VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

MODIFIKOVANÁ ASFALTOVÁ POJIVA

PMB - POLYMER MODIFIED BITUMENS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE MICHAELA VENCLÍKOVÁ
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. PETR HÝZL, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2016

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav pozemních komunikací

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Michaela Venclíková
Název	Modifikovaná asfaltová pojiva
Vedoucí bakalářské práce	Ing. Petr Hýzl, Ph.D.
Datum zadání bakalářské práce	30. 11. 2015
Datum odevzdání bakalářské práce	27. 5. 2016

V Brně dne 30. 11. 2015

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ fakulta stavební DĚKANÁT - 1 -

doc. Dr. Ing. Michal Varaus
Vedoucí ústavu

N. z.
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

ČSN EN 14023 Asfalty a asfaltová pojiva - Systém specifikace pro polymerem modifikované asfalty
Normy pro empirické a funkční zkoušení asfaltových pojiv
Firemní materiály
Internetové zdroje

Zásady pro vypracování (zadání, cíle práce, požadované výstupy)

V bakalářské práci bude pozornost věnována modifikovaným asfaltovým pojivům. V rámci práce budou laboratorně připraveny vzorky modifikovaných pojiv. Následně budou stanovovány vybrané empirické a funkční vlastnosti.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

Hýzl Petr

.....

Ing. Petr Hýzl, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

Abstrakt

V této bakalářské práci bude věnována pozornost modifikaci asfaltových pojiv. Laboratorně bude připravena sada modifikovaných asfaltových pojiv s různým stupněm modifikace. Na těchto vzorcích budou následně prováděny základní empirické zkoušky a funkční zkouška DSR. Cílem práce je najít optimální zdroj nemodifikovaného silničního asfaltu pro modifikaci.

Klíčová slova

Asfalt, přírodní asfalt, ropný asfalt, asfaltová pojiva, modifikovaný asfalt, polymerem modifikovaný asfalt, teplota, penetrace jehlou, bod měknutí, metoda kroužek a kulička, bod lámavosti podle Fraasse, vratná duktilita, dynamický smykový reometr, komplexní smykový modul, fázový úhel.

Abstract

In this bachelor thesis, there are described modified bitumens. The issue of modified bitumens will be explained in the theoretical part. In the practical part, it will be prepared set of modified bituminous binders with different degree of modification. Basic empirical testing and functional testing will be determined. The aim of thesis is to find the optimal source of unmodified bitumen for modification.

Keywords

Bitumen, natural bitumen, petroleum bitumen, bituminous binders, modified bitumen, polymer modified bitumen, temperature, needle penetration, softening point, ring and ball method, Fraass breaking point, elastic recovery, dynamic shear rheometer, complex shear modulus, phase angle.

Bibliografická citace VŠKP

VENCLÍKOVÁ, Michaela. *Modifikovaná asfaltová pojiva.* Brno, 2016. 71 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Petr Hýzl, Ph.D.

Prohlášení

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

V Brně dne 27. 5. 2016

……

podpis autora

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Hýzlovi, Ph.D. za vzorné vedení při zpracování této práce. Dále děkuji zaměstnancům laboratoře Ústavu pozemních komunikací VUT FAST v Brně, především Matěji Šafránkovi za ochotu a rady. V neposlední řadě bych ráda poděkovala celé své rodině, která mě podporovala během studia.

OBSAH

1 ÚVOD 11
2 DOSAVADNÍ STAV PROBLEMATIKY 12
2.1 Charakteristické vlastnosti asfaltů 12
2.2 Základní druhy asfaltů 13
2.3 Modifikovaný asfalt 15
2.4 Rozdělení modifikátorů 16
2.5 Označování asfaltů 17
2.6 Produkce asfaltů 18
3 CÍL PRÁCE 20
4 PRAKTICKÁ ČÁST 21
4.1 Použité materiály 21
4.1.1 Výchozí materiály 21
4.1.2 Varianty zkoušení 21
4.1.3 Vzorky pojiv 22
4.2 Použité zkušební metody 26
4.2.1 Výroba modifikovaných asfaltových pojiv 26
4.2.2 Stanovení penetrace jehlou 27
4.2.2.1 Podstata metody 27
4.2.2.2 Přístroje a pomůcky 27
4.2.2.3 Příprava vzorku na zkoušku 27
4.2.2.4 Postup zkoušky 28
4.2.2.5 Vyjádření výsledků 29
4.2.3 Stanovení bodu měknutí 30
4.2.3.1 Podstata metody 30
4.2.3.2 Činidla a materiály 30
4.2.3.3 Přístroje a pomůcky 30
4.2.3.4 Příprava vzorku na zkoušku 30
4.2.3.5 Postup zkoušky 31
4.2.3.6 Vyjádření výsledků 33
4.2.4 Stanovení bodu lámavosti podle Fraasse 34
4.2.4.1 Podstata metody 34
4.2.4.2 Přístroje a pomůcky 34

4.2.4.3 Příprava vzorku na zkoušku ... 35
4.2.4.4 Postup zkoušky ... 35
4.2.4.5 Vyjádření výsledků ... 36
4.2.5 Stanovení vratné duktility ... 37
4.2.5.1 Podstata metody ... 37
4.2.5.2 Činidla a materiály ... 37
4.2.5.3 Přístroje a pomůcky ... 37
4.2.5.4 Příprava vzorku na zkoušku ... 37
4.2.5.5 Postup zkoušky ... 38
4.2.5.6 Vyjádření výsledků ... 39
4.2.6 Zkouška DSR ... 40
4.2.6.1 Podstata metody ... 40
4.2.6.2 Přístroje a pomůcky ... 40
4.2.6.3 Příprava vzorku na zkoušku ... 40
4.2.6.4 Postup zkoušky ... 41
4.2.6.5 Vyjádření výsledků ... 41
4.3 Výsledky a vyhodnocení ... 42
4.3.1 Stanovení penetrace jehlou ... 42
4.3.1.1 Výsledky - výchozí materiály ... 42
4.3.1.2 Výsledky - varianty s asfaltem 50/70 Litvínov ... 43
4.3.1.3 Výsledky - varianty s asfaltem 50/70 MOL ... 44
4.3.1.4 Výsledky - porovnání Litvínov/MOL ... 45
4.3.2 Stanovení bodu měknutí ... 46
4.3.2.1 Výsledky - výchozí materiály ... 46
4.3.2.2 Výsledky - varianty s asfaltem 50/70 Litvínov ... 46
4.3.2.3 Výsledky - varianty s asfaltem 50/70 MOL ... 47
4.3.2.4 Výsledky - porovnání Litvínov/MOL ... 48
4.3.3 Stanovení bodu lámavosti podle Fraasse ... 49
4.3.3.1 Výsledky - výchozí materiály ... 49
4.3.3.2 Výsledky - varianty s asfaltem 50/70 Litvínov ... 49
4.3.3.3 Výsledky - varianty s asfaltem 50/70 MOL ... 50
4.3.3.4 Výsledky - porovnání Litvínov/MOL ... 51
4.3.4 Stanovení vratné duktility ... 52
4.3.4.1 Výsledky - výchozí materiály ... 52

4.3.4.2 Výsledky - varianty s asfaltem 50/70 Litvínov 52
4.3.4.3 Výsledky - varianty s asfaltem 50/70 MOL 53
4.3.4.4 Výsledky - porovnání Litvínov/MOL 54
4.3.5 Zkouška DSR 55
4.4 Porovnání výsledků s modifikační stanicí 58
4.4.1 Stanovení penetrace jehlou 58
4.4.2 Stanovení bodu měknutí 60
4.4.3 Stanovení bodu lámavosti 61
4.4.4 Stanovení vratné duktility 62
5 ZÁVĚR 63
6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY 65
7 SEZNAM GRAFŮ 68
8 SEZNAM OBRÁZKŮ 70
9 SEZNAM TABULEK 71

1 ÚVOD

Doprava je nedílnou součástí života každého z nás. Nejpoužívanějším způsobem dopravy v České republice je silniční doprava, která zajišťuje osobní a nákladní přepravu. Vlivem rozvoje silniční dopravy prochází výstavba pozemních komunikací pozoruhodným vývojem. Začátek bouřlivého rozvoje automobilové dopravy v České republice je spojován s obdobím po roce 1989.

Nejrozšířenějším typem vozovek jsou netuhé vozovky - vozovky zhotovené z asfaltových vrstev. S rostoucím dopravním zatížením je třeba věnovat se vstupním materiálům nutným k výrobě asfaltové směsi. Základní materiály pro výrobu asfaltové směsi jsou kamenivo a asfalt jako pojivo. Deformace povrchů pozemních komunikací v důsledku enormního nárůstu dopravního zatížení ukazují, jak je důležité neustále zlepšovat vlastnosti těchto materiálů.

Z tohoto důvodu se bakalářská práce věnuje problematice modifikovaných asfaltových pojiv. Jedná se asfaltová pojiva, jejichž vlastnosti jsou zlepšeny přidáním vhodných přísad, které zlepšují chování asfaltových pojiv v oblasti nízkých a vysokých teplot, protože jsou méně citlivé na změny teplot. Asfaltové směsi vyrobené z modifikovaných asfaltových pojiv jsou trvanlivější a odolnější proti tvorbě mrazových trhlin a trvalých deformací. Vlastnosti modifikovaných asfaltů jsou ovlivněny výchozím nemodifikovaným asfaltovým pojivem, ale také druhem a množstvím přidaného modifikátoru.

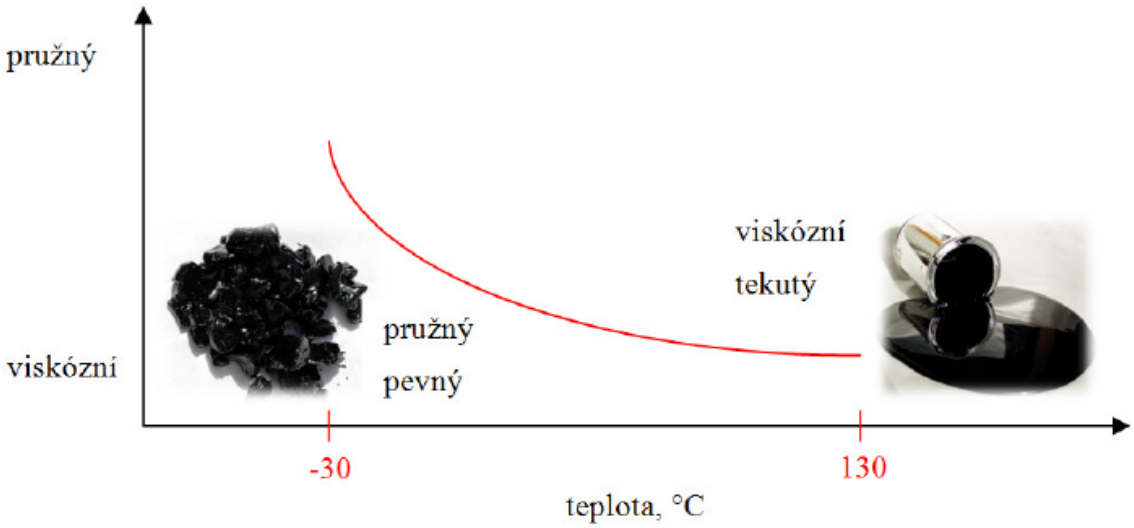
2 DOSAVADNÍ STAV PROBLEMATIKY

Teoretická část bakalářské práce je věnována dosavadnímu stavu řešené problematiky v oblasti modifikovaných asfaltů. V úvodu této kapitoly jsou popsány charakteristické vlastnosti asfaltů a vyjmenovány základní druhy asfaltů. Hlavním cílem této kapitoly je seznámit se s problematikou modifikovaných asfaltových pojiv, jejich označením, použitými modifikátory a produkcí těchto pojiv.

2.1 Charakteristické vlastnosti asfaltů

Asfalt je jedním ze základních stavebních materiálů. V silničním stavitelství se používá zejména jako pojivo do asfaltových a prolévaných vrstev nebo jako základní materiál pro výrobu asfaltových emulzí [1].

Z fyzikálního hlediska jde o amorfní látku neboli látku beztvarou. Nejdůležitější vlastností asfaltového pojiva je teplotní citlivost. Za běžných teplot se asfaltové pojivo chová jako visko - elastický materiál, jehož chování se mění v závislosti na teplotě - viz obrázek 1. V této souvislosti jsou všechny zkoušky asfaltového pojiva udávány s teplotním údajem. Za nízkých teplot se chová jako pružná pevná látka, za vysokých teplot pak jako kapalina, charakterizovaná svou viskozitou [1], [5].



Obrázek 1: Visko - elastické chování asfaltu [26]

Z chemického hlediska se jedná o směs uhlovodíků, ve které je zastoupeno široké spektrum sloučenin. Chemické složení asfaltu lze rozdělit na pevné složky asfaltény a tekuté složky maltény. Asfaltény jsou tuhé částice, které asfalt zahušťují, jsou považovány za nositele tvrdosti asfaltu. Maltény jsou látky olejovitého až pryskyřicového

typu vytvářející prostředí, ve kterém jsou asfaltény rozptýleny. Jsou nositeli plastických a lepivých vlastností asfaltu [1], [5], [17].

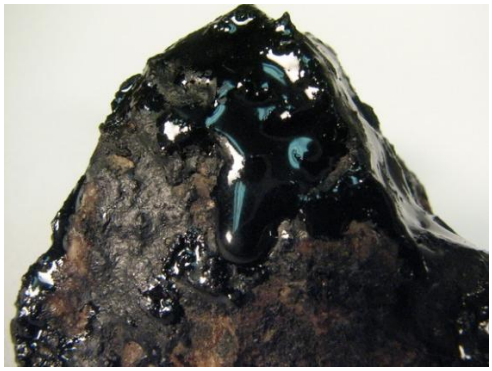
Další velmi nepříjemnou vlastností asfaltu je jeho změna v čase. Asfalt fyzikálními a chemickými procesy (účinkem kyslíku, teploty a ultrafialového záření) stárne. Zvyšuje se podíl asfalténů → asfalt houstne → stává se tvrdším [1], [5].

2.2 Základní druhy asfaltů

Podle původu lze asfalty rozdělit do dvou základních skupin. První skupinou jsou asfalty přírodní, které se vyskytují zřídka. Převážnou většinu tvoří asfalty ropné, které lze získat destilací surové ropy v rafinériích [3].

Přírodní asfalt byl zásluhou vynikajících hydroizolačních a tmelících vlastností používán již ve starověku. Lze jej nalézt pouze na několika místech na světě, případně se získávají vytavením z hornin či zemin, které asfalt obsahují. Vyskytuje se v podobě:

- asfaltitu (asfalt s vysokou tvrdostí a nízkým obsahem minerálních látek);
- asfaltová hornina (asfalt s vysokým obsahem minerálních látek a nízkým obsahem vlastního asfaltu - viz obrázek 2) [17].



Obrázek 2: Ukázka asfaltové horniny [22]

V porovnání s asfaltem ropným je přírodní asfalt mnohem tvrdší. Není zcela vhodný pro přímé použití v silničním stavitelství jako pojivo do asfaltových směsí. Z tohoto důvodu se provádí míchání přírodního asfaltu s měkčím ropným asfaltem. Pro svou tvrdost se však používal zejména při výrobě litých asfaltů, kde veškeré zatížení přenáší asfaltové pojivo. Litý asfalt se používá na chodníky a také do ochranné vrstvy izolace mostních objektů [1], [3].

Největším a nejznámějším nalezištěm přírodního asfaltu na světě je jezero Pitch Lake na ostrově Trinidad. Tento asfalt lze použít jako přísadu do ropných asfaltů. Před samotným použitím se asfalt vytěžený z jezera se čistí zahříváním přibližně na 160 °C a následným prolitím přes síta jej zbavujeme mechanických nečistot. Denně se vytěží přibližně 180 tun, ze kterých zůstane po úpravě asi 140 tun čistého asfaltu. Tento asfalt známý pod názvem Trinidad Epuré, jehož penetrace se pohybuje v rozmezí 0 – 4 p. j. a bod měknutí mezi 93 – 99 °C, je velmi tvrdý. Používá se jako přísada do silničních ropných asfaltů [1], [15].

Ropný asfalt je destilační zbytek z mazutu, který se často upravuje:

- destilační - asfalt získaný přímo po destilaci;
- polofoukané - asfalt, který je upravován oxidací – polofoukáním;
- foukané - vyrábí se obdobným způsobem jako polofoukaný asfalt, při výrobě foukaného asfaltu se však užívá vyšší teplota po delší reakční dobu. Foukané asfalty jsou poté výrazně tvrdší a teplota bodu měknutí se zvyšuje na 80 – 120 °C. Jsou používány zejména jako izolace proti vodě a vlhkosti.
- modifikované - destilační nebo polofoukané asfalty, které jsou upravené přídavkem přísad, použití pro vysoce namáhané vozovky [5].

2.3 Modifikovaný asfalt

Základní vlastností asfaltového pojiva je teplotní citlivost, kterou lze upravit modifikací asfaltu. Asfaltová pojiva, jejichž fyzikální a mechanické vlastnosti byly upraveny přidáním vhodných přísad, se nazývají modifikovaná asfaltová pojiva [1].

Přidáním aditiva lze docílit zlepšení viskoelastického chování původního silničního asfaltového pojiva. Cílem modifikace je zlepšení chování pojiva za vysokých teplot, tj. zvýšení teploty bodu měknutí, a zlepšení chování pojiva za nízkých teplot, tj. snížení teploty bodu lámavosti. Modifikací lze rozšířit obor použitelnosti, tzn. zvětšit teplotní rozsah mezi bodem lámavosti a bodem měknutí - viz obrázek 3 [5].

Obrázek 3: Obor použitelnosti asfaltu [16]

Modifikací silničního asfaltu aditivy lze zlepšit jednu nebo více vlastností asfaltového pojiva. Mezi tyto vlastnosti patří:

- snížení teplotní citlivost asfaltu a jeho křehkosti v oblasti nízkých teplot;
- zvýšení bodu měknutí;
- zlepšení odolnosti proti vzniku trvalých deformací;
- snížení rychlosti stárnutí asfaltu;
- zlepšení přilnavosti asfaltu ke kamenivu [2], [5].

2.4 Rozdělení modifikátorů

Mezi hlavní modifikátory patří přírodní kaučuk, syntetické polymery, organokovové sloučeniny, pryžový granulát nebo síra [27].

