



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

**POUŽITÍ R-MATERIÁLU DO ASFALTOVÝCH SMĚSÍ
TYPU ASFALTOVÝ KOBEREK MASTIXOVÝ**

USAGE OF RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT IN STONE MASTIC ASPHALT

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

ANOTATION OF Ph.D. THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Iva Coufalíková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Hýzl, Ph.D.

BRNO 2019

ABSTRACT

The dissertation deals with the possibilities of adding recycled asphalt pavement (RAP) to the stone mastic asphalt (SMA), which is increasingly being promoted due to its good resistance to permanent deformations and high traffic load. Thanks to the use of high-quality input materials in production, this is a valuable material source. The theoretical part describes composition of SMA mixture and problems of pavement recycling. The practical part deals with SMA 11S laboratory designs with RAP ratio of 0 to 50%. Based on these suggestions, a trial section with 17 variants was placed, which varied with the content and quality of the RAP and the used additives. All variants have been subjected to functional testing not only on mixtures but also on recovered binders. The results obtained during the dissertation were used to build a certified methodology named "Methodology of application RAP to Stone Mastic Asphalt." In conclusion, the results of the dissertation are summarized.

KEYWORDS

Stone mastic asphalt, SMA, reclaimed asphalt pavement, RAP, rejuvenator, cellulose fiber, polymer modified bitumen, trial section.

ABSTRAKT

Disertační práce se zabývá možnostmi přidání R-materiálu do asfaltové směsi typu asfaltový koberec mastixový (SMA), která se stále více prosazuje díky své dobré odolnosti vůči trvalým deformacím a velkému dopravnímu zatížením. Díky použití kvalitních vstupních materiálů při výrobě se jedná o cenný materiálový zdroj. V teoretické části je popsáno složení směsi SMA a problematika recyklace vozovek. Praktická část se zabývá laboratorními návrhy směsi typu SMA 11S s podílem R-materiálu 0 až 50 %. Na základě těchto návrhů byl realizován zkušební úsek s 17 variantami, které se liší obsahem a kvalitou R-materiálu a použitými přísadami. Všechny varianty byly podrobeny funkčnímu zkoušení nejen na směsích, ale také na znovuzískaných pojivech. Výsledky získané v rámci disertační práce byly použity pro sestavení certifikované metodiky s názvem: „Metodika aplikace R-materiálu do asfaltových směsí typu SMA (Stone Mastix Asphalt)“. V závěru jsou shrnuty výsledky disertační práce.

KLÍČOVÁ SLOVA

Asfaltový koberec mastixový, SMA, R-materiál, oživovací přísada, celulózové vlákno, polymerem modifikované pojivo, zkušební úsek.

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE

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

OBSAH

1 ÚVOD.....	5
2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE.....	6
3 ASFALTOVÝ KOBEREK MASTIXOVÝ (STONE MASTIC ASPHALT).....	7
4 RECYKLACE VOZOVEK.....	9
4.1 R-materiál.....	9
4.2 Přidávání R-materiálu do asfaltových směsí typu SMA.....	9
4.2.1 Zkušenosti v zahraničí.....	9
5 POUŽITÉ MATERIÁLY A ZKUŠEBNÍ METODY	11
6 VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ	13
6.1 Výsledky zkoušek na asfaltových směších	13
6.1.1 Síťový rozbor kameniva dle ČSN EN 933-1	13
6.1.2 Stanovení modulu tuhosti dle ČSN EN 12697-26	13
6.1.3 Stanovení nízkoteplotních vlastností asfaltových směsí dle ČSN EN 12697-46	14
6.2 Výsledné vlastnosti asfaltových pojiv.....	15
6.2.1 Stanovení penetrace jehlou podle ČSN EN 1426.....	15
6.2.2 Stanovení bodu měknutí metodou kroužek a kulička podle ČSN EN 1427	16
6.2.3 Zkouška MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery Test) dle ČSN EN 16659 ..	17
6.2.4 Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu dle ČSN EN 14770	18
6.2.5 Stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru podle ČSN EN 14771	22
6.3 Vzájemné srovnání výsledků	23
7 ZÁVĚR.....	27
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	30
ŽIVOTOPIS.....	33

1 ÚVOD

V roce 1968 byla poblíž města Kiel, které se nachází v severním Německu, realizována první vozovka s asfaltovým kobercem mastixovým (Stone Mastic Asphalt - SMA), který byl navržen z důvodu potřeby odolné vrstvy vůči pneumatikám s hřeby. [33] Ovšem díky svým vlastnostem se tato směs brzy osvědčila jako obrusná vrstva pro vysoce zatížené vozovky, a tak v roce 1984 došlo k vytvoření německé národní normy, která měla dopad na rozšíření technologie v rámci Evropy a posléze i po celém světě. [28] První Evropská norma pro asfaltový koberec mastixový byla publikována Evropským výborem pro normalizaci CEN (Comité Européen de Normalisation) v roce 2006 s označením EN 13108-5. V červnu 2008 došlo k prvnímu pozměňovacímu návrhu a poslední změna proběhla v roce 2016. Tento standard specifikuje technický rámec, který umožňuje publikaci národních aplikačních dokumentů v jednotlivých zemích. [14]

V České republice se směs typu SMA začala používat v devadesátých letech 20. století. [23, 30] Česká verze evropské normy EN 13108-5, tedy ČSN EN 13108-5 vešla v účinnost v únoru roku 2008 a obsahovala národní přílohu, kde byly specifikovány české požadavky na tuto směs. Od ledna 2018 již výrobové normy řady EN 13108 nesmějí obsahovat národní přílohy a na základě toho je v současnosti aktualizována norma ČSN 73 6121, kam budou přesunuty. Při této příležitosti dochází i k aktualizacím českých požadavků na směs typu SMA. [14]

V posledních letech je s ohledem na environmentální, materiálové a ekonomické dopady kladen důraz na recyklaci. Asfaltové směsi patří mezi materiály, které mohou být až ze 100 % recyklovány během nové výstavby pozemních komunikací. V České republice je maximální dávkování R-materiálu do nově vyráběných směsí omezeno typem asfaltové směsi, jejím účelem (obrusná, ložní, podkladní) a jejím použitím dle dopravního zatížení. [25]

Dlouhá životnost směsi typu SMA, dobré povrchové vlastnosti a vysoká odolnost vůči trvalým deformacím je dosažena použitím vysoce kvalitních vstupních materiálů. Díky tomu se již běžně používá nejen jako obrusná vrstva na vozovkách s vysokým dopravním zatížením (intavilán i extravilán), ale také na letištních a přístavních plochách. Další uplatnění postupně ještě nachází. S menšími úpravami například jako směs se sníženou hlučností s označením SMA NH, v některých zemích zkouší její využití do ložních vrstev. Tedy její uplatnění stále roste. [23]

Aktuální zkušenosti s přidáváním R-materiálu do tohoto typu směsi jsou minimální a ve většině zemí, jako i v České republice se přidávat nesmí.

V rámci disertační práce je tato problematika řešena a na základě laboratorních návrhů je položen zkušební úsek s variantami směsi typu SMA 11 S obsahující různý podíl R-materiálu a přísad.

2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Cílem disertační práce je především ověřit možnost použití R-materiálu pro obrusné vrstvy vozovek kde je navržena asfaltová směs typu asfaltový koberec mastixový (SMA). Dále prokázat vliv oživovací přísady na zestárlé asfaltové pojivo obsažené v R-materiálu. Dílčí cíle disertační práce jsou uvedeny níže:

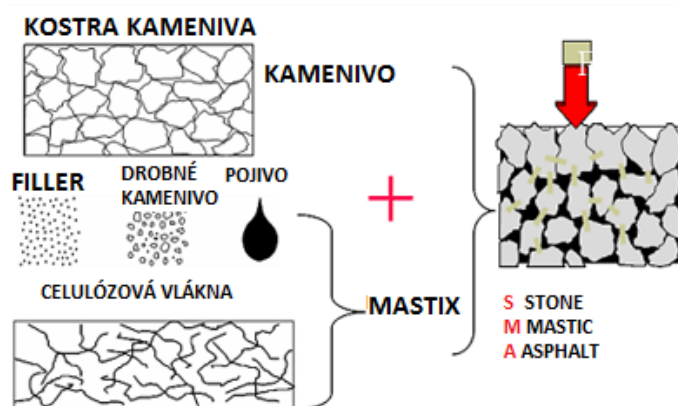
- a) Ověřit možnosti navrhování směsi typu SMA s obsahem R-materiálu.
- b) Ověřit vliv přítomnosti R-materiálu na výsledné vlastnosti asfaltové směsi a porovnat je s referenční směsí bez R-materiálu.
- c) Ověření vlastností R-materiálu:
 - Běžně dostupného v ČR – předrcený R-materiál se silničním asfaltovým pojivem.
 - R-materiál získaný postupným frézováním vozovky ze směsi typu asfaltového koberce mastixového s modifikovaným asfaltovým pojivem.
- d) Ověření vlivu oživovací přísady na výsledné vlastnosti asfaltového pojiva i směsi s R materiálem.
- e) Posouzení variant asfaltové směsi SMA 11 S s různým obsahem a kvalitou R materiálu a přísadami položenými v rámci zkušebního úseku.
- f) Vypracování metodiky pro dávkování R-materiálu do asfaltového koberce mastixového.

3 ASFALTOVÝ KOBEREK MASTIXOVÝ (STONE MASTIC ASPHALT)

Definice asfaltového koberce mastixového (SMA) dle EN 13108-5 je, že se jedná o asfaltovou směs přerušené zrnitosti složené z kostry hrubého drceného kameniva spojené asfaltovým mastixem. [14]

To znamená, že nosná kostra je tvořena nejhrubší a částečně též druhou nejhrubší frakcí kameniva. Zbývající kamenivo je výplňové a společně s asfaltovým pojivem a kamennou moučkou vytváří asfaltovou maltu nazývanou mastix, která vzájemně tmelí zrna nosné kostry.

Tím je dosaženo větších mezer ve struktuře kameniva o velikosti 1 až 2 mm (u směsi SMA 6), 2 až 4 mm (u směsi SMA 8), 3 až 6 mm (u směsi SMA 11), 3 až 8 mm (u směsi SMA 16). Celková mezerovitost směsi se pak nejčastěji pohybuje v rozmezí 3 až 6 %. Objem mezer ve ztuhlé směsi by měl být větší jak objem mastixu. [23]



Obrázek 1: Složení asfaltového koberce mastixového [29]

Důsledkem poměru zastoupení jednotlivých frakcí ve směsi typu SMA je to, že počet kontaktních bodů mezi zrny kameniva je omezen. Proto pro dosažení požadované kvality směsi je velmi důležitá volba kameniva odolného vůči drcení s dobrým tvarovým indexem a povrchovou členitostí (proto se doporučuje používat drcené, a ne těžené kamenivo - písek). Použití písku je bilancí mezi stabilitou a zpracovatelností.

Obsah asfaltového pojiva je vyšší (cca 6 až 8 %). Dle daných podmínek a zkušeností se používají buď silniční, nebo modifikovaná pojiva. Modifikovaná pojiva jsou pojiva, jejichž reologické vlastnosti jsou při výrobě upraveny jedním, nebo více chemickými činidly (např. syntetickými polymery, přírodním kaučukem, sírou, určitou organokovovou sloučeninou apod.) [4]. Jejich použití je výhodné z těchto důvodů:

- Zvýšení odolnosti směsi vůči trvalým deformacím.
- Zvýšení životnosti povrchu vozovky.
- Snížení výskytu poruch hlavně v případě velmi tenkých vrstev.
- Snížení potřeby celulózových vláken (ačkoliv i tak mohou být potřeba).

V jižní části Evropy se převážně používají modifikovaná pojiva z důvodu větší mezerovitosti a menšího obsahu asfaltového pojiva. V některých zemích, jako například Polsko, Rusko, Španělsko, je použití modifikovaných pojiv povinné v případě vysokého dopravního zatížení nebo v náročných klimatických podmínkách. V ČR je zažité používání polymerem modifikovaných pojiv do směsí typu SMA.

Díky vyššímu dávkování asfaltového pojiva je většinou zapotřebí použití celulózových vláken (stabilizačních přísad), které mají velký měrný povrch a tím na sebe naváží asfaltové pojivo tak, aby nezteklo. Mají význam zejména při skladování, převozu a pokládce směsi. Po zhutnění nemají vliv na výsledné vlastnosti směsi.

SMA je asfaltová směs, která poskytuje řadu výhod oproti jiným asfaltovým směsím. Byla úspěšně aplikována na vysoce dopravně zatížené vozovky, na vozovky s pomalou dopravou, závodní okruhy, cyklostezky, letištní plochy atd. Ve všech případech byly prokázány tyto výhody:

- Trvanlivost – vysoká odolnost vůči trvalým deformacím způsobených dopravou nebo klimatickými změnami.
- Bezpečnost – velmi dobré protismykové vlastnosti, rovnost povrchu jak podélně, tak příčně, dobrá viditelnost, menší výskyt aquaplaningu.
- Ekonomická výhodnost – nižší náklady na údržbu, přesvědčivé náklady životního cyklu vedoucí k udržitelnému využívání finančních prostředků.
- Enviromentální benefity – recyklovatelnost, za určitých podmínek snížení hluku dopravy v porovnání s alternativními materiály.

4 RECYKLACE VOZOVEK

4.1 R-MATERIÁL

ČSN EN 13108-8 definuje znovuzískanou asfaltovou směs jako materiál určený k recyklaci ve formě odfrézovaných či jiným způsobem vybouraných asfaltových vrstev pozemních komunikací, dopravních a jiných ploch nebo ve formě asfaltových směsí z neshodné, nadbytečné nebo nevyhovující výroby. R-materiálem označujeme upravený materiál ze znovuzískané asfaltové směsi, vhodný a připravený k použití jako stavební materiál pro asfaltovou směs po jeho odzkoušení, posouzení a klasifikaci. [15]

Asfaltová směs v průběhu své životnosti podléhá degradačním procesům vlivem klimatického působení prostředí a zatížení od dopravy. Asfaltové pojivo stárne a tím se mění jeho viskoelastické vlastnosti. Stává se tužším a jeho obor použitelnosti se posouvá směrem k vyšším teplotám. To znamená, že je asfaltová směs odolnější vůči trvalým deformacím, ale zároveň náchylnější k trhlinám při nižších teplotách. Vliv stárnutí se projevuje například snižující se hodnotou penetrace jehlou nebo naopak rostoucí hodnotou bodu měknutí, než vykazoval vzorek původní při návrhu směsi.

Se zvyšujícím se množstvím R-materiálu v za horka vyráběných asfaltových směsí je nezbytné počítat s riziky, kterým je nutné během výroby předcházet. Zvyšující se množství R-materiálu způsobuje zvýšení tuhosti asfaltové směsi, která se zároveň stává méně odolnou proti únavovému a termálnímu namáhání. Z tohoto důvodu je nutné asfaltové pojivo oživit, buď pojivem vyšší gradace nebo oživovací přísadou.

4.2 PŘIDÁVÁNÍ R-MATERIÁLU DO ASFALTOVÝCH SMĚSÍ TYPU SMA

Přidání R-materiálu do směsí typu SMA obecně není doporučeno z důvodu zalomené čáry zrnitosti a požadavků na vysoce kvalitní kamenivo.

Tak je tomu i v ČR, kdy současné české předpisy neumožňují přidávání R-materiálu do tohoto typu směsi. Díky probíhajícím aktualizacím těchto požadavků se diskutuje o možné změně. V okolních zemích jsou tyto možnosti také omezeny a tato problematika se řeší na evropské úrovni v rámci sdružení EAPA (European Asphalt Pavement Association), jedná se tedy o velmi aktuální téma.

