



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

DISERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Iva Coufalíková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Hýzl, Ph.D.

BRNO 2019

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.

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.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

COUFALÍKOVÁ, Iva. *Použití R-materiálu do asfaltových směsí typu asfaltový koberec mastixový*. Brno, 2019. 160 s., 12 s. příl. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Petr Hýzl, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem disertační práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 31. 1. 2019

Ing. Iva Coufalíková
autorka práce

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu disertační práce Ing. Petrovi Hýzlovi, Ph.D., za čas a rady, které mně poskytl během doktorského studia a vypracování této disertační práce. Také za možnost spolupodílení se na výzkumných projektech a jeho vstřícnému přístupu během celé doby studia. Dále bych chtěla poděkovat Pavlovi Strakovi a Matějovi Šafránkovi za pomoc a ochotu při práci v laboratoři.

V neposlední řadě bych chtěla poděkovat své rodině, která mě podporovala během celého studia. Obzvláště bych ráda poděkovala svému manželovi.

Svoji práci bych ráda věnovala svým rodičům. Z celého srdce Vám děkuji.

OBSAH

1.	ÚVOD	10
2.	ASFALTOVÝ KOBEC MASTIXOVÝ (Stone Mastic Asphalt)	12
2.1.	Trvanlivost	14
2.2.	Bezpečnost	15
2.2.1.	Protismykové vlastnosti	15
2.2.2.	Viditelnost/aquaplaning	16
2.3.	Ekonomické zhodnocení	16
2.4.	Enviromentální benefity	16
2.4.1.	Recyklace	16
2.4.2.	Hluk	16
2.5.	Výroba, pokládka a hutnění	17
2.5.1.	Výroba	17
2.5.2.	Pokládka	18
2.5.3.	Hutnění	18
2.6.	Zahraníční zkušenosti a požadavky na směsi typu SMA	18
2.7.	Dosavadní vývoj a nové trendy ve využití směsi typu SMA	20
2.7.1.	Vývoj parametrů směsi typu SMA 11 S v německých předpisech	20
2.7.2.	SMA pro ložní vrstvy (SMA B C)	22
2.7.3.	Obrusná vrstva se sníženou hlučností z asfaltové směsi typu SMA NR/NH	23
2.7.4.	SMA pro vozovky s velkým dopravním zatížením	24
3.	MODIFIKOVANÉ ASFALTOVÉ POJIVO	25
3.1.	Polymerem modifikovaný asfalt (Polymer Modified Bitumen)	25
3.2.	Asfalt modifikovaný pryžovým granulátem (Crumb Rubber Modified Bitumen) ..	26
4.	RECYKLACE VOZOVEK	28
4.1.	R-materiál	28
4.2.	Vlastnosti R-materiálu	28
4.2.1.	Proces stárnutí asfaltového pojiva	30
4.2.2.	Degradace polymerem modifikovaného pojiva	31
4.2.3.	Oživení zestárlého pojiva v R-materiálu	32
4.3.	Recyklace na obalovně za horka	34
4.3.1.1.	Dávkování studeného R-materiálu přímo do míchačky šaržové obalovny	34
4.3.1.2.	Předeřtátí R-materiálu pomocí dvouplášťového bubnu	35

4.3.1.3.	Dávkování předeřátého R-materiálu v paralelním bubnu do šaržové obalovny.	35
4.3.1.4.	Metoda Drum – mix používaná v kontinuálních obalovnách	36
4.4.	Úprava R-materiálu při dávkování na obalovně	36
4.5.	Použití R-materiálu do za horka vyráběných asfaltových směsí	37
4.6.	Přidávání R-materiálu do asfaltových směsí typu SMA	41
4.6.1.	Zkušenosti v ČR	42
4.6.2.	Zkušenosti v zahraničí	42
5.	CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	45
6.	ZKUŠEBNÍ METODY	46
6.1.	Příprava vzorků pro zkoušení	46
6.1.1.	Homogenizace a kvartace podle ČSN EN 12697-28	46
6.1.2.	Stanovení zrnitosti podle ČSN EN 933-1	46
6.1.3.	Znovuzískání extrahovaného pojiva pomocí rotačního vakuového destilačního zařízení dle ČSN EN 12697-3	47
6.1.4.	Laboratorní výroba směsi podle ČSN EN 12697-35	48
6.1.5.	Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem podle ČSN EN 12697-30	49
6.1.6.	Příprava zkušebních těles zhutňovačem desek podle ČSN EN 12697-33+A1	49
6.2.	Zkušební metody popisující fyzikální vlastnosti asfaltových směsí	50
6.2.1.	Stanovení maximální objemové hmotnosti podle ČSN EN 12697-5	50
6.2.2.	Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa podle ČSN EN 12697-6	51
6.2.3.	Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí podle ČSN EN 12697-8	52
6.2.4.	Zkouška poježdění kolem podle ČSN EN 12697-22	53
6.2.5.	Nízkoteplotní vlastnosti a tvorba trhlin pomocí jednoosé zkoušky tahem podle ČSN EN 12697-46	54
6.2.6.	Stanovení modulu tuhosti asfaltové směsi podle ČSN EN 12697-26	54
6.3.	Zkušební metody popisující fyzikální vlastnosti asfaltových pojiv	55
6.3.1.	Stanovení penetrace jehlou podle ČSN EN 1426	55
6.3.2.	Stanovení bodu měknutí metodou kroužek a kulička podle ČSN EN 1427	56
6.3.3.	Stanovení dynamické viskozity podle ČSN EN 13702	57
6.3.4.	Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu dle ČSN EN 14770	57
6.3.5.	Zkouška MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery Test) dle ČSN EN 16659	58
6.3.6.	Stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru podle ČSN EN 14771	59
7.	POUŽITÉ MATERIÁLY PRO VÝROBU ASFALTOVÝCH SMĚSÍ TYPU SMA V LABORATOŘI	61

7.1.	Kamenivo	61
7.2.	R-materiál	61
7.3.	Asfaltové pojivo	62
7.3.1.	Nativní asfaltové pojivo.....	62
7.3.2.	Obsažené asfaltové pojivo v R-materiálech	63
7.4.	Oživovací přísada	64
7.5.	Celulózová vlákna	64
8.	LABORATORNĚ NAVRŽENÉ SMĚSI – NÁVRHY, VÝSLEDKY	66
8.1.	Laboratorní návrh směsí SMA 11S s různým podílem R-materiálu	66
8.2.	Výsledky zkoušek na asfaltových směších	69
8.2.1.	Stanovení odolnosti proti tvorbě trvalých deformací dle ČSN EN 12697-22.....	69
8.2.2.	Stanovení modulu tuhosti dle ČSN EN 12697-26.....	71
8.2.3.	Stanovení nízkoteplotních vlastností asfaltových směsí dle ČSN EN 12697-46 ...	72
8.3.	Výsledné vlastnosti asfaltových pojiv	73
8.3.1.	Stanovení penetrace jehlou podle ČSN EN 1426	74
8.3.2.	Stanovení bodu měknutí metodou kroužek a kulička podle ČSN EN 1427	74
8.3.3.	Stanovení dynamické viskozity podle ČSN EN 13702	75
8.3.4.	Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu podle ČSN EN 14770	75
8.3.5.	Stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru podle ČSN EN 14771	81
9.	REALIZACE ZKUŠEBNÍHO ÚSEKU	83
9.1.	Způsob realizace a použité materiály	84
10.	VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ ZKUŠEBNÍHO ÚSEKU	92
10.1.	Výsledky zkoušek na asfaltových směších	92
10.1.1.	Sítový rozbor kameniva dle ČSN EN 933-1.....	92
10.1.2.	Objemové hmotnosti a mezerovitosti dle ČSN EN 12697 části 5, 6 a 8	97
10.1.3.	Stanovení odolnosti proti tvorbě trvalých deformací dle ČSN EN 12697-22.....	97
10.1.4.	Stanovení modulu tuhosti dle ČSN EN 12697-26.....	102
10.1.5.	Stanovení nízkoteplotních vlastností asfaltových směsí dle ČSN EN 12697-46 ..	103
10.2.	Výsledné vlastnosti asfaltových pojiv	109
10.2.1.	Stanovení penetrace jehlou podle ČSN EN 1426	109
10.2.2.	Stanovení bodu měknutí metodou kroužek a kulička podle ČSN EN 1427	110
10.2.3.	Stanovení dynamické viskozity podle ČSN EN 13702	111
10.2.4.	Zkouška MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery Test) dle ČSN EN 16659 ...	113
10.2.5.	Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu dle ČSN EN 14770..	117

10.2.6.	Stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru podle ČSN EN 14771	125
10.2.7.	Obor plasticity znovuzískaných pojiv	128
10.3.	Vzájemné srovnání výsledků	129
11.	ZÁVĚR	137
12.	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	140
13.	SEZNAM TABULEK	149
14.	SEZNAM GRAFŮ	150
15.	SEZNAM OBRÁZKŮ	154
16.	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	156
17.	PŘÍLOHA – CERTIFIKOVANÁ METODIKA	160

1. ÚVOD

Historii silniční dopravy tvořily prašné a nijak neupravené pěšiny sledující stezky divokých zvířat. S růstem obchodu byly stezky srovnávány a rozšiřovány. Jejich nevýhodou však nadále byla jejich vysoká prašnost a obtížná schůdnost po deštích, jelikož se nacházely pod terénem a hromadila se v nich voda. Dalším vývojovým stupněm byly zpevněné cesty stavěné nad úroveň okolního terénu. Kamenné podloží umožňovalo odtok vody a cesty tak byly lépe schůdné i za zhoršeného počasí. Historie zpevněných cest sahá do dávných civilizací, zahrnujících Mezopotámii (4 000 př. n. l.) a civilizace v údolí Indu v Pákistánu a severní Indii (2 600 př. n. l.). V římském impériu byly zpevněné cesty stavěny hlavně k vojenským účelům, neboť původně bahnitě cesty přesuny vojsk zdržovaly. Mezi nejznámější patří Via Appia (viz Obrázek 1), jejíž stavba začala roku 312 př. n. l. [116, 130]



Obrázek 1: Via Appia – nejstarší dochovaná římská silnice [102]

Rozvoj novodobých vozovek jde ruku v ruce se zámořskými objevy, kdy sir Walter Raleigh se svojí družinou objevil asfaltové jezero na ostrově Trinidad, jehož materiál použil na opravu svých lodí. Začátkem 19. století John Loudon McAdam začal používat materiál na stavbu silnic z hlíny a štěrku, který je nám známý pod pojmem makadam. Z důvodu snížení prašnosti byl následně makadam zpevněný dehtem a pískem, čímž vznikl tarmak, předchůdce dnešních povrchů z asfaltových směsí. [111, 116]

Další vývoj byl urychlen rozvojem automobilové dopravy. V Německu počátek vozovek určených primárně pro automobilovou dopravu sahá do meziválečného období, kdy byla naplánovaná stavba silnice mezi Hamburkem, Frankfurtem a Švýcarskou Basilejí. Část této stavby byla realizována v 30. a 40. letech 20. století, ovšem její dokončení přerušila Druhá světová válka. V 50. letech 20. století se v Německu začaly budovat první tuhé (betonové) vozovky a později i netuhé z asfaltových směsí. V rámci České republiky se podařilo do roku 1970 vybudovat netuhou vozovku téměř do každé obce a po roce 1970 začala i výstavba dálniční sítě v ČR. [7]

V následujících letech rostla se zvyšující se intenzitou dopravy poptávka po kvalitnějších a únosnějších vozovkách, které zároveň zajišťují komfort cestujícím ve vozidle, bezpečnost, rovinnost povrchu a nízkou hlučnost.

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. [134] Ovšem díky svým

vlastnostem se brzy osvědčil 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. [98] První Evropská norma pro asfaltový koberek 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. [46]

V České republice se směs typu SMA začala používat v devadesátých letech 20. století. [65, 106] 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. [46]

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. [73]

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. [65]

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

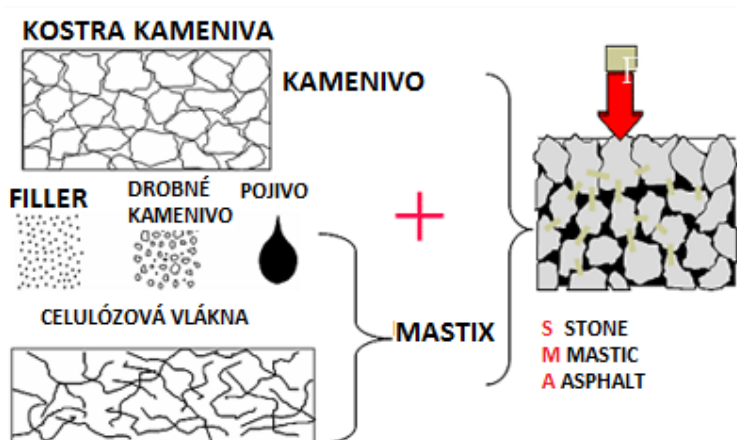
V rámci disertační práce je tato problematika řešena a na základě laboratorních návrhů je položen zkušební úsek s variantami směsi typu SMA 11 S obsahující různý podíl R-materiálu a přísad.

2. 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. [46]

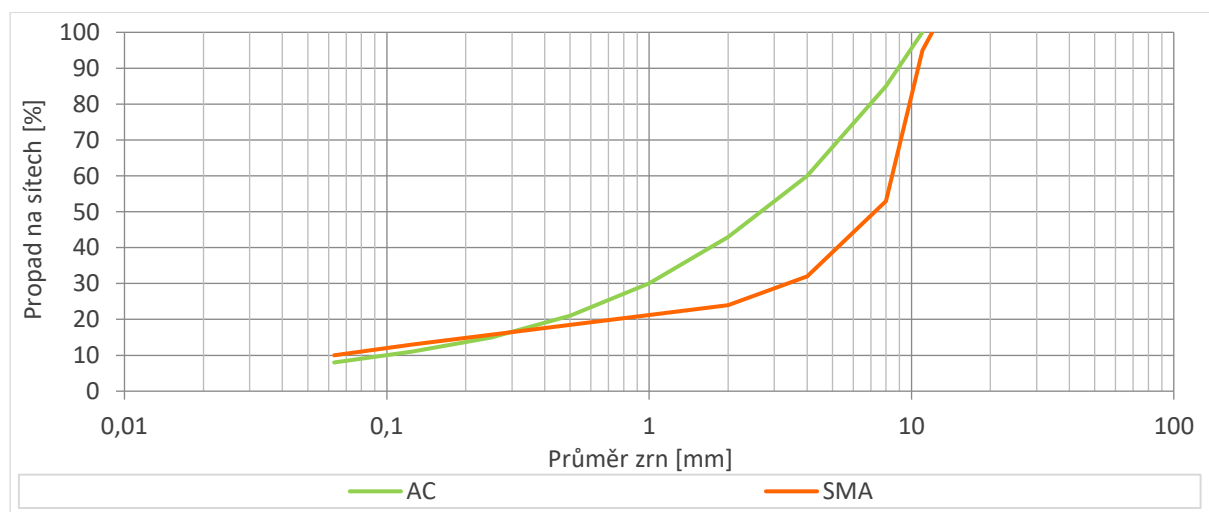
To znamená, že nosná kostra je tvořena nejhrubší a částečně též druhou nejhrubší frakcí kameniva. Zbývající kamenivo je výplňové a společně s asfaltovým pojivem a kamennou moučkou vytváří asfaltovou maltu nazývanou mastix, která vzájemně tmelí zrna nosné kostry.

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. [65]



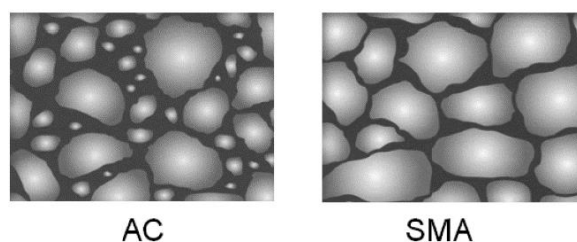
Obrázek 2: Složení asfaltového koberce mastixového [105]

Asfaltový beton (AC) má oproti tomu plynulou čáru zrnitosti, tedy na nosné kostře se podílejí všechny frakce kameniva. [42] Tím je dosaženo většího zaplnění prostoru, tedy menší mezerovitosti a menší velikosti jednotlivých mezer. Srovnání průběhu čar zrnitostí směsi typu AC a SMA je zobrazeno v Grafu 1.



Graf 1: Srovnání průběhu čar zrnitostí směsí SMA a AC

Průběh čáry zrnitosti směsi asfaltový beton je odvozen z Fullerovy paraboly pro maximální zrno ve směsi o velikosti 11 mm a průběh čáry zrnitosti směsi asfaltového koberce mastixového je odvozen z českých normových požadavků na směs typu SMA 11 S, respektive průměrných hodnot z limitů. Při srovnání obou čar zrnitosti lze pozorovat velký rozdíl v oblasti střední a hrubé frakce kameniva. Tento rozdíl je dobře patrný z Obrázku 3, kde lze vidět, že u směsi typu AC jsou jednotlivé frakce rovnoměrněji zastoupeny. Naproti tomu u směsi typu SMA převažuje hrubá kostra kameniva.



Obrázek 3: Rozdíl ve složení asfaltového betonu a asfaltového koberce mastixového [10]

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.

V případě vysoce zatížených vozovek je důležitá tloušťka vrstvy, která je zároveň závislá na největší frakci kameniva. Celková tloušťka vrstvy by měla být minimálně 2,5 x vyšší než největší frakce kameniva. Na základě dlouholetých zkušeností byla odvozena i maximální tloušťka mezi 20 mm pro SMA 6 (Nizozemsko) a 50 mm pro SMA 16 (Švédsko). [65]



Obrázek 4: Přenos zatížení dopravou směsí SMA pomocí kontaktních bodů v kostře kameniva [98]

Vzhledem k větší mezerovitosti směsi a tím větší volnosti pro přemístění jednotlivých zrn je důležitá boční podpora pro zajištění vnitřní stability směsi SMA. Tento mechanismus je důležitý jak ve vozovce, tak při testování v laboratoři. Testy bez boční podpory (jako např. Marshall, jednoosá komprese, zkouška ohybu, nepřímé tahové zkoušky apod.) za vyšších teplot nejsou vhodné pro tuto směs. Doporučující testy jsou zkouška pojíždění kolem dle EN 12697-22 [28] a cyklická zkouška v tlaku v triaxiální komoře dle EN 12697-25 [29].

Obsah asfaltového pojiva je ve srovnání s asfaltovým betonem 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.) [24]. 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. Celulózová vlákna jsou většinou dávkována v granulích (ručně nebo automaticky) přímo do míchačky obalovny. Dávkování celulózových vláken je založeno na zkušenostech z praxe nebo doporučení výrobce. Pro ověření jejich funkčnosti byla v Nizozemsku vynalezena testovací metoda dle Schellenberga, která je popsána v normě EN 12697-18 [27].

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.

2.1. Trvanlivost

Vysoká odolnost a trvanlivost je dosažena díky vodě nepropustnému mastixu. Mastix obsahuje velké množství asfaltového pojiva, a tím je snížena jeho celková degradace, která je silně závislá na tloušťce asfaltového filmu.

První obrusné vrstvy směsi typu SMA byly realizovány v polovině šedesátých let 20. století v Německu, vydržely díky velké tloušťce asfaltového filmu bez údržby až 30 let v provozu. V dalších zemích se směs typu SMA začala používat v polovině osmdesátých

až začátkem devadesátých let, kde bylo dosaženo stejných zkušeností s její odolností a trvanlivostí. [65]

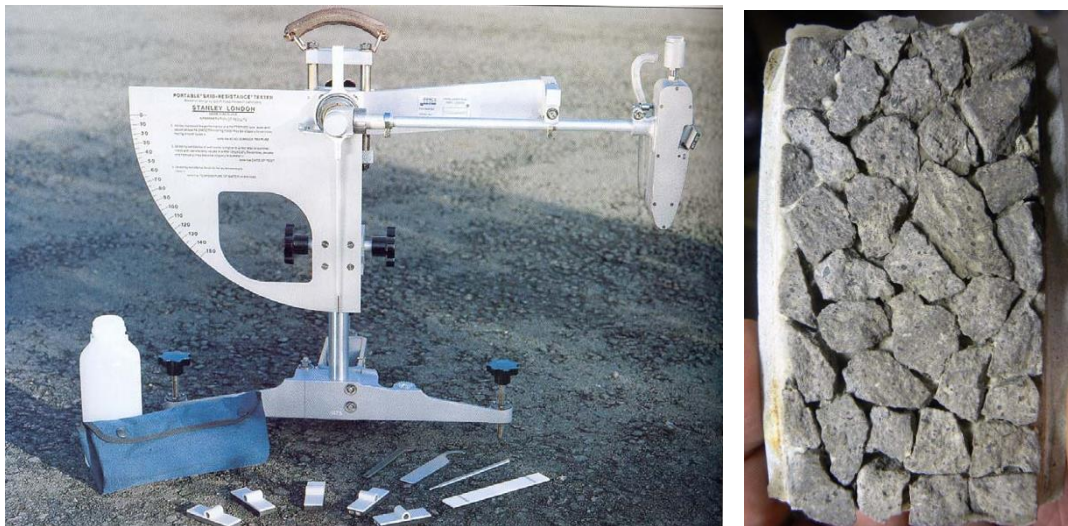
2.2. Bezpečnost

2.2.1. Protismykové vlastnosti

Dosažení požadovaných protismykových vlastností u směsi typu SMA závisí na dvou hlavních faktorech:

- druhu kameniva
- návrhu kostry kameniva a tím povrchové struktury

Tím, že se směs typu SMA používá jako ohrubná vrstva na vysoce dopravou zatížené vozovky a předpokládá se její dlouhá životnost, je zvýšen požadavek na odolnost kameniva vůči ohlazení. K určení odolnosti vůči ohlazení se používá tzv. hodnota PSV (Polished Stone Value) [22]. Zkušební metoda určující hodnotu PSV je dvoufázová zkouška zrychlené ohladitelnosti kameniva (Obrázek 5). Vyšší hodnoty PSV značí vyšší odolnost k ohlazení a jsou tedy příznivější. Nejvyšší hodnoty PSV mají horniny nad 65. [15] Hodnoty PSV ovlivňuje především mineralogické složení zkoušeného kameniva. Nejvyšší hodnoty mají horniny, které se skládají z více minerálů o rozdílné tvrdosti. Relativně novým ekvivalentem zkoušky PSV je německá zkouška měřící součinitel tření po ohlazení, dříve také nazývána Wehner/Schulze dle ČSN EN 12697-49 [38]. Při této zkoušce se používají větší ploché vzorky, které jsou vyrobeny ručně z kameniva nebo vývrtem přímo z vozovky. [63, 80]



Obrázek 5: Kyvadlo pro měření ohladitelnosti kameniva (vlevo), zkušební tělísko (vpravo) [129, 131]

V každé zemi jsou specifikovány požadavky na hodnoty PSV dle místních možností a zkušeností. Několik studií zabývajících se produkcí SMA uvedlo, že v případě použití stejného kameniva, směsi SMA mají stejné nebo lepší protismykové vlastnosti povrchu v porovnání s konvenčními směsmi. [85, 110, 122]

Výběrem hrubého kameniva zajišťujeme dobrou hloubku textury, ale důležitý je také výběr drobného kameniva, které spolu s asfaltovým pojivem vytváří mastix, který vyplňuje

mezery a tím zmenšuje hloubku textury. V případě předávkování mastixem může dojít k snížení protismykových vlastností. Skrz výběr směsi a její návrh lze regulovat strukturu povrchu tak, aby splnila požadavky pro vozovky s pomalou nebo rychlou dopravou.

V případě směsi typu SMA může po pokládce směs vykazovat zhoršené protismykové vlastnosti. To je způsobeno větší tloušťkou asfaltového filmu, která zajišťuje delší životnost směsi, ale v tomto případě může působit negativně. Praxí je ověřeno, že provozem je asfaltový film ojet a obnažená zrna následně zajišťují velmi dobré protismykové vlastnosti. [81]

V některých zemích, jako například v ČR, bylo zavedeno tzv. podrcení, kdy při posledním pojezdu válcem je do povrchu zaválcována frakce kameniva 1/3 mm. Ta zajišťuje dobré protismykové vlastnosti již po pokládce, než dojde k obnažení zrn dopravou na povrchu samotné asfaltové směsi.

2.2.2. Viditelnost/aquaplaning

Členitá struktura povrchu směsi typu SMA pomáhá k lepšímu rozptýlení vody a tím snížení rizika vzniku aquaplaningu. Dále je tím snížena tvorba louží a stříkání vody a tím je zajištěna lepší viditelnost vodorovného dopravního značení. Také díky členité textuře dochází k pohlcení světla od protijedoucích vozidel a tím k redukci oslnění. [65]

2.3. Ekonomické zhodnocení

Počáteční cena jednotlivých komponent směsi typu SMA z důvodu použití vysoce kvalitního kameniva, vyššího obsahu asfaltového pojiva, jeho modifikace, potřebě celulózových vláken a případného prodloužení míchacího času při výrobě na obalovně je vyšší než v případě směsi typu AC. Nicméně z praxe vyplývá, že v případě uvažování celého životního cyklu je směs typu SMA cenově výhodná.

Cena za údržbu je v případě směsi typu SMA menší jak v případě směsi typu AC díky vyšší odolnosti vůči trvalým deformacím, trhlinám a otěru. Při návrhu konstrukce vozovky by měly být brány v úvahu i tyto aspekty.

2.4. Enviromentální benefity

2.4.1. Recyklace

Směs typu SMA je až 100 % recyklovatelná. Vyfrézovaná nebo vybouraná směs může být po převozu na obalovnu opět použita do nové asfaltové směsi jako R-materiál (definice viz kapitola 4.1).

2.4.2. Hluk

Při použití směsi typu SMA dochází ke snížení hluku od dopravy díky její členité struktuře. V Tabulce 1 je uvedeno naměřené snížení hluku od dopravy v dB v případě užití směsi typu SMA oproti běžně používaným směsím v dané zemi. V případě podrcení asfaltové směsi typu SMA po její pokládce může dojít naopak ke zvýšení hluku, které se ale časem opět sníží vlivem ojetí zrn dopravou. [65]

Tabulka 1: Naměřené snížení hluku na směsích typu SMA versus běžně používané směsi v daných zemích [65]

Země	Max zrno směsi typu SMA	Naměřené snížení hluku [dB]	Srovnávaná směs (běžně používaná)
Německo v = 50 km/h	8	cca 2	AC 11
Nizozemsko v = 60 - 100 km/h	8	0,2 až 0,6	AC 16
	11	-0,5 až 0,8	
Velká Británie v = 70 - 90 km/h	6	cca 5,3	HRA 14 (Hot Rolled Asphalt)
	10	3,2 až 3,5	
	14	cca 2,7	

2.5. Výroba, pokládka a hutnění

K získání maximálních výhod směsi typu SMA je zapotřebí nejen dobrého návrhu směsi, ale také dobré kvality výroby a pokládky. Na základě toho lze dosáhnout jak ekonomicky, tak environmentálně zajímavého řešení. Během výroby směsi typu SMA by měl být dodržen správný postup řízení výroby, který je popsán v [44]. Výroba i pokládka směsi typu SMA je realizována pomocí standardního vybavení pro asfaltové směsi, ovšem v obou případech je důležitá určitá péče. [115]

2.5.1. Výroba

Pro výrobu směsí typu SMA může být použita šaržová i kontinuální obalovna. Díky specifické kostře směsi typu SMA, která byla popsána v úvodu, je velmi důležitá kontrola kameniva a sít, aby zastoupení jednotlivých frakcí bylo dle návrhu. V praxi to znamená, že mezerovitost je lineárně závislá na podílu kameniva zadrženo na síti o velikosti oka 2 mm. V případě směsi typu AC to neplatí a kolísání této frakce nemá takový vliv na výslednou mezerovitost směsi. [65]

Směs typu SMA je velmi náchylná na předávkování kostry kameniva mastixem. Pokud se tak stane, může dojít ke ztrátě stability směsi, znemožnění dobrého zaklínění hrubé frakce kameniva a celé zatížení od dopravy pak nese mastix. V případě použití nemodifikovaného pojiva mastix nemá žádnou odolnost vůči trvalým deformacím a dochází ke zhroucení kostry a tvorbě předčasných kolejí. Nedostatečné zaklínění frakcí kameniva může být také způsobeno nedostatečnou pracovní teplotou, která zapříčiní vyšší viskozitu asfaltového pojiva a tím zhoršenou zhutnitelnost směsi. Na to je náchylnější modifikované pojivo, které je obecně více viskózní, tedy pracovní teploty jsou požadovány vyšší.

Z důvodu vyššího dávkování asfaltového pojiva se používají celulózová vlákna, která se dávkuje ve formě granulí přímo do míchačky obalovny. Vlákna je důležité přidat tak, aby bylo zajištěno jejich řádné rozmělnění, resp. rozvláknění, aby plnily svoji funkci a díky velkému měrnému povrchu zajistily neztečení asfaltového pojiva z kostry kameniva.

V případě nedosažení požadované mezerovitosti směsi je doporučen tento postup pro směs typu SMA 11:

- Pro zvětšení mezerovitosti snížit podíl frakce kameniva 4/8 mm a o to zvýšit hrubé kamenivo. Neměnit podíl jemných frakcí.
- Pro zmenšení mezerovitosti zvýšit podíl frakce kameniva 4/8 mm a o to snížit hrubé kamenivo. Neměnit podíl jemných frakcí.

2.5.2. Pokládka

Pokládka finišerem a hutnění asfaltové směsi typu SMA je standardní, avšak vzhledem k silné kostře kameniva je hutnicí účinek omezený. To znamená, že předhutnění lištou finišeru je žádoucí a rovnost daná při její pokládce zůstane nezměněna. [65]

2.5.3. Hutnění

Pro dosažení požadované míry zhutnění je důležité mít k dispozici dostatečný počet válců. Hutnicí válec by měl najíždět co nejbližší k finišeru.

Pro směsi typu SMA se používají pouze ocelové válce. Na základě dlouhodobých zkušeností se začíná se statickým přejezdem, po kterém následuje přejezd s oscilací se střední hutnicí silou. Celkový počet pojezdů závisí na mezerovitosti a objemové hmotnosti směsi. [115]

Při hutnění vrstvy je také důležitá kontrola, aby nedošlo k přehutnění. Tím by došlo k podrcení zrn a oslabení kostry kameniva. Proto se nedoporučuje použití vibrace při hutnění.

2.6. Zahraniční zkušenosti a požadavky na směsi typu SMA

Rozdíly v národních specifikacích napříč Evropou jsou založeny na jiných klimatických podmínkách, rozdílném maximálním zatížení na nápravu, což souvisí s volbou mezerovitosti, obsahem asfaltového pojiva, jeho tuhostí a modifikací.

Nejpoužívanějšími typy jsou SMA 8, SMA 11 a SMA 16. V některých zemích mají ale své preference jako například Německo a Nizozemsko, kde používají SMA 5, SMA 8 a SMA 11; Švédsko SMA 4, SMA 8, SMA 11 a SMA 16; Velká Británie SMA 6, SMA 10 a SMA 14. V severských zemích používají převážně SMA 16 z důvodu lepší odolnosti vůči pneumatikám s hřeby. [65]

Obecně je doporučeno drcené kamenivo jak pro hrubé, tak drobné kamenivo, ačkoliv v některých zemích používají těžené drobné kamenivo. Pro vysoce dopravou zatížené vozovky jsou doporučeny hrubé frakce s vyhovujícím tvarovým indexem.

Pro návrh směsí je specifikováno povolené rozmezí kameniva propadlého na síť 2 mm a obsah pojiva. Tabulka 2 udává rozmezí frakcí kameniva propadených na sítích 0,063 mm a 2 mm a obsah asfaltového pojiva dle směsi typu SMA na základě zkušeností vybraných zemí Evropy.

Tabulka 2: Požadavky vybraných zemí Evropy na propady na sítích 0,063 mm a 2 mm a obsah asfaltového pojiva dle typu směsi SMA [65]

Typ SMA	Propad na síť 0,063 mm	Propad na síť 2 mm	Obsah pojiva
	[%]	[%]	[%]
5-6	6-12	27-40	5,3-7,4
8	6-12	20-35	6,1-7,0
9,5-10	6-11	21-32	5,0-6,4
11-12	6-11	18-32	5,0-7,0
14	6-11	15-30	6,1
16	5-10	15-30	6

Návrh směsi je obecně založen na volumetrických charakteristikách zhutněných Marshallových těles. V Dánsku jsou požadavky na VMA (mezerovitost směsi kameniva), VFB (stupeň vyplnění mezer pojivem) a V_m (mezerovitost tělesa). Jiné země mají požadavek pouze na mezerovitost zhutněného tělesa V_m . V Tabulce 3 jsou uvedeny rozsahy požadovaných mezerovitostí dle maximálního zrna směsi typu SMA, kde v jednotlivých zemích Evropy se může lišit výpočet dané mezerovitosti. [65]

Tabulka 3: Doporučená mezerovitost těles dle maximálního zrna ve směsi typu SMA [65]

Max zrno směsi typu SMA	V_m
	[%]
5-6	2-4
8	2-5
9,5-10	3-6
11-12	1-5
14	2-5
16	2-5

Doporučená tloušťka vrstvy je v jednotlivých zemích je rozdílná. Obecně směs typu SMA má vyšší mezerovitost mezi 4 - 8 %. V případě směsí okolo 3 % může být problém se stabilitou. V poslední době je ale tendence v některých zemích na základě zkušeností směs navrhovat uzavřenější, např. v Německu, kde lze snížit mezerovitost na 2 %, pokud směs splní požadavek na odolnost vůči trvalým deformacím.

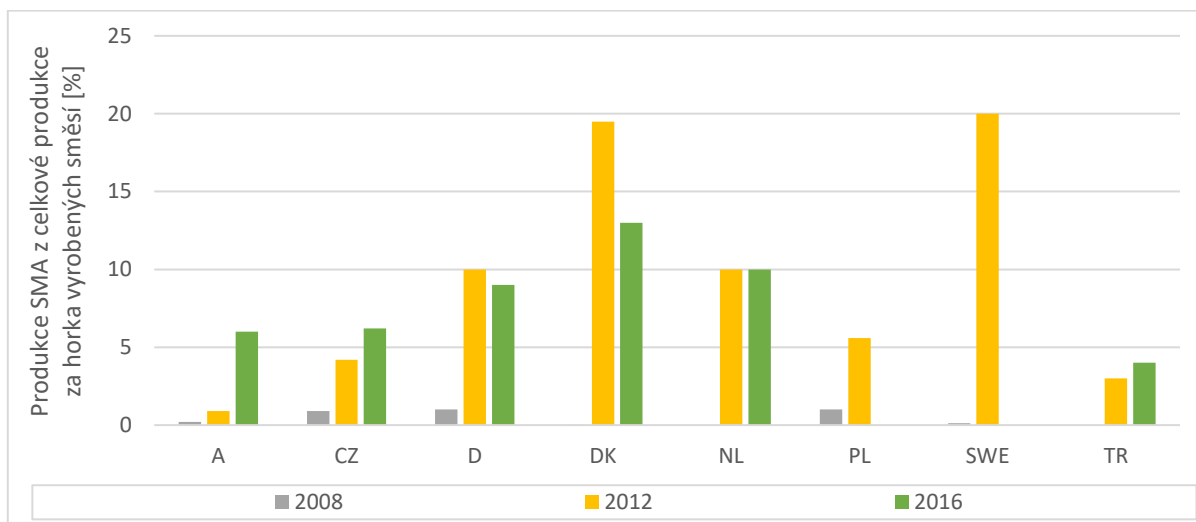
Některé země požadující minimální stupeň zhutnění položené směsi, např. Německo a Turecko ≥ 98 %, ČR ≥ 96 % a $\emptyset 98$ %, Maďarsko ≥ 97 %. Nelze aktuálně určit referenční hodnotu volumetrických vlastností vzhledem k velkým rozdílům mezi jednotlivými zeměmi. To může být způsobeno rozdílnými klimatickými podmínkami a maximálním zatížením na nápravu. Obecně lze říci, že v severní části Evropy, kde je vlhké a chladné počasí, je směs typu SMA navrhována spíše s menší mezerovitostí a větším obsahem asfaltového pojiva (většinou modifikovaného), který vyžaduje použití celulósových vláken. Zatímco v sušších

a teplejších oblastech je mezerovitost vyšší a obsah asfaltového pojiva menší, za použití tužších pojiv. [65]

V posledních letech byly tendence ke snížení obsahu pojiva a používání více viskózních pojiv pro dosažení lepší odolnosti vůči trvalým deformacím a zvýšení tuhosti směsi. Tento směr však ohrožuje trvanlivost směsi. Proto je lepší zachovat množství pojiva a přizpůsobit vlastnosti kameniva a čáru zrnitosti (např. větším použitím drceného kameniva) tak, aby bylo dosaženo větší míry zhutnění a tím zvýšení tuhosti směsi a její odolnosti vůči trvalým deformacím. Zvýšení množství pojiva naopak může pozitivně ovlivnit odolnosti proti únavě a rychlost stárnutí.

2.7. Dosavadní vývoj a nové trendy ve využití směsi typu SMA

Jak bylo zmíněno v úvodu, směs typu SMA byla původně vynalezena jako ohrusná vrstva pro vozovky, kde byly používány pneumatiky s hřeby. Díky její vysoké kvalitě povrchových vlastností s dlouhou životností v kombinaci s výbornou odolností vůči trvalým deformacím a trhlinám se její využití rozšířilo. V Grafu 2 je vidět procentuální zastoupení produkce směsi SMA v jednotlivých zemích v průběhu času. V roce 2012 lze vidět velký nárůst oproti roku 2008. V roce 2016 tento trend ve většině zemí pokračuje až na Dánsko, kde došlo k poklesu a Nizozemí, kde je stejné procentuální zastoupení jako v roce 2012. Lze konstatovat, že obliba směsi SMA roste. Díky její oblibě dochází k jejím úpravám pro rozšíření jejího využití, viz kapitoly dále.



Graf 2: Procentuální zastoupení produkce směsi SMA z celkové produkce za horka vyrobených směsí v jednotlivých zemích a letech [5]

2.7.1. Vývoj parametrů směsi typu SMA 11 S v německých předpisech

V Tabulce 4 jsou uvedeny požadavky na směs typu SMA 11 S napříč německými předpisy v čase. Směs typu SMA byla vyvinuta v Německu a v roce 1984 byl specifikován první předpis, který byl aktualizován v letech 1994, 1998, 2001, 2007 a 2013. Nejzásadnějšími změnami v průběhu jsou zvýšení obsahu asfaltového pojiva, mírnému uzavření směsi a zvýšení požadavku na míru zhutnění.

Tabulka 4: Požadavky na směs typu SMA 11 S v rámci německých předpisů [102]

SMA 0/11 S SMA 11 S	ZTV bit - StB 84	ZTV Asphalt - StB 94	ZTV Asphalt - StB 94/98	ZTV Asphalt - StB 01	TL/ZTV Asphalt - StB 07	TL/ZTV Asphalt - StB 07/13	
<i>Kamenivo</i>							
Podíl drcených zrn				C _{100/0} ; C _{90/1}	C _{100/0} ; C _{95/1} ; C _{90/1}	C _{100/0} ; C _{95/1} ; C _{90/1}	
Odolnost proti drcení	SZ ₁₈	SZ ₁₈	SZ ₁₈	SZ ₁₈	SZ ₁₈ / LA ₂₀	SZ ₁₈ / LA ₂₀	
Odolnost proti ohladitelnosti			PSV ≥ 50	PSV ≥ 50	PSV Specified (51)	PSV Specified (51)	
Minimální podíl jemných částic frakce 0/2 s E _{Cs} 35	[%]				100	100	
Tvarový index					Sl ₂₀	Sl ₂₀	
Index plochosti					Fl ₂₀	Fl ₂₀	
Zrnitost					G _F 85; G _C 90/10; G _C 90/15	G _F 85; G _C 90/10; G _C 90/15	
Odolnost proti zmrazování a rozmrazování					F ₁	F ₁	
<i>Kostra kameniva - propad na sítích</i>							
16	[%]	100	100	100	100	100	
11,2	[%]	90-100	90-100	90-100	90-100	90-100	
8	[%]	50-75	50-75	50-60	50-60	50-65	
5,6	[%]					35-45	
5	[%]	30-50	30-50	30-40	30-40		
2	[%]	20-30	20-30	20-25	20-27	20-30	
0,09	[%]	8-13	8-13	9-13	9-13		
0,063	[%]					8-12	
Poměr drceného k těžnému písku		≥ 1:1	≥ 1:1	1:0	1:0		
<i>Asfaltové pojivo</i>							
Asfalt, typ a gradace		B 65	B 65	B 65 (PmB 45)	50/70 (PmB 45)	25/55-55; 50/70	25/55-55; 50/70
Obsah	[%]	6,0-7,5	6,5-7,5	≥ 6,5	≥ 6,5	B_{min} 6,6	B_{min} 6,7
Stabilizační přísady (celulóznová vlákna)	[%]	0,3-1,5	0,3-1,5	0,3-1,5	0,3-1,5	0,3-1,5	0,3-1,5
<i>Asfaltová směs</i>							
Teplota hutnění marshallových těles	[°C]	135 ± 5	135 ± 5	135 ± 5	135 ± 5		
Minimální obsah mezer marshallových těles	[%]	2,0	2,0	3,0	3,0	V _{min} 2,5	V_{min} 2,5
Maximální obsah mezer marshallových těles	[%]	4,0	4,0	4,0	4,0	V _{max} 3,0	V_{max} 3,0
Mezery vyplněné asfaltem VFB						je třeba specifikovat	je třeba specifikovat
Hloubka koleje						je třeba specifikovat	je třeba specifikovat
<i>Charakteristika vrstvy</i>							
Tloušťka	[cm]	2,5-5,0	2,5-5,0	3,5-4,0	3,5-4,0	3,5-4,0	3,5-4,0

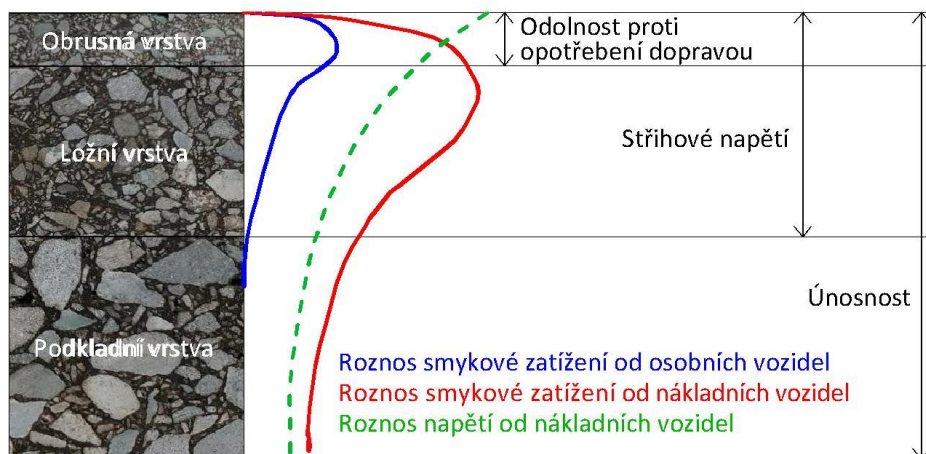
Množství směsi	[kg/m ²]	60-125	60-125	85-100	85-100	85-100	85-100
Míra zhutnění	[%]	≥ 97	≥ 97	≥ 97	≥ 97	≥ 97	≥ 98
Mezerovitost	[%]	≤ 6,0	≤ 6,0	≤ 6,0	≤ 6,0	≤ 5,0	≤ 5,0
Podrcení				0,5-1,0 kg/m ² bez nebo s mírným obalením vysoce kvalitního písku/štěrku 1/3 mm	0,5-1,0 kg/m ² bez nebo s mírným obalením drceného kameniva (C _{90/1}) 1/3 mm	0,5-1,0 kg/m ² bez nebo s mírným obalením drceného kameniva 1/3 mm	0,5-1,0 kg/m ² bez nebo s mírným obalením drceného kameniva 1/3 mm
				1,0-2,0 kg/m ² bez nebo s mírným obalením vysoce kvalitního štěrku 2/5 mm	1,0-2,0 kg/m ² bez nebo s mírným obalením drceného kameniva (C _{90/1}) 2/5 mm	1,0-2,0 kg/m ² bez nebo s mírným obalením drceného kameniva 2/5 mm	1,0-2,0 kg/m ² bez nebo s mírným obalením drceného kameniva 2/5 mm

2.7.2. SMA pro ložní vrstvy (SMA B C)

Směs typu SMA se v posledních letech začíná uplatňovat i do ložních vrstev (stone mastic asphalt for binder courses = asfaltový kobrec mastixový pro ložní vrstvy). Pro ložní vrstvu nejsou povrchové vlastnosti relevantní jako v případě obrusné vrstvy. V ložní vrstvě jsou kladeny požadavky na dobrou odolnost vůči trvalým deformacím a vysokou odolnost vůči únavě. Navíc musí být vodě nepropustná.

Trvanlivost ložních vrstev je často dosahována použitím tvrdších asfaltových pojiv a jejich menším obsahem, což ale zapříčiňuje větší mezerovitost směsi. Tím jsou pak ložní vrstvy náchylnější k průniku vody. To lze pak vidět při opravách po odstranění obrusné vrstvy, že jsou poruchy prokopírovány do ložní a podkladní vrstvy.

V ložních vrstvách zatížení od provozu indukuje vysoké smykové napětí, které způsobuje trvalé deformace. Nejvyšší smykové napětí se obvykle objevuje v hloubce 20 až 70 mm pod povrchem (viz Obrázek 6). V některých klimatických podmínkách může být maximální smykové napětí i níže.



Obrázek 6: Průběh zatížení ve vozovce od dopravy [104]

Praktické zkušenosti ve Švédsku a Německu ukazují, že použití směsi SMA jako ložní vrstvy má vynikající výsledky. Splňuje všechny požadavky (stabilita, trvanlivost) kladené na ložní vrstvy, kde je přenášeno vysoké zatížení od dopravy. Pokládka a hutnění směsi SMA B C je prováděno pomocí standardního vybavení. V Tabulce 5 jsou uvedeny německé požadavky na směs typu SMA B C s maximální velikostí zrna 22 a 16 mm.

Tabulka 5: Německé požadavky na typy směsí do ložní vrstvy [104]

Typ směsi		SMA 22 B C	SMA 16 B C
Tloušťka vrstvy	[cm]	9,5 - 12,0	6,0 - 9,5
Míra zhutnění vrstvy	[%]	≥ 98	
Mezerovitost Marshallových těles	[%]	3,0 – 4,0	
Mezerovitost vrstvy	[%]	1,5 - 5,5	

2.7.3. Obrusná vrstva se sníženou hlučností z asfaltové směsi typu SMA NR/NH

Redukci hluku od styku pneumatiky s vozovkou lze významně zlepšit pomocí vhodné zvolené směsi. Proto jsou již delší dobu prováděny pokusy o vytvoření nové obrusné vrstvy nebo úpravy stávající tak, aby splnila tato kritéria. Úprava směsi SMA s ohledem na snížení hluku při pojezdu dopravou (SMA NR = stone mastic asphalt noise reducing v ČR označované jako SMA NH) byla úspěšně aplikována v Rakousku, Dánsku, Německu atd. V ČR je tato směs popsána v technických podmínkách TP 259 [121], které vešly v platnost v listopadu 2017.

Úprava spočívá v jiném poměru frakcí kameniva, velikostí maximálního zrna kameniva a obsahu asfaltového pojiva. Složení kostry kameniva vede k větší mezerovitosti, která zajišťuje snížení hluku od styku pneumatiky s vozovkou při pojezdu dopravou a zároveň splňuje dobrou makrotexturu vozovky. Německé požadavky na směs typu SMA NR jsou uvedeny v Tabulce 6, které jsou obdobné i v ČR. V porovnání s běžnou směsí typu SMA dochází k minimálním úpravám, tedy výroba směsi typu SMA NR je jednoduchá, dobře se pokládá a hutní.

Tabulka 6: Požadavky na asfaltové směsi typu SMA NR (Německá a Česká republika) [65]

Typ směsi		SMA 8 NR	SMA 5 NR
Tloušťka vrstvy	[cm]	2,5-4,0 (ČR: 2,5-4,0)	2,0-3,0 (ČR: 1,5-3,5)
Míra zhutnění	[%]	≥ 97	
Mezerovitost	[%]	9,0-14,0 (ČR: 8,0-14,0)	
Rovinatost (4 m latí)	[mm]	≤ 3,0	

Další rozdíl mezi asfaltovou směsí typu SMA NR a směsí typu SMA je ten, že po pokládce směs typu SMA NR nesmí být podrcena díky velké mezerovitosti.

K současnosti jsou výsledky směsi typu SMA NR přesvědčivé ohledně životnosti a redukce hluku, v Německu uvádí snížení o více jak 4 dB(A), studie z Nového Zélandu uvádí

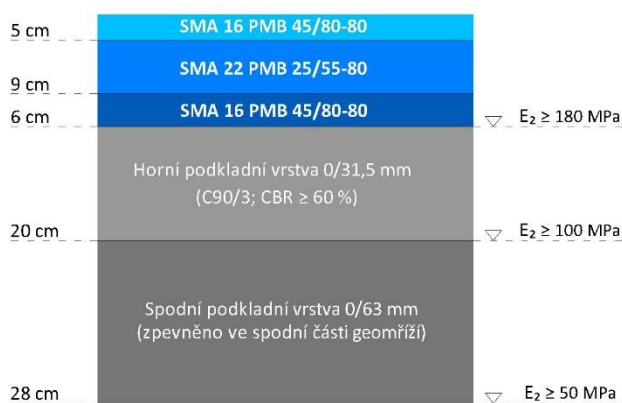
3 dB(A). Tedy se jedná o dobrou alternativu v případě potřeby snížení hluku od provozu a zajištění dobré životnosti směsi. [64]



Obrázek 7: Gyrátorem zhutněné těleso SMA NR 8 (Dánsko) [82]

2.7.4. SMA pro vozovky s velkým dopravním zatížením

Novým trendem pro vozovky s pomalou dopravou a velkým dopravním zatížením, kde se běžně používá tuhá vozovka, je možnost nahradit ji pomocí asfaltové směsi typu SMA s použitím vysoce modifikovaného asfaltového pojiva Higly Modified Asphalt (HiMA) ve všech konstrukčních vrstvách (podkladní, ložní a obrusná). V areálu rafinérie v městě Gdaňsk byla taková konstrukce provedena v únoru 2016 v rámci rozvojového programu Efektivní rafinace (EFRA). V areálu je ročně přepravováno 300 000 tun koxu pomocí nákladní dopravy, která jezdí maximálně rychlostí 20 km/h, což má dlouhodobě nepříznivý vliv na konstrukci vozovky. Položená konstrukce vozovky v rámci areálu je znázorněná na Obrázku 8.[95]



Obrázek 8: Položená konstrukce vozovky v areálu rafinérie [95]

3. MODIFIKOVANÉ ASFALTOVÉ POJIVO

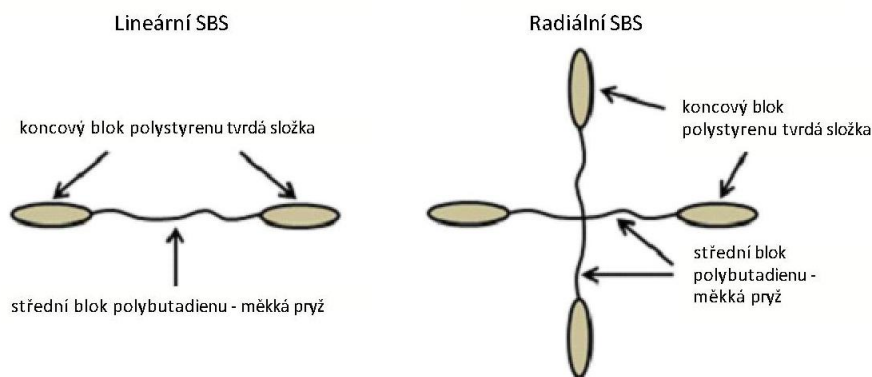
Asfaltové pojivo je viskoelastický materiál, který je za vyšších teplot tekutý a měkký a za nižších tvrdý a křehký. Pro dosažení rozšíření oboru použitelnosti, tedy vyšší odolnosti vůči trvalým deformacím a zlepšení nízkoteplotních vlastností lze dojít jeho modifikací.

Modifikovaný asfalt je asfaltové pojivo, jehož reologické vlastnosti jsou při výrobě upraveny použitím jednoho nebo více chemických činidel. Mezi chemické činidlo řadíme přírodní kaučuk, syntetické polymery, vosky, síru a určité organokovové sloučeniny, ne však kyslík nebo katalyzátory oxidace, jako chlorid železitý, kyselina fosforečná, oxid fosforečný. Vlákna a anorganické prášky („filery“) se nepovažují za modifikátory asfaltu. [24]

3.1. Polymerem modifikovaný asfalt (Polymer Modified Bitumen)

Je asfaltové pojivo, jehož reologické vlastnosti jsou při výrobě upraveny polymerem. Polymery rozlišujeme podle charakteru deformace na plastomery a elastomery. [197]

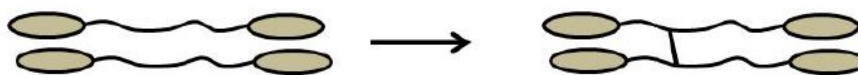
Mezi elastomery nejčastěji používané k modifikaci patří styren-butadien-styren (SBS), označovaný také jako termoplastický kaučuk. Způsobuje primárně nárůst tažnosti a zvýšení teploty bodu měknutí. Hlavními typy SBS polymerů používanými v silničním stavitelství jsou jeho lineární a radiální (rozvětvená) forma (viz Obrázek 9). Vždy obsahují střední-blok polybutadienu ukončený koncovými-bloky polystyrenu. Polystyren udává sílu polymeru, zatímco butadiene jeho elasticitu. [91]



Obrázek 9: Lineární a radiální SBS [123]

Reakce, ke kterým dochází u polymerů SBS při zvýšených teplotách, mohou být extrémně složité a mohou zahrnovat bloky polystyrenu i polybutadienu.

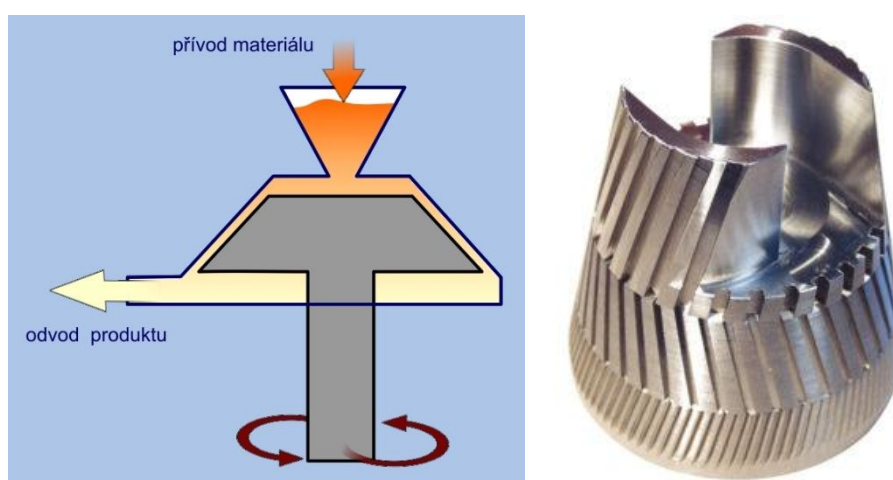
Dalšími, dnes už ne tolik používanými elastomery, jsou styren-butadien (SBR). Nevýhodou těchto modifikátorů je náchylnost k dekantaci, tj. vypadávání polymeru z modifikovaného asfaltu. Proto je nutné tato pojiva během skladování míchat, popř. přečerpávat. Zesíťování a tím pádem stabilizování pojiv modifikovaných elastomery je možné provést přidávkou síry, která má schopnost vytvořit tzv. sírné můstky, které dokáží zabránit dekantaci. [69, 88]



Obrázek 10: Zjednodušené zobrazení síťování [123]

Mezi plastomery vhodné pro modifikaci řadíme ataktický polypropylen (APP), polyetylen (PE), etylen-vinyl-acetát (EVA), aj. [69, 88]

Výroba polymerem modifikovaných asfaltových pojiv probíhá v koloidním mlýnu za vysoké teploty a smykového napětí. Na Obrázku 11 je znázorněn koloidní mlýn, kde hlavní částí přístroje je kuželovitý stator, ve kterém se otáčí rotor umístěný na svislé hřídeli. Štěrbina, kterou je materiál protlačován, je velmi malá a rotor se otáčí velkou rychlostí. Materiál je rozdroben především třením, v menší míře nárazy. Následně odchází výpustným otvorem. [94]



Obrázek 11: Koloidní mlýn [72, 94]

Polymerem modifikované asfalty se označují zkratkou PmB s rozmezím penetrace při 25 °C a minimálním bodem měknutí dle ČSN EN 14023. [19, 49]

3.2. Asphalt modifikovaný pryžovým granulátem (Crumb Rubber Modified Bitumen)

Pojivo ze silničního asfaltu, pryžového granulátu získaného zpracováním použitých pneumatik, případně etylen-propylen-dienového kaučuku (EPDM) a dalších přísad, představující heterogenní směs skládající se ze vzájemně působících fází nabobtnalých částic pryžového granulátu a asfaltové matrice se specifickými fyzikálně mechanickými vlastnostmi. [20]

Přidání pryžového granulátu lze provést: [78]

- a) *Mokrým procesem* – je vyrobeno asfaltové pojivo modifikované pryžovým granulátem
- b) *Suchým procesem* – je vyrobena asfaltová směs modifikovaná pryžovým granulátem

ČSN 65 7222-2 [20] rozlišuje základní, tzv. terminálový typ CRMB s typickým obsahem pryže 5 % až 15 % z celkového pojiva, které jsou vhodné k výrobě asfaltových směsí dle výrobních norem EN 13108-1 [42], EN 13108-2 [43], EN 13108-5 [46] a ČSN 73 6121 [21] místo silničních asfaltů jako pojiva se zlepšeným chováním.

Druhým typem je CRMB se zvýšenou viskozitou a s typickým obsahem pryže 15 % až 25 % z celkového pojiva vyráběný převážně ve speciálních mísicích zařízeních (Obrázek 12) na obalovných asfaltových směsích. Typ CRMB se zvýšenou viskozitou se z důvodu možných obtíží při přepravě a skladování přednostně vyrábí na obalovně asfaltových směsích. Je nestabilní a nevhodný k přepravě a skladování. V České republice pro něj platí Technické podmínky 148 Hutněné asfaltové vrstvy s asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem. [118]



Obrázek 12: Mísicí zařízení pro výrobu asfaltového pojiva modifikovaného pryžovým granulátem

Asfalty modifikované pryžovým granulátem se označují zkratkou CRMB s rozmezím penetrace jehlou při 25 °C a minimálním bodem měknutí. Dále se připojuje písmeno N u základního typu nebo písmeno V u typu se zvýšenou viskozitou. [20]

4. RECYKLACE VOZOVEK

Česká legislativa rozeznává dva druhy odpadů: [120, 132, 133]

- 1) **Stavební a demoliční odpad (SDO)** – je ve smyslu vyhlášky č. 294/2015 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu ve znění § 2 písm. a) vyhlášky č. 61/2018 Sb., inertní odpad, který nemá nebezpečné vlastnosti a u něhož za normálních klimatických podmínek nedochází k žádným významným fyzikálním, chemickým nebo biologickým změnám.
- 2) **Recyklovaný stavební materiál – recyklát (RSM)** – je materiálový výstup ze zařízení které zpracovává SDO a ostatní odpad na velikostní frakce a změněnou zrnitost. Dělí se na recyklát z betonu, z vozovek, ze zdiva, směsný, asfaltový a R-materiál.

4.1. R-materiál

ČSN EN 13108-8 definuje znovuzískanou asfaltovou směs (site-won asphalt) 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. [47]

V České republice R-materiál označujeme zkratkou RA vycházející z anglické odborné literatury jako Reclaimed Asphalt (v anglické literatuře se používá spíše označení RAP – Reclaimed Asphalt Pavement). Před tuto značku se uvádí označení zrnitosti R-materiálu U v mm a po ní následuje označení zrnitosti kameniva d/D také v mm. Celý název tedy vypadá takto U RA d/D, kde d je velikost spodního síta kameniva a D je velikost horního síta kameniva použitého v R-materiálu v mm. U je nejmenší velikost síta v milimetrech, kterým propadne 100 % zrn recyklátu.

Např.: 22 RA 0/16 mm - podle tohoto označení se jedná o R-materiál, jehož kamenivo má velikost horního síta 16 milimetrů a všechny zrna recyklátu propadnou sítem o velikosti ok 22 milimetrů.

4.2. Vlastnosti R-materiálu

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. Podle normy ČSN EN 13108-8 [47] je do nové asfaltové směsi vhodný ten R-materiál, jehož pojivo je převážně ze silničního asfaltu

a nevykazuje v průměru hodnotu bodu měknutí vzorků vyšší jak 70 °C. U jednotlivých vzorků potom nesmí být tato hodnota vyšší než 77 °C. Obdobně je možné zpracovávat R-materiál, jehož minimální hodnota penetrace je rovna nebo vyšší jak 10 x 0,1 mm a průměrná všech vzorků rovna nebo vyšší jak 15 x 0,1 mm.

Počet vzorků, na kterých se stanovují sledované parametry, vychází z množství zásoby upraveného R-materiálu v tunách podělené 500 t a zaokrouhlené nahoru, s minimálním počtem vzorků 5. V případech, kdy je R-materiál zamýšlen pro použití pouze procentuálním přidáním menším než 20 % v asfaltových směsích pro podkladní a ložní vrstvy vozovek a procentuálním přidáním menším než 10 % v asfaltových směsích pro obrusné vrstvy, může být četnost odběrů vzorků stanovena na jeden vzorek výchozího produktu na 2000 t. [47] Stanovení sledovaných parametrů je nutné provádět na zhomogenizovaném R-materiálu z různých míst.

Mezi sledované parametry dle ČSN EN 13108-8 [47] patří přítomnost, obsah a druh cizorodých látek, obsah pojiva, druh (silniční/modifikované/tvrký silniční asfalt) pojiva a v případě požadavku jeho vlastnosti (penetrace, bod měknutí, viskozita dle EN 12596), obsah černouhelného dehtu, respektive množství polycyklických aromatických uhlovodíků (PAU), zrnitost a v případě požadavku druh a vlastnosti kameniva.

Tedy kamenivo obsažené v R-materiálu běžně není nijak sledováno kromě procentuálního propadu na sítěch. V případě vyššího dávkování R-materiálu do obrusných vrstev s větším dopravním zatížením, kde je kladen důraz na ohladitelnost a otlukovost kameniva, to může způsobit problémy. V rámci projekt FAST-J-17-4780 [58] byl ověřen vliv přítomnosti R-materiálu na celkové protismykové vlastnosti asfaltové směsi pomocí součinitele tření po ohlazení dle ČSN EN 12697-49 [38]. Výsledky jsou popsány v článku [80] a diplomové práci [9].



Obrázek 13: Zkušební tělesa pro zkoušku dle ČSN EN 12697-49 [9, 38]

Probíhající studií zabývající se problematikou vlivu přítomnosti kameniva s nižší hodnotou PSV (v různém poměru ke kamenivu s vyšší hodnotou PSV) na výsledné protismykové vlastnosti asfaltové směsi je projekt TH02030194 [114].

4.2.1. Proces stárnutí asfaltového pojiva

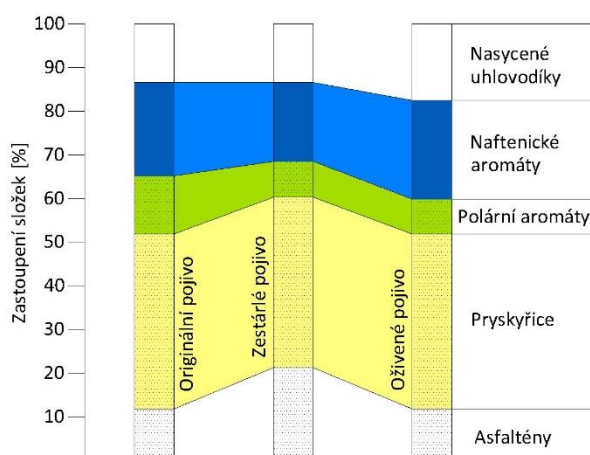
Asfaltové pojivo je koloidní směs vysoce molekulárních uhlovodíků, v které je zastoupeno až kolem tisíce různých sloučenin. Dle SARA (= Saturate, Aromatic, Resin and Asphaltene) analýzy ho můžeme rozdělit na tekuté složky maltény (pryskyřice - polar compounds, polární aromáty - first acidaffins, naftenické aromáty - second aciffins a nasycené uhlovodíky - saturated hydrocarbons) a pevné částice – asfaltény (Obrázek 14). [136]



Obrázek 14: Jednotlivé komponenty asfaltového pojiva [136]

Jelikož asfaltové pojivo patří mezi organické látky, mění v průběhu životnosti své vlastnosti, které mají vliv na trvanlivost asfaltových vozovek. Z tohoto důvodu je nezbytné sledovat vlastnosti jednotlivých pojiv nejen před vlastní výrobou asfaltové směsi, ale taktéž po výrobě, přepravě a pokládce asfaltové směsi a dále v průběhu životnosti asfaltové vozovky, jelikož právě tyto vlastnosti jsou zásadní pro trvanlivost vozovky. [103]

Průběh stárnutí lze zároveň vystihnout změnami, které vznikají ve struktuře asfaltového pojiva (Obrázek 15).



