



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

VLIV VSTUPNÍHO ASFALTU NA VLASTNOSTI POLYMEREM MODIFIKOVANÝCH ASFALTŮ

INFLUENCE OF VIRGIN BITUMEN ON THE PROPERTIES OF POLYMER MODIFIED BITUMENS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Monika Kamanová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav pozemních komunikací
Studentka: **Bc. Monika Kamanová**
Vedoucí práce: **doc. Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.**
Akademický rok: 2022/23
Studijní program: N0732A260026 Stavební inženýrství – konstrukce a dopravní stavby

Děkan Fakulty Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Vliv vstupního asfaltu na vlastnosti polymerem modifikovaných asfaltů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Studentka bude zjišťovat vliv různých druhů vstupních asfaltů na výsledné vlastnosti vyrobeného polymerem modifikovaného asfaltu.

Cíle a výstupy diplomové práce:

Cílem diplomové práce bude popsat vliv použitého vstupního silničního asfaltu na vlastnosti vyrobeného polymerem modifikovaného asfaltu. Vlastnosti srovnávaných polymerem modifikovaných asfaltů budou hodnoceny pomocí vhodných laboratorních zkoušek.

Seznam doporučené literatury a podklady:

Předané vzorky asfaltových pojiv

Normy ČSN 65 7204, ČSN 65 7222-1, ČSN EN 1426, ČSN EN 1427, ČSN EN 14770, ČSN EN 14771, ČSN EN 12593, ČSN EN 13398, ČSN EN 12607-1, ČSN EN 14769

Literatura z internetu

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 29. 3. 2022

L. S.

prof. Dr.techn. Ing. Michal Varaus
vedoucí ústavu

doc. Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.
vedoucí práce

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr. h. c.
děkan

ABSTRAKT

Diplomová práce popisuje vliv použitého vstupního silničního asfaltu na vlastnosti vyrobeného polymerem modifikovaného asfaltu. V teoretické části jsou vysvětleny vlastnosti asfaltových pojiv a zlepšení jejich vlastností po přidání modifikačních přísad. V druhé části jsou popsány metody a poté výsledky jednotlivých zkoušek. K porovnání vlastností pojiv byly provedeny empirické zkoušky (penetrace jehlou, bod měknutí, bod lámavosti) a funkční zkoušky za pomoci dynamického smykového reometru (DSR) a průhybového trámečkového reometru (BBR). V závěru této části je popsáno podrobněji laboratorní stárnutí asfaltových pojiv metodou RTFOT a metodou RTFOT+PAV.

KLÍČOVÁ SLOVA

vstupní asfalt, polymerem modifikovaný asfalt, modifikační přísady, SBS, Styrene Butadiene Styrene, penetrace jehlou, bod měknutí, bod lámavosti, komplexní smykový modul, fázový úhel, BBR, RTFOT, PAV

ABSTRACT

The diploma thesis describes the influence of the used input paving bitumen on the properties of the produced polymer modified bitumen. The theoretical part explains parameters of asphalt binders and improving their properties after using modifying additives. The second part is explaining methods and test results. The empirical tests (needle penetration, softening point, breaking point) and performance tests in dynamic shear rheometer and bending beam rheometer are used for comparison of binders properties. In the conclusion the laboratory aging of asphalt binders is described by RTFOT and RTFOT+PAV method.

KEYWORDS

virgin bitumen, polymer modified bitumen, modifying additives, SBS, Styrene Butadiene Styrene, needle penetration, softening point, breaking point, complex shear modulus, phase angle, BBR, RTFOT, PAV

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Monika Kamanová. *Vliv vstupního asfaltu na vlastnosti polymerem modifikovaných asfaltů*. Brno, 2023. 91 s Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce doc. Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Vliv vstupního asfaltu na vlastnosti polymerem modifikovaných asfaltů* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 13. 01. 2023

Bc. Monika Kamanová

autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Vliv vstupního asfaltu na vlastnosti polymerem modifikovaných asfaltů* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 13. 01. 2023

Bc. Monika Kamanová

autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala vedoucímu práce doc. Ing. Ondřeji Daškovi, Ph.D., za cenné rady a věnovaný čas v průběhu zpracování této diplomové práce. Zvláště bych chtěla poděkovat Ing. Tomáši Koudelkovi, Ph.D. za odborné konzultace, poskytnuté materiály a přípravu poživ. A v neposlední řadě svým blízkým za podporu po celou dobu studia.

OBSAH

1.	ÚVOD	10
2.	REŠERŠE LITERATURY	11
2.1	CHARAKTERISTIKA ASFALTU.....	11
2.2	VÝROBA ASFALTŮ	12
2.3	PRODUKCE, SPOTŘEBA ROPY A ASFALTŮ	14
2.4	MODIFIKOVANÉ ASFALTY (PMB).....	15
2.5	VLASTNOSTI PMB.....	16
2.6	ROZDĚLENÍ POLYMERŮ	17
2.7	TERMOPLASTICKÉ ELASTOMERY	18
2.8	VÝROBA PMB	19
2.9	VLIV SKLADOVACÍ TEPLoty	21
2.10	VLIV KONCENTRACE POLYMERU S-KŘIVKA.....	22
2.11	ÚČINEK ZÁKLADNÍHO ASFALTOVÉHO POJIVA	23
3.	CÍLE PRÁCE	24
4.	POUŽITÉ ZKUŠEBNÍ METODY	25
4.1	STANOVENÍ PENETRACE JEHLOU.....	25
4.2	STANOVENÍ BODU MĚKKNUTÍ – METODA KROUŽEK A KULIČKA	27
4.3	STANOVENÍ KOMPLEXNÍHO SMYKOVÉHO MODULU A FÁZOVÉHO ÚHLU V DSR	29
4.4	STANOVENÍ BODU LÁMAVOSTI PODLE FRAASSE.....	32
4.5	STANOVENÍ ODOLNOSTI PROTI STÁRNUTÍ VLIVEM TEPLA A VZDUCHU – METODA RTFOT	35
4.6	URÝCHLENÉ DLOUHODOBÉ STÁRNUTÍ V TLAKOVÉ NÁDOBĚ PAV	36
4.7	STANOVENÍ MODULU TUHOSTI ZA OHYBU POMOCÍ PRŮHYBOVÉHO TRÁMEČKOVÉHO REOMETRU BBR 38	
5.	POUŽITÉ MATERIÁLY.....	41
6.	VÝSLEDKY ZKOUŠEK.....	42
6.1	STANOVENÍ PENETRACE JEHLOU.....	42
6.2	STANOVENÍ BODU MĚKKNUTÍ – METODA KROUŽEK A KULIČKA	44
6.3	STANOVENÍ KOMPLEXNÍHO SMYKOVÉHO MODULU A FÁZOVÉHO ÚHLU V DSR	48
6.4	STANOVENÍ BODU LÁMAVOSTI PODLE FRAASSE.....	60
6.5	STANOVENÍ MODULU TUHOSTI ZA OHYBU POMOCÍ PRŮHYBOVÉHO TRÁMEČKOVÉHO REOMETRU BBR 61	
6.6	ZÁVISLOSTI MEZI VÝSLEDKY ZKOUŠEK	71
7.	ZÁVĚR.....	80
8.	CITOVANÁ LITERATURA	83

9.	SEZNAMY	87
9.1	SEZNAM OBRAZKŮ.....	87
9.2	SEZNAM TABULEK.....	89
9.3	SEZNAM GRAFŮ	90

1. ÚVOD

Bez ropy už si dnešní svět ani nedokážeme představit. Využití ropy je téměř ve všech odvětvích, zejména v dopravě, buď jako pohonná hmota, nebo jako stavební materiál do vozovek. Na rozdíl od některých jiných zemí světa, Česká republika nemá vlastní zásoby této důležité energetické suroviny.

Dostupnost asfaltových pojiv se pravděpodobně bude časem snižovat a cena naopak zřejmě poroste, kvůli klesajícím zásobám ropy. Řešení je ve snížení kvantitativní spotřeby a nárůstu kvality a efektivity při výrobě asfaltů. Hlavní prioritou pro výrobce asfaltů je zvyšování odolnosti proti vzniku trvalých deformací, odolnost proti únavě a stárnutí.

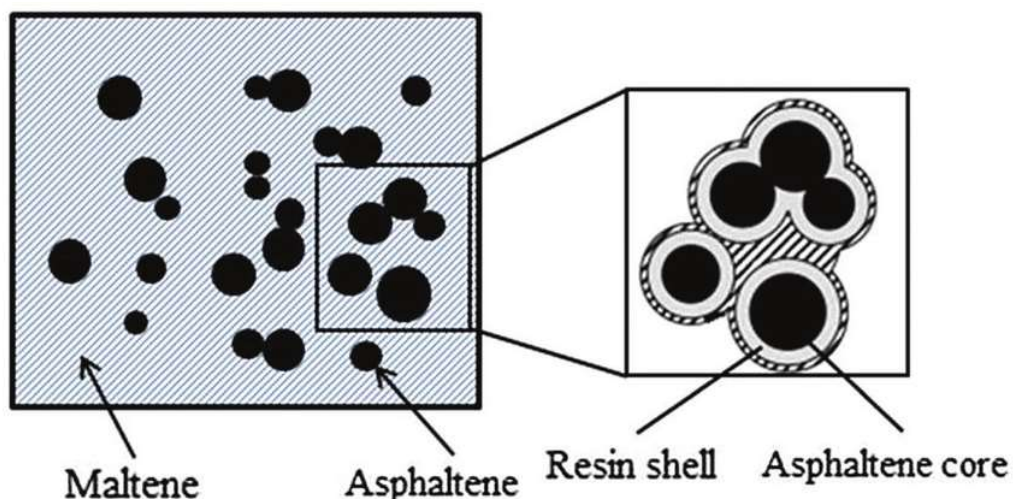
Tradiční pojiva zpravidla narážejí na své hranice výkonnosti, proto se přidávají modifikační přísady do silničních asfaltů. Nejčastěji používané jsou polymery. Rozdělují se podle typu modifikační přísady, způsobu aplikace, a regionu. Asfaltové směsi s modifikovaným asfaltem jsou trvanlivější a odolnější proti tvorbě mrazových trhlin a trvalých deformací. Nejrozšířenější modifikační přísadou na trhu je styren-butadien-styren (SBS) kvůli jeho kladným vlastnostem.

V této diplomové práci se budu zabývat vlivem vlastností vstupního silničního asfaltu na vlastnosti vyrobeného polymerem modifikovaného asfaltu.

2. REŠERŠE LITERATURY

2.1 CHARAKTERISTIKA ASFALTU

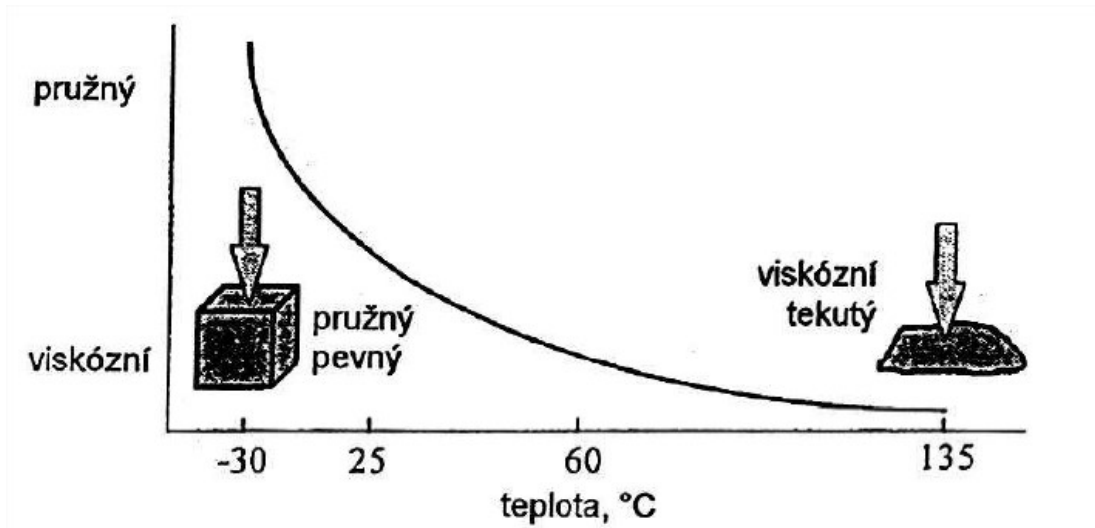
Z chemického hlediska se jedná o koloidní směs vysoce molekulárních uhlovodíků. Chemické složení je složité popsat, při rozboru nalezneme 300 až 2000 sloučenin. Ze zprávy výzkumu SHRP (Strategic Highway Research: Special Report) jsou hlavními složkami asfaltu uhlík (80-88 % hm.) a vodík (8–11 % hm.). Kromě těchto prvků obsahuje také síru, kyslík, dusík a organicky vázané kovy, zejména vanad a nikl. Proto rozdělení zjednodušíme na pevné částice asfaltény, které mají zastoupení přibližně 5 až 25 % a na tekuté složky označované maltény (pryskyřice, olej). Tyto složky zkoumá analýza SARA pro zastoupené frakce Saturate (saturáty), Aromatic (aromáty), Resin (pryskyřice), Asphaltene (asfaltény). Na obrázku 1 můžeme vidět schéma koloidní struktury asfaltu. [1], [2], [3]



Obrázek 1: Schéma koloidní struktury asfaltového pojiva [35]

Asfaltové pojivo se vyznačuje svou poměrně vysokou citlivostí na teplotu. Při nižších teplotách je charakteristické svou pružností (elasticitou) a při vyšších teplotách ho lze popsat jako viskózní kapalinu. Toto chování je znázorněno na obrázku 2. Za běžné teploty se u asfaltů objevují obě tyto vlastnosti, přímo závislé na změnách teploty. Asfalty lze tedy označit za visko-elastické materiály. [2], [3]

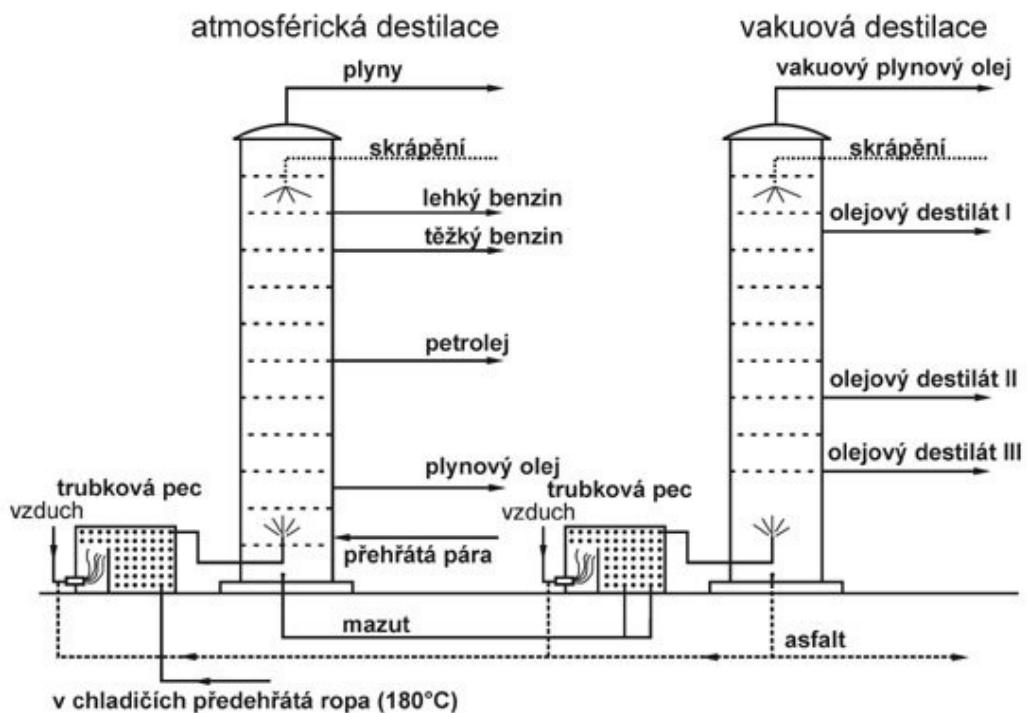
Velké deformace vznikají při nízkých rychlostí nebo stání vozidel, a naopak při velkých rychlostech se asfaltové směsi deformují jen minimálně. Obecně podle délky zatížení a viskozity dochází k různé velikosti deformace. [2]



Obrázek 2: Asfalt – visko-elastický materiál [2]

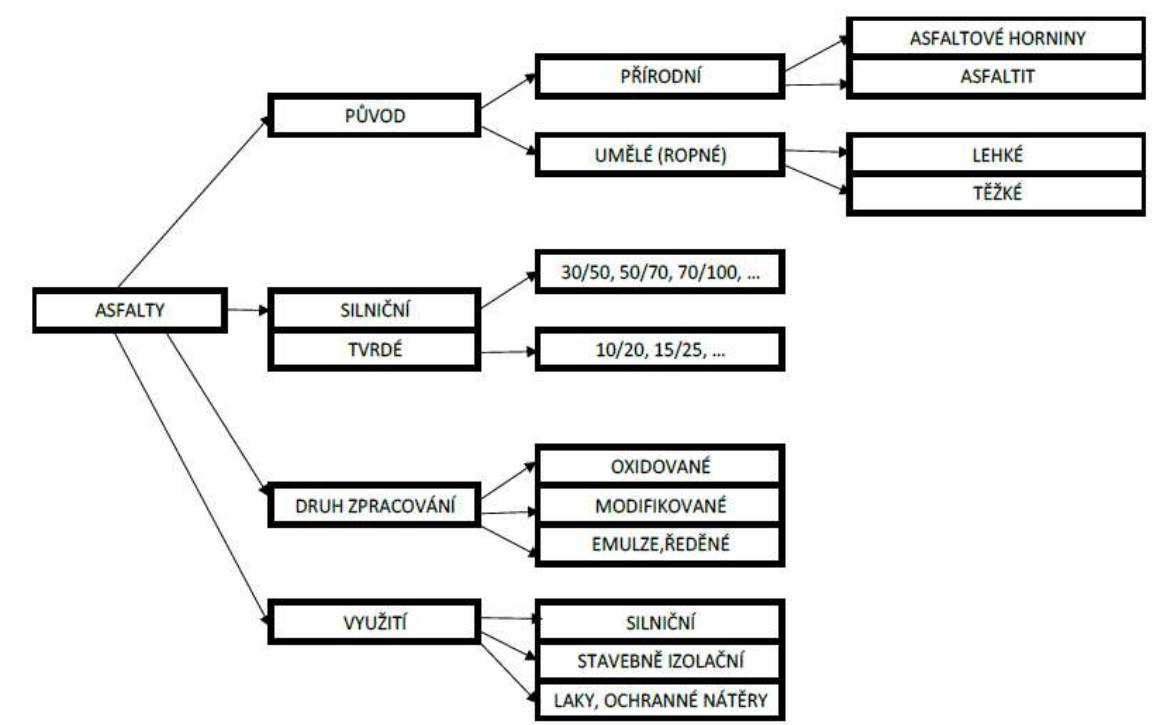
2.2 VÝROBA ASFALTŮ

Asfalt se získává hlavně frakční destilací z ropy (tedy oddělení jednotlivých složek podle teploty bodu varu) viz. Obr. 3. Destilace je třístupňová a probíhá v trubkových



Obrázek 3: Grafické znázornění frakční destilace [31]

pecích. Ropa teče soustavou trubek, které jsou ohřívány buď přímo plamenem, nebo prouděním horkých spalin. Poté dochází k nástřiku do atmosférické destilační kolony, což jsou válcovitá plechová tělesa rozdělena přepážkami na několik pater. V koloně je přítomna jak plynná, tak kapalná fáze. Kapalná fáze je přiváděna do spodní kolony. Plynná se tvoří ihned po nástřiku z trubkové pece a probublává jednotlivými patry. V atmosférické koloně při 360 °C a tlaku 0,15 MPa se oddestiluje nafta, olej, petrolej, kerosin, benzín a destilační zbytek mazut. Mazut se dále destiluje ve vakuových kolonách při tlaku 2-10 kPa. Při zvýšené teplotě okolo 390 °C se z mazutu získají tři olejové frakce s lišící se viskozitou a posledním produktem je asfalt. [2], [3], [4]



Obrázek 4: Základní dělení asfaltů

Nejedná se pouze o jeden typ asfaltu, ale může se lišit díky svému původu, způsobem výroby a popřípadě také následným zpracováním, jak vidíme na Obr. 4. Kvůli organickému původu asfaltu nesmíme opomíjet vliv oxidace neboli tvrdnutí a stárnutí asfaltu. Ke stárnutí může docházet už od počátku výroby, skladování, zpracování, dopravě, pokládce a během užívání. Kvůli působení tepla, ultrafialového záření (UV) a vzdušného kyslíku dochází k degradaci asfaltových vrstev. To vše může mít velký dopad na chemické a fyzikální vlastnosti jako je pružnost, modul tuhosti a křehkost za nízkých teplot. Stárnutí lze napodobit laboratorními zkouškami. Rozlišujeme krátkodobé (metoda RTFOT)

a dlouhodobé stárnutí (metoda PAV). Při krátkodobém stárnutí se simulují změny vlastností pojiva v průběhu míchání, dopravy a pokládky. Při dlouhodobém stárnutí se simuluje změna vlastností v průběhu užívání ve vrstvě vozovky v důsledku působení klimatických podmínek. Kontinuální oxidace se využívá v praxi pro výrobu polofoukaných nebo foukaných asfaltů. A nakonec přidáním přísad vytvoříme modifikované asfalty, které se používají pro vysoce namáhané asfaltové směsi nebo zálivky. [2], [5], [6], [7]

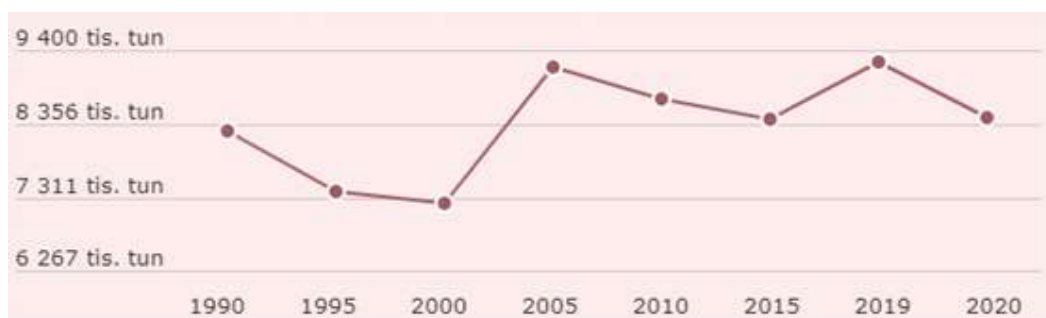
2.3 PRODUKCE, SPOTŘEBA ROPY A ASFALTŮ

Nejvíce ropy se do Evropy dováží z Ruska, které v roce 2020 podle Eurostatu pokrývalo více než čtvrtinu dovozu. Většina ropy do České republiky přitéká ropovodem Ingolstadt-Kralupy nad Vltavou-Litvínov (IKL) 51,2 %, který narušil dominanci ruského



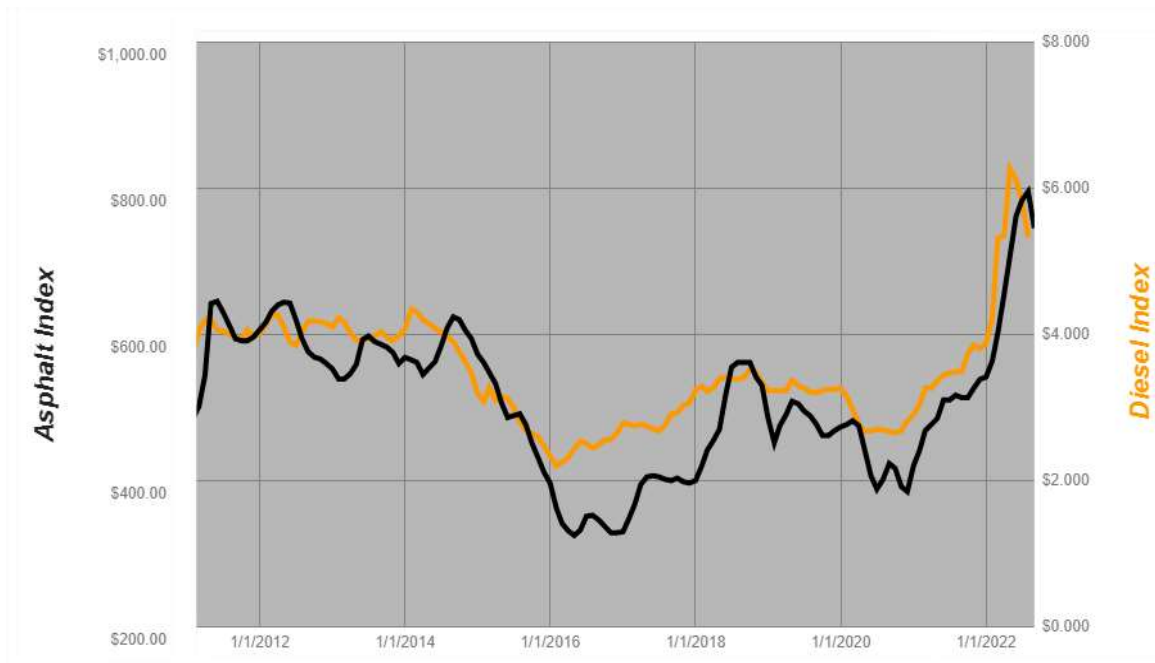
Obrázek 6: Dovoz ropy do ČR v 2021 [9]

ropovodu Družba 48,8 %, viz. Obr. 6. Evropské země spotřebovaly zhruba 3,5krát více, než vyprodukovaly. Po USA, Evropská unie jako celek spotřebovává nejvíce ropy.



Obrázek 5: Spotřeba ropy a ropných produktů v ČR [9]

V roce 2021 se do ČR dovezla ropa v celkovém množství 6 841,0 tis. tun, což představuje nárůst o 10,8 % v porovnání s rokem 2020. Podle Eurostatu Česká republika v roce 2020 spotřebovala 8,4 milionu tun ropy. Jde o mírný pokles oproti předchozímu roku, který přerušil klesající tendenci od roku 2005 viz. Obr. 5. [8], [9]



Obrázek 7: Vývoj ceny asfaltu a ropy [10]

Ropa je neobnovitelná surovina, tak že dosažitelnost asfaltových pojiv se bude snižovat, cena pravděpodobně poroste kvůli klesajícím zásobám zdrojů. Rozvoj nových rafinerských technologií umožňuje lepší zpracování a využití ropy z pohledu lehkých a středních derivátů. Preferován je nákup a využití lehčích typů ropy (pohonných hmot). To naopak snižuje dostupnost těžkých derivátů (asfaltů). Proto v posledních letech cena asfaltu roste rychleji než cena ropy viz. Obr. 7. Výrobci asfaltu mají proto snahu snížit kvantitativní spotřebu, zvýšit kvalitu a efektivitu při výrobě asfaltů. Jedním z opatření je zvýšit produkci polymerem modifikovaných asfaltů (PmB). [9], [10]

2.4 MODIFIKOVANÉ ASFALTY (PMB)

Modifikované asfalty se často obecně nazývají „polymerem modifikované asfalty“. V evropské normě EN 14023 se uvádějí zkratkou PmB (Polymer modified Bitumen). Označujeme zlomkem, který vyjadřuje charakteristickou hodnotu penetrace a minimální hodnotu bodu měknutí. Modifikované asfalty jsou asfalty, jejichž vlastnosti byly změněny přidáním přísad, čímž byly změněny buď jejich chemické nebo fyzikálně-

mechanické vlastnosti. Polymery jsou nejběžnějším typem modifikace, ale dnešní modifikované asfalty lze vyrábět několika způsoby. Zahrnují modifikátory a přísady používané polymery, chemické modifikátory, plniva, oxidanty a antioxidanty, uhlovodíky a přísady proti odlupování. [2], [3], [11], [12]

2.5 VLASTNOSTI PMB

Polymerem modifikovaný asfalt se obvykle používá na vozovkách, zejména těch, které jsou určeny k tomu, aby vydržely těžký provoz a extrémní klimatické podmínky. Stupeň požadovaného zlepšení, a tedy i náklady, jsou závislé na konkrétních potřebách místa. Účelem modifikací je tedy výrazně zlepšit reologické a mechanické vlastnosti asfaltových pojiv. Správný modifikátor po smíchání s asfaltem, by měl být dostatečně kompatibilní, aby nevznikla separace před uvedením do provozu. Jednou z výhod může být odolnost proti trvalým deformacím. Nejčastější poruchou krytu jsou plastické deformace (vyjeté koleje). Dále se zlepšují vlastnosti za nízkých teplot, odolnost proti vzniku mrazových trhlin viz. Obr. 8. Polymer by neměl být příliš viskózní pro míchání v asfaltových zařízeních, měl by odolávat vysokým teplotám ale zároveň nebyt příliš křehký při nízkých teplotách. [3], [11], [13]

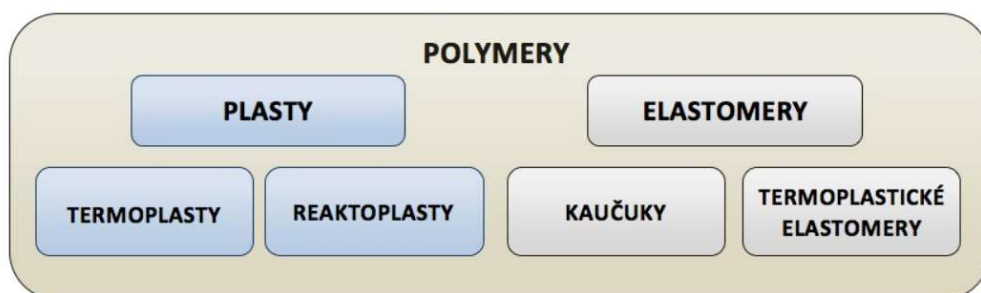


Obrázek 8: (a) vyjeté koleje, (b) mrazové trhliny [33]

Modifikované asfalty mají obvykle vyšší počáteční cenu, ale měly by poskytovat delší životnost s menší údržbou. Polymerem modifikované asfalty mají větší viskozitu než silniční asfalty, které jsou lépe zpracovatelné, proto je nutné dodržovat předpisy jak ve výrobě, tak při pokládce. Nevýhodou je nutnost jejich promíchávání během skladování, aby se polymer nezačal oddělovat od pojiva, nebo se musí použít chemické činidlo pro stabilizaci (peroxid, kyselinu polyfosforečnou, ester nebo síru). [3], [5], [11]

2.6 ROZDĚLENÍ POLYMERŮ

Polymery mají makromolekulární řetězce uspořádané v rovině (lineární, rozvětvené) nebo v prostoru (síťové struktuře). Za normálních teplot se polymery nacházejí ve čtyřech fázových stavech (sklovitém, kaučukovitém, plastickém nebo krystalickém). Výsledná úprava vlastnosti asfaltů závisí především na druhu a množství použitého modifikátoru a typu asfaltu. Polymery obecně rozlišujeme na elastomery a plasty viz. Obr. 9.



Obrázek 9: Rozdělení polymerů [14]

Plasty dále dělíme na termoplasty a reaktoplasty. U elastomerů jsou typickým představitelem kaučuky, ze kterých se vyrábí například pryž. Polymery při modifikaci zasahují přímo do organického složení asfaltů, avšak díky koloidní podstatě asfaltů dokáže být sloučenina stabilní a také umožňuje mnoho dalších úprav. Výsledná úprava vlastnosti asfaltů závisí především na druhu a množství použitého modifikátoru a typu asfaltu. Plasty jsou většinou za běžných podmínek tvrdé, často i křehké, jak ukazuje Obr.10.



