



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

**VLASTNOSTI NÍZKOTEPLTNÍCH POLYMEREM
MODIFIKOVANÝCH ASFALTŮ**

PROPERTIES OF POLYMER MODIFIED BITUMEN FOR WARM MIX ASPHALT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ivo Zábranský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ONDŘEJ DAŠEK, Ph.D.

BRNO 2019



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T009 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav pozemních komunikací

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Ivo Zábranský
Název	Vlastnosti nízkoteplotních polymerem modifikovaných asfaltů
Vedoucí práce	Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2018
Datum odevzdání	11. 1. 2019

V Brně dne 31. 3. 2018

doc. Dr. Ing. Michal Varaus
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Předané vzorky asfaltových pojiv

Návrh normy ČSN 65 7222-3

Zkušební normy pro asfaltová pojiva

Literatura z internetu

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

V nedávné době byl připraven návrh normy, specifikující požadavky na nízkoteplotní polymerem modifikované asfalty (ČSN 65 7222-3). V rámci diplomové práce budou ověřeny některé vlastnosti vybraných vzorků nízkoteplotních polymerem modifikovaných asfaltů, které jsou požadovány normou ČSN 65 7222-3.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.

Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá vlastnostmi nízkoteplotních polymerem modifikovaných asfaltů. Teoretická část práce popisuje přísady, které ovlivňují vlastnosti asfaltů pro jejich širší využití a snížení výrobních a pracovních teplot. Dále teoretická část popisuje závěry z výzkumů, které se tímto tématem již zabývaly. V této části jsou také popsány empirické a funkční zkoušky asfaltových pojiv, jimiž byly asfalty zkoušeny. V praktické části jsou uvedeny výsledky z jednotlivých provedených zkoušek. Zkoušky byly provedeny na asfaltech nezestárých, zestárých metodou stárnutí RTFOT a také zestárých metodou stárnutí RTFOT+PAV. V závěru práce jsou shrnuty výsledky práce a zhodnocení vhodností asfaltových pojiv.

KLÍČOVÁ SLOVA

Nízkoteplotní polymerem modifikovaný asfalt, vosk, stárnutí, dynamický smykový reometr, komplexní smykový modul, fázový úhel, teplota přechodu fáze

ABSTRACT

The Diploma thesis is focus on polymer modified bitumen for warm mix asphalt. The theoretical part of the thesis describes additives which influence the properties of bitumen for their use and reduction of production and service temperatures. Further, the theoretical part describes the conclusions from the researches. This part also describes empirical and functional tests of bituminous binders. The practical part presents the results of individual tests. Tests were performed on samples of non-aged, aged by RTFOT and RTFOT + PAV methods. The results of the work and the assessment of the suitability of bituminous binders are summarized at the end of the thesis.

KEYWORDS

Polymer modified bitumen for warm mix asphalt, wax, ageing, dynamic shear rheometer, complex shear modulus, phase angle, phase transition temperature

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Ivo Zábranský *Vlastnosti nízkoteplotních polymerem modifikovaných asfaltů*. Brno, 2018. 154 s., 9 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Vlastnosti nízkoteplotních polymerem modifikovaných asfaltů* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 11. 1. 2019

Bc. Ivo Zábranský
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval hlavně vedoucímu diplomové práce Ing. Ondřejovi Daškovi, Ph.D. za věnovaný čas a cenné rady během vypracování této diplomové práce a také pracovníkům silniční laboratoře Ústavu pozemních komunikací Pavlu Strakovi a Ing. Pavlu Coufalíkovi, Ph.D. a také Ing. Pavlu Šperkovi z výzkumného centra AdMaS VUT FAST Brno za pomoc a ochotu při práci v laboratoři.

Obsah

1	Úvod	11
2	Rešerše literatury	12
2.1	Aditiva pro snižování viskozity asfaltu	12
2.1.1	Montánní vosky	12
2.1.2	Fischer – Tropschovy parafíny (FTP)	12
2.1.3	Amidy mastných kyselin	13
2.1.4	Zeolity	14
2.2	Aplikace přísad snižujících viskozitu asfaltových pojiv	14
2.3	Asfaltová pojiva	15
2.4	Poznatky užití vosků v asfaltech z ČR a ze Světa	15
2.4.1	Laboratorní studie na použití vosků ke snížení pokládkových teplot [2]	16
2.4.2	Reologické účinky vosků v asfaltech [3]	23
2.4.3	Vliv vosků na polymerem modifikované provedení asfaltového koberce mastixového [4]	26
2.4.4	Vliv vybraných aditiv nízkoteplotních asfaltových směsí (WMA) na běžné polymerem modifikované asfalty (PMB) použité pro asfaltový koberec mastixový (SMA) [5]	32
2.4.5	Experimentální ověřování vybraného souboru nízkoviskózních přísad pro nízkoteplotní asfaltové směsi. [6]	47
2.5	Shrnutí poznatků z rešerší	49
3	Cíle diplomové práce	50
4	Použité metody	51
4.1	Stanovení penetrace jehlou podle ČSN EN 1426	51
4.2	Stanovení bodu měknutí dle ČSN EN 1427 – Metoda kroužek a kulička	52
4.3	Stanovení bodu lámavosti podle Fraasse dle ČSN EN 12593	53
4.4	Stanovení vratné duktility modifikovaných asfaltů dle ČSN EN 13398	54
4.5	Stanovení tažných vlastností modifikovaných asfaltů metodou silové duktility dle ČSN EN 13589	56
4.6	Stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu – Metoda RTFOT dle ČSN EN 12607-1	57

4.7	Urychlené dlouhodobé stárnutí v tlakové nádobě PAV dle ČSN EN 14769.....	58
4.8	Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu dle ČSN EN 14770.....	59
4.9	Stanovení komplexního modulu ve smyku dle ČSN 65 7222-3 příloha A	61
4.10	Stanovení komplexního modulu ve smyku dle AL BTSV (DSR)	61
4.11	Stanovení teploty přechodu fáze T_{PF} dle ČSN 65 7222-3 příloha B	62
4.12	Stanovení dynamické viskozity dle ČSN EN 13702	62
4.13	Zkouška MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery Test) dle ČSN EN 16659.....	63
4.14	Stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru dle ČSN EN 14771	65
5	Použité materiály.....	67
6	Výsledky zkoušek.....	67
6.1	Penetrace jehlou	68
6.2	Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička	70
6.3	Stanovení bodu lámavosti podle Frasse.....	71
6.4	Stanovení vratné duktility modifikovaných asfaltů.....	72
6.5	Stanovení tažných vlastností modifikovaných asfaltů metodou silové duktility	73
6.6	Komplexní smykový modul a fázový úhel dle ČSN EN 14770.....	75
6.7	Měření komplexního modulu ve smyku dle ČSN 65 7222-3 (Příloha A)	87
6.8	Stanovení komplexního modulu ve smyku dle AL BTSV (DSR).....	90
6.9	Porovnání komplexních smykových modulů G^*	93
6.10	Teplota přechodu fáze podle Přílohy B normy ČSN 65 7222-3...	107
6.11	Dynamická viskozita	110
6.12	Zkouška MSCR.....	113
6.13	Stanovení modulu tuhosti za ohybu.....	119
6.14	Závěr	128
7	Zdroje	131
8	Seznam obrázků	137

9	Seznam tabulek	139
10	Seznam rovnic.....	140
11	Seznam grafů	141
12	Seznam použitých zkratk a symbolů	144
13	Seznam příloh	145
14	Přílohy.....	146

1 Úvod

Na použití nízkoteplotních polymerem modifikovaných asfaltů je v současné době zvýšený zájem z hlediska technologického, ekonomického a ekologického. [1, 25, 29, 35, 45]

Z technologického hlediska se jedná hlavně o snížení výrobních teplot, pracovních teplot a o rozšíření teplotního intervalu pokládání a hutnění asfaltových směsí. [1, 23, 24, 27]

Nízkoteplotní asfaltová pojiva z hlediska ekonomického mají výhodu oproti běžným silničním asfaltům v teplotě ohřevu, která je až o 30 °C nižší. Tato výhoda se projevuje v energetické úspoře obaloven při ohřevu pojiv i kameniva. [1, 23, 24, 25, 29]

Z hlediska ekologického je snížení teploty ohřevu na obalovně zásadní faktor, jelikož s klesající teplotou ohřevu klesá množství produkovaní CO₂ do ovzduší s následnou tvorbou skleníkových plynů. Dalším pozitivním ekologickým faktorem a zároveň i zdravotním faktorem je snížení množství výparů při pokládce hutněných asfaltových směsí i litých asfaltů, které mají negativní účinky na zdraví pracovníků jak je vidět na obrázku 2. [1, 24, 29, 45]



Obrázek 1: Obalovna produkující emise CO₂ [39]



Obrázek 2: Výpary při pokládce asfaltové směsi [40]

2 Rešerše literatury

V této kapitole je stručně shrnut současný stav dané problematiky, přičemž bylo čerpáno zejména z odborné literatury na internetu.

2.1 Aditiva pro snižování viskozity asfaltu

V následujícím textu jsou vyjmenovány nejčastěji používané přísady, využívané pro snižování viskozity asfaltových pojiv.