Obrázek 15: Změny ve struktuře asfaltového pojiva v průběhu životnosti [13]

Samotný proces stárnutí asfaltového pojiva je výrazně ovlivněn oblastí, kde se daná asfaltová směs nachází, s tím související klimatické podmínky, působení vzdušného kyslíku,

vlhkost, chemické látky, ultrafialové záření a také typ asfaltové směsi, její mezerovitost a tloušťka asfaltového filmu.

K hlavním faktorům, které ovlivňují degradaci pojiva, patří: [103]

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

Termooxidační stárnutí lze popsat jako soubor chemických změn, které jsou vyvolány zvýšenou teplotou a vzdušným kyslíkem. Z toho vyplývá, že nejvíce je těmto změnám vystavena obrusná vrstva, která je v přímém kontaktu s vzdušným kyslíkem. Atomy kyslíku se zabudovávají do chemické struktury asfaltového pojiva, což lze označit za oxidační stárnutí pojiva. Oxidace má v případě asfaltového pojiva za následek tvrdnutí a křehnutí, které mohou vést až ke vzniku trhlin ve vozovce za nízkých teplot a taktéž ke zhoršení únavových vlastností. [59, 90, 103] Největší vliv na míru termooxidativního stárnutí má teplota a kontaktní plocha pro přístup kyslíku k pojivu.

Destilační stárnutí se nejvíce projevuje při zahřívání asfaltů na vysokou teplotu, která je nejvyšší v průběhu výroby a pokládky asfaltové směsi. Při vyšší teplotě asfaltového pojiva může docházet ke štěpení uhlovodíkových molekul za vzniku nízkomolekulárních sloučenin nebo odpařování lehké olejovité frakce. Odpar lehkých frakcí se zvyšuje s rostoucí teplotou, vyšší gradací asfaltu nebo se zvětšujícím se povrchem vzorku. Odpar lehkých frakcí v konečném důsledku způsobuje navýšení tuhosti asfaltu. [17, 18, 103]

Dalším faktorem, který způsobuje stárnutí, jsou migrační procesy nazývané exudační stárnutí, které probíhá za normálních teplot nižší rychlostí. Během exudačního stárnutí se jednotlivé částice asfaltenu shlukují a asfaltové oleje vnikají do kameniva. Při tomto procesu ztrácí asfaltové pojivo plasticitu, elasticitu a křehne. Tento jev nastává, pokud je do asfaltového pojiva přidáno malé množství fluxačních olejů, nebo když nejsou při výrobě používány dostatečně výkonné destilační kolony. [17, 18, 103]

Při nízkých teplotách, kterým je pojivo vystaveno delší dobu, asfaltové pojivo podléhá strukturálnímu stárnutí. V rámci struktury nedochází k chemickým změnám materiálu, ale probíhá reorganizace a zafixování jednotlivých molekul. Strukturální stárnutí následně zdánlivě zvyšuje tuhost materiálu, kterou lze odbourat opětovným zahřátím vzorku, což je reversibilní proces. [17, 18, 103]

4.2.2. Degradace polymerem modifikovaného pojiva

Stejně jako silniční asfaltové pojivo mohou různé polymery vykazovat při výrobě a v průběhu životnosti různé degradační chování. Vlivy způsobující degradaci asfaltového pojiva byly zmíněny výše. V případě polymerem modifikovaných pojiv mohou tyto vlivy přispět i k určité degradaci polymerních řetězců. Obecně molekuly polymeru nejsou citlivější na chemické působení než klasické silniční pojivo. Polymery se obvykle skládají z lineárních nebo rozvětvených řetězových bloků polymerů (např. SBS), které utváří dlouhé řetězce a ty

právě mohou být v důsledku degradace do jisté míry rozbité. To lze ověřit pomocí SEC (Size Exclusion Chromatography) nebo GPC (Gel Permeation Chromatography) metody, které indikují takovou degradaci molekulární velikosti, ale nejsou tak citlivé, aby ověřily výsledné mechanické chování nové asfaltové směsi s R-materiálem, který obsahuje málo degradovaný polymer. Také pro určení míry degradace polymeru je dobré znát jeho původní chování, což většinou není dosažitelné, jelikož je znovuzískané pojivo odebrané z R-materiálu z neznámého zdroje, který může být 15 – 20 let starý. Z tohoto důvodu nejsou tyto pokročilé metody SEC a GPC běžně zaběhlou praxí, ale používají se pouze pro výzkum. To znamená, že míra degradace nemusí být známa, ale přítomnost může být detekována pomocí mikroskopu, nebo změnou hodnot tradičních testů. [78, 83]

4.2.3. Oživení zestárlého pojiva v R-materiálu

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 vliv pojiva v nově vyráběných směsích kompenzovat pojivem vyšší gradace nebo pomocí speciálních oživovacích přísad.

Účelem procesu oživení zestárlého pojiva je dosažení požadovaných parametrů nebo kategorie pojiva, které způsobí zlepšení nízkoteplotních a únavových charakteristik a zároveň nedojde k výraznému snížení bodu měknutí, které by vyústilo ve sníženou odolnost proti trvalým deformacím. [18]

Docílit požadovaného stupně oživení může být provedeno několika způsoby: [57]

- Použitím pojiva vyšší gradace.
- Použitím oživovacích přísad – rejuvenátorů/změkčovadel.
- Použitím kombinace pojiva vyšší gradace a oživovací přísady.

V případě oživení zestárlého asfaltového pojiva pojivem vyšší gradace lze považovat za „klasický“ a v minulosti i dnes běžně používaný způsob. Vychází z podmínek stanovených v ČSN EN 13108-1 z roku 2008 (za předpokladu recyklace směsí typu asfaltový beton) [42]. V tomto předpisu je stanoveno, že pokud směs obsahuje více jak 20 % R-materiálu, musí výsledné hodnoty penetrace a bodu měknutí odpovídat požadavkům, které jsou požadovány pro nově přidané pojivo. Nicméně každá členská země Evropské unie měla možnost si upravit podmínky pro přidávání R-materiálu ve vlastních národních požadavcích, které však nesmějí být v rozporu s evropskou normou.

V České republice musí být pojivo vyšší gradace přidáno do směsí při vyšším dávkování R-materiálu jak 20 %, přičemž výpočet parametrů penetrace a bodu měknutí se provádí podle rovnice A. 1 respektive A. 2 v ČSN EN 13108-1 [42]. V současné době je řešen návrh normy ČSN 73 6141 zabývající se požadavky na použití R-materiálu do asfaltových směsí, kde je uvedeno, že v případě vyššího dávkování jak 15 % R-materiálu je nutné oživení. Oživením

asfaltové směsi s R-materiálem pojivem gradace 160/220 leží hranice maximálního dávkování R-materiálu okolo 50 % v závislosti na jeho vlastnostech. [128]

Použitím oživovacích přísad toto omezení neplatí a lze R-materiál dávkovat i ve vyšším dávkování je však nutno podotknout, že použití oživovacích přísad a jejich vliv na vlastnosti zestárlého asfaltového pojiva nebyl ještě z dlouhodobého hlediska zcela popsán. [74] Další nejasnosti panují s ohledem na výpočet optimálního množství oživovací přísady, který se liší v závislosti na chemické podstatě vlastní přísady a také na její viskozitě. [60]

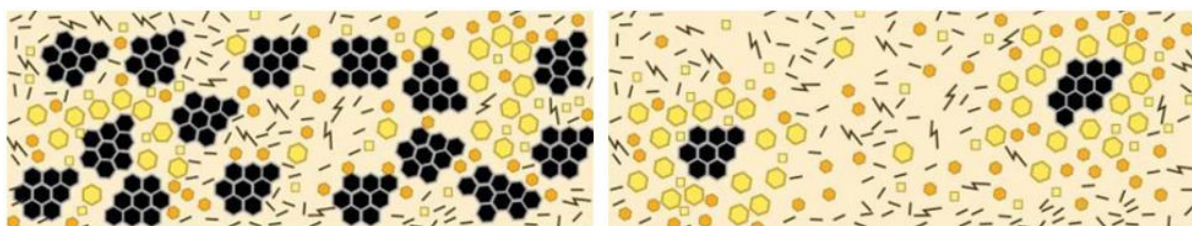
Existuje několik základních typů oživovacích přísad, které se získávají různým způsobem. Například během zpracování ropy, z bio-olejů, z odpadních produktů zpracování biomasy nebo z papírenské výroby. Jednotlivé oživovací přísady v ideálním případě obnoví nejenom chemickou strukturu pojiva, ale také mechanicko-fyzikální vlastnosti včetně odolnosti vůči termooxidačním změnám v čase. Použitá oživovací přísada musí splnit několik základních požadavků:

- Oživit zestárlé pojivo za účelem snížení jeho tuhosti a navrácení některých vlastností na hodnoty podobné asfaltu požadované kategorie.
- Změnit vlastnosti asfaltového pojiva v R-materiálu tak, aby se nesnížila trvanlivost asfaltové směsi po dlouhodobém stárnutí.
- Zajistit přítomnost dostatečného množství asfaltového pojiva, aby došlo k řádnému obalení zrn kameniva v asfaltové směsi a zároveň, aby byly splněny požadavky na vlastnosti asfaltových směsí.

Na trhu lze pod pojmem „oživovací přísada“ nalézt velké množství produktů s různou účinností, které se dají rozdělit do dvou kategorií:

- **Změkčovadla – fluxační přísady** (plasticizers), jež snižují pouze viskozitu pojiva.
- **Rejuvenátory – rejuvenační přísady** (rejuvenators), jejichž cílem je obnovit chemickou strukturu pojiva a přerušit proces shlukování asfalténů.

Rozdíl mezi účinkem fluxačních (změkčujících) přísad a účinkem rejuvenátoru je patrný z Obrázku 16. Vlevo lze vidět, že po přidání fluxačních olejů nedojde k rozptýlení shluků asfalténů v asfaltovém pojivu, ale dojde pouze k zředění malténové fáze a tím ke snížení viskozity pojiva. Naopak vpravo je vidět struktura pojiva po úspěšném oživení (rejuvenaci), kdy je proces shlukování asfalténů úspěšně přerušen.



Obrázek 16: Rozdíl mezi působením změkčující a rejuvenační přísady [66]

V tomto smyslu by rejuvenátory neměly být nazývány látky, které snižují pouze viskozitu zestárlého asfaltového pojiva zředěním malténové fáze látkami s nízkou polaritou (nasyčené uhlovodíky). Tato změkčovadla nepřerušují proces shlukování asfaltů a nezabrání z dlouhodobého hlediska vzniku nízkoteplotních ani únavových trhlin. Navíc tyto látky se vyznačují vyšší mírou těkavosti, která může zapříčinit, že při vyšších teplotách v letních měsících může dojít k migraci oživovací přísady. Tento jev způsobí, že efekt oživení v podstatě zmizí.

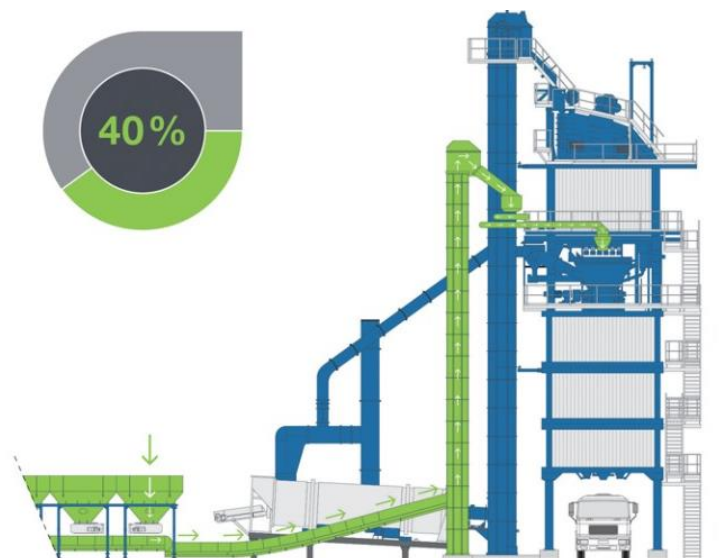
4.3. Recyklace na obalovně za horka

Tento způsob recyklace (Hot in-Plant Recycling) vozovek je nejčastější a také nejefektivnější. Takto přidaný R-materiál bývá předrcený na frakce 0/11 (resp. 0/8) při použití do asfaltových směsí do obrusných vrstev, nebo 0/22 (resp. 0/16) při použití do asfaltových směsí do ložních a podkladních vrstev. V zásadě rozlišujeme čtyři druhy recyklace za horka na obalovně, a to:

- 1) Dávkování studeného R-materiálu přímo do míchačky šaržové obalovny.
- 2) Předehřátí R-materiálu pomocí dvouplášťového bubnu.
- 3) Předehřátí R-materiálu pomocí paralelního bubnu na šaržové obalovně.
- 4) Metoda Drum-mix používaná na kontinuálních obalovnách.

4.3.1.1. Dávkování studeného R-materiálu přímo do míchačky šaržové obalovny

Tato metoda se liší od dalších především tím, že R-materiál není předehřát. Z tohoto důvodu je nutné kamenivo předehřát na vyšší teplotu tak, aby se R-materiál ohřál stykem s kamenivem, což značně omezuje jeho maximální dávkování touto cestou. Dále musíme vzít v úvahu obsaženou vlhkost R-materiálu, která se začne při styku s horkým kamenivem odpařovat a je tedy nutné ji odvést odvětrávacím zařízením. R-materiál je uskladněn v zásobnících a dávkován stejně jako kamenivo nebo se přidává do míchačky přes samostatnou váhu. Při této metodě se doporučuje přidávat maximálně 25 % R-materiálu.

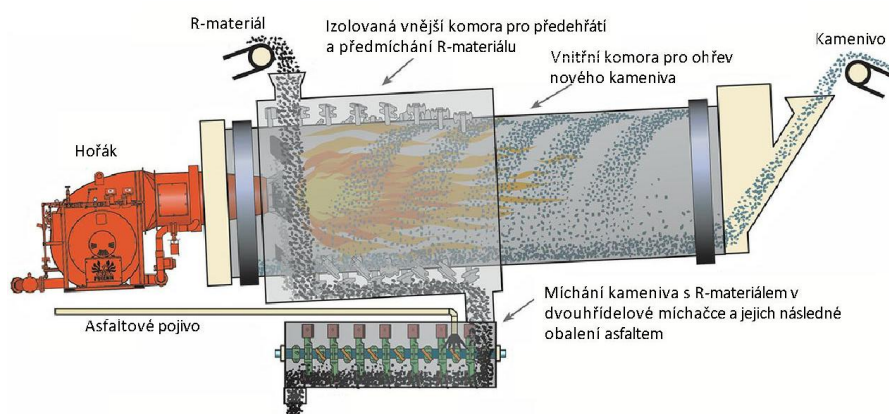


Obrázek 17: Multivariable dosing system [92]

Společnost Benninghoven vyrábí zařízení tzv. „Multivariable dosing system“, pomocí kterého lze dle společnosti dosáhnout dávkování až 40 % studeného R-materiálu, díky dávkování po menších dávkách do míchačky. Schematicky je „Multivariable dosing systém“ patrný z Obrázku 17. V současné době v České republice využívá možnost přidání studeného R-materiálu přímo do míchačky asi 40 % šaržových obaloven. [126]

4.3.1.2. Předehřátí R-materiálu pomocí dvouplášťového bubnu

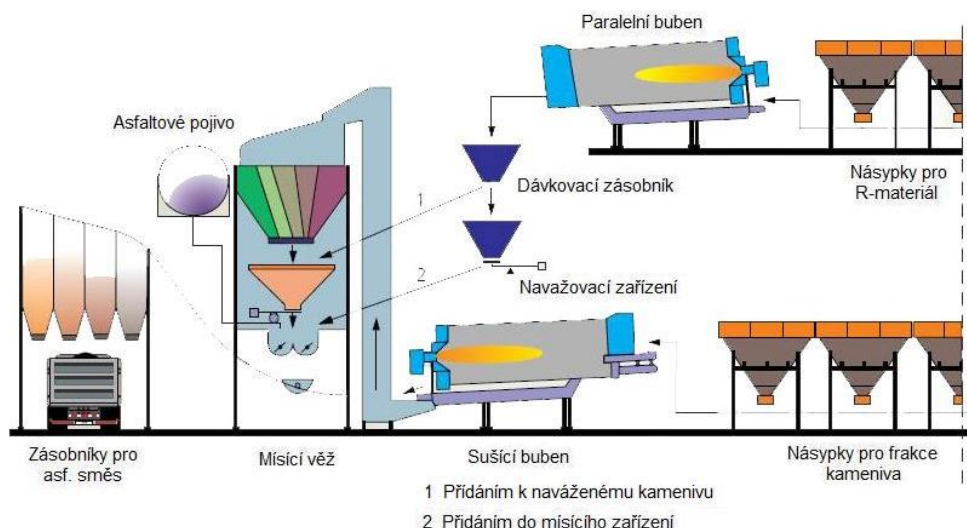
Technologie dvouplášťového bubnu „Double Barrel Drum Mixer“ je znázorněna na Obrázku 18. Hlavní část obalovny sestává z bubnu, který je rozdělen na vnější a vnitřní část. Do vnitřního bubnu je svedeno kamenivo, které po předehřátí proudem horkého vzduchu propadá do vnějšího bubnu, kde dochází k promíchání s R-materiálem, který byl mezitím nahřátý ve vnějším bubnu. Do míchačky je následně přidán filer a asfaltové pojivo. Výhodou této technologie je malý zábor plochy a energetická efektivita procesu. [68, 97]



Obrázek 18: Technologie dvouplášťového bubnu společnosti Astec [97]

4.3.1.3. Dávkování předehřátého R-materiálu v paralelním bubnu do šaržové obalovny

Touto metodou je R-materiál před vstupem do míchačky šaržové obalovny nejprve předehřátý v paralelním bubnu na teplotu 120 °C až 135 °C (Obrázek 19).



Obrázek 19: Schéma předeřívání R-materiálu v paralelním bubnu u šaržové obalovny [124]

Tento způsob zpracování R-materiálu umožňuje na rozdíl od přidávání R-materiálu za studena do šaržové obalovny použít při výrobě směsi až 80 % R-materiálu.

4.3.1.4. *Metoda Drum – mix používaná v kontinuálních obalovnách*

Kontinuální výroba asfaltových směsí není v České republice rozšířena, existuje u nás pouze jedna obalovna využívající tuto technologii. Hodí se především pro velké stavby s konstantní recepturou. Výrobní proces probíhá v nepřetržitém procesu a bez přestávky, přičemž jednotlivé komponenty jsou do mísicího procesu přidávány kontinuálně. Tento typ obaloven je rozšířen zejména v USA, kde tvoří asi 80 % z celkového množství míchacích center a umožňuje přidávání zhruba 50 % R-materiálu. [125]



Obrázek 20: Schéma kontinuální obalovny [4]

4.4. Úprava R-materiálu při dávkování na obalovně

ČSN EN 13108-8 [47] specifikuje, že R-materiál se získává odfrézováním asfaltových vrstev, drcením desek vybouraných z asfaltových vozovek, nebo velkých kusů asfaltové směsi a asfaltové směsi z neshodné nebo nadbytečné výroby. V praxi to tedy často znamená, že bývá smíchán materiál z obrusné, ložní či podkladní asfaltové vrstvy různé kvality nebo i s jiným materiálem jako je např. lité asfalt. Tím dochází k nehomogenitě R-materiálu, což má negativní vliv na výsledné vlastnosti asfaltové směsi. [125]

Aby bylo možné přidávat R-materiál do asfaltových směsí ve větším množství, je třeba jej zpracovávat a nakládat s ním zcela odlišně, než jak je dosud v České republice běžně zvykem. Z tohoto pohledu existuje několik zkušeností ze zahraničí, díky kterým je možné dosahovat vyšší kvality R-materiálu a tudíž i jeho vyššího podílu v nových asfaltových směsích. V České republice zatím nejsou tyto zkušenosti při zpracování R-materiálu dostatečně aplikovány. Níže jsou uvedeny důležité aspekty, pozitivně ovlivňující kvalitu R-materiálu. [125]

Homogenizace: Je jedním z klíčových faktorů, který ovlivňuje konstantní kvalitu R-materiálu a tím i výsledné asfaltové směsi. Velmi důležitá je zejména v případě, kdy je společně skladován R-materiál různého původu. V praxi se homogenizace provádí tak, že se pomocí nakladače odebírá R-materiál z různých míst hromady a přemísťuje se na novou

hromadu kuželovitého tvaru. Tento postup je vhodné vícekrát opakovat. Homogenizaci je nutno provést vždy před dalším zpracováním R-materiálu. [125]

Frézování po vrstvách a oddělené skladování R-materiálu: Základem je frézovat R-materiál po jednotlivých konstrukčních vrstvách (zvláště obrusnou, ložní a podkladní vrstvu a vrstvy s modifikovaným asfaltem) a takto získaný materiál z různých vrstev skladovat odděleně. Zpracování R-materiálu je pak jednodušší, protože je do výroby směsi pro jednotlivé konstrukční vrstvy používán materiál získaný z těchto konstrukčních vrstev, o přibližně stejné zrnitosti (např. pro výrobu asfaltového betonu pro obrusné vrstvy se použije R-materiál získaný frézováním obrusné vrstvy). Není tak nutné se podrobně zabývat kvalitou kameniva, protože je předpoklad, že v minulosti již byla kvalita kameniva pro jednotlivé konstrukční vrstvy řádně ověřena. Zároveň se snáze dosahuje požadované křivky zrnitosti a obsahu pojiva asfaltové směsi. [125]

Zastřešení skládek: Skladováním R-materiálu na skládkách se zastřešením (Obrázek 21) je zabráněno pronikání srážkové vody do něj a tím docílení úspory paliva při jeho předeřívání v paralelním bubnu šaržové obalovny, nebo kameniva při studeném dávkování R-materiálu do míchačky, kde v případě vyššího obsahu vody v R-materiálu může dojít i k nepřesnosti jeho dávkování. Další snížení vlhkosti R-materiálu je možné dosáhnout dostatečným odizolováním od zemského povrchu pod ním, čímž se přeruší kapilární vztlínavost vlhkosti obsažené v zemině. [125]



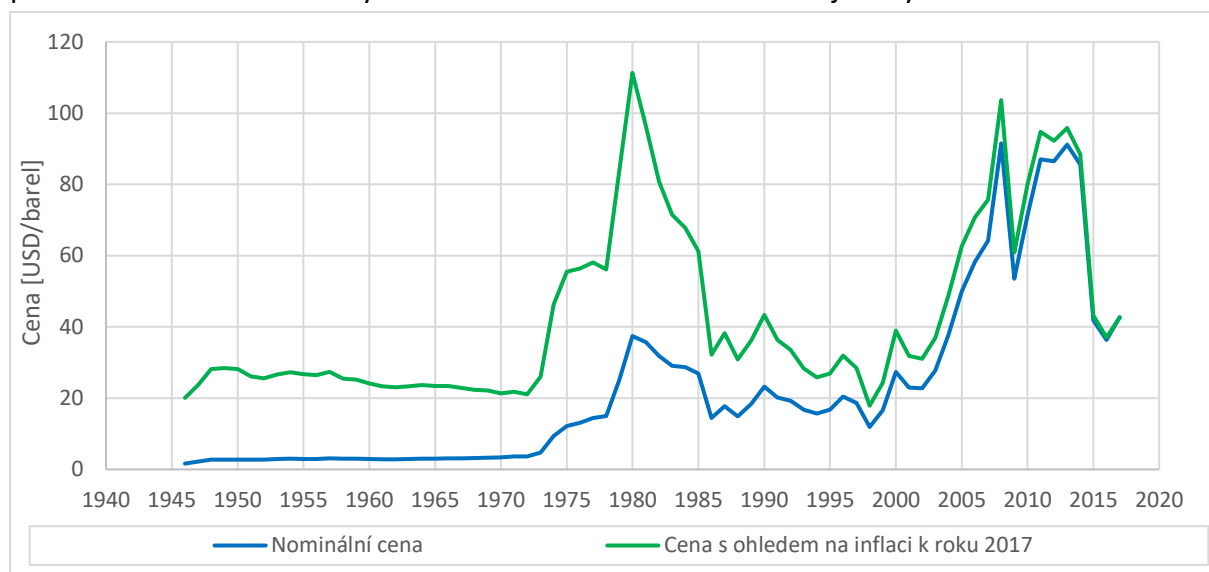
Obrázek 21: Zastřešení skládek kameniva a R-materiálu v areálu společnosti Froněk spol. s r.o.

4.5. Použití R-materiálu do za horka vyráběných asfaltových směsí

Obecně recyklace stavebních materiálů je důležitým krokem pro zachování udržitelného rozvoje, snížení zatížení skládek, uchování zásob neobnovitelných přírodních surovin, omezení dopravních nákladů plynoucích z převozu stavebního materiálu a snížení celkových nákladů na novou stavbu.

V silničním stavitelství k největšímu rozvoji recyklace vozovek pomohl ekonomický tlak v podobě velkého růstu cen ropy v roce 2008 (viz Obrázek 22). Ačkoliv cena ropy následně

klesla, asfaltové pojivo jako takové je nejdražší surovinou v asfaltové směsi. Proto správné použití R-materiálu může být z ekonomického hlediska velmi zajímavým řešením.

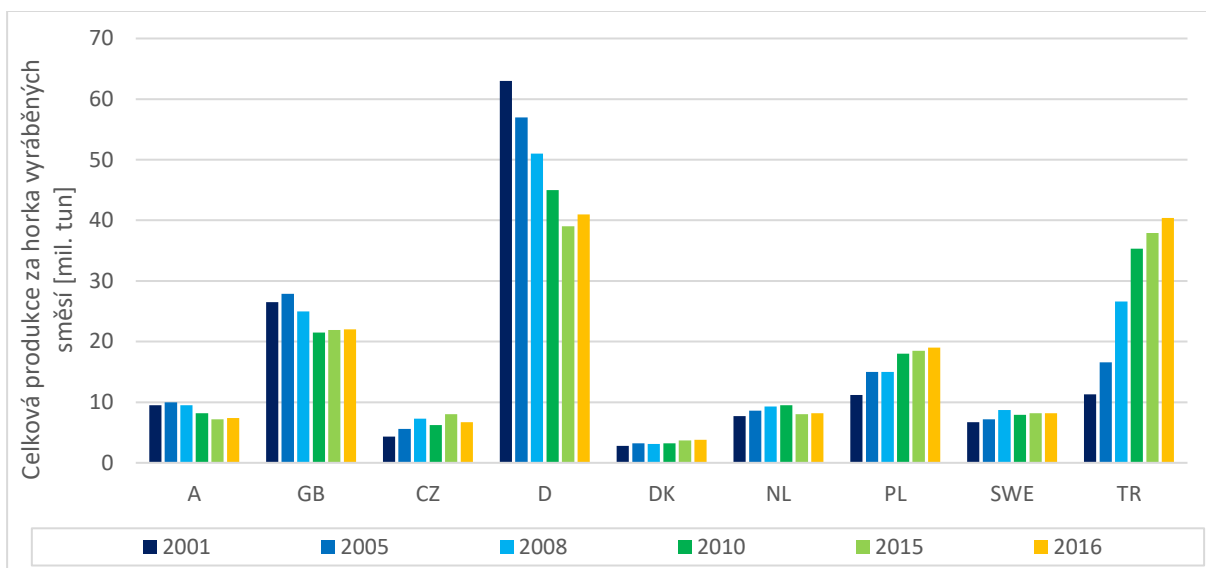


Obrázek 22: Vývoj ceny ropy v průběhu let [12]

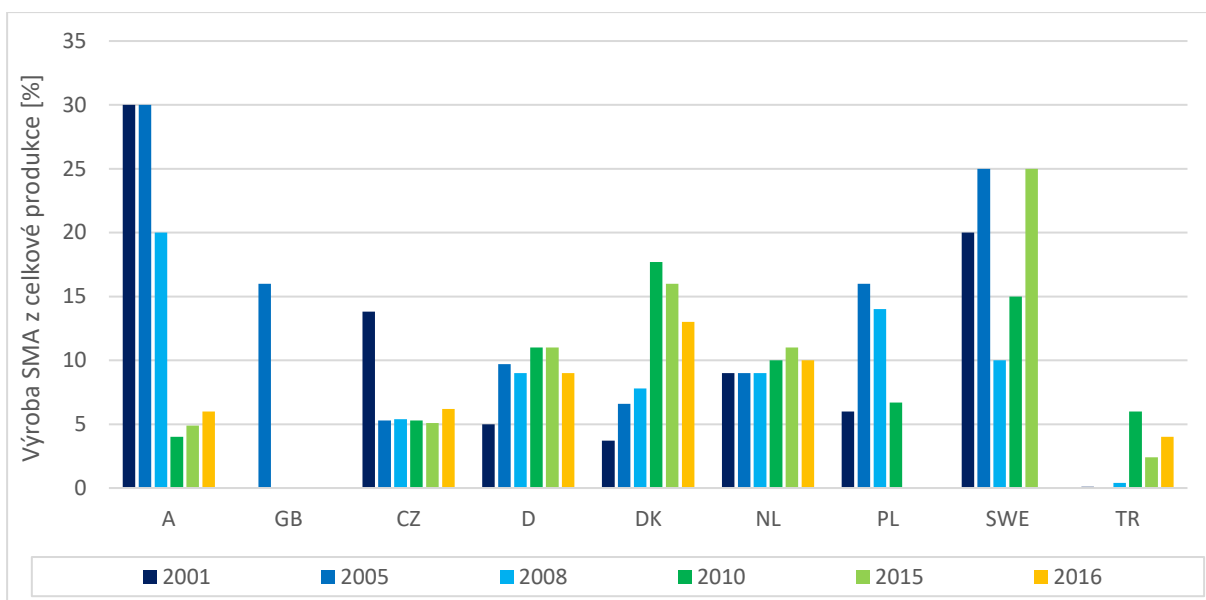
Z Tabulky 7 a Grafu 3 a 4 lze vidět produkci za horka vyráběných asfaltových směsí ve vybraných zemích v různých letech. V rámci ČR lze vidět růst produkce, to znamená potřebu velkého množství přírodního materiálu jak kameniva, tak asfaltového pojiva.

Tabulka 7: Produkce za horka vyráběných asfaltových směsí ve světě (milióny tun) [5]

Země	1995	2000	2005	2010	2015
Česká republika	3,8	7,3	5,6	6,2	8,0
Německo	66,0	51,0	57,0	45,0	39,0
Dánsko	3,4	3,1	3,2	3,2	3,7
Nizozemí	7,5	9,3	8,0	9,5	8,0
Slovensko	1,3	2,2	1,8	1,9	2,7
Evropa	272,9	338,0	320,5	309,3	278,8
USA	459,0	440,0	500,0	327,0	331,0

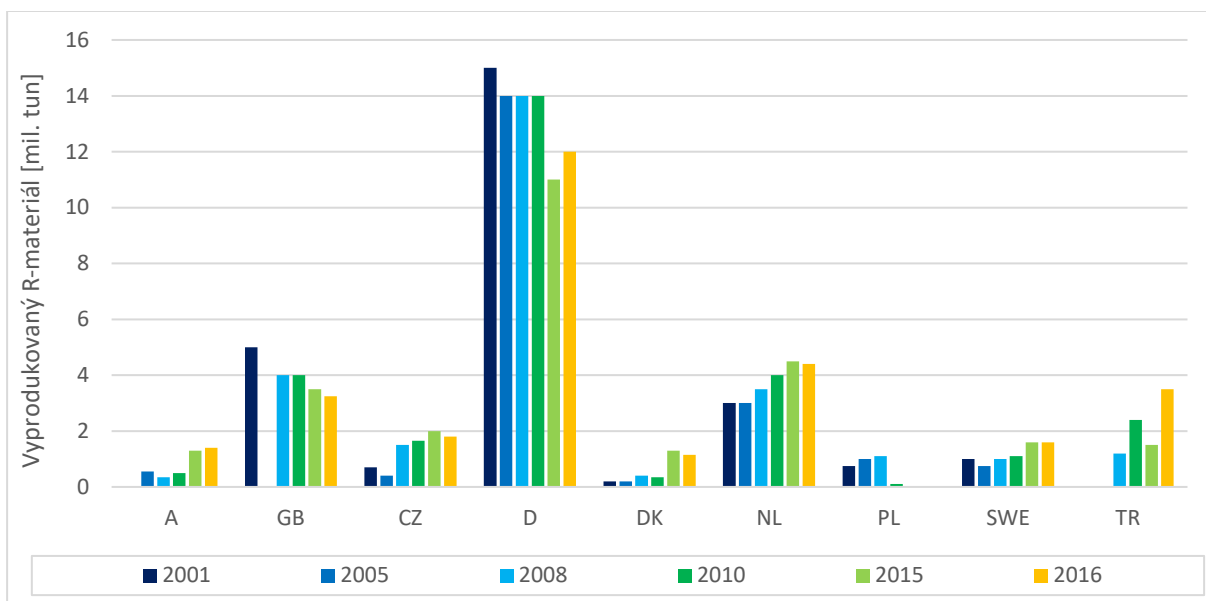


Graf 3: Celková produkce za horka vyráběných směsí v různých zemích a letech [5]



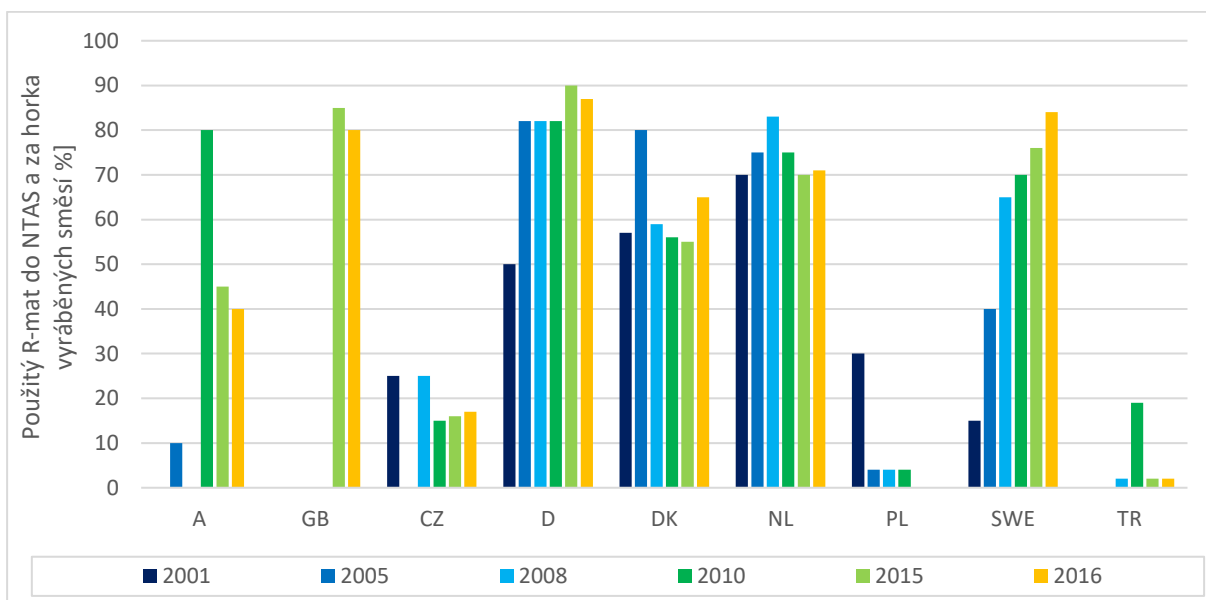
Graf 4: Procentuální podíl produkce směsi SMA ze směsí vyráběných za horka na obalovně [5]

V Grafu 5 lze vidět množství vyprodukovaného R-materiálu ve vybraných zemích a jeho využití pomocí technologie za horka vyráběných směsí na obalovně v letech 2015 a 2016. V letech 2008 a 2010 je znázorněný podíl zpracován jednak do směsí vyráběných za horka a také nízkoteplotních asfaltových směsí (NTAS) na obalovně. V letech 2001 a 2005 tento údaj odpovídá zpracování R-materiálu pouze do směsí NTAS.



Graf 5: Celková produkce R-materiálu v různých zemích a letech [5]

Využití R-materiálu v ČR je poměrně nízké. Pravděpodobnými překážkami pro vyšší využití R-materiálu do asfaltových směsí jsou neoprávněné pochyby investorů o kvalitě R-materiálu, neznalosti technologií recyklace a jejich nedostatečná motivace. Nejasná je i cenová politika správců komunikací a nutná je i úprava stávajících předpisů o použití R-materiálu do asfaltových směsí. [127]



Graf 6: Procentuální podíl využitého R-materiálu na obalovně v různých zemích a letech [5]

Nejvyšší přípustný obsah R-materiálu do asfaltových směsí byl donedávna uveden v národních přílohách výrobních norem směsí ČSN EN 13108 část 1-5, které byly v roce 2017 vydány bez těchto příloh. Přílohy jsou aktuálně zapracovávány do normy ČSN 73 6121 [21]. V Tabulce 8 je uveden nejvyšší přípustný obsah R-materiálu v % hmotnosti asfaltové směsi pro typ asfaltový beton z normy ČSN EN 13108-1 část NA.E [42].

Tabulka 8: Nejvyšší přípustný obsah R-materiálu v % hmotnosti asfaltové směsi [42]

Obrusné vrstvy		Ložní vrstvy		Podkladní vrstvy	
Druh směsi	R-materiál [%]	Druh směsi	R-materiál [%]	Druh směsi	R-materiál [%]
ACO 8	25	ACL 16 S	30/15 ¹⁾²⁾	ACP 16 S	50 ¹⁾
ACO 8 CH	25	ACL 16 +	30 ¹⁾	ACP 16 +	60
ACO 11 S	–	ACL 16	40	ACP 22 S	50 ¹⁾
ACO 11 +	–	ACL 22 S	30/15 ¹⁾²⁾	ACP 22 +	60
ACO 11	25	ACL 22 +	30 ¹⁾		
ACO 16 S	–	ACL 22	40		
ACO 16 +	–				
ACO 16	25				

1) Množství přidávaného R-materiálu při výrobě asfaltových směsí z modifikovaných asfaltů upravuje poznámka uvedená v základní normě ČSN EN 13108-1:2008 Asfaltový beton, článek 5.3.1.1. Na základě národních zkušeností je však možné použít i jiných limitních hodnot uvedených v této tabulce.

2) Při výrobě asfaltových směsí z nemodifikovaných asfaltů je možné použít R-materiál v množství do 30 %, v případě použití modifikovaných asfaltů v množství do 15 %. Použitý R-materiál musí být získán z krytů vozovek.

Z Tabulky 8 vyplývá, že množství R-materiálu je poměrně omezené. Jeho použití do obrusných vrstev je ještě nižší, až nulové v případě asfaltových směsí určených na vozovky vyšších tříd dopravního zatížení. Je snahou toto omezení změnit a umožnit dávkování R-materiálu i do těchto typů asfaltových směsí. Touto problematikou se zabýval projekt TA02030549 [108]. Jedním z cílů bylo ukázat možnost produkce a realizace asfaltových směsí typu AC s různým obsahem R-materiálu za dodržení stejné kvality jako bez něj.

Další snaha byla ověřit možnosti přidávání R-materiálu do asfaltového koberce mastixového v rámci projektu TA04031328 [65] na jehož základě vznikla tato disertační práce.

4.6. Přidávání R-materiálu do asfaltových směsí typu SMA

Směs typu SMA je 100 % recyklovatelná. Vyfrézovaná nebo vybouraná směs může být po převozu na obalovnu opět použita do nové asfaltové směsi jako R-materiál (viz definice kapitola 4.1). Avšak 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 a 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.

4.6.1. Zkušební v ČR

Zkušební s přidáváním R-materiálu do směsí typu SMA jsou minimální, jelikož současné předpisy neumožňují jeho přidávání.

4.6.2. Zkušební v zahraničí

Největší zkušební obecně s přidáváním R-materiálu do asfaltových směsí jsou v Německu. Dle německých technických dodacích podmínek ZTV Asphalt-StB 07 [137] je množství přidaného R-materiálu omezeno dle jeho kvality a homogenity. V příloze D je specifikován postup, jak dojít pomocí výpočtu k maximálnímu možnému přidání obsahu R-materiálu do směsi na základě těchto parametrů - obsah pojiva, jeho bod měknutí, podíl hmotnosti obsažených zrn < 0,063 mm, 0,063 - 2 mm a podíl zrn > 2 mm. ZTV Asphalt-StB 07 [66] také určuje požadavky na maximální bod měknutí a minimální hodnotu vratné duktility (40 %), které jsou zkoušeny na znovuzískaném pojivu.

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 [138] umožňující přidání R-materiálu do směsí typu SMA v množství až 30 % za předpokladu, že použitý R-materiál je z obrusné vrstvy buď směsí typu SMA, nebo asfaltového koberce drenážního upraveného pomocí granulátoru. Granulátorem je myšleno takové zařízení, které od sebe jemně odděluje jednotlivá zrna kameniva, aniž by je drtil (viz Obrázek 23 a 24).



Obrázek 23: Granulátor na obalovně u Perzendorf v Rakousku



Obrázek 24: Detail mechanismu 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 uvažují o umožnění použití 30 % R-materiálu do směsí typu SMA pod podmínkou drceného kameniva v R-materiálu, které splní stejné požadavky jako nové kamenivo. A také chtějí specifikovat požadavky na odolnost asfaltové směsi proti tvorbě trvalých deformací [28] a na poměr pevností v příčném tahu (indirect tensile strength ratio ITSr) [26] více jak 80 %.

V Rakousku při použití R-materiálu do směsi typu AC s modifikovaným pojivem se musí 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. Běžně se používá 20 % R-materiálu, aniž by byl frézován selektivně i na dálnice od roku 2010. 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 [112]. 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 [84].

Obdobně v Norsku dle Handbok 018 také není umožněno přidání R-materiálu do asfaltového koberce mastixového. [76]

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 směsi typu SMA dosud řešeno. [76]

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. [76]

5. 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:

- 1) Ověřit možnosti navrhování směsi typu SMA s obsahem R-materiálu.
- 2) Ověřit vliv přítomnosti R-materiálu na výsledné vlastnosti asfaltové směsi a porovnat je s referenční směsí bez R-materiálu.
- 3) 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.
- 4) Ověření vlivu oživovací přísady na výsledné vlastnosti asfaltového pojiva i směsi s R-materiálem.
- 5) Posouzení variant asfaltové směsi SMA 11 S s různým obsahem a kvalitou R-materiálu a přísadami položenými v rámci zkušebního úseku.
- 6) Vypracování metodiky pro dávkování R-materiálu do asfaltového koberce mastixového.

6. ZKUŠEBNÍ METODY

V této kapitole jsou popsány zkušební metody, které byly použity v rámci řešení disertační práce. Jednotlivé metody jsou rozděleny do tří pod kapitol:

- 1) Příprava vzorků pro zkoušení
- 2) Zkušební metody popisující fyzikální vlastnosti asfaltových směsí
- 3) Zkušební metody popisující fyzikální vlastnosti asfaltových pojiv

6.1. Příprava vzorků pro zkoušení

Pro zkoušení vlastností asfaltových směsí vyrobených v laboratoři bylo zapotřebí kamenivo a R-materiál zhomogenizovat viz kapitola 6.1.1. a provést síťový rozbor pro sestavení požadované čáry zrnitosti navržených směsí. Pro následné měření fyzikálních vlastností asfaltových směsí byla vyrobena tělesa dle postupů uvedených v kapitole 6.1.5. a 6.1.6. Pro zkoušení asfaltového pojiva byl vzorek odebrán dle postupu v normě ČSN EN 58 [55], nebo znovuzískán ze směsi pomocí extrakce a destilace viz postup v kapitole 6.1.3

6.1.1. Homogenizace a kvartace podle ČSN EN 12697-28

Aby byla zajištěna průkaznost následných výsledků pro získání reprezentativních vzorků, byla provedena homogenizace a kvartace dle normy ČSN EN 12697-28. [31]

Homogenizace byla provedena opakovaným přesypáním materiálu z jednoho místa na druhé. Následně byl vytvořen komolý kužel, který byl rozdělen kvartací na čtyři části. Dvě protilehlé byly vyřazeny a zbylé dvě smíchány do jedné. Po opětovném vytvoření komolého kužele byl postup opakován tak dlouho, dokud nebyl vzorek zmenšen na požadovanou navážku.

6.1.2. Stanovení zrnitosti podle ČSN EN 933-1

Stanovení zrnitosti kameniva síťovým rozborem je nutné pro tvorbu/ověření průběhu čáry zrnitosti, která ukazuje jednotlivé zastoupení zrn v kostře kameniva. Postup je uveden v normě ČSN EN 933-1. [56]

Zkouška sestává z roztřídění a oddělení materiálu pomocí sady sít (Obrázek 25) do několika zrnitostních podílů s klesající velikostí částic. Velikosti otvorů sít a počet sít jsou voleny podle druhu vzorku a požadované přesnosti. V případě směsí typu SMA je sada sít specifikována v normě ČSN EN 13108-5 [46]. Velikost zkušební navážky se odvozuje dle největší frakce kameniva D ve směsi. Po oplachu se kamenivo vysuší na ustálenou hmotnost. Sušení probíhá v odvětrávané sušárně nastavené na (110 ± 5) °C. Ustálené hmotnosti se dosáhne, pokud se po sobě následující vážení prováděná nejméně po 1 hodině neliší o více než 0,1 % hmotnosti zkušební navážky. Poté se roztřídí a z hmotnostních zůstatků na jednotlivých sítích se vypočítá procentuální zastoupení z původní navážky.



Obrázek 25: Sada sít pro stanovení zrnitosti [100]

6.1.3. Znovuzískání extrahovaného pojiva pomocí rotačního vakuového destilačního zařízení dle ČSN EN 12697-3

Pro znovuzískání asfaltového pojiva z asfaltové směsi, nebo R-materiálu je potřeba pojivo prvně vyextrahovat dle postupu uvedeného v normě ČSN EN 12697-1 [25]. Postup znovuzískání asfaltového pojiva ze směsi je popsán v ČSN EN 12697-3 [32]. Asphalt je oddělen od kameniva rozpouštědlem (v rámci práce byl použit tetrachloretylen). Po odstranění nerozpouštěných pevných částí z asfaltového roztoku s rozpouštědlem se z něho asphalt získá pomocí vakuové destilace rotačním vakuovým destilačním zařízením (Obrázek 26). Použitím tetrachloretylenu jako rozpouštědla je první fáze destilace prováděna při teplotě 110 °C a tlaku 40 kPa. Po nasátí celého objemu asfaltového roztoku se přechází do druhé fáze, kde je teplota zvýšena na 160 °C a tlak postupně snížen na 2,0 kPa dle použitého rozpouštědla. Teplota a tlak se udržuje až do okamžiku, kdy se přestanou v asfaltu tvořit bubliny. Když přestane tvoření bublin, udržují se teplotní a tlakové podmínky po dalších 10 minut a destilace se ukončí. [32]



Obrázek 26: Rotační vakuové destilační zařízení [93]

6.1.4. Laboratorní výroba směsi podle ČSN EN 12697-35

Norma ČSN EN 12697-35 [35] popisuje laboratorní míchání asfaltových materiálů pro výrobu vzorků. Specifikuje referenční teploty hutnění a míchání podle gradace asfaltových pojiv.

Pro výrobu těles je potřeba připravit všechny komponenty směsi včetně přísad. Vysušené kamenivo a filer se připraví s přesností na 0,1 % hmotnosti. Přísady s přesností na 1 % hmotnosti. V případě použití R-materiálu je potřeba zkontrolovat, zda neobsahuje cizorodé látky podle ČSN EN 12697-42 [36]. R-materiál se zváží s přesností 0,1 % hmotnosti. Odměřené množství (navážka) musí odpovídat složení asfaltové směsi a hmotnosti dávky, která má být vyrobena. Pokud se R-materiál před ohříváním musí vysušit, rozprostře se v tenké vrstvě a umístí do odvětrávané sušárny při teplotě $(50 \pm 10) ^\circ\text{C}$ do dosažení ustálené hmotnosti.

Vzorek pojiva se odebere podle ČSN EN 58 [55] a naplní se do kovových nádob s víčkem, které se následně nahřívají na požadovanou teplotu míchání. V průběhu ohřevu se pojivo homogenizuje promícháním v nádobě. Pro výrobu asfaltové směsi je důležité predehřát nádobu, v které je následně provedeno míchání jednotlivých komponent tak, aby byla zajištěna co nejmenší teplotní ztráta. Pro simulaci výroby asfaltové směsi s R-materiálem pomocí paralelního bubnu při výrobě směsí v laboratoři bylo v rámci disertační práce zvoleno následující pořadí míchání a teploty:

- 1) Všechny frakce kameniva o teplotě $(165 \pm 3) ^\circ\text{C}$ s celulóзовými vlákny.
- 2) R-materiál o teplotě $(130 \pm 3) ^\circ\text{C}$ promíchaný s oživovací přísadou, která se při dané teplotě nechala působit po dobu 10 minut.
- 3) Asfaltové pojivo o teplotě $(165 \pm 3) ^\circ\text{C}$.
- 4) Vápencová moučka o teplotě $(165 \pm 3) ^\circ\text{C}$.

Mechanické míchání bylo provedeno pomocí míchačky zobrazené na Obrázku 27 po dobu minimálně 5 minut, nebo dle homogenity promíchání jednotlivých komponent.

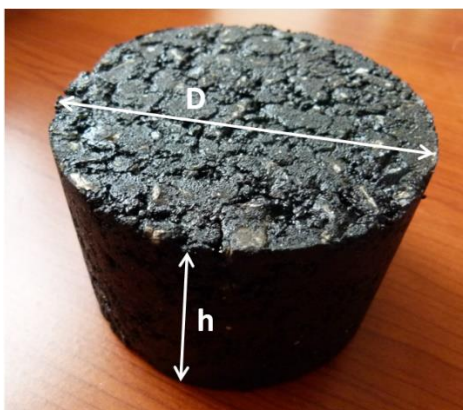


Obrázek 27: Míhací zařízení pro laboratorní výrobu asfaltové směsi [77]

6.1.5. Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem podle ČSN EN 12697-30

Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem je popsána v normě ČSN EN 12697-30 [33]. Tato norma popisuje metody výroby zkušebních těles asfaltových směsí pomocí rázového zhutňovače. Taková tělesa jsou používána zejména pro stanovení objemové hmotnosti.

Při přípravě těles se asfaltová směs vytemperuje na potřebnou teplotu a nasype do ocelové formy pro hutnění. Poté se zhutňuje v rázovém zhutňovači pomocí hutnícího berane pěchu, který padá z předepsané výšky požadovaným počtem rázů na horní povrch zkušebního tělesa. Zkušební těleso se poté nechá zchladnout na laboratorní teplotu. Zkušební tělesa musí mít tvar válce o průměru $D = (101,6 \pm 0,1)$ mm a výšku $h = (63,5 \pm 2,5)$ mm (Obrázek 28). Maximální velikost kameniva ve směsi smí být maximálně 22,4 mm.



Obrázek 28: Rozměry Marshallova tělesa

6.1.6. Příprava zkušebních těles zhutňovačem desek podle ČSN EN 12697-33+A1

V normě ČSN EN 12697-33+A1 [34] je specifikována metoda zhutňování plošných zkušebních vzorků (desek) z asfaltové směsi určených přímo ke zkoušení nebo pro vyřezání zkušebních těles/vzorků. Pro danou navážku asfaltové směsi mohou být zkušební tělesa připravena řízeným zhutňovacím postupem nebo hutněním až do dosažení stanoveného objemu a tím získáním požadované hodnoty mezerovitosti.

Tato norma popisuje tři metody hutnění vzorku:

- Metoda hutnění jedním nebo dvěma koly opatřenými pneumatikou.
- Metoda hutnění hladkým ocelovým válcem.
- Metoda hutnění ocelovými lamelami.

Tato norma platí pro asfaltové směsi připravené v laboratoři nebo vyrobené na obalovně.

V rámci práce byla tělesa hutněna segmentovým zhutňovačem s hladkým ocelovým válcem (Obrázek 29).



Obrázek 29: Segmentový zhutňovač [96]

6.2. Zkušební metody popisující fyzikální vlastnosti asfaltových směsí

6.2.1. Stanovení maximální objemové hmotnosti podle ČSN EN 12697-5

Norma ČSN EN 12697-5 [39] popisuje zkušební metody pro stanovení maximální objemové hmotnosti asfaltové směsi. Norma uvádí volumetrický postup, hydrostatický postup a matematický postup. Popsané zkušební metody jsou určeny pro nezhutněné asfaltové směsi, které obsahují silniční asfalty, modifikované asfalty nebo jiná asfaltová pojiva používaná pro asfaltové směsi vyráběné za horka. Zkoušky jsou vhodné pro čerstvě vyrobené nebo zabudované asfaltové směsi.

Maximální objemová hmotnost se společně s objemovou hmotností používá k výpočtu mezerovitosti zhutněného vzorku a dalších vlastností zhutněné asfaltové směsi, které se vztahují k jejímu objemu.

U volumetrického a hydrostatického postupu se maximální objemová hmotnost asfaltových směsí stanoví z objemu vzorku bez mezer a jeho suché hmotnosti. U volumetrického postupu se objem vzorku měří jako objem vody nebo rozpouštědla vytěsněného vzorkem v pyknometru. Při hydrostatickém postupu se objem vzorku vypočítá ze suché hmotnosti vzorku a z jeho hmotnosti ve vodě. Při matematickém postupu se maximální objemová hmotnost asfaltové směsi vypočítá z jejího složení (obsah pojiva a obsah kameniva) a objemových hmotností složek.

V rámci disertační práce byl použit volumetrický postup, kde se stanovila hmotnost (m_1) prázdného pyknometru s nástavcem o známém objemu (V_p). Další hmotností (m_2) byla váha pyknometru se vzorkem pokojové teploty. Vzorek byl následně zalit odvzdušněnou vodou nebo rozpouštědlem. Zachycený vzduch byl odstraněn pomocí exsikátoru použitím částečného vakua, se zbytkovým tlakem 4 kPa po dobu (15 ± 1) min. Poté byl pyknometr umístěn do vodní lázně s rovnoměrnou zkušební teplotou ($\pm 1,0$ °C) na dobu nejméně 30 minut, ne však déle než na 180 minut, aby bylo dosaženo vyrovnání teploty vzorku a vody v pyknometru s teplotou vody ve vodní lázni. Následně byl pyknometr doplněn vodou nebo rozpouštědlem o stejné teplotě po značku na nástavci. Po vyjmutí pyknometru z vodní lázně a jeho osušení vnější strany byla stanovena hmotnost (m_3).

$$\rho_{mv} = \frac{m_2 - m_1}{10^6 \times V_p - (m_3 - m_2) / \rho_w} \quad (6.1)$$

Kde

- ρ_{mv} - maximální objemová hmotnost asfaltové směsi [Mg/m^3]
- m_1 - hmotnost pyknometru s nástavcem [g]
- m_2 - hmotnost pyknometru s nástavcem a vzorkem [g]
- m_3 - hmotnost pyknometru s nástavcem, vzorkem a vodou/rozpouštědlem [g]
- V_p - objem pyknometru při naplnění po referenční značce nástavce [m^3]
- ρ_w - hustota vody/rozpouštědla

6.2.2. Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušební tělesa podle ČSN EN 12697-6

V normě ČSN EN 12697-6 [40] jsou popsány zkušební metody pro stanovení objemové hmotnosti zhutněného asfaltového zkušební tělesa. Zkušební metody jsou určeny pro laboratorně zhutněná zkušební tělesa nebo zkušební tělesa získaná z vývrtů nebo vyřezáním z vozovky po položení a zhutnění asfaltové směsi.

Tato evropská norma uvádí následující čtyři postupy, přičemž volba postupu závisí na odhadovaném obsahu a přístupnosti mezer ve zkušebním tělese:

- 1) Objemová hmotnost – suchá (pro tělesa s velmi uzavřeným povrchem).
- 2) Objemová hmotnost – nasycený suchý povrch (SSD) (pro tělesa s uzavřeným povrchem).
- 3) Objemová hmotnost – utěsněné zkušební těleso (pro tělesa s otevřeným nebo hrubozrnným povrchem).
- 4) Objemová hmotnost podle rozměrů (pro tělesa s pravidelným povrchem mající geometrický tvar, tj. čtverce, obdélníky, válce apod.).

Objemová hmotnost neporušeného zhutněného asfaltového zkušební tělesa se stanoví z hmotnosti zkušební tělesa a jeho objemu. Hmotnost zkušební tělesa se získá vážením suchého vzorku na vzduchu. U prvních třech postupů se objem zkušební tělesa

získá z jeho hmotnosti na vzduchu a hmotnosti ve vodě. U suchého postupu se hmotnost ve vodě stanoví bez úpravy tělesa. Při postupu „SSD“ se zkušební těleso nejdříve nasytí vodou a poté se jeho povrch osuší vlhkou jelenicí. Při postupu s utěsněným zkušebním tělesem je těleso utěsněno před ponořením do vody, aby se zabránilo vniknutí nadbytku vody do mezer zkušebního tělesa. U čtvrtého postupu „podle rozměrů“ je objem zkušebního tělesa získán změřením jeho rozměrů.

V rámci práce byl zvolen postup B: Objemová hmotnost – nasycený suchý povrch (SSD). Kde byla stanovena hmotnost suchého zkušebního tělesa (m_1). Následně bylo zkušební těleso ponořeno do vodní lázně o známé hustotě (ρ_w) při zkušební teplotě a nechalo se dostatečně dlouho sytit vodou tak, aby byla jeho hmotnost po nasycení ustálená na konstantní hodnotě. Obecně se za dobu požadovanou k nasycení považuje nejméně 30 minut, doba však nemá být delší než 3 hodiny. Byla stanovena hmotnost ponořeného nasyceného zkušebního tělesa (m_2), přičemž se dbalo, aby na povrchu tělesa neulpívaly žádné vzduchové bubliny nebo z něj nevycházely při vážení. Dále bylo těleso vyjmuto a povrchově osušeno (z povrchu byly odstraněny kapky vody) otřením vlhkou jelenicí. Ihned poté byla stanovena hmotnost tělesa nasyceného vodou (m_3).

$$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w \quad (6.2)$$

kde

- ρ_{bssd} - objemová hmotnost SSD [Mg.m^{-3}]
- m_1 - hmotnost suchého zkušebního tělesa [g]
- m_2 - hmotnost zkušebního tělesa ve vodě [g]
- m_3 - hmotnost zkušebního tělesa nasyceného vodou a povrchově osušeného [g]
- ρ_w - hustota vody při zkušební teplotě [Mg.m^{-3}]

6.2.3. Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí podle ČSN EN 12697-8

Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí je popsáno v ČSN EN 12697-8. [41] Tato evropská norma popisuje postup pro výpočet dvou objemových charakteristik zhuštěného zkušebního tělesa z asfaltové směsi: mezerovitost (V_m) a stupeň vyplnění mezer ve směsi kameniva pojivem (VFB). Tato metoda je vhodná pro zkušební tělesa, která jsou zhuštěna v laboratoři nebo pro jádrové vývrty odebrané výřezem z vozovky po pokládce a zhuštění. Tyto objemové charakteristiky mohou být použity jako kritéria návrhu směsi nebo jako parametry pro hodnocení směsi po pokládce a zhuštění. [41]

Mezerovitost asfaltového zkušebního tělesa se vypočítá pomocí maximální objemové hmotnosti směsi (dle postupu 6.1.6) a objemové hmotnosti zkušebního tělesa (dle postupu 6.1.7).

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \times 100 \% \quad (6.3)$$

kde

- V_m - mezerovitost směsi [%]
 ρ_m - maximální objemová hmotnost směsi [kg/m^3]
 ρ_b - objemová hmotnost zkušební tělesa [kg/m^3]

6.2.4. Zkouška pojíždění kolem podle ČSN EN 12697-22

Zkouška pojíždění kolem se provádí dle normy ČSN EN 12697-22, [28] kdy podstatou zkoušky je stanovit náchylnost asfaltové směsi k tvorbě trvalých deformací. Ta se měří pomocí hloubky vyjeté koleje vzniklé opakovaným pojezdem zatíženého kola (10 000 zatěžovacích cyklů, což odpovídá 20 000 pojezdů) při konstantní teplotě, která byla v rámci disertační práce 50 a 60 °C. Měření probíhalo na zkušebních deskách, které byly zhutněny pomocí zhutňovače při teplotě 155 °C. Rozměry zkušební desky byly 260 mm x 320 mm x 40 mm.



Obrázek 30: Zařízení na zkoušku pojíždění kolem [16]

Výsledkem zkoušky je grafické znázornění hloubky vyjeté koleje v závislosti na počtu cyklů (pojezdů). Základní charakteristikou je nárůst vyjeté koleje, který se značí WTS_{AIR} .

$$WTS_{AIR} = \frac{d_{10\,000} - d_{5\,000}}{5} \quad (6.4)$$

kde

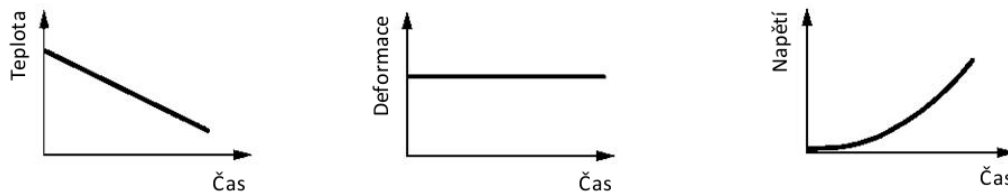
- WTS_{AIR} - přírůstek hloubky vyjeté koleje [$\text{mm}/10^3$ zatěžovacích cyklů]
 $d_{10\,000}, d_{5\,000}$ - hloubka vyjeté koleje po 5 000, resp. 10 000 cyklech [mm]

Dále se hodnotí parametr průměrné poměrné hloubky vyjeté koleje PRD_{AIR} na vzduchu. Což je průměr poměrné hloubky vyjeté koleje ze dvou (nebo více) zkušebních těles s přesností $\pm 0,1$ %.

6.2.5. Nízkoteplotní vlastnosti a tvorba trhlin pomocí jednoosé zkoušky tahem podle ČSN EN 12697-46

Tato evropská norma [37] specifikuje jednoosé zkoušky tahem pro určení charakteristik odolnosti asfaltové směsi vůči tvorbě trhlin při nízkých teplotách. V rámci disertační práce byla použita zkouška TSRST kde s rovnoměrným řízeným poklesem teploty se zjišťuje minimální teplota, kterou je asfaltová směs schopna snést před porušením.

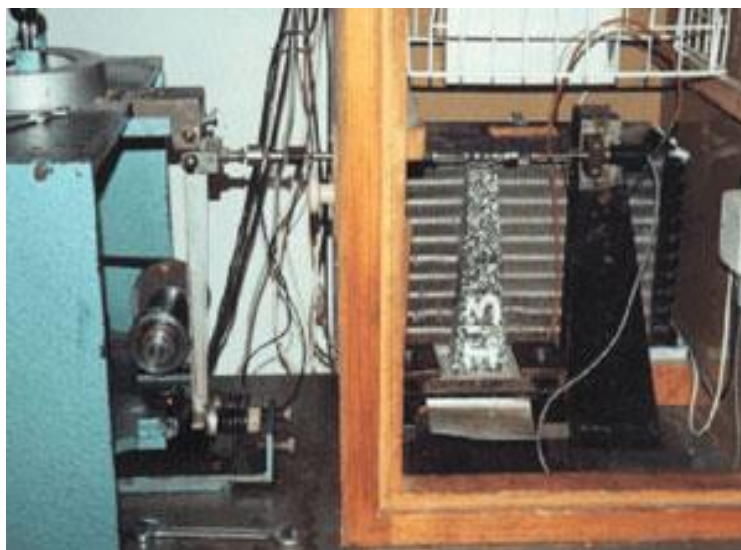
Zkušební tělesa ze ztuhlé asfaltové směsi tvaru trámečku o rozměrech 50 mm x 50 mm x 200 mm jsou vystavena vznikajícímu tahovému napětí způsobeného jeho smršťováním s klesající teplotou za podmínky zabránění jeho zkracování ($\epsilon_t = 0$). Zkouškou je stanovena maximální tahová síla (tahové napětí) a kritická teplota vzniku mrazové trhliny. Princip zkoušky je zřetelný z Obrázku 31.



Obrázek 31: Podstata zkoušky TSRST [16]

6.2.6. Stanovení modulu tuhosti asfaltové směsi podle ČSN EN 12697-26

Modul tuhosti asfaltové směsi byl stanoven podle ČSN EN 12697-26 [30] zkouškou ohybem metodou 2PB-TR: dvoubodový ohyb na tělesech tvaru jednostranně vetknutého komolého klínu (Obrázek 32), který je podrobněji popsán v příloze A této normy. Zkouška se provádí na ztuhlých tělesech při ustáleném harmonickém zatížení. Výsledek zkoušky slouží jako jeden z parametrů pro návrh konstrukce vozovky.



Obrázek 32: Zkušební zařízení pro měření modulu tuhosti asfaltové směsi metodou 2PB-TR [67]

V rámci zkoušky je stanoven komplexní modul, který představuje vztah mezi napětím a přetvořením pro lineárně viskoelastický materiál, který je vystaven ustálenému

harmonickému zatížení v čase t . Jedná se o ekvivalentní napětí, které se hodnotí například i při stanovení komplexního smykového modulu v zařízení dynamického smykového reometru (DSR), který je popsán v kapitole 6.3.4.

Během zkoušky jsou vzorky zatěžovány v rozsahu lineárního přetvoření. Využívá se buď konstantní síla zatěžování, nebo konstantní přetvoření. Při zkoušce se měří amplituda napětí a poměrné přetvoření spolu s fázovým úhlem mezi napětím a poměrným přetvořením.