4.2.1 Zkušenosti v zahraničí

Největší zkušenosti obecně s přidáváním R-materiálu do asfaltových směsí jsou v Německu. Dle německých technických dodacích podmínek ZTV Asphalt-StB 07 [34] je množství přidaného R-materiálu omezeno dle jeho kvality a homogenity. Co se týče přidávání R-materiálu do směsí SMA, tak se limity liší v jednotlivých spolkových zemích. Například ve spolkových zemích Bavorsko, Hesensko, Braniborsko nelze přidat R-materiál do směsí typu SMA. Ve městě Hamburk mají technický předpis ZTV/St Hmb.09 [35] umožňující přidání R-materiálu do směsí typu SMA v množství až 30 % za předpokladu, že použitý R materiál je z obrusné vrstvy buď

směsi typu SMA, nebo asfaltového koberce drenážního upraveného pomocí granulátoru. V okolí Hamburku jsou položeny zkušební úseky až s 75 % R-materiálu směsi SMA 8 s pojivem 25/55-55 A RC a oživovací přísadou.

V Dánsku technické normy umožňují použití 15 % R-materiálu do nových obrusných vrstev typu SMA. Kamenivo v R-materiálu však musí být pouze drcené, což v praxi znamená frézování po vrstvách a oddělené skládkování R-materiálu, protože směsi typu AC mohou obsahovat přírodní těžené kamenivo. Danish Road Directorate aktuálně nepovoluje žádné přidání R-materiálu na dálničních úsecích, kde se používají asfaltové směsi se sníženou hlučností a směsi typu SMA s velmi modifikovanými pojivy 40/100-75, nebo 90/150-75. Na základě dvouletého projektu zaměřeného na přidávání R-materiálu do směsí typu SMA zvažují umožnit použití 30 % R-materiálu do směsí typu SMA pod podmínkou drceného kameniva v R-materiálu, které splní stejné požadavky jako nové kamenivo. Zároveň uvažují nad specifikací na odolnost asfaltové směsi proti tvorbě trvalých deformací [6] a nad poměrem pevnosti v příčném tahu (ITSR) [5] více než 80 %.

V Rakousku se musí při použití R-materiálu do směsi typu AC s modifikovaným pojivem deklarovat teoretická hodnota vratné duktility splňující požadavky na zvolenou kategorii pojiva. Například běžně se používá kategorie 45/80-65, kde je minimální požadavek na vratnou duktilitu 80 %. Tedy směs nového a zestárlého pojiva z R-materiálu musí splňovat toto kritérium. Od roku 2010 se běžně používá 20 % R-materiálu i na dálnice aniž by byl frézován selektivně. Pro dosažení požadované pružnosti (vratné duktility) se používají speciální pojiva s označením RC, která jsou více modifikovaná. Používání R-materiálu do směsí typu SMA není dovoleno.

Ve Švédsku lze použít až 20 % R-materiálu do obrusných vrstev včetně asfaltového koberce mastixového dle TDOK 2013:0529 [31]. Pro drenážní koberce není použití recyklátu povoleno. Pro ložní a podkladní vrstvy lze použít 30 % až 40 % R-materiálu. Tyto pravidla neplatí pro recyklaci na místě. V tomto případě je zapotřebí ověřit vlastnosti stávající konstrukce vozovky a navrhnout potřebné přidání surovin tak, aby se došlo k požadovaným výsledným vlastnostem asfaltové směsi.

Ve Finsku nelze přidat R-materiál do směsí typu SMA dle normy PANK ry2011 [27]. Obdobně v Norsku dle Handbok 018 také není umožněno přidání R-materiálu do asfaltového koberce mastixového. [26]

V Portugalsku technické předpisy umožňují použití maximálně 10 % R-materiálu v obrusných vrstvách vozovek. Toto množství je však pouze teoretické, protože používání směsí typu SMA je v Portugalsku minimální a má krátkou tradici. Z tohoto důvodu nebylo použití R-materiálu u směsí typu SMA dosud řešeno. [26]

Ve Velké Británii a Irsku revidují předpisy zabývající se přidáváním R-materiálu do obrusných vrstev, tedy momentálně nelze říci, zda bude umožněno či nikoliv. Díky klimatickým podmínkám je v těchto zemích nejpoužívanější směsí za horka válcovaný asfalt (HRA = hot roll asphalt), z tohoto důvodu není ani dostatečné množství R-materiálu vhodného pro recyklaci do směsí typu SMA, ale probíhají studie na jejich využití. [26]

5 POUŽITÉ MATERIÁLY A ZKUŠEBNÍ METODY

Praktická část disertační práce je rozdělena na dvě části. První se zabývá laboratorními návrhy asfaltové směsi typu SMA 11S s různým podílem 0 až 50 % a druhem R-materiálu. „Běžný“ R-materiál získaný vyfrézováním celé konstrukce netuhé vozovky z asfaltové směsi typu asfaltový beton AC, tedy jak z obrusné ložní, tak podkladní vrstvy obsahující silniční pojivo. R-materiál z SMA získaný selektivním frézováním obrusné vrstvy ze směsi typu asfaltového koberce mastixového SMA. Pro změkčení zestárlého (zoxidovaného) asfaltového pojiva obsaženého v R-materiálech byla použita oživovací přísada s obchodním názvem Storflux od výrobce Storimplex GmbH. Storflux je derivát ropy získaný ze sekundární rafinace. Množství změkčovadla bylo přizpůsobeno dávkovanému množství R-materiálu. Nativní asfaltové pojivo bylo použito modifikované PmB 45/80-55. Kamenivo bylo použito z kamenolomu Sýkořice ve Zbečně frakce 0/2, 2/5, 4/8, 8/11 a vápencová moučka. Jednotlivé frakce byly podrobeny homogenizaci a kvartaci podle ČSN EN 12697-28 [8] a následně byla stanovena zrnitost podle ČSN EN 933-1 [21]. Pro zvětšení měrného povrchu bylo použito celulózové vlákno pro zajištění neztečení asfaltového pojiva.

V rámci druhé části jsou hodnoceny varianty asfaltové směsi typu SMA 11S vyrobené na obalovně s paralelním bubnem společnosti Froněk, spol. s r.o. a položené v rámci zkušebního úseku. Ten byl realizovaný ke konci roku 2016 na silnici II/227, která je spojnicí města Žatec s městysem Křivoklát. Zkušební úsek se nachází mezi městem Rakovník a obcí Kněževes v délce 4 783 metrů. Návrhy směsí byly převzaty ze zkušeností z laboratorních návrhů.

Obrusná vrstva SMA 11S byla položena v 17 variantách (Tabulka 1). Prvních 6 variant obsahuje modifikované asfaltové pojivo Colflex 45/80-65 a klasické celulózové vlákno S CEL 7G. Směsi se liší v podílu obsaženého R-materiálu. Na úseku 1 a 2 byla položena referenční směs bez R-materiálu. Na třetí a čtvrtý úsek směs obsahující „běžný“ R-materiál v množství 20 % a 30 %. Na pátý a šestý úsek byly položeny varianty s obsahem 30 % a 50 % R-materiálu odděleně vyfrézovaného z SMA.

Varianty 7, 10 a 13 obsahují různá celulózová vlákna od společnosti CIUR, a.s. Sedmá směs neobsahuje R-materiál a silniční asfalt 50/70 byl modifikován pomocí celulózových vláken S-CEL RE, které obsahují pryžový granulát. Desátá až třináctá varianta obsahuje různé množství R-materiálu a dle toho speciálně vyrobené vlákno napuštěné oživovací přísadou s označením S-CEL RF 20/30/50 dle přidaného množství R-materiálu.

V 8. a 9. variantě bylo použito silniční asfaltové pojivo 50/70 s modifikační přísadou Storelastic a celulózové vlákno S-CEL 7G. Ve směsích byl dávkován „běžný“ R-materiál v množství 20 % a 30 %.

Varianta 14 až 18 obsahuje silniční asfaltové pojivo 50/70 a přísadu Storelastic na jeho modifikaci. Směsi neobsahují celulózové vlákno a obsahují různé množství R-materiálu jak „běžného“ tak „modifikovaného“ z SMA. U všech vyrobených směsí s R-materiálem byla zároveň použita oživovací přísada Storflux z důvodu zajištění

průchodnosti cest z paralelního bubnu do míchačky obalovny. Dávkování bylo nastaveno na 0,2 % z hmotnosti R-materiálu v případě použití speciálních vláken s oživovací přísadou, na 0,3 % v případě dávkování „běžného“ R-materiálu a na 0,4 % v případě SMA R-mat.

V průběhu pokládky byly odebrány vzorky u šneku finišeru všech směsí, na kterých byly provedeny laboratorní zkoušky.

Tabulka 1: Asfaltové směsi položené na zkušebním úseku

směr pokládky	staničení (km)	označení SMA	SMA 11S PMB 45/80-65 - 40 mm								
			Asfalt	R-materiál		S-GEL 7G	S-CEL RE (pryž CIURu)	S-CEL RF 20	S-CEL RF 30	S-CEL RF 50	Storelastic
				B	SMA						
Kněžves	4,783-4,240	1-2	PmB	-	-	ano	-	-	-	-	
	4,240-3,970	3	PmB	20	-	ano	-	-	-	-	
	3,970-3,700	4	PmB	30	-	ano	-	-	-	-	
	3,700-3,430	5	PmB	-	30	ano	-	-	-	-	
	3,430-3,160	6	PmB	-	50	ano	-	-	-	-	
	3,160-2,890	7	50/70	-	-	-	ano	-	-	-	-
	2,890-2,620	10	PmB	20	-	-	-	ano	-	-	-
Žel. Přejezd	2,620-2,350	11	PmB	30	-	-	-	-	ano	-	-
Žel. Přejezd	2,350-2,080	12	PmB	-	30	-	-	-	ano	-	-
	2,080-1,810	13	PmB	-	50	-	-	-	-	ano	-
	1,810-1,540	8	50/70	20	-	ano	-	-	-	-	ano
	1,540-1,270	9	50/70	30	-	ano	-	-	-	-	ano
	1,270-1,000	14	50/70	-	-	-	-	-	-	-	ano
	1,000-0,730	15	50/70	20	-	-	-	-	-	-	ano
	0,730-0,460	16	50/70	30	-	-	-	-	-	-	ano
	0,460-0,190	17	50/70	-	30	-	-	-	-	-	ano
Rakovník	0,190-0,000	18	50/70	-	50	-	-	-	-	-	ano

U všech variant asfaltových směsí typu SMA 11S vyrobených v laboratoři i na obalovně asfaltové směsi byly stanoveny maximální objemové hmotnosti podle ČSN EN 12697-5 [10], objemové hmotnosti asfaltových zkušebních těles podle ČSN EN 12697-6 [11], mezerovitosti podle ČSN EN 12697-8 [12], odolnosti vůči vysokým teplotám byly zjišťovány pomocí zkoušky pojíždění kolem dle ČSN EN 12697-22 [6], chování za běžných provozních teplot pomocí stanovení modulu tuhosti dle ČSN EN 12697-26 [7] a nízkoteplotní vlastnosti byly testovány dle postupu popsaného v normě ČSN EN 12697-46 [9].

Dále ze všech variant bylo znovuzískáno pojivo pomocí rotačního vakuového destilačního zařízení dle ČSN EN 12697-3. Znovuzískaná pojiva byla hodnocena pomocí empirických zkoušek penetrací jehlou dle ČSN EN 1426 [17] a bodem měknutí metodou kroužek a kulička dle ČSN EN 1427 [18]. Zároveň byly stanoveny funkční vlastnosti pomocí dynamické viskozity podle ČSN EN 13702 [16], zkouškou MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery Test) dle ČSN EN 16659, komplexní modul ve smyku dle ČSN EN 14770 [19] a modul tuhosti pomocí průhybového trámečkového reometru dle ČSN EN 14771 [20].

Podrobně jsou použité materiály a zkušební metody popsány v disertační práci.

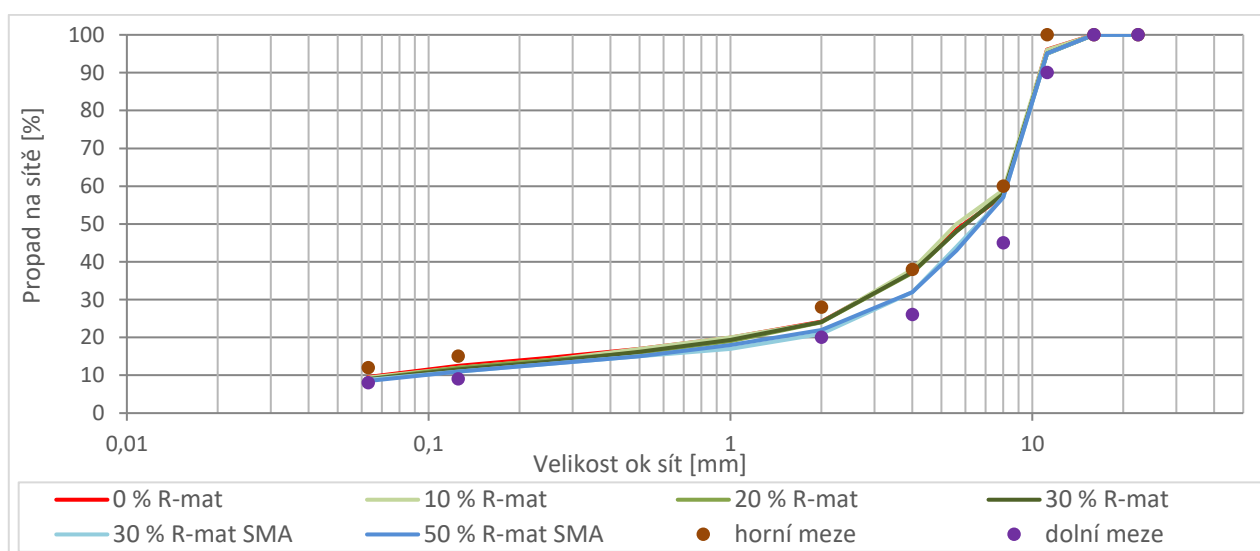
6 VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ

V rámci této kapitoly jsou uvedeny vybrané výsledky z laboratoře i ze zkušebního úseku. Podrobněji jsou jednotlivé výsledky popsány přímo v disertační práci.

6.1 VÝSLEDKY ZKOUŠEK NA ASFALTOVÝCH SMĚSÍCH

6.1.1 Síťový rozbor kameniva dle ČSN EN 933-1

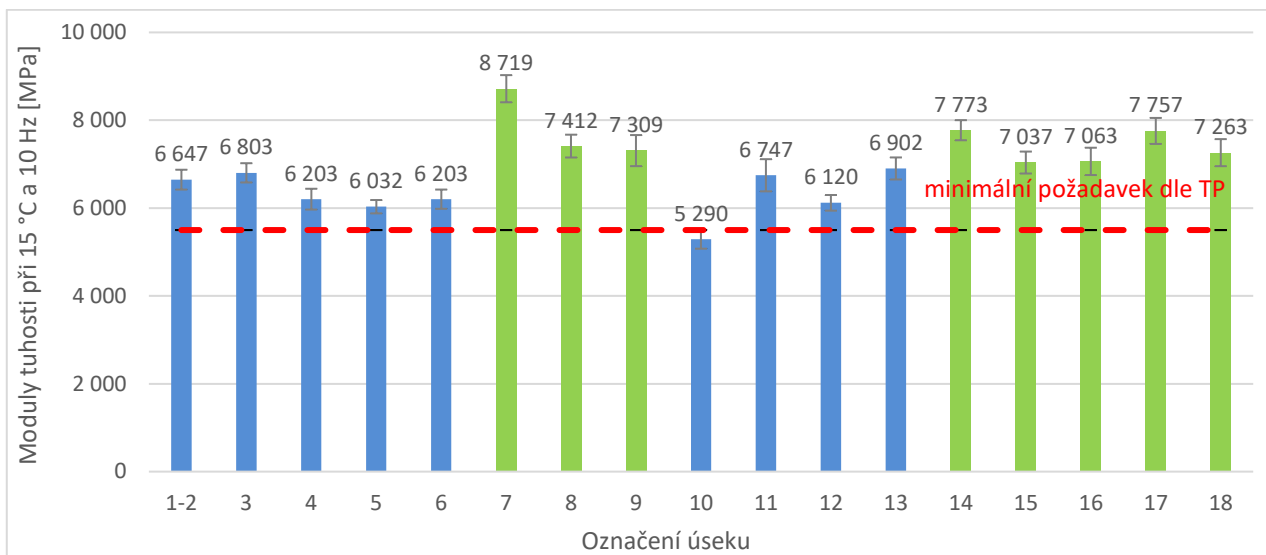
Na všech směsích byl proveden síťový rozbor dle ČSN EN 933-1 [21]. Průběh čar zrnitosti byl porovnán s limitními propady na sítích dle požadavků normy ČSN EN 13108-5 [13]. V Grafu 1 jsou uvedeny průběhy směsí vyrobených v laboratoři. „Běžný“ R-materiál byl dávkován v množství 10, 20 a 30 %. Lze pozorovat, že 30 % běžného R-materiálu z hlediska limitů je maximální. V případě R-materiálu ze selektivního frézování směsi typu SMA je průběh čar zrnitosti více zalomený, což je žádoucí u tohoto typu směsi i v případě dávkování 50 % R-mat SMA.