2.1.1 Montánní vosky

Montánní vosky se získávají zpracováním hnědého uhlí. Jsou složeny ze sloučenin derivátů mastných organických kyselin s dlouhými uhlovodíkovými řetězci a parafíny alkoholů. Vyznačují se vysokou teplotní stabilitou, homogenitou a minimálním úbytkem hmotnosti v důsledku teplotního namáhání. Tání těchto vosků se pohybuje v intervalu 110 až 140 °C. Vosky jsou tvrdé a mají dlouhou životnost.

Využívají se v oblasti litých asfaltů, jelikož při teplotě pod 130 °C klesá jejich zpracovatelnost. Dávkují se v množství do 4 % hmotnosti asfaltového pojiva. Zástupci těchto vosků jsou například vosky Asphaltan a Romonta. [1, 20, 23, 35, 45]

2.1.2 Fischer – Tropschovy parafíny (FTP)

Fischer – Tropschovy parafíny se vyrábí syntézou při katalyckém

vysokotlakém procesu z plynu syntézního. FT parafíny jsou alifatické uhlovodíky. Délky molekul řetězců FT jsou různé u přírodních vosků a u vosků v asfaltovém pojivu.

Při teplotě 115 °C už jsou FT parafíny plně rozpustné v asfaltu a při jejich míchání se vytváří homogenní látka snižující viskozitu asfaltového pojiva v tekutém stavu.

Krystalizace FT parafínů nastává při ochlazování, kde má tento jev za následek zvýšení odolnosti proti deformacím u asfaltové směsi. Použitím těchto vosků do asfaltového pojiva zůstává vzniklý produkt homogenní a stabilní. Do této skupiny patří například vosky Sasobit a vosky DEUREX. [1, 20,23, 27, 29, 35, 41, 45]



Obrázek 3: Pelety Sasobitu [42]

2.1.3 Amidy mastných kyselin

Amidy mastné kyseliny vznikají syntézou, stejně jako Fischer-Tropschovy parafíny. Amidy mají podobné vlastnosti jako FT parafíny. Amidy bývají v podobě granulí nebo prášku rozpustné při teplotě 140 °C a při míchání v asfaltovém pojivu vzniká při této teplotě homogenní zlepšené pojivo. Amidový vosk se dávkuje přímo na obalovně. Přidáním dochází ke zvýšení odolnosti proti tvorbě trvalých deformací a zlepšuje se přilnavost pojiva ke kamenivu. Zástupcem této skupiny je přísada Licomont, která se dávkuje v množství 3 % z hmotnosti asfaltového pojiva. Jiným zástupcem je vosk DEUREX. [1,20,21,22,23, 25, 35, 43]



Obrázek 4: Licomont ve formě prášku [57]

2.1.4 Zeolity

Zeolit je minerální látka, která se aplikuje během výroby do asfaltové směsi jako náhražka za filer. Tato látka obsahuje chemicky nebo fyzikálně vázanou vodu, která se při zahřátí na teplotu mezi 70 až 220 °C začne z vnitřní struktury zeolitu uvolňovat a způsobovat napětí asfaltu. [1]

Zeolity při zahřívání nemění svoji krystalickou strukturu a uvolňují ze sebe krystalovou vodu. Namísto krystalové vody přijímají jiné sloučeniny a působí jako zdroje obměňující strukturu iontů. [1]



Obrázek 5: Zeolit ve formě prášku [44]

2.2 Aplikace přísad snižujících viskozitu asfaltových pojiv

Pro aplikaci přísad snižujících viskozitu pojiv existují tři způsoby: [1]

- Nízkoviskózní asfaltové pojivo obsahující organickou přísadu, které bylo průmyslově vyrobeno [1, 24]
- Aplikace syntetických vosků snižujících viskozitu při výrobě směsi [1, 24]
- Aplikace zeolitů snižujících viskozitu při výrobě směsi [1]

Do celkového návrhu asfaltové směsi je nutno započítat i použité organické přísady vztažené k obsahu pojiva a také množství minerálních přísad připočtených k množství fileru. [1]

Do asfaltového pojiva či asfaltové směsi se organické přísady aplikují

v závěrečném pracovním kroku. [1]

Zahrnutí nízkoteplotních přísad do asfaltových pojiv nebo směsí musí zaručit jejich homogenní rozptýlení v pojivu nebo směsi. Převažující způsob, zaručující homogenitu směsi nebo pojiva, je prodloužení doby míchání. [1]

Přísady, aplikující se do asfaltového pojiva nebo asfaltové směsi, se nejčastěji doporučují dávkovat v množství 2 % až 3 % hmotnosti asfaltového pojiva. [1]

Vybrané specifikace pro používané organické přísady jsou uvedeny v tabulce 1, která byla převzata ze zdroje [1].

Tabulka 1: Technické charakteristiky organických přísad a jejich účinek na asfalt 50/70 [1]

Přísada	Jednotka	Amidy mastných kyselin	Fischer-Tropschův parafin	Montánní vosky (+ deriváty)
Vlastnost				
Vlastnosti přísad (údaje výrobce)				
Vzhled	---	bílý prášek nebo granulát	bílý prášek, granulát nebo tekutina	šedý prášek nebo pastilky
Bod tání/ skápnutí	(°C)	140 až 145	114 až 120	110 až 120
Bod tuhnutí	(°C)	135 až 142	100 až 105	95 až 105
Dynamická viskozita	mPa.s @130°C	neměřitelný	11 až 15	20 až 80
	mPa.s @140°C	13 až 17	9 až 13	15 až 40
	mPa.s @150°C	9 až 13	8 až 12	10 až 20

2.3 Asfaltová pojiva

Pro výrobu nízkoteplotních asfaltových směsí se doporučuje použití průmyslově vyrobených nízkoteplotních asfaltových pojiv, jelikož tyto pojiva mají deklarovány vlastnosti od výrobců pojiv. [1]

Pro výrobu nízkoteplotních asfaltových směsí se používají: [1]

- Silniční asfalty dle ČSN EN 12591
- Polymerem modifikované asfalty dle ČSN EN 14023
- Průmyslově vyrobená nízkoviskózní asfaltová pojiva

Nízkoteplotní asfaltová pojiva musí mít dostatečnou skladovací stabilitu, která nesmí být negativně ovlivněna použitými přísadami. [1]

2.4 Poznatky užití vosků v asfaltech z ČR a ze Světa

V této kapitole je provedena rešerše odborných článků z České republiky a ze zahraničí. Odborné články byly pro jejich zajímavost a nedílnou návaznost jednotlivých kapitol na sebe uvedeny celé, tím lze získat komplexní informace o problematice používání vosků do asfaltů a asfaltových směsí.

2.4.1 Laboratorní studie na použití vosků ke snížení pokládkových teplot [2]

V rozsáhlé studii se uvádí, že je dostupné několik procesů ke snížení teplot při míchání a pokládání horké asfaltové směsi. Jedním z těchto procesů je použití vosků ke snížení viskozity asfaltových pojiv. Tyto vosky musí být tuhé ve vysokých provozních teplotách, ale nad teploty vyšší než provozní teploty se vosky musí rozpustit, stávají se tekuté s nižší viskozitou ve směsi a tímto směrem je možné vyrábět a pokládat asfaltové směsi při nižších teplotách. Vosky, které se rozpouští v teplotním rozsahu mezi 100 °C a 145 °C bývají používány ke snížení viskozity. Podle výrobců jednotlivých druhů vosků může být dosaženo snížení výrobní teploty až o 30 °C oproti standardním teplotám. Odděleně od jejich schopnosti snížit výrobní teplotu jsou tyto vosky také prosazovány pro zlepšení odolnosti proti tvorbě trvalých deformací. [2]

2.4.1.1 Testování vosků a asfaltových pojiv s vosky

Materiály

V rámci studie [2] bylo použito 10 komerčně dostupných vosků označených laboratorně od A do J. Tyto vosky byly přidány do asfaltu gradace 50/70 a byly srovnávány s asfaltem základní gradace 50/70. Vosky ve formě kuliček byly přidány do horkého asfaltového pojiva a míchány při 160 °C po dobu 1 hodiny. Byly použity 2 experimentální metody pro zkoušku těchto vzorků a to diferenciální skenovací kalorimetrie (DSC) a zkoušky v dynamickém smykovém reometru (DSR). [2]