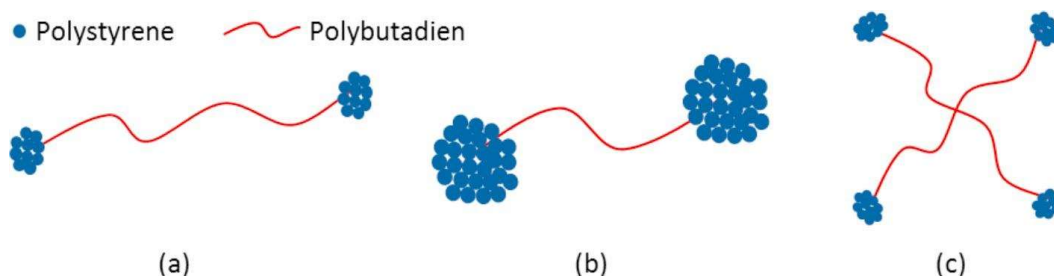
Obrázek 10: Chování polymerů při mechanickém namáhání: plast (vlevo), elastomer (vpravo) [14]

Další dělení pak záleží na tom, zda se plasty vrátí po zchlazení do tuhého stavu a tento děj je opakovatelný. Pokud se tak děje, hovoříme o termoplastech, oproti tomu, při nevratné změně, hovoříme o reaktoplastech. Mezi hlavní termoplastické polymery patří polyetylen (PE), polypropylen (PP) a ethylvinylacetat (EVA), které jsou nejčastěji zkoumaný v posledních letech, díky jejich dobré kompatibilitě s asfaltem. Tyto polymery ovlivňují spíše penetrační vlastnosti, než bod měknutí, na rozdíl od termoplastických elastomerů (např. styrenové kopolymery). Na rozdíl od plastů elastomery jsou vysoce pružné (elastické) materiály s nízkou tuhostí, které můžeme za běžných podmínek malou silou značně deformovat bez porušení. [14]

2.7 TERMOPLASTICKÉ ELASTOMERY

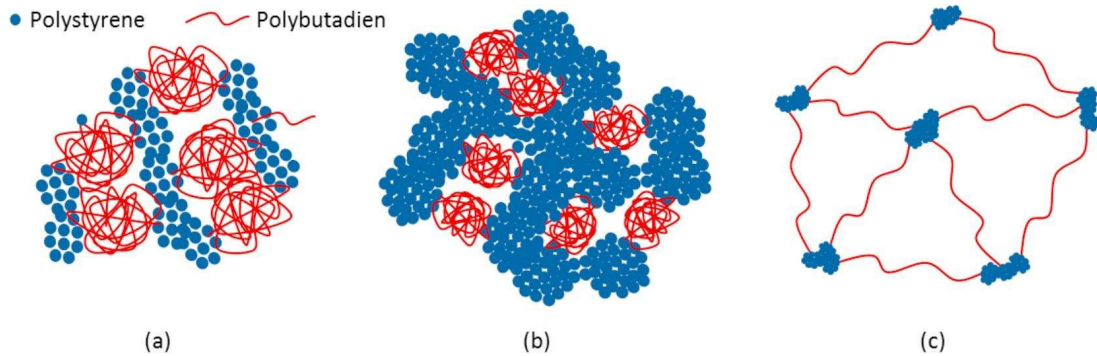
Jedním z nejznámějších typů jsou termoplastické elastomery styrenové kopolymery. Modifikovaná asfaltová pojiva SBS (styren/butadien/styren kopolymer) stále dominuje na světovém trhu. Nepatří mezi nejlevnější ani jeho technologie výroby není jednoduchá, ale vítězí nad všemi díky svým příznivým vlastnostem. [15], [16]

Skládá se z blokových kopolymerů, které se vyrábějí sekvenční polymerací bloků butadienu (střed) a styrenu (připojený na každém konci). Kromě struktury SBS (1D lineární a 2D radiální), poměr butadien: styren (B:S), lze upravit během výrobního procesu viz. Obr. 11. Tyto dvě blokové složky vykazují odlišné mechanické chování při pokojové teplotě, přičemž polybutadien (PB) (skleněný přechod kolem $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$) vykazuje měkké elastické (pružné) chování při pokojové teplotě a polystyren (PS) (skleněný přechod kolem $100\text{ }^{\circ}\text{C}$) vykazuje tuhé chování při pokojové teplotě. [17], [18]



Obrázek 11: Lineární molekuly SBS s vysokým obsahem butadienu (a), s vysokým obsahem styrenu (b) a radiální molekuly SBS (c) [17]

Smícháním SBS s asfaltovým pojivem se polystyrénové (PS) koncové bloky fyzicky zasítují a tvoří trojrozměrnou síť, zatímco polybutadiénové (PB) střední bloky poskytují materiálu pružnost, jak vidíme na Obr. 12. [17], [18]



Obrázek 12: SBS bez průběžné PS sítě (a), s průběžnou PS sítí (b) a SBS tvořící síť v asfaltovém pojivu (c) [17]

Polymery jsou k vstupnímu asfaltu přidávány v požadovaném množství za určitých podmínek. Nejčastěji se dodávají v pevné formě (granule, vlákna, prášek) nebo v kapalném (emulze, roztok) viz. Obr. 13. [5], [16]



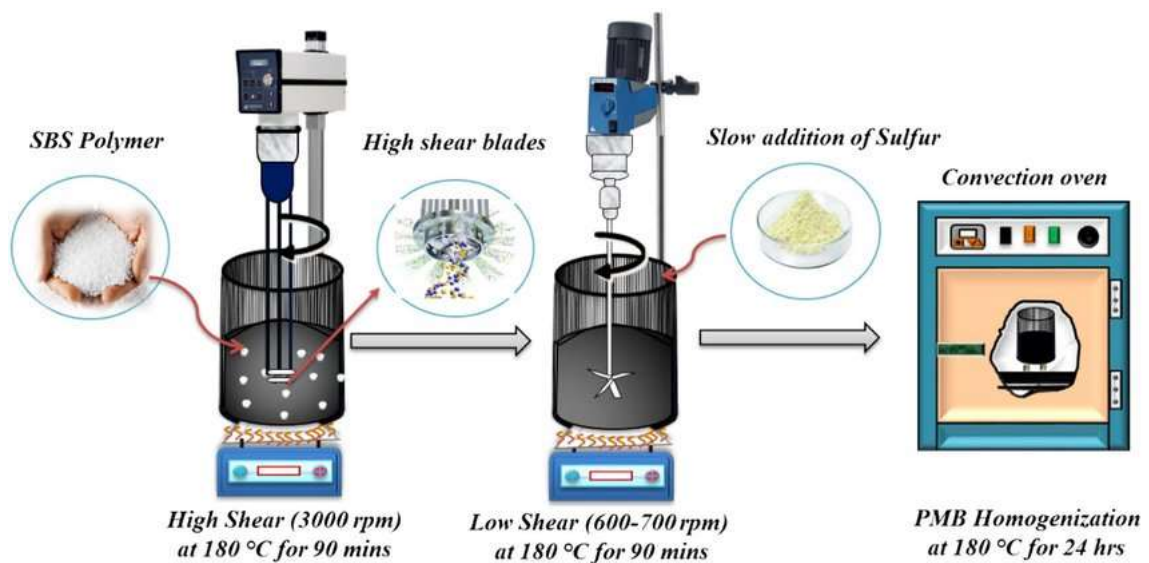
Obrázek 13: SBS jako granule nebo vlákna [34]

2.8 VÝROBA PMB

První výroba začala v 60. letech 20. století. Polymery jsou velmi účinné při regulaci disperzní struktury asfaltového pojiva. Existují určitá důležitá kritéria, která musí polymery splňovat, aby byly účinné při modifikaci asfaltu. Nezbytnou podmínkou výroby PMB je schopnost polymeru rozpouštět se v asfaltovém pojivu. Proto jsou způsoby výroby založeny buď na dispergování polymeru v asfaltu při vysokých teplotách nebo rozpouštění polymeru v rozpouštědle a následném smíchání roztoku s asfaltem. Polymerem

modifikované asfalty se mohou vyrábět přímo v rafinériích nebo ve speciálních modifikačních stanicích (vysokorychlostní nebo konvenční míchací zařízení). [5], [19], [20]

Ve vysokorychlostním míchacím zařízení se velmi rychle protlačuje směs asfaltu a polymeru úzkou mezerou, aby se polymer v asfaltu jemně rozptýlil. Makromolekuly se částečně zničí, když na směs působí smykové síly. Využívá se, pokud potřebujeme směs rychle stabilizovat nebo pokud je nedostatek místa pro uskladnění (pro výrobu menšího množství). Druhým typem speciální stanice je konvenční míchací zařízení, které pracuje na chemickofyzikálním principu. Důležité je přesné sladění základního asfaltu a polymeru. Použitím pomalu se otáčejících míchačů se vpravuje polymer, působí zde velmi malé smykové účinky, takže nehrozí nebezpečí zničení koloidního systému. Hotové směsi potřebují podstatně delší dobu pro stabilizaci, proto je tato metoda časově náročnější. Polymerem modifikované asfalty se dodávají už jako hotové výrobky připravené k okamžitému spotřebování. [3], [5]

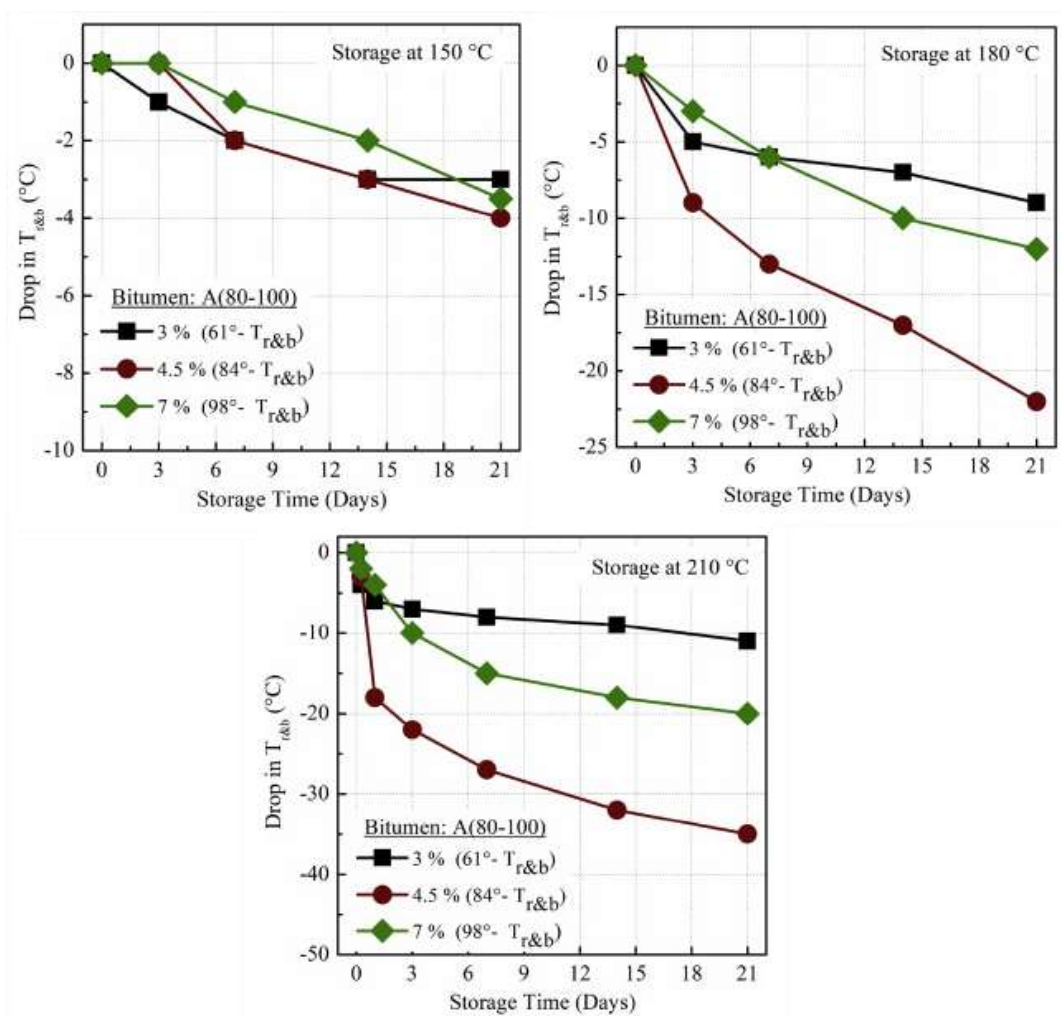


Obrázek 14: Vysokorychlostní míchací zařízení a konvenční míchací zařízení [21]

Teplota míchaní může být u každého modifikátoru různá, standardně se pohybuje v rozmezí 170 °C a 190 °C, protože degradace u většiny polymerů začíná při teplotě nad 200 °C. [13]

2.9 VLIV SKLADOVACÍ TEPLoty

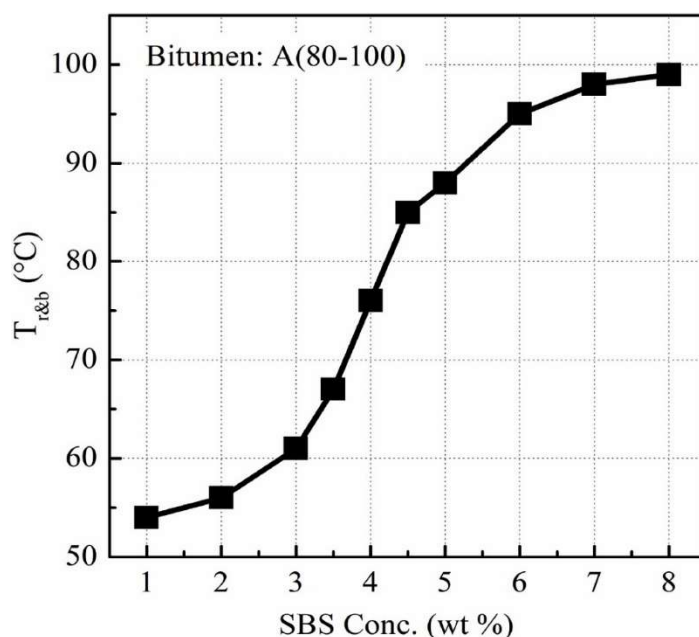
Vhodná volba vstupního asfaltu je velmi důležitým parametrem pro získání optimálního modifikovaného pojiva, protože každý asfalt má jiné chemické složení a strukturu, průměrnou molekulovou hmotnost, rozložení molekulové hmotnosti. Teplota skladování má velký vliv na degradaci polymeru. Je dokázáno že při teplotě 150 °C se vlastnosti PmB téměř nezmění (ani po 21 dnech), ale při teplotě 180 °C vlastnosti poklesnou (už po 3 dnech). Při teplotě 210 °C byly zaznamenány nejhorší výsledky, kdy polymer začal degradovat už po pár hodinách. U vzorků s obsahem SBS pod 3 % není silně vytvořena trojrozměrná síť, a proto je omezeno i snížení vlastností. Ztráta vlastností je nejzřetelnější na vzorcích s obsahem 3 % až 6 % SBS. Zvýšení obsahu SBS nad 6 % přinesl nižší pokles vlastností. [3], [21], [22]



Obrázek 15: Bod měknutí pro různé skladovací teploty a různý obsah SBS [22]

2.10 VLIV KONCENTRACE POLYMERU S-KŘIVKA

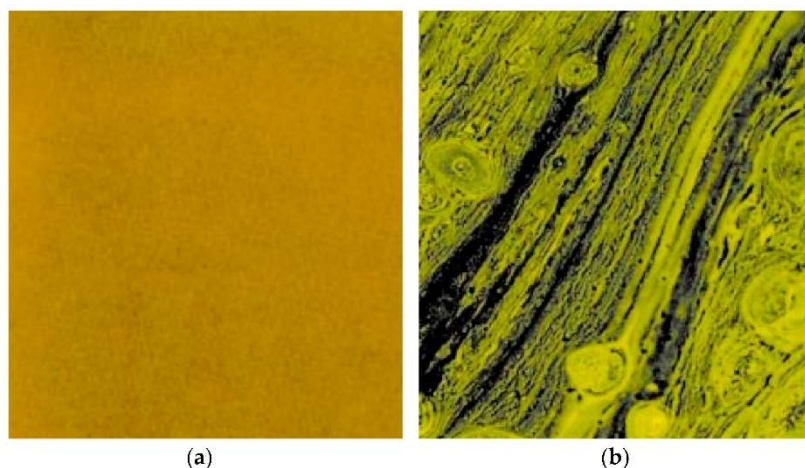
Pomocí S-křivky (bod měknutí vs. koncentrace polymeru) ukazuje Obr.16, že lze zjistit proč asfaltové pojivo s koncentrací 4,5 % vykazuje zhoršení vlastnosti než 7 %. S-křivka má tři oblasti (dolní plošinu, střední „strmé“ oblasti a horní plošinu). Dolní oblast je obvykle pozorována, když jsou koncentrace SBS ≤ 3 %. Při nižším obsahu polymeru není trojrozměrná síť silně tvořena rozptýlenými molekulami polymeru. Jakmile se vytvoří trojrozměrná síť, výrazně zvyšuje pevnostní charakteristiky PmB, jak bylo pozorováno ve strmé střední oblasti (3 %–6 %). V této oblasti je obvykle vidět dvoufázový systém s využitím fluorescenční mikroskopie. V důsledku vytvoření trojrozměrné polymerní sítě jsou také značně změněny reologické vlastnosti PmB (elastické zotavení, viskozita, modul, fázový úhel atd.). Nad 6 % je na křivce opět vidět, že se bod měknutí příliš nemění s rostoucím obsahem polymeru. Vzhledem k tomu, že pozitivní vlastnosti jsou omezené, budou ve srovnání s PmB s vyšším obsahem polymeru omezeny také nevýhody v důsledku skladování při zvýšených teplotách. Z křivky S lze předpokládat, že ve strmé střední oblasti mohou i malé změny polymerní sítě vést k podstatným změnám vlastností PmB. Protože asfalt s obsahem polymeru 4,5 % leží ve strmé střední oblasti, má ztráta polymerní sítě v důsledku degradace polymeru za následek strmější pokles jeho vlastností ve srovnání s asfaltem obsahujícím 7 % polymeru. [22]



Obrázek 16: Bod měknutí vs. obsah SBS v asfaltovém pojivu [22]

2.11 ÚČINEK ZÁKLADNÍHO ASFALTOVÉHO POJIVA

Stabilita PmB je dána především interakcí mezi SBS a aromatickou frakcí vstupního asfaltového pojiva. Protože termoplastické polymery mají molekulové hmotnosti podobné nebo vyšší než asfalteny, soutěží o rozpouštěcí schopnost maltenové fáze a pokud není k dispozici dostatek maltenů, může dojít k oddělení fází. Tato separace fází je známkou nekompatibility základního asfaltového pojiva a polymeru při mísení termoplastických PmB viz. Obr. 17. Výsledky ukazují, že dobrá interakce mezi vstupním asfaltem a polymerem vyžaduje přítomnost přibližně 40 hmotnostních % aromatických sloučenin a objem pevné fáze by měl být nižší než 22 %. Kompatibilitu PmB lze zlepšit přidáním aromatických olejů. Je nutné poznamenat, že příliš vysoký obsah aromatických látek (70–80 %) v PmB však může vést k bobtnání a antiplastifikaci (tj. zvýšení teploty jeho skelného přechodu) některých polystyrenových bloků. [1], [23], [24]



Obrázek 17: (a) Kompatibilní systém se 4 % SBS a (b) nekompatibilní systém se 4 % obsahu SBS [1]

3. CÍLE PRÁCE

Cílem diplomové práce bude popsat vliv použitého vstupního silničního asfaltu na vlastnosti vyrobeného polymerem modifikovaného asfaltu. Proto budou vybrány silniční asfalty třídy 50/70 a 70/100 od dvou různých výrobců a z těchto vstupních asfaltů budou v laboratoři vyrobeny polymerem modifikované asfalty. Vlastnosti srovnávaných polymerem modifikovaných asfaltů budou hodnoceny pomocí následujících laboratorních zkoušek:

➤ Nezestárlá pojiva:

- Penetrace jehlou podle ČSN EN 1426
- Bod měknutí podle ČSN EN 1427
- Bod lámavosti podle Fraasse podle ČSN EN 12593

➤ Pojiva zestárlá metodou RTFOT+PAV podle ČSN EN 14769:

- Bod měknutí podle ČSN EN 1427
- Komplexní smykový modul G^* a fázový úhel δ při teplotě 60 °C z oscilačních zkoušek v DSR podle ČSN EN 14770
- Kritická teplota z BBR (Bending Beam Rheometer) podle ČSN EN 14771

Pomocí těchto zkoušek bude snahou určit závislosti mezi vlastnostmi vstupních silničních asfaltů a vlastnostmi z nich vyrobených polymerem modifikovaných asfaltů. Jinak řečeno, jak ovlivňují vlastnosti vstupního silničního asfaltu vlastnosti vyrobeného polymerem modifikovaného asfaltu.

4. POUŽITÉ ZKUŠEBNÍ METODY

V diplomové práci budou použity zkoušky konvenční (empirické) jako jsou penetrace jehlou, bod měknutí, bod lámavosti podle Fraasse a zkoušky funkční, mezi které patří stanovení komplexního smykového modulu a fázového úhlu za pomoci dynamického smykového reometru DSR a stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru BBR.

4.1 STANOVENÍ PENETRACE JEHLOU

Zkouška je definována v normě ČSN EN 1426: Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou.

Konzistence vzorku materiálu je vyjádřena jako hloubka proniknutí jehly za stanovených podmínek. Tyto podmínky jsou vyjádřeny teplotou, zatížením a časem, při kterém působí na jehlu zatížení. Pro pojiva o penetraci do 330 x 0,1 mm je teplota stanovena



Obrázek 18: Ukázka penetrometru

na 25 °C, zatěžovací hmotnost 100 g a čas 5 s. Hodnoty penetrace jsou vyjádřeny v penetračních jednotkách (1 p.j. = 0,1 mm).

Pomůcky pro stanovení penetrace jsou penetrometr, penetrační jehla, nádoba na zkušební vzorek, vodní lázeň, přenosná miska potřebná pro zkoušku vykonávanou mimo vodní lázeň, zařízení na měření času a teploměr.



Obrázek 19: Temperování zkušebních kelímků s pojivem

Do čistého kelímku připravíme analytický vzorek pojiva, a to v takovém množství, aby výška hladiny byla alespoň o 10 mm větší, než je předpokládaná hloubka vniknutí jehly. Vzorek se nechá chladit na teplotu mezi 15 °C až 30 °C. Před měřením se vzorek nechá alespoň 60 až 90 minut temperovat v lázni s řízenou konstantní teplotou 25 °C. Kelímek se po temperování umístí do přenosné misky s vodou z lázně tak, aby byl kelímek úplně ponořen. Přenosná miska se položí na podstavec připraveného penetrometru. Jehla se sníží k povrchu vzorku tak, že se dotýká svého odraženého obrazu, tato pozice se určí jako nulová. Poté se uvolní jehla přitížená aplikovaným zatížením 100 g, aby vnikala do vzorku po dobu 5 s. Následně se na stupnici odečte hodnota penetrace. Provedou se minimálně tři platná stanovení třemi různými jehlami. Místa penetrování musí být nejméně 10 mm od okraje nádoby se vzorkem a 10 mm od sebe navzájem.



Obrázek 20: Měření penetrace jehlou

Výsledek se vyjádří jako aritmetický průměr v penetračních jednotkách zaokrouhlený na nejbližší celé číslo. [25]

4.2 STANOVENÍ BODU MĚKNOTÍ – METODA KROUŽEK A KULIČKA

Postup zkoušky je popsán v normě ČSN EN 1427: Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknotí – Metoda kroužek a kulička.

Touto zkouškou určíme horní mez oboru plasticity. Podstatou této metody je zahřívání dvou kotoučků z asfaltového pojiva řízenou rychlostí ve vodní/glycerinové lázni, které jsou osazeny v mosazných kroužcích. Na povrchu pojiva je umístěna ocelová kulička. Bod měknotí se zaznamená jako průměr teplot, při kterých tyto dva kotoučky změknou natolik, aby umožnily každé z kuliček obalených v asfaltovém pojivu propadnout o vzdálenost $(25 \pm 0,4)$ mm.

Pro měření se používá zkušební zařízení, které obsahuje kroužky, odlévací desičky a dvě kuličky z korozivzdorné oceli. Nedílnou součástí jsou i prstence pro kuličky, držák kroužků a skleněná kádinka s tekutinou, ve které je umístěné míchadlo.

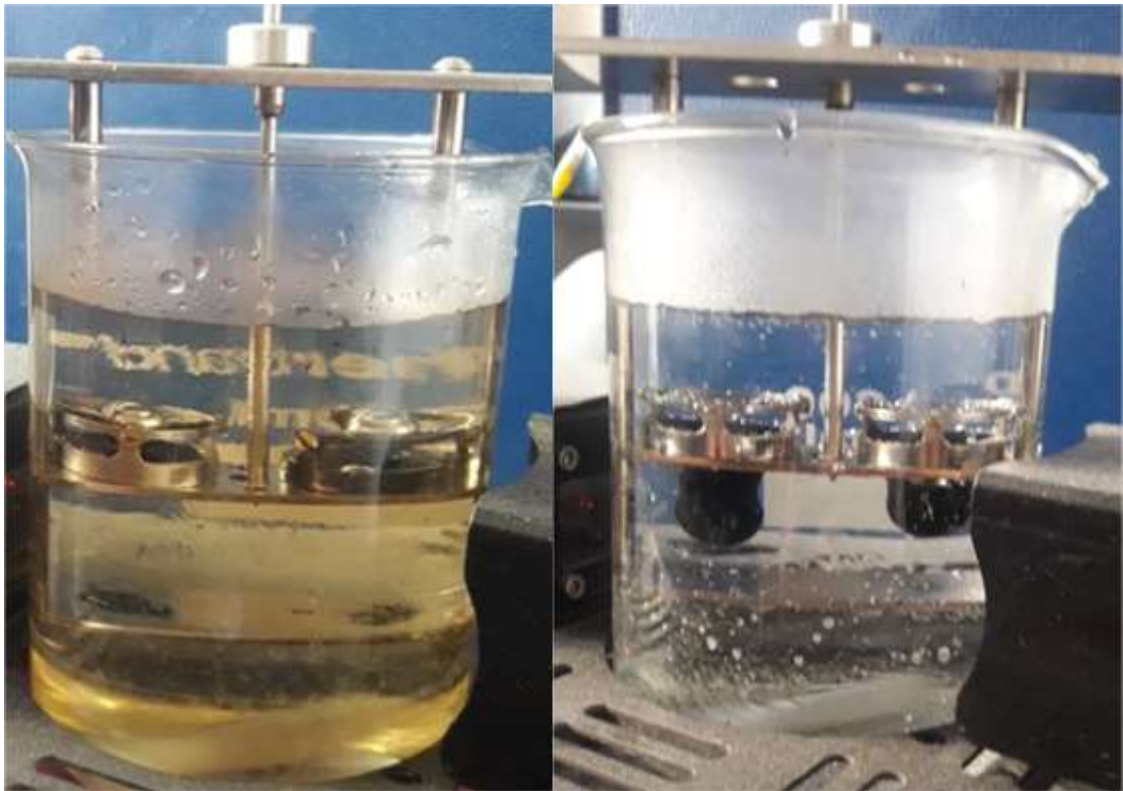
Připravíme si dva kroužky, které umístíme na odlévací destičku a naplníme zahřátým pojivem. Po vychladnutí je začistíme tak, aby povrch vzorku byl zarovnaný s vrchní hranou kroužků.



Obrázek 21: Kroužky se zahřátým pojivem na odlévací destičce

Vzorky vložíme do sestavy se středícím zařízením pro kuličky. Kádinka se naplní odvzdušněnou studenou vodou. Hladina lázně by měla být ve výšce (50 ± 3) mm nad horním okrajem kroužků. Poté celou sestavu zchladíme na (5 ± 1) °C pro asfalty s předpokládanými body měknutí do 80 °C. Pomocí chemických kleští se vloží kuličky do středícího zařízení a při tom musí být zajištěna jejich stejná počáteční teplota jakou má celá sestava. Připravenou soustavu umístíme do zkušebního přístroje. Voda se zahřívá rychlostí 5 °C/min a je zároveň míchána zespodu. Sleduje se teplota v okamžiku, kdy asfalt obklopující kuličku dosáhne 25 mm propadu, v tu chvíli je potřeba zaznamenat aktuální teplotu lázně.

Tato hodnota je hodnotou bodu měknutí. Rozdíl hodnot mezi pravou a levou kuličkou nesmí být větší než 1 °C, pokud se jedná o bod měknutí pod 80 °C. Pokud nebude splněna tato podmínka, je zapotřebí provést zkoušku znovu. Výsledek je vyjádřen jako průměr teplot se zaokrouhlením na nejbližší 0,2 °C. [26]



Obrázek 22: Měření KK ve a) glycerinové nebo b) vodní lázni

4.3 STANOVENÍ KOMPLEXNÍHO SMYKOVÉHO MODULU A FÁZOVÉHO ÚHLU V DSR

Zkouška je popsána v normě ČSN EN 14770: Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu – Dynamický smykový reometr (DSR).

Na temperovanou zkušební soustavu, v níž je zkušební vzorek asfaltu, se aplikuje oscilující smykové napětí dané velikosti. Nechá se působit dané smykové přetvoření na zkušební vzorek a měří se (pomocí přepočtu z krouticího momentu) vzniklé smykové napětí "strain control". S výjimkou specifických účelů se zkouška provádí v oblasti lineárně viskoelastického chování.

Pomůcky pro stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu jsou dynamický smykový reometr (DSR), sušárna, podložky, formy ze silikonu s geometrií typu desky o průměru 25 mm a tloušťkou vzorku 1 mm.

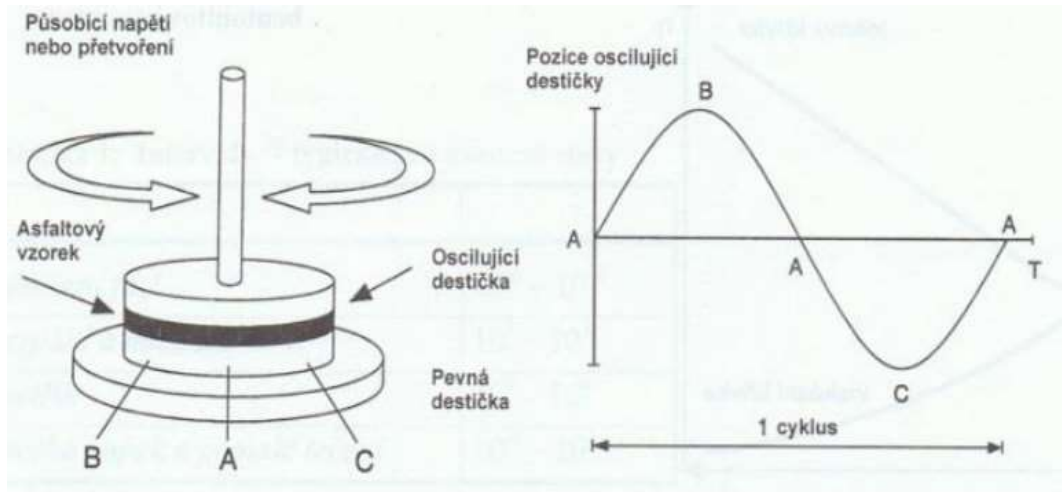


Obrázek 23: Umístění vzorku do reometru

Jako první se nahřeje laboratorní vzorek asfaltového pojiva. Po nahřátí 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.

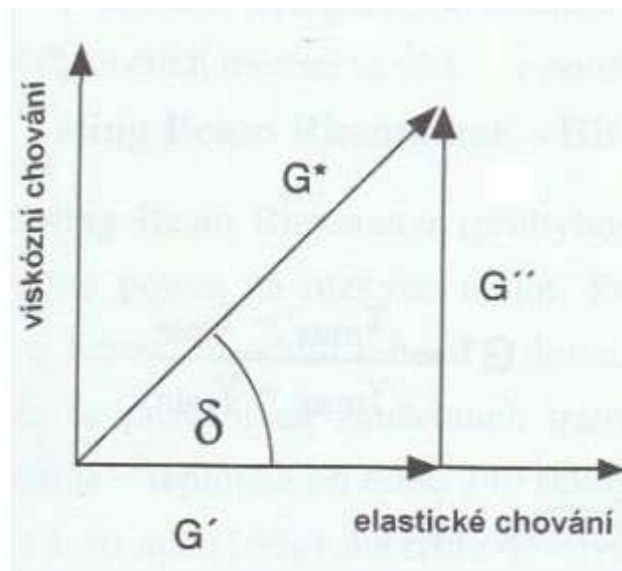
Nejprve se vzorek asfaltového pojiva vyloupne ze silikonové podložky a vloží do reometru. Destičky reometru se předem přehřívají na teplotu 80 °C po dobu neméně 15 min, aby došlo ke spojení zkušební vzorku s destičkami. Dále se vzorek vloží na spodní geometrii a přitiskne horní geometrií na tloušťku 1,05 mm. 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 na hodnotu 1,0 mm. Pro zkoušku je nutno zvolit zkušební teplotu vhodnou pro zkoušené pojivo. Zkouší se od nejnižší frekvence a pokračuje se k vyšší frekvenci (0,1 Hz až 10 Hz), to vše za teplot 40 °C,

45 °C, 50 °C, 55 °C, 60 °C, 65 °C a 70 °C. Zatížení oscilací odpovídá harmonicky proměnné (sinusové) funkci namáhání, která nejspíše odpovídá simulaci zatížení ve vozovce od jedoucích vozidel.