V silničním stavitelství se nejčastěji přidávají látky na bázi polymerů. Evropská norma odpovídající této problematice je ČSN EN 14023 - Asfalty a asfaltová pojiva - Systém specifikace pro polymerem modifikované asfalty [8]. Asfalt modifikovaný polymery je v zahraniční literatuře označován zkratkou PmB - Polymer Modified Bitumen. Modifikací silničního asfaltového pojiva polymerními přísadami vznikne, tzv. asfalto - polymerní kompozit [27]. Polymery používané k modifikaci lze rozdělit na elastomery a plastomery [1], [18].

Z elastomerů je nejčastěji používán styren-butadien-styren (SBS), označovaný také jako termoplastický kaučuk [2]. Přidáním elastomeru se asfaltové pojivo chová pružněji. Mírou elastického chování modifikovaných asfaltů je stanovení vratné duktility. Elastomer vytváří v asfaltech strukturu a pojivo se chová oproti nemodifikovaným asfaltům více pružně [18].

V kategorii plastomerů jsou používány kopolymery etylen/vinylacetát (EVA) a etylen/metylmetakrylát (EMA) [2]. Plastomery asfaltové pojivo zahušťují, ovlivňují jeho chování při vysokých teplotách - zvyšují bod měknutí, ale zhoršují jeho chování za nízkých teplot [18].

Dalším možným aditivem přidávaným do silničního asfaltu je pryžový granulát - viz obrázek 4. Granulát se používá pro svou elastičnost, vodopropustnost, odolnost proti povětrnostním vlivům, zdravotní nezávadnosti dále snižuje hlučnost a dlouhodobě udržuje stávající vlastnosti modifikovaných asfaltových směsí. Asfalt modifikovaný pryžovým granulátem je v zahraniční literatuře označován zkratkou CRmB - Crumb Rubber Modified Bitumen [1], [18].

Obrázek 4: Ukázka pryžového granulátu [23]

2.5 Označování asfaltů

Označování asfaltových pojiv se řídí platnými normami dle druhu asfaltového pojiva. V evropském silničním stavitelství systém označování asfaltových pojiv úzce souvisí se zkouškou stanovení penetrace jehlou. Asfalt je vždy označen penetračním zlomkem, který vyjadřuje rozmezí pro něj charakteristické hodnoty penetrace. Pojiva se dále zatříďují do jednotlivých skupin (tvrdé, běžné, měkké) a tříd (gradací) [1].

Při označování modifikovaných asfaltových pojiv je důležitá nejen hodnota penetrace, ale také typická hodnota bodu měknutí. Polymerem modifikovaná asfaltová pojiva lze označit zkratkou PmB - Polymer Modified Bitumen [1].

V praktické části bakalářské práce se vyskytují silniční asfalty a polymerem modifikované asfalty. Evropské normy související s těmito druhy asfaltů jsou:

- ČSN EN 12591 - Asfalty a asfaltová pojiva - Specifikace pro silniční asfalty;
- ČSN EN 14023 - Asfalty a asfaltová pojiva - Systém specifikace pro polymerem modifikované asfalty [7], [8].

V tabulce 1 je uveden příklad označení asfaltových pojiv, která jsou použita dále v práci. Silniční asfalt je označen pouze penetračním zlomkem 50/70. Modifikovaná asfaltová pojiva jsou označena jednak penetračním zlomkem a dále také bodem měknutím charakteristickým pro dané pojivo.

Tabulka 1: Označení asfaltových pojiv v bakalářské práci

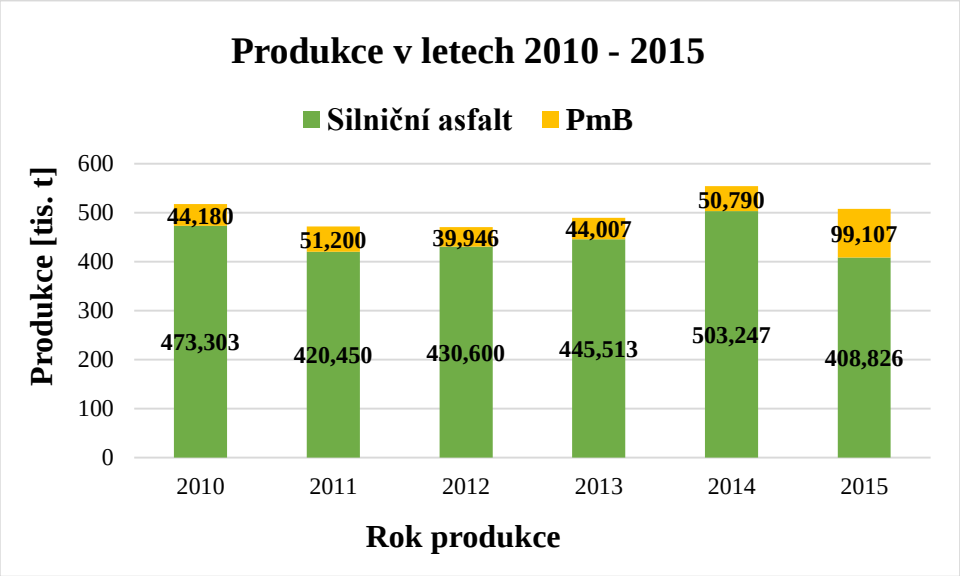
Označení pojiva	Penetrace [p. j.]	Bod měknutí [˚C]
50/70	50 - 70	/
PmB 45/80-55	45 - 80	55
PmB 45/80-65	45 - 80	65

2.6 Produkce asfaltů

V tabulce 2 a grafech 1, 2, 3 lze zaznamenat vývoj výroby silničních asfaltů a polymerem modifikovaných asfaltů PmB v letech 2010 - 2015 v České republice.

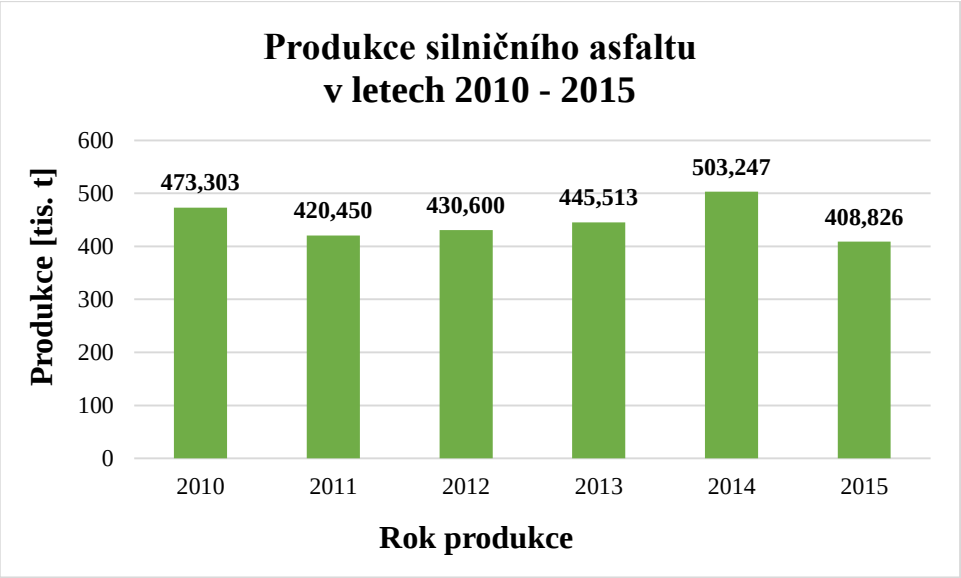
Tabulka 2: Vývoj produkce asfaltů v letech 2010 -2015 [20]

Vývoj výroby asfaltů v letech 2010 - 2015			
Rok	**Silniční asfalt [tis. t]**	**PmB [tis. t]**	**Silniční asfalt + PmB [tis. t]**
2010	473,303	44,180	517,483
2011	420,450	51,200	471,650
2012	430,600	39,946	470,546
2013	445,513	44,007	489,520
2014	503,247	50,790	554,037
2015	408,826	99,107	507,933



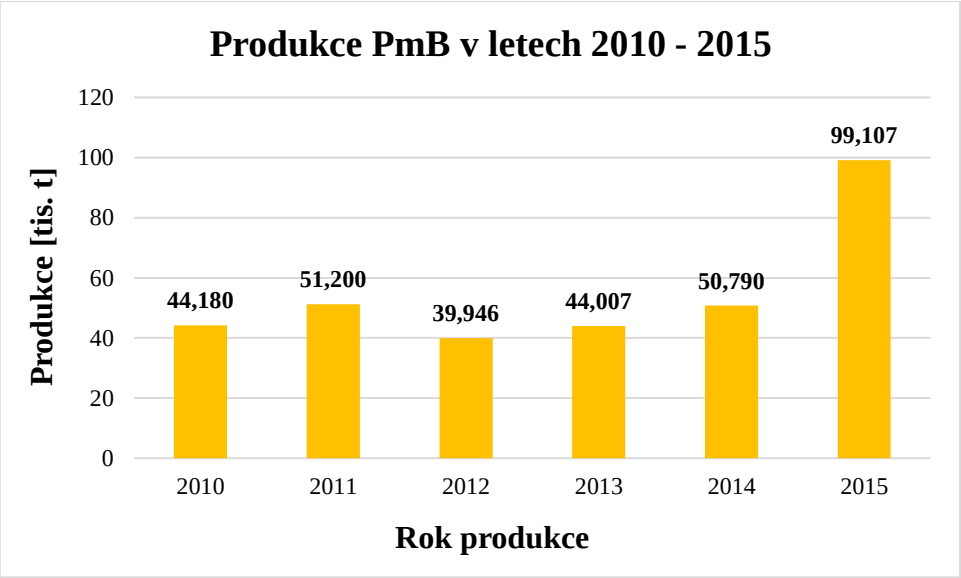
Graf 1: Vývoj produkce asfaltů v letech 2010 - 2015 [20]

Na základě údajů z tabulky 2 a grafu 1 lze říci, že produkce silničních asfaltů a polymerem modifikovaných asfaltů PmB v uplynulých letech spíše stagnuje. Mění se pouze poměrově zastoupení těchto dvou druhů asfaltů.



Graf 2: Vývoj produkce silničního asfaltu v letech 2010 - 2015 [20]

Na základě údajů z grafu 2 lze říci, že produkce silničního asfaltu v uplynulých dvou letech klesla. Důvodem může zvyšující se používání PmB jako pojiva do asfaltových směsí.



Graf 3: Vývoj produkce PmB v letech 2010 - 2015 [20]

Na základě údajů z grafu 3 lze říci, že produkce polymerem modifikovaných asfaltů PmB v uplynulých dvou letech extrémně vzrostla. Důvodem může být neustále se zvyšující dopravní zatížení vyžadující zlepšování vlastností materiálů pro stavbu vozovky.

3 CÍL PRÁCE

Bakalářská práce je rozdělena do dvou částí, teoretickou a praktickou. Cílem první části práce je seznámit se teoreticky s problematikou modifikovaných asfaltových pojiv. V druhé části práce je cílem najít optimální zdroj silničního nemodifikovaného asfaltového pojiva pro výrobu polymerem modifikovaného asfaltového pojiva PmB.

Budou laboratorně připraveny vzorky modifikovaných asfaltových pojiv s různým stupněm modifikace. Poměry pro míchání a podmínky míchání jsou předem stanoveny. Na vzorcích budou provedeny základní empirické zkoušky a funkční zkouška dle platných českých norem. Jedná se o konvenční zkoušky stanovení penetrace jehlou, bodu měknutí metodou kroužek a kulička, bodu lámavosti podle Fraasse, vratné duktility a funkční zkoušku DSR. Výsledky jednotlivých zkoušek budou zpracovány do tabulek a grafů, vyhodnoceny a shrnuty v závěru práce.

Nad rámec zadání bakalářské práce budou výsledky porovnány s laboratorními výsledky z modifikační stanice.

4 PRAKTICKÁ ČÁST

4.1 Použité materiály

4.1.1 Výchozí materiály

V praktické části bakalářské práce jsou použity 3 druhy pojiv. Prvním použitým asfaltovým pojivem je silniční asfalt 50/70 původem z rafinérie v Litvínově. Druhým použitým asfaltovým pojivem je silniční asfalt 50/70 původem z ropného a plynárenského koncernu MOL v Maďarsku. Posledním použitým pojivem je modifikátor MB (Master Batch) - koncentrát používaný k modifikaci dodaný prováděcí firmou. V rámci zjednodušení jsou v bakalářské práci zavedeny zkratky pro jednotlivá pojiva, které jsou uvedeny v tabulce 3.

Tabulka 3: Výchozí materiály

Výchozí pojiva	
Obchodní označení pojiva	**Označení pojiva v bakalářské práci**
Silniční asfalt 50/70 Litvínov	50/70 Litvínov
Silniční asfalt 50/70 MOL	50/70 MOL
MB	MB

4.1.2 Varianty zkoušení

V rámci bakalářské práce jsou zpracovány celkem 3 varianty modifikovaných asfaltových pojiv, poměry míchání jsou předem stanoveny. Jedná se o asfaltová pojiva, jejichž fyzikální a mechanické vlastnosti lze upravit přísadou polymeru. První variantou modifikace silničního asfaltu je pojivo s označením PmB 45/80-55. Druhou variantou je pojivo s označením PmB 45/80-65. Poslední variantou je modifikované asfaltové pojivo s označením PmB 45/80-65. Všechny varianty jsou uvedeny v tabulce 4.

Tabulka 4: Varianty modifikovaných asfaltových pojiv

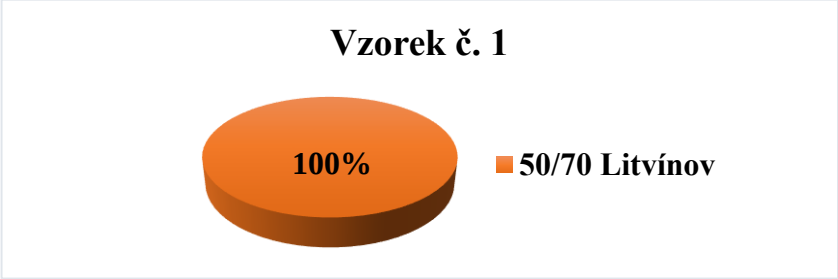
Varianty modifikovaných asfaltových pojiv
Obchodní označení pojiva
PmB 45/80-55
PmB 45/80-65
PmB 45/80-65

4.1.3 Vzorky pojiv

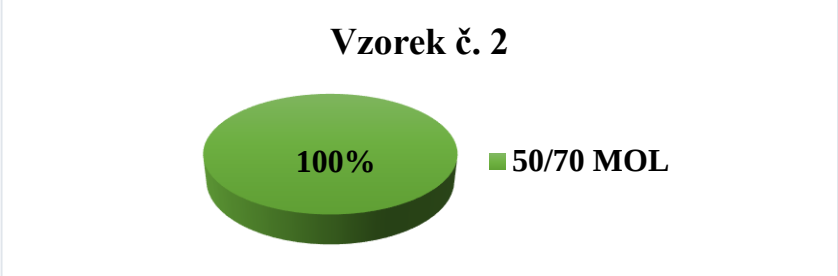
Praktická část je věnována zkoušení 9 vzorků pojiv. První dva zkušební vzorky jsou vzorky nemodifikovaných asfaltových pojiv, jedná se o silniční asfalt 50/70 Litvínov a silniční asfalt 50/70 MOL. Třetím zkušebním vzorkem je MB (Master Batch). Vzorky jsou uvedeny v tabulce 5 a grafech 4, 5, 6.

Tabulka 5: Vzorky pojiv 1, 2, 3

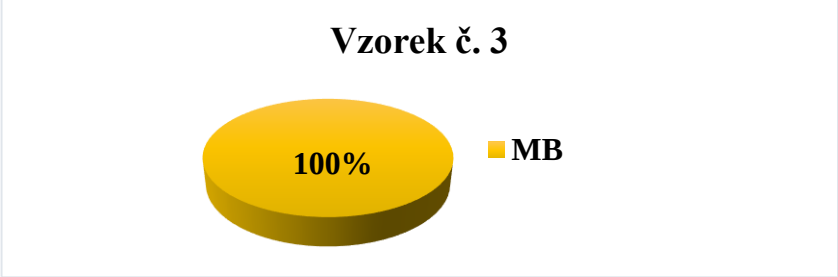
Číslo vzorku	Označení pojiva
1	50/70 Litvínov
2	50/70 MOL
3	MB



Graf 4: Zkušební vzorek č. 1



Graf 5: Zkušební vzorek č. 2

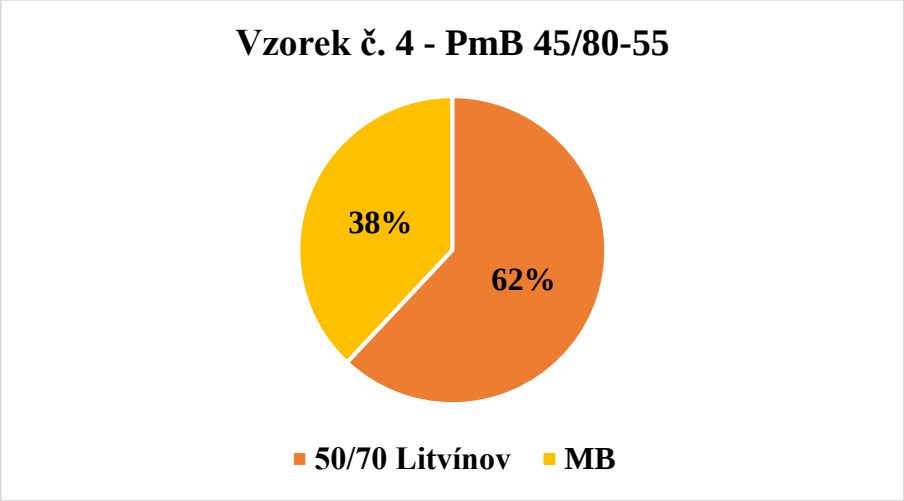


Graf 6: Zkušební vzorek č. 3

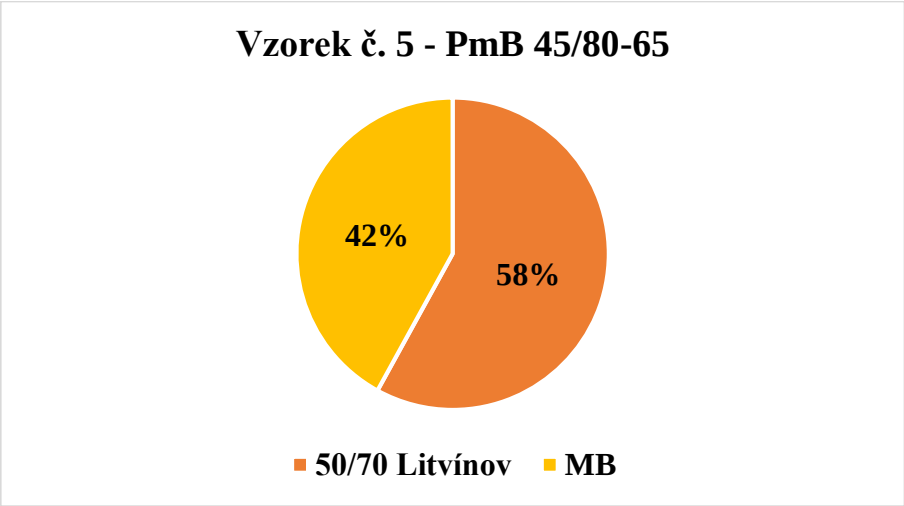
Další tři zkušební vzorky jsou vzorky modifikovaných asfaltových pojiv. Jedná se o modifikaci silničního asfaltu 50/70 Litvínov s modifikátorem MB. Tato modifikace je zpracována ve třech variantách. Poměry pro míchání jsou uvedeny v tabulce 6 a grafech 7, 8, 9.