Výzkum na obdržených voscích

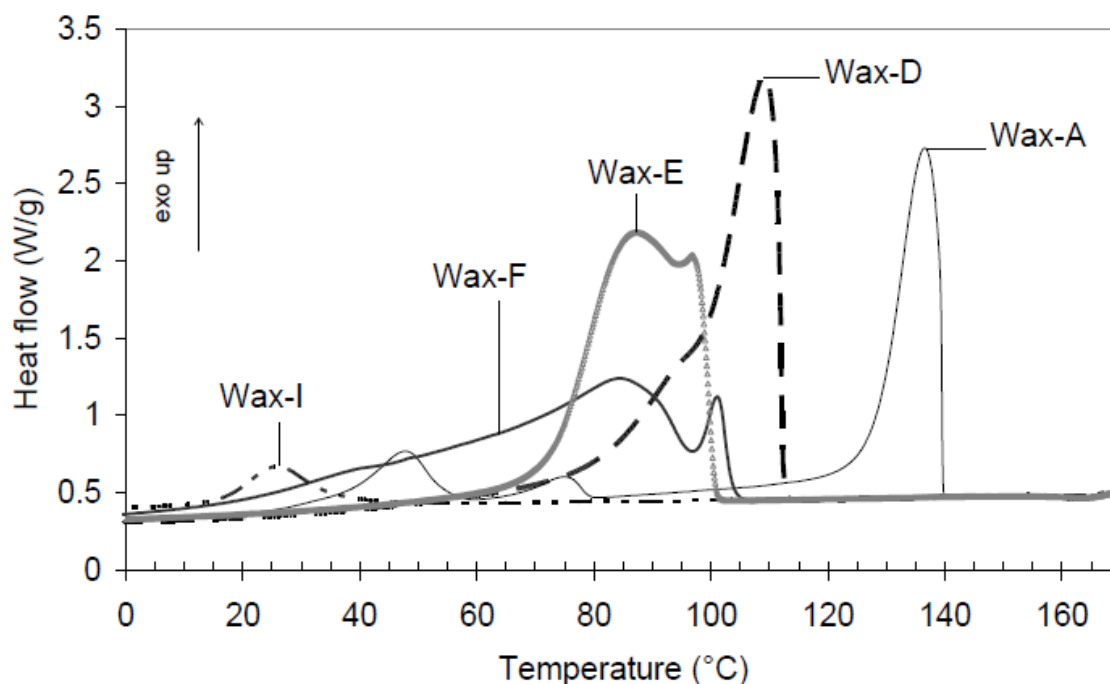
Pro zkoumání rozpouštění a krystalického chování na čistých voscích bylo použito diferenciální skenovací kalorimetrie. Vzorky byly prvně ochlazovány ze 180 °C do -70 °C rychlostí -10 °C/min a následně zahřívány na stejnou hodnotu. Krystalizace byla v mnoha případech pozorována během ochlazování jako exotermní signál. Rozpouštění je pozorováno při zahřívání jako endotermální signál. Jednotlivé výsledky jsou reprezentovány v tabulce 2. Teploty, při nichž docházelo k malým signálům na tyto reakce, jsou uvedeny v závorkách. [2]

Tabulka 2: Kalorimetrie a viskozní vlastnosti vosků v referenčním asfaltu B50/70

Vzorky	Krystalizace při ochlazování	Rozpouštění při zahřívání	Viskozita při 150 °C (20s ⁻¹)	Teplota nárůstu viskozity	Poznámky
	[°C]	[°C]	[Pa·s]	[°C]	
ref. asfalt	-	-	2,14E-01	-	
Vosk-A	140-(75)	(65)-125	8,79E-03	143,0	
Vosk-B	140-(70)	(67)-120	7,90E-03	142,5	
Vosk-C	140-(70)	(60)-120	8,42E-03	144,4	
Vosk-D	110	60	5,43E-02	114,2	
Vosk-E	100	60	8,35E-03	101,0	
Vosk-F	100	30	4,05E-02	105,7	Hranice rozsahu krystalizace
Vosk-G	100	45	1,07E-02	104,5	
Vosk-I	47	57	2,54E-01	-	Nízký stupeň krystalinity
Vosk-J	36	45	3,37E-01	-	
Vosk-H	(120)-80	86-(100)	7,26E-03	-	

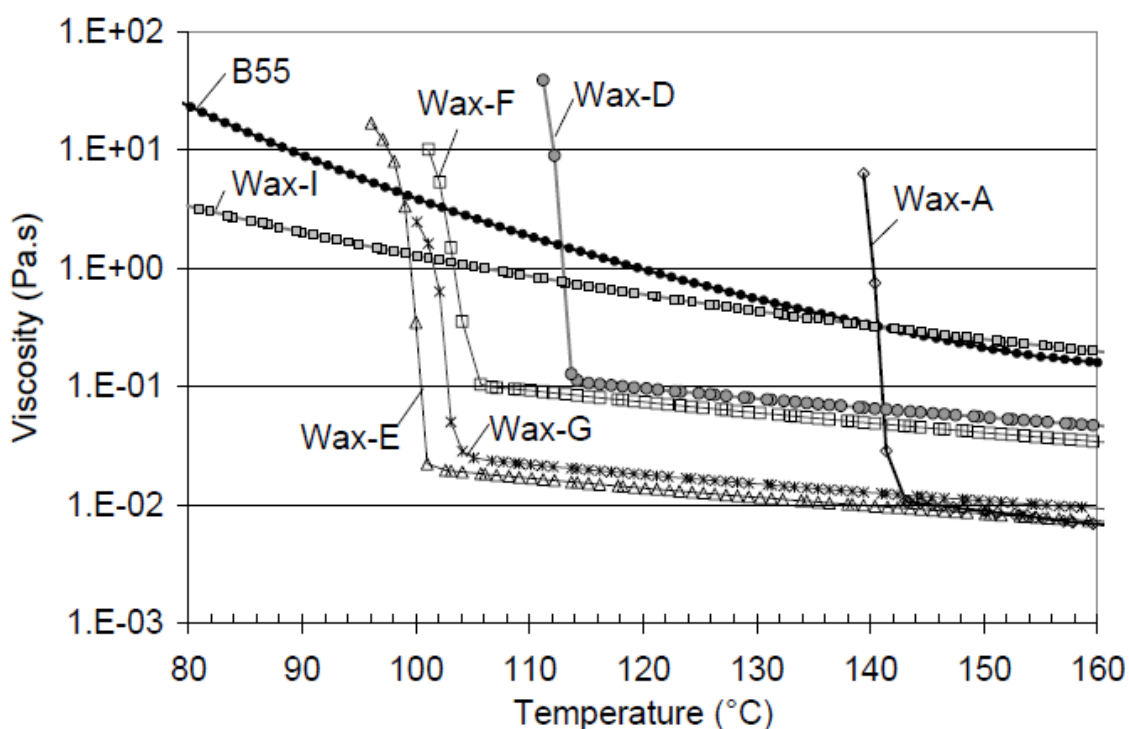
Z diferenciální skenovací kalorimetrie (DSC) bylo chování vzorků rozděleno na 5 typů: [2]

- 1) Vosk-A, Vosk-B a Vosk-C ukazují velkou a ostrou krystalizaci při ochlazování začínající při teplotě 140 °C následované proměnlivými velmi malými krystalizačními špičkami při nižších teplotách. Tyto tři vzorky se chovají velmi podobně. [2]
- 2) Vosk-D ukazuje velký a ostrý krystalizační počátek začínající při teplotě 112 °C, ale exotermický signál se rozšiřuje poněkud při spodních teplotách s konečnou krystalizační teplotou okolo 60 °C. [2]
- 3) Vosk-E ukazuje obrovský krystalizační signál začínající při teplotě 102 °C a končící okolo 60 °C. [2]
- 4) Pro Vosk-F a Vosk-G tvar krystalizačního signálu je velmi podobný jako u vosku Vosku-E, ale pro tyto vzorky je ostrý krystalizační signál při vysokých teplotách okolo 105 °C. V těchto vzorcích spousta materiálu stále krystalizuje i při teplotách nižších než 60 °C což může způsobovat problém při vysokých provozních teplotách, pokud jsou tyto vzorky použity v asfaltových směsích. [2]
- 5) Vosk-H, Vosk-I, Vosk-J ukazují pouze velmi malý krystalizační signál zobrazeny jako malé špičky. Krystalinita těchto 3 vzorků je velmi nízká, proto tyto vosky budou změkčovat pojivo ve všech teplotách a také v provozních teplotách, což může způsobovat problémy. [2]



Obrázek 6: Závislost tepelného toku na teplotě vosků.