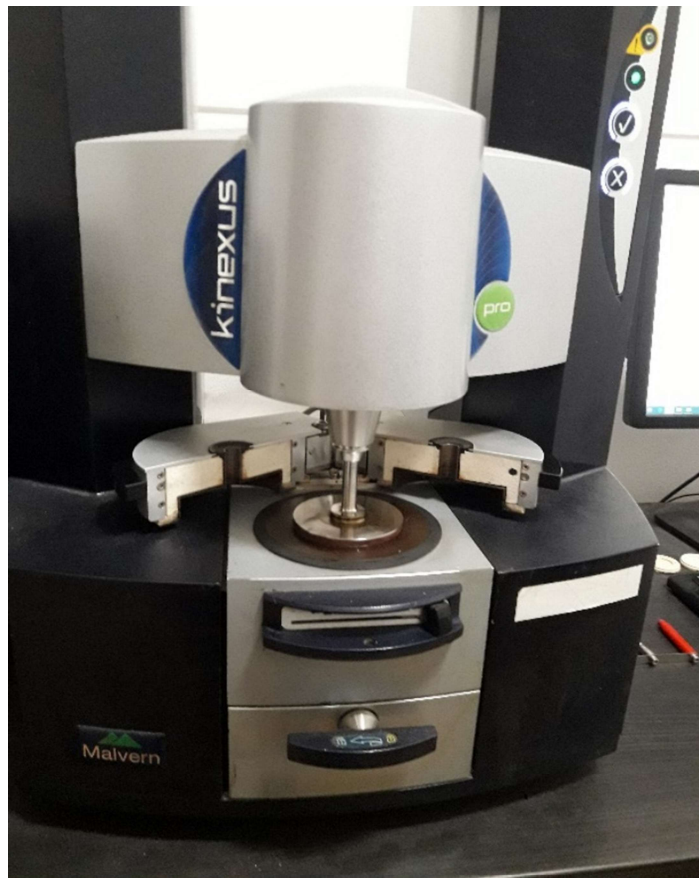
Obrázek 24: Princip DSR [36]

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 δ v [°] na nejbližší 0,1 °C.



Obrázek 25: Složky komplexního modulu [36]

Veličina G^* je mírou celkové odolnosti materiálu proti přetvoření. Skládá se z elastické složky G' (reálné) a viskózní složky G'' (ztrátová). δ označuje fázový úhel. [27]



Obrázek 26: Dynamický smykový reometr Kinexus

4.4 STANOVENÍ BODU LÁMAVOSTI PODLE FRAASSE

Zkouška je popsána v normě ČSN EN 12593. Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu lámavosti podle Fraasse.

Touto zkouškou se určuje křehkost pojiva za nízkých teplot. Asfaltové pojivo se nanese na kovový plíšek, který se stálou rychlostí ochlazuje a opakovaně ohýbá. Zkouška končí ve chvíli, kdy se objeví první prasklina. Zaznamená se teplota, při níž došlo k porušení vzorku asfaltového pojiva, tzv. bod lámavosti podle Fraasse.

Pomůcky pro stanovení bodu lámavosti podle Fraasse jsou plíšky vyrobené z popouštěné pružné oceli, dále je potřeba zařízení pro přípravu plíšků, které se používá k rozehrání zkoušeného vzorku. Zařízení se skládá z magnetického bloku a kovového podstavce, který je tvořen vyhřívanou částí, která je oddělena od části chlazené. Nedílnou

částí je přístroj pro bod lámavosti podle Fraasse, který se skládá z ohýbacího zařízení, chladícího zařízení (suchý led) a teploměru.



Obrázek 27: Suchý led

Před započítím zkoušky je třeba připravit zkušební vzorky, které sestávají z očištěného plíšku, na který je nanášeno pojivo. Plíšek umístíme na magnetický blok, který je vyhříván kovovým podstavcem. Až je pojivo dostatečně tekuté, zajistíme rovnoměrné



*Obrázek 28: Přístroj pro stanovení bodu lámavost
podle Fraasse*

rozprostření nakláněním podstavce. 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.

Zkouška se provádí nejdříve 30 min po nanesení vzorku na plíšek. Plíšek s asfaltovým pojivem se umístí do ohýbacího zařízení, přičemž je důležité pozorovat, 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 chladicího zařízení a instaluje se teploměr do výchozí pozice. 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. Zkušební plíšek se začne ohýbat při teplotě o (10 ± 2) °C vyšší, než je předpokládaná teplota bodu 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.



Obrázek 29: Porušení vzorku

První zkouška je pouze orientační. Z dalších dvou zkoušek se vypočte aritmetický průměr zaokrouhlený na nejbližší celé číslo. Pokud se výsledky neliší o více než 3 °C, je zkouška platná. 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. [28]

4.5 STANOVENÍ ODOLNOSTI PROTI STÁRNUTÍ VLIVEM TEPLA A VZDUCHU – METODA RTFOT

Zkouška je uvedena v normě ČSN EN 12607-1. Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu – Část 1: Metoda RTFOT.

Podstata metody spočívá v tom, že se tenká vrstva pojiva zahřívá při teplotě 163 °C v sušárně s konstantní teplotou. Vzorky pojiva jsou umístěné ve skleněných nádobkách ve stojanu, který se otáčí konstantní rychlostí tak, aby se asfalt rovnoměrně rozprostřel po vnitřních stranách nádoby, a zároveň je do nádob vháněn vzduch o teplotě 163 °C. Kombinace tepla a vzduchu by se měla projevit změnou hmotnosti nebo změnou vlastností asfaltového pojiva. Nevýhoda této zkoušky je, že ze skleněných nádobek se špatně dostává pojivo a nikdy z nich nedostaneme 100 % pojiva, které do nádobek bylo nalito.



Obrázek 30: Skleněné nádoby s asfaltovým pojivem

Pro měření se používá sušárna s elektrickým ohřevem, dále pak průtokoměr, který měří průtok vzduchu v množství $(4 \pm 0,2)$ l/min. Nedílnou součástí je teplotní měřící zařízení, váhy a skleněné nádoby.

Do skleněné nádoby se nalije $(35 \pm 0,5)$ g pojiva a nádoba se vloží do sušárny vytemperované na 163 °C. Naráz se zkouší pojivo až v 8 nádobkách. Během zkoušky je nádobkami otáčeno, což zabraňuje vytvoření povrchové vrstvičky, a zároveň je přímo do

nádobek vháněn horký vzduch. Po uplynutí (75±1) min se nádobky vyjmou a slíjí do plechovky a zhomogenizují se pro následující zkoušky. [6]

4.6 URYCHLENÉ DLOUHODOBÉ STÁRNUTÍ V TLAKOVÉ NÁDOBĚ PAV

Zkouška je popsána v normě ČSN EN 14769. Asfalty a asfaltová pojiva – Urychlené dlouhodobé stárnutí v tlakové nádobě (PAV).



Obrázek 31: Držák s miskami

Princip zkoušky je založen na uchování misek s tenkou nepohyblivou vrstvou pojiva v tlakové nádobě, kde se zahřívá při určité teplotě a za určitého tlaku vzduchu po danou dobu. Zkouška by měla napodobovat změny, ke kterým dochází v pojivu během své životnosti. Je důležité, aby tomuto testu předcházelo simulované stárnutí metodou RTFOT. Vzorek tedy už prošel jednou sekvencí stárnutí.

Pro měření se používá tlaková nebo teplotní nádoba, zařízení pro regulaci tlaku, zařízení pro záznam teploty, kovové misky a váhy.

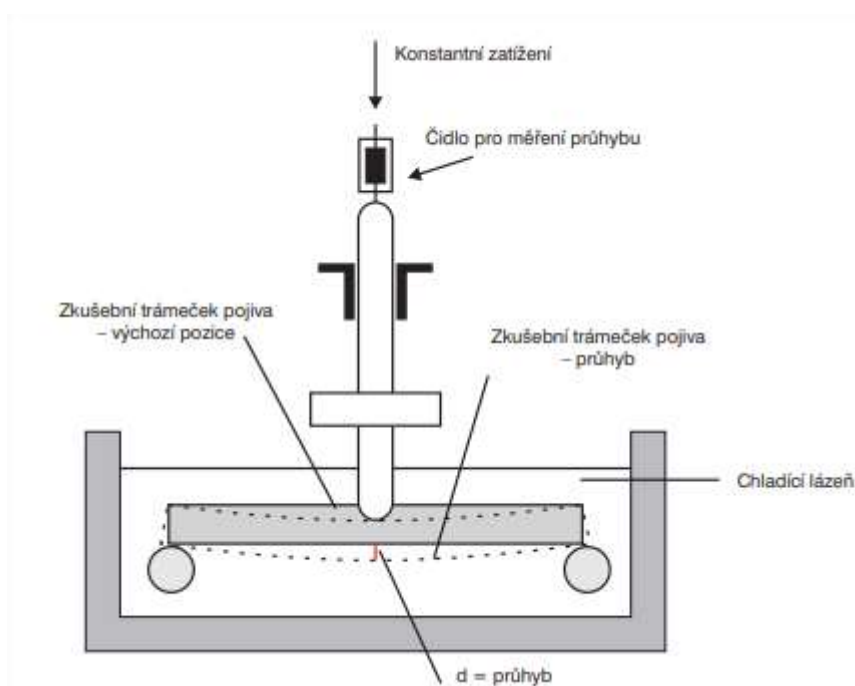


Obrázek 32: Miska s nalitým pojivem

Nádoba PAV se předehřeje na teplotu v rozmezí 80 °C až 115 °C a tlak $(2,1 \pm 0,1)$ MPa. Po předehřátí se miska položí na váhu a naváží se do ní $(50 \pm 0,5)$ g pojiva. Navážené vzorky vložíme do držáku misek a umístíme do tlakové nádoby. Po uplynutí stanovené doby stárnutí se pomalu uvolní vnitřní tlak v PAV prostřednictvím uvolňovacího ventilu tak, aby pokles tlaku byl plynulý a k vyrovnání s atmosférickým tlakem došlo za 8 až 15 minut. Okrajové podmínky zkoušky, nastavené v rámci této práce, jsou: teplota 100 °C, tlak 2,1 MPa a doba stárnutí 20 hod. V některých případech mohou zůstat v pojivu bublinky vzduchu. V takovém případě se musí misky s pojivem umístit do vakuové sušárny s teplotou (170 ± 5) °C. Po 10 min ustavování rovnováhy se otevře vakuový ventil a tlak se sníží na $(15 \pm 2,5)$ kPa a tento tlak se udržuje po dobu (30 ± 1) min. Po 30 min se misky s pojivem vyjmou ze sušárny. Po ukončení se asfaltové pojivo přelije do jedné sběrné nádoby. [7]

4.7 STANOVENÍ MODULU TUHOSTI ZA OHYBU POMOCÍ PRŮHYBOVÉHO TRÁMEČKOVÉHO REOMETRU BBR

Zkouška je popsána v normě ČSN EN 14771. Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru (BBR).



Obrázek 33: Schématický náčrt zařízení BBR [32]

Používá se k měření průhybu ve středu na tříbodovém ohybu trámečku z asfaltového pojiva. BBR (Bending Beam Rheometer) slouží k popsání nízkoteplotních vlastností asfaltového pojiva. Po stanovenou dobu se na střed trámečku vkládá konstantní zatížení a měří se průhyb jako funkce času. Modul tuhosti za ohybu vypočítáme z ohybového napětí a ohybové deformace.

Hlavními pomůckami pro stanovení modulu tuhosti za ohybu jsou průhybový trámečkový reometr (BBR) a formy pro zkušební tělíska.

Sestavená forma se očistí a potřese tenkou vrstvou tuku ropného původu, aby se zabránilo přilepení asfaltového pojiva. Nalije se zahřáté a zhomogenizované pojivo z jednoho konce formy k druhému konci tak, aby bylo rovnoměrně nalito s mírným přebytkem. Po naplnění se nechá forma 45 až 60 minut vychladnout při laboratorní teplotě. Po vychladnutí je horní část tělesa seříznuta ohřátou špachtlí do roviny s kraji formy. Zkouška se musí provést do 4 hod po odlití tělísek. Před vyjmutím asfaltového tělesa

z formy se zkušební vzorek umístí do chladicí komory po dobu 5 minut, aby těleso ztuhlo a dalo se jednoduše z formy vyjmout.

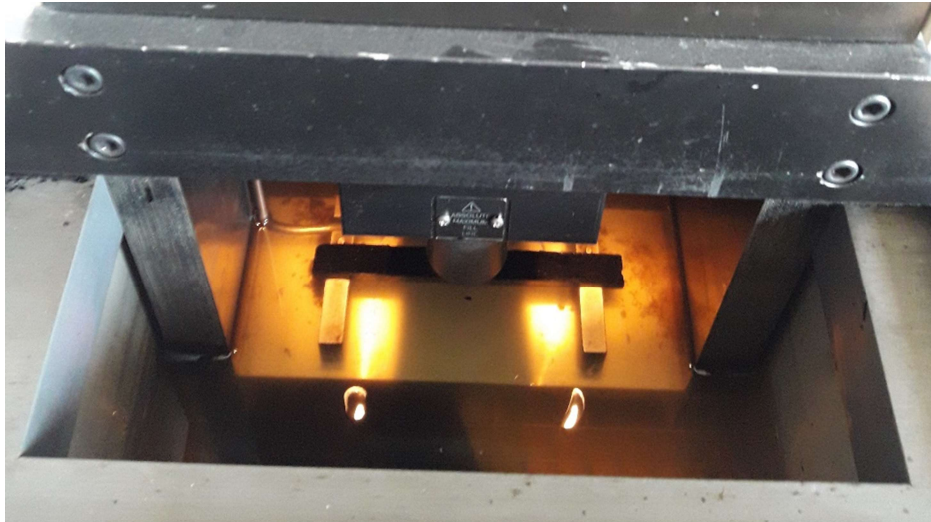
Před zkouškou každé sady zkušebních těles se zkontroluje nastavení kontaktního zatížení a zkušební zatížení. Podle očekávané úrovně tuhosti se zvolí první teplota zkoušení. Provede se kontrola, zda teplota lázně je stálá nejméně po dobu 20 min. Po odstranění zkušebního tělesa z formy se těleso ihned umístí do zkušební lázně a temperuje se při zkušební teplotě po dobu $60 \text{ min} \pm 2 \text{ min}$ před zahájením zkoušky. Před umístěním tělíska na podpěry zjistíme tloušťku tělíska. Poté působíme konstantní zatížení od 25 mN do 45 mN a zaznamenáme údaj převodníku posunu. Jestli je rozdíl obou naměřených hodnot do 1,0 mm vypočte se jejich aritmetický průměr.



Obrázek 34: Asfaltové pojivo ve formě pro měření BBR

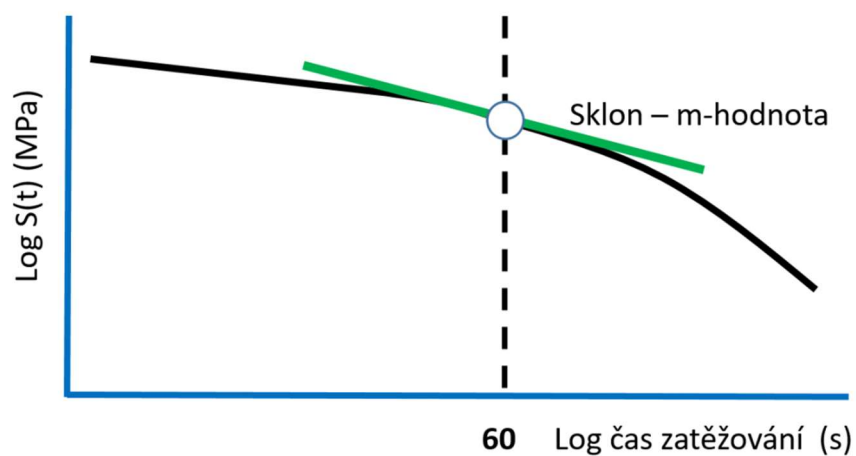
Měření, pro které je průhyb středu zkušebního tělíska menší než 0,08 mm nebo větší než 4,0 mm je nevěrohodné.

Vytvoří se graf závislosti naměřeného zatížení a průhybu zkušebního tělíka v intervalu 0,5 s. nebo méně, počínaje vložení usazovacího zatížení $980 \text{ mN} \pm 50 \text{ mN}$ po dobu $1,0 \pm 0,1 \text{ s}$. [29]



Obrázek 35: Průhybový trámečkový reometr (BBR)


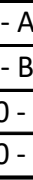
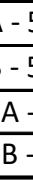
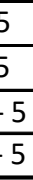





Výsledkem zkoušky je modul tuhosti za ohybu $S(t)$ [MPa] a m -hodnota, která značí sklon tečny logaritmu tuhosti v závislosti na logaritmu času. Tento parametr vyjadřuje schopnost asfaltového pojiva relaxovat. M -hodnota $m(t)$ stejně jako tuhost pojiva (parametr $S(t)$) jsou běžně určovány po 60 s. měření. Vyšší m -hodnota indikuje rychlejší schopnost relaxace (rychlejší pokles tuhosti v závislosti na čase). Výsledky jsou zaokrouhleny na tři platná místa.



Obrázek 36: Způsob odvození m hodnoty [37]

5. POUŽITÉ MATERIÁLY

Asfaltová pojiva, na kterých byly v této diplomové práci prováděny laboratorní zkoušky, byla dodána od dvou výrobců asfaltu. U výrobce asfaltu A se očekávají běžné nízkoteplotní vlastnosti, na rozdíl od výrobce asfaltu B zhoršené vlastnosti v nízkých teplotách. Jedná se konkrétně o čtyři silniční pojiva třídy 50/70 a 70/100. Ze silničních asfaltových pojiv bylo vyrobeno v laboratoři společnosti VIALAB CZ s.r.o. pět modifikovaných pojiv 25/55–65 a 45/80–65 pomocí stejného druhu polymeru SBS. U čtyř vzorků PmB bylo použito 5 % hm. SBS a u jednoho vzorku PmB 3,5 % hm. SBS. Pro snadnější orientaci modifikované asfalty popisují penetrační třídou vstupního asfaltu. Postup výroby PmB začal nahřátím pojiva při 180 °C. Následně se umístilo do patrony a začalo míchání na vysokostřížné míchačce Silverson při 2 500 ot/min (doba míchání 1,0 hod). Po 1,0 hod se nadávkovala síťovací přísada a pokračovalo se v míchání při 2 500 ot/min po dobu 0,5 hod. Následně došlo ke snížení otáček na 300 ot/min. Pojivo zráló při míchání do cca 7-9 hod od začátku výroby. Nakonec se pojivo přelilo z míchací patrony do plechovky a nechalo se zrát v laboratorní sušárně při teplotě 180 °C. Zrání bylo ukončeno po 24 hod od začátku výroby. Informace o pojivech jsou uvedeny v tabulce 1.

Výrobce	Třída penetrace	Modifikace	Označení zkráceně	Barva v graf. a tab.
A	50/70	0	50/70 - A - 0	
B	50/70	0	50/70 - B - 0	
A	70/100	0	70/100 - A - 0	
B	70/100	0	70/100 - B - 0	
A	50/70	3,5	50/70 - A - 3.5	
A	50/70	5	50/70 - A - 5	
B	50/70	5	50/70 - B - 5	
A	70/100	5	70/100 - A - 5	
B	70/100	5	70/100 - B - 5	

Tabulka 1: Zkoušená asfaltová pojiva v rámci diplomové práce

6. VÝSLEDKY ZKOUŠEK

Zkoušky na asfaltovém pojivu probíhaly v laboratoři Ústavu pozemních komunikací v prostorách Stavební fakulty Vysokého učení technického v Brně. Všechny zkoušky byly provedeny dle postupu uvedeného v normě pro konkrétní zkušební metodu, viz bod 4. Použité zkušební metody. Výsledky jsou zpracovány do tabulek a grafů, vyhodnoceny a shrnuty v závěru diplomové práce.

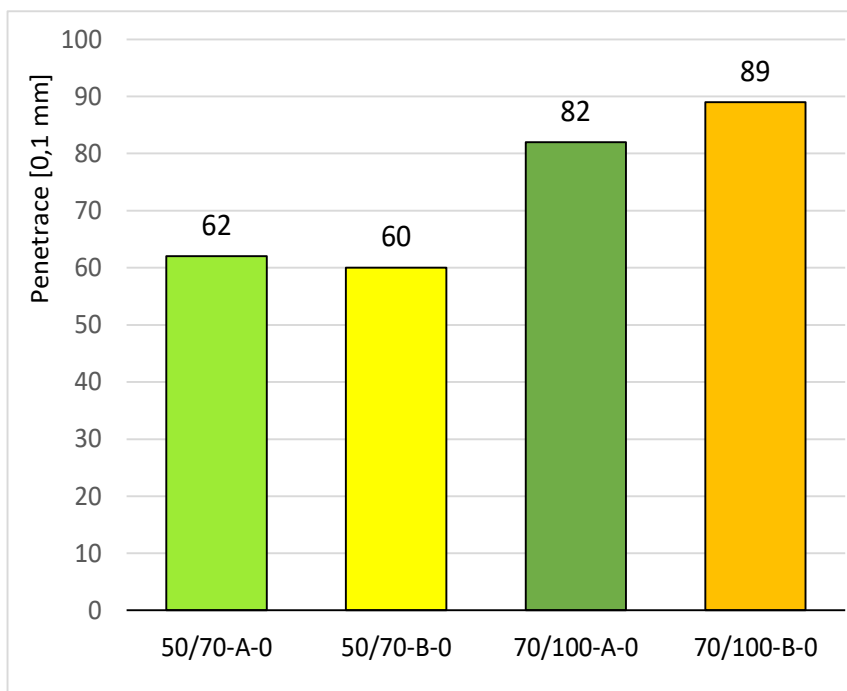
6.1 STANOVENÍ PENETRACE JEHLOU

Zkušební metoda ke stanovení penetrace jehlou byla provedena dle platné normy ČSN EN 1426 a byla stručně popsána v bodu 4.1. Výsledky ze zkoušky penetrace jehlou jsou průměrné hodnoty nezestárých asfaltů, které jsou vyneseny do tabulky 2 a následně zobrazeny v grafech. Naměřené hodnoty vyhovují mezím penetrace dle norm ČSN 65 7204 pro silniční asfalty a ČSN 65 7222-1 pro polymerem modifikované asfalty.

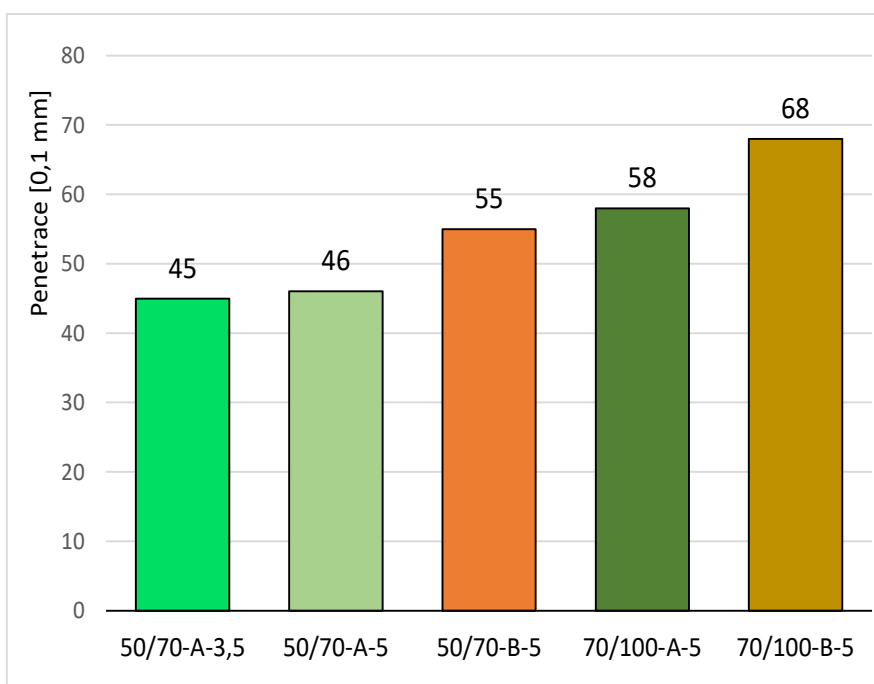
Výrobce	Třída penetrace	Modifikace	Označení zkráceně	Barva v graf. a tab.	Penetrace jehlou
					[0,1 mm]
					nezestárlý
A	50/70	0	50/70 - A - 0		62
B	50/70	0	50/70 - B - 0		60
A	70/100	0	70/100 - A - 0		82
B	70/100	0	70/100 - B - 0		89
A	50/70	3,5	50/70 - A - 3.5		45
A	50/70	5	50/70 - A - 5		46
B	50/70	5	50/70 - B - 5		55
A	70/100	5	70/100 - A - 5		58
B	70/100	5	70/100 - B - 5		68

Tabulka 2: Výsledky penetrace jehlou

Z výsledných hodnot penetrací nezestárých silničních asfaltů uvedených v grafu 1 je patrné, že hodnoty penetrace jsou vyšší než hodnoty penetrace modifikovaných asfaltů viz graf 2. Po přidání polymeru SBS, který snižuje hodnotu penetrace to znamená, že vzniklé modifikované pojivo se stává tvrdším. Nejvyšší hodnota penetrace byla naměřena u nezestárlého silničního asfaltu B 70/100.



Graf 1: Srovnání výsledků penetrace jehlou nezestárých silničních asfaltů



Graf 2: Srovnání výsledků penetrace jehlou nezestárých PmB

Na grafu 2 jsou uvedeny výsledky penetrace modifikovaných nezestárých asfaltů, které byly laboratorně připraveny ze silničních asfaltů popsaných v kapitole 5. Použité materiály. Z výsledků měření lze vidět, že asfalt B i po přidání polymeru má vyšší hodnoty penetrace, je tedy měkčí. Hodnoty penetrací jehlou všech poživ se pohybovaly přibližně uprostřed rozmezí požadovaného normou ČSN 65 7204 pro silniční asfalty a ČSN 65 7222-1 pro polymerem modifikované asfalty, přičemž se předpokládalo, že ze silničních asfaltů třídy 50/70 vzniknou PMB penetrační třídy 25/55 a ze silničních asfaltů třídy 70/100 vzniknout PMB penetrační třídy 45/80.

6.2 STANOVENÍ BODU MĚKNUTÍ – METODA KROUŽEK A KULIČKA

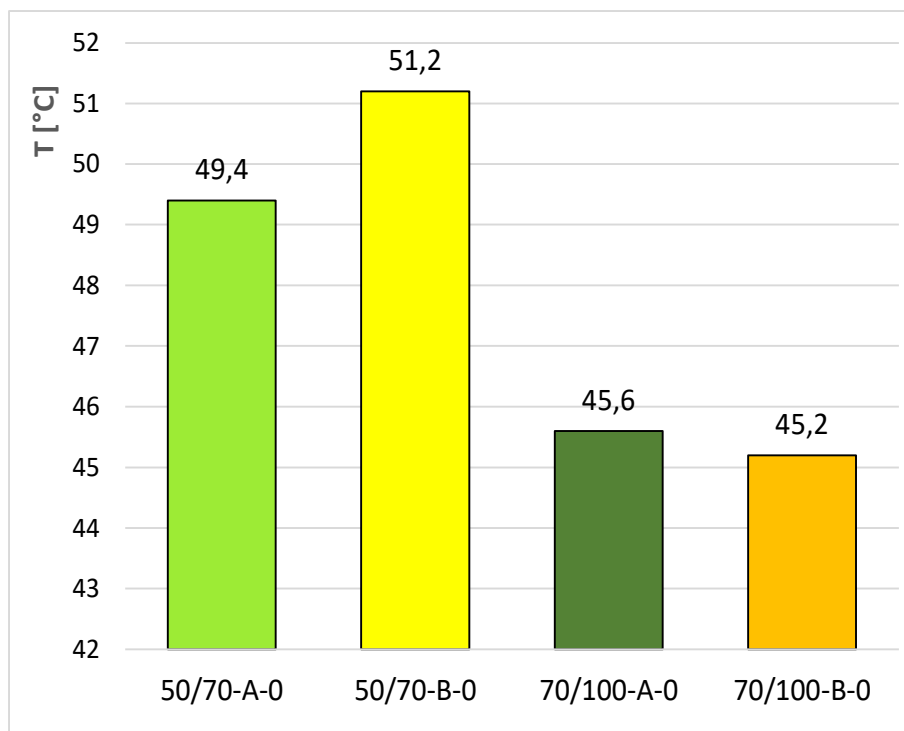
Zkušební metoda ke stanovení bodu měknutí byla provedena dle platné normy ČSN EN 1427 a byla stručně popsána v bodu 4.2. Stanovení bodu měknutí bylo provedeno na nezestárých pojivech a pojivech zestárých metodou RTFOT+PAV. Výsledky měření jsou vyneseny do tabulky 3 a následně zobrazeny v grafech. Naměřené hodnoty vyhovují mezím bodu měknutí dle norem ČSN 65 7204 pro silniční asfalty a ČSN 65 7222-1 pro polymerem modifikované asfalty. Z důvodu přesnější korelace nebyly výsledky zaokrouhleny podle normy ČSN EN 1427, ale na 0,1 °C.

Označení asfaltu zkráceně	Barva v graf. a tab.	Bod měknutí	
		[°C]	
		nezestárý	RTFOT+PAV
50/70 - A - 0		49,4	64,3
50/70 - B - 0		51,2	73,8
70/100 - A - 0		45,6	62,6
70/100 - B - 0		45,2	68,7
50/70 - A - 3.5		72,8	79,5
50/70 - A - 5		68,5	87,3
50/70 - B - 5		71,4	94,4
70/100 - A - 5		67,4	79,6
70/100 - B - 5		70,2	84,5

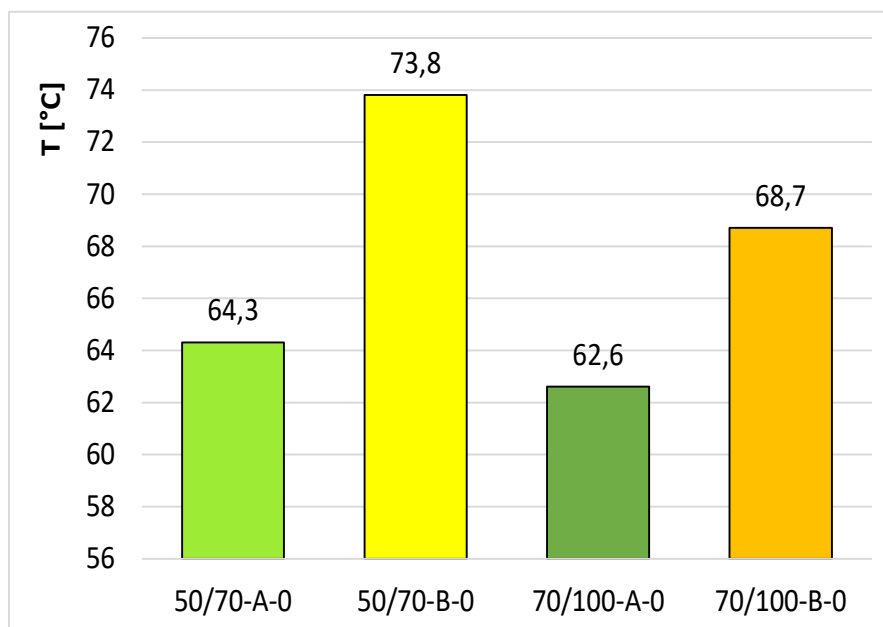
Tabulka 3: Výsledky bodu měknutí

Z grafů 3–4 vyplývá, že vlivem stárnutí metodou RTFOT i metodou RTFOT+PAV dochází ke zvýšení bodů měknutí všech poživ. Čím vyšší je hodnota bodu měknutí, tím se zvyšuje odolnost proti tvorbě trvalých deformací (například vyjeté koleje), ale převážně

na úkor snížení penetrace pojiv a jejich následných náchylností na vznik trhlin. Nejvyšší bod měknutí mají silniční asfalty B.

