

# Program **Zéta**

## **Metodika pro návrh dávkování oživovacích přísad**

**Metodika vznikla v rámci řešení projektu**

TJ01000248

**Identifikační číslo výsledku projektu**

TJ01000248-V6

**Název projektu**

Použití oživovacích přísad pro prodloužení životnosti recyklovaných vozovek s vysokým obsahem R-materiálu

**Předkládá**

Vysoké učení technické v Brně  
Froněk, spol. s r.o.  
SQZ, s.r.o.

**Řešitelský kolektiv**

Ing. Iva Coufalíková  
Ing. Tomáš Koudelka  
Ing. Pavel Coufalík, Ph.D.  
Bc. Markéta Čumíčková  
Jakub Salamánek  
Ing. Jan David

**Mentorové projektu**

doc. Dr. Ing. Michal Varaus  
Ing. Zuzana Loderová

**OBSAH**

1. Úvod .....	4
2. Cíle .....	4
3. Popis metodiky .....	5
3.1. Vlastní popis metodiky .....	5
3.2. Okrajové podmínky .....	6
3.3. Zkušební zařízení .....	6
3.4. Pracovní postup .....	6
3.5. Vyjádření výsledků .....	7
3.5.1. Účinnost oživovacích přísad .....	7
3.5.2. Výpočet dávkování oživovací přísady .....	8
3.5.3. Vlastnosti pojiv v R-materiálech .....	11
3.5.4. Ověření návrhu zvoleného dávkování .....	12
3.5.5. Případy kdy nemusí být možné dosáhnout požadovaného stupně oživení .....	12
3.6. Shrnutí postupu návrhu dávkování .....	13
4. Srovnání „novosti postupů“ .....	13
4.1. Základní popis inovace .....	14
5. Popis uplatnění metodiky .....	15
6. Ekonomické aspekty .....	16
7. Seznam použité související literatury .....	16
8. Seznam publikací, které předcházely metodice .....	17
9. Seznam tabulek .....	17
10. Seznam obrázků .....	17

## 1. Úvod

Asfaltové pojivo je materiál organického původu, který podléhá degradačním procesům. Doposud bylo celkem objeveno na 15 procesů, jež způsobují změny ve struktuře asfaltového pojiva. Mezi nejvýznamnější patří působení vzdušného kyslíku, tepla a ultrafialového záření [1]. Degradační procesy, které jsou souhrnně označovány jako stárnutí, ovlivňují vlastnosti pojiva i jeho odezvu na mechanické a teplotní namáhání. Stárnutí s sebou přináší změnu fyzikálně-chemických vlastností, které se u asfaltových pojiv mění v čase. Zpravidla se stárnutím pojivo stává tužším a křehčím, což lze popsat posunem oboru použitelnosti k vyšším teplotám. Asfaltové pojivo se takto stává v čase odolnější vůči trvalým deformacím, ovšem klesá jeho odolnost vůči mrazovým a únavovým porušením. Kombinace vlivů dopravy a změn teplot může následně vyvolat vznik trhlin, způsobuje postupné zhoršování stavu vozovky s následnou potřebou oprav poškozené vrstvy, případně její úplné odstranění. Při odstranění asfaltové vrstvy se tento materiál pak klasifikuje dle EN 13108-8 a nazývá se termínem znovuzískaná asfaltová směs (*site won asphalt*). Teprve až upravením této znovuzískané asfaltové směsi se získá tzv. R-materiál (*reclaimed asphalt*). Úpravou se v tomto smyslu myslí homogenizace, přetřídění, míchání s jiným R-materiálem, popřípadě předrcení tohoto materiálu.

Aby bylo možno tuto znovuzískanou asfaltovou směs v podobě R-materiálu znovu použít během produkce za horka vyráběných asfaltových směsí, je nutné oživit vlastnosti zestárlého asfaltového pojiva takovým způsobem, aby mechanicko-fyzikální chování nově vyrobené směsi s R-materiálem odpovídalo chování asfaltové směsi vyrobené pouze z primárních surovinových zdrojů [2]. Vlastnosti zestárlého pojiva obsaženého v R-materiálu se upravují za účelem zlepšení nízkoteplotního a únavového chování, aniž by byly negativně ovlivněny vlastnosti posuzované za vysokých provozních teplot vozovky. V takovém případě může být R-materiál použit při výrobě asfaltových směsí ve vysokém množství. Za účelem obnovení vlastností zestárlého asfaltového pojiva je možné použít pojiva vyšší gradace nebo tzv. oživovací přísady. Přičemž při použití oživovacích přísad hraje klíčovou roli během návrhu směsi s vysokým obsahem R-materiálu právě proces výběru a množství dávkování oživovací přísady.

Současná evropská ani česká normová základna neposkytuje definici určující, kdy je množství použitého R-materiálu vysoké. Za vysoké množství se dá například považovat množství, které již není schopna bez úprav výrobního zařízení, nebo výrobních postupů využít tradiční obalovna. Alternativně se dá říci, že vysoké množství je takové, které není schopné být oživeno při výrobě směsí s konvenčním silničním pojivem určeným pro výrobu asfaltových směsí, přičemž v České republice je povoleno používat až třídu 160/220 dle EN 12591. V tomto případě by tak hranice určující vysoké množství ležela okolo 40 % z hmotnosti asfaltové směsi.

## 2. Cíle

**Hlavním cílem této metodiky je popis návrhu dávkování oživovacích přísad, které jsou používány za účelem obnovení vlastností zestárlého pojiva, čímž je umožněno přidávat R-materiál přesahující množství 40 % z hmotnosti asfaltové směsi. Metodika návrhu**

dávkování přísad je však obecně použitelná i pro dávkování R-materiálu, které je menší, než 40 %. V současné době v České republice neexistuje žádný standardizovaný ani přibližný postup, který by pomohl výrobcům asfaltových směsí při návrhu dávkování těchto přísad. Výrobci asfaltových směsí spoléhají pouze na informace od distributora, respektive prodejce, které nemusí být v konkrétním případě dostatečně vypovídající pro potřeby výrobce asfaltových směsí.