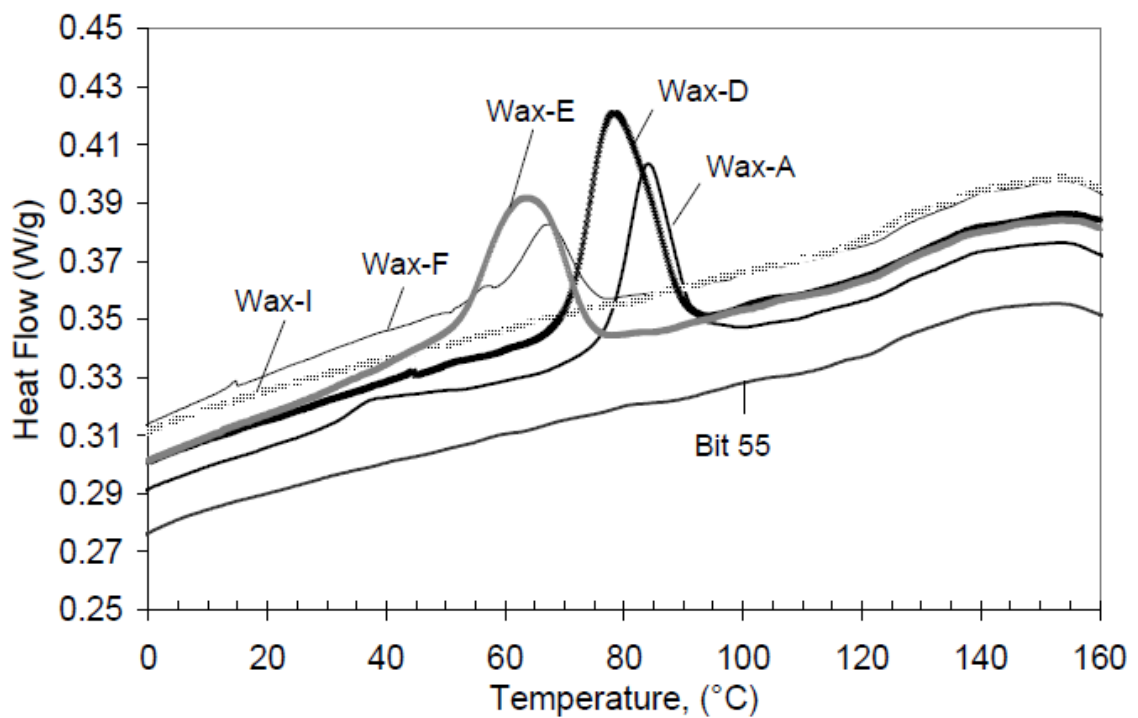
Viskozita na měřených vzorcích byla zjišťována jako dynamická viskozita, která byla měřena během chlazení z teploty 180 °C do 80 °C s gradientem -2 °C/min. Prudké zvýšení ve viskozitě těchto vzorků je způsobeno krystalizačním počátkem. V tomto bodě bylo měření pozastaveno, protože se vzorky stávaly příliš tuhé k měření v geometrii vřeteno-nádobka. Úroveň viskozity při teplotě 150 °C je pro mnoho vosků nižší než viskozita referenčního asfaltového pojiva. [2]



Obrázek 7: Závislost dynamické viskozity na teplotě referenčního pojiva B55 a čistých vosků.

Testování asfaltů s vosky na výrobní teploty

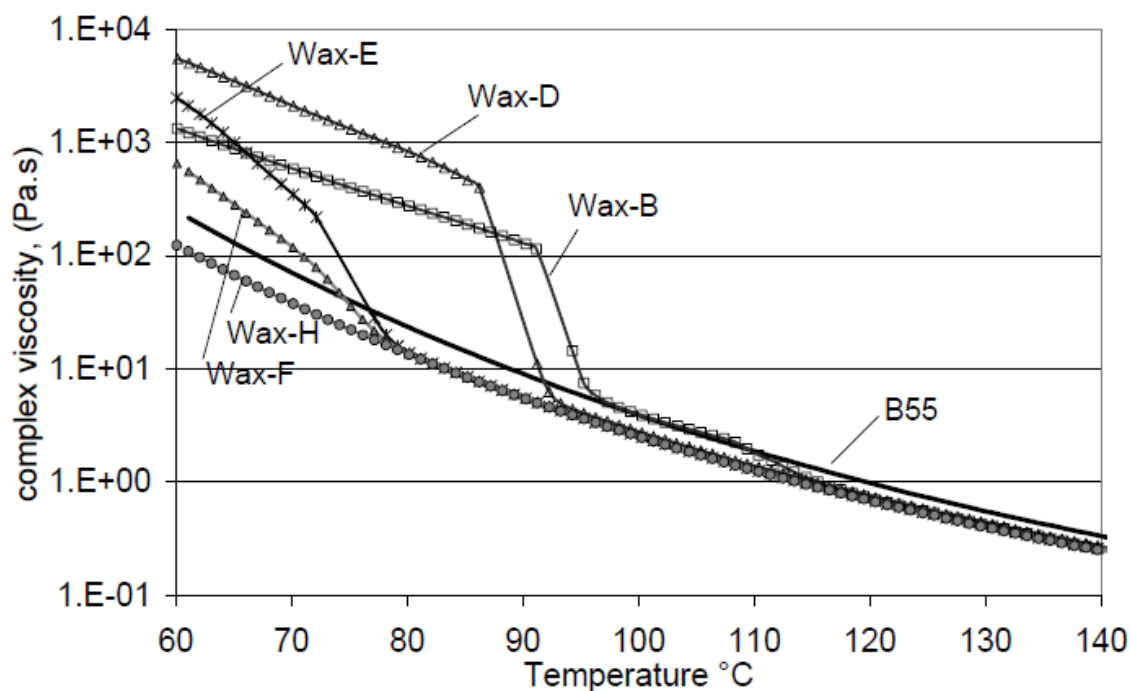
Testy byly provedeny na voscích smíchaných s referenčním pojivem B50/70 v koncentraci 3 % vosku. Tato koncentrace je doporučena výrobcí vosků jako výchozí bod. Průběh zkoušky v DSC je ukázán na obrázku 8. Při porovnání čistých vosků s asfaltovým pojivem s vosky zobrazuje značný pokles v krystalizačních teplotách, které naznačují interakci mezi vosky a pojivem. Například pro Vosk-A dochází k poklesu teploty kolem 40 °C mezi počátkem krystalizace v čisté a smíchané variantě. Pro Vosk-D je tento pokles okolo 20 °C. Vosky H, I, J, které vykazovaly malé krystalizační signály v čisté formě, již v 3 % množství vosku nevykazovaly žádný exotermický signál. V tabulce 3 jsou shrnuty některé parametry pro asfalty s vosky. Viskozita asfaltových pojiv s 3 % vosku s referenčním pojivem B55 jako základní pojivo, které bylo zkoumáno při teplotách mezi 160 °C a 60 °C jak je zobrazeno na obrázku 9. U čistých vosků, krystalizace vede k prudkému zvýšení viskozity a opakovaně velký teplotní pokles mezi čistými a asfaltovými pojivy s vosky. Ačkoliv mnoho čistých vosků mají nižší viskozitu než referenční pojivo, snížení viskozity 3 % u WMB je omezené, zvláště pokud je toto snížení viskozity vyjádřeno jako změna v teplotě. Ekvi-viskózní teploty jsou zahrnuty v tabulce 3. V porovnání s referenčním pojivem, je teplota změny limitována maximálně o 6 °C. Vzhledem k tomu, že snížení viskozity u asfaltů s 3 % vosku je omezeno, byly zkoumány i vyšší koncentrace vosku v asfaltu, bohužel ale i pro 5 % koncentraci bylo snížení viskozity stále omezené. [2]



Obrázek 8: Závislost tepelného toku na teplotě u DSC chlazení 3 % u asfaltového pojiva s vosky s porovnáním k referenčnímu pojivu (chlazení -10 °C/min)

Tabulka 3: Kalorimetrie a viskózní vlastnosti asfaltů s 3 % vosků a referenčního pojiva

Vzorky	DSC krystalizace při ochlazování	Teplota nárůstu viskozity	Viskozita při 150 °C (20s ⁻¹)	Ekviviskózní teplota pro 1 Pa·s
	[°C]	[°C]	[Pa·s]	[°C]
ref. asfalt	-	-	0,214	120,0
Vosk-A	101	94	0,160	114,0
Vosk-B	102	96	0,163	116,5
Vosk-C	102	96	0,169	116,0
Vosk-D	93	93	0,175	115,0
Vosk-E	77	79	0,166	114,0
Vosk-F	76	78	0,168	114,0
Vosk-G	81	80	0,160	112,0
Vosk-I	-	-	0,210	119,0
Vosk-J	-	-	0,218	120,0
Vosk-H	-	-	0,162	114,0



Obrázek 9: Komplexní viskozita během chlazení pro různé 3 % asfalty s vosky a pro referenční asfalt (chlazení rozsahu 2 °C/min; 1 Hz; 1 % přetvoření)

Testování asfaltových pojiv s vosky na provozní teploty

V této části byly prováděny testy na několika asfaltových pojivech s 3 % vosku, kde bylo jako základní pojivo zvoleno 50/70. Konvenční zkoušky jsou zobrazeny v tabulce 4. Z tabulky 4 je zřejmé, že tři vosky, které vykazovaly pouze malé signály v testech DSC (Vosk-I, Vosk-J a Vosk-H), také zobrazují velmi malé zvýšení bodu měknutí v metodě kroužek a kulička. Pro dva vosky s velmi širokým DSC signálem (Vosk-F a G), pouze Vosk-G vykazuje značné zvýšení bodu měknutí, zatímco druhý vzorek, Vosk-F vykazuje zvýšení pouze o 10 °C. U všechny ostatních vosků dochází k velkému zvýšení bodu měknutí. [2]