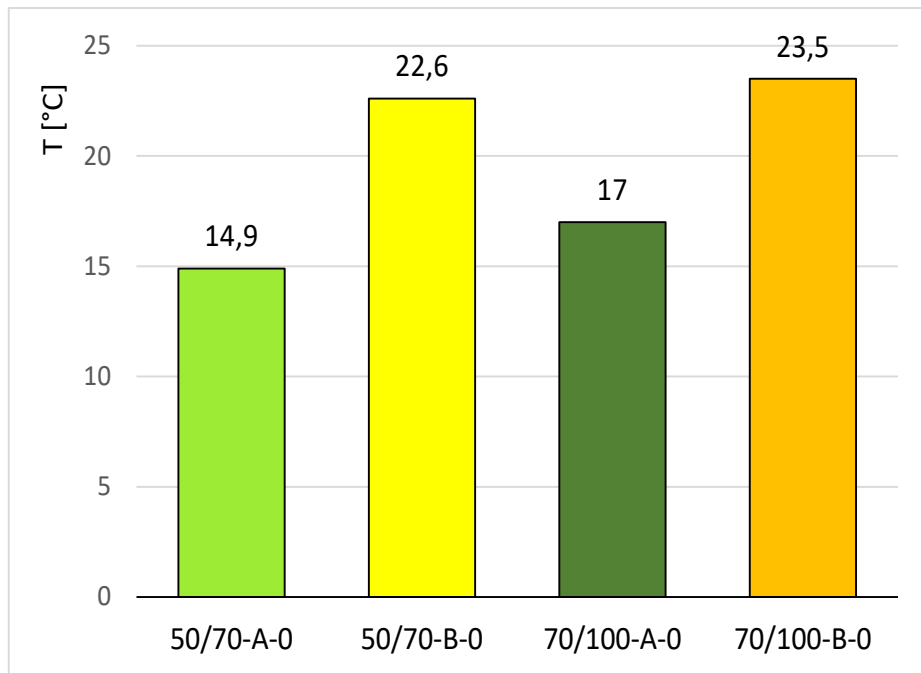


Graf 3: Bod měknutí nezestárých silničních asfaltů

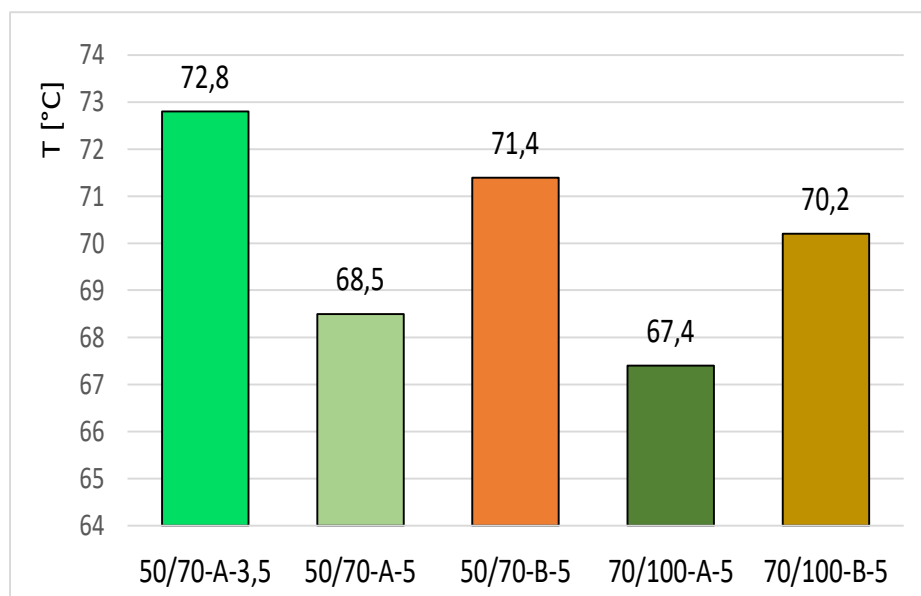


Graf 4: Bod měknutí po RTFOT+PAV silničních (vstupních) asfaltů

Graf 5 ukazuje změnu bodu měknutí silničních (vstupních) asfaltů po stárnutí metodou RTFOT+PAV. Nejvyšší změny bodu měknutí vykazoval asfalt B 70/100 s navýšením o 23,5 °C metodou RTFOT+PAV. Nejnižší změny bodu měknutí byly naměřeny u asfaltu A 50/70, kde se bod měknutí navýšil o 14,9 °C metodou RTFOT+PAV. Silniční asfalty od výrobce A jsou více odolné vůči vlivu stárnutí než asfalty B.

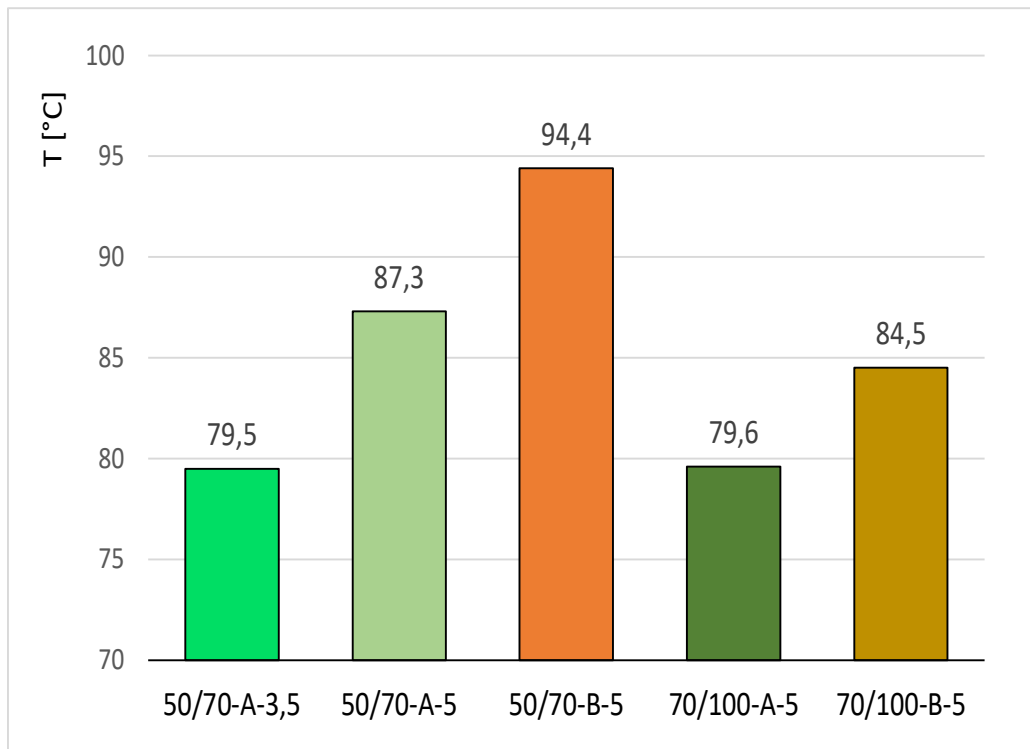


Graf 5: Změna bodu měknutí silničních (vstupních) asfaltů



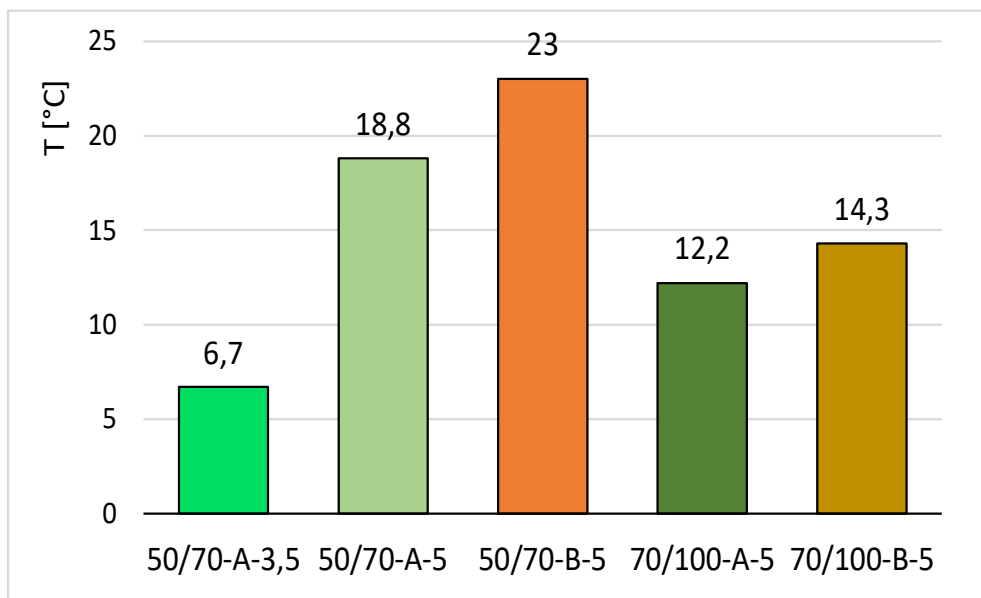
Graf 6: Bod měknutí nezestárlá PmB

Z grafů 6–7 můžeme vidět, že hodnoty bodu měknutí vyrobených modifikovaných asfaltů kopírují chování vstupních silničních asfaltů. Nejvyšší hodnotu bodu měknutí 94,4 °C dosáhl zestárlý asfalt B 50/70. Překvapivé chování asfaltu A 50/70 3,5 % hm. SBS v nezestárlém stavu má vyšší hodnotu bodu měknutí o 4,3 °C než asfalt 50/70 5 % hm. SBS, ale po RTFOT+PAV se hodnoty vyměnily a asfalt 50/70 5 % hm. SBS má vyšší hodnotu o 7,8 °C než A 50/70 3,5 % hm. SBS.



Graf 7: Bod měknutí po RTFOT+PAV PmB

Na grafu 8 je zobrazena změna bodu měknutí po RTFOT+PAV vyrobeného modifikovaného asfaltu. Nejvyšší změny bodu měknutí vykazoval asfalt B 50/70 s navýšením o 23 °C metodou RTFOT+PAV. Nejnižší změny bodu měknutí byly naměřeny u asfaltu A 50/70 3,5 % hm. SBS, kde se bod měknutí navýšil o 6,7 °C metodou RTFOT+PAV.



Graf 8: Změna bodu měknutí po RTFOT+PAV PmB

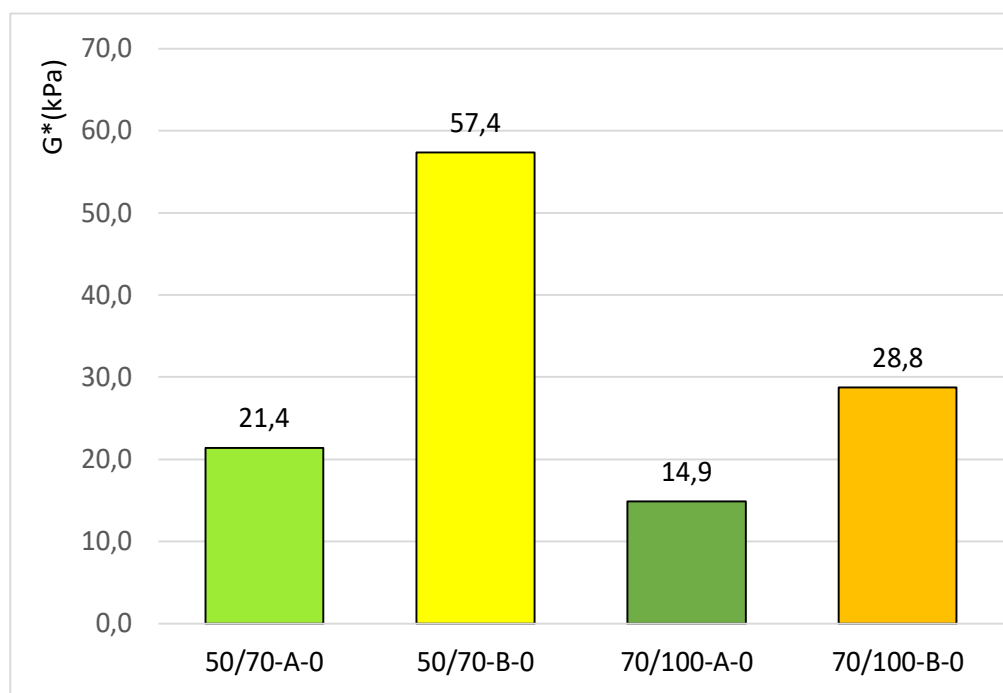
Z grafů vyplývá, že stárnutí způsobuje nárůst bodu měknutí, což je příznivé vůči vzniku trvalých deformací, ale naopak nepříznivé s ohledem na vznik mrazových trhlin a únavové vlastnosti, jelikož se posouvá obor plasticity i u záporných teplot. Z výsledků bodu měknutí je patrné, že stárnutí má větší vliv na asfalty od výrobce B, jak silniční, tak i asfalty po přidání polymeru SBS.

6.3 STANOVENÍ KOMPLEXNÍHO SMYKOVÉHO MODULU A FÁZOVÉHO ÚHLU V DSR

Stanovení komplexního smykového modulu a fázového úhlu bylo provedeno dle ČSN EN 14770. Postup zkoušky je definován v kapitole 4.3. Pro stanovení komplexního smykového modulu a fázového úhlu byl použit dynamický smykový reometr s geometrií typu desky o průměru 25 mm a tloušťkou vzorku 1 mm. Při použití geometrie o průměru 25 mm byly zvoleny teploty 40 °C, 45 °C, 50 °C, 55 °C, 60 °C, 65 °C a 70 °C. Komplexní smykový modul a fázový úhel byl stanoven na pojivech zestárlých metodou RTFOT+PAV v režimu oscilace s řízeným smykovým přetvořením. Při měření byl nastaven frekvenční rozsah zatěžování od 0,1 Hz do 10 Hz. Vyhodnocení komplexního smykového modulu a fázového úhlu se provedlo při zkušební teplotě 60 °C a frekvenci zatěžování 1,59 Hz. Výsledky měření komplexního smykového modulu a fázového úhlu jsou vyneseny do tabulky 4 a následně zobrazeny v grafech.

Označení asfaltu zkráceně	Barva v graf. a tab.	DSR	
		G* [kPa]	δ [-°]
		RTFOT+PAV	
50/70 - A - 0		21,4	73,3
50/70 - B - 0		57,4	57,1
70/100 - A - 0		14,9	74,1
70/100 - B - 0		28,8	64,5
50/70 - A - 3.5		40,7	56,9
50/70 - A - 5		40,9	53,2
50/70 - B - 5		51,1	45,3
70/100 - A - 5		28,4	54,4
70/100 - B - 5		28,9	50,8

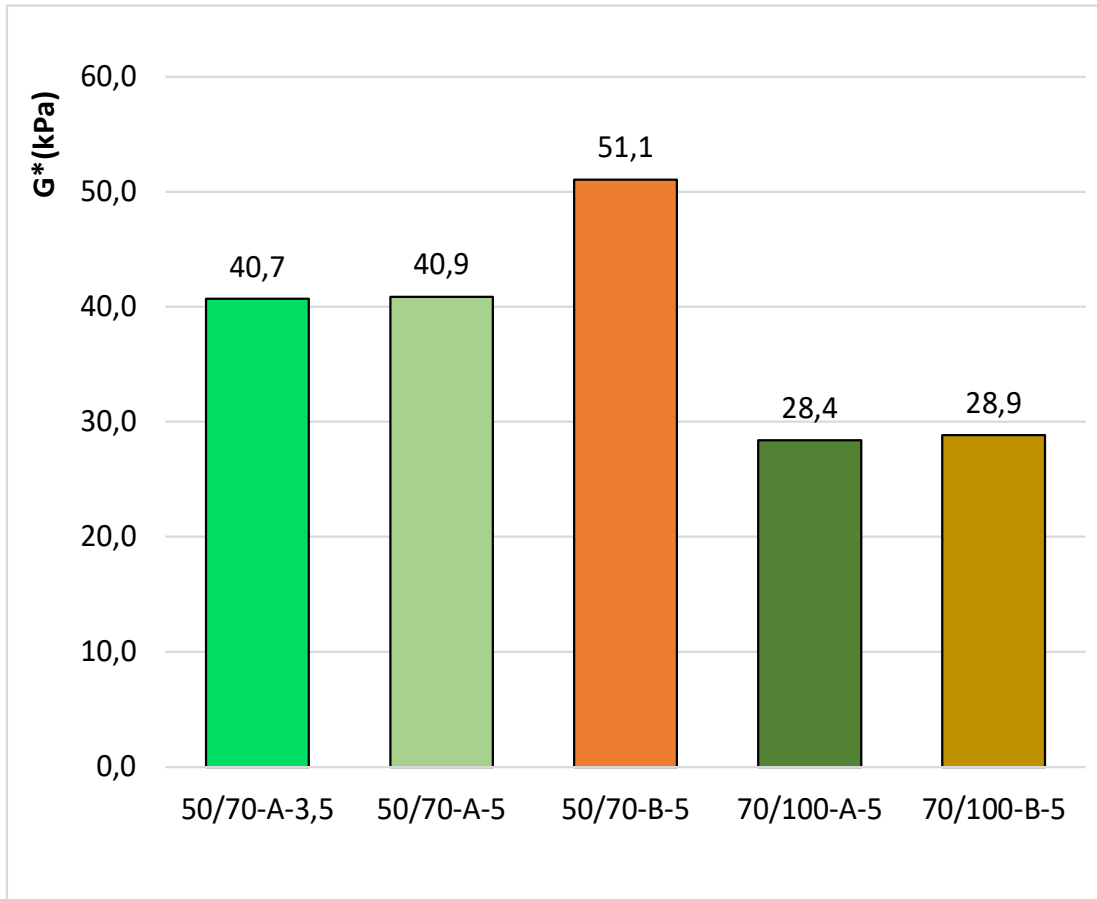
Tabulka 4: Výsledky komplexního smykového modulu a
fázového úhlu, teplota 60 °C, $f = 1,59$ Hz



Graf 9: Komplexní smykový modul silničního (vstupního) asfaltu
po RTFOT+PAV, teplota 60 °C, $f=1,59$ Hz

Z grafu 9 vidíme komplexní smykový modul silničního asfaltu po RTFOT+PAV. Po zkoušce RTFOT+ PAV dosahovaly nejvyšší hodnoty komplexního smykového modulu asfaltu B 50/70 s hodnotou 57,4 kPa. Nejnižší hodnoty komplexního smykového modulu

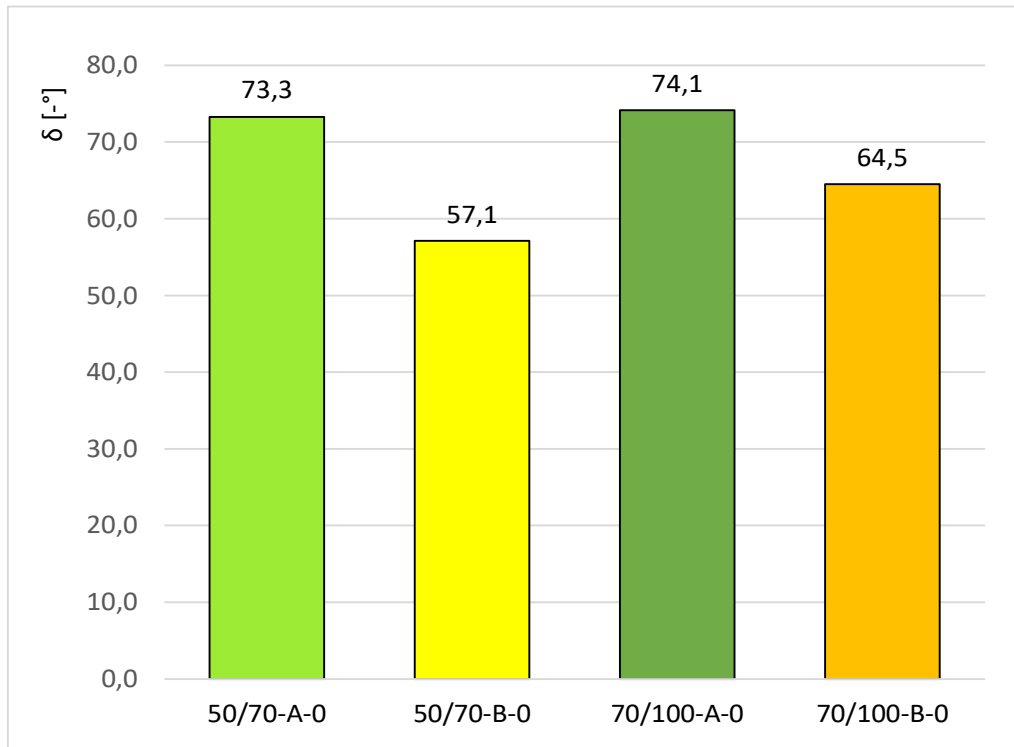
bylo dosaženo u silničního asfaltu A 70/100 14,9 kPa. Pojiva B mají vyšší komplexní smykový modul a jsou tedy tužší. Vyšší hodnoty komplexních smykových modulů dosahovaly silniční asfalty třídy 50/70 než asfalty třídy 70/100.



Graf 10: Komplexní smykový modul PmB po RTFOT+PAV, teplota 60 °C, $f=1,59$ Hz

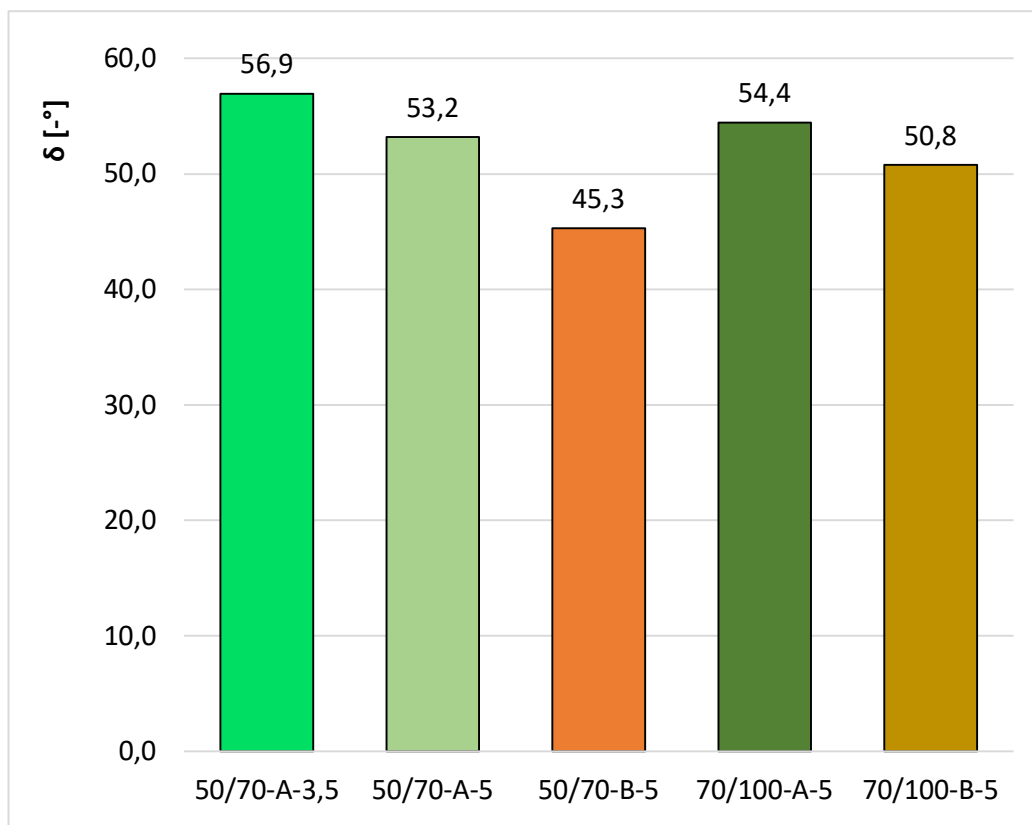
Graf 10 zobrazuje komplexní smykový modul modifikovaného asfaltu po RTFOT+PAV. Po zkoušce RTFOT+ PAV dosahoval nejvyšší hodnoty komplexního smykového modulu asfalt B 50/70 s hodnotou 51,1 kPa. Komplexní smykový modul vyjadřuje odpor vůči deformacím. Čím více se komplexní smykový modul asfaltového pojiva zvyšuje vlivem stárnutí, tím se zvyšuje jeho tuhost. Nejnižší hodnoty komplexního smykového modulu byly pozorovány u silničního asfaltu A 70/100 28,4 kPa. Vstupním asfaltům po přidání polymeru SBS spíše vzrostla tuhost, kromě asfaltu B 50/70.

Graf 11 zobrazuje fázový úhel silničního (vstupního) asfaltu po RTFOT+PAV. Nejvyšší hodnoty fázového úhlu lze pozorovat u asfaltu A 70/100 s hodnotou 74,1 °. Nejnižší hodnoty fázového úhlu jsou u asfaltu B 50/70 s hodnotou 57,1 °. Vstupní asfalty od výrobce B jsou pružnější naopak vstupní asfalty od výrobce A jsou plastičtější.



*Graf 11: Fázový úhel silničního (vstupního) asfaltu po RTFOT+PAV,
teplota 60 °C, $f=1,59$ Hz*

Na grafech 11–12 vidíme fázový úhel z kterého můžeme vyčíst viskoelastické chování asfaltového pojiva. Čím je fázový úhel nižší, tím je pojivo odolnější vůči deformaci, má snahu se vracet do svého původního tvaru a je pružné, elastické. Čím je fázový úhel vyšší, převládá nevratná, plastická složka neboli „ztrátový modul“. U silně zestárlých pojiv je ovšem výhodné, když fázový úhel dosahuje vyšších hodnot, protože pojivo je pak méně křehké a je schopné lépe relaxovat (odbourat) vnesená napětí. To může přispět k omezení vzniku trhlin.

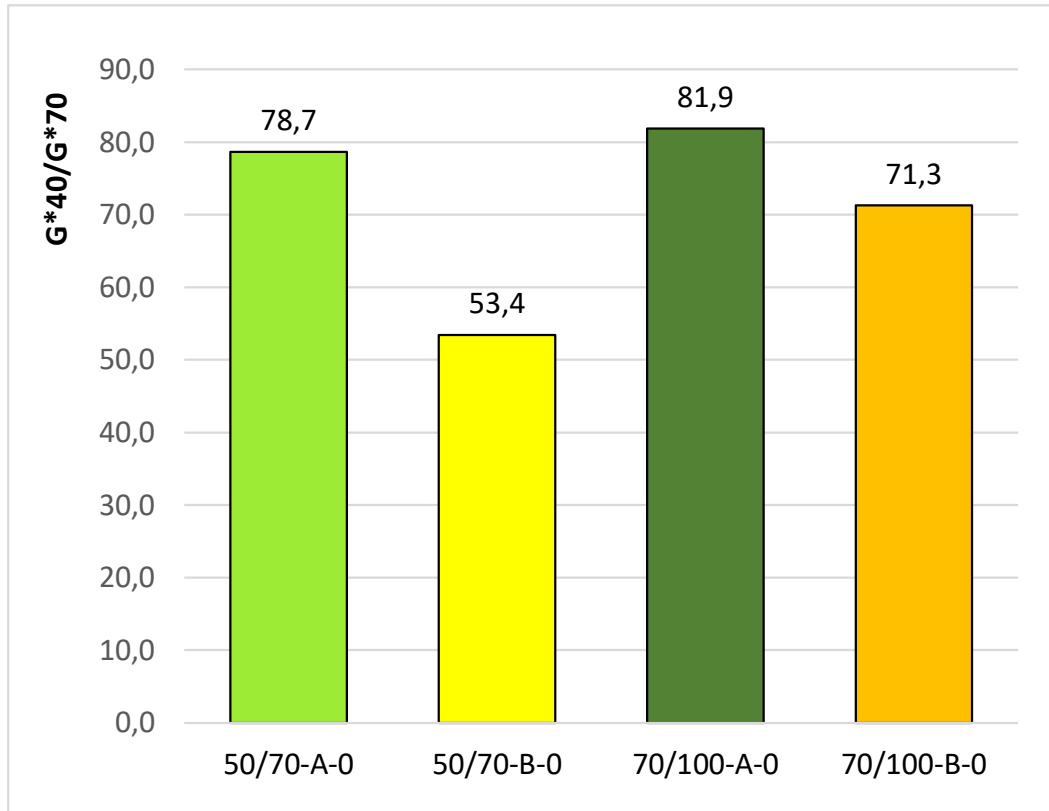


Graf 12: Fázový úhel PmB po RTFOT+PAV, teplota 60 °C, $f=1,59$ Hz

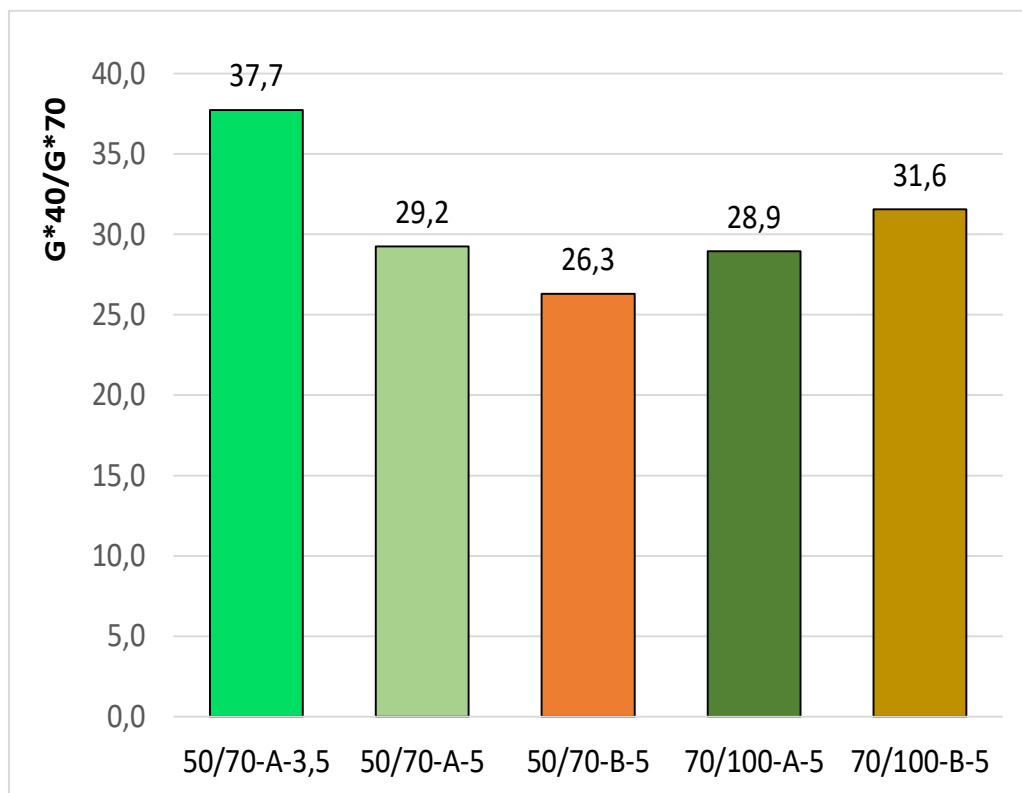
Graf 12 zobrazuje fázový úhel modifikovaného asfaltu po RTFOT+PAV. Nejvyšší hodnoty fázového úhlu lze pozorovat u asfaltu A 50/70 3,5 % hm. SBS s hodnotou 56,9 °. Nejnižší hodnoty fázového úhlu jsou u asfaltu B 50/70 s hodnotou 45,3 °. Modifikované asfalty kopírují hodnoty fázových úhlů vstupních asfaltů.