Cílem této metodiky není stanovení limitních parametrů, které by mělo oživené pojivo splňovat nebo determinace chemického složení oživovací přísady, popřípadě pojiva po oživení. Jedná se spíše o metodu návrhu, která může uživatele přísad upozornit na možná rizika spojená s poddávkováním nebo předávkováním konkrétní zvolené přísady a upozorněním na podmínky, kdy k němu může dojít. V obou těchto případech by totiž chování vyrobené asfaltové směsi s R-materiálem mohlo být horší než u směsí bez obsahu R-materiálu. Metodika je použitelná vždy, když výrobce asfaltové směsi bude chtít porovnat účinek jednotlivých oživovacích přísad nebo když se na trhu objeví přísada nová. Představená metodika by měla umožnit uživateli získat informace ve třech po sobě jdoucích krocích:

- Posoudit účinnost konkrétní přísady vzhledem ke změnám mechanicko-fyzikálního chování zestárlého oživeného asfaltového pojiva.
- Na základě kalibračních křivek odhadnout optimální množství oživovací přísady vzhledem k množství zestárlého pojiva v R-materiálu.
- Upozornit na případy, kdy nemusí být požadované oživení možné.

Zavedením metodiky do české silniční praxe bude umožněno výrobcům asfaltových směsí lépe využívat materiálové a surovinové zdroje v oblasti silničního stavitelství. Na poli recyklace asfaltových směsí se tak usnadní možnost přiblížit se vytyčeným cílům Rady Evropské unie pro odpadové hospodářství a recyklaci [3].

### 3. Popis metodiky

#### 3.1. Vlastní popis metodiky

Podstatou metodiky výpočtu a návrhu dávkování je přidávání oživovací přísady v různém množství do zestárlého asfaltového pojiva s následným sledováním změn jeho vlastností. Rozdílné množství oživovací přísady v zestárlém pojivu způsobuje změnu sledovaných vlastností zestárlého pojiva. Na základě změny zvoleného parametru je možné pomocí regresní funkce následně spočítat množství potřebné k navrácení parametru asfaltového pojiva na původní nebo jinak stanovenou hodnotu. Při výpočtu a následném návrhu dávkování mohou být kombinovány různé parametry asfaltového pojiva používané pro popis chování asfaltových pojiv. Tyto mohou být měřeny pomocí empirických zkoušek nebo pomocí moderní dynamicko-mechanické analýzy využívající měření pomocí dynamického smykového (DSR) nebo průhybového trámečkového reometru (BBR).

### 3.2. Okrajové podmínky

V případě této metodiky je při návrhu dávkování uvažován pouze vliv oživovací přísady na vlastnosti zestárlého pojiva (tzv. 100 % recyklace). Metodika nepostihuje kombinovaný vliv při použití pojiva vyšší gradace a oživovací přísady (např. použití pojiva gradace 70/100 v kombinaci s oživovací přísadou při výsledné požadované kategorii pojiva 50/70). V této metodice je popsán pouze vliv přídatku oživovacích přísad na empirické vlastnosti penetrace jehlou dle EN 1426 a bodu měknutí dle EN 1427. K výběru těchto zkoušek bylo přistoupeno s ohledem na jejich rozšíření v kontrolních laboratořích na území ČR a dále pak s ohledem na parametry silničních asfaltů stanovených v evropské harmonizované normě EN 12591, která stanovuje penetraci a bod měknutí za základní parametry k charakterizaci silničních asfaltů nesoucí označení CE<sup>1</sup>. Dále je nutné vzít v potaz normu EN 13108-8 stanovující mimo jiné limitní deklarovatelné parametry<sup>2</sup> asfaltového pojiva získaného z R-materiálu. Tyto limitní deklarovatelné parametry jsou rovněž stanoveny pomocí zkoušky penetrace (EN 1426) a bodu měknutí (EN 1427). V neposlední řadě v publikaci [6] je uvedeno, že provedení návrhu dávkování dle penetrace povede rovněž ke splnění požadavků dle PG (Superpave performance grading) specifikace používané především v USA, Kanadě a dalších zemích k zatřídění asfaltových pojiv. Metodika samotná se vztahuje pouze na pojiva typu silniční asfalt definovaná dle EN 12591.

### 3.3. Zkušební zařízení

- Penetrometr
- Zařízení pro stanovení bodu měknutí

Bližší popis, specifikace přístrojů a návazné potřebné pomůcky jsou specifikovány v souvisejících normách popisujících postupy a provedení zkoušek.

### 3.4. Pracovní postup

Zestárlé asfaltové pojivo o hmotnosti 400 g až 1000 g, které je určené k analýze účinnosti oživovací přísady, se vloží do laboratorní sušárny vyhřáté na teplotu, přičemž teplota ohřevu vzorků pojiva a příprava analytických vzorků se řídí dle ČSN EN 12594. Zestárlé pojivo v tomto smyslu může být pojivo vyextrahované z R-materiálu nebo laboratorně zestárlé (ve výjimečných případech lze použít i tvrdý silniční asfalt). Následně se asfaltové pojivo vyjme z laboratorní sušárny a mícháním se homogenizuje (pojivo ještě nemusí být při vyjmutí v jádru plně rozehřáto). Poté se odváží do 4 plechovek stejné množství zkoušeného pojiva (minimálně však 100 g). Následně se do plechovek s odváženým množstvím pojiva přimíchává předem stanovené množství oživovací přísady, které se běžně udává v procentech hmotnosti

<sup>1</sup> Označení CE dokládá, že byl výrobek posouzen před uvedením na trh Evropského hospodářského prostoru a splňuje legislativní požadavky Evropské unie. Výrobce deklaruje, že daný výrobek splňuje příslušné základní požadavky, které jsou uvedeny v prohlášení o vlastnostech. Stanovení sledovaných a deklarovaných vlastností se provádí na základě příslušných evropských harmonizovaných norem.