Hodnoty měření, které se získají během zkoušky jsou vyvozená síla F , posun z a fázový úhel Φ . Následně lze vypočítat dvě složky modulu tuhosti. Reálnou složku E_1 a imaginární složku E_2 .

$$E_1 = \gamma \cdot \left(\frac{F}{z} \cdot \cos(\Phi) + \frac{\mu}{10} \cdot \omega^2 \right) \quad (6.5)$$

$$E_2 = \gamma \cdot \left(\frac{F}{z} \cdot \sin(\Phi) \right) \quad (6.6)$$

Kde γ je faktor tvaru jako funkce velikosti a tvaru zkušební tělesa.

$$\gamma = \frac{12L^3}{b(h_1-h_2)^3} \left[\left(2 - \frac{h_2}{2h_1} \right) \frac{h_2}{h_1} - \frac{3}{2} - \ln \frac{h_2}{h_1} \right] \quad (6.7)$$

μ je faktor hmotnosti, který je funkcí hmotnostního složení tělesa M a hmotností pohyblivých částí m , které svojí setrvačnou silou ovlivňují výslednou sílu. M a m se vyjadřují v gramech.

$$\gamma = 0,135M + m \quad (6.8)$$

Výsledkem měření je aritmetický průměr dílčích výsledků modulu tuhosti a fázového posunu ϕ při dané teplotě a frekvenci.

6.3. Zkušební metody popisující fyzikální vlastnosti asfaltových pojiv

Pro hodnocení asfaltových pojiv v rámci řešení disertační práce byly využity empirické a funkční zkoušky, které jsou blíže popsány v následujících kapitolách.

6.3.1. Stanovení penetrace jehlou podle ČSN EN 1426

Penetrace jehlou byla prováděna dle normy ČSN EN 1426 [50], kdy penetrace vyjadřuje hloubku průniku jehly do asfaltového pojiva. Zkouška probíhá při teplotě 25 °C, při aplikovaném zatížení 100 g po dobu 5 s. Příklad zařízení pro měření penetrace jehlou je zobrazen na Obrázku 33. Penetrace jehlou se vyjadřuje jako aritmetický průměr naměřených hodnot v desetinách milimetru (0,1 mm = 1 penetrační jednotka) zaokrouhleno na nejbližší celé číslo.

Výsledky zkoušky penetrace jehlou následně slouží k zařidování asfaltových pojiv do jednotlivých gradačních tříd.



Obrázek 33: Příklad na stanovení penetrace jehlou [86]

6.3.2. Stanovení bodu měknutí metodou kroužek a kulička podle ČSN EN 1427

Stanovení bodu měknutí metodou kroužek a kulička se provádí podle ČSN EN 1427. [51] Zkouška spočívá v tom, že jsou dva kotoučky z asfaltového pojiva, odlité v mosazných kroužcích s osazením, se zahřívají řízenou rychlostí v kapalinové lázni, přičemž na každém z nich je umístěna ocelová kulička. Bod měknutí se zaznamená jako průměr teplot, při kterých tyto dva kotoučky změknou natolik, aby umožnily každé z kuliček, obalených v asfaltovém pojivu, propadnout na vzdálenost $(25,0 \pm 0,4)$ mm. [51] Příklad pro stanovení bodu měknutí metodou kroužek a kulička je zobrazen na Obrázku 34.



Obrázek 34: Příklad na stanovení bodu měknutí metodou KK [8]

Pomocí hodnoty bodu měknutí lze hodnotit chování asfaltového pojiva při vyšších teplotách, a tudíž například stanovit jeho odolnost vůči vzniku trvalých deformací, které hrozí zejména v letních měsících. V rámci výzkumných projektů zejména v zahraničí ovšem

pro popis odolnosti pojiva vůči trvalým deformacím je upřednostňováno využití funkčních zkoušek, mezi které patří například MSCR test prováděný pomocí zařízení DSR, který je popsán v kapitole 6.2.6. a mnohem lépe simuluje namáhání pojiva ve směsi při pojezdu vozidla.

Z výsledků empirických zkoušek penetrace a bodu měknutí je možné stanovit penetrační index (I_p), který indikuje teplotní citlivosti asfaltového pojiva. Penetrační index se vypočítá dle ČSN EN 12591 [23] z Rovnice 6.9.

$$I_p = \frac{20 \cdot t_{Rab} + 500 \cdot \log P - 1952}{t_{Rab} - 50 \cdot \log P + 120} \quad (6.9)$$

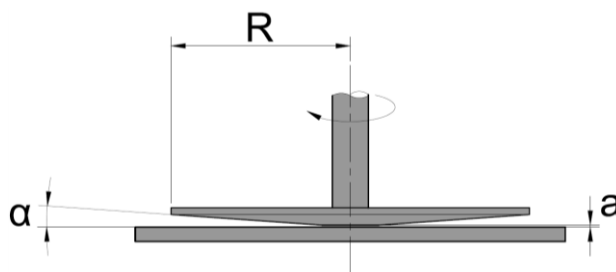
Kde t_{Rab} - je teplota bodu měknutí [$^{\circ}\text{C}$]

$\log P$ - je dekadický logaritmus penetrace při 25°C [0,1 mm]

Pomocí penetračního indexu lze obecně asfalty rozdělit na multigrádové a oxidované, které mají penetrační index kladný a dále na silniční a destilační asfalty, které mají penetrační index záporný. Obecně lze říct, že asfalt s vyšším penetračním indexem má lepší viskoelastické vlastnosti. [107]

6.3.3. Stanovení dynamické viskozity podle ČSN EN 13702

Pro hodnocení dynamické viskozity byl v rámci disertační práce využit postup dle ČSN EN 13702, [48] kde je dynamická viskozita měřena pomocí zařízení DSR při použití geometrie kužel – deska (viz Obrázek 35) v teplotním rozsahu 90 až 165°C (s teplotním skokem po 15°C).



Obrázek 35: Zkušební geometrie typu kužel – deska pro měření dynamické viskozity [17]

Samotné stanovení viskozity je důležité s ohledem na zaručení čerpatelnosti asfaltového pojiva, dále na zpracovatelnost asfaltové směsi při pokládce [70] a taktéž lze pomocí hodnoty dynamické viskozity popsat odolnost asfaltového pojiva vůči trvalým deformacím. Pro hodnocení dynamické viskozity se nejběžněji používá teplota 135°C .

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

Norma ČSN EN 14770 [52] určuje řadu metod používajících dynamický smykový reometr (DSR) pro měření reologických vlastností asfaltových pojiv (Obrázek 36). Postup zahrnuje stanovení komplexního smykového modulu a úhlu fázového posunu pojiv v širokém rozsahu zkušebních frekvencí a teplot při zkoušce oscilace ve smyku.

Ze zkoušky lze při dané teplotě a frekvenci vypočítat absolutní hodnotu komplexního smykového modulu $|G^*|$, úhel fázového posunu δ a složky G' , G'' , J' a J'' komplexního smykového modulu a komplexní poddajnosti.

Metoda je použitelná pro nezestárlá, zestárlá a znovuzískaná asfaltová pojiva, pojiva získaná z ředěných a fluxovaných asfaltů stabilizovaných z emulzí.

Oscilační měření pro hodnocení pojiv v rámci disertační práce probíhalo při teplotách 10 až 70 °C s krokem 5 °C při sadách frekvencí zatěžování 0,1 Hz až 10 Hz (frequency sweeps). Měření bylo provedeno pomocí geometrií o průměrech:

- 25 mm při teplotě 70 až 40 °C, nastavení mezery 1 mm
- 8 mm při teplotě 40 až 10 °C, nastavení mezery 2 mm



Obrázek 36: Dynamický smykový reometr [71]

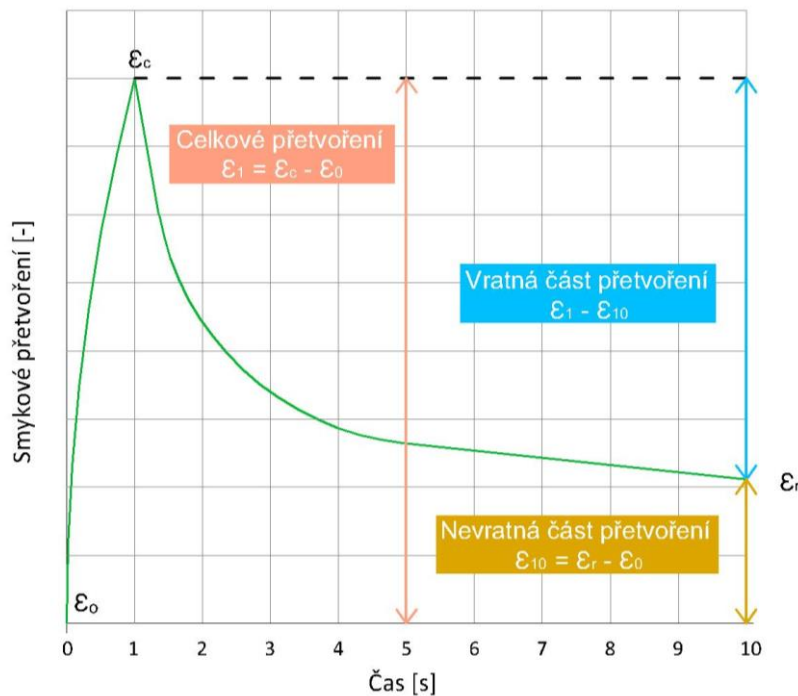
6.3.5. Zkouška MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery Test) dle ČSN EN 16659

Tato zkušební metoda podle ČSN EN 16659 [54] se zabývá stanovením procentuálního zotavení a nevratné smykové poddajnosti asfaltových pojiv pomocí zkoušky MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery Test). Zkouška MSCR se provádí také pomocí DSR v nastavení pro měření smykového dotvarování v oblasti pomalého toku (creep) při stanovené teplotě.

Tato zkušební metoda se používá k stanovení přítomnosti elastické odezvy asfaltových pojiv za podmínek smykového dotvarování a následného zotavení stanoveného při dvou různých hodnotách smykového napětí a při určené teplotě. Přítomnost elastické odezvy materiálu je kvantifikována měřením procentuálního zotavení a nevratné smykové poddajnosti asfaltového pojiva. Ukazuje se, že nevratná smyková poddajnost je indikátorem odolnosti asfaltového pojiva vůči tvorbě trvalých plastických deformací při opakovaném zatížení.

Pro měření v rámci disertační práce byly použity paralelní desky o průměru 25 mm s mezerou 1 mm. Zkušební vzorek byl zatížen konstantním napětím po dobu 1 sekundy, poté

po dobu 9 sekund mu bylo umožněno zotavení. Bylo provedeno celkem 10 cyklů s fází dotvarování a fází zotavení při smykovém napětí 0,1 kPa následovaných dalšími 10 cykly při smykovém napětí 3,2 kPa (Obrázek 37) při teplotách 50, 60 a 70 °C.



Obrázek 37: Typický cyklus dotvarování a zotavení

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

Tato evropská norma ČSN EN 14771 [53] určuje metodu stanovení modulu tuhosti za ohybu při pomalém toku (creep) asfaltových pojiv v rozsahu od 30 MPa do 1 GPa za použití průhybového trámečkového reometru (Obrázek 38).

Průhybový trámečkový reometr se používá k měření průhybu ve středu při tříbodovém ohybu trámečku asfaltového pojiva. Na střed zkoušeného tělíška se po stanovenou dobu vkládá konstantní zatížení a měří se průhyb jako funkce času. Pro regulaci teploty se používá chladicí lázeň. Modul tuhosti za ohybu zkušebního tělíška v určeném čase zatížení se vypočítává z ohybového napětí a ohybové deformace.

Vytvoří se graf závislosti naměřeného zatížení a naměřeného průhybu zkušebního tělíška na době zatížení v intervalech 0,5 s nebo méně, počínaje vložení usazovacího zatížení. Vypočítají se následující hodnoty:

- $S_m(t)$ - modul tuhosti za ohybu v čase t
- m -hodnota pro tytéž doby zatěžování



Obrázek 38: Průhybový trámečkový reometr [113]

Modul tuhosti za ohybu zkušebního tělíška v časech zatížení 8,0 s; 15,0 s; 30,0 s; 60,0 s; 120,0 s; 240,0 s z rozměrů zkušebního tělíška změřeného zkušebního zatížení a změřeného průhybu testovaného vzorku za použití Rovnice 6.10.

$$Sm(t) = \frac{PL^3}{4bh^3 \times \delta(t)} \quad (6.10)$$

Kde $Sm(t)$ - modul tuhosti za ohybu v čase t [MPa]
 P - naměřené zkušební zatížení [N]
 L - vzdálenost mezi podpěrami [mm]
 b - šířka zkušebního tělíška [mm]
 h - tloušťka zkušebního tělíška [mm]
 $\delta(t)$ - průhyb zkušebního tělíška v čase t [mm]

A m-hodnota pro tytéž doby zatěžování za použití Rovnice 6.11.

$$m(t) = \left| \frac{d \log S(t)}{d \log(t)} \right| = |B + 2 \times C \times \log(t)| \quad (6.11)$$

Kde B a C - regresní koeficient [-]
 T - doba zatěžování v [s]

7. POUŽITÉ MATERIÁLY PRO VÝROBU ASFALTOVÝCH SMĚSÍ TYPU SMA V LABORATOŘI

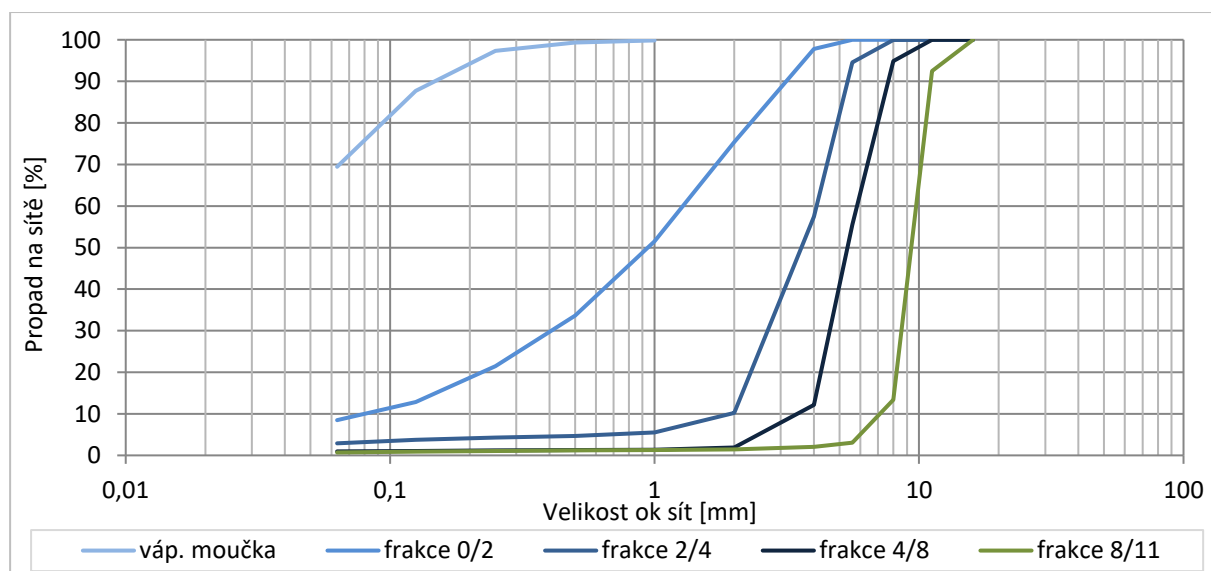
V rámci laboratorního návrhu směsi typu SMA 11S bylo vyrobeno šest směsí lišících se množstvím a druhem obsaženého R-materiálu. První směs byla referenční bez R-materiálu. Do dalších třech směsí bylo přidáno 10 %, 20 % a 30 % běžného R-materiálu a do posledních dvou směsí bylo přidáno 30 % a 50 % R-materiálu, který byl vyfrézován selektivně ze směsi SMA.

7.1. Kamenivo

Pro laboratorní návrhy směsí asfaltového koberce mastixového SMA 11S s různým podílem R-materiálu bylo použito kamenivo z kamenolomu Sýkořice ve Zbečně frakce 0/2, 2/5, 4/8, 8/11 a vápencová moučka. Síťové rozbory jednotlivých frakcí jsou uvedeny v Tabulce 9 a graficky znázorněny v Grafu 7.

Tabulka 9: Procentuální propad na sítích u jednotlivých frakcí kameniva a vápencové moučky

Frakce	Velikost oka síta										
	16	11,2	8	5,6	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
8/11	100,0	92,5	13,4	3,1	2,0	1,4	1,3	1,2	1,1	0,9	0,7
4/8	100,0	100,0	94,9	55,5	12,1	1,9	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0
2/5	100,0	100,0	100,0	94,5	57,5	10,2	5,6	4,7	4,3	3,8	2,9
0/2	100,0	100,0	100,0	100,0	97,8	75,4	51,5	33,6	21,5	12,8	8,5
váp. m.	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,9	99,4	97,4	87,7	69,5



Graf 7: Křivky zrnitosti různých frakcí kameniva a vápencové moučky

7.2. R-materiál

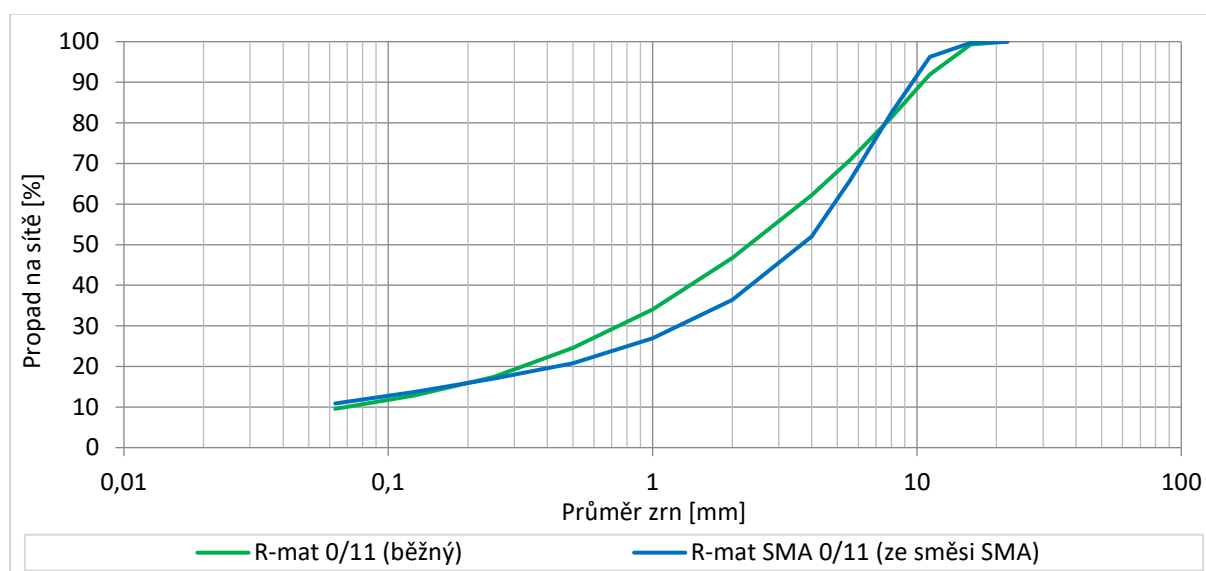
Pro laboratorní návrhy byly použity dva R-materiály. R-materiál, dále s označením R-mat, byl získán vyfrézováním celé konstrukce netuhé vozovky z asfaltové směsi typu

asfaltový beton AC, tedy jak z obrusné ložní, tak podkladní vrstvy. Druhý R-materiál, dále označením R-mat SMA, byl získán selektivním frézováním obrusné vrstvy ze směsi typu asfaltového koberce mastixového SMA. Oba R-materiály byly po vyfrézování předrceny na frakci 0/11 a homogenizovány.

V Tabulce 10 a Grafu 8 lze vidět rozdílnost průběhů křivek zrnitostí R-materiálů. Průběh odpovídá typu asfaltové směsi, z které byl R-materiál vyfrézován. V případě „běžného“ R-materiálu (R-mat) je křivka plynulá, tedy zastoupení všech frakcí je rovnoměrné a všechny frakce se podílejí na kostře asfaltové směsi jako v případě AC. Druhá křivka zrnitosti vyobrazená modře znázorňuje průběh „modifikovaného“ R-materiálu (R-mat SMA). V tomto případě můžeme vidět zalomenou čáru zrnitosti typickou pro asfaltový koberec mastixový.

Tabulka 10: Průměr síťových rozborů jednotlivých frakcí R-materiálu v procentech

R-mat	22	16	11,2	8	5,6	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
0/11 běžný	100,0	99,3	91,9	81,3	71,0	62,2	46,7	34,0	24,6	17,4	12,8	9,6
0/11 SMA	100,0	99,7	96,3	82,4	66,0	52,0	36,4	26,9	20,8	17,0	13,7	10,9



Graf 8: Křivky zrnitosti používaných R-materiálů

7.3. Asfaltové pojivo

Při návrhu asfaltových směsí s obsahem R-materiálu bylo nutné ověřit vlastnosti jednak nativního pojiva, ale zároveň i vlastnosti pojiva obsaženém v R-materiálu.

7.3.1. Nativní asfaltové pojivo

Pro návrh směsi asfaltového koberce mastixového, který je používán jako obrusná vrstva vozovek s nejvyššími třídami dopravního zatížení, se standardně v ČR používá modifikovaný asfalt. Proto bylo použito modifikované asfaltové pojivo PmB 45/80-55. Dle normy ČSN 65 7222-1 musí takové pojivo mít penetraci v rozmezí 45 až 80 [0,1 mm] a bod měknutí minimálně 55 °C. Ačkoliv bylo asfaltové pojivo v průběhu řešení disertační práce

dobro jedním výrobcem, jeho parametry se v průběhu dodávek lišily. V Tabulce 11 jsou uvedeny měnící se vlastnosti použitého pojiva pro dané laboratorní návrhy. V případě směsi bez a s „běžným“ R-materiálem (R-mat) mělo asfaltové pojivo stejnou penetraci, ale v případě přidání 30 % běžného R-materiálu byl bod měknutí o 7,9 °C nižší. Také by pojivo mělo splnit podmínku minimálního bodu měknutí 55 °C, což nespĺnilo o 1,3 °C. V případě použití „modifikovaného“ R-materiálu (R-mat SMA) mělo asfaltové pojivo naopak vyšší bod měknutí a zároveň nižší penetraci. To by ukazovalo na větší modifikaci pojiva. Tyto rozdílnosti mohly mít vliv na výsledné chování vyrobených asfaltových směsí.

Tabulka 11: Vlastnosti asfaltového pojiva přidávaného do směsi SMA 11S s různým množstvím R-materiálu

	Použito do SMA 11S	Penetrace jehlou	Bod měknutí
		[0,1 mm]	[°C]
Colflex PmB 45/80-55	0, 10, 20 % R-mat	64,7	61,6
	30 % R-mat	65,7	53,7
	30 a 50 % R-mat SMA	59,3	73,3

7.3.2. Obsažené asfaltové pojivo v R-materiálech

Na znovuzískaném asfaltovém pojivu z R-materiálů byly provedeny empirické i funkční zkoušky a zároveň byl ověřen obsah asfaltového pojiva v R-materiálech. Výsledky empirických zkoušek jsou uvedeny v Tabulce 12.

Tabulka 12: Vlastnosti asfaltových pojiv obsažených v R-materiálech

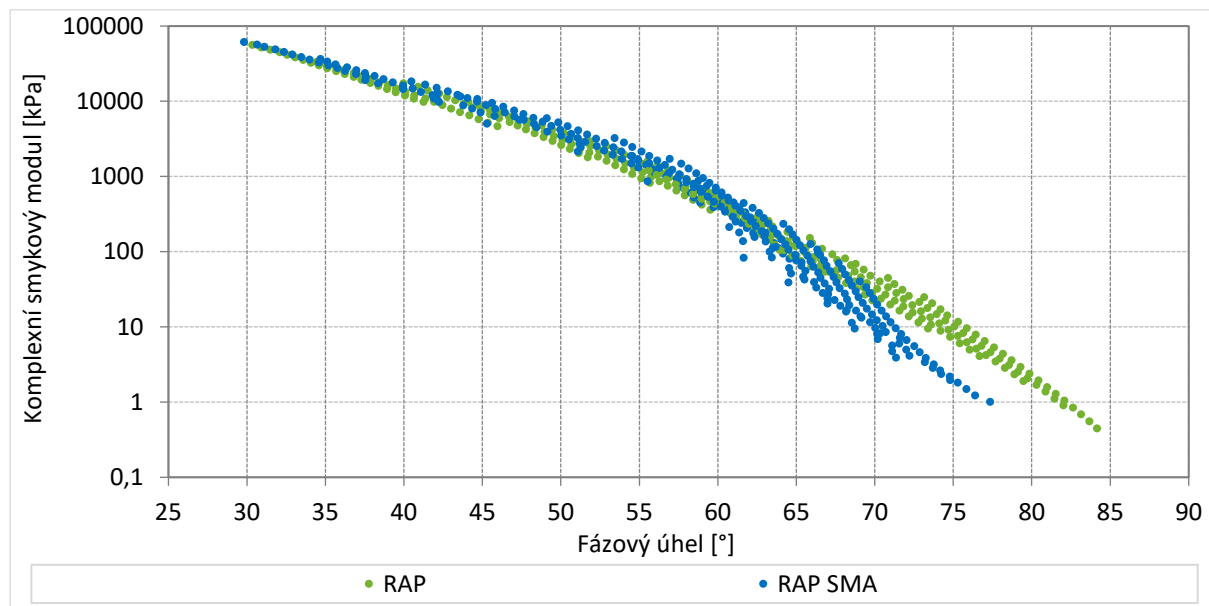
	Obsah pojiva	Penetrace jehlou	Bod měknutí
	[%]	[0,1 mm]	[°C]
R-mat běžný	5,2	24,7	64,4
R-mat SMA	6,4	19,7	69,6

Výsledky empirických zkoušek jsem porovnávala s 10 různými R-materiály, které měly průměrnou hodnotu penetrace jehlou ($15,9 \pm 4,7$) [0,1 mm], čímž lze říct, že oba použité R-materiály jsou poměrně měkké. V případě bodu měknutí byla průměrná hodnota R-materiálů ($67,1 \pm 5,8$) °C. Vyšší hodnota bodu měknutí u R-materiálu z SMA je způsobena jeho modifikací. Naopak běžný R-materiál lze charakterizovat jako měkčí i z pohledu bodu měknutí.

V Grafu 9 je zobrazen Blackův diagram, který popisuje závislost komplexního modulu ve smyku na fázovém úhlu. Z průběhu křivek lze hodnotit citlivost asfaltového pojiva na teplotu a míru zatížení. Esovitě zakřivení je typické pro modifikovanou pojiva, což potvrzuje modifikaci pojiva obsaženém v R-materiálu SMA.

Naopak pojivo obsažené v běžném R-materiálu vykazuje charakteristický průběh zestárlého silničního asfaltu. Originální silniční asfalt má zaoblenější tvar a je posunut více vpravo. Posun u silničního pojiva obsaženém v R-materiálu je způsoben stárnutím. Rozdíl mezi modifikovaným a silničním asfaltem se projevuje především v oblasti vyšších teplot, kdy jsou

při stejné hodnotě komplexního smykového modulu různé fázové úhly. Nižší fázový úhel znamená vyšší pružnost a tím i vyšší odolnost vůči tvorbě trvalých deformací.



Graf 9: Blackův diagram použitých R-materiálů (RAP - běžný R-materiál, RAP SMA – R-materiál z SMA)

7.4. Oživovací přísada

Pro změkčení zestárlého (zoxidovaného) asfaltového pojiva obsaženého v R-materiálu byla použita oživovací přísada s obchodním názvem Storflux od výrobce Storimplex GmbH. Storflux je derivát ropy získaný ze sekundární rafinace. Množství změkčovadla se obecně dávkuje přesně na množství asfaltového pojiva, které je potřeba zregenerovat.

Konkrétní dávkování dle výrobce Storflux se určuje podle hodnoty bodu měknutí pojiva z R-materiálu, a to tak, že pokud je třeba snížit bod měknutí zestárlého pojiva o 1 °C, je nutno dávkovat 1 % oživovací přísady z hmotnosti asfaltového pojiva, které chceme oživit. Určením optimálního dávkování oživovacích přísad se zabývá výzkumný projekt TJ01000248. [117]

Přesné dávkování použité pro zkoušené směsi je uvedené v Tabulce 13.

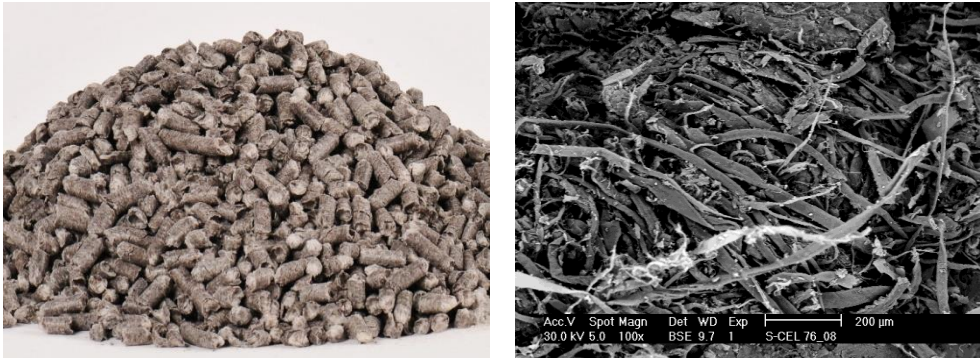
Tabulka 13: Dávkování oživovací přísady v % na tunu R-materiálu dle jeho množství ve směsi

	Obsah R-materiálu	Množství oživovací přísady
		[%]
SMA 11S	0, 10, 20 % R-mat	0,2
	30 % R-mat	0,3
	30 a 50 % R-mat SMA	0,4

7.5. Celulózová vlákna

Celulózová vlákna u směsi typu SMA slouží jako nosič pojiva umožňující jeho zvýšené dávkování. Díky většímu měrnému povrchu snižuje stékavost asfaltového pojiva z kameniva. Při návrzích v laboratoři bylo použito rozmělněné vlákno s označením S-CEL 7G od výrobce CIUR a.s. Celulózové vlákno se vyrábí z výběrového tříděného papíru technologií zpětného

rozvláknění v turbíně na základní celulózní vlákna. Na Obrázku 39 je zobrazeno celulózní vlákno S-CEL 7G včetně stonásobného zvětšení.



Obrázek 39: Celulózní vlákno S-CEL 7G (vpravo 100 x zvětšené) [99]

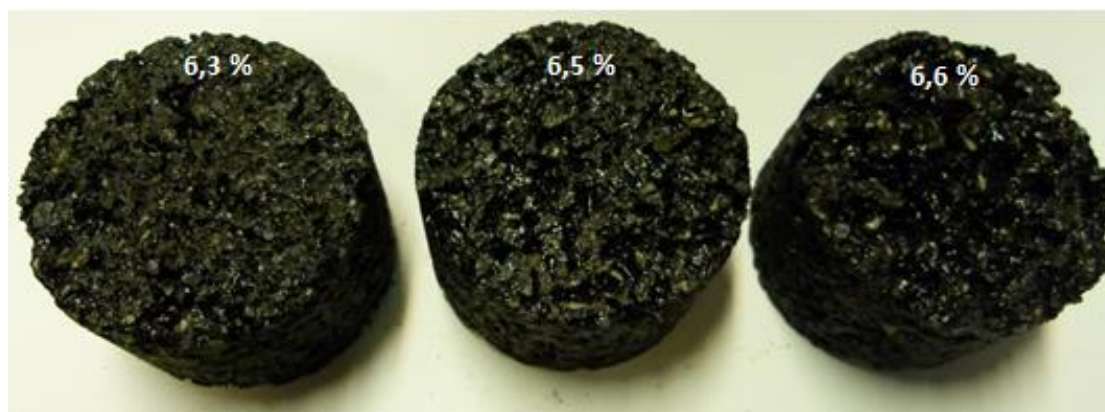
8. LABORATORNĚ NAVRŽENÉ SMĚSI – NÁVRHY, VÝSLEDKY

U laboratorně navržených směsí byla nejprve stanovena objemová hmotnost a mezerovitost dle ČSN EN 12697-6 [40]. Následně byly jednotlivé směsi podrobeny funkčním zkouškám. Odolnost vůči vysokým teplotám byla zjišťována pomocí zkoušky poježdění kolem dle ČSN EN 12697-22 [28], chování za běžných provozních teplot pomocí stanovení modulu tuhosti dle ČSN EN 12697-26 [30] a nízkoteplotní vlastnosti byly testovány dle postupu popsaného v normě ČSN EN 12697-46 [37].

Následně bylo z jednotlivých směsí znovuzískáno pojivo, které bylo navzájem porovnáno pomocí empirických zkoušek penetrace jehlou dle ČSN EN 1426 [50] a bod měknutí metodou kroužek a kulička dle ČSN EN 1427 [51]. Dále byly hodnoceny funkční vlastnosti. Dynamická viskozita podle ČSN EN 13702 [48], komplexní modul ve smyku dle ČSN EN 14770 [52] a modul tuhosti pomocí průhybového trámečkového reometru dle ČSN EN 14771 [53].

8.1. Laboratorní návrh směsí SMA 11S s různým podílem R-materiálu

Prvotní návrh směsi bez R-materiálu byl navržen tak, že obsahoval 9,5 % vápenné moučky, 15 % frakce 0/2, 18 % frakce 2/5, 8 % frakce 4/8 a 48,5 % frakce 8/11. Lišil se v dávkování asfaltového pojiva, které bylo 6,3 %, 6,5 % a 6,6 %. U všech návrhů byla zjišťována maximální objemová hmotnost dle ČSN EN 12697-5 [39]. Byla vyrobena marshallova tělesa (viz Obrázek 40), pomocí kterých byly stanoveny objemové hmotnosti dle ČSN EN 12697-6 [40] a mezerovitost dle ČSN EN 12697-8 [41].



Obrázek 40: Marshallova tělesa směsí SMA 11S s různým obsahem asfaltového pojiva

Na základě výsledků bylo jako optimální množství asfaltového pojiva zvoleno 6,5 %. V Tabulce 14 jsou uvedeny charakteristiky následně měřené na jednotlivých návrzích směsí s různým obsahem a druhem R-materiálu. Podíl frakcí u jednotlivých variant byl optimalizován tak dlouho, dokud nebyly splněny české národní požadavky normy ČSN EN 13108-5 [45]. Požadavek na mezerovitost je dle této normy 3,0 % až 4,5 %, který byl ve všech případech splněn. V připravované aktualizaci českých požadavků se uvažuje o změně na rozsah mezerovitosti 2,5 % až 4,0 %, čímž bude docíleno, aby směs byla mírně uzavřenější. Při návrhu směsí byl brán požadovaný rozsah mezerovitosti 3,0 % až 4,0 %, tak aby byl splněn současný i nově návrhovaný limit.

Tabulka 14: Objemové hmotnosti a mezerovitost směsí SMA 11S s různým obsahem R-materiálu

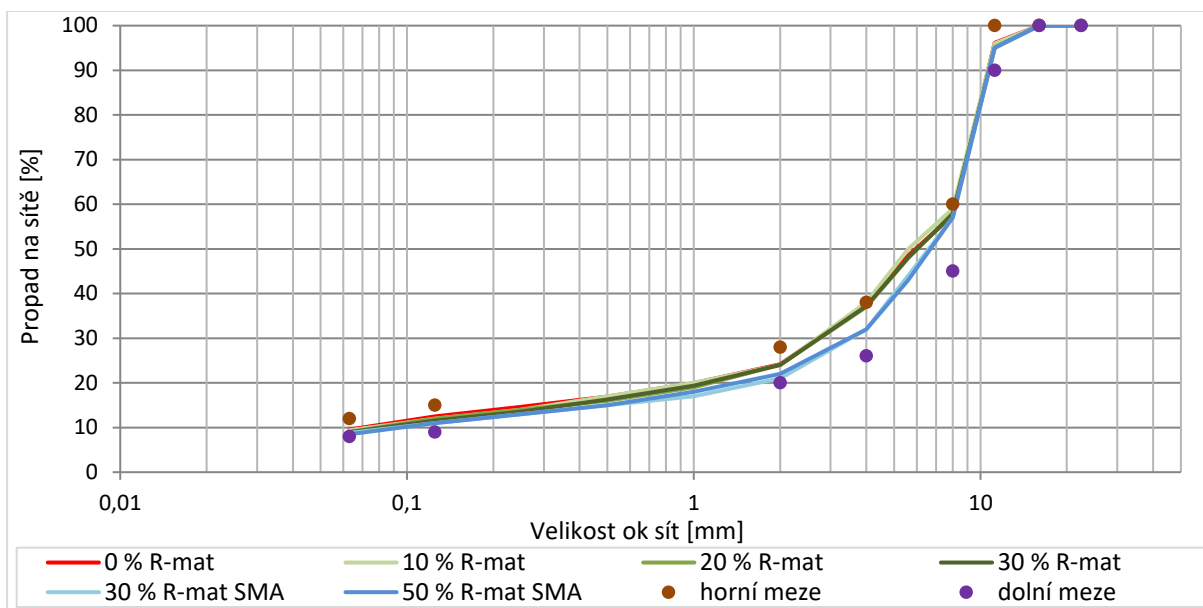
		0 % R-mat	10 % R-mat	20 % R-mat	30 % R-mat	30 % R-mat SMA	50 % R-mat SMA
Maximální objemová hmotnost ρ_{mv}	[kg/m ³]	2 563,8	2 564,8	2 537,9	2 545,0	2 567,2	2 579,0
Objemová hmotnost ρ_{bssd}	[kg/m ³]	2 468,1	2 473,1	2 444,4	2 452,6	2 475,0	2 490,8
Mezerovitost	[%]	3,8	3,6	3,7	3,6	3,6	3,5

V Tabulce 15 je uveden procentuální propad na sítích u jednotlivých směsí SMA 11S s různým množstvím R-materiálu. Zároveň jsou zde uvedeny mezní hodnoty dle ČSN EN 13108-5 [45], které jsou splněny u všech navržených směsí.

Tabulka 15: Navržené křivky zrnitosti ve směších SMA 11S s různým podílem R-materiálu

Velikost ok sít	0 % R-mat	10 % R-mat	20 % R-mat	30 % R-mat	30 % R-mat SMA	50 % R-mat SMA	ČSN EN 13181-5	
							dolní mez	horní mez
[mm]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
22,4	100	100	100	100	100	100	100	100
16	100	100	100	100	100	100	100	100
11,2	96	96	95	95	95	95	90	100
8	57	59	58	58	57	57	45	60
5,6	49	50	48	48	44	43	-	-
4	37	38	37	37	32	32	26	38
2	24	24	24	24	21	22	20	28
1	20	20	19	19	17	18	-	-
0,5	17	17	16	16	15	15	-	-
0,25	15	14	14	14	13	13	-	-
0,125	12	12	12	12	11	11	9	15
0,063	9,6	9,4	9,0	9,0	8,8	8,5	8	12

V Grafu 10 jsou znázorněny čáry zrnitosti navržených směsí SMA 11 S s 0 % až 50 % R-materiálu. Modrými odstíny jsou vyznačeny směsi obsahující R-materiál z odděleného frézování ze směsi SMA. U těchto směsí lze vidět více zalomenou čáru zrnitosti, což je pro tyto směsi žádoucí. Znamená to větší zastoupení hrubozrnějších frakcí. Červeně je vyznačena směs referenční bez R-materiálu, která je plně překryta ostatními návrhy, tedy lze konstatovat, že se průběh čar zrnitostí podařil navrhnout obdobně, jako by neobsahovala R-materiál. Zelenými odstíny jsou označeny směsi obsahující „běžný“ R-materiál, tedy vyfrézovaný z celého konstrukčního souvrství asfaltových vrstev asfaltového betonu, který má plynulou čáru zrnitosti. Zde vidíme tendenci „narovnění“ čáry zrnitosti a přiblížení se horním mezím u větších frakcí kameniva. Lze konstatovat, že 30 % „běžného“ R-materiálu ve směsi je maximální z hlediska zrnitosti. V případě přidání většího množství tohoto R-materiálu by již nebyly splněny požadavky dle ČSN EN 13108-5 [45]. Čára zrnitosti by již nebyla zalomena ale plynulá jako v případě asfaltového betonu.



Graf 10: Čáry zrnitostí směsí SMA 11S s různým podílem R-materiálu

V Tabulce 16 jsou uvedeny procentuální podíly jednotlivých složek, které jsou obsaženy v navržených variantách asfaltové směsi SMA 11S. V případě přilnavosti přísady (TEGO Addibit L300) je množství uvažováno z obsahu nativního asfaltového pojiva, u oživovací přísady (Storflux) z hmotnosti R-materiálu. Obsažené asfaltové pojivo v R-materiálu bylo započítáno, tedy nativní pojivo bylo dávkováno ve sníženém množství tak, aby celkové množství bylo 6,5 % z celkové hmotnosti směsi. Asfaltové pojivo v R-materiálu bylo tedy uvažováno jako plnohodnotná surovina.

Tabulka 16: Množství obsažených komponentů ve směsích SMA 11S s různým podílem R-materiálu

	0 % R-mat	10 % R-mat	20 % R-mat	30 % R-mat	30 % R-mat SMA	50 % R-mat SMA
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Vápenková moučka	10,5	9,5	8,0	7,5	6,5	3,7
Frakce 0/2	15,0	10,0	6,0	3,0	3,0	-
Frakce 2/5	18,0	18,0	16,0	8,0	9,5	1,0
Frakce 4/8	8,0	8,0	6,0	9,0	8,5	7,0
Frakce 8/11	48,5	44,5	44,0	42,5	42,5	38,3
R-mat	-	10,0	20,0	30,0	-	-
R-mat SMA	-	-	-	-	30,0	50,0
S-CEL 7G	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Colflex 45/80-65	6,5	6,0	5,5	5,0	4,6	3,3
Addibit L300	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Storflux	-	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4
Mezerovitost	3,8	3,6	3,7	3,6	3,6	3,5

Dle návrhů byla vyrobena zkušební tělesa, na kterých byly provedeny funkční zkoušky, které slouží k posouzení chování asfaltové směsi v konstrukci vozovky. Míra zhutnění

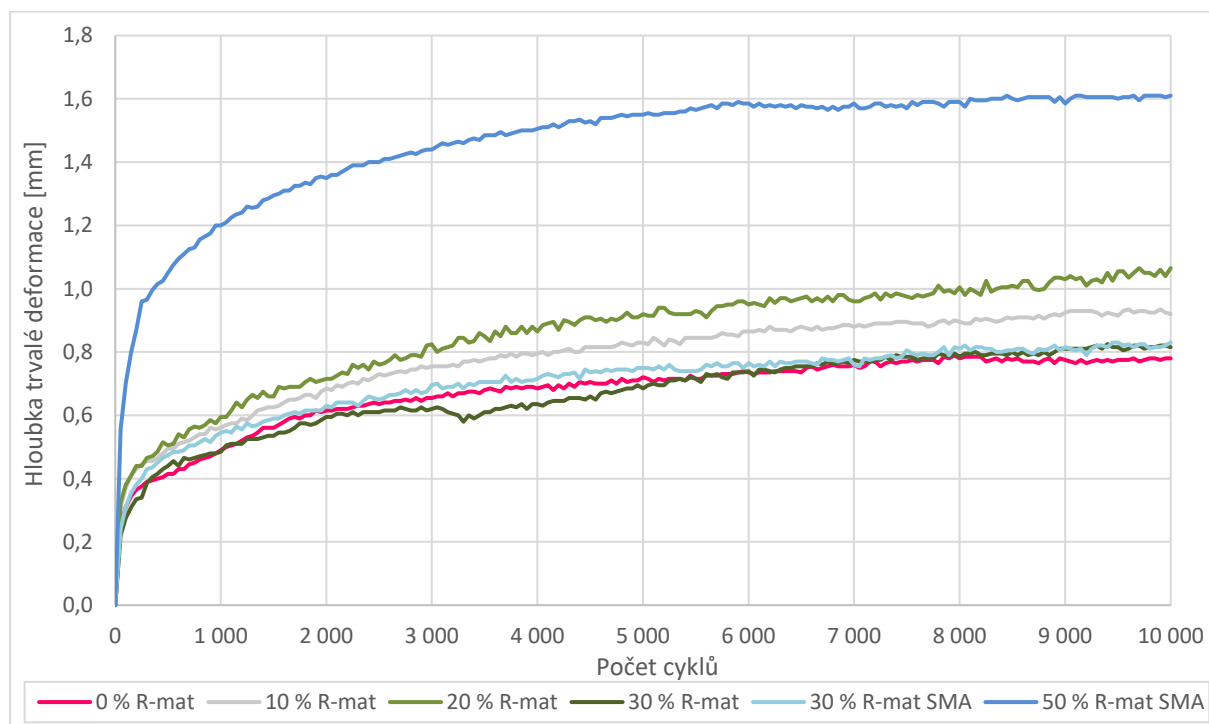
zkušebních těles se pohybovala v rozmezí 99,0 – 101,0 %. Výsledky jednotlivých zkoušek jsou uvedeny v následující kapitole.

8.2. Výsledky zkoušek na asfaltových směsích

Asfaltové směsi byly hodnoceny pomocí funkčních zkoušek. Odolnost vůči trvalým deformacím byla hodnocena dle ČSN EN 12697-22 [28]. Modul tuhosti asfaltové směsi, který je základní veličinou při návrhu konstrukce vozovky, byl ověřen dle ČSN EN 12697-26 [30] a nízkoteplotní vlastnosti, jejichž hodnocení je klíčové zejména u směsí s vyšším obsahem R-materiálu, byly hodnoceny dle ČSN EN 12697-46 [37].

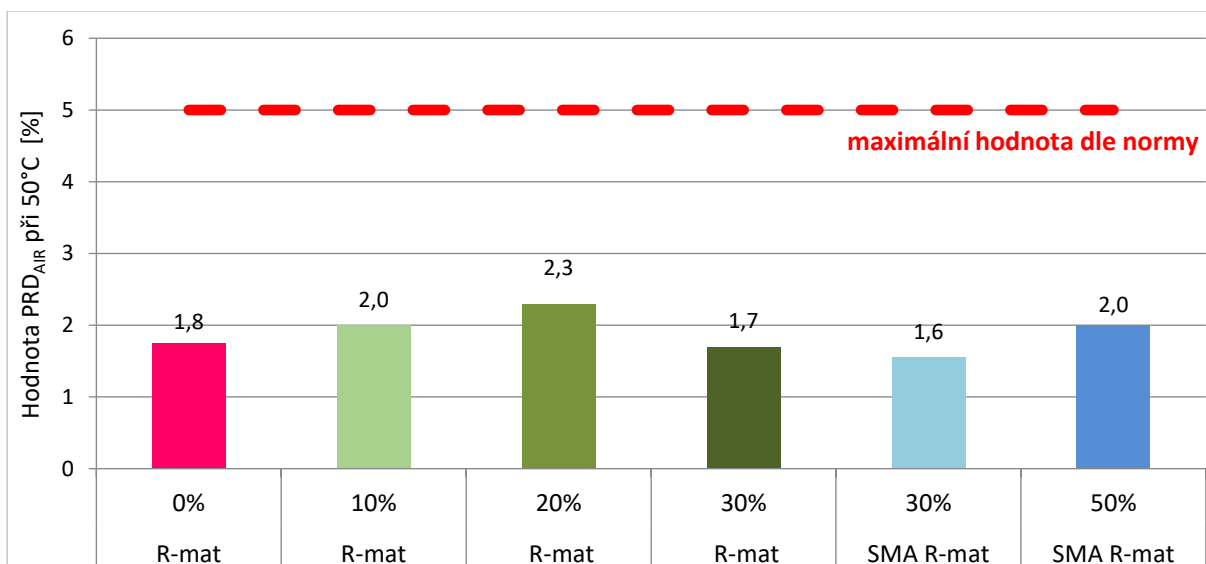
8.2.1. Stanovení odolnosti proti tvorbě trvalých deformací dle ČSN EN 12697-22

Stanovení odolnosti proti tvorbě trvalých deformací bylo provedeno podle ČSN EN 12697-22 [28] při normou požadované teplotě 50 °C. V případě směsí s R materiálem z SMA byla zkouška provedena i při teplotě 60 °C z důvodu uvažované změny v normových předpisech. Změna by měla nastat u směsí s modifikovanými pojivy. Pro srovnání byla při teplotě 60 °C provedena zkouška i u směsí s 30 % běžného R-materiálu. Průběh zkoušky při teplotě 50 °C je patrný z Grafu 11, kdy hloubka trvalé deformace je stanovena jako aritmetický průměr ze dvou zkušebních desek.

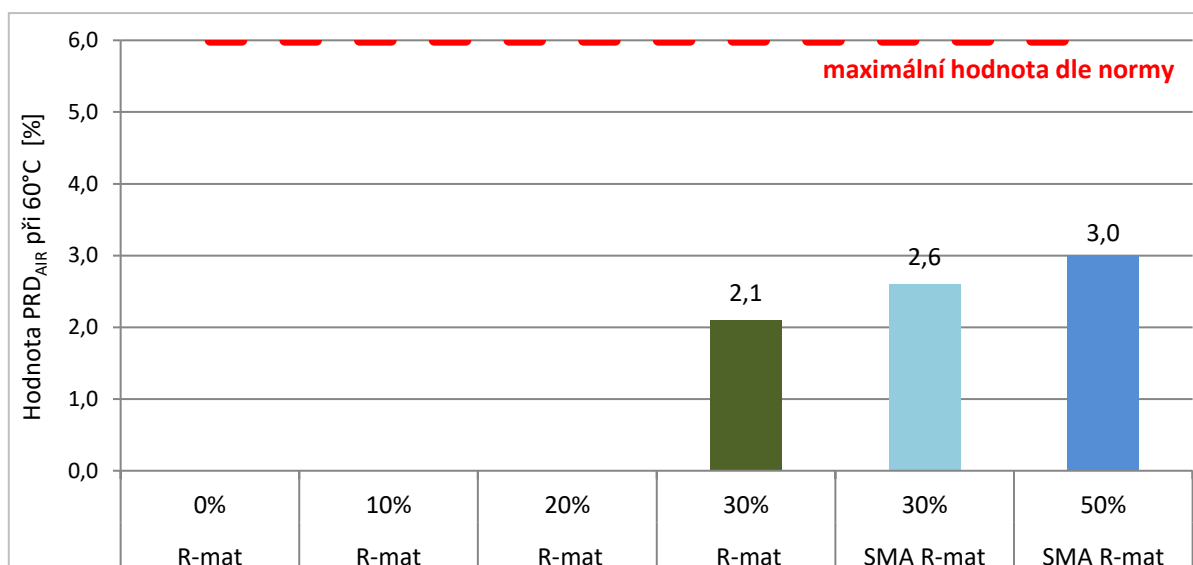


Graf 11: Průběh stanovení odolnosti proti tvorbě trvalých deformací při teplotě 50 °C

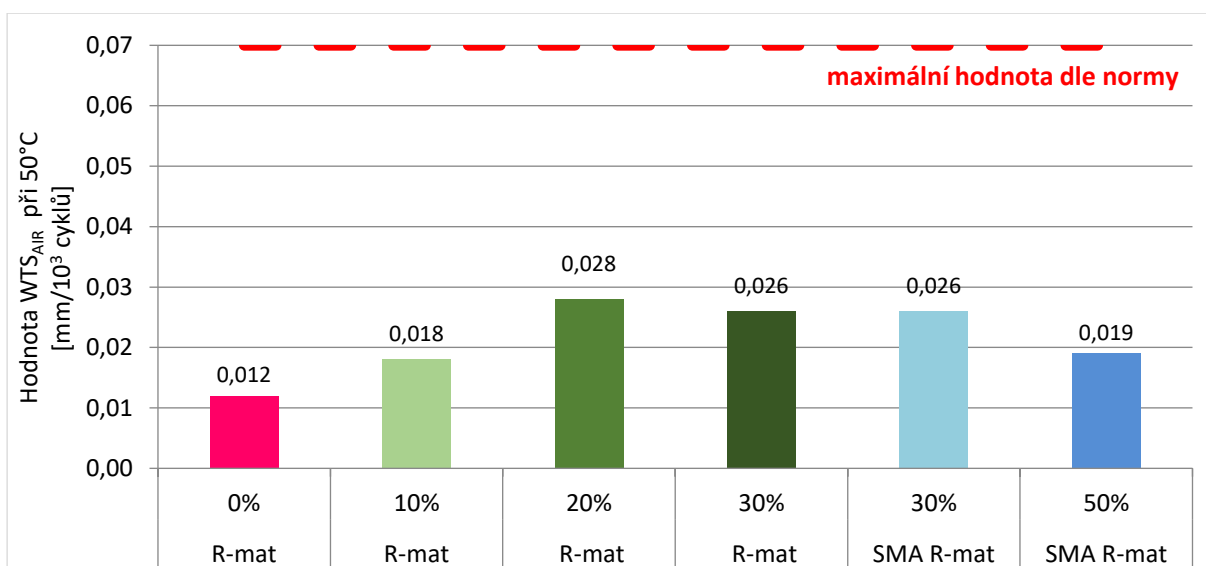
Při provádění zkoušky byly sledovány oba normou požadované parametry. Maximální poměrná hloubka vyjeté koleje PRD_{AIR} Grafy 12 a 13. Maximální normou stanovená hodnota PRD_{AIR} při teplotě 50 °C je 5,0. Při teplotě 60 °C se uvažuje hodnota vyšší 6,0. Maximální přírůstek hloubky vyjeté koleje WTS_{AIR} uvedený v Grafech 14 a 15. Limitní hodnota tohoto parametru WTS_{AIR} je 0,07 (uvažuje se ponechat i v případě zvýšení zkušební teploty na 60 °C).



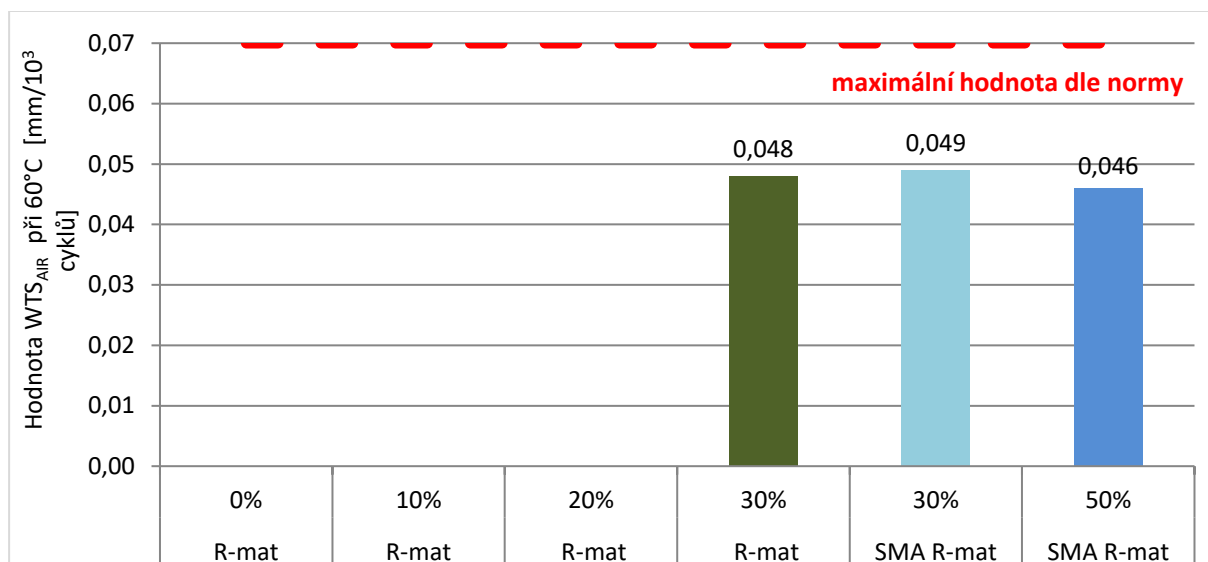
Graf 12: Výsledný parametr PRD_{AIR} směsi SMA 11S s různým obsahem R-materiálu při 50 °C



Graf 13: Výsledný parametr PRD_{AIR} směsi SMA 11S s různým obsahem R-materiálu při 60 °C



Graf 14: Výsledný parametr WTS_{AIR} směsi SMA 11S s různým obsahem R-materiálu při 50 °C

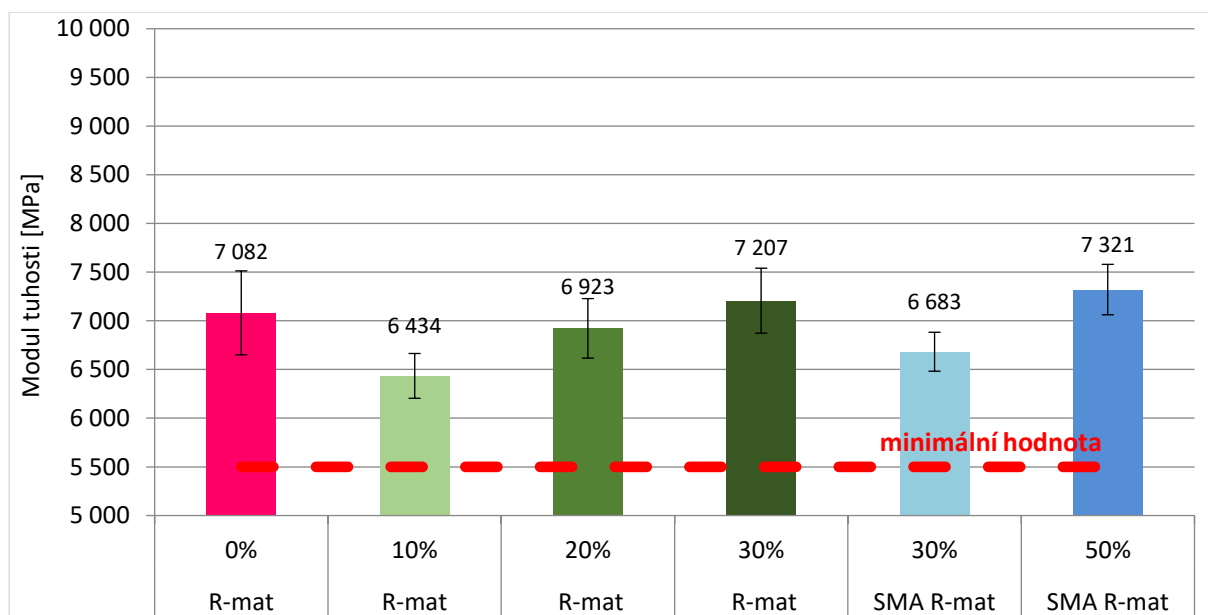


Graf 15: Výsledný parametr WTS_{AIR} směsi SMA 11S s různým obsahem R-materiálu při 60 °C

Z výsledků je zřejmé, že všechny směsi splňují při obou teplotách požadavky výrobní normy řady ČSN EN 13108-5 [45] pro směsi typu SMA. Zároveň nebyl potvrzen předpoklad, že zestárlé pojivo obsažené v R-materiálu (tužší pojivo) by mělo pozitivní vliv na menší tvorbu trvalých deformací. Z výsledku vyplývá, že jsou hodnoty obdobné jako v případě směsi bez R-materiálu. Tudíž lze předpokládat, že oživovací přísada změkčila zestárlé asfaltové pojivo. Zároveň lze konstatovat, že obsažený R-materiál v podstatě nemá žádný vliv na výsledky této zkoušky.

8.2.2. Stanovení modulu tuhosti dle ČSN EN 12697-26

Modul tuhosti byl stanoven pomocí dvoubodové zkoušky ohybem na tělesech ve tvaru komolého klínu, kdy zkouška byla provedena při standardní teplotě 15 °C (Graf 16).

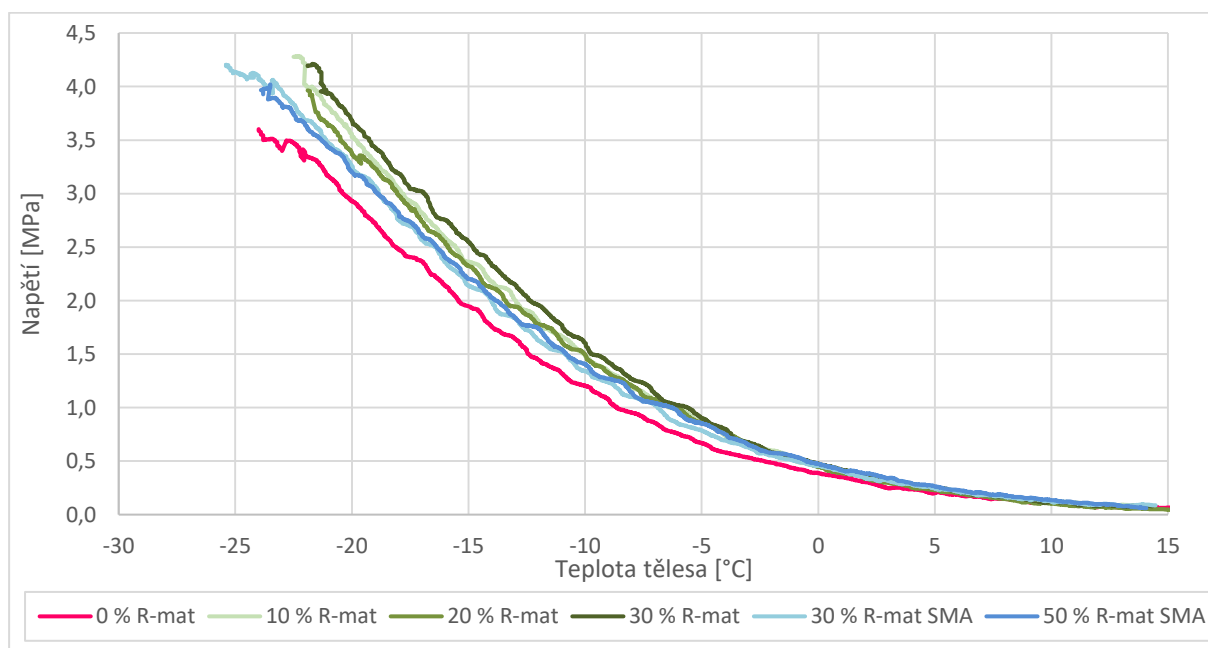


Graf 16: Moduly tuhosti směsí SMA 11S v závislosti na obsahu R-materiálu při 10 Hz a teplotě 15°C

V technických podmínkách TP 170 [119] je pro návrh konstrukce vozovky uvedena minimální hodnota modulu tuhosti při 15 °C a zatížení 10 Hz 5 500 MPa pro směsi typu SMA. Dle výsledků, splnily tuto podmínku všechny navržené směsi. Mezi jednotlivými směsmi jsou mírné rozdíly v modulech tuhostí, jež rostou s množstvím R-materiálu. Tento výsledek může být způsoben tím, že přídavek oživovací přísady nezměkčil zestárlé pojivo ve stejném poměru. U směsi s 10 % běžného R-materiálu a 30 % R-materiálu ze směsi z typu SMA byla naměřena hodnota modulu mírně nižší (cca o 5 %).

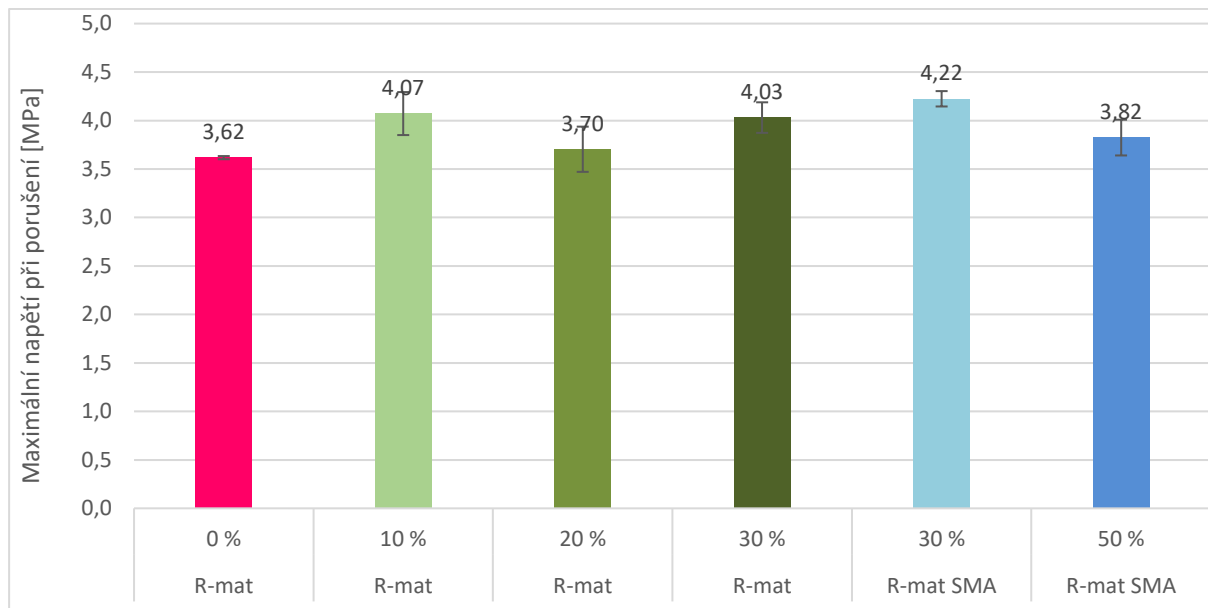
8.2.3. Stanovení nízkoteplotních vlastností asfaltových směsí dle ČSN EN 12697-46

Další zjišťovanou vlastností u navržených směsí bylo jejich chování za nízkých teplot dle ČSN EN 12697-46 [37]. U každé směsi probíhalo měření na třech tělesech, které byly vyřezány ze zkušebních desek připravených zhutňovačem dle postupu popsaného v kapitole 6.1.5. V Grafu 17 je zobrazena průměrná závislost napětí na teplotě tělesa během zkoušky. Z výsledků je patrné, že referenční směs má nejnižší průběh napětí v celém teplotním spektru a zároveň, že byla porušena při nejnižší hodnotě napětí. Následují směsi s R-materiálem z SMA, které mají vyšší průběh napětí oproti referenční směsi, ale zároveň byly porušeny při nižší teplotě.

