový technický předpis na hodnocení hlučnosti povrchů vozovek pozemních komunikací – zavedení klasifikace proměnného parametru hlučnosti na síťové úrovni obdobně jako např. protismykové vlastnosti.

The paper presents selected recent results from national road surface noise measurements using the CPX method. Regular data collection of this variable road surface parameter (noise) for further application has been carried out at CDV for more than a decade. Partial activities are ongoing under the research project, which is funded by the Technology Agency of the Czech Republic (project No. CK04000058). The results have been, are, and will continue to be used at the national level in TKP 7, and internationally in the forthcoming regulation “Characterisation of the Acoustic Properties of Road Surfaces”. The results are also contributing to the development of a completely new technical regulation for assessing the noise characteristics of road surfaces – introducing a classification system for this variable parameter at the road network level, similar to that applied to, for example, skid resistance.

Úvod

Hluk má značný dopad na životní prostředí a zdraví člověka a v posledních letech nabývá čím dál více na významu. Převažujícím zdrojem hluku v obcích je hluk ze silniční dopravy, který je závislý zejména na intenzitě dopravního proudu, jeho složení i rychlosti a do značné míry je ovlivňován též stavem pozemní komunikace, a to především stavem její obrusné vrstvy. Jeden z hlavních zdrojů hluku je generován kontaktem pneumatiky s vozovkou. U moderních osobních vozidel vybavených spalovacím motorem převládá tento hluk již od rychlosti cca 40 km/h [1], u vozidel s elektromotorem již od rychlosti cca 20 km/h [2]. Nejnovější národní výzkum uvádí převládající hluk z odvalování pneumatiky pro spalovací motory od 30 km/h, vznětové motory od 35 km/h a pro elektro auta od 25 km/h [3]. Hlučnost jednotlivých typů povrchů pozemních komunikací se mezi sebou liší a také se mění v čase (asfaltové, betonové, nízkohlučné povrchy, dlažba, nástřiky aj.). Bylo prokázáno, a to nejen v České republice, že hlučnost obrusných vrstev vozovek v čase roste [4–6].

Minimálně v rámci EU se k monitoringu hlučnosti povrchů pozemních komunikací využívá především dynamická metoda malé vzdálenosti (close-proximity (CPX)) definovaná normou ISO 11819-2 [7]. K měření se v souladu s normou ISO/TS 11819-3 [8] vždy používá referenční pneumatika P225/60 R16 označená v normě jako P1 (simulace osobních vozidel). Tímto krokem je ošetřena vlastní nejistota měření styku pneumatika/vozovka, která by mohla vzniknout používáním různých směsí pneumatik a dezénů (všechny parametry dle normy ASTM F2493 [9] jsou dlouhodobě zaručovány). Na jednání CEN/TC 227/WG 5 byly představeny výsledky testování, které potvrdily, že pomocí současných norem ISO 11819-2 a ISO/TS 11819-3 lze provádět opakovatelná a vzájemně srovnatelná měření, i když se používají různé typy CPX přívěsů, ovšem za předpokladu, že jsou dodrženy i ostatní související normy [4, 10]. Obecně lze k získání vstupních dat o hlučnosti obrusných vrstev použít i jiné metody (CB [11], CPB [12], OBSI [13], SPB [14]) či další postupy [15]. Tyto metody však nejsou tak univerzální, prakticky aplikovatelné v terénu, ani tak rozšířené a běžně využívané.

Pravidelný monitoring hlučnosti pozemních komunikací

Pravidelný monitoring hlučnosti povrchů vozovek vybraných úseků komunikací probíhá od roku 2012 metodou CPX. Měření jsou každý rok opakována pomocí nové referenční pneumatiky, získaná data jsou korigována na příslušné referenční rychlosti a teploty tak, aby mohlo být provedeno příslušné srovnání změn hodnot v čase. Do současnosti bylo provedeno přes 6 tisíc jednotlivých unikátních měření provedených in situ metodou CPX realizovaných Centrem dopravního výzkumu (CDV). Byly měřeny vozovky různého stáří i různých typů povrchů. Data jsou zejména z projektu: TA01030459, TE01020168, TA04021486, MD č. j. 8449/2021-710/74, TL02000258, CK02000121 a nejnověji CK04000058. Vlastní způsob měření, podmínky, analýzy i další zpracování vycházející z předpisů a norem ISO 11819-2, ISO/TS 11819-3, ISO/TS 13471-1 [16], ČSN 73 6120 [17], TKP 7 [18], aj. odpovídají zavedeným postupům, které byly uvedeny například v příspěvku z předcházejícího ročníku konference [19]. Měření je prováděno na unikátním přívěsu CDV [20], kdy výsledky byly mezinárodně validovány [10]. Příspěvek tak cíleně neuvádí dané obecnější i dříve uvedené informace.

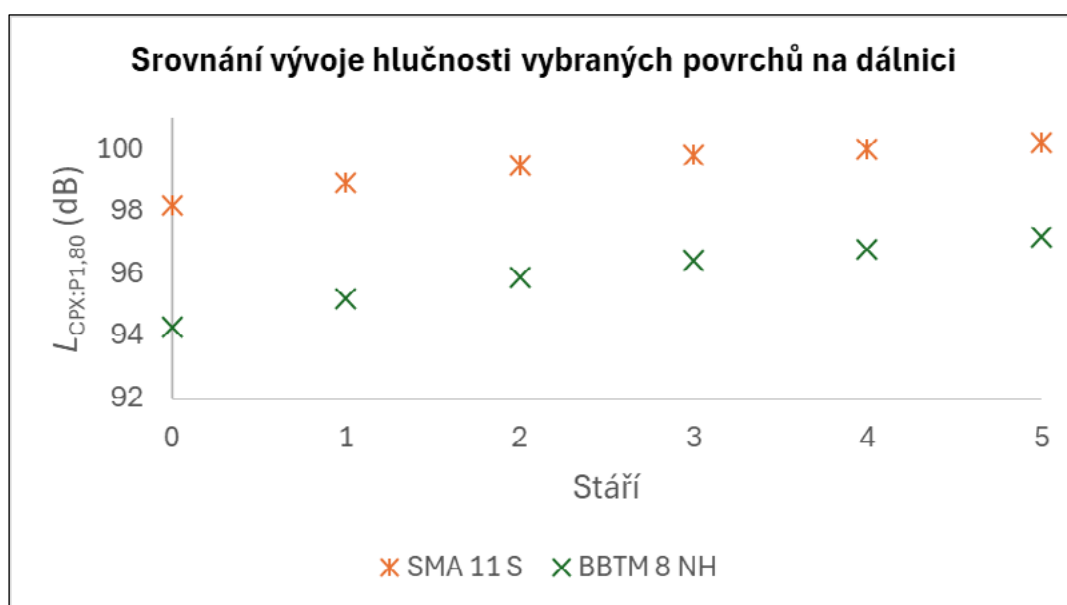
Dlouhodobé výsledky měření metodou CPX

Mezi nejpoužívanější asfaltový povrch na nejvytíženějších komunikacích v ČR, zejména na dálnicích a silnicích I. třídy, patří asfaltový koberec mastixový s maximální velikostí frakce použitého kameniva 11 mm se zvýšenou odolností proti tvorbě trvalých deformací (SMA 11 S) [21]. Povrch SMA 11 S je využit i pro definici národní srovnávací základny z hlediska hlučnosti, která je stanovena pro rychlost 80 km/h hodnotou 98 dB. Referenční hodnota odpovídá průměrné hlučnosti všech analyzovaných povrchů SMA 11 S na celém území ČR po cca 1 roce používání. (Popřípadě SMA 11 S je kombinováno s nejpoužívanějším povrchem v ČR ACO 11 [21]. Řádově jde o několik stovek měření.) Reálná hlučnost v dané lokalitě může být vyšší i nižší, než je uvedená zaokrouhlená celočíselná referenční hodnota, což je zřejmé i z obrázků 1–4. Z rozsáhlého souboru dat měření na dálniční síti byl vybrán akustický monitoring na vybraných lokalitách, kde bezprostředně po sobě (mezi danými exity dálnice) jsou použity různé obrusné vrstvy / povrchové úpravy, jež jsou stejného stáří. Lze tak s výhodou provést porovnání akustických změn v dané lokalitě. Pro účely tohoto příspěvku byly vybrány 4 lokality, kde je vždy možné srovnání vůči povrchu SMA 11 S, ze kterého je odvozena vztažná referenční akustická hodnota vlastního povrchu po pokládce. Časový vývoj akustických hodnot tohoto povrchu je využit i pro návrh klasifikace hlučnosti jako proměnného parametru povrchu vozovky. Zde se počítá s celkovou životností vrchního krytu vozovky a jako podkladová data jsou použita i měření na starších površích. Lokality k prezentaci byly vybrány tak, aby bylo možné zachytit vždy alespoň pětiletý vývoj od pokládky, byť některé časové řady jsou delší. Je provedeno porovnání starší nízkohlučné směsi BBTM 8 NH, která odpovídá požadavkům TP 259 [22] (TKP 7) – obrázek 1, novější nízkohlučné směsi SMA 8 NH, provedené již dle platné dokumentace TP 259 (TKP 7) – obrázek 2. Existují však i další typy povrchů, které z hlediska ČSN 73 6120 nejsou definovány jako obrusné vrstvy se sníženou hlučností, přesto po pokládce vykazují nižší hlučnost, než je stanovená referenční hodnota. Jde například o jemnozrnné uzavřené směsi typu BBTM 8 A, jejichž porovnání je znázorněno na obrázku 3. Nižší hlučnosti lze dosáhnout také u betonových povrchů, pokud jsou vhodně upraveny. Povrchu typu SMA 11 S akusticky odpovídá povrchová úprava cementobetonového krytu (CBK) s obnaženým kamenivem (vymývaný beton). Nižší hlučnost CBK vykazuje také dříve hojně prováděná úprava pomocí vlečené juty nebo nově nižší hlučnost vykazuje i vhodná technologie grindingu (broušení), jak zachycuje obrázek 4.

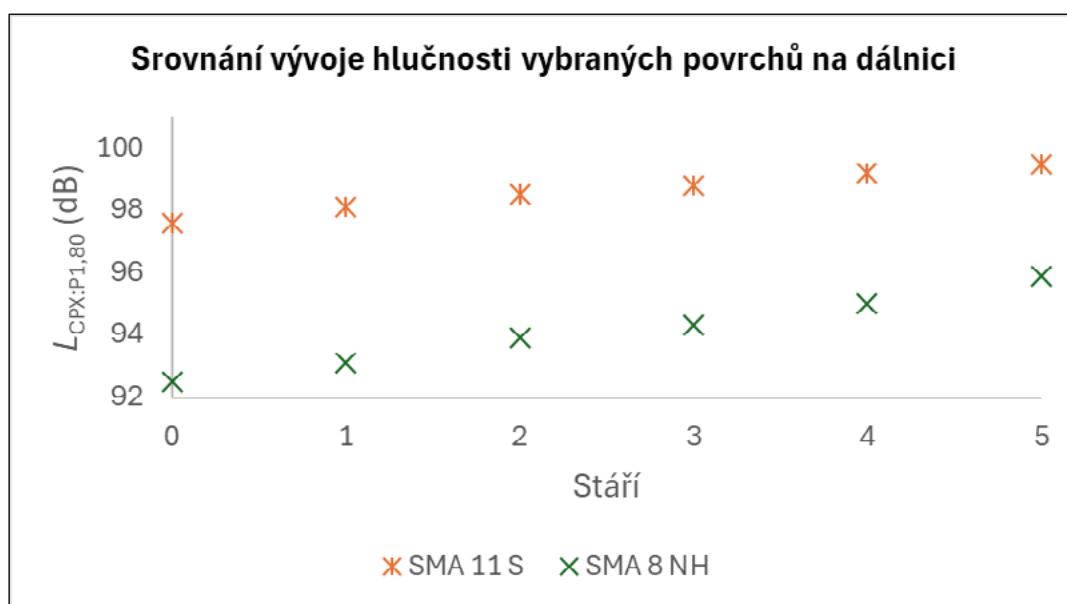
Ve všech čtyřech případech (obrázky 1–4) je vidět velmi dobrá korelace konkrétního povrchu SMA 11 S vůči hodnotám uvedeným v TKP 7 (tabulka P6.2). V nich je definován průměrný rozdíl mezi referenční hodnotou hlučnosti povrchu pozemní komunikace změřené metodou CPX pro rychlost 80 km/h stanovenou na 98 dB. Dle tabulky v TKP 7 by nový povrch SMA 11 S měl mít přibližně hlučnost 97,5 dB a tentýž povrch starý 5 let hlučnost 99,5 dB. V naměřených lokalitách se hlučnost SMA 11 S po pokládce pohybovala v intervalu 97,4–98,3 dB. U povrchů stejného typu, které jsou staré 5 let, jsou naměřené hodnoty hlučnosti v rozmezí 99,4–100,2 dB. Vzhledem k vyšší intenzitě dopravy na dálniční síti, oproti silnicím I. a dalších tříd, které jsou v hodnotách v TKP 7 taktéž zahrnuty, lze velmi mírně vyšší lokální výsledky (cca do 0,5 dB) pochopit. Navíc je nutné počítat s nejistotou měření (normou udávána v úrovni 1 dB) i dílčím rozptylem naměřených hodnot. Vybraná měření pro SMA 11 S odpovídají referenční úrovni, proto lze považovat porovnání výsledků dalších povrchů v jednotlivých grafech za validní.

U povrchů, které jsou v souladu s definicí obrusných vrstev se sníženou hlučností v ČSN 73 6120 (obrázky 1 a 2) je zřejmé, že po pokládce je snížení hlučnosti nejvyšší a oproti běžnému povrchu je zde rozdíl cca 4 dB pro BBTM 8 NH a cca 5 dB pro SMA 8 NH. Po pěti letech oproti pevné referenční hodnotě (98 dB) je stále dosahován akustický útlum v úrovni cca 1 dB pro BBTM 8 NH a cca 2 dB pro SMA 8 NH. Respektive srovnáme-li absolutní naměřené hodnoty v daných místech, je zřejmé, že

hlučnost povrchů v čase narůstá, a to jak u typu SMA 11 S, tak u nízkohlučných obrusných směsí. Dochází tak k „přivírání nůžek“ – absolutního rozdílu mezi naměřenými hodnotami. Povrch BBTM 8 NH se za pět let přiblížil o cca 1 dB k SMA 11 S. (Hlučnost BBTM 8 NH se po pěti letech zvedla o 1 dB více než hlučnost SMA 11 S, tj. absolutní rozdíl 5 let starých povrchů je cca 3 dB). Povrch SMA 8 NH se za pět let přiblížil cca o 1,5 dB k SMA 11 S (absolutní rozdíl 5 let starých povrchů je cca 3,5 dB). Lepších hodnot hlučnosti, než udává tabulka v TKP 7, lze zdůvodnit vývojem a zlepšováním nízkohlučných povrchů v čase (tj. v TKP 7 jsou využita převážně starší data), viz příspěvek v předcházejícím ročníku konference [19]. Dále se na dálniční síti výrazně méně vyskytují problémy se znečištěním vozovky, například zemědělskou technikou nebo ze stavební činnosti aj. Průměrná rychlost dopravního proudu je zde také výrazně vyšší než na silnicích I. a nižších tříd, kde je zpravidla nižší maximální rychlost, tj. je zde lepší uplatnění „samočistícího“ efektu. Na jiných typech komunikací jsou tyto pozitivní vlivy zpravidla méně výrazné, což je také důvodem, proč průměrné hodnoty uváděné v TKP 7 působí konzervativněji. Tyto hodnoty by však bylo vhodné aktualizovat na základě novějších dat.

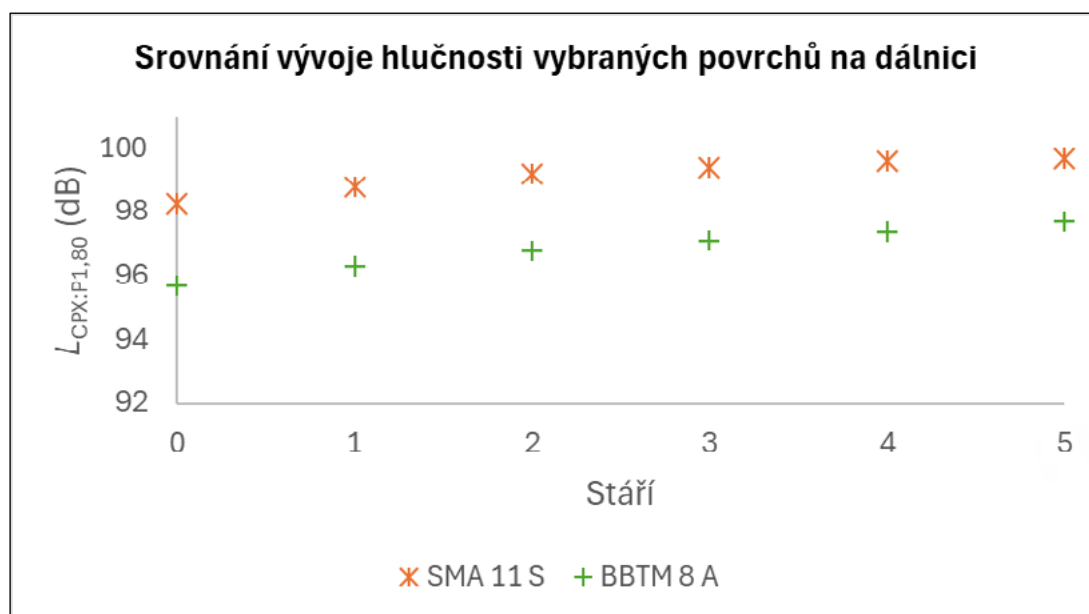


Obrázek 1: Srovnání vývoje hlučnosti v rámci opakovaných každoročních měření běžného (SMA 11 S) a nízkohlučného (BBTM 8 NH) povrchu po dobu pěti let

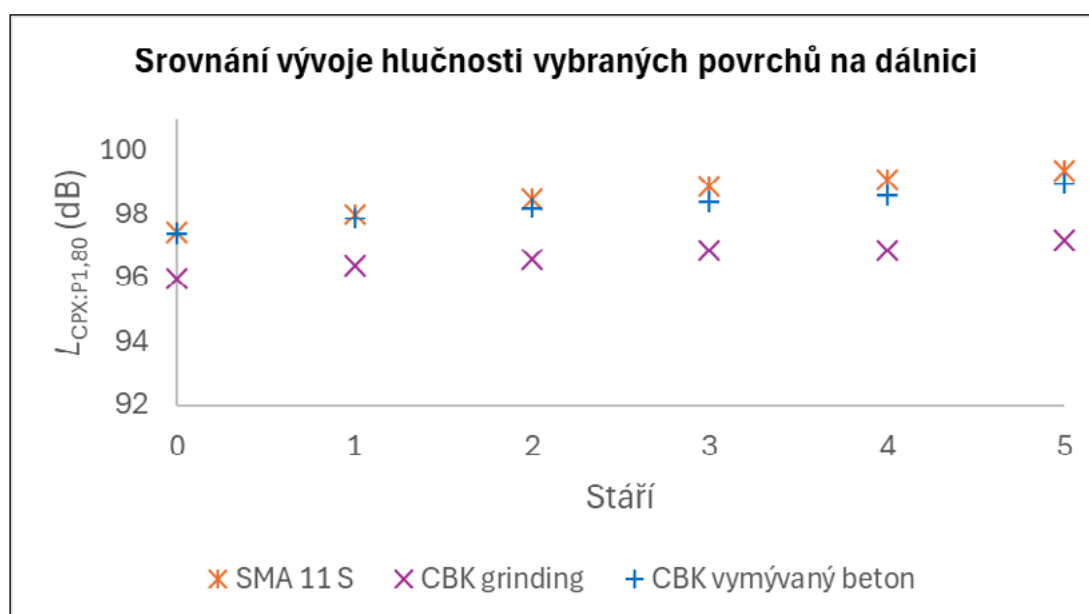


Obrázek 2: Srovnání vývoje hlučnosti v rámci opakovaných každoročních měření běžného (SMA 11 S) a nízkohlučného (SMA 8 NH) povrchu po dobu pěti let

Hlučnost lze snížit i jiným způsobem než čistě specializovanými nízkohlučnými povrchy, kdy volíme vhodnou optimalizovanou strukturu, velikost kameniva aj. Použitím nižší frakce kameniva (BBTM 8 A) (obrázek 3) došlo po pokládce vůči SMA 11 S k dosažení dodatečného akustického útlumu v úrovni cca 2,5 dB. Po pěti letech se povrch BBTM 8 A přiblížil o cca 0,5 dB k SMA 11 S (absolutní rozdíl 5 let starých povrchů je cca 2 dB). Vhodná optimalizovaná struktura na CBK, např. využití technologie grindingu (obrázek 4) taktéž může vést k dodatečnému akustickému útlumu oproti standardní úpravě. Oproti SMA 11 S, respektive CBK vymývanému betonu, byl v dané lokalitě grinding cca o 1,5 dB tišší. Po pěti letech CBK grinding přibližně stále vykazuje stejný absolutní rozdíl vůči CBK vymývanému betonu, kdy díky pomalejšímu nárůstu hlučnosti na betonových površích došlo vůči asfaltovému povrchu SMA 11 S po pěti letech ke zvýšení absolutního rozdílu na cca 2 dB.



Obrázek 3: Srovnání vývoje hlučnosti v rámci opakovaných každoročních měření běžného (SMA 11 S) povrchu a jemnozrnné směsi (BBTM 8 A) po dobu pěti let



Obrázek 4: Srovnání vývoje hlučnosti v rámci opakovaných každoročních měření běžného (SMA 11 S) povrchu a různých cementobetonových úprav (grinding a vymývaný beton) po dobu pěti let

Závěr

Pro akustické posouzení povrchů vozovek pozemních komunikací se využívá ověřená a schválená metoda CPX dle ISO 11819-2. Pomocí této metody na základě dat z měření několika navazujících výzkumných projektů bylo možné udržet dlouhodobou kontinuitu sběru změn akustických charakteristik povrchů pozemních komunikací. Příspěvek představuje výsledky měření hlučnosti povrchů vozovek metodou CPX v ČR pro vybrané dílčí běžné, nízkohlučné i hluk snižující povrchy. Dochází tak k rozšíření informací věnující se vývoji nízkohlučných povrchů v čase [19]. Prezentované vybrané dílčí výsledky potvrzují, viz obrázky 1–4, že hlučnost pneumatika/vozovka se vlivem stárnutí pozemní komunikace v čase mění různě a záleží na konkrétním povrchu vozovky. Ke stejnému závěru došla i skupina CEN/TC 227/WG 5 [4,10]. Dílčí dlouhodobé výsledky, a především analýzy i závěry z nich, jsou využity jak mezinárodně – příprava nového předpisu CEN TS 18194 „Characterization of the acoustic properties of road surfaces“, tak národně – příprava nového předpisu TP 270 „Měření a hodnocení hlučnosti povrchů vozovek“. TP 270 má aktualizovat a zobecnit pro všechny typy a druhy povrchů [21] postupy určené k měření pouze nízkohlučných asfaltových obrusných směsí uvedených v TKP 7 a rozšířit vlastní záběr i informace, včetně zavedení možné klasifikace jako proměnného parametru vozovky [23].

Po praktické stránce představuje porovnání bezprostředně navazujících úseků stejného stáří v dané lokalitě nejvýznamnější a nejcennější místa. Především z důvodu, že zde dlouhodobě působí stejné vlivy (např. intenzita, skladba a rychlost dopravy, meteorologické vlivy aj.). Obrázky 1–4 ukazují, že běžná asfaltová směs používaná v ČR se na těchto vybraných lokalitách chová obdobně. Lze tak provést i další porovnání vůči „druhé části“ zmíněných obrázků mezi sebou, kdy porovnání bylo provedeno mezi dvěma typy nízkohlučných povrchů v souladu s ČSN 73 6120 a dvěma typy povrchů snižujících hlučnost, z nichž jeden je asfaltový a druhý cementobetonový kryt. Ukazuje se, že nejvyššího absolutního snížení hlučnosti (až 5 dB) dosahují právě specializované obrusné směsi se sníženou hlučností (obrázky 1 a 2). Na druhou stranu u nich dochází k nejrychlejšímu nárůstu hlučnosti, přesto však i po pěti letech mají oproti referenční hodnotě o cca 1–2 dB nižší hodnotu hlučnosti. Asfaltový povrch snižující hlučnost (obrázek 3) má křivku méně strmou, ovšem tím, že vychází z nižšího absolutního snížení po pokládce (cca 2–3 dB), tak po pěti letech jeho hlučnost odpovídá přibližně referenční hodnotě. U obrázků 1 až 3 se křivky hlučnosti k sobě přibližují, tj. hlučnost pokládky vybraných asfaltových směsí se přibližuje k povrchu SMA 11 S (na němž je významně založena referenční hodnota). Obrázek 4 ukazuje, že se křivky hlučnosti od sebe mohou i oddalovat. Běžné asfaltové (SMA 11 S) a betonové povrchy (CBK vymývaný beton) za pětileté období vykazují přibližně obdobný nárůst, i když betonový povrch je na tom mírně lépe. Ovšem specializovaná úprava CBK s využitím vhodné technologie grindingu po pokládce snížila hlučnost cca o 2 dB oproti referenční hodnotě. To je sice nejméně oproti jiným technologiím uvedeným na obrázcích 1 až 3, avšak po pěti letech je zde stále hlučnost cca o 1 dB nižší než referenční hodnota. Za pět let tak došlo k nárůstu jen cca o 1 dB, což je nejnižší nárůst hlučnosti ze všech zde prezentovaných příkladů.

Je tak vhodné si uvědomit s čím a jak chceme z hlediska akustických změn povrchů pracovat, respektive čeho chceme dosáhnout. Nejvýraznějšího absolutního snížení hlučnosti vůči referenční hodnotě lze dosáhnout jen pomocí obrusných směsí se sníženou hlučností. Existují však i povrchy, které hlučnost nesnižují tak významným způsobem, avšak jejich akustická degradace nemusí být tak rychlá. Například minimální nárůst hlučnosti mívá povrch z dlažebních kostek, který sám o sobě však představuje „vysokohlučný“ povrch. Tedy počáteční úroveň hlučnosti a jeho změna v čase je pro jednotlivé povrchy rozdílná. Záleží tak čeho je potřeba nejen z hlediska akustiky dosáhnout, a to i ve vztahu k dalším parametrům (celkové životnosti, bezpečnosti, finančním nákladům aj.).

Poděkování

Tento příspěvek čerpá z dat měření, která byla získána na základě řešení projektů Technologické agentury ČR č. TA01030459, TA04021486, TE01020168, TL02000258, CK02000121, CK04000058 a projektu „Analýza a monitoring změn hlučnosti povrchů pozemních komunikací“ financovaného Ministerstvem dopravy.

Tento příspěvek byl vytvořen za finanční podpory Ministerstva dopravy v rámci programu dlouhodobého koncepčního rozvoje výzkumných organizací.

Zdroje:

- [1] Sandberg, U., Ejsmont J. A. *Tyre/road Noise Reference Book*. Kisa, Sweden: INFORMEX, 2002. ISBN 91-631-2610-9.
- [2] Misdariis, N., Pardo L-F. The sound of silence of electric vehicles – Issues and answers. *InterNoise*, Hong Kong, China, 2017.
- [3] Ládyš, L. a kol. *Elektromobilita*. Souhrnná zpráva. Praha: EKOLA group, spol. s r.o. 2023.
- [4] Haider, M., M. Conter, M. Green, B. Schmidt a U. Sandberg. Status of the EU-Project ROSANNE. *Transportation Research Procedia*. 2016, 14, 2946–2955.
- [5] Křivánek, V., Marková, P., Stryk, J., Jedlička J., Špička, L., Effenberger, K. *Dlouhodobé hodnocení hlučnosti povrchů vozovek. Certifikovaná metodika*. Brno: Centrum dopravního výzkumu, v. v. i., 2017. ISBN 978-80-88074-53-3.
- [6] Vázquez, V.F., Terán F., Luong J., Paje, S. E. Functional performance of stone mastic asphalt pavements in Spain: Acoustic assessment. *Coatings*. 2019, 9, 123.
- [7] ISO 11819-2 *Acoustics – Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise – Part 2: The close-proximity method*. Geneva: International Organization for Standardization, 2017. (ČSN EN ISO 11819-2 *Akustika – Měření vlivu povrchů vozovek na dopravní hluk – Část 2: Metoda malé vzdálenosti*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2018.)
- [8] ISO/TS 11819-3 *Acoustics – Method for measuring the influence of road surfaces on traffic noise – Part 3: Reference Tyres*. Geneva: International Organization for Standardization, 2021. (ČSN P ISO/TS 11819-3 *Akustika – Měření vlivu povrchů vozovek na dopravní hluk – Část 3: Referenční pneumatiky*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2022.)
- [9] ASTM F2493 *Standard Specification for P225/60R16 97S Radial Standard Reference Test Tire*. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials, 2020.
- [10] Anfosso-Lédée, F., Krivanek, V., Stryk, J. The measurement of tire-road noise: how does standardization contribute to the development of low noise pavements in Europe. *InterNoise*, Nantes, France, 2024.
- [11] ISO 13325/Amd 1. *Tyres – Coast-by methods for measurement of tyre-to-road sound emission*. Geneva: International Organization for Standardization, 2019/2023.
- [12] Ji, H., Zhang, M., Kim, B. S. Parameter Conversion between Controlled Pass-By Method and Alternative Close Proximity Method. *Applied Sciences*. 2020, 10 (16), 5679.
- [13] AASHTO T 360-16 *Standard Method of Test for Measurement of Tire/Pavement Noise Using the On-Board Sound Intensity (OBSI) Method*. Wahsington D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2020.
- [14] ISO 11819-1:2001 *Acoustics – Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise – Part 1: Statistical Pass-By method*. Geneva: International Organization for Standardization, 2023. (ČSN ISO 11819-1 *Akustika – Měření vlivu povrchů vozovek na dopravní hluk – Část 1: Statistická metoda při průjezdu*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2023.)
- [15] Předpis Evropské hospodářské komise Organizace spojených národů (EHK OSN) č. 117 – Jednotná ustanovení pro schvalování pneumatik z hlediska akustického tlaku odvalování a/nebo přilnavosti na mokřích površích a/nebo valivého odporu, s platností od 20. ledna 2016. *Úřední věstník Evropské unie*. L218, 1–106, 2016.
- [16] ISO/TS 13471-1 *Acoustics – Temperature influence on tyre/road noise measurement – Part 1: Correction for temperature when testing with the CPX method*. Geneva: International Organization for Standardization, 2017.
- [17] ČSN 73 6120 *Stavba vozovek – Ostatní asfaltové vrstvy – Provádění a kontrola shody*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2021.
- [18] Valentin, J. a kol. *Technické kvalitativní podmínky staveb pozemních komunikací, kapitola 7 (TKP 7) Hutněné asfaltové směsi*. Praha: Ministerstvo dopravy, 2023.
- [19] Křivánek, V., Hablovičová, B., Machanec, J., Marková, P. Dlouhodobé změny hlučnosti povrchu vozovky v čase. *Asfaltové vozovky*. České Budějovice, ČR, 2023.
- [20] Centrum dopravního výzkumu, v. v. i., Brno. *Měřicí přívěs CPX*. Původci: R. Cholava a V. Křivánek. Užité vzor 20507, Česká republika, 8. 2. 2010.
- [21] Křivánek, V., Hablovičová, B., Marková, P., Bíza, P., Stryk, J., Ličbinský R., Hejkal, Z. *Výběr nejčastěji používaných typů povrchů na komunikační síti ČR. Závěrečná zpráva*. Brno: Centrum dopravního výzkumu, v. v. i. 2021.
- [22] Valentin, J., Mondschein, P., Bureš, P., Křivánek, V. *Technické podmínky 259 Asfaltové směsi pro obrusné vrstvy se sníženou hlučností*. Praha: Ministerstvo dopravy, 2017. (Zrušené od 17. 7. 2023.)
- [23] Markova, P., Machanec, J., Hablovicova, B., Krivanek, V. Classification scale for road surface noise based on the CPX method in the Czech Republic. *InterNoise*, Nantes, France, 2024.

ŘEŠENÍ NEDOSTATKU KAMENIVA PRO DOPRAVNÍ STAVBY, VÝSTUPY ZE STUDIE DEFINUJÍCÍ STRATEGICKÉ SUROVINY

SOLUTION FOR THE SHORTAGE OF AGGREGATES FOR TRANSPORT CONSTRUCTIONS, OUTPUTS FROM A STUDY DEFINING STRATEGIC RAW MATERIALS

Ing. Josef Godány, Česká geologická služba

Mgr. Jan Buda, Česká geologická služba

Mgr. Michal Marek, Česká geologická služba

RNDr. Josef Večeřa, Česká geologická služba

Mg. Marcela Hrbáčková, Těžební unie

Mgr. Pavel Kotásek, Těžební unie

Ing. Pavel Fiala, Těžební unie

Ing. Petr Svoboda, Sdružení pro výstavbu silnic

Vláda České republiky na základě svého usnesení ze dne 15. října 2025 č. 769, k nařízení vlády č. 435/2025 Sb., o stanovení některých výhradních ložisek stavebního kamene ložisky strategického významu, schválila na území ČR 29 výhradních ložisek stavebního kamene za ložiska strategického významu a na základě svého usnesení ze dne 15. října 2025 č. 768, k nařízení vlády č. 434/2025 Sb., o stanovení některých výhradních ložisek štěrkopísku ložisky strategického významu, schválila na území ČR 18 výhradních ložisek štěrkopísku za ložiska strategického významu. Obě nařízení nabyla účinnosti dnem 1. listopadu 2025. Tím se zavádí nový právní rámec pro tato ložiska, který umožňuje státu lepší ochranu a ovlivňování využití klíčových surovin pro stavebnictví a infrastrukturu. Cílem je alespoň částečně předejít nedostatku kameniva a zajistit surovinovou bezpečnost ČR. K vydání nařízení vlády byla vláda ČR zmocněna na základě § 6a odst. 2 zákona č. 44/1988 Sb., o ochraně a využití nerostného bohatství (horní zákon), ve znění zákona č. 465/2023 Sb. Výběr stanovení 18 výhradních ložisek štěrkopísku ložisky strategického významu se nachází v 8 krajích a výběr stanovení 29 ložisek stavebního kamene ložisky strategického významu se nachází v 11 krajích.

Samotnému schválení výše uvedených nařízení předcházelo v letech 2022–2025 období zpracování klíčových odborných studií, které poukazovaly na nepříznivou okolnost, že situace zásob stavebního kamene a štěrkopísku na využívaných ložiskách je velmi znepokojivá, jelikož u velkého počtu využívaných ložisek jsou vykazovány nízké objemy vytěžitelných zásob, a tedy se markantně snižuje jejich životnost. Jedná se zejména o dokument „Studie dostupnosti kameniva pro plánované železniční infrastruktury a stavby dálnic a silnic I. třídy“ a její doplňky, které na základě objednávky Ředitelství silnic a dálnic s. p. a Správy železnic, s. o., zpracoval řešitelským tým České geologické služby a Těžební unie.

Based on its Resolution No. 769 of 15 October 2025, concerning Government Regulation No. 435/2025 Coll., on the designation of certain exclusive deposits of building stone as deposits of strategic importance, the Government of the Czech Republic approved 29 exclusive deposits of building stone within the territory of the Czech Republic as deposits of strategic importance. Furthermore, based on its Resolution No. 768 of 15 October 2025, concerning Government Regulation No. 434/2025 Coll., on the designation of certain exclusive deposits of sand and gravel as deposits of strategic importance, the Government approved 18 exclusive deposits of sand and gravel as deposits of strategic importance. Both regulations entered into force on 1 November 2025.

This establishes a new legal framework for these deposits, enabling the state to ensure better protection and management of key raw materials for construction and infrastructure. The aim is to at least partially prevent aggregate shortages and to strengthen the raw material security of the Czech Republic. The Government of the Czech Republic was authorized to issue these regulations under Section 6a(2) of Act No. 44/1988 Coll., on the Protection and Utilization of Mineral Resources (the Mining Act), as amended by Act No. 465/2023 Coll.

The selection of 18 exclusive deposits of sand and gravel designated as deposits of strategic importance is distributed across eight regions, while the selection of 29 exclusive deposits of building stone designated as deposits of strategic importance covers eleven regions.

The adoption of the aforementioned regulations was preceded, during the period 2022–2025, by the preparation of several key expert studies highlighting the adverse situation regarding the availability

of building stone and sand and gravel resources in currently exploited deposits. These studies pointed out that a significant number of operating deposits show low extractable reserves, resulting in a marked reduction in their operational lifespan. This finding was primarily presented in the document "Study on the Availability of Aggregate for Planned Railway Infrastructure and Highway and Class I Road Construction" and its supplementary reports, which were prepared by a research team of the Czech Geological Survey and the Mining Union upon the request of the Road and Motorway Directorate (ŘSD) and the Railway Administration (SŽ).

V relevantních ustanoveních zákona č. 465/2023 Sb., kterým se mění zákon č. 416/2009 Sb., o urychlení výstavby dopravní, vodní a energetické infrastruktury a infrastruktury elektronických komunikací (liniový zákon), ve znění pozdějších předpisů, a další související zákony, a zejména v aktuálním znění horního zákona v ustanovení § 3, odst. 3 se uvádí, že mezi kritické nerosty se řadí radioaktivní nerosty, všechny druhy ropy a hořlavého zemního plynu (uhlovodíky), nerosty, z nichž je možno průmyslově vyrábět kovy, vápenec, pokud je vhodný k chemicko-technologickému zpracování, nerosty, z nichž je možno průmyslově vyrábět prvky vzácných zemin a prvky s vlastnostmi polovodičů, a nevyhrazené nerosty stavebního kamene a štěrkopísků, nachází-li se tyto nevyhrazené nerosty na ložiskách, která se považují za výhradní. **V ustanovení § 3, odst. 5 horního zákona se uvádí, že vyhledávání, průzkum a dobývání výhradních ložisek probíhá ve veřejném zájmu.**

Horní zákon v ustanovení § 6a rovněž uvádí, že ložiskem strategického významu je ložisko kritických nerostů, které má mimořádný význam pro zajištění surovinové nebo energetické bezpečnosti státu nebo pro uskutečnění staveb podle zákona č. 416/2009 Sb.

Již několik let registruje jak ve veřejných médiích, tak i v různých odborných člancích upozornění ze stran nositelů státních zakázek (např. ŘSD a SŽ), že vzrůstá nedostatek kvalitního stavebního kamene a štěrkopísků a že stávající zdroje jsou víceméně před vyčerpáním a nebudou schopny naplňovat budoucí požadavky trhu pro silniční a železniční stavitelství. Tento fakt je doložen na základě řady odborných studií v oboru ložiskové geologie, stavitelství a modernizace, energetiky a akreditovaných laboratoří pro jakost a kvalitu stavebních surovin. K rozvoji dopravní infrastruktury, ať se již jedná o moderní železniční koridory, či dálniční a silniční síť, developerské projekty, regionální stavby, výrobu transportbetonu a prefabrikátů, vládou podporované energetické stavby pro zajištění surovinové a energetické bezpečnosti a konkurenceschopnosti (modulární reaktory, nové jaderné bloky EDU a ETE, gigafactory) apod. jsou nezbytné dostatečné zdroje kvalitních stavebních surovin – zejména štěrkopísků a stavebního kamene, ale také zdroje druhotných materiálů. Kromě železničních tratí si žádají velké objemy kamene další dílčí stavby navazující na železniční stavby (mosty-estakády, tunely, nadjezdy, ekodukty, lávky pro pěší a cyklisty apod.) a také nové dopravní terminály a kompletní rekonstrukce železničních stanic apod. Do celkové plánované bilance staveb je zapotřebí započítat další potřeby a nezbytné výroby kamene a transportbetonu pro regionální a lokální stavby, bytovou výstavbu, opravy místních komunikací, odpočívky, stavby a zařízení určená k provádění kontrolní činnosti při dohledu na bezpečnost a plynulost provozu na pozemních komunikacích, mostní objekty (nadjezdy), parkoviště, tunely, galérie, opěrné, zárubní, obkladní a parapetní zdi, tarasy, násypy a svahy, dělicí pásy, příkopy a ostatní povrchová odvodňovací zařízení, dopravní ostrůvky, únikové zóny, protihlukové stěny a protihlukové valy, dále nezbytné dodávky pro soukromé a developerské projekty, stavby vodních přehrad apod.

V případě primárních zdrojů stavebních surovin je potřeba si uvědomit, že dnešní společnost je na nich životně závislá. S ekonomickým vývojem přímo úměrně souvisí rozvoj výstavby obytných, provozních a průmyslových budov a dopravní infrastruktury. Těžené kamenivo (štěrkopísky) a drcené kamenivo (stavební kámen) tvoří v recepturách objemově asi dvě třetiny hmoty betonu a použití do obaloven, takže je to pro betonáře a obalovny, naprosto zásadní surovina, bez které se neobejdeme. Je třeba si navíc uvědomit, že ne všechna ložiska kamene jsou do betonu a obaloven použitelná. Infrastrukturní stavby musí být dimenzovány na minimální životnost 100 let, a to vyžaduje kvalitní vstupní suroviny. Stejně tak konstrukční betony v pozemním stavitelství či předpjaté stropní panely vyžadují prvotřídní kamenivo, kterým dnes disponují už jen některé lokality. Všechny plánované stavby vyžadují vzhledem k plnění přísných norem ČSN EN čím dál více kvalitnější těžené a drcené kamenivo, kterého na trhu ubývá. Jenom s použitím kvalitního kamene vybudovaná silniční, dálniční, železniční a energetická infrastruktura může být bezpečná, mechanicky odolná a trvanlivá.

Spotřeba kamene pro stavby v gesci ŘSD činí cca 40 % a pro ostatní stavby do betonáren a obaloven, pro stavby a rekonstrukce konvenčních železničních koridorů a jejich modernizaci a dále VRT a v neposlední řadě stavby regionálního významu a developerské projekty, činí spotřeba cca 60 %

z celkových ročních objemů těžby kameniva v ČR. Z toho vyplývá, že jenom pro strategické dopravní stavby a nezbytnou údržbu dopravní infrastruktury se spotřebuje až 40 % celkového vytěženého objemu kameniva za rok. Zbývajících 60 % z celkové roční produkce na území ČR zahrnují potřeby pro dodávky regionálních staveb, oprav místních komunikací, dodávky pro developerské projekty, bytovou výstavbu, dodávky do obaloven, do betonáren, pro kompletní výrobní program prefabrikovaných pro-duktů a železobetonových konstrukcí pro železniční stavby a plánované VRT, stavební dílce pro pozemní a inženýrské stavitelství, pro výrobce dlažeb apod.

Pro ekologickou a ekonomickou únosnost projektů je žádoucí, když jsou potřebné surovinové zdroje vhodné kvality co nejbližší realizaci staveb. Krajině únosné využívání místních ložisek je pro ochranu životního prostředí přínosné, neboť minimalizuje dopravu surovin na velké vzdálenosti. Regionálně nerovnoměrná distribuce zdrojů stavebních surovin je kromě rozmístění ložisek dobře patrná také při rozčlenění objemů těžby stavebního kamene a štěrkopísků podle regionů (okresů/krajů). Některé regiony jsou na přírodní zdroje drceného kameniva silně deficitní, což má za následek dvojitý tlak na zdroje v deficitní oblasti – jednak na nárůst produkce těženého kameniva – štěrkopísků, jednak zvyšující se tlak na dovoz nedostatkového drceného kameniva ze sousedních hojněji vybavených oblastí.

Vláda ČR na základě svého usnesení ze dne 15. října 2025 č. 769, k nařízení vlády č. 435/2025 Sb., o stanovení některých výhradních ložisek stavebního kamene ložisky strategického významu, schválila na území ČR 29 výhradních ložisek stavebního kamene za ložiska strategického významu a na základě svého usnesení ze dne 15. října 2025 č. 768 k nařízení vlády č. 434/2025 Sb., o stanovení některých výhradních ložisek štěrkopísku ložisky strategického významu, schválila na území ČR 18 výhradních ložisek štěrkopísků za ložiska strategického významu. Obě nařízení nabyla účinnosti dnem 1. listopadu 2025. Tím se zavádí nový právní rámec pro tato ložiska a umožňuje státu lepší ochranu a ovlivňování využití klíčových surovin pro stavebnictví a infrastrukturu. Cílem je alespoň částečně předejít nedostatku kameniva a zajistit surovinovou bezpečnost ČR. K vydání nařízení vlády byla vláda ČR zmocněna na základě § 6a odst. 2 zákona č. 44/1988 Sb., o ochraně a využití nerostného bohatství (horní zákon), ve znění zákona č. 465/2023 Sb. Výběr stanovení 18 výhradních ložisek štěrkopísku ložisky strategického významu se nachází v 8 krajích a výběr stanovení 29 ložisek stavebního kamene ložisky strategického významu se nachází v 11 krajích.

Vládou schválený výběr ložisek stavebních surovin strategického významu naplňuje polohopisná, kvantitativní a kvalitativní kritéria pro zabezpečení potřeby zásobování strategických dopravních staveb surovinami a současně se bude významně podílet na zajištění surovinové bezpečnosti a surovinové soběstačnosti ČR. S ohledem na skutečnost, že vydobytý nerost nebude izolovaně využíván výlučně na dopravní stavby, navrhovaná ložiska mohou významně plnit také důležitou úlohu při zabezpečení energetické bezpečnosti státu.

Výběr ložisek stavebních surovin strategického významu vychází z geologické stavby území ve vazbě na místo realizace plánovaných akcí výstavby dopravní infrastruktury. Jejich lokalizace je ovšem v některých krajích nerovnoměrná, dána geomorfologicko-geologickými, a zejména geologicko-ložiskovými poměry. Významným rozhodovacím parametrem výběru strategického ložiska bylo umístění ložiska v ekonomicky dostupné vzdálenosti od plánovaných železničních, silničních, dálničních a energetických staveb, množství a kvalita zásob a jejich využitelnost (podle kvality, přístupnosti k dobývání).

Vybraná ložiska stavebních surovin obsahují základní geologicko-ložiskové, dostatečný objem disponibilních zásob, jakostně technologické parametry suroviny, přijatelná technologická kvalita přírodního drceného a těženého kameniva bez značných heterogenit, vhodného do nejvyšších tříd podle ČSN EN 12620, 13043, 13450, 13242, 13285, 13139, 13383, popř. 13877-1 podle zákona č. 102/2001 Sb., (přijatelné technologické zázemí a dispoziční prostory na úpravu a nakládku suroviny), hydrogeologické parametry, a zejména podrobné odůvodnění potřeby výběru předmětného ložiska stavební suroviny v dostupné a ekologické vzdálenosti k plánovaným stavbám ŘSD a SŽ, popř. dalším klíčovým stavbám.

Vládou schválený výběr ložisek stavebních surovin strategického významu pokrývá kvalitu a potřebný objem disponibilních zásob, jak v současnosti dobývané suroviny, tak i podrobnými geologickými průzkumy ověřené suroviny, vyhovující požadavkům trhu pro využití ve výstavbě železniční, dálniční a silniční infrastruktury.

Zařazení vybraných ložisek stavebních surovin mezi strategická ložiska je prozřívavým krokem, který pomůže zajistit stabilní, kvalitní a ekonomicky dostupné dodávky kameniva, posílí surovinovou

soběstačnost, surovinovou bezpečnost a vytvoří nezbytný základ pro úspěšnou realizaci klíčových veřejných staveb financovaných z národních i evropských zdrojů.

Navrhovaný výběr ložisek pro jejich určení ložisky strategického významu, včetně odůvodnění výběru ložisek je podrobně zpracovaný podle jednotlivých krajů. Otvírka nových ložisek je jedinou možností k dosažení dostatečného množství stavebních surovin pro strategické stavby a surovinovou bezpečnost. Rovněž je zapotřebí bezkonfliktně a hospodárně dotěžit stávající vytěžitelné zásoby na roztěžených ložiskách stavebních surovin.

Výběr ložisek stavebních surovin pro jejich určení ložisky strategického významu se podle horního a liniového zákona týká pouze výhradních ložisek nevyhrazeného nerostu (stavebních surovin – zejména stavebního kamene (SK) a štěrkopísků (SP)), a to jak zcela nových, doposud netěžených, tak i významných roztěžených ložisek s předpokladem navýšení disponibilních zásob v rámci DP a CHLÚ s požadovanou kvalitou suroviny na trhu. Tato ložiska jsou ve vlastnictví státu s osvědčením o výhradním ložisku, nikoliv ložisek nevyhrazeného nerostu (či nevýhradních ložisek), která jsou součástí pozemků. Dle ustanovení § 5 zákona č. 41/1957 Sb., o využití nerostného bohatství (horní zákon), ve znění účinném do 1. července 1988, byla ložiska vyhrazených nerostů všechna ložiska vyhrazených nerostů, jakož i taková ložiska nevyhrazených nerostů, která jsou vhodná k průmyslovému dobývání (později nahrazeno pojmem „ložiska vhodná pro potřeby a rozvoj národního hospodářství“). O využitelnosti ložiska k průmyslovému dobývání pak rozhodoval „ústřední hospodářský orgán“. Dle přechodných ustanovení zákona č. 541/1991 Sb., kterým se mění a doplňuje zákon č. 44/1988 Sb., o ochraně a využití nerostného bohatství (horní zákon), se ložiska nevyhrazených nerostů, o nichž bylo rozhodnuto příslušnými orgány státní správy, že jsou vhodná pro potřeby a rozvoj národního hospodářství podle dosavadních předpisů, považují nadále za výhradní ložiska. Výhradní ložiska nevyhrazených nerostů stavebního kamene již v minulosti byla testu „významnosti pro hospodářství“ podrobena, i když v jiných ekonomických, hospodářských a politických podmínkách. S ohledem na nepřemísitelnost, jedinečnost, významnost a neobnovitelnost surovin jako přírodních zdrojů pro hospodářský rozvoj tato významnost pro hospodářství stále nepozbyla „platnosti“.

Zúžený výběr výhradních ložisek strategického významu pro využití především pro významné liniové stavby vychází z níže uvedených odborných podkladových studií a jejich doplňků, které byly zpracovány v letech 2022 až 2025 konsorciem ČGS, Těžební unie a Sdružení pro výstavbu silnic pro Ředitelství silnic a dálnic ČR, s. o. (ŘSD) a Správu železnic s. o. (SŽ). Rovněž se pracovalo s výsledky veřejně projednaných a v zastupitelstvech krajů schválených regionálních (krajských) surovinových koncepcí, které byly zpracované podle struktury schválené a certifikované „Metodiky a tvorby standardů periodické aktualizace regionálních surovinových koncepcí v ČR“ – viz <https://mpo.gov.cz/cz/stavebnictvi-a-suroviny/surovinova-politika/statni-surovinova-politika-nerostne-suroviny-v-cr/vystupy-vyzkumnych-ukolu--285519/>. Zejména se jednalo o následující podklady – „Studie“:

- *Studie dostupnosti kameniva pro plánované stavby dálnic a silnic I. tříd a železniční infrastruktury z roku 2022 (zakázka Ředitelství silnic a dálnic ČR, s.p.). – Těžební unie, Sdružení pro výstavbu silnic, ČGS.*
- *Studie dostupnosti kameniva pro plánované železniční infrastruktury a stavby dálnic a silnic I. tříd – doplněk č. 2: Aktualizace analýzy disponibilních zdrojů těženého drceného kameniva s ohledem na procentuální podíly rozpadu jednotlivých frakcí na území jednotlivých krajů ČR z roku 2025 (zakázka Ředitelství silnic a dálnic ČR, s.p. a Správy železnic, s.o.) – Těžební unie, Sdružení pro výstavbu silnic, ČGS.*
- *Manažerské shrnutí Studie dostupnosti kameniva pro plánované železniční infrastruktury a stavby dálnic a silnic I. tříd a Analýza disponibilních zdrojů těženého drceného kameniva s ohledem na procentuální podíly rozpadu jednotlivých frakcí na území jednotlivých krajů ČR z roku 2025 – ČGS, Těžební unie, MPO, MŽP.*
- *Výsledky Aktualizací regionálních surovinových koncepcí ve vybraných krajích, které byly zpracované podle certifikované metodiky projektu TA ČR (ID TITSMP0909) pod názvem Metodika a tvorba standardů tvorby a periodické aktualizace regionálních surovinových koncepcí, modelové řešení dvou zvolených regionů (Česká geologická služba, krajské úřady).*
- *Studie výběru ložisek stavebních surovin pro jejich určení ložisky strategického významu s podrobným odůvodněním z roku 2025 ve smyslu liniového zákona č. 416/2009 Sb., ve znění pozdějších předpisů (zadavatel MŽP, ve spolupráci s MPO) – MŽP, ČGS, MPO. Studie výběru ložisek stavebních surovin pro jejich určení ložisky strategického významu s podrobným odůvodněním ve smyslu liniového zákona č. 416/2009 Sb., ve znění pozdějších předpisů,*

vychází zejména ze Surovinové politiky a zákonné úpravy obsažené v horním zákoně, zákoně č. 61/1988 Sb., o hornické činnosti, výbušninách a státní báňské správě, ve znění pozdějších předpisů, a v zákoně č. 416/2009 Sb., o urychlení výstavby strategicky významné infrastruktury, ve znění pozdějších předpisů.

Cílem výše uvedených Studií bylo zajistit dostatečné zdroje stavebních surovin vhodné kvality s příznivými geologicko-ložiskovými poměry co nejbližší k realizaci plánovaných staveb celostátního a nadregionálního významu a dosažení co nejnižších dopadů na životní prostředí s minimální uhlíkovou stopou (vyprodukovaným CO₂) při přepravě konvenčními přepravními prostředky.

V těchto studiích byla pro objektivitu zohledněna i struktura finálních produktů stavebních surovin (procentuální podíl frakcí) ve vazbě na požadavky receptur při výstavbě. Disponibilita zdrojů je ve studiích členěna dle jednotlivých krajů a současně dle jednotlivých staveb, potřebných klíčových frakcí a kvalitativních a kvantitativních ukazatelů. V neposlední řadě bylo klíčovým podkladem pro posouzení potřebnosti a dostupnosti suroviny drceného a těženého kameniva pro plánované dopravní stavby manažerské shrnutí a také navazující „Studie výběru ložisek stavebních surovin pro jejich určení ložisky strategického významu s podrobným odůvodněním z června 2025“, jejímž zadavatelem bylo Ministerstvo životního prostředí v součinnosti s Ministerstvem průmyslu a obchodu.

Z výše aktualizovaných výsledků „Studií“ vyplývá, že za disponibilní zdroje jsou považována ložiska nerostů výhradní i nevýhradní, které disponují veřejnoprávními povoleními k těžbě. Uvažováno je s takovým množstvím zásob, které jsou obsaženy v dokumentacích k veřejnoprávním povolením (POPD, případně PVL), přičemž je uvažováno s omezeními (množstevními a časovými), která z povolení vyplývají. Disponibilita zdrojů je ve studiích členěna dle jednotlivých krajů a současně dle, pro stavby, klíčových frakcí a kvalitativních ukazatelů.

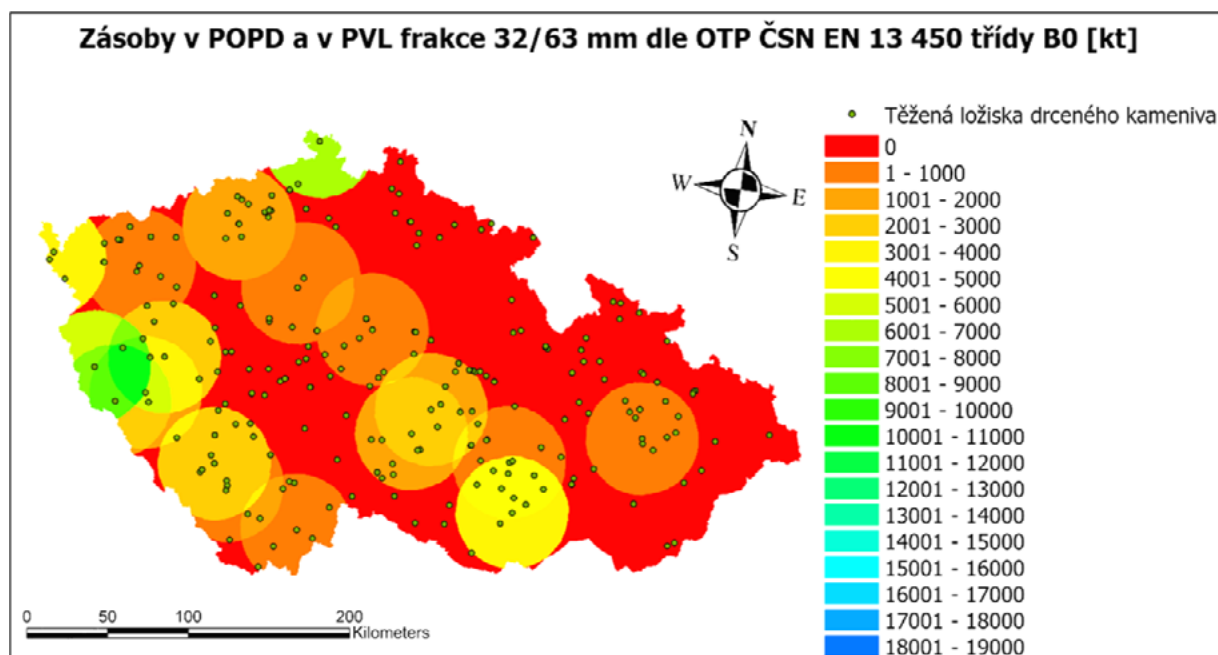
Kompletní analýza ročních těžeb a disponibilních zásob drceného kameniva byla doplněná o další nezbytné údaje, zejména o maximální limity ročních těžeb všech produkovaných frakcí v kamenolomech a o procentuální podíly rozpadu klíčových frakcí dle ČSN EN pro vrstvy silniční a dálniční, a zejména vrstvy železničního svršku (třídy B0, B1, BII) a železničního spodku v jednotlivých provozovnách tak, jak je požadují receptury pro dodávky staveb. Struktura dodávek jednotlivých frakcí je ovlivněna nejenom charakterem ložiska, ale i danou použitou technologií při zpracování vytěžené suroviny. V tomto bodě je nutno podotknout, že potenciální dodavatelé a majitelé jednotlivých kamenolomů a pískoven byli osloveni s požadavkem od SŽ s. p. a ŘSD s. p. na předání struktury dodávaného materiálu podle frakcí.

U převážné většiny provozoven drceného kameniva se uvádí roční těžba jako maximální limit roční těžby všech produkovaných frakcí v kilotunách, a to podle uděleného rozhodnutí o povolení HČ a ČPHZ, a u některých provozoven se také udává omezená maximální roční těžba, která tvoří tzv. hrubý odhad („strop“) všech produkovaných frakcí s ohledem na výrobní kapacitu těžby kameniva, možnosti technologické úpravy a zejména s ohledem na dopravní a územní omezení/zatížení (technický stav komunikací, dopady na dotčené obce apod.). U ložisek se stanoveným limitem roční těžby je „strop“ roven nebo menší než maximální limit ročních těžeb všech produkovaných frakcí (nebyly zvažovány varianty navýšení limitu roční těžby).

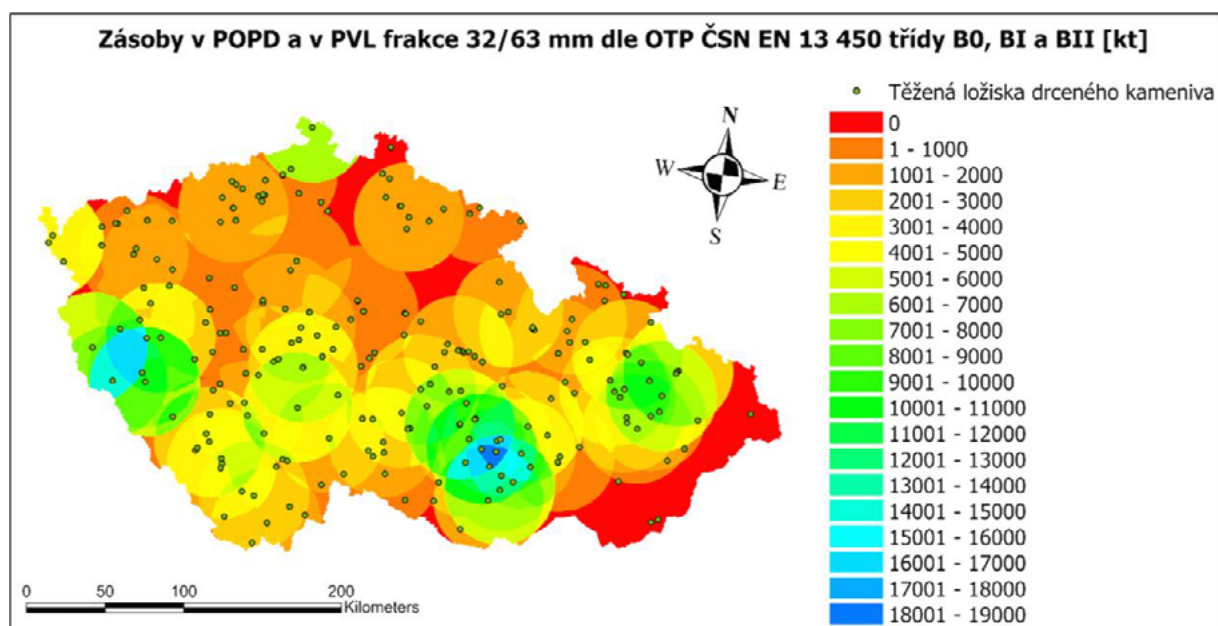
V rámci výše uvedených studií byla zmapována surovinová náročnost jednotlivých staveb podle podkladů předaných ŘSD a SŽ, čímž byl vytvořen základ pro aplikaci statistického propočtu možnosti dodávek z ložisek v dojezdové vzdálenosti do max. 40 km z důvodu eliminace ekologické zátěže vyvolané vzdálenější dopravou suroviny do místa realizované stavby. Dostupnost kameniva na plánované stavby v dojezdové vzdálenosti do max. 40 km je však ve skutečnosti zcela jiná. Zkušenost ukazuje, že stavební společnost získá zakázku na stavbu, poptá nejbližší provozovny (kamenolomy a štěrkovny) ve vzdálenosti do 35–40 km (podle počtu v dané lokalitě). Ve většině regionů je však těžené a drcené kamenivo nedostatkový materiál a firmám nebo skupinám, které nedisponují vlastní kapacitou, nastává velký problém. Důvody odmítnutí podání nabídky jsou zpravidla následující:

- vyčerpané povolené roční limity těžby (vyčerpané produkce žádaných frakcí na trhu),
- omezené disponibilní zásoby v DP, a tudíž těžební organizace nemá zájem si kamenolom v krátké době vytěžit,
- organizace využívá kamenivo pro svoje potřeby (vlastní obalovna, vlastní betonárna, vlastní výhoda pro budoucí potenciální stavbu apod.),
- v neposlední řadě obchodní důvody (již existující dlouhodobé smluvní závazky).