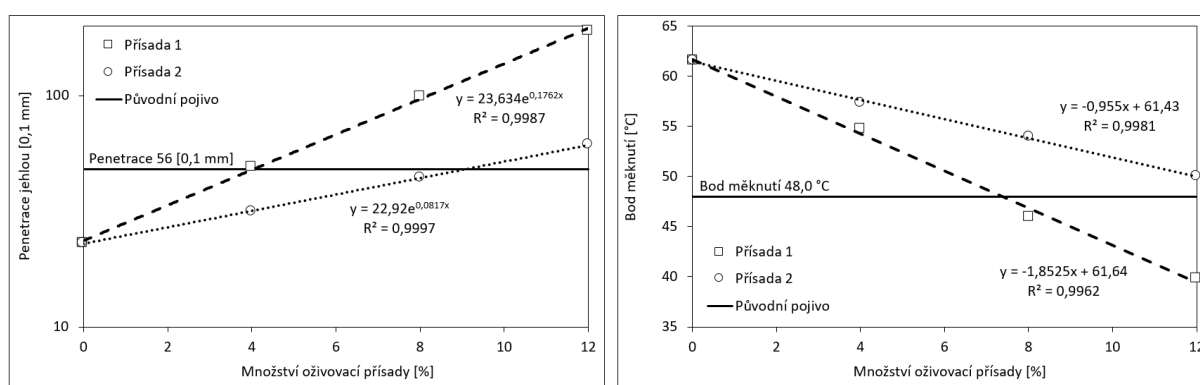
<sup>2</sup> Překročení těchto limitních parametrů neznamená nemožnost použití daného R-materiálu. Jedná se pouze o limitní parametry z hlediska deklarace vlastností asfaltového pojiva v R-materiálu.

zestárlého pojiva. Množství přísady může být voleno s ohledem na její předpokládanou účinnost a stupeň zestárnutí oživovaného pojiva, vždy je však nutné volit dostatečný krok rozmezí dávkování, např: 0 %, 3 %, 6 % a 9 % nebo 0 %, 4 %, 8 % a 12 %. Při zjišťování účinnosti je možné volit i dvě dávky oživovací přísady, např: 0 %, 4 % a 12 %. Použití dvou dávek oživovací přísady může vést k mírně odlišným výsledkům oproti použití tří dávek vzhledem ke změně rovnice regresní funkce používané pro výpočet dávkování. Rozdíl v dávkování je přitom závislý na použitém hodnotícím parametru (většinou je rozdíl v dávkování menší než 1 % z hmotnosti zestárlého pojiva). Po nadávkování přísady do zestárlého pojiva se provede ruční nebo mechanické míchání vhodným míchadlem po dobu nejméně 60 sekund. Poté se uzavřená plechovka s pojivem a oživovací přísadou vloží zpět do laboratorní sušárny po dobu  $(10 \pm 1)$  min. Následně se pojivo s přísadou opětovně míchá po dobu nejméně 60 sekund<sup>3</sup>. Po úplném zhomogenizování a zamíchání oživovací přísady do pojiva se provede příprava analytických vzorků podle specifikace uvedené v daném zkušební postupu (EN 1426 a EN 1427). Následně se provedou zkoušky připravených poživ.

### 3.5. Vyjádření výsledků

#### 3.5.1. Účinnost oživovacích přísad

Pro účely relativního srovnání účinnosti oživovacích přísad je možné použít parametry z regresních funkcí vypočítaných ze závislosti změn sledovaného parametru, viz příklad na obrázku 1 vlevo (penetrace) a vpravo (bod měknutí). Na obrázku 1 je patrné, že přidavek oživovací přísady způsobuje zvýšení penetrace jehlou, které lze se vzrůstajícím množstvím charakterizovat pomocí exponenciální funkce. Pokud se hodnoty penetrace zlogaritmují, je možné získat lineární závislost mezi hodnotami penetrace jehlou a procentuálním množstvím oživovací přísady. V případě bodu měknutí je závislost mezi dávkovaným množstvím a vlastním bodem měknutí lineární.



**Obrázek 1** Vývoj penetrace (vlevo) a bodu měknutí (vpravo) v závislosti na dávkovaném množství přísady, dvě různé oživovací přísady (příklad)

<sup>3</sup> Tento způsob hodnocení je platný, pokud výrobce nestanoví výslovně jiné okrajové podmínky. Např. může být nutné oživovací přísadu před aplikací ohřát z důvodu její vysoké viskozity během běžné laboratorní teploty (typicky se jedná o přísady s vosky), výrobce může požadovat použití vysokostřížné míchačky aj.

Z regresních rovnic průběhu závislosti daného parametru na dávkování se následně získají parametry rovnice ( $a_p$  a  $b_p$ ) (1), pomocí nichž je možné popsat účinnost jednotlivých přísad z hlediska penetrace. Čím je parametr  $a_p$  vyšší, tím se jedná o účinnější oživovací přísadu a je tedy možné dávkovat její nižší množství. Na obrázku 1 vpravo je zobrazen vývoj bodu měknutí v závislosti na dávkování oživovací přísady. Pokles bodu měknutí lze charakterizovat pomocí lineární funkce<sup>4</sup>. Pomocí parametrů přímky ( $a_k$  a  $b_k$ ) lze stanovit účinnost jednotlivých oživovacích přísad z hlediska bodu měknutí. Parametry přímky jsou v obecném tvaru uvedeny v rovnici (2). Čím je parametr  $a_k$  nižší, tím je účinnost přísady vyšší.

$$y = a_p * x + b_p \quad (1)$$

Kde  $a_p$  - směrnice lineární funkce [-]  
 $b_b$  - konstanta lineární funkce [-]  
 $X$  - proměnná

$$y = a_k * x + b_k \quad (2)$$

Kde  $a_k$  - směrnice lineární funkce [-]  
 $b_b$  - konstanty lineární funkce [-]  
 $X$  - proměnná

Pro posouzení rozsahu účinnosti oživovacích přísad bylo v rámci tvorby metodiky ověřeno chování celkem 11 přísad, které se lišily svým původem, chemickým složením i fyzikálními parametry. U těchto přísad bylo zjištěno, že účinnost vyjádřená parametrem  $a_p$  se nacházela v rozmezí 0,18 až 0,08. V případě bodu měknutí byla stanovená účinnost přísad posouzené parametrem  $a_k$  v rozsahu -0,96 až -1,85. Je nutné poznamenat, že hodnoty účinnosti přísad se mohou lišit i v závislosti na zkoumaném zestárlém pojivu, s kterým jsou míchány, tzn., že rozsah zde uvedených účinností nemusí být definitivní. Nicméně poskytnuté rozmezí může sloužit pro relativní posouzení účinnosti konkrétní přísady. Charakteristiky použitých přísad je možné najít v seznamu publikací, které předcházely metodice (kap. 7) nebo v závěrečných zprávách projektu TJ01000248 „Použití oživovacích přísad pro prodloužení životnosti recyklovaných vozovek s vysokým obsahem R-materiálu“.