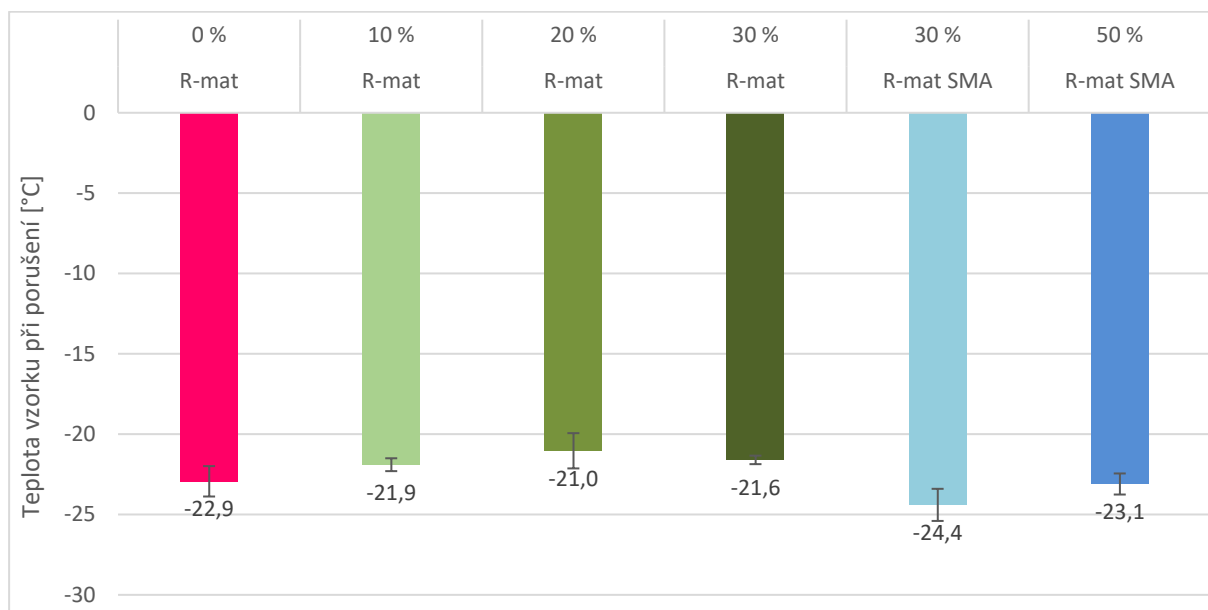


Graf 17: Závislost napětí na teplotě tělesa v průběhu hodnocení nízkoteplotních vlastností

V Grafu 18 a 19 lze pozorovat, že výsledky získané pro jednotlivé směsi nejsou zásadně ovlivněny obsahem R-materiálu. Je možné popsat jen mírný trend nárůstu teploty vzorku při porušení s množstvím obsaženého R-materiálu. Mírně nižší teplota při porušení vzorku byla zaznamenána u směsi s R-materiálem z SMA. Při porovnání SMA 11S s 30 % R-materiálu byla u směsi s SMA R-mat o 2,8 °C nižší teplota vzorku při porušení. Tento fakt může být zapříčiněn použitím o něco více modifikovaným nativním pojivem než v případě směsi s „běžným“ R-materiálem.



Graf 18: Maximální napětí při porušení při zjišťování nízkoteplotních vlastností na směsích SMA 11S s různým podílem R-materiálu



Graf 19: Teplota vzorku při porušení při zjišťování nízkoteplotních vlastností na směsích SMA 11S s různým podílem R-materiálu

Z výsledků nízkoteplotních vlastností je patrné, že s nárůstem množství R-materiálu se nezhoršují nízkoteplotní vlastnosti.

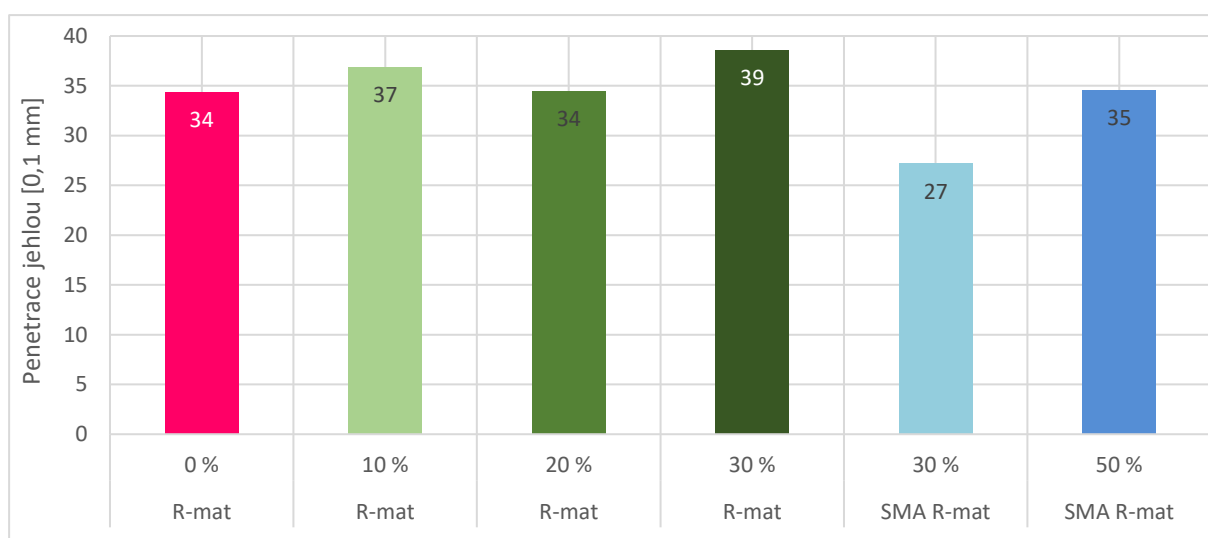
8.3. Výsledné vlastnosti asfaltových pojiv

V další části hodnocení byly sledovány vlastnosti asfaltových pojiv, které byly znovuzískány z laboratorně připravených směsí. Hodnocení bylo prováděno pomocí penetrace jehlou dle ČSN EN 1426 [50], bodem měknutí dle ČSN EN 1427 [51], stanovením dynamické viskozity dle ČSN EN 13702 [48], stanovením komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu

dle ČSN EN 14770 [52] a stanovením modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru dle ČSN EN 14771 [53].

8.3.1. Stanovení penetrace jehlou podle ČSN EN 1426

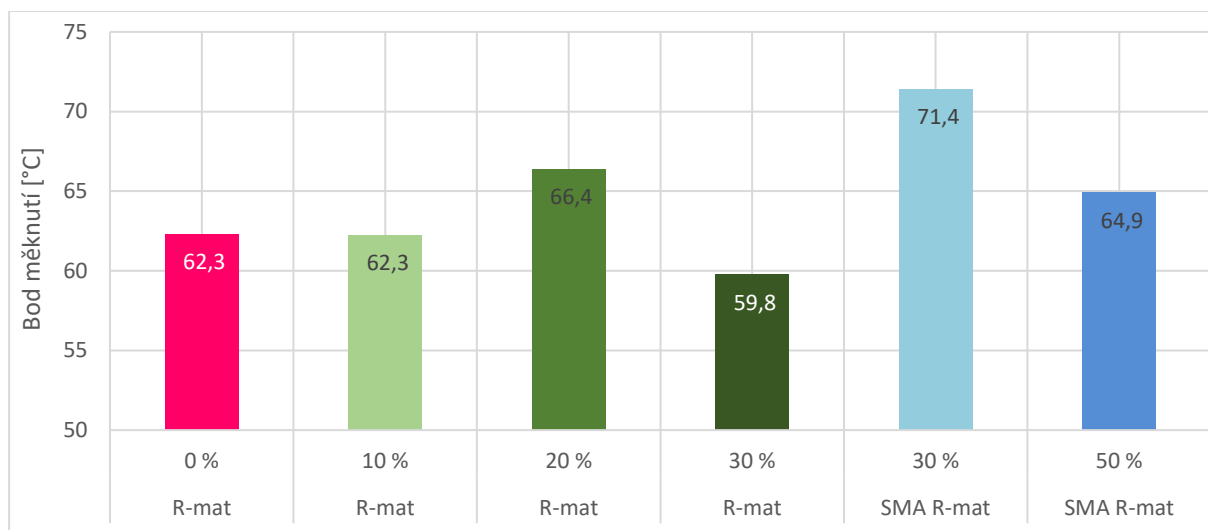
Výsledky penetrace jehlou podle normy ČSN EN 1426 [50] jsou uvedeny v Grafu 20. Se zvyšujícím se množstvím R-materiálu v asfaltové směsi lze předpokládat zvyšující se tuhost konečného pojiva, a tudíž nižší hodnotu penetrace jehlou. Při porovnání výchozí směsi a směsi s přídavkem běžného R-materiálu je patrné, že hodnota penetrace jehlou je velmi podobná v rozmezí 34 až 39 [0,1 mm]. To mohlo být docíleno přidáním oživovací přísady Storflux. V případě přidání 30 % R-materiálu z SMA byla hodnota penetrace jehlou nejnižší o hodnotě 27 [0,1 mm].



Graf 20: Hodnoty penetrace jehlou na znovuzískaném pojivu z laboratorně připravených směsí

8.3.2. Stanovení bodu měknutí metodou kroužek a kulička podle ČSN EN 1427

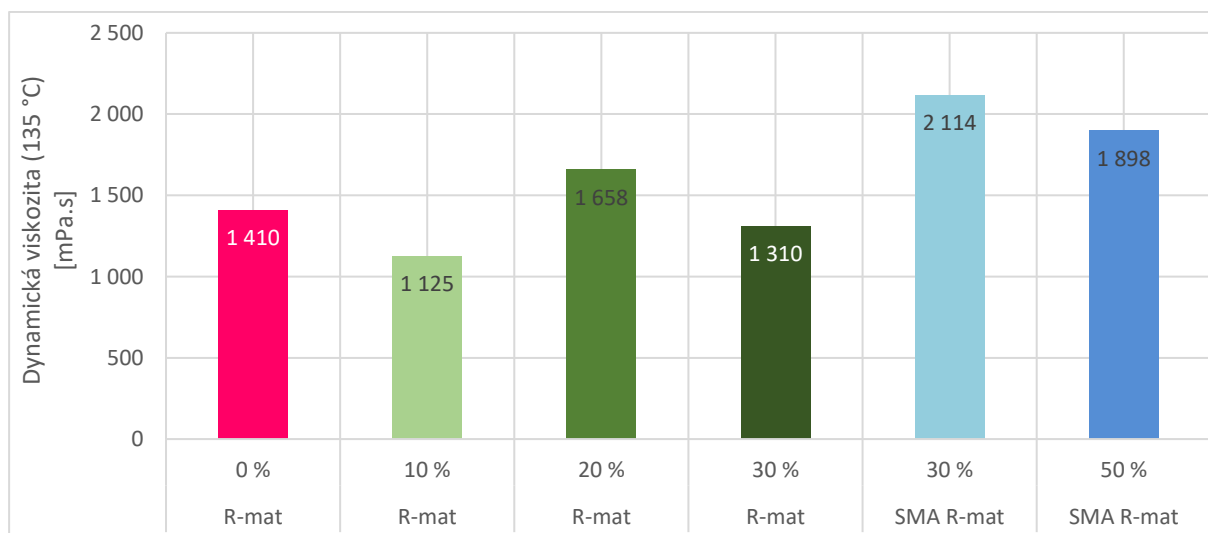
Stanovení bodu měknutí bylo provedeno podle normy ČSN EN 1427 [51], popsáno v kapitole 6.2.3. Výsledky zkoušky na jednotlivých znovuzískaných pojivech z laboratorně připravených variant směsi typu SMA 11S jsou uvedeny v Grafu 21. Z výsledků vyplývá, že se jednotlivá znovuzískaná pojiva seřadila přibližně zrcadlově dle výsledků penetrace jehlou. Nejvyšší hodnota bodu měknutí (71,4 °C) byla naměřena u směsi typu SMA 11S s 30 % R-materiálu SMA, kde byla naměřena i nejnižší hodnota penetrace. Vyšší hodnota bodu měknutí u směsi s R-materiálem z SMA je způsobena vyšším bodem měknutí u výchozího pojiva PmB 45/80-55 (viz Tabulka 11) a zároveň vyšším bodem měknutí u samotného R-materiálu z SMA. U směsi s 30 % R-mat z SMA je vyšší bod měknutí než u směsi s 50 % R-mat z důvodu vyššího dávkování nativního pojiva. Směs s 50 % R-mat z SMA má totiž vyšší množství pojiva obsaženém v R-materiálu. V případě směsi s běžným R-materiálem byl dokonce bod měknutí při dávkování 30 % R-materiálu nižší. To bylo způsobeno přidáním oživovací přísady a zároveň nízkým bodem měknutí (53,7 °C) nativního pojiva.



Graf 21: Hodnoty bodu měknutí na znovuzískaném pojivu z laboratorně připravených směsí

8.3.3. Stanovení dynamické viskozity podle ČSN EN 13702

Jednotlivé znovuzískané asfalty byly hodnoceny také pomocí dynamické viskozity, která byla měřena dynamickým smykovým reometrem DSR při použití geometrie kužel-deska při teplotě 135 °C. Čím je hodnota dynamické viskozity vyšší, tím je asfaltové pojivo při dané teplotě hůře zpracovatelné a je například nutné zvýšit teplotu výroby nebo pokládky asfaltové směsi. Vyšší hodnota dynamické viskozity byla zjištěna u směsí s R-materiálem z SMA, což může být způsobeno větší mírou modifikace komplexní směsí. Výsledky jsou patrné v Grafu 22.

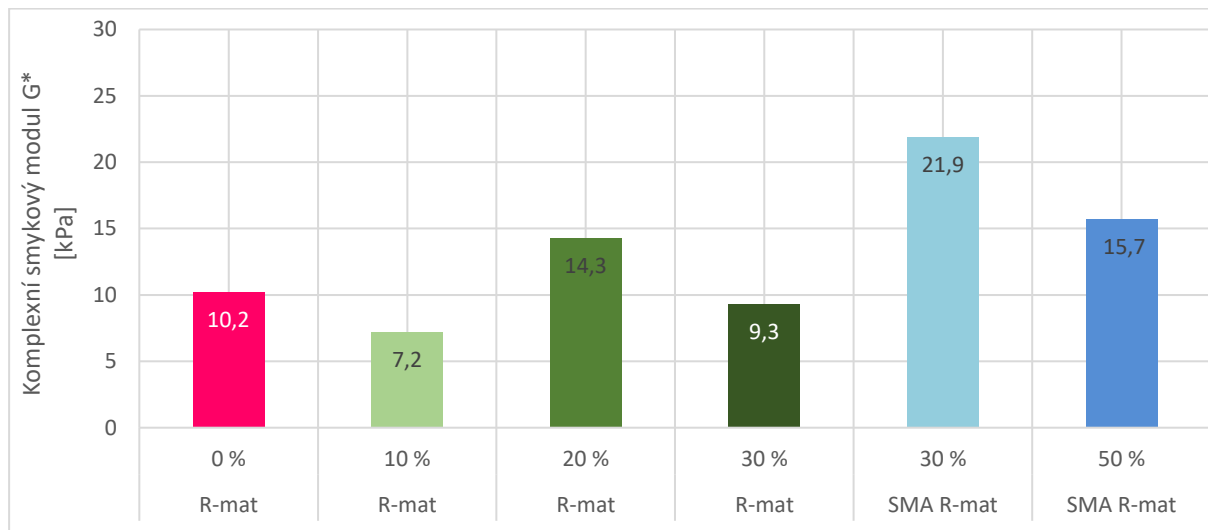


Graf 22: Hodnoty dynamické viskozity při teplotě 135 °C

8.3.4. Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu podle ČSN EN 14770

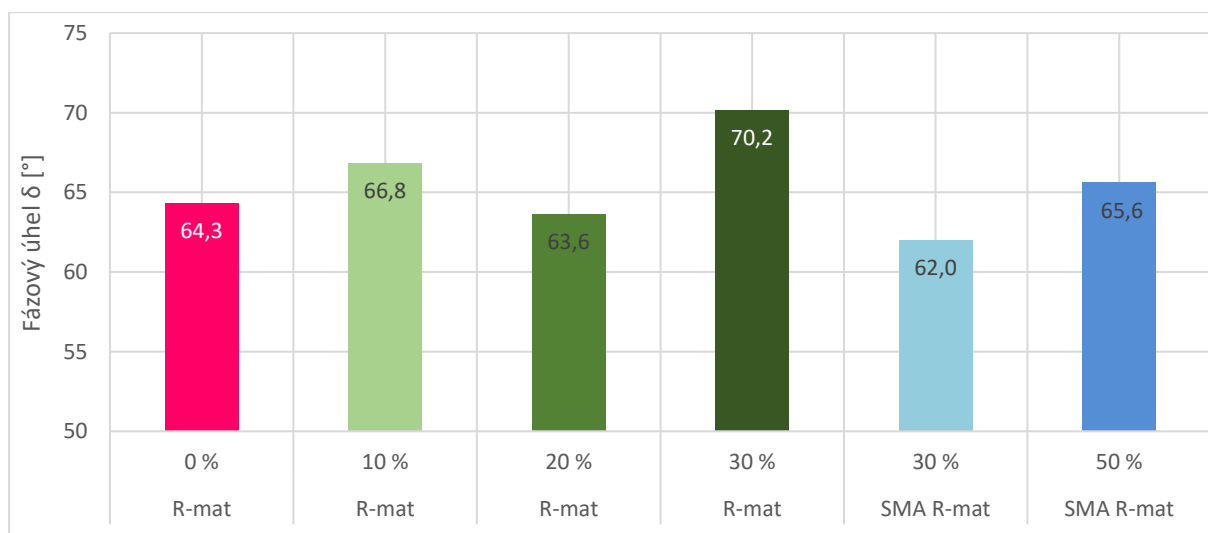
Pomocí dynamického smykového reometru byl dále zjišťován komplexní modul ve smyku a fázový úhel v oscilačním režimu podle ČSN EN 14770 [52].

Hodnoty komplexního smykového modulu měřeného při 60 °C a 1,59 Hz (Graf 23) mají stejný trend jako naměřená dynamická viskozita. Asphaltové pojivo ze směsi s 30 % R-mat SMA je nejtuzší, což bylo způsobeno nativním pojivem, které v případě směsi s R-mat SMA mělo nejmenší penetraci a nejvyšší bod měknutí, tedy bylo nejtuzší. Zároveň u směsi s 30 % R-mat z SMA je vyšší hodnota G^* než u směsi s 50 % R-mat z SMA pravděpodobně z důvodu, že směs s 30 % R-mat SMA obsahuje větší množství nativního pojiva s vysokým bodem měknutí.



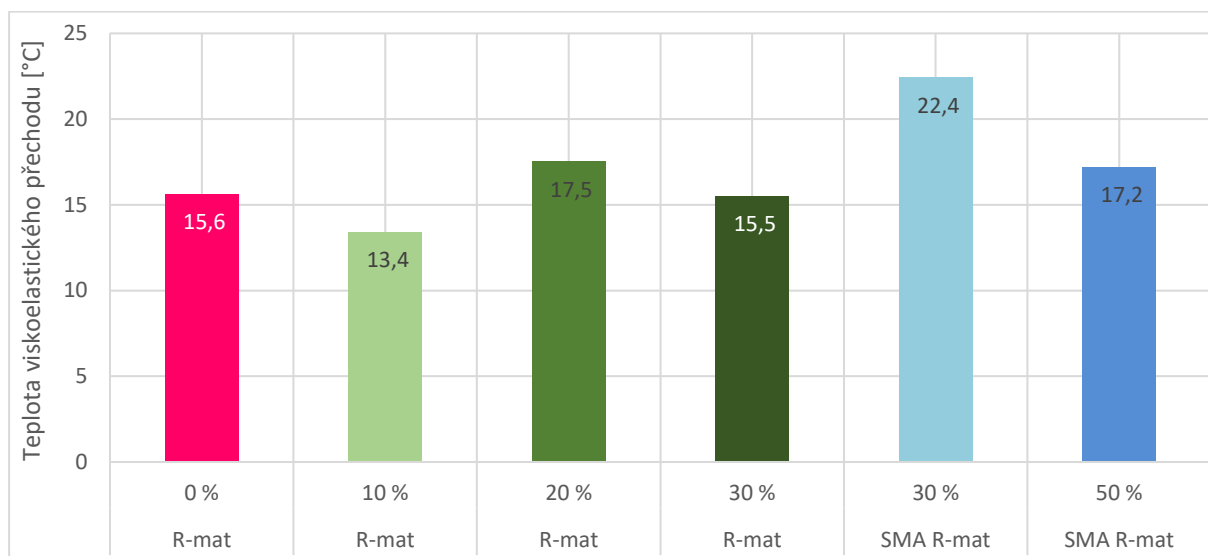
Graf 23: Hodnota komplexního smykového modulu při 60 °C a frekvenci 1,59 Hz

Hodnoty fázových úhlů jsou obdobné (Graf 24). Pouze asphaltové pojivo ze směsi s 30 % běžného R-materiálu má vyšší fázový úhel, tedy převládá viskózní část. To může být způsobeno opět v důsledku základního nativního pojiva, které mělo nejvyšší hodnotu penetrace a nejnižší bod měknutí. Zároveň vyšší hodnota fázového úhlu může znamenat, že pojivo není dostatečně modifikováno. To mohlo být způsobeno nejen nativním pojivem, ale také naředěním modifikovaného pojiva větším množstvím silničního pojiva obsaženého v R-materiálu a oživovací přísadou.



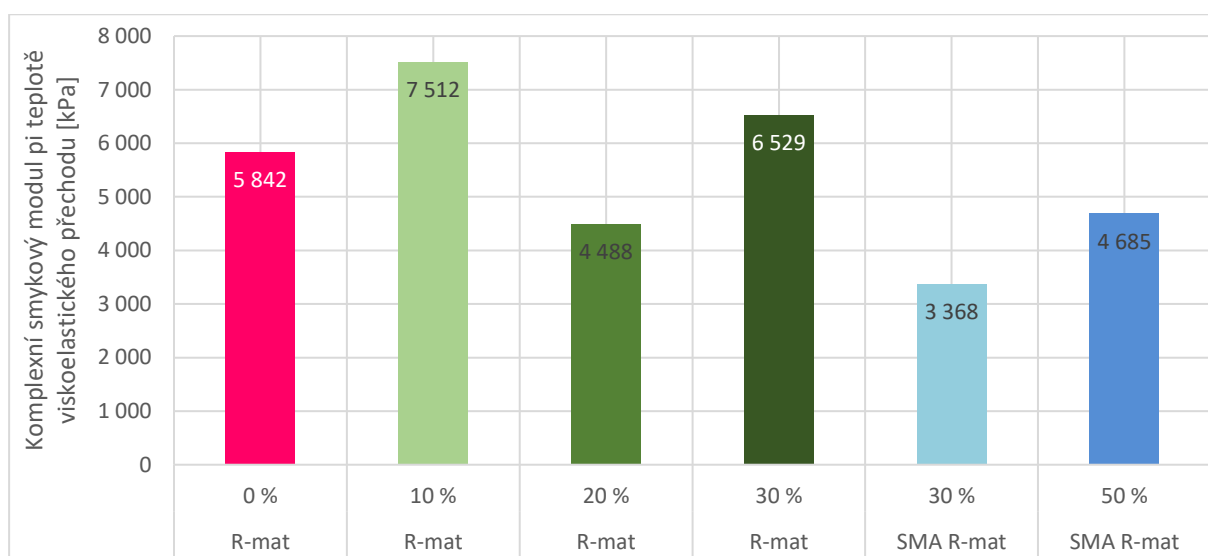
Graf 24: Velikost fázového úhlu při 60 °C a frekvenci 1,59 Hz

V Grafu 25 je uvedena teplota viskoelastického přechodu (T_{VE}) při frekvenci 1,59 Hz. Jedná se o teplotu, při které má pojivo hodnotu fázového úhlu 45° , což znamená, že je stejná hodnota viskózní i elastické části komplexního smykového modulu. [17] Z výsledků vyplývá, že při využití běžného R-materiálu se teplota viskoelastického přechodu blíží směsi bez R-materiálu. U směsi s R-materiálem z SMA je T_{VE} vyšší zejména při přidávání 30 % R-mat, což ale opět mohlo být způsobeno použitím více modifikovaného nativního pojiva.



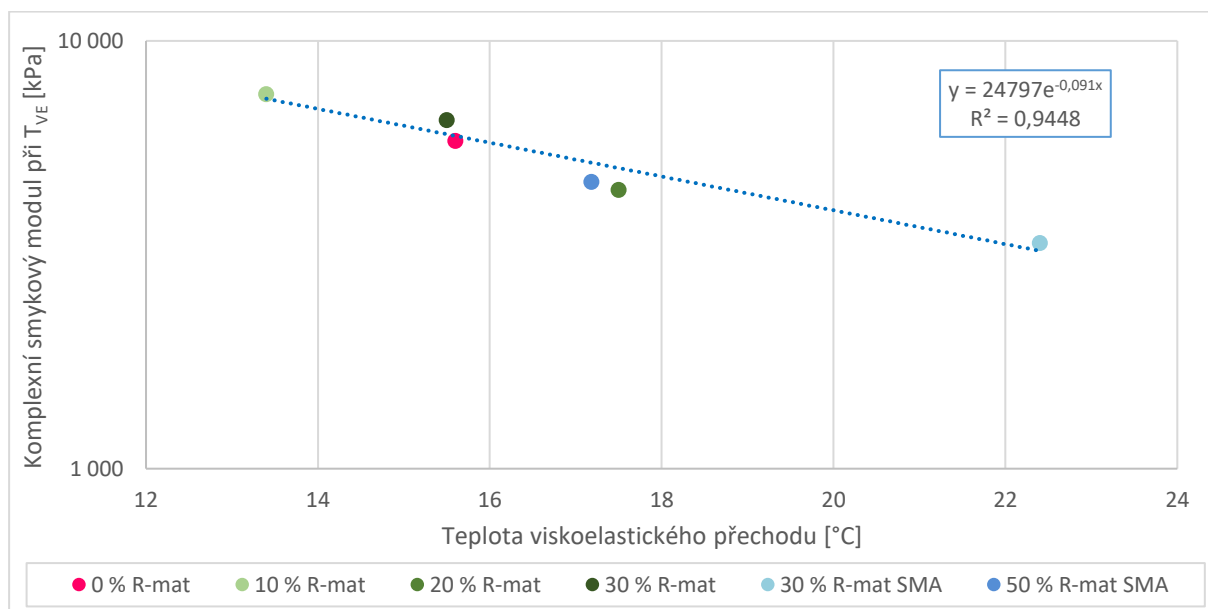
Graf 25: Teplota viskoelastického přechodu při frekvenci 1,59 Hz

Ekvivalentně lze vyhodnotit při teplotě viskoelastického přechodu hodnotu komplexního smykového modulu G^* . Výsledky jsou patrné z Grafu 26, kdy lze s rostoucí T_{VE} pozorovat klesající komplexní smykový modul. To znamená, že například znovuzískané pojivo ze směsi s 30 % R-materiálu z SMA má i při nízké hodnotě komplexního smykového modulu nadále poměrně vysokou míru elastické složky komplexního smykového modulu.



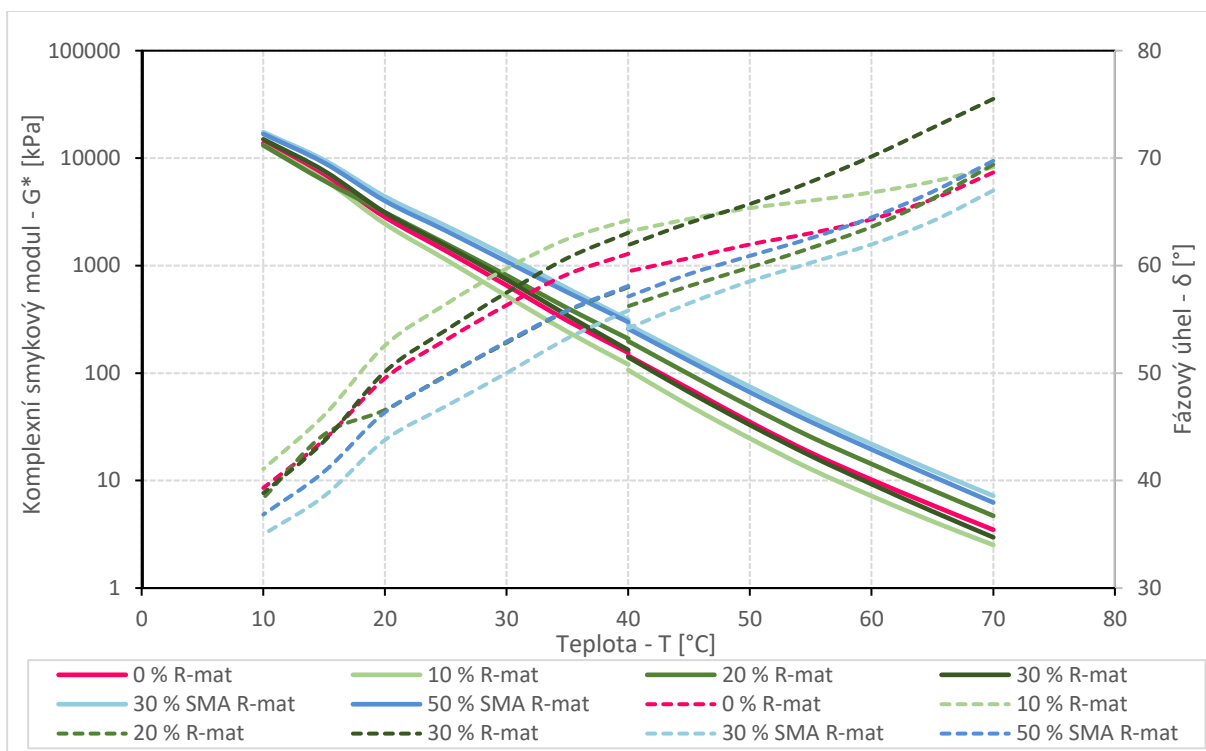
Graf 26: Hodnota komplexního smykového modulu při teplotě viskoelastického přechodu a frekvenci 1,59 Hz

Pokud navzájem porovnáme teplotu viskoelastického přechodu a tomu odpovídající hodnotu komplexního smykového modulu, získáme Graf 27. Mezi jednotlivými výsledky lze pozorovat exponenciální závislost s koeficientem determinace R^2 0,94. Z výsledků vyplývá například výrazný rozdíl u pojiva ze směsi s 30 % R-mat z SMA, který má stejný poměr mezi viskózní a elastickou složkou při nejvyšší teplotě a zároveň dosahuje při této teplotě nejvyšší hodnoty komplexního smykového modulu.



Graf 27: Závislost T_{VE} a to odpovídajícímu komplexnímu smykovému modulu při frekvenci 1,59 Hz

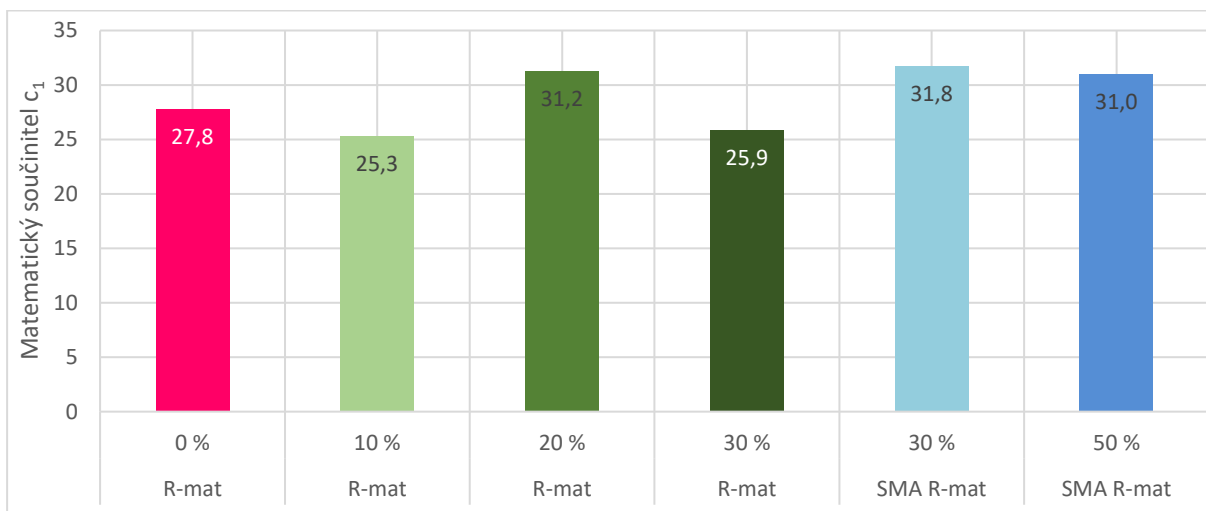
V Grafu 28 je uvedena závislost komplexního smykového modulu a fázového úhlu na teplotě při frekvenci 1,59 Hz. Rozdíl při teplotě 40 °C je dán změnou zkušební geometrie z průměru 25 mm (70 °C až 40 °C) na 8 mm (40 °C až 10 °C). Maximální rozdíl mezi jednotlivými výsledky je u G^* menší než 15 % a u fázového úhlu menší než 3 °, čímž je dodržen požadavek normy ČSN EN 14770 [52]. Z výsledků vyplývá, že asfaltová pojiva ze směsi s R-materiálem z SMA mají po celou dobu vyšší hodnotu komplexního smykového modulu a zároveň nižší fázový úhel, což znamená, že pojivo se chová více elasticky a je více modifikováno. Zakřivení křivek fázových úhlů (čárkované čáry) je dáno vlivem modifikace pojiv. U znovuzískaného pojiva ze směsi s 30 % běžného R-materiálu je patrný výrazný rozdíl od ostatních pojiv především při vyšších teplotách 60 °C až 70 °C. To znamená nižší elasticitu pojiva, a tudíž vyšší náchylnost k tvorbě trvalým deformacím v letních měsících. V tomto případě je tedy přídavek 30 % běžného R-materiálu již příliš vysoký, tedy by bylo zapotřebí použít jako nativní pojivo více modifikované, buď klasické modifikované pojivo o třídu vyšší, nebo RC pojivo o kterých pojednává článek [75].



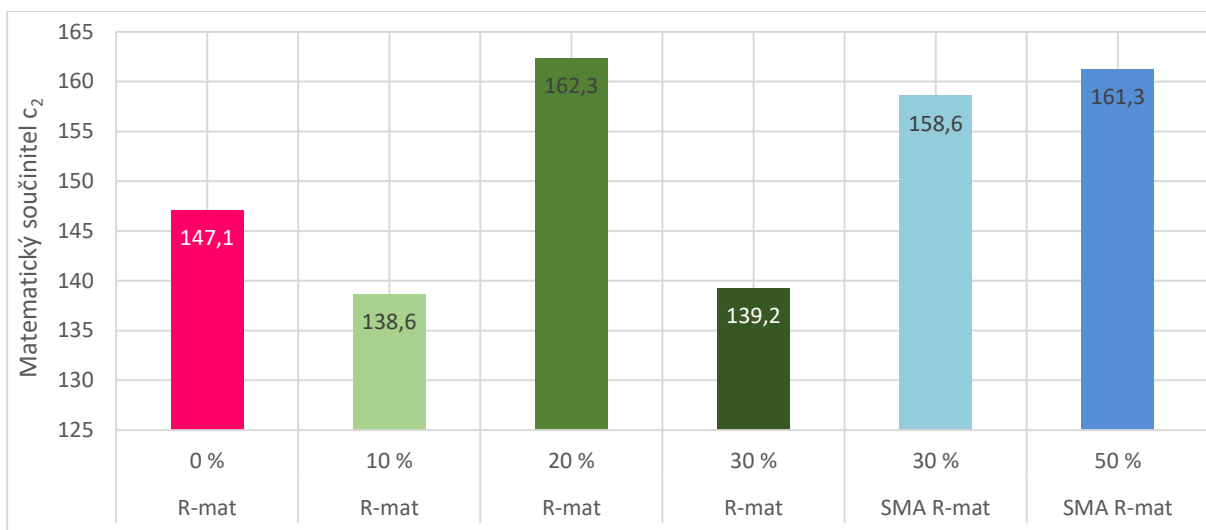
Graf 28: Závislost komplexního smykového modulu a fázového úhlu na teplotě při frekvenci 1,59 Hz

Jak je uvedeno v úvodu, měření komplexního smykového modulu a fázového úhlu probíhalo v teplotním spektru od 10 °C do 70 °C po 5 °C. Následně bylo možné sestavit hlavní křivky komplexních smykových modulů, čímž lze získat vlastnosti asfaltových pojiv mimo měřitelný frekvenční rozsah. Referenční teplotou pro sestavení hlavních křivek byla teplota 50 °C. Posun byl realizován pomocí WLF modelu, který je teoreticky popsán například v [17].

Hodnoty materiálových součinitelů c_1 a c_2 jsou uvedeny v Grafech 29 a 30. Pokud porovnáme součinitele c_1 , je patrné, že jejich hodnota je obdobná. U součinitele c_2 jsou již patrné výraznější rozdíly, které ovšem nejsou závislé na množství přidávaného R-materiálu. Vyšší hodnoty součinitele c_2 je možné pozorovat u znovuzískaných pojiv z 10 % běžného R-materiálu a u 30 % a 50 % R-materiálu z SMA.

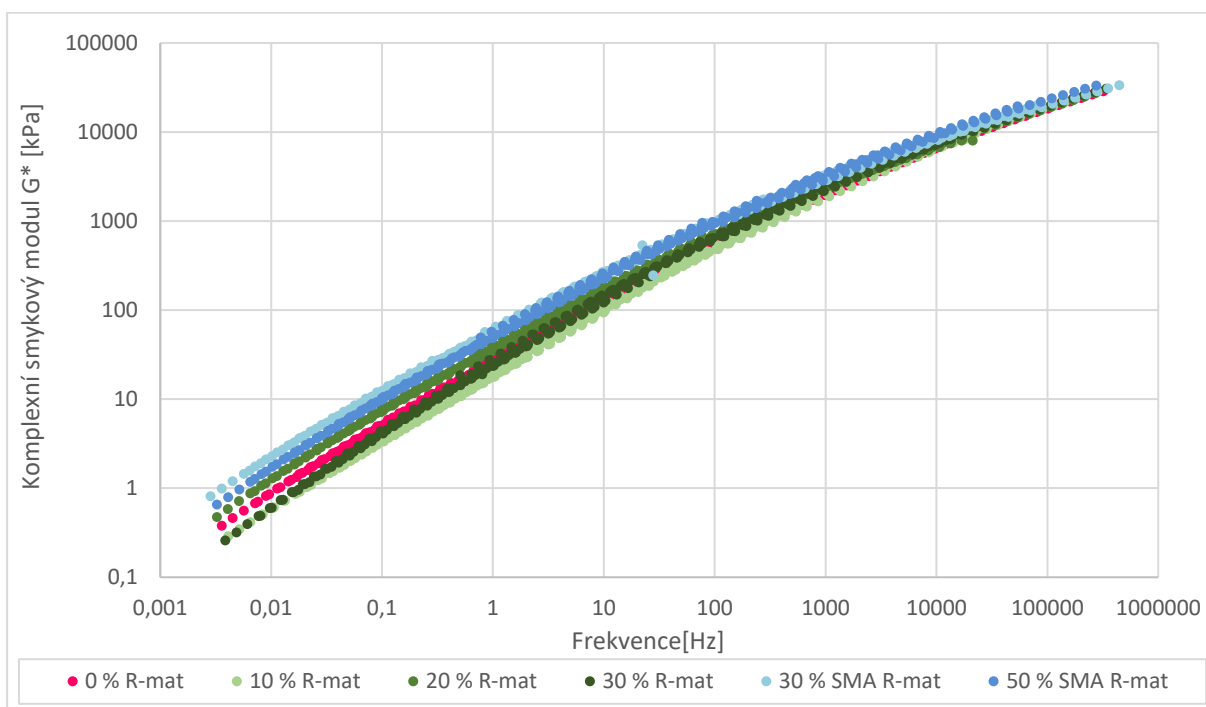


Graf 29: Hodnoty materiálového součinitele c_1



Graf 30: Hodnoty materiálového součinitele c_2

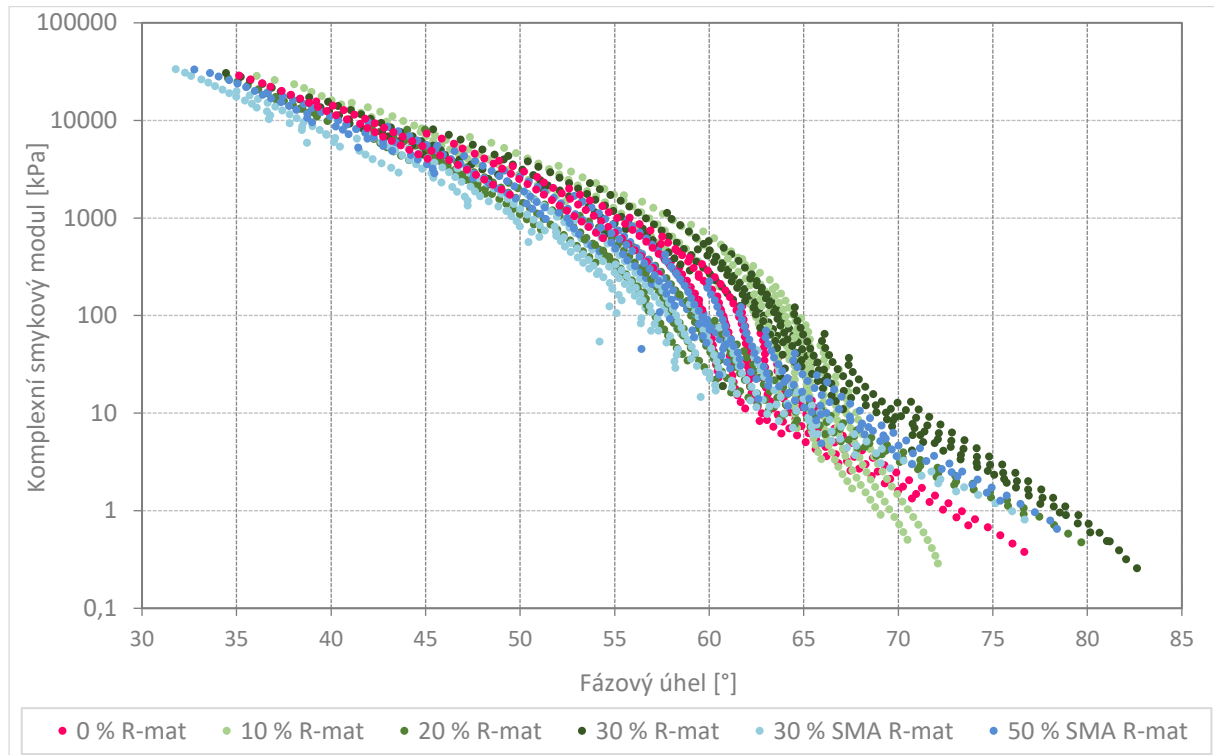
Hlavní křivky, které byly sestrojeny pro referenční teplotu 50 °C, jsou uvedeny v Grafu 31. Z grafického znázornění lze vyhodnotit zejména sklon jednotlivých hlavních křivek, kdy pojivo z asfaltové směsi bez R-materiálu se nachází přibližně uprostřed. Vyšší sklon hlavní křivky je možné pozorovat u znovuzískaných pojiv ze směsí s 10 % a 30 % běžného R-materiálu. Nejvýše položené jsou pojiva ze směsí s obsahem R-materiálu z SMA.



Graf 31: Hlavní křivky komplexních smykových modulů sestrojné pro teplotu 50 °C

V Grafu 32 je znázorněna závislost komplexního smykového modulu na fázovém úhlu, tzv. „Blackův diagram“. Z výsledků je patrné charakteristické zakřivení, které je způsobeno modifikací pojiva, která při snižujících se hodnotách komplexního smykového modulu G^* udržuje hodnotu fázového úhlu níže. To znamená, že pojivo se i při vysokých teplotách stále chová poměrně výrazně elasticky, což zvyšuje jeho odolnost zejména vůči trvalým

deformacím. Grafické znázornění zároveň potvrzuje výsledky hodnocení fázového úhlu, kdy směs s 30 % běžného R-materiálu je nejméně modifikovaná. V tomto případě by bylo vhodné použít vysoce modifikovaný asfalt, který by i při naředění silničním asfaltem z R-materiálu měl výsledné vlastnosti jako směs bez R-materiálu. Směsi s přidavkem R-materiálu ze směsí typu SMA mají průběh Blackova diagramu podobný pojivu znovuzískanému u směsi bez R-materiálu.



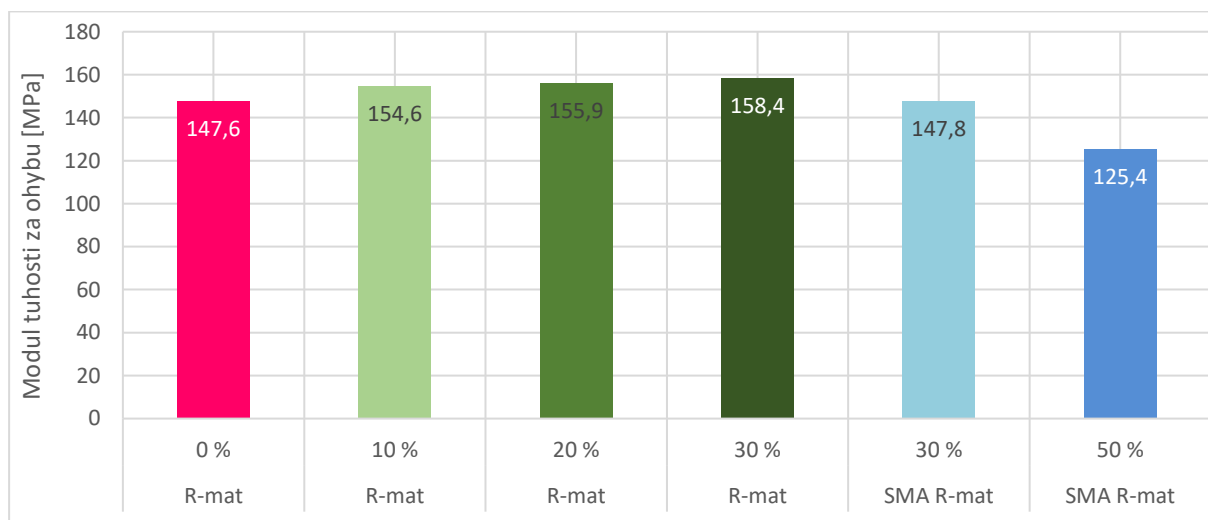
Graf 32: Blackův diagram u jednotlivých směsí

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

Hodnocení nízkoteplotních vlastností u znovuzískaných pojiv probíhalo pomocí zařízení BBR dle ČSN EN 14771 [53] při teplotě $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$. Hodnoty slouží zejména k porovnání se směsí bez R-materiálu, jelikož právě nízkoteplotní vlastnosti jsou jedním z klíčových parametrů při hodnocení směsí s vyšším obsahem R-materiálu. U R-materiálu totiž dochází v průběhu životnosti ke stárnutí obsaženého asfaltového pojiva, které se stává tužší a náchylnější k tvorbě mrazových trhlin. Z tohoto důvodu musí být zaručeno, že toto pojivo bude znovuoživeno vhodným asfaltovým pojivem nebo oživovací přísadou. Dle amerického předpisu se předpokládá, že kritická teplota, při které hrozí riziko vzniku mrazových trhlin, je v okamžiku, kdy ohybová tuhost $S_m(60)$ je rovna 300 MPa, nebo m-hodnota $m(60)$ je 0,3. Při hodnocení se uvažuje méně příznivá varianta kritické teploty, od které se odečte $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, což je kritická teplota pro hodnocení ve vozovce.

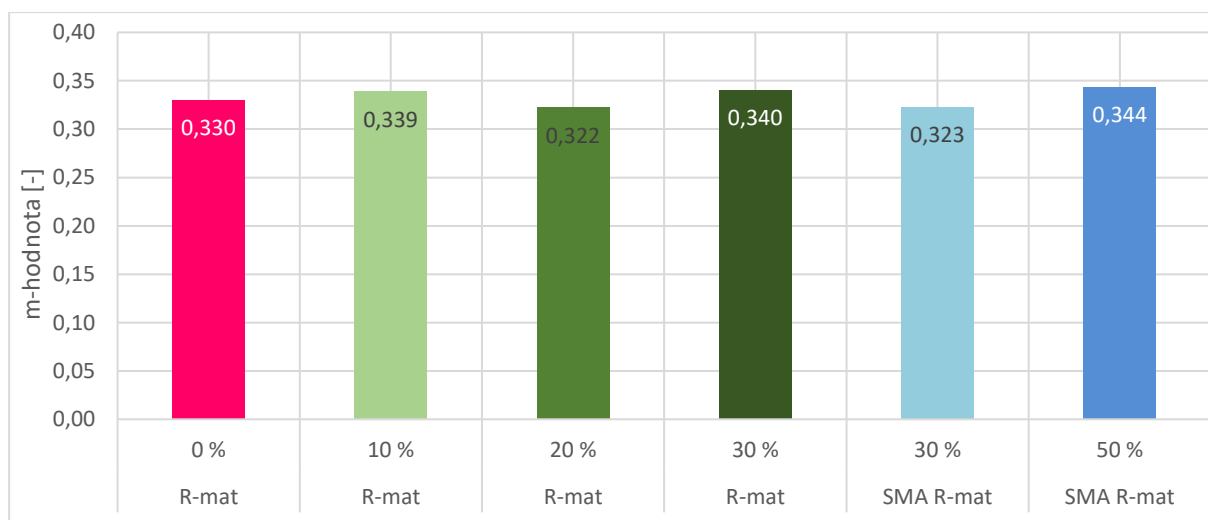
V Grafu 33 je uvedena hodnota modulu tuhosti za ohybu při teplotě $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$. Z výsledků vyplývá, že u žádného znovuzískaného pojiva nedošlo k překročení limitní hodnoty 300 MPa

a tudíž se kritická teplota nachází při nižší teplotě. Zároveň lze říct, že mezi výsledky jsou jen velmi malé rozdíly, což znamená, že pojiva hodnocená tímto parametrem nejsou více náchylná k vzniku mrazové trhliny než pojivo ze směsi bez R-materiálu. Nejnižší hodnota modulu tuhosti za ohybu byla dokonce zaznamenána při dávkování 50 % R-materiálu z SMA, což může být způsobeno vyšším dávkováním oživovací přísady Storflux, která výrazně snižuje modul tuhosti za ohybu. Tuto domněnku potvrzuje i fakt, že Storflux snižuje výrazně více modul tuhosti za ohybu než m-hodnotu, která je vyšší než u ostatních pojiv jen minimálně. V případě pojiva s 30 % R-materiálu z SMA může být vyšší hodnota vysvětlena vyšším množstvím nativního pojiva.



Graf 33: Modul tuhosti za ohybu při teplotě -16 °C

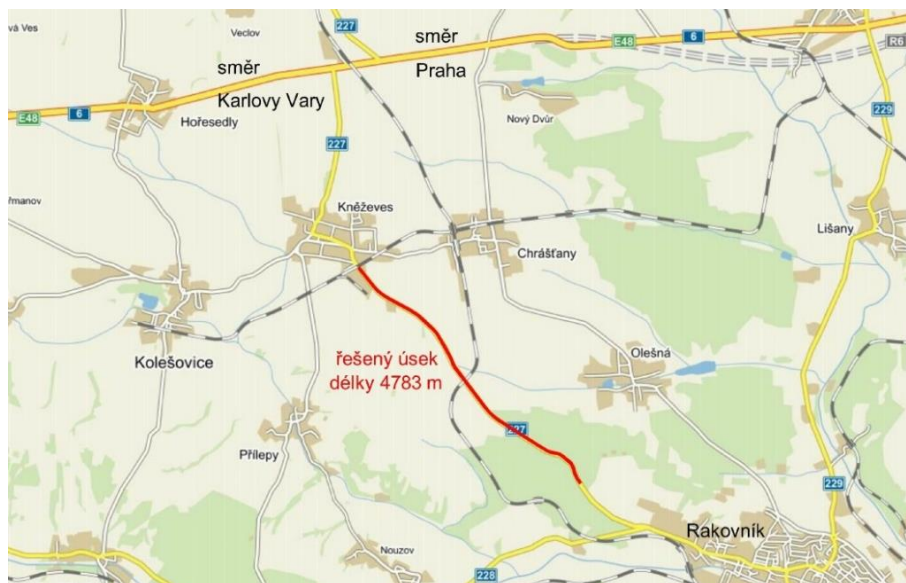
V Grafu 34 jsou uvedeny hodnoty m-hodnoty při teplotě -16 °C. Jelikož se m-hodnota s klesající se teplotou snižuje, nebyla u žádného hodnoceného pojiva překročena limitní hodnota $m(60)$ 0,3. Stejně jako při hodnocení $S_m(60)$ lze i zde říct, že jednotlivé hodnoty jsou velmi podobné a nelze tedy prokázat, že by jednotlivé směsi byly náchylnější ke vzniku mrazových trhlin.



Graf 34: m-hodnota při teplotě -16 °C

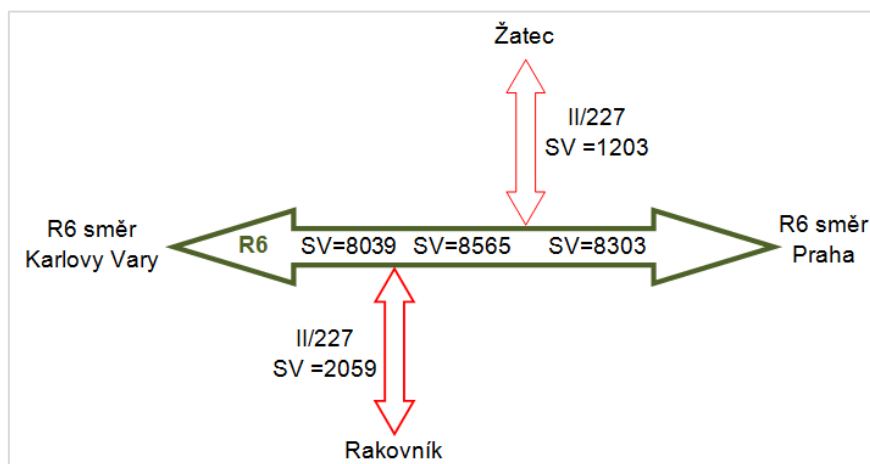
9. REALIZACE ZKUŠEBNÍHO ÚSEKU

Ke konci roku 2016 byl realizován zkušební úsek s asfaltovou směsí typu asfaltový kobec mastixový SMA 11S s různým druhem a obsahem R-materiálu na základě laboratorních návrhů uvedených v kapitole 8. Zkušební úsek se nachází ve Středočeském kraji v okrese Rakovník. Jedná se o část silnice II/227, která je spojnicí města Žatec s městysem Křivoklát. Zkušební úsek (Obrázek 41) se nachází mezi městem Rakovník a obcí Kněževes v délce 4 783 metrů. V půlce úseku se komunikace kříží s železniční tratí.



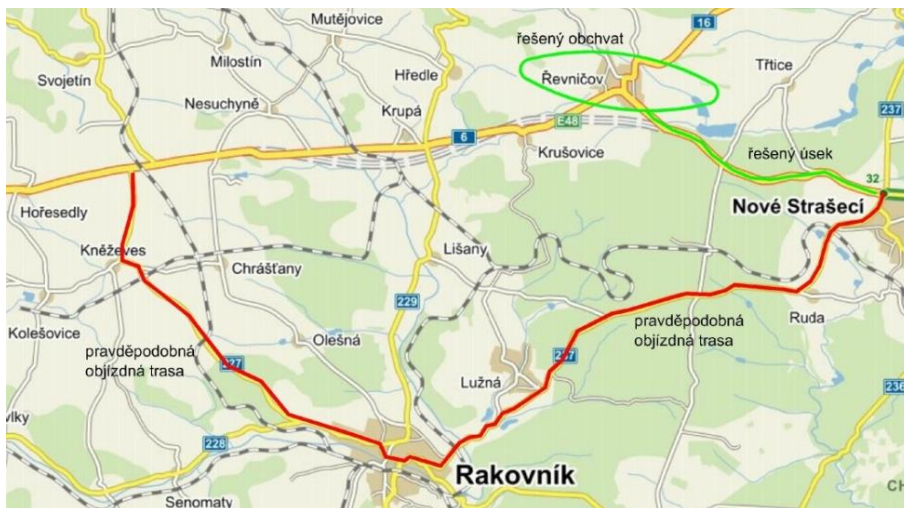
Obrázek 41: Předmětný úsek silnice II/227

V roce 2010 bylo Ředitelstvím silnic a dálnic ČR provedeno celostátní sčítání dopravy (Obrázek 42). Na silnici II/227 byla naměřena roční průměrná denní intenzita (RPDI) 2059 vozidel, z toho 352 těžkých nákladních vozidel, 1688 osobních vozidel a 9 motorových vozidel. V roce 2016 bylo naměřeno RPDI v pracovní den 2757 vozidel za den a z toho 823 těžkých nákladních vozidel. Lze tedy vidět vysoký nárůst těžké nákladní dopravy, která více zatěžuje vozovku. [14]



Obrázek 42: Roční RPDI na II/227 a R6 (v roce 2010)

V roce 2017 bylo zahájeno plánované rozšíření úseku Nové Strašecí – Řevničov na čtyřpruhové uspořádání a také obchvat obce Řevničov. Díky tomu se silnice II/227 stala vyhledávanou objízdnou trasou (Obrázek 43). Z těchto uvedených faktů a z provedeného celostátního sčítání dopravy vyplývá, že je komunikace značně vytěžována. Z tohoto důvodu byl úsek vhodný pro návrh asfaltové směsi typu SMA 11S, která se navrhuje na vysoce zatížené vozovky.



Obrázek 43: Objízdná trasa během rozšíření dálnice D6 mezi Prahou a Karlovými Vary Řešený (zeleně - zahájení řešení úseku v roce 2017, červeně – průběh objízdné trasy)

9.1. Způsob realizace a použité materiály

Návrh rekonstrukce daného úseku počítal s vyfrézováním stávajícího povrchu vozovky do hloubky 110 mm a pokládce dvou asfaltových směsí. Ložní byla navržena jako asfaltový beton ACL 22S o tloušťce 70 mm a obrusná vrstva jako asfaltový koberec mastixový SMA 11S s R-materiálem v tloušťce 40 mm.

Ložní vrstva ACL 22S byla položena ve třech variantách:

- 1) Bez R-materiálu s modifikovaným asfaltovým pojivem Colflex 25/55-65.
- 2) Bez R-materiálu s asfaltovým pojivem 50/70 a přísadou Storelastic, což je pryžový granulát napuštěný oživovací přísadou.
- 3) S 60 % „běžného“ R-materiálu a přísadou Storelastic.

Obrusná vrstva SMA 11S byla položena v 17 variantách (Tabulka 17). Prvních 6 variant obsahuje modifikované asfaltové pojivo Colflex 45/80-65 a klasické celulóznové 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. Lze říct, že se jedná o stejné varianty jako v případě laboratorního návrhu.

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, viz Tabulka 18. 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 17: 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	-	-	-	-
Žel. Přejezd	2,890-2,620	10	PmB	20	-	-	-	ano	-	-	-
Žel. Přejezd	2,620-2,350	11	PmB	30	-	-	-	-	ano	-	-
	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

Výroba všech variant asfaltové směsi typu SMA 11S s různým obsahem R-materiálu byla provedena na obalovně Froněk, spol. s r.o. v Rakovníku (Obrázek 44). R-materiál byl dávkován pomocí paralelního bubnu, který byl přehřátý na teplotu (130 ± 5) °C.



Obrázek 44: Obalovna firmy Froněk, spol. s r.o.

Vlákno S-CEL 7G bylo dávkováno pomocí dávkovače, uzpůsobeného na tento typ přísad. Nově vyrobená vlákna byla dávkována ručně z důvodu větší hmotnosti přítomné regenerační přísady. Dávkování přísady Storelastic proběhlo také ručně vhozením přímo do míchačky. Průběh pokládky je znázorněn na Obrázcích 45 až 50. Stav úseku v září 2018 lze vidět na Obrázcích 51 až 55. Po celé délce úsek nevykazuje žádné poruchy až na místo havárie nákladního automobilového vozidla, která se stala začátkem roku 2017. Lze vidět vypocení asfaltového pojiva na základě bodového zatížení. Lze pozorovat pěkně ojetý asfaltový film z hran kameniva, které zajišťuje dobré protismykové vlastnosti.



Obrázek 45: Dovoz asfaltových směsí na zkušební úsek II/227



Obrázek 46: Pokládka obrusné vrstvy pomocí finišeru



Obrázek 47: Hutnění obrusné vrstvy ze směsi SMA 11S pomocí hutních válců



Obrázek 48: Podrcení povrchu směsi typu SMA 11S frakcí kameniva 0/4 pro zlepšení protismykových vlastností



Obrázek 49: Povrch vozovky před podrcením a po posypu jemnou frakcí pro zaválcování



Obrázek 50: Zkušební úsek po realizaci v roce 2016



Obrázek 51: Zkušební úsek v září 2018 (varianta směsi 18)



Obrázek 52: Stav varianty směsi 17 v září 2018, lze vidět ojetý asfaltový film z kameniva a tím zajištění dobrých protismykových vlastností povrchu vozovky



Obrázek 53: Stav varianty směsi označené číslem 11 v září 2018



Obrázek 54: Stav detailu napojení štěrbinového žlabu poblíž železničního přejezdu v září 2018



Obrázek 55: Stav varianty směsi 1 v září 2018

10. VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ ZKUŠEBNÍHO ÚSEKU

Hodnocení vyrobených variant směsi typu SMA 11S s různým podílem R-materiálu, různým nativním pojivem a přísadami bylo provedeno jednak na směsích pomocí funkčních zkoušek simulujících reálné namáhání vozovky dopravou a klimatickými podmínkami, tak také na znovuzískaných pojivech, kde byly použity jednak standardně používané empirické zkoušky, tak také funkční, které lépe simulují reálné zatížení a podmínky ve vozovce a popisují chování asfaltového pojiva v celé teplotní škále.

10.1. Výsledky zkoušek na asfaltových směsích

10.1.1. Sítový rozbor kameniva dle ČSN EN 933-1

Na všech směsích položených v rámci zkušební úseku byl proveden sítový rozbor dle ČSN EN 933-1 [56]. Průběh čar zrnitosti byl porovnán s počáteční zkouškou typu (ITT) směsi SMA 11S (v Grafech 35 až 40 označená jako ITT - červeně). To znamená s nastavením propadu jednotlivých frakcí na sítích obalovny. Dále jsou v grafech bodově vyznačeny minimální a maximální propady na sítích dle požadavků normy ČSN EN 13108-5 [45].

Kamenivo bylo zbaveno asfaltového pojiva pomocí rozpoštědla (tetrachlorethylen) a následně po vysušení roztříděno sadou sítí. Hmotnost částic zachycených na sítích v procentech k počáteční hmotnosti vzorku kameniva je uvedena v Tabulce 18 a jednotlivé průběhy čar jsou zachyceny na Grafech 35 až 40.

