



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

# REOLOGICKÉ VLASTNOSTI ASFALTOVÝCH POJIV

RHEOLOGICAL PROPERTIES OF ASPHALT BINDERS

## TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

ANOTATION OF Ph.D. THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Pavel Coufalík

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Hýzl, Ph.D.

BRNO 2017

## **ABSTRACT**

Dissertation thesis is focused on rheological properties of asphalt binders and on changes of their performance during the lifetime in road structures. Aging processes of asphalt binders and methods of laboratory aging are described in the theoretical part of the thesis. Furthermore, rheological models and related test methods for the evaluation of asphalt binders are described. In the practical part, properties of asphalt binders are investigated after aging process and their performance is evaluated by empirical and functional test methods. The various methods of aging are compared with each other and a relationship between real conditions and laboratory aging is researched. In the next section, vacuum flashed cracked residue (VFCR) is added to the selected asphalt binders and their influence on rheological properties during description of aging of asphalt binders is investigated. The results were used in publication of two certified methodologies under the title „The methodology for the evaluation of paving bitumen in terms of susceptibility to thermal oxidative aging“ and „The methodology describes laboratory aging of asphalt mixtures“. The results of the thesis are listed in the conclusion.

## **KEYWORDS**

Bituminous binder, binder ageing, determination of the resistance to hardening under the influence of heat and air, RTFOT, dynamic shear rheometer, DSR, viscosity, complex shear modulus, phase angle, Vacuum Flashed Cracked Residue, VFCR.

## **ABSTRAKT**

Disertační práce se zabývá reologií asfaltových pojiv a změnou vlastností v průběhu životnosti ve vozovkách pozemních komunikací. V teoretické části je popsán princip stárnutí asfaltových pojiv a způsoby simulace stárnutí v laboratoři. Dále jsou popsány základní reologické modely a na ně navazující laboratorní zkoušky, které se používají při hodnocení asfaltových pojiv. V praktické části jsou silniční asfalty podrobeny vybraným metodám laboratorního stárnutí a jsou posuzovány pomocí empirických a funkčních zkoušek. Jednotlivé metody stárnutí jsou porovnány mezi sebou a zároveň je hledán vztah mezi realitou a laboratorním stárnutím. V další části práce je do vybraných silničních asfaltů přidáván visbreakingový zbytek (VFCR) a je zjišťován jeho vliv na reologické vlastnosti v průběhu stárnutí asfaltového pojiva. Výsledky získané v rámci disertační práce byly použity pro sestavení certifikovaných metodik s názvem: „Metodika pro hodnocení silničních asfaltů z hlediska náchylnosti k termooxidačnímu stárnutí“ a „Metodika popisující laboratorní stárnutí asfaltových směsí“. V závěru jsou shrnuty výsledky disertační práce.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Silniční asfalt, reologie, stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu, RTFOT, dynamický smykový reometr, DSR, viskozita, komplexní smykový modul, fázový úhel, visbreakingový zbytek, VFCR.

## **MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE**

Ústav pozemních komunikací a Knihovnické a informační centrum FAST VUT v Brně.

# OBSAH

<b>1 ÚVOD .....</b>	<b>5</b>
<b>2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE .....</b>	<b>6</b>
<b>3 ASFALTOVÉ POJIVO.....</b>	<b>7</b>
<b>4 PROBLEMATIKA STÁRNUTÍ ASFALTOVÝCH POJIV A SMĚSÍ.....</b>	<b>8</b>
4.1 Tepelná stálost v tenké pohybující se vrstvě (RTFOT) .....	9
4.2 Urychlené dlouhodobé stárnutí v tlakové nádobě (PAV) .....	10
4.3 Stárnutí asfaltové směsi Braunschweiger Alterung (BSA).....	10
<b>5 POUŽITÉ MATERIÁLY A ZKUŠEBNÍ METODY .....</b>	<b>11</b>
<b>6 VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ.....</b>	<b>11</b>
6.1 Fyzikální a chemické vlastnosti silničních asfaltů .....	12
6.2 Srovnání simulace dlouhodobého stárnutí metodami 3xRTFOT a RTFOT+PAV .....	15
6.3 Srovnání krátkodobého stárnutí metodou RTFOT s reálnou situací.....	16
6.4 Srovnání vlastností silničního asfaltu stejného výrobce .....	17
6.5 Metodika pro hodnocení silničních asfaltů z hlediska náchylnosti k termooxidačnímu stárnutí .....	17
6.6 Matematické modelování zkoušky Multiple Stress Creep Recovery Test pomocí Burgersova modelu .....	18
6.7 Vzájemná korelace mezi jednotlivými výsledky .....	20
6.8 Srovnání simulace stárnutí asfaltového pojiva a asfaltové směsi .....	22
6.9 Metodika popisující laboratorní stárnutí asfaltových směsí .....	23
6.10 Hodnocení silničních asfaltů používaných v ČR pomocí metodiky SHRP .....	23
6.11 Silniční asfalty s obsahem visbreakingového zbytku .....	24
6.12 Srovnání silničních asfaltů s přesným dávkováním VFCR s běžnými silničními asfalty využívanými v České republice .....	26
<b>7 ZÁVĚR.....</b>	<b>27</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>30</b>
<b>ŽIVOTOPIS .....</b>	<b>33</b>

# 1 ÚVOD

Asfaltové směsi patří v České republice k nejčastěji využívaným materiálům při výstavbě krytových vrstev vozovek. Celková délka všech komunikací v Evropě přesahuje 5 milionů km, přičemž asfaltové vozovky tvoří více než 90 %. Jen během roku 2014 bylo vyrobeno v Evropě okolo 265 milionů tun asfaltových směsí [1, 18]. Je tedy patrné, že se jedná o významné celospolečenské náklady a je nezbytné dbát na kvalitu a životnost tohoto stavebního materiálu. [8]

Pokud pomineme vzduchové mezery a různé modifikační přísady, tak asfaltovou směs tvoří dvě základní složky: kamenivo a asfaltové pojivo, jehož hmotnostní podíl se nejčastěji pohybuje v rozmezí 5 % až 8 %. Přestože největší část asfaltové směsi tvoří kamenivo, významné jsou i vlastnosti asfaltových pojiv. Jedná se o materiál organického původu, který se skládá z řady uhlovodíkových sloučenin, jež za určitých podmínek podléhají degradačním procesům vlivem působení tepla, vzdušného kyslíku a ultrafialového záření. Tyto vlivy lze souhrnně nazvat stárnutím asfaltového pojiva. Stárnutí asfaltových pojiv způsobuje chemické a fyzikální změny vlastností. Asfaltové pojivo se stává tvrdší a křehčí, a tudíž náchylnější ke vzniku trhlin ve vozovce především při nižších teplotách.

Aby bylo možné popsat změny vlastností asfaltových pojiv v průběhu životnosti, používají se laboratorní metody, které simulují jejich stárnutí. Pro popis vlastností asfaltových pojiv se v běžné laboratorní praxi používají empirické zkoušky, které však nedokáží dostatečně popsat složité reologické vlastnosti asfaltových pojiv. V současné době se proto pro hodnocení vlastností asfaltových pojiv začínají uplatňovat pokročilejší přístroje, které dokáží lépe charakterizovat jednotlivá asfaltová pojiva.

Významně může ovlivnit reologické vlastnosti silničních asfaltů množství přísady visbreakingového zbytku (VFCR - Vacuum Flashed Cracked Residue), což je zůstatek z mírného termického krakování při zpracování vakuového destilačního zbytku v rafineriích. Část přebytku VFCR se v rafineriích z ekonomických důvodů zpětně přidává do silničního asfaltu a způsobuje jeho vyšší citlivost na oxidativní stárnutí. [20, 25, 39]

Disertační práce rozšiřuje poznání o silničních asfaltech, které se běžně používají ve Střední Evropě. Důraz je kladen zejména na změny, které nastávají u asfaltových pojiv v průběhu životnosti v zabudované asfaltové směsi. Vzájemně je porovnává simulace stárnutí v laboratoři a v reálné situaci v průběhu výroby a pokládky asfaltové směsi. Zároveň jsou hledány parametry, které ovlivňují vyšší náchylnost silničních asfaltů k termooxidačnímu stárnutí. Z tohoto důvodu se do silničních asfaltů přidává různé množství VFCR a následně se pozorují změny probíhající v průběhu laboratorního stárnutí. Výsledky získané v rámci práce přispěly k sestavení metodiky pro hodnocení silničních asfaltů z hlediska náchylnosti k termooxidačnímu stárnutí a dále k sestavení metodiky popisující laboratorní stárnutí asfaltových směsí.

## 2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Cílem disertační práce je především rozšířit poznání o silničních asfaltech jako o základní složce asfaltové směsi s ohledem na stárnutí této komponenty. Cíle disertační práce lze rozdělit do následujících bodů:

- a) Popsat dostupné metody simulující stárnutí asfaltových pojiv a vybrat metody, které mohou být přínosem pro hodnocení asfaltových pojiv v České republice;
- b) Stanovit fyzikální a chemické vlastnosti vybraných silničních asfaltů běžně používaných na území České republiky a posoudit, zda tato pojiva splňují požadavky platných norem;
- c) Srovnat potenciálně vhodné laboratorní metody simulující dlouhodobé stárnutí asfaltových pojiv;
- d) Vybranou metodu krátkodobého stárnutí porovnat s reálnou situací ve vozovce;
- e) Ověřit, zda kolísají vlastnosti silničních asfaltů od stejného výrobce;
- f) Sestavit metodiku pro hodnocení silničních asfaltů z hlediska náchylnosti k termooxidačnímu stárnutí, které snižují životnost vozovek a k této metodice nastavit požadavky, které vyloučí používání asfaltových pojiv s nízkou životností;
- g) Využít vhodný reologický model pro modelování zkoušky Multiple Stress Creep Recovery Test (MSCR);
- h) Statisticky vyhodnotit závislosti mezi výsledky získanými pomocí jednotlivých zkušebních metod a pokusit se najít takové parametry, které dokazují náchylnost asfaltových pojiv vůči stárnutí;
- i) Porovnat získané vlastnosti po stárnutí asfaltových pojiv a směsí;
- j) Sestavit metodiku popisující laboratorní stárnutí asfaltových směsí;
- k) Ověřit zda silniční asfalty používané na území České republiky vyhovují požadavkům americké návrhové metody SHRP;
- l) Určit vliv přidání rozdílného množství visbreakingového zbytku na stupeň stárnutí asfaltových pojiv a jejich reologické vlastnosti;
- m) Porovnat silniční asfalty s přesným dávkováním visbreakingového zbytku s běžnými silničními asfalty.

### 3 ASFALTOVÉ POJIVO

Asfalt je jedním ze základních stavebních materiálů, který se využívá zejména v silničním stavitelství. S asfaltem se lze setkat především jako s pojivem do asfaltových směsí, do prolévaných asfaltových vrstev či jako s materiálem pro výrobu asfaltových emulzí. [41]

Převážná většina asfaltových pojiv, která se používají v silničním stavitelství, je získávána z ropy v rafineriích. Na území České republiky se nachází rafinerie v Litvínově, Kralupech nad Vltavou a Pardubicích. Ovšem díky otevřenému trhu se na našem území setkáváme i s asfaltem z okolních zemí. Asfalt se získává z ropy tak, že se nejprve ropa odsoluje a pak se pomocí atmosférické a vakuové destilace oddělí jednotlivé frakce podle jejich bodu varu. Výsledným produktem je destilační asfalt, který lze dále zušlechťovat nejčastěji pomocí oxidace neboli polofoukání. [5, 17, 24, 40]

Při oxidaci asfaltu nedochází k významnému zvětšení obsahu kyslíku, respektive kyslíkatých sloučenin v oxidovaném asfaltu. Pouze malá část atomů kyslíku zůstává vázaná v asfaltovém pojivu. Hlavní reakcí probíhající při oxidaci (polofoukání) ropných zbytků je oxidativní dehydrogenace, při které dochází k přeměně cykloalkanických kruhů na aromatické za vzniku vody jako vedlejšího reakčního produktu. Zjednodušeně lze říct, že během oxidace se oleje přeměňují na pryskyřice a ty následně na asfalteny. Polofoukané asfalty mají ve srovnání s destilačními asfaltemi nižší bod lámavosti, větší bod měknutí a větší obsah asfaltenů. [4, 27]

Pro vozovky s nejvyšším dopravním zatížením lze destilované asfalty modifikovat vhodnými polymery (označení PmB). Jejich přidáním se zlepšují reologické vlastnosti pojiv, zlepšuje se přilnavost asfaltu ke kamenivu, snižuje se teplotní citlivost a jeho křehkost v oblasti nízkých teplot, zvyšuje se bod měknutí a snižuje se náchylnost ke stárnutí. Tato pojiva jsou odolnější vůči vzniku trvalých deformací a tvorbě mrazových trhlin. Přestože modifikované asfalty přinášejí zlepšení reologických vlastností, používají se z ekonomických důvodů stále nejvíce silniční asfaltemy. Během roku 2015 se v České republice spotřebovalo cca 310,5 tis. tun silničních asfaltů, což je okolo 65 % asfaltů, které se na našem území spotřebují. [5, 17, 19, 22, 24, 40]

Dále může významně ovlivnit reologické vlastnosti silničních asfaltů množství přísady visbreakingového zbytku (VFCR - Vacuum Flashed Cracked Residue), což je zůstatek z mírného termického krakování při zpracování vakuového destilačního zbytku v rafineriích. Část přebytku VFCR se v rafineriích z ekonomických důvodů zpětně přidává do silničního asfaltu a způsobuje jeho vyšší citlivost na oxidativní stárnutí. [20, 25, 39]

Příměs VFCR k asfaltovému pojivu může vést ke snížení koloidní stability, zvýšení termické lability a snížení odolnosti proti stárnutí, změně teplotní citlivosti pojiva, změně povrchového napětí a vnitřní koheze, snížení viskozity směsného pojiva, zvýšení adheze a odolnosti proti působení vody v asfaltových směsích a ke změně teploty skelného přechodu. Všechny tyto změny chování základního pojiva závisejí na množství podílu přidaného VFCR. [4, 28, 38]