Tabulka 6: Vzorky pojiv 4, 5, 6

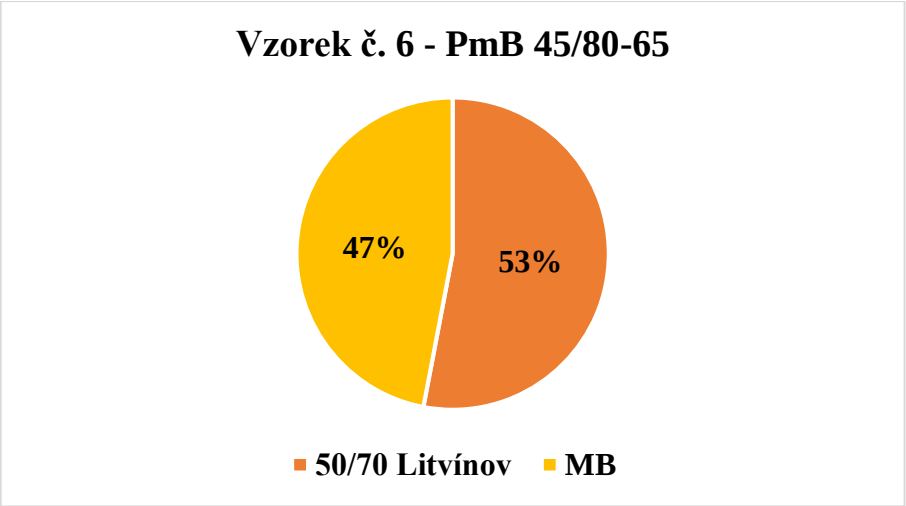
Číslo vzorku	Označení pojiva	Poměry pro míchání		Datum výroby
		50/70 Litvínov	MB	
4	PmB 45/80-55	62%	38%	11. březen 2016
5	PmB 45/80-65	58%	42%	11. březen 2016
6	PmB 45/80-65	53%	47%	11. březen 2016



Graf 7: Zkušební vzorek č. 4



Graf 8: Zkušební vzorek č. 5

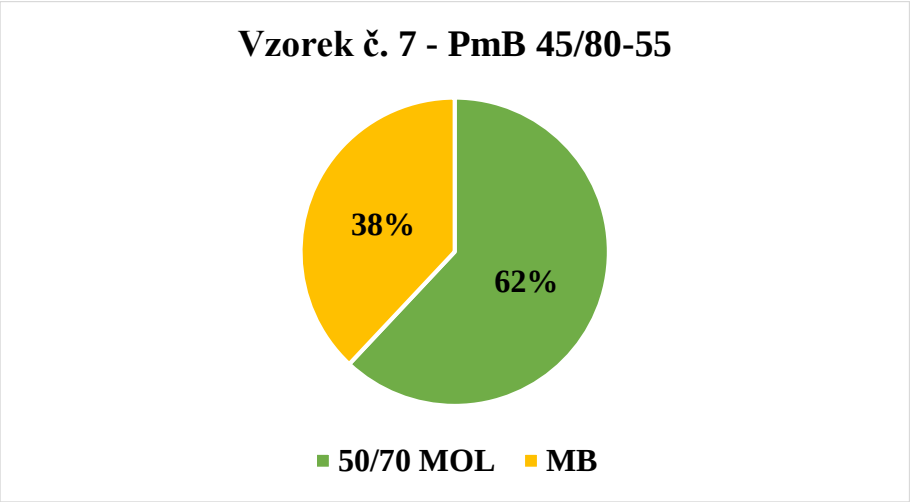


Graf 9: Zkušební vzorek č. 6

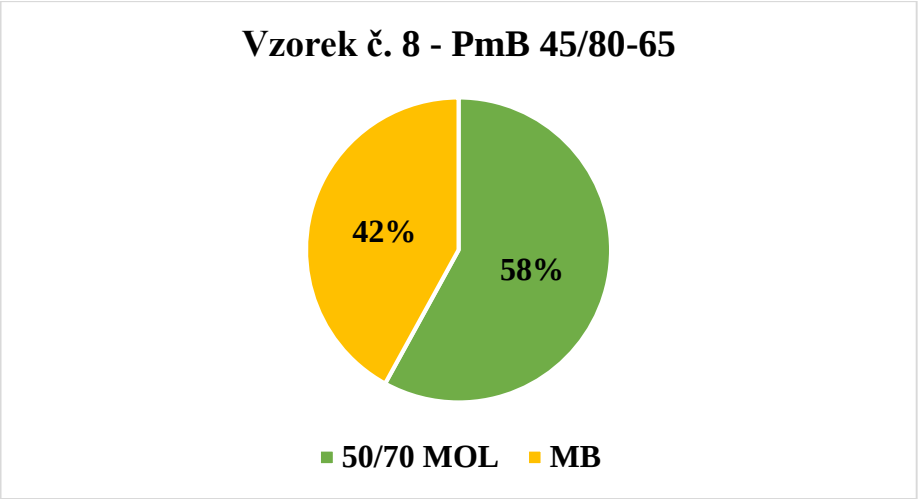
Další tři zkušební vzorky jsou vzorky modifikovaných asfaltových pojiv. Jedná se o modifikaci silničního asfaltu 50/70 MOL s modifikátorem MB. Tato modifikace je zpracována ve třech variantách. Poměry pro míchání jsou uvedeny v tabulce 7 a grafech 10, 11, 12.

Tabulka 7: Vzorky pojiv 7, 8, 9

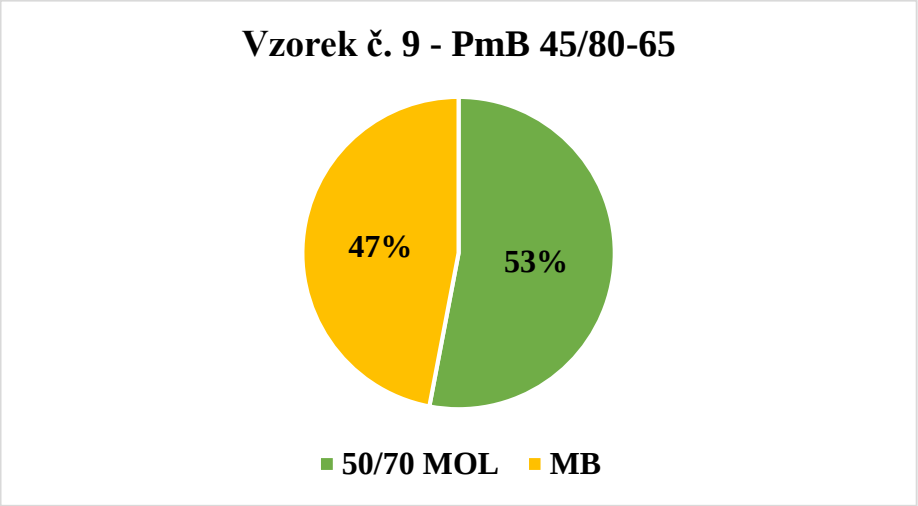
Číslo vzorku	Označení pojiva	Poměry pro míchání		Datum výroby
		50/70 MOL	MB	
7	PmB 45/80-55	62%	38%	3. květen 2016
8	PmB 45/80-65	58%	42%	3. květen 2016
9	PmB 45/80-65	53%	47%	3. květen 2016



Graf 10: Zkušební vzorek č. 7



Graf 11: Zkušební vzorek č. 8



Graf 12: Zkušební vzorek č. 9

Zkušební vzorky asfaltových pojiv jsou připraveny v laboratoři za přesně stanovených podmínek, podrobeny příslušným laboratorním zkouškám, které jsou následně vyhodnoceny do tabulek a grafů, a výsledky zkoušek vzájemně srovnány.

4.2 Použité zkušební metody

V této kapitole je věnována pozornost laboratornímu zkoušení asfaltových pojiv. Popsány jsou vybrané zkoušky konvenční, které vychází z dlouhodobých zkušeností, a dále také zkouška funkční, která se snaží co nejlépe simulovat podmínky ve skutečné stavební konstrukci. Jednotlivé zkoušky jsou stanoveny na základě platných norem, které jsou uvedeny v tabulce 8.

Tabulka 8: Seznam laboratorních zkoušek a příslušných norem

Laboratorní zkouška	Označení příslušné normy
Stanovení penetrace jehlou	ČSN EN 1426
Stanovení bodu měknutí	ČSN EN 1427
Stanovení bodu lámavosti dle Fraasse	ČSN EN 12593
Stanovení vratné duktility	ČSN EN 13398
DSR	ČSN EN 14770

4.2.1 Výroba modifikovaných asfaltových pojiv

Nejprve se připraví plechovky, které se vhodně popíšou, aby nedošlo k záměně vzorku. Výchozí materiály pro zkoušení, tzn. silniční asfalt 50/70 Litvínov, silniční asfalt 50/70 MOL a modifikátor MB, se nahřejí v laboratorní peci na stanovenou teplotu, která je v tomto případě 185 ˚C. Po nahřátí na uvedenou teplotu se prázdná plechovka vytáruje na laboratorní váze - viz obrázek 5 a přistoupí se k samotnému dávkování pojiv. V další fázi se plechovka s pojivem umístí do laboratorní míchačky, kde se nechá míchat po dobu 30 minut. Tímto způsobem lze připravit všech šest vzorků polymerem modifikovaných asfaltových pojiv.

Obrázek 5: Laboratorní váha

4.2.2 Stanovení penetrace jehlou

Jedná se o konvenční zkoušku asfaltových pojiv, která je popsána v normě ČSN EN 1426 - Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení penetrace jehlou.

4.2.2.1 Podstata metody

Základním principem penetrace je stanovení hloubky proniknutí jehly do analytického vzorku asfaltového pojiva za přesně stanovených podmínek, které jsou uvedeny v tabulce 9. Vytemperovaný vzorek asfaltového pojiva na teplotu 25 ˚C je zatěžován hmotností 100 g po dobu 5 s. Hodnota penetrace je uvedena v penetračních jednotkách (1 p. j. = 0,1 mm) [4],[10].

Tabulka 9: Stanovené podmínky zkoušení pro penetraci

Stanovené podmínky zkoušení	
teplota	25 ˚C
zatížení	100 g
doba zatěžování	5 s

4.2.2.2 Přístroje a pomůcky

Nezbytnou součástí pro stanovení penetrace jsou penetrometr, penetrační jehla, nádoba na zkušební vzorek (nádoba na analytický vzorek - viz obrázek 6), vodní lázeň, přenášecí miska potřebná pro zkoušku vykonávanou mimo vodní lázeň, zařízení na měření času a teploměr [10].

Obrázek 6: Nádoby s analytickými vzorky pro stanovení penetrace

4.2.2.3 Příprava vzorku na zkoušku

Jako první se nahřeje laboratorní vzorek asfaltového pojiva. Norma ČSN EN 12594 (Asfalty a asfaltová pojiva - Příprava analytických vzorků) uvádí postup přípravy vzorků, platí i pro polymerem modifikovaná asfaltová pojiva. Po nahřátí, v tomto případě na teplotu 185 ˚C, je potřeba asfaltové pojivo promíchat, aby došlo

k homogenizaci. Poté se asfaltové pojivo nalije do nádoby na zkušební vzorek, která může být kovová nebo skleněná, válcového tvaru s plochým dnem. Nádoba se naplní tak, aby po zchlazení vzorku na zkušební teplotu 25 ˚C byla výška minimálně o 10 mm větší, než je předpokládaná hloubka proniknutí jehly. Analytický vzorek asfaltového pojiva se nechá vychladnout, poté se přistoupí ke zkoušce [9], [10].

4.2.2.4 Postup zkoušky

Nejprve se připraví vodní lázeň s konstantní teplotou (25 ± 0,15) ˚C, do které se umístí nádoba se zkušebním vzorkem asfaltového pojiva. Temperace vzorku probíhá asi 2 hodiny. Dále se nachystá penetrační jehla a přístroj pro stanovení penetrace, tzv. penetrometr. Zkontroluje se, zda je držák jehly zbaven nečistot a vody. Penetrační jehla se očistí toluenem nebo jiným vhodným rozpouštědlem, osuší se čistým hadříkem a vloží do držáku. Pro zkoušku vykonávanou mimo vodní lázeň je potřeba přenášecí miska, do které se vloží nádoba se zkušebním vzorkem. Miska musí být dostatečně hluboká, aby nádoba se vzorkem byla zcela pokryta vodou. Přenášecí miska spolu s nádobou se zkušebním vzorkem se umístí na podstavec penetrometru do své pozice, kterou lze vidět na obrázku 7. Dále se vynulují hodnoty na stupnici penetrometru, která vyjadřuje hodnotu penetrace, a penetrační jehla se postupně snižuje do okamžiku, kdy se její hrot dotkne povrchu vzorku. Nastaví se doba zatěžování na stanovených 5 s a spustí se přístroj. Na stupnici se přečte hodnota penetrace - hloubka vpichu jehly - viz obrázek 8. Zkouška končí uvolněním jehly z držáku, vyjmutím ze vzorku a očištěním [10].

Obrázek 7: Přenášecí miska a nádoba se zkušebním vzorkem asfaltového pojiva

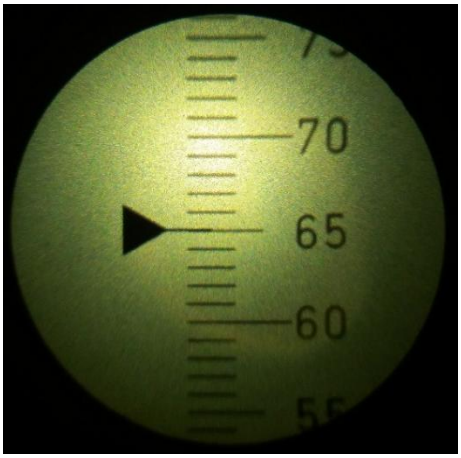
Tímto způsobem se provedou nejméně tři platná stanovení pro každý analytický vzorek asfaltového pojiva. Jednotlivá měření musí být vzdálena minimálně 10 mm od stran nádoby a minimálně 10 mm od sebe [10].

4.2.2.5 Vyjádření výsledků

U zkoušek prováděných za přesně stanovených podmínek zkoušení (teplota 25 ˚C, zatížení 100 g, doba zatěžování 5 s) s nejméně třemi platnými stanoveními je dán maximální rozdíl platných stanovení, který je uveden v tabulce 10. V případě modifikovaných asfaltů lze použit tuto tabulku pouze jako vodítko. Výsledná hodnota penetrace se vyjádří jako aritmetický průměr platných stanovení v desetinách milimetru zaokrouhlený na nejbližší celé číslo [10].

Tabulka 10: Maximální rozdíl platných stanovení

Penetrace v 0,1 mm	do 49	50 až 149	150 až 249	250 a výše
Maximální rozdíl mezi nejvyšším a nejnižším stanovením	2	4	6	8



Obrázek 8: Příklad naměřené hodnoty penetrace

4.2.3 Stanovení bodu měknutí

Jedná se o konvenční zkoušku asfaltových pojiv, která je popsána v normě ČSN EN 1427 - Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení bodu měknutí - Metoda kroužek a kulička.

4.2.3.1 Podstata metody

Základním principem metody kroužek a kulička je stanovení teploty bodu měknutí asfaltového pojiva. Dva mosazné kroužky s osazením jsou vyplněny vrstvou asfaltového pojiva tloušťky 6,4 mm, přičemž na každou z nich je umístěna ocelová kulička. Kroužky jsou zahřívány řízenou rychlostí v kapalinové lázni. Bod měknutí je stanoven v okamžiku, kdy vrstva asfaltového pojiva změkne natolik, že kulička protáhne tuto vrstvu na délku (25 ± 4) mm [11].

4.2.3.2 Činidla a materiály

Ke stanovení bodu měknutí je potřeba separační prostředek, který slouží k eliminaci přilepení asfaltového pojiva na odlévací destičku. Dále je potřeba kapalinová lázeň, kterou může být čerstvě převařená destilovaná voda nebo deionizovaná voda, případně glycerin - viz tabulka 11 [4], [11].

Tabulka 11: Kapalinová lázeň pro stanovení bodu měknutí

Bod měknutí	Kapalinová lázeň	Počáteční teplota lázně
≤ 80 °C	vodní lázeň	(5 ± 1) ˚C
> 80 °C	glycerin	(30 ± 1) ˚C

4.2.3.3 Přístroje a pomůcky

Nezbytnou součástí pro stanovení bodu měknutí je zkušební zařízení, které může být ruční, poloautomatické nebo automatické. Zařízení se skládá z odlévací destičky, dvou mosazných kroužků, špachtle, držáku kroužků, dvou středících prstenců pro kuličky, dvou kuliček z korozivzdorné oceli, skleněné kádinky, míchadla a teploměru [11].

4.2.3.4 Příprava vzorku na zkoušku

Připraví se odlévací destička, která se pokryje nezbytným množstvím separačního prostředku k zamezení přilepení asfaltového pojiva. Dále se nachystají mosazné kroužky, které se položí na odlévací destičku. V případě modifikovaných asfaltů se připraví dva

páry kroužků pro případ, že by se zkouška musela opakovat - viz obrázek 9. Laboratorní vzorek asfaltového pojiva se nahřeje na požadovanou teplotu, která je v tomto případě 185 ˚C, a nalije se do každého z kroužků. Kroužky s asfaltovým pojivem se nechají vychladnout na laboratorní teplotu. Po vychladnutí analytických vzorků se nahřátou špachtlí odřízne nadbytečné množství asfaltového pojiva tak, aby byl povrch každého vzorku zarovnán s okrajem kroužku - viz obrázek 10 [9], [11].