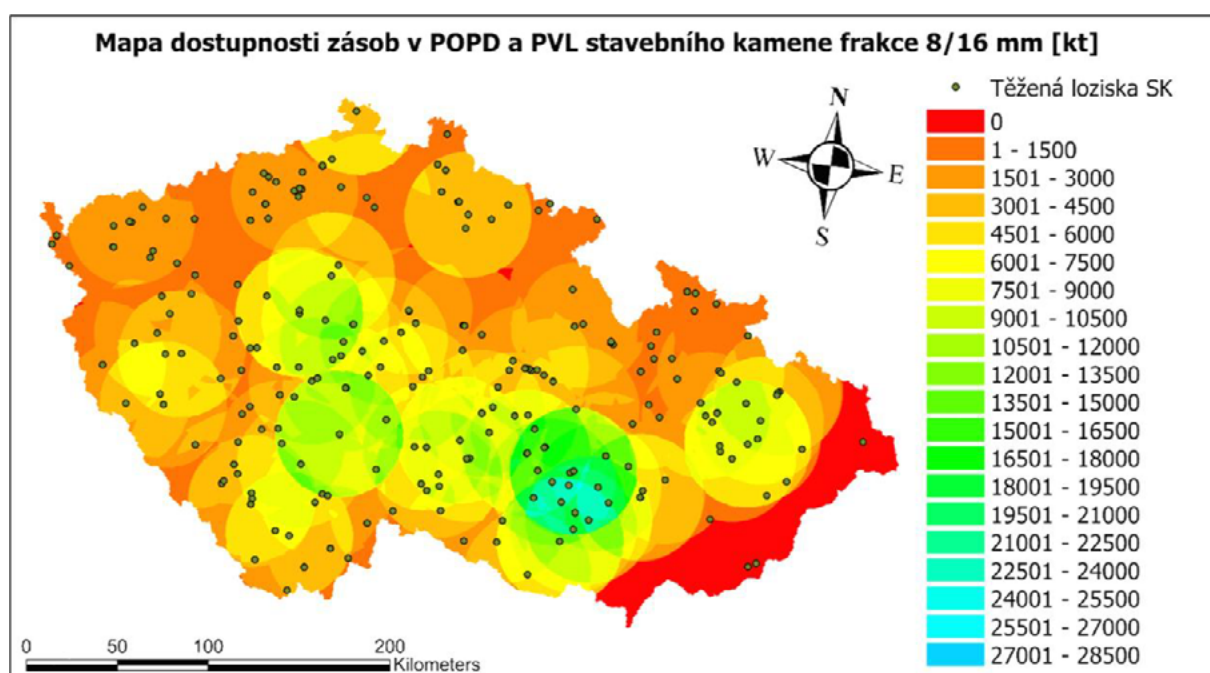
S ohledem na výše uvedené skutečnosti následuje poptání kamenolomů ve vzdálenosti větší než 35–40 km od plánované stavby. Je pak zcela běžné, že dnes se dováží drcené a těžené kamenivo na plánované stavby i z větších vzdáleností cca 80–100 km, což má za následek mnohem vyšší



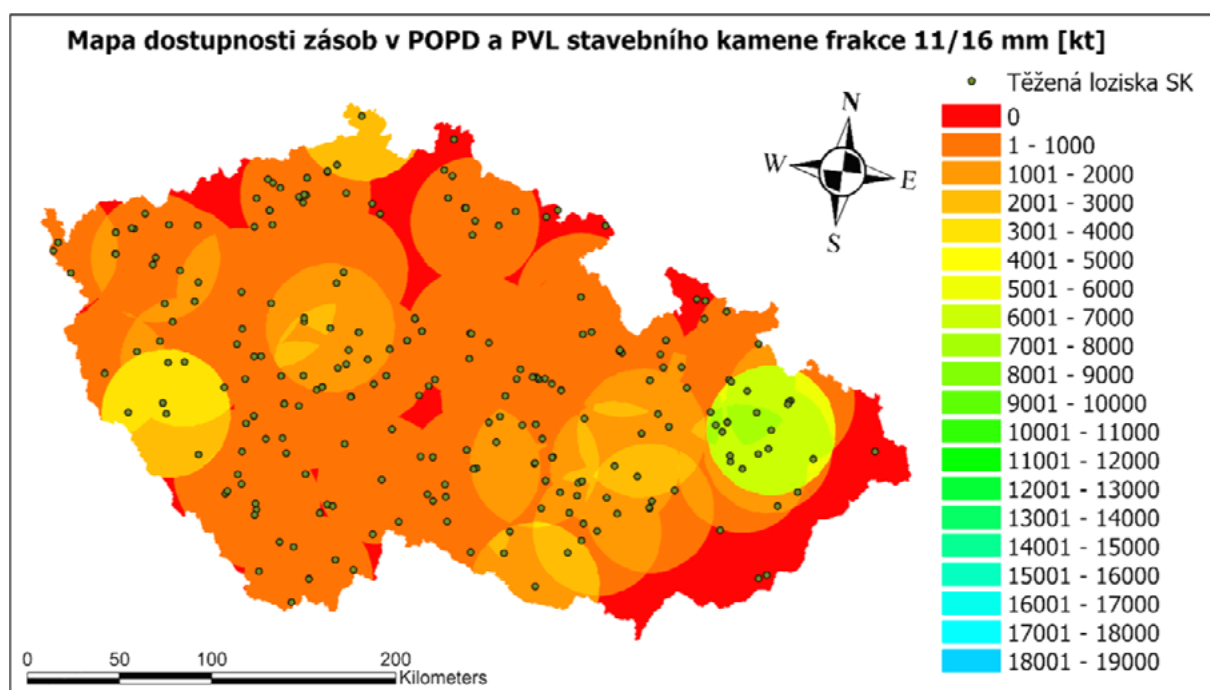
Obrázek 2: Zásoby v POPD a v PVL frakce 32/63 mm dle OTP ČSN EN 13 450 třídy B0



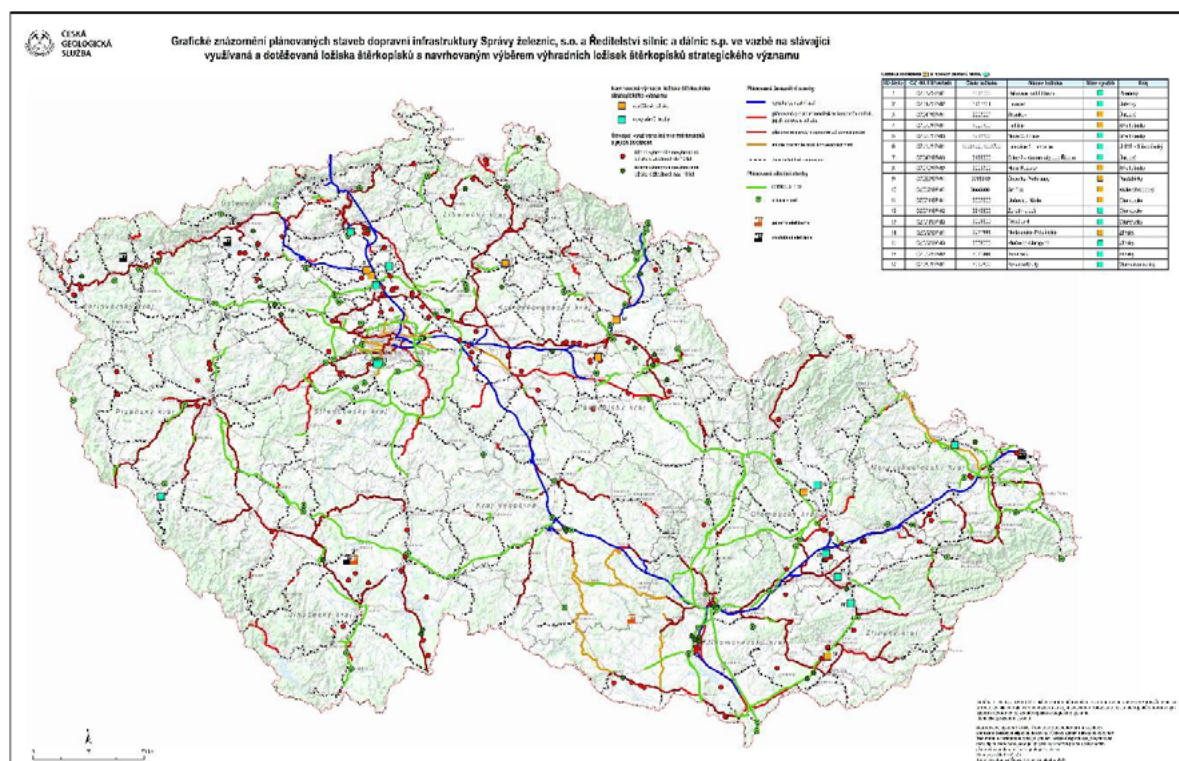
Obrázek 3: Zásoby v POPD a v PVL frakce 32/63 mm dle OTP ČSN EN 13 450 třídy B0, BI a BII



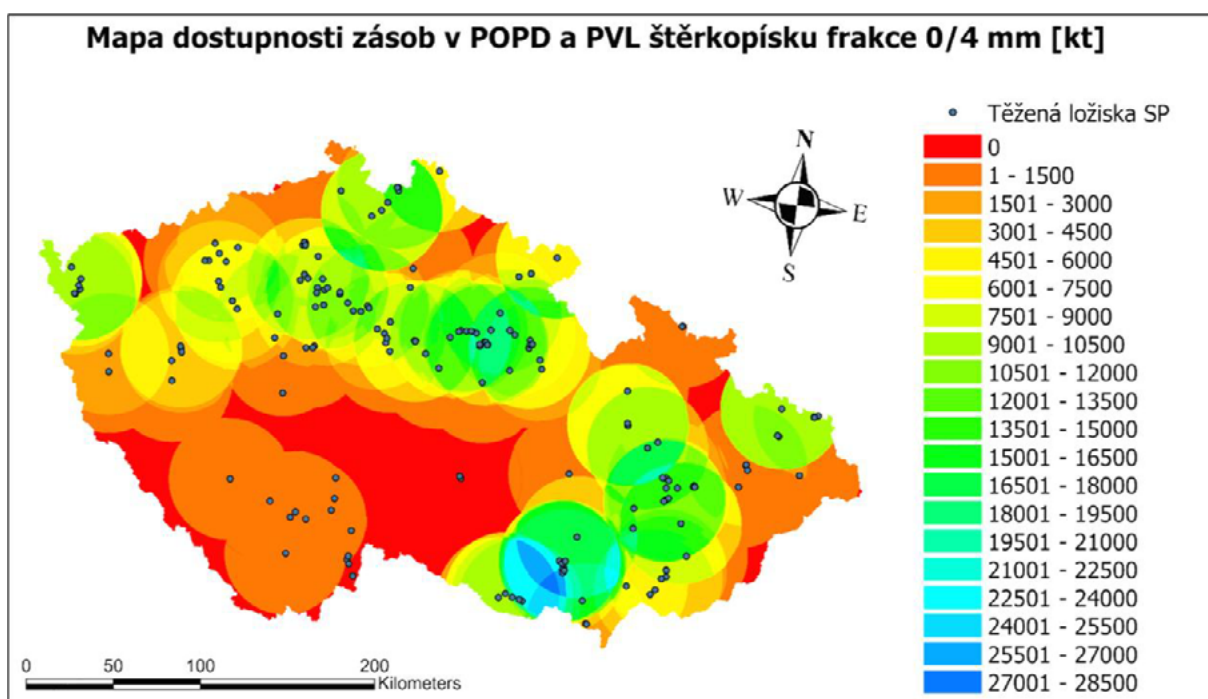
Obrázek 4: Mapa dostupnosti zásob v POPD a PVL stavebního kamene frakce 8/16 mm



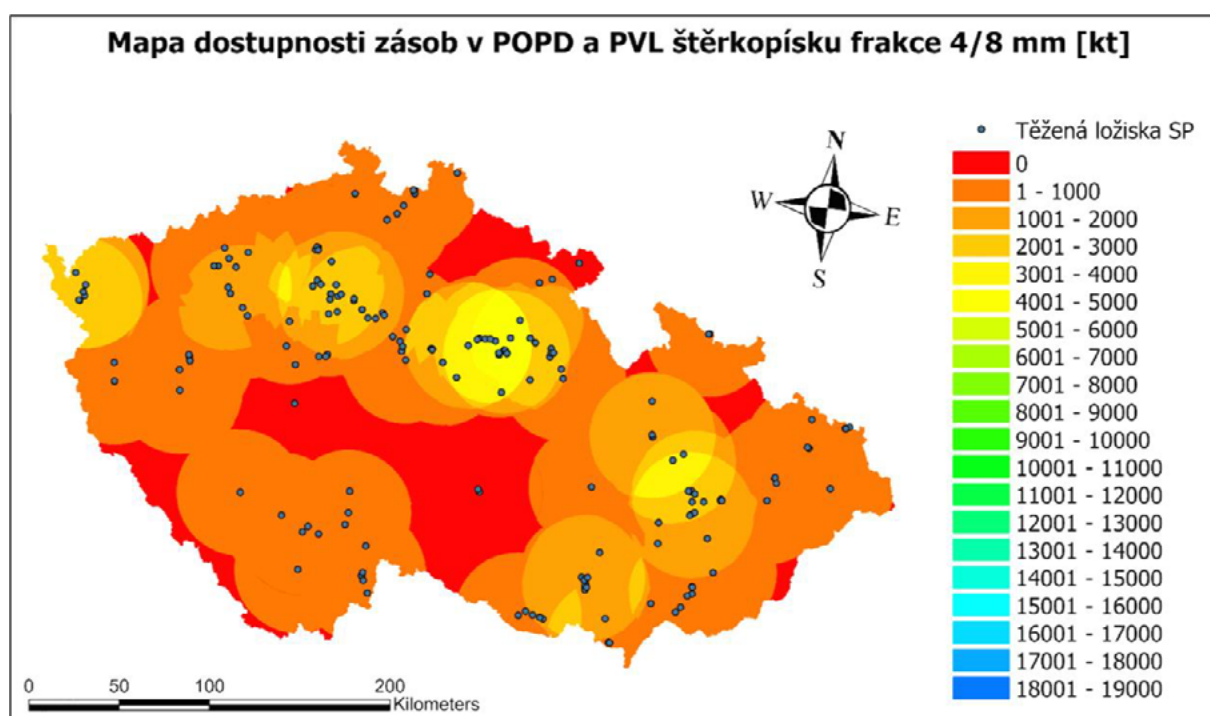
Obrázek 5: Mapa dostupnosti zásob v POPD a PVL stavebního kamene frakce 11/16 mm



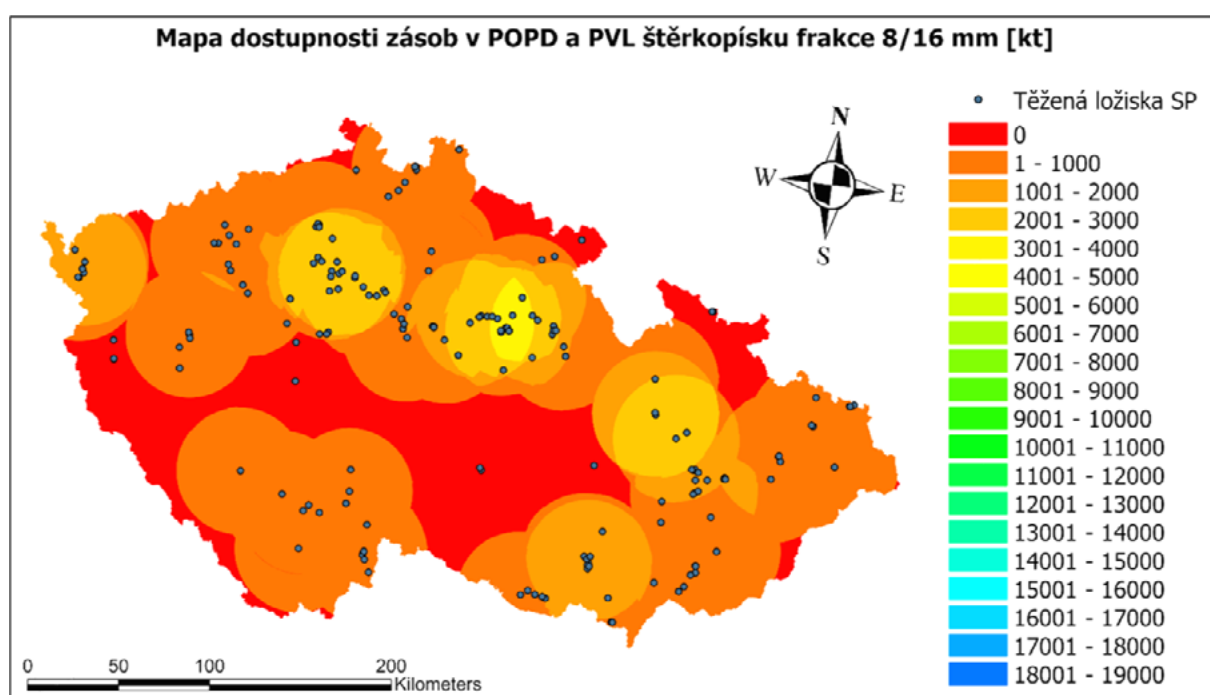
Obrázek 6: Znázornění plánovaných staveb dopravní infrastruktury ve vazbě na stávající využívaná a dotěžovaná ložiska štěrkopísků



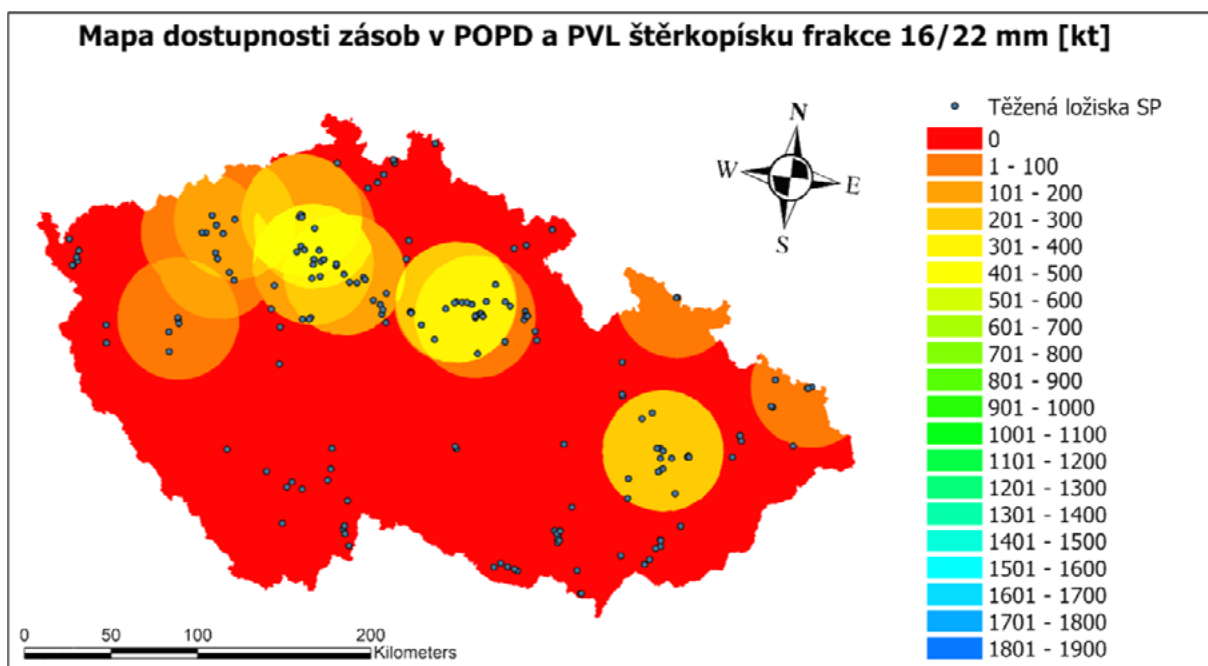
Obrázek 7: Mapa dostupnosti zásob v POPD a PVL štěrkopísku frakce 0/4 mm



Obrázek 8: Mapa dostupnosti zásob v POPD a PVL štěrkopísku frakce 4/8 mm



Obrázek 9: Mapa dostupnosti zásob v POPD a PVL štěrkopísku frakce 8/16 mm



Obrázek 10: Mapa dostupnosti zásob v POPD a PVL štěrkopísku frakce 16/22 mm

Výsledky výše uvedených „Studii“ a mapových výstupů upozorňují na příznaky stavební surovinové krize – regionální výpadky, prodlužující se přepravní trasy a zdražování. Studie se neomezují pouze na podrobnou analytickou část, ale pojmenovávají také příčinu neutěšeného stavu a navrhuji řešení. A to ještě do výpočtů bilance disponibilních zásob nebyly zahrnuty potřeby pro velké energetické stavby, dodávky regionálních a bytových staveb, oprav místních komunikací, dodávek pro soukromé a developerské projekty apod. S ohledem na tyto výše uvedené skutečnosti je zřejmé, že skutečná životnost jednotlivých zdrojů může být významně nižší – kritičtější. Nelze uvažovat s recyklací jako řešením (odhadem se aplikují vhodné recyklované materiály ve výši max. 20–25 %) a ani s dovozem surovin ze vzdálenějších lokalit, popř. s jejich importem ze zahraničí. Aby nedošlo k ohrožení dodávek kvalitního stavebního kamene na trh, je zapotřebí vytvořit územní předpoklady pro otvírku nových ložisek náhradou za postupně dotěžované lokality. Je třeba zrychlit povoloovací proces u nových zdrojů, který v případě pískoven trvá průměrně 5–10 let a v případě kamenolomů 8 až 12 let.

Studie poukazují na nepříznivou okolnost, že situace zásob stavebního kamene a štěrkopísku na využívaných ložiskách je velmi znepokojivá, jelikož u velkého počtu využívaných ložisek jsou vykazovány nízké objemy vytěžitelných zásob, a tedy se markantně snižuje jejich životnost. Dostupnost zásob v čase je „omezována“ i charakteristickou dlouhodobostí záměrů těžby, kdy dle zákona č. 100/2001 Sb. jsou tyto záměry posuzovány na časově omezenou dobu a po uplynutí času je opětovně vyžadováno posouzení záměru (EIA) bez ohledu na skutečnost, že záměr nebyl dokončen a ložisko vykazuje těžitelné zásoby, jež jsou nezbytné pro zásobování ČR stavebním kamenivem (případně štěrkopísky).

Jelikož většina kamenolomů a pískoven je dlouhodobě provozována, byly otevřeny ještě dávno před rokem 1990, je životnost jejich ověřených zásob dnes už u konce. Na některých lokalitách by se dalo ještě pokračovat v těžbě třeba na navazujícím sousedním ložisku, ale povolování nových záměrů naráží na obrovský odpor ze strany dotčené veřejnosti. Možnosti hospodárně dotěžit veškeré zásoby na stávajících ložiskách u většiny ložisek již doznívají, protože jejich zásoby jsou zcela vytěžené nebo před vytěžením. U podstatné řady využívaných ložisek dochází postupným rozšiřováním či zahlubováním těžby k nepatrnému navýšení zásob, ale i tak jsou tyto báňské postupy na samé krajní hranici hospodárného vydobyetí veškerých průzkumem ověřených zásob ve stanoveném DP, popř. za již vytěženým DP v ploše CHLÚ, kde se ve většině případů jedná o dobývání ložiska nevyhrazeného nerostu ČPHZ. Upozorňujeme, že reálná životnost zásob se vzhledem k neočekávané proměnlivosti kvality surovin stavebního kamene v rámci báňsko-těžebního postupu u řady kamenolomů výrazně mění – spíše zkracuje (z důvodu neočekávaných přírodních podmínek jako např. alterace hornin vlivem tektonického porušení, změna petrologické charakteristiky s nevyhovující – výklizovou kvalitou apod.). Zásoby vytěžitelné dle POPD, tzn. ty zásoby, které lze reálně vydobýt, jsou zároveň snižované o objem

min. 15–20 % zásob z důvodu neproduktivních výsivek a odvalů. Zároveň tyto vytěžitelné zásoby jsou ponižené o cca 10–15 % o výklizy a poruchové partie. V závěrných svazích na obvodové kolmici jámového či stěnového lomu zůstává někdy až 60–70 % nedotěžených zásob z celkových bilančních volných zásob a s ohledem na stabilitní výpočty pro geometrii konečných závěrných svahů lomu pro zajištění bezpečnosti stability závěrných svahů.

Vytěžitelné zásoby na ložisku v DP jsou definovány projektem jednotlivých těžebních etází lomu, a to s ohledem na stabilitní výpočty pro geometrii konečných závěrných svahů lomu. Tím je v rámci vydaného POPD lomu vytvořen vlastně uzavřený polygon, v kterém lze těžít ložisko. Ten definuje výpočtem zásob suroviny k těžbě v rostlém stavu. Těžba, která se odehrává z těch-to zásob a je směřována do úpravárenské technologie, má téměř ve všech případech podíl cca 15–20 % (dle čistoty a zahlinění jednotlivých těžebních etází), který jde před procesem úpravy do tzv. odvalů a výsivek mimo hlavní výrobu. Toto množství je potřeba vždy odečíst z tzv. čisté výroby lomu. Dále se během každého roku těžebních prací otevírají tzv. skryté partie, pokud existují, a ty jsou někdy výklizem – tj. nevhodným materiálem pro výrobu kameniva – směřovány mimo úpravu na deponie, do skrývek, odvalů a zemních skládek, někdy i bez následného použití. Tady může být průměr dalších cca 10–15 % z těžby ložiska, a to zejména z horních zahliněných partií lomů nebo níže položených poruchových zón.

Životnost u jednotlivých ložisek zohledňuje i výkyvy v objemech odbytových ročních těžeb za posledních 3 až 5 let, které významně ovlivňují (zkracují) životnost některých provozoven s přihlédnutím na vyráběnou kvalitu suroviny v souvislosti s naplňováním ČSN EN. Za hranicí platných povolení HČ a ČPHZ nelze zásoby nevyhrazených nerostů považovat za jednoznačně vy-těžitelné a nelze s nimi uvažovat v dlouhodobých prognózách jako se zásobami, se kterými může těžební organizace určitě disponovat. Každý kamenolom se liší petrograficky, jakostní kvalitou a rovněž technologicko-úpravárenským zázemím, podmínkami dobývání, geologicko-strukturními podmínkami a územně ekologickými podmínkami. Ne každý lom produkuje stejnou kvalitu suroviny shodného petrografického surovinového typu, proto jejich výrobové produkce jsou rozdílné a jejich uplatnění na trhu rovněž. Ne každý petrografický typ horniny z drceného a těženého kameniva lze používat např. do vysokopevnostních a konstrukčních betonů, či do obalovaných/asfaltových směsí apod. Každý kamenolom je specifický svojí petrologickou charakteristikou a jakostně-technologickou kvalitou suroviny a tím pádem s ohledem na technologické možnosti úpravy této suroviny z toho vyplývající možné výrobové produkce, uplatnitelné na trhu.

„Studie výběru ložisek stavebních surovin pro jejich určení ložisky strategického významu s podrobným odůvodněním z roku 2025 ve smyslu liniového zákona č. 416/2009 Sb., ve znění pozdějších předpisů“ nezohledňuje konkrétní dopady a vlivy těžby na životní prostředí, případně jiné imisní vlivy, jejichž pojmenování a hodnocení bude předmětem povolovacích procesů vedených za účelem získání veřejnoprávních povolení k otvírce a těžbě ložiska, případně úpravě nerostu. Institut ložiska strategického významu předpokládá řádné a kvalitní provedení poměřování veřejných zájmů s veřejným zájmem na těžbě ložiska. V žádném případě však neznamená vyloučení nebo zúžení procesů k posouzení vlivů záměru, potřeby získání podkladových stanovisek a vyjádření. Správní řízení, která jsou dle právního řádu povinností, budou i v těchto případech v celé šíři provedena.

Environmentální rizika jednotlivých lokalit a navrhovaných způsobů těžby budou zhodnocena v „povolovacích“ procesech na základě podkladových Studií, případně odborných posouzení. Institut určení ložiska ložiskem strategického významu není institutem k pojmenování či vyloučení dopadů těžby. Posouzení ani není možné bez detailní znalosti geologických dat oblasti, ale především navrhovaného rozsahu a způsobu otvírky, dobývání, těžební a úpravárenské technologie a způsobu dopravy suroviny. Opačný přístup by představoval vysokou míru neprofesionality, porušení pravidel „*lege artis*“ a vykazoval prvky subjektivního posuzování na místo požadované vysoké míry objektivní a odbornosti. I přes výše uvedené však ložiska, jejichž těžba vykazuje vysokou míru pochybností o míře vlivů na zdroj pitné vody plynoucí z veřejných podkladových materiálů či již zahájených správních řízení, nejsou v návrhu zahrnuta, byť by ostatní kritéria pro zařazení na seznam ložisek strategického významu naplňovala.

Závěry a doporučení

Ložiska vyhrazených a nevyhrazených nerostů jsou jedinečná a nepřemístitelná a situování dobývacího prostoru, případně vymezení území pro dobývání nevyhrazeného nerostu, je tímto nezpochybnitelným objektivním faktem významně omezeno a není dáno volnou úvahou státu, jako vlastníka ložiska, případně těžebního podnikatele, ale přírodními podmínkami – výskytem nerostu v daném místě, jeho úložními poměry, druhem nerostu a technologickými možnostmi způsobu dobývání. Jedná se o přírodní

nahromadění nerostu, kdy osvědčení o ložisku je deklaratorním správním aktem, kterým se „potvrzuje existence“ ložiska, tzn. formálně osvědčuje jeho existenci jakožto přírodního nerostného bohatství. Osvědčení pro výhradní ložiska byla vydána státem, jakožto osvědčení o průmyslovém využití výhradních ložisek. V ustanovení § 3, odst. 5 zákona č. 44/1988 Sb., o ochraně a využití nerostného bohatství (horní zákon), ve znění pozdějších předpisů, se uvádí, že vyhledávání, průzkum a dobývání výhradních ložisek jsou prováděny ve veřejném zájmu.

Ve středním a dlouhodobém výhledu má stavebnictví a průmysl stavebních hmot dostatečné rezervy výrobních kapacit, problémem však může být reálná disponibilita zásob vstupních surovin, která se významně snižuje. Komplikovaný a zdoluhavý průběh správních řízení vedoucích k získání povolení k otvírce, přípravě a dobývání ložisek nerostů se nedaří adekvátně nahrazovat kapacity dotěžených či dotěžovaných ložisek nerostů nově otevíranými. Znepokojující situace se projevuje rostoucí cenou za tunu kameniva, dovoзовými vzdálenostmi, nedostatkem některých klíčových kvalitních frakcí drceného a těženého kameniva do obaloven a betonáren – zejména pak chronickým nedostatkem některých výrobně náročnějších frakcí a tím regionálními výpadky. I v případě úspěšného povoloovacího řízení POPD jde většinou o velmi dlouhé doby (u štěrkopísků až 7–10 let, u stavebního kamene i 8–12 let). K tomu nutno připočítat dobu potřebnou na vybudování provozovny, technologicko-úpravárenského zázemí, provedení zkušebního provozu, zavedení technologických receptur, zahájení přípravy otvírky a těžebních postupů, skrývek, mezideponií apod.

Z hlediska celkové uspokojenosti potřeb veškerých staveb železnic klíčovými frakcemi vyplývá, že z 20 plánovaných staveb vysokorychlostních tratí (VRT) bude celkem 11 neuspokojivých zásobováním kameniva pro vrstvy železničního svršku frakce 32/63 mm (třídy B0, B1) a 11 plánovaných staveb nebude uspokojeno zásobováním kameniva frakce 0/32 kv, 0/63 kv mm – frakce pro konstrukční a podkladní vrstvy tělesa železničního spodku. V případě zbývajících plánovaných staveb konvenčních železničních tratí, jejich rekonstrukcí a modernizací bude celkem 326 plánovaných staveb neuspokojivých zásobováním kameniva pro vrstvy železničního svršku frakce 32/63 mm (třídy B0, B1, BII) a dalších 84 plánovaných staveb nebude uspokojeno zásobováním kameniva frakce 0/32 kv, 0/63 kv mm – frakce pro konstrukční a podkladní vrstvy tělesa železničního spodku. V podrobné analýze všech plánovaných staveb ŘSD a SŽ schází cca 227 staveb konvenčních tratí, plánovaných rekonstrukcí apod., které nebyly zdigitalizovány (nebyly poskytnuty), a tudíž k nim nebylo možno přiřadit příslušné stavební komodity pro pečlivé provedení algoritmu objemu uspokojenosti či neuspokojenosti potřeb. Celkově se jednalo o 3 386 004 tun potřebného kameniva pro vrstvy železničního svršku frakce 32/63 mm (třídy B0, B1, BII) a 1 695 105 tun kameniva frakce 0/32 kv mm, 0/63 kv mm pro konstrukční a podkladní vrstvy tělesa železničního spodku, které nebylo možno přiřadit k příslušným kamenolomům v rámci hodnocení uspokojenosti potřeb výše citovaných 227 železničních staveb. Nicméně tyto celkové výše vykazované objemy pro potřebu scházejících 227 železničních staveb byly algoritmem přiřazeny podle svého umístění do příslušných krajů, ve kterých se nachází. Následně byla algoritmem provedena celková bilance deficitu a uspokojenosti potřeb výše uvedených frakcí pro železniční svršky a železniční spodky za jednotlivé kraje, v níž bylo umístěno již zmiňovaných 227 staveb. Kromě výše uvedených celostátně významných železničních staveb (zejména VRT) si vyžadají velké objemy kameniva na další dílčí navazující stavby (stavby mostů – estakád, tunelů, nadjezdů, ekoduktů, lávek pouze pro pěší a cyklisty apod.) a také nových terminálů a kompletní rekonstrukce železničních stanic apod.

V případě zbývajících klíčových produkovaných frakcí přírodního kameniva – štěrkopísků (tj. frakcí řady 0/2, 0/4, 2/4, 2/5, 4/8, 8/11, 8/16, 11/16, 11/22, 16/32, 32/63 mm a dalších štěrkodrtí 0/32 a 0/63 mm, atd.) zařazených dle ČSN EN 12620 – Kamenivo do betonu a ČSN EN 13043 – Kamenivo pro asfaltové směsi a povrchové vrstvy pozemních komunikací, letištních a jiných dopravních ploch, popř. dalších norem ČSN EN, nezbytných zejména pro silniční a dálniční stavby na území ČR, můžeme konstatovat, že s ohledem na vykazované disponibilní zdroje v rámci POPD a PVL ze všech provozovaných lomů nepředstavuje vyšší potenciál než 50%, tedy zhruba polovina všech využívaných ložisek drceného kameniva produkuje a zároveň zaujímá vyšší disponibilní objemy výše zmíněných klíčových frakcí. Zbývajících část výhradních a nevýhradních ložisek (cca 45–50 %) je s ohledem na nízké vykazované produkce těchto frakcí před postupným vytěžením s nízkými disponibilními zásobami v rámci POPD a PVL, ačkoli jsou v některých případech schopny ještě v současnosti dodávat velmi kvalitní kamenivo na stavby ŘSD. Nicméně řada z nich tyto výše zmiňované klíčové frakce suroviny drceného kameniva neprodukuje.

Ve všech krajích České republiky z celkových vykazovaných disponibilních zásob štěrkopísků a podílu všech vykazovaných frakcí štěrkopísků v rámci POPD a PVL převažují objemy prané i neprané frakce 0/2 mm a 0/4 mm. Pro zajištění trhu a zásobování objemy hrubých frakcí štěrkopísku je možno surovinu částečně doplňovat drceným kamenivem z okolních kamenolomů, nicméně je zapotřebí zdůraznit, že

tyto frakce drobného drceného kameniva se rovněž ve velkých objemech používají do obaloven, tudíž jejich objemy jsou omezené. Z podrobné analýzy potřeby a spotřeby těženého kameniva vyplývá, že z hlediska uspokojení všech plánovaných staveb šterkopískovými frakcemi 0/4 mm, 4/8 mm, 8/16 mm a 16/32 mm bude v rámci plánovaných staveb do budoucna neuspokojeno minimálně 20-30 %.

Celkově při pohledu na výsledky provedené analýzy bilance spotřeby jak těženého, tak i drceného kameniva pro plánované silniční, dálniční a železniční a s nimi související stavby (vysokorychlostní tratě, konvenční tratě, modernizace, rekonstrukce a zkapacitnění železničních tratí, včetně výstavby terminálů, přivaděčů a rekonstrukcí nádraží, apod.), kde byla provedena modelace spotřeby za současných vykazovaných objemů disponibilních zásob, je nutno si uvědomit, že do doby zahájení realizace těchto staveb budou skutečná disponibilní množství potřebných nerostných surovin významně snížena díky jejich spotřebě pro další stavby regionálního a celostátního významu (developerské projekty, bytová výstavba, opravy místních komunikací, dodávky, pro kompletní výrobní program prefabrikovaných produktů, stavební dílce pro pozemní a inženýrské stavitelství, výstavba modulárních a dostavba jaderných elektráren, včetně přivaděčů k nim apod.). Zejména vážná situace je v zajištění potřeb výstavby VRT, kde se jeví jako reálná skutečnost, že většina staveb, které budou zahájeny od roku 2028 do roku 2040, nemusí mít garantované potřebné objemy frakcí 32/63 mm třídy B0, B1, BII přírodního kameniva pro vrstvy železničního svršku a také větší část objemů frakce 0/32 kv, 0/63 kv, 0/90 kv mm pro konstrukční vrstvy tělesa železničního podku.

V provedené analýze stávající bilance zásob kameniva a šterkopísků je kalkulováno pouze s potřebou na stavby silnic a dálnic do roku 2030, konvenčních tratí a VRT do období 2035–2040 a není kalkulováno se spotřebou surovin pro realizaci dalších jak dopravních staveb nižších tříd, tak i energetických staveb, developerských projektů, bytové a komunální výstavby, průmyslové výstavby a provádění údržby a oprav existujících staveb, případně běžnou spotřebou realizovanou fyzickými a právníckými osobami pro drobné stavby.

S ohledem na závěry a doporučení „Studie výběru ložisek stavebních surovin pro jejich určení ložisky strategického významu s podrobným odůvodněním ve smyslu liniového zákona č. 416/2009 Sb., ve znění pozdějších předpisů“ vyplývá, že Vládou ČR schválený výběr ložisek stavebních surovin strategického významu je v různém stupni využití a přípravy. Tato ložiska svými disponibilními zásobami a kvalitou suroviny pokrývají s ohledem na doposud zpracované výsledky a závěry studií max. 40–50 % potřeb materiálu pro dopravní infrastrukturu na území ČR. Z provedené analýzy konkrétní situace v jednotlivých krajích je zřejmé, že současný výčet ložisek strategického významu nebude do budoucna případně naplňovat potřeby stavebních surovin pro realizaci dlouhodobých záměrů, a to nejen v oblasti zajištění strategických staveb, ale i pokrytí potřeb pro další rozvoj stavebnictví v celé šíři oboru. Do budoucna to tedy neznamená, že by se jednalo o uzavřený výběr ložisek stavebních surovin a nebylo možné další ložiska stavebních surovin prohlásit za strategická.

V první fázi bylo vybráno celkem 47 výhradních ložisek stavebního kamene a šterkopísků strategického významu. Zbývající vybraná výhradní ložiska stavebních surovin jsou prozatím považována za rezervu. **Další budoucí výběr rezervních výhradních ložisek stavebních surovin pro jejich určení ložisky strategického významu bude zvláště problematický.** Řada rezervních výhradních ložisek je ve své podstatě nevyužitelná z důvodů naprosto převažujících střetů zájmů s dílčími složkami životního prostředí (velmi komplikovaná dopravní přípustnost, významná ochrana krajiny a přírody, ochrany vodních zdrojů apod.). Velký počet těchto rezervních ložisek také zaujímají velmi nízké vykazované zásoby a zároveň nerentabilní objemy zásob, některá ložiska zaujímají zásoby, které jsou klasifikovány v kategorii vázaných či nebilančních, jsou tudíž neperspektivní pro dlouhodobou těžbu, či dokonce na hranici ekonomické rentability těžby, spíše pro těžbu velmi podružnou s nízkou roční produkcí, polohopisně se nachází na území s dostatečnou roztěžeností a velmi obtížnou dopravní dostupností s velmi nepříznivým dopravním zatížením dotčených obcí a okolní krajiny po technicky nevyhovujících komunikacích, dále jsou tato rezervní ložiska limitována umístěním v Chráněných krajinných oblastech (v území I., II. a III. zóny CHKO), popř. v těsné blízkosti hranice CHKO, ve Vojenských újezdech, v evropsky významných ptačích oblastech a Natura 2000, poblíž MCHÚ a národních parků s význačnými až neřešitelnými střety zájmů s ochranou přírody a krajiny a ochranou podzemních vodních zdrojů apod.

Případné záměry těžeb většiny rezervních výhradních ložisek stavebního kamene by představovaly mimořádně závažný zásah do přírodního a krajinného prostředí s vysokými krajinnými hodnotami, nevratný zásah do přirozeného reliéfu krajinného rázu území, do chráněných rostlin a živočichů, půdního pokryvu, vodního režimu a krajinného pokryvu, resp. biotopů a na ně vázané bioty. Významným neřešitelným problémem je rovněž nedostatečná kapacita dopravních cest nutných k přístupu k těmto

rezervním ložiskům a odvozu natěžené suroviny. Místní komunikace III. a IV. třídy jsou díky členitému reliéfu krajiny úzké a nepřehledné, tudíž pro provoz těžkých nákladních automobilů zcela technicky nevyhovující. Většina kvantitativně potenciálně odpovídajících ložisek se nachází v konfliktních územích a zaujímají zcela nevyhovující umístění vzhledem k zastavěnému a zastavitelnému území dotčených obcí.

V této souvislosti je zapotřebí průběžně vyhodnocovat nadějně prognózní zdroje stavebních surovin a pozornost rovněž soustředit na potenciální využití velmi kvalitních a z územně ekologických hledisek přijatelnějších ložisek nevyhrazeného nerostu. S ohledem na markantní úbytek zásob na výhradních ložiskách stavebních surovin, jednoznačně přibývají a zaujímají vzrůstající hospodářský význam ložiska nevyhrazeného nerostu (nevýhradní ložiska), proto je zapotřebí posílit hospodářský význam těchto nevýhradních ložisek s nutností implementace do územně plánovací dokumentace (ÚPD). Je třeba si uvědomit skutečnost, že výhradní ložiska stavebních surovin nepokrývají ani 2 % celkové rozlohy území České republiky, a tato ložiska ani zásoby v nich „nepřibývají“. Současné znění Horního zákona neumožňuje stanovit další nové výhradní ložisko na nevyhrazeném nerostu.

Závěrem je třeba zdůraznit a vyzdvihnout odbornou práci celého týmu zástupců Těžební unie a České geologické služby a také zástupců Sdružení pro stavbu silnic za poskytnutí vybraných klíčových podkladů. Těžební unie jako smluvní zhotovitel, zpracovatel a iniciátor vzniku studií zaštiťoval koordinaci podkladů od jednotlivých těžebních organizací a objednatelů, což nebyla také úplně snadná role. Konkrétně bychom chtěli poděkovat Mgr. Marcele Hrbáčkové, Mgr. Pavlovi Kotáskovi, Ing. Pavlovi Fialovi a celému týmu z odboru výzkumu ložisek nerostných surovin a surovinové politiky České geologické služby a Sdružení pro stavbu silnic. Rovněž velké poděkování zástupcům odboru geologie MŽP, jakožto zadavateli Studie výběru ložisek stavebních surovin pro jejich určení ložisky strategického významu s podrobným odůvodněním a také zástupcům odboru hornictví a surovinové politiky MPO.

VÝROBA A POKLÁDKA ASFALTOVÉ SMĚSI S R-MATERIÁLEM ZA SNÍŽENÉ TEPLoty – PŘÍPADOVÁ STUDIE

PRODUCTION AND PAVING OF ASPHALT MIX WITH RAP AT REDUCED TEMPERATURE – CASE STUDY

Ing. MSc. Przemyslaw Ostrowski, ORLEN Asphalt, Poland

Ing. MSc. Wiktoria Barnowska, ORLEN Asphalt, Poland

PhD Wojciech Sorociak, ORLEN Asphalt, Silesian University of Technology, Poland

Ing. MSc. Anna Górska, ORLEN Asphalt, Poland

Silniční stavební průmysl stojí před velkou výzvou, jak splnit stále přísnější požadavky na ochranu životního prostředí a udržitelný rozvoj. Jedním ze způsobů, jak přispět ke snížení uhlíkové stopy při pokládce asfaltových vrstev, je využití R-materiálu. Další dostupnou technologií jsou nízkoteplotní asfaltové směsi WMA. Co lze očekávat v případě kombinace těchto dvou technologií? V září 2024 byl v Polsku realizován první zkušební úsek s využitím R-materiálu a inovativního pojiva ORBITON RC50. Byly porovnávány dva úseky – jeden s asfaltovou směsí s R-materiálem a standardním modifikovaným asfaltovým pojivem PMB s realizací za standardní teploty. Druhý úsek byl proveden s asfaltovou směsí s R-materiálem a novým asfaltovým pojivem ORBITON RC50 s rejuvenačními vlastnostmi a realizací při teplotě hutnění o 20 °C nižší než na prvním úseku. Příspěvek porovnává vlastnosti obou asfaltových směsí. Výsledky studie potvrdily dobré funkční vlastnosti směsí s R-materiálem, které byly vyrobené při snížené teplotě.

The road industry faces a major challenge in complying with increasingly stringent environmental and sustainability requirements. One way to help reduce carbon footprint during paving of the roads is to use RAP. Another available technology is WMA. What in case we combine these two technologies? In September 2024, the first experimental section in Poland was constructed using RAP and the innovative ORBITON RC50 binder. Two sections were compared. One with asphalt mix with RAP and standard PMB bitumen produced and paved in standard temperature. Second with asphalt mix with RAP and new bitumen ORBITON RC50 with rejuvenating properties at a 20 C degree lower compaction temperature than the first section. The article describes a comparison of the properties of two bitumen and asphalt mixes. The results of the study confirmed good functional properties of the mix with RAP produced at reduced temperature.

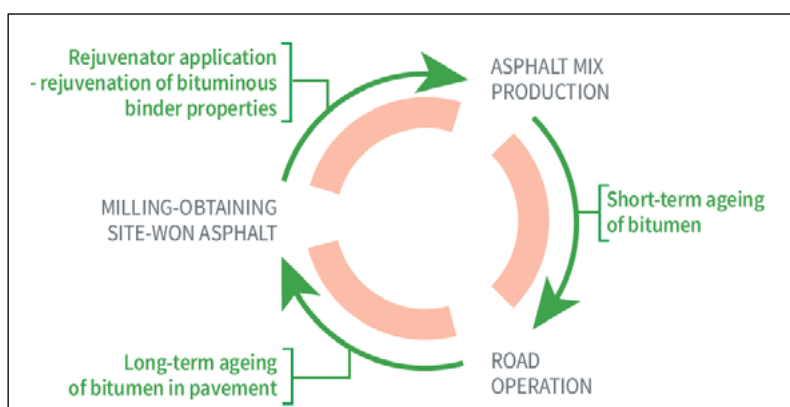
Úvod

Asfaltové vozovky se stejně jako jiné konstrukce postupně opotřebovávají v důsledku jejich používání. Proto, aby sloužily bez poruch co nejdéle, musí být vhodným způsobem udržovány. Kromě běžných ad hoc postupů údržby je nutné v případě zjištění ztráty funkčních vlastností obrusné vrstvy (např. ztráta rovinnosti nebo drsnosti) nebo v případě snížení únosnosti konstrukce vozovky naplánovat práce spojené se zpevněním konstrukce nebo výměnou jedné či více asfaltových vrstev. Výměna konstrukčních vrstev je u asfaltových vozovek běžně používaným postupem. Při těchto pracích se obvykle provádí frézování min. obrusné vrstvy vozovky (obrázek 1). Frézováním asfaltových vrstev vzniká R-materiál (RAP). Zpravidla se jedná o materiál s vyšší přidanou hodnotou, který by měl být, pokud možno, vhodně zpracován a znovu použit do nově prováděných asfaltových vrstev. To umožňuje snížit spotřebu cenných přírodních zdrojů, a je tedy v souladu s principy oběhového hospodářství, které je vyžadováno ve stále větší míře.



Obrázek 1: Frézování asfaltové vozovky – selektivní frézování jednotlivých vrstev
[zdroj: P. Ostrowski]

Asfaltové pojivo zabudované do vozovek prochází řadou chemických procesů, které vedou k jeho degradaci a stárnutí [1]. Intenzita tohoto procesu závisí na mnoha faktorech, včetně chemické povahy pojiva, jeho struktury a skupinového složení, stejně jako také na působení různých vnějších faktorů. Existují však materiály, které umožňují alespoň částečně snížit účinky stárnutí asfaltových pojiv (tzv. rejuvenátory). Nejčastěji obsahují olejové a pryskyřičné frakce bohaté na aromatické sloučeniny nebo jsou ve formě dispergantů. Tyto „omlazovací“ prostředky by měly bez ohledu na své složení umožnit částečné obnovení vhodných poměrů mezi jednotlivými složkami asfaltu, tedy mezi saturáty, aromáty, asfaltény a pryskyřicemi, v původním zestárlém asfaltovém pojivu [2]. Díky svým vlastnostem tyto přísady změní některé fyzikální nebo chemické procesy, které v pojivu probíhají a sníží zejména jeho viskozitu. V důsledku toho je možné výrazně zmírnit nežádoucí účinky procesu stárnutí [3]. Životní cyklus asfaltového pojiva ve vozovce a doporučená forma jeho recyklace pomocí rejuvenačního prostředku jsou znázorněny na obrázku 2.



Obrázek 2: Životní cyklus pojiva v asfaltové vrstvě včetně nutné recyklace
[zdroj: ORLEN Asfalt]

Termíny v obrázku: aplikace rejuvenátoru – oživení vlastností asfaltového pojiva, výroba asfaltové směsi, krátkodobé stárnutí asfaltu, používání vozovky, dlouhodobé stárnutí stávající asfaltové vrstvy, frézování vozovky – získání R-materiálu

Na trhu je aktuálně řada produktů nabízených jako rejuvenační (omlazující) přísady. Účinnost tohoto typu přísad by měla být před použitím v průmyslovém měřítku ověřena laboratorními testy funkčních vlastností pojiv.

Alternativou může být i jednodušší způsob „omlazení“ zestárlého asfaltového pojiva v R-materiálu, a to použitím speciálních průmyslově vyráběných asfaltových pojiv. Složení těchto speciálních pojiv umožňuje dosáhnout vysoké kvality asfaltové směsi vyrobené s příměsí R-materiálu. Pojiva určená pro asfaltové směsi s vysokým obsahem R-materiálu jsou vyráběna i společností PKN Orlen pod názvem ORBITON RC.

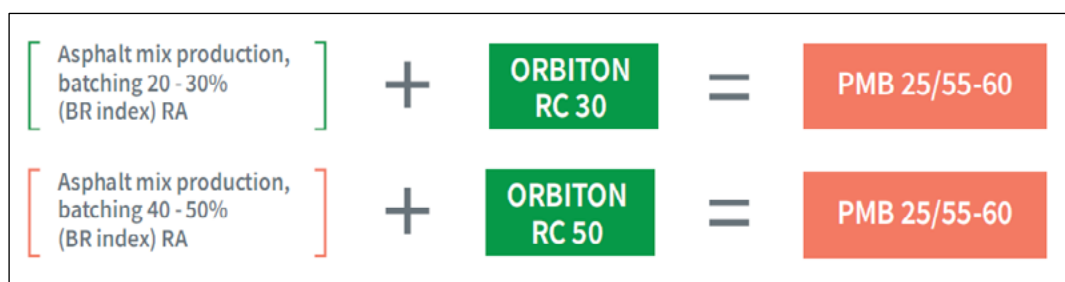
Vlastnosti pojiv ORBITON RC

Nová řada asfaltových pojiv ORBITON RC byla vyvinuta tak, že bez ohledu na množství R-materiálu v asfaltové směsi odpovídají vlastnosti asfaltového pojiva v nově vyrobené asfaltové směsi vrstvy stejné jako u standardního PMB 25/55-60.

Použití pojiva ORBITON RC nevyžaduje žádné úpravy v konstrukci obalovny a výroba asfaltových směsí a pokládka probíhá standardním způsobem.

Schéma postupu při využití asfaltů ORBITON RC je znázorněno na obrázku 3.

Využití pojiv ORBITON RC však lze modifikovat v závislosti na vlastnostech a množství přidávaného R-materiálu a dále i na požadovaných vlastnostech nové asfaltové směsi. Při správném výběru vstupních materiálů lze dosáhnout i snížení teploty při pokládce, stejně jako v případě použití technologie WMA. Díky tomuto postupu lze docílit snížení emisí při provádění asfaltových vrstev.

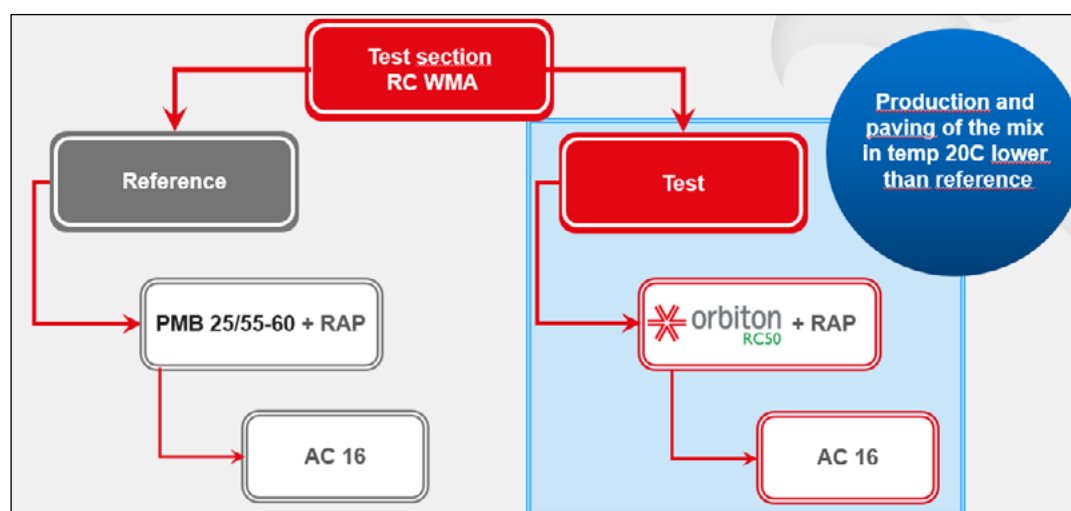


Obrázek 3: Orientační rozsahy množství přidaného R-materiálu při použití různých typů pojiv ORBITON RC [zdroj: ORLEN Asphalt]

Termíny v obrázku: výroba asfaltové směsi, šarže s 20–30 %, (BA index) RA, výroba asfaltové směsi, šarže s 40–50 %, (BA index) RA

Vývojový program

Vývojový program zaměřený na ověření možnosti snížení manipulačních teplot při výrobě a pokládce asfaltové směsi s R-materiálem s využitím asfaltu ORBITON RC byl realizován v závodě společnosti MASFALT ve Varšavě (Polsko). Pro ověření byl vybrán asfaltový beton AC 16 pro ložní vrstvu s obsahem 30 % R-materiálu. Celková koncepce výzkumného programu je uvedena na obrázku 4. Vybrané vlastnosti materiálu použitého ve zkušebním úseku jsou dále uvedeny v tabulce 1.



Obrázek 4: Obecná koncepce vývojového programu [zdroj: ORLEN Asphalt]

Termíny v obrázku: Zkušební úsek RC WMA, reference, test, výroba a pokládka asfaltové směsi při teplotě o 20 °C nižší než reference

Vývojový program se skládal ze dvou částí – zkušební úsek a laboratorní vyhodnocení. Cílem praktické části bylo ověřit možnost zhuštění asfaltové směsi s asfaltovým pojivem ORBITON RC 50 a příměsí R-materiálu při teplotě o 20 °C nižší než u běžných referenčních asfaltových směsí. Během výroby na obalovně byly odebrány vzorky jak referenční směsi, tak i ověřované směsi pro laboratorní zkoušky.

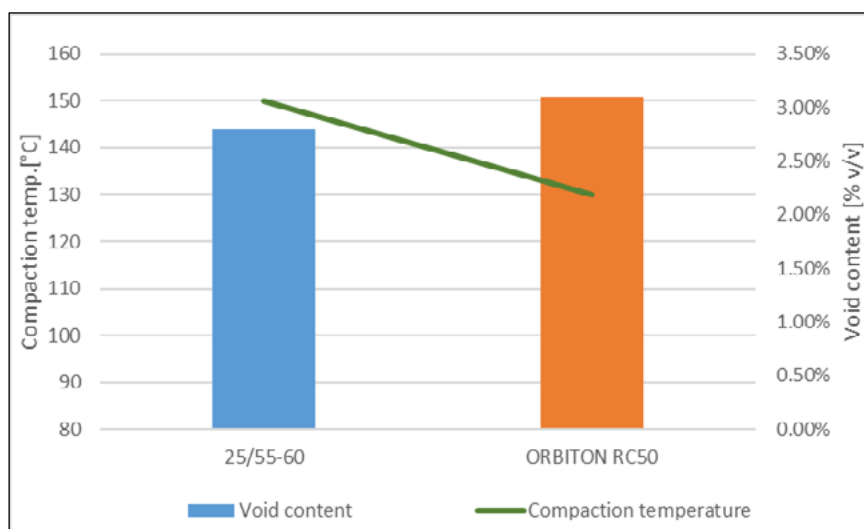
Vypracovaný program laboratorních zkoušek zahrnoval ověření vlastností asfaltových směsí vyrobených s různými typy pojiva při různých teplotách. Program zahrnoval ověření odolnosti proti vyjíždění kolejí podle EN 12697-22, metoda B (s přítomností vzduchu, při 60 °C, trvání 10 000 cyklů), odolnost proti vlivu vody a mrazu podle EN 12697-12 a nízkoteplotní vlastnosti TSRST podle EN 1269-46. Jako nejzajímavější se ukázala zkouška únavových vlastností podle EN 12697-24 (4PB-PR, 10 °C, frekvence 10 Hz).

Tabulka 1: Vybrané vlastnosti materiálů použitých na zkušebním úseku

Ověřovaná asfaltová směs		AC 16	
Typ pojiva		PMB 25/55-60	ORBITON RC 50
Obsah R-mat. (m/m)		30 %	30 %
Vlastnosti extrahovaného pojiva	Penetrace @ 25 °C dle EN 1426 [0,1mm]	13	
	BM KK dle EN 1427 [°C]	73,7	
	Zpětné přetvoření dle EN 13398 [%]	42	
Teplota hutnění [°C]		150	130

Výsledky

Výsledky mezerovitosti směsi AC 16 W s R-materiálem a pojivem PMB 25/55-60 zhutněné při teplotě 150 °C a směsi AC 16 W s R-materiálem s pojivem PMB ORBITON RC 50 zhutněné při teplotě 130 °C jsou uvedeny na obrázku 5. Obě směsi dosáhly podobné mezerovitosti, což dokazuje, že hlavní cíl projektu, kterým bylo ověření možnosti hutnění asfaltové směsi s R-materiálem s pojivem ORBITON RC, byl splněn.

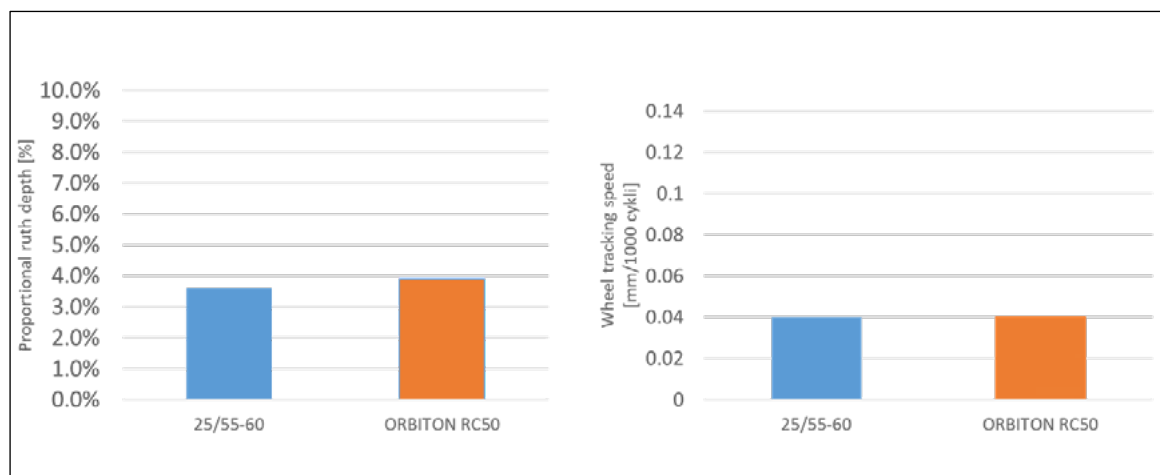


Obrázek 5: Mezerovitost ověřovaných asfaltových směsí podle normy EN 12697-8 [zdroj: ORLEN Asfalt]

Termíny v obrázku: teplota hutnění, mezerovitost

Zkouška pojíždění kolem byla provedena podle normy EN 12697-22, část B, na vzduchu, po 10 000 cyklech a teplotě 60 °C. Výsledky jsou uvedeny na obrázku 5.

Vzhledem k tomu, že obě směsi jsou vyrobeny z polymerem modifikovaného pojiva a R-materiálu, vykazují oba vzorky velmi dobré vlastnosti odolnosti proti tvorbě trvalých deformací.

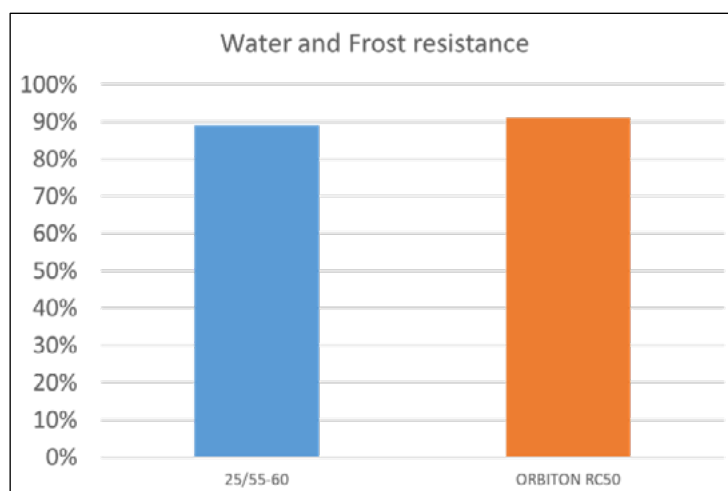


Obrázek 6: Výsledky zkoušky poježdění kolem podle EN 12697-22
[zdroj: ORLEN Asfalt]

Termíny v obrázku: proporcionální hloubka koleje, rychlost poježdění kola

Zkouška odolnosti proti působení vody byla provedena podle normy EN 12697-12. Výsledky jsou uvedeny na obrázku 7.

Z hlediska vlastností citlivosti na vodu dosáhly obě směsi i v tomto případě velmi dobrých výsledků, a to na úrovni přibližně 90 %. Pro směs AC 16 pro ložní vrstvu je podle polských technických směrnic požadován index ITSR vyšší než 80 %.