## 4 PROBLEMATIKA STÁRNUTÍ ASFALTOVÝCH POJIV A SMĚSÍ

Trvanlivost asfaltových vozovek je mimo jiné ovlivněna stárnutím asfaltového pojiva. Pokud vezmeme v úvahu určitý materiál nebo výrobek, předpokládáme, že jeho vlastnosti budou v čase neměnné. U asfaltových pojiv ale tento předpoklad neplatí. Asfalty jsou organické látky, které v průběhu své životnosti mění své vlastnosti. Z tohoto důvodu je nezbytné vyhodnocovat vlastnosti jednotlivých pojiv nejen před vlastní výrobou asfaltové směsi, ale taktéž po výrobě, přepravě a pokládce asfaltové směsi a dále v průběhu životnosti asfaltové vozovky, jelikož právě tyto vlastnosti jsou zásadní pro trvanlivou vozovku. Životní cyklus vozovky je schematicky uveden v Obrázku 1. [32]



Obrázek 1: Průběh životnosti asfaltové vozovky; Zdroj některých fotografií před úpravou [6]

Stárnutí asfaltového pojiva je výrazně ovlivněno oblastí, kde se daná asfaltová směs nachází, s tím souvisí klimatické podmínky, vlhkost, chemické látky, vliv ozonu a především typ asfaltové směsi, její mezerovitost a tloušťka asfaltového filmu. Degradaci asfaltových pojiv způsobují zejména čtyři hlavní faktory: [32]

- 1) termooxidační stárnutí
- 2) destilační stárnutí
- 3) exudační stárnutí
- 4) strukturální stárnutí

Termooxidační stárnutí lze charakterizovat jako soubor chemických změn, které jsou vyvolány zvýšenou teplotou a vzdušným kyslíkem. Pověštinou způsobují zabudování atomů kyslíku do chemické struktury asfaltového pojiva (oxidační stárnutí pojiva). Pod pojmem oxidace organické sloučeniny se chápe odnětí vodíku (dehydrogenace) nebo zabudování kyslíku (oxygenace) do uhlovodíkových sloučenin, což má v případě asfaltového pojiva za následek tvrdnutí a křehnutí, které mohou vézt až ke vzniku trhlin ve vozovce za nízkých teplot a taktéž ke zhoršení únavových vlastností. Oxidační změny mohou být vyvolány i uměle při polofoukání asfaltových pojiv v rafinerii. [21, 30, 32]

Aby bylo možné posoudit změny, které nastávají u asfaltového pojiva v průběhu životnosti, provádí se tzv. laboratorní simulace stárnutí, kterou lze rozdělit na metody



stárnutí prováděných přímo na asfaltovém pojivu nebo na asfaltové směsi. Výhodou simulace stárnutí asfaltové směsi je zahrnutí dalších vlivů, které mají vliv na stárnutí. Jedná se o tloušťku asfaltového filmu, vliv kameniva atd. Nevýhodou stárnutí asfaltové směsi je časová a instrumentální náročnost v porovnání se zkouškami na asfaltovém pojivu. Laboratorní stárnutí lze rozdělit na: [7, 13, 23]

- a) Krátkodobé stárnutí
- b) Dlouhodobé stárnutí

Krátkodobé stárnutí asfaltového pojiva simuluje stárnutí při míchání na obalovně, během dopravy a pokládce asfaltové směsi. Dlouhodobé stárnutí simuluje degradaci asfaltového pojiva v asfaltové vrstvě.

V další části kapitoly jsou popsány metody laboratorního stárnutí, které byly použity v rámci disertační práce. Další metody jsou popsány v disertační práci.

#### **4.1 TEPELNÁ STÁLOST V TENKÉ POHYBUJÍCÍ SE VRSTVĚ (RTFOT)**

Zkouška tepelné stálosti v tenké pohybující se vrstvě (RTFOT) se provádí podle ČSN EN 12607-1 [9]. RTFOT simuluje krátkodobé stárnutí asfaltového pojiva, kterému je asfaltové pojivo vystaveno během míchání na obalovně, během přepravy a při pokládce asfaltové směsi. Zkouška RTFOT vychází z faktu, že asfaltové pojivo je ovlivněno vzdušným kyslíkem pouze do malých tlouštěk (přibližně 50 mikrometrů) a v této tloušťce se tedy nejvíce projevuje termooxidační stárnutí. [2, 13, 31]



Obrázek 2: Zařízení pro stárnutí metodou RTFOT [3]

Kombinovaný účinek tepla a vzduchu se stanoví změnou hmotnosti asfaltového pojiva v nádobkách nebo změnou vlastností asfaltového pojiva, které jsou zjišťovány před a po stárnutí. Mezi výhody zkoušky RTFOT vůči ostatním metodám krátkodobého stárnutí patří její značná rozšířenost v Evropě a tedy možnost mezilaboratorního porovnání. Dále krátká doba zkoušky, která probíhá po dobu 75 minut. V rámci disertační práce byla metoda zároveň modifikována prodloužením času expozice na 225 minut, čímž bylo simulováno dlouhodobé stárnutí asfaltového pojiva.

## 4.2 URYCHLENÉ DLOUHODOBÉ STÁRNUTÍ V TLAKOVÉ NÁDOBĚ (PAV)

Zkouška urychleného dlouhodobého stárnutí se provádí podle ČSN EN 14769 [10]. Laboratorní stárnutí metodou PAV simuluje změny asfaltového pojiva, které nastanou během životnosti ve vozovce. Odhaduje se doba okolo 7 až 10 let, kdy výrazně záleží na oblasti, kde se nachází asfaltová směs a s tím související klimatické podmínky, vliv vlhkosti, chemických látek, ozonu a především typu asfaltové směsi, její mezerovitosti a tloušťce asfaltového filmu. Podstatné je, že urychlenému dlouhodobému stárnutí předchází simulace krátkodobého stárnutí, to znamená, že vzorek je již termicky zatížen například metodou RTFOT. [11, 12, 13, 29]



Obrázek 3: Zkušební miska s nalitým vzorkem pro zkoušku PAV [29]

## 4.3 STÁRNUTÍ ASFALTOVÉ SMĚSI BRAUNSCHWEIGER ALTERUNG (BSA)

V rámci disertační práce byla použita metoda Braunschweiger Alterung (BSA), která byla vyvinuta na Technické universitě Braunschweig v Německu. [37] Při této metodě je nezhuťněná asfaltová směs umístěna v temperované zkušební komoře při teplotě 80 °C s nucenou cirkulací vzduchu po dobu 96 hodin (viz Obrázek 4). Následně jsou prováděny vybrané laboratorní zkoušky přímo na zestárlé asfaltové směsi nebo je znovuzískáno asfaltové pojivo. [13, 26, 33]



Obrázek 4: Stárnutí asfaltové směsi metodou BSA [34]

## 5 POUŽITÉ MATERIÁLY A ZKUŠEBNÍ METODY

V rámci disertační práce bylo hodnoceno 15 silničních asfaltů od různých výrobců (dále v textu označených A až O). Na pojivech byly určeny konvenční empirické zkoušky (stanovení penetrace jehlou podle ČSN EN 1426, stanovení bodu měknutí metodou kroužek a kulička podle ČSN EN 1427 a stanovení bodu lámavosti podle Fraasse podle ČSN EN 12593) a funkční zkoušky (stanovení dynamické viskozity asfaltů metodou kužel a deska podle ČSN EN 13702, stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu podle ČSN EN 14770, zkouška MSCR podle ČSN EN 16659 a stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru podle ČSN EN 14771). Aby bylo možné charakterizovat vliv stárnutí, byla veškerá pojiva zestárnutá metodami RTFOT, 3xRTFOT a RTFOT+PAV. Podrobněji jsou použité materiály a zkušební teploty popsány v disertační práci.

## 6 VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ

Vyhodnocení výsledků je prováděno v souladu s cíli disertační práce, kdy jsou nejprve stanoveny fyzikální a chemické vlastnosti silničních asfaltů, které se běžně používají na území České republiky a zároveň jsou navzájem porovnány metody simulující dlouhodobé stárnutí 3xRTFOT a RTFOT+PAV. Dále jsou silniční asfalty zestárlé metodou RTFOT porovnány se znovuzískanými silničními asfalty po výrobě a pokládce asfaltové směsi a je určen optimální čas stárnutí metody RTFOT v podmínkách České republiky. Dále je zjištěno, zda kolísají vlastnosti silničních asfaltů od stejných výrobců. Výsledky disertační práce jsou použity pro sestavení metodiky pro hodnocení silničních asfaltů z hlediska náchylnosti k termooxidačnímu stárnutí a zároveň jsou nastaveny požadavky, které vyloučí používání asfaltových pojiv s nízkou životností.

Výsledky zkoušky MSCR jsou srovnány s reologickým modelem dle Burgerse a je určeno, který prvek modelu má nejvýznamnější vliv na výsledky zkoušky MSCR. Navzájem jsou korelovány výsledky, které byly získány při stanovení fyzikálních a chemických vlastností silničních asfaltů a jsou odvozeny parametry, které nejlépe dokazují náchylnost silničních asfaltů ke stárnutí.

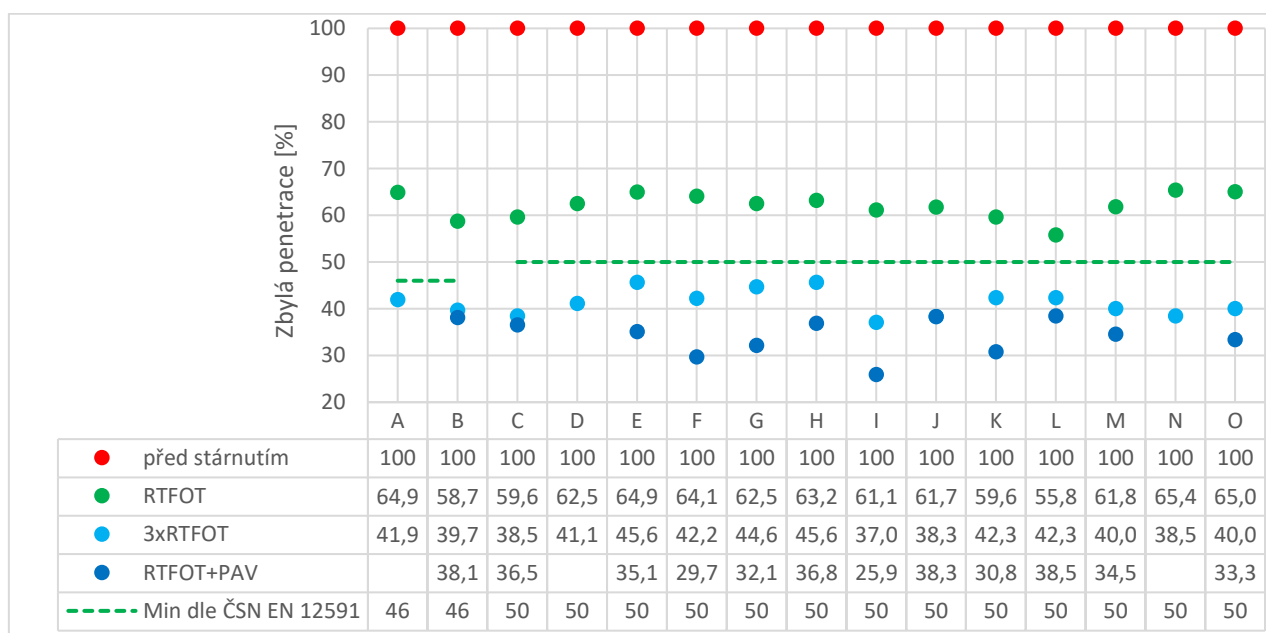
V další části disertační práce jsou porovnány vlastnosti po stárnutí silničních asfaltů a silničních asfaltů zabudovaných v asfaltové směsi. Zkušenosti získané při srovnání obou metod jsou následně použity pro sestavení metodiky popisující laboratorní stárnutí asfaltových směsí. Silniční asfalty posuzované v rámci disertační práce byly zároveň hodnoceny pomocí americké návrhové metody SHRP, která obsahuje i požadavky na dlouhodobě zestárlá pojiva.

V závěru hodnocení byl určen vliv přidání rozdílného množství visbreakingového zbytku na stupeň stárnutí asfaltových pojiv a jejich reologické vlastnosti a zároveň byla tato směsná pojiva srovnána s běžnými silničními asfalty.

## 6.1 FYZIKÁLNÍ A CHEMICKÉ VLASTNOSTI SILNIČNÍCH ASFALTŮ

Pro hodnocení fyzikálních vlastností silničních asfaltů (13 silničních asfaltů gradace 50/70 a 2 silniční asfalty gradace 70/100) jsou využity empirické i funkční zkoušky asfaltových pojiv, mezi které patří stanovení penetrace jehlou podle ČSN EN 1426, stanovení bodu měknutí podle ČSN EN 1427, stanovení bodu lámavosti podle Fraasse podle ČSN EN 12593, stanovení dynamické viskozity podle ČSN EN 13702, zkouška MSCR podle ČSN EN 16659, stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu podle ČSN EN 14770 a stanovení modulu tuhosti za ohybu podle ČSN EN 14771. Jednotlivé zkušební postupy jsou prováděny na originálních pojivech i na pojivech po simulaci laboratorního stárnutí metodami RTFOT, 3xRTFOT a RTFOT+PAV.