Označení asfaltu zkráceně	Barva v graf. a tab.	G*(40) [kPa]	G*(70) [kPa]	G*(40)/G*(70) [-]
		RTFOT+PAV		
50/70 - A - 0	Light Green	429,0	5,5	78,7
50/70 - B - 0	Yellow	783,3	14,7	53,4
70/100 - A - 0	Dark Green	317,2	3,9	81,9
70/100 - B - 0	Orange	495,8	7,0	71,3
50/70 - A - 3.5	Green	520,6	13,8	37,7
50/70 - A - 5	Light Green	444,0	15,2	29,2
50/70 - B - 5	Orange	501,5	19,1	26,3
70/100 - A - 5	Dark Green	310,3	10,7	28,9
70/100 - B - 5	Yellow-Green	330,8	10,5	31,6

Tabulka 5: Teplotní citlivost $G^*(40) / G^*(70)$

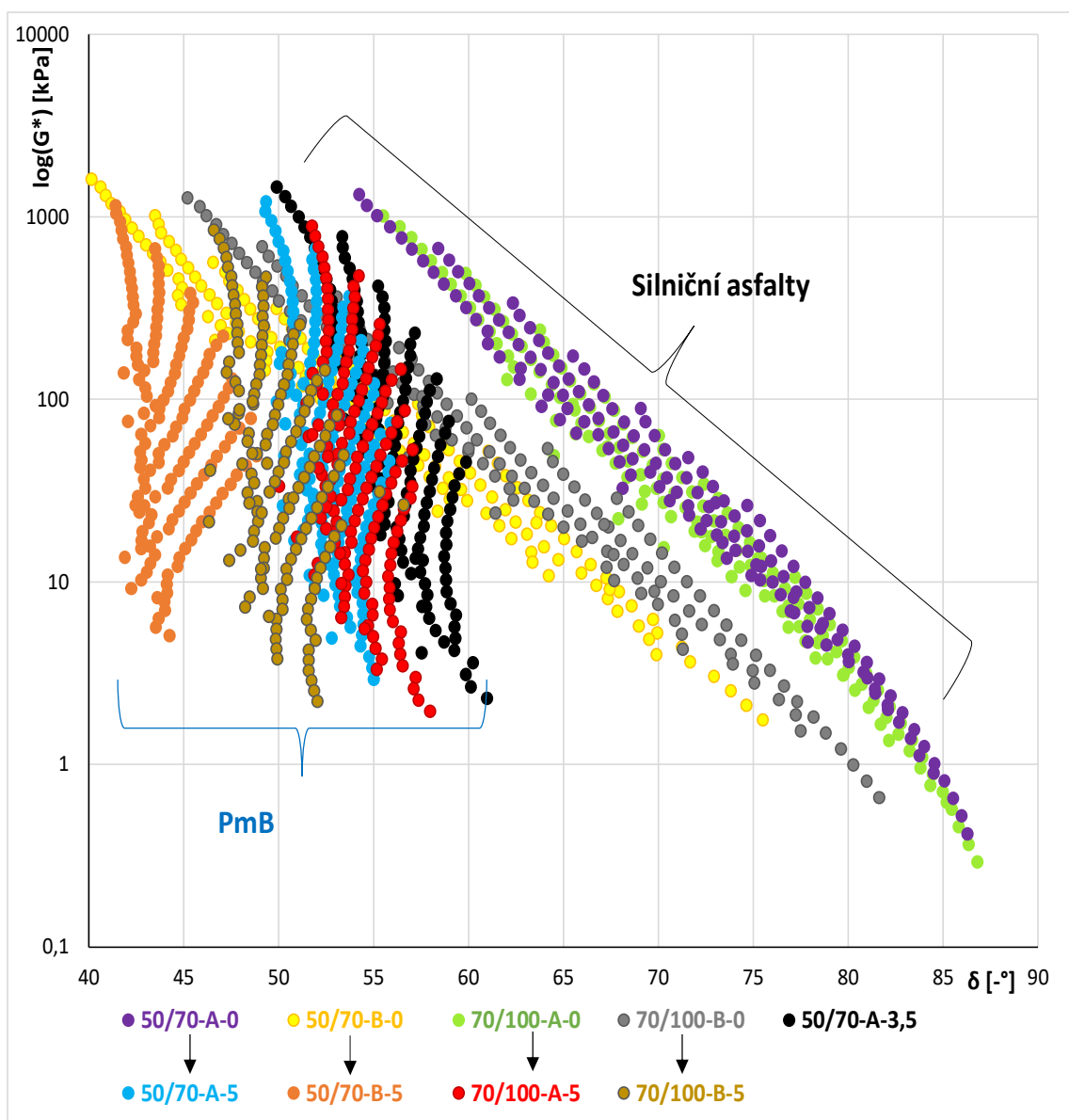


Graf 13: Teplotní citlivost silničního asfaltu po RTFOT+PAV, $f=1,59$ Hz



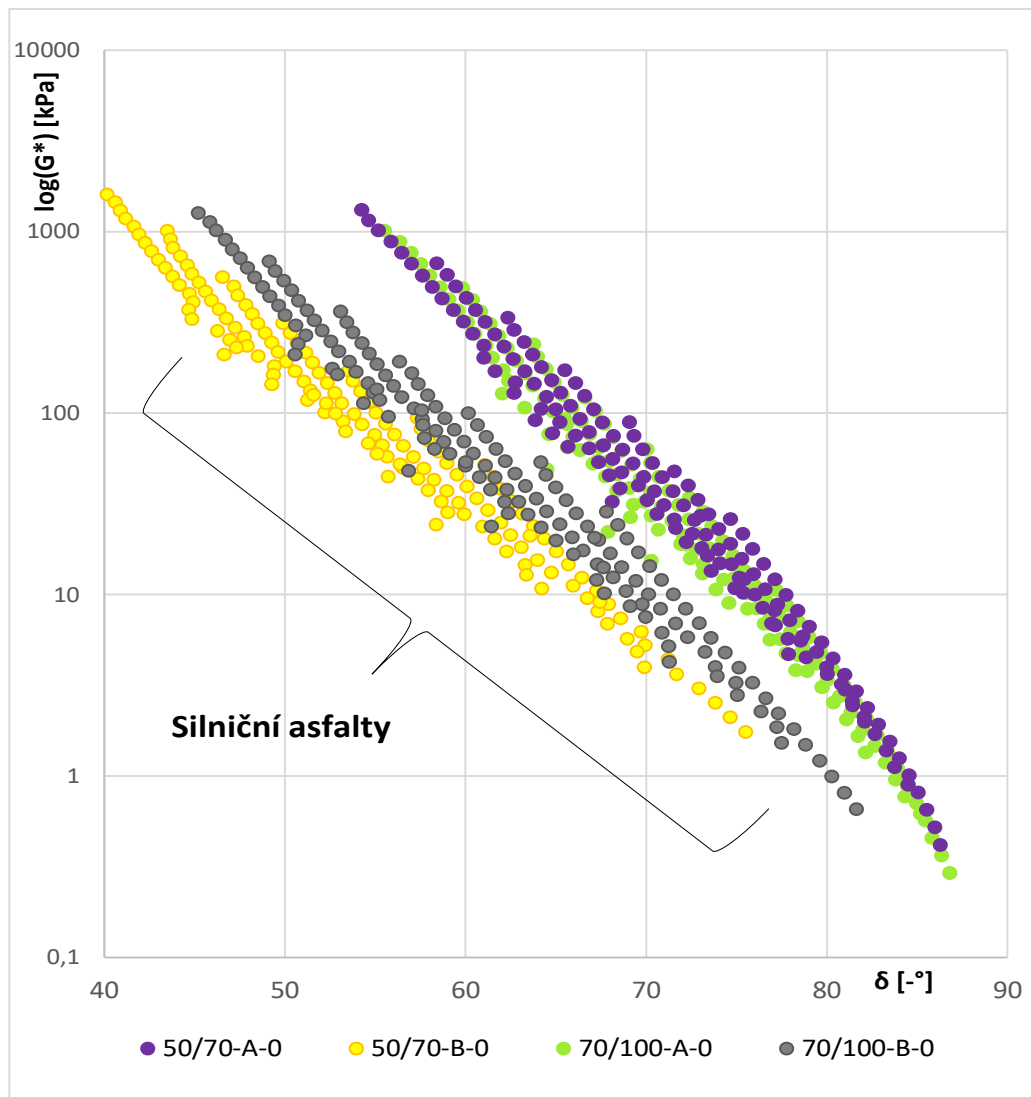
Graf 14: Teplotní citlivost PmB po RTFOT+PAV, $f=1,59$ Hz

Na grafech 13–14 můžeme pozorovat teplotní citlivost pojiv, která byla vypočtena jako podíl komplexních modulů ve smyku při teplotě 40 °C a 70 °C a frekvenci 1,59 Hz. Přidáním polymerní přísady se silně snížila teplotní citlivost všech pojiv. Nejnížší hodnoty teplotní citlivosti jsou u silničního asfaltu B 50/70 s hodnotou 53,4 [-], tak i modifikovaného asfaltu B 50/70 s teplotní citlivostí 26,3 [-]. Nejvyšší hodnoty teplotní citlivosti jsou u silničního asfaltu A 70/100 s hodnotou 81,9 [-] a u modifikovaného asfaltu je to PmB od výrobce A 50/70 s 3,5 % SBS s hodnotou 37,7 [-]. U asfaltů od výrobce A byla převážně větší teplotní citlivost než u asfaltů B. Asfalty s nižším číslem mají nižší teplotní citlivost, jinými slovy v létě tolik netečou a v zimě méně praskají.



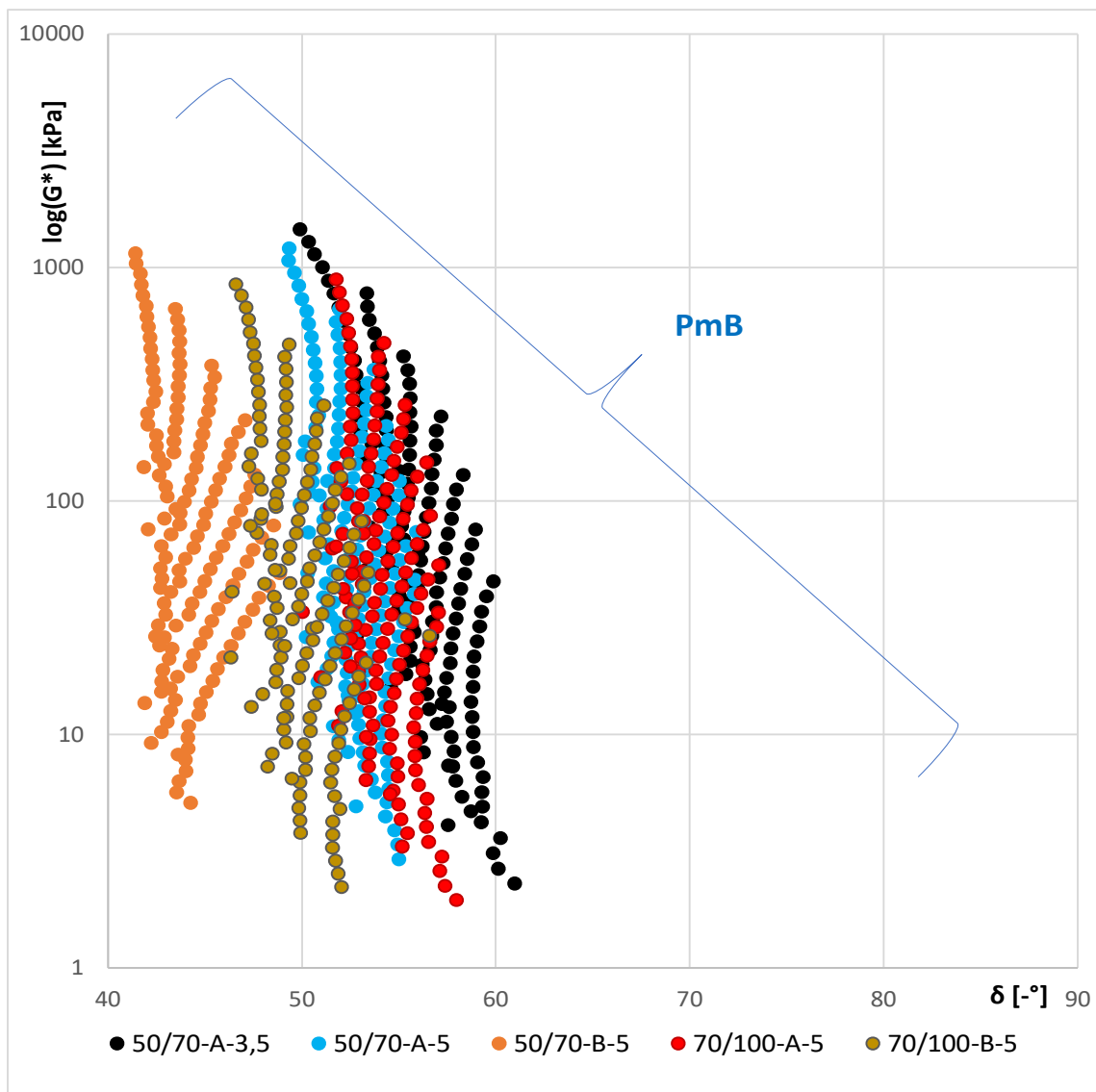
Graf 15: Blackův diagram všech asfaltů po RTFOT+PAV

Dalším způsobem zobrazení výsledků je prostřednictvím Blackova diagramu v grafu 15, kde vidíme průběhy všech asfaltů po RTFOT+PAV. Tento Blackův diagram se někdy označuje jako „otisk prstu“ daného pojiva a vyjadřuje závislost komplexního modulu ve smyku na fázovém úhlu.



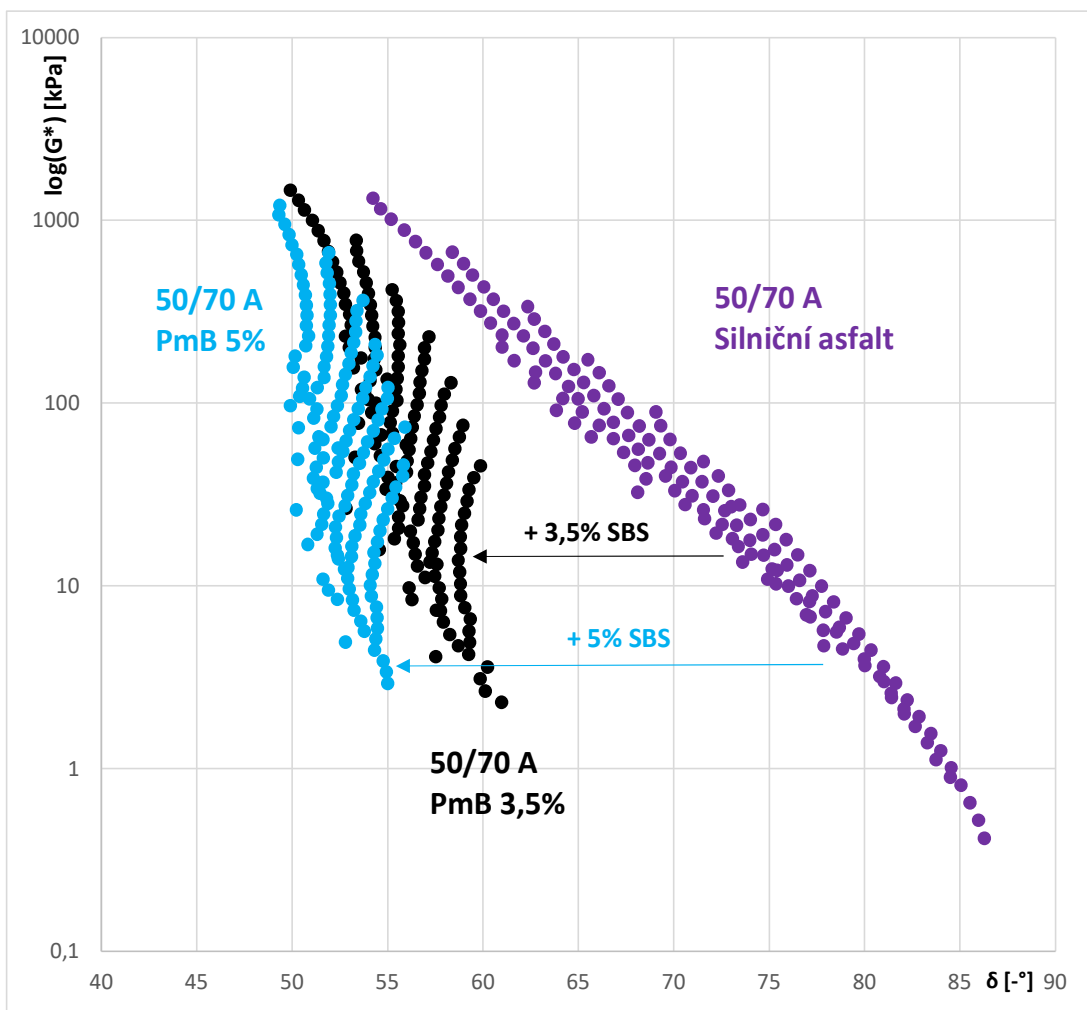
Graf 16: Blackův diagram všech silničních asfaltů po RTFOT+PAV

Graf 16 podrobně ukazuje chování silničních asfaltů po RTFOT+PAV. Neze-stárlý silniční asfalt má většinou obloukový tvar, po dlouhodobém stárnutí se napřímí a posune se mírně doleva k nižším fázovým úhlům a mírně nahoru, protože stárnutím se pojivo stává tužším. Dále můžeme z Blackova diagramu vyčíst, že silniční asfalt B má v celém teplotně-frekvenčním rozsahu nižší fázový úhel, je pružnější, a naopak silniční asfalty A mají vyšší hodnoty fázového úhlu, to znamená, že jejich chování je více plastické.



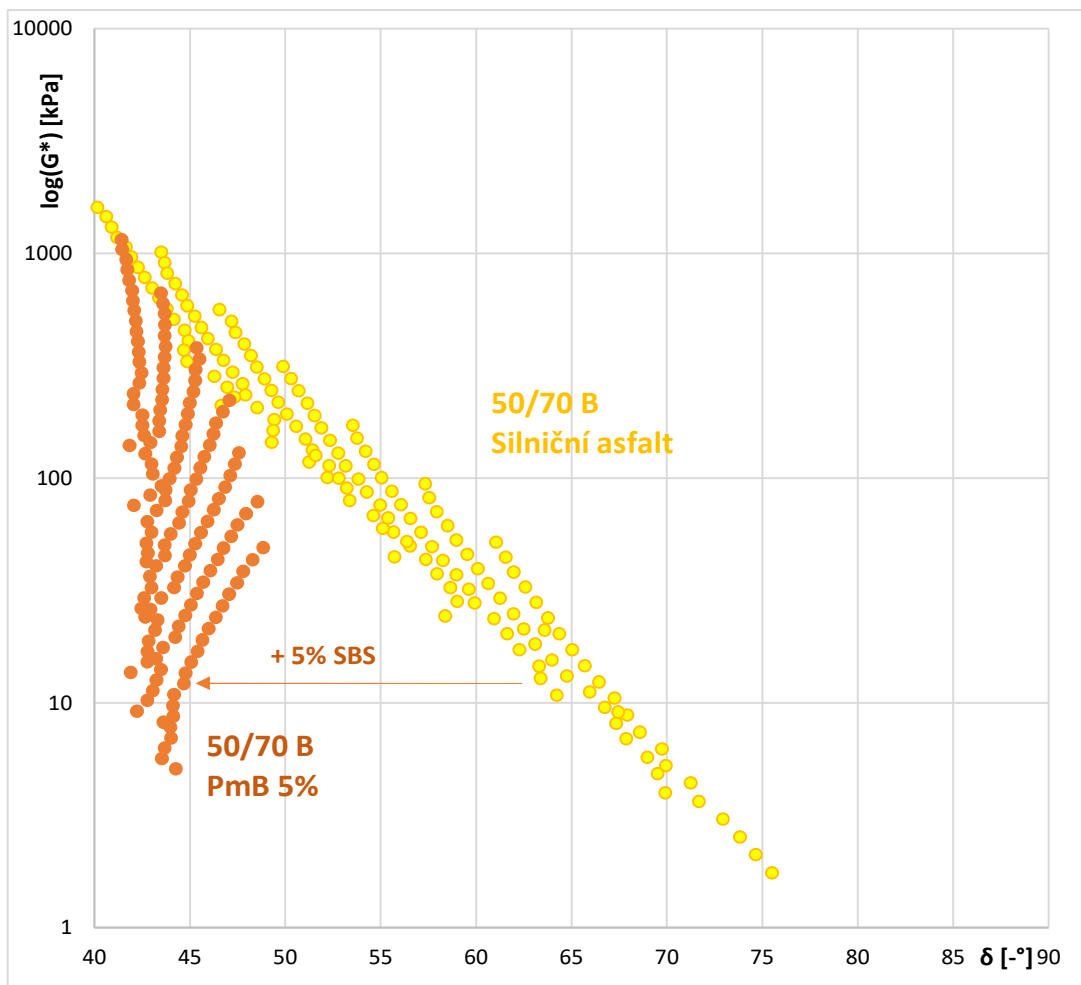
Graf 17: Blackův diagram všech PmB po RTFOT+PAV

Po přidání polymeru SBS spíše vzrostla tuhost a klesl fázový úhel. Modifikované asfalty se v Blackově diagramu posunou víc doleva k nižším fázovým úhlům. Zestárnutím srovnávaných PMB došlo k rozšíření průběhu Blackova diagramu z hladké úzké křivky, kterou obvykle vykazují nezestárlé PMB. Široké (pásové) průběhy Blackových diagramů srovnávaných PMB jsou uvedeny na grafu 17.



Graf 18: Blackův diagram asfalt 50/70 A po RTFOT+PAV

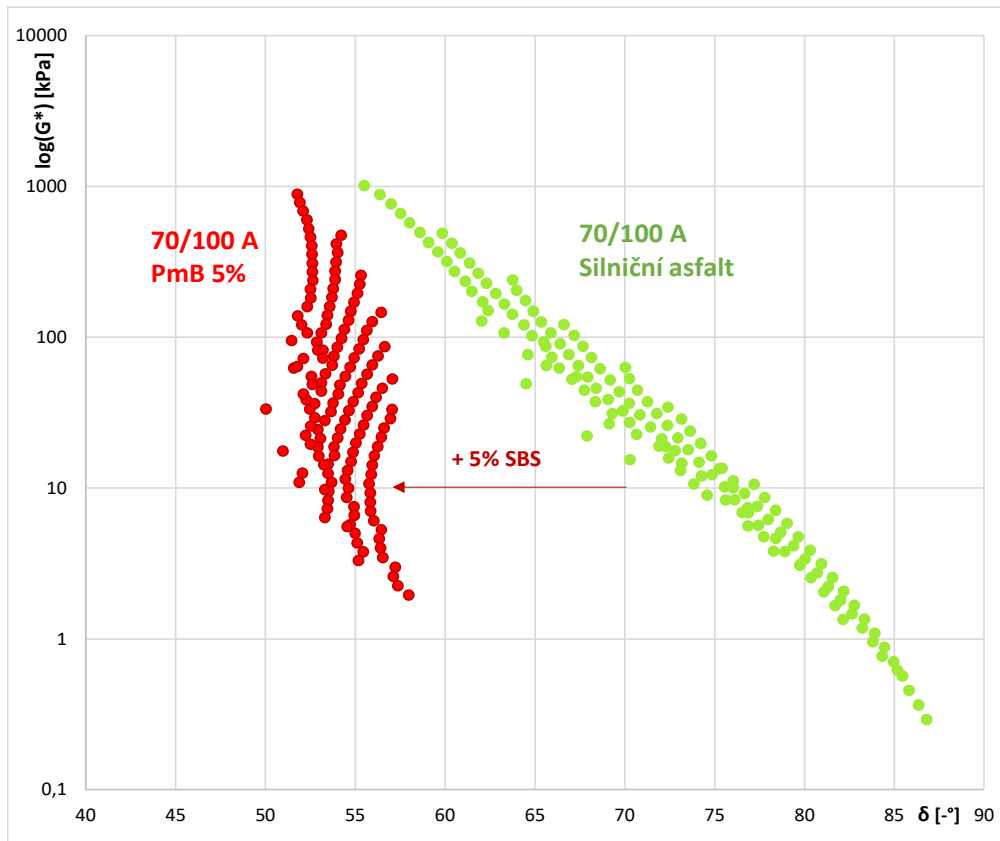
Graf 18 zobrazuje, co se stane se silničním asfaltem 50/70 A po přidání polymeru s 3,5 % hm. anebo s 5 % hm. SBS (vše ve stavu zestárnutí RTFOT+PAV). Tvar Blackova diagramu modifikovaného asfaltu 50/70 A 3,5 % hm. SBS je téměř totožný s asfaltem 50/70 A 5 % hm. SBS. Liší se jen hodnotou fázového úhlu, můžeme sledovat, že asfalt 50/70 A s vyšším podílem SBS má menší hodnotu fázového úhlu, má větší potenciál navracet se do původního stavu než asfalt 50/70 A s nižším podílem SBS.



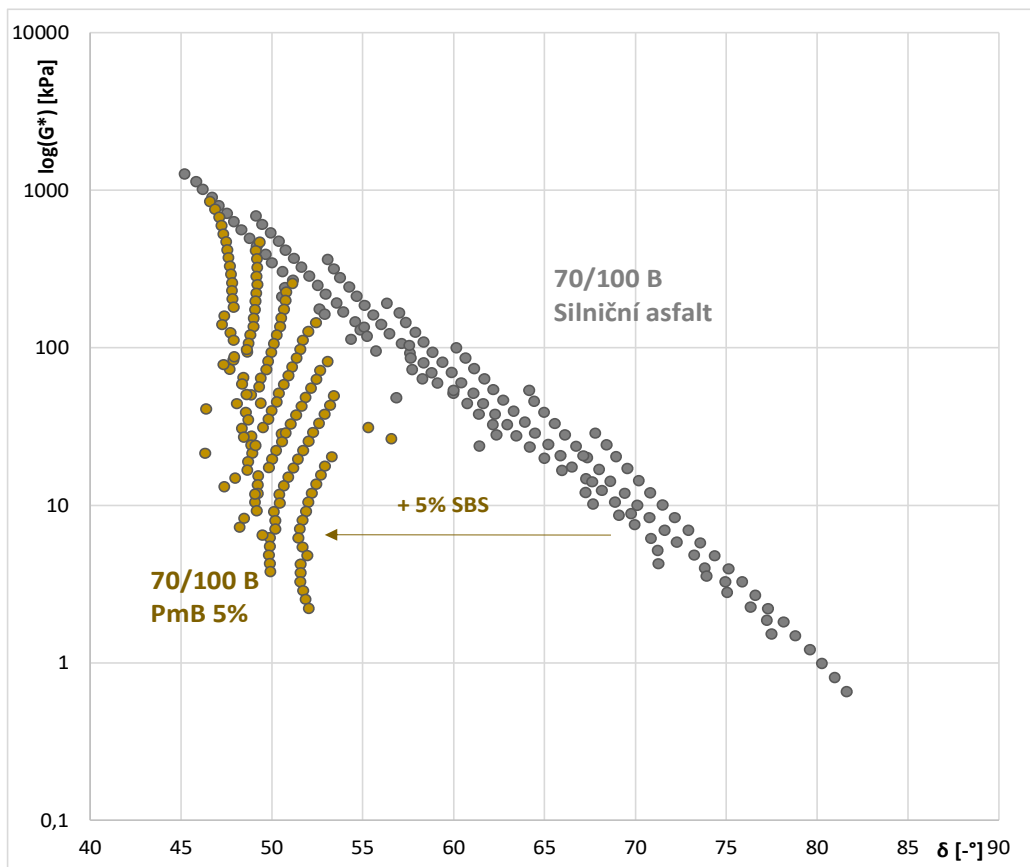
Graf 19: Blackův diagram asfalt 50/70 B po RTFOT+PAV

Další podrobné zobrazení Blackova diagramu ukazuje graf 19, kde je vidět chování silničního asfaltu 50/70 B a po přidání polymeru SBS chování jeho vytvořeného modifikovaného asfaltu. Modifikovaný asfalt 50/70 B má menší fázový úhel (je pružnější) než asfalt 50/70 A.

Na grafech 20–21 můžeme vidět asfalty gradace 70/100 od výrobce asfaltu A a výrobce asfaltu B. Asfalty gradace 70/100 kopírují tvar Blackova diagramu asfaltu gradace 50/70. Jen s rozdílem fázového úhlu, kde asfalty 50/70 mají nižší hodnoty fázového úhlu než asfalty gradace 70/100.



Graf 20: Blackův diagram asfalt 70/100 A po RTFOT+PAV



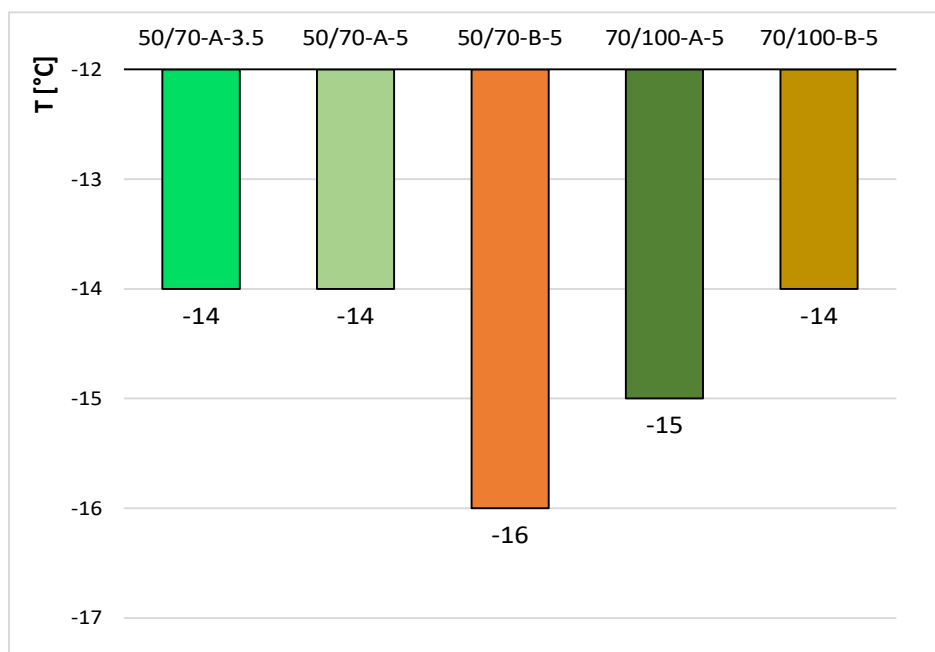
Graf 21: Blackův diagram asfalt 70/100 B po RTFOT+PAV

6.4 STANOVENÍ BODU LÁMAVOSTI PODLE FRAASSE

Zkušební metoda ke stanovení bodu lámavosti podle Fraasse byla provedena dle platné normy ČSN EN 12593 a byla stručně popsána v bodu 4.4. Tato zkouška byla provedena na nezestárých modifikovaných asfaltových pojivech a výsledky jsou vynešeny v grafu 22. Nejvyšší dovolená hodnota bodu lámavosti u pojiv gradace 25/55–65 je $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ a u pojiv gradace 45/80–65 je to $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ podle normy ČSN 65 7222-1 pro polymerem modifikované asfalty. Asfalt B gradace 70/100 těsně nesplnil požadavek. Nejlepších hodnot bodu lámavosti v gradaci 50/70 dosáhl asfalt B s teplotou $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ a v gradaci 70/100 asfalt A s hodnotou $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Zkušební metoda má podle odborné literatury vysokou (špatnou) hodnotu opakovatelnosti i reprodukovatelnosti. Výsledky jsou v rámci chyby metody.