Graf 1: Čary zrnitosti směsí SMA 11S s různým podílem R-materiálu

6.1.2 Stanovení modulu tuhosti dle ČSN EN 12697-26

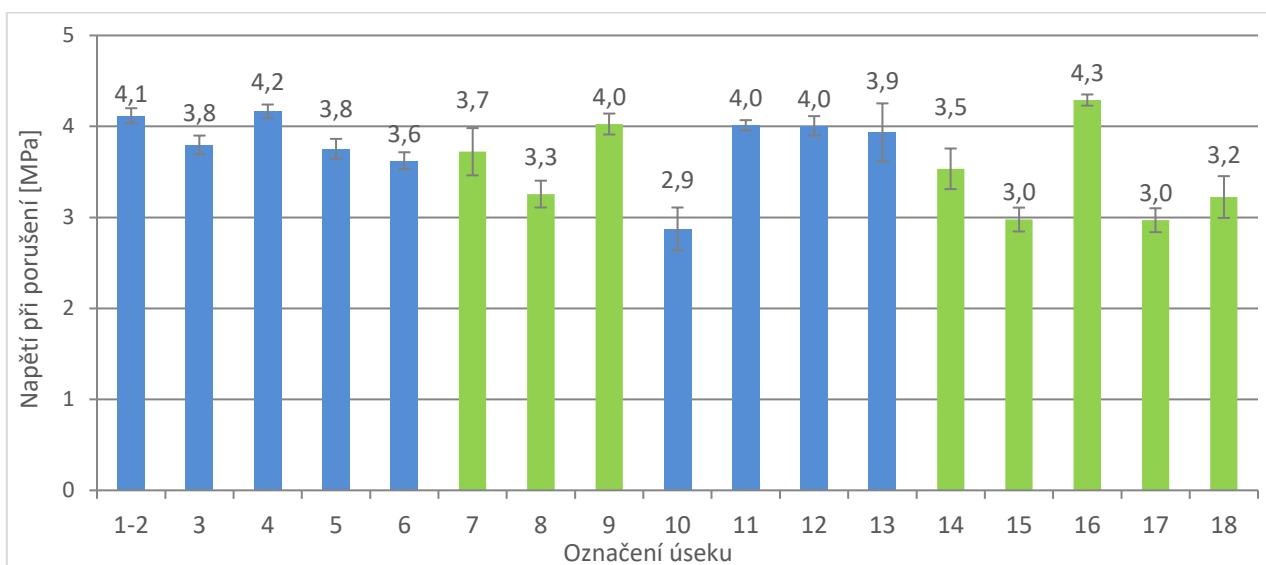
Modul tuhosti byl stanoven pomocí dvoubodové zkoušky ohybem na tělesech ve tvaru komolého klínu. Zkouška byla provedena při teplotě 15 °C a frekvenci zatížení 10 Hz. Průměrné hodnoty naměřených hodnot modulu tuhosti pro jednotlivé varianty směsi jsou znázorněny v Grafu 2. Z výsledků je patrné, že moduly tuhosti jsou v případě směsí s modifikovaným pojivem průměrně nižší než u směsí se silničním pojivem, což lze vysvětlit jejich nižší tuhostí. Výsledky zároveň dobře korelují s naměřenými hodnotami komplexních smykových modulů na asfaltových pojivech při teplotě viskoelastického přechodu ($R^2 = 0,82$). To potvrzuje výrazný vliv asfaltového pojiva na výsledky získané u asfaltových směsí. V případě směsi 10 byla naměřena nižší hodnota modulu tuhosti, než je návrhová hodnota modulu tuhosti pro směs typu SMA dle technických podmínek TP 170 [32]. To mohlo být zapříčiněno velkou mezerovitostí směsi, která byla u zkušebních těles 6,5 %.



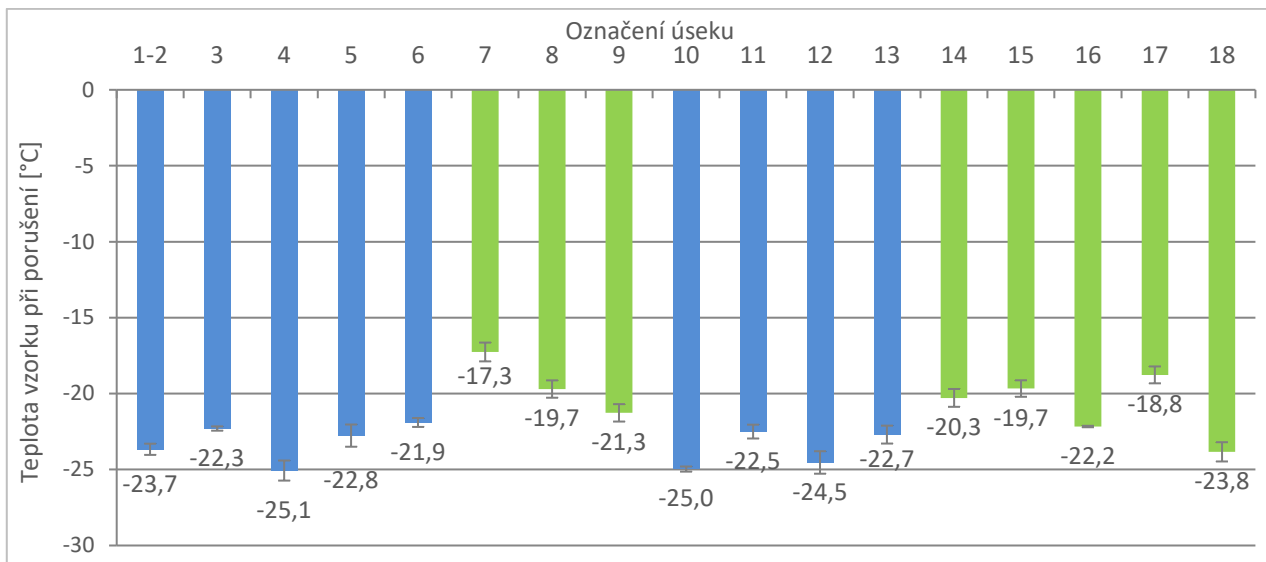
Graf 2: Moduly tuhosti směsí SMA 11S s různým obsahem R-materiálu

6.1.3 Stanovení nízkoteplotních vlastností asfaltových směsí dle ČSN EN 12697-46

Další provedenou zkouškou na asfaltových směsích z pokusného úseku bylo ověření náchylnosti směsí ke vzniku mrazových trhlin při záporných teplotách. V Grafu 3 a 4 jsou zobrazeny průměrné hodnoty maximálního kryogenního napětí a kritické síly při porušení jednotlivých variant směsí. Obecně lze říci, že lepších výsledků dosáhly směsi s nativním pojivem z polymerem modifikovaného pojiva oproti variantám obsahujícím pojivo 50/70 modifikované pryžovým granulátem. Z těchto směsí varianta 18 dopadla nejlépe. To mohlo být způsobeno polymerem modifikovaným pojivem obsaženým v R-materiálu, který byl dávkován v 50 % množství z asfaltové směsí.



Graf 3: Maximální napětí při porušení vzorku při ověřování nízkoteplotních vlastností směsí SMA 11S ze zkušebního úseku

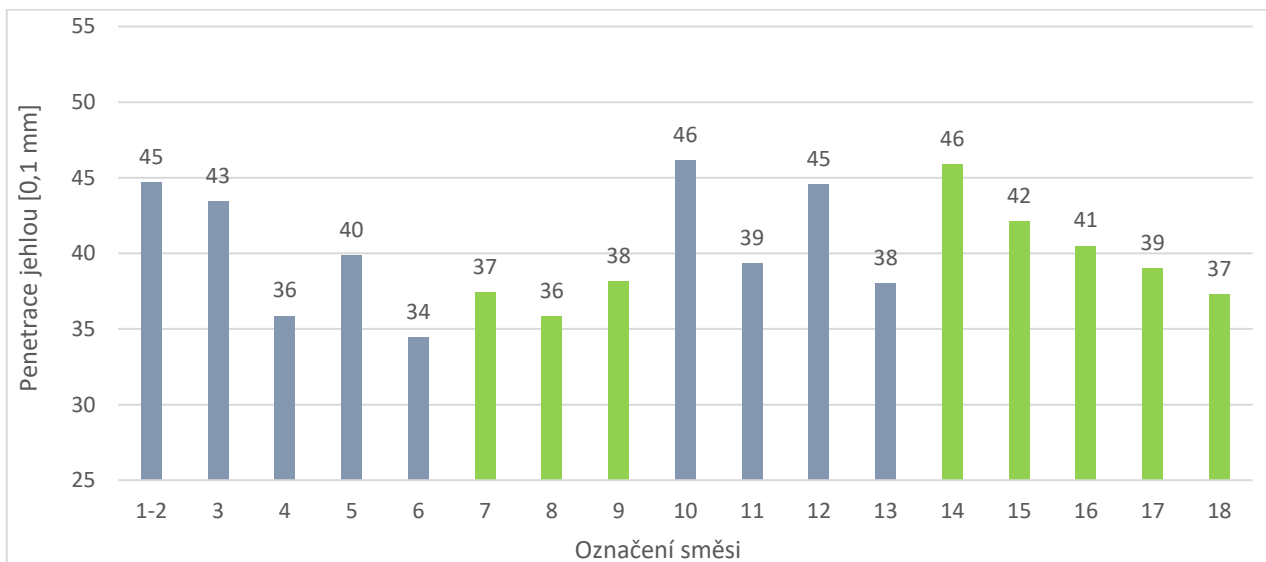


Graf 4: Kritická teplota vzorku při porušení při ověřování nízkoteplotních vlastností směsi SMA 11S ze zkušebního úseku

6.2 VÝSLEDNÉ VLASTNOSTI ASFALTOVÝCH POJIV

6.2.1 Stanovení penetrace jehlou podle ČSN EN 1426

V Grafu 5 jsou zobrazeny výsledky zkoušky penetrace jehlou pro jednotlivá asfaltová pojiva. Z výsledků je patrný velký rozdíl mezi hodnotami penetrace jehlou, který se pohybuje v rozmezí 34 až 46 [0,1 mm].



Graf 5: Hodnoty penetrace jehlou znovuzískaných asfaltových pojiv

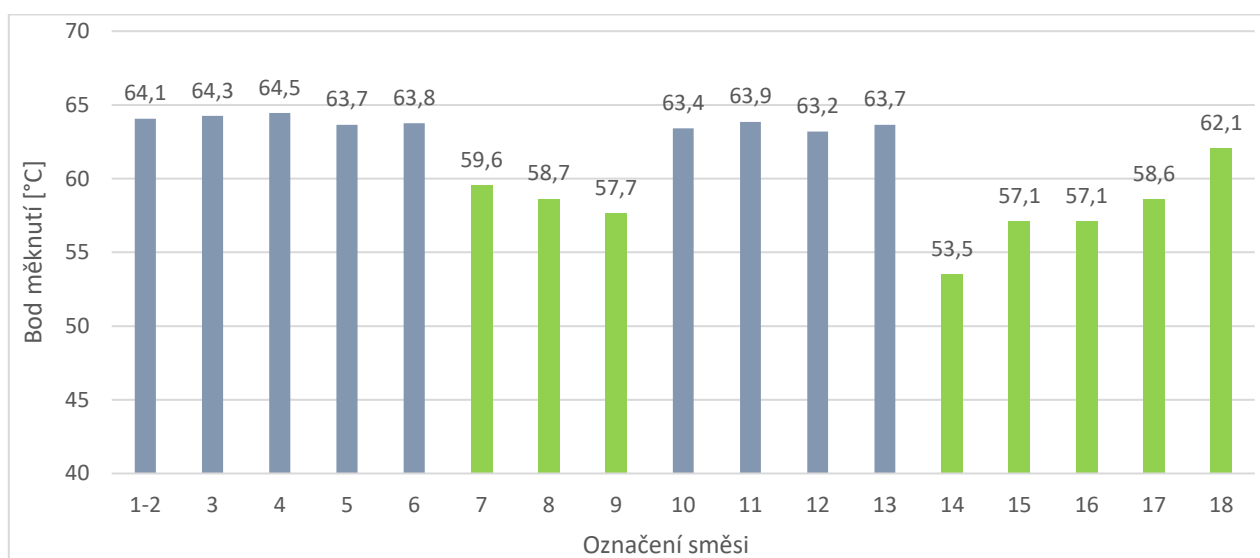
Výsledky hodnot penetrace lze opět rozdělit na dvě části. Šedě vyznačené směsi obsahující polymerem modifikované pojivo s označením PmB 45/80-65, kde můžeme pozorovat, že směsi bez přidaného R materiálu (označené 1-2 a 10), s 30 % R-materiálu z SMA (označené 5 a 12) dosahují nejvyšších hodnot, tedy pojivo je nejměkčí. V případě směsí 3 a 11 s 20 % běžného R materiálu byla hodnota penetrace

mírně nižší než u referenčních směsí. V případě směsí s obsahem 30 % běžného R-materiálu (označené 4 a 11) a 50 % R-materiálu z SMA (označené 6 a 13) jsou hodnoty penetrace nižší, tedy se jedná o tužší pojiva. Na znovuzískané asfaltové pojivo doposud nebyly kladeny žádné normové požadavky. Aktuálně se připravuje norma ČSN 73 6141 „Požadavky na použití R-materiálu do asfaltových směsí“, kde v případě použití pojiva PmB 45/80-65 je požadavek na penetraci jehlou u znovuzískaného pojiva v rozmezí 30 až 70 [0,1 mm]. Tento požadavek by splnily všechny realizované varianty směsi typu SMA 11S v rámci zkušebního úseku.

V případě směsí 7, 8 a 9 se jedná v podstatě o stejné výsledky, tedy přítomnost R-materiálu nemá negativní vliv na hodnoty penetrace. U směsí 14 až 18 lze pozorovat pokles hodnoty penetrace s přibývajícím množstvím R-materiálu. V případě směsí 1 až 6 a 10 až 13 lze vidět podobný trend výsledků dle množství R-materiálu. To může být zapříčiněno mírou zestárnutí asfaltového pojiva v R-materiálu a množstvím přidané oživovací přísady. Tedy při hodnocení dle hodnoty penetrace by v některých případech mohlo být použito více oživovací přísady.