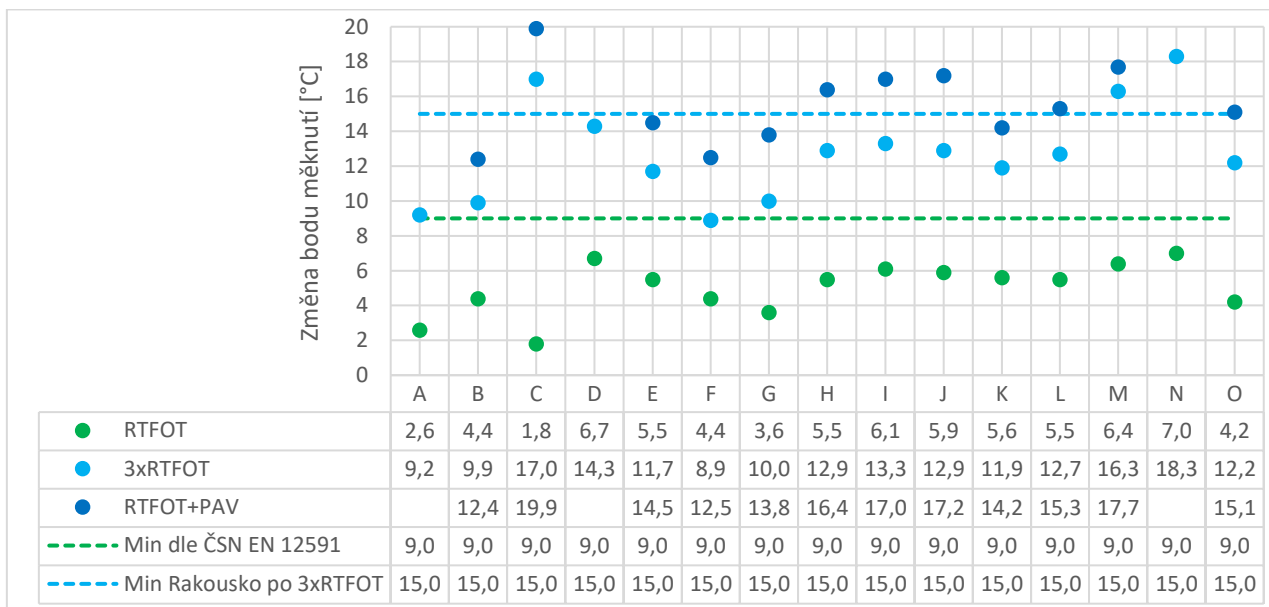
V Grafu 1 je uvedena zbylá penetrace jehlou, z které vyplývá i poněkud benevolentně nastavená limitní hodnota, jenž je uvedena v ČSN EN 12591. Graf 1 zároveň dokazuje významný vliv laboratorního stárnutí na hodnotu penetrace. Jen během výroby a následné pokládky asfaltové směsi je hodnota zbylé penetrace v rozmezí od 55,8 % do 65,4 %. Což znamená, že pojivo se gradačně propadá do nižší třídy. Při aplikaci dlouhodobého stárnutí metodami 3xRTFOT a RTFOT+PAV je dokonce hodnota zbylé penetrace v rozmezí od 45,6 % do 25,9 % své původní hodnoty. Zároveň je zřejmé, že jednotlivé silniční asfalty od různých výrobců odlišně mění své vlastnosti.



Graf 1: Zbylá penetrace jehlou pro jednotlivé silniční asfalty s ohledem na stárnutí

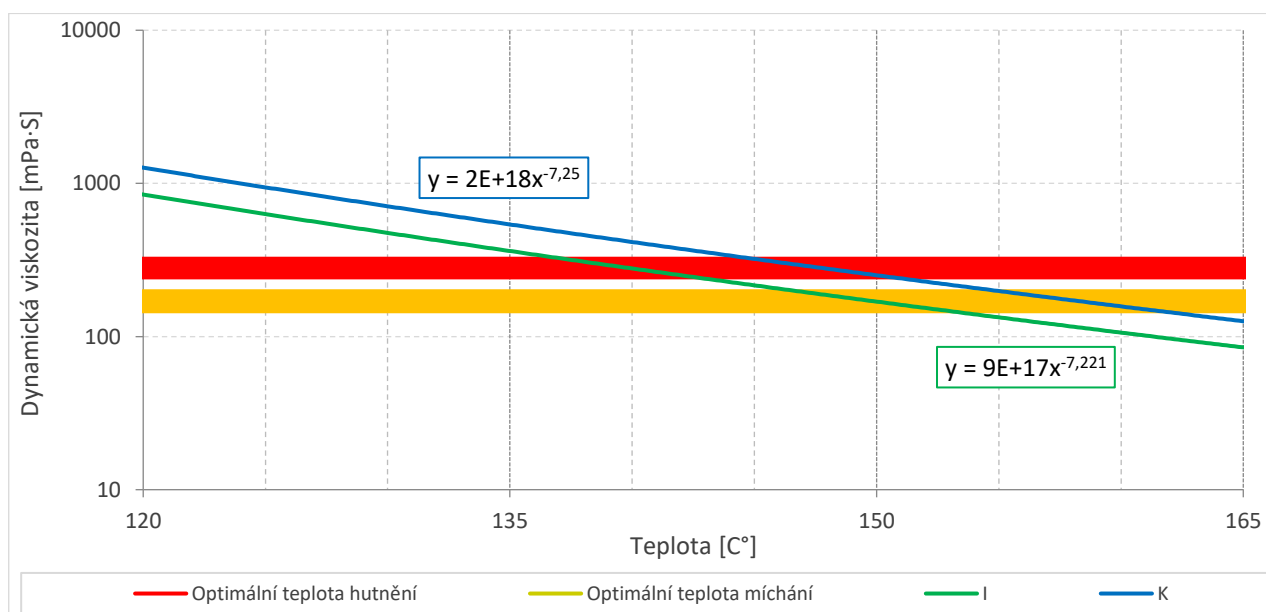
V Grafu 2 je uveden nárůst bodu měknutí u silničních asfaltů s ohledem na laboratorní stárnutí, kdy norma ČSN EN 12591 předepisuje maximální zvýšení bodu měknutí po stárnutí metodou RTFOT o 9 °C. V rakouském předpise RVS 08.97.05 je uveden i požadavek na maximální zvýšení hodnoty bodu měknutí po zkoušce 3xRTFOT, který je 15 °C. Z výsledků vyplývá obdobně jako u zbylé penetrace jehlou

velmi benevolentně nastavená hodnota změny bodu měknutí po simulaci krátkodobého stárnutí metodou RTFOT. Dle předpisu RVS 08.97.05 nevyhověly tři silniční asfalty. Nejvyšší změna bodu měknutí po 3xRTFOT byla zjištěna u pojiva N (18,3 °C), dále u pojiva C (17,0 °C) a pojiva M (16,3 °C). Všechny silniční asfalty jsou od stejného výrobce. Limitní zvýšení bodu měknutí o 15 °C bylo navrženo v rámci metodiky pro hodnocení silničních asfaltů z hlediska náchylnosti k termooxidačnímu stárnutí.



Graf 2: Nárůst bodu měknutí u silničních asfaltů s ohledem na laboratorní stárnutí

Další prováděnou zkouškou bylo stanovení bodu lámavosti podle Fraasse podle ČSN EN 12593, kde normovým požadavkům nevyhověla pojiva C, G, K, L, M a O, jelikož teplota bodu lámavosti byla vyšší než -8 °C.

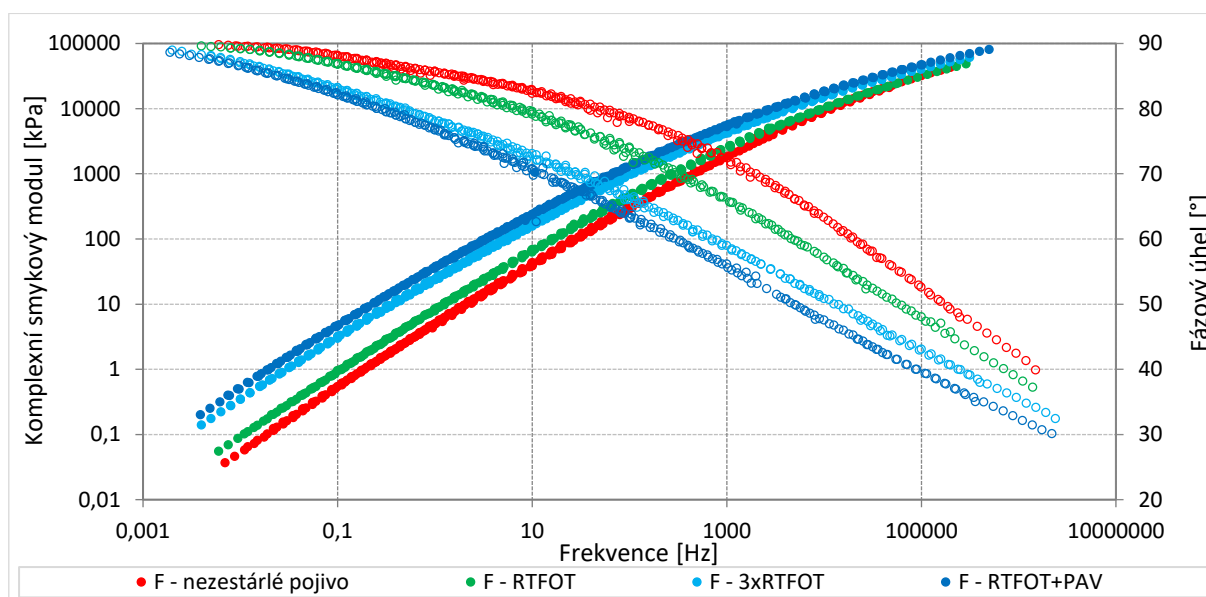


Graf 3: Optimální teploty hutnění a míchání asfaltové směsi dle dynamické viskozity pojiva

Mezi další prováděné zkoušky patřilo stanovení dynamické viskozity podle ČSN EN 13702. Na základě výsledků dynamické viskozity lze určit optimální teplotu míchání a hutnění, kdy se vychází z faktu, že optimální dynamická viskozity při míchání je  $(0,17 \pm 0,02)$  Pa·s a při hutnění je to  $(0,28 \pm 0,03)$  Pa·s. Na základě výsledků v Grafu 3 byly určeny optimální teploty míchání a hutnění pro krajní pojiva. U pojiva s označením I je optimální teplota míchání 148 °C až 153 °C a u pojiva K je to 162 °C až 168 °C. Optimální teplota hutnění pojiva I je 139 °C až 143 °C. U pojiva K je to 152 °C až 156 °C. Rozdíl mezi krajními asfalty se pohybuje okolo 10 °C, což je poměrně vysoká teplota s ohledem na energetickou úsporu na obalovně asfaltové směsi. [35, 36, 37]

Dále byly jednotlivé silniční asfalty po simulaci laboratorního stárnutí metodou RTFOT hodnoceny pomocí MSCR testu. Jelikož nejsou v prostředí České republiky stanoveny normové limitní hodnoty, byla zkouška prováděna při teplotách 46 °C, 52 °C a 58 °C dle metodiky SHRP, která se používá v USA. Na území České republiky lze předpokládat nejvyšší horní kritickou teplotu 46 °C a 52 °C, a tak jen dva silniční asfalty A a F nevyhoví nejpřísnějšímu požadavku pro extrémně těžkou dopravu, kterou lze v prostředí České republiky charakterizovat třídou dopravního zatížení S a I při rychlosti vozidel menší než 20 km/h.

Mezi další zkoušky prováděné pomocí DSR patří zjišťování komplexního modulu  $G^*$  a fázového úhlu  $\delta$  v oscilačním režimu, kdy byly hodnoceny velikosti a změny těchto základních veličin a byla určena teplota viskoelastického přechodu. Jelikož bylo měření prováděno v teplotním spektru od 10 °C do 70 °C, bylo možné pomocí VLF modelu realizovat hlavní křivky komplexních smykových modulů a fázových úhlů a stanovit materiálové součinitele  $c_1$  a  $c_2$ . Z výsledků vyplynulo, že materiálové součinitele jsou vyšší u pojiv nejnáchylnější k laboratornímu stárnutí. Příklad hlavních křivek u pojiva F je uveden v Grafu 4.



Graf 4: Hlavní křivky komplexních smykových modulů a fázových úhlů u pojiva F



Při vyhodnocení změny komplexního smykového modulu tuhosti  $G^*$  vlivem stárnutí byl zjištěn fakt, že komplexní složka  $G'$  roste při stárnutí exponenciální rychlostí a viskózní složka  $G''$  lineárně.

Na základě výsledků z průhybového trámečkové reometru bylo možné stanovit dolní kritickou teplotu, při které se předpokládá riziko porušení mrazovou trhlinou. Při uplatnění teploty bodu měknutí bylo následně možné stanovit průměrný rozsah oboru plasticity, který je u silničních asfaltů  $(79,6 \pm 2,1)$  °C. Z této hodnoty je třeba vycházet při používání silničních asfaltů v České republice.

Vybrané silniční asfalty byly taktéž podrobeny chemickému rozboru, kdy bylo kombinací extrakce a kapalinové chromatografie stanoveno skupinové složení jednotlivých poživ na nasycené sloučeniny, aromáty, pryskyřice a asfalteny. Z výsledků vyplynulo, že nejvyšší procentuální zastoupení mají aromáty a pryskyřice, nižší množství asfalteny a minimální množství nasycené uhlovodíky. Z výsledků bylo možné určit, že se stárnutím roste obsah asfaltenů a úměrně tomu klesá obsah aromátů. Závislost mezi změnou obsahu asfaltenů a aromátů na době stárnutí metodou RTFOT lze poměrně přesně popsat pomocí lineární funkce. Silniční asfalty s nejvyšší náchylností ke stárnutí mají nejvyšší obsah asfaltenů.

## 6.2 SROVNÁNÍ SIMULACE DLOUHODOBÉHO STÁRNUTÍ METODAMI 3XRTFOT A RTFOT+PAV

Na základě výsledků v předchozí kapitole bylo možné porovnat modifikovanou metodu stárnutí 3xRTFOT a běžněji používanou metodu RTFOT+PAV. Optimální doba laboratorního stárnutí metodou RTFOT vzhledem ke stárnutí metodou RTFOT+PAV pro jednotlivé zkoušky je uvedena v Tabulce 1.

Tabulka 1: Optimální časy stárnutí modifikované metody RTFOT vůči metodě RTFOT+PAV

Zkouška	Optimální doba laboratorního stárnutí metodou RTFOT
	[min]
Penetrace jehlou	267
Bod měknutí	277
Dynamická viskozita	265
Komplexní smykový modul (60 °C; 1,59 Hz)	257
Fázový úhel (60 °C; 1,59 Hz)	243

Z výsledků vyplývá, že laboratorní stárnutí metodou 3xRTFOT způsobuje průměrně nižší změnu vlastností silničních asfaltů než RTFOT+PAV. Pro srovnání obou metod by bylo vhodné prodloužit čas expozice z 225 minut (3xRTFOT) na 260 minut (cca 3,5xRTFOT). Odchytku mezi metodami lze redukovat například i snížením teploty stárnutí u metody PAV. Při hodnocení nízkoteplotních vlastností zařízením BBR při teplotě  $-16$  °C bylo zjištěno, že krátkodobé stárnutí metodou RTFOT způsobuje výrazný nárůst ohybové tuhosti a zároveň pokles m-hodnoty. Po

aplikaci modifikované metody stárnutí 3xRTFOT již nebyla směrnice poklesu natolik výrazná a tudíž lze usuzovat, že další prodloužení doby stárnutí metody RTFOT již nepřináší takové změny nízkoteplotních vlastností.