### 3.5.2. Výpočet dávkování oživovací přísady

Po získání parametrů účinnosti z rovnic (1) a (2) zkoumaných přísad lze následně provést výpočet dávkování dle rovnice (3) pro penetraci (DOP) a dávkování dle rovnice (4) pro bod měknutí (DOK). **Za optimální dávkování se v tomto smyslu považuje takové množství přísady (vyjádřené intervalem), které odpovídá průniku rozmezí dávkování DOP a DOK.**

<sup>4</sup> U některých oživovacích přísad může docházet s jejich zvyšujícím se množstvím k nárůstu bod měknutí místo očekávaného snížení. Postupy stanovené v metodice se na tyto druhy přísad nevztahují. Tyto přísady v sobě mohou obsahovat určité množství vosku nebo drcené pryže.



V tomto intervalu je splněna klasifikace asfaltového pojiva dle EN 12591, jak z pohledu penetrace, tak z pohledu bodu měknutí.

$$\text{Množství oživovací přísady (DOP)} = \frac{\text{penetrace}_{\text{požadovaná}} - b_p}{a_p} \quad (3)$$

Kde  $b_p, a_p$  – parametry lineární funkce [-]

$$\text{Množství oživovací přísady (DOK)} = \frac{\text{bod měknutí}_{\text{požadovaný}} - b_k}{a_k} \quad (4)$$

Kde  $b_k, a_k$  – parametry lineární funkce [-]

V tabulce 1 je uveden příklad výpočtu dávkování pro obnovení parametru penetrace zestárlého pojiva. V tabulce 2 je následně uveden výpočet dávkování pro obnovení bodu měknutí zestárlého pojiva. Pro posouzení schopnosti oživení bylo v tomto případě pro míchání použito laboratorně zestárlé pojivo s počátečními parametry uvedenými v tabulce 3.

Tabulka 1 Výpočet dávkování přísady pro obnovení penetrace

Přísada	Množství oživovací přísady [%]				Parametry přímky		R <sup>2</sup>	DOP [%]
	0	4	8	12	a <sub>p</sub>	b <sub>p</sub>		
	log pen. [-], (pen [0,1mm])							
1	3,14 (23)	3,89 (49)	4,61 (100)	5,25 (190)	0,18	3,16	1,00	4,9
2	3,14 (23)	3,45 (32)	3,79 (44)	4,11 (61)	0,08	3,13	1,00	10,9

Tabulka 2 Výpočet dávkování přísady pro obnovení bodu měknutí

Přísada	Množství oživovací přísady [%]				Parametry přímky		R <sup>2</sup>	DOK [%]
	0	4	8	12	a <sub>k</sub>	b <sub>k</sub>		
	Bod měknutí [°C]							
1	61,6	54,7	46,0	39,8	-1,85	61,64	1,00	7,4
2	61,6	57,3	53,9	50,0	-0,96	61,43	1,00	14,1

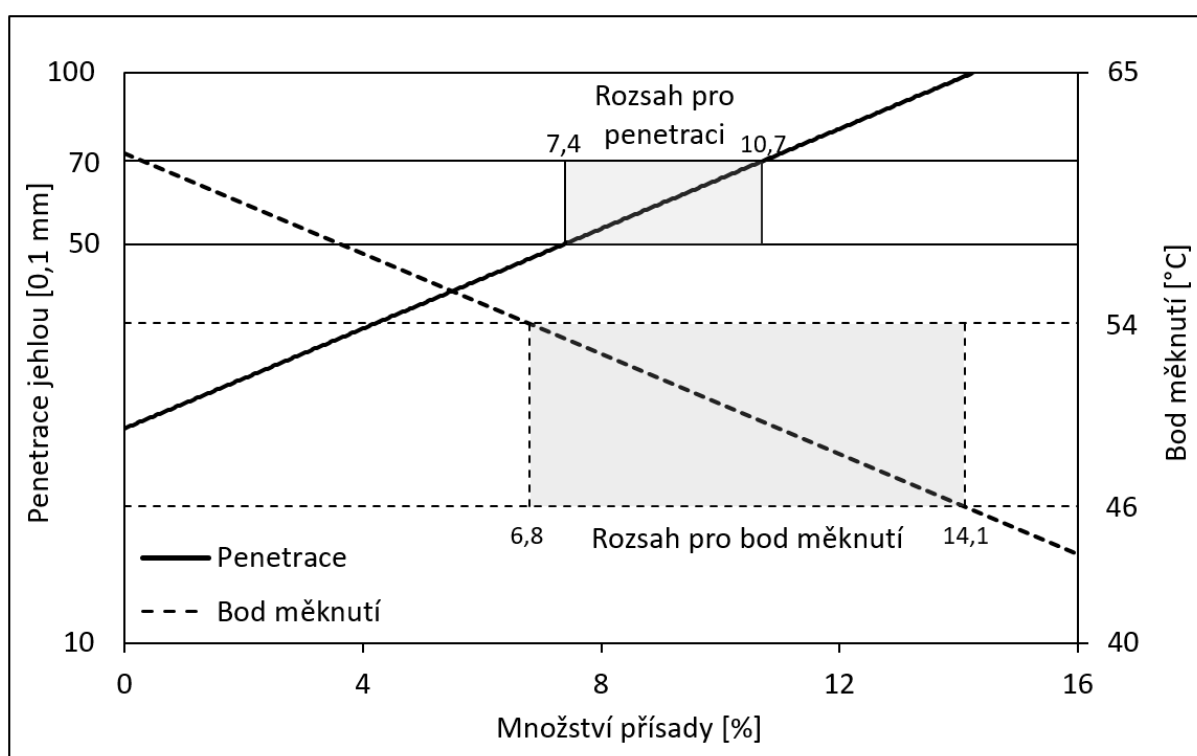
Tabulka 3 Vlastnosti silničního asfaltu použitého ve studii účinnosti přísad

Pojivo	Penetrace [0,1 mm]	Bod měknutí [°C]	Penetrační index [-]
50/70 (původní)	56	48,0	-1,46
50/70 (dlouhodobě zestárlé)	23	61,6	-0,34

Při porovnání výsledků v tabulce 1 a 2 je vidět, že vypočítané dávkování v případě penetrace je odlišné od dávkování vypočítaného dle bodu měknutí. Bylo zjištěno, že toto chování (rozdílné dávkování přísad pro navrácení původní hodnoty rozdílných parametrů asfaltového pojiva) je pro oživovací přísady typické, což bylo potvrzeno například i ve studiích [6, 7, 8]. Graficky je ovlivnění vlastností penetrace a bodu měknutí po přidání náhodně vybrané oživovací přísady do zestárlého pojiva zobrazeno na obrázku 2. Vlastnosti původního a zestárlého pojiva jsou uvedeny v tabulce 3. V tomto případě bylo dávkování pro splnění požadavku na parametr penetrace v rozmezí 7,4 % až 10,7 % z hmotnosti zestárlého pojiva, zatímco v případě bodu měknutí bylo spočítané dávkování na úrovni 6,8 % až 14,1 %.