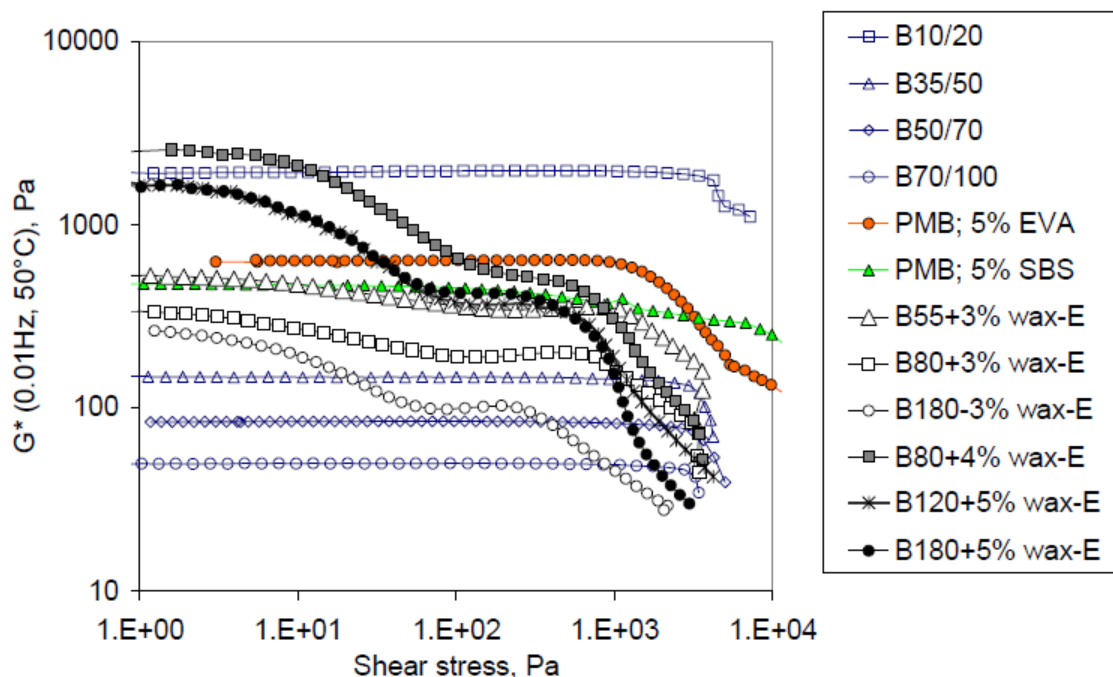
Vosky se značným zvýšením bodu měknutí byly testovány v DSR. Frekvenční rozsah byl z -10 °C do +90 °C pro získání představ o nízké a také vysoké provozní teplotě. Při nízkých teplotách je tuhost při 1 Hz a 0 °C uvedena v tabulce 4. Dá se pozorovat, že tato úroveň tuhosti se nikdy nezvyšuje o více než 5 %, což alespoň naznačuje, že tuhost při nízkých teplotách není téměř ovlivněna přidáním 3 % vosku k základnímu pojivu [34]. Pro vosky E, F a G je tuhost při nízkých teplotách dokonce mírně snížena. [2]

Tabulka 4: Konvenční a reologické vlastnosti referenčního pojiva a asfaltových pojiv s vosky. Všechna pojiva konzistence 3 % vosku v pojivu B50/70 referenčního pojiva.

Vzorky	Penetrace při 25 °C	Kroužek a kulička	Teplota při $G^*/\sin(\delta)=1$ kPa, 1,59 Hz, 1 % přetvoření	$G^*/\sin(\delta)$ -0,01 Hz a 50 °C při 1 % přetvoření	$G^* - 1$ Hz - 0 °C, 0,05% přetvoření
	[0,1 mm]	[°C]	[°C]	[Pa]	[Pa]
ref. asfalt	55	49,0	68	1,13E+02	9,85E+07
Vosk-A	45	100,6	79	8,49E+02	1,02E+08
Vosk-B	42	93,3	82	1,03E+03	1,03E+08
Vosk-C	43	100,5	84	1,50E+03	1,07E+08
Vosk-D	40	102,0	79	6,63E+02	1,12E+08
Vosk-E	35	78,9	76	5,85E+02	7,77E+07
Vosk-F	53	59,4	70	1,39E+02	7,58E+07
Vosk-G	40	90,0	72	2,46E+02	9,32E+07
Vosk-H	49	52,7			
Vosk-I	53	50,0			
Vosk-J	56	55,5			

Mezi různými typy vosků jsou velké rozdíly ve ztužujícím efektu při teplotě 50 °C. Vosky, které vykazují dostatečný krystalický materiál v chladicím skeneru DSC, krystalizují při dostatečně vysokých teplotách (nad 60 °C) vykazující největší ztužující efekt. V praxi to znamená, že tyto vosky s velkým exotermem vyskytující se v malém a vysokém teplotním rozsahu jsou nejvhodnější pro zlepšení odolnosti vůči trvalým deformacím. [2]

Při analýze chování v DSR bylo zjištěno, že tuhost voskem modifikovaná asfaltová pojiva jsou velmi citlivá na přetvoření, tuhost se velmi rychle snižuje, pokud se zvyšuje aplikované smykové napětí. Na obrázku 10 je zobrazen komplexní modul ve smyku v závislosti na rostoucím působícím napětí při teplotě 50 °C a frekvenci 0,01 Hz na některých vybraných vzorcích. V porovnání s nemodifikovanými a polymerem modifikovanými pojivy, tato asfaltová pojiva s vosky mohou být považována za pojiva citlivá na přetvoření. Zjištění že asfaltová pojiva s vosky jsou mnohem více citlivá na přetvoření než nemodifikovaná nebo polymerem modifikovaná pojiva při vysokých provozních teplotách je velmi důležité.



Obrázek 10: Přetvářející závislost při 50 °C a 0,01 Hz pro vybraná asfaltová pojiva s vosky, pro polymerem modifikovaná asfaltová pojiva a pro nemodifikovaná pojiva.

2.4.1.2 Závěr článku [2]

Snížení teploty hutnění a pokládky je zcela spojena s viskozitou pojiva. Proto ekvi-viskozita teplot měřena na pojivech s vosky může být použita k předurčení dosažitelnosti snížení teplot ve výrobě asfaltových směsí. [2]

Vosk je slučitelný s asfaltem, takže zde není oddělená fáze od blíže čistého vosku, který může udržovat jeho nízkou viskozitu. Viskozita asfaltových pojiv s vosky se vztahuje velmi dobře na hodnoty, které jsou očekávány pro sloučení směsí založených na viskozitách dvou čistých komponentů. [2, 24]

2.4.2 Reologické účinky vosků v asfaltech [3]

Téměř všechny asfalty pochází z ropy jako zbytek z jeho procesu rafinace. Je dobře známo, že asfalt je velmi složitý a teplotně závislý materiál sestávající se z uhlovodíkových molekul. Ropa na bázi naftalenu často dávají velkou produkci asfaltů, které mohou být dobré kvality, zatímco parafinické ropy mohou dát asfaltu dobrou kvalitu nebo produkci asfaltů nevhodných pro silniční stavby. [3, 34]

Vosk je termín používaný pro všechny druhy voskovitých pevných látek a tekutin v přírodě, stejně jako pro syntetické sloučeniny s voskovitými fyzikálními vlastnostmi. Některé ropy obsahují značné množství ropného vosku, který krystalizuje při poklesu teploty a mohou způsobit vážné problémy v potrubí a technologickém zařízení při srážkách. Nicméně, ropné vosky jsou také užitečné pro průmyslové výrobky (svíčky, leštidla, atd.) Vosk v asfaltu je ropný vosk pocházející z rafinace voskovitých parafinických rop.

Různí uživatelé však nedospěli k dohodě týkající se nejvhodnější definici vosku v asfaltu. Dvě základní třídy ropných vosků obecně uznávané v ropách a destiláty jsou parafinové vosky a mikrokrytalické vosky. Bylo navrženo, aby vosk v asfaltu mohl být zařazen ve stejných dvou skupinách. Asfalty mohou také obsahovat další typy molekul identifikované jako vosk. [3, 28, 34]

Makrokrytalické parafinové vosky jsou složeny převážně z n-parafínů (n-alkanů) s menším množstvím cykloparafínů. Krystalizují jako desky nebo jehly. Teplota tání izolovaných makrokrytalických parafinových vosků leží okolo 50-70 °C, ale v asfaltu se teplota tání parafínů snižuje přibližně o 20-30 °C. [3]

Mikrokrytalické vosky jsou alifatické sloučeniny uhlovodíků obsahující značné množství iso- a cykloparafínů a menší množství n-parafínů, které krystalizují jako malé jehly. Mikrokrytalický ropný vosk je také charakterizován méně odlišnou oblastí tavení a vysokou průměrnou molekulární hmotností dávající vyšší viskozitu v porovnání s makrokrytalickými parafinovými vosky. [3]

Vosk v asfaltu byl normálně považován za negativní indikaci kvality asfaltu. V důsledku toho mnoho specifikací asfaltů zahrnují požadavky na obsah vosku. Faktory, které ovlivňují účinky vosků, jsou chemické složení (zdroj asfaltu) a reologické chování asfaltu stejně jako obsah, složení a krystalinitu vosku. Podle literatury jsou negativní účinky na asfalt z důvodu vysokého obsahu vosku, které se mohou zobrazit různými způsoby. [3]