Obrázek 7: Výsledky odolnosti proti působení vody podle normy EN 12697-12
[zdroj: ORLEN Asfalt]

Termíny v obrázku: Odolnost proti působení vody a mrazu

Výsledky nízkoteplotních vlastností a vzniku trhlin normy EN 12697-46 jsou uvedeny na obrázku 8. Je třeba poznamenat, že směs s R-materiálem a pojivem ORBITON RC 50 dosáhla výsledků, které byly o více než 4 °C lepší než směs s R-materiálem a standardním typem PMB. Tento výsledek ukazuje vhodnost použití pojiv s rejuvenačními vlastnostmi ve směsích s příměsí R-materiálu.

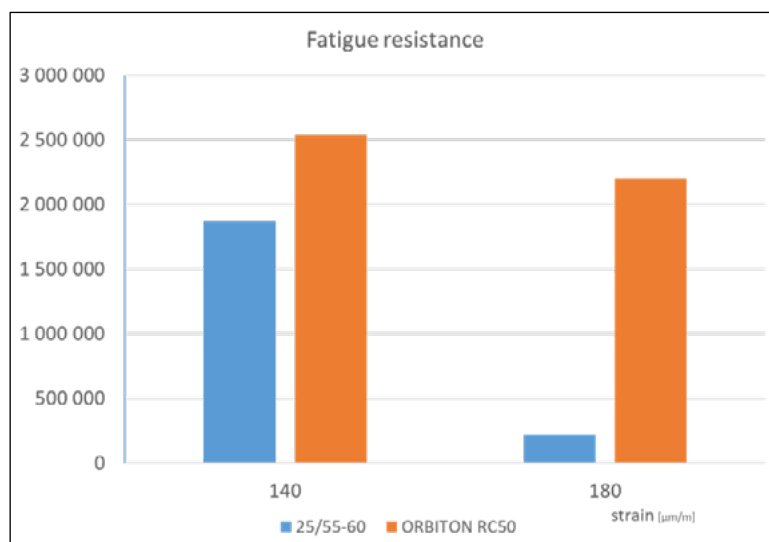


Obrázek 8: Výsledky nízkoteplotních vlastností podle EN 12697-46
[zdroj: ORLEN Asfalt]

Termíny v obrázku: Lomová teplota

Výsledky odolnosti proti únavě podle normy EN 12697-24 (4 PB-PR při 10 °C a frekvenci 10 Hz) jsou uvedeny na obrázku 9.

Přestože zkoušení odolnosti proti únavě pro tento typ asfaltových směsí není ve předpisech požadováno, výsledky zkoušky jasně ukazují rozdíl mezi použitými materiály. Byla provedena zkouška obou typů směsí při třech úrovních deformace. Směs s R-materiálem a pojivem ORBITON RC 50 byla zkoušena na třech úrovních (140/180/250 mikrostrain), Směs PMB a R-materiálem byla ověřována v úrovních 115/140/180 mikrostrain. V grafu je uvedena odolnost proti únavě v překrývajícím se pásu (tedy 140 a 180 mikrostrain). Je zřejmé, že asfaltová směs s pojivem ORBITON RC 50 a R-materiálem dosáhla o více než 20 % lepších výsledků při 140 mikrostrain a více než 9násobně lepších výsledků při 180 mikrostrain než směs s R-materiálem a pojivem PMB 25/55-60. Tyto výsledky opět potvrzují oprávněnost použití pojiv s rejuvenačními vlastnostmi ve směsích i s nižším obsahem R-materiálu (cca 30 %).



Obrázek 9: Výsledky únavové odolnosti podle EN 12697-24 [zdroj: ORLEN Asfalt]

Termíny v obrázku: Odolnost proti únavě

Shrnutí, závěr

Výsledky výzkumu potvrzují účinnost omlazujících látek, které jsou obsaženy v asfaltovém pojivu. Laboratorními testy bylo prokázáno, že pojivo ORBITON RC:

- Umožňuje použití tohoto pojiva pro výrobu asfaltové směsi s podílem 30 % R-materiálu při správné výrobě a pokládce asfaltové vrstvy na zkušebním úseku při teplotě snížené o 20 °C.
- Směs s R-materiálem a pojivem ORBITON RC 50 se vyznačuje lepší únavovou odolností ve srovnání se směsí s R-materiálem a standardním pojivem PMB.
- Pojivo ORBITON RC 50 dosahuje nižší teploty lomu při ověření nízkoteplotních vlastností (TSRST) přibližně o 4 °C.
- Oba typy asfaltových směsí se vyznačovaly velmi dobrou odolností proti působení vody stanovenou ve zkoušce ITSr.

Asfaltové směsi nabízejí řadu možností optimalizace a chytré využití dostupných technologií umožňuje snížit emise při výrobě a pokládce. Toho lze dosáhnout bezpečným způsobem, který nemá negativní vliv na funkční parametry konečného výrobku.

Zdroje:

- [1] Gawel I., Kalabińska M., Piłat J. Asfalty drogowe. Warszawa: WKiŁ, 2014
- [2] Sirin O., Paul D. K., Kassem E. State of the Art Study on Aging of Asphalt Mixtures and Use of Antioxidant Additives, Advances in Civil Engineering, Vol. 2018, Article ID 3428961, 18 pages
- [3] Sorociak W., Grzesik B., Bzówka J., Mieczkowski P. Asphalt concrete produced from rejuvenated reclaimed asphalt pavement (RAP), Archives of Civil Engineering, Vol. 66, nr 2, 2020

PRODUCTION AND PAVING OF ASPHALT MIX WITH RAP AT REDUCED TEMPERATURE – CASE STUDY

VÝROBA A POKLÁDKA ASFALTOVÉ SMĚSI S RAPEM ZA SNÍŽENÉ TEPLoty – PŘÍPADOVÁ STUDIE

Ing. MSc. Przemyslaw Ostrowski, ORLEN Asphalt, Poland

Ing. MSc. Wiktoria Barnowska, ORLEN Asphalt, Poland

PhD Wojciech Sorociak, ORLEN Asphalt, Silesian University of Technology, Poland

Ing. MSc. Anna Górska, ORLEN Asphalt, Poland

The road industry faces a major challenge in complying with increasingly stringent environmental and sustainability requirements. One way to help reduce carbon footprint during paving of the roads is to use RAP. Another available technology is WMA. What in case we combine these two technologies? In September 2024, the first experimental section in Poland was constructed using RAP and the innovative ORBITON RC50 binder. Two sections were compared. One with asphalt mix with RAP and standard PMB bitumen produced and paved in standard temperature. Second with asphalt mix with RAP and new bitumen ORBITON RC50 with rejuvenating properties at a 20 °C degree lower compaction temperature than the first section. The article describes a comparison of the properties of two bitumen and asphalt mixes. The results of the study confirmed good functional properties of the mix with RAP produced at reduced temperature.

Silniční stavební průmysl stojí před velkou výzvou, jak splnit stále přísnější požadavky na ochranu životního prostředí a udržitelný rozvoj. Jedním ze způsobů, jak přispět ke snížení uhlíkové stopy při pokládce asfaltových vrstev, je využití R-materiálu. Další dostupnou technologií jsou nízkoteplotní asfaltové směsi WMA. Co lze očekávat v případě kombinace těchto dvou technologií? V září 2024 byl v Polsku realizován první zkušební úsek s využitím R-materiálu a inovativního pojiva ORBITON RC50. Byly porovnávány dva úseky – jeden s asfaltovou směsí s R-materiálem a standardním modifikovaným asfaltovým pojivem PMB s realizací za standardní teploty. Druhý úsek byl proveden s asfaltovou směsí s R-materiálem a novým asfaltovým pojivem ORBITON RC50 s rejuvenačními vlastnostmi a realizací při teplotě hutnění o 20 °C nižší než na prvním úseku. Příspěvek porovnává vlastnosti obou asfaltových směsí. Výsledky studie potvrdily dobré funkční vlastnosti směsí s R-materiálem, které byly vyrobené při snížené teplotě.

Introduction

Road pavements, like any other construction, gradually wear out as a result of their use. Therefore, in order to serve without failure for as long as possible, they must be maintained in an appropriate manner. In addition to current, ad hoc maintenance procedures, in the event of finding a loss of appropriate functional properties of the wearing course, such as loss of evenness or roughness, and also in the event of exhaustion of the load-bearing capacity of the structure, it is necessary to plan activities related to strengthening the structure or replacing one or more of its layers. Replacing of layers is a commonly used procedure for asphalt pavements. During such renovation works, milling is usually performed (Figure. 1), at least of the wearing course. As a result of milling asphalt mixtures, reclaimed asphalt pavement (RAP) is created. This is a valuable material, which, if possible, should be properly processed and reincorporated into the newly built pavements, which allows to reduce the consumption of natural resources and is in line with the principles of the circular economy, which is becoming more and more demanded.



Figure 1. Milling an asphalt pavement – selective milling of individual courses [source: P.Ostrowski]

Asphalt binder incorporated into pavements undergoes numerous chemical processes that lead to its aging [1]. The intensity of this process depends on many factors, including the chemical nature of the binder, its structure and group composition, as well as the influence of various external factors. However, there are substances that enable – at least partially – reversing the effects of aging in asphalt binders, called rejuvenators. Most often, they contain oil and resin fractions rich in aromatic compounds, or are in the form of dispersants. Rejuvenators, regardless of their composition, should enable the restoration of the appropriate proportions between the individual group components of bitumen: saturated compounds, aromatic compounds, asphaltenes and resins, in the aged asphalt binder [2]. Due to their properties, these additives reverse some of the physical processes occurring in the binder, reducing its viscosity. As a result, it is possible to significantly mitigate the undesirable effects of the aging process [3]. The life cycle of the asphalt binder in the pavement and the recommended form of its recycling using a refreshing agent are shown in Figure. 2.

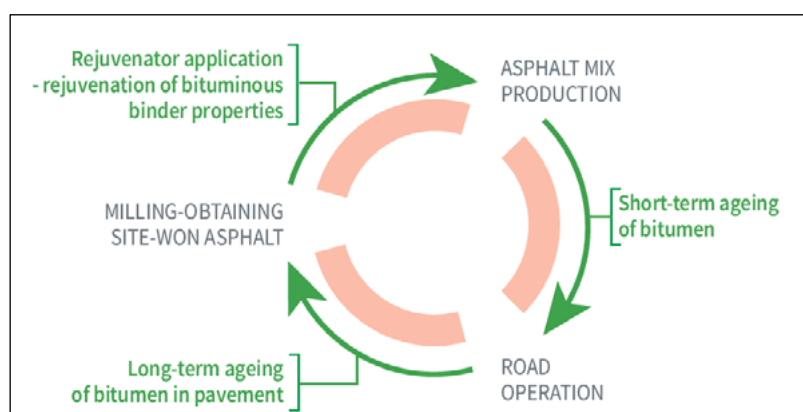


Figure 2. Life cycle of binder in pavement including required recycling [source: ORLEN Asphalt]

There are many products on the market offered as rejuvenators. The effectiveness of this type of additives, before use on an industrial scale, should be verified in laboratory tests of the functional properties of the binders.

Alternatively, a simpler way to "refresh" aged asphalt binder present in RAP may be to use dedicated ready-made asphalt binders. These special binders are composed in such a way that mixtures made using recycled material are characterized by the highest possible quality. Binders dedicated to asphalt mix with a high RAP content are available in stock under the name ORBITON RC.

Properties of ORBITON RC binders

The new range of ORBITON RC binders has been developed in such a way that, regardless of the RAP content used in the asphalt mixture, the properties of the binder within a course are the same as those of the PMB 25/55-60 modified binder.

What is more, using ORBITON RC binders does not require introducing any modifications in the asphalt mix plant design, and asphalt mix production and paving can be done in a standard manner.

The diagram of the concept of using ORBITON RC bitumens is shown in Figure 3.

However, the scheme of using ORBITON RC binders can be modified depending on the properties and dosed amounts of RAP, as well as the properties to be achieved. With the proper selection of input materials, an additional effect of lowering the paving temperature can be achieved, as in the case of using the WMA (warm mix asphalt) technology. Thanks to this, it is also possible to reduce emissions during the construction of asphalt pavements.

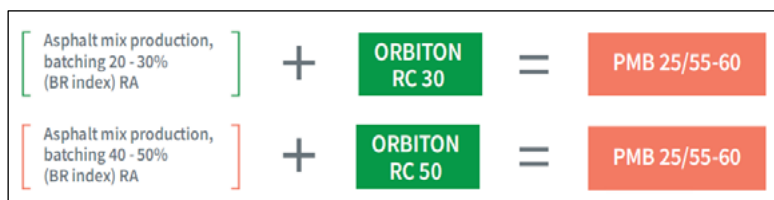


Figure 2. Approximate ranges of values for a RA to be used with the different types of ORBITON RC binders [source: ORLEN Asphalt]

Research program

The research program aimed at verifying the possibility of reducing the production temperature and paving the RAP asphalt mixture using ORBITON RC asphalt was carried out at the MASFALT company plant in Warsaw, Poland. For this purpose asphalt concrete AC 16 for binder course with 30% RAP content was chosen. The general concept of research program is shown in Figure 3. Selected properties of material used in the test section are shown in Table 1.

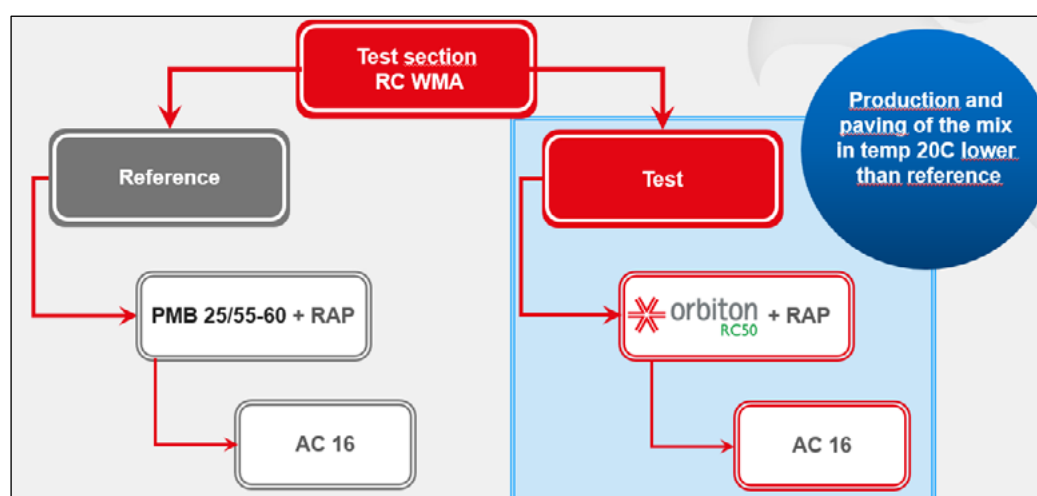


Figure 3. General concept of research program [source: ORLEN Asphalt]

Research program consists of two parts – field part and laboratory part. The aim of the field part was to check the possibility of compacting of the mixture with ORBITON RC 50 and RAP in the temperature 20°C below the reference mixture. During production in the asphalt mix plant, both reference mixture as well as the test mixture were collected to examine the properties in the laboratory.

The developed laboratory testing program includes verification of the properties of asphalt mixtures made with different binders in different temperatures. Program included rutting resistance acc. to EN 12697-22, B method in the air, 60°C, 10 000 cycles, water and frost resistance acc. to EN 12697-12, low temperature properties TSRST acc. to EN 1269-46, but the most interesting was fatigue performance test acc. to EN 12697-24 (4PB-PR, 10C, 10Hz).

Table 1: Selected properties of materials used in test section

Type of examined feature		AC 16	
Binder type		PMB 25/55-60	ORBITON RC50
RAP content (m/m)		30%	30%
RAP binder properties	Penetration @ 25°C acc. EN 1426 [0,1mm]	13	
	R&B acc. EN 1427 [°C]	73,7	
	Elastic recovery acc. EN 13398 [%]	42	
Compaction temperature [°C]		150	130

Results

The results of the air voids content of the AC 16 W mixture with RAP and 25/55-60 binder compacted at a temperature of 150°C and AC 16 W with RAP and ORBITON RC 50 binder compacted at a temperature of 130°C are shown in Figure 4. Both mixtures achieved a similar void content, which proves that the main goal of the project, which was to check the possibility of compacting RAP mixtures with ORBITON binder, was achieved.

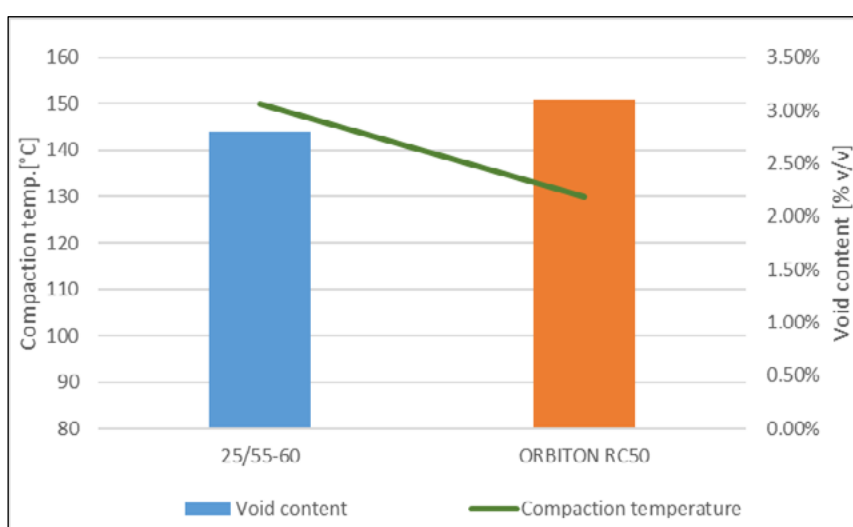


Figure 4. Void content of the tested asphalt mixtures acc. To En 12697-8 [source: ORLEN Asfalt]

Rutting resistnace test conducted according to EN 12697-22, method B, in the air, 10 000 cycles, 60C. The results are shown in the Figure 5.

Due to the fact that both mixtures are produced with PMB bitumens and RAP, they show very good rutting resistance properties.

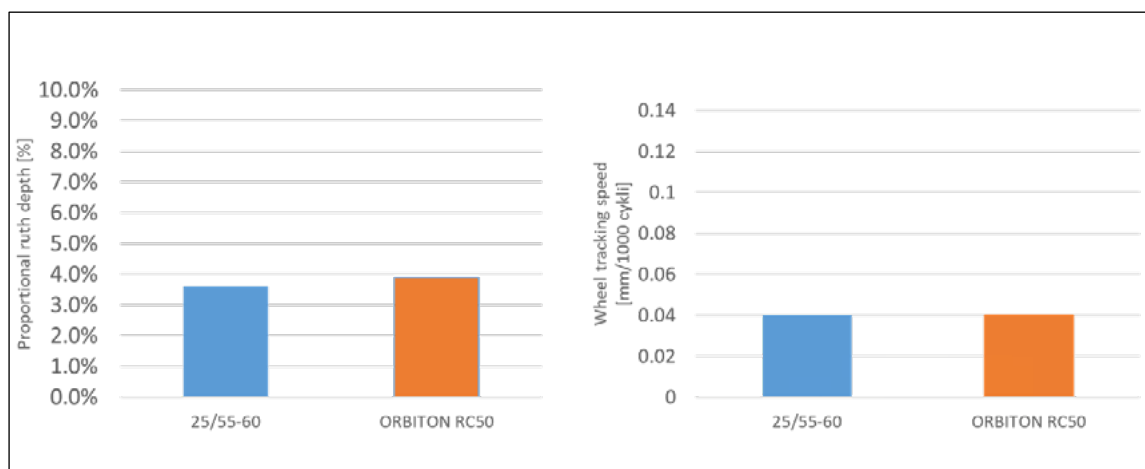


Figure 5. Rutting resistnace results acc. to EN 12697-22 [source: ORLEN Asphalt]

Water sensitivity test conducted according to EN 12697-12. The results are shown in the Figure 6.

In terms of water sensitivity properties, both mixtures achieved very good results, at a level of about 90%. It is worth noting that for the AC 16 mixture for bonding course, an ITSR index of over 80% is required according to polish technical guidelines.

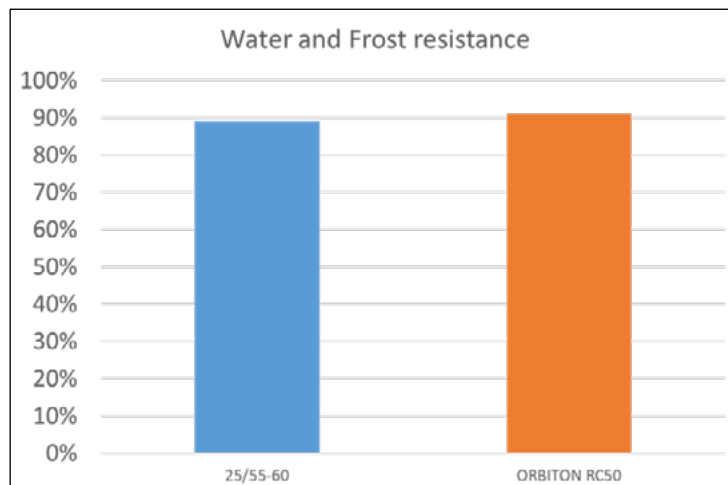


Figure 6. Water sensitivity results acc. to EN 12697-12 [source: ORLEN Asphalt]

The results of fracture cracking due to thermal shrinkage tested according to EN 12697-46 are shown in Figure 7. It should be noted that the mixture with RAP and ORBIOTN RC 50 binder achieved results that were more than 4°C better than the mixture with RAP and the classic PMB binder. This result indicates the advisability of using binders with rejuvenating properties in RAP mixtures.



Figure 7. Fracture temperature results acc. to EN 12697-46 [source: ORLEN Asphalt]

The results of fatigue resistance tested according to EN 12697-24 (4 PB-PR, 10°C, 10Hz) are shown in Figure 8. Although fatigue resistance testing for this type of asphalt mixes is not required in the specifications, the results of the test clearly show the difference between the materials used. The mix with RAP and ORBITON RC 50 binder achieved over 20% better results at 140 microtrain and over 9 times better results at 180 microtrain than the mix with RAP and PMB 25/55-60 binder. These results once again confirm the validity of using binders with rejuvenating properties in mixes even with a moderate content of RAP (around 30%).

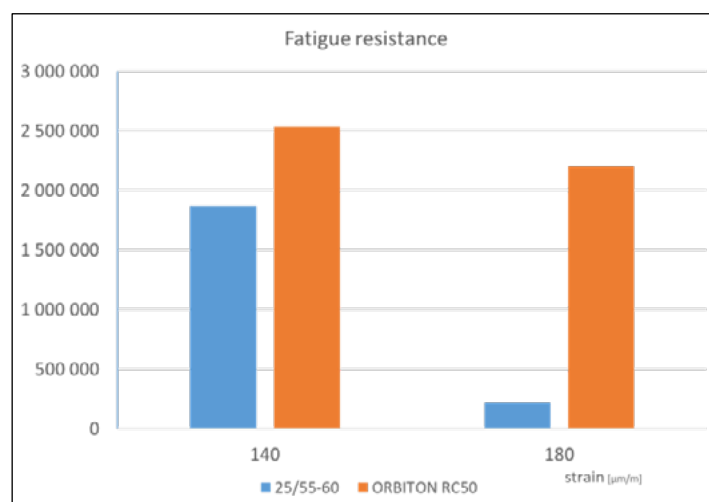


Figure 8. Fatigue resistance results acc. to EN 12697-24 [source: ORLEN Asphalt]

Conclusion

The research results confirm efficiency of rejuvenators already present in asphalt binder. The ORBITON RC binder was verified in laboratory tests allowing to conclude that:

- The use of ORBITON RC50 binder in an asphalt mix with a 30% of RAP allowed for the correct production and paving of the asphalt course on the test road section at a temperature reduced by 20°C.
- The mix with RAP and ORBITON RC50 binder is characterized by improved fatigue life compared to mix with RAP and standard PMB binder.
- ORBITON RC50 binder allowed for a reduction in the fracture temperature in the TSRST test by about 4°C.
- Both mixtures were characterized by similar, very good resistance to water determined in the ITSR test.

Asphalt mixtures offer a number of optimization possibilities, and clever use of available technologies allows for the reduction of emissions during production and paving process. It can be achieved in a safe way, not affecting negatively the final product's parameters.

Sources:

- [1] Gawel I., Kalabińska M., Piłat J., *Asfalty drogowe*. Warszawa: WKiŁ, 2014.
- [2] Okan Sirin, Dalim K. Paul, and Emad Kassem, State of the Art Study on Aging of Asphalt Mixtures and Use of Antioxidant Additives, *Advances in Civil Engineering*, Volume 2018, Article ID 3428961, 18 pages
- [3] Sorociak W., Grzesik B., Bzówka J., Mieczkowski P., Asphalt concrete produced from rejuvenated reclaimed asphalt pavement (RAP), *Archives of Civil Engineering*, Vol. 66, nr 2, 2020

CESTA K MAXIMÁLNÍMU VYUŽITÍ R-MATERIÁLU

UNLOCKING THE FULL POTENTIAL OF RAP

Samir Irzayev, B.Sc., J. Rettenmaier & Söhne GmbH + Co KG, Německo/Germany

V době rostoucího tlaku na náklady a zájmu o životní prostředí představuje vysoce kvalitní recyklace znovuzískaných asfaltových směsí (R-materiálu) ideální příležitost, jak tyto dva aspekty spojit bez jakýchkoli kompromisů, pokud jde o kvalitu nebo trvanlivost asfaltových vozovek. Aby bylo dosaženo co nejvyšší úrovně přidané hodnoty, měl by být v ideálním případě použit vyšší podíl R-materiálu pocházející z krytových vrstev asfaltových vozovek. Tento R-materiál obsahuje vysoce kvalitní minerální kamenivo a pojivo a měl by být opětovně použit v novém asfaltovém krytu.

In times of rising cost pressure paired with a growing concern for the environment, the high-quality recycling of reclaimed asphalt (RAP) provides an ideal opportunity for combining these two aspects without any compromises in terms of quality or durability of asphalt pavements. In order to achieve the highest possible level of added value, ideally, a higher percentage of RAP derived from asphalt surface layer material with high-grade mineral aggregates and binders should be re-used in new asphalt pavement.

Recyklace asfaltových směsí: frézování, zpracování a přidávání R-materiálu

Zatímco termín „recyklace“ označuje přípravu a zpracování materiálů nebo výrobků za účelem výroby něčeho nového, tak termín „opětovné použití“ je definován jako opakované využití materiálů nebo výrobků pro stejný účel použití.

Pro další využití lze R-materiál získat buď bouráním asfaltových vrstev vozovek (asfaltové kry) nebo odfrézováním po jednotlivých vrstvách na určitou tloušťku (frézované asfaltové směsi). Zpracování R-materiálu na obalovnách probíhá formou drcení a prosívání. Různé druhy R-materiálů se skladují odděleně a měly by být zakryty. Přidávání studeného R-materiálu lze provádět jak na šaržové, tak i v kontinuální obalovně. R-materiál lze přidávat také za tepla po jeho předehřátí v paralelním bubnu. Podíl přidávaného studeného nebo horkého R-materiálu se řídí místními předpisy.

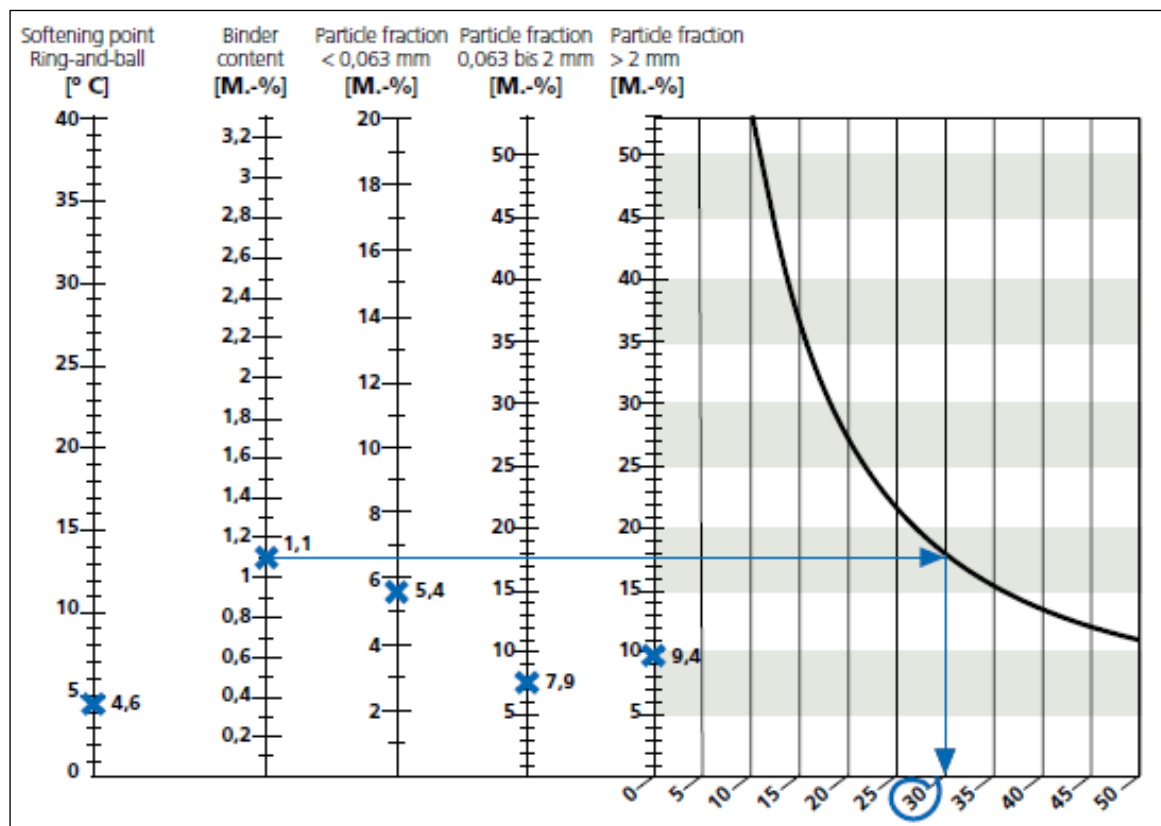
V Německu se za účelem navržení dávkování R-materiálu v asfaltové směsi odebrá ze skládky určitý počet vzorků (obvykle se jedná o 5 vzorků na každých 500 tun). Homogenita skládky se následně určuje podle obsahu pojiva (% hmotnostních), bodu měknutí (°C) a podílů frakcí fileru, drobného a hrubého kameniva o velikosti > 2 mm (% hmotnostních).

Tabulka 1: Výsledky rozboru skládky R-materiálu

Characteristic	Softening point Ring-and-ball ($T_{R\&B}$) [°C]	Binder content [M.-%]	Particle fraction < 0,063 mm [M.-%]	Particle fraction 0,063 mm bis 2 mm [M.-%]	Particle fraction > 2 mm [M.-%]
Sample no. 1	68,6	5,8	9,8	27,7	62,4
Sample no. 2	64,0	5,8	11,3	25,2	63,5
Sample no. 3	64,8	5,2	9,2	19,8	70,9
Sample no. 4	68,0	4,7	6,7	21,5	71,8
Sample no. 5	66,4	5,1	12,1	23,8	64,1
Mean value	66,4	5,3	9,8	23,6	66,5
Range	4,6	1,1	5,4	7,9	9,4

Termíny v obrázku: Charakteristika, bod měknutí ($T_{K\&K}$), obsah pojiva, podíl zrn < 0,063 mm, podíl zrn, 0,063 až 2 mm, podíl zrn > 2 mm, vzorek č. 1, střední hodnota, rozsah

Maximální množství R-materiálu pak závisí na jeho homogenitě a technologickém vybavení obalovny. Nejnížší hodnota z těchto 5 parametrů následně určuje maximální obsah R-materiálu ve směsi (obrázek 1).



Obrázek 1: Určení maximálního dávkování R-materiálu ve směsi

Problematika stárnutí asfaltového pojiva

Stárnutí asfaltového pojiva je způsobeno především účinky tepla, UV zářením a oxidací, které vedou ke zvýšení tuhosti a ztrátě přilnavosti, což má za následek ztrátu hmoty a vznik trhlin v zimním období, a celkově tak vede ke ztrátě životnosti netuhé vozovky.

Působením tepla, vzdušného kyslíku a UV záření se mění chemické složení asfaltového pojiva, tj. snižuje se podíl maltenové fáze a zůstává větší podíl tužších asfaltenů. Asfaltové pojivo se v průběhu své životnosti stává křehkým, méně duktilním a náchylnějším na změny teplot.

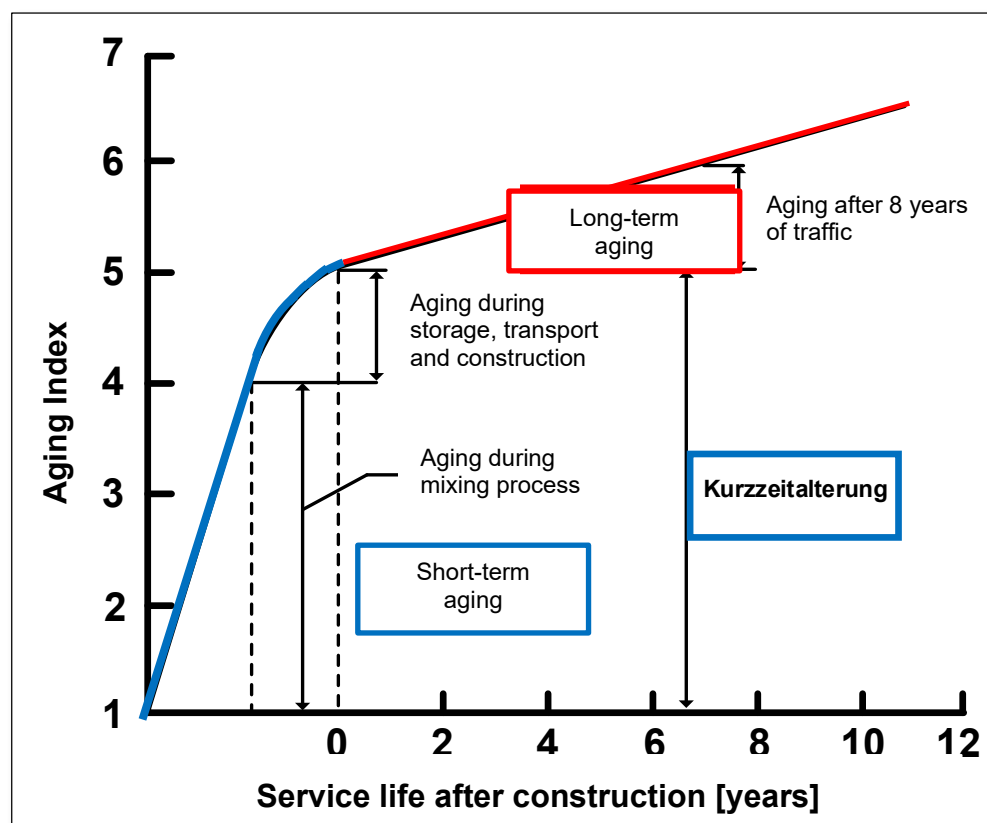


Obrázek 2: Ztráta hmoty



Obrázek 3: Trhlina

Stárnutí asfaltového pojiva probíhá ve dvou fázích: krátkodobé a dlouhodobé. Krátkodobé stárnutí je způsobeno především odpařováním, oxidací a/nebo absorpcí olejových složek a dochází k němu během míchání, přepravy a pokládky směsi. K dlouhodobému stárnutí pojiva dochází během provozu a závisí především na složení asfaltového pojiva, ale také na vnějších vlivech, jako je přísun kyslíku z atmosféry.



Obrázek 4: Krátkodobé a dlouhodobé stárnutí asfaltového pojiva

Termíny v obrázku: Index stárnutí, doba životnosti od výstavby, dlouhodobé stárnutí, zestárnutí po 8 letech provozu, stárnutí během skladování, dopravy a výstavby, stárnutí během výroby, krátkodobé stárnutí

Stárnutí asfaltového pojiva lze simulovat v laboratorních podmínkách: v tlakové nádobě (PAV) pro dlouhodobé stárnutí a při zkoušce tepelné stálosti v tenké pohyblivé vrstvě (RTFOT) krátkodobé stárnutí.

Vyřešení procesu stárnutí asfaltového pojiva: opravdová oživovací přísada oproti změkčující přísadě

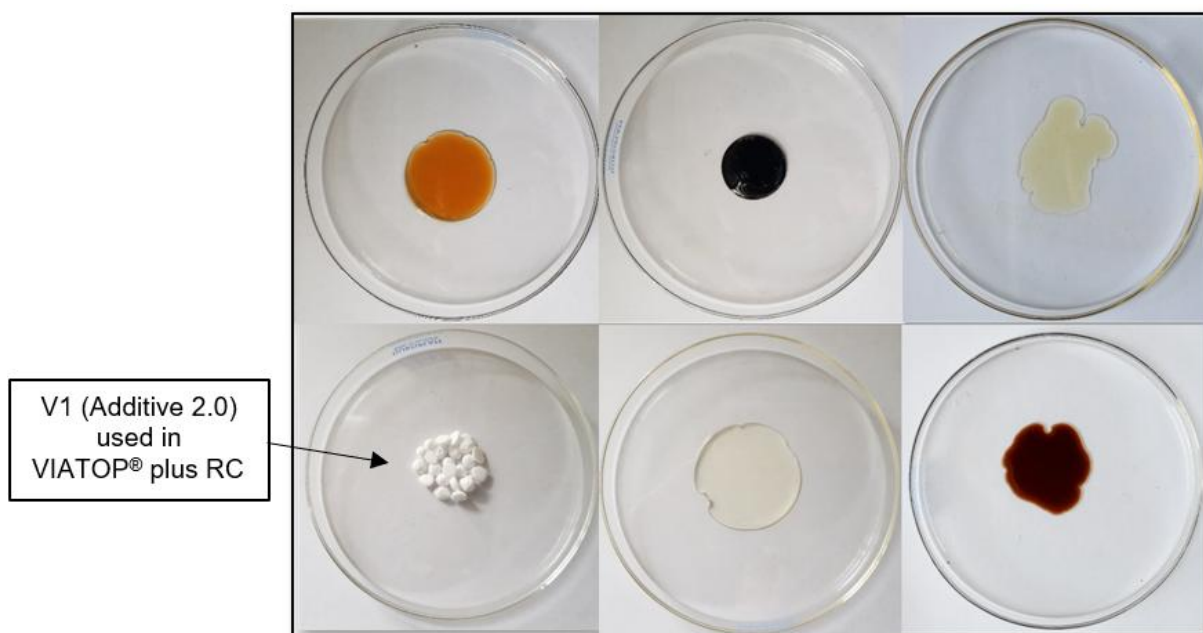
Použití udržitelné a účinné oživovací přísady umožňuje vyřešit problém stárnutí asfaltového pojiva. Opravdová oživovací přísada obnovuje fyzikální a reologické (viskoelastické) vlastnosti zestárleho pojiva, snižuje jeho viskozitu, zlepšuje jeho relaxační, kohezní a adhezní vlastnosti včetně duktility a její použití by nemělo vést k urychlenému stárnutí oživeného asfaltového pojiva.

Změkčovadla, jako je fluxační olej, která jsou často představována jako oživovací přísady, mohou pouze snížit viskozitu zestárleho pojiva. Nedokážou jej však oživit, tj. eliminovat nebo snížit jeho náchylnost na vznik trhlin a zároveň zachovat nebo zlepšit jeho odolnost proti trvalým deformacím. Změkčovadla pouze změkčují, ředí nebo plastifikují zestárlé asfaltové pojivo.

Hledání nového druhu opravdové oživovací přísady nás přivedlo k vývoji nového výrobku **VIATOP® plus RC**, který představuje účinnou kombinaci celulózových vláken a oživovací přísady. Použitím přísady **VIATOP® plus RC** je možné dosáhnout vyššího dávkování R-materiálu na obalovně, která má odpovídající technologické vybavení, a to bez větších investic.

Srovnávací studie účinku různých přísad

V rámci srovnávací studie provedené nezávislou laboratoří bylo zkoumáno celkem šest různých přísad, včetně přísady použité v přísadě **VIATOP® plus RC**, z hlediska jejich oživovacího účinku. Zkoušené přísady jsou zobrazeny na obrázku 5.



Obrázek 5: Přísady použité ve studii

Termíny v obrázku: (přísada 2.0) použitá ve Viatop ® plus RC

Aby bylo možné získat srovnávací základnu pro posouzení účinku jednotlivých přísad, byl pro všechny varianty použit stejný vstupní silniční asfalt gradace 50/70 a zároveň bylo použito stejné množství každé přísady, které odpovídalo 3 % z hmotnosti pojiva.

Pro účely porovnání s těmito šesti přísadami byl také použit řepkový olej v množství 3 % z hmotnosti pojiva a měkký silniční asfalt gradace 160/220 v množství 30 % hmotnosti pojiva.

Nejprve bylo provedeno zkoušení fyzikálních (bod měknutí a penetrace jehlou) a reologických vlastností (komplexní smykový modul a fázový úhel na dynamickém smykovém reometru a chování při nízkých teplotách na průhybovém trámečkovém reometru) na pojivu 50/70 v nezestárlém a zestárlém stavu (krátkodobé stárnutí metodou RTFOT a dlouhodobé stárnutí metodou PAV).

Následně byly do zestárlého vzorku asfaltového pojiva přidány výše uvedené přísady, řepkový olej a pojivo gradace 160/220. Za účelem ověření účinnosti jednotlivých přísad na zestárlé pojivo byly opětovně zkoumány fyzikální a reologické vlastnosti pojiv. Poté byly oživené vzorky podrobeny opakovanému stárnutí a zkoušení, aby se ověřila dlouhodobá účinnost jednotlivých přísad.

K popisu stupně zestárnutí byly použity následující zkratky:

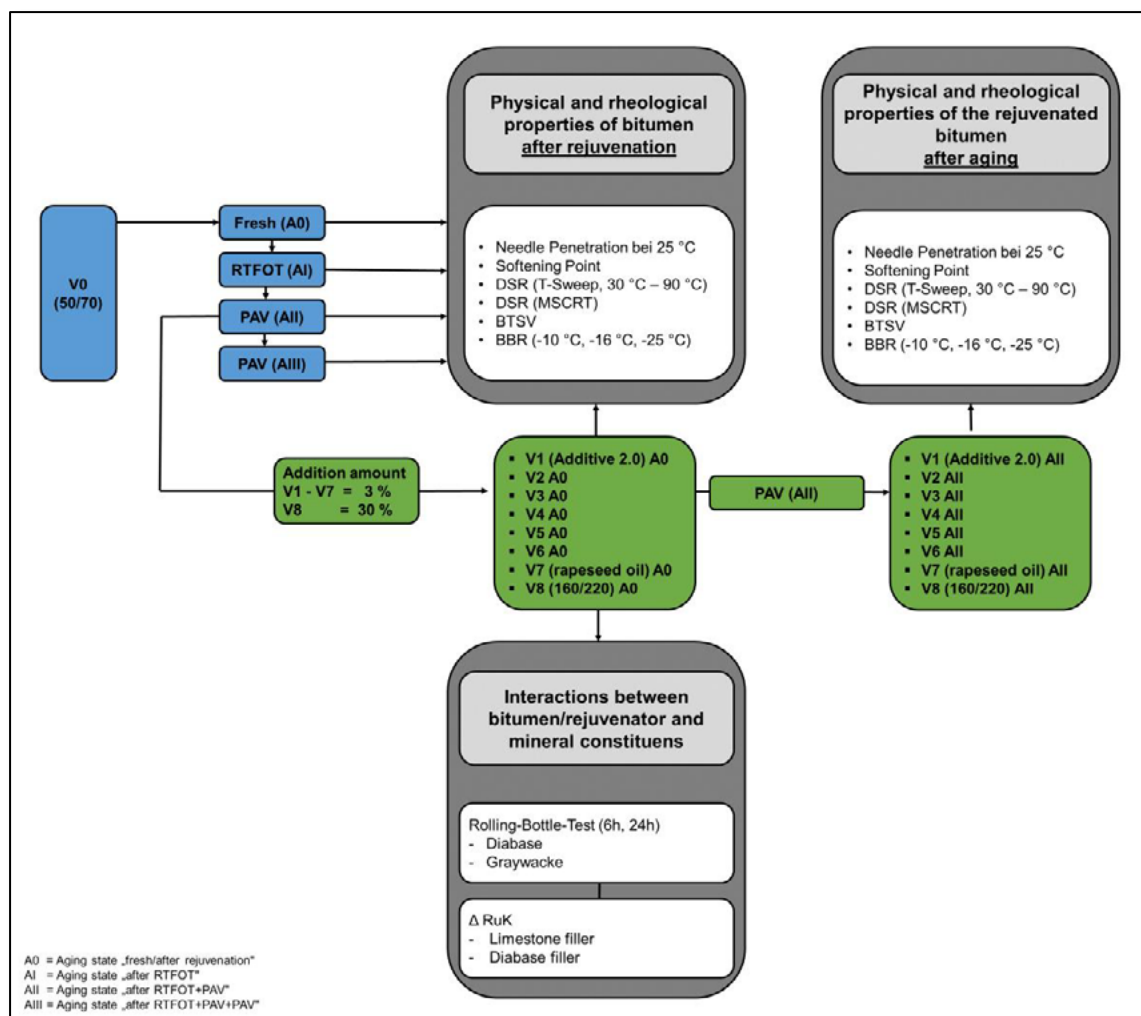
A0 – nezestárlé pojivo nebo pojivo po oživení;

A1 – pojivo po krátkodobém stárnutí (RTFOT);

AII – pojivo po krátkodobém (RTFOT) a dlouhodobém (PAV) stárnutí;

AIII – pojivo po krátkodobém (RTFOT) a dvojnásobně prodlouženém dlouhodobém (PAV) stárnutí.

Zkušební postup je zobrazen na obrázku 6.



Obrázek 6: Zkušební program

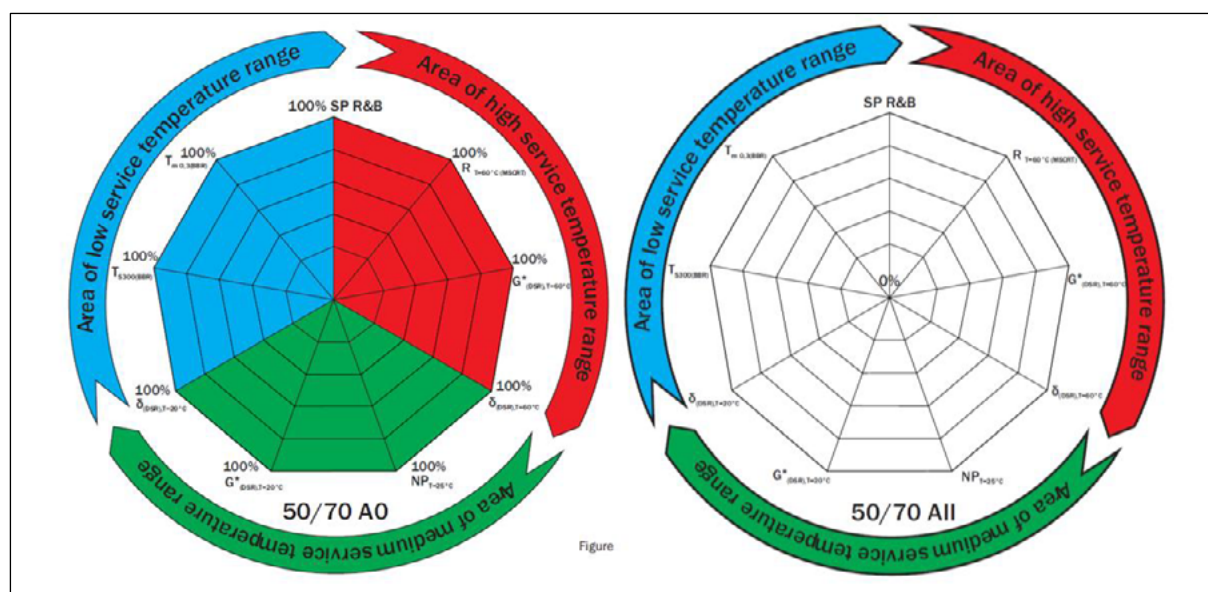
Termíny v obrázku: Fyzikální a reologické vlastnosti pojiva po oživení, fyzikální a reologické vlastnosti pojiva po oživení a následném zestárnutí, nezestárlé, penetrace při 25 °C, bod měknutí, DSR..., množství přísady, řepkový olej, interakce mezi pojivem/oživovací přísadou a minerálním kamenivem, metoda rotující lahve (6 h, 24 h), diabaz, droba, delta kroužek a kulička, vápencový filer, diabasový filer

Pro lepší vizualizaci a porovnatelnost výsledků byly jednotlivé parametry vyneseny do pavoučích diagramů. Parametry pojiva byly rozděleny do tří základních teplotních rozsahů: **vysoký (60 °C)**, **střední (20 °C až 30 °C)** a **nízký (-10 °C až -25 °C)**.

Výsledky ukazují na kolik procent se obnovily fyzikální a reologické vlastnosti zestárlého vstupního pojiva po oživení ve vztahu k pojivu gradace 50/70 v nezestárlém stavu. Diagramy také ukazují účinnost jednotlivých přísad v rámci určitého teplotního rozsahu na základě velikosti barevné plochy (větší barevná plocha = vyšší účinnost).

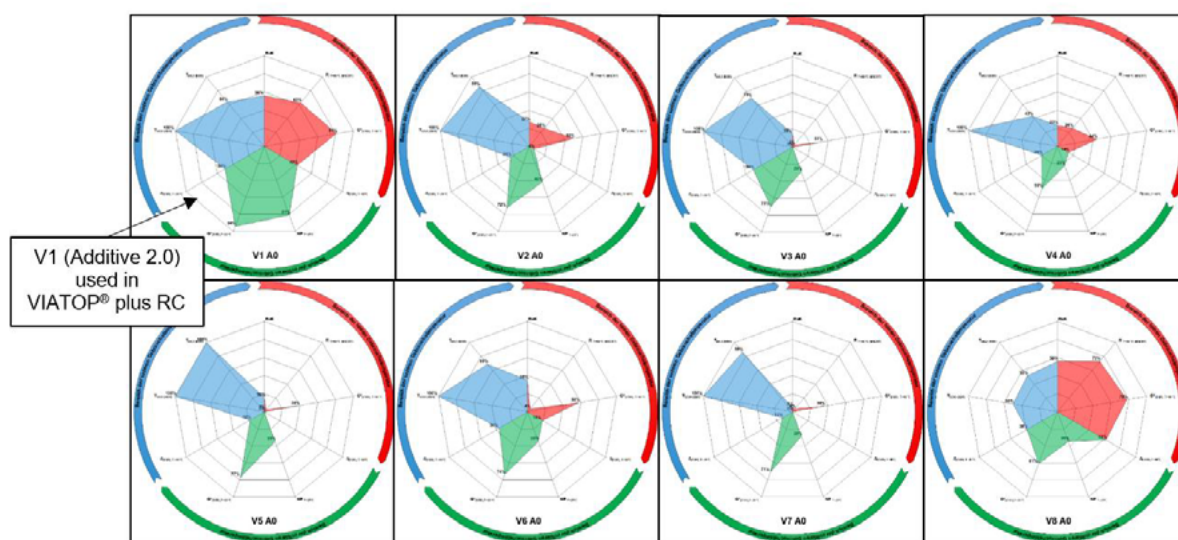
V tomto případě 100 % znamená úplné obnovení původní hodnoty nebo dokonce její zlepšení oživující přísadou.

Na obrázku 7 je uveden příklad pavoučího diagramu pro nezestárlé vstupní pojivo gradace 50/70 (A0) ve srovnání s jeho zestárlým stavem (AII). Obrázek 8 zobrazuje hodnoty dosažené všemi oživovacími přísadami, včetně té, která je použita v přípravku **VIATOP® plus RC (V1)**.



Obrázek 7: Nezestárlé vstupní pojivo gradace 50/70 (A0) oproti zestárlému vstupnímu pojivu gradace 50/70 (All)

Termíny v obrázku: Oblast pro nízkou provozní teplotu, oblast pro vysokou provozní teplotu, oblast pro střední provozní teplotu



Obrázek 8: Obnovení vlastností po oživení zestárlého pojiva gradace 50/70 (All)

Aby mohla být oživovací přísada označena jako účinná, musí obnovit charakteristické vlastnosti nezestárlého pojiva v celém teplotním rozsahu. Oživovací přísada V1 z **VIATOP® plus RC** a měkký silniční asfalt 160/220 (V8), který se přidává v množství 30 % z. hm., vedou k nejvyššímu obnovení fyzikálních a reologických vlastností s nejrovnoměrnějšími výsledky ve všech třech teplotních rozsazích.

Závěr

Výsledky studie jasně ukazují, že nestačí pouze posoudit parametry asfaltového pojiva bezprostředně po přidání oživovací přísady. Spíše je nutné posoudit vlastnosti oživeného pojiva také po opakovaném stárnutí. Oživovací přísadu lze považovat za udržitelnou a účinnou pouze tehdy, pokud oživené pojivo vykazuje výrazně lepší hodnoty než silniční vstupní asfalt při srovnatelné úrovni stárnutí.

Oživovací přísada nesmí v žádném případě urychlit proces stárnutí asfaltového pojiva tak, aby původní vstupní pojivo (bez oživovací přísady) vykazovalo po stárnutí podobné nebo lepší výsledky ve srovnání s oživeným pojivem ve stejném stavu zestárnutí. V této souvislosti hrají významnou roli pojmy udržitelnost a účinnost oživovací přísady.

Studie prokázala, že přísada použitá ve výrobku **VIATOP® plus RC** poskytuje skutečný oživující účinek na zestárnuté asfaltové pojivo. Výrazně zlepšuje jeho fyzikální a reologické vlastnosti. Přísada zestárlé pojivo pouze nezměkčuje, ale znovu jej aktivuje. Kromě zjevného oživujícího účinku studie také prokázala, že oživovací přísada dokáže do určité míry zabránit dalšímu stárnutí pojiva.

Použití oživovacích přísad ke zlepšení vlastností asfaltových vozovek je účinný a ekonomický způsob recyklace asfaltových směsí. VIATOP® plus RC obsahuje skutečnou oživovací přísadu, která umožňuje vyšší dávkování R-materiálu na obalovnách s odpovídajícím technickým vybavením. Ve formě pelet se s přísadou snadno manipuluje pomocí dostupného dávkovacího zařízení. Přísada neobsahuje žádné nebezpečné látky.

VIATOP® plus RC je řešení, které spojuje ekonomické a ekologické aspekty výroby asfaltových směsí.

Zdroje:

- [1] Gogolin D., Lümkmann, T. Effectiveness and Performance of Rejuvenators, Part 3: Laboratory Tests. Asphalt 2019, Vol. 2

UNLOCKING THE FULL POTENTIAL OF RAP

CESTA K MAXIMÁLNÍMU VYUŽITÍ R-MATERIÁLU

Samir Irzayev, B.Sc., J. Rettenmaier & Söhne GmbH + Co KG, Holzmühle, Germany

In times of rising cost pressure paired with a growing concern for the environment, the high-quality recycling of reclaimed asphalt (RAP) provides an ideal opportunity for combining these two aspects without any compromises in terms of quality or durability of asphalt pavements. In order to achieve the highest possible level of added value, ideally, a higher percentage of RAP derived from asphalt surface layer material with high-grade mineral aggregates and binders should be re-used in new asphalt pavement.

V době rostoucího tlaku na náklady a zájmu o životní prostředí představuje vysoce kvalitní recyklace znovuzískaných asfaltových směsí (R-materiálu) ideální příležitost, jak tyto dva aspekty spojit bez jakýchkoli kompromisů, pokud jde o kvalitu nebo trvanlivost asfaltových vozovek. Aby bylo dosaženo co nejvyšší úrovně přidané hodnoty, měl by být v ideálním případě použit vyšší podíl R-materiálu pocházející z krytových vrstev asfaltových vozovek. Tento R-materiál obsahuje vysoce kvalitní minerální kamenivo a pojivo a měl by být opětovně použit v novém asfaltovém krytu

Asphalt recycling: recovery, treatment and addition of RAP

Whereas „recycling“ stands for the preparation and treatment of materials or products to something new, „reuse“ is defined as a repeated use of materials or products for the same application purpose.

So, for its further reuse RAP can be recovered by breaking and lifting up layer packages of asphalt in slabs (demolition asphalt) or by milling off layerwise to a certain thickness (milled asphalt). The treatment of RAP at mixing plants takes place in form of crushing, granulating and sieving. Different RAP types are stored separately from each other and should be covered with foil. The addition of cold RAP can be fulfilled batchwise or continuously, RAP can also be added hot after pre-heating in parallel drums. The portion of added cold or hot RAP depends on local regulation.

In Germany, in order to analyse the RAP content, a defined number of samples is taken from stockpiles, usually 5 samples from every 500 tons. The homogeneity is then determined by bitumen content (% by weight), softening point ring and ball (°C) and particle fractions of filler, sand and coarse aggregates of >2mm (% by weight).

Table 1: RAP content analysis

Characteristic	Softening point Ring-and-ball (T _{R&B}) [°C]	Binder content [M.-%]	Particle fraction < 0,063 mm [M.-%]	Particle fraction 0,063 mm bis 2 mm [M.-%]	Particle fraction > 2 mm [M.-%]
Sample no. 1	68,6	5,8	9,8	27,7	62,4
Sample no. 2	64,0	5,8	11,3	25,2	63,5
Sample no. 3	64,8	5,2	9,2	19,8	70,9
Sample no. 4	68,0	4,7	6,7	21,5	71,8
Sample no. 5	66,4	5,1	12,1	23,8	64,1
Mean value	66,4	5,3	9,8	23,6	66,5
Range	4,6	1,1	5,4	7,9	9,4

The maximum amount of RAP is based on its homogeneity and the technical setup of the mixing plant. However, the lowest value out of these 5 parameters determines the maximum RAP content (see Figure 1).

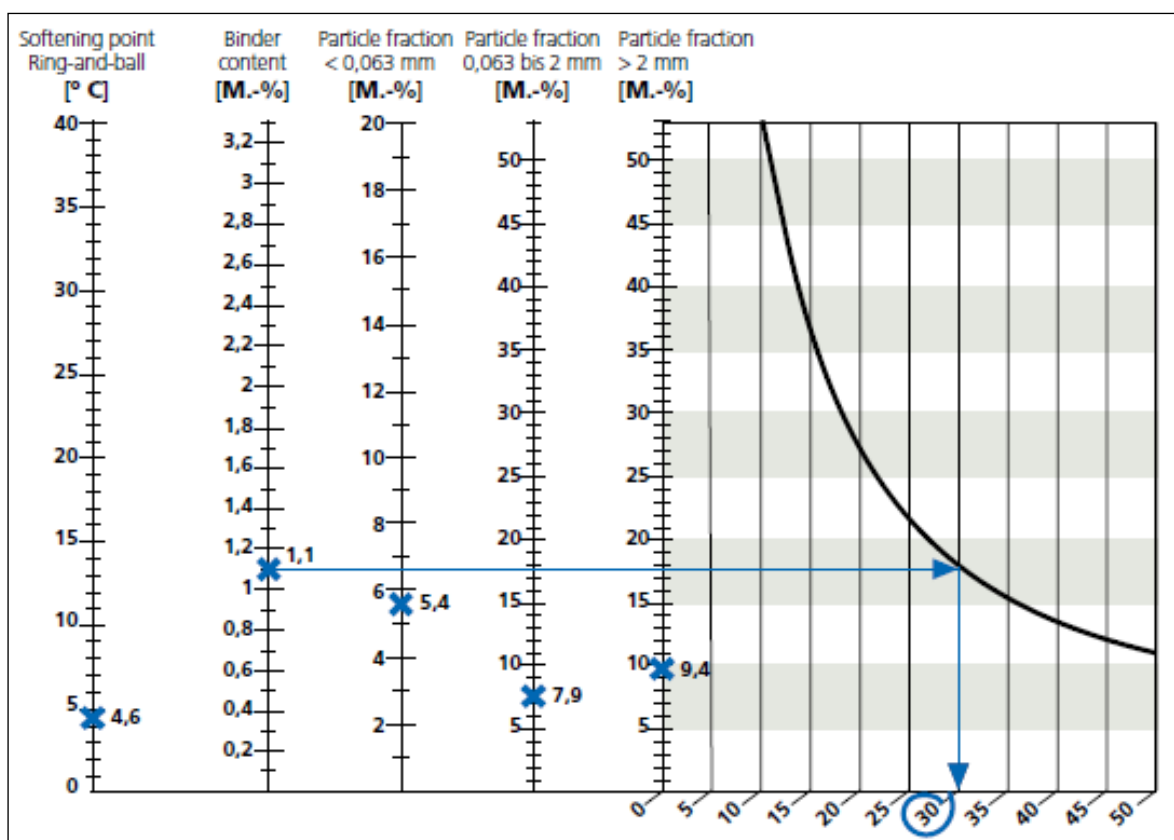


Figure 1: Determination of maximum RAP content

Problem of bitumen aging

Bitumen aging is primarily caused by heat, UV and oxidation, which all lead to increased stiffness and loss of adhesion, resulting in ravelling and thermal cracking in winter periods and, therefore, shortening the total service life of the asphalt pavement.

The exposure to heat, air oxygen and UV changes the chemical composition of the bitumen, that is reducing its oily maltenes phase with remaining greater ratio of stiffer asphaltenes. The bitumen becomes over its lifetime brittle, less ductile and more susceptible to temperature variations.



Figure 2: Ravelling



Figure 3: Cracking

Asphalt aging occurs in two stages: short-term and long-term. Short-term aging is mainly caused by volatilization, oxidation, and/or absorption of oily components and happens during mixing, transport and paving. Long-term aging occurs during service life and depends mainly on the composition of asphalt as well as on external influence such as oxygen from the atmosphere.