Obrázek 9: Dva páry mosazných kroužků na odlévací destičce

Obrázek 10: Ukázka seříznutí asfaltového pojiva

4.2.3.5 Postup zkoušky

Nejprve se připraví vhodně zvolená kapalinová lázeň dle předpokládané teploty bodu měknutí. Pro bod měknutí mezi (28 - 80) ˚C se použije čerstvě převařená destilovaná voda nebo deionizovaná voda, přičemž počáteční teplota musí být (5 ± 1) ˚C. Při teplotě bodu měknutí nad 80 ˚C se použije glycerin, počáteční teplota lázně musí být (30 ± 1) ˚C. Do otvoru držáku se osadí dva kroužky se seříznutými vzorky, na které se nasadí středící prstence pro kuličky. Celá sestava se vloží do skleněné kádinky naplněné příslušnou kapalinovou lázní tak, aby byl povrch lázně (50 ± 3) mm nad horním okrajem kroužků.

Sestava se nechá buďto zchladit (pro vodní lázeň) nebo se mírně zahřeje (pro glycerinovou lázeň) po dobu 15 minut. Poté se sestava vyjme, do každého kroužku se umístí kulička pomocí středícího prstence a vloží zpět do kádinky. Nutno zajistit, aby kovové kuličky měly stejnou počáteční teplotu jako zbývající část sestavy [11].

Obrázek 11: Sestava pro stanovení bodu měknutí

Takto připravená soustava se umístí do zkušebního zařízení. Do kádinky se vloží teploměr a magnetické míchadlo a spustí se ohřívací zařízení - viz obrázek 11 a 12. Teplota stoupá rovnoměrně řízenou rychlostí 5 ˚C/min. S rostoucí teplotou roste deformace a kulička se propadá. Zkouška trvá do okamžiku, kdy se kulička obalená asfaltovým pojivem propadne na délku (25 ± 4) mm - viz obrázek 13. Přístroj automaticky zaznamená propad obou kuliček pomocí světelného paprsku a zapíše výsledné hodnoty u obou kroužků [11].

Obrázek 12: Zkušební zařízení

Zkouška se opakuje, pokud je rozdíl mezi dvěma teplotami větší než 1 ˚C pro bod měknutí pod 80 ˚C včetně nebo větší než 2 ˚C pro bod měknutí větší než 80 ˚C - viz tabulka 12 [11].

Tabulka 12: Podmínky pro opakování zkoušky kroužek a kulička

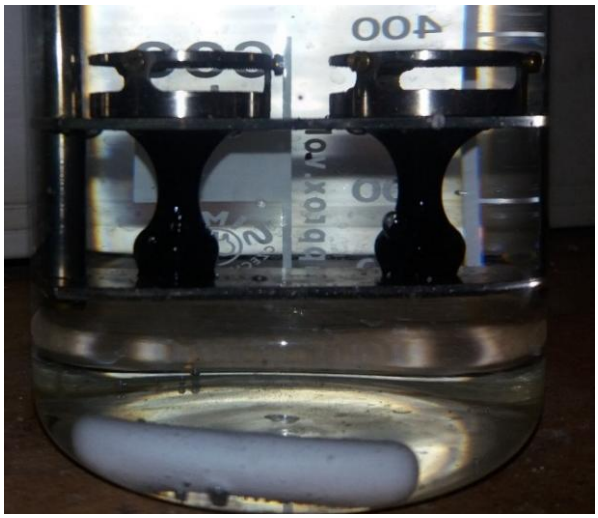
Bod měknutí	Maximální rozdíl dvou teplot
≤ 80 °C	1 °C
> 80 °C	2 °C

U modifikovaných asfaltů se zkouška opakuje, pokud rozdíl mezi dvěma teplotami je větší než 2 ˚C nebo kulička poruší vrstvu asfaltu, již je obklopena ještě předtím, než se dotkne základní desky nebo přeruší paprsek světla, nebo pokud lze pozorovat částečné odlepení asfaltu od kuličky [11].

Rozdíl mezi teplotou bodu měknutí stanovenou ve vodní lázni a v glycerinové lázni je asi 4 ˚C, v glycerinové lázni je větší. Jestliže se hodnoty pohybují okolo 80 ˚C, je třeba zkoušku kroužek a kulička provést v obou z těchto kapalinových lázní [11].

4.2.3.6 Vyjádření výsledků

V normě ČSN EN 1427 je stanoven maximální rozdíl platných stanovení. Pokud je teplota menší nebo rovna 80 ˚C, výsledná hodnota bodu měknutí se vyjádří jako průměr stanovených teplot zaokrouhlený na nejbližší 0,2 ˚C. V případě, že teplota bodu měknutí bude větší než 80 ˚C, výsledná hodnota bodu měknutí se zaokrouhlí na nejbližší 0,5 ˚C [11].



Obrázek 13: Propad kuliček

4.2.4 Stanovení bodu lámavosti podle Fraasse

Jedná se o konvenční zkoušku asfaltových pojiv, která je popsána v normě ČSN EN 12593 - Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení bodu lámavosti podle Fraasse.

4.2.4.1 Podstata metody

Základním principem stanovení bodu lámavosti podle Fraasse je stanovení teploty, při které vzorek asfaltového pojiva zkřehne natolik, že praskne. Asfaltové pojivo se nanese na kovový plíšek, který se stálou rychlostí ochlazuje a opakovaně ohýbá. Je potřeba nanést rovnoměrnou tloušťku asfaltového pojiva. Zkouška končí ve chvíli, kdy se objeví první prasklina. Zaznamená se teplota, při které došlo k porušení vzorku asfaltového pojiva, tzv. bod lámavosti podle Fraasse [4], [12].

4.2.4.2 Přístroje a pomůcky

Nezbytnou součástí pro stanovení bodu lámavosti podle Fraasse jsou plíšky vyrobené z popouštěné pružné oceli (viz obrázek15). Základní rozměry plíšku jsou délka (41,00 ± 0,05) mm, šířka (20,0 ± 0,2) mm a tloušťka (0,15 ± 0,02) mm. K provedení zkoušky je dále potřeba zařízení pro přípravu plíšků, které se používá k rozehřátí zkoušeného vzorku. Zařízení se skládá z magnetického bloku a kovového podstavce, který je tvořen vyhřívanou části, která je oddělena od části chlazené. Nedílnou částí je přístroj pro lámavost podle Fraasse, který se skládá z ohýbacího zařízení, chladícího zařízení - v tomto případě suchý led - viz obrázek 14 a teploměru [12].

Obrázek 14: Suchý led potřebný pro zkoušku

4.2.4.3 Příprava vzorku na zkoušku

Připraví se zkušební plíšky, které se odmastí vhodným odmašťovacím rozpouštědlem, vysuší a zváží s přesností na 0,01 g. Na zkušební plíšek se naváží (410 ± 10) mg asfaltového pojiva. Plíšek spolu s naváženým množstvím asfaltového pojiva se umístí na magnetický blok, který se položí na vyhřívanou část kovového podstavce. Teplota nepřekračuje bod měknutí asfaltového pojiva o více než 80 ˚C. V případě polymerem modifikovaných asfaltů musí být teplota maximálně 200 ˚C bez ohledu na bod měknutí stanovený metodou kroužek a kulička. Zajistí se rovnoměrné nanesení asfaltového pojiva po celém povrchu plíšku prostřednictvím naklápěcího vyhřívacího podstavce. Zahřátím povrchu se odstraní malé vzduchové bublinky, musí se však zabránit přehřátí. Takto připravený vzorek se na magnetickém bloku přesune na chlazenou část kovového podstavce, kde se nechá chladit 30 min na laboratorní teplotu. Po vychladnutí vzorku lze přistoupit k samotné zkoušce [9], [12].

Obrázek 15: Zkušební plíšky

4.2.4.4 Postup zkoušky

Zkouška se provádí nejdříve 30 min po nanesení vzorku na plíšek. Plíšek s asfaltovým pojivem se umístí do ohýbacího zařízení, přičemž je důležité, zda nedojde ke zlomení vrstvičky asfaltového pojiva na plíšku. V případě vzniku prasklinky je nutno plíšek nahradit novým. Dále se ohýbací zařízení vloží do zkumavky chladícího zařízení a instaluje se teploměr do výchozí pozice. Rtuťová nádobka teploměru musí být umístěna za zkušebním plíškem uprostřed mezi upínacími patkami. Důležité je, aby v prostoru mezi

vnitřní a vnější zkumavkou byla kapalina, jejíž teplotu lze regulovat postupným přidáváním malých kousků tuhého oxidu uhličitého, do výšky nejméně 100 mm. Nyní se zahájí ochlazování. Počáteční teplota před zahájením ochlazování musí být minimálně 15 ˚C nad očekávaným bodem lámavosti. V prvních třech minutách probíhá ochlazování konstantní rychlostí 1 ˚C/min. Po prvních třech minutách se pokračuje v ochlazování rychlostí 1 ˚C každých (60 ± 5) s, tzn. maximální odchylka je 5 s. Zkušební plíšek se začne ohýbat při teplotě (10 ± 2) ˚C, než je předpokládaná teplota lámavosti. Ohýbání plíšku se provádí rovnoměrným otáčením kličky ohýbacího zařízení konstantní rychlostí 1 otáčka/s až na doraz, přičemž se se kontroluje vrstvička pojiva, zda nevzniká prasklinka. Po kontrole se otáčí kličkou ohýbacího zařízení stejnou rychlostí zpět, přičemž dochází ke zpětnému narovnávání plíšku. Mezi opakovaným ohýbáním je ohýbací zařízení ponecháno po dobu (38 ± 5) s ve výchozí pozici. Zkouška končí ve chvíli, kdy vznikne první prasklinka na povrchu asfaltového pojiva [12].

Obrázek 16: Porušení zkušebního vzorku trhlinou

4.2.4.5 Vyjádření výsledků

V evropské normě ČSN EN 12593 je stanoven maximální rozdíl platných stanovení. Dvě stanovení jsou platná, jestliže je jejich rozdíl menší nebo roven 3 ˚C. V opačném případě se provedou další dvě stanovení, přičemž jejich rozdíl musí být maximálně 3 ˚C. Výsledná hodnota teploty bodu lámavosti podle Fraasse se vyjádří jako aritmetický průměr dvou platných stanovení v ˚C, zaokrouhlený na nejbližší celé číslo [12].

4.2.5 Stanovení vratné duktility

Jedná se o konvenční zkoušku asfaltových pojiv, která je popsána v normě ČSN EN 13398 - Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení vratné duktility modifikovaných asfaltů.

4.2.5.1 Podstata metody

Základním principem stanovení vratné duktility je stanovení míry elastického chování modifikovaných asfaltů. Zkouška probíhá za přesně stanovených podmínek, které jsou uvedeny v tabulce 13. Vytemperovaný vzorek asfaltového pojiva na teplotu 25 ˚C je protahován konstantní rychlostí 50 mm/min na předem určené prodloužení 200 mm. Takto vzniklé asfaltové vlákno se uprostřed přestřihne a vzniknou dvě polovlákna. Po uplynutí předem určené doby pro navrácení 30 minut se měří zkrácení polovláken a vyjadřuje se jako procento z délky prodloužení [4], [13].

Tabulka 13: Stanovené podmínky zkoušení pro vratnou duktilitu

Stanovené podmínky zkoušení	
teplota	25 ˚C
konstantní rychlost	50 mm/min
předem určené prodloužení	200 mm
předem určená doba pro navrácení	30 min

4.2.5.2 Činidla a materiály

Ke stanovení vratné duktility je potřeba separační prostředek, který slouží k eliminaci přilepení asfaltového pojiva na odlévací destičku [13].

4.2.5.3 Přístroje a pomůcky

Nezbytnou součástí pro stanovení vratné duktility je zkušební zařízení, tzv. duktilometr, který se skládá z protahovacího zařízení a vodní lázně s regulací teploty, která udržuje její konstantní teplotu. Dále je potřeba odlévací destička, formovací souprava - viz obrázek 17, špachtle na seříznutí nadbytečného množství asfaltového pojiva, nůžky a pravítko [13].

4.2.5.4 Příprava vzorku na zkoušku

Připraví se odlévací destička, která se pokryje nezbytným množstvím separačního prostředku k zamezení přilepení asfaltového pojiva. Dále se nachystá formovací souprava

skládající se ze dvou svorek a dvou bočních částí. Boční části je třeba pokrýt nezbytným množstvím separačního prostředku pro snadnější manipulaci při oddělávání bočních částí před zahájením zkoušky. Svorky se nepokrývají separačním prostředkem, aby se zabránilo odtržení při napínání vzorku asfaltového pojiva. Laboratorní vzorek asfaltového pojiva se nahřeje na požadovanou teplotu, která je v tomto případě 185 ˚C, a nalije do připravené formovací soupravy. Poté se analytický vzorek asfaltového pojiva nechá vychladnout na laboratorní teplotu. Po vychladnutí analytických vzorků se nahřátou špachtlí odřízne nadbytečné množství asfaltového pojiva tak, aby byl povrch vzorku zarovnán s okrajem formovací soupravy [9], [13].

Obrázek 17: Formovací souprava

4.2.5.5 Postup zkoušky

Připraví se zkušební zařízení, tzv. duktilometr, do kterého je umístěna formovací souprava se zkušebním vzorkem asfaltového pojiva na odlévací destičce. Temperace vzorku ve vodní lázni s konstantní teplotou (25 ± 0,15) ˚C probíhá asi 90 minut. Vytemperovaný vzorek asfaltového pojiva se vyjme z vodní lázně a opatrně sundá z odlévací destičky. Poté se formovací souprava vrátí zpět do duktilometru tak, aby trny vodící desky byly v otvorech svorky. Nyní se opatrně odloupnou boční části formovací soupravy a zapne se protahovací zařízení. Vzorek se protahuje při teplotě (25 ± 0,15) ˚C konstantní rychlostí (50 ± 2,5) mm/min na délku (200 ± 2,5) mm - viz obrázek 18. Délku protažení lze sledovat pomocí trvale připevněného metru. Po dosažení předepsané zkušební délky protažení se protahovací zařízení vypne. Takto vzniklé asfaltové vlákno se uprostřed přestřihne a vzniknou dvě polovlákna - viz obrázek 19. Po uplynutí předem určené doby pro navrácení, 30 min, se změří vzdálenost mezi konci polovláken pomocí pravítka [13].

4.2.5.6 Vyjádření výsledků

V evropské normě ČSN EN 13398 je stanoven maximální rozdíl platných stanovení. Pro stanovení vratné duktility nám slouží matematický vztah. Hodnota d [mm] představuje naměřenou vzdálenost polovláken a hodnota L [mm] je předepsaná zkušební délka protažení 200 mm. Vypočtená hodnota se vyjádří v procentech a zaokrouhlí na 1 procento [13].

$$R_E = \frac{d}{L} \times 100$$

Obrázek 18: Protahování asfaltových vláken

Obrázek 19: Návratnost asfaltových polovláken

4.2.6 Zkouška DSR

Jedná se o funkční zkoušku asfaltových pojiv, která je popsána v normě ČSN EN 14770 - Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu - Dynamický smykový reometr (DSR).

4.2.6.1 Podstata metody

Základním princem zkoušky DSR je stanovení komplexního smykového modulu, který popisuje celkový odpor asfaltového pojiva proti deformaci při vystavení opakovaným pulzům smykového napětí a fázového úhlu, který je indikátorem relativní velikosti vratné a nevratné deformace. Na temperovanou zkušební soupravu, ve které je zkušební vzorek asfaltu, se aplikuje oscilující smykové napětí dané velikosti [1], [4], [14].

4.2.6.2 Přístroje a pomůcky

Nezbytnou součástí k provedení této zkoušky je dynamický smykový reometr - viz obrázek 21. Dále je nutná forma, podložka - viz obrázek 20 nebo nádobka pro přípravu vzorků, kterou ovšem nelze použít v případě PmB. Dále je potřeba sušárna, která umožňuje regulaci teplot v rozsahu (50 - 200) ˚C s přesností ± 5 ˚C [14].

4.2.6.3 Příprava vzorku na zkoušku

Jako první se nahřeje laboratorní vzorek asfaltového pojiva. Norma ČSN EN 12594 (Asfalty a asfaltová pojiva - Příprava analytických vzorků) uvádí postup přípravy vzorků, platí i pro polymerem modifikovaná asfaltová pojiva. Po nahřátí, v tomto případě na teplotu 185 ˚C, je potřeba asfaltové pojivo promíchat, aby došlo k homogenizaci. Poté se asfaltové pojivo nalije do silikonové formy. Analytický vzorek asfaltového pojiva se nechá vychladnout, poté se přistoupí ke zkoušce [9], [14].

Obrázek 20: Zkušební vzorek pro zkoušku DSR

4.2.6.4 Postup zkoušky

Nejprve se vzorek asfaltového pojiva vyloupne ze silikonové podložky a vloží do reometru. Destičky reometru se předem předehřívají, buďto na teplotu bodu měknutí pojiva plus 20 ˚C ± 5 ˚C, nebo na 90 ˚C ± 5 ˚C, podle toho, která teplota je nižší. Doba předehřívání je minimálně 30 minut, aby došlo ke spojení zkušebního vzorku s destičkami. Dále se vzorek upraví na zvolené nastavení mezery, po dobu nejméně 5 minut se udržuje na teplotě přilnutí a poté se přebývající pojivo ořízne vhodným ořezávacím nástrojem. Po oříznutí se nastaví zkušební mezera. Pro zkoušku je nutno zvolit zkušební teplotu vhodnou pro zkoušené pojivo. V tomto případě je to 60 ˚C. Před samotným zkoušením se zkušební vzorek ponechá v přístroji do dosažení ustálené teploty. Nutno zvolit jednotlivé zkušební frekvence nebo rozsah frekvencí. Zkouší se od nejnižší frekvence a pokračuje se k vyšší frekvenci.

4.2.6.5 Vyjádření výsledků

Při vyhodnocení zkoušky je důležité uvést podmínky zkoušení, jedná se o zkušební teplotu a frekvenci. Výsledkem zkoušky je absolutní hodnota komplexního modulu ve smyku | G*| v [Pa] na tři platná místa a hodnota úhlu fázového posunu v [°] na nejbližší 0,1 ˚C [14].

Obrázek 21: Dynamický smykový reometr [25]

4.3 Výsledky a vyhodnocení

V této kapitole je věnována pozornost výsledkům jednotlivých zkoušek, které byly provedeny na zkušebních vzorcích asfaltových pojiv nemodifikovaných i modifikovaných polymerem. Jedná se o empirické zkoušky stanovení penetrace jehlou, stanovení bodu měknutí, stanovení bodu lámavosti podle Fraasse, stanovení vratné duktility a funkční zkouška DSR. Výsledky jsou zpracovány do tabulek a grafů, vyhodnoceny a shrnuty v závěru bakalářské práce.