### 6.3 SROVNÁNÍ KRÁTKODOBÉHO STÁRNUTÍ METODOU RTFOT S REÁLNOU SITUACÍ

V rámci disertační práce bylo ověřeno, zda simulace laboratorního stárnutí metodou RTFOT odpovídá reálné situaci ve vozovce. Pro hodnocení bylo vybráno 7 silničních asfaltů, které byly podrobeny simulaci laboratorního stárnutí a zároveň byly použity pro výrobu a pokládku asfaltové směsi typu ACO 11. Před vlastním porovnáním bylo zjištěno, že rozpouštědlo trichloretylen nemá vliv na znovuzískání asfaltového pojiva z asfaltové směsi. Pro porovnání byly použity empirické zkoušky stanovení penetrace jehlou podle ČSN EN 1426 a stanovení bodu měknutí metodou kroužek a kulička podle ČSN EN 1427 a dále funkční zkoušky stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu podle ČSN EN 14770.

Při porovnání jednotlivých výsledků bylo možné při zachování parametru laboratorního stárnutí určit optimální čas metody RTFOT tak, aby bylo určeno co nejméně srovnání s realitou.

Tabulka 2: Optimální časy stárnutí metodou RTFOT

Zkouška	Optimální doba laboratorního stárnutí metodou RTFOT
	[min]
Penetrace jehlou	72
Bod měknutí	121
Dynamická viskozita	98
Komplexní smykový modul (60 °C; 1,59 Hz)	125
Fázový úhel (60 °C; 1,59 Hz)	98

Z Tabulky 2 je patrné, že metoda RTFOT podhodnocuje stárnutí asfaltového pojiva, které reálně vzniká u směsi typu ACO 11. Tato odchylka může být způsobena i vyšším teplotním namáháním v průběhu výroby asfaltové směsi, než pro jakou byla metoda navržena. Z Tabulky 2 lze zároveň odvodit průměrný čas optimální doby laboratorního stárnutí včetně směrodatné odchylky ( $103 \pm 21$ ) minut. Hodnota směrodatné odchylky je poměrně vysoká, jelikož optimální čas metody RTFOT vyháží pro jednotlivé zkoušky rozdílně. Jako optimální čas stárnutí metody RTFOT se jeví prodloužit čas expozice ze 75 minut na 100 minut. Tedy prodloužit čas expozice o přibližně 33 %. Nicméně je nutné podotknout, že by bylo vhodné provést širší srovnání pro upřesnění výsledného času expozice RTFOT, která by odpovídala reálným podmínkám v České republice. Zároveň by změna doby stárnutí znemožnila konfrontaci napříč státy, kde je metoda RTFOT používána.



## 6.4 SROVNÁNÍ VLASTNOSTÍ SILNIČNÍHO ASFALTU STEJNÉHO VÝROBCE

V rámci disertační práce byly popsány vlastnosti silničních asfaltů gradace 50/70 od stejného výrobce, aby bylo možné popsat kolísání jejich vlastností v průběhu výroby. Porovnání bylo provedeno na čtyřech pojivech od výrobce I a dále byly porovnána tři pojiva od výrobce V. Výsledky u jednotlivých pojiv po stárnutí metodou 3xRTFOT jsou uvedeny v Tabulce 3.

Tabulka 3: Porovnání pojiv gradace 50/70 po stárnutí metodou 3xRTFOT

Výrobce		I				V		
Označení		C	M	N	O	G	K	L
Změna hmotnosti	[%]	0,24	0,30	0,37	0,30	0,34	0,41	0,37
Změna penetrace	[%]	38,5	40,0	38,5	40,0	44,6	42,3	42,3
Zvýšení bodu měknutí	[°C]	17,0	16,3	18,3	12,2	10,0	11,9	12,7
Změna dynamické viskozity 135 °C	[-]	3,43	3,04	3,73	2,24	2,14	2,53	2,60
Změna G* 60 °C; 1,59 Hz	[-]	12,29	12,47	14,35	6,55	5,21	7,17	6,66
Změna G* 25 °C; 0,4 Hz	[-]	5,40	7,18	8,33	5,11	4,13	4,81	5,06
Změna kritické teploty z BBR	[-]	0,87	0,74	-	0,84	0,85	0,79	0,78

Z výsledků je patrné, že zkoušená pojiva od výrobce V vykazují srovnatelné vlastnosti. Pojiva od výrobce I jsou naopak odlišně náchylná ke změně vlastností po aplikaci dlouhodobého stárnutí metodou 3xRTFOT. Tento fakt lze přisuzovat kolísání množství visbreakingového zbytku.

## 6.5 METODIKA PRO HODNOCENÍ SILNIČNÍCH ASFALTŮ Z HLEDISKA NÁCHYLNOSTI K TERMOOXIDAČNÍMU STÁRNUTÍ

Výsledky disertační práce napomohly ke vzniku certifikované metodiky s názvem: „Metodika pro hodnocení silničních asfaltů z hlediska náchylnosti k termooxidačnímu stárnutí“, která vznikla v rámci řešení projektu TAČR TA03030381 s názvem: „Nové zkušební metody asfaltových pojiv a směsí umožňující prodloužení životnosti asfaltových vozovek“.

Tvorba metodiky byla reakce na fakt, že všechna v České republice vyráběná asfaltová pojiva v současné době splňují parametry požadované platnými technickými předpisy a normami. Dlouhodobým sledováním kvality asfaltových hutněných vrstev se však ukázalo, že některá pojiva v konstrukci vozovky nemusejí splňovat požadavky na dostatečnou trvanlivost. Tento fakt může být způsoben změnou vlastností asfaltových pojiv v průběhu jejich životnosti, které následně negativně ovlivňují užité vlastnosti hutněné asfaltové vrstvy. Cílem metodiky je zavést jednoduchý zkušební postup simulovaného stárnutí a současně nastavit požadavky na limitní hodnoty signálních veličin. Zvolené parametry jsou snadno stanovitelné laboratorními zkouškami a zároveň překročení zvolených hraničních hodnot indikuje problematické chování asfaltového pojiva. Potenciální možnost s předstihem rozpoznat asfaltová pojiva náchylná ke zrychlenému termooxidačnímu stárnutí představuje zásadní přínos

pro zajištění kvality asfaltových vrstev používající jako pojivo nemodifikované silniční asfalty. [16]

Aby bylo možné posoudit chování silničních asfaltů v průběhu životnosti, je v rámci metodiky navržena simulace laboratorního stárnutí modifikovanou metodou RTFOT s trojnásobně prodlouženou dobou expozice (3xRTFOT). S ohledem na výsledky, které byly získány při řešení disertační práce, byly navrženy signální parametry, které identifikují pojiva s výraznou náchylností vůči laboratornímu stárnutí. Vybrané požadavky na maximální přípustnou změnu vlastností silničních asfaltů gradace 50/70 a 70/100 po stárnutí metodou 3xRTFOT jsou uvedeny v Tabulce 4.

Tabulka 4: Porovnání pojiv od výrobce I po stárnutí metodou 3xRTFOT

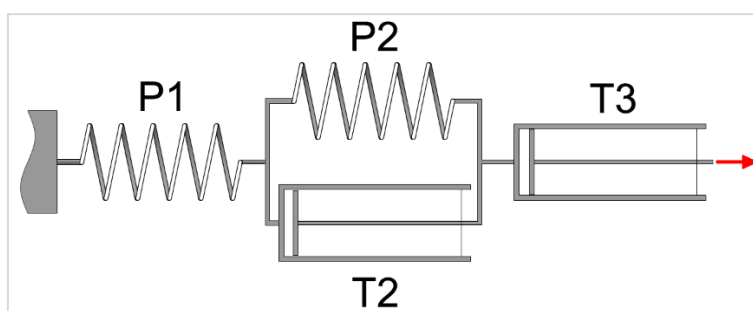
Vlastnost	Metoda zkoušení	Jednotka	Hodnota
Zvýšení bodu měknutí po 3xRTFOT	ČSN EN 1427	[°C]	≤ 15
Zvýšení komplexního smykového modulu $G^*$ po 3xRTFOT	ČSN EN 14770 (60 °C, 1 Hz)	[-]	≤ 15tinásobek

Doporučené limitní zvýšení hodnoty bodu měknutí o 15 °C vychází z matematické statistiky, kdy podmínce nevyhovělo 15 % zkoumaných silničních asfaltů.

Certifikovaná metodika pro hodnocení použitelnosti asfaltového pojiva z hlediska termooxidačního stárnutí je určena pro orgány státní správy (zejména Ministerstvo dopravy ČR a Ředitelství silnic a dálnic ČR), které touto certifikovanou metodikou získají jednoduchý nástroj pro hodnocení náchylnosti asfaltových pojiv ke stárnutí. Metodika bude uplatněna při kontrole vlastností silničních asfaltů a zejména při kontrole stálosti těchto vlastností po simulaci stárnutí metodou 3xRTFOT v laboratoři. Metodiku mohou využívat silniční laboratoře nebo laboratoře výrobců asfaltů.

## 6.6 MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ ZKOUŠKY MULTIPLE STRESS CREEP RECOVERY TEST POMOCÍ BURGERSOVA MODELU

Pro zkoušku Multiple Stress Creep Recovery Test (MSCR) bylo uplatněno matematické modelování za použití Burgersova modelu, který je schematicky zobrazen v Obrázku 5.

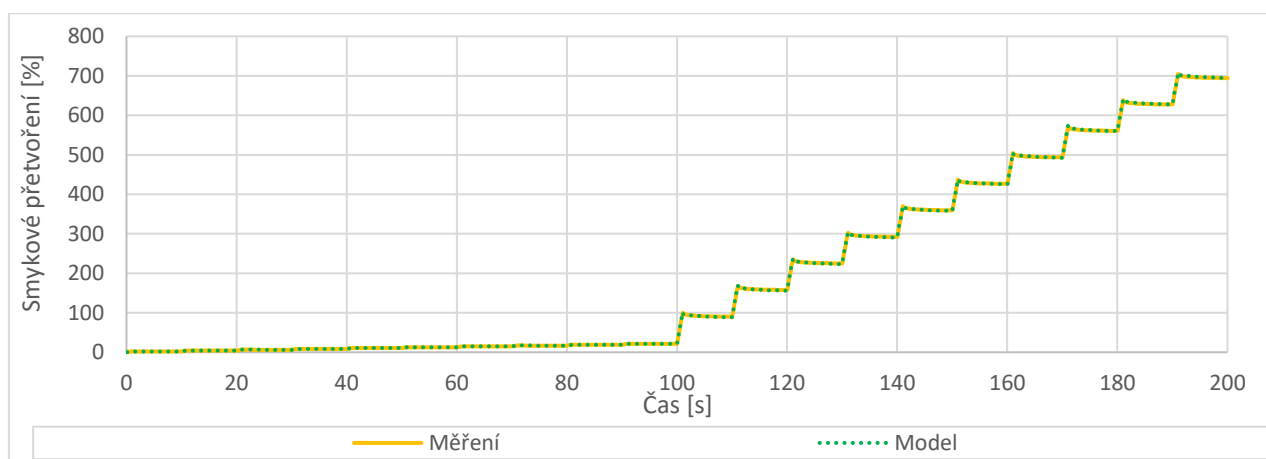


Obrázek 5: Burgersův model

Jednotlivé komponenty modelu lze vyjádřit pomocí rovnice 6.1, jejíž odvození je provedeno v rámci disertační práce.

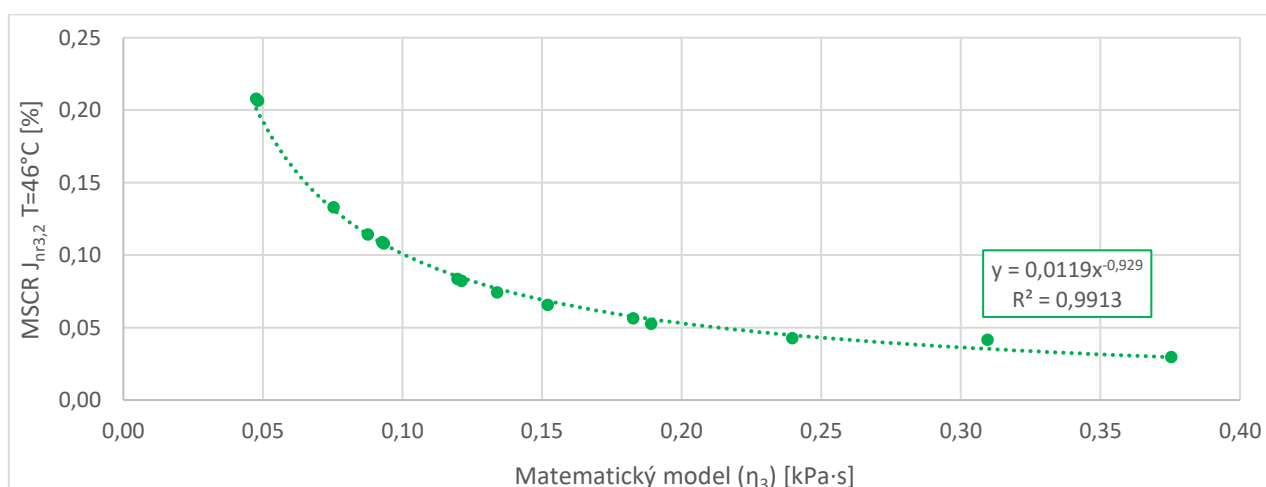
$$\gamma(t) = \gamma_1 + \gamma_2(t) + \gamma_3(t) = \left(\frac{\tau_0}{G_1}\right) + \left(\frac{\tau_0}{G_2}\right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\Lambda}}\right) + \frac{\tau_0 \cdot t}{\eta_3} \quad (6.1)$$

Jednotlivé komponenty modelu dle rovnice 6.1  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $\Lambda$  a  $\eta_3$  byly vypočítány pomocí metody nejmenších čtverců s rozhodujícím parametrem minimalizace relativní odchylky. Pro modelování byly vybrány výsledky měření při teplotě 46 °C. Příklad porovnání mezi naměřenými daty a modelem pro silniční asfalt F je uveden v Grafu 5.