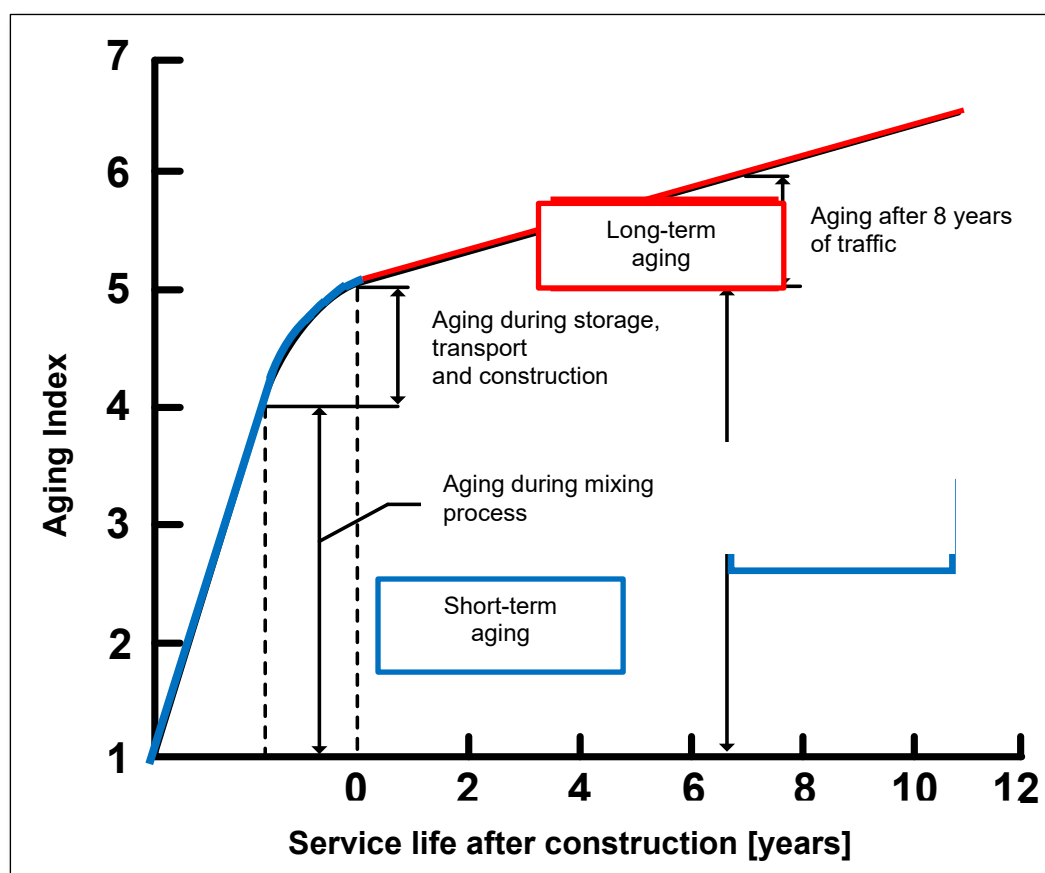


Figure 4: Short-term and long-term aging of bitumen

The bitumen aging can be simulated in lab conditions: in Pressure-Aging-Vessel (PAV) for a long-term aging and during Rolling-Thin-Film-Oven-Test (RTFOT) for a short-term aging.

Overcoming bitumen aging: real rejuvenator vs. softening agents

The usage of a sustainable and effective rejuvenator allows to solve the issue of bitumen aging. A real rejuvenator restores physical and rheological (viscoelastic) properties of an aged bitumen, reduces its overall viscosity, improves its relaxation, ductility, cohesive and adhesive properties and should not lead to the accelerated aging of a rejuvenated bitumen.

Softening agents such as flux oil, which are frequently positioned as rejuvenators, can only lower the viscosity of an aged bitumen. They are unable to re-activate it, to eliminate or reduce its exposure to cracking and to maintain or improve its rutting resistance. Softening agents only soften, dilute or plasticize the aged bitumen.

Search for a new kind of real rejuvenator led us to the development of a new product **VIATOP® plus RC**, an effective combination of cellulose fibers and rejuvenator. By using **VIATOP® plus RC**, a higher dosage of RAP is possible at mixing plants with adequate technical setup without major investments.

Comparative study on effect of various additives

In course of a comparative study performed by an independent laboratory, a total of six different additives, including the additive used in **VIATOP® plus RC**, were examined with regard to their rejuvenation effect. The additives studied are shown in Figure 5.

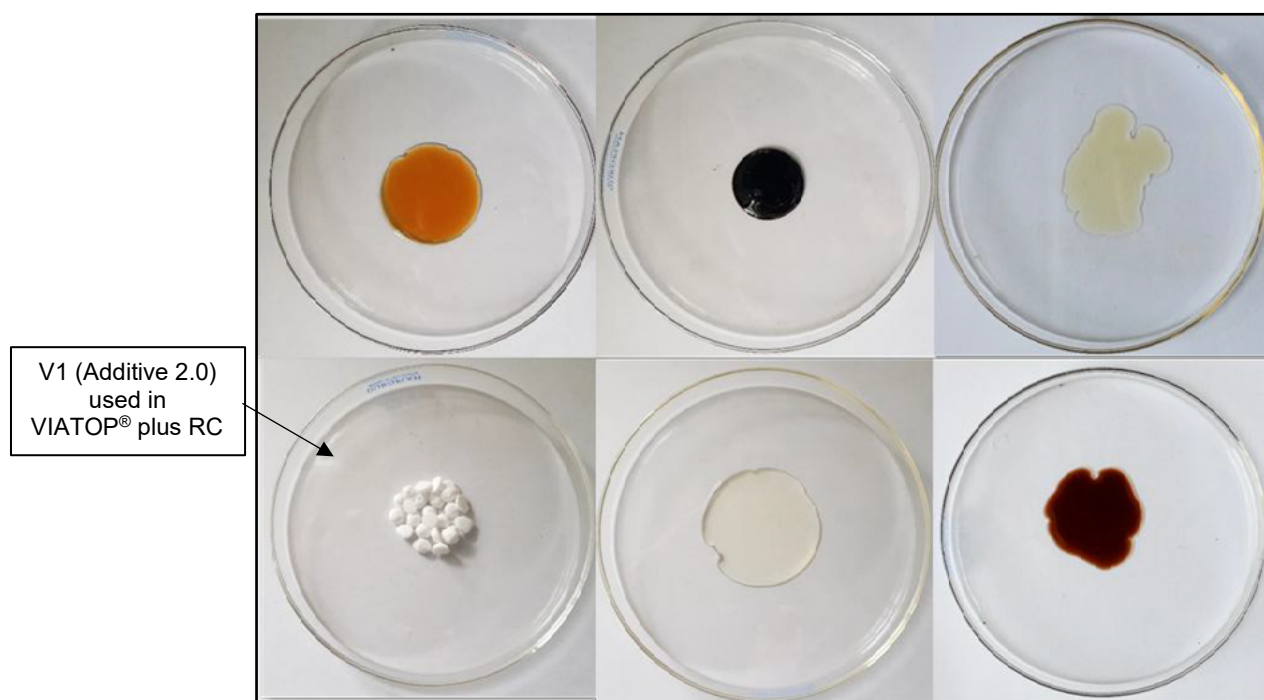


Figure 5: Additives for study

In order to obtain a comparative basis for assessment of their individual effect, the same road construction bitumen 50/70 was used for all variants and a constant quantity of 3% by weight of each additive was applied.

Rapeseed oil at the quantity of 3% by weight and soft road construction bitumen 160/220 at a rate of 30% by weight were also used for direct comparison to six additives.

Firstly, a testing of the physical (*softening point ring and ball, needle penetration*) and rheological properties (*complex shear modulus and phase angle* on Dynamic Shear Rheometer as well as *behavior at low temperatures* on Bending Beam Rheometer) was performed on a bitumen 50/70 in the “virgin” and aged (short-term aging RTFOT and long-term aging PAV) condition.

Afterwards, the above-mentioned additives, rapeseed oil and bitumen 160/220 were added to the aged bitumen samples. In order to test the effectiveness of each additive on aged bitumen, physical and rheological properties of the samples were examined again. Then, the rejuvenated samples underwent repeated aging and testing to check the long-term effectiveness of each additive.

The following indications were used to identify the aging stages:

- A0: fresh / “virgin” condition, also after rejuvenation
- A1: after short-term aging (RTFOT)
- AII: after short-term (RTFOT) and long-term aging (PAV)
- AIII: after short-term (RTFOT) and twice long-term aging (PAV)

The testing procedure is shown as a flow chart in Figure 6:

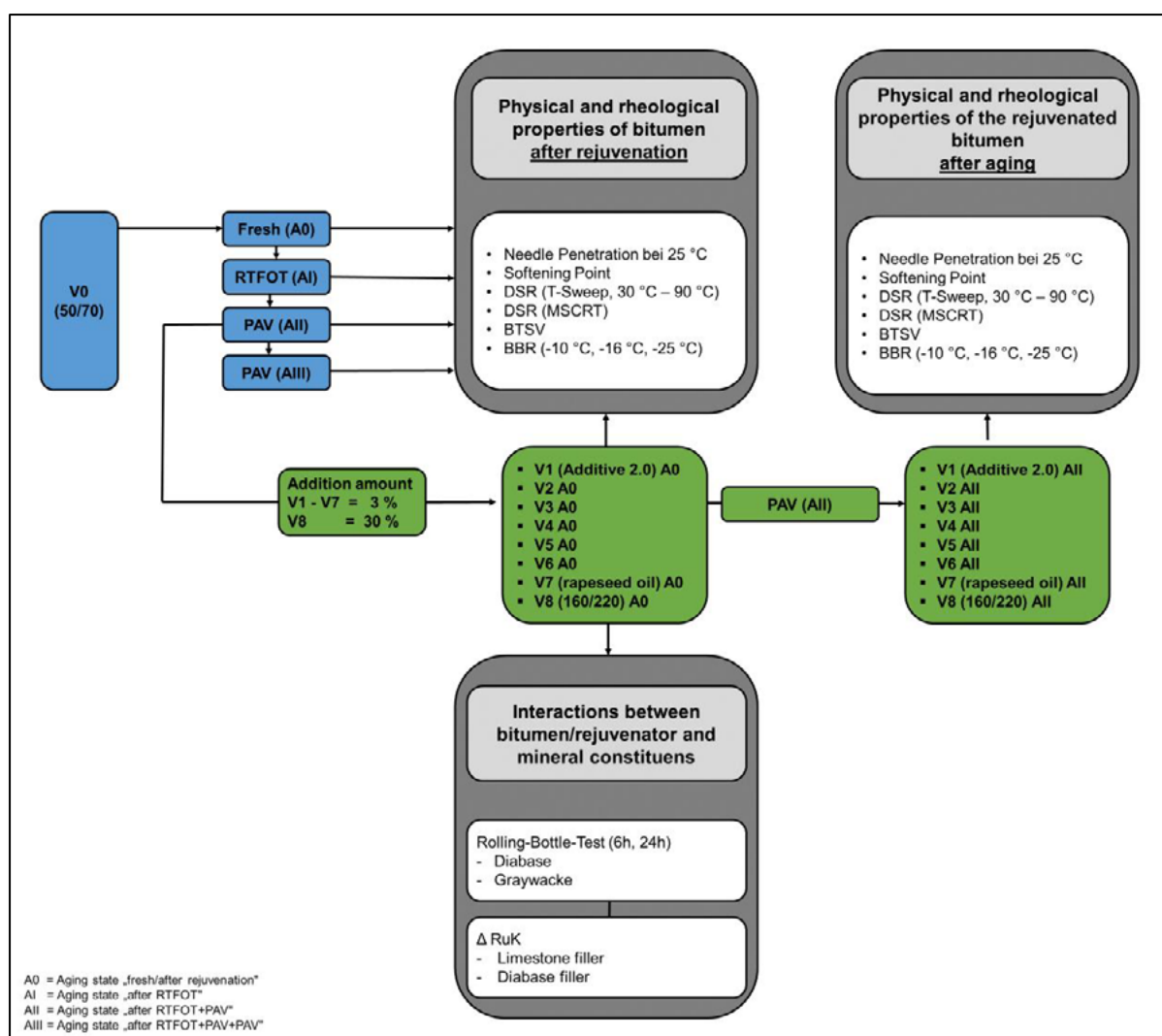


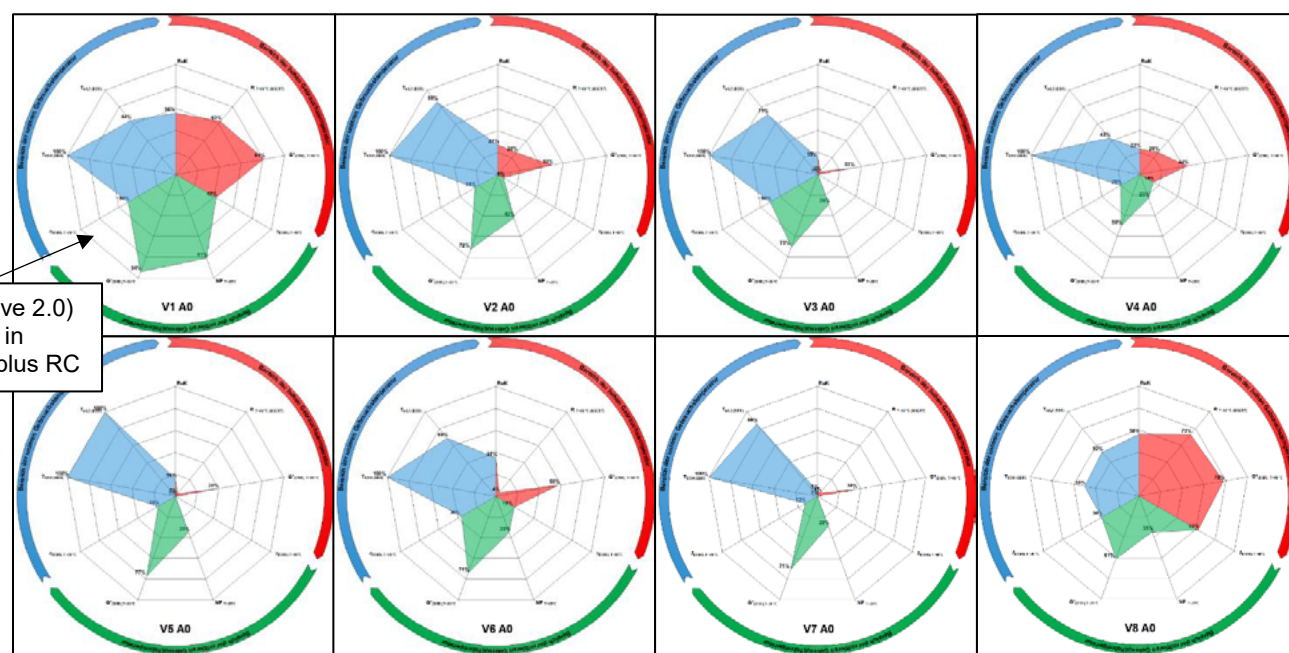
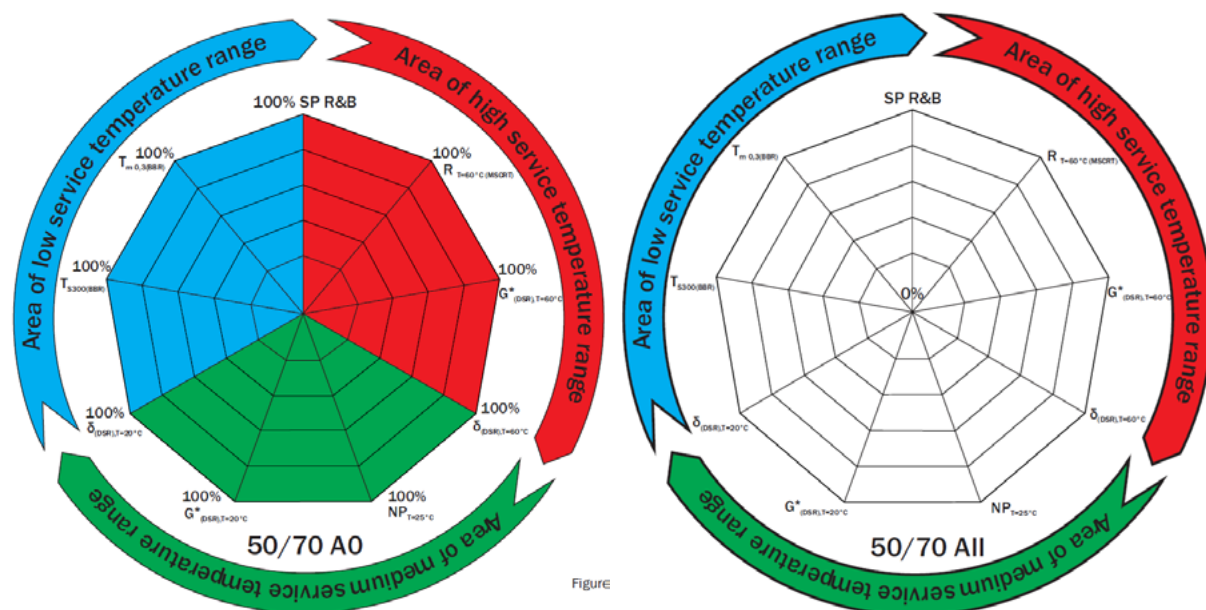
Figure 6: Testing program

For a better visualization and comparability of the results, the parameters were plotted on spider diagrams. The bitumen parameters were subdivided into three basic temperature ranges: **high (60°C)**, **medium (20°C to 30°C)** and **low (-10°C to -25°C)**.

The results show the percentage, to which the physical and rheological properties of the aged base bitumen were restored after rejuvenation in relation to base bitumen 50/70 in the „virgin“ condition. They also indicate the effectiveness of an individual product within the specific temperature range based on the size of the colored area (larger colored area = higher effectiveness).

100% stands for a complete restoration of the value or even its improvement by the rejuvenating agent.

The following Figure 7 provides an example of the spider diagram for a fresh base bitumen 50/70 (A0) compared to its aged state (AII). Figure 8 compares the values achieved by all rejuvenating additives, including the one used in **VIATOP® plus RC (V1)**.



In order for a rejuvenator to be classified as effective, it must restore the characteristic values of the fresh bitumen over the entire temperature range. The rejuvenator V1 from **VIATOP® plus RC** and soft road construction bitumen 160/220 (V8), which is added at a rate of 30% by weight, both lead to the highest restoration of the physical and rheological properties with the most uniform results over all three temperature ranges.

Conclusion

The results of the study make it clear that it is not enough to simply assess the bitumen parameters directly after the addition of a rejuvenator. Rather it is necessary to also assess the properties of the rejuvenated bitumen after repeated aging as well. A rejuvenator can be considered as sustainable and effective only if it exhibits significantly better values than the base bitumen at the comparable aging level.

By any means, a rejuvenator must not accelerate the aging process of the bitumen in a way, so that the original bitumen (without rejuvenator) shows similar or better results after aging, compared to a rejuvenated bitumen of the same „aging status“. In this context, the terms sustainability and effectiveness of a rejuvenator play a major role.

The study demonstrated that the additive used in our product **VIATOP® plus RC** provides a real rejuvenation effect on aged bitumen. It significantly improves its physical and rheological properties. The additive does not simply soften or plasticize the aged bitumen, but re-activates it. In addition to the apparent rejuvenating effect, the study has proven that the rejuvenator is able to prevent further aging of the binder to a certain extent.

Using rejuvenators to improve the performance of asphalt pavement is an effective and economic way of hot asphalt recycling. **VIATOP® plus RC** contains a real rejuvenator, allowing a higher dosage of RAP at mixing plants with adequate technical setup. In the pelletized form it is easy to handle with the available dosing technology and it contains no hazardous substances.

VIATOP® plus RC is the solution, which combines economic and environmental aspects of asphalt production.

Sources:

- [1] „Effectiveness and Performance of Rejuvenators, Part 3: Laboratory Tests“ by Dr.-Ing. Daniel Gogolin and Tim Lümke, B.Sc. (asphalt, Volume 2/2019)

VYUŽITÍ ODPADNÍCH ASFALTOVÝCH IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ PŘI VÝROBĚ ASFALTOVÝCH SMĚSÍ

USE OF WASTE INSULATING ASPHALT MATERIALS IN THE PRODUCTION OF ASPHALT MIXTURES

Ing. Zdeněk Hegr, Skanska Asphalt s.r.o.

doc. Ing. Petr Hýzl, Ph.D., doc. Ing. Ondřej Dašek, Ph.D., Vysoké učení technické v Brně,
Fakulta stavební

Mgr. Tomáš Chudárek, Recovera Využití zdrojů a.s.

Cílem příspěvku je představit náplň a první výsledky výzkumného projektu Technologické agentury ČR č. CL01000187 s názvem „Materiálové využití odpadních asfaltových izolačních materiálů při výrobě asfaltových směsí“, jehož řešiteli jsou společnosti Skanska Asphalt s.r.o., Recovera Využití zdrojů a.s., Skanska a.s. a Vysoké učení technické v Brně. Cílem tohoto projektu je vývoj asfaltových směsí, u kterých část asfaltového pojiva v nich obsaženého bude nahrazena alternativními asfaltovými pojivy z odpadních asfaltových izolačních materiálů za účelem snížení využití nových asfaltových pojiv a snížení uhlíkové stopy nově vyráběných asfaltových směsí až o 30 %.

The aim of the paper is to present the content and first results of the research project of the Technology Agency of the Czech Republic No. CL01000187 entitled "Material use of waste insulating asphalt materials in the production of asphalt mixtures", the researchers of which are Skanska Asphalt s.r.o., Recovera Využití zdrojů a.s., Skanska a.s. and Brno University of Technology. The aim of this project is to develop asphalt mixtures in which part of the asphalt binder contained in them will be replaced with alternative asphalt binders from waste asphalt insulation materials in order to reduce the use of new asphalt binders and reduce the carbon footprint of newly produced asphalt mixtures by up to 30 %.

Úvod

Produkce asfaltových směsí v České republice každoročně přesahuje 6 mil. tun. Tato produkce představuje nemalou zátěž pro životní prostředí v podobě spotřeby přírodních materiálů a emise skleníkových plynů (uhlíkové stopy). Jednou z možných cest ke snížení zátěže životního prostředí při výrobě asfaltových směsí je využívání recyklovaných materiálů. V České republice se v minulých letech v této oblasti podařil výrazný krok vpřed díky legislativnímu umožnění dávkování vysokých podílů R-materiálu při výrobě asfaltových směsí. Je však třeba hledat i další cesty ke snížení zátěže životního prostředí. Autoři příspěvku další možnou cestu spatřují ve vývoji asfaltových směsí, u kterých část asfaltového pojiva v nich obsaženého bude nahrazena alternativními asfaltovými pojivy z odpadních asfaltových izolačních materiálů. Problematika je řešena v rámci výzkumného projektu Technologické agentury ČR č. CL01000187 s názvem „Materiálové využití odpadních asfaltových izolačních materiálů při výrobě asfaltových směsí“, jehož řešitelský tým tvoří zástupci firem Skanska Asphalt s.r.o., Recovera Využití zdrojů a.s., Skanska a.s. a Vysokého učení technického v Brně.

Smyslem projektu je částečná náhrada čerstvého asfaltového pojiva vstupujícího do procesu výroby asfaltových směsí, čímž dojde k šetření přírodních zdrojů a zároveň ke snížení uhlíkové stopy při výrobě asfaltových směsí. Odpadní asfaltové izolační materiály totiž v sobě obsahují z cca 50 % asfaltové pojivo. Díky jejich použití tak dojde ke snížení spotřeby dávkování nového „virgin“ pojiva v rozsahu až cca 30 %. K obdobnému efektu dojde v menší míře i v případě drobného drceného kameniva.

Stav řešení

Řešení výzkumného projektu je plánováno na období od ledna 2024 do června 2026. První klíčovou činností bylo v roce 2024 zajištění vzorků odpadních asfaltových izolačních materiálů. Již v rámci návrhu tohoto projektu byly osloveny společnosti Charvát a SIKA, jakožto výrobci asfaltových izolačních pásů, ale zároveň také původci odpadních asfaltových izolačních materiálů.

Obě zmíněné společnosti poskytly řešitelskému týmu vedle vzorků materiálů vstupujících do výrobního procesu asfaltových izolačních materiálů také dostatečné množství odpadních asfaltových izolačních materiálů z výroby. Jednalo se prakticky o 4 různé vzorky, které však z velké části pokrývají výrobní sortiment, a tedy i potenciální odpadní materiál jako zdroj k dalšímu využití na obalovnách asfaltových směsí.

Tyto vzorky byly následně distribuovány k dalšímu zkoumání do laboratoří řešitelského týmu a do společnosti Recovera Využití zdrojů a.s., která se mimo jiné zabývala možnostmi úpravy dodaných vzorků odpadních asfaltových izolačních materiálů na recyklačních linkách na frakci materiálu použitelného pro výrobu asfaltových směsí.

Zkoušky pojiv vstupujících do procesu výroby asfaltových izolačních materiálů

V silniční laboratoři VUT v Brně byly provedeny základní empirické zkoušky asfaltových pojiv vstupujících do procesu výroby asfaltových izolačních materiálů. Konkrétně se jednalo o stanovení penetrace jehlou podle normy ČSN EN 1426 a stanovení bodu měknutí metodou kroužek-kulička dle ČSN EN 1427. Jednalo se o vzorky pojiv označených 95/35, 160/220 a pojivo s označením SIKA Speciál. U běžně dostupných pojiv 95/35 a 160/220 byly potvrzeny požadované vlastnosti. Jako velmi zajímavé se pak jeví pojivo „SIKA Speciál“, které dosahovalo velmi vysokých hodnot bodu měknutí (nad 122 °C) při penetracích kolem 44 penetračních jednotek.

Z výše uvedených parametrů tohoto pojiva vyplývá, že stupeň modifikace tohoto pojiva (obsah polymerní přísady) je výrazně vyšší než u asfaltových pojiv, která jsou běžně používána v ČR pro výrobu asfaltových směsí. Tato skutečnost se jeví jako velmi výhodná pro jejich následné využití pro výrobu asfaltových směsí, a to primárně s ohledem na možnost pozitivního ovlivnění výsledných parametrů asfaltové směsi.

Zkoušky zpětně získaných pojiv z odpadních asfaltových izolačních pásů

Ve druhé fázi řešení projektu bylo snahou získat ze vzorků pásů v nich obsažené asfaltové pojivo tak, jak by tomu bylo reálně na obalovně při výrobě asfaltové směsi. Vzorek pásu byl v laboratorní sušárně nahřát na teplotu 180 °C (max. 200 °C) s cílem získat vzorek ztečeného pojiva. Ve všech případech však bylo nutné (vzhledem k přítomnosti posypového kameniva a silné modifikaci pojiva) provést následné mechanické „oškrábání“ neztečené části asfaltového pojiva. Na takto získaných pojivech bylo opět provedeno stanovení penetrace jehlou dle ČSN EN 1426 a stanovení bodu měknutí metodou kroužek-kulička dle ČSN EN 1427. Dále bylo v dynamickém smykovém reometru provedeno stanovení jejich reologických vlastností.

Vzorek pásu č. 1

Jde o vzorek asfaltového izolačního pásu, který je opatřen hrubým posypem. Vzorek pásu v nerezové misce sloužící pro zachycení pojiva je uveden na obrázku 1.



Obrázek 1: Detail vzorku pásu č. 1

Níže v tabulce 1 jsou uvedeny výsledky empirických zkoušek asfaltového pojiva zpětně získaného ztečením a mechanickým oškrábáním ze vzorku izolačního pásu.

Tabulka 1: Výsledky stanovení penetrace a bodu měknutí – vzorek 1 – zpětně získané pojivo

	Stanovení penetrace dle ČSN EN 1426 (0,1 mm)	Stanovení bodu měknutí dle ČSN EN 1427 (°C)
Vzorek 1	60,1	118,0
	61,0	119,0
	Ø 60,6	Ø 118,5

Vzhledem k tomu, že při zkoušce stanovení bodu měknutí metodou kroužek-kulička došlo k protržení váčku pojiva a vypadnutí kuličky, bylo nutné upravit následný postup. Vypadnutí kuličky bylo způsobeno tím, že zpětně získané pojivo nebylo homogenního charakteru jako v případě běžných asfaltových pojiv používaných pro výrobu asfaltových směsí. Získané pojivo obsahovalo až z poloviny své hmotnosti zrna posypu a jeho konzistence byla charakteru plastické hmoty. Na základě této skutečnosti bylo pro získání vlastností samotného zpětně získaného asfaltového pojiva z pásu použito rozpouštědlo (perchloretylen). Níže v tabulce 2 jsou uvedeny výsledky empirických zkoušek asfaltového pojiva zpětně získaného pomocí rozpouštědla.

Tabulka 2: Výsledky stanovení penetrace a bodu měknutí – vzorek 1 – zpětně získané pojivo rozpouštědlem

	Stanovení penetrace dle ČSN EN 1426 (0,1 mm)	Stanovení bodu měknutí dle ČSN EN 1427 (°C)
Vzorek 1	44,5	113,0
	44,8	114,0
	Ø 44,7	Ø 113,5

Výsledky bodu měknutí jsou velmi obdobné. Rozdíl v hodnotě penetrace na úrovni cca 15 penetračních jednotek byl s největší pravděpodobností ovlivněn rozpuštěním ochranné (lepící) fólie rozpouštědlem.

Vzorek pásu č. 2

Jde o vzorek asfaltového izolačního pásu, který je opatřen jemným posypem kamenivem. Vzorek pásu v nerezové misce sloužící pro zachycení pojiva je uveden na obrázku 2.



Obrázek 2: Detail vzorku pásu č. 2

Níže v tabulce 3 jsou uvedeny výsledky empirických zkoušek asfaltového pojiva zpětně získaného ztečením a mechanickým oškrábáním ze vzorku izolačního pásu.

Tabulka 3: Výsledky stanovení penetrace a bodu měknutí – vzorek 2 – zpětně získané pojivo

	Stanovení penetrace dle ČSN EN 1426 (0,1 mm)	Stanovení bodu měknutí dle ČSN EN 1427 (°C)
Vzorek 2	31,0	107,3
	33,0	108,6
	Ø 32,0	Ø 108,0

Na základě výše uvedených výsledků lze konstatovat, že jde o tvrdší a vysoce modifikované asfaltové pojivo.

Vzorek pásu č. 3

Jde o vzorek asfaltového izolačního pásu, na kterém je pouze malé množství posypu kamenivem oproti ostatním vzorkům. Vzorek pásu v nerezové misce sloužící pro zachycení pojiva je uveden na obrázku 3.



Obrázek 3: Detail vzorku pásu č. 3

Níže v tabulce 4 jsou uvedeny výsledky empirických zkoušek asfaltového pojiva zpětně získaného ztečením a mechanickým oškrábáním ze vzorku izolačního pásu.

Tabulka 4: Výsledky stanovení penetrace a bodu měknutí – vzorek 3 – zpětně získané pojivo

	Stanovení penetrace dle ČSN EN 1426 (0,1 mm)	Stanovení bodu měknutí dle ČSN EN 1427 (°C)
Vzorek 3	15,5	114,6
	15,3	115,2
	Ø 15,4	Ø 114,9

Na základě výše uvedených výsledků lze konstatovat, že jde o tvrdé a vysoce modifikované asfaltové pojivo.

Vzorek pásu č. 4

Jde o vzorek asfaltového izolačního pásu, který lze charakterizovat jako odpad z výroby asfaltových šindelů. Na vzorku je vysoké množství posypu kamenivem. Vzorek pásu je uveden na obrázku 4.



Obrázek 4: Detail vzorku pásu č. 4 – odpad z výroby

U tohoto vzorku v podstatě nebylo možno běžným zahřátím a následným mechanickým oškrábáním získat vzorek pojiva použitelný pro stanovení penetrace, teploty bodu měknutí a následných reologických vlastností. Obdobně jako v případě vzorku č. 1 bylo přistoupeno k získání pojiva opět pomocí rozpouštědla – perchlorylenu. Níže v tabulce 5 jsou uvedeny výsledky empirických zkoušek asfaltového pojiva zpětně získaného pomocí rozpouštědla.

Tabulka 5: Výsledky stanovení penetrace a bodu měknutí – vzorek 1 – zpětně získané pojivo rozpouštědlem

	Stanovení penetrace dle ČSN EN 1426 (0,1 mm)	Stanovení bodu měknutí dle ČSN EN 1427 (°C)
Vzorek 4	23,0	109,6
	22,6	110,8
	Ø 22,8	Ø 110,2

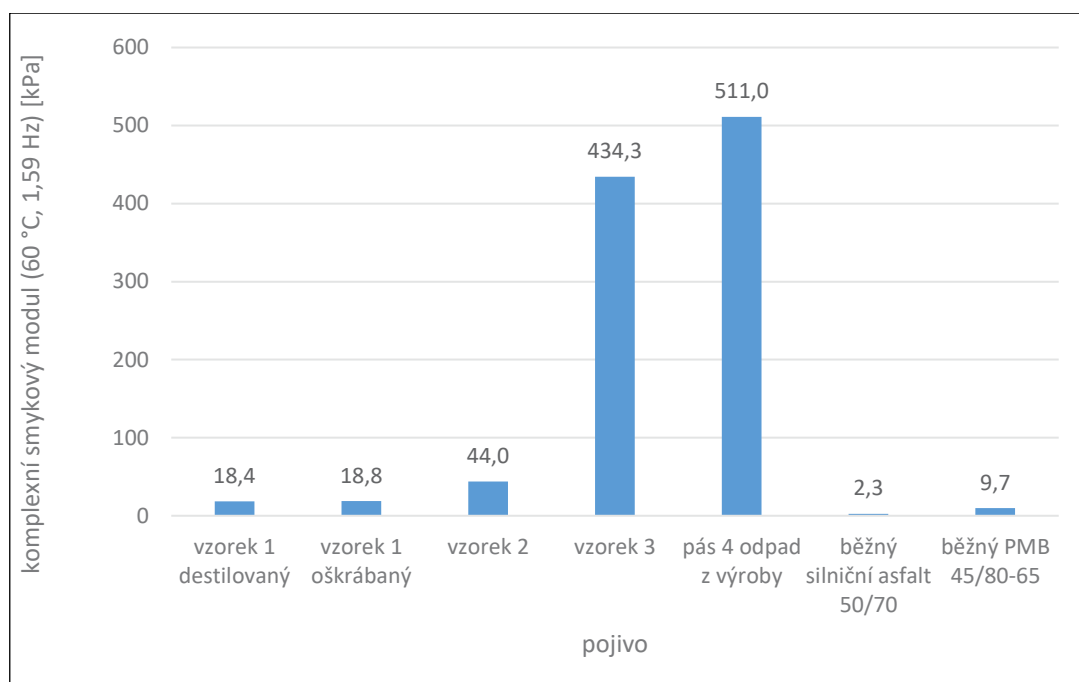
Na základě výše uvedených výsledků lze konstatovat, že jde o tvrdé a vysoce modifikované asfaltové pojivo.

Reologické parametry zpětně získaných pojiv z odpadních asfaltových izolačních pásů

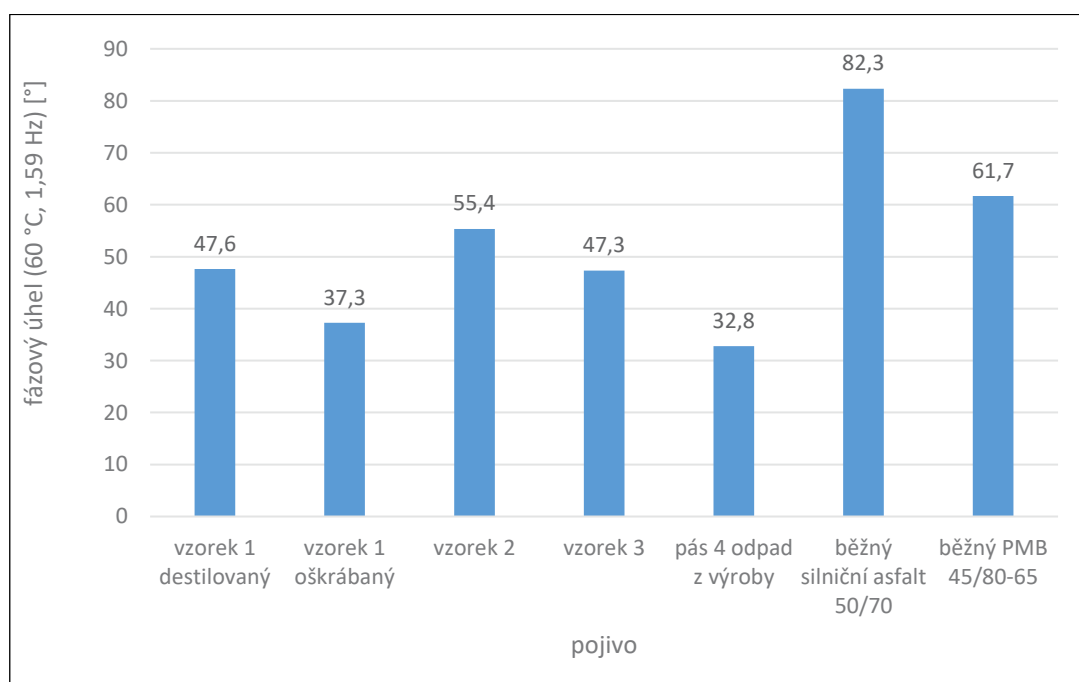
V další fázi výzkumu byla na zpětně získaných pojivech provedena reologická měření v dynamickém smykovém reometru.

Stanovení komplexních smykových modulů a fázových úhlů

Stanovení komplexních smykových modulů a fázových úhlů bylo provedeno při teplotě 60 °C a frekvenci zatěžování 1,59 Hz. Shrnutí naměřených dat včetně srovnání s běžnými silničními a polymerem modifikovanými pojivy je uvedeno v obrázcích 5 a 6.



Obrázek 5: Komplexní smykové moduly zpětně získaných pojiv z izolačních pásů

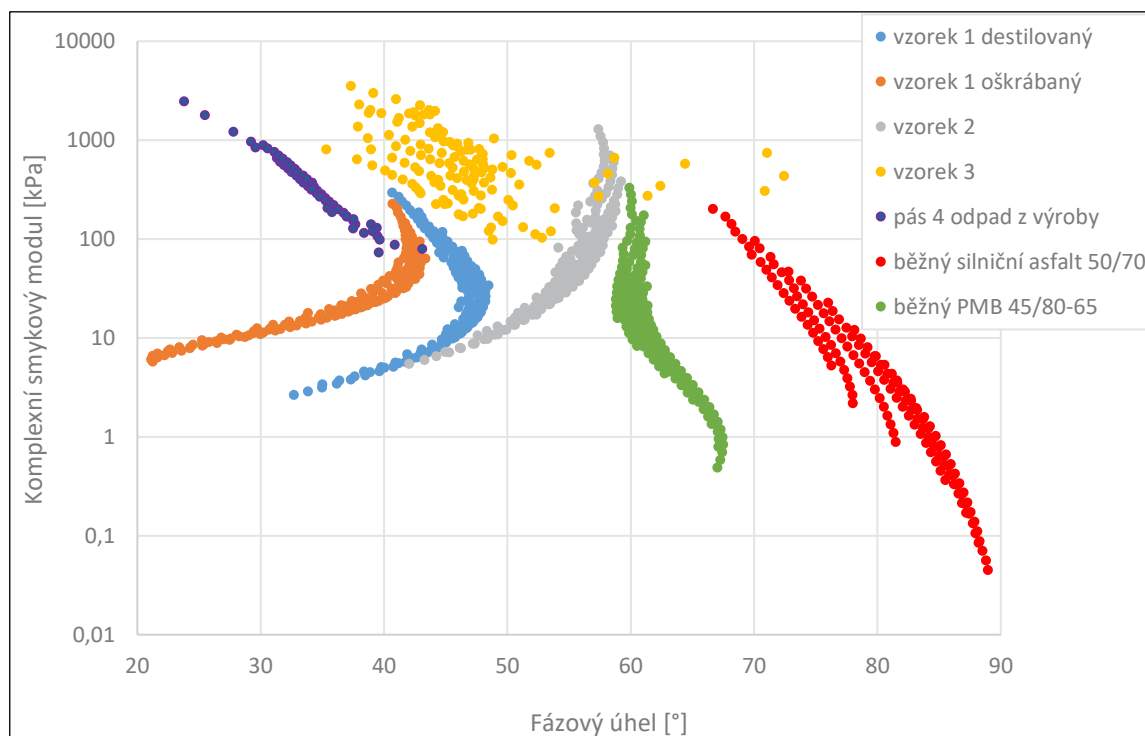


Obrázek 6: Fázové úhly zpětně získaných pojiv z izolačních pásů

Na základě reologických měření v dynamickém smykovém reometru lze konstatovat, že zpětně získaná asfaltová pojiva z izolačních pásů jsou tužší než běžné silniční a polymerem modifikované asfalty používané v ČR. Nejvyšší tuhost vykazují vzorky č. 3 a 4. Zpětně získaná asfaltová pojiva z izolačních pásů vykazují dále nižší fázové úhly (jsou pružnější) než běžné silniční a polymerem modifikované asfalty používané v ČR.

Blackovy diagramy

Níže v obrázku 7 je uveden Blackův diagram pro jednotlivá pojiva opět se srovnáním s běžnými silničními a polymerem modifikovanými pojivy.



Obrázek 7: Blackův diagram

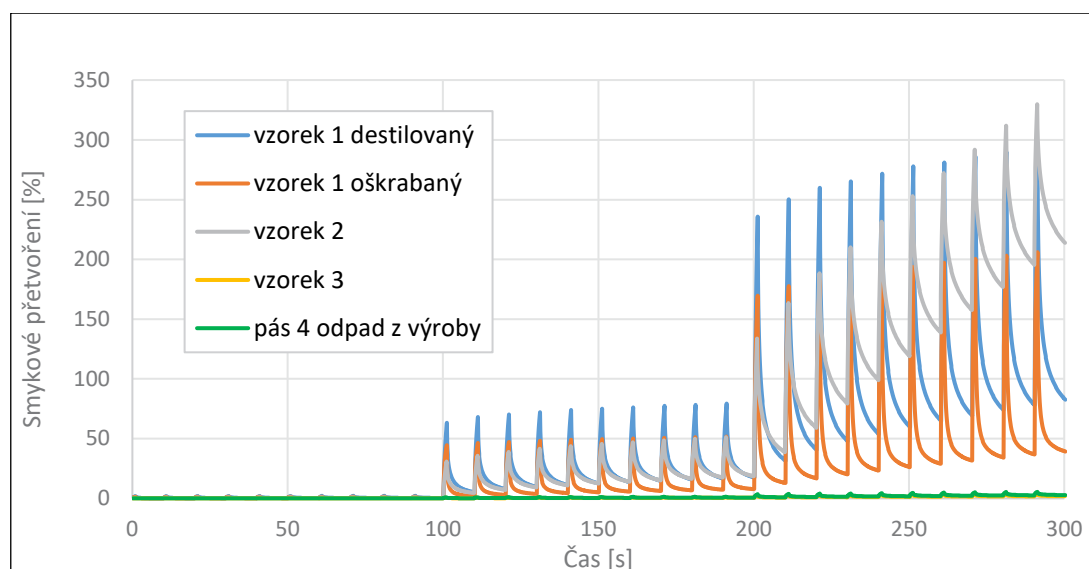
Na základě Blackových diagramů lze konstatovat, že vzorky jsou silně modifikovány (umístění dat vlevo a jejich zvlnění). Vzorky č. 3 a 4 vykazovaly opět velmi vysokou tuhost – jde o téměř neměřitelné vzorky v dynamickém smykovém reometru za daných zkušebních podmínek.

„MSCR“ test

Multiple Stress Creep Recovery test byl proveden při zkušební teplotě 60 °C. Oproti normovému postupu byla navíc zahrnuta i třetí zatěžovací větev. Shrnutí naměřených dat je uvedeno v tabulce 6 a obrázku 8.

Tabulka 6: Výsledky „MSCR“ testu při teplotě 60 °C

	$J_{nr0,1}$ (kPa^{-1})	$J_{nr3,2}$ (kPa^{-1})	$J_{nr diff 3,2-0,1}$ (%)	$R_{0,1}$ (%)	$R_{3,2}$ (%)	$R_{diff 3,2-0,1}$ (%)
Vzorek 1 (destilovaný)	0,0031	0,0053	70,1	98,3	97,3	1,04
Vzorek 1 („oškrábaný“)	0,0023	0,0023	2,1	98,2	98,3	-0,11
Vzorek 2	0,0033	0,0057	71,8	95,0	94,3	0,76
Vzorek 3	0,0001	0,0001	-8,9	91,9	92,9	-1,15
Vzorek 4	0,0002	0,0002	-0,2	93,3	93,1	0,13



Obrázek 8: Záznam „MSCR“ testu

Na základě výše uvedených výsledků lze konstatovat, že zpětně získaná pojiva z izolačních pásů vykazují výbornou odolnost proti deformacím díky jejich vysoké tuhosti a pružnosti.

Další postup řešení projektu

V dalších etapách řešení projektu jsou plánované činnosti zaměřené na vývoj asfaltové směsi typu asfaltový beton s přísadou z odpadních asfaltových izolačních materiálů. Činnosti budou probíhat od návrhu směsi, přes laboratorní míchání a ověřování základních parametrů asfaltové směsi až po přípravu počáteční zkoušky typu a provedení poloprovozní zkoušky na obalovně.

Poté je plánováno vytipování vhodné lokality pro provedení zkušebního úseku a jeho následná realizace.

V neposlední řadě budou probíhat činnosti související se zajištěním a odzkoušením vhodné technologické sestavy pro úpravu odpadní suroviny na požadovanou frakci vhodnou pro použití na obalovnách.

Závěr

Cílem příspěvku bylo seznámit odbornou veřejnost s náplní a prvními získanými zkušenostmi při řešení výzkumného projektu Technologické agentury ČR č. CL01000187 s názvem „Materiálové využití odpadních asfaltových izolačních materiálů při výrobě asfaltových směsí“, jehož řešitelský tým tvoří zástupci firem Skanska Asfalt s.r.o., Recovera Využití zdrojů a.s., Skanska a.s. a Vysokého učení technického v Brně. První získané výsledky jsou optimistické a prozatím naznačují možnost využití pojiva získaného z odpadních izolačních pásů v asfaltových směsích.

Poděkování

Příspěvek vznikl s podporou Technologické agentury ČR v rámci Národního plánu obnovy z evropského Nástroje pro oživení a odolnost, projekt CL01000187 (Materiálové využití odpadních asfaltových izolačních materiálů při výrobě asfaltových směsí).

Zdroje:

- [1] ČSN EN 1426 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou
- [2] ČSN EN 1427 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička
- [3] ČSN EN 14770 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu – Dynamický smykový reometr (DSR)
- [4] ČSN EN 16659 Asfalty a asfaltová pojiva – Zkouška MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery Test)

NÍZKOTEPLTNÉ ASFALTOVÉ ZMESI VYRÁBANÉ S PRÍSADOU LOWTHERM®4G

WARM MIX ASPHALT PRODUCED BY AN ADDITIVE LOWTHERM®4G

Ing. Peter Koval', ECT, s.r.o.

Ing. Eva Králová, ECT, s.r.o.

Súčasný rozvoj asfaltových vozoviek v rámci EÚ sa stále viac orientuje na ochranu životného prostredia. Cieľom je širšie uplatnenie environmentálnych technológií pri výrobe a spracovaní asfaltových zmesí. Nízkoteplotné asfaltové zmesi, opätovné využitie materiálov, zhodnotenie druhotných surovín, nové typy spojív či nové konštrukčné riešenia vozoviek, to všetko sú možnosti, ktorými môžeme prispieť k riešeniu tohto problému.

The current development of asphalt pavements within the EU is increasingly oriented towards environmental protection. Our goal is the wider application of environmental technologies in the production and processing of asphalt mixtures. Warm mix asphalt, reuse of materials, recovery of secondary raw materials, new types of binders or new road construction solutions, these are all possibilities with which we can contribute to solving this problem.

Úvod

V tomto príspevku sa budeme venovať nízkoteplotným asfaltovým zmesiam, ktoré sa vyrábajú prísadou LowTherm®4G. Túto prísadu vyrába spoločnosť ACTIVA Srl a je jednou z najviac dostupných nízkoteplotných prísad na českom a slovenskom trhu.

Najbežnejšie techniky pre nízkoteplotné asfaltové zmesi

Najbežnejšie techniky pre nízkoteplotné asfaltové zmesi sú nasledovné:

- **Organické prísady** – znižujú teploty asfaltových zmesí, teda teploty miešania a zhutňovania o 20 °C až 30 °C. Sú to hlavne parafíny a vosky získané konverziou zo zemného plynu.
- **Chemické prísady** – znižujú teploty asfaltových zmesí o cca 20 °C až 40 °C.
- **Peniace techniky** – tie môžu byť realizované dvoma spôsobmi, a to:
 - priamou metódou penenia, kde je vstrekovanie malého kontrolovaného množstva vody do horúceho asfaltu cez penotvorné trysky; zníženie teploty asfaltovej zmesi je približne o 20 °C až 40 °C.
 - technikou nepriameho penenia; využíva sa minerál – zeolit, ktorý môže byť prírodný, alebo syntetický, ako zdroj peniacej vody; zníženie teploty asfaltovej zmesi je približne o 30 °C.

Významné výhody zníženia teploty asfaltových zmesí

Za najvýznamnejšie výhody zníženia teploty asfaltových zmesí pri výrobe ako aj pri pokládke považujeme:

- zníženie emisií do atmosféry,
- zníženie zadymenia a zápachu,
- zníženie energetickej spotreby pri sušení kameniva a obalovaní (cca o 30 °C až 40 °C),
- zlepšenie pracovných podmienok obsluhy,
- využitie jestvujúcich obalovačiek,
- zachovanie spracovateľnosti obalovanej zmesi.

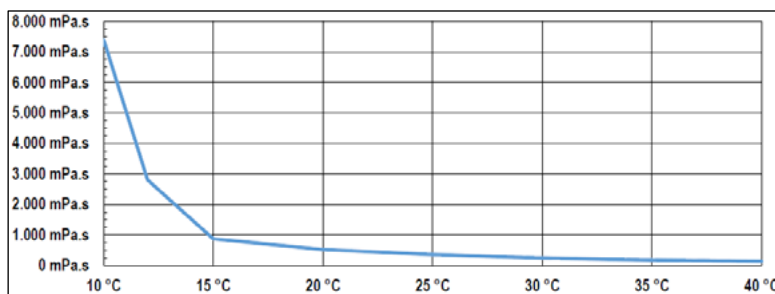
Nízkoteplotná prísada LowTherm®4G

LowTherm®4G je kvapalná povrchovo aktívna látka určená na výrobu, pokládku a zhutňovanie asfaltových zmesí pri teplotách o 30 °C až 50 °C nižších ako teploty bežne používané v horúcich asfaltových zmesiach bez toho, aby sa znížila výkonnosť a trvanlivosť vozovky. LowTherm®4G možno tiež použiť na predĺženie doby prepravy a vzdialenosti horúcej asfaltovej zmesi alebo na uľahčenie pokládky v extrémne chladných poveternostných podmienkach. LowTherm®4G zlepšuje výkonnosť zmesí a predlžuje životnosť vozoviek, pretože vytvára silnú chemickú väzbu medzi asfaltom a kamenivom, ktorá vytvára ako „aktívnu“, tak „pasívnu“ adhéziu.

LowTherm®4G má vydané Osvědčení o vhodnosti ako nízkoteplotná prísada aj ako príľnavostná prísada a rovnako ako nízkoteplotná prísada v súlade s ustanovením článku 3.2. časti Ostatní výrobky Metodického pokynu Systém jakosti v oboru pozemních komunikací (SJ-PK) zo dňa 21. 1. 2020 vydaného Ministerstvom dopravy České republiky.

Tabuľka 1: Chemicko-fyzikálne vlastnosti LowTherm®4G

Vzhľad	Kvapalina
Farba	Jantárová
Zápach	Mierny
Hustota (pri 20 °C)	980–1 100 kg/m ³
Viskozita (pri 20 °C)	400–600 mPa.s
Bod vzplanutia	> 180 °C
Bod varu	> 200 °C
Celkové číslo kyslosti	120–160 mg KOH/g
Bod tuhnutia	< -5 °C

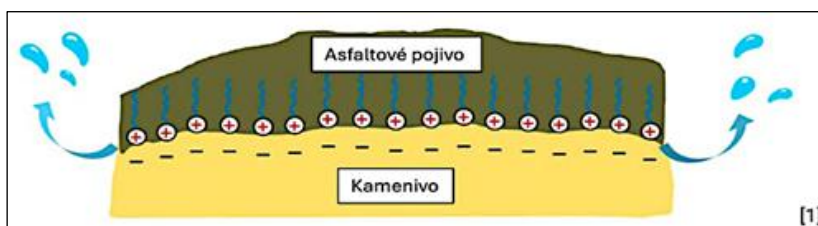


Obrázok 1: LowTherm®4G – viskozita vs. teplota

Zvýšenie príľnavosti asfaltového spojiva ku kamenivu

LowTherm®4G významne zvyšuje príľnavosť asfaltového spojiva ku kamenivu, takže nie je potrebné používať súčasne iné prísady na príľnavosť. Rozlišujeme aktívnu príľnavosť, kde asfaltové spojivo s prísadou LowTherm®4G úplne pokryje povrch kameniva, a to aj za prítomnosti vyššej vlhkosti.

Pasívna príľnavosť – dlhotrvajúca adhézia – vytvorenie pevného filmu s dlhodobou odolnosťou.



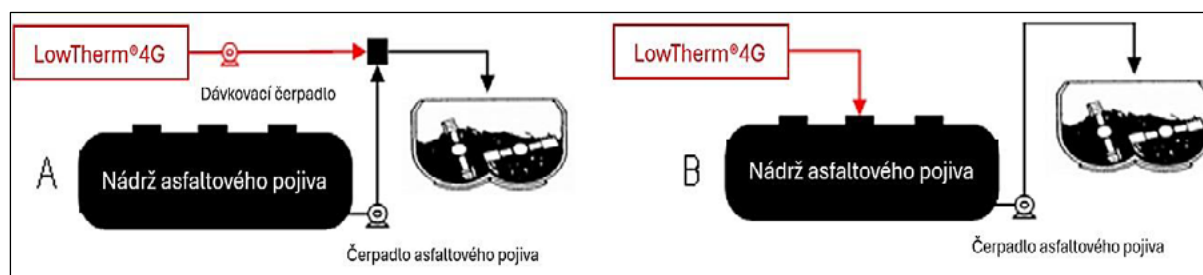
Obrázok 2: Zníženie povrchového napätia na rozhraní asfaltu a kameniva

LowTherm®4G u asfaltových zmesí významne znižuje poškodenie spôsobené vlhkosťou; zlepšuje hodnotu ITSR (pomer pevnosti v priečnom ťahu).

Jednoduchá použiteľnosť

LowTherm®4G je kvapalina a je možné ju dávkovať priamo jestvujúcimi dávkovacími zariadeniami na obalovačkách pre dávkovanie tekutých prísad v procese výroby asfaltovej zmesi, alebo aj do nádrže s asfaltovým spojivom.

LowTherm®4G je stabilný niekoľko týždňov pri teplote 180 °C. Vďaka tejto tepelnej stabilite môže byť pridávaný do nádrže, ktorou sa dopravuje asfalt z rafinérie alebo zo skladu s asfaltovým spojivom.



Obrázok 3: Schémy dávkovania LowTherm®4G

Odporúčané dávkovanie

V dávke 0,1 % až 0,2 % z asfaltu, pôsobí ako stimulátor príľnavosti a zlepšuje spracovateľnosť.

V dávke 0,2 % až 0,5 % výrazne zvyšujú spracovateľnosť, takže je možné znížiť výrobnú teplotu alebo zvýšiť dovoznú vzdialenosť.

Tabuľka 2: Odporúčané dávkovanie

LowTherm®4G Dávkovanie (%)	Výrobná teplota (°C)	Teplota hutnenia (°C)
0,1–0,2	160 ± 5	≥150
0,2–0,3	140 ± 5	≥130
0,4–0,5	120 ± 5	≥110

Dávkovanie je potrebné stanoviť na konkrétnu asfaltovú zmes v laboratóriu na základe použitého kameniva a asfaltu v zmysle ČSN 73 6120 Provádění a kontrola shody.

V doterajšej praxi sa nám osvedčilo zníženie teploty o 20 °C až 30 °C pri výrobe a pokládke s dávkovaním 0,35 % až 0,4 % z asfaltu.

Už zníženie teploty asfaltovej zmesi o 15 °C finančne vykryje nákup prísady LowTherm®4G.

Balenie a skladovanie

LowTherm®4G sa dodáva v IBC kontajneroch s objemom 1 000 litrov a sudoch s objemom 200 l.

Produkt je nutné skladovať v originálnych a uzavretých obaloch pri teplote 5 °C až 35 °C po dobu maximálne 24 mesiacov, chrániť pred mrazom, priamym slnkom a vlhkosťou.

V prípade, že sa produkt zakalí vplyvom nízkych teplôt alebo stuhne, je možné ho vrátiť do pôvodného stavu zahriatím na 20 °C až 30 °C a súčasným miešaním. Stuhnutie a opätovné roztavenie nemá negatívny vplyv na použiteľnosť produktu.

Životné prostredie, ochrana zdravia a bezpečnosť práce

LowTherm®4G nie je škodlivý pre ľudské zdravie ani pre životné prostredie:

- bezpečný pre pracovníkov pri manipulácii – pri výrobe, doprave a pokládke,
- bez zápachu a tvorby dymu,
- žiadne obmedzenie pri doprave (nie je ADR),
- biologicky odbúrateľný,
- zníženie energetickej náročnosti výroby asfaltových zmesí a vypustení emisii skleníkových plynov, rovnako ako nepríjemné výpary.

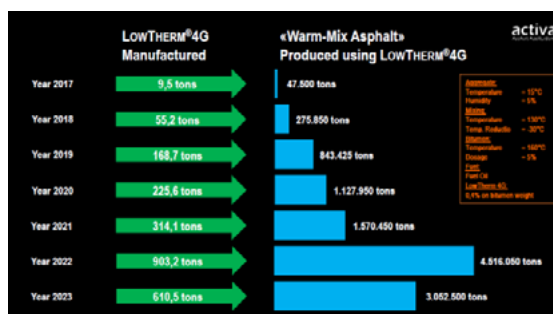
- důležité najmä pri použití v intravilánoch ako aj pri pokládke asfaltových zmesí v tuneloch,
- LowTherm®4G významne znižuje uhlíkovú stopu vznikajúcu pri miešaní a pokládke asfaltových zmesí.

LowTherm®G – zastúpenie na trhu

V tabuľke uvádzame výrobu nízkoteplotných asfaltových zmesí v štatistike EAPA, Asphalt in figures 2023 v rámci EU 27.

Tabuľka 3: Výroba nízkoteplotných asfaltových zmesí (štatistika EAPA)

Rok	Celková produkcia asfaltovej zmesi (mil.t)	Nízkoteplotná asfaltová zmes (mil.t)
2022	212,50	13,50
2023	202,70	13,56



Obrázok 4: LowTherm®4G – celková produkcia

Záver

Trh s nízkoteplotnými asfaltovými zmesami zažíva významný rast. Tento rast je poháňaný zvyšujúcim sa dopytom po udržateľných stavebných materiáloch a ekologických stavebných postupoch. Tento trend je podporovaný prísnyimi environmentálnymi a bezpečnostnými predpismi a rastúcim povedomím o klimatických zmenách.

V Českej republike sa trh s nízkoteplotnými asfaltovými zmesami tiež rozvíja. Prvé pokusné úseky s nízkoteplotnými asfaltovými zmesami, vyrobenými s prísadou LowTherm®4G, boli položené od roku 2023, a to na diaľnici v úseku D48 Skotnice. Realizácia prebehla v zimných mesiacoch.

V roku 2024 Ředitelství silnic a dálnic České republiky vypísalo súťaž na 4 pokusné stavby, aby mohla byť overená účinnosť nízkoteplotných prísad.

Stavba, cesta I. triedy I/38 v úseku Žebrutky, kde boli položené nízkoteplotné asfaltové zmesi s prísadou LowTherm®4G, bola realizovaná v minulom roku. Zhotoviteľom bola firma COLAS CZ, a.s.

Dáta z laboratórnych skúšok asfaltových zmesí použitých na tejto stavbe poslúžili na vydanie Osvedčenia o vhodnosti pre LowTherm®4G ako nízkoteplotná prísada.

Ďalšia z týchto pokusných stavieb bude realizovaná v priebehu leta tohto roku. Jedná sa o cestu I/45 na prieťahu obce Děřichov nad Bystřicí. Zhotoviteľom je spoločnosť Skanska, a.s.

LowTherm®4G bude teda použitý na dvoch zo štyroch pokusných stavieb vypísaných Ředitelstvom silnic a dálnic.

Zdroje:

- [1] Firemné materiály ACTIVA Srl
- [2] Firemné materiály ECT, s.r.o.

DOSAVADNÍ ZKUŠENOSTI S VYUŽÍVÁNÍM NÍZKOTEPLNÍCH ASFALTOVÝCH SMĚSÍ V NĚMECKU

EXPERIENCE TO DATE WITH THE USE OF LOW TEMPERATURE ASPHALT MIXTURES IN GERMANY

Horst Mocker, Eric Reim, Michael Huber, VARO Energy GmbH, Německo/Germany
Václav Valentin, technický konzultant, Česká republika/Czech Republic

V Německu se předpokládalo, že nízkoteplotní směsi budou plošně používány od začátku roku 2026. Nízkoteplotní směsi mohou být vyráběny buď s využitím asfaltových pojiv typu NV/NT (s chemickými přísadami nebo různými typy vosků), nebo s přidáváním přísad pro snížení viskozity přímo na obalovně při výrobě asfaltové směsi. Pro zajištění kontroly kvality byly zpracovány předpisy TL Bitumen, ZTV Asphalt, resp. TL Asphalt. Zavádění nízkoteplotních směsí souvisí s ochranou životního prostředí, se snižováním energetické náročnosti a se snížením expozičních limitů na pracovním místě. Příspěvek popisuje genezi vývoje použití nízkoteplotních asfaltových směsí v Evropě i na německém trhu a aktuální stav při jejich zavádění do standardního užívání.

In Germany, it was assumed that low-temperature mixtures would be used across the board from the beginning of 2026. Low-temperature mixes can be produced either by using NV/NT bitumen binders (with chemical additives or different types of waxes) or by adding viscosity-reducing additives directly at the asphalt mixing plant during the production of the asphalt mix. TL Bitumen, ZTV Asphalt and TL Asphalt regulations have been developed to ensure quality control. The introduction of low-temperature mixtures is related to environmental protection, reduction of energy consumption and reduction of exposure limits at the workplace. This paper describes the genesis of the development of the use of low-temperature asphalt mixtures in Europe and on the German market as well and the current status of their introduction into standard use.

Úvod – vývoj v Evropě

Udržitelnost, digitalizace, oběhové hospodářství apod. jsou módní slova, která jsou již několik let skloňována ve všech pádech napříč všemi odvětvími. V souvislosti s udržitelností rozvoje se i v odvětví výroby a využití asfaltu stále častěji diskutuje o tématu snižování teploty a volá se po co nejrychlejší a nejširší realizaci. Proč je tento koncept důležitý pro budoucnost výstavby asfaltových vozovek a jaké možnosti byly dosud vyvinuty pro aplikace při snížené výrobní a manipulační teplotě? Jaké jsou kromě ekonomických faktorů aktuální technické a environmentální důvody pro prosazení této technologie, i když se v žádném případě nejedná o převratnou novinku? První doporučení pro využití nízkoteplotních asfaltových směsí bylo v Německu vydáno v roce 2009. V tomto dokumentu bylo kromě technologických postupů též konstatováno, že snížení teploty bude v budoucnu jedním z určujících zásadních směrů technologického vývoje.

Technické a ekonomické problémy ve stavebnictví jsou obecně velké a tlak na snižování emisí CO₂ neustále roste i v důsledku politických požadavků a mezinárodních dohod, jako je např. **Kjótský protokol**, v němž se OSN v roce 2005 poprvé dohodla na mezinárodně závazných cílových hodnotách emisí skleníkových plynů z průmyslové činnosti, které jsou hlavní příčinou globálního oteplování. V **Pařížské dohodě** bylo v roce 2015 dosaženo závazné dohody o omezení globálního oteplování výrazně pod úroveň 2 °C ve srovnání s úrovní před industrializací. Zatímco Kjótský protokol byl zaměřen na ekonomicky bohaté průmyslové země, Pařížská dohoda poprvé zavázala všechny signatářské státy.