Tabulka 18: Hmotnostní podíly obsažených frakcí a obsah pojiva ve směsích SMA 11S

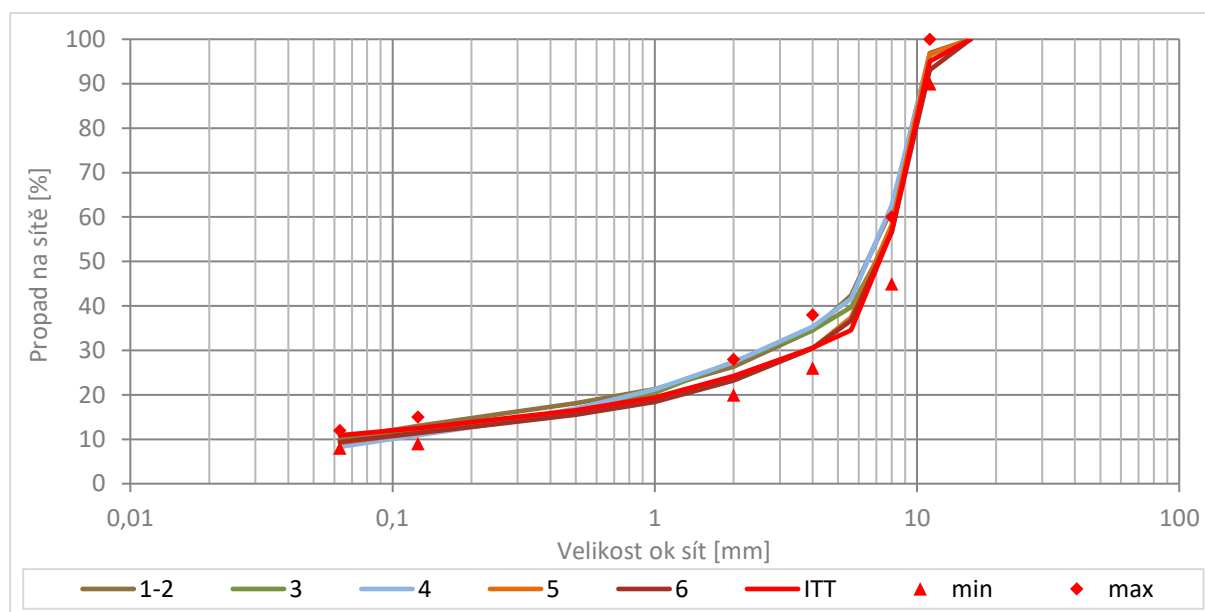
Směs	11,2	8	5,6	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	Obsah asfaltu
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
ITT	95	57	35	31	24	19	17	15	13	10,9	6,5
1-2	97	62	42	35	26	21	18	16	13	10,2	6,5
3	97	56	40	35	27	21	17	14	12	9,6	7,2
4	96	63	42	35	27	21	17	14	11	8,3	6,3
5	97	58	37	30	23	19	16	14	11	9,2	6,8
6	93	57	37	31	23	18	16	13	11	9,4	6,4
7	94	62	42	35	27	21	17	15	14	11,0	6,6
8	95	51	34	29	22	17	13	11	9	7,1	6,4
9	95	58	39	33	26	20	16	13	11	9,0	6,8
10	93	53	34	28	21	16	14	12	10	7,9	6,1
11	94	59	42	36	28	21	17	14	12	9,8	6,4
12	96	56	38	31	24	19	16	14	12	9,6	6,5
13	92	55	37	31	23	18	15	13	11	9,0	5,9
14	96	60	41	35	25	19	16	14	12	10,1	6,6
15	91	49	32	28	22	17	13	11	9	7,2	6,5

16	97	57	39	34	27	20	16	13	11	9,2	7,0
17	97	52	32	30	23	19	16	13	11	9,8	6,9
18	94	57	35	30	21	16	14	12	10	8,5	6,7
minimum	90	45		26	20				9	8,0	
maximum	100	60		38	28				15	12,0	

Z výsledků je patrné, že většina propadů na sítích všech směsí splnila požadavky normy ČSN EN 13108-5 [45]. V Tabulce 19 jsou červeně zvýrazněné hodnoty, které jsou mimo požadavky normy. Jedná se o směsi bez R-materiálu s označením 1-2 a 7 a směs 4 s 30 % R-mat, které na sítě 8 mírně překročily maximální množství 60 % požadovaného propadu. Směsi s 20 % R-materiálu s označením 8, 10 a 15 naopak nedosáhly minimálního požadavku 8 % na sítě 0,063 mm. Tento menší propad na sítích s menšími oky mohl mít vliv na výslednou mezerovitost, která je u těchto variant směsí vyšší, viz kapitola 10.1.2.

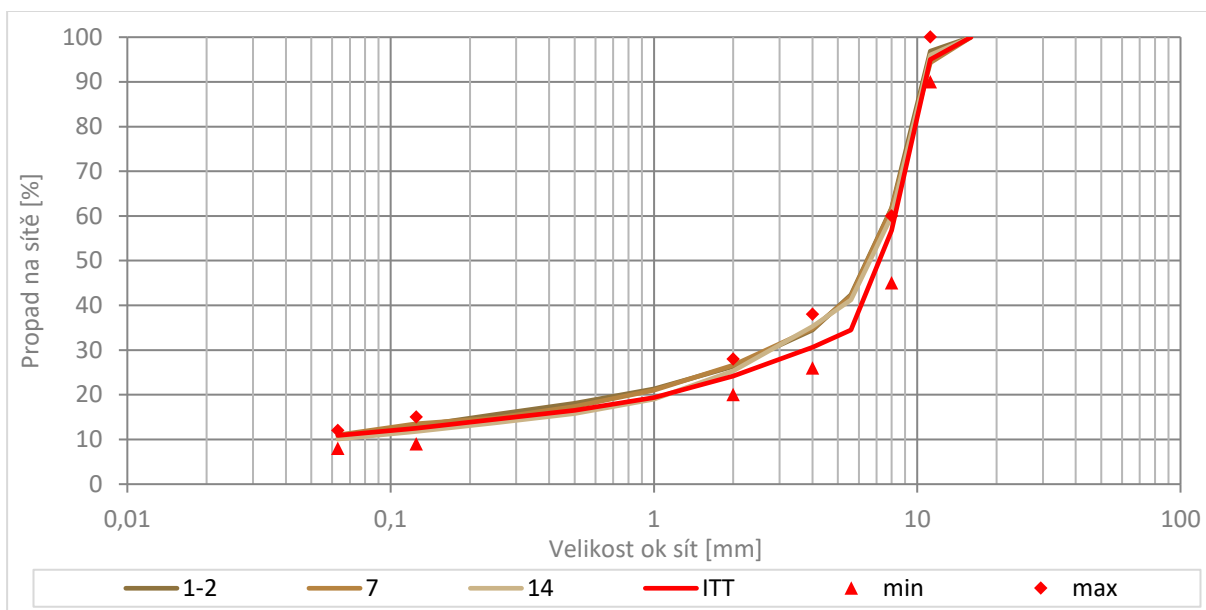
Průměrná hodnota obsahu asfaltového pojiva je 6,6 %. Nejnižší obsah má směs 13 a to 5,9 % a nejvyšší směs 3 a to 7,2 % pojiva. Tloušťka asfaltového filmu může mít vliv na životnost směsi, mezerovitost a trvalé deformace.

V Grafu 35 jsou srovnány směsi 1-2, 3, 4, 5, 6 s průběhem definovaným průkazní zkouškou směsí (ITT). Jedná se o směsi, které odpovídají laboratorním návrhům, které byly popsány v kapitole 8. Z výsledků je patrný méně zakřivený tvar čar znitosti u směsí s běžným R-materiálem 3 a 4 a zároveň u směsí bez R-materiálu (1-2). Výsledek potvrzuje laboratorní návrhy ve smyslu, že R-materiál z SMA umožňuje navržení více zakřivené čáry zrnitosti.



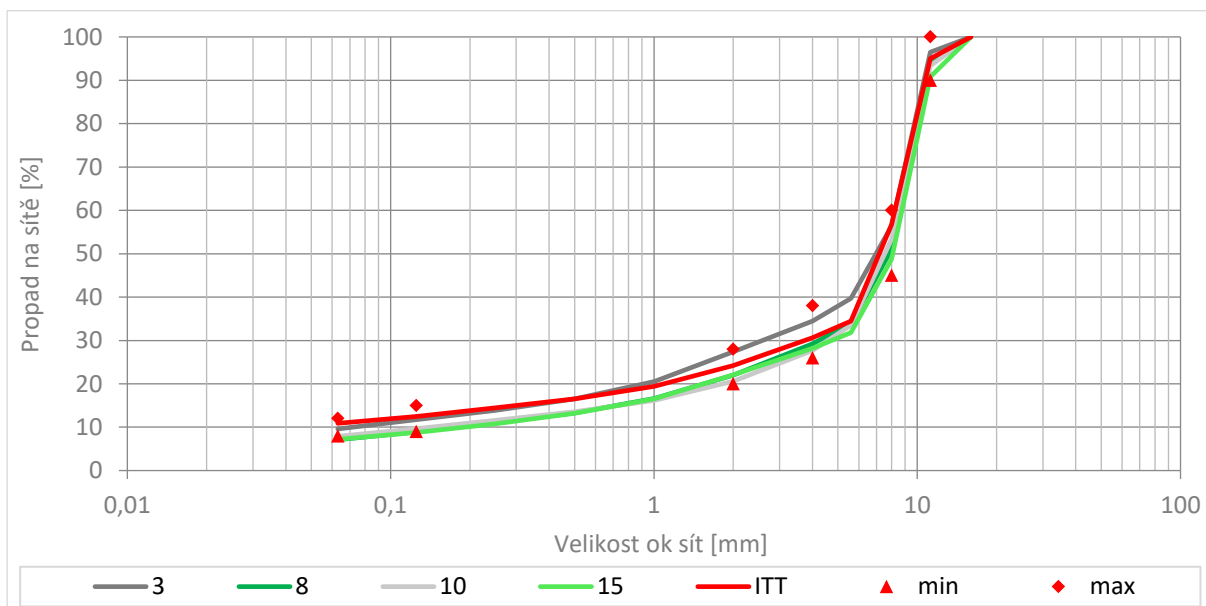
Graf 35: Čáry zrnitostí směsí s různým obsahem R-materiálu 0 až 50 % v porovnání se směsí dle ITT a požadavky normy ČSN EN 13108-5 [45] pro směsi typu asfaltový koberec mastixový (SMA)

V Grafu 36 jsou porovnány směsi bez R-materiálu, které se vyznačují plynulejším vedením čáry zrnitosti, která kopíruje horní meze stanovené pro směs typu SMA 11 S. Hrubé frakce v kamenivu mají menší zastoupení oproti průkazní zkoušce.



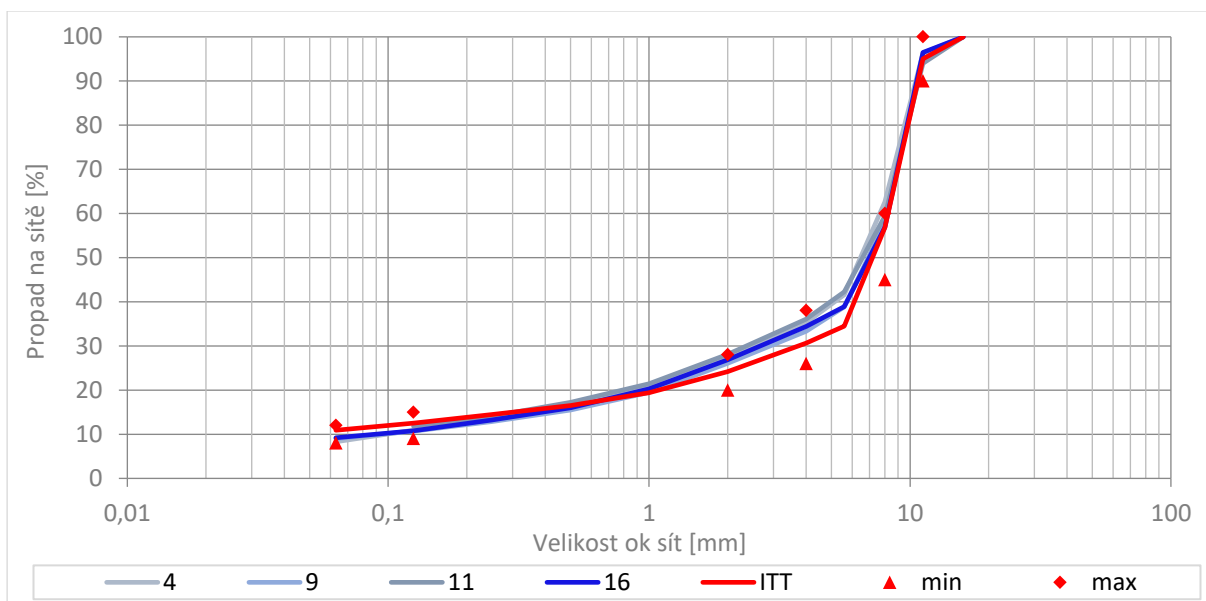
Graf 36: Čáry zrnitostí směsí bez % R-materiálu v porovnání s ITT a požadavky normy [45]

V Grafu 37 jsou porovnány směsi s 20 % běžného R-materiálu. S výjimkou směsi 3, která se podobá spíše průběhu čar zrnitostí směsí bez R-materiálu, jsou jednotlivé frakce kameniva zastoupeny podobně. Podobný průběh čar zrnitostí ukazuje na homogenitu R-materiálu, který byl přidáván do jednotlivých variant. Tyto směsi se blíží spíše dolním mezím dle českých požadavků na směs typu SMA 11S [45].



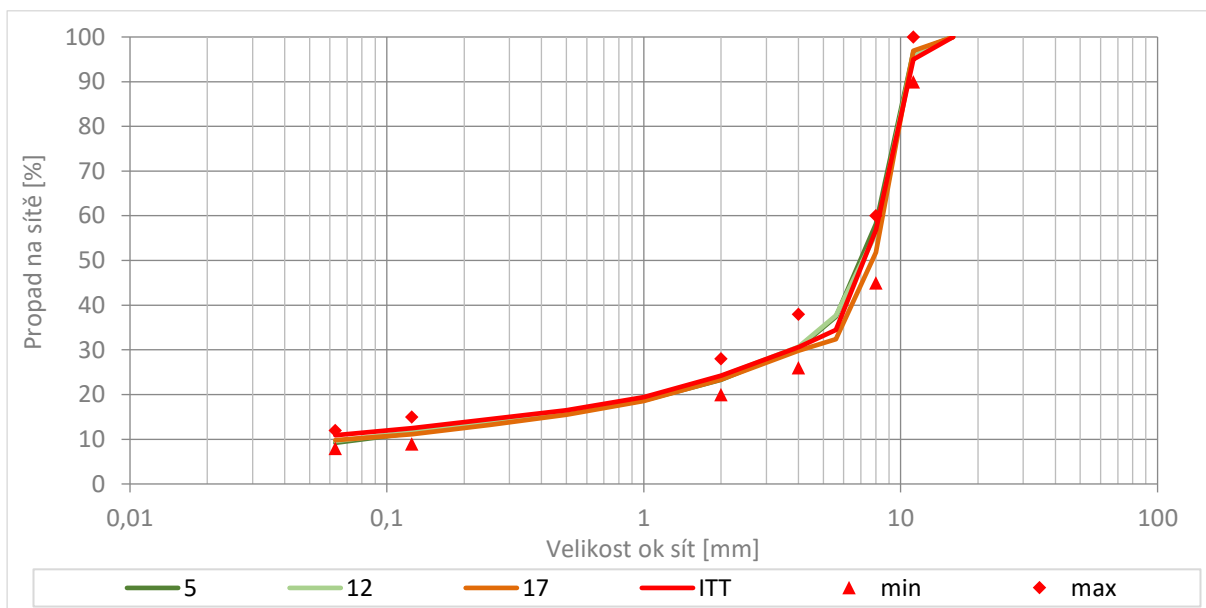
Graf 37: Čáry zrnitostí směsí s 20 % běžného R-materiálu v porovnání s ITT a požadavky normy [45]

V případě směsí s 30 % běžného R-materiálu (Graf 38) se průběh čar zrnitosti blíží k horním mezím. Z toho vyplývá, že přidání ještě většího množství tohoto R-materiálu by nemuselo splnit tato kritéria. Plynulejší průběh čar zrnitostí má vliv na uzavřenost směsi a tím menší mezerovitost.

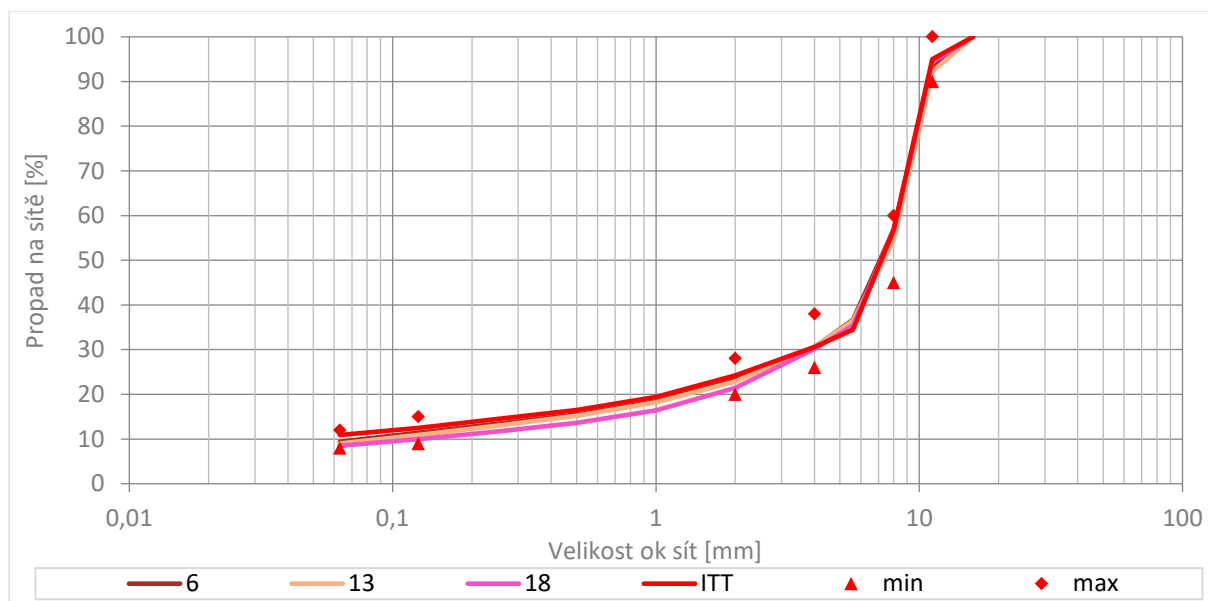


Graf 38: Čáry zrnitostí směsí s 30 % R-materiálu v porovnání s ITT a požadavky normy [45]

V případě přidání 30 a 50 % R-materiálu vyfrézovaného ze směsi SMA můžeme vidět více zalomené průběhy čar, což je žádoucí pro tento typ směsi (Graf 39 a 40). Z tohoto výsledku vyplývá, že zvyšování R-materiálu nad hranici 30 % je podmíněno selektivním frézováním vrstev vozovky a rozlišováním typů směsí.



Graf 39: Čáry zrnitostí směsí s 30 % R-materiálu SMA v porovnání s ITT a požadavky normy [45]



Graf 40: Čáry zrnitostí směsí s 50 % R-materiálu SMA v porovnání s ITT a požadavky normy [45]

Na Obrázku 56 je zachycen síťový rozbor směsi 5, kdy na síť o velikosti oka 1 mm došlo společně s kamenivem frakce 1 mm až 2 mm k zachycení obsaženého celulózového vlákna. Na Obrázku 57 je dále patrný obsah pryžového granulátu (Storelastic) ve směsi 16 zachyceného na síťě 8 mm a 0,125 mm.



Obrázek 56: Směs 5 - síť frakce 1 mm, lze vidět obsažené celulózové vlákno



Obrázek 57: Směs 16 – síť 8 a 0,125, lze vidět obsažený pryžový granulát

10.1.2. Objemové hmotnosti a mezerovitosti dle ČSN EN 12697 části 5, 6 a 8

Před výrobou zkušebních těles byly stanoveny objemové hmotnosti směsí pro výpočet navážek a také mezerovitost pro ověření splnění požadavku dle ČSN EN 13108-5 [45]. Aktuální požadavek je 3,0 – 4,5 % (2,0 – 6,0 % pro kontrolní zkoušky). Jelikož byly asfaltové směsi vyrobeny přímo na obalovně, je nutné vycházet z povolené tolerance mezerovitosti, která je 2 % až 6 %. Stanovené objemové hmotnosti a mezerovitosti směsí jsou uvedeny v Tabulce 19, kde jsou červeně vyznačeny směsi, jež nevyhověly požadavku na mezerovitost při výrobě na obalovně. Modře jsou vyznačeny směsi, které jsou mimo nově navrhovaný rozsah mezerovitosti 2,5 % až 4,0 %.

Tabulka 19: Objemové hmotnosti a mezerovitost směsí

Označení směsi	1-2	3	4	5	6
Maximální objemová hmotnost ρ_{mv} [kg/m ³]	2 494	2 508	2 521	2 493	2 490
Objemová hmotnost ρ [kg/m ³]	2 416	2 461	2 417	2 394	2 400
Mezerovitost [%]	3,1	1,9	3,9	4,0	3,6
Označení směsi	7	8	9	10	11
Maximální objemová hmotnost ρ_{mv} [kg/m ³]	2 482	2 477	2 472	2 517	2520
Objemová hmotnost ρ [kg/m ³]	2 410	2 386	2 418	2 358	2472
Mezerovitost [%]	2,9	3,7	2,2	6,3	1,9
Označení směsi	12	13	14	15	16
Maximální objemová hmotnost ρ_{mv} [kg/m ³]	2511	2512	2457	2478	2489
Objemová hmotnost ρ [kg/m ³]	2431	2424	2394	2370	2422
Mezerovitost [%]	3,2	3,5	2,6	4,4	2,7
Označení směsi	17	18			
Maximální objemová hmotnost ρ_{mv} [kg/m ³]	2476	2496			
Objemová hmotnost ρ [kg/m ³]	2405	2404			
Mezerovitost [%]	2,9	3,7			

Z naměřených hodnot vyplývá, že směsi se pohybují v požadovaném rozmezí až na směs 10, kterou lze charakterizovat jako otevřenou s mezerovitostí přes 6 %, čára zrnitosti je zalomená a hodnoty jemných frakcí kameniva jsou blízko minimálním propadům požadovaných na sítěch. Naopak směsi 3 a 11 jsou více uzavřené, čáry zrnitosti jsou více plynulé a blíží se horním mezím propadu na sítěch. Obsah asfaltového pojiva směsi 3 byl 7,2 %, což vedlo k jejímu uzavření a zmenšení mezerovitosti směsi.

Zkušební tělesa pro následná měření byla připravována tak, aby míra zhutnění byla v rozmezí 99,0 – 101,0 %.

10.1.3. Stanovení odolnosti proti tvorbě trvalých deformací dle ČSN EN 12697-22

Zkouška byla provedena při dvou zkušebních teplotách jako v případě laboratorních návrhů směsí a to při 50 °C, což je aktuálně normou požadovaná teplota a při teplotě 60 °C, o které se uvažuje v případě asfaltových směsí obsahující modifikované pojivo.

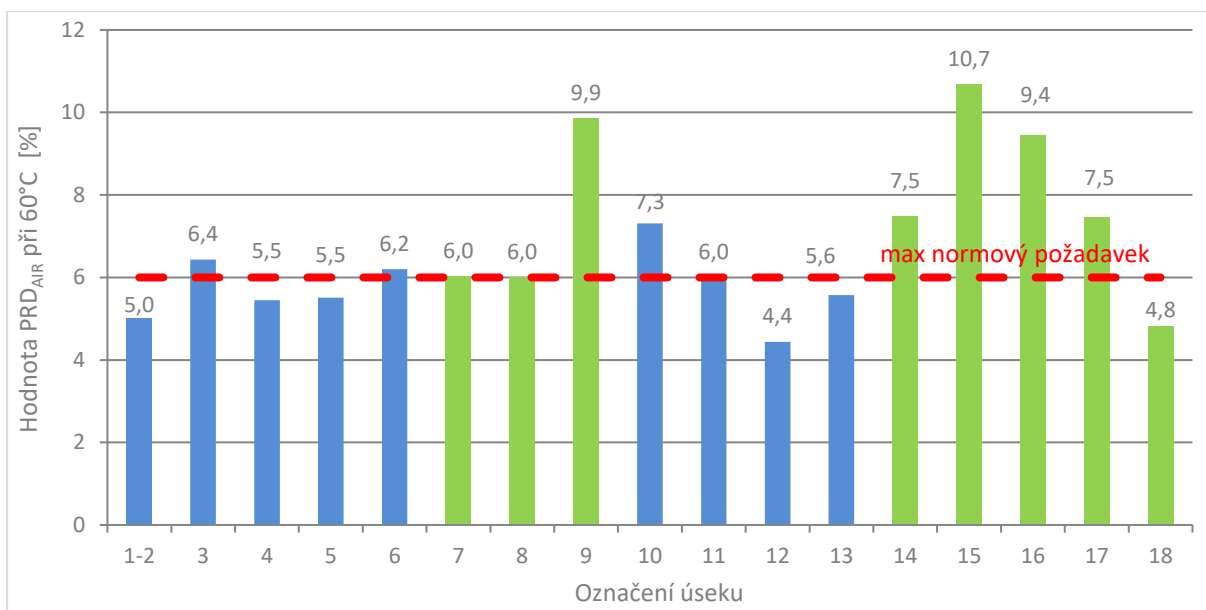
Výsledky při zkušební teplotě 60 °C jsou uvedeny v Tabulce 20. Zeleně jsou vyznačeny směsi se silničním asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem. V tabulce jsou červeně vyznačeny hodnoty, které jsou mimo normové požadavky. V případě bodu měknutí jsou tučně vyznačeny hodnoty, které jsou nižší jak zkušební teplota 60 °C, což mohlo mít vliv na výsledek zkoušky.

Tabulka 20: Výsledné trvalých deformací zkoušených při 60 °C s detaily měřených těles

Číslo směsi	PRD _{AIR} [%]	WTS _{AIR} mm/10 ³ cyklů]	Mezerovitost [%]	Míra zhutnění [%]	Bod měknutí [°C]
1-2	5,0	0,038	2,8	100,4	64,1
3	6,4	0,066	2,4	99,5	64,3
4	5,5	0,072	3,7	100,4	64,5
5	5,5	0,066	4,4	99,1	63,7
6	6,2	0,089	3,6	99,8	63,8
7	6,0	0,060	3,0	99,9	59,6
8	6,0	0,074	4,8	98,8	58,7
9	9,9	0,154	2,5	99,7	57,7
10	7,3	0,116	6,1	99,8	63,4
11	6,0	0,074	2,9	99,0	63,9
12	4,4	0,037	3,8	99,4	63,2
13	5,6	0,060	4,0	99,5	63,7
14	7,5	0,115	3,1	99,3	53,5
15	10,7	0,254	5,3	99,0	57,1
16	9,4	0,182	3,4	99,3	57,1
17	7,5	0,106	2,9	100,0	58,9
18	4,8	0,034	2,5	101,2	62,1

V Grafu 41 jsou znázorněny hodnoty PRD_{AIR} při zkušební teplotě 60 °C. Z výsledků vyplývá, že nejvyšší hodnoty parametru jsou u směsi obsahující silniční asfalt modifikovaný pryžovým granulátem (zeleně vyznačené). Pouze směsi 7, 8 a 18 vyhovely normovým požadavkům. U směsi 18 to může být způsobeno 50 % obsahem SMA R-mat, který obsahuje modifikované pojivo, které je odolnější vůči trvalým deformacím. Také tato směs měla nejvyšší míru zhutnění. Nejvyšší hodnota PRD_{AIR} byla naměřena u směsi 15, u které byla vyšší mezerovitost (5,3 %).

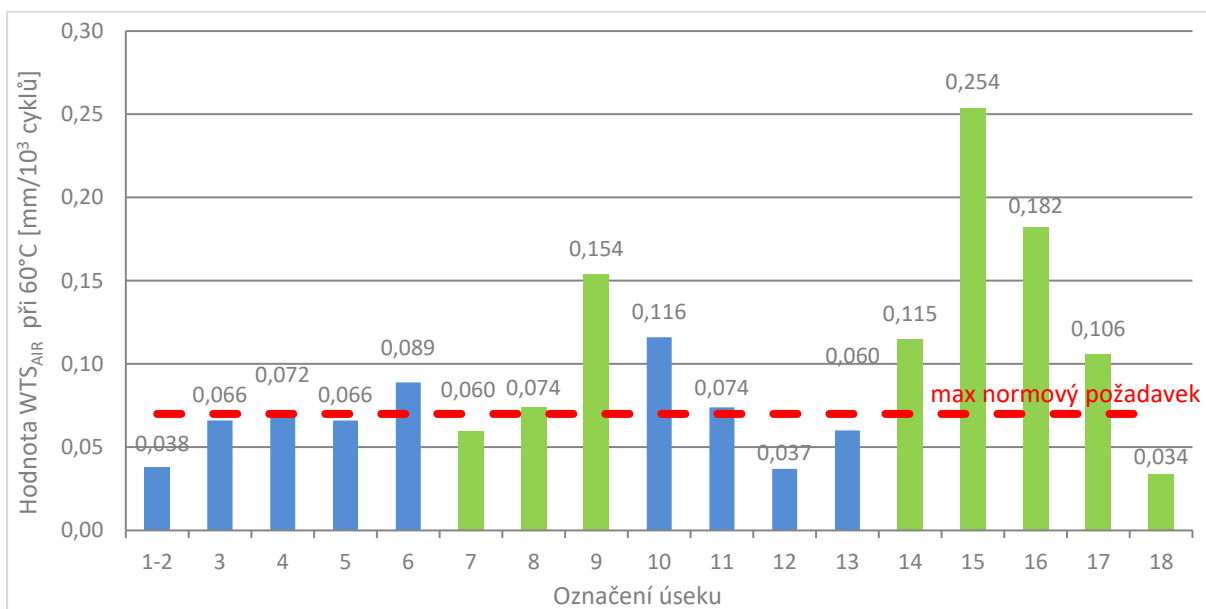
U směsí s modifikovaným pojivem PmB 45/80-65 byly průměrně zaznamenány nižší hodnoty PRD_{AIR}. Požadavku přesto nevyhovely tři směsi, a to 3, 6 a 10. U směsi 10 je možné tento fakt přisuzovat vyšší mezerovitosti asfaltové směsi, u směsi 3 vyššímu obsahu asfaltového pojiva.



Graf 41: Hodnoty parametru PRDAIR měřeného při 60 °C

Dalším parametrem, který byl při teplotě 60 °C hodnocen, je WTS_{AIR} (Graf 42). Zde je maximální normový požadavek 0,07. Obdobně jako při hodnocení parametru PRDAIR byly průměrně zjištěny vyšší hodnoty u směsí s pojivem 50/70. Požadavku v tomto případě vyhověly pouze směsi 7 a 18. U směsi 15 byl požadavek překročen dokonce více než 3,5 krát.

Směsi s modifikovaným pojivem prokazovaly průměrně lepší výsledky, i když požadavku těsně nevyhověly směsi 4, 6, 10 a 11.



Graf 42: Hodnoty parametru WTS_{AIR} měřeného při 60 °C

Na Obrázcích 58 až 60 jsou fotografie s detaily zkušebních těles po zkoušce vyjetí kolem variant 10, 13 a 15 při zkušební teplotě 60 °C. U varianty 15 je možné pozorovat největší hloubku koleje.



Obrázek 58: Detail vyjeté koleje zkušebního tělesa směsi 13

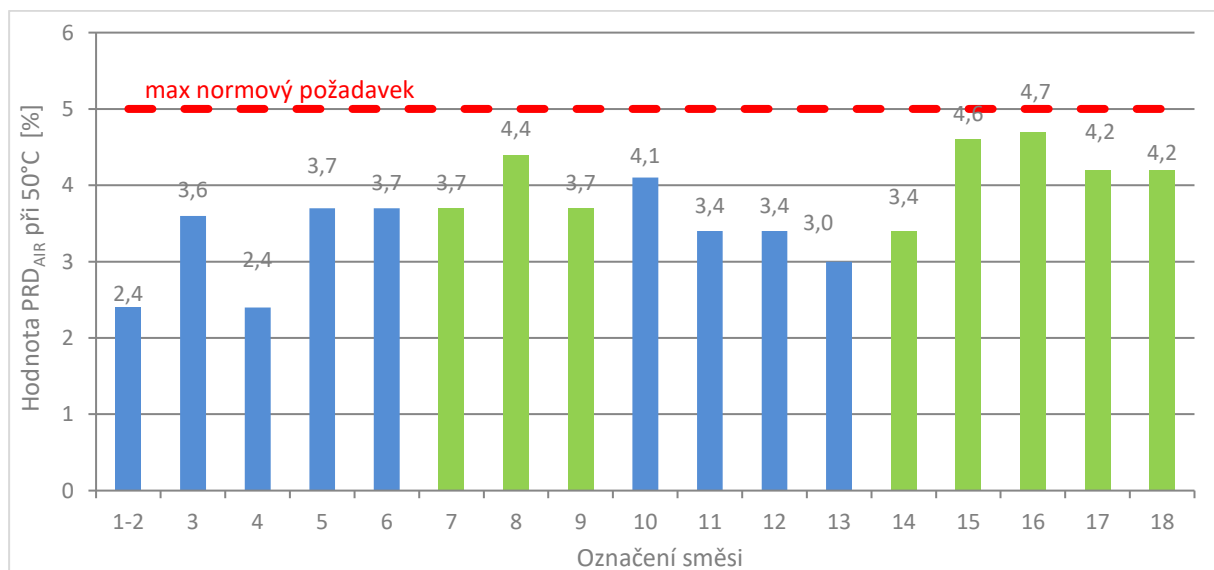


Obrázek 59: Detail vyjeté koleje zkušebního tělesa směsi 10

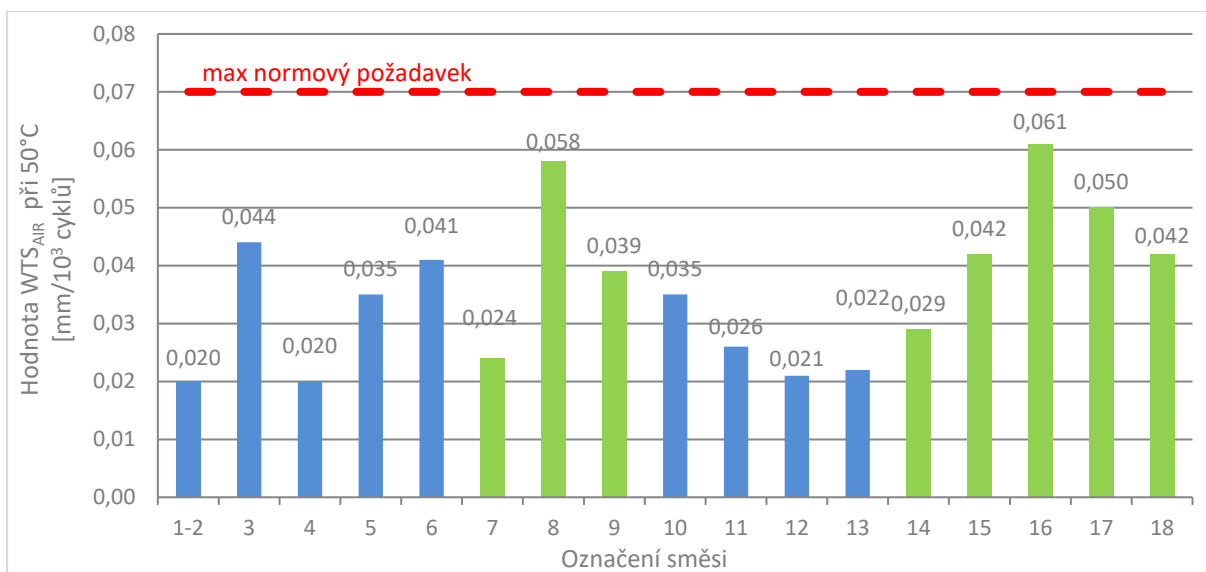


Obrázek 60: Detail vyjeté koleje zkušebního tělesa směsi 15

V Grafech 43 a 44 a Tabulce 21 jsou uvedeny výsledky při teplotě zkoušení 50 °C. V tomto případě všechny varianty splnily normové požadavky na sledované parametry [45].



Graf 43: Hodnoty parametru PRD_{AIR} měřeného při 50 °C



Graf 44: Hodnoty parametru WTS_{AIR} měřeného při 50 °C

Tabulka 21: Výsledné trvalých deformací zkoušených při 50 °C s detaily měřených těles

Číslo směsi	PRD _{AIR}	WTS _{AIR}
	[%]	[mm/10 ³ cyklů]
1-2	2,4	0,020
3	3,6	0,044
4	2,4	0,020
5	3,7	0,035
6	3,7	0,041
7	3,7	0,024
8	4,4	0,058
9	3,7	0,039
10	4,1	0,035
11	3,4	0,026
12	3,4	0,021
13	3,0	0,022
14	3,4	0,029
15	4,6	0,042
16	4,7	0,061
17	4,2	0,05
18	4,2	0,042

U variant s R-materiálem by se daly očekávat malé trvalé deformace díky přítomnosti zestárlého pojiva v R-materiálu, které je tužší než nativní pojivo. Z výsledků tento trend není patrný, což může být způsobeno pozitivním působením oživovací přísady. Pro ověření způsobu oživení asfaltových pojiv obsažených ve směsích byla asfaltová pojiva znovuzískána a hodnocena zkouškami na pojivech viz kapitola 10.2.

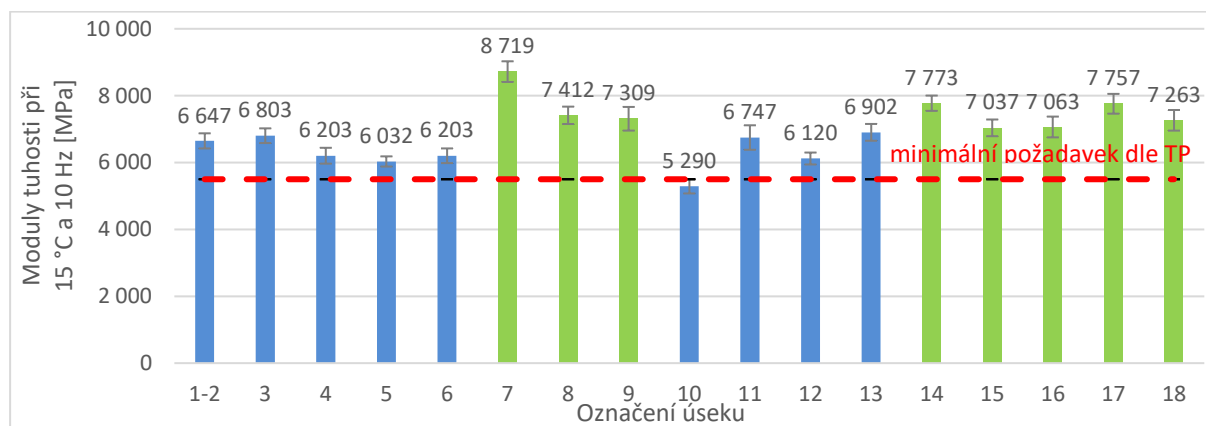
10.1.4. Stanovení modulu tuhosti dle ČSN EN 12697-26

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. V Tabulce 22 jsou uvedeny základní charakteristiky vyrobených zkušebních desek. Jedná se o mezerovitost a míru zhutnění.

Tabulka 22: Mezerovitost a míra zhutnění těles použitých pro stanovení modulu tuhosti

Označení směsi		1-2		3		4		5	
Mezerovitost	[%]	3,0	2,9	2,7	2,5	3,9	3,8	3,8	3,7
Míra zhutnění	[%]	100,1	100,2	99,1	99,3	100,3	100,4	100,2	100,2
Označení směsi		6		7		8		9	
Mezerovitost	[%]	3,9	3,9	3,0	3,0	4,3	4,3	2,8	2,7
Míra zhutnění	[%]	99,7	100,1	99,9	99,9	99,3	99,4	99,4	99,5
Označení směsi		10		11		12		13	
Mezerovitost	[%]	6,4	6,5	2,8	2,9	3,5	3,5	4,1	4,2
Míra zhutnění	[%]	99,4	99,3	99,1	99,1	99,7	99,7	99,3	99,3
Označení směsi		14		15		16		17	
Mezerovitost	[%]	2,7	2,8	3,6	3,8	2,8	2,5	3,3	3,4
Míra zhutnění	[%]	99,8	99,7	100,8	100,6	99,9	100,2	99,5	99,5
Označení směsi		18							
Mezerovitost	[%]	4,1	3,8						
Míra zhutnění	[%]	99,6	99,9						

Průměrné hodnoty naměřených hodnot modulu tuhosti pro jednotlivé varianty směsi jsou znázorněny v Grafu 45. Z výsledků je patrné, že moduly tuhosti jsou v případě směsi s modifikovaným pojivem průměrně nižší než u směsi se silničním pojivem, což lze vysvětlit jejich nižší tuhostí. Výsledky dobře korelují s naměřenými hodnotami komplexních smykových modulů při teplotě viskoelastického přechodu na pojivech (Graf 71). 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 – viz Tabulka B.2 [119]. To mohlo být zapříčiněno velkou mezerovitostí směsi, kdy mezerovitost zkoušených těles byla 6,5 %.



Graf 45: Moduly tuhosti směsí SMA 11S s různým obsahem R-materiálu

10.1.5. 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 Tabulce 23 jsou uvedeny základní parametry zkušebních desek, ze kterých byly vyříznuty zkušební trámce.

Tabulka 23: Mezerovitost a míra zhutnění těles použitých pro danou zkoušku

Označení směsi		1-2	3	4	5	6	7	8	9
Mezerovitost	[%]	2,5	2,7	4,0	3,8	3,8	3,3	4,3	2,2
Míra zhutnění	[%]	100,6	99,1	100,1	100,2	99,8	99,6	99,3	100,0
Označení směsi		10	11	12	13	14	15	16	17
Mezerovitost	[%]	6,1	2,7	3,3	3,7	3,4	3,9	2,3	2,7
Míra zhutnění	[%]	99,7	99,2	99,9	99,8	99,1	100,5	100,4	100,1
Označení směsi		18							
Mezerovitost	[%]	4,2							
Míra zhutnění	[%]	99,5							

Na Obrázku 61 a 62 jsou zobrazeny detaily zkušebních vzorků směsí 1-2 a 11 při porušení mrazovou trhlinou. Lze pozorovat vedení trhliny převážně asfaltovým pojivem a částečně zrny menších frakcí kameniva.

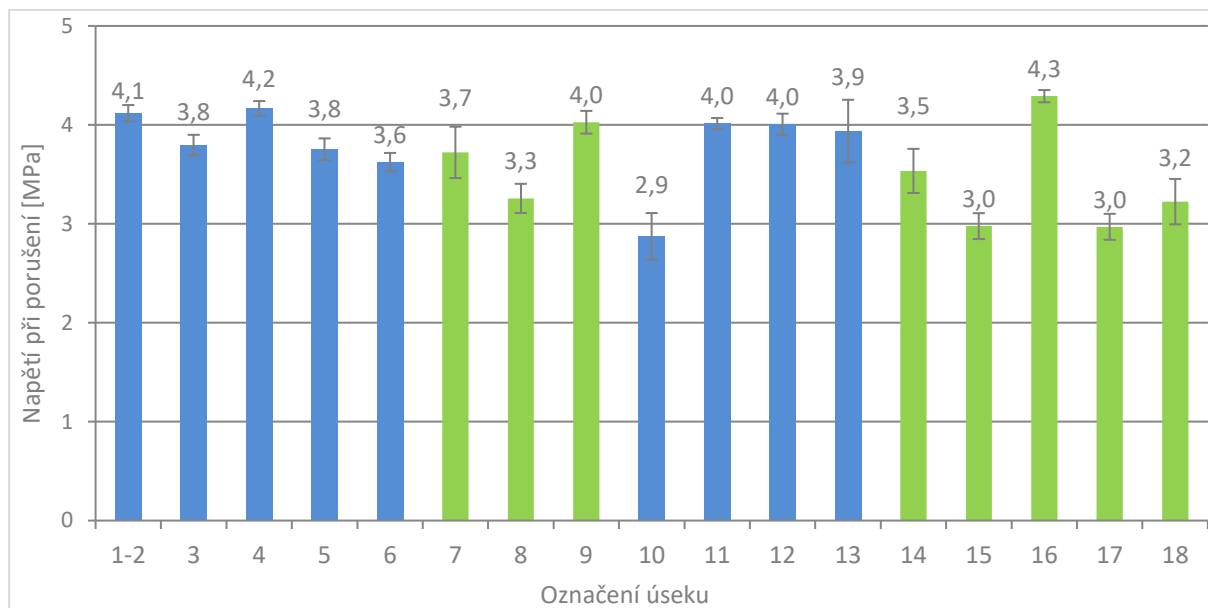


Obrázek 61: Směs 1-2 detail porušení tělesa vlivem působení kryogenního napětí

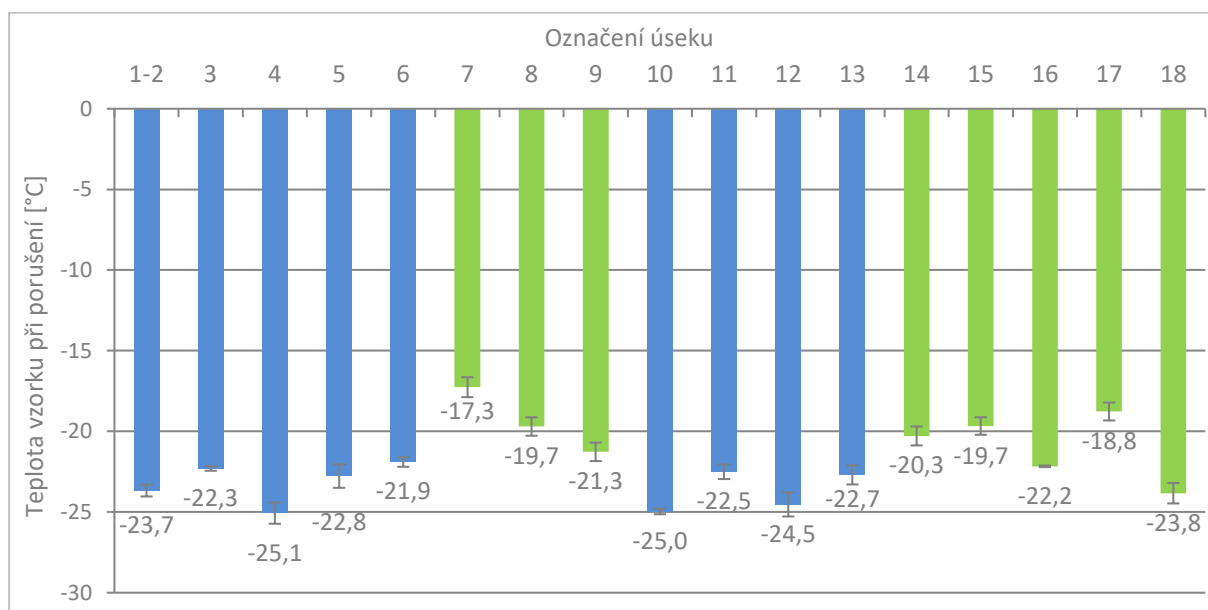


Obrázek 62: Směs 11 detail porušení tělesa vlivem působení kryogenního napětí

V Grafu 46 a 47 jsou zobrazeny průměrné hodnoty maximálního kryogenního napětí a kritické síly při porušení jednotlivých variant směsi.

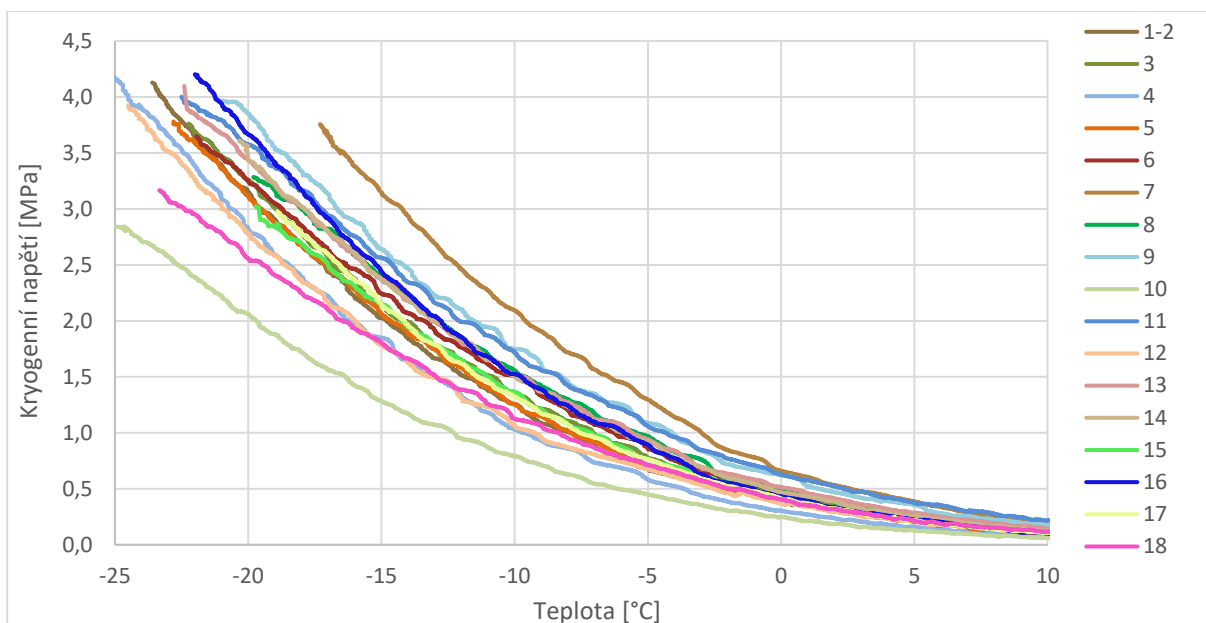


Graf 46: Maximální napětí při porušení vzorku při ověřování nízkoteplotních vlastností variant směsi SMA 11S ze zkušebního úseku



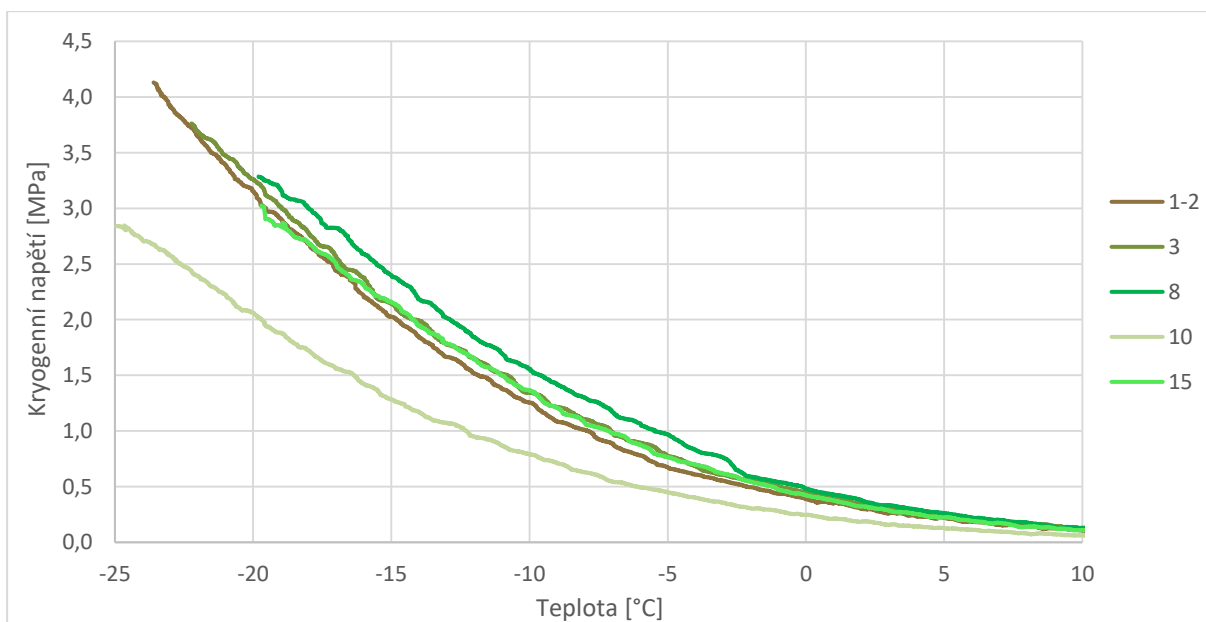
Graf 47: Kritická teplota vzorku při porušení při ověřování nízkoteplotních vlastností variant směsi SMA 11S ze zkušebního úseku

V Grafu 48 je zobrazena závislost kryogenního napětí na teplotě vzorků všech variant směsi typu SMA 11S. V grafech 49-52 jsou vzájemně porovnány varianty se stejným obsahem a druhem R-materiálu (běžný/selektivně vyfrézovaný z SMA) s referenční směsí, která je vždy označena hnědou barvou.



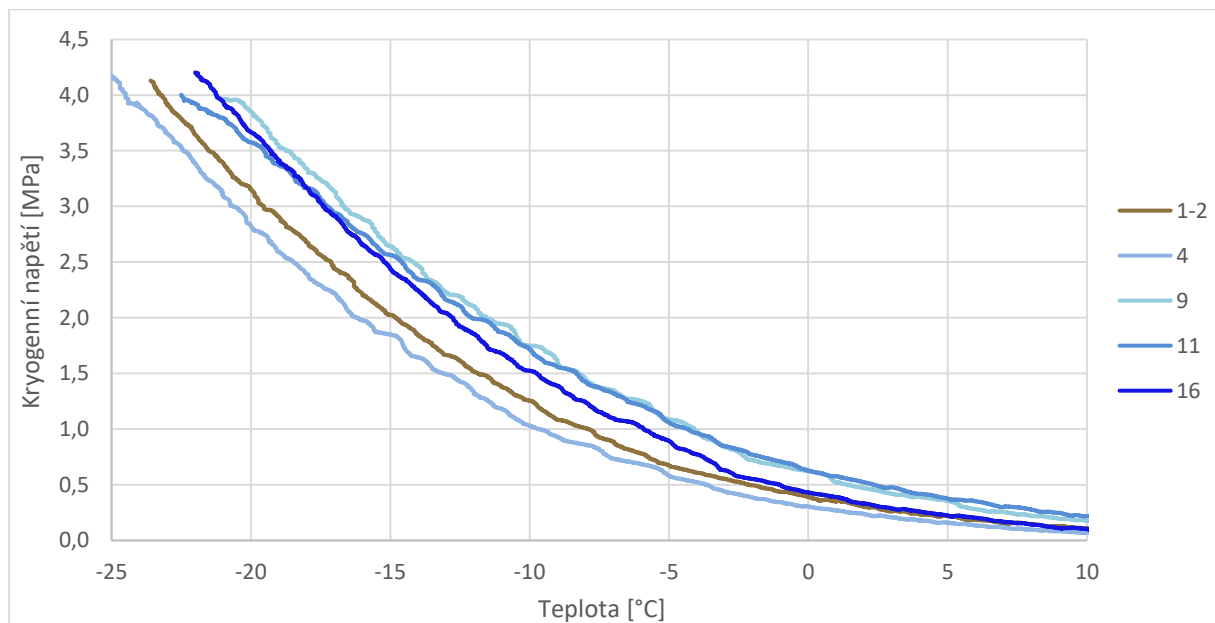
Graf 48: Závislost kryogenního napětí na teplotě tělesa v průběhu hodnocení nízkoteplotních vlastností všech variant

Graf 49 zobrazuje průběhy variant s 20 % R-materiálu. Co se týče složení, tak varianty 3 a 10 jsou obdobné (nově přidané pojivo je PmB), stejně tak 8 a 15 (kde je použito pojivo 50/70 s přísadou Storelastic). Průběh křivek napětí daných variant je obdobný s referenční směsí, až na variantu 10, která lépe relaxuje a dosahuje nižšího napětí v celém průběhu zatížení. Tato varianta má vyšší mezerovitost pohybující se okolo 6 %, která mohla ovlivnit výsledky měření. V případě variant 8 a 15 je kritická teplota porušení nejvyšší. To by mohlo poukazovat na nedostatečnou modifikaci směsi přísadou Storelastic s použitím asfaltového pojiva 50/70 v porovnání s variantami nově přidaného pojiva PmB.



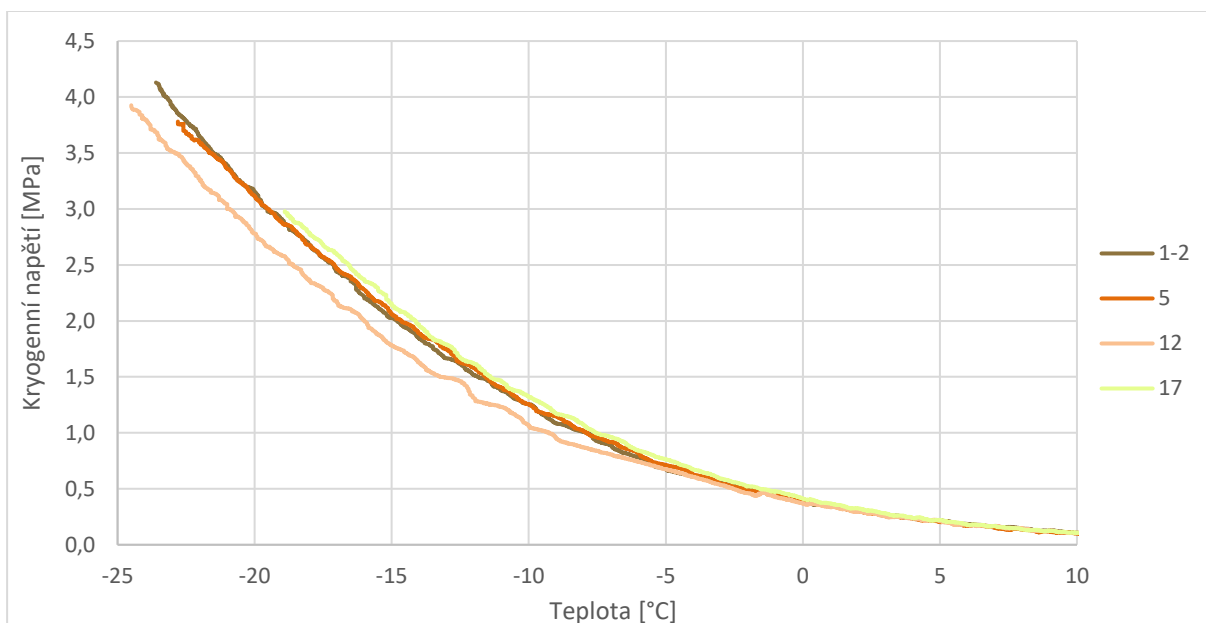
Graf 49: Závislost kryogenního napětí na teplotě tělesa v průběhu hodnocení nízkoteplotních vlastností směsí s 20 % R-materiálu

V Grafu 50 jsou uvedeny varianty obsahující 30 % běžného R-materiálu. Do varianty 4 a 11 bylo přidáno PmB pojivo a do variant 9 a 16 silniční pojivo 50/70 s přísadou Storelastic. Všechny varianty se vyznačují podobným maximálním napětím při porušení, ale liší se průběhem křivky napětí a teplotou porušení. Varianty 9 a 11 mají podobný průběh, liší se až v oblasti nejvyššího vnitřního napětí, kdy směs s PmB je porušena při nižší teplotě. V případě variant 9 a 16 s 50/70 jsou maximální napětí, kritická teplota a mezerovitost obdobné, přesto se varianty liší průběhem závislosti kryogenního napětí na teplotě. Varianta 4 vykazuje ze směsí v Grafu 50 nejprůběh napětí a dosahuje nejnižší kritické teploty, což může být opět způsobeno větší mezerovitostí (4,0 %) vůči porovnávaným směsím (okolo 2,5 %). Varianty obsahující PmB opět vykázaly nižší teploty při porušení.



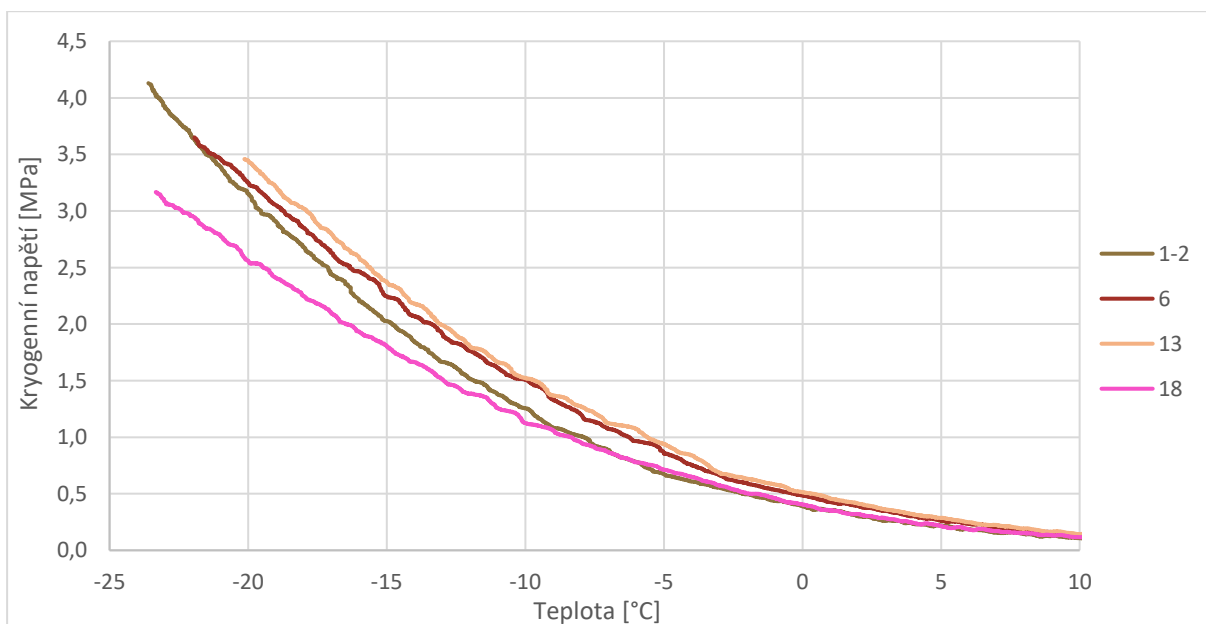
Graf 50: Závislost kryogenního napětí na teplotě tělesa v průběhu hodnocení nízkoteplotních vlastností směsí s 30 % R-materiálu

V Grafu 51 můžeme pozorovat závislost průběhu kryogenního napětí na teplotě směsí s 30 % R-materiálu z SMA. Všechny varianty mají obdobný průběh. Směs 12 se mírně liší při teplotách nižších jak -7 °C. Směs 17 vykázala nejvyšší teplotu při porušení. Jediná z porovnávaných obsahuje jako základní pojivo 50/70 a je modifikovaná pryžovým granulátem (přísadou Storelastic). Tento výsledek může opět poukazovat na nedostatečnou modifikaci směsi touto přísadou při porovnání s variantami s PmB pojivy.



Graf 51: Závislost kryogenního napětí na teplotě tělesa v průběhu hodnocení nízkoteplotních vlastností směsí s 30 % SMA R-materiálu

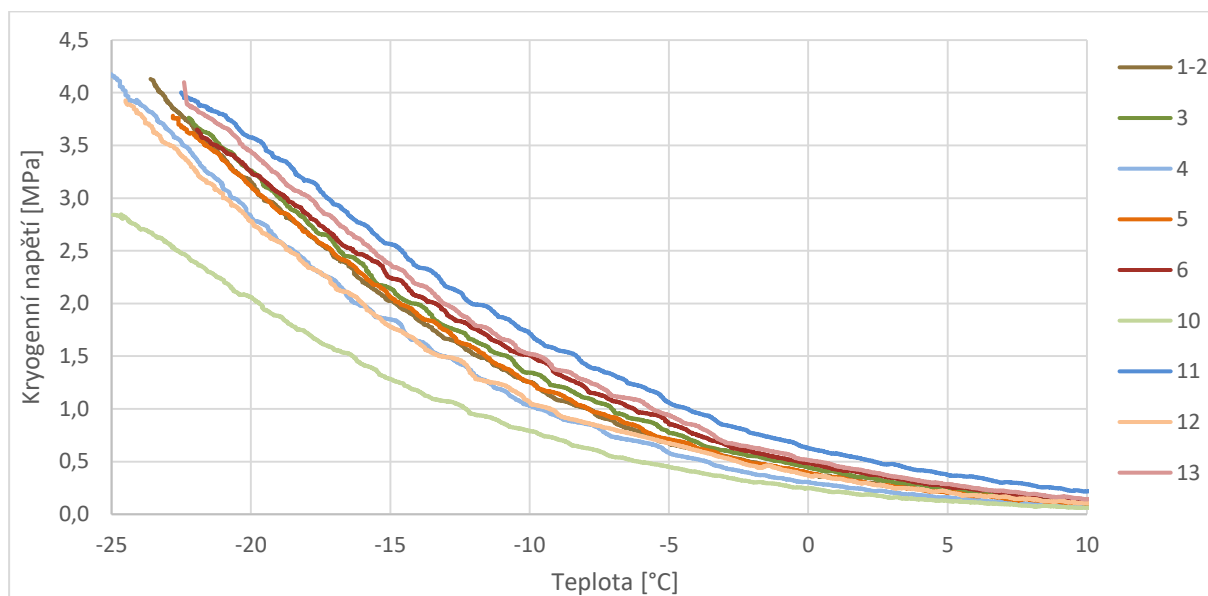
V Grafu 52 jsou uvedeny varianty s 50 % R-materiálu ze směsi SMA. Všechny vykazují nižší maximální napětí při porušení oproti referenční směsi. Zároveň varianty 6 a 13 mají kryogenní napětí při klesající teplotě v celém průběhu vyšší, což poukazuje na jejich horší relaxaci při působení nízkých teplot. Překvapivý výsledek byl dosažen u směsi 18, kdy maximální napětí a kritická teplota při porušení byly nejnižší. Pro ověření správnosti výsledků by bylo vhodné měření zopakovat. Z důvodu nedostatečného množství materiálu tak nebylo učiněno. Nelze tedy hodnotit, zda na to mohl mít vliv R-materiál obsahující modifikované pojivo, nebo mírně vyšší mezerovitost 4,2 %, nebo jiný parametr.