Z výše zmíněného vyplývá, že v případě požadavku oživení na původní hodnotu bodu měknutí, může být překročena hodnota penetrace dané kategoriální třídy asfaltového pojiva. Pojivo by tak svými vlastnostmi neodpovídalo zařazení do kategorie dle evropské harmonizované normy pro silniční asfalty EN 12591. Z tohoto důvodu je vhodné hledat průnik v dávkování přísady dle penetrace a bodu měknutí tak, aby oživené pojivo splnilo požadavky dle EN 12591, viz kapitola 3.5.4.

V rámci výzkumné studie programu ZETA bylo zjištěno, že interval dávkování různých oživovacích přísad pro navrácení původní hodnoty penetrace se pohyboval v rozmezí 4,9 % až 10,9 % z hmotnosti použitého zestárlého pojiva. Z hlediska bodu měknutí se tento interval pohyboval v rozmezí 7,4 % až 14,1 % z hmotnosti zestárlého pojiva. V tomto případě bylo pro analýzu použito pojivo, jehož vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 3.



**Obrázek 2** Závislost penetrace (logaritmické měřítko) a bodu měknutí na dávkovaném množství oživovací přísady (příklad)

Při použití oživovacích přísad byl tak zaznamenán rozdíl oproti způsobu oživení pomocí pojiva vyšší gradace (např. 160/220) a použití penetračního pravidla viz rovnice A1 v EN 13108-1, viz rovnice (5).

$$a \cdot \lg pen_1 + b \cdot \lg pen_2 = (a + b) \cdot \lg pen_{mix} \quad (5)$$

Kde  $pen_1$  – penetrace pojiva 1 [0,1 mm]  
 $pen_2$  – penetrace pojiva 2 [0,1 mm]  
 $pen_{mix}$  – výsledná penetrace směsi [0,1 mm]

I při použití měkkého pojiva však není možné vrátit vždy zkoumané parametry po oživení na původní hodnoty, rozdíly oproti oživovacím přísadám jsou však z pravidla menší, jak bylo dokázáno v [4#]. Jak již bylo upozorněno v úvodu a dále pak například v [9], použití měkkého pojiva má své limity ve smyslu dosažení požadovaného stupně oživení. Maximální dávkování R-materiálu v případě použití pojiva kategorie 160/220 odpovídá zhruba 40 % hmotnosti z asfaltové směsi v závislostech na vlastnostech R-materiálu (v případě výsledné požadované kategorie pojiva ve směsi 50/70). Při vyšších dávkováních R-materiálu by bylo nutné použít nadměrné množství měkkého pojiva a celkové množství pojiva ve směsi by tak bylo příliš vysoké.

### 3.5.3. Vlastnosti pojiv v R-materiálech

V některých případech může být pojivo v R-materiálu zřetelně tužší než pojivo použité v rámci výzkumné studie, což může být způsobeno vlivem druhu původního pojiva nebo velmi výrazným zestárnutím pojiva ve vozovce. Při kontrole vlastností zestárklých pojiv obsažených v R-materiálech na území České republiky bylo zjištěno, že hodnota penetrace znovuzískaných pojiv se pohybovala v rozmezí 12 (0,1 mm) až 25 (0,1 mm) s průměrnou hodnotou 16 (0,1 mm)  $\pm$  5 (0,1 mm). Na druhé straně bod měknutí se u těchto pojiv pohyboval v rozmezí 57,8 °C až 79,6 °C s průměrnou hodnotou 67,1  $\pm$  5,8 °C. Hodnoty penetračního indexu se pohybovaly v rozmezí -0,90 až 1,37 s průměrnou hodnotou -0,17  $\pm$  0,62, viz tabulka 4.

Tabulka 4 Vlastnosti zpětně získaných pojiv z R-materiálů na území ČR

Pojivo	Penetrace [0,1 mm]	Bod měknutí [°C]	Penetrační index [-]
R1	12	71,1	0,07
R2	25	57,8	-0,90
R3	15	67,3	-0,14
R4	12	66,4	-0,64
R5	14	65,4	-0,55
R6	14	68,4	-0,08
R7 (PMB)	13	79,6	1,37
R8	21	63,8	-0,13
R9	12	68,8	-0,27
R10	21	62,0	-0,44

Z výše zmíněných informací a dat lze usuzovat, že v praxi používané dávkované množství může být i vyšší než uvedená rozmezí dávkování v této metodice. Rovněž lze konstatovat, že pojivo z R-materiálu R7 má v porovnání s ostatními pojivy zřetelně vyšší penetrační index. Toto pojivo bylo polymerem modifikované, což bylo dokázáno pomocí měření na DSR dle EN 14770.

U pojiv R1 až R10 byly rovněž zjišťovány parametry  $a_p$  a  $a_k$ . Bylo zjištěno, že účinnost oživovacích přísad se liší v závislosti na pojivu, s kterým jsou tyto přísady míchány. Lze očekávat, že míra variability parametrů  $a_p$  a  $a_k$  vyjádřená pomocí variačního koeficientu se bude u různých oživovacích přísad pohybovat v rozmezí do 10 %.