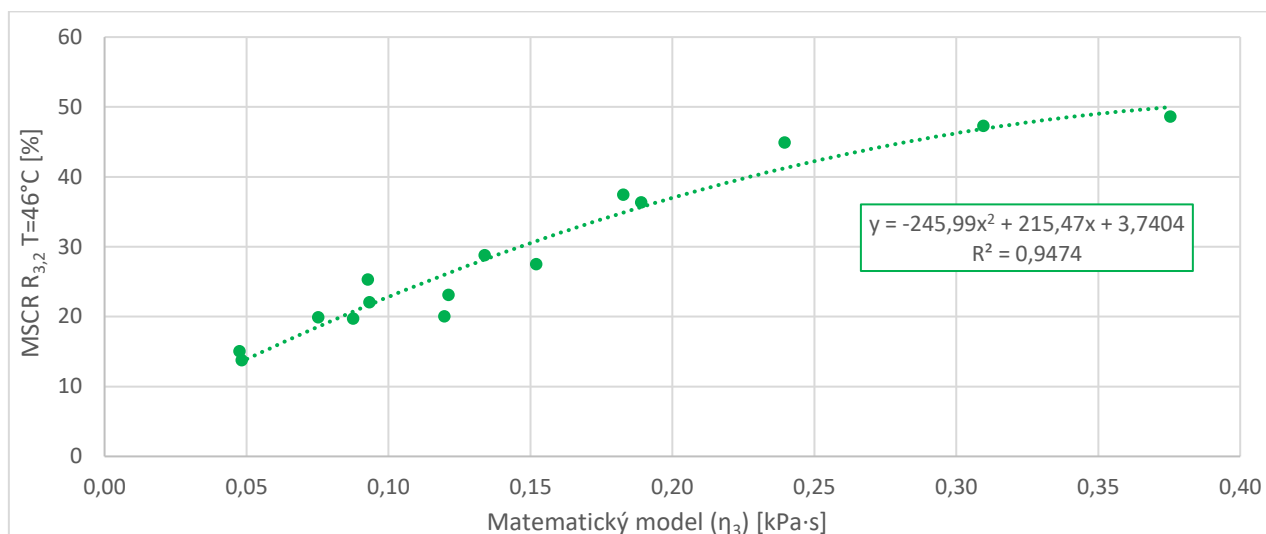
Graf 5: porovnání průběhu zkoušky MSCR a modelu dle Burgese

V modelu dle Burgese jsou dva samostatné prvky (pružina a tlumič) a pak oba prvky paralelně spojené. Pomocí korelace je tedy možné ověřit, které prvky modelu mají vliv na výsledné hodnoty MSCR testu. Z výsledků zkoušky MSCR se nejčastěji hodnotí nevratná smyková poddajnost  $J_{nr3,2}$ , jenž je mocnině závislá na parametru  $\eta_3$ , což je základní charakteristika tlumiče (T3). Závislost mezi parametrem  $\eta_3$  a  $J_{nr3,2}$  lze popsat korelačním součinitelem  $R^2=0,99$  (viz Graf 6).



Graf 6: Závislost mezi  $J_{nr3,2}$  a hodnotou  $\eta_3$  z matematického modelu dle Burgese

Dále se nejběžněji hodnotí velikost elastického zotavení  $R_{3,2}$ , které je dle korelační závislosti taktéž nejvíce závislé na parametru  $\eta_3$  a lze ho popsat vysokou hodnotou korelačního součinitele  $R^2=0,95$  (Graf 7). Pro hodnocení závislosti byla vybrána parabola druhého stupně.



Graf 7: Závislost  $R_{3,2}$  a hodnotou  $\eta_3$  z matematického modelu dle Burgese

Z výsledků vyplývá, že nejvyšší vliv na výsledky zkoušky MSCR má hodnota tlumiče (T3), který udává nevratnou část při zkoušce MSCR.

## 6.7 VZÁJEMNÁ KORELACE MEZI JEDNOTLIVÝMI VÝSLEDKY

V rámci disertační práce bylo hodnoceno celkově 633 parametrů, které byly všechny vzájemně porovnány a korelovány pomocí různých funkcí. To znamená, že bylo hodnoceno více než 200 tisíc různých kombinací při jedné funkci. Snahou bylo zjistit, zda mají jednotlivé parametry mezi sebou vazbu, což by bylo velmi výhodné s ohledem na to, že by z jedné zkoušky v dynamickém smykovém reometru bylo možné odvodit s vysokou pravděpodobností například výsledek bodu měknutí a tudíž ušetřit časovou nebo instrumentální náročnost. V další části byl hledán parametr, který by před stárnutím naznačil chování asfaltového pojiva po simulaci dlouhodobého stárnutí. Bylo by tudíž možné neprovádět simulaci laboratorního stárnutí a z výsledků s vysokou pravděpodobností odhadnout, jak se bude pojivo po stárnutí chovat.

Na základě korelačních závislostí bylo možné stanovit optimální okrajové podmínky DSR tak, aby bylo možné odvodit hodnotu bodu měknutí a penetrace jehlou, jakožto základních zkoušek silničních asfaltů. Hodnota penetrace jehlou koreluje mocninou funkcí s hodnotou komplexního smykového modulu při teplotě 25 °C a frekvenci 0,40 Hz s hodnotou korelačního součinitele  $R^2=0,93$ . Hodnotě bodu měknutí zase odpovídá měření pomocí DSR při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz, což dokazuje korelační součinitel  $R^2=0,97$  opět při mocninné závislosti. Srovnání penetrace jehlou a bodu měknutí s výsledky z DSR jsou uvedeny v Tabulce 5.

Tabulka 5: Srovnání empirických zkoušek s výsledky z DSR

Empirická zkouška	Odpovídající parametr	Korelační součinitel $R^2$	Odpovídající rovnice
Penetrace jehlou	$G^*$ (25 °C; 0,40 Hz)	0,93	$y = 407\,808 \cdot x^{-1,812}$
Bod měknutí	$G^*$ (60 °C; 1,59 Hz)	0,97	$y = 5 \cdot 10^{-14} \cdot x^{8,1243}$

Dále byla nalezena lineární závislost ( $R^2=0,86$ ) mezi fázovým úhlem při teplotě 40 °C a frekvenci 1,59 Hz s procentuálním množstvím asfaltenu. S klesajícím procentuálním množstvím asfaltenu stoupá hodnota fázového úhlu. Zároveň byla zjištěna lineární závislost daná korelačním součinitelem  $R^2=0,97$  mezi bodem lámavosti a množstvím aromátů.

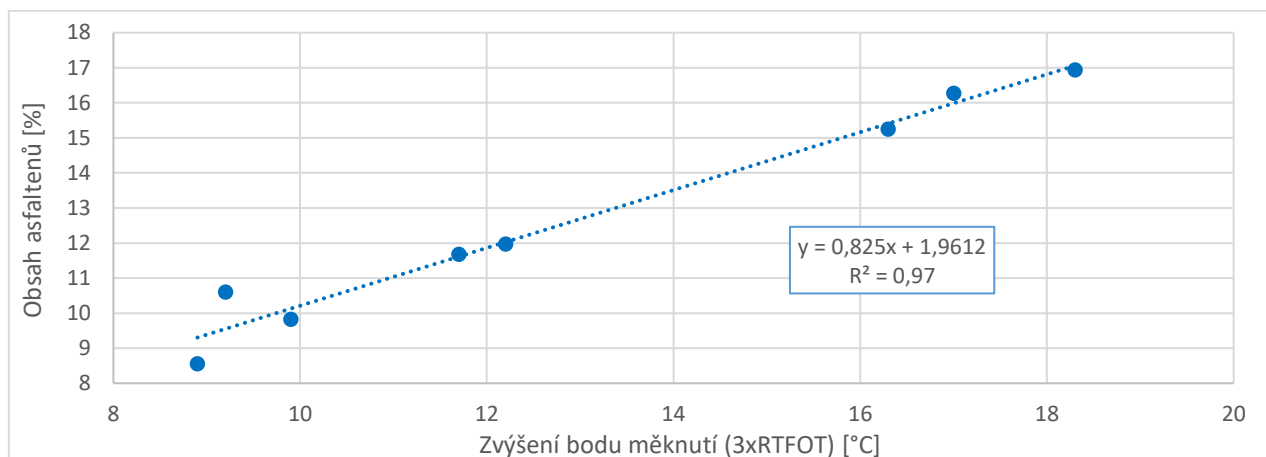
Dále byla zjištěna lineární závislost mezi hodnotou komplexního smykového modulu  $G^*$  (teplota 10 °C a frekvence 10 Hz) a hodnotou  $S_m(60)$  získané z přístroje BBR při teplotě -16 °C. Závislost lze vyjádřit korelačním součinitelem v hodnotě  $R^2=0,86$ . Lze tudíž z oscilačního měření v DSR přibližně předurčit, jakým způsobem se bude silniční asfalt chovat při záporných teplotách. Vyšší hodnotu korelačního součinitele je možné předpokládat při zkoušení zařízením DSR při adekvátní teplotě (-16 °C). Zde je ovšem nezbytné podotknout, že vysoká tuhost pojiva je mnohdy již na hranici měřicího rozsahu přístroje. Je často nutné například použít zkušební geometrii o průměru 4 mm, která je ovšem velmi citlivá na přesné seříznutí vzorku. S vývojem dynamických smykových reometrů se ovšem dá předpokládat, že pomocí tohoto přístroje bude možné hodnotit asfaltová pojiva i při záporných teplotách.

Mezi další zjištěné závislosti patří vztah mezi procentuálním zotavením  $R_{3,2}$  získaným ze zkoušky MSCR při teplotě 46 °C a velikostí fázového úhlu při blízké teplotě 45 °C a frekvenci 1,59 Hz. Hodnota korelačního součinitele je  $R^2=0,92$ . Čím je hodnota  $R_{3,2}$  vyšší, tím je asfaltové pojivo odolnější vůči trvalé deformaci, což odpovídá nižší hodnotě fázového úhlu. Pojivo se chová více pružně.

V další části byla snaha najít parametr, který by dokázal predikovat chování asfaltového pojiva po simulaci dlouhodobého stárnutí. To znamená, že by u originálního pojiva bylo možné určit bez simulace dlouhodobého stárnutí, jak se bude asfaltové pojivo chovat. Jako vhodný parametr pro popsání změny v průběhu stárnutí byla zvolena změna bodu měknutí po simulaci 3xRTFOT a změna komplexního smykového modulu  $G^*$  po 3xRTFOT. Tyto veličiny byly následně korelovány s více než 600 parametry, které byly získány na originálním pojivu. Jako nepřesvědčivější se prokázala lineární závislost mezi procentuálním obsahem asfaltenu a změnou bodu měknutí po 3xRTFOT s vysokým korelačním součinitelem  $R^2=0,97$  (viz Graf 8). To znamená, že na změnu po stárnutí má zásadní vliv obsah asfaltenu v asfaltovém pojivu. Jelikož se jedná o velmi důležité zjištění, bylo by vhodné tento fakt ověřit na vyšším počtu silničních asfaltů.

Zároveň byla zjištěna lineární závislost mezi hodnotou fázového úhlu při teplotě 50 °C a frekvenci 0,2 Hz na originálním pojivu a změnou komplexního smykového

modulu při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz po aplikaci dlouhodobého stárnutí metodou 3xRTFOT. Závislost lze vyjádřit hodnotou korelačního součinitele  $R^2=0,83$ .



Graf 8: Závislost mezi obsahem asfaltů u originálního pojiva a zvýšením bodu měknutí po aplikaci dlouhodobého stárnutí metodou 3xRTFOT

## 6.8 SROVNÁNÍ SIMULACE STÁRNUTÍ ASFALTOVÉHO POJIVA A ASFALTOVÉ SMĚSI

V další části disertační práce byly porovnány změny vlastností při stárnutí asfaltového pojiva a asfaltové směsi. Stárnutí asfaltové směsi bylo provedeno pomocí metody BSA na sedmi asfaltových směsích. Výsledky na znovuzískaných pojivech po stárnutí metodou BSA byly následně porovnány s výsledky na pojivech zestárlých metodami dlouhodobého stárnutí asfaltového pojiva (3xRTFOT a RTFOT+PAV). [26, 33]

Při porovnání výsledků na pojivech po stárnutí asfaltové směsi metodou BSA a po laboratorním stárnutí metodami 3xRTFOT a RTFOT+PAV bylo zjištěno, že obě použité metody simulující stárnutí asfaltového pojiva způsobují vyšší změnu vlastností než metoda stárnutí asfaltové směsi BSA, která probíhá při teplotě 80 °C po dobu 96 hodin. Přesto bylo možné sledovat totožný trend, kdy nejnáchylnější pojiva na stárnutí, byla zároveň nejnáchylnější při stárnutí asfaltové směsi metodou BSA. V Tabulce 6 je možné porovnat optimální čas laboratorního stárnutí metody BSA tak, aby výsledky jednotlivých zkoušek odpovídaly hodnotám po stárnutí silničních asfaltů.

Z Tabulky 6 je patrné, že stárnutí metodou BSA způsobuje nižší změnu vlastností oproti metodám stárnutí asfaltového pojiva (3xRTFOT a RTFOT+PAV). Při porovnání výsledků v Tabulce 6 je patrný výrazný rozdíl mezi optimálním časem získaným z penetrace jehlou a ostatními laboratorními zkouškami. Při porovnání BSA a 3xRTFOT je zároveň zjevný výrazně vyšší optimální čas u fázového úhlu (275 hodin). U ostatních veličin byl zjištěný optimální čas podobně v přibližné hodnotě 190 hodin, což je ovšem dvojnásobný čas oproti zkoušce BSA. Pokud porovnáme metodu BSA vůči RTFOT+PAV, opět je patrný nižší optimální čas u penetrace jehlou (195 hodin) oproti ostatním zkouškám. Dále byl zjištěn velmi



podobný optimální čas u dynamické viskozity (268 hodin) a u komplexního smykového modulu (267 hodin). Optimální čas u bodu měknutí (314 hodin) zase odpovídal fázovému úhlu (322 hodin).