6.2.2 Stanovení bodu měknutí metodou kroužek a kulička podle ČSN EN 1427

V Grafu 6 jsou zobrazeny výsledky zkoušky stanovení bodu měknutí metodou kroužek a kulička pro jednotlivá znovuzískaná pojiva. Mezi výslednými hodnotami je poměrně velký rozdíl. Pohybují se v rozmezí 53,5 až 64,5 °C. Zejména směsi se silničním asfaltem dosahují výrazně nižších hodnot než varianty směsi s PmB. Naopak u všech variant s PmB byly zaznamenány jen minimální rozdíly (rozptyl 63,2 až 64,5 °C) a není tudíž patrný vliv přidaného R materiálu na výsledné hodnoty této zkoušky.



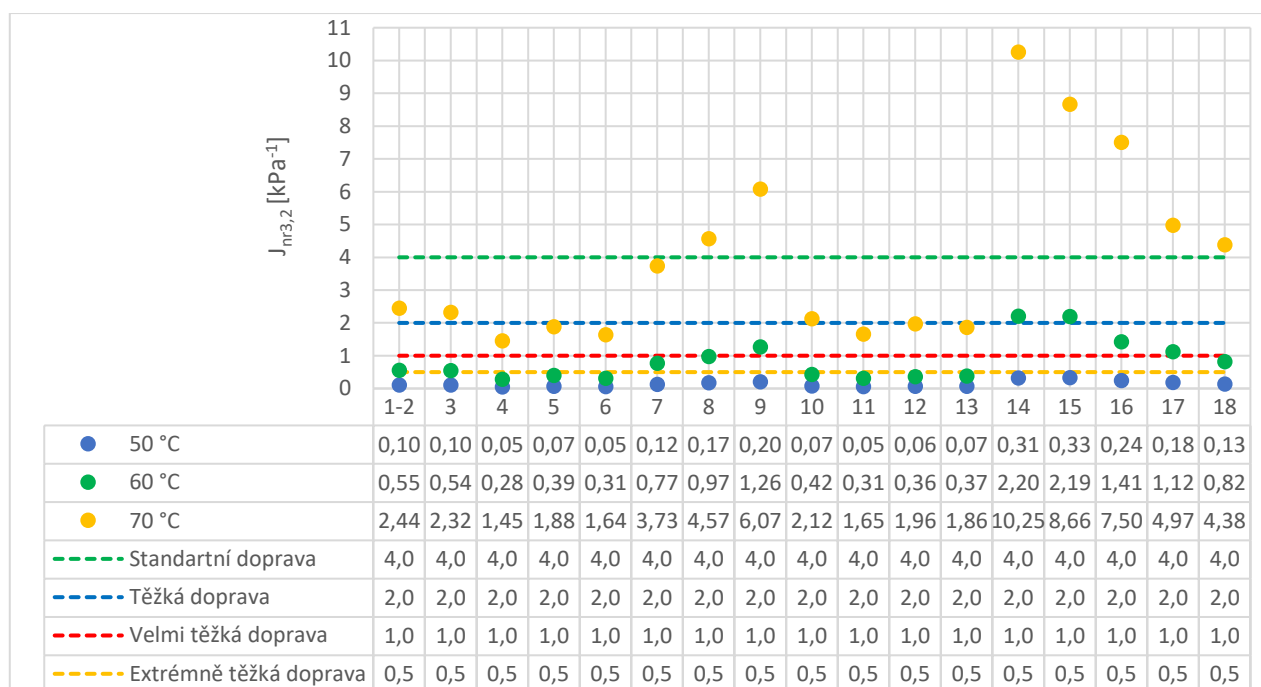
Graf 6: Hodnoty bodu měknutí pro znovuzískaná asfaltová pojiva

Bod měknutí znovuzískaného pojiva z asfaltové směsi obsahující R-materiál, kde bylo použito asfaltové pojivo PmB 45/80-65, by dle připravované normy ČSN 73

6141 měl mít hodnotu bodu měknutí vyšší jak 60 °C. Tento požadavek by nespĺnily všechny varianty obsahující silniční pojivo 50/70 modifikované pryžovým granulátem, což mohlo být způsobeno nedostatečnou modifikací pryžového granulátu, nebo tím, že pryž zůstala při extrakci na sítích, a ne v pojivu. Jediná varianta 18 obsahující silniční pojivo 50/70 modifikované pryžovým granulátem by splnila daný požadavek. To může být způsobeno 50 % obsahem R mat SMA, který obsahuje polymer, který mohl způsobit modifikaci obsaženého pojiva a tím zvýšit hodnotu bodu měknutí dané varianty směsi.

6.2.3 Zkouška MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery Test) dle ČSN EN 16659

Pro hodnocení zkoušky MSCR se používá nevratná smyková poddajnost $J_{nr3,2}$, kdy její nižší hodnota znamená vyšší odolnost vůči trvalým deformacím. V Grafu 7 jsou zobrazeny hodnoty $J_{nr3,2}$ pro jednotlivé znovuzískané asfalty s ohledem na teplotu.



Graf 7: Velikost nevratné smykové poddajnosti $J_{nr3,2}$ jednotlivých znovuzískaných pojiv

Z výsledků je patrné, že zvyšující se teplota zapříčiňuje zvýšení nevratné smykové poddajnosti, čímž klesá odolnost vůči trvalým deformacím. Pokles nevratné smykové poddajnosti lze popsat pomocí mocninné funkce, jejíž argument se pohybuje v rozmezí 9,32 až 10,39. V ČR doposud nejsou specifikovány požadavky na výsledné hodnoty zkoušky MSCR, proto bylo zvoleno posouzení americkou návrhovou metodou SHRP (The strategic Highway Research Program) [24]. Hranice pro jednotlivé úrovně dopravního zatížení dle americké návrhové metody SHRP jsou také v Grafu 7 uvedeny. Standardní dopravu lze charakterizovat dopravním zatížením ESAL nižším než 10 mil./rok a průměrnou rychlostí vyšší než 70 km/h. Těžkou dopravu lze charakterizovat počtem ESAL 10 až 30 mil./rok nebo průměrnou

rychlostí v rozmezí 20 až 70 km/h. Velmi těžká doprava se vyznačuje pojezdem ESAL vyšším než 30 mil./rok nebo rychlostí nižší než 20 km/h. Extrémně těžká doprava má intenzitu dopravy ESAL vyšší než 30 mil./rok a zároveň rychlost pojezdu nižší než 20 km/h. [1, 3, 22]

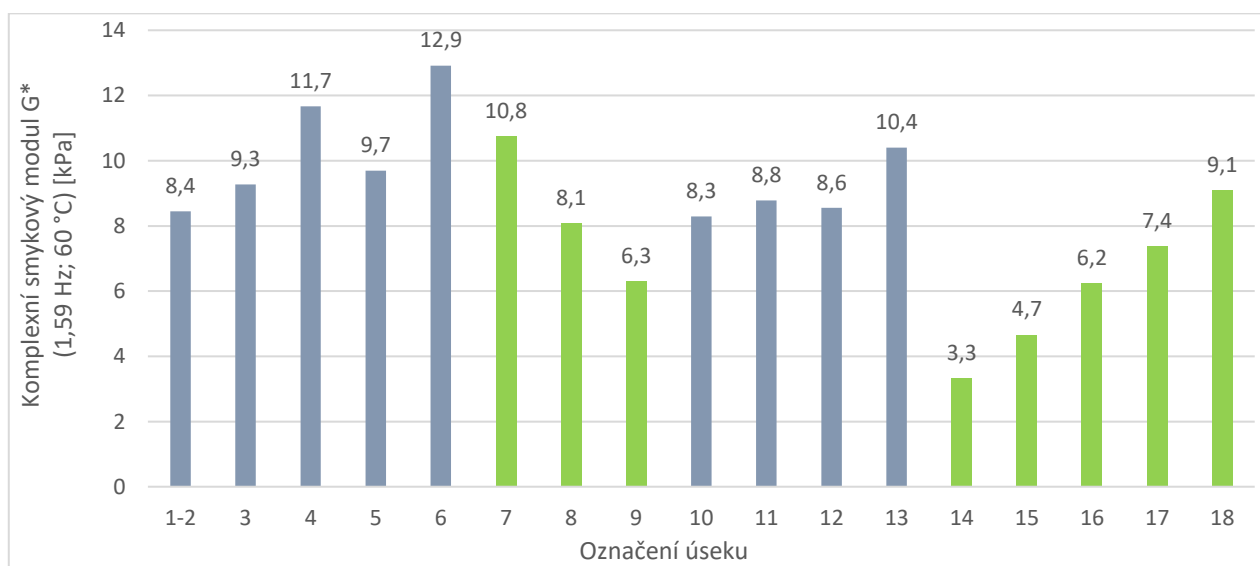
Z výsledků vyplývá výrazný rozdíl mezi variantami s PmB a silničním asfaltem 50/70. Zejména při teplotě 70 °C je nevratná smyková poddajnost u směsi se silničním asfaltem mimo limitní hodnoty. V České republice je ovšem vhodné hodnotit pojiva při teplotě 60 °C. Zde požadavkům pro extrémně těžkou dopravu vyhověly směsi 4, 5, 6, 10, 11, 12 a 13, které obsahují PmB. Mírně horší výsledky s PmB byly zjištěny u směsí 1-2 a 3, které nevyhověly podmínce pro extrémně těžkou dopravu.

Pojiva se silničním asfaltem 50/70 ze směsí 7, 8 a 18 vyhověla podmínce pro velmi těžkou dopravu. Znovuzískané pojivo ze směsí 9, 16 a 17 vyhověla požadavku na těžkou dopravu a pojiva ze směsí 14 a 15 vyhověla pouze požadavkům standartní dopravy. Směs 18 se silničním asfaltem a 50 % R-mat ze směsi typu SMA patřila z těchto směsí k nejlepším, což opět dokazuje benefit v podobě R-mat z SMA, tedy že polymer obsažený v pojivu R-materiálu je stále funkční a zlepšuje odolnosti vůči trvalým deformacím.

Jelikož směs typu SMA se používá výhradně na vysoce exponované vozovky (např. dálniční úseky), výsledky potvrzují, že je vhodné používat pojiva modifikovaná polymerem, která jsou odolnější vůči vzniku trvalých deformací.

6.2.4 Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu dle ČSN EN 14770

Mezi zkoušky provedené pomocí DSR patří měření komplexního modulu ve smyku G^* a fázového úhlu δ dle ČSN EN 14770 [19]. Obvykle se hodnocení G^* provádí při teplotě 60 °C a frekvenci zatěžování 1,59 Hz (10 rad/s). Výsledky jsou ty znázorněny v Grafu 8.



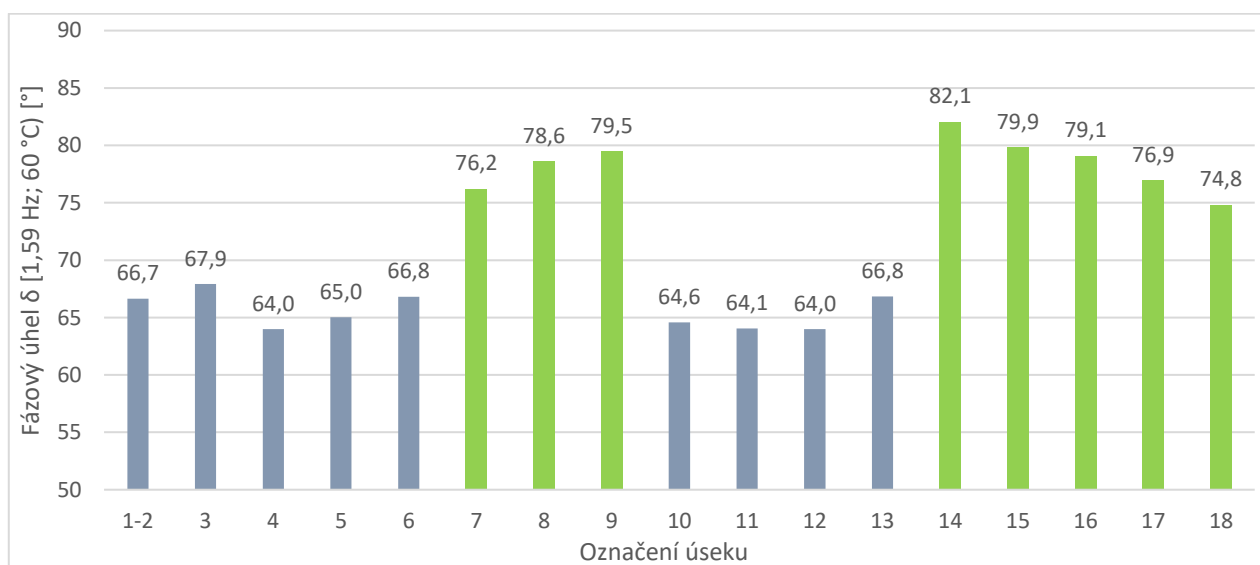
Graf 8: Velikost komplexního smykového modulu při 60 °C a frekvenci zatěžování 1,59 Hz

Při hodnocení znovuzískaných pojiv s PmB pojivem (1-2, 3 a 4) lze pozorovat, že zvyšující se množství R-materiálu způsobuje nárůst komplexního smykového modulu. U směsí 10 a 11, u kterých je použito speciální celulózové vlákno do směsí s R-materiálem, byla zjištěna nižší hodnota komplexního smykového modulu než u pojiv ze směsí 3 a 4. Zároveň se hodnota komplexního smykového modulu blíží směsi bez R-materiálu (směs 1-2).

Taktéž u směsí s modifikovaným pojivem PmB a R-materiálem získaným ze směsi typu SMA (směs 5 a 6) způsobuje vyšší přidání R-materiálu vyšší hodnotu komplexního smykového modulu. Tedy kdyby množství oživovací přísady bylo dávkováno dle tohoto parametru, bylo by potřeba zvýšit jeho množství. V případě variant 12 a 13 se stejným dávkováním R-materiálu bylo docíleno nižší hodnoty komplexního smykového modulu. Pro směs s 30 % R-mat z SMA o 3,1 kPa a u směsi s 50 % R-materiálu z SMA o 2,5 kPa. Zároveň u znovuzískaného pojiva ze směsi 12 byl komplexní smykový modul vyšší pouze o 0,2 kPa oproti výchozí směsi 1-2.

Při porovnání znovuzískaných pojiv s obsahem silničního asfaltu je patrné, že u směsí 7, 8 a 9 klesá s rostoucím množstvím R-materiálu komplexní smykový modul. U znovuzískaných pojiv ze směsí 14 až 18 je patrný rostoucí trend s vyšším množstvím R-materiálu, což dokazuje, že pro rozdílné dávkování R-materiálu je nutné upravit množství oživovací přísady.

Při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz byla zároveň hodnocena i velikost fázového úhlu, která popisuje elasticitu pojiva (Graf 9).