Následná **Evropská zelená dohoda (Green Deal)** je koncept, který Evropská komise představila 11. prosince 2019 s více než ambiciózním cílem, aby všechny členské státy Evropské unie byly do roku 2050 klimaticky neutrální. Úkolem je vyjasnit a definovat, které investice a ekonomické aktivity lze skutečně zařadit do kategorie ekologických a udržitelných, a které tedy skutečně přispívají k dosažení cílů v oblasti ochrany klimatu.

V návaznosti na to bylo dalším krokem Evropské unie vytvoření tzv. **nařízení EU o taxonomii 2020**. Jedná se o nařízení Evropského parlamentu, které upravuje vytvoření rámce pro usnadnění udržitelných

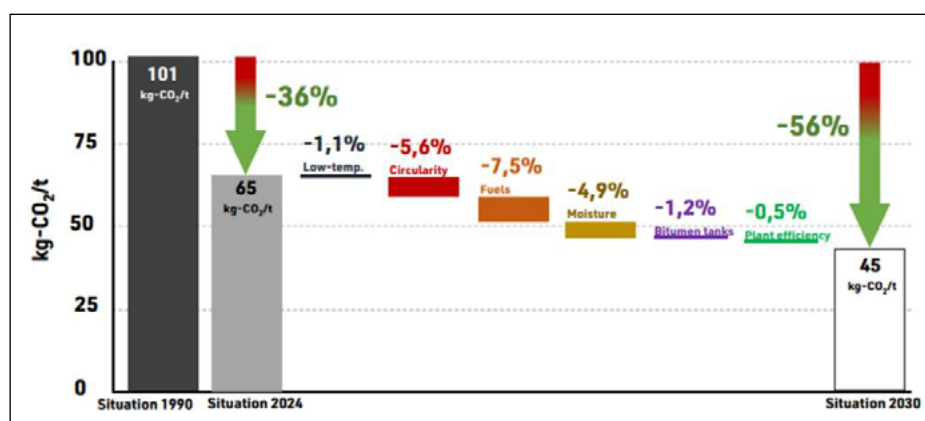
investic, tj. klasifikačního systému pro udržitelné hospodářské činnosti. Zde jsou definovány environmentální cíle:

- ochrana klimatu,
- přizpůsobení se změně klimatu,
- udržitelné využívání a ochrana vodních a mořských zdrojů,
- přechod na oběhové hospodářství,
- prevence a snižování znečištění,
- ochrana a obnova biologické rozmanitosti a ekosystémů.

Podle tohoto nařízení má být hospodářská činnost klasifikována jako udržitelná, pokud významně přispívá k realizaci jednoho nebo více z uvedených environmentálních cílů a současně nevede ke zhoršení jednoho nebo více z těchto cílů. Dále musí být zajištěno dodržování minimální úrovně ochrany (tj. minimálních sociálních kritérií) a musí být splněna kritéria technického posouzení stanovená Evropskou komisí.

Posledním důležitým prvkem, který je třeba zmínit, je nové **nařízení EU o stavebních výrobcích** zveřejněné v prosinci 2024. Touto cestou bude vyžadováno, aby stavební výrobky kromě požadavků z roku 2011 a související certifikace CE poskytovaly také EPD (environmentální prohlášení o výrobku) vztahující se ke konkrétnímu výrobku. Jedná se o doklad k uhlíkové stopě každého stavebního výrobku. Cílem je zajistit do budoucna nejen transparentnost ve stavebnictví, ale také poprvé umožnit srovnání jednotlivých stavebních výrobků z hlediska jejich udržitelnosti.

Na základě všech těchto požadavků vypracovala EAPA strategický dokument pro výrobu a užití asfaltových směsí s cílem dosáhnout požadované cílové hodnoty. Proto byly definovány dva milníky: rok 2030 a rok 2050, při jejichž dosažení mají být emise CO₂ z výroby asfaltových směsí sníženy o 56 %, resp. o > 90 %, a to v porovnání s údaji o výrobě v roce 1990.



Obrázek 1: Postupné snižování emisí CO₂ v letech

Pro úspěšnou realizaci strategie jsou nezbytné technické změny, které však musí současně zajistit i dlouhodobou životnost asfaltových vozovek, jejich dostatečnou odolnost proti klimatickým vlivům i rostoucímu zatížení dopravou, vyšší bezpečnost a jízdní komfort. Řešení probíhají v různých segmentech:

- odklon od fosilních paliv vč. ropy, nezbytnost hledání alternativy k ropným asfaltům,
- alternativní zdroje energie pro zajištění provozu obaloven,
- snižování výrobních a manipulačních teplot,
- vyšší využití studených technologií,
- výrazné zvýšení podílu recyklovaného asfaltu na tunu asfaltové směsi,
- důsledné využívání systému hospodaření s vozovkou.

Je tedy naprosto zřejmé, že snížení výrobní a manipulační teploty je pro dosažení klimatických cílů požadovaných Evropskou unií klíčové. Do roku 2030 má být až 50 % všech vyrobených asfaltových směsí vyrobeno při snížené teplotě a do roku 2050 se mají asfaltové směsi vyrábět výhradně touto cestou, což znamená, že nejpozději v roce 2050 přestane zřejmě existovat výroba asfaltových směsí tak, jak ji známe dnes.

Vývoj využívání nízkoteplotních asfaltových směsí v Německu do roku 2019

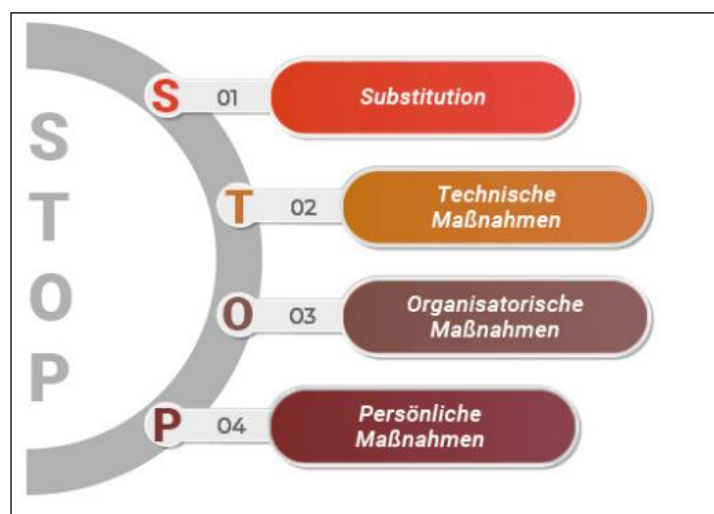
Abychom lépe pochopili současnou situaci, je nutné vrátit se do minulosti. První emisní limitní hodnoty pro pracovní místa byly zavedeny již v roce 1996, a to v hodnotě 20 mg/m³ ve vnitřních prostorách a 15 mg/m³ pro všechny ostatní práce. Krátce poté, v roce 1998, byla při Německém svazu výrobců a uživatelů asfaltu (DAV) založena pracovní skupina s názvem „Snížení teploty“. V roce 2001 se z této pracovní skupiny stala pracovní skupina 7.6.9 „Snížení teploty v asfaltu“ při FGSV (Sdružení pro výzkum silnic a dopravy). V roce 2005 byla následně ve vyhlášce o nebezpečných látkách přijata snížená mezní hodnota 10 mg/m³. V roce 2009 byla vydána první informační brožura pro snižování teploty, která byla v letech 2011 a 2021 revidována. Po určitou dobu tak v oboru panovalo přesvědčení, že expozice s limitní hodnotou 10 mg/m³ zajistí dostatečnou ochranu zaměstnanců zejména i proto, že údaje o nemocech z povolání nedávaly důvod k dalšímu snižování této hodnoty.

Pro dosažení větší přehlednosti z lékařského hlediska byl zaveden program pravidelných prohlídek pracovníků na stavbách, v jehož rámci měla být zajištěna zejména individuální prevence na základě úzce zaměřených lékařských prohlídek. Toto opatření mělo prokázat, že hodnota DNEL 2,9 mg/m³ (stanovená výrobcí asfaltu v rámci nařízení REACH – nařízení EU o chemických látkách) je dostatečná i z hlediska ochrany zdraví. Zveřejněním hodnoty MAK se však ukázalo, že limit pro posuzování bude v budoucnosti muset být výrazně nižší než 10 mg/m³.

Nová limitní hodnota expozice na pracovním místě

V červenci 2018 zveřejnila komise MAK limitní hodnotu 1,5 mg/m³ pro plynné emise a aerosoly při zpracování asfaltové směsi za horka, která je založena na potencionálních zdravotních rizicích. Tuto orientační hodnotu, která původně nebyla pro firmy právně závazná, převzal Pracovní výbor pro nebezpečné látky (AGS) při Spolkovém ministerstvu práce a sociálních věcí (BMAS) a převedl ji 19. listopadu 2019 na závaznou limitní hodnotu expozice na pracovišti (OEL) ve výši **1,5 mg/m³** pro plynné emise a aerosoly z asfaltové směsi. Vzhledem k tomu, že členové AGS si byli během konzultací vědomi, že novou OEL pro bitumen nelze v současné době v některých oblastech stavebnictví dodržet, bylo dotčeným odvětvím poskytnuto pětileté přechodné období. Pro válcované asfaltové směsi, lité asfalt a pro odvětví izolačních asfaltových pásů (např. střešních krytin) se na OEL vztahovalo přechodné období do 31. prosince 2024. K systematickému zajištění limitní hodnoty se jako ochranné opatření při manipulaci s nebezpečnými látkami začal používat tzv. **Postup STOP**:

- **Substitute:** možnost náhrady kritických substancí a látek
- **Technická opatření:** úpravy finišerů a válců (ventilace, filtrační jednotky apod.)
- **Organizační opatření:** např. snížení expozice rotací pracovníků během pokládky apod.
- **Personální opatření:** osobní ochranné pomůcky



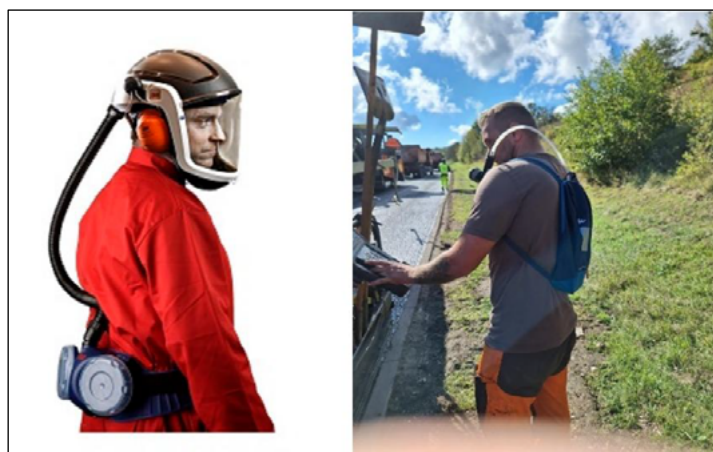
Obrázek 2: Postup STOP

Termíny v obrázku: S = substitute, T = technická opatření, O = organizační opatření, P = personální opatření



Obrázek 3: Úpravy finišeru

Termíny v obrázku: Odtah, ventilátor, nasávací kanály



Obrázek 4: Osobní ochranné pomůcky

Vývoj využívání nízkoteplotních asfaltových směsí v Německu od roku 2019

V roce 2020 založen Koordinační výbor pro asfalty (KoA-Bit). Jde o konsorcium šesti německých sdružení:

- Svaz německého stavebního průmyslu (HDB).
- Ústřední svaz německého stavebnictví (ZDB)
- Spolkový svaz středních stavebních podniků (BVMB)
- Svaz pojištění odpovědnosti zaměstnavatele ve stavebnictví (BG Bau)
- Poradenská organizace pro aplikace litého asfaltu (BGA)
- Německý svaz výrobců a uživatelů asfaltových směsí (DAV)

Koordinuje veškerá opatření související s mezní hodnotou MAK. Jedná se o:

- výběr typů a tříd asfaltů,
- požadavky na stavební projekt,
- výběru požadavků na použití asfaltových pojiv se sníženou teplotou,
- rozšířené počáteční zkoušky typu a prokázání vhodnosti,
- použití odsávacích zařízení na používaných silničních strojích,
- měření vlivu na životní prostředí a měření výparů a aerosolů,
- doprovodná měření při pokládce asfaltových vrstev,
- provádění zkoušek za účelem sběru dat a informací,
- provádění kontrolních zkoušek a měření odchylek od stávajících požadavků.

Měření prováděná v letech 2019–2024 prokázala, že aktuální průměrné hodnoty MAK při použití asfaltových směsí při standardních teplotách se pohybují v následujících hodnotách:

- Řidič finišeru 8,9 mg/m³
- Pracovník na liště finišeru 12,4 mg/m³
- Řidič válce 2,5 mg/m³

Tyto skutečnosti vedly v roce 2024 k posunutí původního termínu platnosti o 2 roky. Konečný termín, od něhož musí být dodržena **max. hodnota MAK 1,5 mg/m³, byl stanoven na 1. 1. 2027**. Otázka možných řešení a opatření tak nabyla na významu a důležitosti a v způsobila i poměrně začnou nervozitu. Zkušenosti jasně ukázaly, že osobní ochranné pomůcky pro ochranu před vlivem nebezpečných látek nejsou z hlediska pracovního komfortu řešením a mohou vést i k dalšímu – již dnes značnému – nedostatku pracovních sil. Vývoj v oblasti politické (řada válečných konfliktů, které komplikují zásobování ropou i její cenu) i problematika energetických zdrojů a cena energií v současné době do určité míry relativizují navrhovaný výstup z fosilních paliv, a to i s ohledem na řešenou možnost využití jiných typů poživ. tzv. bio-pojiv. V této oblasti probíhá celá řada výzkumných a vývojových prací, zatím však bez skutečně výrazného a prokazatelného řešení jak v oblasti technické (kvalita a dlouhodobá odolnost), tak i v oblasti dostupnosti některých komponentů.

Řada dlouhodobých měření však prokázala, že snížením manipulační teploty asfaltu a asfaltových směsí o 20 °C až 40 °C vede k výraznému omezení vzniku výparů a aerosolů. Aktuálním řešením je tedy využití nízkoteplotních asfaltových směsí v kombinaci s využitím finišerů s odsávacím zařízením.



Obrázek 5: Porovnání pokládky standardní asfaltové směsi s teplotou 160 °C a nízkoteplotní asfaltové směsi s teplotou 140 °C (teplota vzduchu 5 °C)

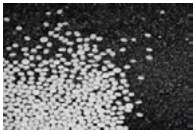
Aktuální technologické možnosti pro snižování teploty

- Pojiva se sníženou viskozitou
- Aditiva pro snížení viskozity (organického, chemického nebo minerálního původu)
- Povrchově aktivní aditiva
- Pěnoasfalt

Asfaltová pojiva se sníženou viskozitou

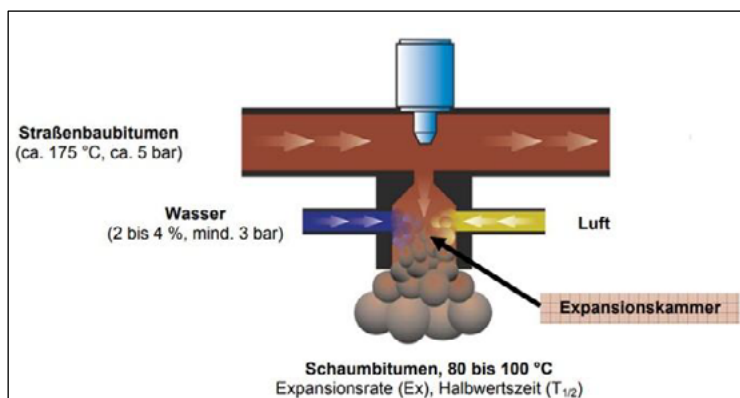
Aktuálně platný obsahuje předpis **TL VBit-StB 22** i požadavky na asfaltová pojiva typu NT/NV. Současně platí pro asfaltová pojiva obecně i předpis **TL Bitumen-StB, revize z roku 2023**.

Aditiva pro snížení viskozity

Organická aditiva	Minerální aditiva	Chemická aditiva
Různé typy vosků, některé s výrazným skokovým vlivem na snížení viskozity pojiva 	Např. AsphaMin (pevná látka) 	Např. Anova, Evotherm, B2L (tekutá forma) Aditiva snižují povrchové napětí pojiva 
Pozdější hutnění může být neúčinné Zlepšení odolnosti proti deformacím Vliv na parametry asfaltu	Žádný vliv na odolnost proti deformacím Žádný vliv na parametry asfaltu	Žádný vliv na parametry asfaltu

Obrázek 6: Přehled typů aditiv pro snížení viskozity

Pěnoasfalt



Obrázek 7: Schéma výroby pěnoasfaltu

Termíny v obrázku: Silniční asfalt, voda, pěnoasfalt 80 °C až 100 °C, vzduch, expanzní komora

Současná situace, předpoklady dalšího vývoje

Aktuálně platný předpis R1 (ZTV Asphalt – StB 07/13) neobsahuje žádná specifická ustanovení – nízkoteplotní asfaltové směsi nejsou v tomto předpisu z roku 2013 zahrnuty. Aktuálně tak platí **smluvní podmínky podle ARS 13/2025** (dopis Ministerstva dopravy a digitalizace), které stanovují, že „pro provádění zkušebních úseků na spolkových silnicích, kde jsou využívány nízkoteplotní asfaltové směsi, platí nutnost vybavení finišeru odsávacím zařízením“!

Předpis R1 je v současné době revidován. Revize tohoto předpisu je vzhledem k obsahu rozsáhlejší, než tomu bylo v případě revize předpisů TL VBit-StB, resp. TL Bitumen-StB. Proto došlo k tomu, že předpis pro asfaltové pojivo byl vydán, chybí však návaznost na aktuální znění předpisu pro asfaltové směsi.

Revidované předpisy ZTV Asphalt-StB 202x a TL Asphalt-StB 202x budou obsahovat výhradní využití nízkoteplotní asfaltové směsi s platností od 1. 1. 2027. Podle předpokladu vydány v roce 2026. Co bude v těchto revizích zahrnuto?

Jedná se o:

- povolené teplotní rozpětí teploty asfaltové směsi při nasypání do násypky finišeru:
 - směsi typu ACP, ACL 130 °C až 150 °C,
 - směsi ACO SMA 140 °C až 155 °C,
- dodržení hodnoty emisního zatížení pracovního místa MAK max. 1,5 mg/m³,
- používání finišerů s odsáváním,

- dopravu asfaltových směsí výhradně v tepelně izolovaných korbách nákladních vozidel,
- využívání teplotních skenerů na finišerech,
- využívání plošné kontroly hutnění na válcích,
- používání předpisu TL Vbit-StB 22 místo dosud používaného předpisu E KvB.

V současné době stále probíhají další kontrolní měření emisí na pracovním místě na vybraných stavbách. Měřicí body jsou umístěny následovně:

- měřicí bod u řidiče finišeru
- měřicí bod u pracovníků na liště finišeru
- měřicí bod u řidiče válce
- v případě použití podavače a homogenizátoru asfaltové směsi („Beschickeru“), měřicí bod u řidiče zařízení.

Dosud získané výsledky ze zkušebních úseků, kde byly využívány nízkoteplotní asfaltové směsi, ukazují, že požadovaná hodnota max. 1,5 mg/m³ je dosahována pouze u řidičů válců. Na ostatních měřicích bodech jsou hodnoty sice výrazně nižší, než je tomu při použití standardních asfaltových směsí, přesto však budoucí požadovaný limit v některých případech mírně překračován. Kontrolní měření tak budou probíhat i v letošním a příštím roce tak, aby bylo vhodnými opatřeními zajištěno celoplošné dodržování limitu MAK.

Využívání nízkoteplotních asfaltových směsí je současně doplňováno o hledání možností výrazně vyššího využívání R-materiálu s cílem využívat v Německu > 84 % vybouraných asfaltových směsí. Obecně jsou stanoveny následující cíle:

- | | |
|------------------------------|---|
| • podkladní vrstva | cca 90 % R-materiálu, |
| • asfaltová podkladní vrstva | cca 40 % až 80 %, |
| • asfaltová ložní vrstva | cca 30 % až 50 %, |
| • asfaltová ohrubná vrstva | cca 0 % až 30 % pro směsi typu ACO, umožnění přidávání R-materiálu do směsi typu SMA. |

Shrnutí

Německý trh očekává vydání revidovaných předpisů pro výrobu a pokládku asfaltových směsí. Od roku 2026 bude využívání nízkoteplotních směsí standardním postupem při realizaci prací v Německu. Nadále budou probíhat další kontrolní měření emisí na pracovním místě, výrazná pozornost bude nadále věnována jak dodržování přísnějších technologických postupů při výrobě a užívání nízkoteplotních asfaltových směsí, tak i jejich kvalitě, což vedlo aktuálně k nárůstu objemu kontrolních zkoušek.

Probíhající proces ukazuje, že v době aktuálních výzev je využívání nízkoteplotních/nízkoviskózních asfaltových směsí skutečně pozitivní cestou pro zlepšení ekologických i zdravotních aspektů při využívání asfaltových materiálů v silničním stavitelství. Současně jednoznačně ukazuje na nezbytnou vyšší investiční zátěž při zabezpečení přechodu na tento nový typ asfaltových směsí. Růst cen se stejně jako chronický nedostatek odborného personálu ukazuje jako silně limitující faktor, což do určité míry limituje rychlejší rozvoj této technologie.

VYUŽITÍ VRATNÉHO PRACHU V KONSTRUKCÍCH POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

USE OF RETURNABLE WASTE DUST IN ROAD CONSTRUCTIONS

Ing. Karel Spies, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební

doc. Ing. Dušan Stehlík, Ph.D., Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební

Příspěvek se zabývá možnostmi využití vratného prachu z obaloven asfaltových směsí v různých konstrukčních vrstvách vozovek a jako alternativní složka směsného pojiva pro chemickou úpravu nevhodných zemin v podloží vozovek. Problémem využití vratného prachu se zabývá výzkumný projekt Technologické agentury České republiky (TA ČR) CL02000006 z roku 2025, jehož prozatímní dosažené výstupy jsou v tomto článku prezentovány. Vratný prach vzniká jako vedlejší produkt při sušení a horkém třídění kameniva na obalovnách asfaltových směsí. [1] Jedná se o velmi jemné částice kameniva, o velikosti menší než 125 μm , které jsou pomocí filtračních systémů (cyklónové a látkové filtry) odsávány a částečně recyklovány. Zbývající materiál bývá většinou odvážen zpět do kamenolomů, kde dochází k jeho skládkování. Výzkumný projekt má za cíl najít možnosti využití tohoto přebytečného vratného prachu např. jako plnivo do malt, jako náhradu za přídavný směsný filler či jako alternativní část směsného pojiva do nevhodných zemin v podloží.

The paper deals with the possibilities of using returnable waste dust from asphalt mixing plants in various construction layers of roads and as a binder for chemical stabilization of unsuitable soils in road subgrades. The problem of using return dust is the subject of a research project by the Technology Agency of the Czech Republic (TA ČR) CL02000006 from 2025, the preliminary results of which are presented in this article. Waste dust is a by-product of drying and hot screening of aggregate at asphalt mixing plants. [1] These are very fine aggregate particles, smaller than 125 μm , which are extracted using filtration systems (cyclone and fabric filters) and partially recycled. The remaining material is usually transported back to the quarries, where it is deposited in landfills. The research project aims to find ways to use this excess returnable dust, e.g., as a filler in mortars, as a substitute for additional filler in asphalt mixtures, or as an alternative binder in unsuitable subsoil.

Úvod

S rozvojem přísnějších emisních požadavků a zvyšujícím se tlakem na recyklaci a používání obnovitelných materiálů v silničním stavitelství se pojí i využívání dříve nepoužívaných materiálů. Jedním z těchto materiálů je i tzv. vratný prach, vznikající při výrobě asfaltových směsí na obalovnách. Tento velmi jemný materiál, odsávaný při sušení kameniva, je částečně využíván při výrobě asfaltových směsí, avšak velké množství končí nevyužitě na skládkách jako odpadní materiál. Tento odpad tak způsobuje zvýšenou finanční i ekologickou zátěž.

Výzkumný projekt si tak klade za cíl najít uplatnitelnost tohoto přebytečného materiálu v konstrukcích vozovek nebo při úpravě zemin v podloží. Hlavními výzkumnými body jsou:

- využití vratného prachu jako alternativní části pojiva do zemin pro úpravu nevhodného podloží vozovek,
- využití vratného prachu do malt, převážně určených do prolévané podkladní vrstvy ŠCM dle ČSN 73 6127-1,
- využití vratného prachu jako přilnavostní přísady při výrobě asfaltových směsí.

V rámci výzkumu je posuzováno celkem 5 druhů vratného prachu odebraných přímo na obalovnách asfaltových směsí, a to v lokalitách Boskovice, Bílý Kámen, Chvaletice, Hulín a Lipník nad Bečvou.

Základní parametry vratných prachů

Na všech materiálech byly určeny hodnoty Ph, jejichž hodnoty jsou uvedeny v tabulce 1. U všech měřených vzorků byly zjištěny mírné alkalické hodnoty kolem Ph 8. Hodnota Ph je proměnlivá dle typu použitého kameniva a obsahu minerálů, jako např. oxid křemičitý (SiO_2), uhličitán vápenatý (CaCO_3), oxid hořečnatý (MgO) a oxidy vápenatý (CaO). Tyto výsledky korespondují se zahraničními zkušenostmi zabývajícími se danou tematikou, které taktéž uvádějí mírně až silně zásadité pH mezi 7,2 až 12,4. [2] Vzhledem k tomu, že ČR zatím disponuje kvalitnějšími typy kameniva (rula, droba, amfibolit, syenit...), než je např. nepřilíh vhodný vápenec, lze u vratného prachu v ČR očekávat také nižší obsah vápenných iontů, a tudíž i nižší zásaditost.

Tabulka 1: Hodnoty Ph vratného filleru

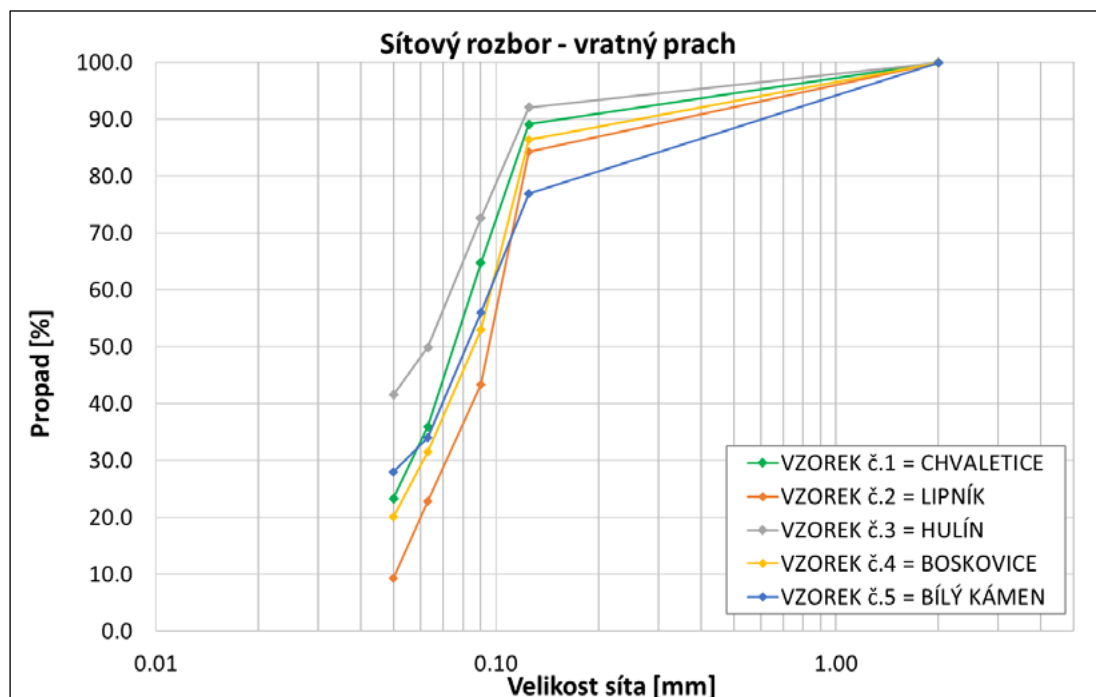
Vzorek	1 Chvaletice	2 Lipník	3 Hulín	4 Boskovice	5 Bílý Kámen
1. měření	7,80	7,85	8,32	8,70	7,63
2. měření	7,47	7,72	8,56	8,62	7,61
Průměr	7,64	7,79	8,44	8,66	7,62

Vzorky vratných prachů sloužící ke stanovení hodnot pH jsou zobrazeny na obrázku 1.



Obrázek 1: Vzorky na měření pH

Zároveň byly na všech vzorcích provedeny zrnitostní rozbor (obrázek 2). U jednotlivých vratných prachů byl pozorován poměrně markantní rozdíl v obsahu jemných částic menších než 63 μm , a to mezi 10 % až 42 %. Při použití do směsných pojiv pro malty se však tento rozdíl eliminoval a při zkoušení jednotlivých malt nebyla zjištěna žádná korelace mezi obsahem jemných částic a pevností v tlaku (viz následující kapitola).



Obrázek 2: Sítový rozbor vratného prachu

Návrh malt pro ŠCM

Dalším bodem výzkumu je návrh malt s obsahem vratného prachu jako plniva pro použití do prolévané podkladní vrstvy šterku částečně vyplněného cementovou maltou. V rámci výzkumu dochází k porovnání standardních zrnitostí kameniva do malt (0/4, 2/4, 0/8 a 2/8) v kombinaci s různým proporcionálním zastoupením vratného prachu (33 %, 50 %, 100 %) a vhodným množstvím pojiva. Jako nosné pojivo byl použit buď samostatně standardní portlandský směsný cement CEM II/B-M(V-LL) 32,5 R, nebo jeho kombinace s úletovým popínkem.

V počátku výzkumu bylo nutné ověřit chování samotného vratného prachu a jeho vlastní pevnostní charakteristiky (jak mechanické, tak popř. chemické). Za tímto účelem bylo zhotoveno několik sad zkušebních těles pro stanovení pevnosti v tlaku, a to pouze z vratných prachů v kombinaci s vodou. U jednotlivých vzorků vratných prachů nebyly při zkoušce zjištěny žádné chemické vazby a nedocházelo k vyššímu nárůstu pevnosti. V rámci návrhu receptur pak bylo stanoveno maximální množství vratného prachu na 33 % hmotnosti. S tímto množstvím vratného prachu byly dále připravovány všechny návrhy malt.

Dalším krokem bylo nutné určit množství cementu pro dosažení dostatečné pevnosti. Předem uvažované hodnoty okolo 5 % však zdaleka nesplňovaly normové požadavky. V rámci dalšího výzkumu proto bylo určeno pro všechny navrhované směsi maximální množství pojiva 33 %. Jednalo se buď o čistý cement, nebo o kombinaci fluidního popínku z elektrárny Poříčí (EPO) a cementu. V rámci finálního návrhu se ukázalo, že EPO nedosahuje dostatečných pevností a při větších dávkovaných množstvích, dohromady v kombinaci s vratným prachem, obsahují výsledné malty příliš mnoho jemných částic a nedosahují požadované pevnosti. Pro finální návrh tak bylo použito vždy 33 % pojiva v podobě portlandského směsného cementu pevnosti 32,5 MPa. Toto množství odpovídá cca 11 % hm. cementu v celé podkladní prolévané vrstvě ŠCM.

Dalším bodem návrhu bylo porovnání vlivu frakce kameniva na pevnost výsledné malty. V rámci výzkumu byly mezi sebou porovnány frakce 0/4 mm a 0/8 mm s frakcemi 2/4 mm a 2/8 mm. Z výsledků bylo odvozeno, že i přes absenci frakce 0/1 mm vychází pevnosti malt bez jemné složky (0/2 mm) lépe než malty s jejím obsahem. Frakce 0/1 mm je v tomto případě nahrazena částicemi vratného prachu. V případě frakcí 0/4 a 2/4 bylo použito kamenivo přímo nadrcené v kamenolomu, zatímco frakce 0/8 a 2/8 byla namíchána z užších frakcí v poměrech dle Fullerovy paraboly. Jako drobné kamenivo byla pro výzkumné účely zvolena moravská droba z lomu v Jakubčovicích nad Odrou.

Součástí projektu je mimo jiné úprava požadavků uvedených v normě ČSN 73 6127-1 *Stavba vozovek – Prolévané vrstvy – Část 1: Vrstva ze šterku částečně vyplněného cementovou maltou*. Jedná se zejména o změnu požadované hodnoty pevnosti malty v prostém tlaku, a to ze 7 MPa na optimální 4 MPa po 28 dnech (tabulka 2). Nově navrhovaná hodnota by měla zvýšit používání této vrstvy převážně pro komunikace nižších tříd a srovnat pevnosti ŠCM s pevnostmi dnes poměrně velmi oblíbené a používané vrstvy při rekonstrukcích komunikací – směsi stmelené cementem SC C_{3/4}.

Další hodnotou, která by mohla být upravena v rámci revize normy ČSN 73 6127-1, je velikost kostry kameniva a s tím spojená maximální velikost zrna kameniva $D_{\max}$. K současným hodnotám by tak mohla přibýt velikost kostry (63/125) a s ní spojené $D_{\max} = 8$ mm pro výplňovou maltu.

Tabulka 2: Požadavky normy ČSN 73 6127-1 na pevnost malty v prostém tlaku R_t

Vlastnost	Požadavek
Konzistence čerstvé cementové malty ¹⁾	130 mm ± 20 mm
Minimální pevnost v prostém tlaku R_t ^{2) 3)}	7 MPa
¹⁾ Zkouší se podle ČSN EN 12350-2. ²⁾ Zkouší se 28denní pevnost na 3 krychlich o hraně 150 mm podle ČSN EN 12390-3. ³⁾ V případě použití pomalu tuhnoucího pojiva je možno zkoušet po 60 dnech.	

Zkušební tělesa pro stanovení pevností malty v tlaku jsou zobrazena na obrázku 3. Výsledky dosažených 7denních pevností v tlaku pro jednotlivé návrhy malt jsou uvedeny v souhrnné tabulce 3. Zeleně jsou vyznačeny hodnoty pevností splňující nově navrhované požadavky na pevnost v tlaku (min. 4 MPa po 28 dnech) již po 7 dnech požadovaného zrání.



Obrázek 3: Zkušební tělesa navržených směsí malt pro stanovení pevnosti v prostém tlaku

Tabulka 2: Pevnosti v prostém tlaku po 7 dnech malty s vratným prachem (VP)

VP [%]	0/4 [%]	2/4 [%]	0/8 [%]	2/8 [%]	ÚP [%]	CEM [%]	Pevnost v tlaku [MPa]
100	0	0	0	0	0	0	0.10
100	0	0	0	0	0	3	0.10
100	0	0	0	0	0	4	0.16
100	0	0	0	0	0	5	0.16
100	0	0	0	0	0	6	0.30
VP [%]	0/4 [%]	2/4 [%]	0/8 [%]	2/8 [%]	ÚP [%]	CEM [%]	Pevnost v tlaku [MPa]
100	0	0	0	0	10	5	0.27
100	0	0	0	0	15	5	0.37
100	0	0	0	0	20	5	0.49
100	0	0	0	0	10	6	0.41
100	0	0	0	0	15	6	0.54
100	0	0	0	0	20	6	0.56
VP [%]	0/4 [%]	2/4 [%]	0/8 [%]	2/8 [%]	ÚP [%]	CEM [%]	Pevnost v tlaku [MPa]
50	0	50	0	0	0	33	4.93
33	0	66	0	0	0	33	6.12
33	66	0	0	0	0	33	3.58
33	0	0	66	0	0	33	5.54
33	0	0	0	66	0	33	5.87
33	0	0	0	66	0	22	4.11
33	0	0	0	66	0	11	2.00

Poznámka: ÚP ... fluidní popílek elektrárny Poříčí (EPO)

Bezprostředně před uzávěrkou podání příspěvku bylo dokončeno stanovení pevnosti v tlaku po 28 dnech zrání. Výsledky pevností navržených směsí zeleně zvýrazněných v tabulce 2 jsou o 10 % až 20 % vyšší než požadovaná hodnota pevností v tlaku 7 MPa v ČSN 73 6127-1.

Pojivo pro stabilizaci zemin v podloží

Součástí výzkumu je návrh směsných pojiv pro úpravu nevhodných zemin v podloží. Aktuálně probíhá fáze návrhu, kdy se stanovují vhodné procentuální podíly vratného prachu, cementu a vápna. Poté budou provedeny zkoušky okamžitého indexu únosnosti IBI, kalifornského poměru únosnosti CBR a zkoušky přímé namrzavosti na zkušebních tělesech z nevhodných zemin.

Přilnavostní přísada a náhrada vápencové moučky

V rámci pokračování výzkumu bude prověřeno použití vratného prachu jako přilnavostní přísady do asfaltových směsí s méně vhodnými kamenivky. Částečná či úplná náhrada standardně používané vápencové moučky při přípravě asfaltových směsí by tak mohla výrazně ušetřit celkové náklady na výrobu směsí. Zahraniční výzkumy uvádí až 30% náhradu vápencové moučky vratným prachem. V rámci výzkumného projektu je předpokládána hodnota maximální náhrady směsným filerem s vratným prachem hodnota 25 % hm. [3]

Vzhledem k počáteční fázi výzkumu zde zatím nebudou publikovány žádná data na toto téma a jedná se pouze o prvotní informaci k nadcházejícím výzkumným pracím.

Závěr

Tento příspěvek má za cíl především informovat o novém výzkumném projektu, který se týká možnosti zpracování vratného prachu pro další použití v pozemních komunikacích. Výzkum aktuálně přechází z první části – návrhu malt pro podkladní vrstvu ze štěrku částečně vyplněného cementovou maltou – do své další části. V té bude zkoumán vliv vratného prachu jakožto přilnavostní přísady a bude prověřena možnost jeho použití jako náhrady za vápencovou moučku při výrobě asfaltových směsí. Výsledky výzkumného projektu, které budou dále publikovány v odborných článcích, by mohly znamenat značnou úsporu při zpracování a transportu přebytečného a těžce zpracovatelného materiálu, kterým vratný prach v současné době je.

Poděkování

Autoři článku děkují projektu TA ČR CL 02000006 Perspektivní podkladní vrstvy pozemních komunikací za finanční podporu, bez které by tento projekt nevznikl.

Zdroje:

- [1] CHesner, W. H., Collins, R. J., Mackay, M. H. 1998. User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction. Federal Highway Administration Research and Technology [online]. USA, , 683 Dostupné z: <https://rosap.nhtl.bts.gov/view/dot/38365>.
- [2] User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction: Baghouse Fine, 2016. Online. In: User Guidelines. Washington, DC: Federal Highway Administration Research and Technology, 03. 08. 2016, s. 3. Dostupné z: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/97148/005.cfm>. [cit. 2025-07-26].
- [3] Sdružení pro výstavbu silnic a APT Servis, 2008. ČSN 73 6127-1, Stavba vozovek – Prolévané vrstvy 0150 Část 1: Vrstva ze štěrku částečně vyplněného cementovou maltou. Praha: Český normalizační institut.
- [4] Usanga, Idorenyin & Imoh, Udeme & Imitini, Elo & Etuke, Julius. (2021). Evaluation of Mechanical Properties of Asphalt- Concrete Using Baghouse Dust as Filler Material. International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology, 6, 609–614.

METODY OPTIMALIZACE ASFALTOVÉHO OMLAZOVACÍHO PROSTŘEDKU A OSMILETÝ ZKUŠEBNÍ ÚSEK V ČESKÉ REPUBLICE

ASPHALT REJUVENATOR OPTIMIZATION METHODS AND AN 8-YEAR-OLD TRIAL SECTION IN THE CZECH REPUBLIC

Shahin Eskandarsefat, Ph.D., Iterchimica S.p.A., Itálie/Italy

Mezi technologiemi, které byly zavedeny a používány v oblasti asfaltových vozovek, žádná z nich neprokázala větší potenciál jak z hlediska užitných vlastností, tak z hlediska přínosu pro životní prostředí než recyklace asfaltové směsi. Proto mnoho silničních úřadů reviduje technické specifikace umožňující opětovné zavedení vysokého obsahu asfaltového R-materiálu (RAP) do nových asfaltových směsí. Pro dosažení tohoto účelu se ukázalo, že omlazovací prostředky hrají klíčovou roli při výrobě vysoce kvalitních a odolných asfaltových materiálů. Tento článek zkoumá účinnost omlazovacího prostředku na přírodní bázi prostřednictvím laboratorní analýzy a dlouhodobé účinnosti in situ v reálném měřítku. S cílem porovnat protokoly optimalizace dávkování tohoto typu přísad zahrnovaly metody laboratorního testování pojiva jak německý přístup (H Rejuv WA; 2021), tak protokol tradičních zkušebních metod a byly ověřeny prostřednictvím zkoušek u asfaltových směsí. Druhá část článku se zaměřuje na sledování stavu zkušebního úseku vybudovaného před 8 lety v České republice. Ve všech třech případech byl zkoumaným asfaltovým pojivem asfalt 50/70. Na základě laboratorních výsledků bylo optimální dávkování omlazovacího prostředku na základě analýzy pojiva vyšší než požadované dávkování stanovené prostřednictvím zkoušek v případě asfaltové směsi. Nicméně podle výsledků zkoušek a šetření in situ přidavek omlazovacího prostředku umožnil výrobu asfaltových směsí s vysokým obsahem R-materiálu (50 %-hm. směsi) se srovnatelnými a v některých případech dokonce lepšími vlastnostmi než referenční směs využívající pouze čerstvý silniční asfalt.

Among the technologies that have been introduced and practiced in the field of asphalt pavements, none of them have shown more potential in both performance properties and environmental benefits than asphalt recycling. Hence, many road authorities have been revising the technical specifications allowing the re-use introduction of high content Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in new asphalt productions. To achieve this purpose, rejuvenators have shown a crucial role in producing high-quality and durable asphalt materials. This paper investigates the efficiency of a bio-based rejuvenator via laboratory analysis and in situ real-scale long-term performance. With the target of comparing the dosage optimization protocols, the binder laboratory testing methods included both German instructions (H Rejuv WA; 2021) and traditional testing methods protocol and verified via mixture-scale tests. The second section of the paper instead is concentrated on the condition monitoring of a trial section constructed 8 years ago in the Czech Republic. In all three cases, bitumen 50/70 was the investigated asphalt binder. Based on the laboratory results, the optimum dosage of the rejuvenator based on the binder analysis was more than the required dosage determined via mixture-scale tests. Nevertheless, according to the tests' results and in-situ investigations, the addition of the rejuvenator allowed the production of high-content (50% RAP) recycled asphalt mixtures with comparable and even in some cases superior performance to the reference virgin counterpart.

Úvod

Jak dokládá řada analýz životního cyklu (LCA), recyklace asfaltových směsí se ukázala jako nejdůležitější technika pro snížení uhlíkové stopy tohoto typu výrobku. Ve skutečnosti dnes hraje ve většině národních akčních plánech na snížení emisí uhlíku klíčovou roli zvýšení podílu asfaltového R-materiálu ve výrobě nové asfaltové směsi. Existují však některé technické překážky, včetně omezení v obalovnách. Laboratorní i praktické zkušenosti ukazují, že vyšší podíl asfaltového R-materiálu vyžaduje použití paralelního bubnu [1], aby se zvýšila úroveň difúze asfaltového pojiva mezi starým a novým pojivem. Ale to není vše. Podle literatury jsou pro recyklaci tvrdého zoxidovaného pojiva v R-materiálu na zajištění trvanlivosti asfaltové směsi s R-materiálem klíčové také rejuvenační přísady [2]. Z technického hlediska je přítomnost těchto přísad nezbytná pro směsi s vysokým obsahem R-materiálu, které v zásadě obsahují méně čerstvého pojiva přidaného do směsi. V tomto případě by použití měkkého pojiva nestačilo k dosažení celkových požadavků na pojivo stanovených ve specifikaci. Za tímto účelem bylo dosud do oblasti asfaltových vozovek zavedeno mnoho oživovacích přísad

různého původu. Hlavními materiály, které byly zavedeny a stále se používají, jsou odpadní rostlinný olej (WV Oil), odpadní rostlinný tuk (WV Grease), organický olej, destilovaný tálový olej, aromatický extrakt a odpadní motorový olej (WEO) [3]. Každá z těchto přísad, která má odlišnou chemickou povahu, může v různé míře přispívat k recyklaci asfaltového pojiva, a proto je lze nazvat recyklačními přísadami pro asfaltové pojivo. Mechanismus působení v matrici asfaltového materiálu však může být odlišný. Technicky jsou podle literatury tyto přísady klasifikovány buď jako fluxační činidla (změkčovadla), nebo jako omlazovače/oživovače. Fluxové oleje jsou recyklační činidla, která ovlivňují pouze fyzikální a reologické vlastnosti pojiva, zatímco omlazovače asfaltu jsou přísady, které kromě fyzikálních vlastností dokážou obnovit některé chemické vlastnosti zestárlého asfaltu a přiblížit jej tak určitým způsobem k původnímu nezestárlému stavu [4]. Různé mechanismy působení byly prokázány mnoha výzkumnými pracemi, ale pravděpodobně jednou z nejpodrobnějších je studie BRRC, která definuje chemickou reakci recyklačních činidel ve 3 různých režimech [5]. V této souvislosti a na základě těchto nejnovějších poznatků definovala Evropská asociace pro asfaltové vozovky (EAPA) přísady pro recyklaci asfaltových směsí a odlišila omlazovače od všech ostatních zavedených přísad. Dle EAPA [6]: „Přísada pro recyklaci asfaltu je tvořena skupinou produktů používaných při výrobě asfaltových směsí obsahujících asfaltový R-materiál, které působí na zestárlé asfaltové pojivo a pomáhá splnit požadavky/specifikace definované pro pojivo a asfaltových směsí. Termín „omlazovač/oživovač“ se často používá pro označení některých z těchto produktů.“

Kromě typů přísad pro recyklaci asfaltu představovaly pro technologie asfaltových směsí výzvu také správné metody optimalizace dávkování. Za tímto účelem bylo zavedeno několik návrhových tabulek a podrobných postupů, které se zaměřují hlavně na zkoušky pojiva. Mezi zavedenými metodami představují nejčastěji používanou praxi protokol RILEM [7] a v poslední době také německá metodika (H Rejuv WA; 2021) [8]. Německá metodika je ve srovnání s protokolem RILEM komplexnější a zahrnuje také zkoušku u asfaltové směsi, často se uvádí primárně odpovídající dávkování vztažené k asfaltovému pojivu [9]. Jelikož konečným produktem je vždy asfaltová směs, a ta bude vystavena účinkům dopravního zatížení a klimatickým vlivům, vždy se doporučuje provést závěrečnou kontrolu vlastností asfaltové směsi.

Za tímto účelem je hlavním cílem tohoto článku představit laboratorní výsledky projektu, kde se použila asfaltová směs s obsahem 50 % R-materiálu a oživovací přísadou na přírodní bázi. Cílem bylo porovnat výsledky získané použitím německé metodiky s výsledky směsi ze zkušebního úseku, který byl realizován v roce 2017. U tohoto zkušebního úseku byla použita stejná oživovací přísada, ale jeho množství bylo optimalizováno pomocí jiných zkušebních protokolů. Veškeré informace o tomto pokusu byly uvedeny v článku publikovaném v roce 2023 [10].

Použité materiály

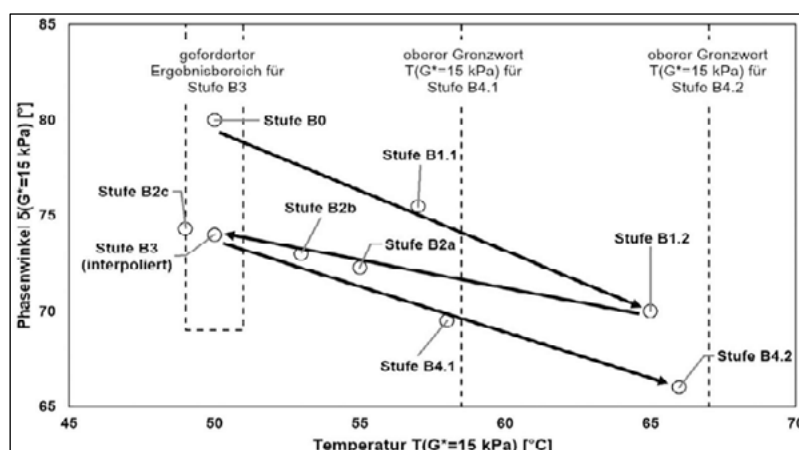
Přidáváním asfaltovým pojivem použitým v laboratoři i v rámci zkušebního úseku byl silniční asfalt gradace 50/70, dodávaným různými rafinériemi v Německu a v České republice. Souhrn určujících charakteristik pojiva lze nalézt v části výsledky a analýza. Oživovací přísadou použitou v této studii je látka na přírodní bázi, která se v jiných výzkumných pracích ukázala jako účinná z hlediska vlivu na fyzikální i chemické vlastnosti zestárlého asfaltu [10]. Některé vlastnosti této přísady jsou shrnuty v tabulce 1.

Tabulka 1: Některé z typických vlastností oživovací přísady

Vlastnost	Jednotka	Hodnota/údaj
Barva	–	Black
Viskozita @25 °C	cP	750–950
Bod vzplanutí	°C	≥ 215
Hustota @25 °C	g/cm ³	0,90–1,00

Zkušební metody

Jak bylo uvedeno v cílech, tento příspěvek se zaměřuje na laboratorní analýzu a představení zkušební úseku s použitím stejné oživovací přísady a množství asfaltového R-materiálu. Podle laboratorní analýzy byly v souladu s německou metodikou (H Rejuv WA; 2022) použity zkušební metody BTSV dle normy EN 17643 před a po krátkodobém stárnutí metodou RTFOT podle normy EN 12607-1 a po dlouhodobém stárnutí v tlakové nádobě PAV podle normy EN 14769. Obrázek 1 znázorňuje postup testování. Jak je patrné, první krok je věnován stavům čerstvého pojiva (Stufe B0), jakož i krátkodobě a (Stufe B1.1) dlouhodobě zestárnutého pojiva (Stufe B1.2). Následně se k dlouhodobě zestárnutému asfaltu přidají tři různé dávky (Stufe 2a – Stufe 2c) oživovací přísady a podle toho se stanoví optimální dávka. Poté se omlazené asfaltové pojivo nechá stárnout a porovná se s původním asfaltem, aby se ověřila správnost zvoleného dávkování.



Obrázek 1: Postup optimalizace dávkování oživovací přísady dle metodiky H Rejuv WA; 2022

Kromě analýzy provedené s pomocí DSR se dále zkontroluje dávkování vybrané oživovací přísady pomocí trámečkového průhybového reometru (BBR) podle evropské normy EN 14771. Tato další zkouška má potvrdit vhodnost dávkování zejména pro vozovky realizované v chladnějším klimatu.

Vybrané dávkování oživovací přísady musí být ověřeno pomocí zkoušek provedených na asfaltové směsi, včetně sledování vlastností a chování v oboru nízkých teplot podle normy EN 12697-46, stanovení odolnosti proti únavě podle normy EN 12697-24 a stanovení odolnosti proti trvalé deformaci podle normy EN 12697-22. V metodice předepsaná směs, která má být vyrobena pro analýzu směsi, musí být hutný asfaltový beton s maximálním zrnem 8 mm obsahující 50 % R-materiálu, který bude porovnán s asfaltovou směsí bez obsahu R-materiálu. Pokud jde o vlastní R-materiál, je třeba poznamenat, že byl uměle vyroben podle metody stárnutí asfaltové směsi TU Braunschweig [11]. Za tímto účelem byla po 4 hodinách krátkodobého stárnutí při teplotě 135 °C stárnutá směs uchovávána v sušárně s nucenou cirkulací vzduchu po dobu 96 hodin při teplotě 80 °C. Tento zvolený postup dle aktuálně platné německé metodiky se samozřejmě nevztahuje na zkušební úsek navržený a realizovaný v roce 2017.

Výsledky a diskuse

Optimalizace dávkování oživovací přísady

Jako jeden z hlavních cílů této studie byly při analýze pojiva použity jak německá metodika (H Rejuv WA; 2022), tak tradiční zkušební postupy, aby se otestovala proveditelnost metod optimalizace dávkování oživovací přísady pro R-materiál. Tabulka 2 shrnuje výsledky získané použitím metodiky H Rejuv WA. Jako výchozí bod bylo na základě technického listu aditiva vybráno 5,5 %-hm. přísady v pojivu a poté analýza pokračovala s většími dávkami, až byly získány požadované hodnoty srovnatelné s referenčním silničním asfaltem. Jak je patrné z výsledků reologických zkoušek na DSR, 7 % oživovací přísady umožnilo obnovení zestárnutého asfaltu do stavu, který odpovídal čerstvému pojivu. Dávkování bylo poté zkontrolováno pomocí zkoušek pro nízkoteplotní chování pojiva s využitím BBR. Podle naměřených hodnot přidaných 7 %-hm. přísady v pojivu překonalo hodnoty v oboru nízkých teplot a vedlo k docílení nižší tuhosti při nízkých teplotách. Tato skutečnost se již potvrdila i v jiných studiích [12] používajících stejný typ oživovací přísady. V tomto případě se tak konečné ověření

dávkování posoudí pomocí zkoušek provedených u asfaltové směsi, protože konečným produktem bude asfaltová vrstva a její chování za běžného provozu.

V dalším kroku bylo analyzováno stejné asfaltové pojivo pomocí tradičních zkušebních metod s použitím 5 %-hm. a 7 %-hm. stejné oživovací přísady. Stejně dávkování a třídy materiálů použité v obou metodách umožnily porovnatelnou interpretaci výsledků. Jak je uvedeno v tabulce 3, 7 %-hm. oživovací přísady vedlo ke stejnému bodu měknutí a relativně podobné penetraci jako u referenčního asfaltu. Pokud jde o viskozitu, výsledky ukázaly nárůst o 12 % ve srovnání s referenčním asfaltem.

Z jiného úhlu pohledu, při srovnání výsledků před a po stárnutí, je patrné, že ve srovnání s referenčním asfaltem je použitá přísada méně náchylná ke stárnutí a po stárnutí vykazuje nižší tuhost. Na základě těchto výsledků lze dojít k závěru, že přibližně 7 %-hm. (nebo méně) přísady v pojivu by bylo technicky optimální dávkování na základě obou použitých optimalizačních protokolů.

Tabulka 2: Výsledky zkoušek provedených u asfaltového pojiva dle H Rejuv WA; 2022 – zdroj asfaltového pojiva I

Zkušební krok	Materiál Asfalt 50/70, zdroj I	Sledovaný parametr			
		T °C (G* = 15 kPa)	Fázový úhel	T °C (S = 300 MPa)	T °C (m = 0.3)
B0	nezestárnutý stav	49	82.1	-16.5	-18.7
B1.1.	krátkodobě zestárnuté pojivo	54.5	80.0	-	-
B1.2.	dlouhodobě zestárnuté pojivo	65	75.6	- 14.3	- 13.9
B2a	dlouhodobě zestárnuté + 5,5 % přísady	52	79.9	-	-
B2b/c	dlouhodobě zestárnuté + 7,0 % přísady	49	79.0	-23.1	-22.3
B3	Bylo zvoleno dávkování 7,0 %				
B4.1.	krátkodobě zestárnuté B 2b/c*	52.5	76.7	-	-
B4.1.	dlouhodobě zestárnuté B 2b/c*	65.5	73.5	-19.3	-15.4

* V souladu s H Rejuv WA; 2022, viz obrázek 1.

Tabulka 3: Výsledky zkoušek provedených u asfaltového pojiva se zaměřením na vybrané tradiční zkušební metody – zdroj asfaltového pojiva II

Zkušební krok	Materiál Asfalt 50/70, zdroj II	Sledovaný parametr		
		Penetrace (dmm)	Bod měknutí (°C)	Viskozita @ 135 °C (c.P)
B0	nezestárnutý stav	55,5	51,7	653
B1.1.	krátkodobě zestárnuté pojivo	35,2	57,8	990
B1.2.	dlouhodobě zestárnuté pojivo	19,3	67,4	1996
B2a	dlouhodobě zestárnuté + 5,5 % přísady	46,6	54,3	1151
B2b/c	dlouhodobě zestárnuté + 7,0 % přísady	54,1	52,7	821
B3	Bylo zvoleno dávkování 7,0 %			
B4.1.	krátkodobě zestárnuté B 2b/c*	33,6	54,9	1038
B4.1.	dlouhodobě zestárnuté B 2b/c*	22,1	67,7	2250

*V souladu s H Rejuv WA; 2022, viz obrázek 1.

Validace dávkování oživovací přísady**Objemové vlastnosti**

První fáze analýzy asfaltové směsi byla věnována objemovým vlastnostem testované směsi v porovnání s referenční asfaltovou směsí bez obsahu R-materiálu. Tabulka 4 shrnuje získané výsledky. Ty ukazují, že posuzovaná asfaltová směs vykazovala podobné hodnoty jako referenční směs a ani vysoký obsah R-materiálu, nesnížilo zhutnitelnost asfaltové směsi.

Tabulka 4: Shrnutí volumetrických vlastností

Sledovaná vlastnost	Norma	Jednotka	Referenční směs	Testovaná směs (50 % R-materiálu) + 7,0% oživovací přísady
Přidávané čerstvé pojivo	-	%	5,8	3,33
Obsah pojiva v R-materiálu	-	%	0,0	2,30
Množství oživovací přísady	-	%	0,0	0,15
Zhutněná objemová hmotnost*	EN 12697-8	g/cm ³	2,526	2,534
Mezerovitost*	EN 12697-8	%	2,0	1,8

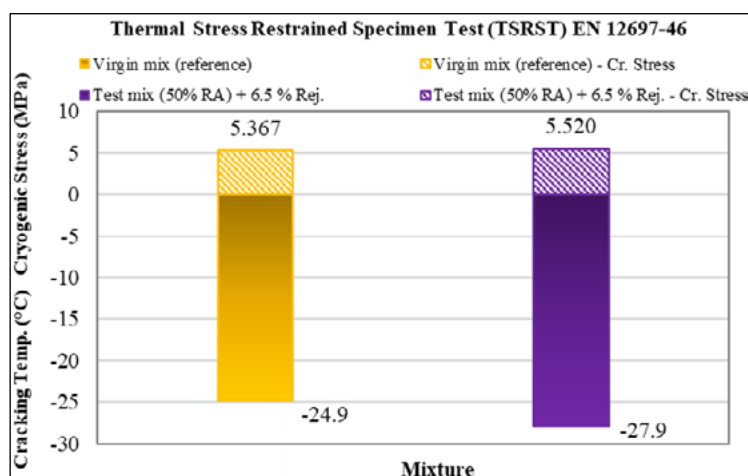
*Zkušební tělesa hutněná rázovým zhuťovačem – 2x50 úderů pro každé zkušební těleso.

Vlastnosti v oboru nízkých teplot

S ohledem na hlavní technické problémy spojené s asfaltovými směsmi s vysokým obsahem R-materiálu byla analýza směsí zaměřena na jejich odolnost vůči účinkům vody a na chování v oboru nízkých teplot. Posuzované směsi obsahovaly 50 % uměle vyrobeného R-materiálu dle dříve uvedeného laboratorního protokolu TU Braunschweig.

Zkouška odolnosti vůči účinkům vody byla provedena na zkušebních tělesech zhutněných 50 údery Marshallova pěchu a byla vyhodnocena pomocí pevnosti v příčném tahu a charakteristiky ITSR v souladu s EN 12697-12. Na základě zaznamenaných hodnot bylo dosaženo hodnoty ITSR = 98 % pro referenční směs a 96 % pro asfaltovou směs s obsahem R-materiálu. V tomto případě obě směsi splnily minimální požadavek technických specifikací, který je 80 %, a prokázaly vysokou odolnost vůči účinkům vody.

Posouzení chování v oboru nízkých teplot bylo provedeno na trámcích vyřezaných ze zkušebních desek, a to s použitím zkušební metody TSRST podle normy EN 12697-46. Obrázek 2 ukazuje získané výsledky této zkoušky.

**Obrázek 2: Vlastnosti posuzovaných směsí v oboru nízkých teplot**

Výsledky ukazují, že asfaltová směs s obsahem R-materiálu z hlediska charakteristik zkoušky TSRST překonala referenční směs. Současně vykázala podobné výsledky, pokud jde o odolnost proti účinkům vody, přičemž v obou případech byly splněny požadavky technických specifikací. Porovnáním výsledků na úrovni směsi s výsledky na úrovni pojiva však lze vidět, že v obou případech je zaznamenána nižší tuhost, což souvisí s nadměrným dávkováním přísady (6,5 %-hm. zestárnutého asfaltu) použitým pro asfaltovou směs s R-materiálem. Tento rozdíl v dávkách mezi dvěma fázemi stanovení optimální dávky je způsoben dvěma technickými důvody: (a) rozdílem v úrovni stárnutí, které je dosaženo během simulací stárnutí pojiva a směsi v laboratoři, a (b) nepoužitím krátkodobého stárnutí u asfaltové směsi obsahující 50 %-hm. R-materiálu v laboratoři před zhutněním zkušebních těles. Ve skutečnosti je asfalt v případě testování čistě asfaltového pojiva vystaven jak stárnutí RTFOT, tak stárnutí PAV, což je odlišné od stárnutí asfaltové směsi v sušárně při 80 °C během simulované výroby R-materiálu (v tomto případě metodou TU Braunschweig). Podle normy AASHTO R 30-2 z roku 2015 musí být čerstvě vyrobená směs v laboratoři uchovávána v sušárně buď po dobu 2 hodin při teplotě hutnění, nebo po dobu 4 hodin při teplotě 135 ± 3 °C.

Nedostatek v optimalizaci oživovací přísady při jejím dávkování k zestárnutému asfaltu na základě zkoušek pojiva byl popsán v několika výzkumných pracích [12–14], kde bylo opakovaně zjištěno nadměrné dávkování. Proto se vždy doporučovalo potvrdit takto odvozené dávkování pomocí zkoušek u asfaltové směsi. Tento krok nemá vést k omezení použití oživovacích přísad, naopak určujícím hlediskem je posouzení přijatelnosti množství přísady, pokud její dávkování bylo optimalizováno pomocí zkoušek provedených na asfaltovém pojivu.

Analýza u zpětně získaného asfaltového pojiva

Aby bylo možné porovnat výsledky prvotní analýzy pojiva s výsledky zkoušek provedených u asfaltové směsi a aby bylo možné ověřit přesnost zvoleného dávkování, byla testována pojiva zpětně získaná z referenční asfaltové směsi a posuzované směsi s obsahem R-materiálu. Na základě výsledků shrnutých v tabulce 5 je patrné, že v souladu s výsledky zkoušek provedených u směsi bylo zvolené dávkování nadměrné, než bylo technicky nutné pro oživení zestárnutého pojiva. Toto nadměrné dávkování (7,0 %-hm.) vedlo k lepší výkonnosti směsi s R-materiálem v porovnání s referenční směsí a mohlo mít také vliv na další vlastnosti. Je však třeba poznamenat, že R-materiál použitý pro asfaltovou směs s 50 % tohoto materiálu byl vyroben uměle a nejedná se o reálně oxidovaný R-materiál získaný v místě konkrétní vozovky. Pokud by tedy byl použit v reálném měřítku získaný R-materiál (res. znovuzískaná asfaltová směs), byl by docílený rozdíl menší.