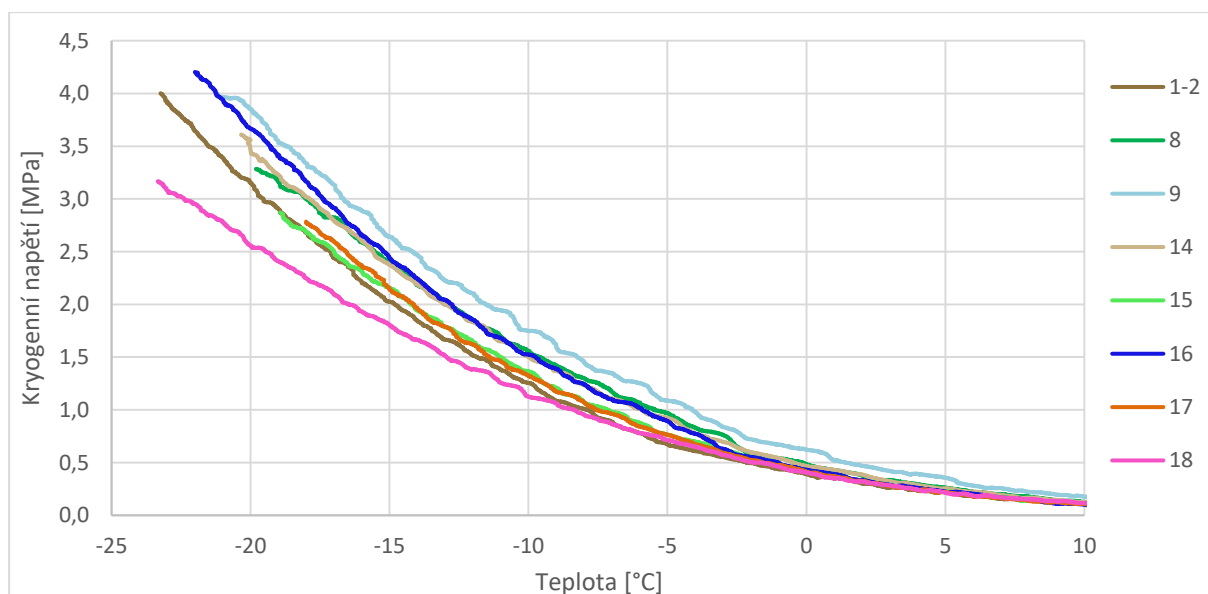
Graf 52: Závislost kryogenního napětí na teplotě tělesa v průběhu hodnocení nízkoteplotních vlastností směsí s 50 % SMA R-materiálu

V Grafu 53 jsou vyneseny všechny varianty obsahující pojivo PmB jako základ. Průběh závislosti napětí na teplotě je na obě strany od referenční směsi. Průměrné maximální kryogenní napětí těchto variant je $(3,8 \pm 0,1)$ MPa a teplota při porušení $(-23,4 \pm 0,5)$ °C.

V Grafu 54 jsou vyneseny všechny varianty obsahující pojivo 50/70 jako základ s přísadou Storelastic, která měla zajistit modifikaci směsi. Varianty jsou porovnány s referenční směsí. Když pomíneme variantu 18, tak všechny směsi mají vyšší průběh kryogenního napětí v celém průběhu zkoušky oproti referenční směsi, tedy hůře relaxují. Průměrné maximální kryogenní napětí těchto variant je $(3,5 \pm 0,2)$ MPa a teplota při porušení $(-20,4 \pm 0,5)$ °C.



Graf 53: Závislost kryogenního napětí na teplotě tělesa v průběhu hodnocení nízkoteplotních vlastností všech variant s polymerem modifikovaným pojivem



Graf 54: Závislost kryogenního napětí na teplotě tělesa v průběhu hodnocení nízkoteplotních vlastností všech variant se silničním pojivem modifikovaným pryžovým granulátem (přísadou Storelastic) a referenční směsí

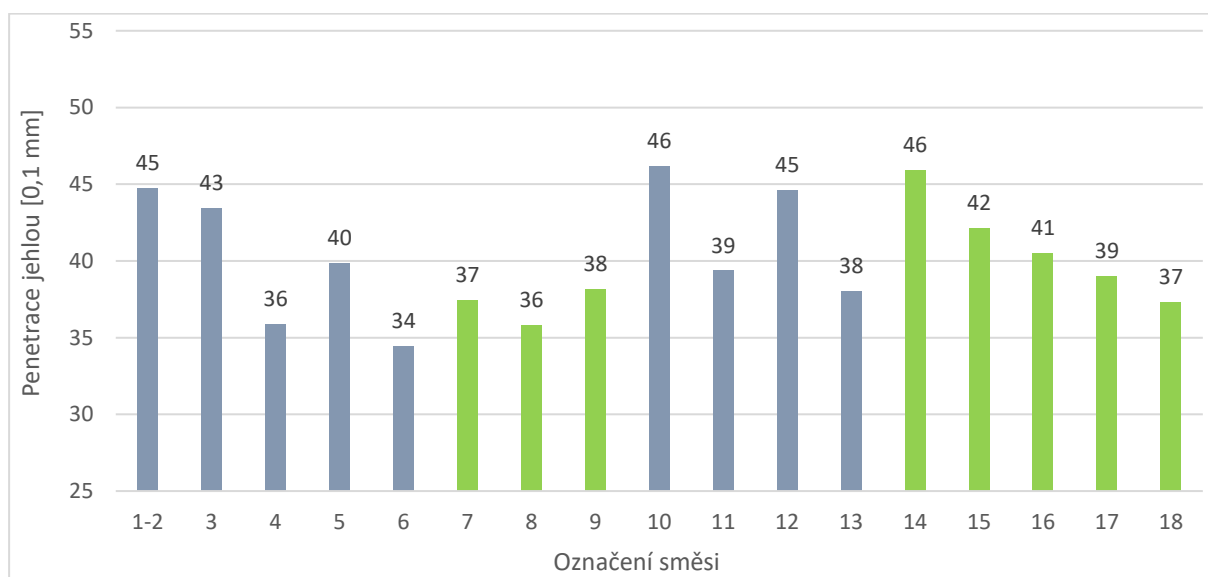
10.2. Výsledné vlastnosti asfaltových pojiv

Ze všech variant směsi typu SMA 11S položených v rámci zkušebního úseku byla znovuzískána pojiva, aby byla podrobena empirickým zkouškám penetraci dle ČSN EN 1426 [50] a bodu měknutí dle ČSN EN 1427 [51]. Dále také funkčním měřením pomocí dynamického smykového reometru, a to dynamická viskozita podle ČSN EN 13702 [48], zkouška MSCR dle ČSN EN 16659 [54] a komplexní modul ve smyku a fázového úhlu dle ČSN EN 14770 [52]. Pomocí trámečkového reometru byl stanoven modul tuhosti za ohybu podle ČSN EN 14771 [53] vyjadřující odolnost pojiva vůči nízkým teplotám.

V případě naměřených parametrů znovuzískaných pojiv ze směsí obsahující silniční pojivo modifikované pryžovým granulátem je potřeba upozornit na fakt, že pryž v průběhu extrakce zůstala na sítích.

10.2.1. Stanovení penetrace jehlou podle ČSN EN 1426

V Grafu 55 jsou zobrazeny výsledky zkoušky penetrace jehlou pro jednotlivá asfaltová pojiva, která byla znovuzískána z variant asfaltové směsi typu SMA 11S. Z výsledků je patrný velký rozdíl mezi hodnotami penetrace jehlou, který se pohybuje v rozmezí 34 až 46 [0,1 mm].



Graf 55: Hodnoty penetrace jehlou znovuzískaných asfaltových pojiv

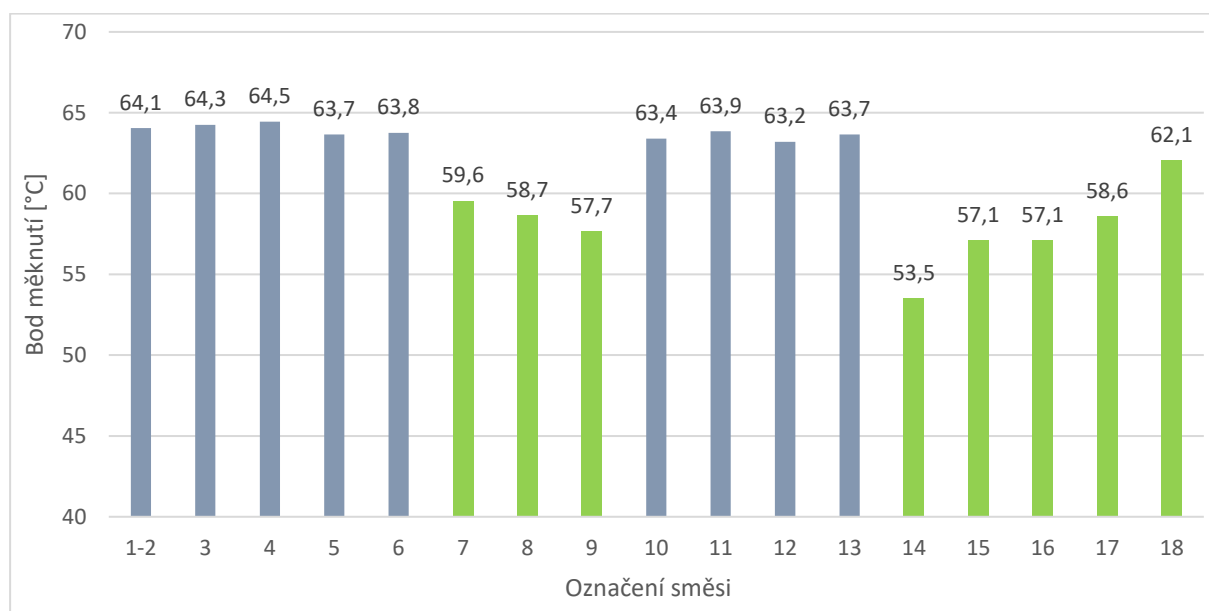
Výsledky hodnot penetrace lze opět rozdělit na dvě části. Šedě vyznačené směsi obsahující polymerem modifikované pojivo s označením PmB 45/80-65, kde můžeme pozorovat, že směsi bez přidaného R materiálu (označené 1-2 a 10), s 30 % R-materiálu z SMA (označené 5 a 12) dosahují nejvyšších hodnot, tedy pojivo 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. Podobný trend by se dal očekávat u měření modulů tuhostí na směsích, ale jak bylo zmíněno, s těmito výsledky lépe koreluje parametr komplexního smykového modulu při teplotě viskoelastického přechodu měřený pomocí DSR.

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 znovuzískané pojivo hodnota penetrace v rozmezí 30 – 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 1-6 a 10-13 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.

10.2.2. Stanovení bodu měknutí metodou kroužek a kulička podle ČSN EN 1427

V Grafu 56 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.



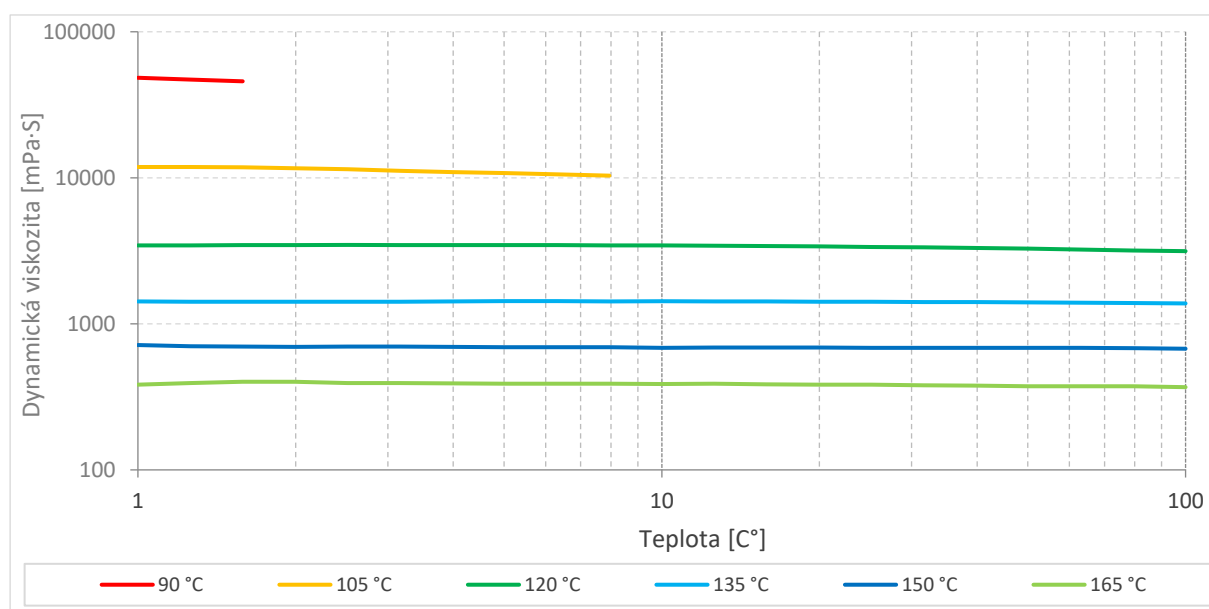
Graf 56: Hodnoty bodu měknutí pro znovuzískaná asfaltová pojiva

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 mělo 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.

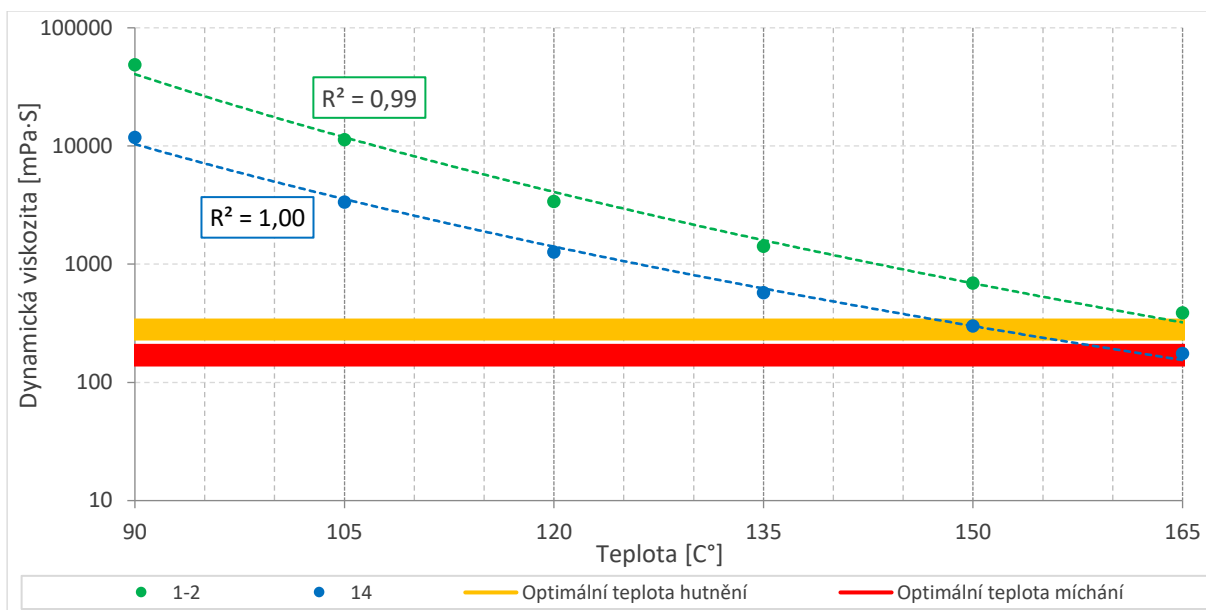
10.2.3. Stanovení dynamické viskozity podle ČSN EN 13702

Jednotlivé znovuzískané asfalty byly dále hodnoceny pomocí dynamické viskozity, která byla měřena přístrojem DSR geometrií kužel-deska při teplotě 90 až 165 °C s teplotním krokem 15 °C a při smykové rychlosti 1 s⁻¹ až 100 s⁻¹. Při počátečních teplotách měření (90 a 105 °C) byl sledován pokles dynamické viskozity s rostoucí smykovou rychlostí. Pokud hodnota dynamické viskozity klesla pod 95 % své původní hodnoty, bylo měření ukončeno a následovalo temperování na vyšší teplotu. Bod změny dynamické viskozity v závislosti na smykové rychlosti lze přisoudit oblasti, ve které se již pojivo nechová jako newtonovská látka. Příklad měření u pojiva získaného ze směsi 1-2 je uveden v Grafu 57.



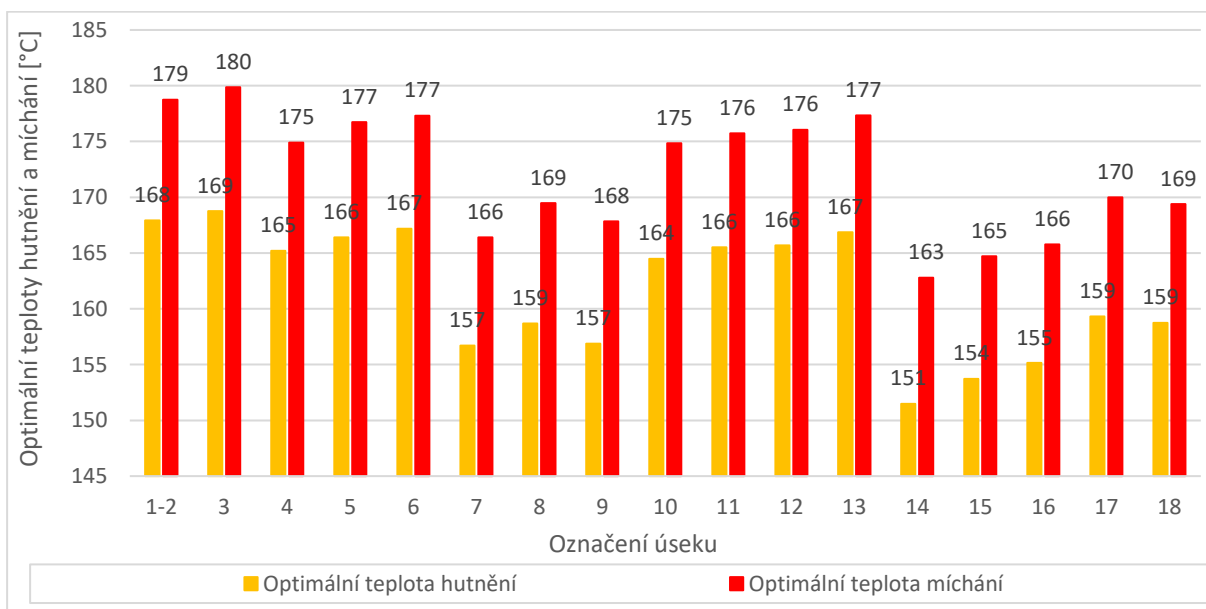
Graf 57: Hodnoty dynamické viskozity v závislosti na smykové rychlosti u znovuzískaného pojiva ze směsi 1-2

V Grafu 58 je pro přehlednost uvedena závislost dynamické viskozity na teplotě u dvou výrazně odlišných znovuzískaných pojiv (směs 1-2 a 14). Z výsledků vyplývá, že dynamická viskozita asfaltových pojiv je silně závislá na teplotě a lze ji popsat pomocí mocninné funkce. Hodnota dynamické viskozity je důležitá veličina pro popis pracovních teplot. Podle americké specifikace ASTM D 2493 [6] je optimální hodnota dynamické viskozity pro míchání asfaltové směsi (0,17 ± 0,02) Pa·s a pro hutnění (0,28 ± 0,03) Pa·s. Obě oblasti jsou uvedeny v Grafu 58. Se snižující se viskozitou je možné vyrábět a hutnit asfaltovou směs při nižší teplotě, což přináší ekonomické i environmentální úspory. [6, 87, 135]



Graf 58: Hodnoty dynamické viskozity v závislosti na teplotě u vybraných znovuzískaných pojiv

V Grafu 59 jsou uvedeny optimální teploty míchání a hutnění pro jednotlivá znovuzískaná pojiva. Z výsledků vyplývají poměrně výrazné rozdíly mezi jednotlivými pojivy, která dosahují optimální teplotu hutnění v rozmezí 151 až 169 °C a optimální teplotu míchání v rozmezí 163 až 180 °C. Výrazně vyšších hodnot optimální teploty míchání a hutnění dosahují polymerem modifikovaná pojiva, což souvisí s přítomností polymeru, který zvyšuje tuhost pojiva. Tomu odpovídá i vyšší odolnost vůči trvalým deformacím při teplotách okolo 60 °C.



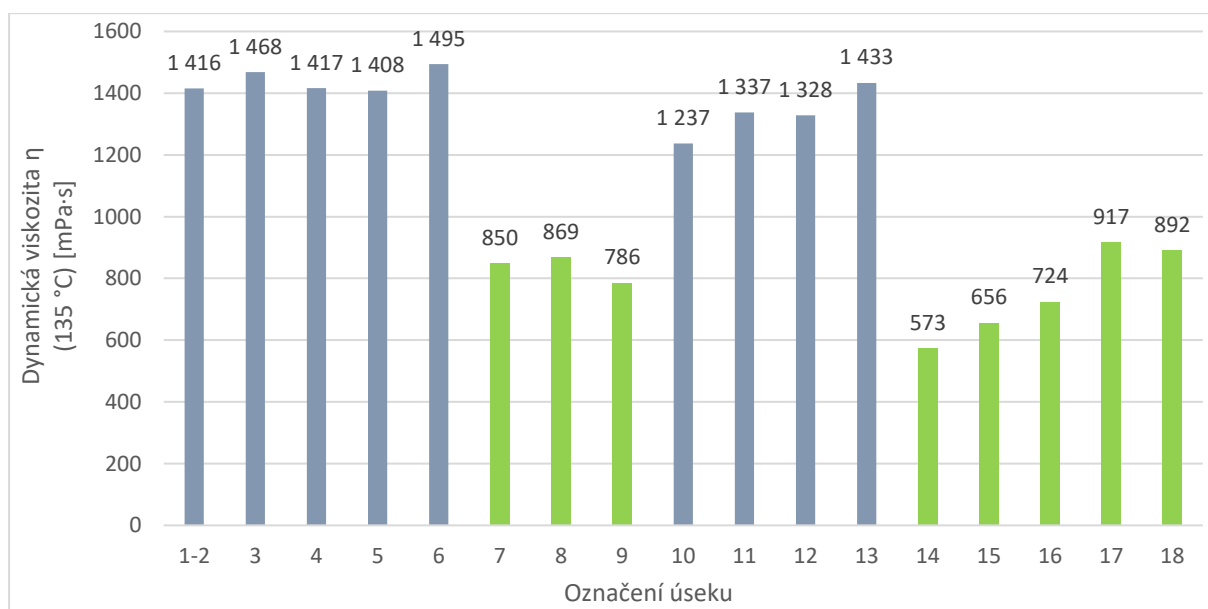
Graf 59: Optimální teplota míchání a hutnění jednotlivých znovuzískaných pojiv

V Grafu 60 jsou uvedeny hodnoty dynamické viskozity při teplotě 135 °C a smykové rychlosti 1,0 s⁻¹. Dynamická viskozita se při této teplotě hodnotí z důvodu zpracovatelnosti asfaltové směsi na obalovně. U pojiv před vlastní výrobou je dle požadavků AASHTO MP 1 [1] maximální hodnota dynamické viskozity 3 Pa·s právě při teplotě 135 °C a smykové rychlosti

1,0 s⁻¹. Přestože je požadavek kladen na pojiva před výrobou asfaltové směsi, vyhovují tomuto požadavku veškerá asfaltová pojiva i po výrobě, kdy dynamická viskozita vlivem stárnutí asfaltového pojiva stoupá.

Z Grafu 60 jsou patrné výrazné rozdíly mezi variantami s PmB a silničním asfaltem. U znovuzískaných pojiv ze směsí s PmB byla zjištěna přibližně 1,8krát vyšší hodnota dynamické viskozity než u směsí se silničním pojivem a zároveň hodnoty PmB pojiv (varianty 1-2, 3, 4, 5, 6, 10, 11, 12 a 13) jsou obdobné, v rozpětí 1 237 mPa·s až 1 495 mPa·s. Například u varianty s 50 % R-mat ze směsi typu SMA (směs 6) je dynamické viskozity pouze o 5,5 % vyšší než u směsi bez R-materiálu (směs 1-2).

U směsí 14-16 s obsahem silničního asfaltu jsou zřetelné rozdíly s rostoucím obsahem R-materiálu, kdy roste i hodnota dynamické viskozity. Varianty 17 a 18 obsahující R-mat ze směsi typu SMA dosahují ještě vyšších hodnot dynamické viskozity oproti variantám s nativním pojivem 50/70 a běžným R-materiálem.



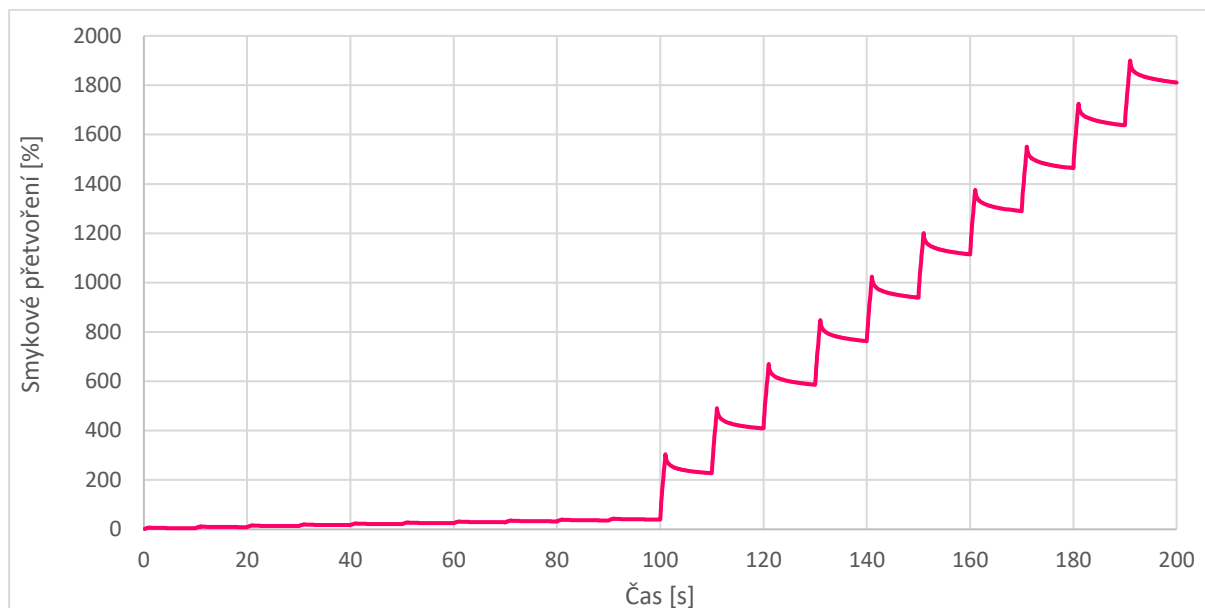
Graf 60: Hodnoty dynamické viskozity jednotlivých znovuzískaných pojiv při teplotě 135 °C

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

Jednotlivé znovuzískané asfalty byly také hodnoceny pomocí MSCR testu, který je popsán v kapitole 6.2.6. Zkušební teploty byly převzaty z výrobové normy ČSN EN 13108-5 [45] pro směsi typu asfaltový koberec mastixový, kde jsou v národní příloze specifikovány požadavky na maximální poměrnou hloubku koleje a její přírůstek při teplotě zkoušení 50 °C. Mělo by dojít k úpravě stávajícího požadavku a to zvýšením zkušební teploty na 60 °C z důvodu vyšší vypovídající hodnoty s reálnou situací na vozovce. Měření tedy bylo provedeno při 50, 60 a zároveň 70 °C, aby byly více patrné rozdíly mezi výsledky naměřenými na jednotlivých znovuzískaných pojiv.

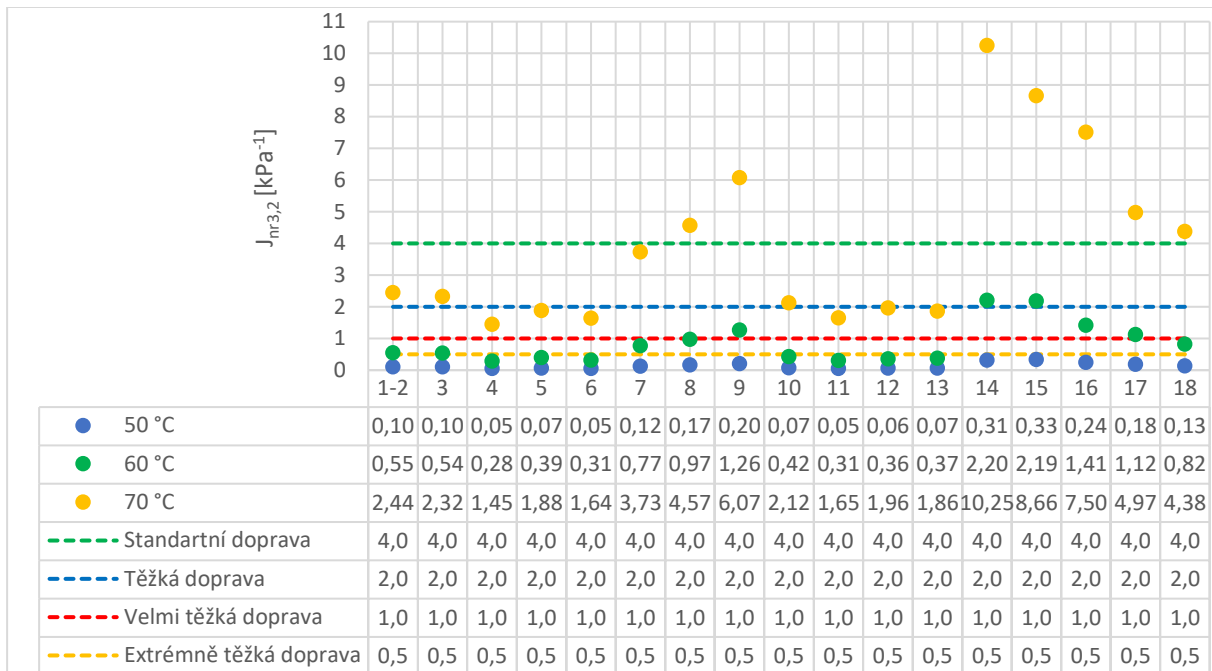
V Grafu 61 je zobrazen příklad průběhu zkoušky, měřený vzorek je ze směsi 1-2 při zkušební teplotě 60 °C. Je patrné, že při prvních deseti zatěžovacích cyklech bylo smykové

přetvoření výrazně nižší (0,1 kPa) než v druhé části, kde bylo aplikováno smykové napětí v hodnotě 3,2 kPa.



Graf 61: Průběh zkoušky MSCR pro znovuzískané pojivo ze směsi 1-2 při teplotě 60 °C

Pro hodnocení zkoušky MSCR se používá nevratná smyková poddajnost $J_{nr3,2}$, kdy její nižší hodnota znamená vyšší odolnost vůči trvalým deformacím. V Grafu 62 jsou zobrazeny hodnoty $J_{nr3,2}$ pro jednotlivé znovuzískané asfalty s ohledem na teplotu. 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) [70]. Hranice pro jednotlivé úrovně dopravního zatížení dle americké návrhové metody SHRP jsou také uvedeny v Grafu 62. 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. [2, 17, 62]



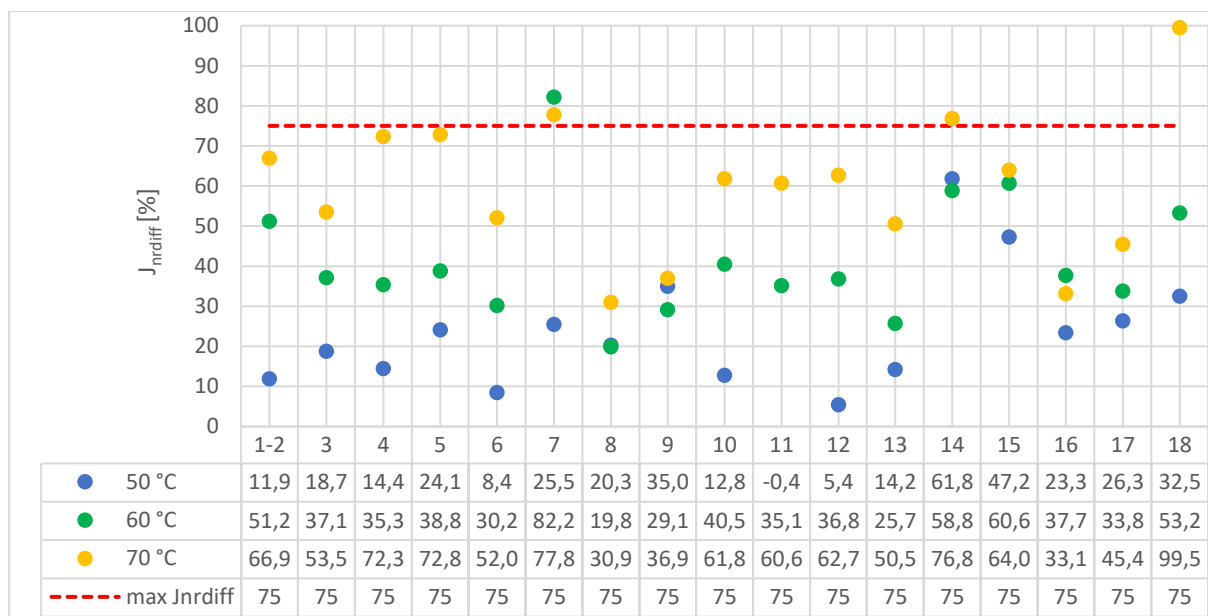
Graf 62: Velikost nevratné smykové poddajnosti $J_{nr3,2}$ jednotlivých znovuzískaných pojiv

Z výsledků vyplývá výrazný rozdíl mezi variantami s PmB a silničním asfaltem 50/70. Zejména při teplotě 70 °C je nevratná smyková poddajnost u směsí 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, kterou lze charakterizovat v České republice třídou dopravního zatížení S a I při rychlosti vozidel menší než 20 km/h. Tyto extrémními případy nejsou v ČR běžné, ale lze se s nimi setkat na velmi exponovaných úsecích tam, kde doprava často zastavuje. [17]

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.

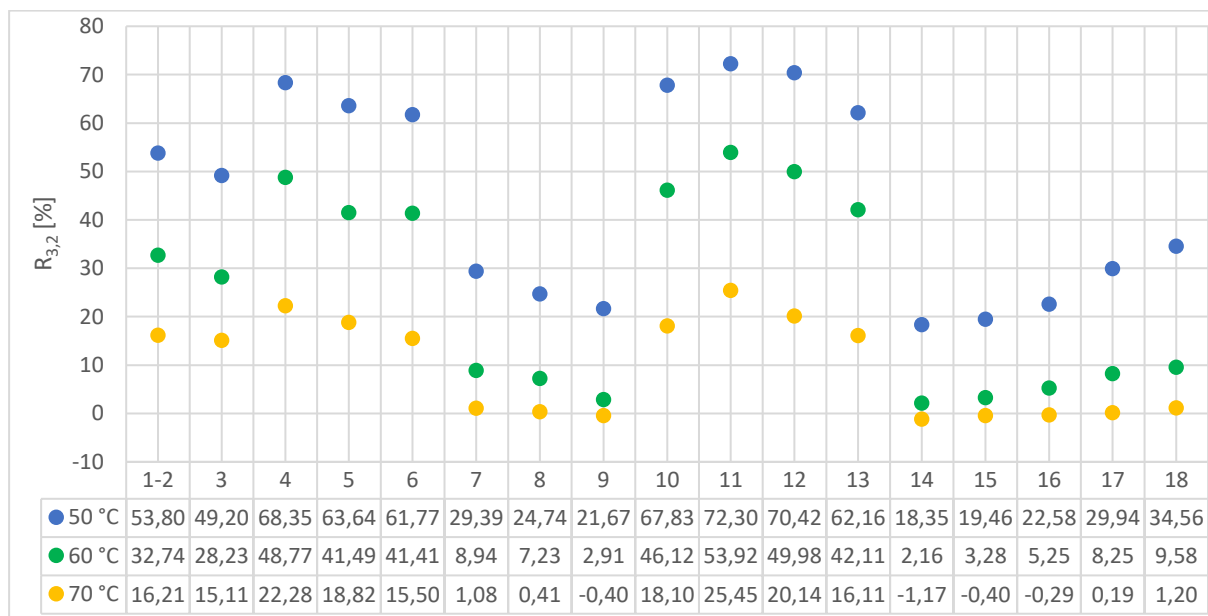
Dále je možné hodnotit procentuální rozdíl ve smykové poddajnosti $J_{nr diff}$ [54]. Dle požadavků SHRP je nejvyšší dovolená hodnota 75 % [17]. Z Grafu 63 vyplývá, že se zvyšující se teplotou u většiny znovuzískaných pojiv hodnota procentuálního rozdílu nevratné smykové poddajnosti stoupá. Této hodnotě nevyhověla znovuzískaná pojiva z variant 7, 14 a 18 mající jako nově přidané silniční asfalt 50/70 při teplotě 70 °C. Při zkušební teplotě 60 °C nevyhověla pouze varianta směsi 7.



Graf 63: Velikost procentuálního rozdílu ve smykové poddajnosti

Graf 64 zobrazuje průměrné elastické zotavení $R_{3,2}$ u znovuzískaných asfaltových pojiv v závislosti na zkušební teplotě. S rostoucí hodnotou průměrného elastického zotavení roste odolnost vůči vzniku trvalých deformací. Z toho vyplývá, že vzrůstající teplota snižuje hodnotu průměrného elastického zotavení, a tudíž se snižuje odolnost vůči vzniku trvalých deformací.

V Grafu 64 jsou dobře patrné rozdíly mezi variantami s PmB a silničním asfaltem. Přídavek R-mat z SMA do směsi se silničním asfaltem (směs 17 a 18) má pozitivní vliv na hodnotu průměrného elastického zotavení. Rozdíl u směsí 8, 9 a 15, 16 je zanedbatelný.



Graf 64: Velikost průměrného elastického zotavení jednotlivých asfaltových pojiv

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

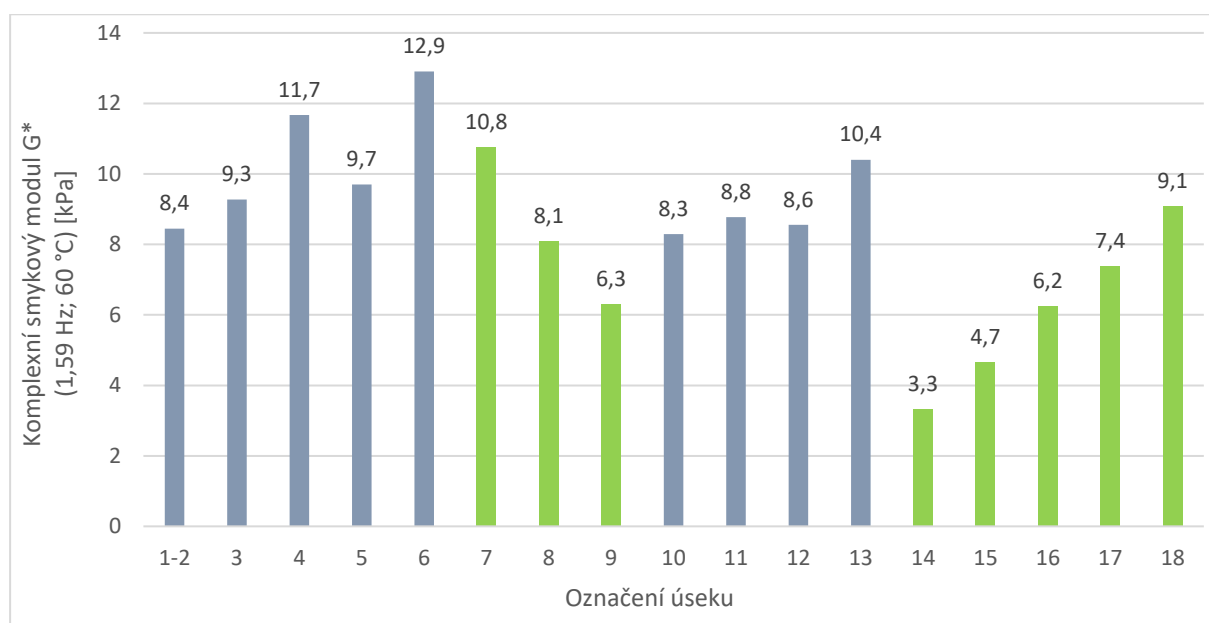
Mezi zkoušky provedené pomocí DSR patří měření komplexního modulu ve smyku G^* a fázového úhlu δ dle ČSN EN 14770 [52].

Obvykle se hodnocení komplexního smykového modulu provádí při teplotě 60 °C a frekvenci zatěžování 1,59 Hz (10 rad/s). Tyto hodnoty komplexního smykového modulu jsou znázorněny v Grafu 65.

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-mat, 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-mat (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.



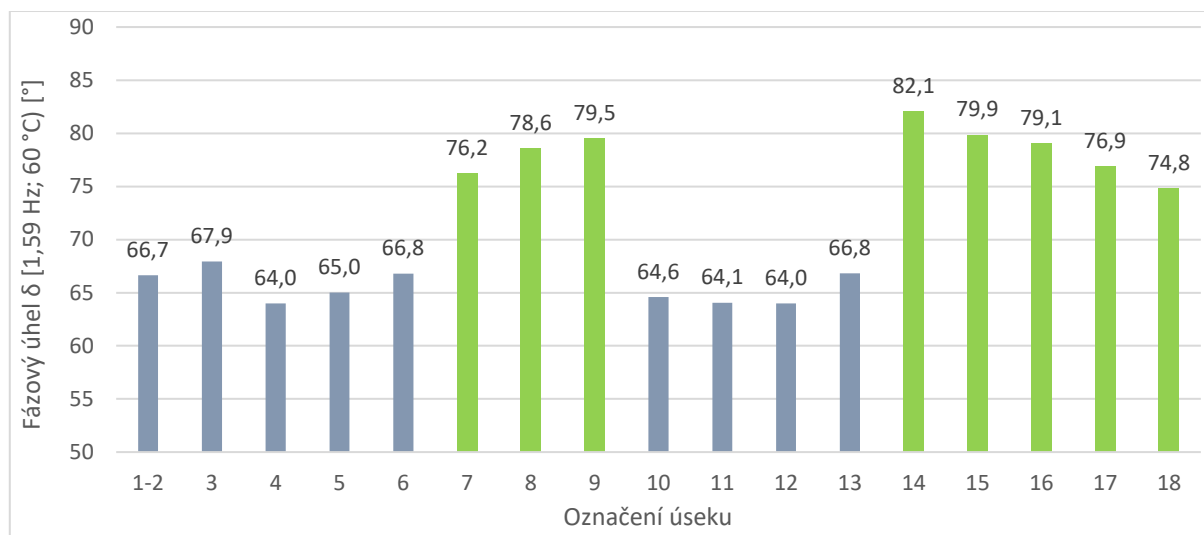
Graf 65: Velikost komplexního smykového modulu při 60 °C a frekvenci zatěžování 1,59 Hz

Při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz byla zároveň hodnocena i velikost fázového úhlu, která popisuje elasticitu pojiva. Z Grafu 66 vyplývá, že znovuzískané pojivo 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-mat.

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-mat z SMA modifikuje výslednou směs, která se nachází přibližně uprostřed mezi směsí SMA (pouze se silničním asfaltem) a směsí SMA (s PmB pojivem).

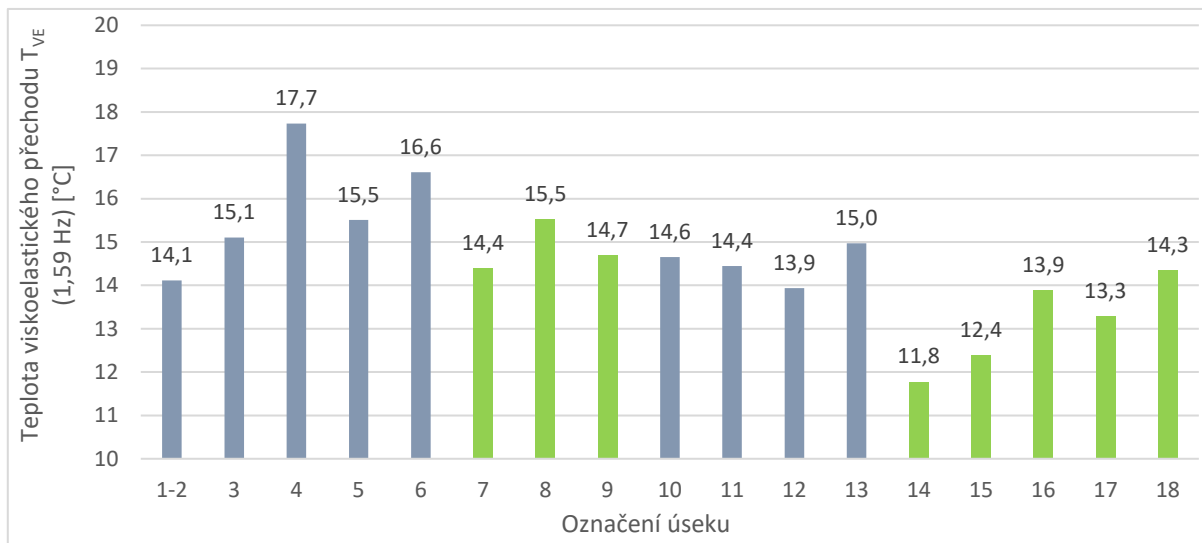
Směsi 7, 8 a 9 mají velmi podobný fázový úhel. Pojiva ze směsí 14 až 18 vykazují klesající hodnoty fázového úhlu, což je způsobeno nižší hodnotou fázového úhlu u přidávaného R-materiálu. Všeobecně lze totiž říct, že R-materiál má nižší hodnotu fázového úhlu, což způsobuje zejména oxidativní stárnutí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



Graf 66: Velikost fázového úhlu při 60 °C a frekvenci zatěžování 1,59 Hz

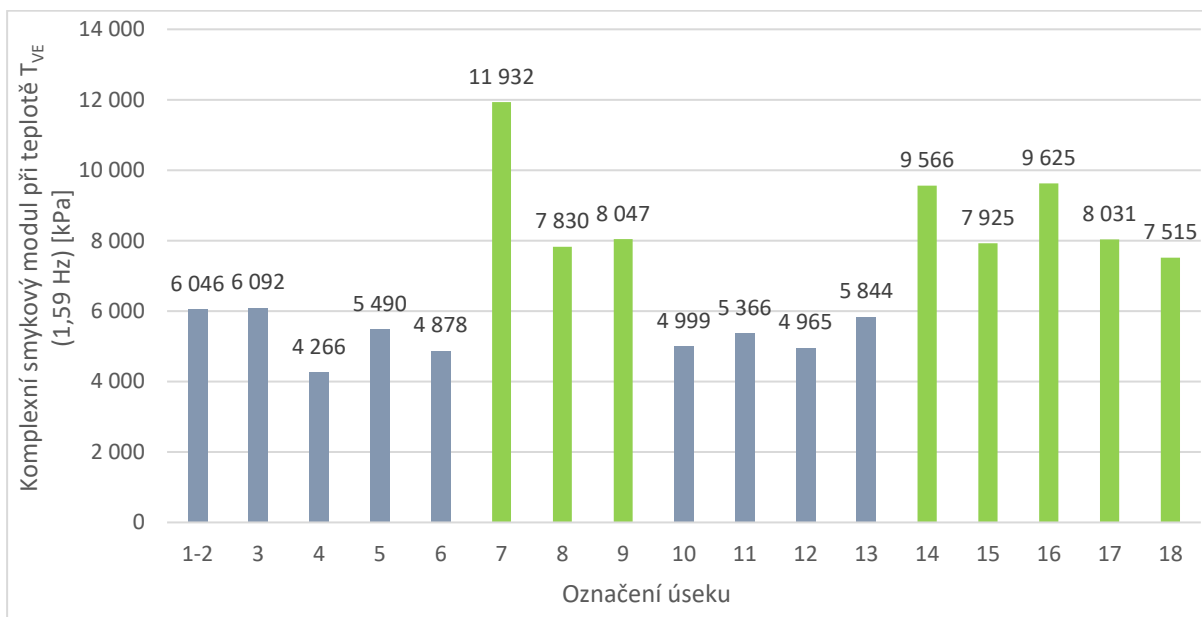
Dále byla hodnocena teplota viskoelastického přechodu, která udává teplotu, při které je hodnota fázového úhlu rovna 45 ° (Graf 67). Pokud se zaměříme na směsi s pojivem PmB (směs 1-2, 3, 4, 5 a 6), je patrné, že zvyšující se množství R-mat způsobuje nárůst viskoelastické teploty. Zároveň je patrné, 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).



Graf 67: Teplota viskoelastického přechodu při frekvenci zatěžování 1,59 Hz

Dále se při teplotě viskoelastického přechodu hodnotí velikost komplexního smykového modulu. Z Grafu 68 vyplývá, že směsi s pojivem 50/70 mají výrazně vyšší hodnotu komplexního smykového modulu. Naopak směsi s PmB jsou srovnatelné v rozmezí 4266 kPa až 6092 kPa.

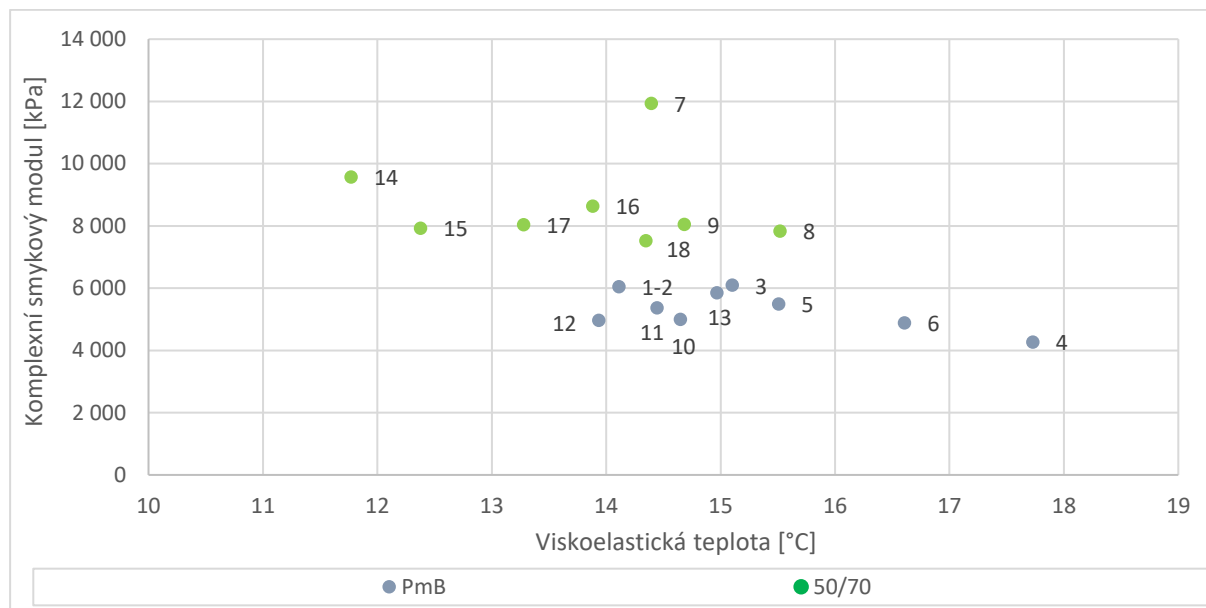


Graf 68: Hodnota komplexního smykového modulu při teplotě viskoelastického přechodu

Pomocí viskoelastické teploty a tomu odpovídající hodnotě komplexního smykového modulu lze charakterizovat chování pojiva za středních teplot (tzv. Cross-over parametr). Teplota viskoelastického přechodu indikuje tvrdost/měkkost pojiva a tomu odpovídající komplexní smykový modul popisuje teplotní citlivost.

Prostřednictvím cross-over analýzy (Graf 69) je možné konstatovat, že směsi s PmB mají při obdobné teplotě viskoelastického přechodu nižší hodnotu komplexního smykového

modulu. Vyšší tuhost a pružnost je pozitivní výhodou při hodnocení odolnosti vůči trvalým deformacím.



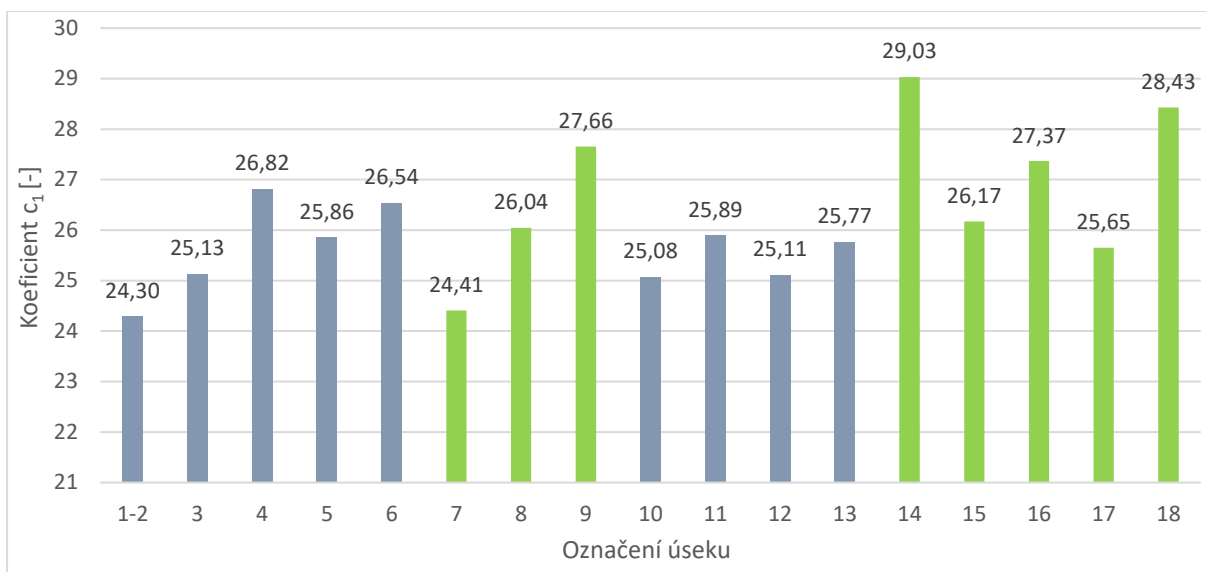
Graf 69: Cross-over parametr

Jelikož samotné měření probíhalo v teplotním spektru 10 °C až 70 °C a ve frekvenčním rozsahu 0,1 Hz až 10 Hz, bylo možné pomocí superpozice sestojit například hlavní křivky komplexních smykových modulů, pomocí kterých je možné charakterizovat chování pojiva mimo zkušební frekvenční rozsah. Pro popis hlavních křivek byl vybrán WLF model. [17] Jako referenční byla vybrána teplota 50 °C.

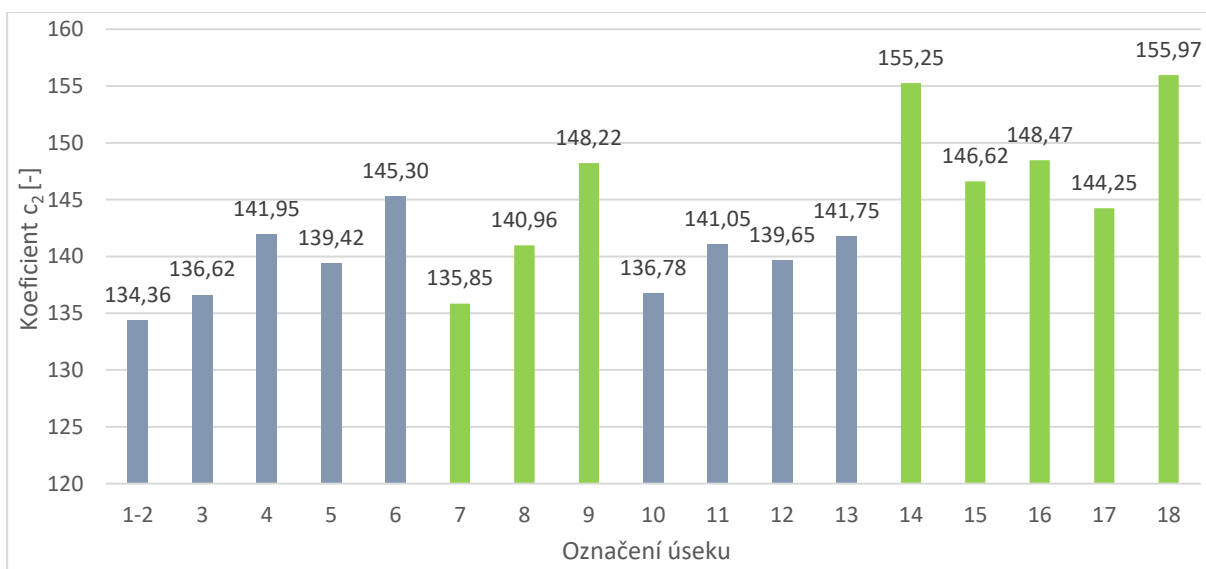
V Grafech 70 a 71 jsou uvedeny hodnoty materiálových koeficientů c_1 a c_2 . Z výsledků vyplývá, že u směsí s PmB pojivem (1-2, 3, 4, 5 a 6) rostou koeficienty s množstvím R-mat. Při srovnání směsí 4 a 5, které se liší původem R-materiálu, bylo zjištěno, že nižší hodnota koeficientů je u znovuzískaného pojiva ze směsi 5, která obsahuje R-mat z SMA.

U směsí 10, 11, 12 a 13, které obsahují celulózoová vlákna s oživovací přísadou, byla zjištěna obdobná nebo mírně nižší hodnota koeficientů než u znovuzískaných pojiv ze směsí 1-2, 3, 4, 5 a 6.

Zajímavě vyšly výsledky u znovuzískaných pojiv ze směsí 7, 8 a 9, u kterých se hodnota koeficientů zvyšovala s rostoucím množstvím R-mat, přestože při vyhodnocení jiných zkoušek byly výsledky většinou opačné. U znovuzískaných pojiv ze směsí 14 až 18 lze obdobně jako u směsí 1-2 až 6 pozorovat nárůst koeficientů s vyšším přidavkem R-mat. Výjimku tvoří znovuzískané pojivo ze směsi 14, jejíž výsledky jsou nestandardní. Při porovnání směsí 8 a 15 a směsí 9 a 16, které mají stejný obsah a druh R-materiálu a nativní pojivo, bylo v podstatě dosaženo stejných výsledků.



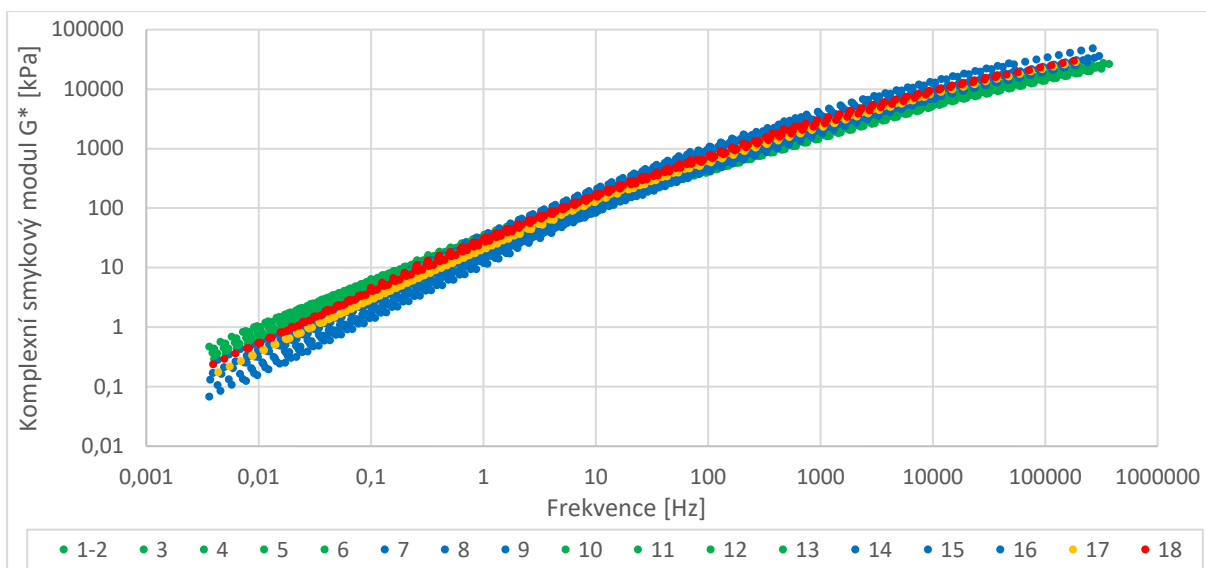
Graf 70: Hodnoty materiálového součinitele C_1



Graf 71: Hodnoty materiálového součinitele C_2

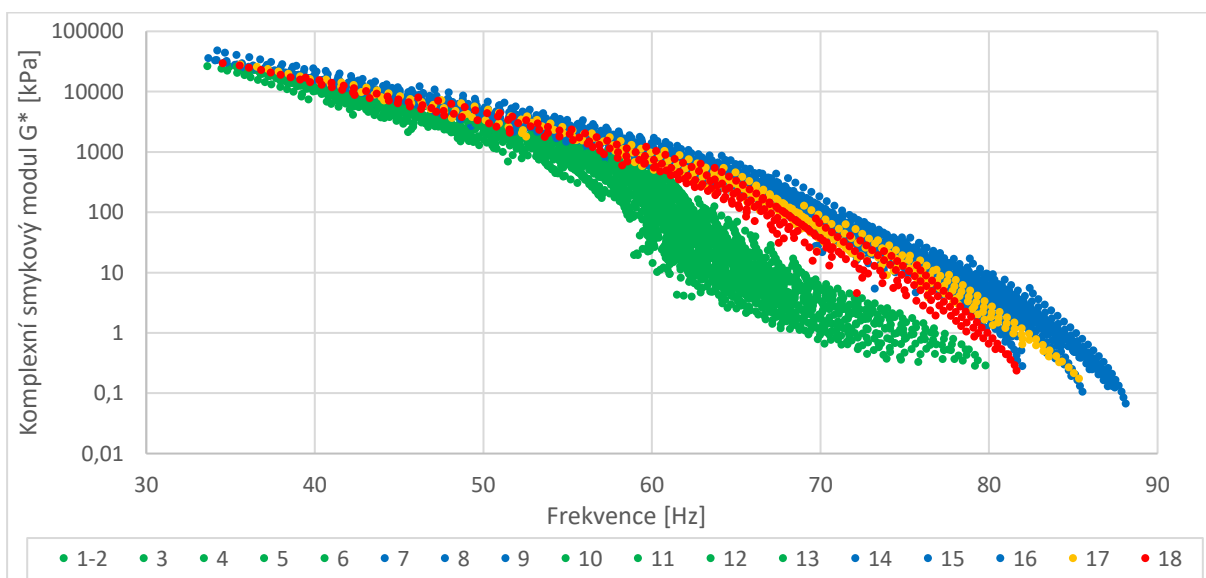
Po sestrojení hlavních křivek jednotlivých znovuzískaných pojiv pomocí WLF modelu (Graf 72) bylo možné pozorovat zejména výrazné rozdíly mezi směsmi s PmB pojivem a silničním asfaltem 50/70. Pojiva s obsahem PmB vykazují nižší sklon křivky, což představuje jejich nižší teplotní citlivost, která je výhodná z hlediska vzniku trvalých deformací při vysokých teplotách a také z hlediska rizika vzniku křehké trhliny při nízkých teplotách.

Zároveň jsou záměrně vyznačeny směsi 17 a 18, které obsahují R-mat ze směsi SMA. Z výsledků vyplývá, že zvyšující se množství R-mat z SMA způsobuje přiblížení hlavních křivek ke směsím s obsahem PmB. Lze tedy říct, že přidávání R-mat z SMA je výhodné, jelikož výsledná směs je částečně modifikovaná z R-mat.