Graf 9: Velikost fázového úhlu při 60 °C a frekvenci zatěžování 1,59 Hz

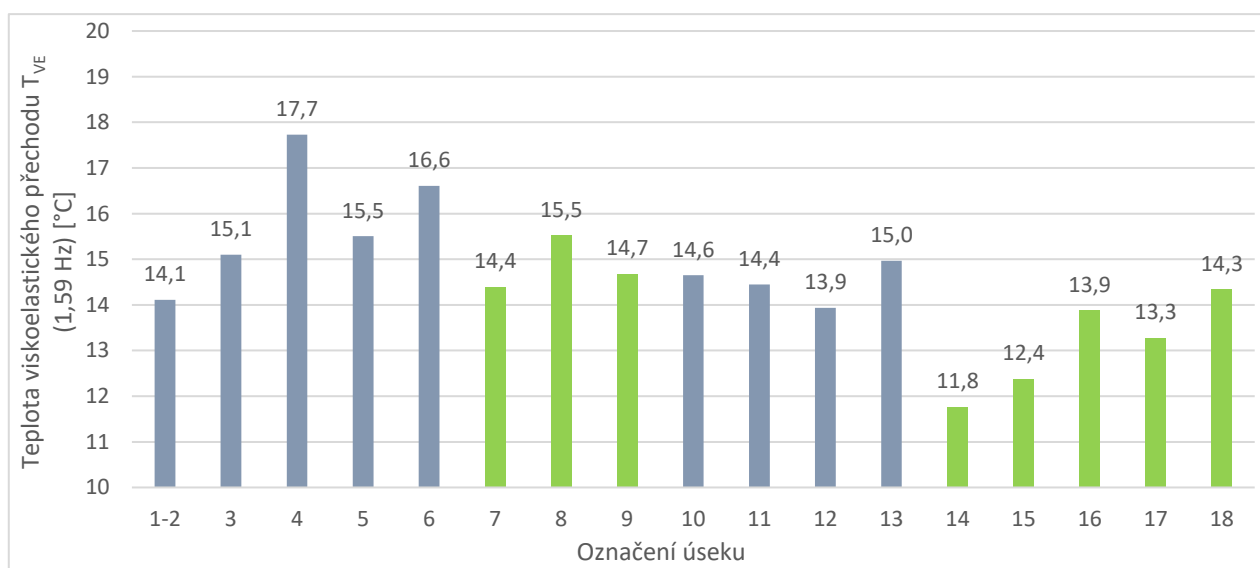
Z výsledků vyplývá, že znovuzískaná pojiva ze směsí s PmB mají výrazně nižší hodnotu fázového úhlu, což je způsobeno polymery, které dodávají pojivu pružnost, která je důležitá pro odolnost vůči trvalým deformacím. Hodnota fázového úhlu je u těchto směsí velmi podobná a není tedy závislá na množství R-materiálu.

Pokud porovnáme směsi se silničním asfaltem 50/70, byla zjištěna mírně nižší hodnota fázového úhlu u směsí 17 a 18, které obsahují R-mat ze směsi SMA. Je tedy

patrné, že pojivo z R-mat SMA modifikuje výsledné pojivo. Pokud porovnáme změnu fázového úhlu mezi znovuzískaným pojivem ze směsi 14 (silniční asfalt) a pojivem ze směsi 18 (50 % R-mat z SMA), je pokles fázového úhlu o 7,3 °. Rozdíl mezi znovuzískanými pojivy ze směsí 1-2 a 18 je 8,1 °. Lze tedy říct, že přidání 50 % R-materiálu z SMA modifikuje výslednou směs, která se nachází přibližně uprostřed mezi směsí SMA (pouze se silničním asfaltem) a směsí SMA (s PmB pojivem).

Směsi 7, 8 a 9 mají velmi podobný fázový úhel. Pojiva ze směsí 14 až 18 vykazují klesající hodnoty fázového úhlu, což je způsobeno nižší hodnotou fázového úhlu u přidávaného R-materiálu. Všeobecně lze totiž říct, že R-materiál má nižší hodnotu fázového úhlu, což způsobuje zejména oxidativní stárnutí během výroby, pokládky a provozu vozovky.

Dále byla hodnocena teplota viskoelastického přechodu, která udává teplotu, při které je hodnota fázového úhlu rovna 45 ° (Graf 10).



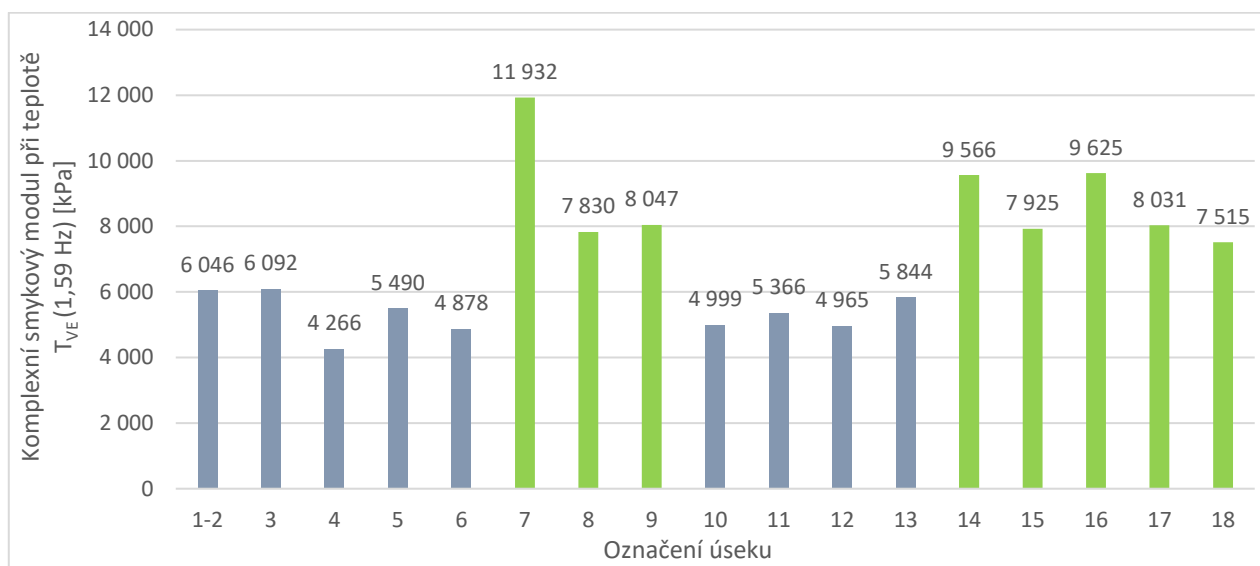
Graf 10: Teplota viskoelastického přechodu při frekvenci zatěžování 1,59 Hz

Pokud se zaměříme na směsi s pojivem PmB (směs 1-2, 3, 4, 5 a 6), je patrné, že zvyšující se množství R-mat způsobuje nárůst viskoelastické teploty. Zároveň je patrné, že pojivo ze směsi 5 (R-mat SMA) má nižší hodnotu teploty viskoelastického přechodu než pojivo ze směsi 4 (běžný R-mat), přestože mají obě směsi stejné množství R-mat.

U směsí 10, 11, 12 a 13, které obsahují speciální celulósová vlákna do asfaltových směsí s R-mat, byla teplota viskoelastického přechodu srovnatelná, ale také lze vidět pokles v případě přidání R-mat SMA oproti běžnému. U směsí 14, 15, 16, 17 a 18 bylo možné pozorovat růst teploty viskoelastického přechodu se zvyšujícím se množstvím R-mat. Při dávkování 30 % R-mat SMA byla u směsí 5 a 17 zjištěna nižší teplota viskoelastického přechodu než u směsí s 30 % běžného R-mat (směs 4 a 16).

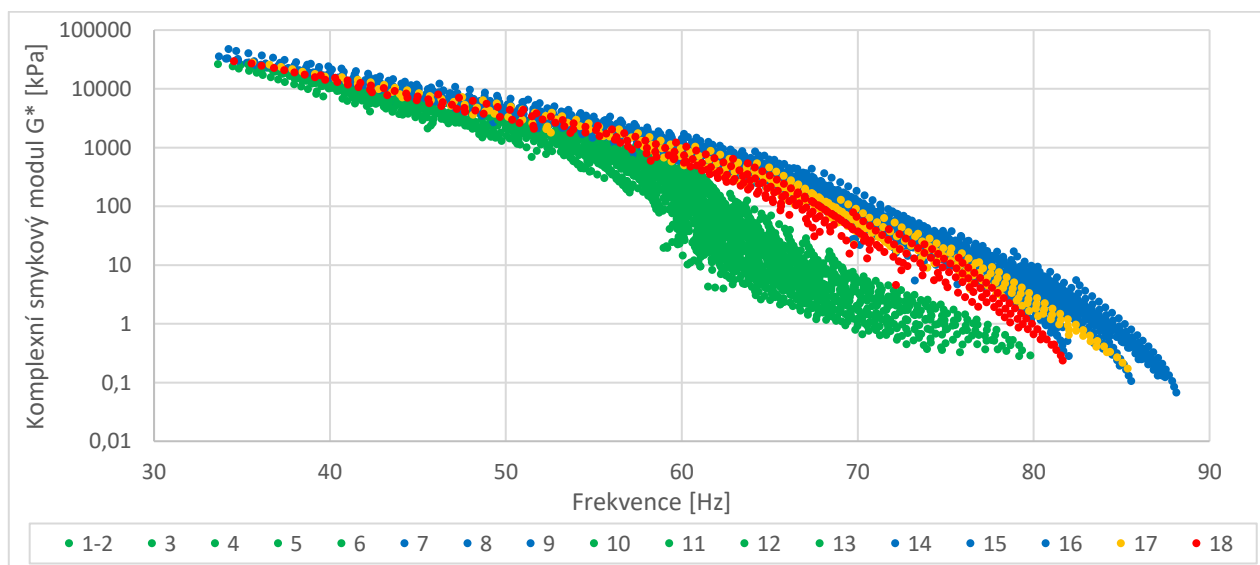
Dále se při teplotě viskoelastického přechodu hodnotí velikost komplexního smykového modulu. Z Grafu 11 vyplývá, že směsi s pojivem 50/70 mají výrazně vyšší

hodnotu komplexního smykového modulu. Naopak směsi s PmB jsou srovnatelné v rozmezí 4 266 kPa až 6 092 kPa.



Graf 11: Hodnota komplexního smykového modulu při teplotě viskoelastického přechodu

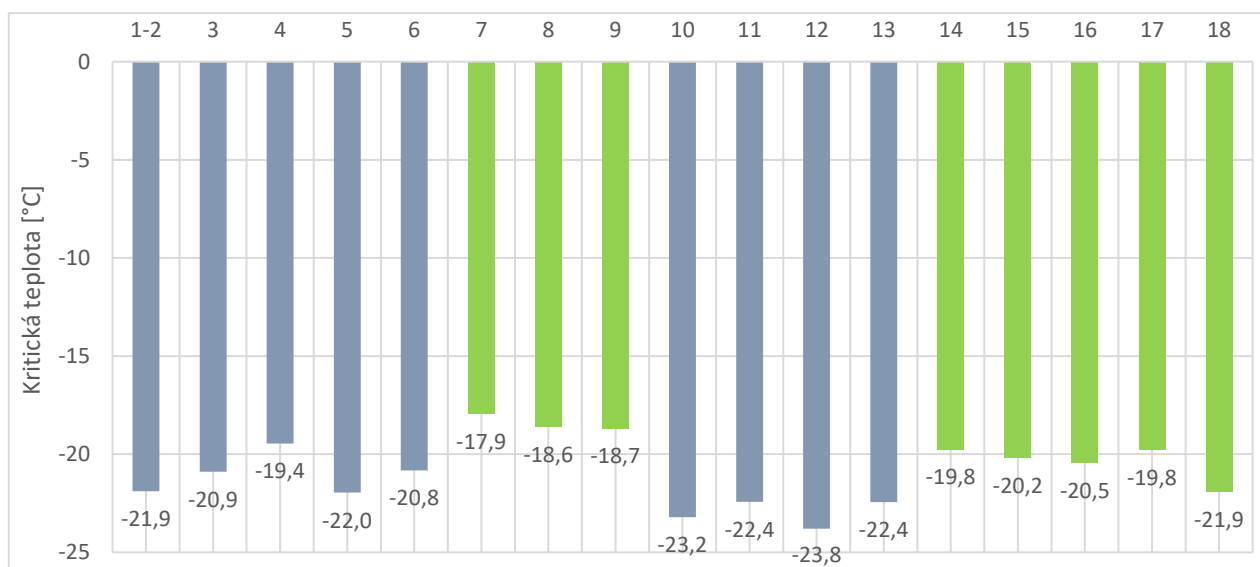
V Grafu 12 je znázorněn Blackův diagram, který udává závislost mezi komplexním smykovým modulem a fázovým úhlem. Tento diagram lze označit jako „otisk prstu“ každého pojiva. Pomocí Blackova diagramu lze dobře rozlišit znovuzískaná pojiva s PmB a silničním asfaltem 50/70. Pojiva s PmB vykazují charakteristické zakřivení, které je způsobeno oblastí fungování polymerů v pojivu, které se i při vyšších teplotách (nižším komplexním smykovém modulem) chová více elasticky než běžné silniční asfalty. Při pohledu na směsi 17 a 18, které obsahují R-materiál ze směsi SMA, je patrné, že křivky Blackova diagramu se opět blíží k PmB pojivům. Ovšem na druhou stranu nelze zde dostatečně pozorovat charakteristické zakřivení, které způsobuje obsah PmB.



Graf 12: Blackův diagram

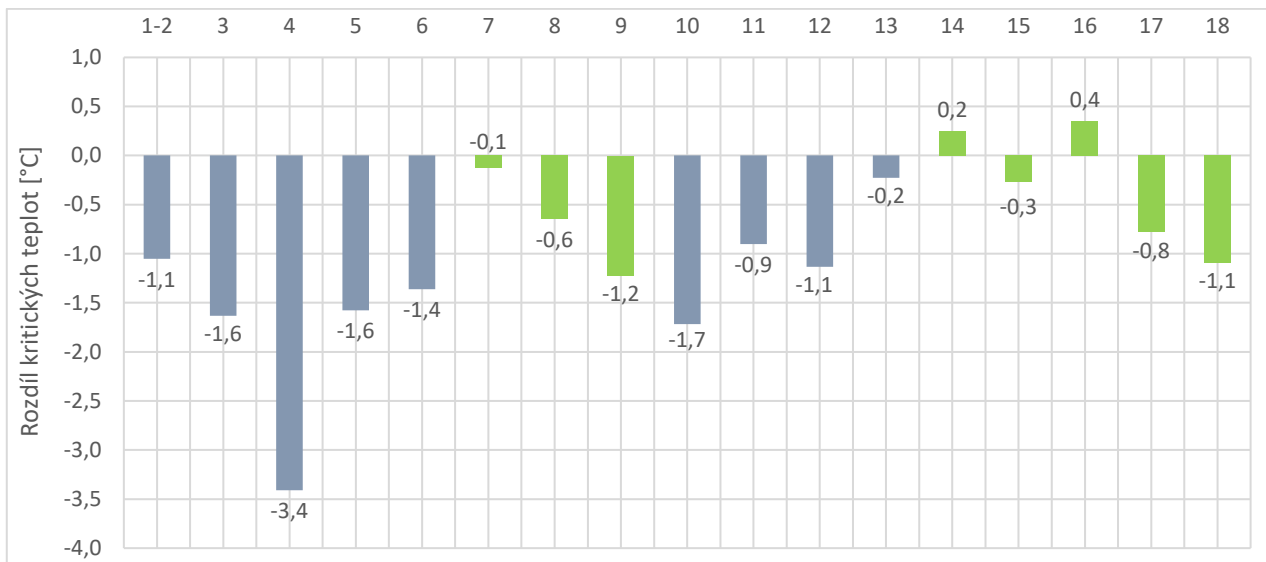
6.2.5 Stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru podle ČSN EN 14771

Hodnocení nízkoteplotních vlastností asfaltových pojiv bylo provedeno pomocí průhybového trámečkového reometru, kdy zkouška udává, při jaké teplotě hrozí riziko mrazové trhliny. Byla stanovena kritická teplota z ohybové tuhosti, kdy $S_{m(60)} = 300$ MPa a m -hodnota = 0,3. Méně příznivá varianta následně udává hodnotu kritické teploty (Graf 13). Z výsledků vyplývá, že u směsí s PmB přídavek R-materiálu u variant 5, 6, 10, 11, 12 a 13 nemá negativní vliv na kritickou teplotu. Naopak v některých případech byly naměřeny nižší teploty jak u referenční směsi. V případě směsí 3 a 4, kde je přidán běžný R-materiál, došlo k zvýšení kritické teploty. Nejvyšší kritická teplota byla zaznamenána u směsí se silničním asfaltem (7, 8 a 9) a běžným R-materiálem. Naopak nejnižších hodnot bylo dosaženo u směsí 10, 11, 12 a 13, které obsahují PmB pojivo.