### 3.5.4. *Ověření návrhu zvoleného dávkování*

Protože v některých případech může dojít k předávkování nebo poddávkování oživovací přísady (viz obr. 2) je vhodné k ověření správného dávkování hodnotit parametr **CK** oživovací přísady podle rovnice (6). Ten se stanoví na základě pomocných výpočtů pomocí rovnic (7) a (8). Parametr **c** v rovnici (6) představuje poměr rozdílů empirických parametrů penetrace a bodu měknutí. Parametr **d** vyjadřuje funkční hodnotu. Číselné hodnoty ve vzorci (6) jsou empiricky odvozené konstanty, které byly získány během řešení výzkumného projektu TJ01000248. Výpočet platí jen pro podmínky, pro které byl odvozen a pro posouzení pojiva kategorie 50/70 dle EN 12591.

$$CK = \frac{(1,9773-d)}{(c-0,0421)} \quad [-] \quad (6)$$

$$c = \frac{\ln(\text{pen}_{R-\text{materiál}}) - \ln(\text{pen}_{\text{nastavené dávkování}})}{KK_{R-\text{materiál}} - KK_{\text{nastavené dávkování}}} \quad [-] \quad (7)$$

$$d = \ln(\text{pen}_{R-\text{materiál}}) - c \cdot KK_{R-\text{materiál}} \quad [-] \quad (8)$$

Pokud se vypočítaný parametr CK pohybuje v rozmezí 46 až 54, bude docíleno výroby oživeného pojiva splňující podmínky gradační třídy 50/70 v souvislosti s požadavky uvedenými v EN 12591. V jiném případě není možné znovuoživené pojivo zařadit do této gradace. Parametr **CK** neslouží ke stanovení skutečného přidávaného množství oživovací přísady, ale slouží pouze k ověření výpočtu dávkování dle rovnice (3) a (4). Nedosažení požadovaného rozmezí parametru **CK** může být způsobeno například tím, že zestárlé pojivo obsahuje polymerem modifikovaný asfalt, multigrádový asfalt nebo že oživovací přísada není schopna obnovit vlastnosti zestárlého pojiva do zvolené kategorie pojiva.

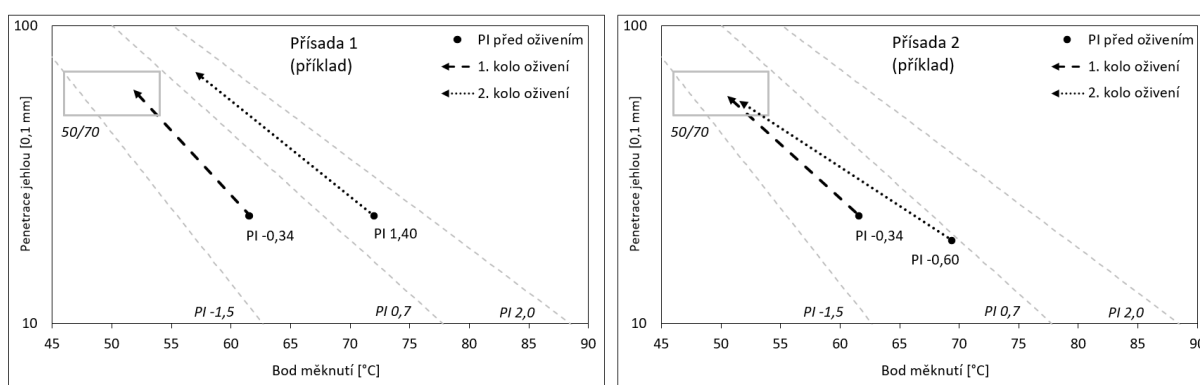
### 3.5.5. *Případy, kdy nemusí být možné dosáhnout požadovaného stupně oživení*

Jednotlivé oživovací přísady mají rozdílný vliv na visko-elastické vlastnosti zestárlých pojiv, což je graficky zobrazeno na obrázku 1 a číselně vyjádřeno v tabulkách 1 a 2. Dále, jak je popsáno například v [2#] a zobrazeno na obrázku 3, schopnost oživení zestárlého pojiva na požadované kategoriální hodnoty stanovené v EN 12591 není závislá pouze na dávkovaném množství oživovací přísady, respektive její efektivitě. Schopnost oživení je rovněž závislá na počátečním penetračním indexu (PI) zestárlého pojiva. Pokud bude penetrační index vyšší, než jsou běžně dosahované hodnoty pro silniční asfalty (EN 12591 stanovuje doporučené rozmezí pro PI -1,5 až 0,7), je možné, že nebude konkrétní oživovací přísada schopna oživit zestárlé pojivo. Vysoký penetrační index může být detekován zejména v následujících případech [4, 5, 2#]:

- Oživované pojivo bylo již v minulosti oživeno.
- Oživované pojivo není silniční asfalt ale nějakým způsobem modifikované pojivo (elastomerní a plastomerní přísady, pryžový granulát, vosky aj.)

- Oživované pojivo není silniční asfalt, ale tvrdý silniční asfalt, jak je specifikován v EN 13924-1.

Na obrázku 3 jsou porovnány dvě oživovací přísady právě z hlediska schopnosti oživení zestárlého pojiva. Zestárlé pojivo, do kterého jsou tyto přísady dávkovány, je popsáno v tabulce 3, počáteční PI před prvním kolem oživením byl -0,34 u obou přísad. Po oživení byla obě pojiva klasifikována jako 50/70. Následně byla tato pojiva stárnutá metodami RTFOT dle EN 12607 a PAV dle EN 14769 (expozice PAV byla prodloužena na 40 h). Následně došlo u pojiv k opětovnému oživení. Bylo zjištěno, že pojivo s přísadou 1 mělo po dlouhodobém stárnutí po 1. kole oživení nejenom vysoký penetrační index (1,40), ale tato přísada nebyla schopna oživit zestárlé pojivo v 2. kole oživení do kategorie 50/70 nezávisle na dávkovaném množství. Příklad 2 byla schopna oživení do požadované penetrační třídy i vzhledem k tomu, že během stárnutí nenarůstal její penetrační index tolik jako v případě přísady 1.



**Obrázek 3** Schopnost oživení v závislosti na použité oživovací přísadě a počátečním stavu zestárnutí

Ve výše zmíněných případech zobrazených na obrázku 3 byla simulována tzv. 100 % recyklace, tzn., že došlo pouze k míchání zestárlého pojiva a oživovací přísady. Tuto variantu lze považovat za extrémní, protože v praxi vyžaduje velmi speciální vybavení obaloven. V praxi bude spíše docházet k výrobě směsí s nižším obsahem R-materiálu. Pokud v daném případě nelze dosáhnout požadovaného stupně oživení, lze vždy snížit dávkované množství R-materiálu, tak aby pojivo po oživení odpovídalo specifikaci dle EN 12591.