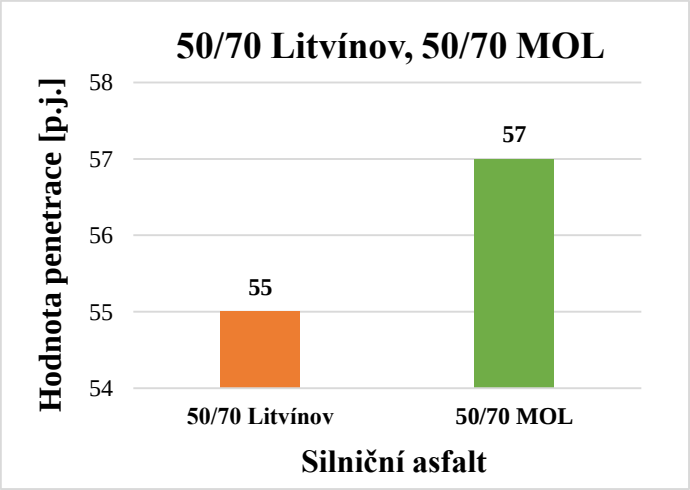
4.3.1 Stanovení penetrace jehlou

Zkouška stanovení penetrace jehlou je podrobně popsána v kapitole 4.2.2. U každého vzorku asfaltového pojiva, ať už modifikovaného či nemodifikovaného bylo stanoveno 5 měření, jejichž výsledky jsou zprůměrovány a zaokrouhleny na nejbližší celé číslo. Výsledky penetrace jsou uvedeny v tabulkách 14, 15, 16 a grafech 13, 14, 15, 16 v penetračních jednotkách.

4.3.1.1 Výsledky - výchozí materiály

Tabulka 14: Výsledky penetrace - vzorky 1, 2, 3

Výchozí pojiva							
Číslo vzorku	**Označení pojiva**	**Penetrace [p. j.]**					
1	50/70 Litvínov	56	54	55	55	56	**55**
2	50/70 MOL	56	58	58	56	58	**57**
3	MB	73	70	73	73	73	**72**

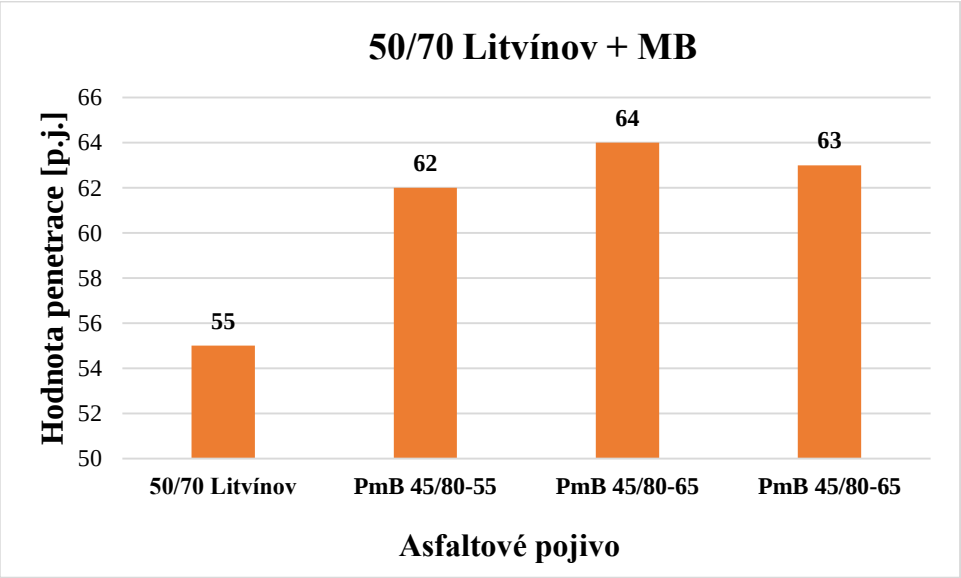


Graf 13: Výsledky penetrace - vzorky 1, 2

4.3.1.2 Výsledky - varianty s asfaltem 50/70 Litvínov

Tabulka 15: Výsledky penetrace - vzorky 4, 5, 6

50/70 Litvínov + MB							
Číslo vzorku	**Označení pojiva**	**Penetrace [p. j.]**					
4	PmB 45/80-55	63	62	63	62	62	**62**
5	PmB 45/80-65	63	63	64	63	65	**64**
6	PmB 45/80-65	62	62	63	63	64	**63**



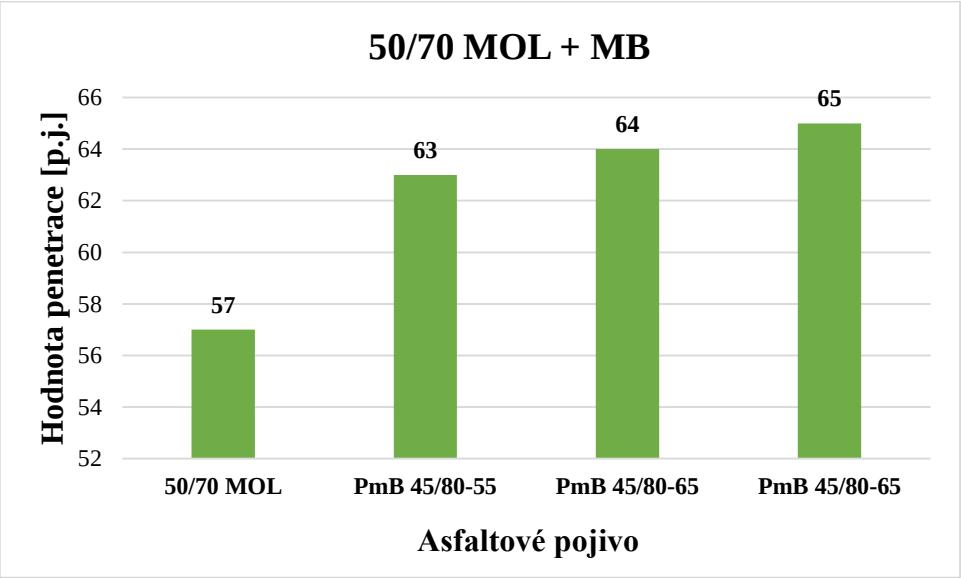
Graf 14: Výsledky penetrace - vzorky 1, 4, 5, 6

Z tabulky 15 a grafu 14 je zřejmé, že hodnoty penetrace jsou ovlivněny modifikací. Zatímco u nemodifikovaného silničního asfaltu 50/70 Litvínov byla zjištěna hodnota penetrace 55 p. j., u modifikovaného silničního asfaltu 50/70 Litvínov jsou hodnoty penetrace mnohem vyšší. Obecně lze říci, že čím větší modifikace silničního asfaltu, tím narůstá hodnota penetrace. Jinými slovy čím vyšší podíl MB, tím vyšší hodnota penetrace. Všechny zjištěné hodnoty penetrace vyhovují gradaci 45/80 dle označení, hodnota penetrace je v intervalu 45 - 80 p. j.

4.3.1.3 Výsledky - varianty s asfaltem 50/70 MOL

Tabulka 16: Výsledky penetrace - vzorky 7, 8, 9

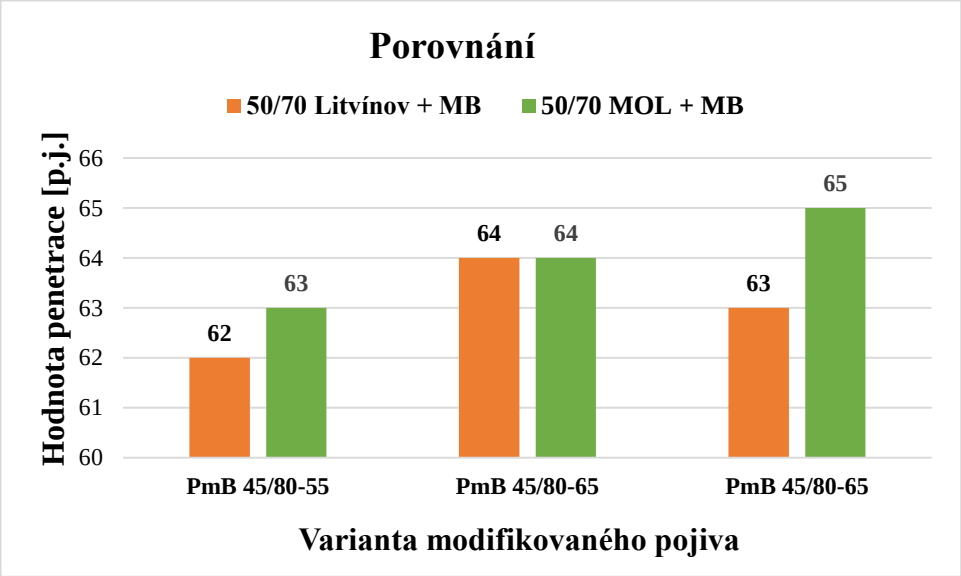
50/70 MOL + MB							
Číslo vzorku	**Označení pojiva**	**Penetrace [p. j.]**					
7	PmB 45/80-55	63	62	65	63	62	**63**
8	PmB 45/80-65	63	64	63	65	64	**64**
9	PmB 45/80-65	64	65	66	64	65	**65**



Graf 15: Výsledky penetrace - vzorky 2, 7, 8, 9

Z tabulky 16 a grafu 15 je opět zřejmé, že hodnoty penetrace jsou ovlivněny modifikací. Zatímco u nemodifikovaného silničního asfaltu 50/70 MOL byla zjištěna hodnota penetrace 57 p. j., u modifikovaného silničního asfaltu 50/70 MOL jsou hodnoty penetrace mnohem vyšší. Lze říci, že s rostoucím množstvím přidaného MB roste hodnota penetrace. Všechny zjištěné hodnoty penetrace vyhovují gradaci 45/80 dle označení, hodnota penetrace je v intervalu 45 - 80 p. j.

4.3.1.4 Výsledky - porovnání Litvínov/MOL



Graf 16: Výsledky penetrace - porovnání Litvínov/MOL

V grafu 16 jsou porovnány varianty modifikace silničního asfaltu 50/70 Litvínov a silničního asfaltu 50/70 MOL. Hodnoty penetrace jsou u všech variant téměř shodné, ať už je výchozím pojivem nemodifikovaný silniční asfalt 50/70 Litvínov nebo silniční asfalt 50/70 MOL. Lze říci, že modifikace má vliv na hodnotu penetrace - zvyšuje ji.

4.3.2 Stanovení bodu měknutí

Zkouška stanovení bodu měknutí je podrobně popsána v kapitole 4.2.3. U každého vzorku asfaltového pojiva, ať už modifikovaného či nemodifikovaného, byla stanovena 2 měření, jejichž výsledky jsou zprůměrovány a zaokrouhleny dle normy ČSN EN 1427. Výsledky bodu měknutí jsou uvedeny v tabulkách 17, 18, 19 a grafech 17, 18, 19 v ˚C.

4.3.2.1 Výsledky - výchozí materiály

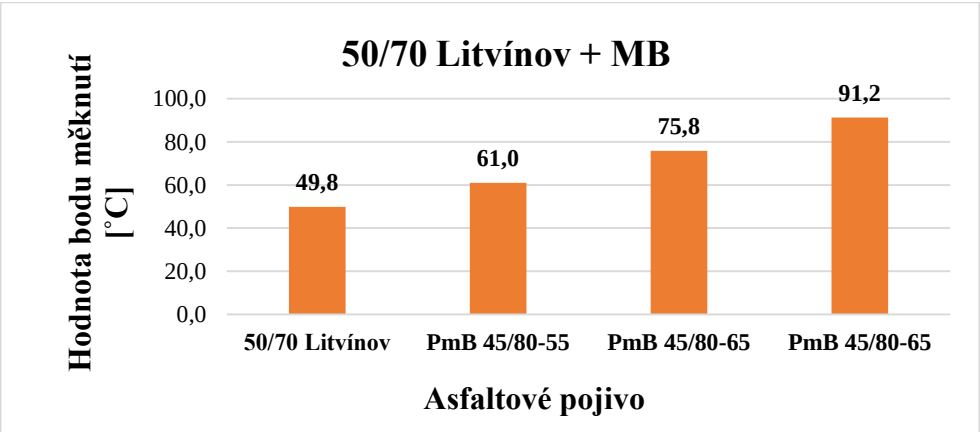
Tabulka 17: Výsledky bodu měknutí - vzorky 1, 2, 3

Výchozí pojiva				
Číslo vzorku	**Označení pojiva**	**Bod měknutí [˚C]**		
1	50/70 Litvínov	50,0	49,6	**49,8**
2	50/70 MOL	48,7	48,5	**48,6**
3	MB	102,3	104,3	**103,5**

4.3.2.2 Výsledky - varianty s asfaltem 50/70 Litvínov

Tabulka 18: Výsledky bodu měknutí - vzorky 4, 5, 6

50/70 Litvínov + MB				
Číslo vzorku	**Označení pojiva**	**Bod měknutí [˚C]**		
4	PmB 45/80-55	61,3	60,4	**61,0**
5	PmB 45/80-65	75,4	75,9	**75,8**
6	PmB 45/80-65	91,3	91,0	**91,2**



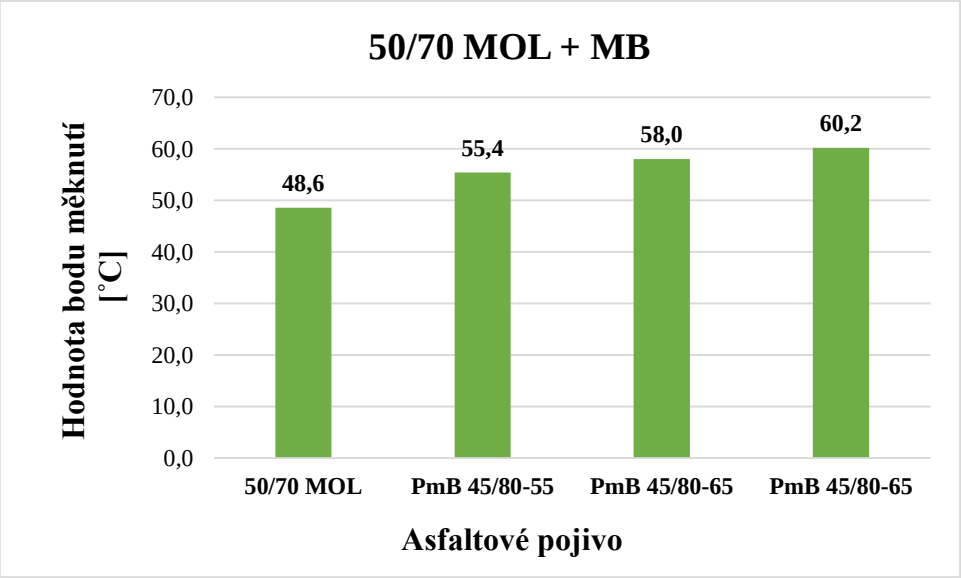
Graf 17: Výsledky bodu měknutí: vzorky 1, 4, 5, 6

Z tabulky 18 a grafu 17 je zřejmé, že hodnoty bodu měknutí jsou ovlivněny modifikací. Účelem modifikace je v tomto případě zvýšit bod měknutí. Zatímco u nemodifikovaného silničního asfaltu 50/70 Litvínov byla zjištěna hodnota bodu měknutí 49,8 ˚C, u modifikovaného silničního asfaltu 50/70 Litvínov jsou hodnoty bodu měknutí vyšší. Lze říci, že čím vyšší podíl modifikátoru MB, tím vyšší hodnota bodu měknutí.

4.3.2.3 Výsledky - varianty s asfaltem 50/70 MOL

Tabulka 19: Výsledky bodu měknutí - vzorky 7, 8, 9

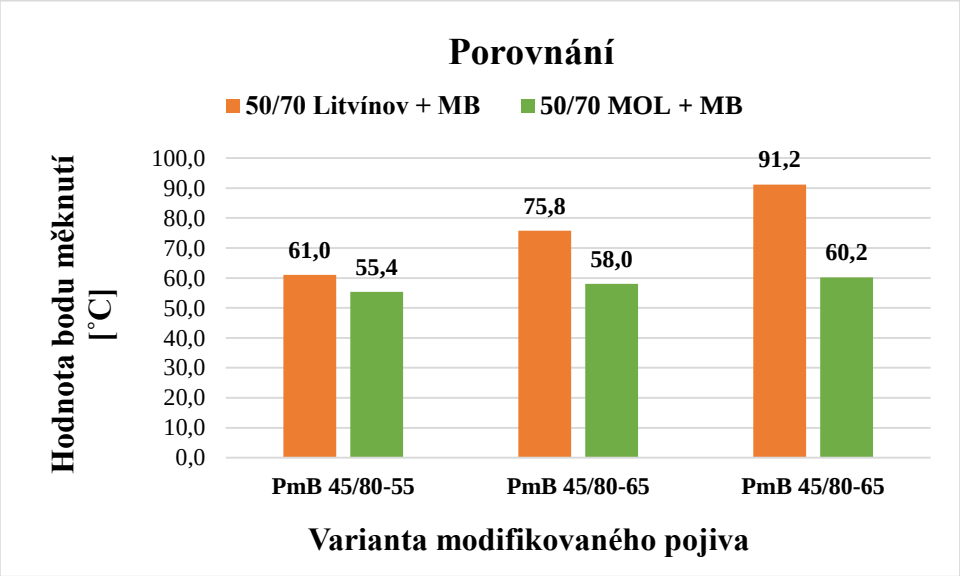
50/70 MOL + MB				
Číslo vzorku	**Označení pojiva**	**Bod měknutí [˚C]**		
7	PmB 45/80-55	55,2	55,6	**55,4**
8	PmB 45/80-65	58,0	57,8	**58,0**
9	PmB 45/80-65	60,1	60,3	**60,2**



Graf 18: Výsledky bodu měknutí - vzorky 2, 7, 8, 9

Z tabulky 19 a grafu 18 je opět zřejmé, že hodnoty bodu měknutí jsou ovlivněny modifikací. Zatímco u nemodifikovaného silničního asfaltu 50/70 MOL byla zjištěna hodnota bodu měknutí 48,6 ˚C, u modifikovaného silničního asfaltu 50/70 MOL jsou hodnoty bodu měknutí vyšší. Opět lze říci, že čím vyšší podíl modifikátoru MB, tím vyšší hodnota bodu měknutí.