Graf 13: Kritická teplota

Dalším možným parametrem pro hodnocení výsledků ze zařízení BBR je porovnání rozdílu kritických teplot (Graf 14), který je získán odečtením kritické teploty naměřené při m -hodnotě = 0,3 od kritické teploty naměřené při $S_{m(60)} = 300$ MPa. S klesající hodnotou rozdílu kritických teplot ΔT_{cr} se snižuje odolnost vůči vnesenému napětí a směs se stává náchylnější k prasknutí. Parametr navrhl v roce 2011 Anderson, [2] který doporučil limitní hodnotu $\Delta T_{cr} -5$ ° C pro vznik trhlin. Zároveň bylo doporučeno parametr hodnotit po simulaci dlouhodobého stárnutí, které zpravidla ještě zvyšuje rozdíl hodnot kritických teplot. Z výsledků vyplývá, že kritickou hodnotu -5 ° C nevykázalo žádné zkoušené pojivo, ale jedná se o pojiva znovuzískaná po výrobě na obalovně. Největší rozdíl hodnot byl zaznamenán u znovuzískaného pojiva ze směsi 4 ($-3,4$ °C).



Graf 14: Rozdíl kritických teplot získaných z modulu tuhosti za ohybu a m-hodnoty

6.3 VZÁJEMNÉ SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ

Jelikož se pokusný úsek skládal ze 17 různých asfaltových směsí, bylo možné mezi sebou navzájem porovnat jednotlivé výsledky, které byly získány z různých zkoušek. Jednak bylo například možné porovnat vzájemně výsledky asfaltových pojiv a zároveň bylo možné srovnat výsledky na asfaltových pojivech a směsích, čímž lze dosáhnout ověření, zda vlastnosti asfaltového pojiva ovlivňují vlastnosti z něj vyrobené asfaltové směsi.

V rámci disertační práce bylo celkově zjištěno u každé varianty asfaltové směsi SMA 11S 26 parametrů a u každého znovuzískaného pojiva 590 parametrů. Následně byly všechny parametry vzájemně porovnány pomocí lineární, exponenciální, mocninné a logaritmické funkce. Celkově tedy bylo možné vzájemně porovnat přes 750 tisíc různých kombinací.

V rámci disertační práce [3] byla nalezena mocninná korelace mezi bodem měknutí a penetrací jehlou. V rámci získaných výsledků této práce nebyla korelace potvrzena, což je pravděpodobně způsobeno modifikací pojiv, kdy v [3] se jednalo pouze o silniční asfalty. V případě modifikovaných pojiv byl koeficient determinace R^2 pouze 0,01. Obdobně nebyla potvrzena závislost mezi penetrací jehlou a komplexním smykovým modulem při teplotě 25 °C a frekvenci 0,4 Hz, kterou doporučil v roce 1958 Saal a LaBout. V tomto případě byl koeficient determinace R^2 jen 0,58.

V rámci hodnocení asfaltových pojiv z pohledu odolnosti vůči trvalým deformacím se v posledních letech upřednostňuje hodnocení pomocí zařízení DSR testem MSCR, který nahrazuje stanovení bodu měknutí. V rámci vzájemného porovnání tedy bylo možné parametry MSCR a bod měknutí srovnat, kdy koeficienty determinace R^2 mezi jednotlivými parametry jsou uvedeny v Tabulce 2.

Z výsledků vyplývá, že se jedná o poměrně těsnou závislost, která se pohybuje v rozmezí koeficientu determinace R^2 0,86 až 0,93. Zároveň lze říct, že hodnota R^2 roste s teplotou zkoušení během MSCR testu. Výsledek tedy napovídá, že i pomocí

bodů měknutí lze poměrně přesně popsat creepovou návratnost pojiva, která je důležitá z pohledu odolnosti vůči trvalým deformacím.

Tabulka 1: Korelace mezi výsledky bodu měknutí a MSCR testem při 50 °C, 60 °C a 70 °C

	$J_{nr3,2}$	$R_{3,2}$	$J_{nr3,2}$	$R_{3,2}$	$J_{nr3,2}$	$R_{3,2}$
	50 °C	50 °C	60 °C	60 °C	70 °C	70 °C
Bod měknutí	0,86 ⁽¹⁾	0,88 ⁽²⁾	0,86 ⁽¹⁾	0,93 ⁽²⁾	0,91 ⁽¹⁾	0,92 ⁽²⁾

Pozn.: (1) – Lineární závislost, (2) – Mocninné závislost

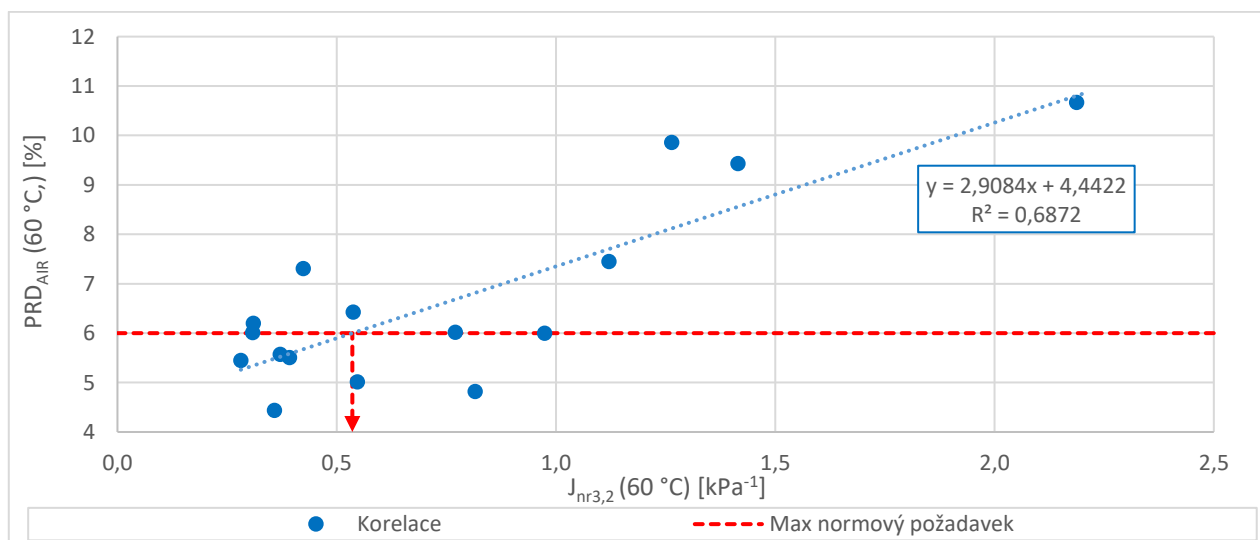
V disertační práci [3] byla zjištěna lineární závislost, kterou lze popsat koeficientem determinace R^2 0,92, mezi průměrným elastickým zotavením $R_{3,2}$ a fázovým úhlem při frekvenci 1,59 Hz. V rámci výsledků této práce byla vysoká hodnota koeficientu determinace potvrzena. Lineární závislost při různých teplotách je zobrazena v Tabulce 3. Z výsledků tedy vyplývá, že na výsledek zkoušky MSCR má výrazný vliv hodnota fázového úhlu, která popisuje poměr mezi elastickou a viskózní částí komplexního smykového modulu.

Tabulka 3: Korelace mezi MSCR a fázovým úhlem δ při různých teplotách

		$R_{3,2}$	$J_{nr3,2}$	$J_{nr3,2}$
		50 °C	60 °C	70 °C
δ (1,59 Hz)	50 °C	0,96 ⁽¹⁾	X	X
δ (1,59 Hz)	60 °C	X	0,96 ⁽¹⁾	X
δ (1,59 Hz)	70 °C	X	X	0,95 ⁽¹⁾

Pozn.: (1) – Lineární závislost

V Grafu 15 je uvedena závislost mezi PRD_{AIR} a nevratnou smykovou poddajností při teplotě 60 °C.

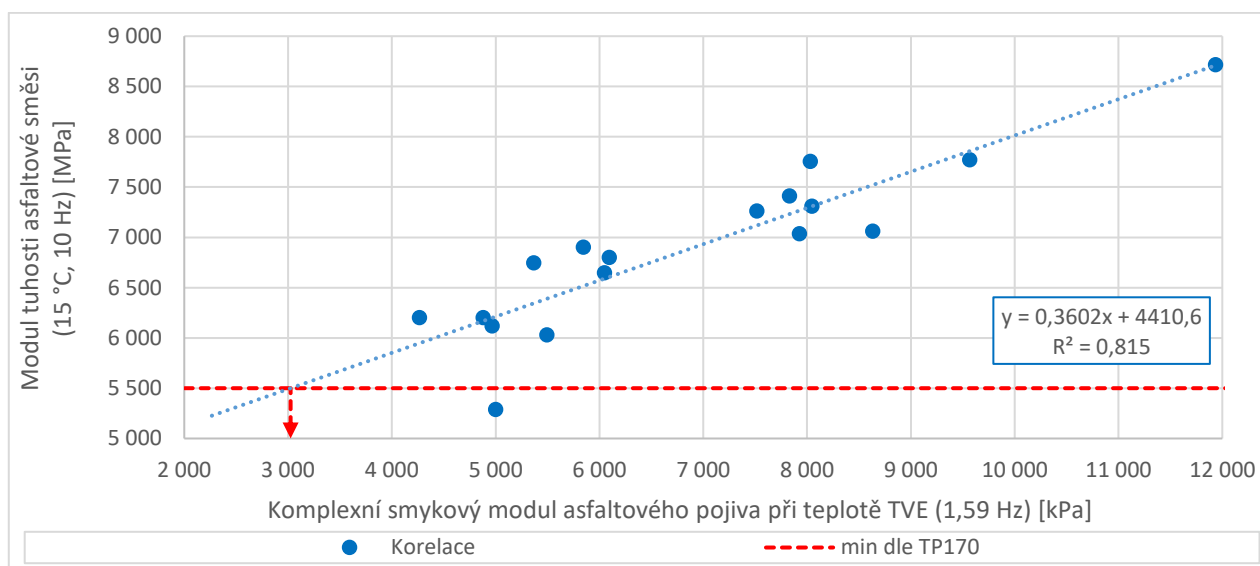


Graf 15: Lineární závislost mezi nevratnou smykovou poddajností $J_{nr3,2}$ a PRD_{AIR} při 60 °C

V tomto případě vyšel koeficient determinace R^2 0,69, kdy s klesající hodnotou $J_{nr3,2}$ klesá i hodnota PRD_{AIR} a tím pádem je asfaltová směs potažmo pojivo odolnější

vůči trvalým deformacím. Zároveň z korelace byla odvozena limitní hodnota $J_{nr3,2}$, kdy hodnotě 6 % PRD_{AIR} odpovídá $J_{nr3,2}$ 0,54. Lze říct, že se jedná o velmi blízkou hodnotu 0,5, která je v SHRP hodnocení uvedena pro extrémně těžkou dopravu. Z tohoto pohledu se tedy jedná o poměrně přísnou limitní hodnotu. Například velmi těžké dopravě (1,0) by odpovídala hodnota PRD_{AIR} 7,4 a těžké dopravě (2,0) by odpovídala hodnota PRD_{AIR} 10,3.

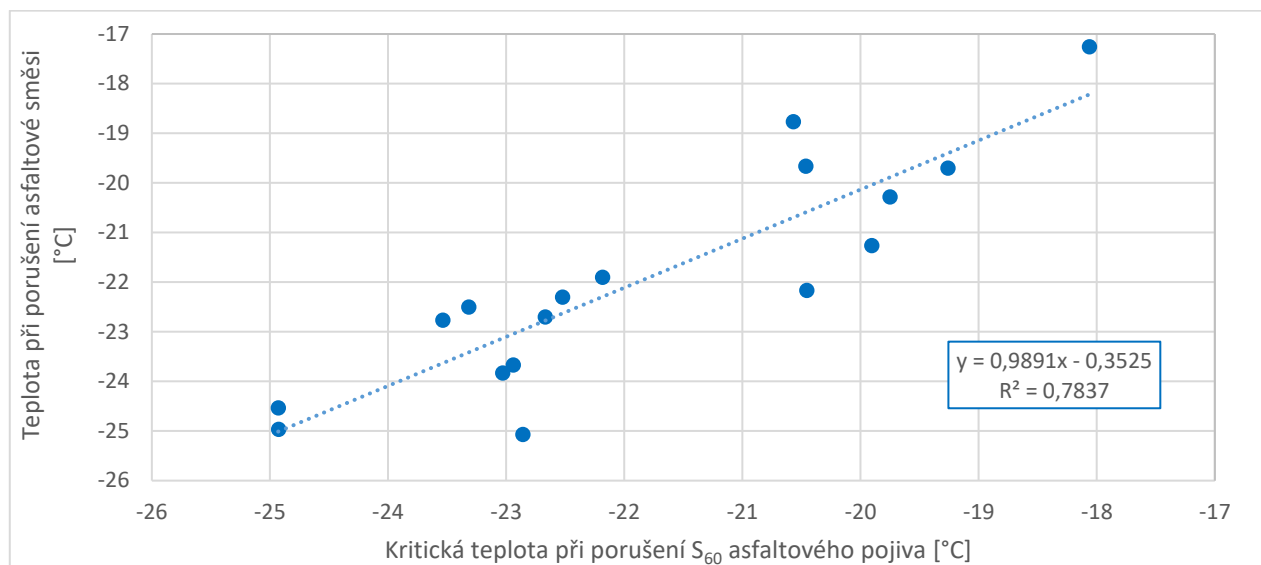
Další zkoušce, které byly podrobeny asfaltové směsi, bylo měření modulu tuhosti podle ČSN EN 12697-26 [7]. V tomto případě byl porovnán modul tuhosti asfaltové směsi s komplexním modulem asfaltového pojiva při teplotě 15 °C a frekvenci 10 Hz. Byla nalezena závislost, kterou lze popsat koeficientem determinace R^2 0,60. Z toho vyplývá, že na modul tuhosti asfaltové směsi má vliv modul tuhosti pojiva, přestože je jeho hodnota řádově jiná. Modulu tuhosti 5 500 MPa u asfaltové směsi odpovídá hodnota 7,40 MPa asfaltového pojiva. Výrazně vyšší závislost R^2 0,82 (Graf 16) byla ovšem nalezena mezi modulem tuhosti asfaltové směsi a komplexním smykovým modulem asfaltového pojiva při frekvenci 1,59 Hz a teplotě viskoelastického přechodu T_{VE} . Z toho vyplývá, že na modul tuhosti asfaltové směsi má výrazný vliv i velikost fázového úhlu. V tomto případě odpovídá 5 500 MPa hodnota komplexního smykového modulu při teplotě T_{VE} 3 024 kPa.



Graf 16: Lineární závislost mezi komplexním smykovým modulem asfaltového pojiva při teplotě T_{VE} a modulem tuhosti asfaltové směsi při 15 °C a 10 Hz

V Grafu 17 je uvedena závislost mezi teplotou porušení asfaltové směsi při jednoosé zkoušce tahem podle ČSN EN 12697-46 [9] a kritickou teplotou z ohybové tuhosti u znovuzískaného pojiva získanou pomocí průhybového trámečkového reometru. Tuto závislost je možné popsat koeficientem determinace R^2 0,78. Zároveň je patrné, že závislost má směrnici 1,00 a úsek vytknutý přímkou se blíží 0. Z toho vyplývá, že teplota porušení vzorku v asfaltové směsi odpovídá kritické teplotě získané z ohybové tuhosti u znovuzískaného pojiva. Lze tedy říct, že na nízkoteplotní vlastnosti asfaltové směsi má výrazný vliv použité asfaltové pojivo. Také tím lze

potvrdit, že pryžový granulát, který byl přidán suchým způsobem pro modifikaci pojiva, nemá vliv na výsledné vlastnosti asfaltových směsí z pohledu nízkoteplotních vlastností.