Viskozita může náhle poklesnout při teplotním rozsahu tavení krystalického vosku (typicky okolo 60-80 °C). Jiné obávané účinky jsou křehkost, fyzikální ztvrdnutí, špatná tažnost a špatná přilnavost. [3]

Jako zásadní pravidlo bylo navrženo, že obsah vosku v asfaltu by neměl překročit 3 % hmotnosti asfaltu. V závislosti na definici vosku v asfaltu toto může nebo nemusí být relevantní údaj. Výsledky a zkušenosti týkající se negativního účinku vosku v asfaltu jsou založeny především na laboratorních studiích a některé jsou již uvedené. [3, 28, 29]

Vosk v asfaltu může: [3]

- Vykazovat negativní účinky při zhutňování asfaltové směsi v důsledku náhlého zvýšení viskozity. Asfaltový beton také může být citlivý na trvalé deformace (vyjeté koleje) jako výsledek snížení viskozity způsobené voskem při vyšších teplotách. [3]
- Dělat asfalt mnohem křehčí a asfaltový beton náchylný k popraskání při nízkých teplotách. Fyzikální ztvrdnutí při nižších teplotách je považováno za alespoň částečně způsobené voskem. [3]
- Vykazovat negativní účinek na přilnavost mezi asfaltem a kamenivem. Schopnost navlhčit kamenivo se může snížit

z důvodu hydrofobního charakteru vosku. [3]

- Snížení soudržnosti asfaltu, což je kritické zejména u tenkých asfaltových vrstev. Nehomogenita v asfaltu způsobená krystaly vosku mohou snížit tažnost při nižších teplotách. [3]

Poměrně rozporuplně také pozitivní účinky vosku v asfaltu mohou být a to zejména nízkoteplotní vlastnosti a nižší manipulační teploty (pro lepší hutnění). [3]

Několik metod jsou použitelných pro stanovení obsahu vosku. Všechny dávají různé výsledky pro stejný asfalt, které způsobují problémy po mnoho let. Tato překážka byla zřejmá také v Evropské harmonizační práci. Většina testovacích metod pro stanovení obsahu vosku v asfaltu obsahuje dva kroky, oddělení a voskové srážení. Oddělení bylo provedeno absorpcí polárních sloučenin v kombinaci s rozpouštědlovou extrakcí neutrálních olejů a vosků dokonce i destilací (destruktivní). Použité pozdější techniky jsou nevodná iontoměničová chromatografie (IEC) a vylučovací chromatografie (SEC) k oddělení neutrálního oleje z polárních sloučenin. Srážení vosku znamená izolaci vosků ze zbytku neutrálních frakcí za použití rozpouštědla, které se nerozpustí ve vosku při nižších teplotách (odvoskování). Vosk bude krystalizovat a pak může být filtrován. Výsledkem je obojí kvantitativně a kvalitativně závislostí na rozpouštědle a použité srážecí teplotě. [3]

Další metoda pro studium vosků je diferenciální skenovací kalorimetrie (DSC), která je používána od roku 1970 pro studium srážení vosku a stanovení obsahu vosku. Obsah vosku nebo krystalizační frakce (CF) označuje množství materiálu, který se účastní fázového přechodu v daném teplotním rozmezí. Při teplotě DSC změna entalpie se měří při chladícím cyklu pro stanovení krystalizačního materiálu a cyklus vytápění pro výpočet množství tavení materiálu. [3]

Voskový vliv na reologické chování asfaltu byl studován a dokumentován několika autory. Některé z těchto studií a použitím reometru jsou zmíněny níže. [3]

McKay et al. izolovali asfaltový vosk za použití neutrálních frakcí IEC a srážení vosku v methylethylketonu (MEK) při -25 °C. Z reologických údajů (dynamická viskozita), se dospělo k závěru, že parafinové vosky v asfaltu vykazují vyšší tuhost a mohou mít za následek snížení nízkoteplotních vlastností asfaltů a také, že mikrokrytalické vosky snižují tuhost a mohou zlepšit nízkoteplotní vlastnosti asfaltů. Asfaltový vosk byl izolován za použití hliníkové absorpce polárních sloučenin s následnou extrakcí neutrálních olejů Soxhlet a srážení vosku v MEK při -10 °C. Frekvenční rozsah byl proveden při teplotách od 10 do 70 °C. Výrazné rozdíly byly zaznamenány pouze u vysoké hladiny vosku při nejvyšších a nejnižších teplotách. Při vysokých teplotách bylo zjištěno, že parafinické vosky a zejména n-alkany

v těchto voscích mírně zhoršují reologického chování asfaltu (snížení komplexního modulu). Při nízkých teplotách, vosky z parafinického asfaltu zvyšují dynamický smykový modul, zatímco vosk z nafteno-aromatického asfaltu snižuje modul. Carbognani a kol. dospěl k závěru, že toto zlepšení (nižší modul při 10 °C) bylo způsobeno krystalizovanými aromatickými a pryskyřičnými typy.[3]

Asfalty s Tafelparafinem (TP) a Gatschparafinem (GP) byly studovány Oberturem a kol. Tafelparafin je makroparafinový vosk (90 % hmotnosti tvoří n-parafiny) a Gatschparafin je polotuhý mikroparafinový vosk (asi 70 % hmotnosti tvoří iso- a cykloparafiny). Byly provedeny zkoušky komplexního modulu při teplotní rozsahu od -10 do 70 °C a při nízké frekvenci. Při nízkých teplotách se komplexní modul zvýšil se zvyšujícím obsahem Tafelparafinu. Při vyšších teplotách a v závislosti na obsahu parafinu, parafiny byly rozpuštěny v asfaltu. Dokonce i při vyšších teplotách Tafelparafiny ukazují řídňovací účinek. Přidáním Gatschparafiny se ukázalo řídňovací účinek až do 10 °C. [3]

Butz a kol. také studovali vliv přidání Fischer-Tropschových (FT) parafínů k asfaltům. Fischer-Tropschův parafín je podobný asfaltovému vosku, ale obsahuje mnohem delší molekuly. Širší molekuly vosku distribují větší oblast pro tání. Účinky FT-parafínů na reologické chování asfaltů byly měřeny za teploty od 10 do 60 °C při nízkých a vyšších frekvencích. Závěrem bylo zjištěno, že tuhost a pružnost vzrostla při těchto teplotách. [3]

2.4.3 Vliv vosků na polymerem modifikované provedení asfaltového koberce mastixového [4]

Hlavním účelem přidání vosku je snížit teplotu míchání asfaltové směsi, aby se snížila spotřeba energie a emise asfaltových výparů a aerosolu. Zpracovatelnost asfaltové směsi je zpravidla zlepšena. Pod teplotou pokládky může dojít také ke zvýšení viskozity v důsledku krystalizace vosku a tím k určitému ztužení. V důsledku toho může vozovka z asfaltové směsi získat lepší odolnost proti trvalým deformacím. V případě asfaltového betonu, může nižší mezerovitost z důvodu lepších hutnících vlastností způsobit, že vozovka bude trvanlivější. Nicméně jiné vlastnosti vozovky, jako je náchylnost k trhlinám při nízkých teplotách, odolnost proti únavě a přilnavost, by mohly být ovlivněny přidáním zlepšovače průtoku. Různé asfaltové směsi jsou více či méně citlivé na voskové přísady. [4]

2.4.3.1 Použití voskových přídatných látek v asfaltu a asfaltových směsí

Typické produkty snižující viskozitu používané pro asfaltové vozovky jsou FT-parafiny, montánní vosk, oxidovaný polyetylenový vosk, termoplastické pryskyřice a amid mastné kyseliny. Distribuce molekulových

hmotností se liší, stejně jako jejich vliv na vlastnosti asfaltového betonu nebo na asfaltový koberec mastixový. Zeolity jsou dalším typem přísady, které patří do skupiny hydratovaných křemičitanů hliníků. Zeolity se však nepoužívají v asfaltovém koberci mastixovém. V praxi se nejčastěji používají FT-parafíny a montánní vosky. Přidání 2-3 % vosku k hmotnosti asfaltu. [4]

Hlavním účelem přidávání vosku do asfaltu je obvykle snížení viskozity v určitém teplotním rozmezí. Na druhou stranu to může vést k lepší zpracovatelnosti, k delšímu období pokládání směsí a může vést k méně náročnému zhutňování válci. Snížení spotřeby energie se považují za velmi důležitou výhodu přidavku vosku [33]. Výrobní náklady na obalovnách mohou být nižší díky nižší výrobní teplotě a kratší výrobní době. Menší opotřebení zařízení na obalovně je dalším možným příznivým důsledkem. Na druhé straně se mohou výrobní náklady zvýšit o dodatečné náklady na vosk, a pokud je pro nový výrobní proces zapotřebí úpravy zařízení. Nižší výrobní teplota také znamená snížení emisí, což jinak může být problémem nebo dokonce poškozující zdraví při výrobě asfaltové směsi a při pokládce směsi. Asfaltové páry v souvislosti s vnitřními asfaltovými pracemi je známa jako nejproblematictější. [4, 23, 27]