4.3.2.4 Výsledky - porovnání Litvínov/MOL



Graf 19: Výsledky bodu měknutí - porovnání Litvínov/MOL

V grafu 19 jsou porovnány varianty modifikace silničního asfaltu 50/70 Litvínov a silničního asfaltu 50/70 MOL. Z grafu je zřejmé, že hodnoty bodu měknutí u modifikovaného silničního asfaltu 50/70 Litvínov jsou mnohem vyšší, než hodnoty bodu měknutí u modifikovaného silničního asfaltu 50/70 MOL. Při porovnání pouze nemodifikovaných silničních asfaltů je hodnota bodu měknutí u asfaltu 50/70 Litvínov 49,8 ˚C, u asfaltu 50/70 MOL 48,6 ˚C - viz tabulka 17.

4.3.3 Stanovení bodu lámavosti podle Fraasse

Zkouška stanovení bodu lámavosti podle Fraasse je podrobně popsána v kapitole 4.2.4. U každého vzorku asfaltového pojiva, ať už modifikovaného či nemodifikovaného, byla stanovena 2 měření, jejichž výsledky jsou zprůměrovány a zaokrouhleny na nejbližší celé číslo. Výsledky hodnoty bodu lámavosti jsou uvedeny v tabulkách 20, 21, 22 a grafech 20, 21, 22 v ˚C.

4.3.3.1 Výsledky - výchozí materiály

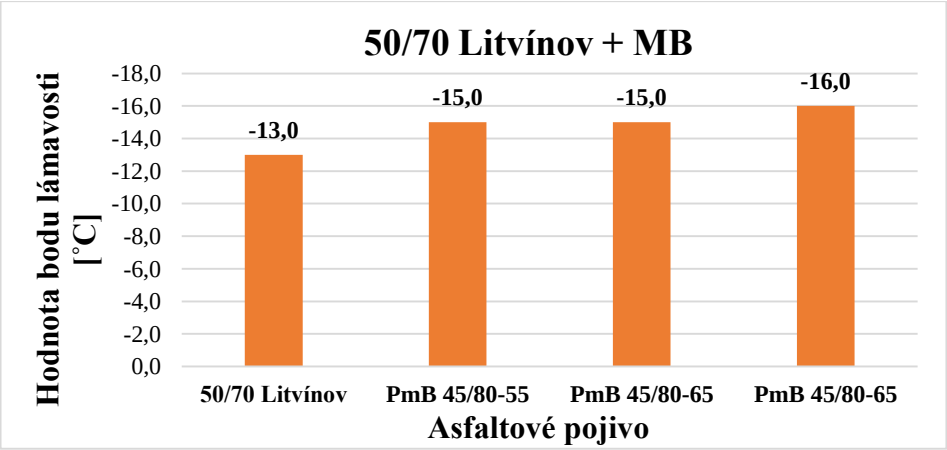
Tabulka 20: Výsledky bodu lámavosti - vzorky 1, 2, 3

Výchozí pojiva				
Číslo vzorku	**Označení pojiva**	**Bod lámavosti [˚C]**		
1	50/70 Litvínov	-12,0	-13,0	**-13,0**
2	50/70 MOL	-10,0	-10,0	**-10,0**
3	MB	-28,0	-28,0	**-28,0**

4.3.3.2 Výsledky - varianty s asfaltem 50/70 Litvínov

Tabulka 21: Výsledky bodu lámavosti - vzorky 4, 5, 6

50/70 Litvínov + MB				
Číslo vzorku	**Označení pojiva**	**Bod lámavosti [˚C]**		
4	PmB 45/80-55	-15,0	-15,0	**-15,0**
5	PmB 45/80-65	-15,0	-15,0	**-15,0**
6	PmB 45/80-65	-15,0	-16,0	**-16,0**



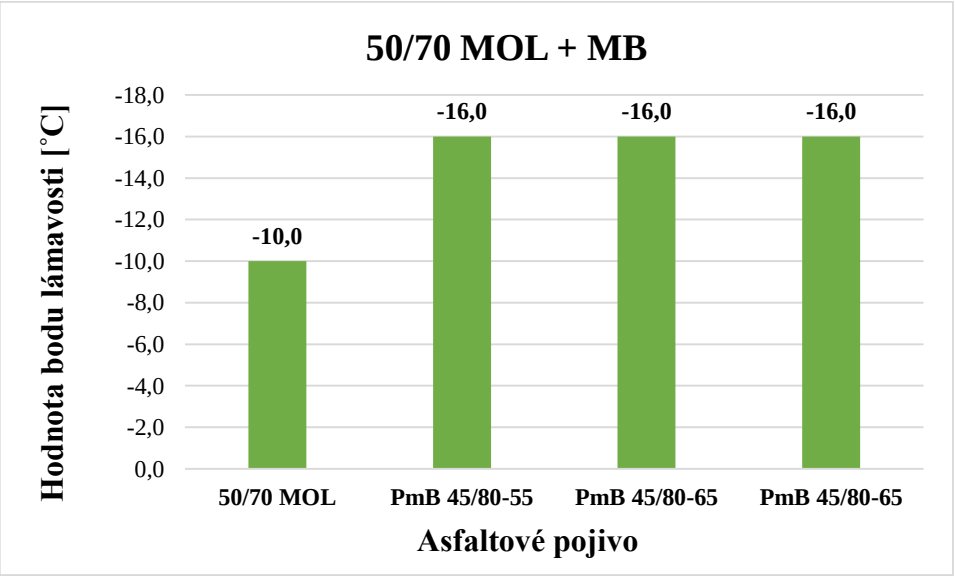
Graf 20: Výsledky bodu lámavosti: vzorky 1, 4, 5, 6

Z tabulky 21 a grafu 20 je zřejmé, že hodnoty bodu lámavosti jsou nepatrně ovlivněny modifikací. Účelem modifikace je v tomto případě snížit bod lámavosti. Zatímco u nemodifikovaného silničního asfaltu 50/70 Litvínov byla zjištěna hodnota bodu lámavosti -13 ˚C, u modifikovaného asfaltu jsou hodnoty bodu lámavosti trochu nižší. Lze říci, že množství modifikátoru MB výrazně neovlivňuje hodnotu bodu lámavosti.

4.3.3.3 Výsledky - varianty s asfaltem 50/70 MOL

Tabulka 22: Výsledky bodu lámavosti - vzorky 7, 8, 9

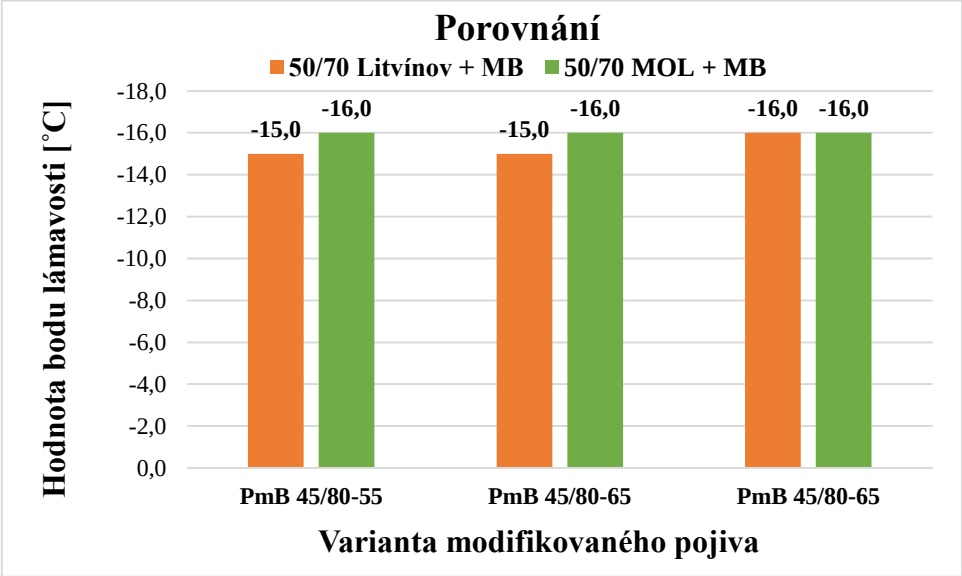
50/70 MOL + MB				
Číslo vzorku	**Označení pojiva**	**Bod lámavosti [˚C]**		
7	PmB 45/80-55	-16,0	-15,0	**-16,0**
8	PmB 45/80-65	-15,0	-16,0	**-16,0**
9	PmB 45/80-65	-16,0	-16,0	**-16,0**



Graf 21: Výsledky bodu lámavosti - vzorky 2, 7, 8, 9

Z tabulky 22 a grafu 21 je zřejmé, že hodnoty bodu lámavosti jsou opět nepatrně ovlivněny modifikací. Účelem modifikace je v tomto případě snížit bod lámavosti. Zatímco u nemodifikovaného silničního asfaltu 50/70 MOL byla zjištěna hodnota bodu lámavosti - 10 ˚C, u všech variant modifikovaného silničního asfaltu 50/70 MOL je hodnota bodu lámavosti -16 ˚C. Lze říci, že množství modifikátoru MB neovlivňuje hodnotu bodu lámavosti.

4.3.3.4 Výsledky - porovnání Litvínov/MOL



Graf 22: Výsledky bodu lámavosti - porovnání Litvínov/MOL

V grafu 22 jsou porovnány varianty modifikace silničního asfaltu 50/70 Litvínov a silničního asfaltu 50/70 MOL. Z grafu lze vypozorovat, že hodnoty bodu lámavosti u modifikovaného silničního asfaltu 50/70 Litvínov i 50/70 MOL jsou téměř shodné. Při porovnání pouze nemodifikovaných silničních asfaltů je hodnota bodu lámavosti u asfaltu 50/70 Litvínov -13 ˚C, u asfaltu 50/70 MOL -10 ˚C.

4.3.4 Stanovení vratné duktility

Zkouška stanovení vratné duktility je podrobně popsána v kapitole 4.2.5. U každého vzorku modifikovaného asfaltového pojiva bylo stanoveno 1 měření. Výsledky vratné duktility jsou uvedeny v tabulkách 23, 24, 25 a grafech 23, 24, 25 v %.

4.3.4.1 Výsledky - výchozí materiály

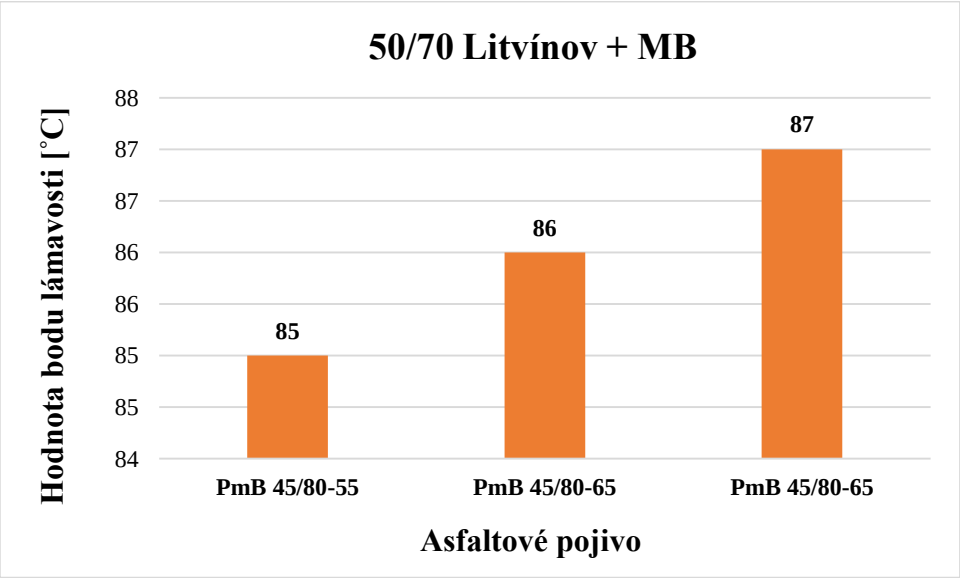
Tabulka 23: Výsledky vratné duktility - vzorek 3

Výchozí pojiva		
Číslo vzorku	**Označení pojiva**	**Vratná duktilita [%]**
3	MB	100

4.3.4.2 Výsledky - varianty s asfaltem 50/70 Litvínov

Tabulka 24: Výsledky vratné duktility - vzorky 4, 5, 6

50/70 Litvínov + MB		
Číslo vzorku	**Označení pojiva**	**Vratná duktilita [%]**
4	PmB 45/80-55	85
5	PmB 45/80-65	86
6	PmB 45/80-65	87



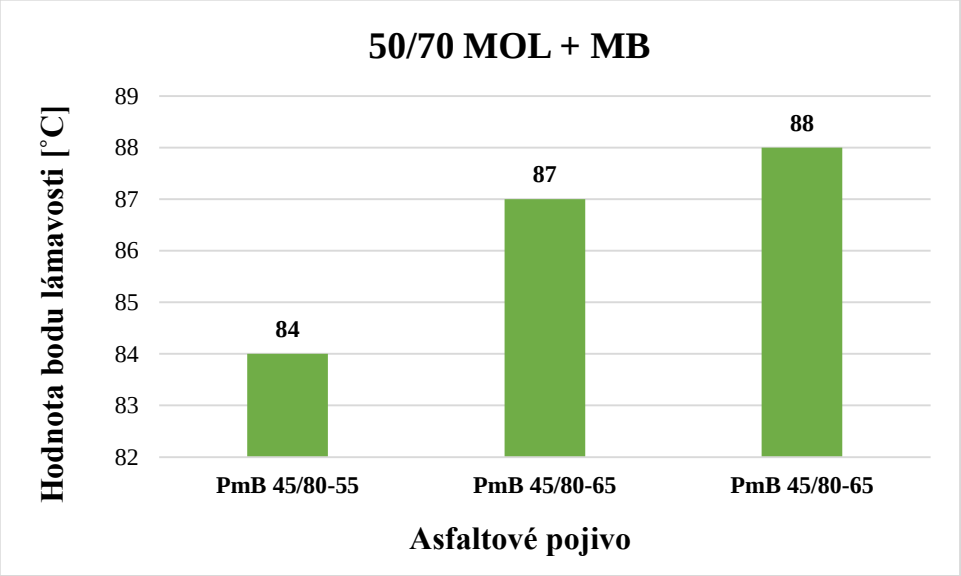
Graf 23: Výsledky vratné duktility - vzorky 1, 4, 5, 6

Z tabulky 24 a grafu 23 je zřejmé, že hodnoty vratné duktility jsou ovlivněny modifikací. Lze říci, že čím vyšší podíl modifikátoru MB, tím vyšší hodnota vratné duktility - schopnost pojiva navrátit se do původního stavu.

4.3.4.3 Výsledky - varianty s asfaltem 50/70 MOL

Tabulka 25: Výsledky vratné duktility - vzorky 7, 8, 9

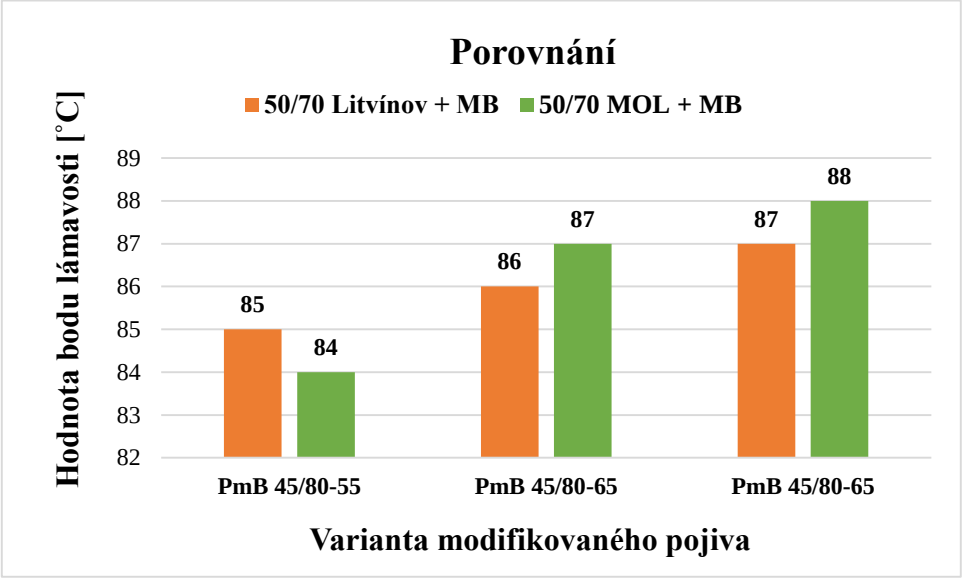
50/70 MOL + MB		
Číslo vzorku	**Označení pojiva**	**Vratná duktilita [%]**
7	PmB 45/80-55	84
8	PmB 45/80-65	87
9	PmB 45/80-65	88



Graf 24: Výsledky vratné duktility - vzorky 2, 7, 8, 9

Z tabulky 25 a grafu 24 je opět zřejmé, že hodnoty vratné duktility jsou výrazně ovlivněny modifikací. S rostoucím množstvím přidaného modifikátoru MB roste také hodnota vratné duktility.

4.3.4.4 Výsledky - porovnání Litvínov/MOL



Graf 25: Výsledky vratné duktility - porovnání Litvínov/MOL

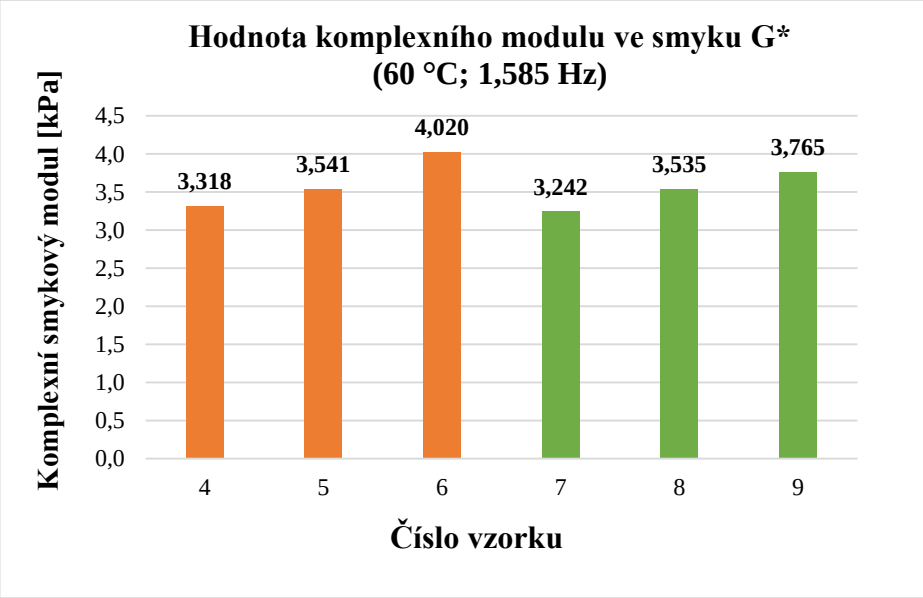
V grafu 25 jsou porovnány varianty modifikace silničního asfaltu 50/70 Litvínov a silničního asfaltu 50/70 MOL. Je zřejmé, že hodnoty vratné duktility jsou ovlivněny modifikací. S rostoucím množstvím modifikátoru roste také hodnota vratné duktility. Při porovnání Litvínov/MOL lze říci, že varianty jsou téměř shodné - stejně pružné.