Graf 17: Lineární závislost mezi kritickou teplotou při porušení S₆₀ asfaltového pojiva a teplotou porušení u asfaltové směsi jednoosou zkouškou tahem

7 ZÁVĚR

Disertační práce je zaměřena na možnosti přidávání R-materiálu do asfaltové směsi typu asfaltový koberec mastixový, který se běžně používá na vysoce dopravně zatížené vozovky. Díky velice kvalitním vstupním materiálům se v případě frézování celé hloubky asfaltových vrstev netuhé vozovky s SMA jedná o vysoce neekologické a neekonomické řešení, protože je tento R-materiál následně použit do směsi typu asfaltového betonu, na které nejsou kladeny tak vysoké požadavky jako na směsi typu SMA.

V rámci disertační práce bylo řešeno několik dílčích úkolů, které byly prováděny za účelem získání nových poznatků o variantách asfaltových směsí typu SMA s různým podílem a kvalitou R-materiálu, nativním pojivem a přísadami použitých na konkrétním úseku silnice. Celkem bylo vyzkoušeno a prověřeno 17 různých variant a na základě zjištěných výsledků lze formulovat následující závěry:

- Přidání běžného R-materiálu v množství 30 % je možno považovat za maximum z hlediska průběhu čáry zrnitosti. Křivka má už spíše plynulý průběh a hodnoty se blíží mezním normovým požadavkům na propady na sítěch hrubých frakcí kameniva. Zapříčiňuje to menší mezerovitost směsi, což má následně negativní vliv na trvalé deformace. Z toho vyplývá, že zvyšování R-materiálu nad hranici 30 % je podmíněno selektivním frézováním vrstev vozovky a rozlišováním dle typů směsí.
- U směsí vyrobených v laboratoři znovuzískané pojivo v případě 30 % běžného R materiálu mělo nižší fázový úhel, což může znamenat menší modifikaci. Ta mohla být způsobena jednak vlastnostmi nativního pojiva, ale také tím, že celkové množství pojiva bylo více „naředěno“ pojivem z běžného R materiálu obsahujícího silniční pojivo. Horší výsledky byly patrné hlavně u vyšších teplot nad 60 °C. To znamená, že pojivo má nižší elasticitu a tím vyšší náchylnost na trvalé deformace v letních měsících. Z toho vyplývá, že 30 % běžného R-materiálu je hodně, nebo že je potřeba použít více modifikované nativní pojivo tak, aby bylo dosaženo požadované celkové modifikace jako bez přidání R-materiálu.
- V případě přidání R-mat SMA jsou čáry zrnitosti zalomené, což je žádoucí pro tyto směsi. Lze tedy říct, že frézování po vrstvách má smysl nejen z důvodu kvalitnějšího modifikovaného pojiva, ale i pro sestavení průběhu čáry zrnitosti.
- Nižší obsah jemných frakcí kameniva má důsledek na celkovou mezerovitost směsi. To dokazuje varianta směsi 10, u které se čára zrnitosti blíží minimálním normovým požadavkům na propady na jemných sítěch a směs vykázala velkou mezerovitost. To pravděpodobně zapříčinilo nižší modul tuhosti a lepší relaxaci vzorků v průběhu jednoosé zkoušky tahem pro určení odolnosti asfaltové směsi vůči tvorbě trhlin při nízkých teplotách. Vyšší mezerovitostí lze u obrusné vrstvy očekávat, že vlivem klimatických jevů může dojít k rychlejšímu zestárnutí směsi nebo její poruchovosti.
- Oživovací přísada nemá schopnost asfaltovému pojivu rovnoměrně navrátit jeho původní vlastnosti. Tento výsledek vyplývá z výrazně rozdílných výsledků

- empirických i funkčních zkoušek. Je důležité si uvědomit, který parametr je při návrhu zásadní a dle něj přizpůsobit výběr a dávkování oživovací přísady.
- Celulózová vlákna speciálně vyrobená pro směsi s obsahem R-materiálu s označením S-CEL RF 20/30/50 napuštěná oživovací přísadou neměla zásadní účinky na výsledné vlastnosti směsí.
 - Co se týče výsledných vlastností na znovuzískaných asfaltových pojivech, tak varianty obsahující jako základ polymerem modifikované pojivo oproti variantám obsahující silniční pojivo 50/70 modifikované pryžovým granulátem (dávkovaným suchým způsobem) dosáhly obecně lepších parametrů. Je nutné podotknout, že v případech extrakce pojiva ze směsí obsahující pryž zůstala na sítěch, tedy modifikace pryžovým granulátem modifikuje spíše asfaltovou směs než pojivo jako takové.
 - U jednoosé zkoušky tahem, pro určení charakteristik odolnosti vůči tvorbě trhlin při nízkých teplotách, asfaltové směsi se základním pojivem PmB vykázaly v průměru nižší hodnoty kritické teploty oproti směsím obsahujícím silniční pojivo 50/70 modifikované pryžovým granulátem. Z toho vyplývá, že modifikace pryžovým granulátem suchým způsobem není dostatečná ani z pohledu nízkoteplotních vlastností asfaltových směsí.
 - Pojiva modifikovaná polymerem vykazují nižší sklon hlavních křivek, což představuje jejich nižší teplotní citlivost, která je výhodná z hlediska vzniku trvalých deformací při vysokých teplotách a také z hlediska rizika vzniku křehké trhliny při nízkých teplotách.
 - V případě varianty 18 bylo dosaženo dobrého výsledku kritické teploty při porušení asfaltové směsi. To může poukazovat na modifikaci směsi polymerem modifikovaným pojivem obsaženým v R-materiálu, který byl dávkován v 50 % množstvím. Ačkoliv asfaltové pojivo v R-materiálu degradovalo v průběhu životnosti, lze vidět, že modifikace pojiva je stále přítomna. Lepší výsledky směsi 18 oproti směsím s nativním pojivem 50/70 modifikovaným pryžovým granulátem lze pozorovat i u stanovení odolnosti proti trvalým deformacím při 60 °C a na znovuzískaném pojivu na hodnotách bodu měknutí, hlavních křivek komplexních smykových modulů, fázovém úhlu při teplotě 60 °C, Blackově diagramu a modulu tuhosti za ohybu při -16 °C.
 - V rámci hodnocení asfaltových pojiv z pohledu odolnosti vůči trvalým deformacím se v posledních letech upřednostňuje hodnocení pomocí zařízení DSR testem MSCR, který nahrazuje stanovení bodu měknutí. V rámci vzájemného porovnání byly srovnány parametry MSCR a bod měknutí, kde koeficienty determinace R^2 se pohyboval v rozmezí 0,86 až 0,93. Zároveň lze říct, že hodnota R^2 roste s teplotou zkoušení během MSCR testu. Výsledek tedy napovídá, že i pomocí bodu měknutí lze popsat creepovou návratnost pojiva, která je důležitá z pohledu odolnosti vůči trvalým deformacím.
 - Z lineární závislosti mezi průměrným elastickým zotavením $R_{3,2}$ a fázovým úhlem při frekvenci 1,59 Hz vyplývá, že na výsledek zkoušky MSCR má

výrazný vliv hodnota fázového úhlu, která popisuje poměr mezi elastickou a viskózní částí komplexního smykového modulu.

- U závislosti mezi PRD_{AIR} a nevratnou smykovou poddajností při teplotě 60 °C vyšel koeficient determinace R^2 0,69, kdy s klesající hodnotou $J_{nr3,2}$ klesá i hodnota PRD_{AIR} a tím pádem je asfaltová směs, potažmo pojivo, odolnější vůči trvalým deformacím. Zároveň z korelace byla odvozena limitní hodnota $J_{nr3,2}$, kdy hodnotě 6 % PRD_{AIR} (která je nově zvažována jako normový požadavek) odpovídá $J_{nr3,2}$ 0,54. Lze říct, že se jedná o velmi blízkou hodnotu 0,5, která je v SHRP hodnocení uvedena pro extrémně těžkou dopravu. Z tohoto pohledu se jedná o poměrně přísnou limitní hodnotu. Například velmi těžké dopravě (1,0) by odpovídala hodnota PRD_{AIR} 7,4 a těžké dopravě (2,0) PRD_{AIR} 10,3.
- Mezi modulem tuhosti asfaltové směsi a komplexním smykovým modulem asfaltového pojiva při frekvenci 1,59 Hz a teplotě viskoelastického přechodu T_{VE} byla nalezena závislost R^2 0,82. Z toho vyplývá, že na modul tuhosti asfaltové směsi má výrazný vliv i velikost fázového úhlu.
- Závislost mezi teplotou porušení asfaltové směsi při jednoosé zkoušce tahem a kritickou teplotou z ohybové tuhosti pojiva měřenou BBR je možné popsat koeficientem determinace R^2 0,78. Lze tedy říct, že na nízkoteplotní vlastnosti asfaltové směsi má výrazný vliv použité asfaltové pojivo.

Z naměřených výsledků vyplývá, že přidání R-materiálu do směsi typu asfaltový koberec mastixový je možné. Pro zachování kvality směsi je důležité v případě vyššího dávkování selektivní frézování, tedy použití R-materiálu ze směsi typu SMA. V případě použití R-materiálu obsahujícího běžné silniční pojivo je nutné jako nativní pojivo zvolit pojivo více modifikované pro zajištění dostatečné modifikace celé směsi. Z hlediska čáry zrnitosti má použití běžného R-materiálu také své limity z důvodu zalomené čáry zrnitosti směsi typu SMA. Vhodné postupy pro dávkování R-materiálu do směsi typu SMA jsou shrnuty v certifikované metodice s názvem „Metodika aplikace R-materiálu do asfaltových směsí typu SMA (Stone mastix asphalt)“.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] AASHTO MP19 - 10: "Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test", American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 2010.
- [2] ANDERSON, R. J.; KING, G. N.; HANSON, D. I.; BLANKENSHIP, P. B. Evaluation of the Relationship between Asphalt Binder Properties and Non-Load Related Cracking. 2011.
- [3] COUFALÍK, Pavel. Reologické vlastnosti asfaltových pojiv. Brno, 2017. 213 s., 28 s. příl. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Petr Hýzl, Ph.D.
- [4] ČSN EN 12597 (657000). Asfalty a asfaltová pojiva - Terminologie. Praha: Český normalizační institut, 2014.
- [5] ČSN EN 12697-12 (736160). Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 12: Stanovení odolnosti zkušebního tělesa vůči vodě. Praha: Český normalizační institut, 2019.
- [6] ČSN EN 12697-22 +A1 (736160). Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 22: Zkouška pojíždění kolem. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [7] ČSN EN 12697-26 (736160). Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 26: Tuhost. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [8] ČSN EN 12697-28. Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 28: Příprava vzorků pro stanovení obsahu pojiva, obsahu vody a zrnitosti. Praha: Český normalizační institut, 2002.
- [9] ČSN EN 12697-46 (736160). Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 46: Nízkoteplotní vlastnosti a tvorba trhlin pomocí jednoosé zkoušky tahem. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [10] ČSN EN 12697-5 (736160). Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti. Praha: Český normalizační institut, 2010.
- [11] ČSN EN 12697-6 (736160). Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [12] ČSN EN 12697-8 (736160). Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 8: Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [13] ČSN EN 13108-5 (736140). Asfaltové směsi - Specifikace pro materiály - Část 5: Asfaltový koberec mastixový. 2. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [14] ČSN EN 13108-5 ED. 2 (736140). Asfaltové směsi - Specifikace pro materiály - Část 5: Asfaltový koberec mastixový. 2. Praha: Český normalizační institut, 2018.
- [15] ČSN EN 13108-8 ED. 2 (736140). Asfaltové směsi - Specifikace pro materiály - Část 8: R-materiál. Praha: Český normalizační institut, 2017.

- [16] ČSN EN 13702 (657103). Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení dynamické viskozity modifikovaných asfaltů metodou kužel a deska. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [17] ČSN EN 1426 (657062). Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení penetrace jehlou. Praha: Český normalizační institut, 2015.
- [18] ČSN EN 1427 (657060). Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení bodu měknutí - Metoda kroužek a kulička. Praha: Český normalizační institut, 2015.
- [19] ČSN EN 14770 (657091). Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu - Dynamický smykový reometr (DSR). Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [20] ČSN EN 14771 (657093). Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru (BBR). Praha: Český normalizační institut, 2013.
- [21] ČSN EN 933-1 (721193). Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 1: Stanovení zrnitosti - Síťový rozbor. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [22] GIERHART, Danny. Simple Talking Points for Sharing Why Your State Should Be Implementing MSCR [online]. 2011, 38 s. [cit. 2014-07-04].
- [23] Heavy Duty Surfaces: The Arguments for SMA [online]. 1. Nizozemsko: European Asphalt Pavement Association, 1998, s. 1-41 [cit. 2018-12-28]. ISBN 90-801214-8-7. Dostupné z: <http://eapa.org/wp-content/uploads/2018/07/The-arguments-for-SMA-1998.pdf>
- [24] KENNEDY, Thomas W., Gerald A. HUBER, Edward T. HARRIGAN, Ronald J. COMINSKY, HUGHES, Harold von QUINTUS a MOULTHROP. Superior performing asphalt pavements, superpave: the product of the SHRP asphalt research program. Washington, DC: Strategic Highway Research Program, National Research Council, 1994. ISBN 0-309-05821-X.
- [25] KOUDELKA, T.; COUFALÍK, P.; VARAUS, M.; COUFALÍKOVÁ, I. Rejuvenated Binders, Reclaimed Binders and Paving Bitumens, Are They Any Different?. In Chemo-Mechanical Characterization of Bituminous Materials. RILEM Bookseries. 1. Braunschweig: Springer International Publishing, 2018. s. 208-214. ISBN: 978-3-030-00475-0. ISSN: 2211-0844.
- [26] KRČMOVÁ, I.; HÝZL, P.; VARAUS, M.; NEKULOVÁ, P. Přidávání R-materiálu do asfaltových směsí. Výstavba a rehabilitácia asfaltových vozoviek - Asfaltové vozovky v kontexte tvorby a ochrany životného prostredia. Slovenská republika: Etela Bačenkova - Dom techniky, 2015. s. 33-38. ISBN: 9788023203288.
- [27] PANK ry2011. Päällystealan neuvottelukunta Ry. Mannerheimin角度. 2011.
- [28] SCHNEIDER, Bernd. Stone Mastic Asphalt: Pavement Technology for the New Millennium [online]. In: . s. 1-7 [cit. 2018-12-28]. Dostupné z: <https://1url.cz/7MHYW>
- [29] Stone Mastic Asphalt Details. In: Engineering and Technology [online]. 2013 [cit. 2018-12-28]. Dostupné z: <https://1url.cz/hMHYH>

- [30] Stone mastic asphalt. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-12-28]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Stone_mastic_asphalt
- [31] TDOK 2013:0529. Bitumenbundna lager. Kenneth Lind, Ivtbo. KRAV. 2015.
- [32] TP 170. Navrhování vozovek pozemních komunikací. Praha: Ministerstvo dopravy, 2010.
- [33] WAANDERS, G. a H. ELS. Splittmastixasphalt und Dränasphalt in den Niederlanden. Erfahrungen und Untersuchungen in der Provinz Overijssel. Asphalt. 1995, (4), 8-17.
- [34] ZTV Asphalt-StB 07. Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt. Berlin. 2007
- [35] ZTV/St Hmb.09. Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Straßenbauarbeiten in Hamburg. Hamburg. 2009.