Tabulka 6: Nastavení optimálního času u metody BSA

Zkouška	BSA vůči 3xRTFOT	BSA vůči RTFOT+PAV
	[hod.]	[hod.]
Penetrace jehlou	120	195
Bod měknutí	204	314
Dynamická viskozita	181	268
Komplexní smykový modul (60 °C; 1,59 Hz)	185	267
Fázový úhel (60 °C; 1,59 Hz)	275	322

Metoda stárnutí asfaltové směsi BSA způsobuje odlišný způsob degradace pojiva oproti stárnutí asfaltových pojiv. Zejména bylo zjištěno, že se pozvolněji mění hodnota fázového úhlu. Termooxidační zátěž BSA lze vyhodnotit tak, že leží mezi metodami RTFOT a 3xRTFOT (případně RTFOT+PAV).

## 6.9 METODIKA POPISUJÍCÍ LABORATORNÍ STÁRNUTÍ ASFALTOVÝCH SMĚSÍ

V České republice neexistovala metodika pro simulaci termooxidačního stárnutí asfaltových směsí v laboratoři. Výhodou simulovaného laboratorního stárnutí asfaltové směsi (tzn. stárnutí asfaltového pojiva zabudovaného do asfaltové směsi) je možnost posoudit vliv druhu, kvality a obsahu pojiva v asfaltové směsi, tloušťky filmu pojiva na povrchu kameniva a eventuálně i použitých přísad na změnu vlastností asfaltového pojiva v asfaltové směsi. Takto jsou zohledněny pro dané asfaltové pojivo konkrétní podmínky použití, které se mohou od doposud používaných standardních testů akcelerovaného simulovaného stárnutí pouhého pojiva odlišovat. [15]

Na základě výsledků disertační práce byla v roce 2015 schválena certifikovaná metodika s názvem: „Metodika popisující laboratorní stárnutí asfaltových směsí“. V rámci metodiky byla vybrána pro modelování stárnutí asfaltové směsi metoda BSA.

## 6.10 HODNOCENÍ SILNIČNÍCH ASFALTŮ POUŽÍVANÝCH V ČR POMOCÍ METODIKY SHRP

Silniční asfalty používané v rámci České republiky byly hodnoceny pomocí metodiky SHRP, v které jsou uplatněny funkční zkoušky na asfaltových pojivech. Jednotlivá asfaltová pojiva jsou podrobena simulaci laboratorního stárnutí metodami RTFOT a RTFOT+PAV a následně jsou hodnocena pomocí dynamického viskozimetru, dynamického smykového reometru (DSR) a průhybového trámečkového reometru (BBR).

Na základě výsledků bylo zjištěno, že silniční asfalty vyhovují požadavkům pro originální pojiva a zároveň požadavkům po krátkodobém stárnutí metodou RTFOT.

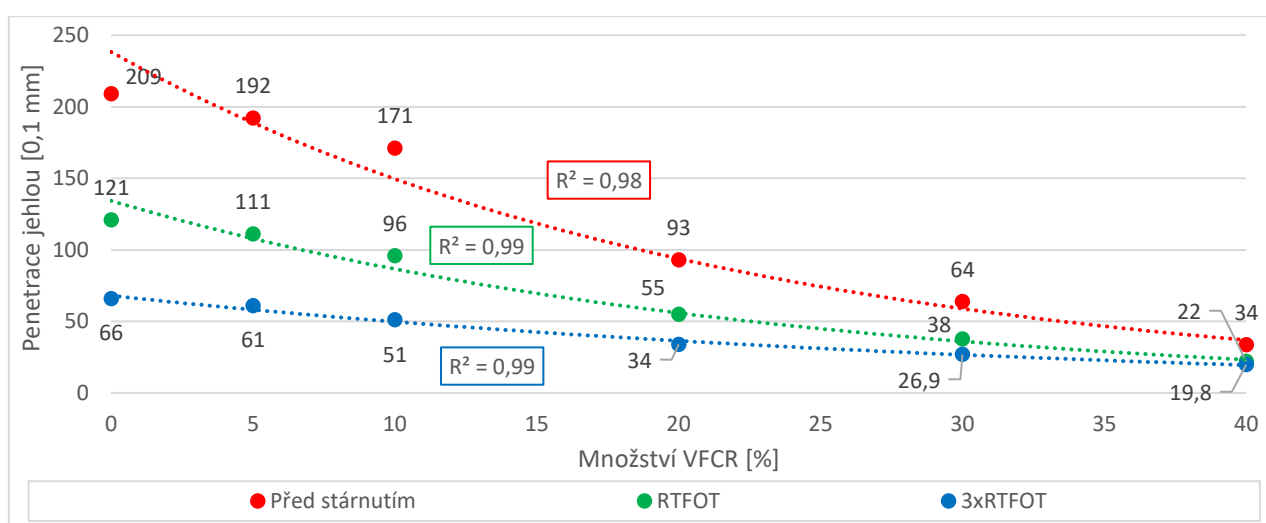
Problém ovšem nastává u silničních asfaltů podrobených laboratornímu stárnutí metodou RTFOT+PAV, kdy většina hodnocených pojiv nevyhověla na únavový parametr a na zkoušku nízkoteplotních vlastností.

Z výsledků vyplynulo, že sofistikovaná metoda dle SHRP klade požadavky na asfaltová pojiva během celé životnosti, kdežto evropská norma hodnotí jen originální pojiva a pojiva po krátkodobém stárnutí. Zejména chybí hodnocení po dlouhodobém stárnutí, protože výsledky disertační práce potvrdily, že pojiva, která se využívají v České republice, často nevyhovují zejména na únavové parametry a nízkoteplotní vlastnosti.

## 6.11 SILNIČNÍ ASFALTY S OBSAHEM VISBREAKINGOVÉHO ZBYTKU

Visbreakingový zbytek (dále označovaný jako VFCR z anglického názvu Vacuum Flashed Cracked Residue) se přidává do asfaltového pojiva již v rafinerii a není v současné době možné pomocí běžně použitých laboratorních zkoušek zjistit jeho množství v pojivu. Z tohoto důvodu byl VFCR v různém množství přidán do třech vybraných silničních asfaltů a byl pozorován vliv na změnu jeho vlastností.

Jako výchozí pojiva byly vybrány silniční asfalty gradace 50/70 s označením F a 70/100 s označením A. Z důvodu vysoké tuhosti přidávaného VFCR byl třetím výchozím pojivem silniční asfalt 160/220 s označením P. Dávkované množství VFCR v silničním asfaltu bylo stanoveno na 10 %, 20 %, 30 % a 40 %. Míchání probíhalo po dobu jedné minuty bez následné stabilizace například polofoukáním. Jednotlivé vzorky byly podrobeny stárnutí metodou RTFOT a dále modifikovanou metodou 3xRTFOT. Na jednotlivých vzorcích byla stanovena penetrace jehlou dle ČSN EN 1426 a bod měknutí metodou kroužek a kulička dle ČSN EN 1427. Pomocí dynamického smykového reometru (DSR) byla určena dynamická viskozita podle ČSN EN 13702 a dále byl stanoven komplexní smykový modul  $G^*$  a fázový úhel  $\delta$  dle ČSN EN 14770. Nízkoteplotní vlastnosti byly hodnoceny pomocí zařízení BBR podle ČSN EN 14771.



Graf 9: Závislost penetrace jehlou na množství VFCR s ohledem na simulaci laboratorního stárnutí

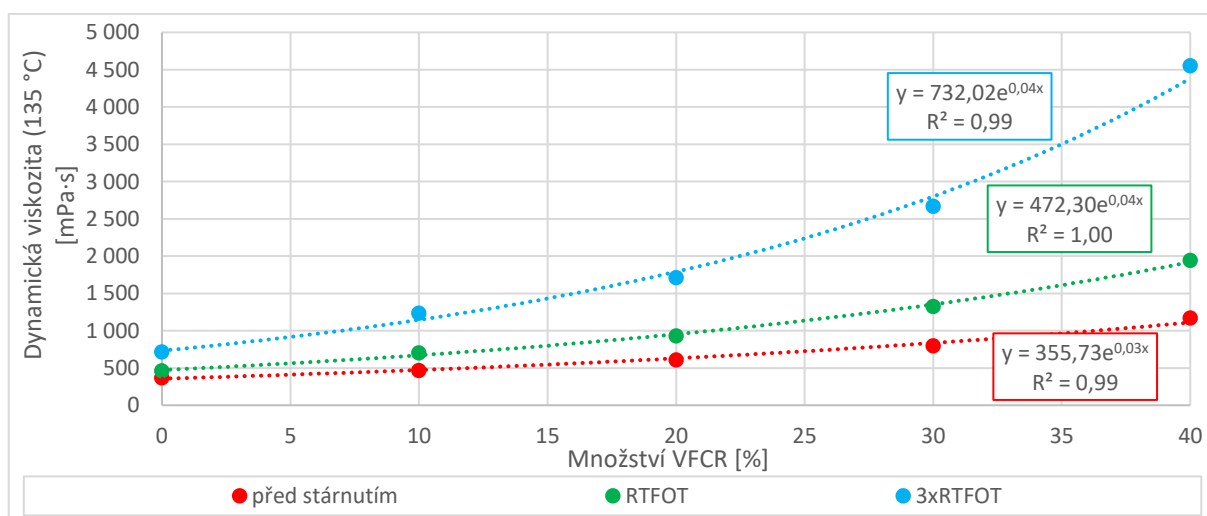


Z výsledků vyplynulo, že přidavek VFCE způsobuje nárůst tvrdosti pojiva, kterou dokazuje snižující se penetrace jehlou, která klesá exponenciálně vůči množství přidaného VFCE. Tento fakt způsobuje vysoká tvrdost VFCE, u něhož byla zjištěna penetrace jehlou 0 [0,1 mm]. Příklad změny penetrace jehlou u výchozího pojiva gradace 160/220 je patrný z Grafu 9.

V Tabulce 7 jsou uvedeny hodnoty bodu měknutí jednotlivých směsných pojiv s ohledem na laboratorní stárnutí a zároveň je uvedena odpovídající gradace dle ČSN EN 12591. Z výsledků vyplývá, že simulace laboratorního stárnutí a přidavek VFCE způsobují nárůst bodu měknutí. Zároveň z Tabulky 7 vyplývá, že přidavek VFCE způsobuje zvýšení změny bodu měknutí po aplikaci dlouhodobého stárnutí (hodnoty jsou uvedeny v závorce). Závislost lze popsat pomocí lineární funkce.

Tabulka 7: Hodnoty bodu měknutí pro směsná pojiva s odlišným množstvím VFCE

Zkouška	Odpovídající gradace dle ČSN EN 12591	Bod měknutí dle EN 1427		
		[°C]		
Jednotka		-	RTFOT	3xRTFOT
Laboratorní stárnutí				
50/70	50/70	46,7	51,1 (4,4)	55,6 (8,9)
50/70 + 10 % VFCE	35/50	50,3	55,7 (5,4)	61,7 (11,4)
50/70 + 20 % VFCE	30/45	53,1	60,9 (7,8)	67,3 (14,2)
50/70 + 30 % VFCE	-	57,5	64,6 (7,1)	74,2 (16,7)
50/70 + 40 % VFCE	-	61,4	69,9 (8,5)	79,5 (18,1)
70/100	70/100	46,7	49,3 (2,6)	55,9 (9,2)
70/100 + 10 % VFCE	35/50	50,4	55,1 (4,7)	62,4 (12,0)
70/100 + 20 % VFCE	30/45	53,7	58,4 (4,7)	67,7 (14,0)
70/100 + 30 % VFCE	20/30	58,1	64,5 (6,4)	75,0 (16,9)
70/100 + 40 % VFCE	-	62,7	71,3 (8,6)	79,0 (16,3)
160/220	160/220	38,3	42,7 (4,4)	47,4 (9,1)
160/220 + 10 % VFCE	160/220	40,1	45,1 (5,0)	50,3 (10,2)
160/220 + 20 % VFCE	70/100	43,2	49,1 (5,9)	56,6 (13,4)
160/220 + 30 % VFCE	50/70	46,7	53,5 (6,8)	60,3 (13,6)
160/220 + 40 % VFCE	30/45	53,7	62,5 (8,8)	69,5 (15,8)



Graf 10: Závislost dynamické viskozity při 135 °C na množství VFCE u výchozího pojiva 70/100

Při měření dynamické viskozity bylo zjištěno, že vliv přidání VFCE je znatelnější při aplikaci dlouhodobého stárnutí. Příkladem budiž Graf 10, kde je uvedena závislost mezi dynamickou viskozitou při teplotě 135 °C na množství VFCE u výchozího pojiva gradace 70/100.

Při hodnocení komplexního smykového modulu a fázového úhlu bylo zjištěno, že přidavek VFCE způsobuje zvyšování komplexního smykového modulu a snižování fázového úhlu. Se zvyšujícím se obsahem VFCE roste násobná změna stárnutí, která se projevuje především po aplikaci dlouhodobého stárnutí například metodou 3xRTFOT. U směsných pojiv s výchozími pojivy gradace 50/70 a 70/100 byly sestrojeny hlavní křivky komplexních smykových modulů a fázových úhlů. Bylo zjištěno, že posun hlavních křivek je vyšší u pojiv s vyšším přídatkem VFCE. U výchozích pojiv bez přídatku VFCE byl zřejmý konkávní tvar hlavních křivek fázových úhlů, který se v průběhu stárnutí pozvolna srovnal do lineárního tvaru. U směsného pojiva s 30 % VFCE přecházely hlavní křivky fázových úhlů v průběhu stárnutí do konvexního tvaru. Dále byly stanoveny viskoelastické teploty při frekvenci 1,59 Hz, které určují, při jaké teplotě je fázový úhel 45 °. Bylo zjištěno, že laboratorní stárnutí a přidavek VFCE způsobují nárůst viskoelastické teploty a zároveň, že při této teplotě klesá lineárně hodnota komplexního smykového modulu.

Při hodnocení nízkoteplotních vlastností pomocí zařízení BBR byla zjištěna lineární závislost mezi ohybovou tuhostí a množstvím VFCE, kdy ohybová tuhost s přídatkem VFCE roste. Opak byl zjištěn při hodnocení m-hodnoty, která lineárně klesá s přídatkem VFCE.