Oficiální označení PmB	Označení asfaltu zkráceně	Barva v graf. a tab.	Bod lámavosti	Mezní hodnota
			[$^{\circ}\text{C}$]	[$^{\circ}\text{C}$]
			nezestárý	ČSN 65 7222-1
25/55–65	50/70 - A - 3.5		-14	≤ -12
25/55–65	50/70 - A - 5		-14	≤ -12
25/55–65	50/70 - B - 5		-16	≤ -12
45/80–65	70/100 - A - 5		-15	≤ -15
45/80–65	70/100 - B - 5		-14	≤ -15

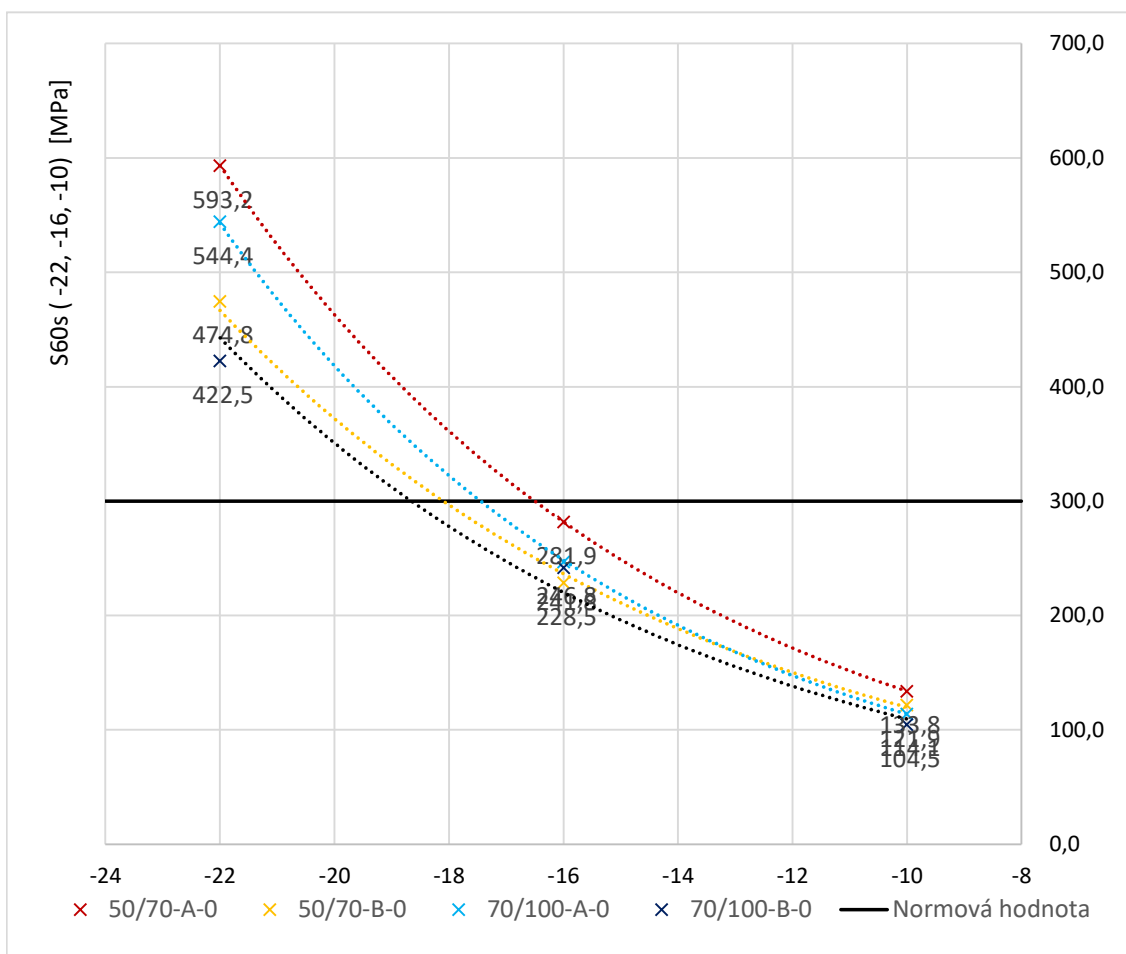
Tabulka 6: Výsledky bodu lámavosti podle Fraasse



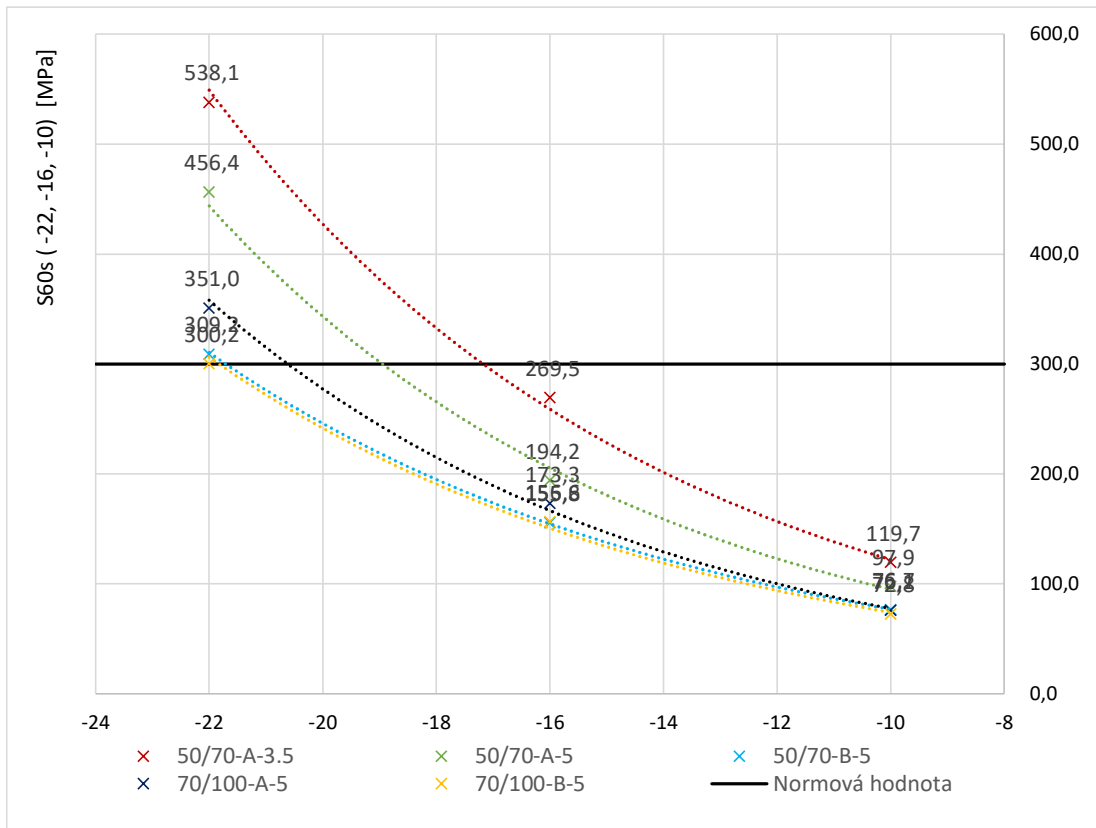
Graf 22: Teplota lámavosti Fraasse PmB po RTFOT+PAV

6.5 STANOVENÍ MODULU TUHOSTI ZA OHYBU POMOCÍ PRŮHYBOVÉHO TRÁMEČKOVÉHO REOMETRU BBR

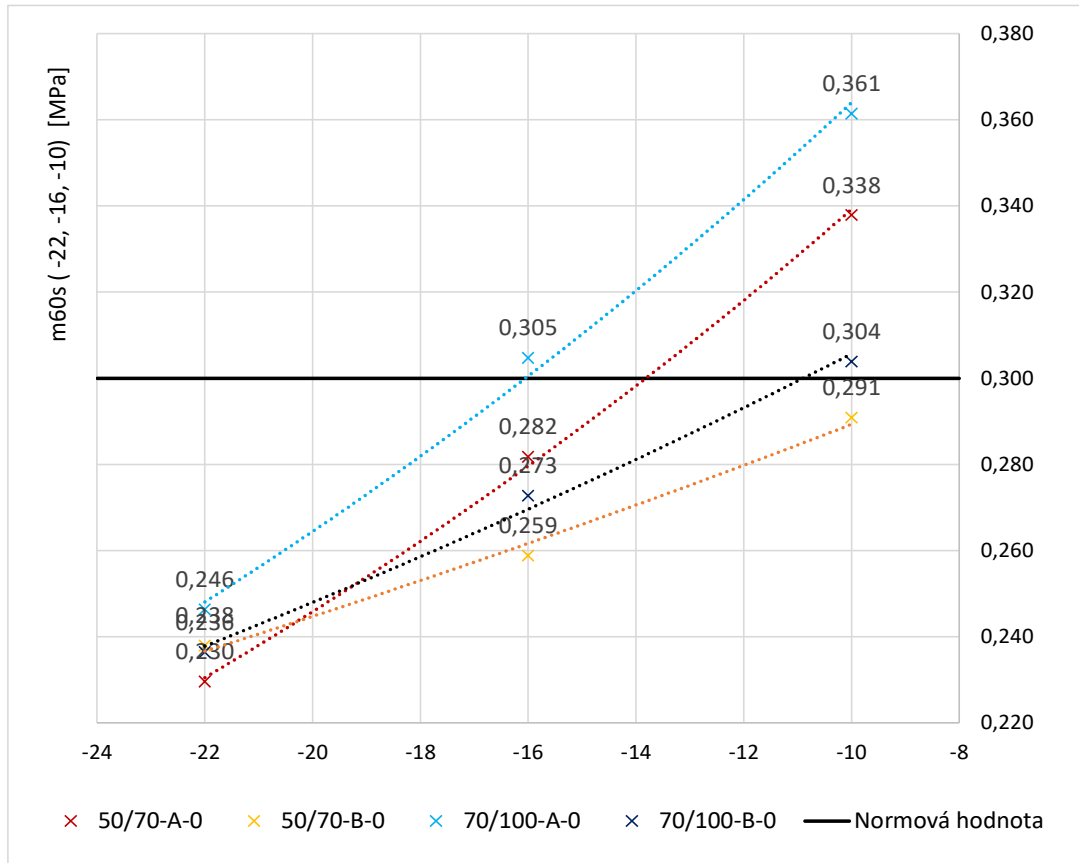
Zkušební metoda ke stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru BBR byla provedena dle platné normy ČSN EN 14771 a byla stručně popsána v bodu 4.7. Pro stanovení modulu tuhosti za ohybu byl použit průhybový trámečkový reometr BBR (Bending Beam Rheometer), který slouží k popisu chování asfaltových pojiv za nízkých teplot. Po stanovenou dobu se na střed trámečku vkládá konstantní zatížení a měří se průhyb jako funkce času. Modul tuhosti za ohybu vypočítáme z ohybového napětí a ohybové deformace. Hledaná kritická teplota je stanovena z hodnot modulu tuhosti za ohybu, který má při 60 s ($S_{m60s} = 300$ MPa) a z m-hodnot při 60 s ($m_{60s} = 0,3$). Jako výsledná hodnota se bere vyšší (méně příznivá) hodnota z těchto dvou teplot. Měření probíhalo při teplotách (-10, -16, -22) °C, protože se očekávalo, že kritická teplota bude ležet v tomto rozmezí teplot.



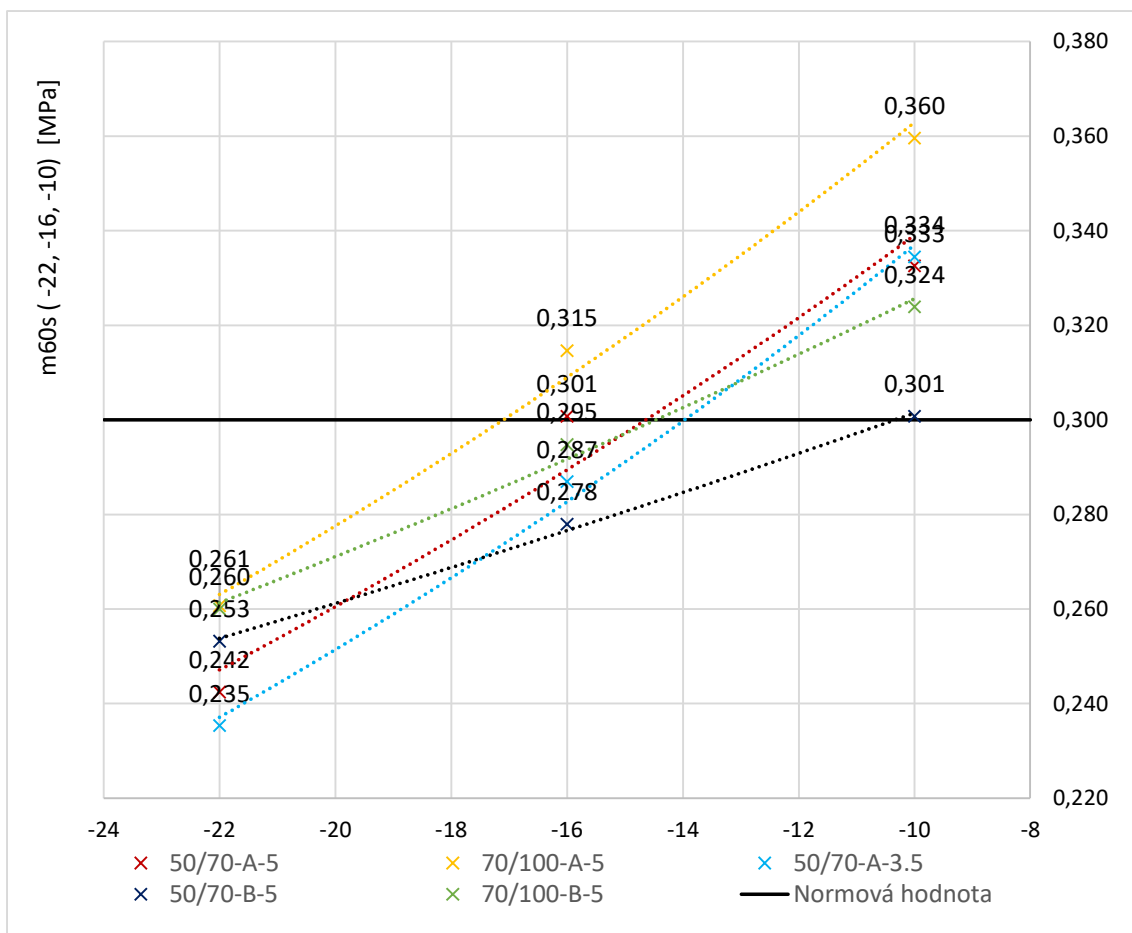
Graf 23: Modul tuhosti za ohybu silničních asfaltů po RTFOT+PAV



Graf 24: Modul tuhosti za ohybu PmB po RTFOT+PAV



Graf 25: M-hodnota silničních asfaltů po RTFOT+PAV



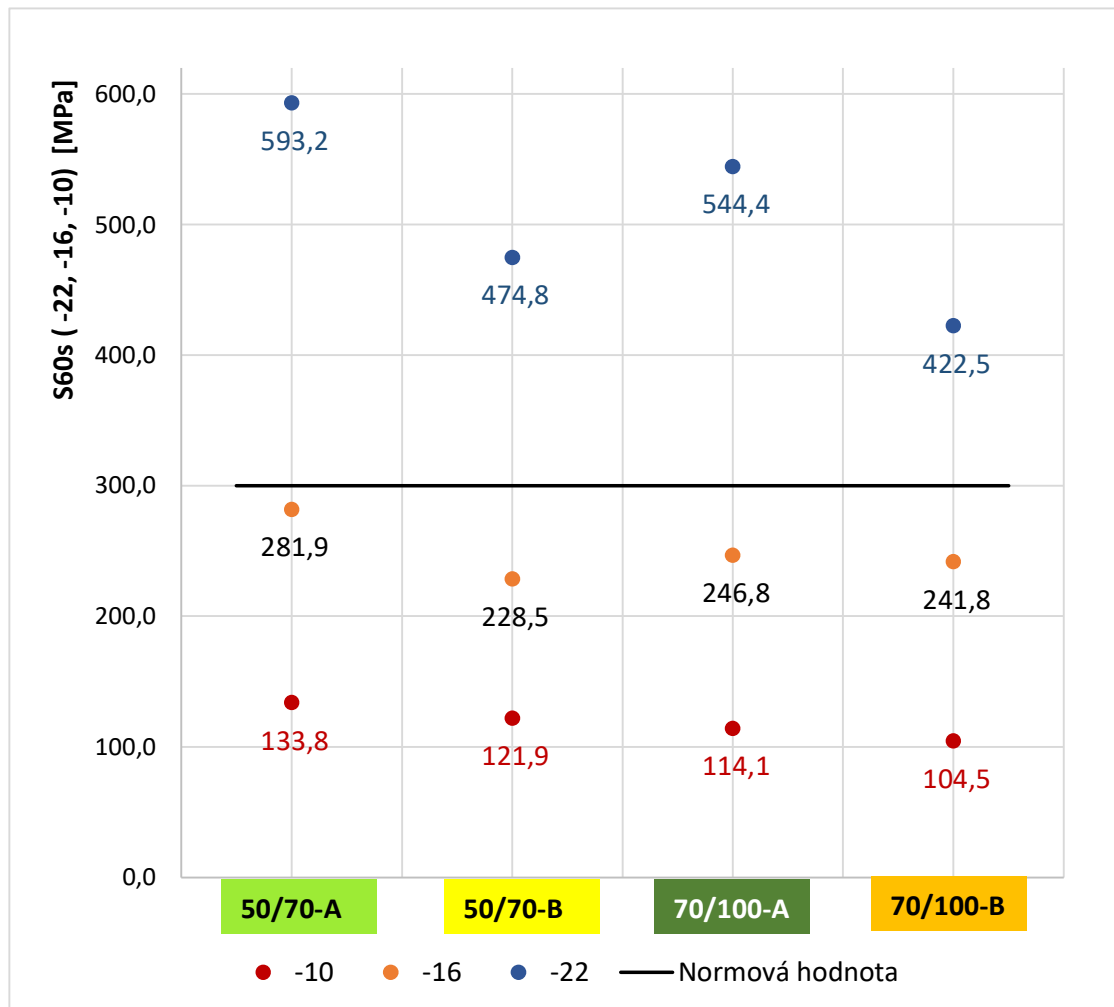
Graf 26: M-hodnota PmB po RTFOT+PAV

Grafy 23–26 ukazují ohybové tuhosti a m-hodnoty všech asfaltů po RTFOT+PAV, toto zobrazení se často používá, ale je velmi nepřehledné. Proto se vytvořily grafy 27–30, aby byly čitelné všechny potřebné hodnoty.

Označení asfaltu zkráceně	Barva v graf. a tab.	S60s [Mpa]	m60s [s]
		-16	-16
50/70 - A - 0		281,9	0,282
50/70 - B - 0		228,5	0,259
70/100 - A - 0		246,8	0,305
70/100 - B - 0		241,8	0,273
50/70 - A - 3.5		269,5	0,287
50/70 - A - 5		194,2	0,301
50/70 - B - 5		155,8	0,278
70/100 - A - 5		173,3	0,315
70/100 - B - 5		156,6	0,295

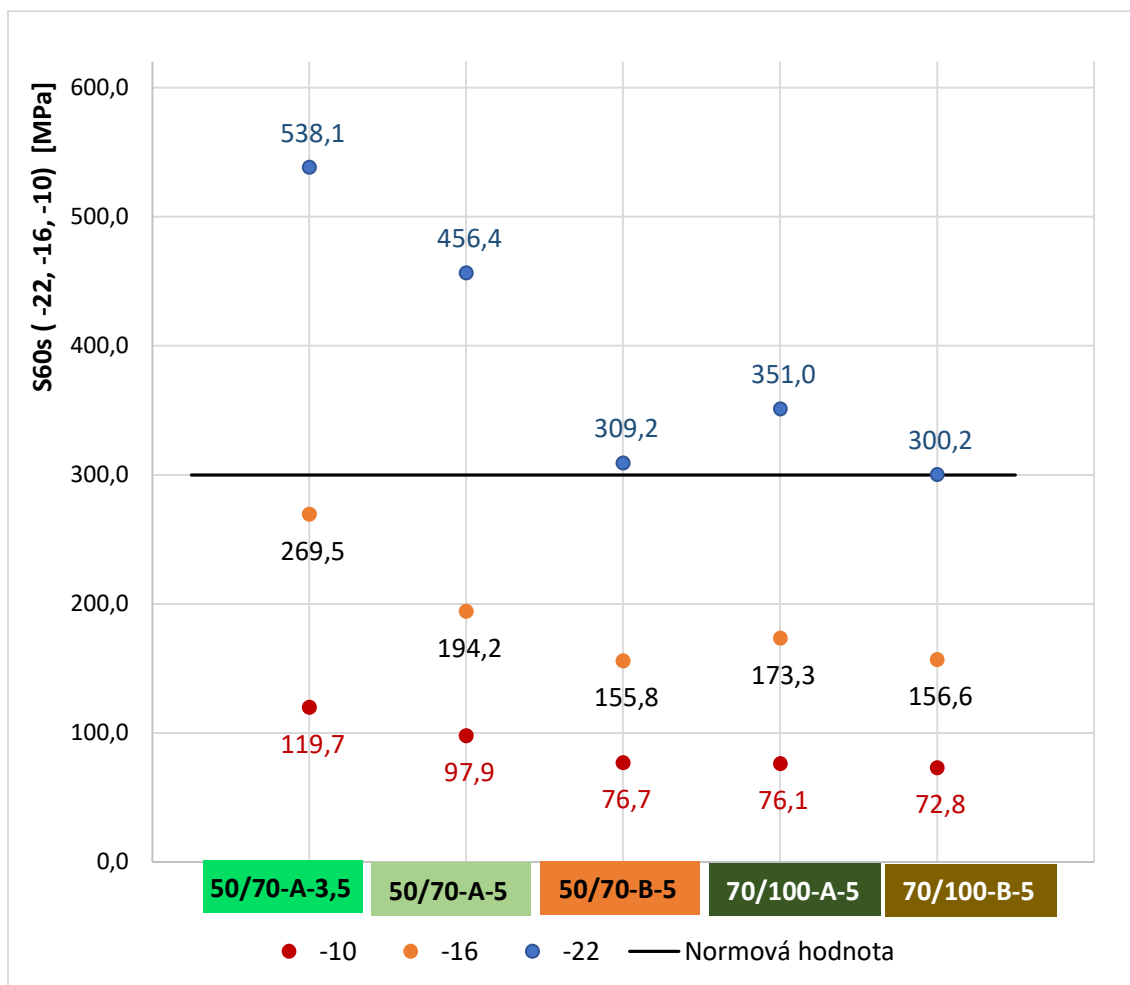
Tabulka 7: Výsledky modulu tuhosti a m-hodnoty (-16 °C)

V grafu 27 jsou zaneseny jednotlivé hodnoty ohybové tuhosti S_{m60} pro silniční asfalty po RTFOT+PAV a normová hodnota 300 MPa. Můžeme pozorovat, že s klesající teplotou modul tuhosti exponenciálně roste u silničních asfaltů. Maximální hodnota modulu tuhosti je S_{m60} 281,9 MPa pro silniční asfalt 50/70 A a minimální pro silniční asfalt 70/100 B S_{m60} je 228,5 MPa při teplotě $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$. Čím je hodnota modulu tuhosti vyšší, tím se pojivo stává citlivější na vznik mrazových trhlin, protože pojivo je křehčí.



Graf 27: Modul tuhosti silničních asfaltů po RTFOT+PAV

Modul tuhosti s klesající teplotou roste na rozdíl od m -hodnoty, která s klesající teplotou klesá exponenciálně. Čím je m -hodnota vyšší, tím je pojivo schopné rychleji se dotvarovat, odbourat napětí a tím má vyšší odolnost vůči vzniku mrazových trhlin.

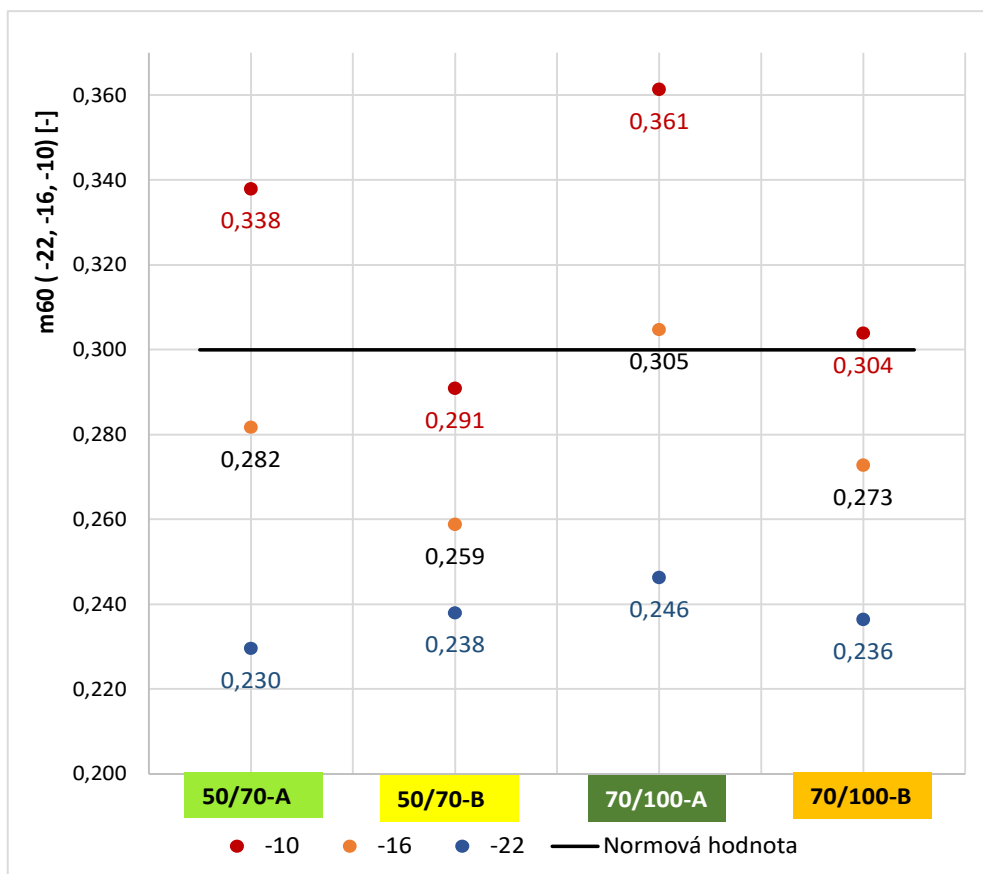


Graf 28: Modul tuhosti PmB po RTFOT+PAV

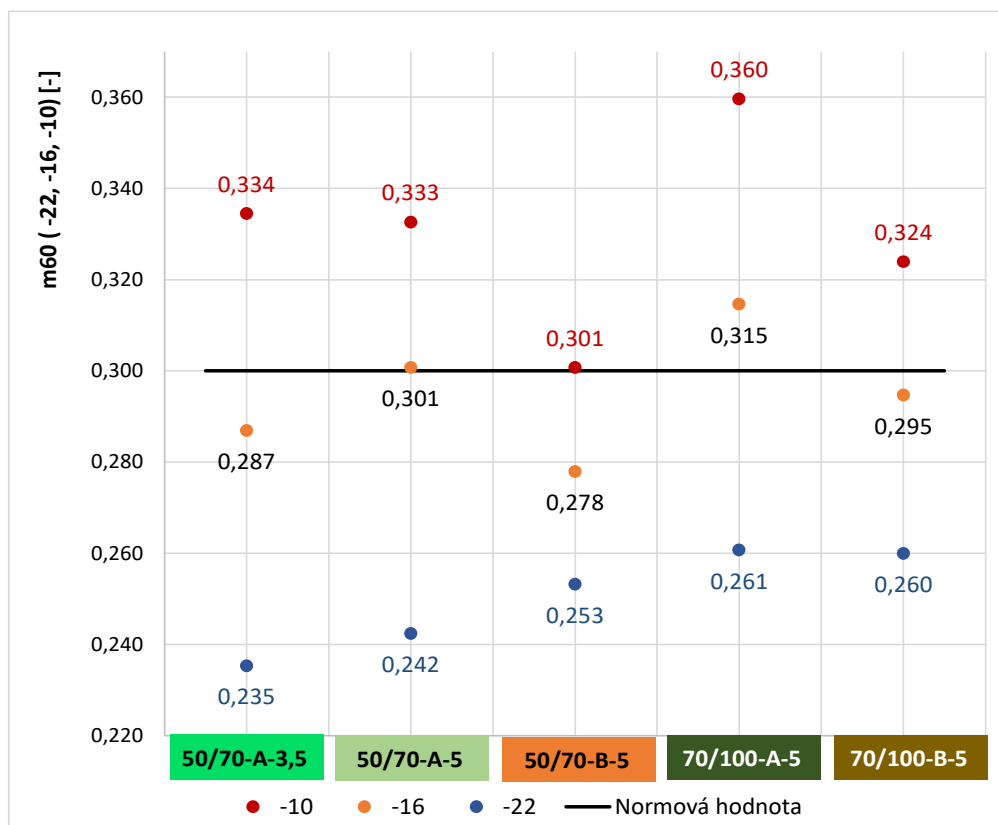
V grafu 28 jsou zaneseny jednotlivé hodnoty ohybové tuhosti Sm_{60} pro modifikované asfalty po RTFOT+PAV a normová hodnota 300 MPa. Můžeme pozorovat, že s klesající teplotou modul tuhosti exponenciálně roste stejně jako u silničních asfaltů. Maximální hodnota modulu tuhosti je Sm_{60} 269,5 MPa pro modifikovaný asfalt 50/70 A s 3,5 % polymeru SBS a minimální pro modifikovaný asfalt 50/70 B Sm_{60} je 155,8 MPa při teplotě - 16 °C.

Dále můžeme pozorovat, že po přidání polymeru SBS, asfalty mají při těchto nízkých teplotách menší tuhost. A jak se očekávalo, větší tuhost v nízkých teplotách má pojivo s menším obsahem polymeru SBS asfalt A 50/70 3,5 % hm. SBS.

Graf 29 ukazuje jednotlivé m-hodnoty m_{60} pro silniční asfalty po RTFOT+PAV a normová hodnota 0,300 [-]. Nejvyšší m-hodnota je 0,305 [-] u silničního asfaltu A 70/100 a nejnižší m-hodnota 0,259 [-] u silničního asfaltu B 50/70 při teplotě - 16 °C.



Graf 29: M-hodnoty silničních asfaltů po RTFOT+PAV



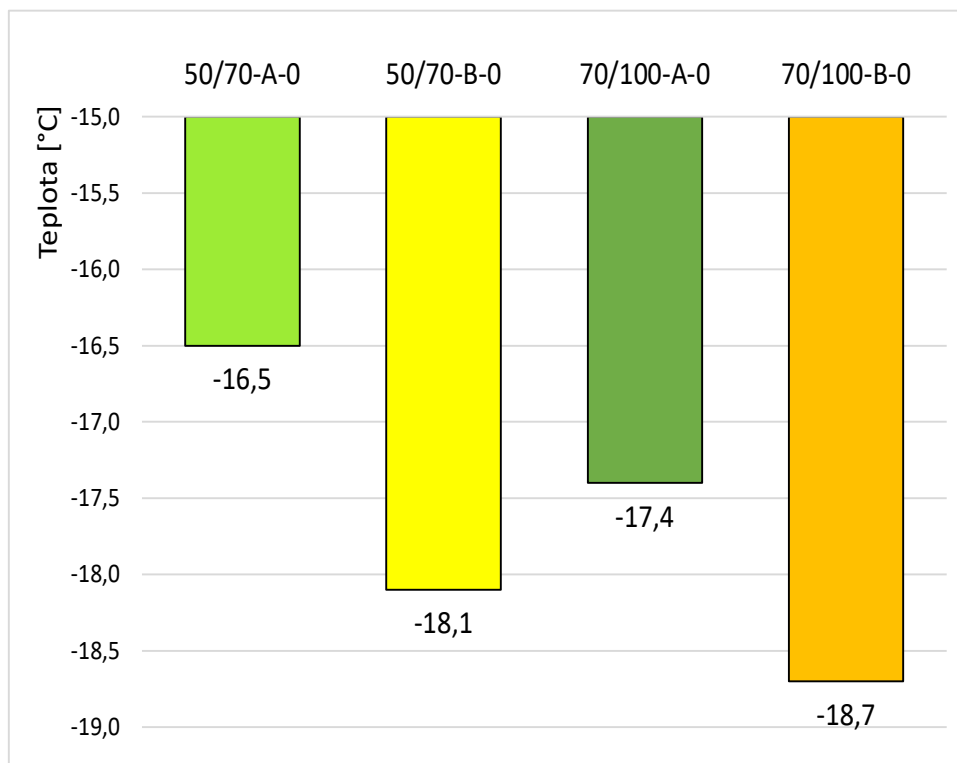
Graf 30: M-hodnoty PmB po RTFOT+PAV

Graf 30 ukazuje jednotlivé m-hodnoty m60 pro modifikované asfalty po RTFOT+PAV a normová hodnota 0,300 [-]. Nejvyšší m-hodnota je 0,315 [-] u modifikovaného asfaltu A 70/100 a nejnižší m-hodnota 0,278 [-] u modifikovaného asfaltu B 50/70 při teplotě - 16 °C.

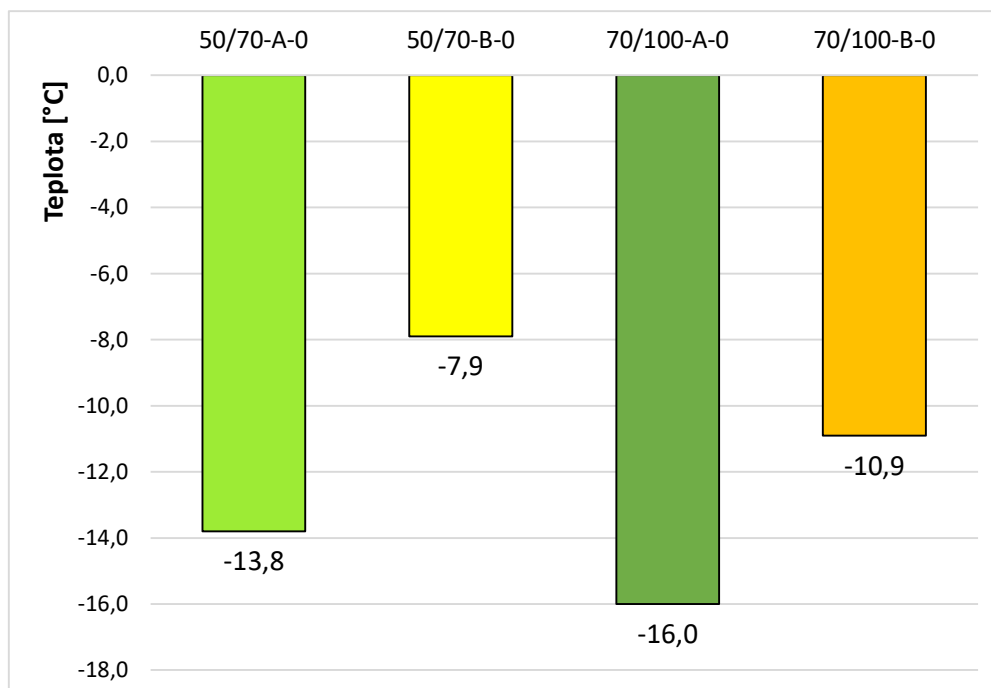
Výsledky měření kritických teplot (S60s, m60s) a rozdíl kritických teplot S60s a m60s, označený jako ΔT_c , jsou vyneseny do tabulky 8.