4.3.5 Zkouška DSR

Zkouška DSR je podrobně popsána v kapitole 4.2.6. U každého modifikovaného vzorku asfaltového pojiva bylo stanoveno 1 měření. Výsledky zkoušky jsou uvedeny v tabulce 26 a grafech 26, 27, 28, 29. Zkušební teplota 60 °C, zkušební frekvence 1,585 Hz.

Tabulka 26: Výsledky DSR

Charakteristiky při frekvenci 1,585 Hz					
Číslo vzorku	**Označení pojiva**	**G* [kPa]**	**G´ [kPa]**	**G´´ [kPa]**	**delta [°]**
4	PmB 45/80-55 (L)	3,318	0,766	3,228	76,7
5	PmB 45/80-65 (L)	3,541	0,995	3,398	73,7
6	PmB 45/80-65 (L)	4,020	1,375	3,777	70,0
7	PmB 45/80-55 (M)	3,242	1,058	3,065	71,0
8	PmB 45/80-65 (M)	3,535	1,307	3,285	68,3
9	PmB 45/80-65 (M)	3,765	1,543	3,434	65,8

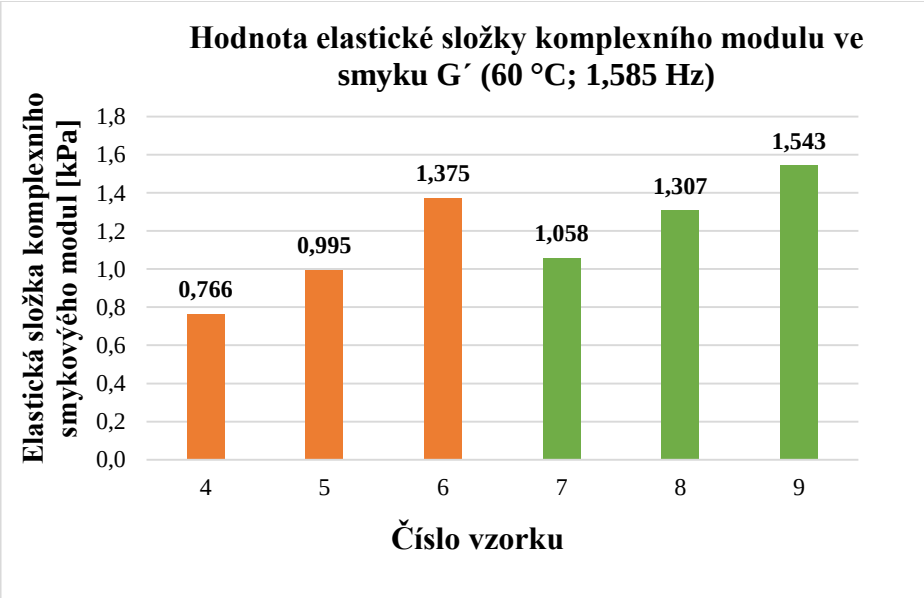


*Graf 26: Výsledky DSR - komplexní modul ve smyku G**

Při vyhodnocení zkoušky DSR lze říci, že s rostoucím množstvím MB stoupá také tuhost pojiva. Tento fakt platí pro modifikovaná pojiva vzniklá modifikací silničního asfaltu 50/70 Litvínov - vzorky 4, 5, 6 i pro modifikovaná pojiva vzniklá úpravou silničního asfaltu 50/70 MOL - vzorky 7, 8, 9. Jednotlivé hodnoty komplexního modulu

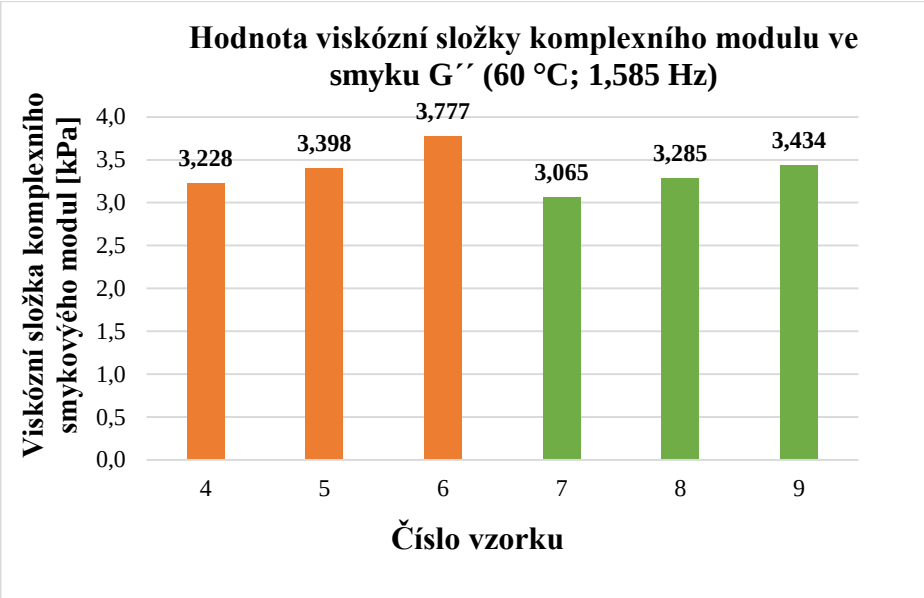
ve smyku G* jsou uvedeny v tabulce 26 a grafu 26. Při stejných poměrech míchání jsou hodnoty G* větší vždy u modifikace silničního asfaltu 50/70 Litvínov.

Hodnotu komplexního modulu ve smyku, lze rozložit do dvou složek, na složku pružnou (elastickou) a viskózní. Hodnoty těchto dílčích složek jsou uvedeny v tabulce 26 a grafech 27 a 28.



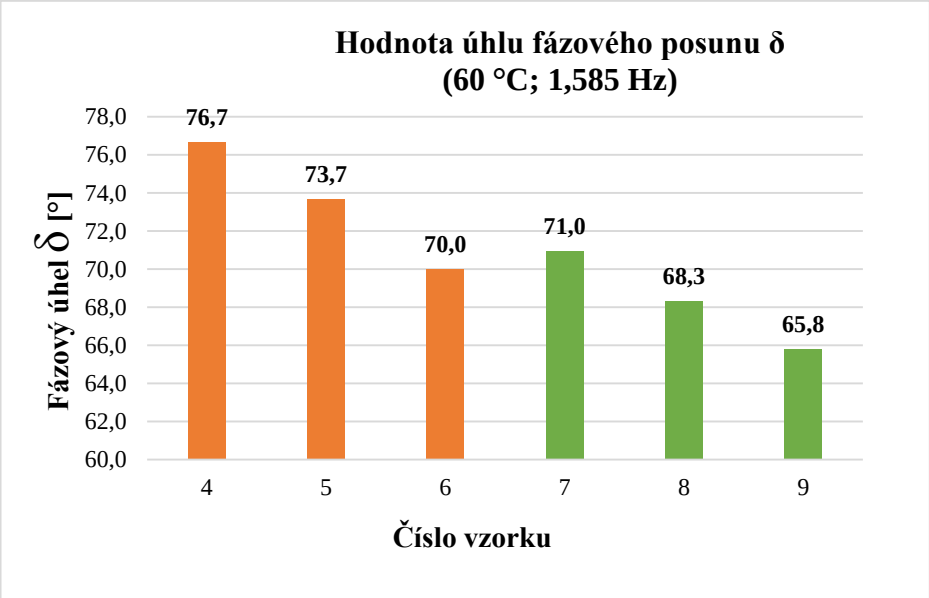
Graf 27: Výsledky DSR - elastická složka komplexního modulu ve smyku G´

Z grafu 27 plyne, že hodnota elastické složky komplexního modulu ve smyku G´ při teplotě 60 °C je vždy větší u modifikace silničního asfaltu 50/70 MOL - vzorky 7, 8, 9, tzn. je pružnější - lepší z tohoto hlediska. Navíc lze říci, že s rostoucím množstvím MB, se stává pojivo pružnější - platí pro Litvínov i MOL.



Graf 28: Výsledky DSR - viskózní složka komplexního modulu ve smyku G´´

Z grafu 28 plyne, že hodnota viskózní složky komplexního modulu ve smyku G´´ při teplotě 60 °C je vždy větší u modifikace silničního asfaltu 50/70 Litvínov - vzorky 4, 5, 6, tzn. je viskóznější - horší z toho hlediska. Navíc lze říci, že s rostoucím množstvím MB, se stává pojivo viskóznější - platí pro Litvínov i MOL.



*Graf 29: Výsledky DSR - hodnota úhlu fázového posunu **δ***

Čím je hodnota úhlu fázového posunu δ menší, tím je asfaltové pojivo pružnější. Z grafu 29 plyne, že modifikovaná pojiva vzniklá modifikací silničního asfaltu 50/70 MOL jsou pružnější - vzorky 7, 8, 9.

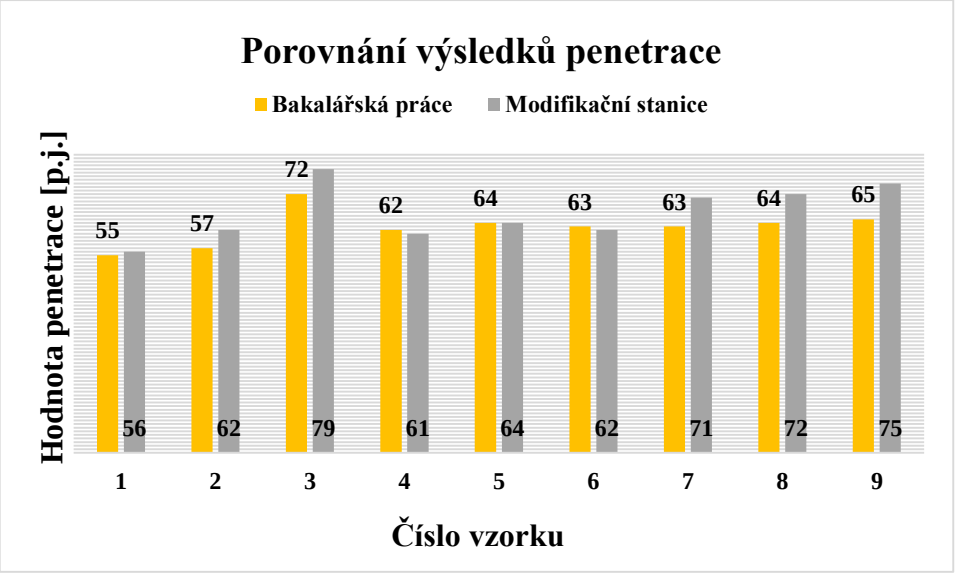
4.4 Porovnání výsledků s modifikační stanicí

V této kapitole je věnována pozornost porovnání výsledků jednotlivých zkoušek, které byly provedeny na zkušebních vzorcích asfaltových pojiv nemodifikovaných i modifikovaných polymerem viz kapitola 4.3, s výsledky modifikační stanice. Konkrétně se jedná o empirické zkoušky stanovení penetrace jehlou, stanovení bodu měknutí, stanovení bodu lámavosti podle Fraasse a stanovení vratné duktility. Vše je zpracováno do tabulek a grafů.

4.4.1 Stanovení penetrace jehlou

Tabulka 27: Porovnání výsledků penetrace

Výsledky - penetrace [p. j.]			
Číslo vzorku	**Označení pojiva**	**Bakalářská práce**	**Modifikační stanice**
1	50/70 Litvínov	**55**	**56**
2	50/70 MOL	**57**	**62**
3	MB	**72**	**79**
4	PmB 45/80-55 (L)	**62**	**61**
5	PmB 45/80-65 (L)	**64**	**64**
6	PmB 45/80-65 (L)	**63**	**62**
7	PmB 45/80-55 (M)	**63**	**71**
8	PmB 45/80-65 (M)	**64**	**72**
9	PmB 45/80-65 (M)	**65**	**75**



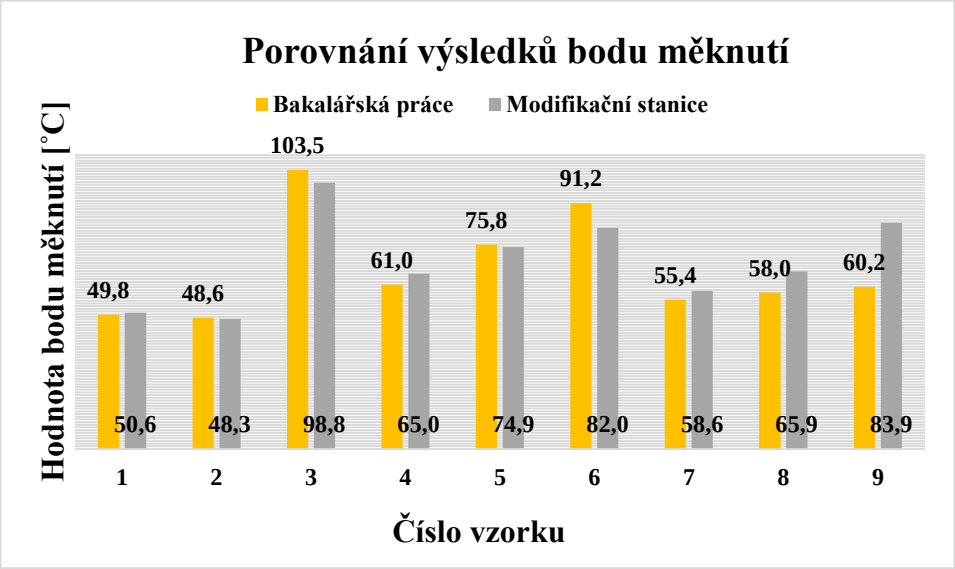
Graf 30: Porovnání výsledků penetrace

V tabulce 27 a grafu 30 jsou porovnány výsledky bakalářské práce s výsledky modifikační stanice, které byly stanoveny na totožných vzorcích asfaltových pojiv. Výsledky bakalářské práce související s nemodifikovaným silničním asfaltem gradace 50/70 Litvínov a jeho následnou modifikací lze považovat za téměř shodné s výsledky modifikační stanice. Konkrétně je jedná o vzorky s označením 1, 4, 5, 6. Rozdíly jsou mizivé, vzhledem k tomu, že norma ČSN EN 1426 uvádí maximální rozdíl platných stanovení 2 p. j. pro penetraci do 49 p. j. nebo 4 p. j. pro penetraci od 50 do 149 p. j. Porovnání výsledků bakalářské práce související s nemodifikovaným silničním asfaltem gradace 50/70 MOL a jeho následnou modifikací s výsledky modifikační stanice je složitější. Konkrétně je jedná o vzorky s označením 2, 7, 8, 9. Rozdíly jsou patrné, až 10 p. j. Důvodem může být stárnutí pojiva. Asfalt fyzikálními a chemickými procesy stárne - stává se tvrdším.

4.4.2 Stanovení bodu měknutí

Tabulka 28: Porovnání výsledků bodu měknutí

Výsledky - bod měknutí [°C]			
Číslo vzorku	**Označení pojiva**	**Bakalářská práce**	**Modifikační stanice**
1	50/70 Litvínov	**49,8**	**50,6**
2	50/70 MOL	**48,6**	**48,3**
3	MB	**103,5**	**98,8**
4	PmB 45/80-55 (L)	**61,0**	**65,0**
5	PmB 45/80-65 (L)	**75,8**	**74,9**
6	PmB 45/80-65 (L)	**91,2**	**82,0**
7	PmB 45/80-55 (M)	**55,4**	**58,6**
8	PmB 45/80-65 (M)	**58,0**	**65,9**
9	PmB 45/80-65 (M)	**60,2**	**83,9**



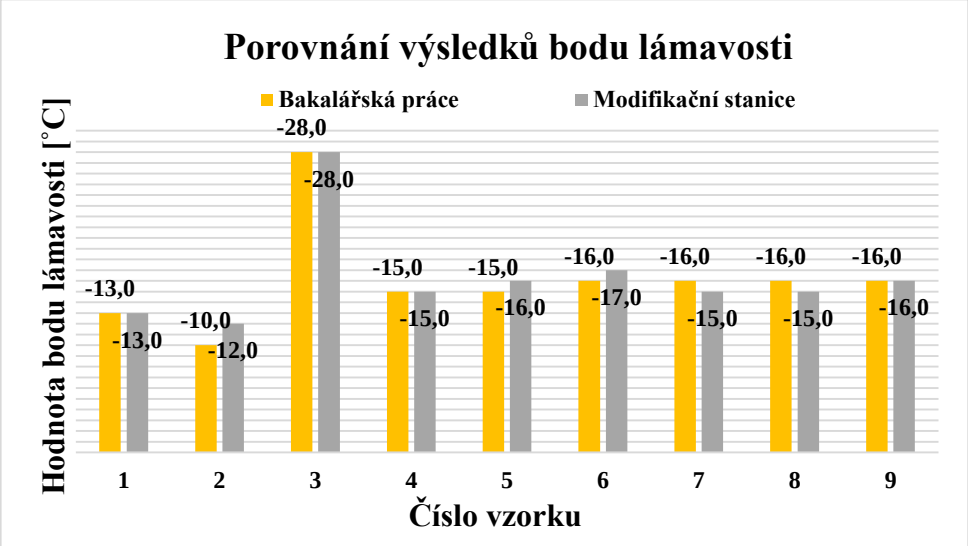
Graf 31: Porovnání výsledků bodu měknutí

Porovnání výsledků bakalářské práce a výsledků modifikační stanice u zkoušky stanovení bodu měknutí je zřejmé z tabulky 28 a grafu 31. V případě nemodifikovaných silničních asfaltů 50/70 Litvínov a 50/70 MOL lze považovat výsledky bodu měknutí za shodné - norma ČSN EN 1427 umožňuje maximální rozdíl platných stanovení 1 °C - vzorky 1, 2. U modifikovaných asfaltových pojiv jsou však značné rozdíly, zejména u modifikace silničního asfaltu 50/70 MOL - vzorky 7, 8, 9.