ŽIVOTOPIS

Jméno a příjmení: Ing. Iva Coufalíková
Rodné příjmení: Krčmová
Datum narození: 9. 6. 1986
Bydliště: Svojsíkova 1343, Mladá Boleslav, 293 01
Telefon: + 420 608 684 962
E-mail: coufalikova.iva@gmail.com

Vzdělání

2012 – dosud Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební,
Obor konstrukce a dopravní stavby
Ph.D. studium
Téma: Použití recyklovaného materiálu do asfaltových směsí

2009 – 2012 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební,
Obor konstrukce a dopravní stavby
Dosažený titul: **Inženýr**
Diplomová práce: Okružní křižovatka ulic Jihlavská –
Kamenice - Dlouhá v Brně
Ocenění: **Pochvala děkana za vynikající zpracování
diplomové práce**

2010 – 2011 Universidade do Minho, Portugalsko
Erasmus studijní pobyt (2 semestry)

2005 – 2009 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební,
Obor konstrukce a dopravní stavby
Dosažený titul: **Bakalář**
Bakalářská práce: Úprava ulice Pražská - Mladá Boleslav

1997 – 2005 Gymnázium Mladá Boleslav, Palackého 191/1

Pracovní zkušenosti

06/2012 – dosud **Vysoké učení technické v Brně**
Výzkum v silniční laboratoři, provádění laboratorních
zkoušek, vyhodnocování protokolů, hlavní řešitelka
projektu TAČR

10/2017 – dosud **TPA ČR, s.r.o.**
Odborník na asfaltová pojiva a směsi

06/2009 – 09/2009
06/2008 – 09/2008
06/2007 – 09/2007

CR Projekt s.r.o.
Brigáda v projekční kanceláři, projektování dopravních staveb, pomoc při měření statickou a rázovou zatěžovací zkouškou

06/2006 – 09/2006

ŠKODA AUTO a.s.
Brigádnické práce na oddělené dopravních staveb

Jazykové znalosti

Český jazyk	Rodilý mluvčí
Anglický jazyk	Středně pokročilý
Německý jazyk	Začátečník

Pedagogická činnost

AR 2014/15	Cvičení z předmětu BM03 – Městské komunikace
AR 2013/14	Cvičení z předmětu BM03 – Městské komunikace
AR 2012/13	Cvičení z předmětu BM03 – Městské komunikace

Činnost ve prospěch ústavu a fakulty

Organizace 17. odborné konference Juniorstav 2015

Zahraniční pobyty na jiných pracovištích

06/2013	University of Greenwich krátkodobá stáž v rámci projektu MODO
04/2013	University of Greenwich krátkodobá stáž v rámci projektu MODO
02/2013	DVS (Rijkswaterstaat Dienst Verkeer en Schveepvaart) studijní stáž ve firmě

Účast na výzkumných projektech

09/2017 – dosud	Použití oživovacích přísad pro prodloužení životnosti recyklovaných vozovek s vysokým obsahem R-materiálu (TJ01000248) Financováno Technologickou agenturou ČR Hlavní řešitel
06/2015 – 02/2017	Recyklace asfaltových koberců mastixových a vývoj speciálního celulózového vlákna do těchto typů asfaltových směsí (TA04031328)

Financováno Technologickou agenturou ČR
Řešitel dílčích úkolů

- 04/2016 – 12/2016 **Recyklovaný materiál v obrusných vrstvách vozovek (FAST-S-16-3545)**
Financováno Vysokým učením technickým v Brně
Řešitel dílčích úkolů
- 06/2015 – 12/2016 **Zavedení zrychlené laboratorní metody podle prEN 12697-49 k měření protismykových vlastností povrchů vozovek a jejich vývoje v závislosti na dopravním zatížení pro snížení nehodovosti a prodloužení životnosti obrusných vrstev (TA02030479)**
Financováno Technologickou agenturou ČR
Řešitel dílčích úkolů
- 01/2016 – 12/2016 **Využití pokročilých zkušebních metod pro hodnocení asfaltových pojiv (FAST-J-16-2984)**
Financováno Vysokým učením technickým v Brně
Řešitel dílčích úkolů
- 01/2016 – 12/2016 **Vliv přidání visbreakingového zbytku na vlastnosti asfaltových pojiv (FAST-S-16-3732)**
Financováno Vysokým učením technickým v Brně
Řešitel dílčích úkolů
- 06/2012 – 02/2015 **Podpora sítě excelence výzkumných a akademických pracovníků v oblasti dopravy (CZ.1.07/2.3.00/20.0226)**
Financování OPVK
Řešitel dílčích úkolů
- 06/2012 – 12/2014 **Nové metody modelování v dopravě (CZ.1.07/2.3.00/20.0227)**
Financování OPVK
Řešitel dílčích úkolů
- 03/2013 – 06/2014 **Centre for Effective and Sustainable Transport Infrastructure (TE01020168)**
Financováno TAČR Centrum kompetence
Řešitel dílčích úkolů
- 07/2012 – 12/2012 **Využití autonomních systémů při dopravních průzkumech**

(FAST-S-12-39/1726)

Financováno Vysokým učením technickým v Brně
Řešitel dílčích úkolů

07/2012 – 12/2012

Validační studie evakuačních scénářů

(FAST-S-12-39/1719)

Financováno Vysokým učením technickým v Brně
Řešitel dílčích úkolů

07/2012 – 12/2012

Studium interakce dopravního proudu a pěších

(FAST-S-12-39/1753)

Financováno Vysokým učením technickým v Brně
Řešitel dílčích úkolů

Publikační činnost

NEKULOVÁ, P.; COUFALÍKOVÁ, I. Vliv přidaného R-materiálu v obrusných vrstvách na protismykové vlastnosti povrchu vozovky. In Sborník příspěvků konference JUNIORSTAV 2018. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2018. s. 285-291. ISBN: 978-80-86433-69-1.

KOUDELKA, T.; VARAUS, M.; DAŠEK, O.; COUFALÍKOVÁ, I. Recyklace asfaltových směsí s polymerem modifikovanými asfalty. Silniční obzor, 2018, roč. 2018, č. 7-8, s. 190-198. ISSN: 0322-7154.

KOUDELKA, T.; COUFALÍK, P.; VARAUS, M.; COUFALÍKOVÁ, I. Rejuvenated Binders, Reclaimed Binders and Paving Bitumens, Are They Any Different?. In Chemo-Mechanical Characterization of Bituminous Materials. RILEM Bookseries. 1. Braunschweig: Springer International Publishing, 2018. s. 208-214. ISBN: 978-3-030-00475-0. ISSN: 2211-0844.

COUFALÍK, P.; DAŠEK, O.; COUFALÍKOVÁ, I.; HÝZL, P. The Effects of Aging on Asphalt Binders Containing Visbreaking Residues. In Engineering Materials and Technology. 2017. s. 541-547. ISBN: 978-3-0357-1033- 5.

COUFALÍKOVÁ, I.; HÝZL, P.; NEKULOVÁ, P.; COUFALÍK, P.; DAŠEK, O. Use of Rejuvenators to Rejuvenate Asphalt Binders in RAPs. In Engineering Materials and Technology, ICMSET 2016. softcover. 2017. s. 547-553. ISBN: 978-3-0357-1033- 5.

HÝZL, P.; COUFALÍKOVÁ, I.; NEKULOVÁ, P.; DAŠEK, O.; COUFALÍK, P. Properties of rejuvenated RAPs from Stone Mastic Asphalt. In Applied Mechanics and Materials (Volume 863). softcover. Trans Tech Publications INC. Materials Science & Engineering, 2017. s. 129-134. ISBN: 978-3-03835-757- 5.

NEKULOVÁ, P.; COUFALÍKOVÁ, I.; DAŠKOVÁ, J. Nedostatky ČSN EN 12697-49 – Stanovení součinitele tření po ohlazení. Silniční obzor, 2017, roč. 78, č. 2, s. 39-42. ISSN: 0322-7154.

HÝZL, P.; COUFALÍKOVÁ, I.; VARAUS, M.; HRBEK, K.; PAZNA, R.; BOHUSLAV, J.; MONDSCHHEIN, P.; BURÁŇ, F.; URBÁNEK, M. Využití R-materiálu v asfaltových směsích typu SMA. In *Asfaltové vozovky 2017*. 1. České Budějovice: PRAGOPROJEKT, a.s., K Ryšánci 1668/16, 147 54 Praha 4, 2017. s. 1-10. ISBN: 978-80-906809-0-6.

COUFALÍK, P.; KOUDELKA, T.; COUFALÍKOVÁ, I.; DAŠEK, O. Možnosti širšího využití dynamického smykového reometru (DSR) pro hodnocení vlastností silničních asfaltů. *Silniční obzor*, 2017, č. 12, s. 327-331. ISSN: 0322-7154.

COUFALÍKOVÁ, I.; HÝZL, P.; COUFALÍK, P.; DAŠEK, O. Využití recyklovaného materiálu v asfaltových kobercích mastixových. In *Zborník Prednášok z konferencie Výstavba a rehabilitácia asfaltových vozoviek*. 1. Košice: Etela Bačenkova - Dom techniky, 2017. s. 39-43. ISBN: 978-80-232-0333- 2.

COUFALÍK, P.; DAŠEK, O.; HÝZL, P.; STEHLÍK, D.; KUDRNA, J.; KRČMOVÁ, I.; ŠPERKA, P. Resistance of asphalt binders to formation of frost cracks. In *Resources, Environment and Engineering II*. The Netherlands: CRC Press/ Balkema, 2016. s. 83-90. ISBN: 978-1-138-02894- 4.

NEKULOVÁ, P.; DAŠKOVÁ, J.; COUFALÍKOVÁ, I.; NEKULA, L. Vliv měřicí rychlosti na protismykové vlastnosti povrchu vozovky. *Silnice a železnice*, 2016, č. 1/ 2016, s. 10-12. ISSN: 1801-822X.

COUFALÍKOVÁ, I.; NEKULOVÁ, P. Vlastnosti asfaltového pojiva obsaženého v R materiálu. In *DOPRAVNÉ STAVBY A DOPRAVNÉ INŽINIERSTVO AKO SYSTÉMOVÉ RIEŠENIE XXI*. seminár Ivana Poliačka s medzinárodnou účasťou. Jasná: Kongres STUDIO, spol. s.r.o., 2016. s. 138-142. ISBN: 978-80-89565-27- 6.

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. *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 2016, roč. 11, č. 3, s. 222-232. ISSN: 1822-427X.

KRČMOVÁ, I.; KOUDELKA, T. Vliv přísad na stékavost asfaltového pojiva. In *Sborník abstraktů konference Juniorstav 2016*. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Veverí 331/95, 602 00 Brno, 2016. s. 1-6. ISBN: 978-80-214-5311- 1.

KRČMOVÁ, I. Posouzení celkové doby evakuace z daného objektu pomocí mikrosimulace. In *Sborník abstraktů Juniorstav 2015*. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2015. s. 1-13. ISBN: 978-80-214-4860- 5.

KRČMOVÁ, I.; HÝZL, P.; VARAUS, M.; NEKULOVÁ, P. Přidávání R- materiálu do asfaltových směsí. *Výstavba a rehabilitácia asfaltových vozoviek - Asfaltové vozovky v kontexte tvorby a ochrany životného prostredia*. Slovenská republiky: Etela Bačenkova - Dom techniky, 2015. s. 33-38. ISBN: 9788023203288.

STEHLÍK, D.; DAŠEK, O.; HÝZL, P.; COUFALÍK, P.; KRČMOVÁ, I.; VARAUS, M. Pavement construction using road waste building material – from a model to reality. Road Materials and Pavement Design, 2015, roč. 2015 (16), č. Supplement 1, s. 314-329. ISSN: 1468- 0629.

KRČMOVÁ, I.; COUFALÍK, P. Úprava pozemních komunikací pro nevidomé. In 17. odborná konference doktorského studia Juniorstav 2015. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Veverí 331/95, 602 00 Brno, 2015. s. 1-7. ISBN: 978-80-214-5091- 2.

NEKULOVÁ, P.; KRČMOVÁ, I.; DAŠKOVÁ, J.; NEKULA, L. Vliv měřicí rychlosti na protismykové vlastnosti povrchu vozovky. In Konference Asfaltové vozovky 2015. Praha: PRAGOPROJEKT, a.s., 2015. s. 1-7. ISBN: 978-80-903925-7- 1.

HÝZL, P.; DAŠEK, O.; KRČMOVÁ, I.; COUFALÍK, P. Zkušební normy pro asfaltové směsi - nové metody. In Sborník příspěvků konference Asfaltové vozovky 2015. České Budějovice: 2015. s. 1-6. ISBN: 978-80-903925-7- 1.

KRČMOVÁ, I.; APELTAUER, J. Kapacitní posouzení objektu pomocí softwaru Exodus. In Sborník anotací. Brno: Vysoké učení technické v Brně - Stavební fakulta, 2014. s. 179-180. ISBN: 978-80-214-4851- 3.

KRČMOVÁ, I.; COUFALÍK, P. Mobilita nevidomých. MEMO - městská mobilita, 2014, roč. 3, č. 3- 4, s. 34-38. ISSN: 1805- 9198.

HÝZL, P.; VARAUS, M.; STEHLÍK, D.; DAŠEK, O.; COUFALÍK, P.; KRČMOVÁ, I.; DAŠKOVÁ, J. Performance Characteristics of Asphalt Mixtures with Additives. In Applied Mechanics and Materials - Selected paper from the 3rd International Conference on Engineering and Technology Innovation ICETI 2014. 1. Taiwan: Trans Tech Publications, Switzerland, 2014. s. 82-86. ISBN: 978-3-03835-460- 4.

KRČMOVÁ, I.; APELTAUER, J. Kapacitní posouzení objektu pomocí softwaru Exodus. Brno: Vysoké učení technické v Brně - Stavební fakulta, 2014. s. 179-179. ISBN: 978-80-214-4851- 3.

KRČMOVÁ, I. Modelování evakuace osob z objektu. In Mobilita obyvatelstva 2014. 1. VUT, Fakulta stavební, Veverí 331/95, 662 37 Brno: VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemní komunikace, 2014. s. 51-62. ISBN: 978-80-214-4860- 5.

COUFALÍK, P.; KRČMOVÁ, I. Londýn na kole aneb metropole z jiného pohledu. MEMO - městská mobilita, 2014, roč. 3, č. 3- 4, s. 8-11. ISSN: 1805- 9198.

DAŠEK, O.; COUFALÍK, P.; HÝZL, P.; KUDRNA, J.; DAŠKOVÁ, J.; VARAUS, M.; STEHLÍK, D.; KRČMOVÁ, I. Design and Evaluation of Asphalt Mixtures for Stress Absorbing Pavement Layers. In Applied Mechanics and Materials - Selected paper from the 3rd International Conference on Engineering and Technology Innovation ICETI 2014. 1. Taiwan: Trans Tech Publications, Switzerland, 2014. s. 116-121. ISBN: 978-3-03835-460- 4.

APELTAUER, J.; VŠETEČKA, M.; KRČMOVÁ, I.; HOLCNER, P.; APELTAUER, T. Využití autonomních systémů při podrobném dopravně-inženýrském průzkumu křižovatek. Silniční obzor, 2013, roč. 2013, č. 3, s. 72-75. ISSN: 0322- 7154.

KRČMOVÁ, I.; MATUSZKOVÁ, R. Softwarové nástroje pro modelování chodců. MEMO - městská mobilita, 2013, roč. 2, č. 4, s. 26-29. ISSN: 1805- 9198.

APELTAUER, J.; KRČMOVÁ, I.; APELTAUER, T.; VŠETEČKA, M. Traffic flow microsimulation. In CMDTUR 2012. 1. Žilina: Žilinská uiverzita v Žilině, 2012. s. 401-403. ISBN: 978-80-554-0512- 4.

RADIMSKÝ, M.; SMĚLÝ, M.; APELTAUER, T.; VŠETEČKA, M.; KRČMOVÁ, I. Rozšíření dálnice D1 na šestipruhové uspořádání, stavba D1 01312 Brno, východ – Holubice, bezpečnostní audit DÚR. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2012. s. 1-15.

RADIMSKÝ, M.; SMĚLÝ, M.; KOSŇOVSKÝ, M.; APELTAUER, T.; KRČMOVÁ, I. Rozšíření dálnice D1 na šestipruhové uspořádání, stavba D1 01311 Brno, jih – Brno, východ, bezpečnostní audit DÚR. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2012. s. 1-13.