Označení asfaltu zkráceně	Barva v graf. a tab.	BBR		
		S60s [°C]	m60s [°C]	ΔT_c [°C]
		RTFOT+PAV		
50/70 - A - 0		-16,5	-13,8	-2,7
50/70 - B - 0		-18,1	-7,9	-10,2
70/100 - A - 0		-17,4	-16,0	-1,4
70/100 - B - 0		-18,7	-10,9	-7,8
50/70 - A - 3.5		-17,2	-14,0	-3,2
50/70 - A - 5		-19,0	-14,6	-4,4
50/70 - B - 5		-21,7	-10,3	-11,4
70/100 - A - 5		-20,6	-17,1	-3,5
70/100 - B - 5		-21,9	-14,5	-7,4

Tabulka 8: Výsledky kritických teplot S60s a m60s

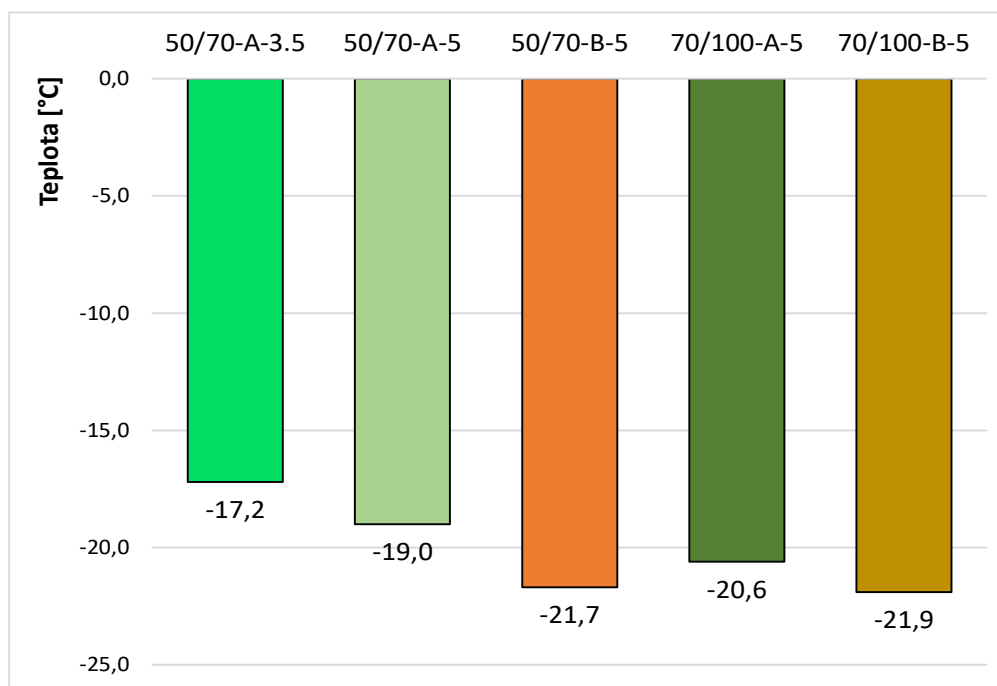


Graf 31: Kritické teploty ze S60s silniční asfalty po RTFOT+PAV

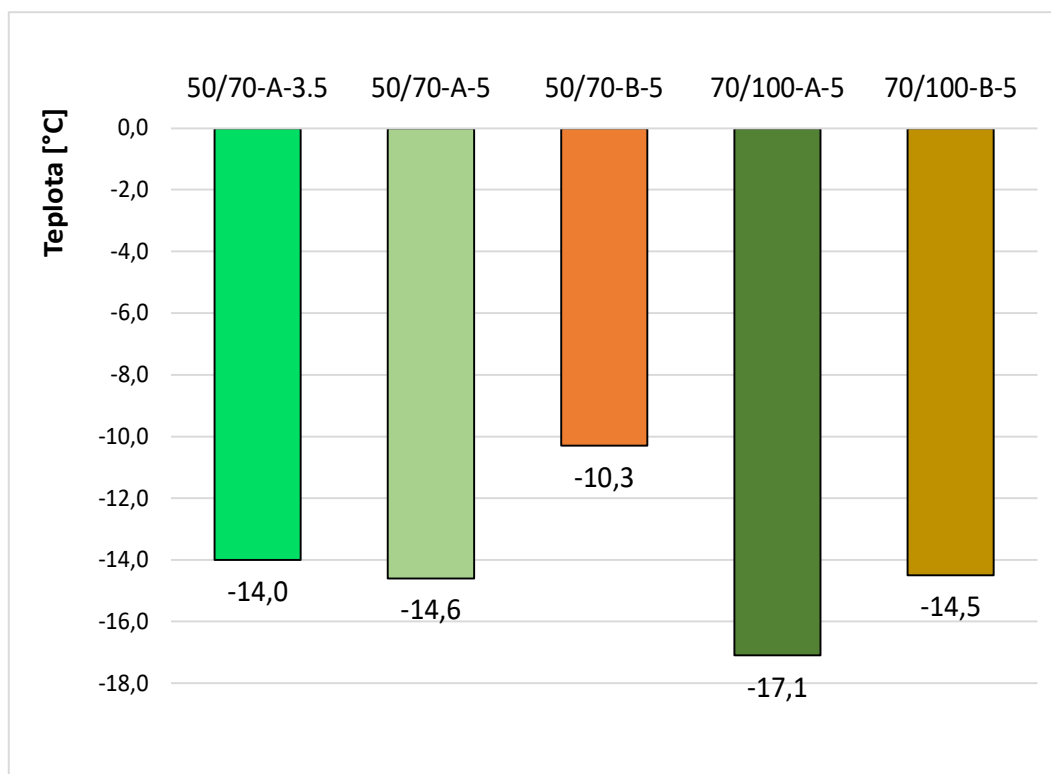


Graf 32: Kritické teploty ze m60s silniční asfaltů po RTFOT+PAV

Grafy 31–32 zobrazují kritické teploty silničních asfaltů po RTFOT+PAV při dosažení S60s = 300 MPa a m60s = 0,3, výsledná kritická teplota je ta, co má vyšší (horší) kritickou teplotu ze S60s nebo m60s. Zajímavé, že výsledná kritická teplota byla vždy z m-hodnoty u silničních asfaltů. Nejnižší (nejlepší) výslednou kritickou teplotu z m-hodnoty dosáhl asfalt A 70/100 m60s = - 16,0 °C. Nejvyšší (nejhorší) výslednou kritickou teplotu má silniční asfalt B 50/70 s m60s = - 7,9 °C.



Graf 33: Kritické teploty ze S60s PmB po RTFOT+PAV

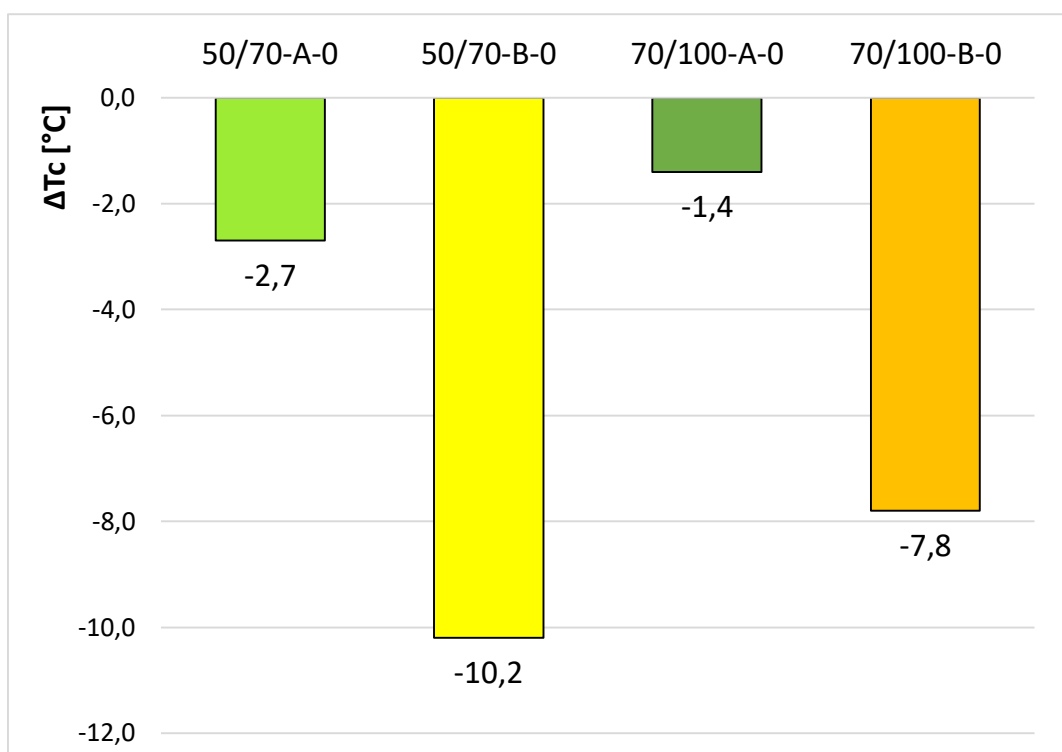


Graf 34: Kritické teploty ze m60s PmB po RTFOT+PAV

Grafy 33-34 zobrazují výsledky kritických teplot modifikovaných asfaltů po RTFOT+PAV při dosažení $S60s = 300$ MPa a $m60s = 0,3$, výsledná teplota je ta, co má vyšší (horší) kritickou teplotu. Po přidání polymeru SBS asfalty podle očekávání více odolávají nízkým teplotám. Zajímavé je, že výsledná kritická teplota byla vždy z m-hodnoty stejně jako u silničních asfaltů. Nejnížší (nejlepší) výslednou kritickou teplotu z m-hodnoty dosáhl modifikovaný asfalt A 70/100 $m60s = -17,1$ °C. Nejvyšší (nejhorší) výslednou kritickou teplotu má modifikovaný asfalt B 50/70 s $m60s = -10,3$ °C.

Pro zjištění chování modifikovaného asfaltu v nízkých teplotách s rozdílným stupněm modifikace polymeru SBS byl vytvořen modifikovaný asfalt A 50/70 s 3,5 % SBS. Pokud budeme srovnávat asfalt A s rozdílným stupněm modifikace (3,5 % SBS vs. 5 % SBS), uvidíme, že se kritické teploty až tak moc neliší. U kritické teploty $S60s$ je rozdíl mezi asfaltem A 3,5 % a 5 % rozdíl o 2 °C u kritických teplot z m-hodnoty je rozdíl ještě menší dokonce jen 0,6 °C. Získané výsledky by bylo vhodné potvrdit na větším souboru asfaltových pojiv, ale z těchto výsledků můžeme usoudit, že rozdíl kritických teplot není až tak razantní, jak by se očekávalo při jinem stupni modifikace.

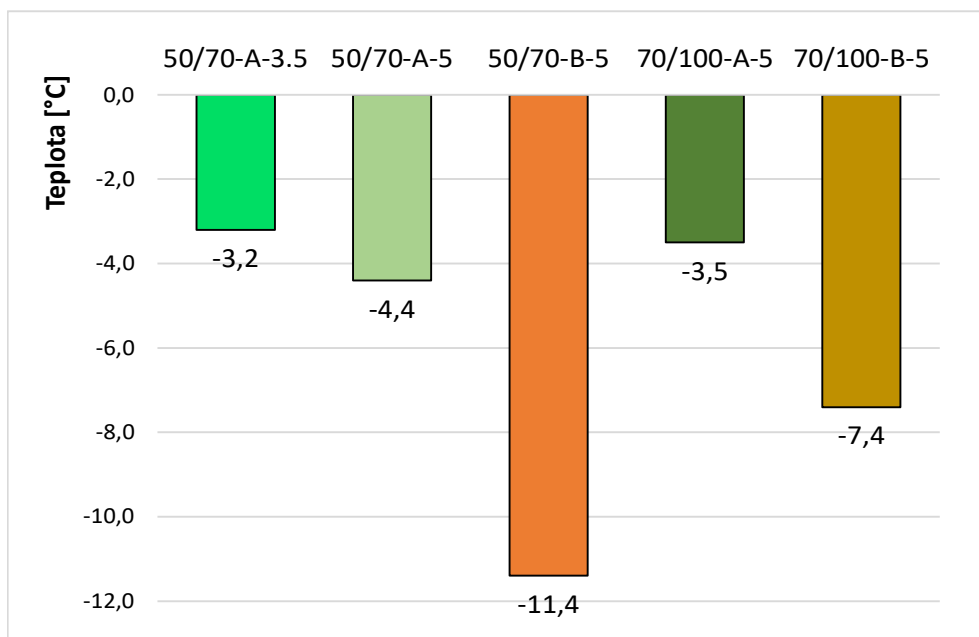
Graf 35 ukazuje kvalitu asfaltu v nízkých teplotách, je to rozdíl kritických teplot S60s a m60s, označený jako ΔT_c . Z grafu je zřejmé, že pojiva 70/100 mají lepší nízkoteplotní vlastnosti než 50/70, protože hodnota parametru ΔT_c je u nich vyšší (bližší hodnotě 0). Dále můžeme vidět, že asfalty B mají až extrémně nejnižší (nejhorší) rozdíl kritických teplot, který nesplňuje požadovaný limit. Požadovaný rozdíl kritických teplot je do $-5,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, což je podrobně uvedeno např. v literatuře [30]. Proto nejhorší rozdíl kritických teplot pro gradaci 50/70 má silniční asfalt B 50/70 s hodnotou $-10,2$ pro gradaci 70/100 je to silniční asfalt B 70/100 s rozdílem $\Delta T_c -7,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nejlepší výsledky dosahoval silniční asfalt A 70/100 s hodnotou $\Delta T_c = -1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Graf 35: ΔT_c silničních asfaltů po RTFOT+PAV

Graf 36 ukazuje hodnoty ΔT_c , což je rozdíl kritických teplot S60s a m60s modifikovaných asfaltů po RTFOT+PAV. Můžeme vidět, že modifikované asfalty kopírují nízkoteplotní vlastnosti silničních asfaltů a asfalty B mají zase až extrémně nejnižší (nejhorší) rozdíl kritických teplot, který nesplňuje požadovaný limit, uvedený v [30]. Nejhorší rozdíl kritických teplot pro gradaci 50/70 má modifikovaný asfalt B 50/70 s hodnotou $-11,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ a pro gradaci 70/100 je to asfalt B 70/100 s rozdílem $\Delta T_c -7,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nejlepší výsledky měl v gradaci 50/70 PmB A s 3,5 % hm. SBS s hodnotou $-3,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ a pro gradaci 70/100 to byl asfalt A s hodnotou $-3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Vyhodnocením parametru ΔT_c je tedy patrné, že silniční asfalty výrobce A dosahují lepšího nízkoteplotního chování, než silniční asfalty výrobce B. Nízkoteplotní vlastnosti vstupních silničních asfaltů silně ovlivňují nízkoteplotní chování z nich vyrobených polymerem modifikovaných asfaltů. Jinak řečeno, pokud se pro výrobu PMB použije silniční asfalt s nevhodnými nízkoteplotními vlastnostmi, vznikne PMB, které bude rovněž vykazovat špatné chování při nízkých teplotách.



Graf 36: ΔT_c modifikovaných asfaltů po RTFOT+PAV

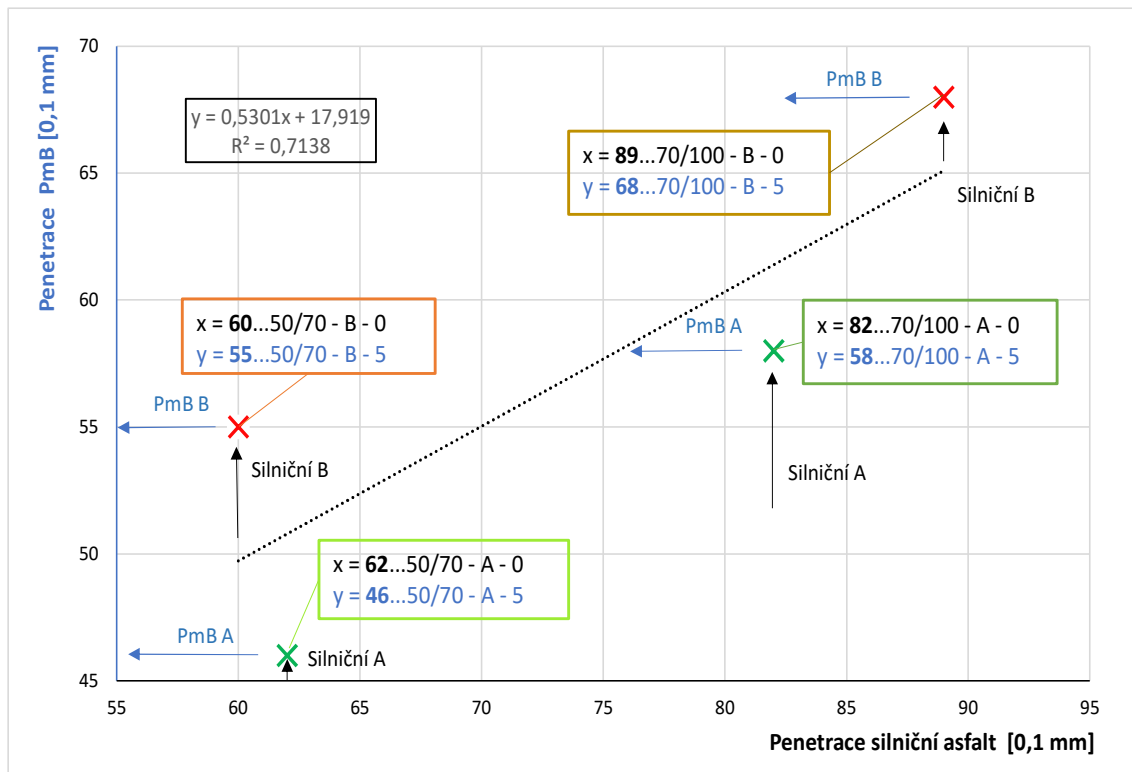
6.6 ZÁVISLOSTI MEZI VÝSLEDKY ZKOUŠEK

V následující kapitole jsou grafickou formou znázorněny závislosti mezi prováděnými zkouškami. Jednotlivé závislosti jsou popsány korelační funkcí s rovnicí křivky y a determinačním součinitelem R^2 . Jestliže determinační součinitel nabývá hodnot

Označení zkráceně	Barva v graf. a tab.	Penetrace jehlou	Označení zkráceně	Barva v graf. a tab.	Penetrace jehlou
		[0,1 mm]			[0,1 mm]
		nezestárlý			nezestárlý
50/70 - A - 0		62	50/70 - A - 5		46
50/70 - B - 0		60	50/70 - B - 5		55
70/100 - A - 0		82	70/100 - A - 5		58
70/100 - B - 0		89	70/100 - B - 5		68

Tabulka 9: Hodnoty penetrace silničních asfaltů a PMB v nezestárlém stavu

blížíci se 1, pak se jedná o silnou závislost. Pokud je naopak jeho hodnota blízká 0, můžeme říct, že mezi proměnnými neexistuje žádná závislost.



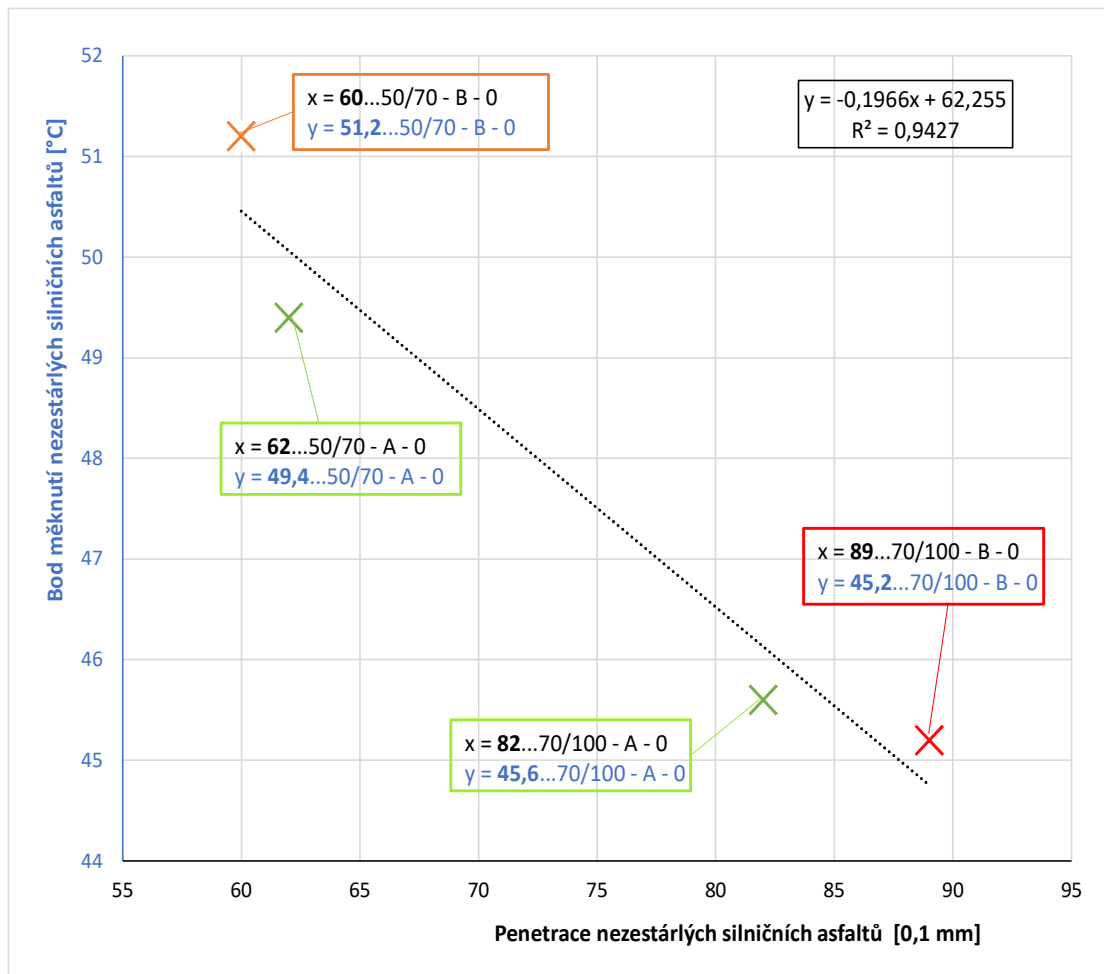
Graf 37: Závislost penetrace nezestárých silničních a modifikovaných asfaltů

Na grafu 37 je vynesena závislost mezi penetrací silničního asfaltu a vždy odpovídajícího modifikovaného asfaltu v nezestárlém stavu. Závislost je vyjádřena spojnicí trendu a koeficient determinace dosahuje hodnoty 0,7138. Můžeme vidět chování

Označení zkráceně	Barva v graf. a tab.	Penetrace jehlou	Bod měknutí
		[0,1 mm]	[°C]
		nezestárlý	nezestárlý
50/70 - A - 0	Light Green	62	49,4
50/70 - B - 0	Yellow	60	51,2
70/100 - A - 0	Dark Green	82	45,6
70/100 - B - 0	Orange	89	45,2
50/70 - A - 5	Light Green	46	68,5
50/70 - B - 5	Orange	55	71,4
70/100 - A - 5	Dark Green	58	67,4
70/100 - B - 5	Brown	68	70,2

Tabulka 10: Hodnoty penetrace a bodu měknutí nezestárlých asfaltů

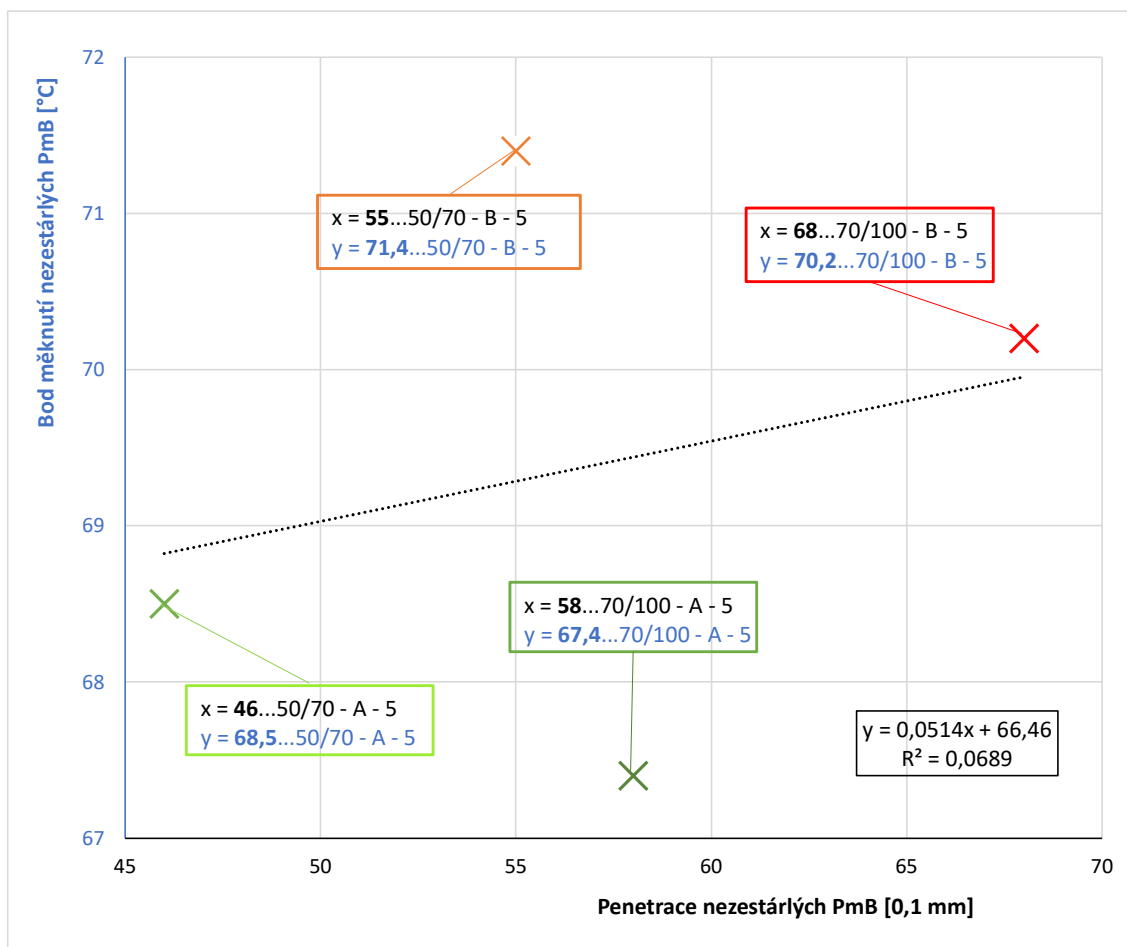
silničního asfaltu po přidání polymeru SBS, že hodnoty penetrace jsou nižší, tak jak se očekávalo.



Graf 38: Závislost mezi penetrací a bodem měknutí nezestárlého silničního asfaltu

Na grafu 38 je vynesena závislost mezi penetrací silničního asfaltu a bodem měknutí v nezestárlém stavu. Závislost je vyjádřena spojnicí trendu a koeficient determinace dosahuje hodnoty 0,9427.

Na grafu 39 je vynesena velmi malá vzájemná závislost mezi penetrací PmB a bodem měknutí PmB v nezestárlém stavu. Závislost je vyjádřena spojnicí trendu a koeficient determinace dosahuje hodnoty 0,0689 a je tedy možné říct, že hodnota bodu měknutí nezávisí u PMB na penetraci.



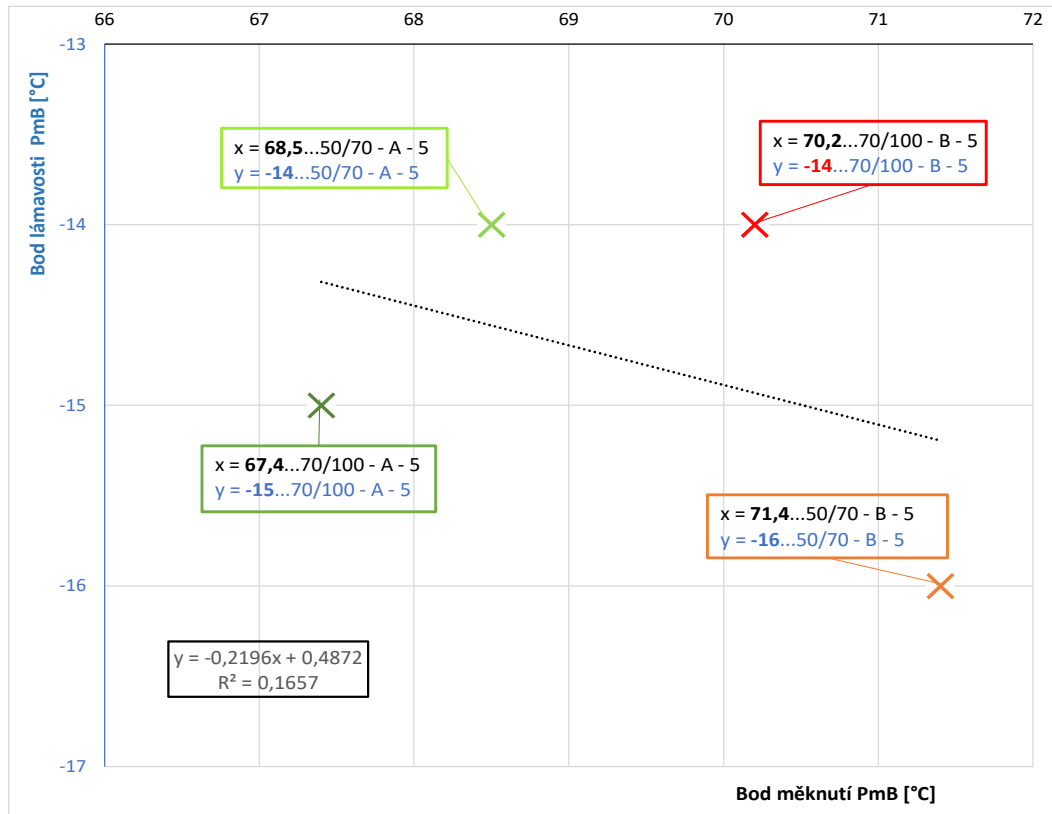
Graf 39: Závislost mezi penetrací a bodem měknutí nezestárého PmB

Označení zkráceně	Barva v graf. a tab.	Bod měknutí [°C]	Bod lámavosti [°C]
50/70 - A - 5	Green	68,5	-14
50/70 - B - 5	Orange	71,4	-16
70/100 - A - 5	Green	67,4	-15
70/100 - B - 5	Yellow	70,2	-14

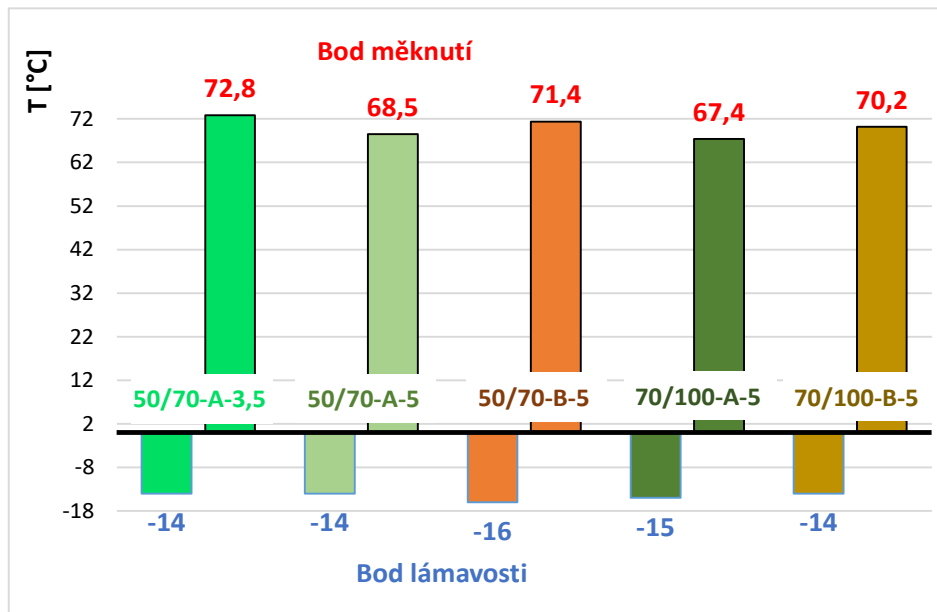
Tabulka 11: Hodnoty bodu měknutí PmB a bodu lámavosti PmB

Na grafu 40 je vynesena závislost mezi bodem měknutí PmB a bodem lámavosti PmB v nezestárém stavu. Závislost je vyjádřena spojnicí trendu s koeficientem determinace 0,1657. Mezi bodem měknutí a bodem lámavosti PmB nebyla nalezena žádná závislost.

Graf 41 ukazuje obor plasticity nezestárých vytvořených modifikovaných asfaltů.