4.4.3 Stanovení bodu lámavosti

Tabulka 29: Porovnání výsledků bodu lámavosti

Výsledky - bod lámavosti [˚C]			
Číslo vzorku	**Označení pojiva**	**Bakalářská práce**	**Modifikační stanice**
1	50/70 Litvínov	**-13,0**	**-13,0**
2	50/70 MOL	**-10,0**	**-12,0**
3	MB	**-28,0**	**-28,0**
4	PmB 45/80-55 (L)	**-15,0**	**-15,0**
5	PmB 45/80-65 (L)	**-15,0**	**-16,0**
6	PmB 45/80-65 (L)	**-16,0**	**-17,0**
7	PmB 45/80-55 (M)	**-16,0**	**-15,0**
8	PmB 45/80-65 (M)	**-16,0**	**-15,0**
9	PmB 45/80-65 (M)	**-16,0**	**-16,0**



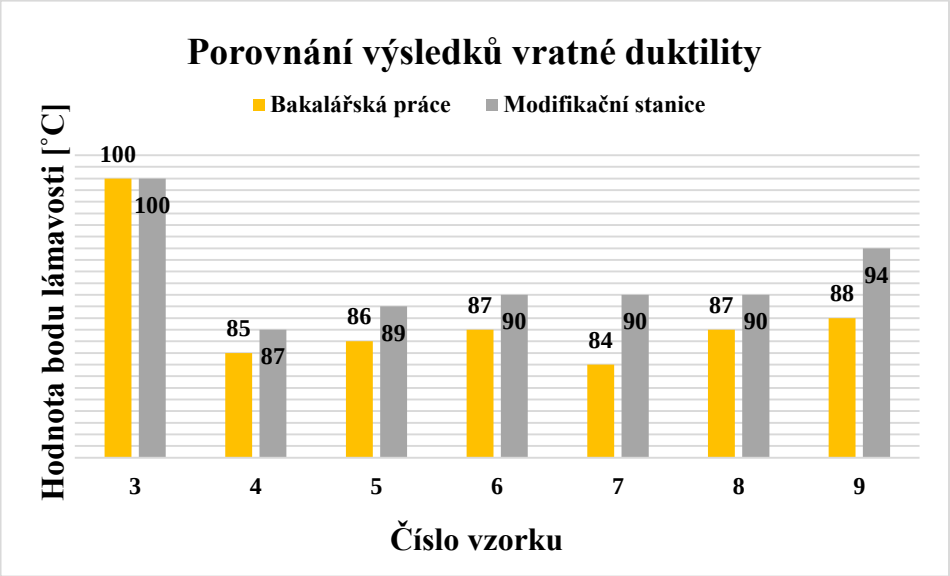
Graf 32: Porovnání výsledků bodu lámavosti

V případě porovnání výsledků bakalářské práce a výsledků modifikační stanice u zkoušky stanovení bodu lámavosti podle Fraasse lze říci, že výsledky jsou téměř shodné u všech vzorků - viz tabulka 29 a graf 32. V případě vzorků 1, 3, 4, 9 dokonce zcela shodné. U ostatních vzorků jsou rozdíly nepatrné vzhledem k tomu, že norma ČSN EN 12593 uvádí maximální rozdíl platných stanovení 3 ˚C.

4.4.4 Stanovení vratné duktility

Tabulka 30: Porovnání výsledků vratné duktility

Výsledky - vratná duktilita [%]			
Číslo vzorku	**Označení pojiva**	**Bakalářská práce**	**Modifikační stanice**
3	MB	**100**	**100**
4	PmB 45/80-55 (L)	**85**	**87**
5	PmB 45/80-65 (L)	**86**	**89**
6	PmB 45/80-65 (L)	**87**	**90**
7	PmB 45/80-55 (M)	**84**	**90**
8	PmB 45/80-65 (M)	**87**	**90**
9	PmB 45/80-65 (M)	**88**	**94**



Graf 33: Porovnání výsledků vratné duktility

V případě porovnání výsledků bakalářské práce a výsledků modifikační stanice u zkoušky vratné duktility má význam porovnání pouze u modifikovaných asfaltů. Lze říci, že vzorky vzniklé modifikací asfaltu 50/70 Litvínov i 50/70 MOL pro účely zkoušení v rámci bakalářské práce jsou méně pružné - mají menší hodnotu vratné duktility, než vzorky modifikační stanice - viz tabulka 30 a graf 33.

5 ZÁVĚR

V bakalářské práci byla zpracována problematika modifikovaných asfaltových pojiv. Práce byla rozdělena na část teoretickou a část praktickou.

V teoretické části bylo cílem seznámit se teoreticky s problematikou modifikovaných asfaltových pojiv. Jinými slovy seznámit se s charakteristickými vlastnostmi asfaltů jako takovými, dále základními druhy asfaltů, zjistit význam modifikovaného asfaltového pojiva, vlastnosti tohoto pojiva, rozdělení modifikátorů, způsob označování a produkce modifikovaných asfaltových pojiv PmB v České republice

V druhé části práce bylo cílem najít optimální zdroj silničního nemodifikovaného asfaltového pojiva pro výrobu polymerem modifikovaného asfaltového pojiva. Laboratorně byly připraveny vzorky modifikovaných asfaltových pojiv s různým stupněm modifikace. Vstupním materiálem byl nemodifikovaný silniční asfalt 50/70 Litvínov, nemodifikovaný silniční asfalt 50/70 MOL a koncentrát používaný k modifikaci MB dodaný prováděcí firmou. Poměry pro míchání a podmínky míchání byly předem stanoveny prováděcí firmou. Laboratorně připravené vzorky byly podrobeny empirickému a funkčnímu zkoušení. Tyto zkoušky byly následně vyhodnoceny a výsledky zpracovány do tabulek a grafů.

První zkouškou byla základní empirická zkouška stanovení penetrace jehlou. Z výsledků je zřejmé, že hodnoty penetrace jsou ovlivněny modifikací. Obecně lze říci, že s rostoucím množstvím modifikátoru roste také hodnota penetrace. Při porovnání variant modifikace Litvínov/MOL jsou hodnoty srovnatelné, znamená to jediné, že druh výchozího nemodifikovaného pojiva neovlivňuje hodnotu penetrace.

Další zkouškou bylo stanovení bodu měknutí. Z výsledků je zřejmé, že hodnoty bodu měknutí jsou opět ovlivněny modifikací. S rostoucím množstvím přidaného koncentrátu MB roste také hodnota bodu měknutí. Přidané aditivum pozitivně ovlivňuje vlastnosti asfaltového pojiva, rozšiřuje jeho obor použitelnosti. Při porovnání variant modifikace Litvínov/MOL lze říci, že varianty vzniklé modifikací 50/70 Litvínov jsou odolnější vůči vyšším teplotám, jejich bod měknutí je větší než u modifikace 50/70 MOL.

Dále byla provedena zkouška stanovení bodu lámavosti podle Fraasse. Na základě výsledků je možno říci, že hodnoty bodu lámavosti jsou pouze nepatrně ovlivněny modifikací. Výrazněji jsou ovlivněny varianty míchání vzniklé modifikací 50/70 MOL.

Při porovnání Litvínov/MOL lze dojít k závěru, že výchozí nemodifikované pojivo neovlivňuje hodnotu bodu lámavosti.

Poslední empirickou zkouškou, která byla provedena, je stanovení vratné duktility. Tato zkouška má význam pouze u modifikovaných asfaltových pojiv. Hodnotou vratné duktility lze vyjádřit míru elastického chování modifikovaných asfaltů. Z výsledků je zřejmé, že hodnoty vratné duktility jsou ovlivněny modifikací. S rostoucím množstvím modifikátoru roste také hodnota vratné duktility - návratnosti. Při porovnání Litvínov/MOL lze říci, že varianty jsou téměř totožné.

Funkční zkouškou, která byla provedena na vzorcích, je zkouška DSR - dynamický smykový reometr. Cílem zkoušky bylo zjistit tuhost asfaltového pojiva. Zkoušce byla podrobena pouze modifikovaná asfaltová pojiva. Z výsledků plyne, že pojiva vzniklá modifikací silničního asfaltu 50/70 MOL jsou při teplotě 60 °C pružnější.

Nad rámec zadání bakalářské práce byly výsledky jednotlivých zkoušek srovnány s výsledky z modifikační stanice. Při porovnání nelze zcela říci, že výsledky bakalářské práce odpovídají vždy výsledkům z modifikační stanice - důvodem může být např. stárnutí pojiva v případě penetrace, neshodnost výchozích materiálů pro modifikaci nebo také nepřesnost měření. Na závěr je možno uvést doporučení pro příště - pro zpřesnění výsledků by bylo vhodné v navazujících bakalářských pracích provést stanovení výše uvedených parametrů na větším množství vzorků, výsledky by poté mohly být objektivnější.

6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] ZAJÍČEK, Jan. *Technologie stavby vozovek*. Praha: ČKAIT, 2014. ISBN 978-80-87438-59-6.

[2] GSCHWENDT, Ivan. *Vozovky: obnova, zesilování a rekonstrukce*. Bratislava: Jaga, 2004. ISBN 80-8076-005-5.

[3] GSCHWENDT, Ivan. *Vozovky: materiály a technológie.* Bratislava: Jaga group, 2001. ISBN 80-88905-52-4.

[4] READ, John, David. WHITEOAK a Robert N. HUNTER. *The Shell Bitumen handbook*. 5th ed. London: Thomas Telford, 2003. ISBN 072773220X.

[5] VARAUS, Michal. *Pozemní komunikace II: Asfaltová pojiva*. Brno, 2005, 17 s

[6] ČSN EN 12597. *Asfalty a asfaltová pojiva - Terminologie*. Praha: Český normalizační institut, 2001.

[7] ČSN EN 12591. *Asfalty a asfaltová pojiva - Specifikace pro silniční asfalty.* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, 2009.

[8] ČSN 14023. *Asfalty a asfaltová pojiva - Systém specifikace pro polymerem modifikované asfalty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, 2010.

[9] ČSN EN 12594. *Asfalty a asfaltová pojiva - Příprava analytických vzorků*. Praha: Český normalizační institut, 2007.

[10] ČSN EN 1426. *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení penetrace jehlou*. Praha: Český normalizační institut, 2007.

[11] ČSN EN 1427. *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení bodu měknutí - Metoda kroužek a kulička*. Praha: Český normalizační institut, 2007.

[12] ČSN EN 12593. *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení bodu lámavosti podle Fraasse*. Praha: Český normalizační institut, 2007.

[13] ČSN EN 13398. *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení vratné duktility modifikovaných asfaltů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, 2010.

[14] ČSN EN 14770. *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu - Dynamický smykový reometr (DSR)*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, 2012.

[15] HÝZL, Petr. VUT, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. *Zkoušení asfaltových pojiv*. Přednáška předmětu: Pozemní komunikace II, 2011.

[16] COUFALÍK, Pavel a Iva KRČMOVÁ. VUT, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. *Asfaltová pojiva - část č. 1*. Přednáška předmětu: Pozemní komunikace II, 2016.

[17] VYMAZAL, Tomáš a Jan KUDRNA. VUT, Fakulta stavební, Ústav stavební zkušebnictví. *Asfalty a dehty*. Přednáška předmětu: Stavební látky, 2008.

[18] KUDRNA, Jan. *Návrh a stavba vozovek. Krytové vrstvy vozovek: Téma II - Materiály a hmoty ve výstavbě pozemních komunikací* [online]. 2011. [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: http://www.vzdelavanimkekvalite.cz/PDFs/DT%203%20Asfaltove%20vrstvy.pdf

[19] BUCHTA, Jaroslav. *Asfalty a asfaltové výrobky*. *ČAPPO* [online]. 2013 [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: http://www.cappo.cz/ropne-vyrobky/pevne-uhlovodiky/asfalty-a-asfaltove-vyrobky/

[20] *Sdružení pro výstavbu silnic Praha* [online]. [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: http://www.sdruzeni-silnice.cz/

[21] *Petroleum.cz* [online]. 2007 [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: http://www.petroleum.cz/vyrobky/asfalty-silnicni.aspx

[22] *Ložiska energetických surovin* [online]. [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: http://geologie.vsb.cz/loziska/loziska/energsur/asfalt.html

[23] *RPG Recycling, s.r.o.* [online]. [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: http://www.rpgrecycling.cz/

[24] *Sycorex CR s.r.o.* [online]. [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: http://www.sycorex.cz/dopravni-stavby/

[25] DAŠEK Ondřej, Petr HÝZL a kolektiv. *Metodika pro hodnocení silničních asfaltů z hlediska náchylnosti k termooxidačnímu stárnutí*. 2016

[26] MUSIL, Vladimír. *Relaxace smykového napětí asfaltových pojiv v DSR*. Brno, 2014. 72 s., 13s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.

[27] PĚNČÍK, Michal. *Pojiva do netuhých vozovek*. Brno, 2013. 73s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Petr Hýzl, Ph.D.

7 SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Vývoj produkce asfaltů v letech 2010 - 2015 [20] 18
Graf 2: Vývoj produkce silničního asfaltu v letech 2010 - 2015 [20] 19
Graf 3: Vývoj produkce PmB v letech 2010 - 2015 [20] 19
Graf 4: Zkušební vzorek č. 1 22
Graf 5: Zkušební vzorek č. 2 22
Graf 6: Zkušební vzorek č. 3 22
Graf 7: Zkušební vzorek č. 4 23
Graf 8: Zkušební vzorek č. 5 23
Graf 9: Zkušební vzorek č. 6 24
Graf 10: Zkušební vzorek č. 7 24
Graf 11: Zkušební vzorek č. 8 25
Graf 12: Zkušební vzorek č. 9 25
Graf 13: Výsledky penetrace - vzorky 1, 2 42
Graf 14: Výsledky penetrace - vzorky 1, 4, 5, 6 43
Graf 15: Výsledky penetrace - vzorky 2, 7, 8, 9 44
Graf 16: Výsledky penetrace - porovnání Litvínov/MOL 45
Graf 17: Výsledky bodu měknutí: vzorky 1, 4, 5, 6 46
Graf 18: Výsledky bodu měknutí - vzorky 2, 7, 8, 9 47
Graf 19: Výsledky bodu měknutí - porovnání Litvínov/MOL 48
Graf 20: Výsledky bodu lámavosti: vzorky 1, 4, 5, 6 49
Graf 21: Výsledky bodu lámavosti - vzorky 2, 7, 8, 9 50
Graf 22: Výsledky bodu lámavosti - porovnání Litvínov/MOL 51
Graf 23: Výsledky vratné duktility - vzorky 1, 4, 5, 6 52
Graf 24: Výsledky vratné duktility - vzorky 2, 7, 8, 9 53
Graf 25: Výsledky vratné duktility - porovnání Litvínov/MOL 54
Graf 26: Výsledky DSR - komplexní modul ve smyku G* 55
Graf 27: Výsledky DSR - elastická složka komplexního modulu ve smyku G´ 56
Graf 28: Výsledky DSR - viskózní složka komplexního modulu ve smyku G´´ 57
Graf 29: Výsledky DSR - hodnota úhlu fázového posunu **δ** 57
Graf 30: Porovnání výsledků penetrace 58
Graf 31: Porovnání výsledků bodu měknutí 60
Graf 32: Porovnání výsledků bodu lámavosti 61

Graf 33: Porovnání výsledků vratné duktility..... 62

8 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Visko - elastické chování asfaltu [26] 12
Obrázek 2: Ukázka asfaltové horniny [22] 13
Obrázek 3: Obor použitelnosti asfaltu [16] 15
Obrázek 4: Ukázka pryžového granulátu [23] 16
Obrázek 5: Laboratorní váha 26
Obrázek 6: Nádoby s analytickými vzorky pro stanovení penetrace 27
Obrázek 7: Přenášecí miska a nádoba se zkušebním vzorkem asfaltového pojiva 28
Obrázek 8: Příklad naměřené hodnoty penetrace 29
Obrázek 9: Dva páry mosazných kroužků na odlévací destičce 31
Obrázek 10: Ukázka seříznutí asfaltového pojiva 31
Obrázek 11: Sestava pro stanovení bodu měknutí 32
Obrázek 12: Zkušební zařízení 32
Obrázek 13: Propad kuliček 33
Obrázek 14: Suchý led potřebný pro zkoušku 34
Obrázek 15: Zkušební plíšky 35
Obrázek 16: Porušení zkušebního vzorku trhlinou 36
Obrázek 17: Formovací souprava 38
Obrázek 18: Protahování asfaltových vláken 39
Obrázek 19: Návratnost asfaltových polovláken 39
Obrázek 20: Zkušební vzorek pro zkoušku DSR 40
Obrázek 21: Dynamický smykový reometr [25] 41

9 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Označení asfaltových pojiv v bakalářské práci 17
Tabulka 2: Vývoj produkce asfaltů v letech 2010 -2015 [20] 18
Tabulka 3: Výchozí materiály 21
Tabulka 4: Varianty modifikovaných asfaltových pojiv 21
Tabulka 5: Vzorky pojiv 1, 2, 3 22
Tabulka 6: Vzorky pojiv 4, 5, 6 23
Tabulka 7: Vzorky pojiv 7, 8, 9 24
Tabulka 8: Seznam laboratorních zkoušek a příslušných norem 26
Tabulka 9: Stanovené podmínky zkoušení pro penetraci 27
Tabulka 10: Maximální rozdíl platných stanovení 29
Tabulka 11: Kapalinová lázeň pro stanovení bodu měknutí 30
Tabulka 12: Podmínky pro opakování zkoušky kroužek a kulička 33
Tabulka 13: Stanovené podmínky zkoušení pro vratnou duktilitu 37
Tabulka 14: Výsledky penetrace - vzorky 1, 2, 3 42
Tabulka 15: Výsledky penetrace - vzorky 4, 5, 6 43
Tabulka 16: Výsledky penetrace - vzorky 7, 8, 9 44
Tabulka 17: Výsledky bodu měknutí - vzorky 1, 2, 3 46
Tabulka 18: Výsledky bodu měknutí - vzorky 4, 5, 6 46
Tabulka 19: Výsledky bodu měknutí - vzorky 7, 8, 9 47
Tabulka 20: Výsledky bodu lámavosti - vzorky 1, 2, 3 49
Tabulka 21: Výsledky bodu lámavosti - vzorky 4, 5, 6 49
Tabulka 22: Výsledky bodu lámavosti - vzorky 7, 8, 9 50
Tabulka 23: Výsledky vratné duktility - vzorek 3 52
Tabulka 24: Výsledky vratné duktility - vzorky 4, 5, 6 52
Tabulka 25: Výsledky vratné duktility - vzorky 7, 8, 9 53
Tabulka 26: Výsledky DSR 55
Tabulka 27: Porovnání výsledků penetrace 58
Tabulka 28: Porovnání výsledků bodu měknutí 60
Tabulka 29: Porovnání výsledků bodu lámavosti 61
Tabulka 30: Porovnání výsledků vratné duktility 62