Graf 72: Hlavní křivky komplexních smykových modulů a fázových úhlů při teplotě 50 °C

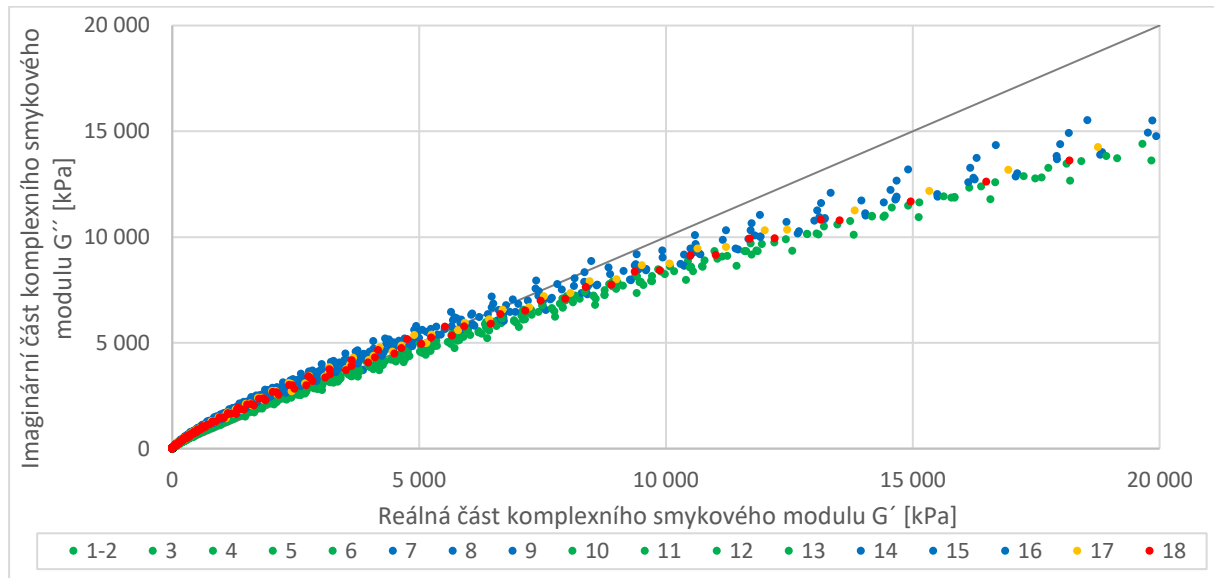
V Grafu 73 je znázorněn Blackův diagram, který udává závislost mezi komplexním smykovým modulem a fázovým úhlem. Tento diagram lze označit jako „otisk prstu“ každého pojiva. Pomocí Blackova diagramu lze dobře rozlišit znovuzískaná pojiva s PmB a silničním asfaltem 50/70. Pojiva s PmB vykazují charakteristické zakřivení, které je způsobeno oblastí fungování polymerů v pojivu, které se i při vyšších teplotách (nižším komplexním smykovém modulu) chová více elasticky než běžné silniční asfalty. Při pohledu na směsi 17 a 18, které obsahují R-mat 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 73: Blackův diagram

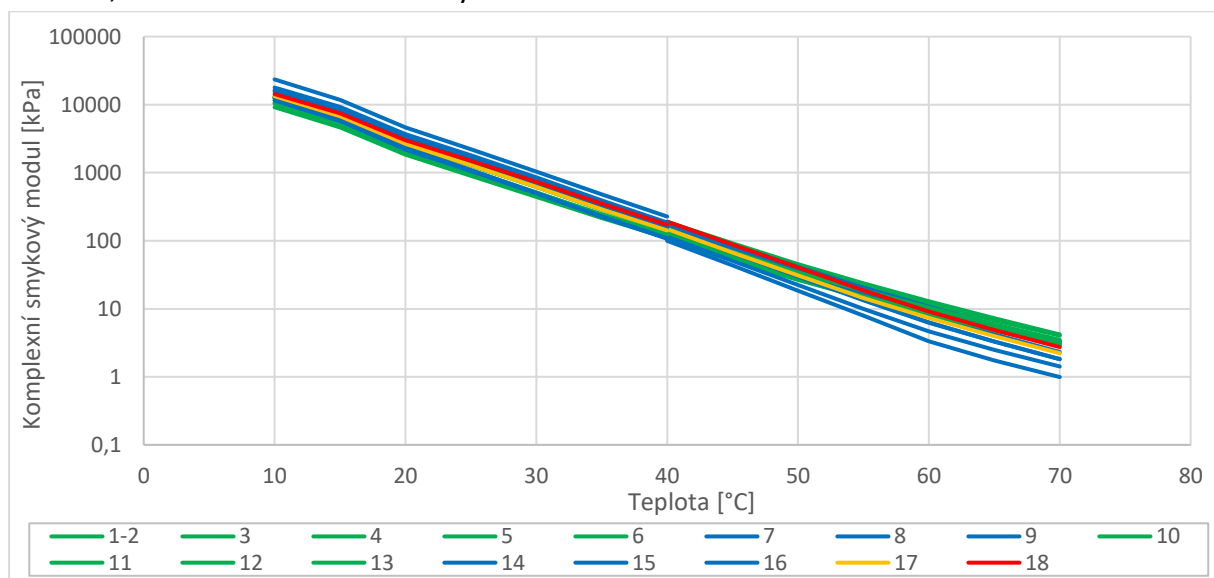
V Grafu 74 je znázorněn Cole-cole diagram, jenž popisuje závislost imaginární G'' a reálné G' části komplexního smykového modulu. Z výsledků vyplývá, že v oblasti nižších hodnot komplexních smykových modulů (při vyšších teplotách) převládá imaginární (viskózní)

část komplexního smykového modulu. Ovšem při nárůstu komplexního smykového modulu klesá hodnota fázového úhlu a převládá reálná (pružná) část komplexního smykového modulu. Při srovnání vyplývá, že pojiva s PmB jsou více posunuta právě k reálné části komplexního smykového modulu (chovají se více pružně). Zároveň je i patrný trend znovuzískaných pojiv s obsahem R-mat z SMA, který se přibližuje právě modifikovaným asfaltům.



Graf 74: Cole-cole diagram

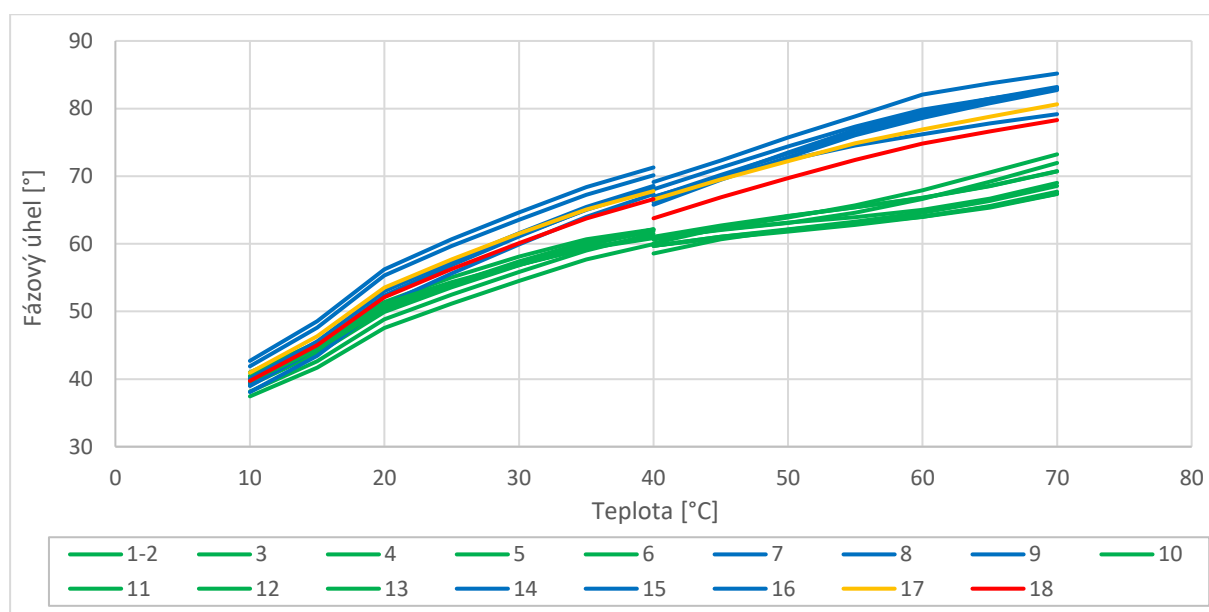
V Grafu 75 jsou zobrazeny isochrony (závislost veličiny při konstantní frekvenci) komplexních smykových modulů srovnávaných pojiv při frekvenci 1,59 Hz. Z Grafu 75 vyplývá mocnná závislost komplexního smykového modulu jednotlivých znovuzískaných pojiv na teplotě. Zároveň je zřejmá nižší hodnota směrnice u pojiv s pojivem PmB (označené zeleně v grafu) oproti variantám se silničním pojivem 50/70 (označené modře). Příklad R-mat z SMA do směsi s nemodifikovaným asfaltem způsobuje pokles směrnice křivky, a tudíž nižší teplotní citlivost, která se blíží modifikovaným asfaltům.



Graf 75: Isochrony komplexních smykových modulů srovnávaných pojiv

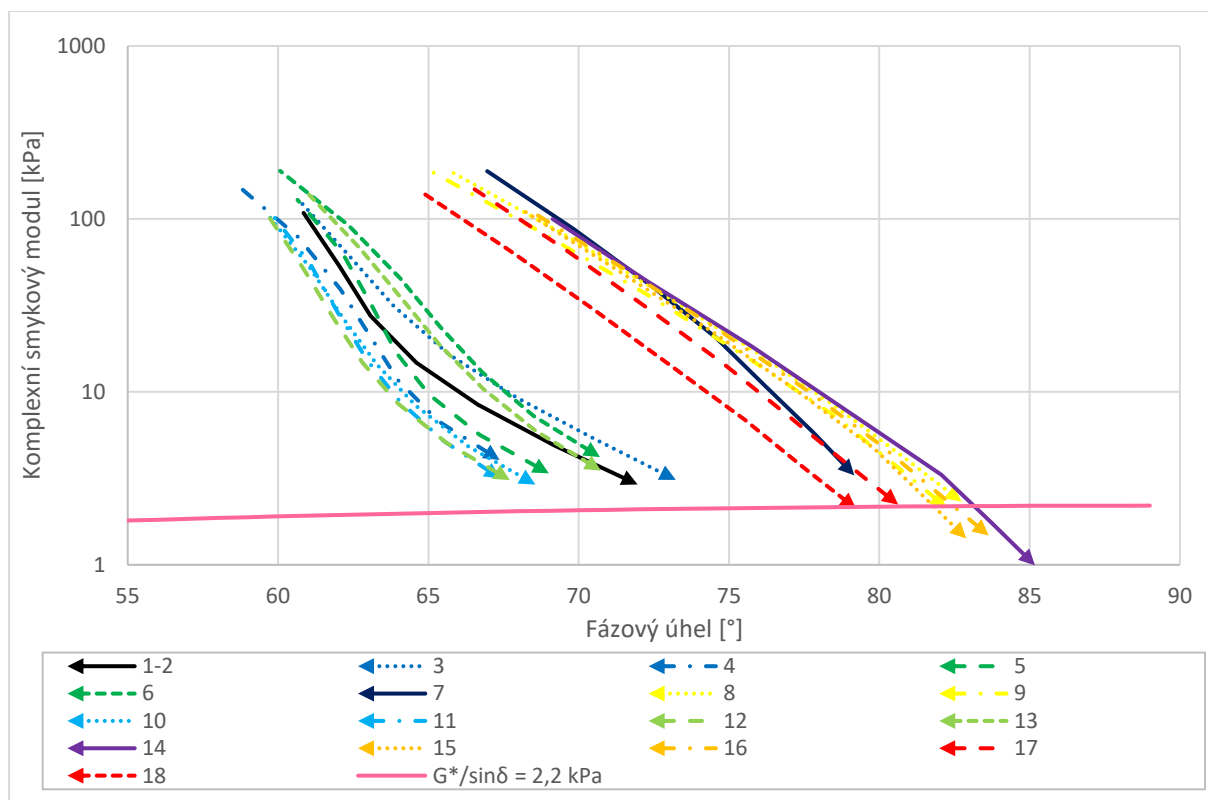
Graf 76 zobrazuje izochrony fázových úhlů při frekvenci 1,59 Hz. Je opět patrné, že teplota má výrazný vliv na hodnotu fázového úhlu. Rostoucí teplota způsobuje nárůst fázového úhlu, který je zřetelně nižší u PmB asfaltů zejména v oblasti vyšších teplot. To je výhodné zejména z hlediska potenciálního omezení vzniku trvalých deformací na vozovce. Z výsledků zároveň vyplývá, že přídavek R-mat z SMA do silničního asfaltu způsobuje mírné snížení fázového úhlu, což je způsobeno modifikovaným asfaltem, který se nachází v zestárlém pojivu.

Skok při teplotě 40 °C je způsoben výměnou geometrií v průběhu měření. Dle normy ČSN EN 14770 [52] se nesmí lišit při výměně geometrií komplexní smykový modul více než o 15 % a fázový úhel více než o 3 °. Tyto hodnoty byly splněny a lze považovat měření za vyhovující požadavkům normy.



Graf 76: Isochrony fázových úhlů srovnávaných pojiv

V Grafu 77 je znázorněna hodnota $G^* / \sin \delta$ při teplotě 40 °C až 70 °C a frekvenci 1,59 Hz, která by měla vystihovat odolnost asfaltového pojiva vůči vzniku trvalých deformací. Jako kritická hodnota se uvádí $G^* / \sin \delta = 2,2 \text{ kPa}$. [17] Pokud hodnota vyjde nižší, předpokládá se vznik trvalých deformací. V Grafu 77 je šipkou znázorněn trend poklesu parametru $G^* / \sin \delta$ s rostoucí teplotou. Zároveň je z Grafu 77 patrné rozdělení pojiv do dvou oblastí. Pojiva v levé části jsou s asfaltem PmB, který se vyznačuje vyšší elasticitou, a tudíž nižší hodnotou δ . V tomto případě může být komplexní modul nižší, a přesto pojivo vyhoví požadavku. Zde je patrné, že se pojiva vyznačují mírně konvexním tvarem, a tudíž jsou odolnější vůči trvalým deformacím i při vyšší teplotě. Zároveň nejsou patrné přesvědčivé rozdíly při přidání R-mat ze směsi typu SMA, u kterých se předpokládá modifikované pojivo. Naopak u znovuzískaných pojiv se silničním asfaltem je patrné, že nejvíce se modifikovaným pojivům blíží směs 17 a 18, jenž obsahují R-mat ze směsi typu SMA. Nejhůře dopadl znovuzískaný asfalt ze směsi 14, která neobsahuje R-mat.

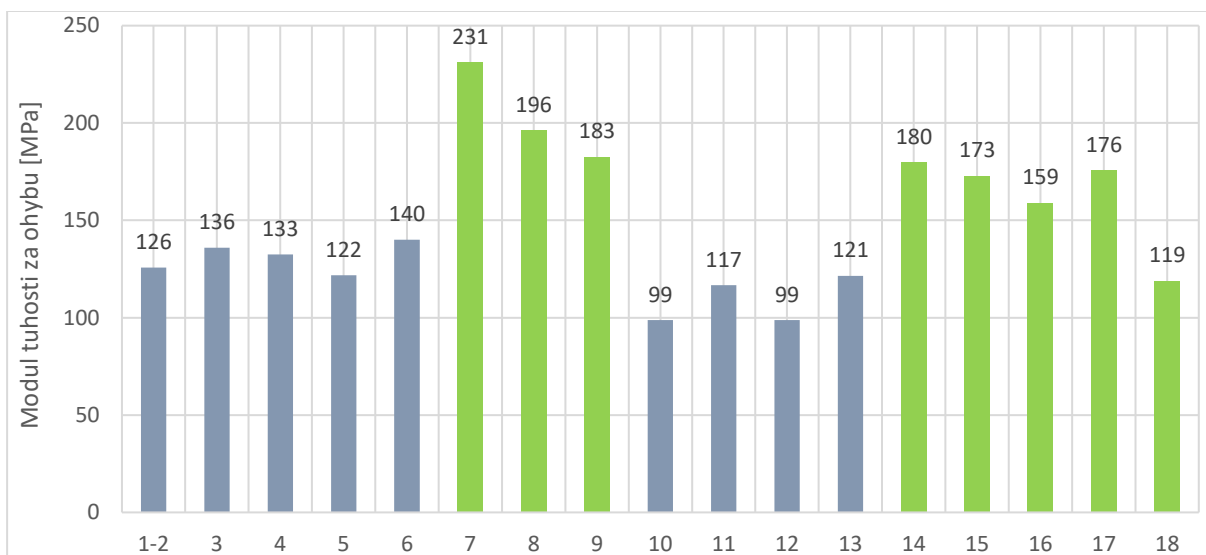


Graf 77: Odolnost vůči trvalým deformacím hodnocená parametrem $G^*/\sin\delta$

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

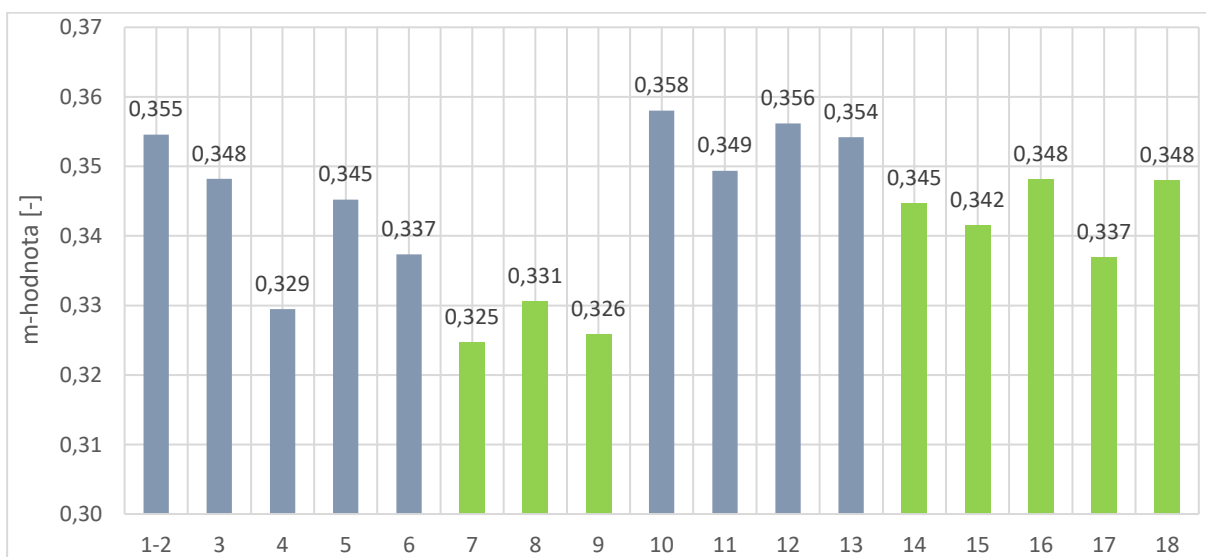
Hodnocení nízkoteplotních vlastností asfaltových pojiv bylo provedeno pomocí průhybového trámečkového reometru, kdy zkouška udává, při jaké teplotě hrozí riziko mrazové trhliny. Samotné měření probíhalo při teplotách -16 °C a -22 °C s následnou interpolací kritické teploty, který je pro modul tuhosti za ohybu při hodnotě 300 MPa a m-hodnoty při 0,3. V případě, že bylo nutné extrapolovat, bylo z důvodu zvýšení přesnosti měření provedeno i při teplotě -28 °C .

V Grafu 78 jsou uvedeny hodnoty modulu tuhosti při teplotě -16 °C u jednotlivých znovuzískaných pojiv. Lze říct, že čím je modul tuhosti za ohybu nižší, tím lze asfaltové pojivo považovat za odolnější vůči porušení za nízkých teplot. Z výsledků vyplývá, že nejvyšší hodnoty modulu tuhosti za ohybu $Sm(60)$ byly zjištěny u znovuzískaných pojiv, u kterých byl použit silniční asfalt a případně běžný R-materiál. U směsí 7, 8 a 9 s rostoucím množstvím R-materiálu klesá i hodnota $Sm(60)$. To může být způsobeno přítomností oživovací přísady. Varianty 14, 15 a 17 jsou obdobné. V případech směsí 16 a 18, kde je více R-materiálu, tedy i více oživovací přísady $Sm(60)$, také klesl. U varianty 18 to může být i způsobeno modifikací asfaltového pojiva v R-materiálu. V případě pojiv s modifikovaným primárním pojivem je modul tuhosti za ohybu při teplotě -16 °C srovnatelný.



Graf 78: Modul tuhosti za ohybu při -16 °C

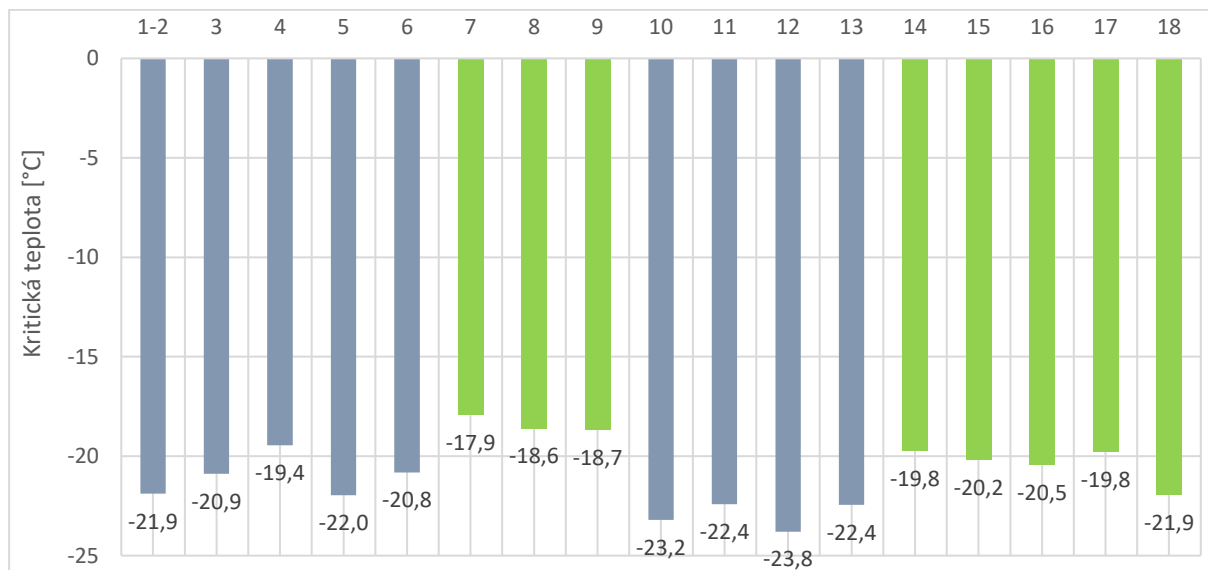
V Grafu 79 je ekvivalentně uvedena m-hodnota při teplotě -16 °C. S klesající teplotou m-hodnota klesá, což je opačný případ než u ohybové tuhosti. Za kritickou lze považovat hodnotu 0,3. Z výsledků vyplývá, že s rostoucím množstvím R-materiálu klesá m-hodnota, a tudíž se zvyšuje náchylnost k porušení. Opačným způsobem lze hodnotit směsi 15 a 16 respektive 17 a 18, u kterých m-hodnota roste se zvyšujícím se množstvím R-materiálu. Nejnižší m-hodnota byla zaznamenána u znovuzískaných pojiv ze směsí 4, 7, 8 a 9.



Graf 79: m-hodnota při -16 °C

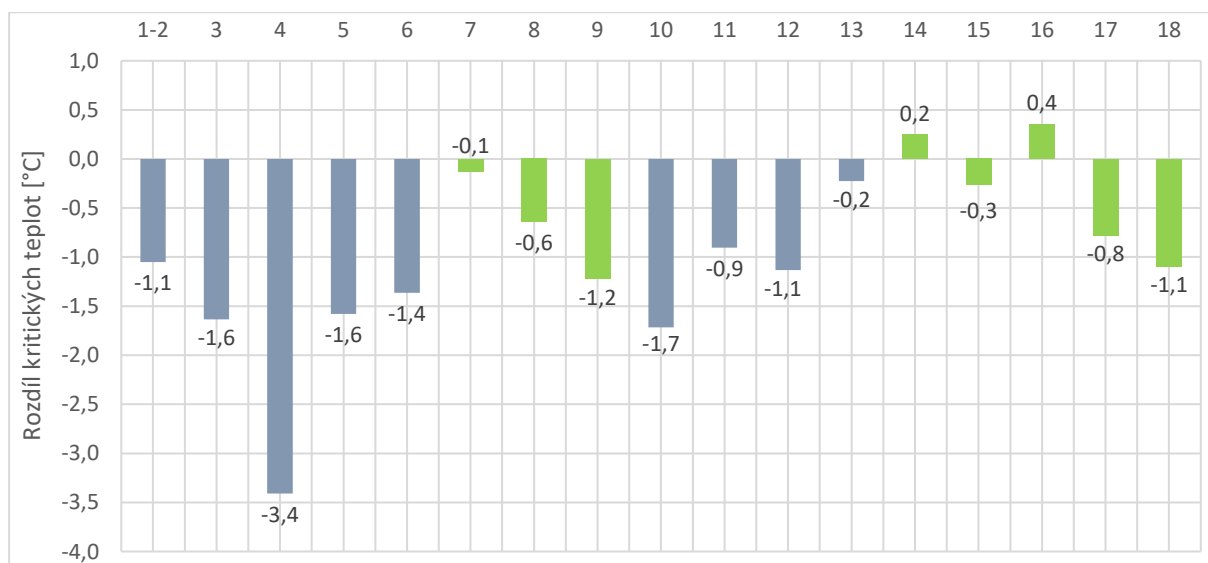
Pokud je měření prováděno při více teplotách, jako v případě disertační práce, je možné stanovit kritickou teplotu z ohybové tuhosti, kdy $S_m(60) = 300$ MPa a m-hodnota = 0,3. Méně příznivá varianta následně udává hodnotu kritické teploty (Graf 80). Z výsledků vyplývá, že u směsí s PmB přídavek R-materiálu 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 80: Kritická teplota

Dalším možným parametrem pro hodnocení výsledků ze zařízení BBR je porovnání rozdílu kritických teplot (Graf 81), 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, [3] 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 zkušební 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 81: Rozdíl kritických teplot získaných z modulu tuhosti za ohybu a m-hodnoty

10.2.7. Obor plasticity znovuzískaných pojiv

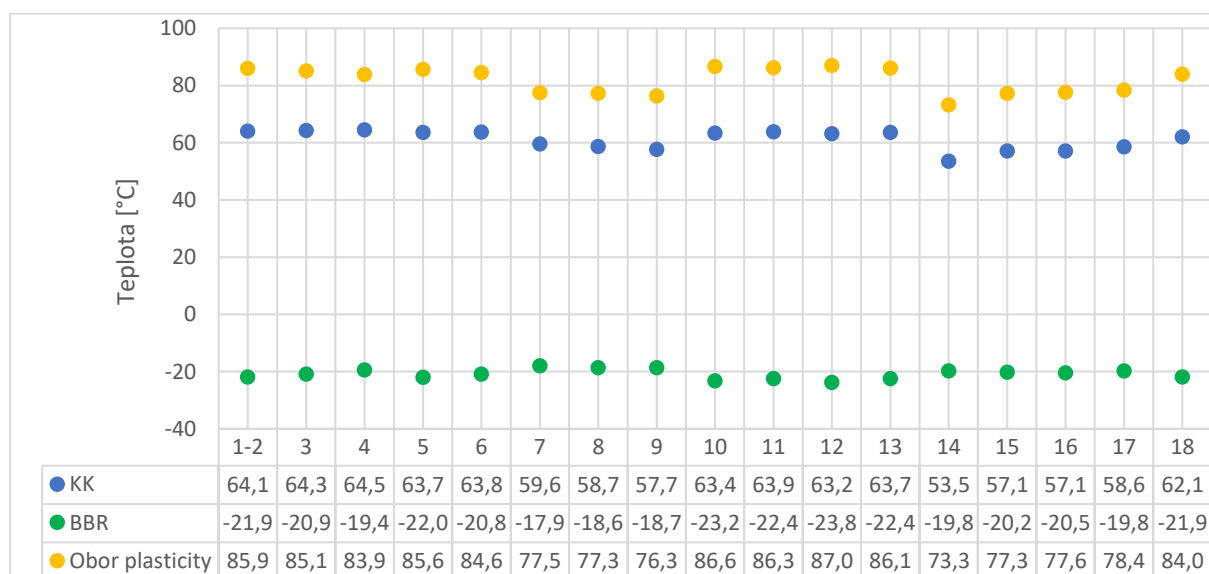
Z výsledků předchozích zkoušek je patrné, že chování asfaltových pojiv je silně závislé na teplotě. Pokud je pojivo příliš měkké, hrozí během letních měsíců riziko trvalých deformací, které lze například charakterizovat bodem měknutí, MSCR testem nebo pomocí kombinace komplexního smykového modulu a fázového úhlu. Naopak v zimě je pojivo příliš tvrdé a hrozí riziko vzniku mrazových trhlin, které je možné popsat například pomocí zkoušky v průhybovém trámečkovém reometru. Ekvivalentně lze hodnotit i náchylnost poruchy přímo u asfaltové směsi, kdy riziko trvalých deformací se hodnotí zkouškou pojíždění kolem podle ČSN EN 12697-22 [28] a riziko vzniku mrazových trhlin pomocí jednoosé zkoušky tahem podle ČSN EN 12697-46 [37].

Teplotní rozsah, který vymezuje možnost využití asfaltového pojiva, lze nazvat jako obor plasticity (použitelnosti). Za horní kritickou teplotu lze brát například hodnotu bodu měknutí a dolní kritickou teplotu lze získat například při stanovení kritické teploty pomocí BBR, která se sníží o 10 °C. Výpočet oboru plasticity je následující:

$$\Delta = T_{KK} - T_{BBR} \quad (10.1)$$

- Kde Δ - teplotní rozsah oboru plasticity [°C]
 T_{KK} - teplota bodu měknutí metodou kroužek a kulička [°C]
 T_{BBR} - kritická teplota z BBR [°C]

V Grafu 82 jsou uvedeny jednotlivé teploty bodu měknutí, kritické teploty z BBR a zároveň je dopočítán teplotní rozsah oboru plasticity. Pro přesnější vyjádření oboru plasticity by bylo vhodné provést na pojivech nebo přímo na směsích aplikaci dlouhodobého stárnutí, které kritičtěji popisuje chování zejména za nízkých teplot.



Graf 82: Stanovení oboru plasticity jednotlivých znovuzískaných asfaltových pojiv

Z výsledků vyplývají výrazné rozdíly oboru plasticity mezi směsmi s PmB pojivem a silničními asfalty, kterou ovlivňují zejména hodnoty bodu měknutí. Rozdíly kritických teplot

z BBR jsou nižší. U směsí s PmB se pohybuje rozptyl oboru plasticity v rozmezí 83,9 až 87,0 °C. U směsí se silničním asfaltem jak nativním, tak v R-materiálu je rozpětí 73,3 až 77,6 °C, tedy přibližně o 10 °C méně. U směsí se silničním asfaltem a obsahem R-materiálu z SMA byla hodnota oboru plasticity 78,4 °C (30 % R-mat SMA) a dokonce 84,0 °C (50 % R-mat SMA).

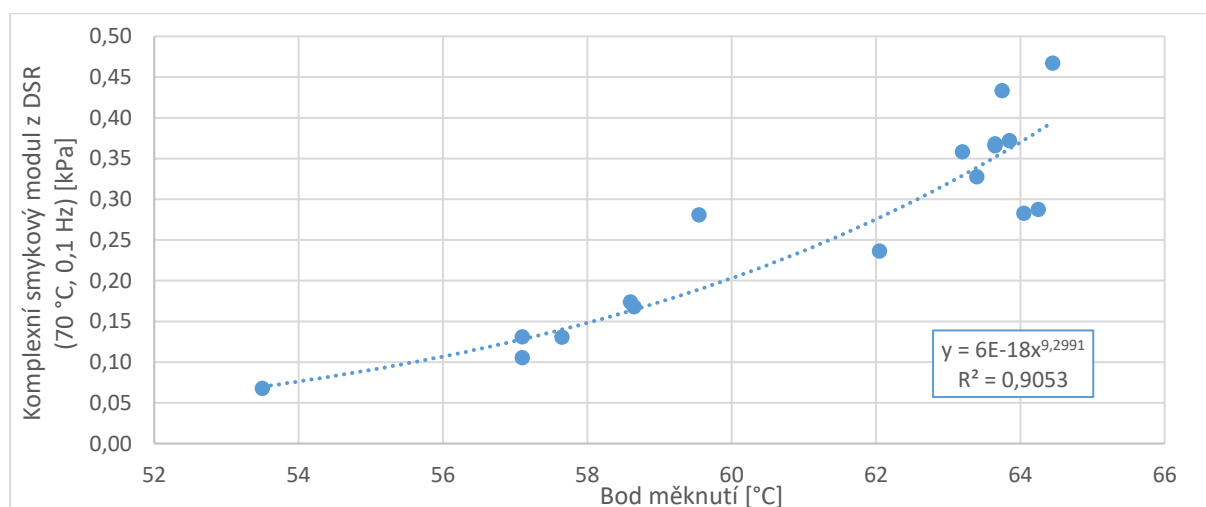
10.3. Vzájemné srovnání výsledků

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 [17] 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 [17] 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 případě korelace mezi bodem měknutí a komplexním smykovým modulem byla nalezena závislost při teplotě 70 °C a frekvenci 0,1 Hz (Graf 83). Zde byl koeficient determinace R^2 0,91. Pokud bychom uvažovali stejné okrajové podmínky jako v [17], vycházel by koeficient determinace R^2 0,71.



Graf 83: Mocninná závislost mezi bodem měknutí a komplexním smykovým modulem z DSR při teplotě 70 °C a frekvenci 0,1 Hz

V rámci hodnocení asfaltových pojiv z pohledu odolnosti vůči trvalým deformacím se v posledních letech upřednostňuje hodnocení pomocí zařízení DSR testu MSCR, které 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 24.

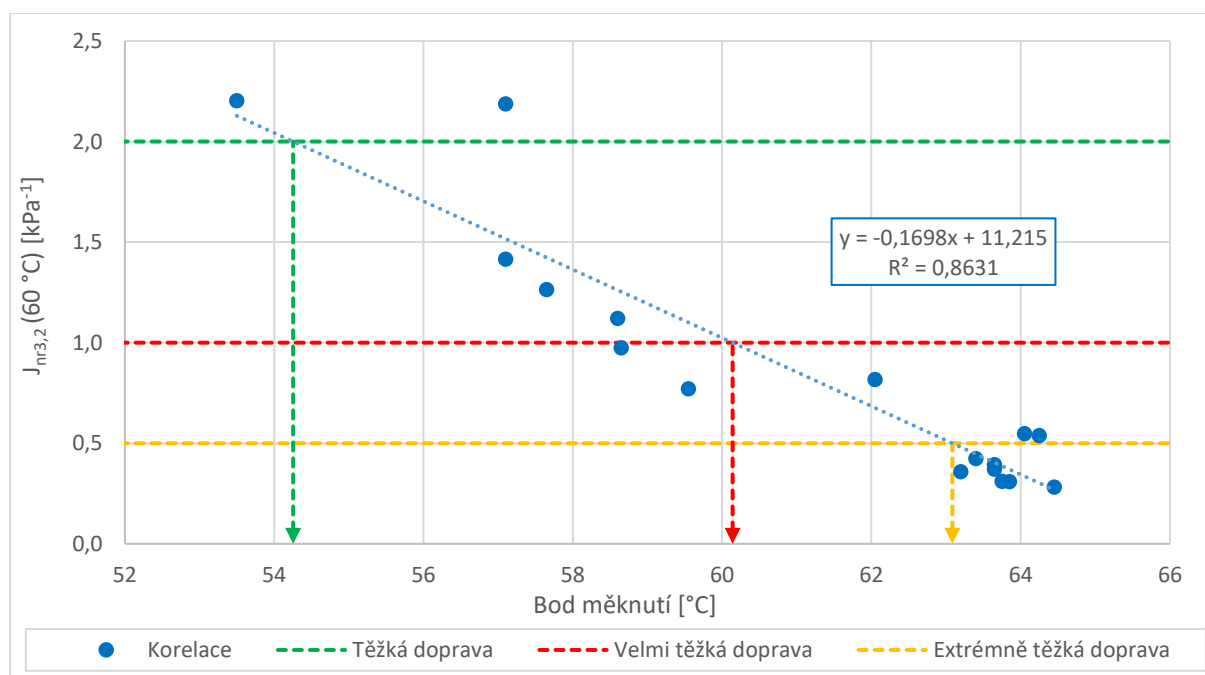
Tabulka 24: Korelace mezi výsledky bodu měknutí a MSCR testem při teplotách 50 °C, 60 °C a 70 °C

	$J_{nr3,2}$ (50 °C)	$R_{3,2}$ (50 °C)	$J_{nr3,2}$ (60 °C)	$R_{3,2}$ (60 °C)	$J_{nr3,2}$ (70 °C)	$R_{3,2}$ (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

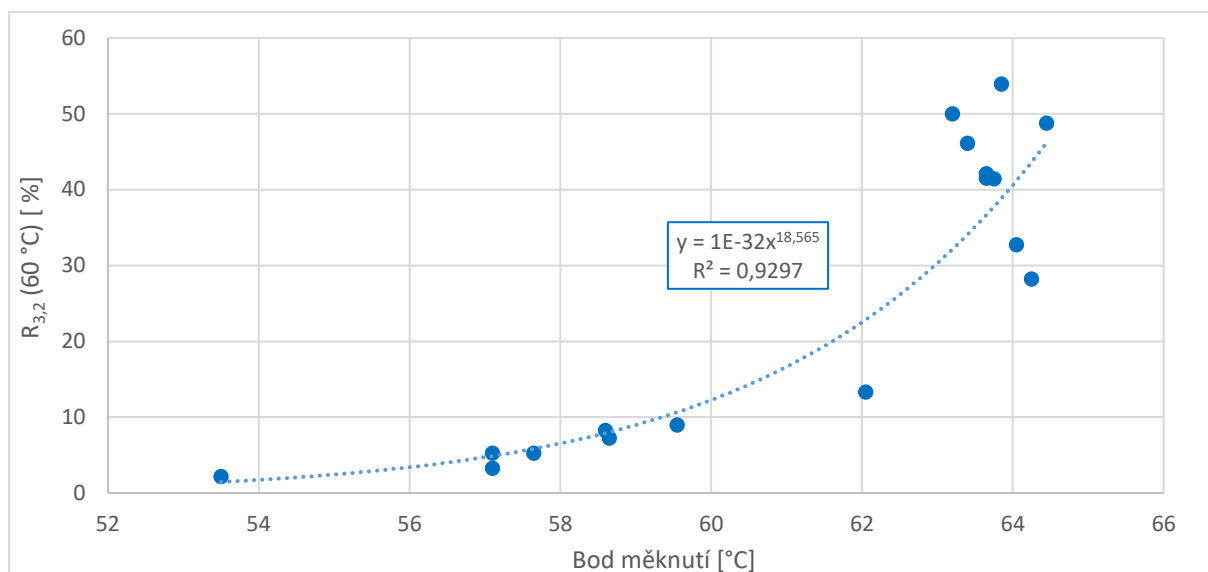
Z Tabulky 24 vyplývá, že se jedná o poměrně těsnou závislost, která se pohybuje v rozmezí koeficientu determinace R^2 0,86 až 0,93. Zároveň lze říct, že hodnota R^2 roste s teplotou zkoušení během MSCR testu. Výsledek tedy napovídá, že i pomocí bodu měknutí lze poměrně přesně popsat creepovou návratnost pojiva, která je důležitá z pohledu odolnosti vůči trvalým deformacím.

V Grafu 84 je znázorněna závislost bodu měknutí na nevratné smykové poddajnosti při teplotě 60 °C. Součinitel determinace je v tomto případě R^2 0,86. Zároveň jsou v Grafu 84 zobrazeny meze dle amerického návrhu SHRP pro těžkou dopravu, velmi těžkou dopravu a extrémně těžkou dopravu, které se hodnotí po krátkodobém stárnutí metodou RTFOT. Jelikož jsou výsledky bodu měknutí na pojivech znovuzískaných z asfaltových směsí, lze říct, že se jedná právě o krátkodobé stárnutí. Z Grafu 84 vychází, že požadavkům pro těžkou dopravu (2 kPa^{-1}) přibližně odpovídá teplota bodu měknutí 54,3 °C. Pro velmi těžkou dopravu (2 kPa^{-1}) odpovídá bod měknutí 60,1 °C a pro extrémně těžkou dopravu (2 kPa^{-1}) je to 63,1 °C.



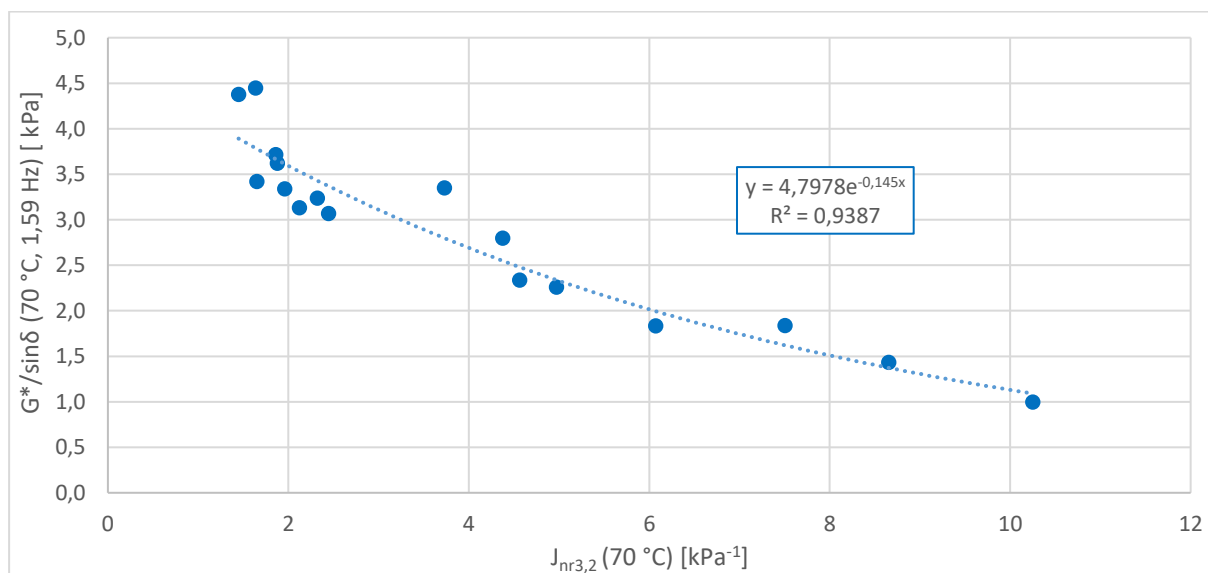
Graf 84: Lineární závislost mezi bodem měknutí a nevratnou smykovou poddajností $J_{nr3,2}$ při 60 °C

V Grafu 85 je uvedena mocnná závislost mezi bodem měknutí a průměrným elastickým zotavením $R_{3,2}$ při teplotě 60 °C. V tomto případě je součinitel determinace R^2 0,93. Z výsledků je patrné, že s klesajícím bodem měknutí klesá i průměrné elastické zotavení.



Graf 85: Mocnná závislost mezi bodem měknutí a průměrným elastickým zotavením $R_{3,2}$ při 60 °C

V USA je v posledních letech trendem přecházet na hodnocení odolnosti vůči trvalým deformacím pomocí parametru $J_{nr3,2}$ namísto $G^*/\sin\delta$. V Grafu 86 je proto uvedena závislost mezi koeficienty při teplotě 70 °C, kterou lze popsat pomocí exponenciální funkce. V tomto případě byla zjištěna vysoká hodnota koeficientu determinace R^2 0,94.



Graf 86: Mocnná závislost mezi bodem měknutí a průměrným elastickým zotavením $R_{3,2}$ při 60 °C

Ovšem při porovnání výsledků při nižších teplotách je koeficient determinace výrazně nižší (viz Tabulka 25).

Tabulka 25: Korelace mezi smykovou poddajností z MSCR a $G^*/\sin\delta$ při různých teplotách

		$J_{nr3,2}$ 50 °C	$J_{nr3,2}$ 60 °C	$J_{nr3,2}$ 70 °C
$G^*/\sin\delta$	50 °C	0,46 ⁽¹⁾	X	X
$G^*/\sin\delta$	60 °C	X	0,88 ⁽¹⁾	X
$G^*/\sin\delta$	70 °C	X	X	0,94 ⁽¹⁾

Pozn.: (1) – Exponenciální závislost

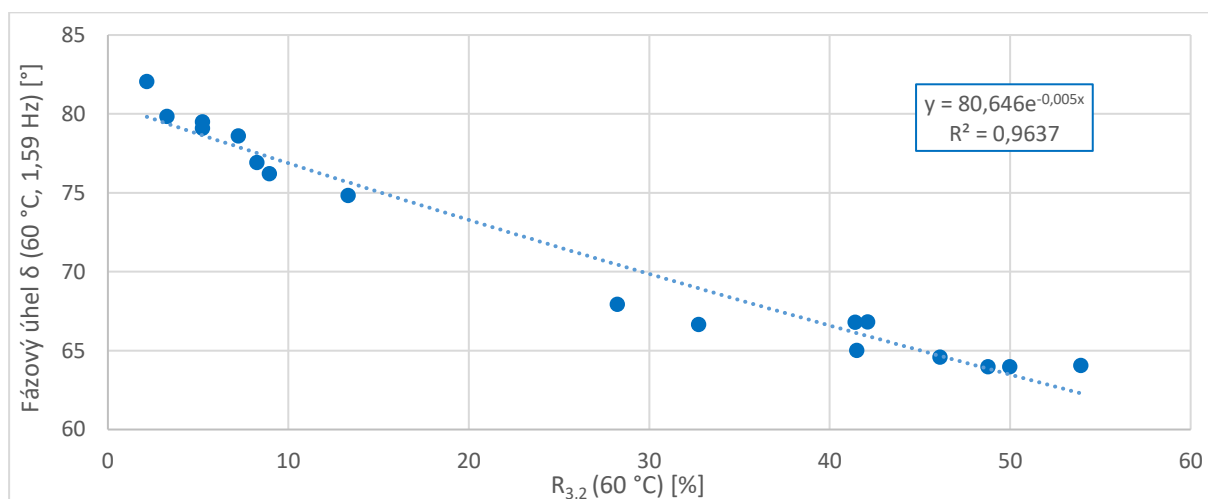
V disertační práci [17] byla zjištěna lineární závislost, kterou lze popsat koeficientem determinace R^2 0,92, mezi průměrným elastickým zotavením $R_{3,2}$ a fázovým úhlem při frekvenci 1,59 Hz. V rámci výsledků této práce byla vysoká hodnota koeficientu determinace potvrzena. Lineární závislost při různých teplotách je zobrazena v Tabulce 26. 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 26: Korelace mezi MSCR a fázovým úhlem δ při různých teplotách

		$R_{3,2}$ 50 °C	$J_{nr3,2}$ 60 °C	$J_{nr3,2}$ 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

Příklad závislosti mezi průměrným elastickým zotavením $R_{3,2}$ a hodnotou fázového úhlu δ při teplotě 60 °C je uveden v Grafu 87. Jedná se o lineární závislost, kterou lze popsat koeficientem determinace R^2 0,96.



Graf 87: Lineární závislost mezi fázovým úhlem δ a průměrným elastickým zotavením $R_{3,2}$ při 60 °C

V další části byly hledány vzájemné korelace mezi výsledky na asfaltových směsích a znovuzískaných pojivech. Jako první se nabízí porovnání hodnot parametrů zkoušky pojždění kolem, které se u asfaltových směsí hodnotí podle ČSN EN 12697-22. [28]

Pro hodnocení asfaltových pojiv lze použít například bod měknutí, MSCR test nebo další hodnoty získané zařízením DSR.

Obdobné porovnání lze najít i v literatuře, kde například zde [11] byly pro směs typu SMA 11 nalezeny hodnoty, jež jsou uvedeny pro porovnání v Tabulce 27. Zde jsou zároveň uvedeny koeficienty determinace pro zkoušené směsi (zde byl jeden bod odfiltrován z důvodu vysoké směrodatné odchylky).

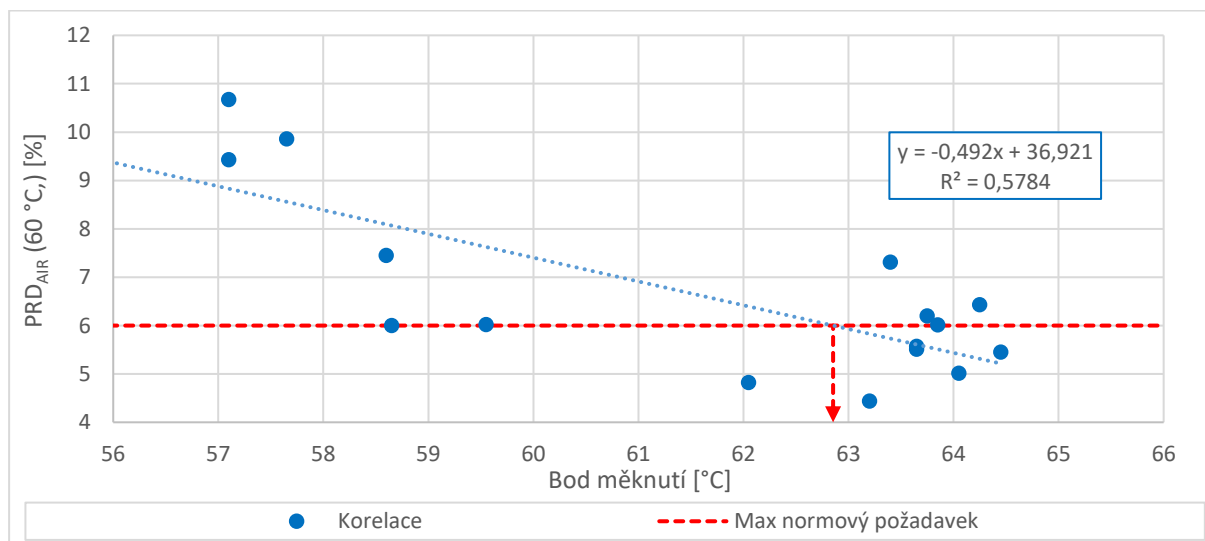
Tabulka 27: Korelace mezi MSCR a fázovým úhlem δ při různých teplotách

		Disertační práce		Literatura [11]	
		PRD _{AIR}	WTS _{AIR}	PRD _{AIR}	WTS _{AIR}
Penetrace jehlou	[0,1 mm]	0,01	0,01	0,35	0,22
Bod měknutí	[°C]	0,58	0,50	0,79	0,57
Dynamická viskozita (135 °C)	[mPa·s]	0,44	0,39	0,70	0,52
MSCR, J _{nr,3,2} (60 °C)	[kPa ⁻¹]	0,69	0,69	0,78 ⁽¹⁾	0,66 ⁽¹⁾
MSCR, J _{nr,diff} (60 °C)	[%]	0,00	0,01	0,67 ⁽¹⁾	0,61 ⁽¹⁾
MSCR, R _{3,2} (60 °C)	[%]	0,36	0,43	-	-
MSCR, R _{nr,diff} (60 °C)	[%]	0,26	0,34	-	-
G*/sin δ (1,59 Hz, 60 °C)	[kPa]	0,50	0,59	-	-

Pozn.: (1) – Teplota 64 °C

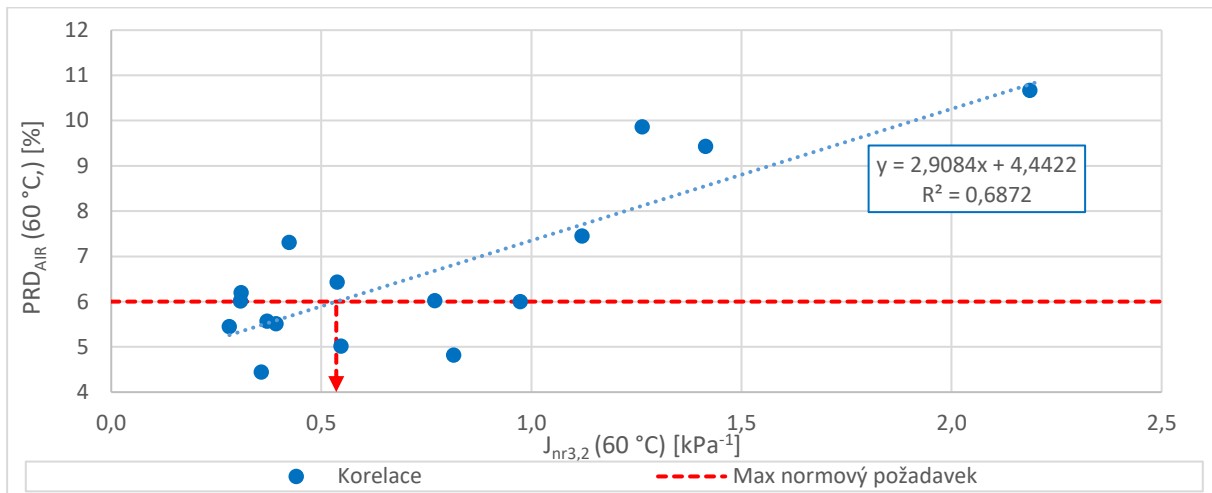
Z výsledků v Tabulce 27 vyplývá, že v rámci článku [11] byly vesměs nalezeny vyšší hodnoty koeficientů determinace. Zároveň lze ovšem říct, že nejvyšších hodnot v obou případech docházelo u MSCR testu, u kterého byla hodnota R² nejvyšší.

V Grafu 88 je uvedena závislost mezi PRD_{AIR} a bodem měknutí znovuzískaného pojiva. Koeficient determinace R² je v tomto případě 0,58. Zároveň je patrné, že s klesajícím bodem měknutí klesá i odolnost směsi vůči trvalým deformacím. Zároveň je v Grafu 88 přidána maximální hodnota PRD_{AIR} 6 %, která by měla být požadována pro směsi typu SMA při 60 °C. Při korelaci této hodnotě odpovídá teplota bodu měknutí 62,9 °C.



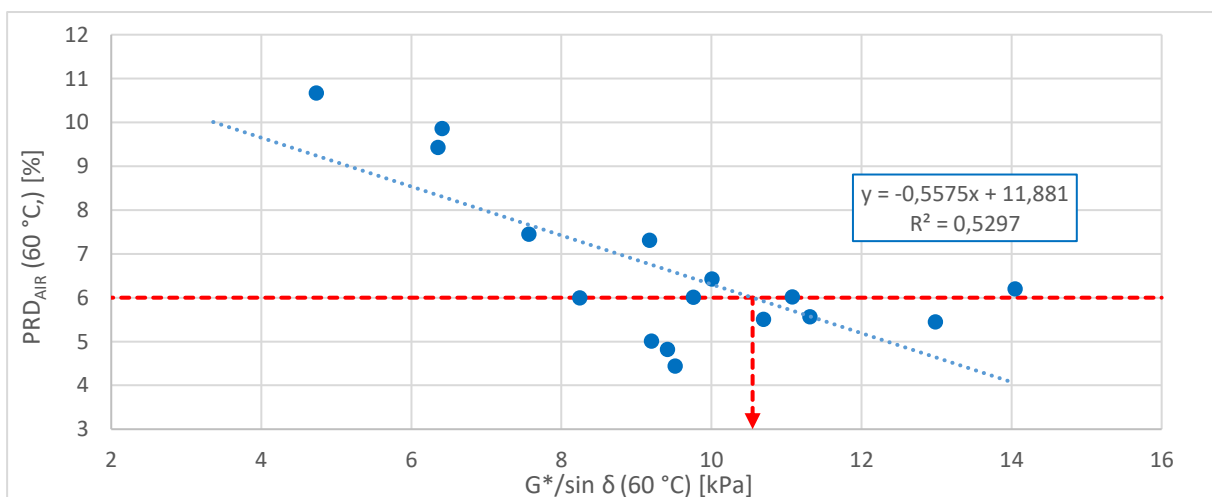
Graf 88: Lineární závislost mezi bodem měknutí a PRD_{AIR} při 60 °C

V Grafu 89 je uvedena závislost mezi PRD_{AIR} a nevratnou smykovou poddajností při teplotě 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.



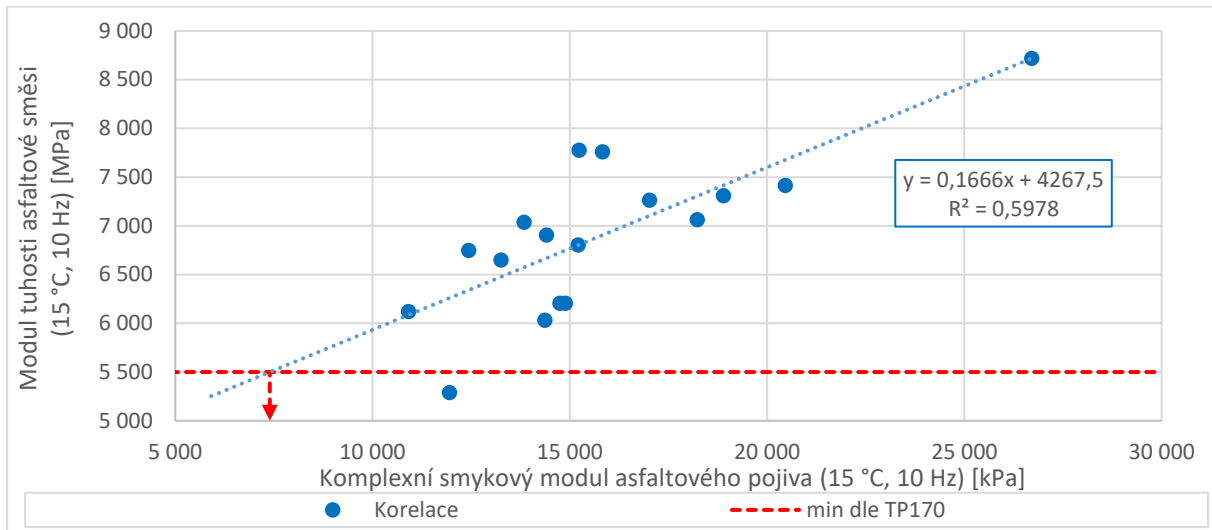
Graf 89: Lineární závislost mezi nevratnou smykovou poddajností $J_{nr3,2}$ a PRD_{AIR} při 60 °C

V Grafu 90 je popsána závislost mezi parametrem PRD_{AIR} u asfaltové směsi a $G^*/\sin\delta$ u znovuzískaného pojiva. V tomto případě byla hodnota koeficientu determinace R^2 0,53. Pokud opět vyhodnotíme odpovídající hodnotu 6 % PRD_{AIR} , tak zjistíme, že hodnotě odpovídá 10,6 kPa. V tomto případě americká metoda SHRP [70] uvažuje hodnotou 2,2 kPa, což je na první pohled hodnota výrazně benevolentnější. V tomto případě je ale nezbytné uvažovat tzv. „Grade bumping“, [17] kdy měření tohoto parametru je prováděno při vyšší teplotě dle dopravního zatížení a tím by bylo možné získat bližší hodnoty.



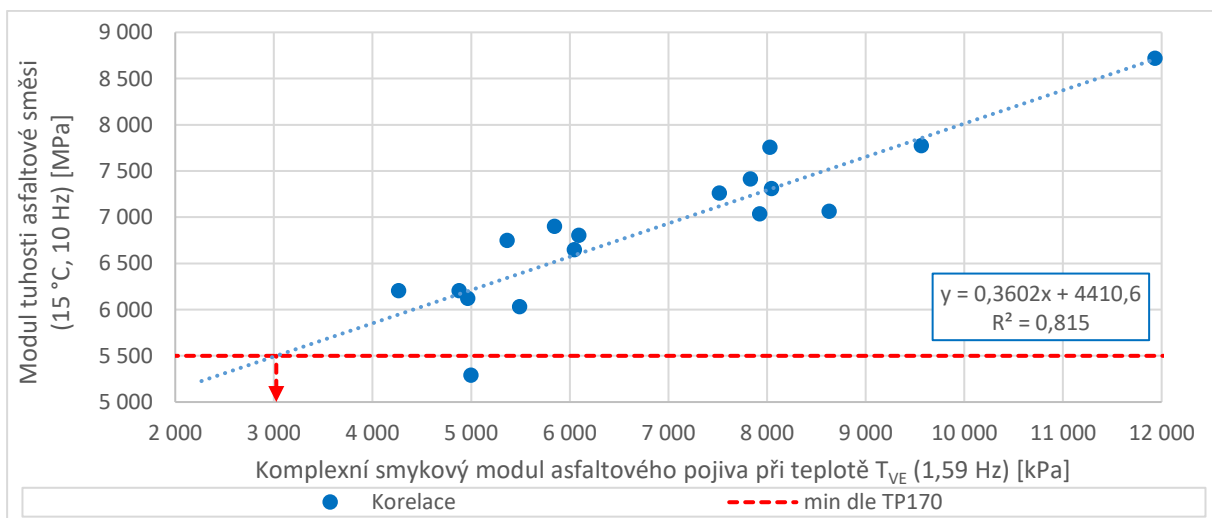
Graf 90: Lineární závislost mezi $G^*/\sin\delta$ a PRD_{AIR} při 60 °C

Další zkoušce, které byly podrobeny asfaltové směsi, bylo měření modulu tuhosti podle ČSN EN 12697-26 [30]. V tomto případě byl porovnán modul tuhosti asfaltové směsi s komplexním modulem asfaltového pojiva při teplotě 15 °C a frekvenci 10 Hz. Dle Grafu 91 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 7396 kPa asfaltového pojiva.



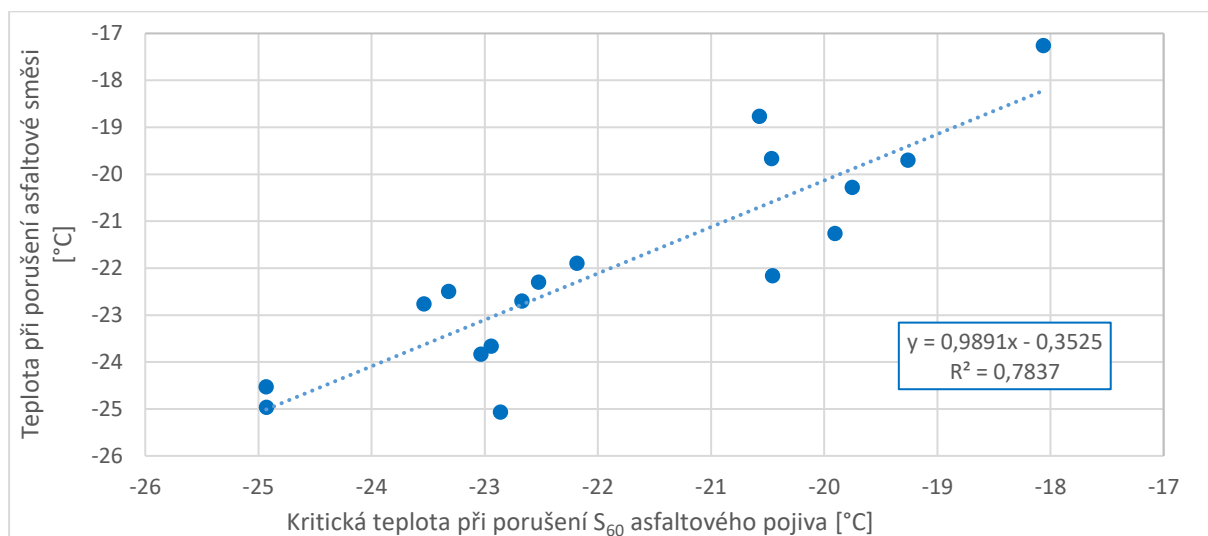
Graf 91: Lineární závislost mezi komplexním smykovým modulem asfaltového pojiva a modulem tuhosti asfaltové směsi při 15 °C a 10 Hz

Výrazně vyšší závislost R^2 0,82 (Graf 92) 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 92: 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 93 je uvedena závislost mezi teplotou porušení asfaltové směsi při jednoosé zkoušce tahem podle ČSN EN 12697-46 [37] 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 93: Lineární závislost mezi kritickou teplotou při porušení S_{60} asfaltového pojiva a teplotou porušení u asfaltové směsi jednoosou zkouškou tahem

11. 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 směsí 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 sítích, 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 % množství. 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)“.

12. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] AASHTO MP 1: „Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder“, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 1998.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Asphalt drum mix plant. Dostupné z: <http://www.kditechnology.com/asphaltdrummixplant.html>
- [5] Asphalt in Figures. EAPA [online]. [cit. 2018-12-29]. Dostupné z: <https://eapa.org/asphalt-in-figures/>
- [6] ASTM D2493 / D2493M - 09. Standard Viscosity-Temperature Chart for Asphalts. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2009.
- [7] Autobahn. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-12-28]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Autobahn#History>
- [8] Automatic Digital Ring and Ball Apparatus. In: Matest [online]. [cit. 2018-12-29]. Dostupné z: <https://1url.cz/2MHxs>
- [9] BAMBULOVÁ, L. Protismykové vlastnosti asfaltových vrstev s Rmateriálem. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Ústav pozemních komunikací, 2018. 84 s., 23 s. příl. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Petr Hýzl, Ph.D.
- [10] BEUVING, Egbert. Use of SMA in Europe [online]. In: . Japonsko, 2018, s. 1-48 [cit. 2018-12-28]. Dostupné z: <https://1url.cz/oMHYq>
- [11] BLAZEJOWSKI, Krzysztof a Bohdan DOLZYCKI. Relationships between Asphalt Mix Rutting Resistance and MSCR Test Results. In: Design, Analysis, and Asphalt Material Characterization for Road and Airfield Pavements. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2014, 2014-06-23, s. 202-209. DOI: 10.1061/9780784478462.025. ISBN 9780784478462. dostupné také z: <http://ascelibrary>
- [12] Brent crude oil price 1988-2015. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-12-28]. Dostupné z: https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Brent_crude_oil_price_1988-2015.svg
- [13] BROWNRIDGE, Jim. The Role of an Asphalt Rejuvenator in Pavement Preservation: Use and Need for Asphalt Rejuvenation. In: Compendium of Papers from the First International Conference on Pavement Preservation. Newport Beach, 2010, s. 351-354.
- [14] Celostátní sčítání dopravy 2010. Ředitelství silnic a dálnic ČR [online]. 2010 [cit. 2018-12-29]. Dostupné z: <https://1url.cz/wMHx0>
- [15] COLLIS, L. a R.A. FOX. Aggregates: Sand, Gravel and Crushed Rock Aggregates for Construction Purposes. Londýn: Engineering Geology Special Publication, 1985.

- [16] COUFALÍK, Pavel. Návrh a posouzení směsi pro asfaltové vrstvy se zvýšenou odolností proti šíření trhlin (SAL). Brno, 2012. 155 s., 67 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce prof. Ing. Jan Kudrna, CSc.
- [17] 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.
- [18] COUFALÍKOVÁ, Iva, Tomáš KOUDELKA, Pavel COUFALÍK, Markéta ČUMÍČKOVÁ, Jakub SALAMÁNEK, Vendula RŮŽIČKOVÁ, Michal VARAUS a Zuzana LODEROVÁ. Příloha 1 k průběžné zprávě za rok 2017: Příloha k odborné zprávě o postupu prací a dosažených výsledcích za rok 2017. Brno, 2017.
- [19] ČSN 65 7222-1 (657222). Asfalty a asfaltová pojiva - Silniční modifikované asfalty - Část 1: Polymerem modifikované asfalty. Praha: Český normalizační institut, 2017.
- [20] ČSN 65 7222-2. Asfalty a asfaltová pojiva - Silniční modifikované asfalty - Část 2: Asfalty modifikované pryžovým granulátem. Praha: Český normalizační institut, 2018.
- [21] ČSN 73 6121. Stavba vozovek – Hutněné asfaltové vrstvy – Provádění a kontrola shody. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [22] ČSN EN 1097-8 (721194). Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 8: Stanovení hodnoty ohladitelnosti. Praha: Český normalizační institut, 2010.
- [23] ČSN EN 12591 (657201). Asfalty a asfaltová pojiva - Specifikace pro silniční asfalty. Praha: Český normalizační institut, 2009.
- [24] ČSN EN 12597 (657000). Asfalty a asfaltová pojiva - Terminologie. Praha: Český normalizační institut, 2014.
- [25] ČSN EN 12697-1 (736160). Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 1: Obsah rozpustného pojiva. Praha: Český normalizační institut, 2018.
- [26] 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.
- [27] ČSN EN 12697-18 (736160). Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 18: Stékovost pojiva. Praha: Český normalizační institut, 2018.
- [28] 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.
- [29] ČSN EN 12697-25 (736160). Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 25: Cyklická zkouška v tlaku. Praha: Český normalizační institut, 2017.
- [30] ČSN EN 12697-26 (736160). Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 26: Tuhost. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [31] 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.