## **6.12 SROVNÁNÍ SILNIČNÍCH ASFALTŮ S PŘESNÝM DÁVKOVÁNÍM VFCE S BĚŽNÝMI SILNIČNÍMI ASFALTY VYUŽÍVANÝMI V ČESKÉ REPUBLICE**

Při namíchání silničního asfaltu gradace 160/220 s 30 % VFCE bylo docíleno směsného pojiva gradace 50/70, které se nejčastěji používá na území České republiky. Následně bylo toto směsné pojivo porovnáno pomocí empirických a funkčních zkoušek s běžnými silničními asfalty gradace 50/70.

Z výsledků vyplynulo, že směsné pojivo se chová více méně průměrně včetně náchylnosti k laboratornímu stárnutí. Odchylna byla zjištěna při porovnání nízkoteplotních vlastností. U směsného pojiva byla zjištěna nižší průměrná náchylnost ke stárnutí, ovšem hodnota ohybové tuhosti po aplikaci dlouhodobého stárnutí byla přibližně o 15 % vyšší. Při hodnocení m-hodnoty po dlouhodobém stárnutí patřilo směsné pojivo k lepším. U komerčních silničních asfaltů je pro získání kritické teploty většinou směrodatná velikost m-hodnoty, ale u směsného pojiva vychází výrazně hůře hodnota získaná z ohybové tuhosti.

## 7 ZÁVĚR

Řešení disertační práce bylo vyvoláno diskuzí nad snižující se kvalitou vozovek, která může být způsobena i vlastnostmi silničního asfaltu, jakožto základní složky asfaltové směsi. V současné době používané silniční asfalty většinou vyhovují požadavkům platných norem, ovšem jejich životnost při zabudování v asfaltové směsi je výrazně rozdílná. Proto je hlavní náplní disertační práce posuzování silničních asfaltů po aplikaci laboratorního stárnutí a následném hodnocení pomocí empirických i funkčních zkoušek.

Dle výsledků disertační práce lze formulovat následující závěry:

- Pro krátkodobé stárnutí asfaltového pojiva se nejčastěji používá metoda tepelné stálosti v tenké pohybující se vrstvě (RTFOT), jejíž modifikace trojnásobným prodloužením doby expozice (3xRTFOT) může být vhodnou alternativou urychleného dlouhodobého stárnutí v tlakové nádobě (PAV). Výhodou při použití stárnutí metodou 3xRTFOT je ušetření nemalých finančních prostředků při nákupu dalšího zařízení pro simulaci dlouhodobého laboratorního stárnutí a zároveň menší pracnost, jelikož metodě PAV obvykle předchází stárnutí metodou RTFOT.
- Při hodnocení dvou silničních asfaltů 70/100 a 13 silničních asfaltů 50/70 dle ČSN EN 12591 byly zjištěny velmi benevolentně nastavené požadavky zejména po aplikaci krátkodobého stárnutí. Problém nastával u bodu lámavosti podle Fraasse, kdy normovým požadavkům nevyhovělo více než 50 % hodnocených poživ.
- Na základě hodnoty bodu měknutí po RTFOT a kritické teplotě z BBR po 3xRTFOT byl stanoven průměrný rozsah oboru plasticity, který je u silničních asfaltů ( $79,6 \pm 2,1$ ) °C. Z této hodnoty je třeba vycházet při používání silničních asfaltů v České republice.
- Z chemického rozboru silničních asfaltů vyplývá, že nejvyšší procentuální zastoupení v silničním asfaltu mají aromáty a pryskyřice. Nižší množství tvoří asfalteny a minimální množství nasycené uhlovodíky. V průběhu laboratorního stárnutí se příliš nemění poměr pryskyřic a nasycených uhlovodíků. Ovšem roste množství asfaltenů a úměrně tomu klesá obsah aromatů. Závislost mezi změnou obsahu asfaltenů a aromatů na době stárnutí metodou RTFOT lze poměrně přesně popsat pomocí lineární funkce.
- Silniční asfalty s nejvyšší náchylností ke stárnutí mají nejvyšší obsah asfaltenů.
- Při srovnání dlouhodobého stárnutí metodami RTFOT+PAV a 3xRTFOT bylo zjištěno, že laboratorní stárnutí metodou 3xRTFOT způsobuje průměrně nižší změnu vlastností silničních asfaltů než RTFOT+PAV. Pro srovnání obou metod by bylo vhodné prodloužit čas expozice z 225 minut (3xRTFOT) na 260 minut (cca 3,5xRTFOT). Odchylku mezi metodami lze redukovat například i snížením teploty stárnutí u metody PAV.
- Při srovnání výsledků nízkoteplotních vlastností u poživ zestárlých metodou RTFOT+PAV a 3xRTFOT bylo zjištěno, že RTFOT+PAV přináší výrazně vyšší stupeň stárnutí.

- Při porovnání vlastností silničních asfaltů laboratorně zestárých metodou RTFOT se znovuzískanými pojivy ze směsi typu ACO 11 po pokládce asfaltové směsi bylo zjištěno, že optimální čas laboratorního stárnutí metodou RTFOT v prostředí České republiky je vhodné prodloužit ze 75 minut na přibližně 100 minut.
- U jednoho vybraného výrobce bylo zjištěno kolísání kvality silničních asfaltů, což může být způsobeno kolísáním obsahu visbreakingového zbytku.
- Dle výsledků je důležité hodnotit vlastnosti silničních asfaltů především po aplikaci dlouhodobého stárnutí například metodou 3xRTFOT nebo známější kombinací RTFOT+PAV, neboť teprve poté jsou rozdíly mezi jednotlivými silničními asfalty patrné.
- Na základě výsledků disertační práce vznikla v roce 2015 certifikovaná metodika s názvem: „Metodika pro hodnocení silničních asfaltů z hlediska náchylnosti k termooxidačnímu stárnutí“. V rámci metodiky je navržena simulace laboratorního stárnutí modifikovanou metodou RTFOT s trojnásobně prodlouženou dobou expozice (3xRTFOT). Certifikovaná metodika pro hodnocení použitelnosti asfaltového pojiva z hlediska termooxidačního stárnutí je určena pro orgány státní správy (zejména Ministerstvo dopravy ČR a Ředitelství silnic a dálnic ČR), které touto certifikovanou metodikou získají jednoduchý nástroj pro hodnocení náchylnosti asfaltových pojiv ke stárnutí.
- V předložené metodice je navržen limitní požadavek na zvýšení bodu měknutí o 15 °C a zvýšení komplexního smykového modulu maximálně o 15tinásobek po stárnutí metodou 3xRTFOT.
- Pro zkoušku Multiple Stress Creep Recovery Test (MSCR) bylo uplatněno matematické modelování za použití Burgersova modelu. Z výsledků vyplývá, že nejvyšší vliv na výsledky zkoušky MSCR má hodnota tlumiče (T3), který udává nevratnou část při zkoušce MSCR.
- V rámci práce byly mezi sebou porovnány výsledky jednotlivých zkoušek při celkovém počtu více než 800 tisíc různých kombinací. Na základě korelačních závislostí bylo možné stanovit optimální okrajové podmínky DSR, tak aby bylo možné odvodit hodnotu bodu měknutí a penetrace jehlou, jakožto základních zkoušek silničních asfaltů. Hodnota penetrace jehlou koreluje mocninou funkcí s hodnotou komplexního smykového modulu při teplotě 25 °C a frekvenci 0,40 Hz s hodnotou korelačního součinitele  $R^2=0,93$ . Hodnotě bodu měknutí zase odpovídá měření pomocí DSR při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz, což dokazuje korelační součinitel  $R^2=0,97$  opět při mocninné závislosti.
- Při porovnání chemických a fyzikálních vlastností bylo zjištěno, že snižující se obsah asfaltenů vede ke zvýšení fázového úhlu. Při teplotě 40 °C a frekvenci 1,59 Hz byla zjištěna lineární závislost v hodnotě  $R^2=0,86$ . Dále byla zjištěna lineární závislost daná korelačním součinitelem  $R^2=0,97$  mezi bodem lámavosti a množstvím aromatů.
- Při porovnání pojiv po stárnutí asfaltové směsi metodou BSA a po laboratorním stárnutí metodami 3xRTFOT a RTFOT+PAV bylo zjištěno, že obě použité

metody simulující stárnutí asfaltového pojiva způsobují vyšší změnu vlastností než metoda stárnutí asfaltové směsi BSA, která probíhá při teplotě 80 °C po dobu 96 hodin. Přesto bylo možné sledovat totožný trend, kdy nejnáchylnější pojiva na stárnutí asfaltových pojiv byla zároveň nejnáchylnější při stárnutí asfaltové směsi metodou BSA. Termooxidační zátěž BSA leží mezi metodami RTFOT a 3xRTFOT (případně RTFOT+PAV).

- Na základě výsledků z disertační práce, byla v roce 2015 schválena certifikovaná metodika s názvem: „Metodika popisující laboratorní stárnutí asfaltových směsí“. V rámci metodiky byla vybrána pro modelování stárnutí asfaltové směsi metoda BSA.
- Silniční asfalty používající se v rámci České republiky byly hodnoceny pomocí metodiky SHRP. Bylo zjištěno, že silniční asfalty vyhovují požadavkům pro originální pojiva a zároveň požadavkům po krátkodobém stárnutí metodou RTFOT. Ovšem problém nastává u silničních asfaltů podrobených laboratornímu stárnutí metodou RTFOT+PAV, kdy většina hodnocených pojiv nevyhověla na únavový parametr a na zkoušku nízkoteplotních vlastností.
- V rámci disertační práce bylo přidáváno přesné množství VFQR do třech silničních asfaltů gradace 50/70, 70/100 a 160/220. Jelikož VFQR je velmi tvrdá komponenta, její přimíchání do silničního asfaltu způsobuje výrazné zvýšení tuhosti pojiva, což se odráží na snižující se penetraci jehlou a tudíž poklesu gradační třídy.
- Dávkování VFQR způsobuje exponenciální pokles penetrace jehlou, lineární nárůst bodu měknutí, exponenciální nárůst dynamické viskozity a komplexního smykového modulu, lineární pokles fázového úhlu a ohybové tuhosti a m-hodnoty ze zařízení BBR.
- Zvyšující se podíl VFQR způsobuje například výraznější zvýšení bodu měknutí po aplikaci dlouhodobého stárnutí. Důvodem je zřejmě vyšší podíl asfaltů v obsahu VFQR.
- Při namíchání silničního asfaltu 160/220 s 30 % VFQR bylo docíleno směsného pojiva gradace 50/70. Při porovnání empirických a funkčních zkoušek zařízením DSR, bylo zjištěno, že směsné pojivo se chová více méně průměrně včetně náchylnosti k laboratornímu stárnutí. Při porovnání nízkoteplotních vlastností byla u směsného pojiva zjištěna nižší průměrná náchylnost ke stárnutí, ovšem hodnota ohybové tuhosti po aplikaci dlouhodobého stárnutí byla přibližně o 15 % vyšší. Při hodnocení m-hodnoty po dlouhodobém stárnutí patřilo směsné pojivo k lepším. U komerčních silničních asfaltů je pro získání kritické teploty většinou směrodatná velikost m hodnoty, ale u směsného pojiva vychází výrazně hůře hodnota získaná z ohybové tuhosti.

Z výsledků disertační práce vyplývá, že je potřeba začít rutinně posuzovat silniční asfalty po simulaci dlouhodobého stárnutí a zároveň nastavit adekvátní limitní hodnoty, které znemožní používání nevhodných silničních asfaltů v České republice. Výstavba a údržba silniční sítě představuje významné celospolečenské náklady, které mohou být redukovány právě vyloučením nevhodných asfaltových pojiv.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Asphalt. EAPA [online]. 2012 [cit. 2015-05-12]. Dostupné z: <http://www.eapa.org/asphalt.php>.
- [2] BESAMUSCA, Jeroen, Anja SÖRENSEN a Chris SOUTHWELL. Addressing Ageing Characteristics of Bituminous Binder in Europe. In: 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress. Istanbul: 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress, 2012, s. 10.
- [3] Bitumen Oven for Rolling Thin-Film Oven Test. UTEST Material Testing Equipment [online]. 2016 [cit. 2016-09-21]. Dostupné z: <http://1url.cz/utEgt>
- [4] BLAŽEK, Josef a Vratislav RÁBL. Základy zpracování a využití ropy. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006, 254 s. ISBN 80-708-0619-2.
- [5] BUCHTA, Jaroslav. Asfalty a asfaltové výrobky [online]. 2015, 6 s. [cit. 2016-02-16]. Dostupné z: <http://www.cappo.cz/res/data/000111.pdf>
- [6] CAPELLOSI, Cleiton. "Bilateral" adaptive cruise control could help reduce traffic jams. Capellossiiv.blogspot.cz [online]. 2013 [cit. 2016-02-19]. Dostupné z: <http://1url.cz/jtl3U>
- [7] COUFALÍK, Pavel, Ondřej DAŠEK, Jiří KACHTÍK, Jan KUDRNA a Svatopluk STOKLÁSEK. The Stress Relaxation Of Modified Bitumen. In: AL NAGEIM, Hassan. Proceeding of The 13 th Annual International Conference on ASPHALT, PAVEMENT ENGINEERING AND INFRASTRUCTURE. Liverpool: Built Environment and Sustainable Technologies (BEST) Research Institute, 2014, s. 55. ISBN 978-0-9571804-4-4.
- [8] COUFALÍK, Pavel, Ondřej DAŠEK, Petr HÝZL, Dušan STEHLÍK, Jan KUDRNA, Iva KRČMOVÁ a Pavel ŠPERKA. Resistance of asphalt binders to formation of frost cracks. Hong Kong, 2015.
- [9] ČSN EN 12607-1. Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu - Část 1: Metoda RTFOT. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [10] ČSN EN 14769. Asfalty a asfaltová pojiva - Urychlené dlouhodobé stárnutí v tlakové nádobě (PAV). Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [11] DAŠEK, Ondřej a Pavel COUFALÍK. Výzkumný projekt TA 03030381 Nové zkušební metody asfaltových pojiv a směsí umožňující prodloužení životnosti asfaltových vozovek - Příloha B.1: Příloha k odborné zprávě o postupu prací a dosažených výsledcích za rok 2013. Brno, 2013.
- [12] DAŠEK, Ondřej, Pavel COUFALÍK, Petr HÝZL, Michal VARAUS, Petr ŠPAČEK, Zdeněk HEGR a Svatopluk STOKLÁSEK. Nové zkušební metody umožňující predikovat prodloužení životnosti asfaltových vozovek. In: Sborník ASFALTOVÉ VOZOVKY 2013/ASPHALT PAVEMENTS 2013. Praha: PRAGOPROJEKT, a.s., K Ryšánci 1668/16, 147 54 Praha 4, 2013, s. 18. ISBN 978-80-903925-3-3.)
- [13] DAŠEK, Ondřej, Pavel COUFALÍK, Petr HÝZL, Michal VARAUS, Petr ŠPAČEK, Zdeněk HEGR a Svatopluk STOKLÁSEK. Nové zkušební metody umožňující predikovat prodloužení životnosti asfaltových vozovek. In: Sborník

ASFALTOVÉ VOZOVKY 2013/ASPHALT PAVEMENTS 2013. Praha: PRAGOPROJEKT, a.s., K Ryšánce 1668/16, 147 54 Praha 4, 2013, s. 18. ISBN 978-80-903925-3-3.