Tabulka 5: Shrnutí výsledků vlastností sledovaných u asfaltových směsí

Zpětně získané pojivo	Posuzovaný parametr			
	T při $G^* = 15$ kPa (°C)	Fázový úhel při $G^* = 15$ kPa	T při $S = 300$ MPa (°C)	T při $m = 0.3$ (°C)
Referenční směs	50,8	77,3	-26,4	-24,4
Posuzovaná směs (50% R-mat.) + 6,5 % oživovací přísady	45,8	77,8	-29,0	-31,0

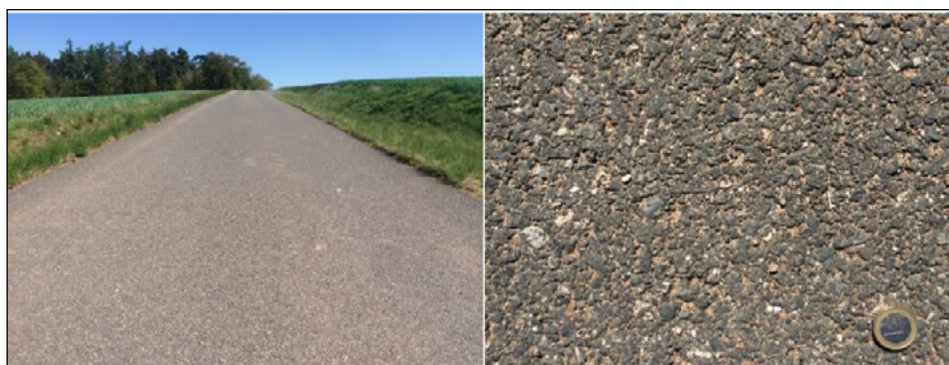
Osmiletý zkušební úsek v České republice

Oživovací přísada diskutovaná v tomto příspěvku byla použita a dále analyzována na zkušebním úseku v České republice v roce 2017. Vyrobená a položená asfaltová směs s R-materiálem a základní informace o vozovce zkušebního úseku jsou shrnuty v dále uvedených bodech:

- Lokalita: Siřem, Blšany, v blízkosti silnice III. třídy (III/2218)
- Rok realizace: 2017
- Typ komunikace: Místní účelová komunikace
- Ty asfaltové směsi: AC 11 mm
- Typ vrstvy: obrušná
- Silniční asfalt: 50/70
- Podíl R-materiálu v asfaltové směsi: 50 %
- Penetrace zestárnutého pojiva: 25 dmm
- Bod měknutí zestárnutého pojiva: 60 °C

- Oživovací přísada: ITERLENE ACF 2000
- Dávkování přísady: 3,75 % (vztaženo k hmotnosti zestárnutého asfaltu)

Veškeré informace týkající se tohoto projektu byly zdokumentovány v samostatné publikaci dostupné online [10]. Pokud jde o optimalizaci množství oživovací přísady, tak na základě výzkumu na VUT v Brně byl vyvinut nástroj pro odhad dávkování rejuvenátoru na základě složení asfaltové směsi a vlastností zestárnutého pojiva v R-materiálu. Nástroj je k dispozici online na webové stránce Rejuvenator [15]. S ohledem na výše uvedené údaje bylo pomocí tohoto nástroje odhadnuto dávkování 4,5 % pro zkušební úsek. Toto nižší množství oživovací přísady v porovnání s výše uvedenými poznatky je přičítáno nižší hodnotě bodu měknutí (60 °C) a vlastnostem použitého silničního asfaltu 50/70. Podle monitorování stavu vozovky v roce 2024 byla realizovaná vozovka technicky v dobrém stavu, bez výskytu teplotně indukovaných trhlin nebo trvalé deformace způsobené pojezdy těžkých zemědělských strojů. Obrázek 3 ukazuje úsek a jeho texturu po 8 letech v reálných podmínkách.



**Obrázek 3: Zpevněný recyklovaný materiál po 8 letech v květnu 2025.
Měřítka mince 1 euro = 23,35 mm**

Shrnutí

Vzhledem k průběžně rostoucímu zájmu o udržitelnost asfaltových vozovek a snižování uhlíkové stopy se stále větší pozornost věnuje zvyšování úrovně recyklace. Z technického hlediska však není recyklace asfaltových vrstev s použitím měkčího pojiva proveditelná, protože tyto směsi obsahují malé množství čerstvého pojiva. Dále platí, že nelze v některých případech aktivovat extrémně zestárnutý R-materiál obsahující tvrdý degradovaný asfalt a přidáním nového pojiva zaručit požadované technické vlastnosti. Tento článek zkoumal proveditelnost německé technické metodiky pro optimalizaci množství oživovacích přísad dávkovaných k zestárnutému asfaltu a představil zkušební úsek realizovaný před 8 lety v České republice, který byl optimalizován pomocí jiných metod a úvah. V obou případech směs obsahovala 50 %-hm. R-materiálu, byl použit stejný typ oživovací přísady a stejný typ přidávaného asfaltu. Podle této studie a v souladu s existující literaturou lze zdůraznit následující aspekty:

- Dávkování stanovené podle zkoušek asfaltového pojiva v souladu s německou metodikou bylo vyšší než dávkování požadované na základě provedených zkoušek asfaltové směsi.
- Jak konvenční metody (penetrace, bod měknutí, viskozita), tak analýza pomocí DSR ukázaly podobné výsledky při optimalizaci dávkování oživovací přísady pojiva. V obou případech však byly stanovené dávky vyšší než dávky požadované na základě zkoušek asfaltové směsi. Tento rozdíl je přičítán (a) odlišné úrovni stárnutí pojiva a směsi během simulované výroby zestárnutého pojiva a R-materiálu, (b) absenci krátkodobého stárnutí směsi během výroby zkušebních těles asfaltové směsi s R-materiálem.
- Na základě stavu zkušebního úseku vozovky po 8 letech od její pokládky vykazovala posuzovaná oživovací přísada slibné výsledky pro výrobu asfaltových směsí s vysokým podílem R-materiálu. Během monitorování stavu vozovky odborníky nebyla zjištěna přítomnost trvalé deformace nebo trhlin.

Zdroje:

- [1] Shao, H., Sun, L., Liu, L., You, Z., Yang, X. (2017). A novel double-drum mixing technique for plant hot mix asphalt recycling with high reclaimed asphalt pavement content and rejuvenator. Constr Build Mater. 134, pp. 236-244, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.077>

- [2] Loise, V., Oliviero Rossi, C., Venturini, L., Eskandarsefat, S., Sangalli, L. (2019). Rejuvenating vs. softening agents; a rheological and microscopic study. The proceedings of the first Macedonian road congress, Skopje, North Macedonia
- [3] Zaumanis, M., B. Mallick, R., et al. (2014). Influence of six rejuvenators on the performance properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binder and 100% recycled asphalt mixtures. *Constr Build Mater.* 71, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.073>
- [4] Caputo, P., et. al., (2020). Towards advances in differentiating recycling agents: softening agents vs. rejuvenating agents. 7th E&E Congress Eurashalt & Eurobitume (virtual).
- [5] De Bock, L., Pierard, N., Vansteenkiste, S., Vanelstraete, A. Classification et analyse des produits régénérants pour la réutilisation des enrobés. Centre de recherches routières, https://brrc.be/sites/default/files/2020-05/dossier21_en.pdf
- [6] European Asphalt Pavement Association (EAPA). The Circular Economy of Asphalt. EAPA Technical Review (2022) 34 pages. <https://eapa.org/download/15684/>
- [7] Hugener M. et al. (2022). Recommendation of RILEM TC 264 RAP on the evaluation of asphalt recycling agents for hot mix asphalt. *Materials and Structures* 55, <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01837-0>
- [8] FGSV 753. Hinweise zur Anwendung von Rejuvenatoren bei der Wiederverwendung von Asphalt. HRe WA, Ausgabe 2022. Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe, Asphaltbauweisen. ISBN 978-3-86446-332-7
- [9] CEN. EN 17643:2022, Bitumen and Bituminous Binders — Determination of Equi shear Modulus Temperature and Phase Angle Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)—BTSV Test. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2022.
- [10] Eskandarsefat, S., Ciarlitt, A., Baccellieri, L. (2023). Hot asphalt recycling with high reclaimed asphalt content: the case studies in Spain and in Czech Republic. Proceedings of AV 23 Conference Asphalt Pavements, Ceske Budějovice, Czech Republic.
- [11] CEN/TS 12697-52:2017, Bituminous mixtures - Test methods, Part 52: Conditioning to address oxidative ageing PD. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2017.
- [12] Büchner, J., et. al., (2023). Rheological characterisation of rejuvenator blending lines, *Road Mater. Pavement Des.*, <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2023.2180994>
- [13] Handle, F. (2014). Unraveling the bitumen microstructure – towards a new understanding of bitumen ageing. Doctoral thesis, Vienna University of Technology.
- [14] Koudelka, T., Coufalik, P., Fiedler, J., Coufalikova, I., Varaus M., Yin F. (2019). Rheological evaluation of asphalt blends at multiple rejuvenation and aging cycles, *Road Materials and Pavement Design*, <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2019.1588150>
- [15] Setting the optimal dosage for rejuvenator available online at <http://web.rejuvenator.eu/>

ASPHALT REJUVENATOR OPTIMIZATION METHODS AND AN 8-YEAR-OLD TRIAL SECTION IN THE CZECH REPUBLIC

METODY OPTIMALIZACE ASFALTOVÉHO OMLAZOVACÍHO PROSTŘEDKU A OSMILETÝ ZKUŠEBNÍ ÚSEK V ČESKÉ REPUBLICE

Shahin Eskandarsefat, Ph.D., Iterchimica S.p.A. Italy

Among the technologies that have been introduced and practiced in the field of asphalt pavements, none of them have shown more potential in both performance properties and environmental benefits than asphalt recycling. Hence, many road authorities have been revising the technical specifications allowing the re-use introduction of high content Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in new asphalt productions. To achieve this purpose, rejuvenators have shown a crucial role in producing high-quality and durable asphalt materials. This paper investigates the efficiency of a bio-based rejuvenator via laboratory analysis and in situ real-scale long-term performance. With the target of comparing the dosage optimization protocols, the binder laboratory testing methods included both German instructions (H Rejuv WA; 2021) and traditional testing methods protocol and verified via mixture-scale tests. The second section of the paper instead is concentrated on the condition monitoring of a trial section constructed 8 years ago in the Czech Republic. In all three cases, bitumen 50/70 was the investigated asphalt binder. Based on the laboratory results, the optimum dosage of the rejuvenator based on the binder analysis was more than the required dosage determined via mixture-scale tests. Nevertheless, according to the tests' results and in-situ investigations, the addition of the rejuvenator allowed the production of high-content (50% RAP) recycled asphalt mixtures with comparable and even in some cases superior performance to the reference virgin counterpart.

Mezi technologiemi, které byly zavedeny a používány v oblasti asfaltových vozovek, žádná z nich neprokázala větší potenciál jak z hlediska užitných vlastností, tak z hlediska přínosu pro životní prostředí než recyklace asfaltu. Proto mnoho silničních úřadů reviduje technické specifikace umožňující opětovné zavedení vysokého obsahu regenerovaného asfaltu (RAP) do nových asfaltových výrob. Pro dosažení tohoto účelu se ukázalo, že omlazovací prostředky hrají klíčovou roli při výrobě vysoce kvalitních a odolných asfaltových materiálů. Tento článek zkoumá účinnost omlazovacího prostředku na biologické bázi prostřednictvím laboratorní analýzy a dlouhodobé účinnosti in situ v reálném měřítku. S cílem porovnat protokoly optimalizace dávkování zahrnovaly metody laboratorního testování pojiva jak německý návod (H Rejuv WA; 2021), tak protokol tradičních testovacích metod a byly ověřeny prostřednictvím testů v měřítku směsi. Druhá část článku se místo toho soustředí na sledování stavu zkušebního úseku vybudovaného před 8 lety v České republice. Ve všech třech případech byl zkoumaným asfaltovým pojivem asfalt 50/70. Na základě laboratorních výsledků bylo optimální dávkování omlazovacího prostředku na základě analýzy pojiva vyšší než požadované dávkování stanovené prostřednictvím zkoušek v měřítku směsi. Nicméně podle výsledků zkoušek a šetření in-situ přídavek omlazovacího prostředku umožnil výrobu recyklovaných asfaltových směsí s vysokým obsahem (50 % RAP) se srovnatelnými a v některých případech dokonce lepšími vlastnostmi než referenční protějšek z panenského asfaltu.

Introduction

Attested by many Life Cycle Analysis (LCA), asphalt recycling has shown to be the most important technique for reducing the asphalt carbon footprint. In fact, within most of the carbon reduction national action plans, increasing the level of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in the new asphalt productions plays a key role. However, there are some technical obstacles, including limitations within asphalt plants. As a matter of fact, both laboratory and practical experience show that higher level of recycled asphalt requires double drum [1] to enhance the level of asphalt binder diffusion between the aged and new binders. But this is not all. According to the literature, asphalt recycling agents are also crucial for recycling the hard oxidized binder of the RAP and ensuring the durability of recycled asphalt pavement [2]. Technically, the presence of recycling agents becomes necessary for high RAP content mixtures, which basically contain less fresh bitumen added to the mix. In this case, the use of softer binder would not be sufficient to achieve the overall binder requirements of the specification. To this end, many recycling agents of different sources have so far been introduced into the field of asphalt pavements. The main materials that have been introduced and still used are Waste Vegetable Oil (WV Oil), Waste

Vegetable Grease (WV Grease), organic oil, distilled Tall oil, Aromatic Extract, and Waste Engine Oil (WEO) [3]. Each of these additives, of a different chemical nature, can act to a different extent in enabling asphalt recycling and can therefore be called an asphalt recycling agent. However, the mechanism of action in the asphalt material matrix may be different. Technically, according to the literature, asphalt recycling agents are classified as flux oils (softeners) and rejuvenators. Flux oils are those recycling agents that only impact on the physical and rheological properties of bitumen, while asphalt rejuvenators refer to those additives that, in addition to physical properties, are able to restore some chemical properties of aged bitumen, bringing it closer in some way to the virgin un-aged state [4]. The different mechanisms of action have been demonstrated by many research works, but probably one of the most detailed is that reported by BRRC, which defines the chemical reaction of recycling agents in 3 different modes [5]. In this context and based on these recent findings, the European Asphalt Pavement Association (EAPA) has defined recycling agents and distinguished rejuvenators from all other introduced additives. According to EAPA [6] "Asphalt Re-use / Recycling agent: family of products used in the manufacturing of asphalt mixes containing reclaimed asphalt to act on the aged bituminous binder and help to meet the requirements/specifications of binder and asphalt mixes. The term "Rejuvenator" has often been used to refer to some of these products."

Besides the types of recycling agents, the proper methods of dosage optimization have also been a challenge for asphalt material designers. For this purpose, several design fellow charts and detailed procedures were introduced, focusing mainly on binder-scale tests. Among the introduced methods, the RILEM protocol [7] and more recently the German instruction (H Rejuv WA; 2021) [8] represent the most applied practice. Although, compared to the RILEM protocol, the German instruction is more comprehensive and includes the mixture-scale test, additional dosage in its binder-scale phase has often been reported [9]. Therefore, since the asphalt mixture will be the end product that shall perform under load and climatic stresses, a final check on mixture properties is always recommended.

To this end, the main objective of this paper is to present the laboratory results of a project that used recycled asphalt mixture containing 50% RAP and a bio-based rejuvenator. The objective was to compare the results obtained by applying the German instruction with the material results of a trial section, which was constructed in 2017. In this trial section, the same rejuvenator was used, but was optimized with other protocols. All information on this trial was provided in the paper published in 2023 [10].

Materials

The asphalt binder used in both laboratory and trial section was a paving grade bitumen 50/70, but supplied by different refineries in Germany and Czech Republic. Full characterizations can be found in the results and analysis section. The rejuvenator used in this study is a bio-based rejuvenator, which has been shown through other research works to be effective on both the physical and chemical properties of aged bitumen [10]. Some of the rejuvenator properties are summarized in Table 1.

Table 1: Some of the given properties of the rejuvenator

Property	Unit	Value/aspect
Colour	-	Black
Viscosity @25°C	cP	750 - 950
Flash point	°C	≥ 215
Density @25°C	g/cm ³	0.90-1.00

Methods

As was introduced in the objectives, this paper included a laboratory analysis and introduction of a trial section using the same rejuvenator and amount of reclaimed asphalt. As per laboratory analysis, following the German instruction (H Rejuv WA; 2022), the testing methods applied were BTSV, according to EN 17643 before and after short-term aging via Rolling Thin Film Ovens (RTFOT), according to EN 12607-1 and long-term aging via Pressure Aging Vessel (PAV) according to EN 14769. Figure 1 shows the testing procedure. As can be seen, the first step is dedicated to virgin (Stufe B0), short-term (Stufe B1.1), and long-term (Stufe B1.2) ageing states. Subsequently, three different dosages (Stufe 2a – Stufe 2c) of the rejuvenator are added to the long-term aged bitumen and the optimum dosage is defined accordingly. Then, the rejuvenated bitumen is aged and compared with the virgin bitumen to validate the selected dosage.

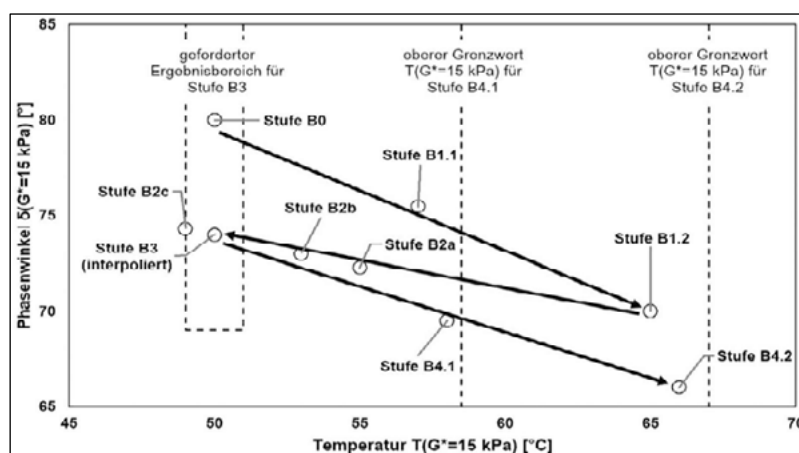


Figure 1: Rejuvenator dosage optimization procedure according to H Rejuv WA; 2022

In addition to the DSR analysis, the dosage of the selected rejuvenator is then checked via Bending Beam Rheometer (BBR), according to the European standard EN 14771. The test confirms the dosage especially for cold climate pavements.

The selected dosage of the rejuvenator shall be validated through mix-scale tests, including low-temperature properties according to EN 12697-46, resistance to fatigue, according to EN 12697-24, and resistance to permanent deformation according to EN 12697-22. The prescribed mixture to be produced for the mixture analysis shall be an 8 mm dense-graded asphalt concrete containing 50% RAP to be compared with the totally virgin mixture. As far as the RAP material is concerned, it should be noted that RAP was artificially produced following the TU Braunschweig mixture aging method [11]. For this purpose, after 4 hours of short-term aging at 135°C, the aged mixture was kept in an oven for 96 hours at 80 °C. Of course, this does not refer to the trial section introduced and built in 2017.

Results and analysis

Rejuvenator dosage optimization

As one of the main objectives of this study, both German instruction (H Rejuv WA; 2022) and traditional methods were applied during the binder analysis to test the viability of asphalt rejuvenator dosage optimization methods. Table 2 summarizes the results obtained by applying H Rejuv WA; 2022. As starting point, 5.5% rejuvenator was selected based on the TDS of the additive and then the analysis continued with larger quantities, until the required values comparable with the reference (virgin) bitumen were obtained. As can be seen from the DSR rheological results, 7% of rejuvenator allowed the recovery of aged bitumen in its virgin state. The dosage was then checked through low-temperature analysis using BBR. According to the measured values, the addition of 7% rejuvenator outperformed at low-temperature and resulted in lower stiffness at low temperatures. This has already been seen in other studies [12] using the same rejuvenator. In this case, the final verification of the dosage shall be completed with mixture scale tests, as the final product will be the asphalt pavement under the service.

In the next step, the same grade of asphalt binder was analysed by applying traditional testing methods using 5% and 7% of the same rejuvenator. The same dosages and materials grades used in both

methods, allowed the technical interpretation of the results. As shown in Table 3, the 7% rejuvenator resulted in the same softening point and relatively similar penetration. With respect to viscosity, the results showed an increase of 12% compared to the reference bitumen.

From another point of view, comparing the results before and after aging, it can be seen that compared to the reference bitumen, the rejuvenator used is less susceptible to ageing, showing lower stiffness properties after aging. Based on these results, it can be concluded that approximately 7% (or less) would technically be the optimal dosage based on both optimization protocols applied.

Table 2: Binder-scale tests results according to H Rejuv WA; 2022 – Bitumen source I

Test Step	Material Bitumen 50/70 Source I	Test parameter			
		T °C (G* = 15 kPa)	Phase angle	T °C (S = 300 MPa)	T °C (m = 0.3)
B0	Virgin state	49	82.1	-16.5	-18.7
B1.1.	Short-term aged	54.5	80.0	-	-
B1.2.	Long-term aged	65	75.6	- 14.3	- 13.9
B2a	Long-term aged + 5.5 % Rej.	52	79.9	-	-
B2b/c	Long-term aged + 7.0 % Rej.	49	79.0	-23.1	-22.3
B3	7.0 % is selected				
B4.1.	Shor-term aged B 2b/c*	52.5	76.7	-	-
B4.1.	Long-term aged B 2b/c*	65.5	73.5	-19.3	-15.4

*According to H Rejuv WA; 2022. See figure 1

Table 3: Binder-scale tests results according to traditional tests – Bitumen source II

Test Step	Material Bitumen 50/70 Source II	Test parameter		
		Penetration (dmm)	Softening point (°C)	Viscosity @ 135 °C (c.P)
B0	Virgin state	55.5	51.7	653
B1.1.	Short-term aged	35.2	57.8	990
B1.2.	Long-term aged	19.3	67.4	1996
B2a	Long-term aged + 5.5 % Rej.	46.6	54.3	1151
B2b/c	Long-term aged + 7.0 % Rej.	54.1	52.7	821
B3	7.0 % is selected			
B4.1.	Shor-term aged B 2b/c	33.6	54.9	1038
B4.1.	Long-term aged B 2b/c	22.1	67.7	2250

*According to H Rejuv WA; 2022. See figure 1

Rejuvenator dosage validation

Volumetric analysis

The first phase of the mixture-scale analysis was dedicated to the volumetric properties of the test mixture compared to the reference counterpart without reclaimed asphalt. Table 4 summarizes the obtained results. These show that the test mixture presented similar values to those of the reference mixture and even a high quantity of the reclaimed asphalt did not decrease the mixture's compactability.

Table 4: Volumetric analysis summary

Test parameter	Standard	Unit	Virgin mix (reference)	Test mix (50% RA) + 7.0% Rej.
Virgin bitumen added	-	%	5.8	3.33
Aged bitumen within RAP	-	%	0.0	2.30
Rejuvenator content	-	%	0.0	0.15
Bulk density*	12697-8	g/cm ³	2.526	2.534
Air void content*	12697-8	%	2.0	1.8
*Marshall hammer compacted specimens – 50 blows each face of the specimens				

Low-temperature properties

Considering the main technical concerns associated with recycled asphalt mixtures with a high RAP content, the mixture analysis included water sensitivity and low-temperature performance. In this case, the mixtures contained 50% artificially produced reclaimed asphalt according to the TU Braunschweig protocol.

The water sensitivity test was carried out using 50 Marshall hammer compacted specimens and assessed by applying indirect tensile ratio according to EN 12697-12. Based on the recorded values, an average of 98% and 96% was obtained for the virgin and test mix, respectively. In this case, both complied with the minimum requirement of the technical specifications, which is 80%, showing high resistance to water sensitivity.

Low-temperature resistance was instead investigated with prisms extracted from roller-compacted slabs and applying the TSRST testing method according to EN 12697-46. Figure 2 shows the obtained tests results.

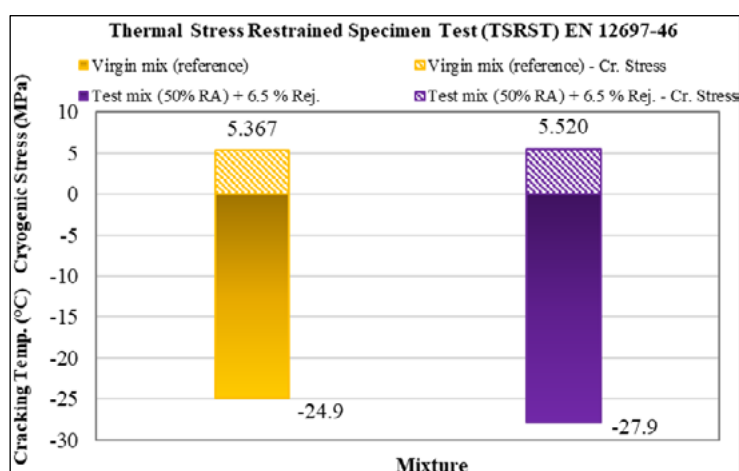


Figure 2: Low-temperature properties of the mixtures

The results show that the recycled asphalt mixture outperformed the reference mixture with regard to low-temperature cracking resistance and showed similar results with regard to water sensitivity resistance, both of which complied with the requirement of the technical specifications. However, comparing the mixture-scale results with the binder-scale results, it can be seen that in both cases less

stiffness is recorded, which relates to the excessive dosage (6.5% by weight of the aged bitumen) used for the recycled mixtures. This difference in the dosages between the two phases of determining the optimum dosage is attributed to two technical reasons: I) the difference between the level of aging, which is achieved during the binder aging and mixture aging simulations in the laboratory, and II) non-application of the short-term aging of the recycled mixture produced (containing 50% RAP) in the laboratory prior to specimen compaction. In fact, in the binder-scale bitumen is subjected to both RTFOT and PAV aging, which is rarer than the aging of the mixture in an oven at 80 °C during artificial RAP production (in this case TU Braunschweig method). According to AASHTO R 30-2; 2015, the produced mixture shall be kept in the oven either for 2 hours at the compaction temperature or for 4 hours at 135 ± 3 °C.

The deficiency in the optimisation of asphalt recycling agents (rejuvenators), based on binder-scale tests, has been reported in several research works in the literature [12-14], where excessive dosage has been determined. Hence, it has always been recommended to confirm the dosage via mixture tests. Nevertheless, this would not limit the use of rejuvenators, and the only need is to consider a smaller amount when dosage is optimized through binder tests.

Extracted binder analysis

To relate the results of the primary binder analysis to the results of the mixture-scale tests and to check the accuracy of the selected dosage, binders extracted from virgin (reference) and recycled test mixtures were tested. Based on the results summarized in Table 5, it can be seen that, in line with the mixture-scale results, the selected dosage was excessive and higher than technically required to recover the aged binder. This excessive dosage (7.0%) resulted in superior performance of the recycled mixture compared to the virgin reference mixture and could also have an impact on other properties. However, it should be noted that the reclaimed asphalt used for the recycled asphalt mixture was artificially produced and is not an in situ oxidized reclaimed asphalt. Hence, if used in real scale and site-won reclaimed asphalt, the observed difference would be smaller.

Table 5: Summary of the mixture-scale tests' results

Extracted Binder	Test parameter			
	T at G* = 15 kPa (°C)	phase angle at G* = 15 kPa	T at S = 300 MPa (°C)	T at m = 0.3 (°C)
Virgin mix (reference)	50.8	77.3	-26.4	-24.4
Test mix (50% RA) + 6.5 % Rej.	45.8	77.8	-29	-31

An 8-year old trial section in the Czech Republic

The rejuvenator introduced in this study was investigated and used in the Czech Republic 8 years ago, in 2017. The recycled mix produced and laid and the pavement profile are summarized as follows:

- Location: Sifem, Blšany, close to 2218 Rd.
- Construction date: 2017
- Type of road: Local access Rd.
- Type of mixture: AC 11 mm
- Type of layer: Surface course
- Paving bitumen: PEN 50/70
- RAP quantity in the mix: 50%
- Aged bitumen penetration: 25 dmm
- Aged bitumen softening point: 60 °C
- Rejuvenator: ITERLENE ACF 2000
- Dosage: 3.75% (on the weight of the aged binder)

All information regarding this project was documented in a dedicated publication available online [10]. As far as rejuvenator optimization is concerned, following extensive research at the Technical University of Brno, a tool was developed to estimate the dosage of the rejuvenator based on the mix design and the characteristics of the RAP aged binder. The tool is available online at the Rejuvenator web page [15]. Considering the above data, using the tool, a dosage of 4.5 % was estimated for the trial section. This lower rejuvenator quantity compared to the introduced cases is attributed to the lower softening point value (60 °C) and the properties of the 50/70 virgin bitumen. According to condition monitoring by pavement experts in 2024, the laid pavement was technically in good condition, without even thermal cracking or permanent deformation due to the passage of heavy agricultural vehicles. Figure 3 shows the section and its texture after 8 years under realistic conditions.



Figure 3: The paved ecycled material after 8 years in May 2025. Scale coin: 1 euro = 23.35mm

Conclusion

Considering the ever-increasing interest in the sustainability of asphalt pavements and in the reduction of the carbon footprint, raising the level of recycling is gaining more and more attention. However, from a technical point of view, due to the low amount of fresh binder in these mixtures, recycling asphalt using a softer binder is not feasible. From another point of view, in some cases, extremely aged reclaimed asphalt containing hard, aged bitumen cannot be activated and with added virgin binder, guaranteeing the required technical performance. This paper investigated the feasibility of the German technical instruction for the optimization of asphalt rejuvenators and introduced a trial section laid 8 years ago in the Czech Republic that was optimized with other methods and considerations. In both cases, the mixture contained 50% RAP, the same rejuvenator and virgin bitumen was used. According to this study and in line with the literature, the following aspects can be highlighted:

- The dosage determined according to the binder-scale test of the German instruction was higher than the dosage required on the basis of the applied mixture-scale tests.
- Both conventional methods (penetration, softening point, viscosity) and DSR analysis showed similar results in optimizing the dosage of the binder-scale rejuvenator. However, in both cases the determined dosages were higher than those required based on the mixture tests. This difference is attributed to I) the different level of binder and mixture ageing during the production of artificial binder and RAP, respectively, and II) the absence of short-term mixture aging during the production of the recycled mixture specimens for the mixture-scale tests.
- Based on the condition of the pavement after 8 years of its construction, the introduced rejuvenator showed promising results for the production of recycled asphalt mixtures with a high RAP content. During the condition monitoring by the pavement experts, neither rutting nor cracking was detected.

Sources:

- [1] Shao, H., Sun, L., Liu, L., You, Z., Yang, X. (2017). A novel double-drum mixing technique for plant hot mix asphalt recycling with high reclaimed asphalt pavement content and rejuvenator. *Constr Build Mater.* 134, pp. 236-244, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.077>
- [2] Loise, V., Oliviero Rossi, C., Venturini, L., Eskandarsefat, S., Sangalli, L. (2019). Rejuvenating vs. softening agents; a rheological and microscopic study. The proceedings of the first Macedonian road congress, Skopje, North Macedonia
- [3] Zaumanis, M., B. Mallick, R., et al. (2014). Influence of six rejuvenators on the performance properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binder and 100% recycled asphalt mixtures. *Constr Build Mater.* 71, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.073>
- [4] Caputo, P., et. al., (2020). Towards advances in differentiating recycling agents: softening agents vs. rejuvenating agents. 7th E&E Congress Eurashalt & Eurobitume (virtual).
- [5] De Bock, L., Pierard, N., Vansteenkiste, S., Vanelstraete, A. Classification et analyse des produits régénérants pour la réutilisation des enrobés. Centre de recherches routières, https://brrc.be/sites/default/files/2020-05/dossier21_en.pdf
- [6] European Asphalt Pavement Association (EAPA). The Circular Economy of Asphalt. EAPA Technical Review (2022) 34 pages. <https://eapa.org/download/15684/>
- [7] Hugener M. et al. (2022). Recommendation of RILEM TC 264 RAP on the evaluation of asphalt recycling agents for hot mix asphalt. *Materials and Structures* 55, <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01837-0>
- [8] FGSV 753. Hinweise zur Anwendung von Rejuvenatoren bei der Wiederverwendung von Asphalt. HRe WA, Ausgabe 2022. Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe, Asphaltbauweisen. ISBN 978-3-86446-332-7
- [9] CEN. EN 17643:2022, Bitumen and Bituminous Binders — Determination of Equi shear Modulus Temperature and Phase Angle Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)—BTSV Test. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2022.
- [10] Eskandarsefat, S., Ciarlitt, A., Baccellieri, L. (2023). Hot asphalt recycling with high reclaimed asphalt content: the case studies in Spain and in Czech Republic. Proceedings of AV 23 Conference Asphalt Pavements, Ceske Budějovice, Czech Republic.
- [11] CEN/TS 12697-52:2017, Bituminous mixtures - Test methods, Part 52: Conditioning to address oxidative ageing PD. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2017.
- [12] Büchner, J., et. al., (2023). Rheological characterisation of rejuvenator blending lines, *Road Mater. Pavement Des.*, <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2023.2180994>
- [13] Handle, F. (2014). Unraveling the bitumen microstructure – towards a new understanding of bitumen ageing. Doctoral thesis, Vienna University of Technology.
- [14] Koudelka, T., Coufalik, P., Fiedler, J., Coufalikova, I., Varaus M., Yin F. (2019). Rheological evaluation of asphalt blends at multiple rejuvenation and aging cycles, *Road Materials and Pavement Design*, <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2019.1588150>
- [15] Setting the optimal dosage for rejuvenator available online at <http://web.rejuvenator.eu/>

VLIV POČTU ZRN A POVRCHU KAMENIVA NA VÝKONNOST PREDIKCE ASFALTOVÉ SMĚSI S R-MATERIÁLEM POMOCÍ STROJOVÉHO UČENÍ

EFFECT OF NUMBER AND SURFACE AREA OF THE AGGREGATES ON MACHINE LEARNING PREDICTION PERFORMANCE OF RECYCLED HOT-MIX ASPHALT

Mert Atakan, MSc., Prof. Kürşat Yıldız, Gazi University, Faculty of Technology, Department of Civil Engineering, Turecko/Turkey
doc. Ing. Jan Valentin, Ph.D., ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Česká republika/Czech Republic

Zde prezentovaná studie se zabývá možnostmi alternativního přístupu při návrhu složení asfaltové směsi, a to prostřednictvím vyhodnocení vlivu plochy povrchu kameniva (ASA) a počtu zrn kameniva (NA) v modelech strojového učení (ML). Byla analyzována datová sada 107 asfaltových směsí obsahujících 0–50 % R-materiálu. Přírodní kamenivo a zrna R-materiálu byly spočítány a změřeny pomocí digitální obrazové analýzy, aby se vypočítaly hodnoty NA a ASA, přičemž specifické plochy povrchu byly určeny v prostředí fyzikálního modelování. Poté byly naměřené průměrné hmotnosti zrn kameniva kalibrovány pomocí 13 vzorků. Byly vyvinuty různé modely ML s algoritmem náhodného lesa, které zahrnovaly různé sady vstupních atributů (IFS), včetně NA, ASA a dalších základních charakteristik směsí. Výsledky ukázaly, že zahrnutí NA a ASA významně nezlepšilo výkon modelu ve srovnání s použitím pouze vstupních údajů o procentuálním rozložení zrnitosti.

This study addresses the challenge of designing hot-mix asphalt by evaluating the impact of aggregate surface area (ASA) and the number of aggregates (NA) in machine learning (ML) models. A dataset of 107 asphalt mixtures containing 0-50% reclaimed asphalt pavement (RAP) was analyzed. Virgin aggregates and RAP particles were counted and measured via digital photography to calculate NA and ASA, with specific surface areas determined in a physics engine environment. Then, measured average aggregate particle weights were calibrated using 13 specimens. Various ML models were developed with the random forest algorithm, incorporating different input feature sets (IFS), including NA, ASA, and other basic features of the mixtures. Results revealed that including NA and ASA did not significantly improve model performance compared to using only gradation percentage inputs.

Úvod

Vozovky komunikací se navrhují jako tuhé [1], asfaltové (netuhé) nebo polotuhé [2–4]. Pro návrh asfaltových směsí se používají různé techniky, jako je postup podle Marshallova, modifikovaný postup podle Marshallova, postup podle Hveema a americká metodika Superpave. Přitom platí, že používání návrhu podle Marshalla je v mnoha zemích široce oblíbený díky své praktičnosti a zavedené praxi [5]. Konvenční návrh asfaltové směsi v laboratoři je nákladný a vyžaduje mnoho času a práce. Například návrh směsi dle Superpave může trvat přibližně 7,5 pracovních dnů [6]. Proto odborníci průběžně hledají metody, které by usnadnily proces návrhu asfaltové směsi.

Bylo provedeno značné množství výzkumu zaměřeného na zkrácení doby návrhu a snížení náročnosti práce s využitím simulačních výpočetních technik. Velké a stále rostoucí množství literatury se zabývá mezostrukturálními vlastnostmi především asfaltového betonu (AC) simulací zhutňování kameniva pomocí numerických metod, jako je metoda diskrétních prvků (DEM) [7–9] nebo fyzikální počítačové simulace pro určitý systém, např. kompozitní [10–22]. DEM řeší problémy nespojitých látek zkoumáním vzájemných kontaktů mezi diskrétními prvky. Identifikuje konstitutivní vztah, který tyto kontakty řídí, a vytváří pro ně fyzikální a mechanický model. Následně simuluje chování těchto nespojitých prvků na základě Newtonova druhého zákona pohybu [23]. Podobně jsou založené i fyzikální výpočetní simulace, které simulují Newtonovy zákony a které se obvykle používají k navrhování videoher a animací, ale v simulacích zhutňování kameniva se mohou použít jako alternativa k DEM, která se vyznačuje vždy vysokými výpočetními náklady [21]. Na druhé straně některé studie vytvořily virtuální vzorek AC náhodným výběrem nebo přeskupením prostorových poloh zrn kameniva bez simulace principu jejich obalení pojivem [24–26].

V literatuře lze dohledat značné množství zdrojů, které se věnují hodnocení různých faktorů ovlivňujících návrh směsi. Mnoho studií přikládalo význam počtu zrn kameniva v asfaltových směsích. Hu et al.

(2018) uvedli pozitivní korelaci mezi počtem takových zrn a mezerovitostí [27]. Garcia-Hernandez et al. (2021) [22] vyvinuli rovnici předpovídající virtuální sílu potřebnou pro zhuštění v simulaci fyzikálního výpočetního modelu. Rovnice používá objem asfaltového tmelu (tj. pojivo, filer a drobné kamenivo) a počet zrn kameniva. Podobně Awuah et al. (2024) a Wan et al. (2023) představili nomogramy založené na počtu zrn kameniva a objemu asfaltového tmelu. Nomogramy mohou ukázat proveditelné oblasti pro různé typy směsí splňující optimální materiálová kritéria z hlediska mezerovitosti, charakteristik Marshallovy zkoušky, zpracovatelnosti a modulu tuhosti [10,11].

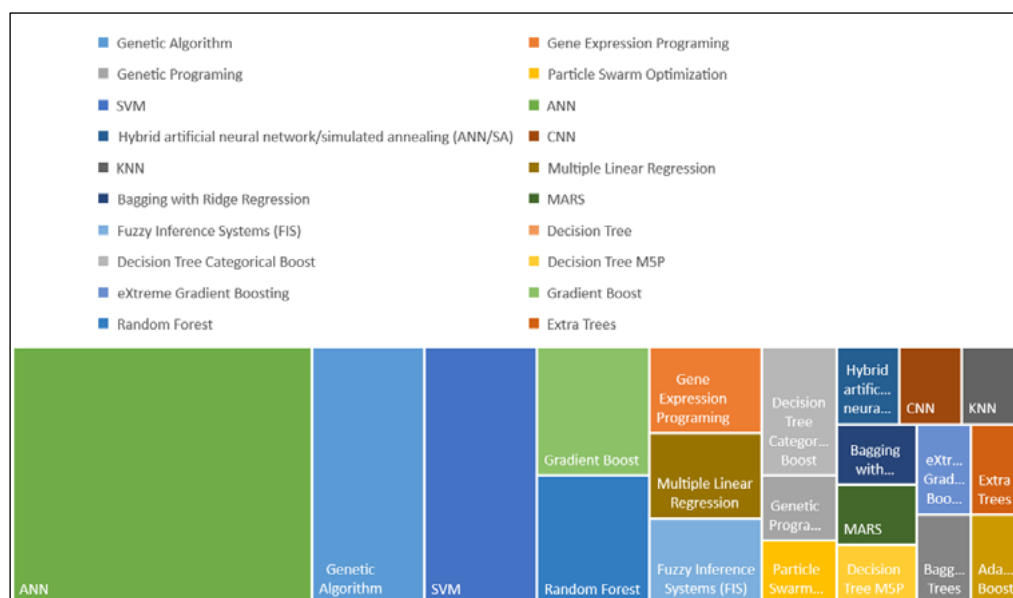
Některé studie se také zabývají vlivem povrchové plochy kameniva a tloušťky asfaltového tmelu na vlastnosti asfaltových směsí. Ji et al. (2021) uvedli, že směsi s větší povrchovou plochou kameniva jsou náchylné k vysokým teplotám a vlhkosti [28]. Liang et al. (2021) vysvětlili a popsali parabolický vztah mezi povrchovou plochou kameniva a odolností proti lomu [29]. Bressi et al. (2016) představili metodu pro stanovení optimálního obsahu asfaltu pomocí faktoru povrchové plochy s ohledem na skutečný tvar kameniva. Fadhil et al. (2022) použili povrchovou plochu kameniva jako vstupní údaj ve svém modelu umělých neuronových sítí (ANN) [30].

Kromě toho existuje velké množství publikovaných studií o aplikacích strojového učení (ML) v návrhu asfaltových směsí. Výzkumníci použili různé vstupní údaje k předpovědi mechanických a fyzikálních vlastností asfaltových směsí. Lze je rozdělit do následujících kategorií:

1. Vlastnosti a zrnitost kameniva
2. Vlastnosti fileru a jeho poměr k asfaltovému pojivu
3. Vlastnosti asfaltového pojiva a jeho podíl ve směsi
4. Objemové a mechanické vlastnosti směsi
5. Obsah R-materiálu
6. Přítomnost dalších přísad
7. Parametry zkoušek, jako je teplota, frekvence atd.
8. Kritéria ovlivňující výkonnost směsi, jako je klima, stáří, struktura vozovky

Nejčastěji používanými vstupními parametry jsou obsah asfaltu, mezerovitost, zrnitost kameniva, maximální zrno kameniva ve směsi, mezerovitost kostry kameniva a základní vlastnosti asfaltového pojiva. Výsledky Marshallovy zkoušky, mezerovitost a modul tuhosti jsou v modelech a simulačních technikách nejčastěji předpovídanými cílovými parametry.

Pokud jde o dnes dostupné algoritmy strojového či hlubokého učení, tak vědecké týmy používali hlavně umělé neuronové sítě (ANN), pravděpodobně kvůli jejich vysokému výkonu (obrázek 1). Následovaly genetické algoritmy, podpůrné vektorové simulační techniky a algoritmy založené na stromové struktuře. Algoritmy založené na stromové (rozvětvené) struktuře se obecně používají pro souhrnné učení (např. random forest, gradient boost atd.), při kterém se vytváří a kombinuje více modelů ML.



Obrázek 1: Algoritmy strojového učení použité v dřívějších výzkumných pracích (SVM: Support Vector Machine; CNN: Convolutional neural network; MARS: Multivariate Adaptive Regression Spline)

Vzhledem k velikosti silniční infrastruktury ve světě a environmentálním dopadům výstavby komunikací staly se snaha o docilování efektivních návrhů asfaltové směsi s prokazatelným přínosem v trvanlivosti a životnosti staly významným technickým problémem. Je samozřejmě mnoho studií, jež se zabývaly snížením environmentálního dopadu vozovek nahrazením cementu alternativními materiály [31–33]. Pokud jde o asfaltové vozovky, mnoho studií se zabývá co nejefektivnějším využitím R-materiálu [34]. Mnoho výzkumníků studovalo zvyšování obsahu R-materiálu [35] nebo mechanických a výkonnostních charakteristik asfaltových směsí s obsahem R-materiálu [36].

Ačkoli existuje i v tomto případě řada studií o ML modelech a simulacích zhutňování kameniva, dosud jsme se nesetkali s žádným výzkumem, který by podrobněji analyzoval vliv počtu zrn kameniva a povrchové plochy kameniva na predikční výkon ML vlastností asfaltových směsí, a to včetně vlivu, který zde R-materiál může mít. Tento příspěvek se snaží přiblížit použitelnost počtu zrn kameniva a povrchové plochy kameniva jako vstupu do ML modelu namísto standardní zrnitosti jednotlivých frakcí kameniva. K dosažení tohoto cíle byl připraven datový soubor složený z různých asfaltových směsí obsahujících 0–50 % R-materiálu.

Poté byly pomocí digitální fotografie stanoveny pro kamenivo a R-materiál použité v konkrétním typu směsi počty zrn kameniva a povrchová plocha kameniva, a to vztaženo k definovanému vzorku cca 1 kg asfaltové směsi. Dále byly naměřené hmotnosti zrn kameniva kalibrovány pomocí 13 vzorků a specifický povrch kameniva byl stanoven v prostředí fyzikálního simulačního výpočetního nástroje. Po dokončení všech výpočtů byly pomocí algoritmu random forest vytvořeny různé modely strojového učení s různými vstupními vlastnostmi. Nakonec byla porovnána predikční výkonnost ML modelů a význam vlastností, které modely lze predikovat.

Použité materiály a metody

Použitá pojiva a kamenivo

Použité kamenivo pocházelo z kamenolomu Zbraslav (určující horninou zde je spilit). Hodnoty objemové hmotnosti byly měřeny podle normy ČSN EN 1097-6; výsledky jsou uvedeny v tabulce 1. R-materiál byl dodán ze stejného zdroje, kde je znovuzískaná asfaltová směs s různých staveb v Praze a středních Čechách skladována a následně předrcována a pětřídována dle momentální potřeby obalovny. R-materiál použitý v této studii měl zrnitost 0/8 mm (podle normy ČSN EN 13108-8 klasifikován jako 11 RA 0/8).

Tabulka 1: Objemová hmotnost a nasákavost použitého kameniva

Frakce kameniva	Objemová hmotnost (g/cm ³)	Nasákavost (%-hm.)
0/4	2,699	0,5
2/5	2,689	0,5
4/8	2,687	0,5
8/11	2,681	0,3
8/16	2,680	0,3
11/16	2,678	0,5
16/22	2,675	0,5

Byly vyhodnoceny extrakce 18 vzorků R-materiálu zrnitostí dle (tabulky 2). Poté byly vypočítány průměrné hodnoty a mezní hodnoty intervalu spolehlivosti, a to pro každou velikost použitého síta. Při vyhodnocení hodnot šikmosti a špičatosti bylo zjištěno, že všechny velikosti sít kromě síta 11,2 mm se pohybovaly mezi hodnotami -1,5 a +1,5. Tyto údaje tedy odpovídají normálnímu rozdělení pravděpodobnosti. V případě síta 11,2 mm lze předpokládat, že se jedná o maximální velikost rovnající se 100 %, protože u většiny vzorků se blíží právě k této hodnotě. Ve stejné tabulce byly uvedeny očekávané minimální a maximální hodnoty. Interval spolehlivosti udává, že průměrná hodnota sledované hodnoty se nachází v tomto rozmezí s pravděpodobností 95 %. Jinými slovy, průměrné hodnoty gradací se očekávají v těchto mezích v 95 %.

Tabulka 2: Zrnitost použitého R-materiálu získaná jako průměr 18 extrakcí

	Propady (%) pro jednotlivá zkušební síta (mm)											Obsah pojiva (%)
	16	11	8	5,6	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	
Průměr	100	99,60	89,58	78,34	68,30	51,40	38,64	29,01	21,87	17,51	14,71	5,68
Směrodatná odchylka	0,00	0,59	6,19	8,85	8,64	7,42	5,39	3,56	2,52	2,11	1,92	0,56
95% interval spolehlivosti	-	0,27	2,86	4,09	3,99	3,43	2,49	1,64	1,16	0,97	0,89	0,26
Minimum	100	99,33	86,73	74,26	64,31	47,97	36,15	27,36	20,71	16,53	13,82	5,42
Maximum	100	99,87	92,44	82,43	72,29	54,83	41,13	30,65	23,03	18,48	15,59	5,94

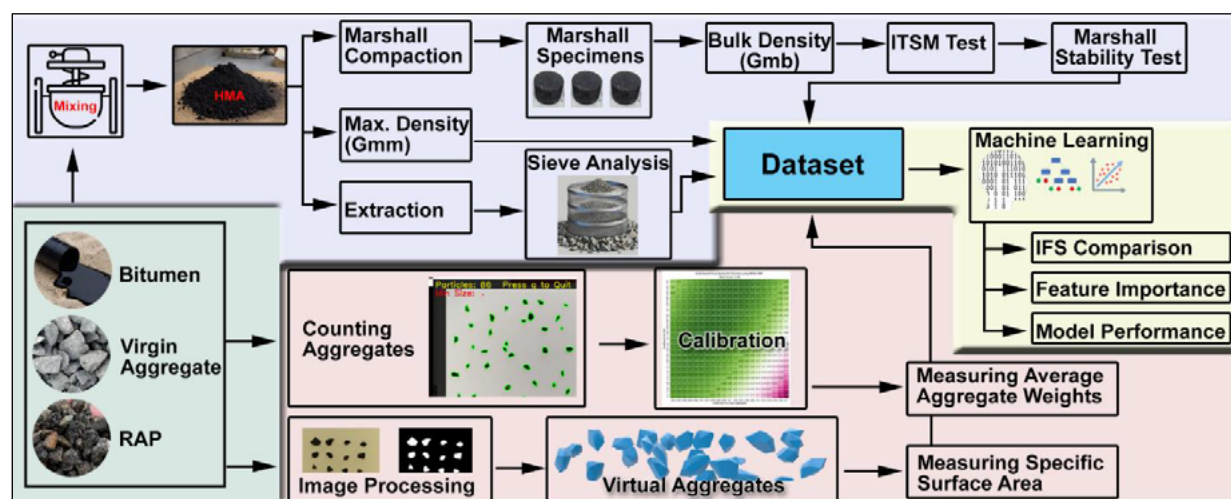
Různé druhy použitých asfaltových pojiv jsou shrnuty v tabulce 3.

Tabulka3: Penetrace a bod měknutí asfaltových pojiv použitých v této studii

Asfaltové pojivo	Penetrace (0,1 mm)	Bod měknutí KK (°C)
70/100	75	47,0
50/70	59	51,2
PMB 45/80-65	68	70,8
PMB 25/55-60	31	60,6
PMB 25/55-65 RC	44	69,8

Příprava Marshallových zkušebních těles

Marshallova zkušební tělesa byla připravena zhuťněním vzorků asfaltové směsi připravené na obalovně. Bylo odebráno přibližně 15 kg asfaltové směsi a polovina tohoto vzorku byla použita pro extrakci a síťový rozbor. Druhá polovina byla použita ke zhuťnění min. tří zkušebních válcových těles a ke stanovení maximální objemové hmotnosti. Zhuťnění bylo provedeno pomocí standardního rázového zhuťňovače. K zhuťnění vzorků byla použita odpovídající teplota zhuťnění podle typu asfaltového pojiva, tedy 150 °C pro asfalt 50/70, 145 °C pro asfalt 70/100 a 160 °C pro polymerem modifikovaná pojiva.



Obrázek 2: Postupový diagram provedených experimentálních prací

Měření průměrné hmotnosti zrn kameniva (AAPW) a kalibrace

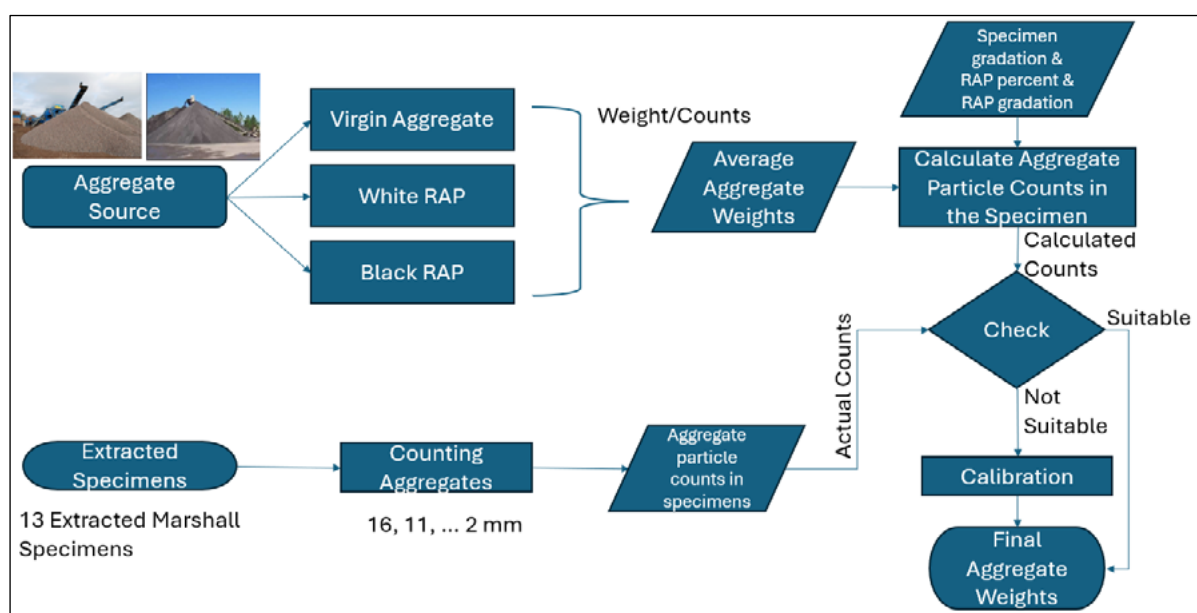
Postup pro stanovení počtu zrn kameniva

Byl spočítán počet zrn kameniva, a to jak v případě přidávaného nového kameniva, tak i přidávaného R-materiálu. Kontrolní měření byla provedena i pro směsi kombinující kamenivo s R-materiálem, kdy získané výsledky byly použity k ověření a kalibraci průměrných hmotností zrn kameniva (obrázek 3). Pokud se vypočtené hodnoty zrn kameniva a R-materiálu a skutečné počty získané ze směsi shodují

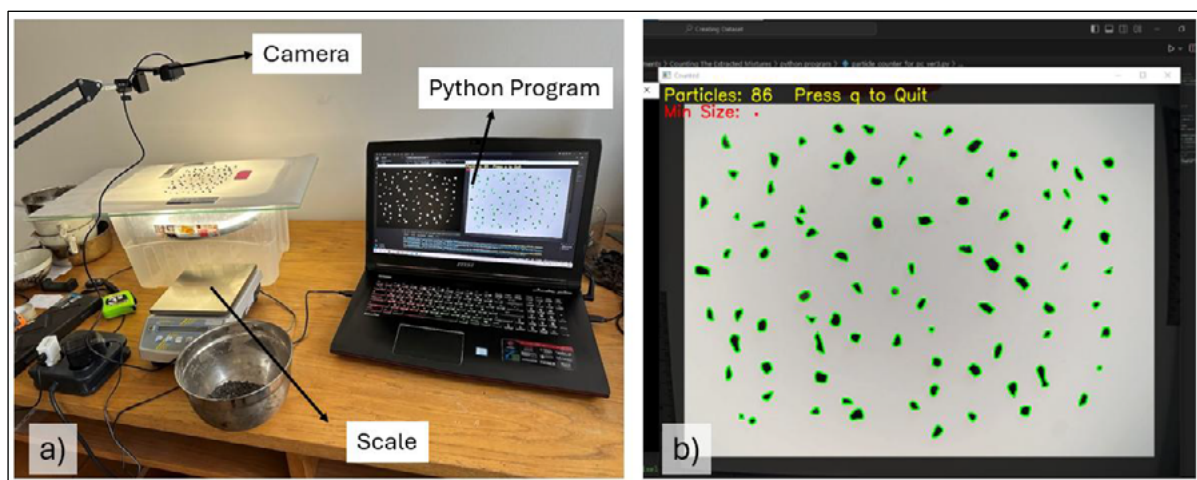
(jak je znázorněno na obrázku), byla hodnota AAPW přijata; v opačném případě byla provedena kalibrace. Nejprve byly směsi prosety přes normová síta o velikosti 22, 16, 8, 5,6, 4 a 2 mm. Zbývající kamenivo na každém sítu bylo zváženo a vloženo do nádob. Poté bylo ručně spočítáno kamenivo větší než 8 mm. Na kamenivo zachycené na sítích o velikosti 2, 4 a 5,6 mm bylo použito digitální zpracování obrazu. Bylo měřeno pouze kamenivo větší než 2 mm, protože minimální velikost zrn v kostře kameniva byla uvažována v souladu s dřívější literaturou na úrovni 2 mm [37,38].

Aby bylo možné spočítat zrna menší než 8 mm, bylo odebráno malé množství kameniva metodou kvartování a rozptýleno na podsvíceném stole vybaveném poloprůsvitným bílým plátnem. Poté byl použit program Python k automatizovanému počítání zrn kameniva a bylo provedeno vlastní nafočení. Program využívá vstupy z kamery a zobrazuje počet zrn kameniva na obrazovce (obrázek 4). Následně byla zrna kameniva zvážena. Změřeny byly postupně všechny velikosti a stanovila se průměrná hmotnost AAPW podle rovnice (1). Tato hodnota udává, kolik zrn kameniva se nachází v jednom gramu v každé velikosti kameniva.

$$AAPW = \frac{\text{Hmotnost kameniva}}{\text{Počet zrn kameniva}} \quad (1)$$



Obrázek 3: Postupový diagram vysvětlující princip stanovení průměrných hmotností kameniva



Obrázek 4: Počítání zrn kameniva menších než 8 mm a) použité nastavení b) rozhraní program

Vývoj podpůrné softwarové aplikace v Python pro počítání zrn kameniva

Pro efektivní počítání zrn kameniva byl naprogramován kód (skript) v jazyce Python. Tento skript využívá knihovnu OpenCV k zpracování obrazu v reálném čase na snímcích zachycených fotoaparátem nebo kamerou. Nejprve inicializuje kameru a vstoupí do smyčky nepřetržitého zpracování. Tato smyčka zachycuje snímky z kamery, mění jejich velikost a graficky upravuje kvalitu snímku. Poté aplikuje mediánové rozostření a binarizaci pomocí Otsuovy prahové metody. Dále provede stanovení počtu zrn v binárním obrazu a zároveň filtruje malá zrna detekcí kontur a aplikací filtrů založených na ploše. Poté nakreslí kontury kolem detekovaných zrn na původním snímku, aby je vizualizoval. Následně se vytvoří maska pro zobrazení původního snímku s poloprůsvitným černým pozadím mimo oblast zájmu (ROI), což je oříznutý snímek, kde dochází k počítání zrn kameniva. Navíc se v pravém horním rohu masky nakreslí kruh představující částici s určitou plochou. Tento kruh představuje minimální velikost, kterou program aktuálně počítá. Textové překryvy zobrazují počet zrn, minimální velikost zrn a pokyny k ukončení aplikace. Nakonec se v reálném čase zobrazí dvě okna: jedno zobrazující snímek se stanoveným počtem zrn kameniva a druhé zobrazující binární obraz. Smyčku lze ukončit stisknutím klávesy „q“, která uvolní kameru a zavře všechna okna OpenCV.

Kód byl postupně upraven pro použití na mobilních zařízeních. Upravený kód funguje na zařízeních iOS v aplikaci s názvem Pyto. Kód je navíc přepsán pomocí knihovny Pythonu s názvem kivy. Tato knihovna poskytuje možnost vyvíjet programy fungující na různých platformách. Napsaný program kivy nyní funguje na počítači, ale po dalších úpravách může fungovat i na zařízeních využívajících Android.

Kalibrace průměrných hmotností kameniva

Průměrné hmotnosti zrn kameniva pro čerstvé kamenivo i použitý R-materiál byly použity pro výpočet počtu zrn kameniva v případě 13 Marshallových zkušebních těles. Výpočetní proces je vysvětlen dále v textu. Poté byly porovnány výpočetem stanovené počty zrn kameniva a naměřené skutečné počty pro každou velikost a byly vypočítány statistické metriky (tj. R^2 , RMSE, MSE). Následně byly hmotnosti čerstvého kameniva i zrn R-materiálu vynásobeny sadou korekčních koeficientů v rozmezí od 0,80 do 1,20. Tímto způsobem byla pro kalibraci testována široká škála korekčních koeficientů. Každá kombinace byla vyhodnocena ve smyčce a koeficienty, které poskytly nejvyšší hodnotu R^2 , byly vybrány jako korekční koeficienty.

Stanovení celkového počtu zrn kameniva ve vzorcích

AAPW byla vypočítána podle postupu uvedeného výše. Na základě těchto hodnot byl stanoven počet zrn kameniva 13 zkušebních tělesech a byl porovnán se skutečnými počty. Vzhledem k tomu, že obsah R-materiálu v jednotlivých tělesech (asfaltových směsích) byl odlišný, bylo pro každé kontrolní síto stanoveno odlišné množství R-materiálu. Proto byly procentní podíly R-materiálu vypočítány pro každé síto samostatně. K výpočtu procentního podílu R-materiálu vztaženém k jednotlivým kontrolním sítům byla použita rovnice (2).

$$Rmat \% (i) = \begin{cases} \frac{zrnitost \% Rmat (i) \times Rmat \% m}{zrnitost \% m (i)}, & Rmat \% (i) \leq 100 \\ 100, & Rmat \% (i) > 100 \end{cases} \quad (2)$$

R-mat % (i): zbytek R-materiálu na kontrolním sítu i

Zrnitost % R-mat (i): zbytek na kontrolním sítu i pro kamenivo R-materiálu, který je použit v asfaltové směsi

R-mat % m: podíl R-materiálu v asfaltové směsi

Zrnitost % m (i): celkový zbytek na kontrolním sítu I pro posuzovanou asfaltovou směs (výsledek síťového rozboru směsi)

Po stanovení podílu zrn R-materiálu v závislosti velikosti kontrolního síta byla vypočítána celková hmotnost zrn R-materiálu a přidávaného přírodního kameniva, a to vztaženo vždy k hmotnosti vzorku směsi 1 kg. Poté byl stanoven počet zrn kameniva vydělením hmotnosti kameniva hodnotou AAPW. Tento výpočet byl proveden pro každou velikost zrn kameniva samostatně pro R-materiál před extrakcí,

kamenivo R-materiálu po extrakci a přírodní kamenivo. Skutečný a předpokládaný počet zrn kameniva byl vypočítán pomocí níže uvedených rovnic.

i : velikost kontrolního síta (2; 4; 5,6; 8; 11; 16 mm)

W : Celková hmotnost kameniva určité frakce v referenčním množství asfaltové směsi (zvoleno jako 1000 g)

$N_{skut}(i)$: Skutečný počet zrn kameniva zachycený na kontrolním sítu i

$AAPW_{skut}(i)$: Skutečná průměrná hmotnost zrn kameniva na kontrolní sítu i po extrakci referenčního množství asfaltové směsi

$N_{Rmat}(i)$: Počet zrn kameniva R-materiálu (před | po extrakci) na kontrolním sítu i

$AAPW_{RAP}(i)$: průměrná hmotnost zrn kameniva R-materiálu (před | po extrakci) na kontrolním sítu i

$N_{přirodní}(i)$: počet zrn přírodního kameniva na kontrolním sítu i

$AAPW_{přirodní}(i)$: průměrná hmotnost zrn přírodního kameniva na kontrolní sítu i

$N_{pred}(i)$: celkový počet kameniva na kontrolním sítu i

N_{pred} : celkový počet zrn kameniva v referenčním vzorku směsi

$$N_{skut}(i) = \frac{W \times \text{zrnost \% m}(i)}{AAPW_{skut}(i)} \quad (3)$$

$$N_{Rmat}(i) = \frac{W \times \text{zrnost \% m}(i) \times Rmat \% (i)}{AAPW_{Rmat}(i)} \quad (4)$$

$$N_{přirodní}(i) = \frac{W \times \text{zrnost \% m}(i) \times [100 - Rmat \% (i)]}{AAPW_{přirodní}(i)} \quad (5)$$

$$N_{pred}(i) = N_{přirodní}(i) + N_{Rmat}(i) \quad (6)$$

$$N_{pred} = \sum_{i=2}^{16} N_{přirodní}(i) + \sum_{i=2}^{16} N_{Rmat}(i) \quad (7)$$

Posledním krokem po provedení vlastního kalibračního procesu byl výpočet hodnoty N_{pred} pro všechny vzorky v datovém souboru podle stejných kroků, a to pomocí kalibrovaných AAPW.