Graf 40: Závislost bodu měknutí a bodu lámavosti nezestárých PmB

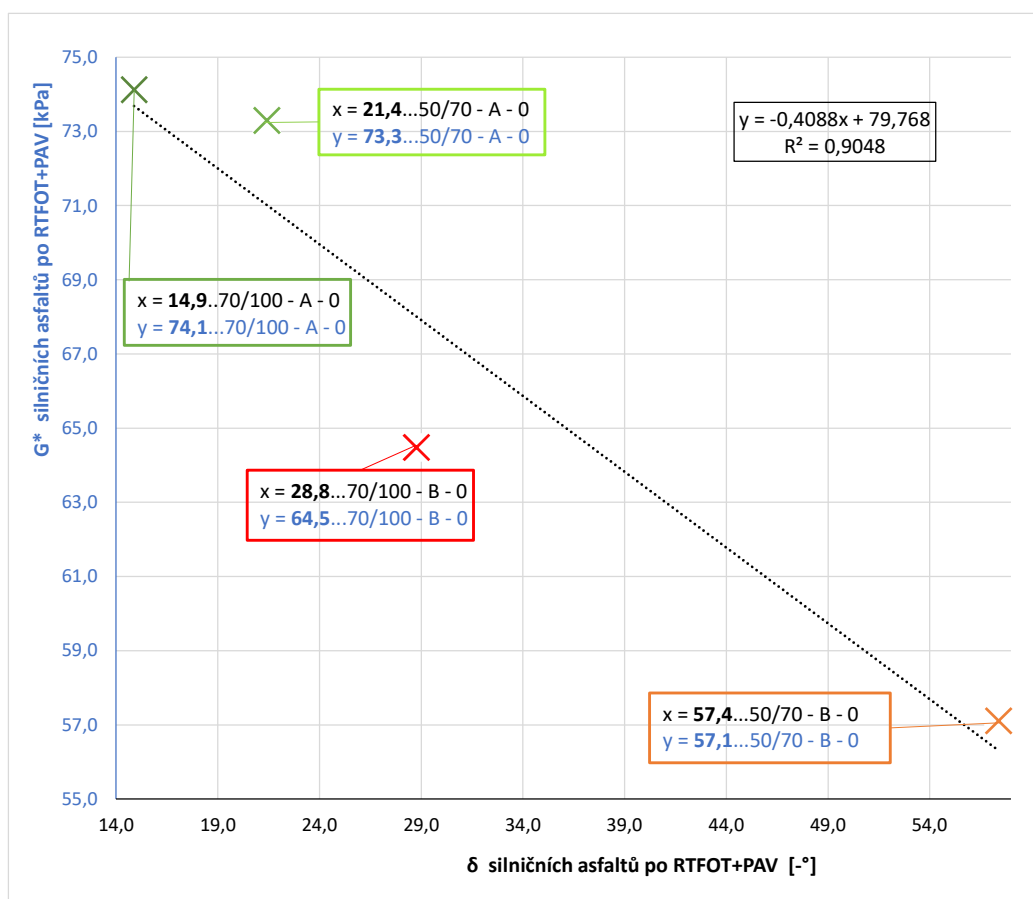


Graf 41: Zobrazení oboru plasticity nezestárých PmB

Označení asfaltu zkráceně	Barva v graf. a tab.	DSR	
		G* [kPa]	δ [-°]
		RTFOT+PAV	
50/70 - A - 0		21,4	73,3
50/70 - B - 0		57,4	57,1
70/100 - A - 0		14,9	74,1
70/100 - B - 0		28,8	64,5
50/70 - A - 5		40,9	53,2
50/70 - B - 5		51,1	45,3
70/100 - A - 5		28,4	54,4
70/100 - B - 5		28,9	50,8

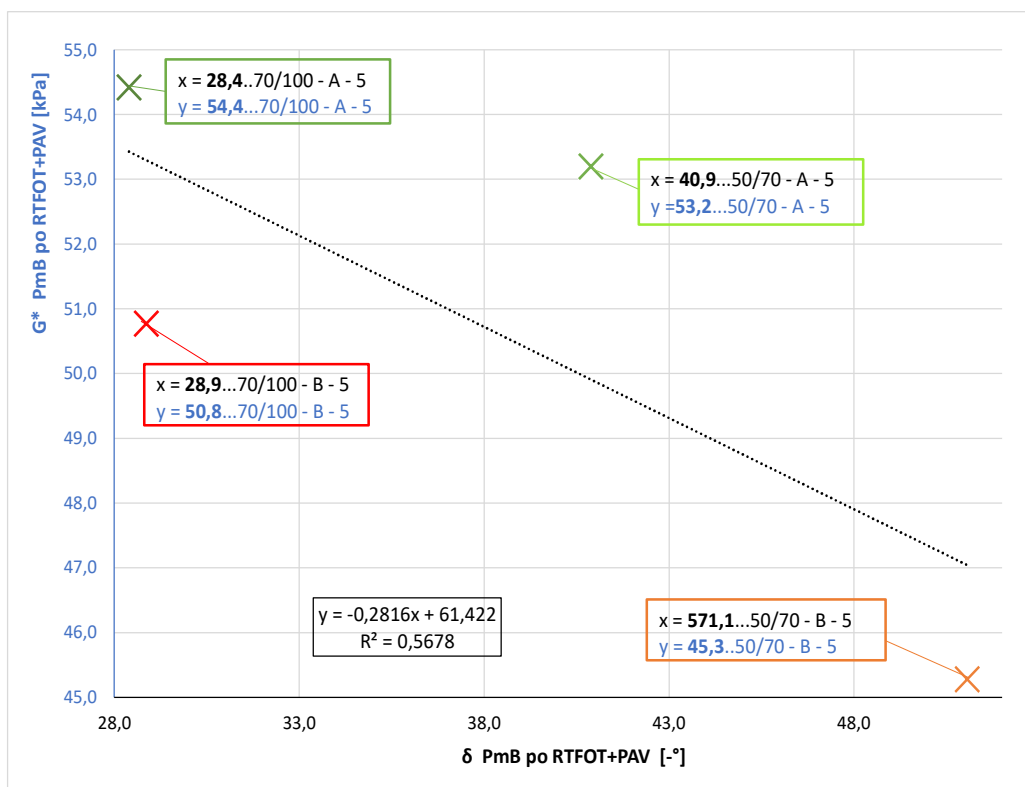
Tabulka 12: Hodnoty G* a δ po RTFOT+PAV

Na grafu 42 je vynesena silná závislost mezi komplexním smykovým modulem a fázovým úhlem silničních asfaltů po RTFOT+PAV. Závislost je vyjádřena spojnící trendu s koeficientem determinace 0,9048.



Graf 42: Závislost mezi G^* a δ silničních asfaltů po RTFOT+PAV

Na grafu 43 je vynesena závislost mezi komplexním smykovým modulem a fázovým úhlem PmB po RTFOT+PAV. Závislost je vyjádřena spojnicí trendu s koeficientem determinace 0,5678 a je tudíž nižší, než v případě nemodifikovaných silničních asfaltů.

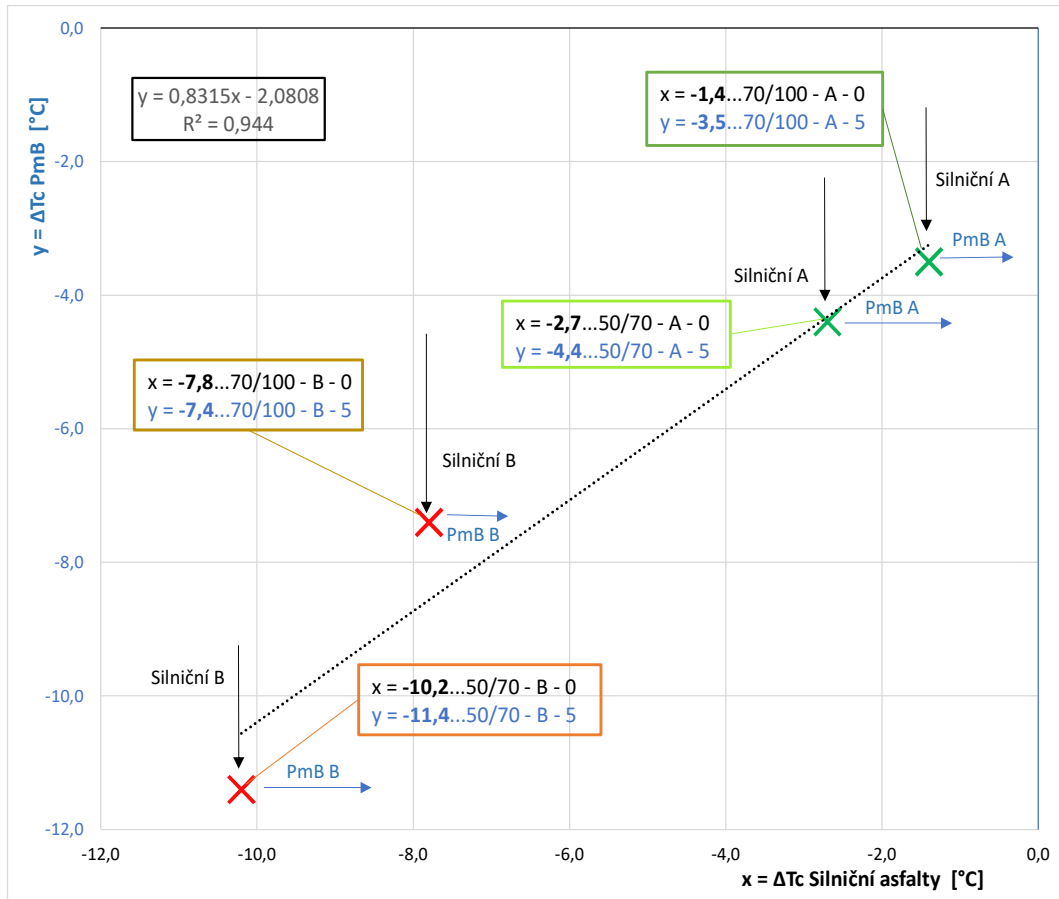


Graf 43: Závislost mezi G^* a δ PmB po RTFOT+PAV

Označení asfaltu zkráceně	Barva v graf. a tab.	BBR		
		S60s [°C]	m60s [°C]	ΔT_c [°C]
RTFOT+PAV				
50/70 - A - 0		-16,5	-13,8	-2,7
50/70 - B - 0		-18,1	-7,9	-10,2
70/100 - A - 0		-17,4	-16,0	-1,4
70/100 - B - 0		-18,7	-10,9	-7,8
50/70 - A - 5		-19,0	-14,6	-4,4
50/70 - B - 5		-21,7	-10,3	-11,4
70/100 - A - 5		-20,6	-17,1	-3,5
70/100 - B - 5		-21,9	-14,5	-7,4

Tabulka 13: Hodnoty ΔT_c silničních asfaltů a PmB po RTFOT+PAV

Pravděpodobně nejzajímavější je závislost, uvedená v grafu 44. Jedná se o závislost ΔT_c silničních asfaltů a PmB po RTFOT+PAV. Závislost je vyjádřena spojnící trendu s koeficientem determinace 0,9440. Tento graf potvrzuje předpoklad, že pokud budeme mít vstupní (silniční) asfalt s nevhodným nízkoteplotním chováním, tak i vyrobený modifikovaný asfalt bude mít nadále nekvalitní nízkoteplotní vlastnosti.



Graf 44: Závislost ΔT_c silničních asfaltů a PmB po RTFOT+PAV

V tabulce 14 a 15 jsou souhrnně vypsány vzájemné závislosti zkoušek vyjádřené koeficientem determinace R^2 . Nejdůležitější a nejsilnější závislostí je mezi ΔT_c silničních asfaltů a PmB po RTFOT+PAV, která nám určuje vliv nízkoteplotních vlastností vstupních asfaltů na nízkoteplotní chování vytvořených PmB. Koeficient determinace se v tomto případě téměř rovná 1,00. V opačném případě korelace mezi penetrací jehlou a bodem měknutí pro modifikované asfalty se koeficient determinace rovná skoro 0,00. To je pravděpodobně způsobeno tím, že se srovnávají vlastnosti modifikovaných pojiv a naopak u silničních asfaltů je závislost velmi vysoká. Závislost mezi bodem měknutí a bodem lámavosti je taktéž nízká, což je zase pravděpodobně způsobeno tím, že se srovnávaly modifikované asfalty.

Z hodnot koeficientů determinace je patrné, že ne všechny zkoušky mají mezi sebou nějakou závislost. Získané výsledky by bylo vhodné potvrdit na větším souboru asfaltových pojiv pro eliminaci případných nepřesností měření a následné potvrzení či vyvrácení vzájemných závislostí výsledků.

		Penetrace jehlou [0,1 mm]		Bod měknutí [°C]		Bod lámavosti [°C]
		Silniční	PmB	Silniční	PmB	PmB
nezestárly						
Penetrace jehlou [0,1 mm]	Silniční	nezestárly	0,7138	0,9427		
	PmB				0,0689	
Bod měknutí [°C]	Silniční					
	PmB					0,1657
Bod lámavosti [°C]	PmB					

Tabulka 14: Výsledky koeficientů determinace pro nezestárly asfalty

		G* [kPa]		δ [-°]		ΔTc [°C]	
		Silniční	PmB	Silniční	PmB	Silniční	PmB
RTFOT+PAV							
G* [kPa]	Silniční	RTFOT+PAV		0,9048			
	PmB				0,5678		
δ [-°]	Silniční						
	PmB						
ΔTc [°C]	Silniční					0,944	
	PmB						

Tabulka 15: Výsledky koeficientů determinace pro asfalty po RTFOT+PAV

7. ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo popsat vliv použitého vstupního silničního asfaltu na vlastnosti vyrobeného polymerem modifikovaného asfaltu. Konkrétně se jednalo o čtyři silniční asfaltová pojiva třídy 50/70 a 70/100. Ze silničních asfaltových poživ bylo v laboratoři vyrobeno pět modifikovaných poživ 25/55–65 a 45/80–65 pomocí stejného druhu polymeru SBS. Na těchto asfaltech byly v laboratoři provedeny zkoušky empirické a zkoušky funkční, mezi které patří penetrace jehlou, bod měknutí, DSR, bod lámavosti a BBR. Souhrn výsledků zkoušek je uveden v tabulce 16.

První zkouškou byla základní empirická zkouška stanovení penetrace jehlou, která byla provedena jen na nezestárých silničních a vytvořených modifikovaných asfaltech. U polymerem modifikovaných asfaltů klesla oproti odpovídajícím vstupním silničním asfaltům hodnota penetrace, což znamená, že vzniklé modifikované pojivo se stalo tvrdším. Z výsledků měření se zjistilo, že asfalt B i po přidání polymeru má vyšší hodnoty penetrace, je měkčí.

Zkouška bodu měknutí byla provedena na nezestárých asfaltech, ale i asfaltech po RTFOT+PAV. Z výsledků bodu měknutí je patrné, že stárnutí má větší vliv na asfalty od výrobce B, jak silniční, tak i asfalty po přidání polymeru SBS.

První funkční zkouškou bylo stanovení komplexního smykového modulu a fázového úhlu pomocí dynamického smykového reometru. Pojiva B měla vyšší komplexní smykový modul a lze je zařadit jako tužší asfalty. Teplotní citlivost poživ, vyjádřená podílem komplexního smykového modulu, určeným při teplotě 40 °C a 70 °C, u asfaltů od výrobce A byla převážně větší než u asfaltů výrobce B. U asfaltů s nižší hodnotou teplotní citlivosti hrozí menší riziko vzniku trhlin při nízkých teplotách a zároveň vzniku deformace při vysokých teplotách.

Asfalt B gradace 70/100 těsně nesplnil požadavek na teplotu bodu lámavosti podle Fraasse, na druhou stranu asfalt B 50/70 dosáhl nejnižší hodnoty bodu lámavosti. Rozdíly mezi výsledky jsou ovšem v rámci chyby metody.

Z poslední funkční zkoušky nízkoteplotních vlastností v BBR byly zjištěny výsledné dolní kritické teploty srovnávaných poživ. Pojiva gradace 70/100 měla podle očekávání lepší nízkoteplotní vlastnosti než asfalty 50/70. Asfalty B měly extrémně velký

(horší) rozdíl kritických teplot ΔT_c , který nespĺňoval požadovaný limit [30], jak pro silniční, tak i vytvořený modifikovaný asfalt.

Co se týče závislosti jednotlivých proměnných, tak nejdůležitější a nejsilnější závislost byla nalezena mezi rozdílem kritických teplot S60s a m60s ΔT_c silničních asfaltů a PmB po RTFOT+PAV. Z toho lze usuzovat, že nízkoteplotní vlastnosti vstupních silničních asfaltů silně ovlivňují nízkoteplotní chování z nich vyrobených polymerem modifikovaných asfaltů. Jinak řečeno, pokud se pro výrobu PmB použije silniční asfalt s nevhodnými nízkoteplotními vlastnostmi, vznikne PmB, které bude rovněž vykazovat špatné chování při nízkých teplotách.

Závěrem lze tedy říct, že asfalty od výrobce B více podléhají stárnutí, což je velká nevýhoda. Dále i po přidání polymeru SBS vykazují vyšší (horší) kritickou teplotu a co je nejdůležitější, mají příliš velký rozdíl kritických teplot získaných z hodnot S60s a m60s (ΔT_c), což znamená, že mají horší chování za nízkých teplot.

Výsledky diplomové práce prokázaly, že na nízkoteplotní chování vyrobeného PmB má zásadní vliv vstupní (silniční) asfalt.

Označení asfaltu zkráceně	Barva v graf. a tab.	Penetrace jehlou [0,1 mm]	Bod měknutí [°C]		Bod lámavosti [°C]	DSR (60 °C; 1,59 Hz)		BBR		
			nezeztárlý	RTFOT+PAV		G* [kPa]	δ [°]	S60s [°C]	m60s [°C]	ΔTc [°C]
50/70 - A - 0		62	49,4	64,3	-	21,4	73,3	-16,5	-13,8	-2,7
50/70 - B - 0		60	51,2	73,8	-	57,4	57,1	-18,1	-7,9	-10,2
70/100 - A - 0		82	45,6	62,6	-	14,9	74,1	-17,4	-16,0	-1,4
70/100 - B - 0		89	45,2	68,7	-	28,8	64,5	-18,7	-10,9	-7,8
50/70 - A - 3.5		45	72,8	79,5	-14	40,7	56,9	-17,2	-14,0	-3,2
50/70 - A - 5		46	68,5	87,3	-14	40,9	53,2	-19,0	-14,6	-4,4
50/70 - B - 5		55	71,4	94,4	-16	51,1	45,3	-21,7	-10,3	-11,4
70/100 - A - 5		58	67,4	79,6	-15	28,4	54,4	-20,6	-17,1	-3,5
70/100 - B - 5		68	70,2	84,5	-14	28,9	50,8	-21,9	-14,5	-7,4

Tabulka 16: Výsledky zkoušených asfaltů

8. CITOVANÁ LITERATURA

- [1] PORTO, Michele, Paolino CAPUTO, Valeria LOISE, Shahin ESKANDARSEFAT, Bagdat TELTAYEV a Cesare ROSSI. *Bitumen and Bitumen Modification: A Review on Latest Advances* [online]. 35 [cit. 2022-08-05]. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2076-3417/9/4/742>
- [2] VARAUS, Michal. *Pozemní komunikace II: Asfaltová pojiva*. Brno, 2005, 17 s.
- [3] HUNTER, Dr, Andy SELF a Professor READ. *The Shell Bitumen Handbook* [online]. 2014, 808 s. [cit. 2022-08-06].
- [4] VŠCHT PRAHA. *www.petroleum.cz* [online]. [cit. 2022-08-07]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/>
- [5] MĚŠŤANOVÁ, Petra. *Vliv skladování polymerem modifikovaných asfaltů na jejich vlastnosti*. Brno, 2019, 55 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.
- [6] ČSN EN 12607-1. *Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu – Část 1: Metoda RTFOT*. ÚNMZ, 2015.
- [7] ČSN EN 14769. *Asfalty a asfaltová pojiva – Urychlené dlouhodobé stárnutí v tlakové nádobě (PAV)*. ÚNMZ, 2012.
- [8] *Statistika dovozu ropy do ČR* [online]. In: . [cit. 2022-09-08]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/energetika/statistika/ropa-ropne-produkty/statistika-dovozu-ropy-do-cr--259953/>
- [9] JUNA, Petr. *Přehledně: Jak je Evropa závislá na ruské ropě* [online]. [cit. 2022-09-08]. Dostupné z: <https://www.seznamzpravy.cz/clanek/fakta-prehledne-jak-je-evropa-zavisla-na-ruske-ropce-201976>
- [10] *ASFALTOVÝ INDEX: Převládající měsíční cena za asfalt* [online]. In: . [cit. 2022-09-08]. Dostupné z: <https://mdasphalt.org/asphalt-index/>

- [11] WALKER, Dwight. *The benefits of modified asphalts* [online]. In: . [cit. 2022-09-09]. Dostupné z: <http://asphaltmagazine.com/the-benefits-of-modified-asphalts/>
- [12] *Polymer Modified Bitumen (PMB)* [online]. In: . [cit. 2022-07-08]. Dostupné z: <https://www.corrosionpedia.com/definition/3215/polymer-modified-bitumen-PmB>
- [13] DOHNÁLEK, Jakub. *Využití rychle reagujícího SBS polymeru při výrobě asfaltových směsí* [online]. Brno, 2022, 95 s. [cit. 2022-09-14]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/141740>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Doc. Ing. PETR HÝZL, Ph.D.
- [14] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery: Rozdělení a charakteristika polymerů* [online]. In: . [cit. 2022-09-11]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/04.html>
- [15] VONK, W.C., R. HARTEMINK a E.J. SCHOLTEN. *Jaké vlastnosti stojí za globálním úspěchem asfaltových modifikátorů* [online]. In AV.05: Konference asfaltové vozovky. 1. vyd. Brno: SILMOS s. r. o., 2005, , 59-64 s. [cit. 2022-09-13]. ISBN 80-903-2791-5.
- [16] *Styrene-Butadiene-Styrene based Thermoplastic Elastomer* [online]. In: . [cit. 2022-09-18]. Dostupné z: <http://www.softergroup.com/en/>
- [17] SCHAUR, Andreas, Seraphin UNTERBERGER a Roman LACKNER. Impact of molecular structure of SBS on thermomechanical properties of polymer modified bitumen. *European Polymer Journal* [online]. [cit. 2022-09-18]. ISSN 0014-3057. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0014305716317505>
- [18] KRINGOS, Niki, Björn BIRGISSON a Jiqing ZHU. *Polymer modification of bitumen: Advances and challenges* [online]. [cit. 2022-09-12]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0014305714000597?via%3Dihub>
- [19] *SILNIČNÍ STAVEBNÍ MATERIÁLY – POLYMERNĚ MODIFIKOVANÝ ASFALT* [online]. In: . [cit. 2022-08-07]. Dostupné z: <https://emulsion.globecore.com/road-construction-materials-polymer-modified-bitumen>

- [20] RYCHLÍKOVÁ, Marie. *Význam polymerů pro výrobu modifikovaných asfaltů*. 2009. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, Ústav inženýrství polymerů. Vedoucí práce Ing. Jana Navrátilová, Ph. D.
- [21] ISLAM, SK, Sumit SINGH, GD R.N. a Sham RAVINDRANATH. Performance Deterioration of SBS-Modified Asphalt Mix: Impact of Elevated Storage Temperature and SBS Concentration of Modified Binder. *Journal of Materials in Civil Engineering* [online]. 2022, **34**(3) [cit. 2022-09-14]. ISSN 0899-1561. Dostupné z: doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004092
- [22] SINGH, Sumit, Yogesh KUMAR a Sham RAVINDRANATH. Thermal degradation of SBS in bitumen during storage: Influence of temperature, SBS concentration, polymer type and base bitumen. *Polymer Degradation and Stability* [online]. 2018, **147** [cit. 2022-09-23]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.polyimdegradstab.2017.11.008>
- [23] Storage stability of SBS/sulfur modified bitumens at high temperature: Influence of bitumen composition and structure. *Construction and Building Materials* [online]. 2014, **52** [cit. 2022-09-25].
- [24] AIREY, Gordon. Rheological properties of styrene butadiene styrene polymer modified road bitumens. *Fuel* [online]. 2003 [cit. 2022-09-21]. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(03\)00146-7](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(03)00146-7)
- [25] ČSN EN 1426. *Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou*. ÚNMZ, 2015.
- [26] ČSN EN 1427. *Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknutí – Metoda Kroužek a kulička*. ÚNMZ, 2015.
- [27] ČSN EN 14770. *Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu – Dynamický smykový reometr (DSR)*. ÚNMZ, 2012.
- [28] ČSN EN 12593. *Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu lámavosti podle Fraasse*. ÚNMZ, 2015.
- [29] ČSN EN 14771. *Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru (BBR)*. ÚNMZ, 2012.

- [30] ASPHALT INSTITUTE TECHNICAL ADVISORY COMMITTEE. *State-of-the-Knowledge: Use of the Delta Tc Parameter to Characterize Asphalt Binder Behavior* [online]. 2019 [cit. 2022-12-28]. ISBN 978-1-934154-77-9. Dostupné z: asphaltinstitute.org
- [31] Výskyt a získávání alkanů. In: *Eluc.ikap.cz* [online]. [cit. 2022-07-30]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/2384?PageSpeed=noscript>
- [32] *Polymerem modifikovaný asfalt pro silniční stavitelství: Řešení pro extrémně namáhané dopravní plochy* [online]. TOTAL Česká republika s.r.o. [cit. 2022-08-28]. Dostupné z: https://totalenergies.cz/sites/g/files/wompnd546/f/atoms/files/styrelf_brozura_0.pdf
- [33] HÝZL, Petr. *Technologie stavby vozovek Poruchy a opravy vozovek (SENS 11): Poruchy vozovek a jejich příčiny* [online]. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební [cit. 2022-09-16].
- [34] *Styrene-Butadiene-Styrene (SBS) Block Copolymer* [online]. In: . [cit. 2022-09-12]. Dostupné z: <https://avocadoengineering.wordpress.com/styrene-butadiene-styrene-sbs-block-copolymer/>
- [35] HOLÝ, Michal a Eva REMIŠOVÁ. Characterization of Bitumen Binders on the Basis of Their Thermo-Viscous Properties. *Slovak Journal of Civil Engineering* [online]. 2019, **27**(1), 25-31 [cit. 2022-09-18]. ISSN 1338-3973. Dostupné z: doi:10.2478/sjce-2019-0004
- [36] PĚNČÍK, Michal. *Reologické vlastnosti asfaltových pojiv*. 2015. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Petr Hýzl, Ph.D.
- [37] DOSTÁL, Filip. *Vliv druhu a dávky polymeru na vlastnosti modifikovaných pojiv*. Brno, 2020, 162 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Doc. Ing. Petr Hýzl, Ph.D.

9. SEZNAMY

9.1 SEZNAM OBRAZKŮ

Obrázek 1: Schéma koloidní struktury asfaltového pojiva [35].....	11
Obrázek 2: Asfalt – visko-elastický materiál [2].....	12
Obrázek 3: Grafické znázornění frakční destilace [31]	12
Obrázek 4: Základní dělení asfaltů.....	13
Obrázek 5: Spotřeba ropy a ropných produktů v ČR [9].....	14
Obrázek 6: Dovoz ropy do ČR v 2021 [9]	14
Obrázek 7: Vývoj ceny asfaltu a ropy [10]	15
Obrázek 8: (a) vyjeté koleje, (b) mrazové trhliny [33]	16
Obrázek 9: Rozdělení polymerů [14]	17
Obrázek 10: Chování polymerů při mechanickém namáhání: plast (vlevo), elastomer (vpravo) [14]	17
Obrázek 11: Lineární molekuly SBS s vysokým obsahem butadienu (a), s vysokým obsahem styrenu (b) a radiální molekuly SBS (c) [17].....	18
Obrázek 12: SBS bez průběžné PS sítě (a), s průběžnou PS sítí (b) a SBS tvořící síť v asfaltovém pojivu (c) [17]	19
Obrázek 13: SBS jako granule nebo vlákna [34]	19
Obrázek 14: Vysokorychlostní míchací zařízení a konvenční míchací zařízení [21]	20
Obrázek 15: Bod měknutí pro různé skladovací teploty a různý obsah SBS [22].....	21
Obrázek 16: Bod měknutí vs. obsah SBS v asfaltovém pojivu [22].....	22
Obrázek 17: (a) Kompatibilní systém se 4 % SBS a (b) nekompatibilní systém se 4 % obsahu SBS [1]	23
Obrázek 18: Ukázka penetrometru.....	25
Obrázek 19: Temperování zkušebních kelímků s pojivem.....	26
Obrázek 20: Měření penetrace jehlou.....	27
Obrázek 21: Kroužky se zahřátým pojivem na odlévací destičce	28
Obrázek 22: Měření KK ve a) glycerinové nebo b) vodní lázni	29
Obrázek 23: Umístění vzorku do reometru	30
Obrázek 24: Princip DSR [36]	31
Obrázek 25: Složky komplexního modulu [36]	31

Obrázek 26: Dynamický smykový reometr Kinexus.....	32
Obrázek 27: Suchý led.....	33
Obrázek 28: Příklad pro stanovení bodu lámavost podle Fraasse.....	33
Obrázek 29: Porušení vzorku	34
Obrázek 30: Skleněné nádoby s asfaltovým pojivem	35
Obrázek 31: Držák s miskami	36
Obrázek 32: Miska s nalitým pojivem.....	37
Obrázek 33: Schématický nákres zařízení BBR [32].....	38
Obrázek 34: Asfaltové pojivo ve formě pro měření BBR	39
Obrázek 35: Průhybový trámečkový reometr (BBR).....	40
Obrázek 36: Způsob odvození m hodnoty [37]	40

9.2 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Zkoušená asfaltová pojiva v rámci diplomové práce	41
Tabulka 2: Výsledky penetrace jehlou	42
Tabulka 3: Výsledky bodu měknutí.....	44
Tabulka 4: Výsledky komplexního smykového modulu a fázového úhlu, teplota 60 °C, f = 1,59 Hz	49
Tabulka 5: Teplotní citlivost $G^*(40) / G^*(70)$	52
Tabulka 6: Výsledky bodu lámavosti podle Fraasse	60
Tabulka 7: Výsledky modulu tuhosti a m-hodnoty (-16 °C).....	63
Tabulka 8: Výsledky kritických teplot S60s a m60s.....	67
Tabulka 9: Hodnoty penetrace silničních asfaltů a PmB v nezestárlém stavu	71
Tabulka 10: Hodnoty penetrace a bodu měknutí nezestárlých asfaltů.....	72
Tabulka 11: Hodnoty bodu měknutí PmB a bodu lámavosti PmB.....	74
Tabulka 12: Hodnoty G^* a δ po RTFOT+PAV	76
Tabulka 13: Hodnoty ΔT_c silničních asfaltů a PmB po RTFOT+PAV	77
Tabulka 14: Výsledky koeficientů determinace pro nezestárlý asfalt	79
Tabulka 15: Výsledky koeficientů determinace pro asfalt po RTFOT+PAV.....	79
Tabulka 16: Výsledky zkoušených asfaltů	82

9.3 SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Srovnání výsledků penetrace jehlou nezestárých silničních asfaltů.....	43
Graf 2: Srovnání výsledků penetrace jehlou nezestárých PmB	43
Graf 3: Bod měknutí nezestárých silničních asfaltů.....	45
Graf 4: Bod měknutí po RTFOT+PAV silničních (vstupních) asfaltů.....	45
Graf 5: Změna bodu měknutí silničních (vstupních) asfaltů.....	46
Graf 6: Bod měknutí nezestárlá PmB.....	46
Graf 7: Bod měknutí po RTFOT+PAV PmB	47
Graf 8: Změna bodu měknutí po RTFOT+PAV PmB	48
Graf 9: Komplexní smykový modul silničního (vstupního) asfaltu po RTFOT+PAV, teplota 60 °C, f=1,59 Hz.....	49
Graf 10: Komplexní smykový modul PmB po RTFOT+PAV, teplota 60 °C, f=1,59 Hz	50
Graf 11:Fázový úhel silničního (vstupního) asfaltu po RTFOT+PAV, teplota 60 °C, f=1,59 Hz	51
Graf 12: Fázový úhel PmB po RTFOT+PAV, teplota 60 °C, f=1,59 Hz.....	52
Graf 13: Teplotní citlivost silničního asfaltu po RTFOT+PAV, f=1,59 Hz	53
Graf 14: Teplotní citlivost PmB po RTFOT+PAV, f=1,59 Hz.....	53
Graf 15: Blackův diagram všech asfaltů po RTFOT+PAV.....	54
Graf 16: Blackův diagram všech silničních asfaltů po RTFOT+PAV	55
Graf 17: Blackův diagram všech PmB po RTFOT+PAV	56
Graf 18: Blackův diagram asfalt 50/70 A po RTFOT+PAV	57
Graf 19: Blackův diagram asfalt 50/70 B po RTFOT+PAV	58
Graf 20: Blackův diagram asfalt 70/100 A po RTFOT+PAV	59
Graf 21: Blackův diagram asfalt 70/100 B po RTFOT+PAV	59
Graf 22: Teplota lámavosti Fraasse PmB po RTFOT+PAV	60
Graf 23: Modul tuhosti za ohybu silničních asfaltů po RTFOT+PAV	61
Graf 24: Modul tuhosti za ohybu PmB po RTFOT+PAV	62
Graf 25: M-hodnota silničních asfaltů po RTFOT+PAV	62
Graf 26: M-hodnota PmB po RTFOT+PAV	63
Graf 27: Modul tuhosti silničních asfaltů po RTFOT+PAV	64
Graf 28: Modul tuhosti PmB po RTFOT+PAV	65
Graf 29: M-hodnoty silničních asfaltů po RTFOT+PAV	66

Graf 30: M-hodnoty PmB po RTFOT+PAV.....	66
Graf 31: Kritické teploty ze S60s silniční asfaltů po RTFOT+PAV	67
Graf 32: Kritické teploty ze m60s silniční asfaltů po RTFOT+PAV.....	68
Graf 33: Kritické teploty ze S60s PmB po RTFOT+PAV	68
Graf 34: Kritické teploty ze m60s PmB po RTFOT+PAV	69
Graf 35: ΔT_c silničních asfaltů po RTFOT+PAV.....	70
Graf 36: ΔT_c modifikovaných asfaltů po RTFOT+PAV.....	71
Graf 37: Závislost penetrace nezestárých silničních a modifikovaných asfaltů	72
Graf 38: Závislost mezi penetrací a bodem měknutí nezestárlého silničního asfaltu	73
Graf 39: Závislost mezi penetrací a bodem měknutí nezestárlého PmB.....	74
Graf 40: Závislost bodu měknutí a bodu lámavosti nezestárých PmB	75
Graf 41: Zobrazení oboru plasticity nezestárých PmB.....	75
Graf 42: Závislost mezi G^* a δ silničních asfaltů po RTFOT+PAV.....	76
Graf 43: Závislost mezi G^* a δ PmB po RTFOT+PAV	77
Graf 44: Závislost ΔT_c silničních asfaltů a PmB po RTFOT+PAV.....	78