- [14] DAŠEK, Ondřej, Pavel COUFALÍK, Petr HÝZL, Michal VARAUS, Petr ŠPAČEK, Zdeněk HEGR a Svatopluk STOKLÁSEK. Nové zkušební metody umožňující predikovat prodloužení životnosti asfaltových vozovek. Silniční obzor. Praha: Česká silniční společnost, 2014, roč. 75, č. 2.
- [15] DAŠEK, Ondřej, Petr HÝZL, Pavel COUFALÍK, et al. Metodika popisující laboratorní stárnutí asfaltových směsí. Brno, 2015.
- [16] DAŠEK, Ondřej, Petr HÝZL, Pavel COUFALÍK, et al. Metodika pro hodnocení silničních asfaltů z hlediska náchylnosti k termooxidačnímu stárnutí. Brno, 2015.
- [17] Die Herstellung von Bitumen – die Animation. You Tube [online]. 2015 [cit. 2016-02-16]. Dostupné z: [https://youtu.be/gVRpp\\_tdOJg](https://youtu.be/gVRpp_tdOJg)
- [18] EAPA. Asphalt in Figures [online]. Brusel, 2014 [cit. 2016-02-29]. Dostupné z: <http://1url.cz/Ptl3f>
- [19] Energy crisis. Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-02-23]. Dostupné z: <http://1url.cz/7tl3I>
- [20] European Patent Application 0 240 090: „Process for the Preparation of Bitumen“, Applicant: Shell Internationale Research Maatschappij B.V. NL-2596 HR Den Haag(NL), 07.10.1987.
- [21] FIEDLER, Jiří. Rešerše ke stárnutí asfaltů.
- [22] MATOUŠEK, David a Petr SVOBODA. Výzkumný projekt TA 03030381 Nové zkušební metody asfaltových pojiv a směsí umožňující prodloužení životnosti asfaltových vozovek - Příloha B7. Praha, 2016.
- [23] MORIAN, Nathan, Elie HAJJ, Charles GLOVER a Peter SEBAALY. Oxidative Aging of Asphalt Binders in Hot-Mix Asphalt Mixtures. In: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. Washington, D.C.: The National Academy of Sciences, 2014. ISSN 0361-1981.
- [24] Naše produkty: Asfalty a asfaltové výrobky. Česká rafinerská [online]. 2016 [cit. 2016-02-16]. Dostupné z: <http://www.crc.cz/cz/asfalty-asfaltove-vyrobky.aspx>
- [25] NOVÁK, Václav a Radek ČERNÝ. Vliv přísadky visbreakingu na vlastnosti silničních asfaltů. In: Asfaltové vozovky. s. 50-62.
- [26] PĚNČÍK, M. Reologické vlastnosti asfaltových pojiv [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. 2015.
- [27] PETROLEUM.CZ. Petroleum.cz: Výroba asfaltů [online]. 2016 [cit. 2016-02-29]. Dostupné z: <http://www.petroileum.cz/zpracovani/zpracovani-ropy-42.aspx>
- [28] PETROLEUM.CZ. Petroleum.cz: Zpracování ropy [online]. 2016 [cit. 2016-01-19]. Dostupné z: <http://www.petroileum.cz/zpracovani/>
- [29] Pressure Aging Vessel. Pavement interactive [online]. 2011 [cit. 2016-02-22]. Dostupné z: <http://www.pavementinteractive.org/article/pressure-aging-vessel/>
- [30] RAHMAN, AIREY a A. C. COLLOP. The Mechanical Properties of the Dry Process CRM Asphalt Mixtures Following Short-term and Long-term Ageing. Statens vegvesen. Dostupné také z: <http://1url.cz/Ltl3S>

- [31] SPIEGL, Markus. The road to performance-related bitumen specification. In: 12th Colloquium on Asphalt and Bitumen. Kranjska Gora: ZAS, 2009, s. 10.
- [32] STOKLÁSEK, Svatopluk. Výzkumný projekt TA 03030381 Nové zkušební metody asfaltových pojiv a směsí umožňující prodloužení životnosti asfaltových vozovek - Příloha B 4.2: Stárnutí asfaltových pojiv jako důležitý aspekt životnosti asfaltových vozovek. Brno, 2013.
- [33] ŠTĚPANOVSKEÝ, V. Problematika stárnutí asfaltových pojiv a směsí [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. 2015.
- [34] ŠTĚPANOVSKEÝ, Vlastimil. Problematika stárnutí asfaltových pojiv a směsí. Brno, 2015. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [35] TE-BBR Pro Thermoelectric Bending Beam Rheometer. CANNON INSTRUMENT COMPANY. CANNON Instrument Company [online]. 2016 [cit. 2016-02-19]. Dostupné z: <https://www.cannoninstrument.com/en/products-detail/te-bbr-pro-thermoelectric-bending-beam-rheometer--CANNON%20TE-BBR%20Pro>
- [36] TECHBRIEF. The Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Procedure. 2011, 9 s.
- [37] Testing Equipment. Technische Universitat Braunschweig [online]. 2014 [cit. 2014-07-25]. Dostupné z: <http://1url.cz/ft2UV>
- [38] UNIPETROL RPA, S.R.O. Cesta za tajemstvím ropy [online]. 2015 [cit. 2016-02-16]. Dostupné z: <http://www.duclair.org/gallery/flashapp/ivp-ropa/>
- [39] UNIPETROL, A.S. Cesta za tajemstvím ropy [online]. 2011 [cit. 2015-07-28]. Dostupné z: [http://www.duclair.org/gallery/flashapp/ivp-ropa/.](http://www.duclair.org/gallery/flashapp/ivp-ropa/)
- [40] VARAUS, Michal. Pozemní komunikace II: Modul 3 Asfaltová pojiva. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2005.
- [41] ZAJÍČEK, Jan. Technologie stavby vozovek. 1. vyd. Praha: ČKAIT, 2014, 392 s. ISBN 978-80-87438-59-6.



## ŽIVOTOPIS

Jméno a příjmení: Ing. Pavel Coufalík  
Datum narození: 29. 11. 1987  
Bydliště: Za Potokem 13, Pozlovice, 763 26  
Telefon: + 420 541 147 350 (pracoviště)  
E-mail: coufalik.p@fce.vutbr.cz

### Vzdělání

2013 – dosud Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební,  
Obor konstrukce a dopravní stavby  
**Ph.D. studium**  
Téma: Reologické vlastnosti asfaltových pojiv

2011 – 2013 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební,  
Obor konstrukce a dopravní stavby  
Dosažený titul: **Inženýr**  
Diplomová práce: Návrh a posouzení směsi pro asfaltové  
vrstvy  
se zvýšenou odolností proti šíření trhlin (SAL)  
Ocenění: **Cena rektora, vyznamenání**

2007 – 2011 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební,  
Obor konstrukce a dopravní stavby  
Dosažený titul: **Bakalář**  
Bakalářská práce: Vyhledávací studie obchvatu města  
Luhačovice

2003 – 2007 Střední průmyslová škola Zlín  
Obor Technické lyceum

### Pracovní zkušenosti

06/2011 – dosud **Vysoké učení technické v Brně**  
Výzkum v silniční laboratoři, provádění laboratorních  
zkoušek, vyhodnocování protokolů, spolupráce na  
výzkumných projektech TAČR

04/2016 – 06/2016 **SQZ, s.r.o.**  
Stáž v ústřední laboratoři firmy, provádění laboratorních  
zkoušek v laboratoři a v terénu

### Jazykové znalosti

Český jazyk Rodilý mluvčí  
Anglický jazyk Středně pokročilý

## **Pedagogická činnost**

AR 2016/17	Cvičení z předmětu BO001- Konstrukce a dopravní stavby
AR 2015/16	Cvičení z předmětu BM02 - Pozemní komunikace II Cvičení z předmětu BO01 - Konstrukce a dopravní stavby
AR 2014/15	Cvičení z předmětu BO01 - Konstrukce a dopravní stavby Cvičení z předmětu MM53 - Doprava ve městech
AR 2013/14	Cvičení z předmětu BO01 - Konstrukce a dopravní stavby

## **Účast na výzkumných projektech**

01/2013 – 12/2016	<b>Nové zkušební metody asfaltových pojiv a směsí umožňující prodloužení životnosti asfaltových vozovek (TA03030381)</b> Financováno Technologickou agenturou ČR Člen řešitelského týmu
01/2016 – 12/2016	<b>Využití pokročilých zkušebních metod pro hodnocení asfaltových pojiv (FAST-J-16-2984)</b> Financováno Vysokým učením technickým v Brně Hlavní řešitel
01/2016 – 12/2016	<b>Vliv přidání visbreakingového zbytku na vlastnosti asfaltových pojiv (FAST-S-16-3732)</b> Financováno Vysokým učením technickým v Brně Člen řešitelského týmu
01/2016 – 12/2016	<b>Omezení vzniku trhlin u asfaltových vozovek v závislosti na vybraném asfaltovém pojivu (FAST-J-15-2901)</b> Financováno Vysokým učením technickým v Brně Hlavní řešitel
01/2012 – 12/2015	<b>Výzkum a realizace dodávky asfaltů modifikovaných pryžovým granulátem systémem “just in time” a komplexní servis při výrobě asfaltových směsí (TA02031191)</b> Financováno Technologickou agenturou ČR Řešitel dílčích úkolů

## **Publikační činnost (výběr)**

COUFALÍK, P.; DAŠEK, O.; HÝZL, P.; STEHLÍK, D.; KUDRNA, J.; KRČMOVÁ, I.; ŠPERKA, P., Resistance of asphalt binders to formation of frost cracks, příspěvek na konferenci Resources, Environment and Engineering II, ISBN 978-1-138-02894-4, CRC Press/Balkema, The Netherlands, 2016.

HÝZL, P.; DAŠEK, O.; VARAUS, M.; STEHLÍK, D.; COUFALÍK, P.; DAŠKOVÁ, J.; KRČMOVÁ, I.; NEKULOVÁ, P., The Effect of Compaction Degree and Binder Content on Performance Properties of Asphalt Mixtures, článek v Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, ISSN 1822-427X, Vilnius Gediminas Technical University, Vilnius, Lithuania, 2016.

DAŠEK, O.; COUFALÍK, P.; HÝZL, P.; ŠPAČEK, P.; HEGR, Z.; MATOUŠEK, D., Změny vlastností silničních asfaltů způsobené stárnutím, příspěvek na konferenci Sborník příspěvků konference Asfaltové vozovky 2015, ISBN 978-80-903925-7-1, České Budějovice, 2015.

STEHLÍK, D.; DAŠEK, O.; HÝZL, P.; COUFALÍK, P.; KRČMOVÁ, I.; VARAUS, M., Pavement construction using road waste building material – from a model to reality, článek v Road Materials and Pavement Design, ISSN 1468-0629, Taylor & Francis, London, 2015.

COUFALÍK, P.; DAŠEK, O.; HÝZL, P., Srovnání stárnutí asfaltových pojiv v laboratorních podmínkách a v reálné situaci, příspěvek na konferenci Výstavba a rehabilitácia asfaltových vozoviek - Asfaltové vozovky v kontexte tvorby a ochrany životného prostredia, ISBN 978-80-232-0328-8, Etela Bačenkova - Dom techniky, Košice, 2015.

HÝZL, P.; VARAUS, M.; STEHLÍK, D.; DAŠEK, O.; COUFALÍK, P.; KRČMOVÁ, I.; DAŠKOVÁ, J., Performance Characteristics of Asphalt Mixtures with Additives, příspěvek na konferenci Applied Mechanics and Materials - Selected paper from the 3rd International Conference on Engineering and Technology Innovation ICETI 2014, ISBN 978-3-03835-460-4, Trans Tech Publications, Switzerland, Taiwan, 2014.

COUFALÍK, P.; DAŠEK, O., Zjišťování náchylnosti asfaltových pojiv k deformaci pomocí MSCR testu, příspěvek na konferenci Sborník recenzovaných příspěvků konference ZKOUŠENÍ A JAKOST VE STAVEBNICTVÍ 2014, ISBN 978-80-214-5032-5, Brno, 2014.

DAŠEK, O.; HÝZL, P.; VARAUS, M.; COUFALÍK, P.; ŠPAČEK, P.; HEGR, Z., Usage of advanced functions of Dynamic Shear Rheometer for the selection of a suitable binder for asphalt mixtures, příspěvek na konferenci Asphalt Pavements - Proceedings of the International Conference on Asphalt Pavements, ISAP 2014, ISBN 978-1-138-02693-3, CRC Press/Balkema, Taylor & Francis Group, Raleigh, USA, 2014.

COUFALÍK, P.; DAŠEK, O.; KACHTÍK, J.; KUDRNA, J.; STOKLÁSEK, S., The Stress Relaxation of Modified Bitumens, příspěvek na konferenci Proceeding of The 13th Annual International Conference on ASPHALT, PAVEMENT ENGINEERING AND INFRASTRUCTURE, ISBN 978-0-9571804-4-4, Liverpool Centre for Materials Technology, Liverpool, 2014.