Specifický povrch kameniva (SSA)

Uplatnění dat z odborné literatury

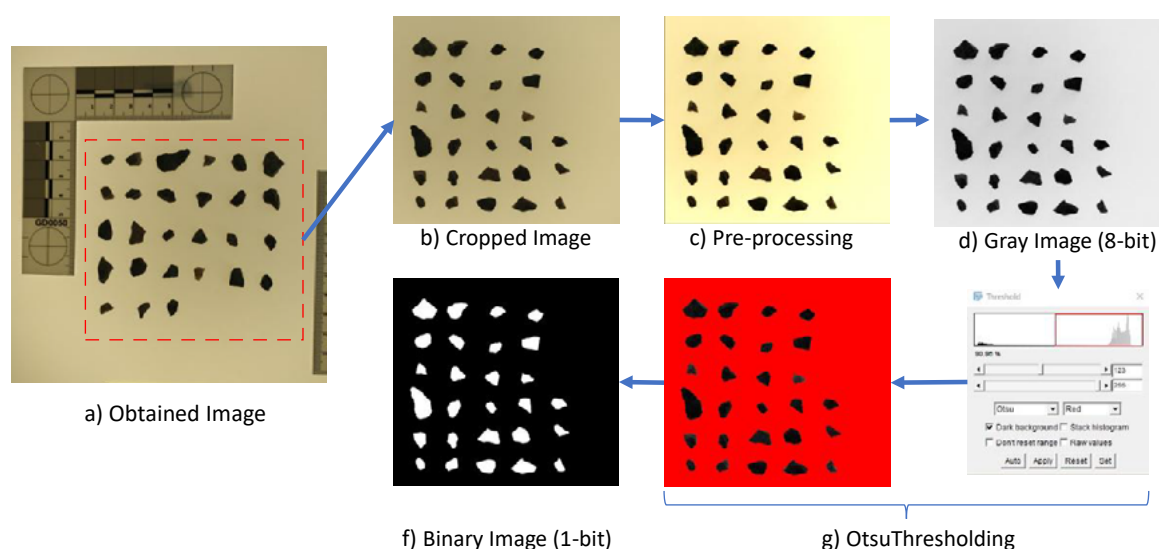
Specifický povrch je charakteristikou, která udává povrch vzorku kameniva vztažený k jednotce hmotnosti. Lze jej také vyjádřit jako povrch jedné částice kameniva. Na základě této skutečnosti byl SSA vynásoben počtem zrn kameniva a byl vypočítán povrch nového kameniva a kameniva získaného z R-materiálu, a to pro každou frakci. K tomu byly nejprve použity hodnoty SSA uvedené v literatuře, kde lze čerpat z vícero studií. V našem případě byly vybrány hodnoty SSA od Bressi et al. (2016), které vyjadřovaly SSA jako m^2 na počet zrn. V citovaném výzkumu změřili autoři plochu povrchu čtyř různých velikostí hrubého kameniva (22,4/31,5, 31,5/40, 40/50 a 50/60 mm) pomocí laserového skeneru a odhadli menší velikosti pomocí odvozené regresní rovnice [39]. Prezentovali SSA na kg a počet zrn. Tyto hodnoty SSA na počet zrn kameniva byly použity k výpočtu plochy povrchu kameniva všech vzorků v datovém souboru pro každou velikost kontrolního síta.

Výpočet SSA s využitím fyzikálních simulačních výpočetních technik

V druhém kroku byla pomocí fyzikálních simulačních technik provedena predikce SSA použitého R-materiálu i přírodního kameniva. K tomu byla zrna kameniva fotografována podobným způsobem jako v kapitole 2.3. Jediným rozdílem bylo, že tentokrát byly snímky pořízeny fotoaparátem mobilního telefonu. Byla také upravena expoziční doba, aby pozadí bylo dostatečně bílé a zrna kameniva dostatečně tmavá. V závislosti na přirozených světelných podmínkách daného dne byly použity expozice 1/30, 1/60 nebo 1/125 s. Různé velikosti zrn v každé skupině kameniva jsou fotografovány postupně. V závislosti na průměru zrn kameniva bylo pořízeno 16–30 fotografií najednou. Aby byly

výsledky statisticky významné, byly pořízeny snímky nejméně 60 zrn z každé velikosti. Po provedení snímkování každé sady zrn kameniva byla tloušťka všech zrn změřena posuvným měřítkem.

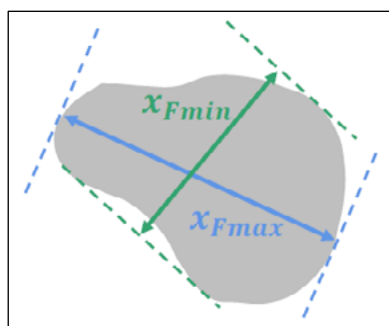
Snímky zrn kameniva byly zpracovány v open-source programu ImageJ založeném na jazyce Java s připraveným makrem JavaScript (obrázek 5) s dále uvedenými dílčími kroky: změna měřítka, oříznutí, vylepšení snímku (zvýšení kontrastu, mediánový filtr), 8bitová konverze, Otsuovo prahování, analýza binárního obrazu pomocí pluginu BioVoxel, uložení výsledků. V ojedinělých případech prahování nefunguje dobře, proto byly použity jiné metody a ruční opravy. Při analýze zrn kameniva byly některé indexy, jako je plocha, obvod, Feretův průměr atd., změřeny a uloženy ve formě excelovského souboru pomocí napsaného makro kódu.



Obrázek 5: Jednotlivé kroky digitálního zpracování snímku

Každá analyzovaná úzká frakce kameniva, například 2-4 mm, 4-5,6 mm atd., byla vyhodnocena jako jedna skupina a byly vypočítány její definitivní statistiky. Poté byly ke každé skupině přizpůsobeny Weibullové funkce pravděpodobnostního rozdělení pro minimální Feret a Feretův poměr stran. K výpočtu Weibullových parametrů byl použit modul z Pythonu pro analýzu předpovědi spolehlivosti. Byla použita metoda maximální věrohodnosti (MLE). Vypočítané vlastnosti jsou: (a) střední hodnota plochy; (b) střední hodnota obvodu; (c) průměrná úhlovitost; (d) tvarové faktory Weibullova rozdělení (pro minimální Feretovu vzdálenost a poměr stran Feretovy vzdálenosti); (e) faktor tloušťky (P50 tloušťky/P50 minimální Feretovy vzdálenosti).

Minimální Feretova vzdálenost je na obrázku 6 znázorněna jako X_{Fmin} , zatímco maximální Feretova vzdálenost je X_{Fmax} . Poměr stran byl poměrem mezi nimi. Zaoblení/úhlovitost bylo vypočítáno podle rovnice (8).



Obrázek 6: Feretovy vzdálenosti u zrna kameniva

$$\text{Úhlovitost} = 4 \times \frac{\text{Plocha}}{\pi \times X_{Fmax}} \quad (8)$$

Po stanovení všech popisných charakteristik kameniva byly vytvořeny virtuální 3D obrazy zrn kameniva pro měření jejich specifického povrchu. Vytvoření virtuálních zrn bylo v minulosti blíže popsáno např. v [13]. Stejná metodika byla použita i v této studii. Proces byl proveden v rámci platformy Unity3D. Zpočátku byly jako základ pro zrna kameniva použity hranoly, jejichž minimální Feretův úhel, poměr stran a výška spadaly do naměřeného rozsahu zjištěného u skutečných zrn kameniva. Každý hranol byl deformován, dokud jeho plocha a obvod neodpovídaly hodnotám pozorovaným na obrázcích reálných zrn. Nejprve byl po povrchu hranolu rozložen určitý počet bodů, označený jako N . Následně byly tyto body podrobeny posunutí pomocí pseudonáhodného multiplikačního faktoru, označeného jako J , v rozmezí od $-J$ do J . Maximální hodnota J byla 0,5, kde 0 znamená žádné posunutí a 0,5 představuje polovinu vzdálenosti mezi bodem a těžištěm hranolu. Aby se vyřešily potenciální nereálné vrcholy a poklesy, byl použit Perlinův šum k vyhlazení bodů, což virtuálním zrnům dodalo hladší vzhled. Poté byla k propojení bodů použita Delaunayova triangulace. Nakonec byly všechny body dále vyhlazeny pomocí Perlinova šumu a znovu triangulovány. Parametry N , J , S_d a J_d určovaly konečnou geometrii virtuálních zrn kameniva. Hodnoty parametrů byly určeny pomocí optimalizačního algoritmu diferenciální evoluce, který iterativně upravoval parametry, dokud se rozložení virtuálních zrn neshodovalo s rozložením skutečných zrn kameniva z hlediska jejich ploch a obvodů.

Popis datového souboru

V zde prezentované studii bylo použito 107 různých asfaltových směsí. Pro každou směs byly k dispozici tři zkušební válcová tělesa. Každé těleso bylo testováno na tuhost metodou IT-CY, což znamená celkem 642 datových bodů. Odlehle hodnoty s příliš vysokou hodnotou stability podle Marshalla (>20 kN) nebo příliš nízkým přetvořením podle Marshalla (<2 mm) byly odstraněny. Na základě této úpravy souboru dat bylo pro algoritmy strojového učení použito 624 datových bodů. Tabulka 4 uvádí počet dat podle různých proměnných. Tabulka 5 přibližuje statistický popis datového souboru.

Tabulka 4: Počet datových sad dle typu směsi, podílu R-materiálu a typu asfaltového pojiva

Asfaltová směs	Počet	Podíl R-materiálu	Počet	Typ pojiva	Počet
ACL 16	24	0%	18	70/100	304
ACL 16+	48	15%	172	PMB 25/55-65	134
ACL 16S	6	20%	6	50/70	66
ACL 22+	18	25%	120	PMB 45/80-65	48
ACL 22S	176	30%	106	PMB 25/55-65 RC	48
ACO 11	120	40%	148	PMB 25/55-60	24
ACO 11+	66	50%	54	CELKEM	624
ACO 11S	18	CELKEM	624		
ACO 16	6				
ACO 16S	30				
ACO 8	6				
ACP 22S	106				
CELKEM	624				

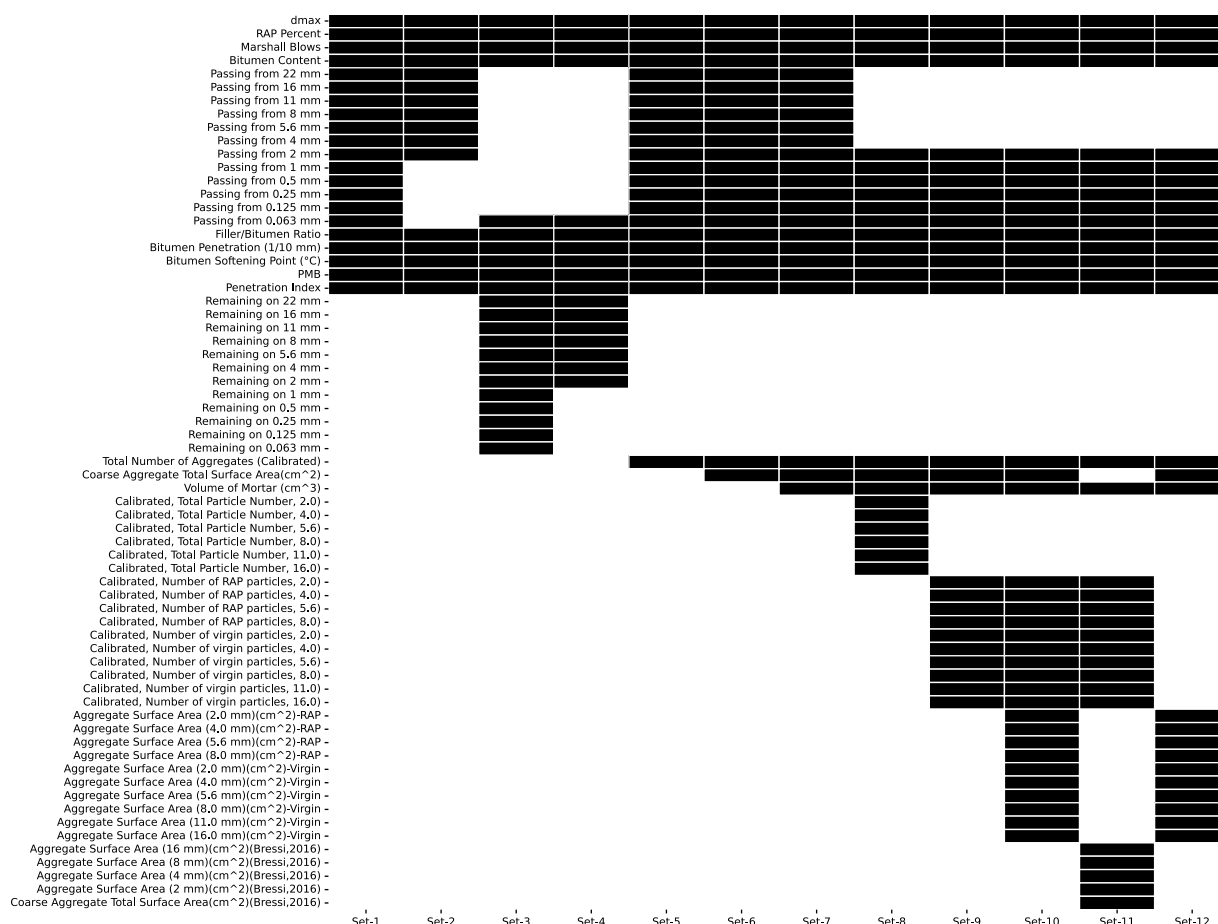
Tabulka 5: Popisné statistiky datové sady

	d _{max}	Podíl R-materiálu (%)	Množství pojiva (%)	Propad na 22 mm	Propad na 16 mm	Propad na 11 mm	Propad na 8 mm	Propad na 5,6 mm	Propad na 4 mm	Propad na 2 mm	Propad na 0,063 mm
Počet	624										
Průměr	17,17	28	4,5	99,1%	88,0%	76,8%	60,1%	47,5%	39,4%	28,0%	8,4%
Sm. odch.	4,97	12	0,81	1,7%	12,4%	16,0%	13,4%	10,9%	9,3%	5,9%	1,7%
Min	8	0	2,98	92,4%	63,9%	50,3%	36,3%	25,9%	21,4%	17,0%	5,5%
25%	11	15	3,83	98,5%	75,2%	62,3%	48,5%	37,7%	30,4%	22,5%	7,6%
50%	16	25	4,30	100,0%	94,5%	75,4%	60,3%	47,7%	39,1%	27,6%	8,3%
75%	22	40	5,23	100,0%	100,0%	95,7%	72,3%	57,9%	47,5%	33,0%	9,1%
Max	22	50	5,99	100,0%	100,0%	100,0%	98,0%	78,2%	63,6%	41,0%	16,4%

	Mezerovitost	Stabilita podle Marshalla (kN)	Přetvoření podle Marshalla (1/10 mm)	Penetrace (0,1 mm)	Bod měknutí (°C)	Tuhost (MPa)
Počet	624					
Průměr	4,5%	13,6	64,2	59,3	54,5	10 896
Sm. odch.	1,7%	2,8	18,2	18,7	8,7	2 372
Min	0,8%	7,4	31,0	31,0	47,0	5 482
25%	3,2%	11,3	49,0	31,0	47,0	9 092
50%	4,3%	13,0	61,0	68,1	51,1	10 855
75%	5,7%	15,8	76,0	75,1	60,6	12 563
Max	8,9%	19,7	112,0	75,1	70,7	17 060

Výběr vstupních charakteristik pro strojové učení

Za účelem vyhodnocení vlivu různých vstupních charakteristik na model strojového učení bylo připraveno 12 různých sad vstupních charakteristik (IFS). Tyto sady jsou znázorněny na obrázku 7. První čtyři sady charakteristik obsahovaly klasické vlastnosti. Ostatní sady charakteristik naopak obsahovaly nové vlastnosti, jako je počet zrn kameniva, objem kameniva a povrchová plocha zrn kameniva. Kromě těchto vlastností byl do každé sady přidán jako kategorický vstup typ asfaltové směsi.



Obrázek 7: Datové sady vstupních parametrů použití v prezentované studii

Postup použití strojového učení

Strojové učení bylo aplikováno s využitím knihovny scikit learn v programovacím jazyce Python. Vstupní sady se skládaly z 12 různých datových setů, zatímco cílové vlastnosti byly stanoveny jako tuhost (ITSM), stabilita podle Marshalla (MS), přetvoření podle Marshalla (MF), mezerovitost (Va) a teoretická maximální hmotnost asfaltové směsi (Gmm). Pro vstupní vlastnost, kterou je typ směsi, bylo implementováno kódování one-hot, což je metoda pro reprezentaci kategorických dat v binárním systému. Datový soubor byl rozdělen na dvě části – testovací sadu a trénovací sadu, přičemž velikost testovací sady byla 20 %. Jako trénovací algoritmus byla použita regrese dle modelu random forest, což je metoda učení založená na rozhodovacím stromu. V trénovacím procesu bylo použito kritérium kvadratické chyby (tj. MSE), které je výchozí volbou. Pro určení nejlepších parametrů byla použita křížová validace. Použitá parametrická mřížka je uvedena v tabulce 6. Po dokončení trénování byl pro každý vstupní soubor uložen nejlepší model.

Tabulka 6: Mřížka parametrů a přípustných hodnot

Parametr	Možnosti
bootstrap	True
max_depth	10, 15, 20, None
max_features	'sqrt', 'log2', 0.5, None,
min_samples_leaf	1
min_samples_split	2,3,4
n_estimators	100, 150, 300

K vyhodnocení výkonu modelu byly spočítány různé metriky regresního výkonu. Jedná se o R^2 , průměr absolutních hodnot odchylek požadovaných výstupů od predikovaných výstupů (MAE), průměr sumy čtverců odchylek požadovaných výstupů od predikovaných výstupů (MSE), směrodatnou odchylku chyb (RMSE), průměrnou absolutní procentní chybu (MAPE) a mediánovou absolutní chybu (Median AE). Kritériem v procesu učení byl MSE. Definice těchto metrik je uvedena např. v dokumentu scikit learn [40].

Z modelu náhodného lesa (Random Forest) byla také extrahována důležitost vlastností pro každou sadu vstupů. Poté byly vzájemně porovnány.

Výsledky a diskuse

Kalibrace AAPW

Naměřené hodnoty AAPW byly použity k výpočtu celkového počtu zrn kameniva 13 různých Marshallových těles. U těchto těles byla také provedena extrakce a pro získané kamenivo byly stanoveny počty zrn pro jednotlivá síta. Skutečné a předpokládané počty zrn kameniva byly porovnány a hodnoty AAPW byly kalibrovány pomocí příslušných korekčních koeficientů. Tabulka 7 uvádí hodnoty AAPW pro každou velikost zrn kameniva, vč. rozlišení R-materiálu a přírodního kameniva.

Obrázek 8 ilustruje kalibrační proces použitý v případě zrn o velikosti 2 mm. Hodnoty R^2 uvedené na obrázku byly průměrnými trénovacími skóre z trojitě křížové validace. Z těchto grafů byly jako nejlepší korekční koeficienty vybrány koeficienty poskytující nejlepší skóre R^2 .

Tabulka 8 ukazuje kalibrační koeficienty R-materiálu a přidávaného přírodního kameniva. Kromě toho byla v tabulce uvedena predikční výkonnost ve srovnání se skutečnými počty. Vzhledem k tomu, že vzorky neobsahují částice R-materiálu o velikosti 11 mm a 16 mm, nebyl pro tyto velikosti vypočítán kalibrační koeficient. Pro další výpočty byl v případě zrn velikosti 2 mm zvolen R-materiál před extrakcí; pro ostatní velikosti (4 mm, 5,6 mm a 8 mm) byla zvolena zrna R-materiálu po extrakci. Tento výběr byl proveden proto, že jejich testovací hodnoty R^2 byly vyšší.

Tabulka 7: Stanovené AAPW hodnoty pro různé velikosti zrn kameniva

Označení kameniva	Síto (mm)	Hmotnost zrn (g)	Počet zrn (spočítaný)	AAPW – průměrná hmotnost zrn kameniva (g)	Korekční faktor
RAP 0/8 mm - Black	8	90	93	0,9677	0,82
RAP 0/8 mm - Black	5,6	103,8	261	0,3977	0,88
RAP 0/8 mm - Black	4	68,75	449	0,1531	0,96
RAP 0/8 mm - Black	2	12,75	297	0,0429	0,96
RAP 0/8 mm - White	8	36,05	33	1,0924	0,82
RAP 0/8 mm - White	5,6	59,65	134	0,4451	0,88
RAP 0/8 mm - White	4	53,2	345	0,1542	0,96
RAP 0/8 mm - White	2	28,55	847	0,0337	0,96
Virgin Zbraslav Split	16	1105,1	107	10,3280	1,08
Virgin Zbraslav Split	11	586,8	160	3,6675	0,96
Virgin Zbraslav Split	8	182,7	144	1,2688	0,94
Virgin Zbraslav Split	5,6	94,55	219	0,4317	0,96
Virgin Zbraslav Split	4	60,8	346	0,1757	1,10
Virgin Zbraslav Split	2	20,7	623	0,0332	0,94

Tabulka 8: Kalibrační koeficienty hmotností kameniva a výkonnostní metriky předpokládaného počtu kameniva s použitím 13 různých Marshallových zkušebních těles

Velikost (mm)	Typ R-mat.	Koeficient R-mat.	Koeficient přírodní kamenivo	Kalibrovaný R2 trénování	Kalibrovaný R2 testování
2	po extrakci	0,82	0,94	0,75	0,73
2	před extrakcí	0,96	0,94	0,76	0,75*
4	po extrakci	0,96	1,10	0,96	0,95*
4	před extrakcí	0,96	1,10	0,96	0,94
5,6	po extrakci	0,88	0,96	0,97	0,96*
5,6	před extrakcí	0,88	0,96	0,97	0,93
8	po extrakci	0,82	0,94	0,91	0,86*
8	před extrakcí	0,82	0,94	0,89	0,65
11	-	-	0,96	0,90	0,82
16	-	-	1,08	0,68	0,63

* Z hlediska dalšího modelování ML zvolené hodnoty.

**Obrázek 8: Hodnoty R² počtu zrn kameniva v rámci kalibračního procesu u zrn 2 mm a) použití AAPW u R-materiálu před extrakcí, b) použití AAPW u R-materiálu po extrakci**

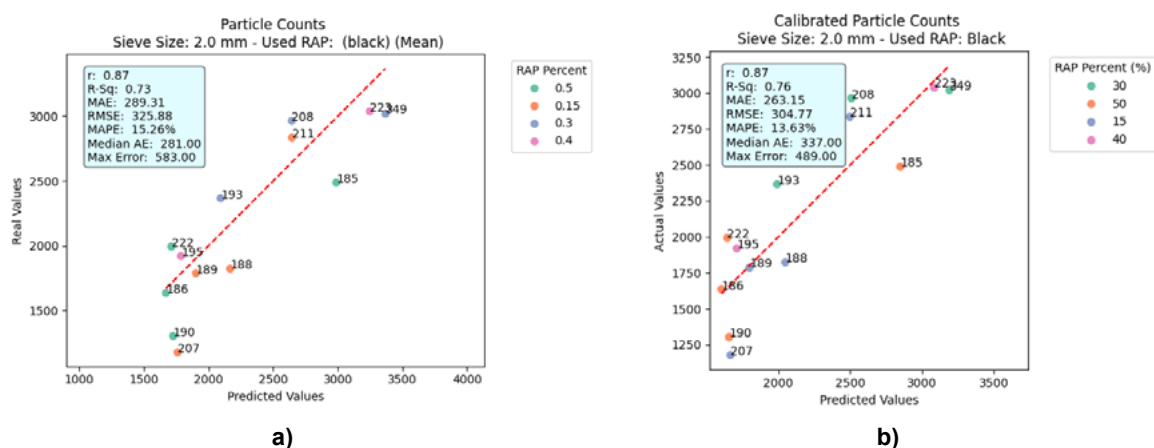
Tabulka 9 představuje kalibrované a původní výkonnostní metriky získané z 13 vzorků, u nichž byly známy skutečné souhrnné počty zrn kameniva dílčích frakcí. Původní výkonnostní metriky byly vypočítány ze skutečných souhrnných počtů i predikce souhrnných počtů na základě původních AAPW. Kalibrované výkonnostní metriky trénovací a testovací sady dat byly vypočítány pomocí kalibrovaných AAPW. Metriky pro trénovací a testovací sady jsou průměrnými skóre trojnásobných výsledků. Jinými slovy, byla použita metoda trojnásobné křížové validace a v každém složení byl vypočítán jeden výsledek trénování a jeden výsledek testování. Poté byly výsledky získané z trojnásobného složení zprůměrovány. Z tabulky je patrné, že metriky chyb byly výrazně sníženy, zejména u zrn velikosti 5,6 mm a 8 mm. Ostatní velikosti byly zlepšeny do určité míry. Při vyhodnocení kalibrovaných výsledků testů byla nejvyšší chyba zaznamenána u zrn velikosti 2 mm (charakteristika MAPE). Z hlediska hodnot R² však byla nejnižší hodnota zaznamenána u zrn velikost 16 mm. Je to pravděpodobně proto, že vzorek odsítovaných zrn velikosti 2 mm obsahuje z hlediska absolutního počtu vyšší počet zrn než zrn velikosti 16 mm. To může způsobit lepší R², ale horší MAPE. Důvod, proč byly obě hodnoty v uvedených případech nižší v porovnání s ostatními velikostmi, však může záviset na dalších faktorech. Zrna

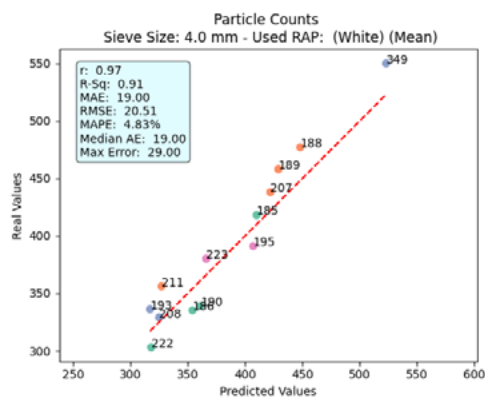
velikosti 2 mm obsahují nejvíce R-materiálu, což mohlo vést ke špatnému měření AAPW nebo skutečného počtu částic vzorků. Na druhé straně jsou zrna velikosti 16 mm z hlediska absolutního počtu zastoupena poměrně malou hodnotou. Proto několik zrn kameniva, více či méně, způsobuje velký rozdíl.

Tabulka 9: Vybrané koeficienty a predikční výkonnost počtů zrn kameniva

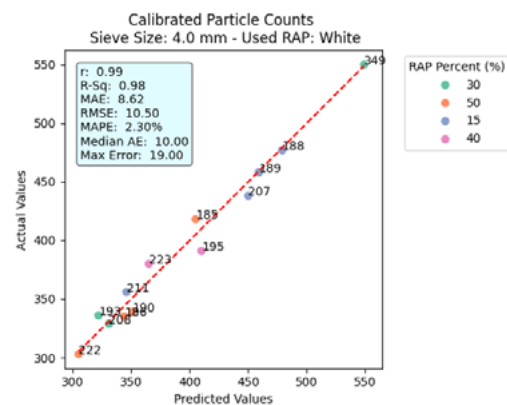
Typ datové sady	Koeficient R-mat.	Koeficient přírodní kam.	r	R ²	MAE	RMSE	MAPE	Median AE	Max. chyba	Velikost (mm)
Kalibrovaný testovací	0,96	0,94	0,908	0,753	270,050	305,356	14,14%	276,667	431,333	2
	0,96	1,1	0,985	0,945	8,300	9,723	2,22%	8,333	14,667	4
	0,88	0,96	0,993	0,961	6,300	7,540	3,16%	6,167	12,000	5,6
	0,82	0,94	0,958	0,864	3,783	4,519	3,76%	3,500	7,000	8
	1	0,96	0,946	0,823	1,667	2,229	5,86%	1,333	4,000	11
	1	1,08	0,918	0,635	2,467	2,786	10,15%	2,333	4,000	16
Kalibrovaný trénovací	0,96	0,94	0,879	0,761	265,069	305,018	13,77%	307,167	478,000	2
	0,96	1,1	0,983	0,962	8,528	10,279	2,28%	9,833	17,000	4
	0,88	0,96	0,986	0,967	6,250	7,611	3,14%	5,833	14,667	5,6
	0,82	0,94	0,959	0,912	3,718	4,538	3,70%	3,500	8,667	8
	1	0,96	0,968	0,902	1,685	2,361	5,85%	1,667	5,333	11
	1	1,08	0,864	0,680	2,407	2,956	9,91%	2,000	5,667	16
Originální	1	1	0,87	0,73	289,31	325,88	15,26%	281	583	2
	1	1	0,97	0,91	18,846	20,563	4,81%	17	29	4
	1	1	0,98	0,65	24,308	26,05	13,18%	21	42	5,6
	1	1	0,95	0,06	14	15,437	14,17%	14	26	8
	1	1	0,97	0,88	2,231	2,815	7,43%	2	6	11
	1	1	0,82	0,43	3,077	3,981	11,22%	3	10	16

Obrázek 9 znázorňuje skutečný a předpokládaný počet zrn kameniva ve 13 vzorcích asfaltových směsí. Červená přerušovaná čára představuje přímku $x=y$, která svírá s osou x úhel 45° , a měřítka obou os jsou stejná. Číslo u údajů představuje kód názvu vzorků. Barvy představují různé procentní podíly R-materiálu. Původní předpovědi počtu zrn kameniva jsou vlevo a kalibrované hodnoty vpravo. Z grafů je patrné, že po kalibračním procesu se chyby snížily a přesnost předpovědi se zlepšila. Pokud jde o procentní podíly R-materiálu, nebyl zjištěn žádný konkrétní vztah, kterým by toto bylo možné vyjádřit.

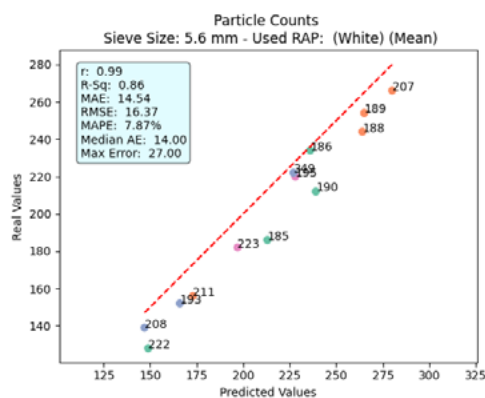




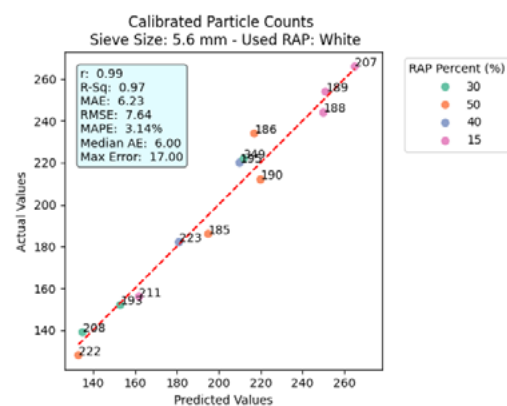
c)



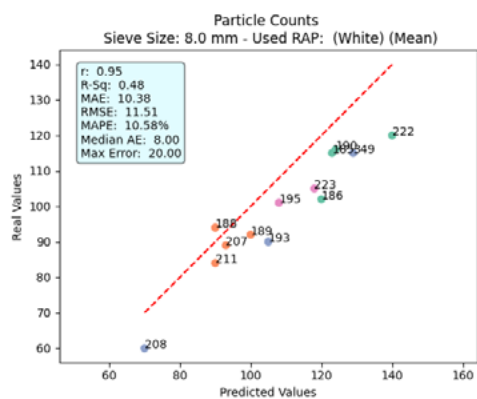
d)



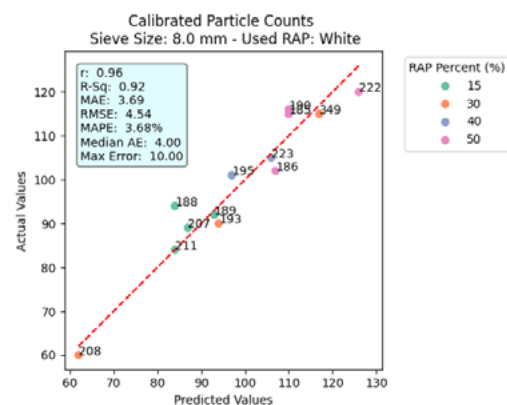
e)



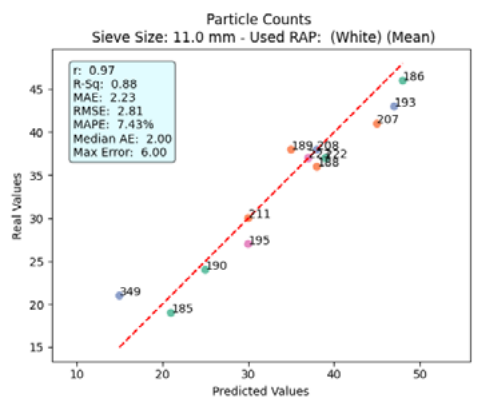
f)



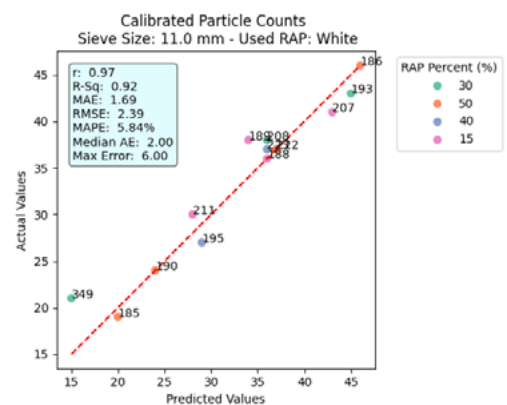
g)



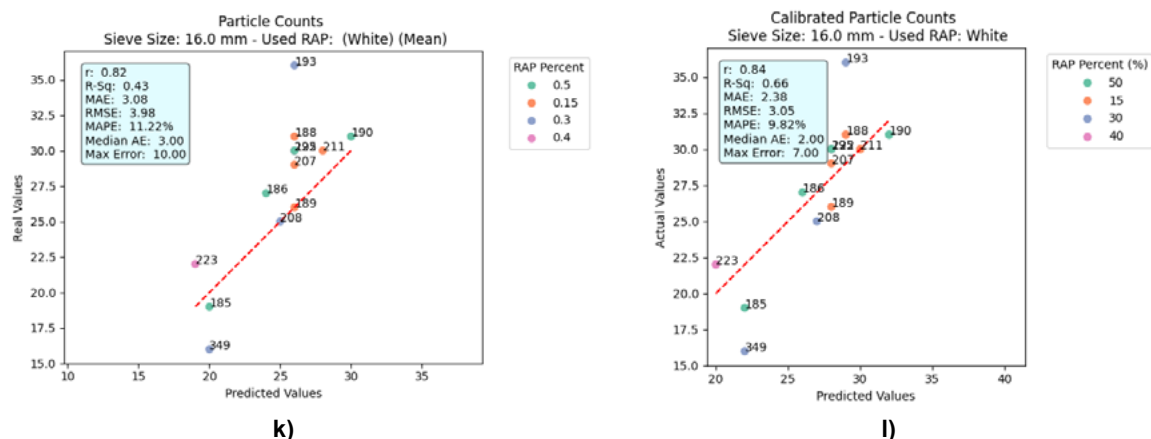
h)



i)



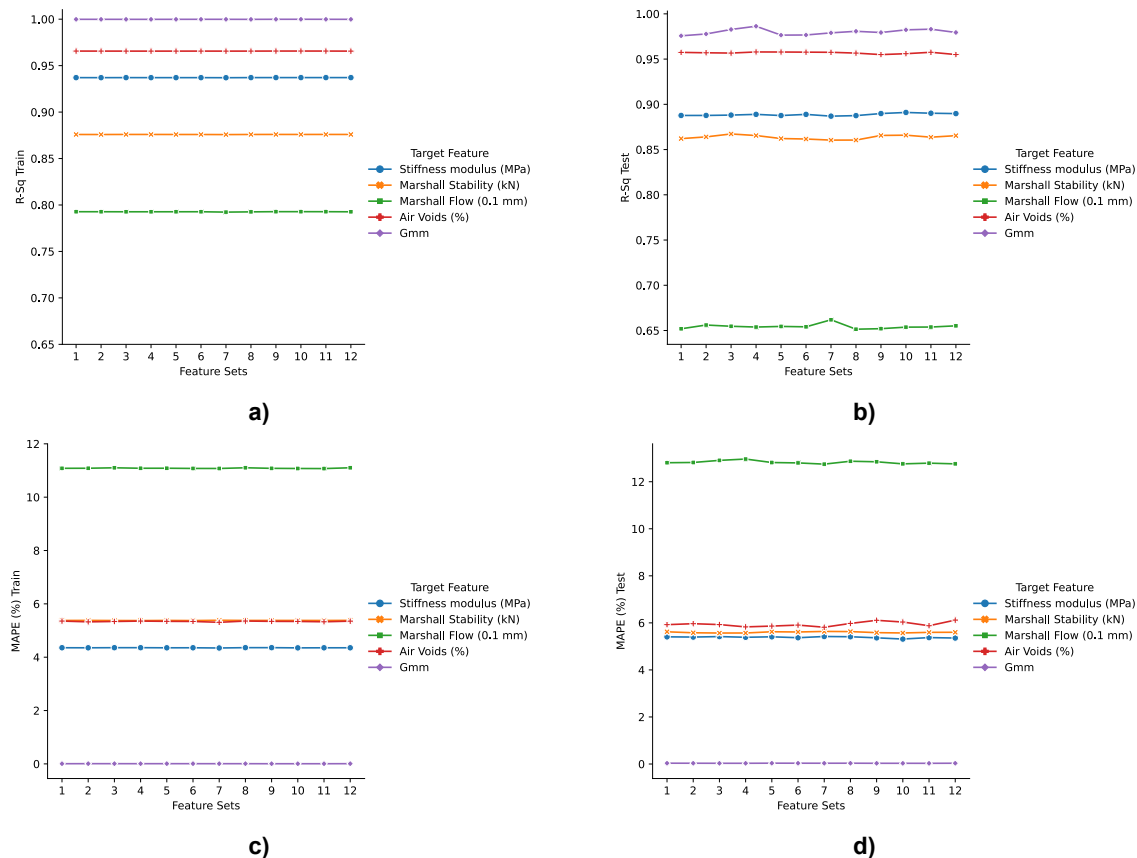
j)



Obrázek 9: Celková výkonost predikce počtu zrn kameniva pomocí původních průměrných hmotností kameniva (vlevo) a kalibrovaných průměrných hmotností kameniva (vpravo)

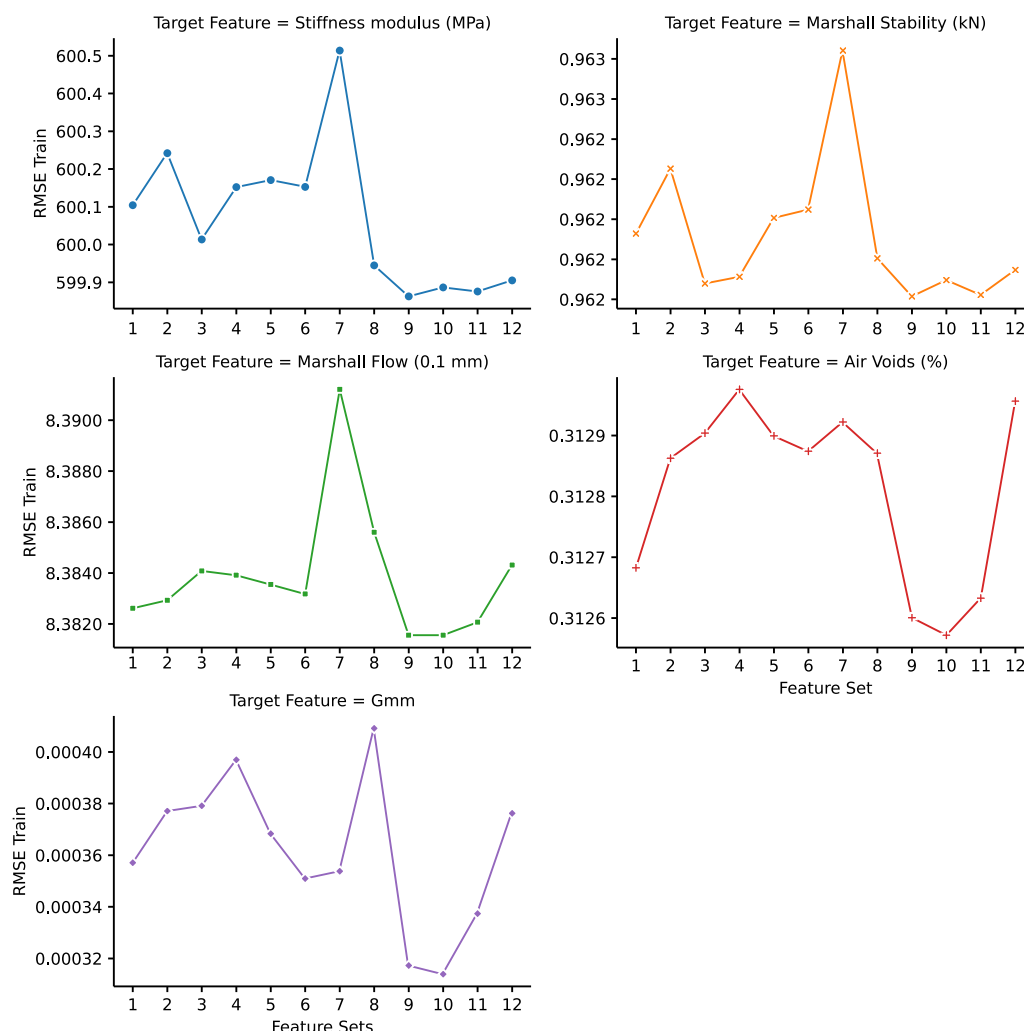
Porovnání různých vstupních parametrů/atributů (IFS) modelů

Obrázek 10 znázorňuje výkonost ML modelu různých vstupních parametrů. Z obrázků 10a a 10b je patrné, že bylo provedeno porovnání z hlediska hodnot R^2 pro trénovací a testovací sady dat. U trénovací sady vykazovaly všechny IFS téměř stejnou výkonost. U testovací sady však došlo k mírným výkyvům. Například maximální objemová hmotnost (Gmm) vykázala nejlepší výkonost při použití IFS-4. Naopak u přetvoření podle Marshalla (MF) byla nejvyšší hodnota R^2 dosažena s IFS-7. Pokud jde o MAPE, v grafech byl vidět podobný vývoj. Protože MAPE je chyba vztažená k modelu, nejmenší chyba znamená nejvyšší výkon. Proto zatímco MF mělo nejmenší výkonost, Gmm vykázala nejlepší výkonost. Celkově různé IFS neměly významný vliv. Pokud však byly podrobněji vyhodnoceny hodnoty RMSE, lze malé rozdíly pozorovat. Tím se zabývá následující část této části článku.



Obrázek 10: Porovnání různých IFS z hlediska výkonosti modelu

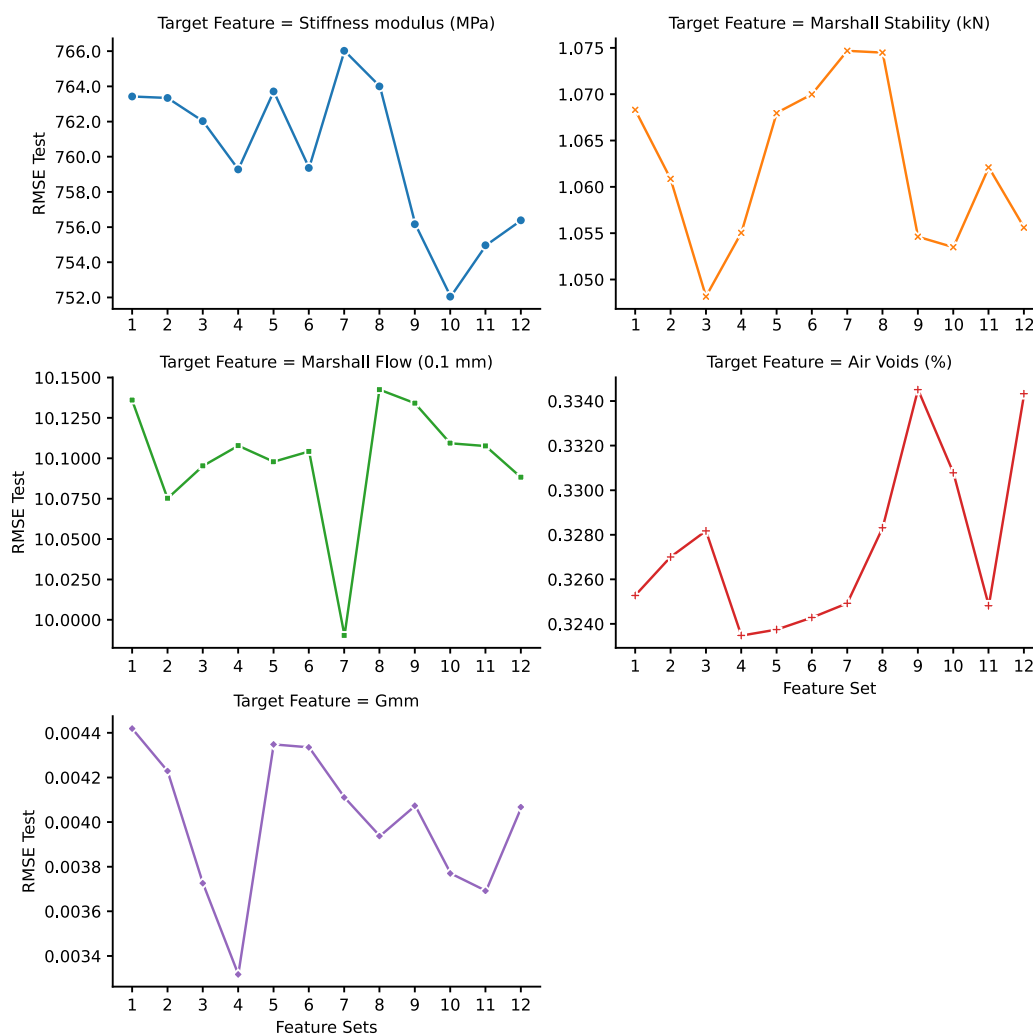
Obrázek 11 znázorňuje hodnoty RMSE trénovací sady pro různé IFS. Z grafů je patrné, že mezi modulem tuhosti (ITSM), stabilitou podle Marshalla (MS) a MF existuje podobný vzorec chování. Podobně i ostatní cílové vlastnosti, tj. Gmm a mezerovitost (Va), vykazují podobné vzorce chování. U první zmíněné skupiny vykazoval IFS-7 nejvyšší chybu, zatímco IFS-9 vykazoval nejnižší chybu. Rozdíl v chybě mezi různými IFS však není významný. Jinými slovy, tuto změnu je téměř nemožné obecně detekovat tradičními testovacími metodami. Proto lze říci, že každý IFS byl dostatečný k zachycení vzorců chování v datech a k vytvoření modelu strojového učení.



Obrázek 11: Hodnoty RMSE pro trénovací datovou sadu v závislosti na různých IFS

Obrázek 12 ilustruje změnu hodnot RMSE v závislosti na posouzení různých IFS. Podobně jako u chyb trénovacích datových sad není změna hodnot RMSE v případě testovacích datových sad nijak výrazně vysoká. Jinými slovy, všechny vstupní parametry modelu vykazovaly podobnou predikční výkonnost. Předchozí studie používaly různé sady vstupních charakteristik k predikci vlastností asfaltových směsí. Tyto výsledky jasně ukázaly následující poznatky:

1. Podobné výsledky byly získány buď pomocí součtové hodnot propadů zrn kameniva, nebo procentuálního zbytku na každém normovém sítu.
2. Použití hodnot zrnitosti menší než 2 mm nemělo vliv na výkonost modelu. Proto bylo pro predikci cílových vlastností dostačující použití zrn větších než 2 mm.
3. Použití počtu zrn kameniva, plochy zrn kameniva (vypočítané dvěma různými metodami) nebo různých kombinací těchto veličin nemá měřitelný vliv v porovnání s použitím pouze vstupních hodnot zrnitosti. Důvodem je skutečnost, že v každém IFS byla použita odlišná kombinace vstupních proměnných a všechny IFS vykazovaly podobnou výkonost.



Obrázek 12: Hodnoty RMSE pro testovací datovou sadu v závislosti na různých IFS

Tabulka 10 shrnuje nejlepší parametry získané z CV mřížkového vyhledávání. Podobné parametry byly získány pro různé IF. Pro dosažení nejlepší predikční výkonnosti se však doporučuje provést mřížkové vyhledávání pro každý vstupní parametr modelu.

Tabulka 10: Nejlepší parametry pro jednotlivé atributy (IFS)

Sada atributů	Bootstrap	max_depth	max_features	min_samples_leaf	min_samples_split	n_estimators
1	True	None	sqrt	1	2	300
2	True	15	log2	1	2	300
3	True	15	log2	1	2	300
4	True	20	log2	1	3	300
5	True	15	log2	1	2	300
6	True	15	sqrt	1	2	300
7	True	15	sqrt	1	2	100
8	True	20	log2	1	3	300
9	True	None	sqrt	1	2	300
10	True	20	log2	1	2	300
11	True	20	log2	1	2	300
12	True	15	sqrt	1	2	300

Význam atributů

Obecné hodnocení

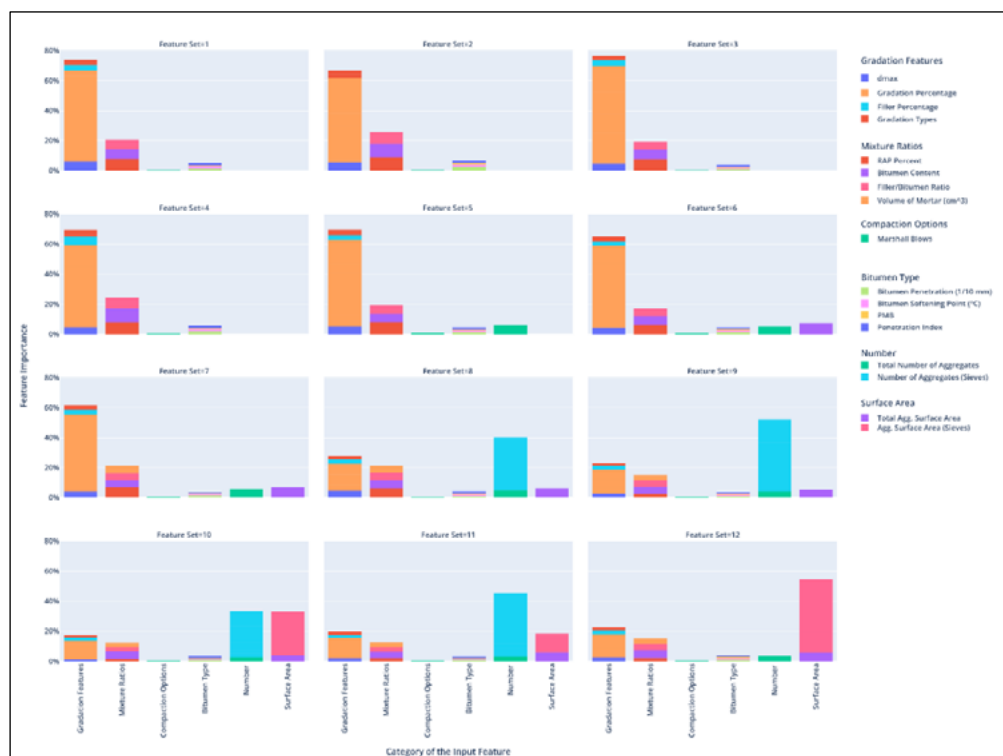
Důležitost jednotlivých atributů pro každý IFS byla extrahována z modelu ML náhodného lesa (obrázek 13). Atributy byly rozděleny do šesti skupin, aby se překonala obtížnost porovnání přílišného množství vstupních parametrů/atributů, jako jsou různé atributy zrnitosti týkající se různých velikostí sít.

Atributy dílčích zrnitostí mají pro IFS 1-7 důležitost 60 % až 75 %. Skutečnost, že zrnitost byla určující vlastností, je také v souladu s předchozím výzkumem [6]. Jakmile se však vlastnosti počtu zrn a plochy zrn přidaly mezi vstupní vlastnosti, převzaly důležitost procentuálně vyjádřené zrnitosti. Vzhledem k tomu, že počet zrn kameniva a plocha zrn úzce souvisí se zrnitostí, měli při porovnání k zrnitosti důležitost IFS 8-12.

Pokud jde o podkategorie charakteristik zrnitosti, význam podílu fileru se u všech IFS pohyboval mezi 2 % a 5 %. Podobný význam měla také konkrétní velikost síta. Význam maximální velikosti použitého kameniva (d_{max}) se pohyboval mezi 1 % a 6 %.

Množství použitého R-materiálu mělo přibližně 7 % významnost pro IFS 1-8. U sad IFS 9-12 byla však mnohem nižší, a to pouze přibližně 2 %. Důvodem je pravděpodobně skutečnost, že v těchto sadách má podíl R-materiálu vs. podíl přírodního kameniva, stejně jako plocha zrn přírodního kameniva nebo R-materiálu, menší vliv než znalost celkového množství R-materiálu. Proto měly tyto vstupy vyšší význam.

Zhutnění zkušebních těles bylo provedeno buď 2x50, nebo 2x75 údery. Jeho význam se u všech IFS pohyboval mezi 4 % a 7 %. Tato vlastnost může být vzhledem k jejímu značnému významu použita v budoucích predikčních modelech. Samozřejmě, toto platí za předpokladu, že daná země bude mít v závislosti na očekávaném kvalitativní třídě asfaltové směsi zavedeny různé úrovně míry zhutnění.



Obrázek 13: Významnost atributů dle jednotlivých kategorií pro datové sady atributů

Kategorie typu asfaltového pojiva tvořila přibližně 4 % významu vlastnosti pro všechny IFS s výjimkou IFS-2 a IFS-4, kde významnost byla mírně vyšší, tedy 7 % a 6 %. Podobná situace je patrná také u obsahu pojiva a poměru filer/asfalt. Význam obsahu pojiva činil přibližně 5 %, s výjimkou IFS-2 a IFS-4, kde byla hodnota vyšší (9 %). Je to pravděpodobně proto, že tyto dva atributy nezahrnovaly procentní podíly drobného kameniva. Vzhledem k tomu, že vlastnosti asfaltu, množství asfaltu, typ drobného kameniva a procentní podíly určují společně vlastnosti mastixu, lze jejich význam přenést na sebe navzájem, jakmile je jeden z nich odstraněn.

Počty zrn kameniva byly do modelů v IFS-5 zavedeny jako celkové počty zrn. Pro všechny následující IFS měly význam 3-6 %. Pro IFS-8 až IFS-11 však byl počet zrn kameniva pro každou velikost síta použit samostatně jako vstupní údaj. Tyto vlastnosti měly význam 30-48 %. Tato hodnota závisí na vlastnostech plochy zrn kameniva a na tom, zda jsou počty zrn kameniva v R-materiálu a zrn přírodního kameniva zahrnuty samostatně, či nikoli.

Celková plocha zrn kameniva měla význam 5-7 % pro IFS 6-12. Jejich význam byl mnohem vyšší, když byla použita plocha zrn pro různé velikosti sít. IFS-10, IFS-11 a IFS-12 měly tyto atributy a jejich význam byl přibližně 29 %, 13 % a 49 %. IFS-12 měl nejvyšší významnost z hlediska charakteristiky plochy kameniva. Důvodem je skutečnost, že v této sadě nejsou žádné vlastnosti týkající se počtu zrn kameniva nebo podílu hrubého kameniva. IFS-11 naopak vykazoval nejnižší význam, protože plochy zrn R-materiálu a zrn z přírodního kameniva nebyly odděleny. Místo toho byly použity jako celková hodnota. Dalším důvodem mohla být skutečnost, že tato měření byla založena na hodnotách specifické plochy získaných z literatury.

Porovnání IFS

V tabulce 11 je uvedeno porovnání mezi IFS. Vstupní atribut, který reprezentuje danou vstupní vlastnost, je uveden ve sloupci „včetně“, zatímco sloupec „vyjma“ uvádí IFS, který danou vstupní vlastnost nezahrnuje. Ve sloupci „porovnání“ je popsán rozdíl v důležitosti jednotlivých vlastností.

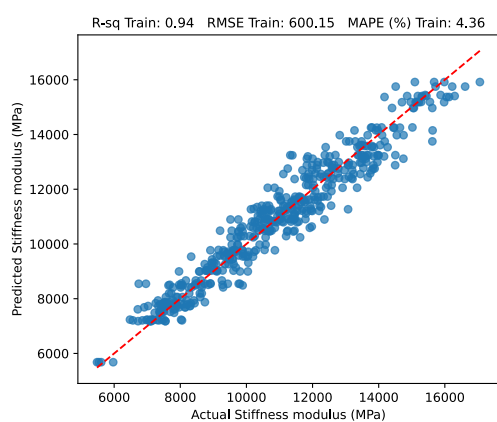
Tabulka 11: Porovnání IFS ve smyslu významnosti atributu

Vstupní atribut	Včetně	Vyjma	Porovnání
Hodnoty propadů	IFS-1	IFS-3	Měly v zásadě stejné vstupní atributy. Nicméně podíl zrnitosti v případě IFS-1 byla hodnotami propadu, zatímco v IFS-3 to byly zbytky na daném síte. Důležitost vlastnosti podílu zrnitosti pro hodnoty zbytků byla o 4 % vyšší. Také kategorie atributu zrnitosti jako celku byla o 2 % vyšší. Zdá se, že hodnoty zbytku jako vstupního atributu mohou mít v trénovaném modelu o něco větší význam než hodnoty propadu.
Procentuální množství filerů	IFS-2	IFS-4	Protože IFS-2 neměl jako vstupní atribut hodnotu podílu fileru, jeho význam byl rozdělen mezi další vlastnosti, jako jsou zrnitost, dmax, typ asfaltu, poměr filer/pojivo, jako i množství R-materiálu ve směsi.
Podíl drobného kameniva	IFS-4	IFS-3	Ve vstupním atributu procentuálního rozložení zrnitosti je rozdíl 10 %. Protože IFS-4 neměl informace o křivce zrnitosti drobného kameniva, byl tento 10% rozdíl rozdělen mezi ostatní vstupní údaje, jež se týkají charakterizace mastixu, jako je obsah pojiva, poměr filer/pojivo a typ asfaltu.
Celkový počet zrn kameniva	IFS-1	IFS-5	IFS-5 má oproti IFS-1 také atribut celkového počtu zrn kameniva. Zdá se, že význam některých atributů se změnil a byl přidán k atributu celkového počtu zrn kameniva. Vstupní vlastnosti se sníženým významem byla zrnitost, dmax, obsah pojiva a poměr filer/pojivo.
Celková plocha povrchu zrn hrubého kameniva	IFS-5	IFS-6	IFS-6 má v porovnání s IFS-5 také atribut celkové plochy povrchu zrn hrubého kameniva hrubého kameniva. Přibližně 7 % významu bylo přeneseno na tuto dodatečnou vlastnost. Atributy se sníženou významností byly: celkový počet zrn kameniva, procentní podíl R-materiálu, dmax, množství fileru, zrnitost jednotlivých frakcí kameniva.
Objem mastixu (asf. tmelu)	IFS-6	IFS-7	IFS-7 v porovnání s IFS-6 zahrnuje navíc i objem mastixu jako vstupní atribut. Přibližně 5 % důležitosti bylo přeneseno na tento dodatečný atribut. Významnost atributu počtu zrn a plochy povrchu zrn se nezměnila. Množství pojiva a procentní podíl R-materiálu se snížily o 1 %, zatímco atribut zrnitosti se snížil přibližně o 3 %.
Celkový počet zrn kameniva na jednotlivých sítích	IFS-7	IFS-8	IFS-8 zahrnuje jako atribut celkové počty zrn kameniva stanovené pro jednotlivá síta >2 mm, a to místo procentuálního podílu hrubého kameniva (v podoby zbytků na jednotlivých sítích). Z poznatků přitom vyplývá, že atribut procentuálního podílu hrubého kameniva se plně promítne v atributu celkového počtu zrn kameniva na jednotlivých sítích.
Počet zrn R-materiálu a přírodního	IFS-8	IFS-9	IFS-9 zahrnuje jako vstupní atribut počet zrn kameniva R-materiálu a zrn přírodního kameniva, a to pro každé použité

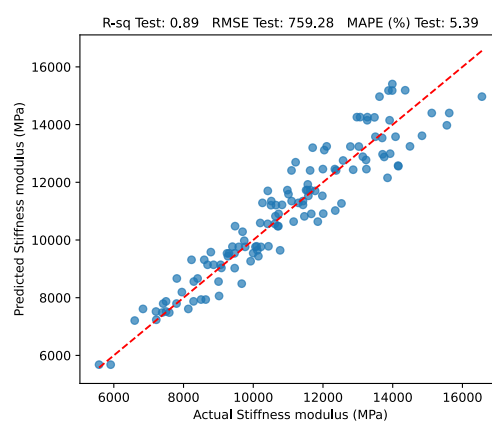
kameniva na jednotlivých sítích			normové síto. Atribut nahrazuje celkový počet zrn kameniva na jednotlivých sítích (bez rozlišení na R-materiál a přírodní kamenivo). Při použití IFS-9 poklesla významnost atributu zrnitosti o 5 %. Rovněž atributy vyjadřujících podíly jednotlivých složek asfaltové směsi z hlediska významnosti poklesly o 6 %, přičemž atribut množství přidávaného R-materiálu v tom tvoří až 4 %. Vliv těchto atributů se promítl v atributu celkového počtu zrn kameniva na jednotlivých sítích, jenž dosáhl významnosti 48 %. Tato změna je logická, protože pokud se jako atribut použije počet zrn R-materiálu a zrn přírodního kameniva, potom tento údaj obsahuje i informaci o množství použitého R-materiálu a informace o distribuci jednotlivých částic.
Změřená plocha povrchu zrn R-materiálu a přírodního kameniva pro jednotlivá síta	IFS-9	IFS-10	IFS-10 zahrnuje jako atribut plochu povrchu zrn R-materiálu a přírodního kameniva pro jednotlivá síta a to jako další vstupní parametr vedle počtu zrn kameniva. Při použití IFS-10 bylo 28 % významnosti přeneseno z parametrů, jako jsou zrnitost (6 %), počet zrn kameniva (19 %) a podíly jednotlivých složek (3 %) na atribut celkové plochy povrchu zrn.
Plocha povrchu zrn R-materiálu a přírodního kameniva pro jednotlivá síta	IFS-9	IFS-12	IFS-12 zahrnuje jako vstupní atribut povrchovou plochu zrn kameniva na každém sítu a to namísto počtu zrn kameniva. Zdá se, že významnost počtu zrn kameniva se v tomto případě převedla do atributu plochy povrchu zrn kameniva.