Vosk jako zlepšovač průtoku vykazuje změkčovací účinek na asfalt a asfaltovou směs při vyšší teplotě (nad 80 °C). Navíc k tomu ztužující efekt nastane pod teplotou pokládky v důsledku krystalizace vosku. Tím se také může zvýšit odolnost vozovky z asfaltové směsi proti trvalé deformaci. Reologické účinky přidávání vosku na asfalt lze studovat pomocí dynamické mechanické analýzy (DMA). V poměru DMA je poměr špičkového napětí k vrcholu přetvoření definován jako komplexní modul G^* , který je měřítkem celkové odolnosti vůči deformaci testovaného vzorku. Fázový rozdíl mezi napětím a přetvořením definován jako fázový úhel δ a je měřítkem viskoelastického charakteru vzorku. Pro zcela viskózní kapalinu je fázový úhel 90 °C a pro ideální elastický pevný materiál je fázový úhel 0 °. Komplexní modul a fázový úhel asfaltů jsou funkcemi teploty a frekvence, které se mohou měnit přidáním různých přísad, jako jsou vosky a polymery. [4, 27, 33]

2.4.3.2 Experiment

Materiály

Použitý polymerem modifikovaný asfalt byl produkt třídy 50/100-75 (PmB 32) vyráběný firmou Nynas. Komerčními voskovými přísadami byly FT-parafíny (Vosk S) a montánní vosk (vosk A). Jejich charakteristiky jsou uvedeny v tabulce 5. Byly použity úrovně 3 % a 6 % vosku ku hmotnosti asfaltu. Míchání provedl výrobce asfaltu. Vzorky byly zestárnuty metodou RTFOT (Rolling Thin Film Oven). [4]

Tabulka 5: Informace týkající se přísad použitých v tomto příspěvku získány z technických listů produktu

Additive	Characteristics	Value
Wax S. (FT paraffin wax)	Congearing point (ASTM D 938)	100 (°C)
	Penetration at 25°C (ASTM D 1321)	<1 (dmm)
	Penetration at 65°C (ASTM 1321)	7 (dmm)
Wax A. (Montan wax)	Solidification point	120-130 (°C)
	Dropping point	125-135 (°C)
	Viscosity at 150°C	5-20 (mPas)

Metody analýzy

Následující zkušební metody byly použity pro testování pojiv: [4]

- Bod měknutí (EN 1427)
- Penetrace při 25 °C (EN 1426)
- Bod lámavosti podle Fraasse (EN 12593)
- Dynamická viskozita, Brookfield při teplotách 135 a 180 °C (ASTM D442)
- Vratná duktilita při 10 °C (EN 13398)
- Silová duktilita při 10 °C (EN 13589, EN 13703)
- Stabilita při skladování při 180 °C (EN 13339)
- DSR při teplotním rozsahu z -30 do +80 °C a frekvence 10 rad/s (AASHTO TP5)
- BBR při -18 a -24 °C (EN 14771)
- DSC (Differential Scanning Calorimetry)

2.4.3.3 Výsledky

Výsledky jsou prezentovány v tabulce 6 a zobrazují snížení viskozity přibližně o 60 jednotek při 180 °C s přidavkem 6% vosku S nebo vosku A, což odpovídá možnému snížení teploty při pokládce přibližně o 10 °C. [4]

Přidání vosku S ukazuje o něco větší ztužující účinek ve srovnání s voskem A při teplotách kolem 30 až 60 °C. Toto je indikováno vyšším komplexním modulem a nižším fázovým úhlem, jak je ukázáno u původních vzorků na obrázku 12 a laboratorních vzorků na obrázku 13. Vliv na bod měknutí a penetraci je také větší u vosku S ve srovnání s voskem A, zejména u původních vzorků. [4]

Zdá se, že skladovací stabilita se zlepší přidáním vosku. Nebo spíše, bod měknutí se zvyšuje v rozsahu odpovídající tomu, co se stalo také během laboratorního stárnutí v RTFOT. PmB 32 neobsahující žádný vosk není stabilní při skladování a bod měknutí je po laboratorním stárnutí okrajově změněn. Následně se bod měknutí zpočátku zvyšuje přidáním vosku, ale dále se zvyšuje, jestliže se skladuje nebo stárne. Po 72 hodinách skladování při teplotě 180 °C vykazují všechny vzorky obsahující vosk teplotu bodu

měknutí okolo 100 °C. Po stárnutí je bod měknutí okolo 90-100 °C pro všechny vzorky obsahující vosk. Je třeba poznamenat, že PmB 32 může měnit bod měknutí v závislosti na teplotě a čase přípravy vzorku. [4]

Vratná duktilita při 10 °C se poněkud sníží přidáním 3 % vosku. Při vyšší úrovni vosku se zkušební vzorky přetrhnou, než dosáhnou délky prodloužení 200 mm. Po stárnutí se všechny vzorky obsahující vosk přetrhly během testu. Vratná duktilita byla stanovena při 10 °C (ne při 25 °C), jak je požadováno v normě. [4]

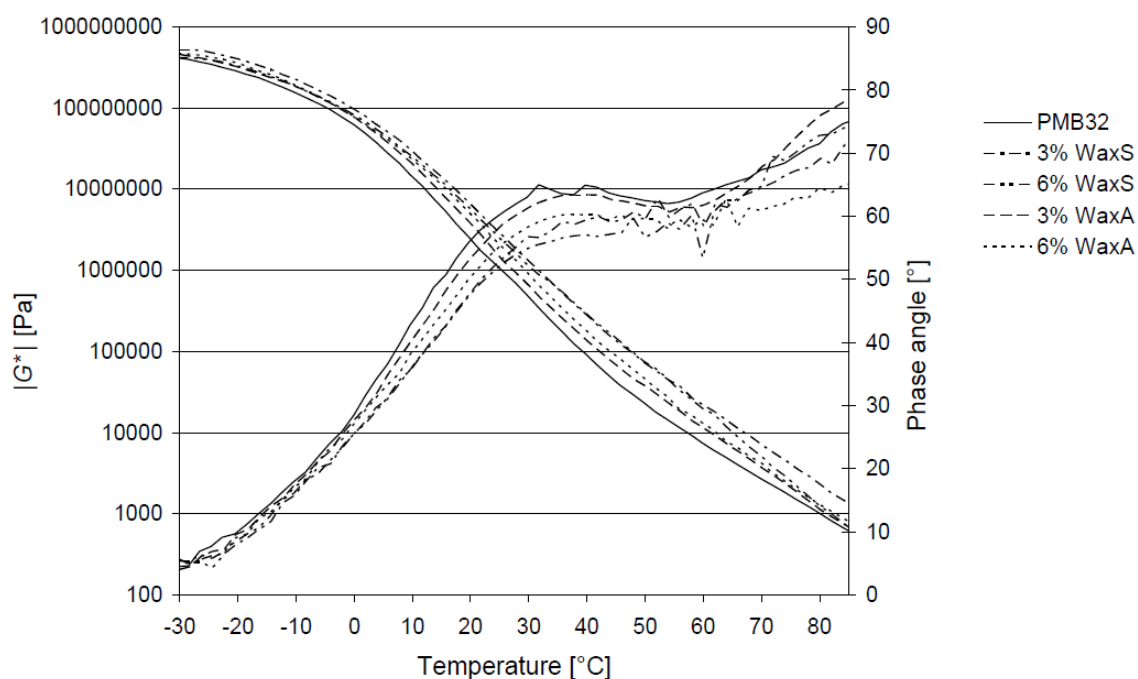
Také v silové duktilitě při 10 °C, všechny zestárlé vzorky obsahující vosk se přetrhly před dosažením prodloužení 400 mm. Silová duktilita je považována za měřítko soudržnosti a homogenity zkušebního vzorku, výsledky zkoušek naznačují zesílení při 10 °C v souvislosti s pravděpodobným poklesem soudržnosti. [4]

Pokud jde o nízkou teplotu, bod lámavosti je mírně ovlivněn přidáním vosku. Zkoušení při nízkých teplotách pomocí BBR ukazuje celkové zvýšení tuhosti při -18 °C, což naznačuje negativní dopad na náchylnost k trhlinám při nízkých teplotách, což je větší přidáním vosku S, než přidáním vosku A. [4]