- [32] ČSN EN 12697-3 (736160). Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 3: Znovuzískání extrahovaného pojiva - Rotační vakuové destilační zařízení. Praha: Český normalizační institut, 2013.
- [33] ČSN EN 12697-30 (736160). Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [34] ČSN EN 12697-33 +A1 (736160). Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 33: Příprava zkušebních těles zhutňovačem desek. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [35] ČSN EN 12697-35 (736160). Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 35: Laboratorní výroba směsi. Praha: Český normalizační institut, 2018.
- [36] ČSN EN 12697-42 (736160). Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 42: Obsah cizorodých látek v asfaltovém recyklátu. Praha: Český normalizační institut, 2013.
- [37] 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.
- [38] ČSN EN 12697-49 (736160). Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 49: Stanovení součinitele tření po ohlazení. Praha: Český normalizační institut, 2014.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] ČSN EN 13108-1 Asfaltové směsi – Specifikace pro materiály, Část 1: Asfaltový beton, Český normalizační institut, Praha, 2008, 44 s.
- [43] ČSN EN 13108-2 ED. 2 (736140). Asfaltové směsi - Specifikace pro materiály - Část 2: Asfaltový beton pro velmi tenké vrstvy (BBTM). Praha: Český normalizační institut, 2017.
- [44] ČSN EN 13108-21 ED. 2 (736140). Asfaltové směsi - Specifikace pro materiály - Část 21: Řízení výroby. Praha: Český normalizační institut, 2017.
- [45] ČSN EN 13108-5 (736140). Asfaltové směsi - Specifikace pro materiály - Část 5: Asfaltový koberec mastixový. 2. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [46] ČSN EN 13108-5 ED. 2 (736140). Asfaltové směsi - Specifikace pro materiály - Část 5: Asfaltový koberec mastixový. 2. Praha: Český normalizační institut, 2018.
- [47] ČSN EN 13108-8 ED. 2 (736140). Asfaltové směsi - Specifikace pro materiály - Část 8: R-materiál. Praha: Český normalizační institut, 2017.

- [48] 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.
- [49] ČSN EN 14023 (657220). Asfalty a asfaltová pojiva - Systém specifikace pro polymerem modifikované asfalty. Praha: Český normalizační institut, 2010.
- [50] ČSN EN 1426 (657062). Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení penetrace jehlou. Praha: Český normalizační institut, 2015.
- [51] ČSN EN 1427 (657060). Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení bodu měknutí - Metoda kroužek a kulička. Praha: Český normalizační institut, 2015.
- [52] 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.
- [53] ČSN EN 14771 (657093). Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru (BBR). Praha: Český normalizační institut, 2013.
- [54] ČSN EN 16659 (657096). Asfalty a asfaltová pojiva - Zkouška MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery Test). Praha: Český normalizační institut, 2016.
- [55] ČSN EN 58 (657003). Asfalty a asfaltová pojiva - Vzorkování asfaltových pojiv. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [56] ČSN EN 933-1 (721193). Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 1: Stanovení zrnitosti - Síťový rozbor. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [57] DUNN, Leonard a Stephen CROSS. ., Basic Asphalt Recycling Manua, Asphalt Recycling and Reclaiming Association (ARRA). Maryland, 2001.
- [58] FAST-J-17-4780. Vliv R-materiálu použitého v obrusné vrstvě na protismykové vlastnosti povrchu vozovky. Hlavní řešitelka: Ing. Pavla Nekulová. VUT v Brně. Zahájení: 01.01.2017, ukončení: 31.12.2017.
- [59] FIEDLER, Jiří. Rešerše ke stárnutí asfaltů.
- [60] FRANK, B. Dose optimization – balancing Stiffness and Flexibility, Asphalt Paving Technology conference, Presentation, 2015.
- [61] Generální zpráva "Recyklace". Konference Asfaltové vozovky. České Budějovice, 2009.
- [62] GIERHART, Danny. Simple Talking Points for Sharing Why Your State Should Be Implementing MSCR [online]. 2011, 38 s. [cit. 2014-07-04].
- [63] GODANY, Josef. Pasportizace lomů přírodního kameniva ČR. 2. Praha: Česká geologická služba, 2015.
- [64] GREER, Gayle. Stone Mastix Asphalt - A review of its noise reducing and early life skid resistance properties. In: Acoustics. Christchurch, 2006, s. 77.
- [65] 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>
- [66] HOLMES, Ch., Rejuvenators, South Carolina Asphalt Pavement Association (SCAPA), Winter Conference, 2016.

- [67] HÝZL, Petr a Michal VARAUS. Funkční zkoušky asfaltových směsí. Časopis Stavebnictví. 2007, (6-7).
- [68] Chapter 6. Hot-Mix Asphalt Recycling - Drum Plant (Construction Methods And Equipment). Federal Highway Administration [online]. [cit. 2018-12-28]. Dostupné z: <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/recycling/98042/06.cfm>
- [69] Izolace proti vodě a vlhkosti. ČVUT. Tpm.fsv.cvut.cz [online]. [cit. 2013-05-18]. Dostupné z: http://tpm.fsv.cvut.cz/vyuka/materialy_izolace/prednaskalIII_IZMA.pdf
- [70] 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.
- [71] Kinexus ultra+. In: Malvern Panalytical [online]. [cit. 2018-12-29]. Dostupné z: <https://1url.cz/LMHxd>
- [72] Koloidní mlýn MK. NEOTEC, spol. s r.o. [online]. [cit. 2018-12-28]. Dostupné z: <http://www.neotec.cz/ikaprocess/colloid-mill-mk/>
- [73] 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.
- [74] KOUDELKA, T.; VARAUS, M.; COUFALÍKOVÁ, I. Rejuvenating agents – experience acquired at Brno University of technology, EAPA TC meeting, Germany, Berlin, 2017.
- [75] 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.
- [76] 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.
- [77] MALÁ, M. Využití R-materiálu v krytových vrstvách vozovek. Brno, 2016. 122 stran Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Petr Hýzl, Ph.D.
- [78] MCNALLY, Tony. Polymer modified bitumen: properties and characterisation. Philadelphia: Woodhead Publishing, 2011. Woodhead Publishing in materials. ISBN 978-0-85709-372-1.
- [79] MOTL, V. Problematika R-materiálu v asfaltových směsích typu SMA. Brno, 2016. 68. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Petr Hýzl, Ph.D.
- [80] 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.
- [81] NEKULOVÁ, P.; DAŠKOVÁ, J.; NEKULA, L. Využití laboratorní zkoušky Wehner/ Schulze k predikci životnosti protismykových vlastností povrchu vozovky. In Bezpečnost cestnej premávky 2017 - zborník. Kongres STUDIO, spol. s r.o., 2017. s. 60-65. ISBN: 978-80-89565-29-0.
- [82] NIELSEN, Erik, Jørn RAABERG a Hans BENDTSEN. Noise reducing SMA pavements: Mix design for Silence - F2 [online]. Hedehusene: Road Directorate, Danish Road Institute, 2006 [cit. 2018-12-28]. ISBN 87-91177-87-1. Dostupné z: <https://1url.cz/dMHne>
- [83] NIELSEN, Erik. RECPMA – State of the Art – Recycling Polymer Modified Asphal 1/2013. Dánsko, 2013.
- [84] PANK ry2011. Päälystealan neuvottelukunta Ry. Mannerheimin aukio. 2011.
- [85] PATZAK, Thomas, Manfred HASE, Ralf ROOS a Thomas WÖRNER. Friction of different surface courses. 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress. Praha, 2016.
- [86] Penetrometr automatický pro asfaltová pojiva [online]. [cit. 2018-12-28]. Dostupné z: <https://www.controlab.fr/gamme/penetrometre-automatique-a-bitume/>
- [87] Performance Graded (PG) Performance Graded (PG) Asphalts: SUPERPAVE Update for SUPERPAVE Update for NJDOT/NEAUPG Mechanistic [online]. 2003 [cit. 2016-03-10]. Dostupné z: <http://1url.cz/6t2UR>.
- [88] PLITZ, Jiří a František SVOVODA. Modifikace silničních asfaltů RET polymerem. Silnice a mosty. 2008, roč. 2008, č. 2.
- [89] PŘÍVARA, J. Využití běžného R-materiálu v asfaltových směsích. Brno, 2016. 73. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.
- [90] RAHMAN, AIREY a A. C. COLLOP. The Mechanical Properties of the Dry Process CRM Asphalt Mixtures Following Short-term and Long-term Ageing. Statens vegvesen. Dostupné také z: http://www.vegvesen.no/_attachment/110547/binary/192714.
- [91] READ, John, David WHITEOAK a Robert N. HUNTER. The Shell Bitumen handbook. 5th ed. London: Thomas Telford, 2003. ISBN 978-0727732200.
- [92] Recycling technology: Cold Recycling. Benninghoven [online]. [cit. 2018-12-28]. Dostupné z: <https://www.benninghoven.com/en/technologies/recycling/>
- [93] Rotační vakuová odparka Rotavapor® R-100, chladič V, Büchi. In: MANEKO [online]. [cit. 2018-12-28]. Dostupné z: <http://www.maneko.cz/rotacni-vakuova-odparka-rotavapor-r-100-chladic-v-buchi/>
- [94] Rozdrobňování. Vyšší odborná škola zdravotnická a Střední zdravotnická škola [online]. Hradec Králové [cit. 2018-12-28]. Dostupné z: <https://lat.zshk.cz/vyuka/rozdrobnovani.aspx>
- [95] RUTTMAR, Igor, Marcin HERING, Agata GRAJEWSKA a Pawel CZAJKOWSKI. Inovativní vozovka pro velká dopravní zatížení ze tří vrstev SMA v rafinerii Gdaňsk. Silnice + mosty. Praha: PRAGOPROJEKT, 2018, (1), 7-10. ISSN 1804-8684.

- [96] Segmentový zhutňovač. In: Con Tech CZ [online]. [cit. 2018-12-28]. Dostupné z: http://www.con-tech.cz/?page_id=120
- [97] Sequential Mixing. Astec [online]. [cit. 2018-12-28]. Dostupné z: <https://1url.cz/yMH6q>
- [98] 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>
- [99] Silniční vlákna – S-CEL 7G. In: CIUR [online]. [cit. 2018-12-29]. Dostupné z: <https://1url.cz/0MHxf>
- [100] Sítový rozbor [online]. Opava [cit. 2018-12-29]. Dostupné z: http://dk.spsopava.cz:8080/fotogalzobraz.php?adr=OGfVhL_20141128_140605
- [101] Slavíček M. Využití R - materiálu v asfaltových kobercích mastixových. Brno, 2017. 94 s., 21 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Petr Hýzl, Ph.D.
- [102] SMA: The History. In: 1st international conferenco on Stone Matrix Asphalt, presentation SMA History [online]. s. 1-79 [cit. 2018-12-28]. Dostupné z: <https://1url.cz/XMHYJ>
- [103] STOKLÁSEK, Svatopluk. Výzkumný projekt TA 03030381 Nové zkušební metody asfaltových pojiv a směsí umožňující prodloužení životnosti asfaltových vozovek - Příloha B 4.2: Stárnutí asfaltových pojiv jako důležitý aspekt životnosti asfaltových vozovek. Brno, 2013.
- [104] Stone Mastic Asphalt - SMA [online]. Japonsko, 2018 [cit. 2018-12-28]. Dostupné z: [http://hosou.hscet.com/img/SMA%20-%20The%20Concept%20\(Japan\).pdf](http://hosou.hscet.com/img/SMA%20-%20The%20Concept%20(Japan).pdf)
- [105] Stone Mastic Asphalt Details. In: Engineering and Technology [online]. 2013 [cit. 2018-12-28]. Dostupné z: <https://1url.cz/hMHYH>
- [106] 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
- [107] ŠVADLÁK, Daniel, Radek ČERNÝ a Jiří PLITZ. Aplikace nových metod pro zkoušení silničních asfaltů. In: Plné texty přednášek. Praha, 2009, s. 1337-1342. ISBN 9788002021117. Dostupné také z: <http://1url.cz/ztEgJ>.
- [108] TA02030549. Maximálně efektivní využití recyklovaných asfaltových vrstev vozovek pro výrobu nových asfaltových směsí. Hlavní řešitel: doc. Dr. Ing. Michal Varaus. TAČR. Zahájení: 01.01.2012, ukončení: 31.12.2014.
- [109] TA04031328. Recyklace asfaltových koberců mastixových a vývoj speciálního celulózového vlákna do těchto typů asfaltových směsí. Hlavní řešitel: Ing. Petr Hýzl, Ph.D. TAČR. Zahájení: 01.01.2014, ukončení: 31.12.2017
- [110] TAN DO, Minh, Paul MARSAC a Yves DELANNE. Prediction of Tire/Wet Road Friction from Road Surface Microtexture and Tire Rubber Properties. In: SURF 2004 - 5th Symposium on Pavement Surface Characteristics. Toronto, 2004.
- [111] Tarmacadam. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-12-28]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Tarmacadam>

- [112] TDOK 2013:0529. Bitumenbundna lager. Kenneth Lind, Ivtbo. KRAV. 2015.
- [113] TE-BBR Pro Thermoelectric Bending Beam Rheometer. In: Cannon Instrument Company [online]. [cit. 2018-12-29]. Dostupné z: <https://1url.cz/LMHxD>
- [114] TH02030194. Použití směsí kameniva s různou odolností proti ohlazení do obrusných vrstev za účelem dosažení dlouhodobě vyhovujících protismykových vlastností povrchu vozovky, zvýšení bezpečnosti silničního provozu a ekonomického využití přírodních zdrojů. Hlavní řešitelka Ing. Pavla Nekulová. TAČR. Zahájení: 01.01.2017, ukončení: 31.12.2020.
- [115] The arguments for SMA. EAPA [online]. Nizozemí: European Asphalt Pavement Association, 1998 [cit. 2018-12-29]. Dostupné z: <https://eapa.org/wp-content/uploads/2018/07/The-arguments-for-SMA-1998.pdf>
- [116] The History of Asphalt. BeyondRoads.com [online]. [cit. 2018-12-28]. Dostupné z: <https://1url.cz/uMHY1>
- [117] TJ 01000248. Použití oživovacích přísad pro prodloužení životnosti recyklovaných vozovek s vysokým obsahem R materiálu. Hlavní řešitel: Ing. Iva Coufalíková. TAČR. Zahájení: 01.09.2017, ukončení: 31.08.2019.
- [118] TP 148. Hutněné asfaltové vrstvy S asfaltem modifikovaným pryžovým Granulátem z pneumatik. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2009.
- [119] TP 170. Navrhování vozovek pozemních komunikací. Praha: Ministerstvo dopravy, 2010.
- [120] TP 210. Užití recyklovaných stavebních demoličních materiálů do pozemních komunikací. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2011.
- [121] TP 259. Asfaltové směsi pro obrusné vrstvy se sníženou hlučností. Praha: Ministerstvo dopravy, 2017.
- [122] UECKERMANN, Andreas, Dawei WANG, Markus OESER a Bernhard STEINAUER. Calculation of skid resistance from texture measurements. Journal of Traffic and Transportation Engineering. 2015, 2(1), 3-16.
- [123] URQUHART, Robert a Khar Yean KHOO. Investigations into the effects of polymer segregation and degradation in polymer modified binders: Austroads Technical Report AP-T227-13. Sydney, 2013.
- [124] VARAUS M., Asfaltové směsi s vysokým obsahem R-materiálu, SENS 9 Asfaltové směsi a vrstvy, 2015
- [125] VARAUS M., Metodika aplikace R-materiálu v asfaltových směsích, Brno, 2014
- [126] VARAUS, M. Recyklace asfaltových směsí na obalovně, Přednáška 2013
- [127] VARAUS, M. Recyklace asfaltových směsí na obalovně. Konference Projektování pozemních komunikací. Brno, 2013.
- [128] VARAUS, M.; KOUDELKA, T. Funkční vlastnosti asfaltových směsí s R materiálem. In Dopravné stavby a dopravné inženýrstvo ako systémové riešenie. Bratislava, SK: Kongres STUDIO, spol. s r.o., 2016. s. 184-190. ISBN: 978-80-89565-27- 6.
- [129] VARAUS, Michal. Pozemní komunikace II: Modul II - kamenivo. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2005.

- [130] Via Appia. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-12-28]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Via_Appia
- [131] Vulkanické horniny vhodné pro výrobu drceného kameniva. Get [online]. [cit. 2018-12-28]. Dostupné z: <http://www.get.cz/cz/jamajka-vulkanity/>
- [132] Vyhláška č. 383/2001 Sb. Ministerstva životního prostředí o podrobnostech nakládání s odpady. Ministerstva životního prostředí. 2001.
- [133] Vyhláška č. 61/2018 Sb. o seznamu nebezpečných chemických látek, směsí a prachů a podmínkách nakládání s nebezpečnými chemickými látkami a směsmi a podmínkách výkonu činností spojených s nebezpečnou expozicí prachů. Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy. 2018
- [134] WAANDERS, G. a H. ELS. Splittmastixasphalt und Dränasphalt in den Niederlanden. Erfahrungen und Untersuchungen in der Provinz Overijssel. Asphalt. 1995, (4), 8-17.
- [135] YILDIRIM, Yetkin, Mansour SOLAIMANIAN a Thomas W. KENNEDY. Mixing and Compaction Temperatures for Hot Mix Asphalt Concrete [online]. 2000 [cit. 2016-03-10]. Dostupné z: https://www.utexas.edu/research/ctr/pdf_reports/1250_5.pdf.
- [136] ZAUMANIS, Martins, Rajib B. MALLICK a Robert FRANK. Evaluation of Rejuvenator's Effectiveness with Conventional Mix Testing for 100% Reclaimed Asphalt Pavement Mixtures. In: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2018, 2370(1), s. 17-25. DOI: 10.3141/2370-03. ISSN 0361-1981. Dostupné také z: <http://journals.sagepub.com/doi/10.3141/2370-03>
- [137] ZTV Asphalt-StB 07. Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt. Berlin. 2007
- [138] ZTV/St Hmb.09. Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Straßenbauarbeiten in Hamburg. Hamburg. 2009.

13. SEZNAM TABULEK

Tabulka 1:	Naměřené snížení hluku na směsích typu SMA versus běžně používané směsi v daných zemí [65]	17
Tabulka 2:	Požadavky vybraných zemí Evropy na propady na sítích 0,063 mm a 2 mm a obsah asfaltového pojiva dle typu směsi SMA [65]	19
Tabulka 3:	Doporučená mezerovitost těles dle maximálního zrna ve směsi typu SMA [65]	19
Tabulka 4:	Požadavky na směs typu SMA 11 S v rámci německých předpisů [102]	21
Tabulka 5:	Německé požadavky na typy směsí do ložní vrstvy [104].....	23
Tabulka 6:	Požadavky na asfaltové směsi typu SMA NR (Německá a Česká republika) [65]	23
Tabulka 7:	Produkce za horka vyráběných asfaltových směsí ve světě (milióny tun) [5]	38
Tabulka 8:	Nejvyšší přípustný obsah R-materiálu v % hmotnosti asfaltové směsi [42]	41
Tabulka 9:	Procentuální propad na sítích u jednotlivých frakcí kameniva a vápencové moučky	61
Tabulka 10:	Průměr síťových rozborů jednotlivých frakcí R-materiálu v procentech.....	62
Tabulka 11:	Vlastnosti asfaltového pojiva přidávaného do směsi SMA 11S s různým množstvím R-materiálu.....	63
Tabulka 12:	Vlastnosti asfaltových pojiv obsažených v R-materiálech	63
Tabulka 13:	Dávkování oživovací přísady v % na tunu R-materiálu dle jeho množství ve směsi	64
Tabulka 14:	Objemové hmotnosti a mezerovitost směsí SMA 11S s různým obsahem R-materiálu	67
Tabulka 15:	Navržené křivky zrnitosti ve směsích SMA 11S s různým podílem R-materiálu .	67
Tabulka 16:	Množství obsažených komponentů ve směsích SMA 11S s různým podílem R-materiálu	68
Tabulka 17:	Asfaltové směsi položené na zkušební úseku	85
Tabulka 18:	Hmotnostní podíly obsažených frakcí a obsah pojiva ve směsích SMA 11S.....	92
Tabulka 19:	Objemové hmotnosti a mezerovitost směsí	97
Tabulka 20:	Výsledné trvalých deformací zkoušených při 60 °C s detaily měřených těles	98
Tabulka 21:	Výsledné trvalých deformací zkoušených při 50 °C s detaily měřených těles..	101
Tabulka 22:	Mezerovitost a míra zhutnění těles použitých pro stanovení modulu tuhosti	102
Tabulka 23:	Mezerovitost a míra zhutnění těles použitých pro danou zkoušku.....	103
Tabulka 24:	Korelace mezi výsledky bodu měknutí a MSCR testem při teplotách 50 °C, 60 °C a 70 °C	130
Tabulka 25:	Korelace mezi smykovou poddajností z MSCR a $G^*/\sin\delta$ při různých teplotách	132
Tabulka 26:	Korelace mezi MSCR a fázovým úhlem δ při různých teplotách	132
Tabulka 27:	Korelace mezi MSCR a fázovým úhlem δ při různých teplotách	133

14. SEZNAM GRAFŮ

Graf 1:	Srovnání průběhu čar zrnitostí směsí SMA a AC	12
Graf 2:	Procentuální zastoupení produkce směsi SMA z celkové produkce za horka vyrobených směsí v jednotlivých zemích a letech [5]	20
Graf 3:	Celková produkce za horka vyráběných směsí v různých zemích a letech [5]	39
Graf 4:	Procentuální podíl produkce směsi SMA ze směsí vyráběných za horka na obalovně [5]	39
Graf 5:	Celková produkce R-materiálu v různých zemích a letech [5]	40
Graf 6:	Procentuální podíl využitého R-materiálu na obalovně v různých zemích a letech [5]	40
Graf 7:	Křivky zrnitosti různých frakcí kameniva a vápencové moučky	61
Graf 8:	Křivky zrnitosti používaných R-materiálů	62
Graf 9:	Blackův diagram použitých R-materiálů (RAP - běžný R-materiál, RAP SMA – R-materiál z SMA)	64
Graf 10:	Čáry zrnitostí směsí SMA 11S s různým podílem R-materiálu	68
Graf 11:	Průběh stanovení odolnosti proti tvorbě trvalých deformací při teplotě 50 °C	69
Graf 12:	Výsledný parametr PRD_{AIR} směsi SMA 11S s různým obsahem R-materiálu při 50 °C	70
Graf 13:	Výsledný parametr PRD_{AIR} směsi SMA 11S s různým obsahem R-materiálu při 60 °C	70
Graf 14:	Výsledný parametr WTS_{AIR} směsi SMA 11S s různým obsahem R-materiálu při 50 °C	70
Graf 15:	Výsledný parametr WTS_{AIR} směsi SMA 11S s různým obsahem R-materiálu při 60 °C	71
Graf 16:	Moduly tuhosti směsí SMA 11S v závislosti na obsahu R-materiálu při 10 Hz a teplotě 15 °C	71
Graf 17:	Závislost napětí na teplotě tělesa v průběhu hodnocení nízkoteplotních vlastností	72
Graf 18:	Maximální napětí při porušení při zjišťování nízkoteplotních vlastností na směsích SMA 11S s různým podílem R-materiálu	73
Graf 19:	Teplota vzorku při porušení při zjišťování nízkoteplotních vlastností na směsích SMA 11S s různým podílem R-materiálu	73
Graf 20:	Hodnoty penetrace jehlou na znovuzískaném pojivu z laboratorně připravených směsí	74
Graf 21:	Hodnoty bodu měknutí na znovuzískaném pojivu z laboratorně připravených směsí	75
Graf 22:	Hodnoty dynamické viskozity při teplotě 135 °C	75
Graf 23:	Hodnota komplexního smykového modulu při 60 °C a frekvenci 1,59 Hz	76
Graf 24:	Velikost fázového úhlu při 60 °C a frekvenci 1,59 Hz	76
Graf 25:	Teplota viskoelastického přechodu při frekvenci 1,59 Hz	77

Graf 26: Hodnota komplexního smykového modulu při teplotě viskoelastického přechodu a frekvenci 1,59 Hz	77
Graf 27: Závislost T_{VE} a to odpovídajícímu komplexnímu smykovému modulu při frekvenci 1,59 Hz	78
Graf 28: Závislost komplexního smykového modulu a fázového úhlu na teplotě při frekvenci 1,59 Hz	79
Graf 29: Hodnoty materiálového součinitele c_1	79
Graf 30: Hodnoty materiálového součinitele c_2	80
Graf 31: Hlavní křivky komplexních smykových modulů sestavené pro teplotu 50 °C	80
Graf 32: Blackův diagram u jednotlivých směsí	81
Graf 33: Modul tuhosti za ohybu při teplotě -16 °C	82
Graf 34: m-hodnota při teplotě -16 °C	82
Graf 35: Čáry zrnitostí směsí s různým obsahem R-materiálu 0 až 50 % v porovnání se směsí dle ITT a požadavky normy ČSN EN 13108-5 [45] pro směsi typu asfaltový koberec mastixový (SMA)	93
Graf 36: Čáry zrnitostí směsí bez % R-materiálu v porovnání s ITT a požadavky normy [45]	94
Graf 37: Čáry zrnitostí směsí s 20 % běžného R-materiálu v porovnání s ITT a požadavky normy [45]	94
Graf 38: Čáry zrnitostí směsí s 30 % R-materiálu v porovnání s ITT a požadavky normy [45]	95
Graf 39: Čáry zrnitostí směsí s 30 % R-materiálu SMA v porovnání s ITT a požadavky normy [45]	95
Graf 40: Čáry zrnitostí směsí s 50 % R-materiálu SMA v porovnání s ITT a požadavky normy [45]	96
Graf 41: Hodnoty parametru PRD_{AIR} měřeného při 60 °C	99
Graf 42: Hodnoty parametru WTS_{AIR} měřeného při 60 °C	99
Graf 43: Hodnoty parametru PRD_{AIR} měřeného při 50 °C	100
Graf 44: Hodnoty parametru WTS_{AIR} měřeného při 50 °C	101
Graf 45: Moduly tuhosti směsí SMA 11S s různým obsahem R-materiálu	102
Graf 46: Maximální napětí při porušení vzorku při ověřování nízkoteplotních vlastností variant směsi SMA 11S ze zkušebního úseku	104
Graf 47: Kritická teplota vzorku při porušení při ověřování nízkoteplotních vlastností variant směsi SMA 11S ze zkušebního úseku	104
Graf 48: Závislost kryogenního napětí na teplotě tělesa v průběhu hodnocení nízkoteplotních vlastností všech variant	105
Graf 49: Závislost kryogenního napětí na teplotě tělesa v průběhu hodnocení nízkoteplotních vlastností směsí s 20 % R-materiálu	105
Graf 50: Závislost kryogenního napětí na teplotě tělesa v průběhu hodnocení nízkoteplotních vlastností směsí s 30 % R-materiálu	106
Graf 51: Závislost kryogenního napětí na teplotě tělesa v průběhu hodnocení nízkoteplotních vlastností směsí s 30 % SMA R-materiálu	107

Graf 52: Závislost kryogenního napětí na teplotě tělesa v průběhu hodnocení nízkoteplotních vlastností směsí s 50 % SMA R-materiálu	107
Graf 53: Závislost kryogenního napětí na teplotě tělesa v průběhu hodnocení nízkoteplotních vlastností všech variant s polymerem modifikovaným pojivem .	108
Graf 54: Závislost kryogenního napětí na teplotě tělesa v průběhu hodnocení nízkoteplotních vlastností všech variant se silničním pojivem modifikovaným pryžovým granulátem (přísadou Storelastic) a referenční směsí.....	108
Graf 55: Hodnoty penetrace jehlou znovuzískaných asfaltových pojiv.....	109
Graf 56: Hodnoty bodu měknutí pro znovuzískaná asfaltová pojiva	110
Graf 57: Hodnoty dynamické viskozity v závislosti na smykové rychlosti u znovuzískaného pojiva ze směsi 1-2.....	111
Graf 58: Hodnoty dynamické viskozity v závislosti na teplotě u vybraných znovuzískaných pojiv	112
Graf 59: Optimální teplota míchání a hutnění jednotlivých znovuzískaných pojiv	112
Graf 60: Hodnoty dynamické viskozity jednotlivých znovuzískaných pojiv při teplotě 135 °C	113
Graf 61: Průběh zkoušky MSCR pro znovuzískané pojivo ze směsi 1-2 při teplotě 60 °C ...	114
Graf 62: Velikost nevratné smykové poddajnosti $J_{nr3,2}$ jednotlivých znovuzískaných pojiv	115
Graf 63: Velikost procentuálního rozdílu ve smykové poddajnosti	116
Graf 64: Velikost průměrného elastického zotavení jednotlivých asfaltových pojiv	116
Graf 65: Velikost komplexního smykového modulu při 60 °C a frekvenci zatěžování 1,59 Hz	117
Graf 66: Velikost fázového úhlu při 60 °C a frekvenci zatěžování 1,59 Hz	118
Graf 67: Teplota viskoelastického přechodu při frekvenci zatěžování 1,59 Hz.....	119
Graf 68: Hodnota komplexního smykového modulu při teplotě viskoelastického přechodu	119
Graf 69: Cross-over parametr	120
Graf 70: Hodnoty materiálového součinitele C_1	121
Graf 71: Hodnoty materiálového součinitele C_2	121
Graf 72: Hlavní křivky komplexních smykových modulů a fázových úhlů při teplotě 50 °C	122
Graf 73: Blackův diagram.....	122
Graf 74: Cole-cole diagram	123
Graf 75: Isochrony komplexních smykových modulů srovnávaných pojiv.....	123
Graf 76: Isochrony fázových úhlů srovnávaných pojiv	124
Graf 77: Odolnost vůči trvalým deformacím hodnocená parametrem $G^*/\sin\delta$	125
Graf 78: Modul tuhosti za ohybu při -16 °C.....	126
Graf 79: m-hodnota při -16 °C	126
Graf 80: Kritická teplota.....	127
Graf 81: Rozdíl kritických teplot získaných z modulu tuhosti za ohybu a m-hodnoty	127
Graf 82: Stanovení oboru plasticity jednotlivých znovuzískaných asfaltových pojiv	128

Graf 83: Mocninná závislost mezi bodem měknutí a komplexním smykovým modulem z DSR při teplotě 70 °C a frekvenci 0,1 Hz	129
Graf 84: Lineární závislost mezi bodem měknutí a nevratnou smykovou poddajností $J_{nr3,2}$ při 60 °C.....	130
Graf 85: Mocninná závislost mezi bodem měknutí a průměrným elastickým zotavením $R_{3,2}$ při 60 °C.....	131
Graf 86: Mocninná závislost mezi bodem měknutí a průměrným elastickým zotavením $R_{3,2}$ při 60 °C.....	131
Graf 87: Lineární závislost mezi fázovým úhlem δ a průměrným elastickým zotavením $R_{3,2}$ při 60 °C.....	132
Graf 88: Lineární závislost mezi bodem měknutí a PRD_{AIR} při 60 °C.....	133
Graf 89: Lineární závislost mezi nevratnou smykovou poddajností $J_{nr3,2}$ a PRD_{AIR} při 60 °C	134
Graf 90: Lineární závislost mezi $G^*/\sin \delta$ a PRD_{AIR} při 60 °C	134
Graf 91: Lineární závislost mezi komplexním smykovým modulem asfaltového pojiva a modulem tuhosti asfaltové směsi při 15 °C a 10 Hz	135
Graf 92: Lineární závislost mezi komplexním smykovým modulem asfaltového pojiva při teplotě T_{VE} a modulem tuhosti asfaltové směsi při 15 °C a 10 Hz.....	135
Graf 93: Lineární závislost mezi kritickou teplotou při porušení S_{60} asfaltového pojiva a teplotou porušení u asfaltové směsi jednoosou zkouškou tahem.....	136

15. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Via Appia – nejstarší dochovaná římská silnice [102].....	10
Obrázek 2: Složení asfaltového koberce mastixového [105]	12
Obrázek 3: Rozdíl ve složení asfaltového betonu a asfaltového koberce mastixového [10] 13	
Obrázek 4: Přenos zatížení dopravou směsí SMA pomocí kontaktních bodů v kostře kameniva [98].....	13
Obrázek 5: Kyvadlo pro měření ohladitelnosti kameniva (vlevo), zkušební tělísko (vpravo) [129, 131]	15
Obrázek 6: Průběh zatížení ve vozovce od dopravy [104]	22
Obrázek 7: Gyrátorem zhutněné těleso SMA NR 8 (Dánsko) [82]	24
Obrázek 8: Položená konstrukce vozovky v areálu rafinérie [95]	24
Obrázek 9: Lineární a radiální SBS [123]	25
Obrázek 10: Zjednodušené zobrazení síťování [123]	26
Obrázek 11: Koloidní mlýn [72, 94]	26
Obrázek 12: Mísící zařízení pro výrobu asfaltového pojiva modifikovaného pryžovým granulátem	27
Obrázek 15: Zkušební tělesa pro zkoušku dle ČSN EN 12697-49 [9, 38].....	29
Obrázek 14: Jednotlivé komponenty asfaltového pojiva [136]	30
Obrázek 15: Změny ve struktuře asfaltového pojiva v průběhu životnosti [13].....	30
Obrázek 16: Rozdíl mezi působením změkčující a rejuvenační přísady [66].....	33
Obrázek 17: Multivariable dosing system [92].....	34
Obrázek 18: Technologie dvouplášťového bubnu společnosti Astec [97]	35
Obrázek 19: Schéma předeřívání R-materiálu v paralelním bubnu u šaržové obalovny [124]	36
Obrázek 20: Schéma kontinuální obalovny [4]	36
Obrázek 21: Zastřešení skládek kameniva a R-materiálu v areálu společnosti Froněk spol. s r.o.....	37
Obrázek 22: Vývoj ceny ropy v průběhu let [12].....	38
Obrázek 23: Granulátor na obalovně u Perzendorf v Rakousku	42
Obrázek 24: Detail mechanismu granulátoru	43
Obrázek 25: Sada sít pro stanovení zrnitosti [100]	47
Obrázek 26: Rotační vakuové destilační zařízení [93]	47
Obrázek 27: Míchací zařízení pro laboratorní výrobu asfaltové směsi [77].....	48
Obrázek 28: Rozměry Marshallova tělesa	49
Obrázek 29: Segmentový zhutňovač [96]	50
Obrázek 30: Zařízení na zkoušku pojíždění kolem [16]	53
Obrázek 31: Podstata zkoušky TSRST [16]	54
Obrázek 32: Zkušební zařízení pro měření modulu tuhosti asfaltové směsi metodou 2PB-TR [67]	54
Obrázek 33: Přístroj na stanovení penetrace jehlou [86]	56

Obrázek 34: Příklad na stanovení bodu měknutí metodou KK [8]	56
Obrázek 35: Zkušební geometrie typu kužel – deska pro měření dynamické viskozity [17] ..	57
Obrázek 36: Dynamický smykový reometr [71]	58
Obrázek 37: Typický cyklus dotvarování a zotavení.....	59
Obrázek 38: Průhybový trámečkový reometr [113].....	60
Obrázek 39: Celulózové vlákno S-CEL 7G (vpravo 100 x zvětšené) [99]	65
Obrázek 40: Marshallova tělesa směsí SMA 11S s různým obsahem asfaltového pojiva.....	66
Obrázek 41: Předmětný úsek silnice II/227	83
Obrázek 42: Roční RPDÍ na II/227 a R6 (v roce 2010)	83
Obrázek 43: Objízdná trasa během rozšíření dálnice D6 mezi Prahou a Karlovými Vary Řešený (zeleně - zahájení řešení úseku v roce 2017, červeně – průběh objízdné trasy)	84
Obrázek 44: Obalovna firmy Froněk, spol. s r.o.	86
Obrázek 45: Dovoz asfaltových směsí na zkušební úsek II/227	86
Obrázek 46: Pokládka obrusné vrstvy pomocí finišeru	87
Obrázek 47: Hutnění obrusné vrstvy ze směsi SMA 11S pomocí hutnicích válců.....	87
Obrázek 48: Podrcení povrchu směsi typu SMA 11S frakcí kameniva 0/4 pro zlepšení protismykových vlastností	88
Obrázek 49: Povrch vozovky před podrcením a po posypu jemnou frakcí pro zaválcování... 88	
Obrázek 50: Zkušební úsek po realizaci v roce 2016.....	89
Obrázek 51: Zkušební úsek v září 2018 (varianta směsi 18).....	89
Obrázek 52: Stav varianty směsi 17 v září 2018, lze vidět ojetý asfaltový film z kameniva a tím zajištění dobrých protismykových vlastností povrchu vozovky	90
Obrázek 53: Stav varianty směsi označené číslem 11 v září 2018	90
Obrázek 54: Stav detailu napojení šterbinového žlabu poblíž železničního přejezdu v září 2018	91
Obrázek 55: Stav varianty směsi 1 v září 2018	91
Obrázek 56: Směs 5 - síto frakce 1 mm, lze vidět obsažené celulózové vlákno.....	96
Obrázek 62: Směs 16 – síto 8 a 0,125, lze vidět obsažený pryžový granulát	96
Obrázek 58: Detail vyjeté koleje zkušebního tělesa směsi 13.....	100
Obrázek 59: Detail vyjeté koleje zkušebního tělesa směsi 10.....	100
Obrázek 60: Detail vyjeté koleje zkušebního tělesa směsi 15.....	100
Obrázek 61: Směs 1-2 detail porušení tělesa vlivem působení kryogenního napětí.....	103
Obrázek 62: Směs 11 detail porušení tělesa vlivem působení kryogenního napětí	103

16. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

A) Symboly a zkratky (latinské názvy)

<i>A</i>		Rakousko
<i>AC</i>		Asfaltový beton (Asphalt concrete)
<i>ACO</i>		Asfaltový beton pro obrusné vrstvy
<i>ACL</i>		Asfaltový beton pro ložní vrstvy
<i>ACP</i>		Asfaltový beton pro podkladní vrstvy
<i>APP</i>		Ataktický polypropylen
<i>ASTM</i>		Americká společnost pro zkoušení a materiály (American Society for Testing and Materials)
a_T	[-]	Shift factor
b	[m]	Šířka
<i>BBR</i>		Průhybový trámečkový reometr (Bending Beam Rheometer)
c_1		Materiálový součinitel
c_2		Materiálový součinitel
<i>CEN</i>		Evropský výbor pro normalizaci (Comité Européen de Normalisation)
<i>CRmB</i>		Asfalt modifikovaný pryžovým granulátem (Crumb Rubber Modified Bitumen)
<i>CZ</i>		Česká republika
<i>ČSN</i>		Česká technická norma
<i>D</i>		Německo
D	[mm]	Velikost horního síta
D	[mm]	Průměr
d	[mm]	Velikost spodního síta
d_{5000}	[mm]	Hloubka vyjeté koleje po 5 000 cyklech
d_{10000}	[mm]	Hloubka vyjeté koleje po 10 000 cyklech
<i>DK</i>		Dánsko
<i>DSR</i>		Dynamický smykový reometr (Dynamic Shear Rheometer)
E	[Pa]	Modul pružnosti
E_1	[Pa]	Reálná složka modulu tuhosti
E_2	[Pa]	Imaginární složka modulu tuhosti
<i>EAPA</i>		Evropská asociace asfaltových vozovek (European Asphalt Pavement Association)
<i>EFRA</i>		Program efektivní rafinace
<i>EN</i>		Evropská norma
<i>EPDM</i>		Etylen-propylen-dienového kaučuku (Ethylen-propylen-dien)
<i>ESAL</i>		Ekvivalentní zatížení jednou nápravou (Equivalent Single Axle Load)
<i>EVA</i>		Etylvinylacetát (Ethylene-vinyl acetate)

f	[Hz]	Frekvence
F	[N]	Síla
FL		Plovoucí částice
G	[Pa]	Modul pružnosti ve smyku
G^*	[Pa]	Komplexní smykový modul
G'	[Pa]	Reálná elastická část komplexního smykového modulu
G''	[Pa]	Viskózní složka komplexního smykového modulu
GPC		Gelová chromatografie (Gel Permeation Chromatography)
h	[m]	Výška
$HiMA$		Vysoce modifikované asfaltové pojivo (Highly Modified Asphalt)
HRA		Hot Rolled Asphalt
I_p	[-]	Penetrační index
$ITSR$		Zkouška odolnosti asfaltové směsi vůči negativním účinkům vody (Indirect tensile strength ratio)
ITT		Initial type testing (počáteční zkouška typu)
J_{nr}	[-]	Nevratná smyková poddajnost
$J_{nr;0,1(3,2)}$	[-]	Průměrná smyková poddajnost
$J_{nr;diff}$	[%]	Procentuální rozdíl ve smykové poddajnosti
KK		Kroužek a kulička
L	[mm]	Rozpětí
m_1	[g]	Hmotnost pyknometru s nástavcem
m_1	[g]	Hmotnost suchého zkušební tělesa
m_2	[g]	Hmotnost pyknometru s nástavcem a vzorkem
m_2	[g]	Hmotnost zkušební tělesa ve vodě
m_3	[g]	pyknometru s nástavcem, vzorkem a vodou/rozpuštědlem
m_3	[g]	Hmotnost zkušební tělesa nasyceného vodou a povrchově osušeného
MA		Litý asfalt (Mastic asphalt)
$MSCR$		Multiple Stress Creep Recovery
NL		Nizozemsko
$NTAS$		Nízkoteplotní asfaltové směsi
P	[N]	Působící síla
PA		Asfaltový koberec drenážní (Porous Asphalt)
PAU		Polycyklické aromatické uhlovodíky (olyaromatic hydrocarbons)
PE		Polyetylen
PG		Užitná třída (Performance grade)
PL		Polsko
PmB		Polymerem modifikovaný asfalt (Polymer modified Bitumen)
PRV_{AIR}	[%]	Průměrná poměrná hloubka vyjeté koleje
PSV		Hodnota ohladitelnosti (Polished Stone Value)
R_b		Recyklát ze zdiva

R_C		Recyklát z betonu
R_N	[%]	Elastické zotavení
R_u		Recyklát z vozovek
RA		Asfaltový recyklát (Reclaimed asphalt)
RAP		Asfaltový recyklát z vozovek (Reclaimed asphalt pavement)
RC		Označení asfaltových pojiv vhodných do R-materiálů
$RPDI$		Roční průměrná denní intenzita
RSM		Recyklovaný stavební materiál – recyklát
$RTFOT$		Tepelná stálost v tenké pohybuující se vrstvě (Rolling Thin Film Oven Test)
$S(t)$	[Pa]	Časově závislá ohybová tuhost
SBR		Styrén-butadién styren-butadien
SBS		Styrén-butadién-styrén (Styrene-Butadien-Styrene)
SDO		Stavební a demoliční odpad
SEC		Chromatografie s vyloučením velikosti (Size Exclusion Chromatography)
$SHRP$		Strategický výzkumný program (The strategic Highway Research Program)
SMA		Asfaltový koberec mastixový (Stone mastic asphalt)
$SMA B C$		Asfaltový koberec mastixový pro ložní vrstvy (Stone mastic asphalt for binder courses)
$SMA NR$		Asfaltový koberec mastixový pro snížení hlučnosti (Stone mastic asphalt noise reduction)
SWE		Švédsko
T	[K]	teplota
T_{BBR}	[°C]	Kritická teplota z BBR
T_{KK}	[°C]	Teplota bodu měknutí metodou kroužek a kulička
t_{Rab}	[°C]	Teplota bodu měknutí
T_{VE}	[°C]	Teplota viskoelastického přechodu
$TAČR$		Technologická agentura České republiky
TP		Technické podmínky
TR		Turecko
$TSRST$		Jednoosá zkouška tahem (The Thermal Stress Restrained Specimen Test)
USA		Spojené státy americké
USD		Americký dolar
V_p	[m ³]	Objem pyknometru při naplnění po referenční značce nástavce
VE		Viskoelastický
VFB		Mezery zaplněné pojivem
WLF		Williams–Landel–Ferry model
VMA		Mezerovitost kameniva

WTS_{AIR}	[mm/103 zatěžovacích cyklů]	Přírůstek hloubky vyjeté koleje
VS		Mezerovitost tělesa
X		Jiné částice
Y		Ostatní částice
ZTV		Dodatečné technické podmínky smlouvy (Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen)

B) Řecké symboly

δ	[°]	Úhel fázového posunu (ztrátový úhel)
$\delta(t)$	[mm]	Časově závislé přetvoření (průhyb) trámečku
Δ	[°C]	Teplotní rozsah oboru použitelnosti
ΔT_{cr}	[°C]	Rozdíl kritických teplot
ε	[1/s]	Přetvoření
ε	[-]	Relativní přetvoření
ε_1	[%]	Celkové přetvoření
ε_{10}	[%]	Nevratná část přetvoření
η	[Pa·s]	Dynamická viskozita
σ	[Pa]	Napětí
ρ	[kg·m ³]	Hustota
ρ_{bssd}	[Mg/m ³]	Objemová hmotnost SSD
ρ_b	[kg/m ³]	Objemová hmotnost zkušebního tělesa
ρ_m	[kg/m ³]	Maximální objemová hmotnost asfaltové směsi
ρ_{mv}	[Mg/m ³]	Maximální objemová hmotnost asfaltové směsi
ρ_{ref}	[kg/m ³]	Referenční hustota
ρ_w	[kg/m ³]	Hustota vody/rozpouštědla

17. PŘÍLOHA – CERTIFIKOVANÁ METODIKA

Metodika aplikace R-materiálu do asfaltových směsí typu SMA (Stone mastix asphalt)

Metodika je výsledkem řešení projektu Technologické agentury České republiky TA04031328 s názvem „Recyklace asfaltových koberců mastixových a vývoj speciálního celulózového vlákna do těchto typů směsí“.

Autoři:

Ing. Petr Hýzl, Ph.D., doc. Dr. Ing. Michal Varaus, Ing. Iva Coufalíková
(Vysoké učení technické v Brně);

Ing. Petr Mondschein, Ph.D., Ing. Jan Valentin, Ph.D.,
(České vysoké učení technické v Praze);

Radek Pazyna, Ing. Kamil Hrbek
(Froněk spol. s r.o.).

Ing. František Buráň
(CIUR a.s.)

V Brně, říjen 2017

1. Cíl metodiky

Cílem metodiky je popsat způsob použití R-materiálu v asfaltových směsích typu SMA (Stone mastix asphalt) na šaržových obalovnách v České republice. Metodika uvádí postup zpracování R-materiálu na obalovnách asfaltových směsí včetně přípravy kameniva, asfaltového pojiva a R-materiálu. Metodika má sloužit investorským organizacím a výrobním firmám pro správné provádění postupů při výrobě asfaltových směsí typu SMA s R-materiálem. Ekonomická efektivita využití R-materiálu v nově vyráběných směsích se odvíjí od množství použitého R-materiálu, ceny R-materiálu a způsobu jeho úpravy.

2. Vlastní popis metodiky

2.1 Úvod

Recyklace stavebních materiálů je nezbytným předpokladem udržitelného rozvoje a překlenutí rozporu mezi ekonomickým růstem a ochranou životního prostředí.

Netuhé (asfaltové) konstrukce vozovek pozemních komunikací jsou významným materiálovým zdrojem. Vyfrézované nebo vybourané asfaltové směsi, získané při opravách či rekonstrukcích netuhých vozovek lze opět ve formě R-materiálu využít pro výrobu nových asfaltových směsí.

Tento R-materiál obsahuje jednak kamenivo, jehož kvalita nebyla jeho prvním využitím v asfaltové směsi nijak zhoršena a dále asfaltové pojivo, u něhož lze v případě potřeby provést jeho ošetření a znovu ho použít do nově vyráběné asfaltové směsi.

Využití R-materiálu v nově za horka zpracovávaných asfaltových směsích je tedy nezbytným předpokladem pro zodpovědné hospodaření s přírodními zdroji, jako jsou kamenivo a asfaltová pojiva a představuje nejefektivnější způsob jeho využití.

V současné době Česká republika v oblasti využívání R-materiálu zaostává za západoevropskými zeměmi. Důvodem jsou často neoprávněné obavy ze strany investorů o kvalitě asfaltových směsí s R-materiálem, neexistence účinných pobídkových mechanismů k efektivnějšímu zpracování R-materiálu a v neposlední řadě také omezující legislativní a normové požadavky. Hlavní důvody pro využívání R-materiálu v nově vyráběných asfaltových směsích jsou uvedeny v následujícím přehledu:

Zachování materiálových a energetických zdrojů

- materiálové zdroje (kamenivo, asfalt)
- energetické zdroje (pohonné hmoty, topná média atd.)

Ochrana životního prostředí

- redukce skleníkových plynů, zejména CO₂
- snížení znečištění ovzduší (výfukové plyny, hluk)
- omezení skládek

Ekonomický přínos

- snížení nákladů
- snížení zatížení komunikací

2.2. Asfaltové směsi typu SMA s R-materiálem

R-materiál, který je přidáván do nových asfaltových směsí typu SMA je vyfrézovaná asfaltová směs, získaná odděleným frézováním obrusné vrstvy vozovky, tvořené asfaltovou směsí typu SMA, která je následně předrcena na vhodnou frakci.

Vhodnou frakcí kameniva pro dávkování do nově vyráběných asfaltových směsí typu SMA může být v podmínkách ČR frakce 0/11 mm. Ideální dobou pro předrcení R-materiálu je podzimní nebo zimní období, kdy R-materiál již není tolik lepkavý a lépe se zpracovává.

Jako vhodný pro tyto účely je např. moderní mobilní drtící a třídící technologická linka firmy Benninghoven viz Obrázek 1. Primární drtič této technologické linky je schopen zpracovat bloky o velikosti až 1800 mm. Tyto bloky jsou tlačeny na rotor se zuby, kde dochází k šetrnému omílání bloků. Takto upravený materiál je dopravován přes dopravníkový pás, nad kterým je odlučovač kovových částic. Poté probíhá druhý stupeň drcení na výslednou požadovanou frakci. Výhodou celého systému je malé množství jemných částic po zpracování. Další výhodou je, že nedochází k drcení kameniva v recyklátu.

a) násypka s drtičem



b) magnetický separátor s drtičem



c) vibrační síta s drtičem



Obrázek 1 Stacionární technologická linka pro drcení asfaltového recyklátu

Pro výslednou kvalitu nově vyráběné asfaltové směsi typu asfaltový koberec mastixový je důležitá homogenita R-materiálu.

Pro zajištění homogenity přidávaného R-materiálu je potřebné zajistit jeho oddělené skládkování, vzhledem k vyšší kvalitě použitého kameniva a předpokladu přítomnosti modifikovaného asfaltového pojiva.

Při odděleném skládkování R-materiálu ze směsí typu SMA a jeho opětovném použití do stejné vrstvy se použije zrnitostně přibližně stejný materiál, u kterého již není nutno se podrobně zabývat kvalitou kameniva, protože lze předpokládat, že tato byla v minulosti již jednou ověřena.

Zastřešením skladovaného R-materiálu je zabráněno pronikání srážkové vody a následně je docíleno úspory paliv při předehřívání R-materiálu v paralelním sušícím bubnu nebo omezen problém s tvorbou páry při dávkování R-materiálu zastudena.



Obrázek 2 Zastřešení skládky předrceného R-materiálu

Dále je zapotřebí průběžně sledovat i **obsah pojiva** a též **čáru zrnitosti** na kamenivu R-materiálu po extrakci pojiva. Jako dostačující je sledování propadu na síť 0,063 mm, 2 mm a propadu na nominální síť.

Počet vzorků n , na kterém se stanovení provádí, bude vycházet z množství zásoby upraveného R-materiálu v tunách podělené 500 t a zaokrouhlené nahoru, s minimálním počtem 5 vzorků. Znovuzískání pojiva ze směsí pro zkoušení se provede podle ČSN EN 12697-3. R-materiál se zkontroluje, zda neobsahuje cizorodé látky podle ČSN EN 12697-42.

2.3. Úprava R-materiálu používaného do směsí typu SMA

Vzhledem k tomu, že modifikované asfaltové pojivo obsažené v přidávaném R-materiálu může mít nižší výkonové parametry vzhledem k jeho zestárnutí, **doporučuje** se provést jeden z níže uvedených kroků, případně jejich kombinace:

- použít nově přidávané modifikované pojivo, které má o jednu kategorii vyšší deklarovanou hodnotu bodu měknutí, oproti pojivu předepsanému předpisy,
- použít nově přidávané modifikované pojivo skupiny „RC“ (určené pro recyklace),
- přidávat vhodnou modifikační přísadu (buď samostatně, nebo např. ve formě celulózových vláken nasycených přísadou).

V případě směsí typu SMA, kde je možné provádět dávkování R-materiálu v množství do 20 %, je pro kvalitu výsledné asfaltové směsi zapotřebí ověřit vstupní parametry směsného pojiva, tedy pojiva vyextrahovaného z R-materiálu a nově přidávaného pojiva. Při použití nově přidávaného pojiva typu PMB dle ČSN 65 7222-1 (což bude s největší pravděpodobností většina případů), je nutno splnit vybrané základní požadavky na směsné pojivo dle výsledného deklarovaného druhu modifikovaného pojiva dle výše citované normy (např. PMB 25/55-60). Jedná se o požadavek na penetraci, bod měknutí a vratnou duktilitu.

Penetrace/bod měknutí přidávaného pojiva, znovuzískaného pojiva a směsného pojiva se stanoví podle ČSN EN 1426/ČSN EN 1427. Vratná duktilita přidávaného pojiva, znovuzískaného pojiva a směsného pojiva se stanoví podle ČSN EN 13398.

2.4. Technologie výroby asfaltové směsi typu SMA s obsahem R-materiálu

R-materiál, jehož parametry vyhovují požadavkům uvedeným v kapitole 2.2., může být do nově vyráběných asfaltových směsí typu SMA (Asfaltový koberec mastixový) přidán v množství do 20%.

V současné době se lze v České republice setkat s následujícími způsoby aplikace R-materiálu do nově vyráběných asfaltových směsí:

a) Aplikace R-materiálu zastudena

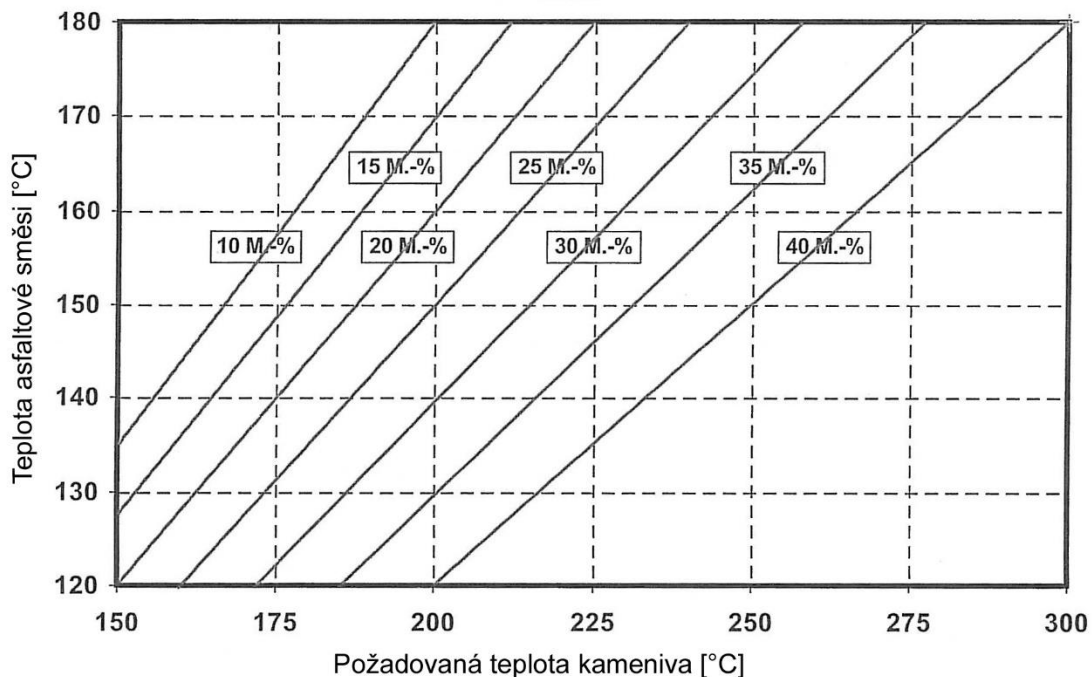
V současnosti je v České republice vybaveno zařízením na přidávání studeného R-materiálu do asfaltových směsí přibližně 40 % šaržových obaloven. Přidávání R-materiálu se provádí buď přímo do míchačky přes samostatnou váhu, nebo je R-materiál skladován v zásobníku stejně jako ostatní přetříděné frakce kameniva a dávkuje se přes váhu stejně jako kamenivo.

Tyto způsoby přidávání R-materiálu vyžadují potřebu předeřhřátí nového kameniva na vyšší teplotu s ohledem na:

- výslednou teplotu směsi,
- vlhkost, kterou zpracováváný R-materiál obsahuje.

Přechod tepla z horkého kameniva na R-materiál probíhá u této technologie během krátké doby. Při tomto procesu vzniká vodní pára, která musí být odvedena účinným odvětrávacím zařízením.

Teplota přehřátí kameniva v závislosti na výsledné teplotě asfaltové směsi je uvedena v Obrázku 3, který je převzat ze zahraničních materiálů. Následující Tabulka 1 pak uvádí korekce na teplotu v závislosti na obsahu vody v přidávaném R-materiálu.



Obrázek 3: Požadovaná teplota kameniva v °C při přidání R-materiálu za studena

Tabulka 1: Korekce teploty kameniva v závislosti na obsahu vody v R-materiálu

Podíl R-materiálu v % hm.	Vlhkost R-materiálu v %					
	1	2	3	4	5	6
	Korektura (zvýšení) teploty v °C					
10	4	8	12	16	20	24
15	6	12	18	24	30	36
20	8	16	24	32	40	48

Další možností přidávání R-materiálu za studena je v kontinuální obalovně typu drum-mix.

V kontinuální obalovně se pak R-materiál dávkuje ve střední části sušícího a ohřívacího bubnu průběžně, následně se míchá s kamenivem a asfaltovým pojivem, popř. probíhá míchání v samostatné míchací jednotce.

b) Aplikace ohřátého R-materiálu

Za účelem přidávání ohřátého R-materiálu jsou již některé obalovny asfaltových směsí vybaveny tzv. paralelním bubnem. V paralelním bubnu šaržové obalovny se R-materiál ohřívá na teplotu cca 130°C.



Obrázek 4: Šaržová obalovna s paralelním sušícím bubnem, umístěným v horní části obalovny

3. Srovnání „novosti postupů“

V České republice nebylo doposud umožněno dávkovat R-materiál do asfaltových směsí typu SMA. Na základě:

- zahraničních zkušeností,
- provedených laboratorních prací v rámci výzkumného projektu TA04031328 s názvem „Recyklace asfaltových koberců mastixových a vývoj speciálního celulózového vlákna do těchto typů směsí“ a
- realizace několika pokusných úseků

bylo prokázáno, že vhodně upravený R-materiál je možné při dodržení zásad popsanych v této metodice, dávkovat do nově vyráběných směsí typu SMA v množství do 20% bez jakékoliv obavy o negativním ovlivnění kvality nově vyráběné asfaltové směsi typu SMA.

4. Přínos a popis uplatnění certifikované metodiky

Přínosem uvedené metodiky je umožnění dávkování R-materiálu, získaného odděleným frézováním obrusných vrstev vozovek ze směsí typu SMA, do nově vyráběných směsí typu SMA při dodržení v této metodice popisovaných pravidel. Metodika je určena především pro Ministerstvo dopravy ČR, Ředitelství silnic a dálnic ČR a výrobní firmy, které touto metodikou získají popis a pravidla pro technicky správnou aplikaci R-materiálu do nově vyráběných asfaltových směsí typu asfaltový koberec mastixový (SMA).

5. Ekonomické aspekty

Investice do budování a oprav silniční infrastruktury jsou základním pilířem a předpokladem ekonomické úspěšnosti a dalšího rozvoje České republiky. Jak bylo již uvedeno výše, asfaltové vozovky jsou významným materiálovým zdrojem. Vyfrézované nebo vybourané asfaltové směsi, získané při opravách či rekonstrukcích netuhých vozovek lze opět ve formě vhodně upraveného R-materiálu využít pro výrobu nových asfaltových směsí.

Tento R-materiál obsahuje jednak kamenivo, jehož kvalita nebyla jeho prvním využitím v asfaltové směsi nijak zhoršena a dále asfaltové pojivo, u něhož lze v případě potřeby provést jeho ošetření a znovu ho použít do nově vyráběné asfaltové směsi.

Ve využití R-materiálu v nově za horka zpracovávaných asfaltových směsích lze tedy

spatřovat jak ekonomické tak i ekologické přínosy této metodiky.

6. Seznam použité související literatury

ČSN EN 13108-5 ed.2 Asfaltové směsi – Specifikace pro materiály – Část 5: Asfaltový koberec mastixový

ČSN EN 13108-8 ed.2 Asfaltové směsi – Specifikace pro materiály – Část 8: R-materiál

ČSN EN 932-1 Zkoušení všeobecných vlastností kameniva – Část 1: Metody odběru vzorků

ČSN EN 933-1 Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Síťový rozbor

ČSN EN 1426 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou

ČSN EN 1427 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička

ČSN EN 13398 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení vratné duktility modifikovaných asfaltů

ČSN EN 12697-1 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 1: Obsah rozpustného pojiva

ČSN EN 12697-2 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 2: Stanovení zrnitosti

ČSN EN 12697-3 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 3: Znovuzískání extrahovaného pojiva – Rotační vakuové destilační zařízení

ČSN EN 12697-4 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 4: Znovuzískání extrahovaného pojiva: Frakcionační kolona

ČSN EN 12697-42 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 42: Obsah cizorodých látek v asfaltovém recyklátu

ČSN 73 6160 Zkoušení asfaltových směsí

ČSN EN 13043 Kamenivo pro asfaltové směsi a povrchové vrstvy pozemních komunikací, letištních a jiných dopravních ploch

ČSN 65 7222-1 Asfalty a asfaltová pojiva – Silniční modifikované asfalty – Část 1: Polymerem modifikované asfalty

7. Seznam publikací, které předcházely metodice

HÝZL, P.; COUFALÍKOVÁ, I.; VARAUS, M.; HRBEK, K.; PAZYNA, R.; MONDSCHHEIN, P.; VALENTIN, J.; BURÁŇ, F., Výroční zprávy z řešení projektu Technologické agentury ČR TA04031328 „Recyklace asfaltových koberců mastixových a vývoj speciálního celulózového vlákna do těchto typů asfaltových směsí“, 2014-2017

HÝZL, P.; COUFALÍKOVÁ, I.; VARAUS, M.; HRBEK, K.; PAZYNA, R.; BOHUSLAV, J.; MONDSCHHEIN, P.; BURÁŇ, F.; URBÁNEK, M., Využití R-materiálu v asfaltových směších typu SMA, příspěvek na konferenci *Asfaltové vozovky 2017*, České Budějovice, 2017

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

COUFALÍKOVÁ, I.; HÝZL, P.; NEKULOVÁ, P.; COUFALÍK, P.; DAŠEK, O., Use of Rejuvenators to Rejuvenate Asphalt Binders in RAPs, příspěvek na konferenci *Engineering Materials and Technology, ICMSET 2016*, ISBN 978-3-0357-1033-5, 2017

COUFALÍKOVÁ, I.; HÝZL, P.; COUFALÍK, P.; DAŠEK, O., Využití recyklovaného materiálu v asfaltových kobercích mastixových, příspěvek na konferenci *Zborník Přednášok z konferencie Výstavba a rehabilitácia asfaltových vozoviek*, ISBN 978-80-232-0333-2, Etela Bačenková - Dom techniky, Košice, 2017

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

Recyklace asfaltových vozovek – poznatky Asociace výrobců asfaltových směsí EAPA (European Asphalt Pavement Association), Brussels, 2012

TL AG-StB 06, Technische Lieferbedingungen für Asphaltgranulat, FGSV, Německo, 2006

8. Dedikace na projekt

Metodika je výsledkem řešení projektu Technologické agentury České republiky TA04031328 s názvem „Recyklace asfaltových koberců mastixových a vývoj speciálního celulózoového vlákna do těchto typů směsí“.

9. Vypracování metodiky

Ing. Petr Hýzl, Ph.D., doc. Dr. Ing. Michal Varaus, Ing. Iva Coufalíková
(Vysoké učení technické v Brně);

Ing. Petr Mondschein, Ph.D., Ing. Jan Valentin, Ph.D.,
(České vysoké učení technické v Praze);

Radek Pazyna, Ing. Kamil Hrbek
(Froněk spol. s r.o.).

Ing. František Buráň
(CIUR a.s.)

10. Jména oponentů a názvy jejich organizací

Ing. Jiří Škrabka, vedoucí samostatného oddělení zkušebnictví Praha, Ředitelství silnic a
dálnic ČR

Ing. Milan Slavíček, SILMOS-Q s.r.o., Křížíkova 70, 612 00 Brno