Výkonost modelu

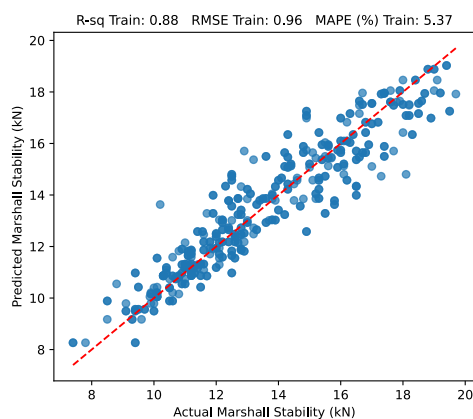
Byly zpracovány diagramy výkonosti modelu pro IFS-4 (obrázek 14). Výkonost trénovací datové sady byla uvedena vlevo, zatímco výkonost testovací datové sady byla uvedena vpravo. Protože všechny IFS měly podobnou výkonost, byl z důvodu jednoduchosti vybrán IFS-4. Pro modul tuhosti byly hodnoty R^2 pro trénování a testování 0,94 a 0,89.



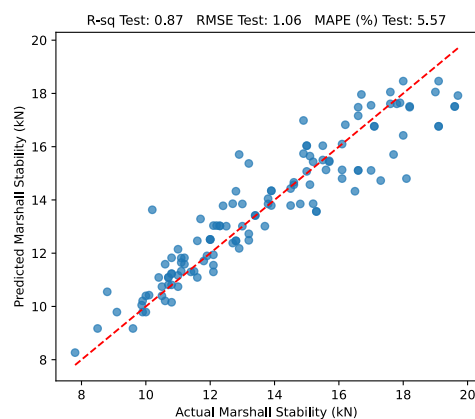
a)



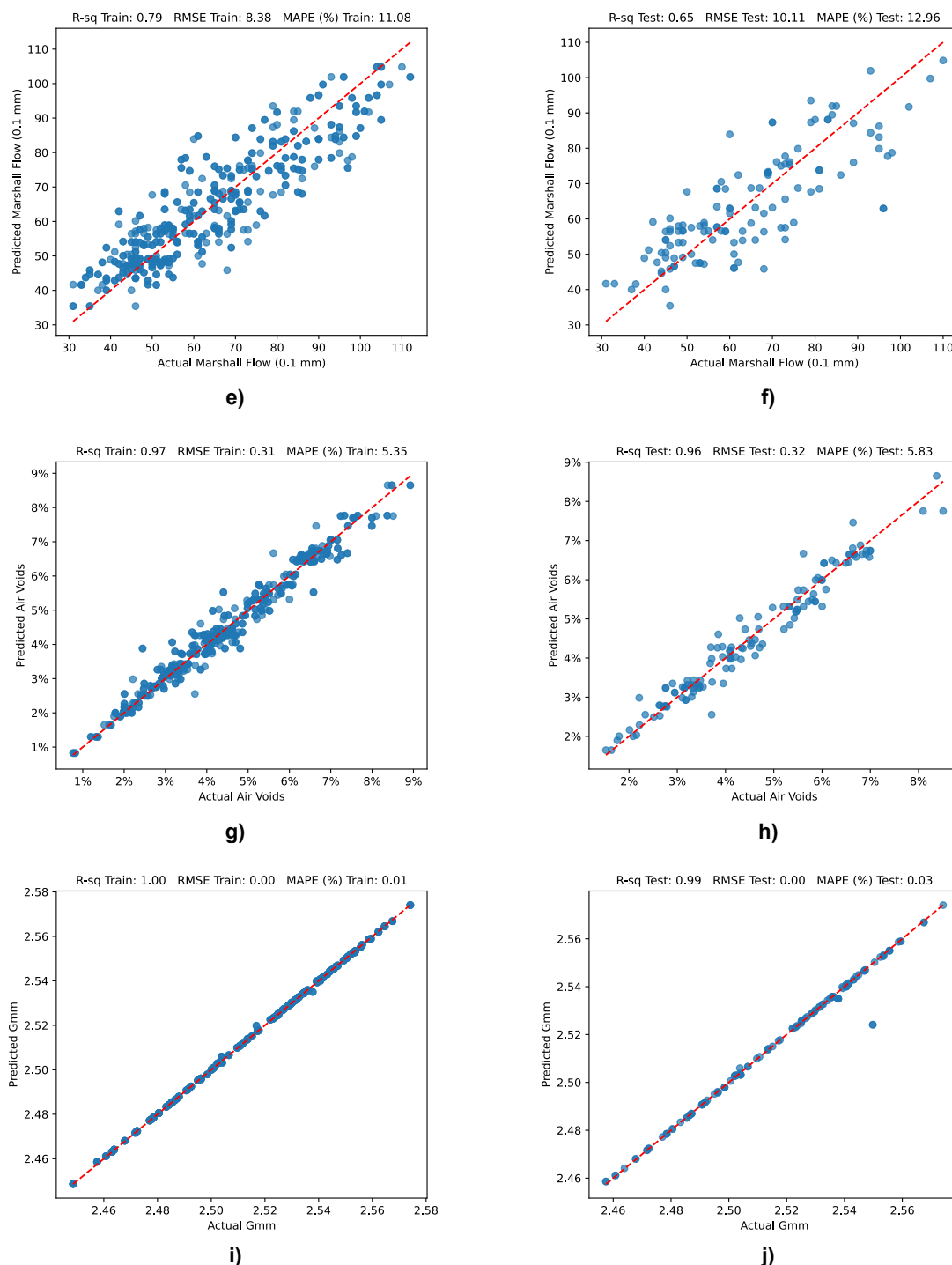
b)



c)



d)

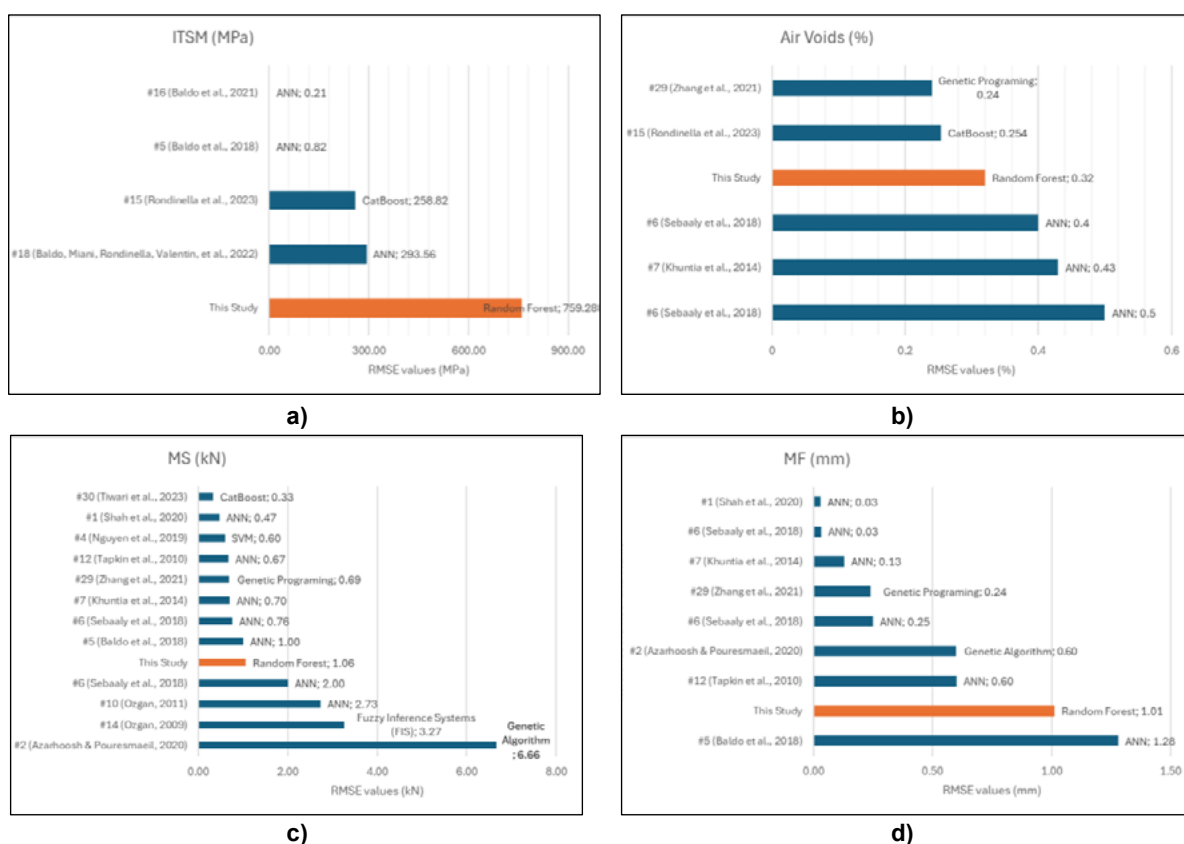


Obrázek 14: Výkonost modelu pro IFS-4 (trénovací datová sada je vlevo, testovací datová sada je vpravo)

Hodnota MAPE byla 5,4 % pro testovací sadu. Tyto výsledky lze považovat za dobrý výkon, vzhledem k tomu, že samotná zkouška modulu tuhosti umožňuje variabilitu od -20 % do 10 % mezi vzorky jedné měřené sady. Stabilita podle Marshalla vykazovala podobný výkon, přičemž hodnoty R^2 obou sad byly blíže k sobě (0,88 a 0,87). Pokud jde o mezerovitost, byla tato charakteristika dle hodnot R^2 a RMSE předpovězena výrazně lépe. Hodnoty MAPE však byly blízké výše uvedeným cílovým charakteristikám tuhosti a stability. Pokud jde o maximální objemovou hmotnost její výkonost byla podle všech tří metrik (tj. R^2 , RMSE a MAPE) vysoká. Pokud jde o přetvoření podle Marshalla, byly hodnoty R^2 pro trénování a testování 0,79 a 0,65. Výkonost této cílové vlastnosti byla nejnižší. Zjištěný výsledek přesto může být dostačující k získání základní představy o chování trvalé deformace u asfaltové směsi.

Jedním z omezení této studie je, že bere v úvahu tradiční ukazatele výkonnosti modelů strojového učení, jako jsou medián AE, MAE, MAEP, MSE, RMSE a R^2 . Užitečné by však bylo použití metody analýzy zkreslení. Analýza zkreslení poskytuje komplexní pochopení přesnosti a spolehlivosti modelu strojového učení na základě zkoumání průměrné chyby, sklonu a průsečíku [30,41]. Obecně je analýza zkreslení vnímána jako proces, který se zaměřuje na identifikaci a kvantifikaci systematických chyb v měření, datech nebo myšlení.

Výkon modelu byl porovnán s předchozími studiemi z hlediska hodnot RMSE. Grafy pro porovnání jsou uvedeny na obr. 15. Ačkoli chyba pro modul tuhosti (ITSM) byla nejvyšší, z hlediska hodnot MAPE se chyba pohybovala v mezích tolerance dle příslušné technické normy pro tuto zkoušku. Pokud jde o mezerovitost, stabilitu podle Marshalla a přetvoření podle Marshalla, hodnoty RMSE se pohybovaly kolem průměru hodnot uvedených v literatuře. Vzhledem k tomu, že některé modely ANN (neuronové sítě) v literatuře vykazovaly lepší výkon, mohlo by být pro budoucí studie výhodné vyzkoušet právě ANN na tomto druhu datového souboru. K vylepšení výkonu modelu lze například použít skupinovou metodu zpracování dat (GMDH) [42].



Obrázek 15: Porovnání výkonnosti modelu dle této studie s poznatky dostupnými v literatuře

Shrnutí a doporučení

V zde uvedené studii byly pro predikci vybraných vlastností asfaltové směsi použity jako vstupní charakteristiky kromě tradičních charakteristik, jako je zrnitost nebo obsah pojiva, také počet zrn kameniva a plocha povrchu zrn kameniva. Kromě toho byly pomocí různých ML modelů testovány různé kombinace vstupních charakteristik. Z této studie lze vyvodit následující závěry:

- Hodnoty AAPW byly stanoveny počítáním zrn kameniva s využitím digitálního obrazu. Tato měření byla kalibrována na 13 vzorcích asfaltových směsí.
- Po kalibračním procesu se výrazně snížily metriky chyb, zejména u velikostí zrn 5,6 mm a 8 mm.
- Mezi počtem zrn kameniva a podílem R-materiálu ve sledovaných vzorcích asfaltové směsi nebyl zjištěn žádný specifický vztah.
- Různé IFS neměly významný vliv. Při podrobném vyhodnocení hodnot RMSE lze však pozorovat malé rozdíly (např. IFS-7 vykazoval nejvyšší chybu, zatímco IFS-9 vykazoval nejnižší chybu pro charakteristiky ITSM, MS a MF).

- Pro předpověď vlastností asfaltové směsi z hlediska jejího návrhu byl jako nejvhodnější navržen ML model s IFS-4. Důvodem pro tuto volbu je skutečnost, že všechny IFS měly podobný výkon a IFS-4 neobsahuje nové vlastnosti, jako je počet zrn kameniva a plochu povrchu zrn kameniva, které byly ve srovnání s procentuálním zastoupením jednotlivých frakcí obtížně měřitelné.
- Podobnou predikční výkonost bylo možné získat, buď pomocí součtové hodnotě propadů, nebo s využitím hodnot zbytku na jednotlivých sítích.
- Použití hodnot pro zrnitost <2 mm nemělo vliv na výkonost modelu. Proto bylo pro předpověď cílových vlastností dostačující použití sítí větších než 2 mm.
- Použití parametru počtu zrn kameniva, plochy povrchu zrn kameniva (vypočítané dvěma různými metodami) nebo různých kombinací těchto dvou charakteristik nemělo měřitelný vliv ve srovnání s použitím pouze vstupních hodnot zrnitosti.
- Atributy zrnitosti má v IFS 1-7 významnost 60-75 %. Jakmile se však jako vstupní parametry přidaly parametry počtu zrn a plochy povrchu, převzaly v rámci porovnání všech těchto tří atributů významnost pro model namísto zrnitosti.
- Vstupní parametr obsahu R-materiálu měl významnost přibližně 7 %.
- Hodnoty R^2 pro trénování a testování byly 0,94 a 0,89 v případě charakteristiky modulu tuhosti. Hodnota MAPE byla 5,4 % v případě testovací sady. Tyto výsledky lze považovat za dobrý výkon, vzhledem k tomu, že zkouška modulu tuhosti v případě metody IT-CY umožňuje variabilitu mezi sadou měřených vzorků -20 % až +10 %. Podobně jsou trénovací a testovací hodnoty R^2 pro stabilitu podle Marshalla 0,88 a 0,87, což lze interpretovat jako vysoký výkon.
- Dle hodnot R^2 a RMSE byla mezerovitost předpovězena modelem strojového učení výrazně lépe v porovnání s modulem tuhosti, stabilitou podle Marshalla a přetvořením podle Marshalla. Hodnoty MAPE se však v případě mezerovitosti blížily výše uvedeným cílovým vlastnostem.
- Predikční výkonnost maximální objemové hmotnosti byla podle všech tří metrik (tj. R^2 , RMSE a MAPE) nad očekávání vysoká.
- Hodnoty R^2 pro trénování a testování přetvoření podle Marshalla byly 0,79 a 0,65. To by mohlo stačit k získání obecné základní představy o chování asfaltové směsi z hlediska trvalé deformaci.
- V této studii byl použit jeden typ zdroje kameniva s různým procentním podílem R-materiálu. Další studie může být provedena s různými typy zdrojů kameniva, aby se vyhodnotil vliv počtu zrn kameniva, stejně jako i parametr plochy jejich povrchu na výkonost ML modelu.
- V budoucích studiích mohou být zavedené modely ML použity k návrhu asfaltové směsi, aby se usnadnily laboratorní postupy.

Poděkování: Tato výzkumná práce byla vypracována díky podpoře programu TUBITAK 2214-A pod číslem žádosti 1059B142200349 a podpoře Gazi University pod číslem projektu FDK-2022-7894, jež realizoval hlavní autor na FSv ČVUT v Praze. Činnosti zajišťované ze strany ČVUT v Praze byly podpořeny projektem SGS23/042/OHK1/1T/11.

Zdroje:

- [1] H.I. Öztürk, E.B. Tan, E. Şengün, I.Ö. Yaman, Comparison of jointed plain concrete pavement systems designed by mechanisticempirical (M-E) method for different traffic, subgrade, material and climatic conditions, J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ. 34 (2019) 771–783. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85069741407&partnerID=40&md5=ea45417c82bda48bc7a31502e9aca319>.
- [2] M.I. Khan, N. Khan, S.R.Z. Hashmi, M.R.M. Yazid, N.I.M. Yusoff, R.W. Azfar, M. Ali, R. Fediuk, Prediction of compressive strength of cementitious grouts for semi-flexible pavement application using machine learning approach, Case Stud. Constr. Mater. 19 (2023) e02370. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02370>.
- [3] M.I. Khan, M.H. Sutanto, N.I.M. Yusoff, S.E. Zoorob, W. Rafiq, M. Ali, R. Fediuk, N.I. Vatin, Cementitious Grouts for Semi-Flexible Pavement Surfaces—A Review, Materials (Basel). 15 (2022). doi:10.3390/ma15155466.
- [4] M. Imran Khan, M.H. Sutanto, M. Bin Napiiah, S.E. Zoorob, A.M. Al-Sabaei, W. Rafiq, M. Ali, A.M. Memon, Investigating the mechanical properties and fuel spillage resistance of semi-flexible pavement surfacing containing irradiated waste PET based grouts, Constr. Build. Mater. 304 (2021) 124641. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124641>.
- [5] A. Khan, J. Huan, R. Zhang, Y. Zhu, W. Zhang, G. Ying, K.N. Ahmad, S.K. Shah, An ensemble tree-based prediction of Marshall mix design parameters and resilient modulus in stabilized base materials, Constr. Build. Mater. 401 (2023) 132833. doi:10.1016/j.conbuildmat.2023.132833.
- [6] H.I. Ozturk, M. Emin Kutay, An artificial neural network model for virtual Superpave asphalt mixture

- design, *Int. J. Pavement Eng.* 15 (2014) 151–162. doi:10.1080/10298436.2013.808341.
- [7] D. Han, Y. Xi, Y. Xie, Z. Li, Y. Zhao, 3D Virtual reconstruction of asphalt mixture microstructure based on rigid body dynamic simulation, *Int. J. Pavement Eng.* 24 (2023). doi:10.1080/10298436.2023.2165654.
 - [8] F. Gong, X. Zhou, Z. You, Y. Liu, S. Chen, Using discrete element models to track movement of coarse aggregates during compaction of asphalt mixture, *Constr. Build. Mater.* 189 (2018) 338–351. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.08.133.
 - [9] Y. Liu, X. Zhou, Z. You, S. Yao, F. Gong, H. Wang, Discrete element modeling of realistic particle shapes in stone-based mixtures through MATLAB-based imaging process, *Constr. Build. Mater.* 143 (2017) 169–178. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.03.037.
 - [10] F.K.A. Awuah, A. Garcia-hernandez, J. Valentin, A digital design method for asphalt mixtures that incorporates aggregate geometry, *Constr. Build. Mater.* 416 (2024) 135281. doi:10.1016/j.conbuildmat.2024.135281.
 - [11] L. Wan, A. Garcia-Hernández, G. Cui, P. Liu, A novel performance-based method to design asphalt mixtures, *Constr. Build. Mater.* 400 (2023). doi:10.1016/j.conbuildmat.2023.132792.
 - [12] S. Michot-Roberto, A. Garcia-Hernández, S. Dopazo-Hilario, A. Dawson, Use of a physics toolbox to simulate aggregate packings, *Constr. Build. Mater.* 311 (2021) 125254. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.125254.
 - [13] A. Garcia-Hernandez, L. Wan, S. Dopazo-Hilario, A. Chiarelli, A. Dawson, Generation of virtual asphalt concrete in a physics engine, *Constr. Build. Mater.* 286 (2021) 122972. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.122972.
 - [14] P. Cao, F. Jin, D. Feng, C. Zhou, W. Hu, Prediction on dynamic modulus of asphalt concrete with random aggregate modeling methods and virtual physics engine, *Constr. Build. Mater.* 125 (2016) 987–997. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.08.121.
 - [15] L. Wan, A. Garcia-Hernandez, Manufacture of asphalt concrete virtually by physics engine and algorithm generation, in: *Elev. Int. Conf. Bear. Capacit. Roads, Railw. Airfields*, Vol. 2, CRC Press, London, 2022: pp. 487–496. doi:10.1201/9781003222897-45.
 - [16] S. Komaragiri, A. Filonzi, A. Gigliotti, A. Bhasin, Evaluation of internal structure of asphalt mixtures compacted using a virtual gyratory compactor, *Int. J. Pavement Eng.* (2022) 1–12. doi:10.1080/10298436.2022.2090558.
 - [17] S. Michot-Roberto, A. Garcia-Hernández, S. Dopazo-Hilario, A. Dawson, The spherical primitive and perlin noise method to recreate realistic aggregate shapes, *Granul. Matter.* 23 (2021) 1–11. doi:10.1007/s10035-021-01105-6.
 - [18] S. Komaragiri, A. Gigliotti, A. Bhasin, Feasibility of using a physics engine to virtually compact asphalt mixtures in a gyratory compactor, *Constr. Build. Mater.* 308 (2021) 124977. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.124977.
 - [19] H. He, J. Zheng, V.R. Schaefer, Simulating shearing behavior of realistic granular soils using physics engine, *Granul. Matter.* 23 (2021) 56. doi:10.1007/s10035-021-01122-5.
 - [20] S. Komaragiri, A. Gigliotti, A. Bhasin, Calibration and extended validation of a virtual asphalt mixture compaction model using bullet physics engine, *Constr. Build. Mater.* 311 (2021) 125257. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.125257.
 - [21] A. Garcia-Hernandez, S. Michot-Roberto, S. Dopazo-Hilario, A. Chiarelli, A. Dawson, Creation of realistic virtual aggregate avatars, *Powder Technol.* 378 (2021) 760–771. doi:10.1016/j.powtec.2020.10.036.
 - [22] A. Garcia-Hernandez, L. Wan, S. Dopazo-Hilario, In-silico manufacturing of asphalt concrete, *Powder Technol.* 386 (2021) 399–410. doi:10.1016/j.powtec.2021.03.065.
 - [23] H. Yao, M. Xu, J. Liu, Y. Liu, J. Ji, Z. You, Literature Review on the Discrete Element Method in Asphalt Mixtures, *Front. Mater.* 9 (2022) 1–19. doi:10.3389/fmats.2022.879245.
 - [24] C. Jin, Y. Feng, X. Yang, P. Liu, Z. Ding, M. Oeser, Virtual design of asphalt mixtures using a growth and contact model based on realistic aggregates, *Constr. Build. Mater.* 320 (2022) 126322. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.126322.
 - [25] C. Jin, F. Zou, X. Yang, K. Liu, 3-D virtual design and microstructural modeling of asphalt mixture based on a digital aggregate library, *Comput. Struct.* 242 (2021) 106378. doi:10.1016/j.compstruc.2020.106378.
 - [26] J. Chen, H. Wang, H. Dan, Y. Xie, Random Modeling of Three-Dimensional Heterogeneous Microstructure of Asphalt Concrete for Mechanical Analysis, *J. Eng. Mech.* 144 (2018) 04018083. doi:10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001505.
 - [27] J. Hu, P. Liu, D. Wang, M. Oeser, Influence of aggregates' spatial characteristics on air-voids in asphalt mixture, *Road Mater. Pavement Des.* 19 (2018) 837–855.

- doi:10.1080/14680629.2017.1279072.
- [28] J. Ji, Y. Dong, R. Zhang, Z. Suo, C. Guo, X. Yang, Z. You, Effect of Water Absorption and Loss Characteristics of Fine Aggregates on Aggregate-Asphalt Adhesion, *KSCE J. Civ. Eng.* 25 (2021) 2020–2035. doi:10.1007/s12205-021-1464-0.
 - [29] H. Liang, L. Shi, D. Wang, X. Xiao, K. Deng, Influence of graded coarse aggregate content and specific surface area on the fracture properties of asphalt mixtures based on discrete element simulations and indoor tests, *Constr. Build. Mater.* 299 (2021) 123942. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.123942.
 - [30] T.H. Fadhil, T.M. Ahmed, Y.I. Al Mashhadany, Application of Artificial Neural Networks as Design Tool for Hot Mix Asphalt, *Int. J. Pavement Res. Technol.* 15 (2022) 269–283. doi:10.1007/s42947-021-00065-7.
 - [31] A. Ali, M. Mahdi, Z.M. Reza, Mechanical Behavior and Permeability of Plastic Concrete Containing Natural Zeolite under Triaxial and Uniaxial Compression, *J. Mater. Civ. Eng.* 34 (2022) 4021453. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004093.
 - [32] A. Akbarpour, M. Mahdikhani, R.Z. Moayed, Effects of natural zeolite and sulfate ions on the mechanical properties and microstructure of plastic concrete, *Front. Struct. Civ. Eng.* 16 (2022) 86–98. doi:10.1007/s11709-021-0793-x.
 - [33] A. Akbarpour, M. Mahdikhani, Effects of natural zeolite and sulfate environment on mechanical properties and permeability of cement–bentonite cutoff wall, *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 27 (2023) 1165–1178. doi:10.1080/19648189.2022.2075940.
 - [34] M. Zauamanis, L. Boesiger, B. Kunz, H. Mazzoni, P. Bruhin, S. Mazor, L. Poulikakos, Three indexes to characterise crushing and screening of reclaimed asphalt pavement, *Int. J. Pavement Eng.* 0 (2021) 1–14. doi:10.1080/10298436.2021.1990287.
 - [35] B. Katla, S. Raju, A.R. Waim, V.A. Danam, Utilization of Higher Percentages of RAP for Improved Mixture Performance by Adopting the Process of Fractionation, *Int. J. Pavement Res. Technol.* 15 (2022) 349–366. doi:10.1007/s42947-021-00026-0.
 - [36] A. Mondal, G.D.R. R.N., Evaluating the Engineering Properties of Asphalt Mixtures Containing RAP Aggregates Incorporating Different Wastes as Fillers and their Effects on the Ageing Susceptibility, *Clean. Waste Syst.* 3 (2022) 100037. doi:10.1016/j.clwas.2022.100037.
 - [37] T. Ma, D. Zhang, Y. Zhang, J. Hong, Micromechanical response of aggregate skeleton within asphalt mixture based on virtual simulation of wheel tracking test, *Constr. Build. Mater.* 111 (2016) 153–163. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.02.104.
 - [38] X. Cai, K.H. Wu, W.K. Huang, C. Wan, Study on the correlation between aggregate skeleton characteristics and rutting performance of asphalt mixture, *Constr. Build. Mater.* 179 (2018) 294–301. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.05.153.
 - [39] S. Bressi, A.G. Dumont, M.N. Partl, An advanced methodology for the mix design optimization of hot mix asphalt, *Mater. Des.* 98 (2016) 174–185. doi:10.1016/j.matdes.2016.03.003.
 - [40] scikit-learn 1.4.2, Metrics and scoring: quantifying the quality of predictions¶, (2024). https://scikit-learn.org/stable/modules/model_evaluation.html.
 - [41] T.M. Ahmed, P.L. Green, H.A. Khalid, Predicting fatigue performance of hot mix asphalt using artificial neural networks, *Road Mater. Pavement Des.* 18 (2017) 141–154. doi:10.1080/14680629.2017.1306928.
 - [42] S.F. Fazel Mojtahedi, A. Akbarpour, A.G. Darzi, H. Sadeghi, M.T. van Genuchten, Prediction of Stress-Dependent Soil Water Retention Using Machine Learning, *Geotech. Geol. Eng.* 42 (2024) 3939–3966. doi:10.1007/s10706-024-02767-8.
 - [43] S.A.R. Shah, M.K. Anwar, H. Arshad, M.A. Qurashi, A. Nisar, A.N. Khan, M. Waseem, Marshall stability and flow analysis of asphalt concrete under progressive temperature conditions: An application of advance decision-making approach, *Constr. Build. Mater.* 262 (2020) 120756. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.120756.
 - [44] A. Azarhoosh, S. Pouresmaeil, Prediction of Marshall Mix Design Parameters in Flexible Pavements Using Genetic Programming, *Arab. J. Sci. Eng.* 45 (2020) 8427–8441. doi:10.1007/s13369-020-04776-0.
 - [45] A.R. Ghanizadeh, F.S. Jahanshahi, V. Khalifeh, F. Jalali, Predicting Flow Number of Asphalt Mixtures Based on the Marshall Mix design Parameters Using Multivariate Adaptive Regression Spline (MARS), *Int. J. Transp. Eng.* 7 (2020).
 - [46] H.L. Nguyen, T.H. Le, C.T. Pham, T.T. Le, L.S. Ho, V.M. Le, B.T. Pham, H.B. Ly, Development of hybrid artificial intelligence approaches and a support vector machine algorithm for predicting the marshall parameters of stone matrix asphalt, *Appl. Sci.* 9 (2019). doi:10.3390/app9153172.
 - [47] N. Baldo, E. Manthos, M. Pasetto, Analysis of the Mechanical Behaviour of Asphalt Concretes

- Using Artificial Neural Networks, *Adv. Civ. Eng.* 2018 (2018). doi:10.1155/2018/1650945.
- [48] H. Sebaaly, S. Varma, J.W. Maina, Optimizing asphalt mix design process using artificial neural network and genetic algorithm, *Constr. Build. Mater.* 168 (2018) 660–670. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.02.118.
- [49] S. Khuntia, A.K. Das, M. Mohanty, M. Panda, Prediction of Marshall Parameters of Modified Bituminous Mixtures Using Artificial Intelligence Techniques, *Int. J. Transp. Sci. Technol.* 3 (2014) 211–227. doi:10.1260/2046-0430.3.3.211.
- [50] A. Aksoy, E. Iskender, H. Tolga Kahraman, Application of the intuitive k-NN Estimator for prediction of the Marshall Test (ASTM D1559) results for asphalt mixtures, *Constr. Build. Mater.* 34 (2012) 561–569. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.02.091.
- [51] A.H. Gandomi, A.H. Alavi, M.R. Mirzahosseini, F.M. Nejad, Nonlinear Genetic-Based Models for Prediction of Flow Number of Asphalt Mixtures, *J. Mater. Civ. Eng.* 23 (2011) 248–263. doi:10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000154.
- [52] E. Ozgan, Artificial neural network based modelling of the Marshall Stability of asphalt concrete, *Expert Syst. Appl.* 38 (2011) 6025–6030. doi:10.1016/j.eswa.2010.11.018.
- [53] M.R. Mirzahosseini, A. Aghaeifar, A.H. Alavi, A.H. Gandomi, R. Seyednour, Permanent deformation analysis of asphalt mixtures using soft computing techniques, *Expert Syst. Appl.* 38 (2011) 6081–6100. doi:10.1016/j.eswa.2010.11.002.
- [54] S. Tapkin, A. Çevik, Ü. Uşar, Prediction of Marshall test results for polypropylene modified dense bituminous mixtures using neural networks, *Expert Syst. Appl.* 37 (2010) 4660–4670. doi:10.1016/j.eswa.2009.12.042.
- [55] S. Tapkin, A. Çevik, Ü. Uşar, Accumulated strain prediction of polypropylene modified marshall specimens in repeated creep test using artificial neural networks, *Expert Syst. Appl.* 36 (2009) 11186–11197. doi:10.1016/j.eswa.2009.02.089.
- [56] E. Ozgan, Fuzzy logic and statistical-based modelling of the Marshall Stability of asphalt concrete under varying temperatures and exposure times, *Adv. Eng. Softw.* 40 (2009) 527–534. doi:10.1016/j.advengsoft.2008.10.005.
- [57] F. Rondinella, F. Daneluz, P. Vacková, J. Valentin, N. Baldo, Volumetric Properties and Stiffness Modulus of Asphalt Concrete Mixtures Made with Selected Quarry Fillers: Experimental Investigation and Machine Learning Prediction, *Materials (Basel)*. 16 (2023). doi:10.3390/ma16031017.
- [58] N. Baldo, M. Miani, F. Rondinella, P. Vacková, J. Valentin, Performance Prediction of Fine-Grained Asphalt Concretes with Different Quarry Fillers by Machine Learning Approaches, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 1203 (2021) 022113. doi:10.1088/1757-899x/1203/2/022113.
- [59] M. Miani, M. Dunnhofer, F. Rondinella, E. Manthos, J. Valentin, C. Micheloni, N. Baldo, Bituminous mixtures experimental data modeling using a hyperparameters-optimized machine learning approach, *Appl. Sci.* 11 (2021). doi:10.3390/app112411710.
- [60] N. Baldo, M. Miani, F. Rondinella, J. Valentin, P. Vacková, E. Manthos, Stiffness Data of High-Modulus Asphalt Concretes for Road Pavements: Predictive Modeling by Machine-Learning, *Coatings*. 12 (2022) 1–20. doi:10.3390/coatings12010054.
- [61] N. Baldo, M. Miani, F. Rondinella, E. Manthos, J. Valentin, Road Pavement Asphalt Concretes for Thin Wearing Layers: A Machine Learning Approach towards Stiffness Modulus and Volumetric Properties Prediction, *Period. Polytech. Civ. Eng.* 66 (2022) 1087–1097. doi:10.3311/PPci.19996.
- [62] A. Behnood, D. Daneshvar, A machine learning study of the dynamic modulus of asphalt concretes: An application of M5P model tree algorithm, *Constr. Build. Mater.* 262 (2020) 120544. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.120544.
- [63] Y. Ali, F. Hussain, M. Irfan, A.S. Buller, An eXtreme Gradient Boosting model for predicting dynamic modulus of asphalt concrete mixtures, *Constr. Build. Mater.* 295 (2021) 123642. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.123642.
- [64] J. Liu, F. Liu, C. Zheng, D. Zhou, L. Wang, Optimizing asphalt mix design through predicting effective asphalt content and absorbed asphalt content using machine learning, *Constr. Build. Mater.* 325 (2022) 126607. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.126607.
- [65] K.M.M. Othman, H. Abdelwahab, Prediction of the optimum asphalt content using artificial neural networks, *Metall. Mater. Eng.* 27 (2021) 227–242. doi:10.30544/579.
- [66] H. Majidifard, B. Jahangiri, P. Rath, L. Urrea Contreras, W.G. Buttlar, A.H. Alavi, Developing a prediction model for rutting depth of asphalt mixtures using gene expression programming, *Constr. Build. Mater.* (2020) 120543. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.120543.
- [67] H. Majidifard, B. Jahangiri, P. Rath, A.H. Alavi, W.G. Buttlar, A deep learning approach to predict Hamburg rutting curve, *Road Mater. Pavement Des.* 22 (2021) 2159–2180.

- doi:10.1080/14680629.2021.1886160.
- [68] H. Majidifard, B. Jahangiri, W.G. Buttlar, A.H. Alavi, New machine learning-based prediction models for fracture energy of asphalt mixtures, *Meas. J. Int. Meas. Confed.* 135 (2019) 438–451. doi:10.1016/j.measurement.2018.11.081.
- [69] S. Rahman, A. Bhasin, A. Smit, Exploring the use of machine learning to predict metrics related to asphalt mixture performance, *Constr. Build. Mater.* 295 (2021) 123585. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.123585.
- [70] W. Zhang, A. Khan, J. Huan, J. Zhong, T. Peng, H. Cheng, Predicting Marshall parameters of flexible pavement using support vector machine and genetic programming, *Constr. Build. Mater.* 306 (2021) 124924. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.124924.
- [71] N. Tiwari, F. Rondinella, N. Satyam, N. Baldo, Alternative Fillers in Asphalt Concrete Mixtures: Laboratory Investigation and Machine Learning Modeling towards Mechanical Performance Prediction, *Materials (Basel)*. 16 (2023). doi:10.3390/ma16020807.
- [72] J. Liu, F. Liu, C. Zheng, D. Zhou, L. Wang, Optimizing asphalt mix design through predicting the rut depth of asphalt pavement using machine learning, *Constr. Build. Mater.* 356 (2022) 129211. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.129211.

SHRUTÍ POZNATKŮ Z KONFERENCE AV'25

Ing. Petr Mondschein, Ph.D., ČVUT v Praze, Fakulta stavební

Úvod

Vážené dámy a pánové, kolegyně a kolegové, přátelé a fandové asfaltových technologií,

mám znovu tu čest uzavřít proběhnuvší konferenci Asfaltové vozovky a zároveň okomentovat sborník příspěvků shrnujícím článkem. Tento ročník konference nese motto „*Asfalt – materiál s historií pro budoucnost*“. Pojdme se podívat dříve, než se dostaneme k odborným závěrům, shrnutím a zhodnocením konference, na statistiku příspěvků a odborných vystoupení.

Program dvou dní konference byl rozdělen opět do tří tematických okruhů: 1. *Inovace materiálů, technologií a návrhu konstrukcí asfaltových vozovek*, 2. *Trendy ve výstavbě, správě a údržbě vozovek*, 3. *Udržitelnost, oběhové hospodářství, digitalizace*. V rámci konference, resp. sborníku, který byl zpracován, bylo prezentováno 30 příspěvků. Jedná se o další mírný pokles ve srovnání s předchozím ročníkem, který proběhl v roce 2023. Nejvíce příspěvků bylo odevzdáno do tématu č. 3, kde bylo představeno 12 příspěvků. V letošním sborníku naleznete příspěvky autorů z 8 zemí. Jedná se o autory z České republiky (22 příspěvků), Itálie (3 příspěvky), Polsko (3 příspěvky), Německo (2 příspěvky), Rakousko (1 příspěvek), Slovensko (1 příspěvek), Tunisko (1 příspěvek), Francie (1 příspěvek), Řecko (1 příspěvek), Turecko (1 příspěvek). Na konferenci se opět prezentovalo mnoho odborníků z univerzitního prostředí, ti spolupracovali na 11 příspěvcích, zastoupeny byly ČVUT v Praze, Fakulta stavební; VUT v Brně, Fakulta stavební; Mendelova Univerzita v Brně; Aristotle University of Thessaloniki; University of Udine; Fakulta stavební, TU ve Varšavě; Faculty of Science and Engineering Macquarie University, NSW, Australia. Z uvedené statistiky vyplývá, že konference Asfaltové vozovky je významnou odbornou akcí, respektovanou odbornou veřejností v České republice, ale i v okolních státech Evropy. Jaká témata rezonovala letošnímu ročníku konference? Pokusím se v následujícím textu stručně shrnout obsah příspěvků, myšlenky autorů prezentující své výsledky výzkumu či zkušenosti z praxe.

Obecná tematika konference může být nahlížena z několika různých úhlů pohledu. Prvním z nich je zaměření na asfaltové směsi jako takové, zejména na jejich složení, vlastnosti a na klíčové komponenty, mezi které patří kamenivo a asfaltové pojivo. Další významnou oblastí je samotná aplikace asfaltových materiálů do konstrukčních vrstev vozovek. Zde se řeší především využití moderních materiálů a inovativních směsí, které mohou přispět k vyšší životnosti, odolnosti i celkové ekonomické efektivitě provádění údržby a oprav komunikací.

Velký důraz byl letos kladen také na principy oběhového hospodářství. Diskutovalo se široké spektrum možností recyklace různých typů materiálů a jejich opětovné využití v nových konstrukcích. S tím souvisí i téma snižování uhlíkové stopy, které se stává stále důležitějším kritériem při posuzování asfaltových technologií a jejich dopadu na životní prostředí.

Všechny uvedené aspekty je však nutné posuzovat v kontextu současných trendů v oblasti digitalizace, využívání pokročilých analytických metod a rozvoje umělé inteligence. Tyto nástroje umožňují efektivnější správu dat, přesnější návrh konstrukcí a kvalitnější řízení celého procesu, od výroby směsí až po jejich konečné použití a údržbu silniční sítě.

Inovace materiálů, technologií a návrhu konstrukcí asfaltových vozovek

První tematický okruh konference roku 2025 zahrnuje jedenáct odborných příspěvků zaměřených především na problematiku asfaltových pojev, jejich chování a možnosti modifikace. Část příspěvků se věnuje složení a úpravám asfaltových směsí, další pak mechanickému chování směsí v laboratorních podmínkách i při zatížení v reálném provozu.

V oblasti materiálových inovací asfaltových pojev je patrný posun od klasických polymerních příměsí k pokročilejším chemickým a biologickým modifikátorům. Příspěvek (T1.2) ukazuje, že vlastnosti PMB asfaltových pojev výrazně závisí na složení vstupního asfaltu, zejména na poměru asfalténu a malténové fáze. Rozdíly mezi asfalty z různých rafinerií se promítají do reologického chování pojev i jejich compatibility s polymerem SBS. Parametry ΔTC a FTI přitom poskytují vhodný základ pro hodnocení odolnosti vůči stárnutí.

Příspěvky (T1.4 a T1.5) se zabývají úpravami silničních asfaltů i dodatečnou modifikací PMB pojev s cílem zlepšit jejich reologické vlastnosti, zvýšit výkonnostní parametry, odolnost vůči vysokému

dopravnímu zatížení asfaltových směsí a zvýšit odolnost asfaltových směsí vůči vyšším teplotám, typickým například pro městské prostředí. Zároveň kladou důraz na potřebu využívat vyšší podíly recyklovaných materiálů. V uvedených studiích byly aplikovány reaktivní modifikátory na bázi isokyanátové chemie a přírodní oleje z kukuřice a slunečnice. Problematiku nehomogenity ropných asfaltů a její dopad na chování směsí mohou dle příspěvku (T1.3) částečně řešit syntetická (transparentní) pojiva, jejichž vlastnosti byly porovnány s klasickými a modifikovanými asfaltovými pojivy.

Asfaltové pojivo tvoří pouze jednu ze složek asfaltových směsí, které se používají v konstrukcích netuhých a polotuhých vozovek. Typickými poruchami těchto vozovek jsou trvalé deformace a různé typy trhlin. Příspěvek (T1.12) se proto zabývá mechanismy vzniku těchto poruch na okružních křižovatkách a navrhuje opatření ke snížení jejich výskytu, například použitím 3D rozptýlené výztuže. Příspěvek (T1.10) představuje nový typ aramidových vláken určených k tomuto účelu. Příspěvek (T1.9) pak dokumentuje, že asfaltové směsi s maximální velikostí zrna 32 mm vykazují vysokou odolnost vůči trvalým deformacím a zvýšenou tuhost při vyšších teplotách, což zároveň snižuje tlak na nedostatkové frakce kameniva běžně používané pro směsi zrnitosti 8 až 22 mm.

Schopnost předvídat chování asfaltových směsí je klíčová pro jejich správný návrh a aplikaci. Příspěvky (T1.6 a T1.7) se v této souvislosti zaměřují na modelování mechanických vlastností. Autoři v (T1.6) ukazují, že umělé neuronové sítě dokáží lépe než klasické regresní modely predikovat modul tuhosti směsí na základě dat ze čtyřbodové ohybové zkoušky. Autoři (T1.7) pak potvrzují, že pro směsi s podílem recyklátu poskytuje Witczakova sigmoidní funkce přesnější popis dynamického modulu než reologický model 2S2P1D. Tyto závěry lze využít i v našich návrhových metodách, například v TP 170. Jejich ověření v provozu dokládá příspěvek (T1.11), který hodnotí visko-elastické chování vozovky pomocí časového průhybu pod zatížením v proměnlivých podmínkách teploty a dopravního zatížení.

Trendy ve výstavbě, správě a údržbě vozovek

Druhé téma letošní konference obsahuje sedm odborných příspěvků. Dlouhodobě osobně apelují, aby ze strany investorů a správců komunikací byly prezentovány odborné veřejnosti jejich zkušenosti se zaváděním nových technologií v případě výstavby a údržby silničních sítí a postupy v digitalizaci.

Současný vývoj v oblasti správy a údržby vozovek směřuje k datově řízenému rozhodování a prediktivní údržbě. Základním nástrojem největšího investora ŘSD je Systém hospodaření s vozovkou (SHV), který integruje informace o stavu sítě, využívá predikční modely degradace a umožňuje plánování oprav. SHV je doplněn o Centrální evidenci vad (CEV), která sjednocuje záznamy o poruchách a zárukách. Tyto nástroje umožňují optimalizaci zásahů podle životního cyklu konstrukce, hospodárnosti i dopravní bezpečnosti (T2.2). Autoři tohoto příspěvku nás seznamují jednak s posloupností údržbových technologií v rámci životního cyklu vozovky, ale i s používáním nových typů asfaltových směsí v rámci výstavby a údržby dálniční sítě a sítě silnic I. třídy. Inovativní asfaltové směsi typu ACP RBL, SMA L či NTAS představují významný posun v oblasti výstavby, správy a údržby vozovek, jelikož dokáží efektivně reagovat na rostoucí nároky na kvalitu, životnost a udržitelnost silniční infrastruktury. Tyto směsi přinášejí nejen zlepšení mechanických a reologických vlastností konstrukcí, ale také přispívají ke snižování energetické náročnosti a emisní zátěže, což je v souladu s evropskými klimatickými cíli. V oblasti údržby se pak prosazují preventivní zásahy: regenerační a konzervační postřiky, mikrokoberce, či technologie Blacktopping – pokládka asfaltových vrstev na stávající cementobetonové kryty pro prodloužení jejich životnosti.

Zajímavý přístup k principům SHV přináší příspěvek (T2.1). Ten představuje model odhadu zbytkové životnosti vozovek na základě vizuálně identifikovaných poruch a indexu kvality povrchu (PQI). Model umožňuje stanovit potřebu údržby a rekonstrukce na síťové úrovni bez nutnosti destruktivních zkoušek, čímž výrazně snižuje náklady a časové nároky na sběr dat a plnění datové základny systému.

V rámci tématu konference věnovaného inovacím materiálů, technologií a návrhu konstrukcí asfaltových vozovek byla diskutována 3D rozptýlená výztuž. Příspěvek (T2.3) prezentoval dlouhodobé zkušenosti s touto relativně jednoduchou, a díky fyzické přítomnosti vláken ve směsi také trvalou, metodou modifikace asfaltových směsí. Výsledky z pokusného úseku potvrzují pozitivní vliv 3D výztuže na chování asfaltových směsí i jednotlivých vrstev. Na trhu je dostupná široká škála takových výrobků, avšak jejich účinnost se liší, a proto je nezbytné volit materiály s prokazatelným přínosem.

Výztužné prvky se v konstrukci vozovek neobjevují pouze ve 3D formě, ale také ve formě 2D, která má své specifické využití při opravách. Příspěvek (T2.4) poukázal na to, že sklovláknité geomříže vložené mezi asfaltové vrstvy dokážou při zachování stejné tloušťky konstrukce zvýšit počet zatěžovacích cyklů o více než 140 %. Správná volba a aplikace geomříží tedy může významně prodloužit životnost vozovky.

Pro zabudování těchto prvků se používají spojovací postřiky z asfaltových emulzí. Příspěvek (T2.6) se zabýval návrhem speciálních emulzí, jejich laboratornímu ověření i testování v podmínkách stavby. Prezentované emulze jsou vhodné zejména pro použití s geokompozity nebo při realizaci mostních konstrukcí. Příspěvek (T2.5) v této souvislosti upozornil na specifické poruchy mostních vozovek, které mohou vznikat kombinací nerovností mostovky, nedostatečného zhutnění ložních vrstev a akumulace vody nad izolací, což může vést až k rozpadu asfaltových vrstev. Tyto poznatky přispěly k revizi normy ČSN 73 6242, jež zpřísňuje požadavky na rovinatost mostovek a stanovuje nutnost provádění vyrovnávacích vrstev či broušení povrchu před pokládkou.

V souvislosti se spojovacími postřiky lze navíc omezit nežádoucí nalepování pojiva na pneumatiky stavebních strojů použitím stabilizovaného vápenného mléka jako ochranné vrstvy (T2.7). Tato technologie zachovává adhezi spojovacího postřiku a současně zvyšuje čistotu a bezpečnost práce. Po jejím zavedení do ČSN 73 6121 a TKP 7 se její využití v České republice stále rozšiřuje, což potvrzuje soulad s pozitivními zahraničními zkušenostmi.

Udržitelnost, oběhové hospodářství, digitalizace

Udržitelnost, oběhové hospodářství, digitalizace je rezonující téma nejen této konference, ale posledních několika roků se jedná o diskutované téma v České republice, v Evropě a ve světě. V České republice je hlavním směrem v oblasti cirkulární ekonomiky opětovné použití materiálů a recyklace, využití R-materiálu v za horka vyráběných asfaltových směsích, ale i za studena vyráběných hydraulicky stmelených směsích, kde je maticí vyfrézovaný nebo vybouraný R-materiál. Dalším tématem cirkulární ekonomiky je využití dalších materiálů v konstrukčních vrstvách vozovek, resp. v asfaltových směsích (T3.11) jako jsou například asfaltové izolační materiály (T3.7). V tomto třetím tématu konference však byly zejména diskutovány nízkoteplotní asfaltové směsi (T3.5, T3.8, T3.9) a využití R-materiálu v asfaltových směsích (T3.6, T3.11), a to i obě témata dohromady (T3.5).

Hlavní důraz je opět kladen na maximalizaci využití R-materiálu v jakýchkoliv technologiích, v rámci této konference je kladen důraz na technologie vyráběné za horka. Výhodou asfaltových vozovek je jejich znovupoužití, a to i 100 % recyklace. K tomuto přístupu nás nutí nedostatek neobnovitelných zdrojů, ale i nutnost předcházet skládkování, tedy využití zpětně získaných materiálů do konstrukcí vozovek. Objem výroby asfaltových směsí s určitým podílem R-materiálu se v České republice výrazně zvyšuje až do takové míry, že v některých regionech se asfaltový R-materiál stává stejně nedostatkovou surovinou jako kamenivo. Důležitým aspektem výroby asfaltových směsí s podílem R-materiálu je jeho homogenita, množství a vlastnosti asfaltového pojiva. Asfaltové pojivo obsažené v R-materiálu může být příčinou vzniku poruch ve formě trhlin a z tohoto důvodu je nutné věnovat pozornost jeho oživení, a to s dlouhodobými účinky (T3.6, T3.9).

Významným trendem v oblasti udržitelnosti silničního hospodářství je dekarbonizace a snížení uhlíkové stopy. Jednou z možných cest, jak se přiblížit k cíli je využívání technologie nízkoteplotních směsí. Touto tematikou se zabývají autoři příspěvků (T3.5, T3.8, T3.9). Asfaltové směsi vyráběné za snížených teplot musí vykazovat stejné vlastnosti jako standardní. Příspěvky nás seznamují se zkušenostmi a realizacemi nízkoteplotních asfaltových směsí v České republice, Slovensku, Polsku a Německu. Při výrobě a celém procesu dopravy a pokládky dochází ke snižování procesních teplot o cca 20°C. Nejedná se jen o snížení spotřeby energie na obalovně, snížení uhlíkové stopy, ale i zlepšení pracovního prostředí z pohledu komfortu a zdraví.

V tématu *Udržitelnost, oběhové hospodářství, digitalizace* nelze opomenout již dlouhodobě prezentovanou problematiku asfaltových směsí snižující valivý hluk na kontaktu pneumatika-obrusná vrstva. Autoři příspěvku (T3.3) se zaměřili na dlouhodobé změny hlučnosti povrchů vozovek v čase. Konstatují, že je důležité si definovat, s jakým typem povrchu chceme z hlediska jeho akustických vlastností pracovat a jakého výsledku chceme dosáhnout. Největšího absolutního snížení hlučnosti oproti výchozímu stavu lze dosáhnout pouze použitím obrusných směsí se sníženou hlučností. Ty však degradují oproti jiným povrchům rychleji než jiné, které nesnižují hlučnost tak výrazně, ale jejich akustické zhoršování v čase probíhá pomaleji.

Tématu digitalizace se v letošním ročníku konference věnoval příspěvek (T3.2), a to v souvislosti s posuzováním životního cyklu staveb. Digitální nástroje mohou významně usnadnit shromažďování, zpracování i vyhodnocování dat potřebných pro LCA ve všech jeho sledovaných etapách. Základem pro tvorbu relevantních modelů a výpočetních postupů jsou hodnoty EPD použitých materiálů a informace o jejich dopravě do obaloven asfaltových směsí. Údaje získané z řídicích systémů lze následně využít k určení environmentálních dopadů v závislosti na aktuálně vyráběném množství asfaltové směsi. Rovněž dopad dopravy, pokládky a hutnění asfaltové směsi lze digitálně sledovat a vyhodnocovat. Díky takto automaticky shromážděným datům je následně možné velmi jednoduše sestavit kompletní hodnocení životního cyklu jak samotné obalovny, tak i konkrétní stavby. A právě problematiku EPD u asfaltových směsí osvětlují autoři článku (T3.1), kde nás informují, jak k EPD přistupují v Norsku, Francii a Německu.

Závěr

Dámy a pánové, vážené kolegyně a kolegové, milí přátelé a příznivci asfaltových technologií, tento příspěvek vzniká – jako každoročně – ještě před samotným zahájením konference, aby mohl uzavřít sborník, ačkoliv jeho úkolem je hodnotit průběh celého dvoudenního programu. Je tedy nezbytné trochu předjímat a spoléhat se na dostupné informace. Už nyní ale mohu říci, že zájem o letošní ročník byl mimořádný. Kapacita byla naplněna a pořadatelé museli některé další zájemce odmítnout. Věřím, že doprovodná výstava opět nabídla pestrý prostor pro odborné i neformální rozhovory u jednotlivých stánků. Dovolím si rovněž odhadnout, že přednáškový sál byl po celou dobu zaplněn posluchači, které opravdu zajímá odborný obsah konference, a že v závěru každého bloku proběhla podnětná diskuse mezi přednášejícími a delegáty.

Sborník konference Asfaltové vozovky 2025 si i letos drží vysokou odbornou úroveň. Najdete v něm mnoho užitečných informací, které můžete využít ve své praxi. Pokud si porovnáte letošní příspěvky s těmi z minulých let, opět se Vám otevře možnost sledovat vývoj materiálů a technologií v našem oboru. Kam se posouváme? Na co dnes klademe důraz? V oblasti dopravní infrastruktury stále silněji vnímáme omezené materiálové zdroje, které máme k dispozici pro výstavbu a opravy. O to více hledáme řešení, technologie a postupy, které budou dlouhodobě udržitelné, opakovatelné a přinesou co největší užitek.

Vážené dámy a pánové, milé kolegyně a kolegové, děkuji Vám za účast na letošní konferenci a už nyní si Vás dovoluji pozvat na její další ročník, který se uskuteční v roce 2027 v Českých Budějovicích. Těším se na setkání.



AdheBit® LA-1245



Tekutá adhezivní přísada s nízkou viskozitou a vysokým účinkem.



Duroflex® Standard

Modifikační přísada do asfaltových směsí vyrobená z recyklovaných plastů.



Licomont® BS 100

Modifikační přísada na bázi amidových vosků, vhodná pro všechny typy asfaltových směsí. Směsi modifikované pomocí Licomont BS 100 mají obdobné parametry jako asfaltové směsi vyrobené s použitím PmB.



LowTherm® 4G



Biologicky rozložitelná přísada pro asfaltové směsi vyráběné za tepla. Zlepšuje zhutnitelnost směsi, zpracovatelnost a trvanlivost vozovky, zlepšuje přilnavost pojiva ke kamenivu a umožňuje snížení pracovních teplot. Neškodí lidskému zdraví ani životnímu prostředí.



LowTherm® ACF

Rejuvenátor a současně promotor adheze a nízkoteplotní přísada určená k výrobě směsí s vysokým obsahem R-materiálu.



PEP - granulované pigmenty

Pigmenty nejnovější generace určené k výrobě barevného asfaltu. Jednoduchá manipulace, přesné dávkování a trvanlivý barevný efekt. Čistě a bezpečné řešení pro lidi i životní prostředí.



Shell GTL Sarawax® SX 105

Modifikační přísada na bázi FT vosku, určená k modifikaci litých asfaltů.



WAWAX®-Ultra

Přísada určená k modifikaci litých asfaltů, vhodná i k manuálnímu zpracování.



LAITEX B-733

Vodná vysokosušinná kationaktivní butadien-styrenová disperze.

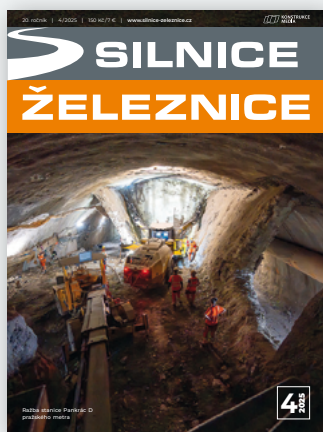


RESTAPLAST

Jsme dodavatelem dvou klíčových vstupních surovin pro technologii modifikace asfaltových směsí RESTAPLAST.

SPOLU TVOŘÍME BUDOUCNOST OBORU

 KONSTRUKCE
MEDIA



Jsme více než 25 let důvěryhodnou platformou pro odborníky z akademické i komerční oblasti, kteří se zabývají problematikou liniových staveb. Umožňujeme sdílení odborných znalostí a know-how. Nově jsme začali natáčet podcasty a videoreportáže ze staveb, jejichž prostřednictvím se můžete prezentovat i vy. Online verze časopisu má stoupající návštěvnost. Podporujeme také projekt Kým budu, který si klade za cíl zatraktivnit technické vzdělávání.

**Společně formujeme budoucnost oboru.
S respektem a hrdostí.**

silnice-zeleznice.cz

 SILNICE
ŽELEZNICE

Sborník ASFALTOVÉ VOZOVKY 2025/ASPHALT PAVEMENTS 2025 Proceedings

Sborník příspěvků je určený pro účastníky konference Asfaltové vozovky 2025
The Proceedings are intended for the participants of the Conference Asphalt Pavements 2025

Vydává/Issued by: PRAGOPROJEKT, a.s., K Ryšánce 1668/16, 147 54 Praha 4

Distribuce/Distributed by: PRAGOPROJEKT, a.s., oddělení PŠČ, Thámová 181/20, 186 00 Praha 8

Zpracoval: kolektiv autorů/Elaborated by: Collective of authors

Odpovědný redaktor/Responsible editor:

Mgr. Eva Procházková, PRAGOPROJEKT, a.s., oddělení PŠČ, Thámová 181/20, 186 00 Praha 8

Překlady odborných příspěvků/Papers translated by:

Ing. Jiří Fiedler

Ing. Tomáš Koudelka, Ph.D.

Ing. Václav Valentin

doc. Ing. Jan Valentin, Ph.D.

Ing. Maria Míková

Grafický návrh/Graphic design: Titty, s.r.o.

Uzávěrka/Deadline: 30. 10. 2025

Vydání 1./1st edition

www.asfaltove-vozovky.cz; www.sdruzeni-silnice.cz

ISBN 978-80-908948-6-0



9 788090 894860

Vystavovatelé | Exhibitors:

Výstavní stánky | Exhibition booths

ASKOM a.s.
BIONA JERSÍN, s.r.o.
Bitrak, s.r.o.
COLAS CZ, a.s.
COMAP s.r.l.
COMMATEL - Obchodní činnost, s.r.o.
EMZET s.r.o.
ENVIRON, s.r.o.
Fliegl Bau- und Kommunaltechnik GmbH
FREKOMOS, s.r.o.
HSH Chemie, s.r.o.
Inreco Asfalt s.r.o.
LABOR machine s.r.o.

MI Roads a.s.
MOBA Mobile Automation
ORLEN Asfalt Česká republika s.r.o.
PORR a.s.
SAINT-GOBAIN ADFORS CZ s.r.o.
SILNICE HEJDA s.r.o.
Skanska Asfalt s.r.o.
STRABAG a.s.
SWIETELSKY stavební s.r.o.
TotalEnergies Marketing Česká republika s.r.o.
VIALIT SOBĚSLAV spol. s r.o.
VINCI Construction CS a.s.
Wirtgen Österreich GmbH

Výstavní roll up | Exhibition roll up

CIUR a.s.
COLAS CZ, a.s.
COMMATEL - Obchodní činnost, s.r.o.
Česká agentura pro standardizaci
MI Roads a.s.
OMV Česká republika s.r.o.
ORLEN Asfalt Česká republika s.r.o.
SAINT-GOBAIN ADFORS CZ s.r.o.

SILMOS-Q s.r.o.
STRABAG a.s.
SWIETELSKY stavební s.r.o.
TotalEnergies Marketing Česká republika s.r.o.
VIALIT SOBĚSLAV spol. s r.o.
VINCI Construction CS a.s.
Wirtgen Österreich GmbH

Loga v jednacím sále | Logos of the companies in the conference hall

CIUR a.s.
COLAS CZ, a.s.
Česká agentura pro standardizaci
Euro-bit Trade s.r.o.
Froněk spol. s r.o.
MI Roads a.s.
OMV Česká republika s.r.o.
ORLEN Asfalt Česká republika s.r.o.

SAINT-GOBAIN ADFORS CZ s.r.o.
Skanska Asfalt s.r.o.
SQZ, s.r.o.
STRABAG a.s.
SWIETELSKY stavební s.r.o.
TotalEnergies Marketing Česká republika s.r.o.
VINCI Construction CS a.s.

Jiné formy prezentace | Other form of presentation

ECT, s.r.o.
LABTECH s.r.o.

Magistrát hl. m. Prahy
Q Point GmbH

Generální partner | General partner



ORLEN
ASFALT
ČESKÁ REPUBLIKA

Hlavní partneři | Main partners



Vystavovatelé | Exhibitors