### 3.6. Shrnutí postupu návrhu dávkování

- Stanovení účinnosti oživovacích přísad (kap. 3.5.1).
- Výpočet dávkování oživovacích přísad pro každý ze sledovaných parametrů (kap. 3.5.2).
- Ověření zvoleného dávkování ve smyslu splnění požadavků EN 12591 z pohledu penetrace a bodu měknutí (kap. 3.5.4)

## 4. Srovnání „novosti postupů“

V České republice se v silničním stavitelství doposud žádná metoda k určení a návrhu optimálního dávkování oživovací přísady nepoužívá. V zahraniční literatuře jsou popsány metody návrhu optimálního dávkování dle výpočtu podle jednoho parametru, popřípadě je

hodnocení prováděno dle Superpave Performance Grading (PG system) používané v USA [6], nikoli však v Evropě. Při návrzích zpravidla není používán ověřovací výpočet pro nastavené dávkování a vždy se předpokládá možnost oživení. Zároveň byly oproti zahraniční situaci definovány okrajové podmínky, pro které existuje riziko, že se pojivo nepodaří oživit do požadovaných tříd penetrace stanovených v EN 12591.

#### 4.1. Základní popis inovace

Při vypracování metodiky se vycházelo z předpokladu, že nejběžněji používané zkoušky v českých laboratořích k ověření parametrů silničních asfaltů definovaných dle EN 12591 jsou zkouška penetrace jehlou (EN 1426) a zkouška bodu měknutí (EN 1427). Tyto zkoušky jsou rovněž požadovány při zkouškách pojiv získaných z R-materiálů dle EN 13108-8. Z toho důvodu byly právě tyto zkoušky použity pro návrh metodiky.

V dnešní době je většina výrobců asfaltových směsí odkázána při používání oživovacích přísad pouze na informace od distributorů, popřípadě výrobců těchto přísad. Nezřídka se tvrdí, že nabízený výrobek disponuje takovým složením, že umožňuje: oživení zestárlého pojiva, modifikaci zestárlého pojiva v R-materiálu nebo snížení pracovních teplot výroby a pokládky asfaltových směsí. Dále, pro zjednodušení situace se často stává, že distributoři přísad doporučují dávkovat pouze jedno stanovené množství bez vazby k materiálovým charakteristikám použitého zestárlého pojiva, množství R-materiálu ve směsi nebo doporučují příliš zjednodušující výpočet dávkování reflektující pouze jeden materiálový parametr bez dalšího ověření vlivu na parametry další.

Metoda zde představená přináší výrobcům asfaltových směsí nástroj, jak si pomocí vlastních laboratorních zkoušek ověřit s použitím zde stanovených postupů informace od distributorů přísad týkající se jejich efektivity a účinku. Následně je možné provést optimalizaci dávkování, a to i v kombinaci s výsledky in-situ, kdy je z vyrobené asfaltové směsi s R-materiálem a oživovací přísadou vyextrahované pojivo. Další možností optimalizace návrhu asfaltových směsí s vysokým obsahem R-materiálu a oživovací přísady spočívá v použití funkčních zkoušek asfaltových směsí stanovených v normách řady EN 12697.

Postup stanovení optimálního dávkování oživovací přísady přináší několik výhod oproti současnému stavu:

- Jasně stanovuje postup určení účinnosti přísad pomocí běžně dostupných pracovních postupů.
- Uvádí rozsah účinnosti oživovacích přísad vyskytujících se jak na evropském, tak i americkém trhu, pomocí parametrů  $a_p$  a  $a_k$ , který se pohybuje v rozmezí 0,18 až 0,08 respektive -0,96 až -1,85.
- Představuje postupy vhodné pro použití a hodnocení jakékoli nové oživovací přísady, která se objeví na trhu.
- Upozorňuje na případy, kdy nemusí být možné vůbec dosáhnout požadovaného stupně oživení s uvedením konkrétního případu (viz. článek 2.5.5). Tato varianta se doposud v odborné praxi v ČR nezmiňovala.

- Další přínos spočívá v definování rozsahu dávkování přísad tak, aby po oživení byly splněny požadavky požadované penetrační třídy s ohledem na penetraci a bod měknutí. Při výpočtu parametru CK dle rovnice (6) může být ověřeno, zda je navržené dávkování spočítané podle rovnic (3) a (4) dostatečné nebo naopak přebytečné.

## 5. Popis uplatnění metodiky

Metodika návrhu optimálního dávkování oživovacích přísad slouží k zjištění účinnosti oživovacích přísad s následným výpočtem a optimalizací jejich dávkování. Nesprávné dávkování může vést ke snížené kvalitě vyrobené asfaltové směsi. Při nedostatečném dávkování hrozí dřívější vznik únavových a nízkoteplotních trhlin, zatímco při předávkování hrozí dřívější vznik trvalých (plastických) deformací.

Z hlediska navržených postupů může metodika sloužit i k posouzení ekonomické výhodnosti dané oživovací přísady. Při kombinaci parametrů ceny a vlastní účinnosti lze vyhodnotit i ekonomickou stránku použití přísady. Použití více efektivní přísady z pohledu mechanicko-fyzikálních zkoušek nemusí být totiž vždy ekonomicky výhodnější. Při volbě použití konkrétní přísady je však nutné brát i ohled na technologické možnosti vybavení obalovny. Zpravidla je systém dávkování navržen na minimální a maximální průtok. Zvolené dávkování tomu musí vyhovovat.

Dále bylo upozorněno na případy, kdy není možné zestárlé pojivo oživit. Došlo tak k jasné identifikaci potenciálně nevhodných R-materiálů pro výrobu směsí s vysokým nebo velmi vysokým obsahem R-materiálu. V některých případech je však možnost v recyklačních dvorech provést smíchání a homogenizaci například „měkčího“ a tvrdšího“ R-materiálu za účelem změny parametrů nevhodného R-materiálu na vhodný.

Představená metodika může sloužit jako pomůcka pro všechny výrobce asfaltových směsí, kteří používají při výrobě asfaltové směsi vyšší dávkování R-materiálu spolu v kombinaci s oživovacími přísadami.

Metodický postup zde popsáný je obecně uplatnitelný i v případech, kdy asfaltová směs obsahuje méně než 100 % R materiálu. Metodika je pojata jako postup umožňující návrh dávkování přísad tak, aby zestárlé pojivo po oživení splňovalo požadavky na pojivo kategorie 50/70. Metodika je uplatnitelná i pro návrh dávkování přísad, kdy je výsledná požadovaná gradace jiná než 50/70, v tomto případě však nelze aplikovat ověřující výpočet parametru CK, který je popsán v kapitole 3.5.4 (konstanty v rovnici (6) jsou platné pouze pro pojivo kategorie 50/70).

Postup popsáný v metodice je platný pouze v případě použití silničních pojiv. Metodika se nevztahuje na použití kombinace jakkoli modifikovaných pojiv (např. polymery, nízkoteplotními přísadami, pryžovým granulátem aj.), která jsou dávkována jako čerstvá pojiva nebo obsažena v R-materiálu.



## 6. Ekonomické aspekty

Metoda popisující návrh optimálního dávkování oživovacích přísad může sloužit k identifikaci vhodné oživovací přísady pro použití do asfaltové směsi s vysokým obsahem R-materiálu, ale i k identifikaci potenciálně nevhodného R-materiálu, nebo přísady pro oživení.

Tato problematika byla v České republice dosud do jisté míry opomíjena z důvodu menšího rozšíření technologie výroby směsí na obalovně s paralelním bubnem. Vzhledem k tomu, že asfaltová směs je až 100 % recyklovatelný produkt, lze očekávat, že tento stav se bude do budoucna měnit, a to i s ohledem na vytyčené cíle Rady Evropské unie pro odpadové hospodářství a recyklaci. Jenom v České republice se v rozmezí let 2006 až 2016 zvýšilo používání R-materiálu znovu během výroby asfaltových směsí za horka téměř dvojnásobně, přičemž v současnosti je celkově využíváno při této produkci až 17 % dostupného R-materiálu. V tomto časovém období se však zvýšilo i množství dostupného R-materiálu, a to trojnásobně z 0,6 milionů tun v roce 2006 na 1,8 milionů tun v roce 2016 [9].

Při takto zvyšujících se objemech výroby směsí s R-materiálem je však kritické právě stanovení správného postupu výroby směsí zahrnující kromě stanovení okrajových podmínek výroby (doby míchání, teploty jednotlivých složek aj.) rovněž použití a dávkování oživovacích přísad. Z tohoto pohledu může sloužit tato metodika jako nástroj vedoucí k významným úsporám při výrobě asfaltových směsí, ale i k ušetření finančních prostředků nutných k opravě nekvalitně vyrobené asfaltové směsi, kdy dojde k poddávkování nebo naopak předávkování oživovací přísady.

## 7. Seznam použité související literatury

- [1] Read, J., Whiteoak, D. (2003) *Shell Bitumen Handbook*. 5<sup>th</sup> Edition, Thomas Telford Publishing, Londýn
- [2] Zaumanis, M., Mallick, R. B. (2014) *Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant-produced pavements: State of the art*. International Journal of Pavement Engineering 16(1)
- [3] The European Parliament (2018) *Directive of the European parliament and of the council amending Directive 2008/98/EC on waste*, Brusel
- [4] Johannsen, K. (2018, únor, březen) *Rejuvenatoren – Wie geht es weiter?*, Deutsche Asphalttage, Berchtesgaden
- [5] Liu, G., Van de Ven, M., Leegwater, G. (2011) *Research Report of WP3: Properties of Aged Polymer Modified Binder*, ERA-NET ROAD
- [6] Zaumanis, M., Mallick, R. B., Frank R. (2014) *Determining optimum rejuvenator dose for asphalt recycling based on Superpave performance grade specifications*, Construction and Building Materials 69
- [7] Golalipour, A. (2013) *Investigation of the Effect of Oil Modification on Critical Characteristics of Asphalt Binders*, dizertační práce, University of Wisconsin-Madison, Wisconsin
- [8] Ali, H. (2015) *Long-term Aging of Recycled Binders*, report BDV29 Two 977-01, The Florida Department of Transportation, Florida, USA



- [9] European Asphalt Pavement Association [EAPA] (2018) *Asphalt in Figures 2017*, Brusel

## 8. Seznam publikací, které předcházely metodice

- [1#] Koudelka, T., Porot, L., Coufalik, P., Varaus, M. (2018) The use of rejuvenators as an effective way to restore aged binder properties, Transport Research Arena 2018, article 10783, Vídeň
- [2#] Koudelka, T., Coufalik, P., Varaus, M., Coufalikova, I. (2018, září) Rejuvenated binders, Reclaimed binders and Paving bitumens, are they any different?, Rilem CMB-252, Braunschweig
- [3#] Coufalik, P., Koudelka, T., Coufalikova, I., Varaus, M., Hrbek, K., Loderova, Z., Pazyna, R., Holá, B. (2018) Z laboratoře do reality – ověření návrhu dávkování oživovacích přísad při výstavbě pozemních komunikací, Silniční obzor 12/2018, Praha
- [4#] Koudelka, T., Coufalik, P., Fiedler J., Varaus, M., Coufalikova, I., Yin, F. (2018, červen) Rheological evaluation of asphalt blends at multiple rejuvenation and aging cycles, 8th EATA, Granada

## 9. Dedikace na projekt

Metodika byla zpracována v rámci řešení projektu Technologické agentury ČR s označením TJ01000248 a názvem „Použití oživovacích přísad pro prodloužení životnosti recyklovaných vozovek s vysokým obsahem R-materiálu“.

## 10. Seznam tabulek

Tabulka 1 Výpočet dávkování přísady pro obnovení penetrace .....	9
Tabulka 2 Výpočet dávkování přísady pro obnovení bodu měknutí.....	9
Tabulka 3 Vlastnosti silničního asfaltu použitého ve studii účinnosti přísad .....	9
Tabulka 4 Vlastnosti zpětnězískaných pojiv z R-materiálů na území ČR.....	11

## 11. Seznam obrázků

Obrázek 1 Vývoj penetrace (vlevo) a bodu měknutí (vpravo) v závislosti na dávkovaném množství přísady, dvě různé oživovací přísady (příklad) .....	7
Obrázek 2 Závislost penetrace (logaritmické měřítko) a bodu měknutí na dávkovaném množství oživovací přísady (příklad) .....	10
Obrázek 3 Schopnost oživení v závislosti na použité oživovací přísadě a počátečním stavu zestárnutí.....	13

## 12. Oponenti

**Ing. Jiří Fiedler**

Dopravní inženýr, zástupce ČR ve sdružení EAPA (European Asphalt Pavement Association).

**Ing. Jiří Škrabka**

Vedoucí samostatného oddělení zkušebnictví Praha, Ředitelství silnic a dálnic ČR.