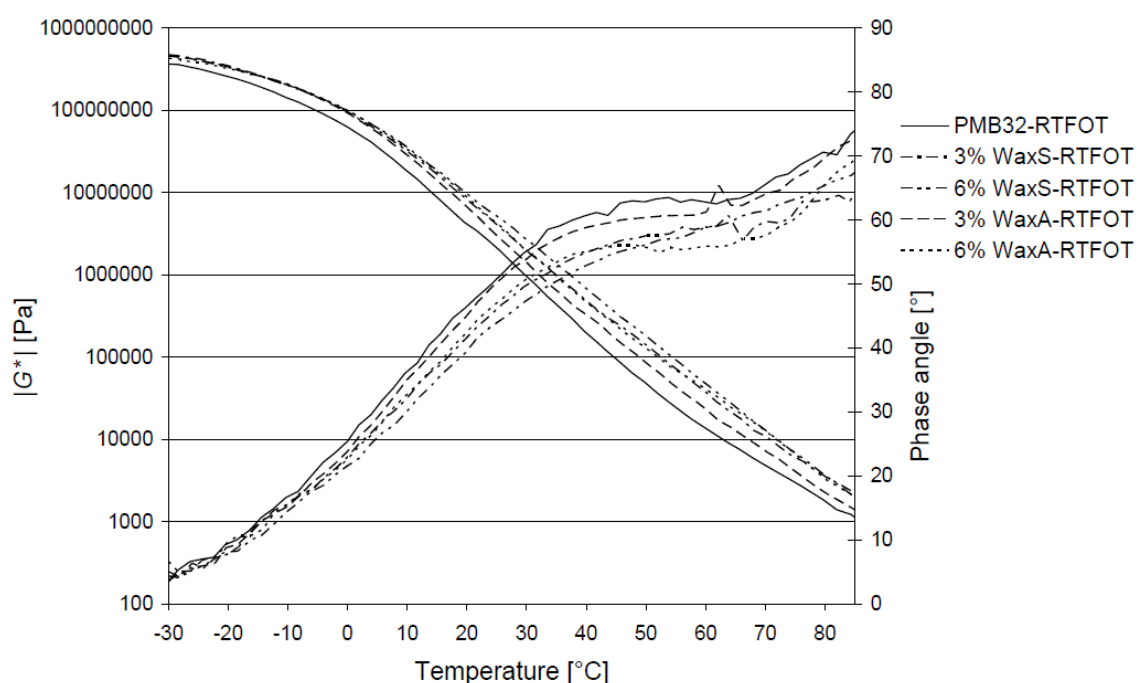
Pro kontrolu při nízkých teplotách sklon k trhlinám podle SHRP se zkouška BBR provádí při teplotě o 10 °C nad očekávanou nejnižší teplotou vozovky pro aktuální PG (Performance Grade – užitná třída) [30]. Za účelem splnění požadavků nesmí modul tuhosti za ohybu překročit 300 MPa a m-hodnota musí být nejméně 0,300. Nižší mezní teplota lze stanovit z výsledků BBR při dvou nebo více různých teplotách. To bylo provedeno na základě výsledků testů při -18 °C a -24 °C. Další analýza BBR byla provedena při -6 °C pro zestárlé vzorky obsahující vosk. U původních vzorků výsledky ukazují, že limitní teploty byly poněkud ovlivněny přidáním vosku. Nejvyšší mezní teplota tuhosti (-17 °C) a nejvyšší mezní teplota m-hodnoty (-12 °C) původních vzorků byla zaznamenána pro pojivo obsahující 6 % vosku S. U zestárlých vzorků byly spodní mezní teploty rovnoměrně více ovlivněny voskovými přísadami. Například přidáním 6 % vosku S došlo k nárůstu mezní teploty m-hodnoty od -18 do přibližně -5 °C. [4, 27]

Tabulka 6: Výsledky pro asfalt PmB 32 s a bez přísady vosku

Zkoušky		PmB 32	PmB 32 +3% vosku S	PmB 32 +3% vosku A	PmB 32 +6% vosku S	PmB 32 +6% vosku A
Bod měknutí	[°C]	74	96	70	94	77
Penetrace	[0,1 mm]	56	39	51	35	45
Bod lámavosti podle Frasse	[°C]	-15	-11	-12	-10	-13
Vratná duktilita při 10 °C	[%]	79	75	73	přetrženo	přetrženo
Silová duktilita při 10 °C	[Nm]	5,5	6,7	5,1	5,5	5,6
Viskozita při 135 °C	[mPa·s]	1636	1419	1150	1192	945
Viskozita při 180 °C	[mPa·s]	299	273	260	239	236
BBR při -18 °C, S/ m-hodnota	[MPa] [-]	225/0,319	234/0,282	214/0,318	314/0,260	212/0,296
BBR při -24 °C, S/ m-hodnota	[MPa] [-]	451/0,259	463/0,230	440/0,225	456/0,222	460/0,238
LST	[°C]	-20	-20	-20	-17	-20
LmT	[°C]	-20	-16	-19	-12	-18
Skladovací stabilita při 180 °C	[-]					
Nejvyšší bod měknutí	[°C]	100	103	95	106	100
Nejnižší bod měknutí	[°C]	72	93	94	101	99
DSC vosk roztaven při teplotě	[°C]	-	114	112	114	120
Po RTFOT						
Bod měknutí	[°C]	70	94	88	99	90
Penetrace	[0,1 mm]	38	25	28	22	30
Bod lámavosti podle Frasse	[°C]	-11	-11	-14	-7	-14
Vratná duktilita při 10 °C	[%]	65	přetrženo	přetrženo	přetrženo	-
Silová duktilita při 10 °C	[J/cm ²]	6,1	7,2	7,3	5,4	4,6
BBR při -18 °C, S/ m-hodnota	[MPa] [-]	239/0,304	303/0,248	294/0,275	363/0,225	299/0,278
BBR při -24 °C, S/ m-hodnota	[MPa] [-]	461/0,234	540/0,216	434/0,221	574/0,197	527/0,212
BBR při -6 °C, S/ m-hodnota	[MPa] [-]		84/0,346	59/0,433	115/0,297	77/0,388
LST	[°C]	-20	-18	-18	-16	-18
LmT	[°C]	-18	-8	-15	-2	-16



Obrázek 11: DSR při teplotním rozsahu -30 do 80 °C a frekvenci 10 rad/s pro PmB 32 obsahující vosky



Obrázek 12: DSR při teplotním rozsahu od -30 do 80 °C při frekvenci 10 rad/s pro PmB 32 obsahující vosk po laboratorním zestárnutí RTFOT

2.4.3.4 Závěry k článku [4]

Na základě výsledků směsí pojiv v tomto příspěvku lze vyvodit následující předběžné závěry: [4]

- Oba vosky (vosk S a vosk A) mají při vyšších teplotách vliv na zvýšení průtoku/viskozity u PmB 32, což naznačuje možnou nižší

teplotu při míchání a pokládce asfaltových koberců mastixových, pokud jsou modifikovány těmito vosky. [4]

- Pokud jde o provedení pojiv při teplotách nižších než přibližně 100 °C, dohází ke ztuhnutí z důvodu modifikace vosku, což naznačuje určitý pozitivní vliv na stabilitu. To bylo prokázáno v rozsahu teplot v DSR, zvýšením bodu měknutí a poklesem hodnoty penetrace. [4]
- Nicméně, tento ztuzující efekt se však objevuje také při velmi nízkých teplotách, což naznačuje negativní dopad na náchylnost k trhlinám, což je větší přidáním vosku S, než přidáním vosku A. Nejvíce se jedná o spodní limit m-hodnoty teploty BBR. U zestárých vzorků obsahující 6 % vosku S se tato dolní mezní m-hodnota zvýšila přibližně o 15 °C, zatímco odpovídající vzrůst pro vzorky obsahující 6 % vosku A byl pouze 2 °C.

2.4.4 Vliv vybraných aditiv nízkoteplotních asfaltových směsí (WMA) na běžné polymerem modifikované asfalty (PMB) použité pro asfaltový koberec mastixový (SMA) [5]

Použití polymerem modifikovaných asfaltových pojiv v SMA směsích v silnicích a dálnicích s vysokou úrovní zatížení vozidly přináší řadu výhod. Směsi jsou charakterizovány vyšší odolností proti trvalým deformacím, dobrými protismykovými vlastnostmi a také potlačují hluk způsobený dopravou. Na druhou stranu SMA směsi s PMB vyžadují vyšší teploty během míchání, pokládky a zhutnění, aby byla zajištěna dostatečná přilnavost asfaltu ke kamenivu. [5, 31]

Tradiční technologické metody jsou obvykle energeticky náročné a představují zdroje skleníkových plynů a jejich uhlovodíkových sloučenin a emise výparů. Přestože podle nejnovější studie IARC nejsou výpary karcinogenní. Snížení potřebné pracovní teploty snižuje obě koncentrace a kvalitativní složení těchto par. Proto výroba WMA vyžaduje vhodné přísady (syntetické vosky, amidy mastných kyselin, atd.), které zajistí potřebnou viskozitu a dostatečnou přilnavost mezi kamenivem a pojivem navzdory nižší výrobní a teplotě pokládky. Asfaltové směsi typu WMA jsou vhodné zvláště z pohledu životního prostředí (nižší spotřeba energie v důsledku snížené teploty během výroby a pokládky, snížení emisí CO₂ a zápachu v obalovnách, snadnější recyklace recyklované asfaltové směsi) poskytují pomalejší stárnutí asfaltu a samotná pokládka může být prováděna při nižších teplotách. [5, 31]

2.4.4.1 Cíle článku [5]

Hlavním cílem této kapitoly je porovnání účinků několika přísad pro WMA na dvě různá PMB pojiva označená 25/55-55. Srovnání zahrnuje jak

empirické, tak funkční zkoušení asfaltových pojiv jako srovnání vlivů jednotlivých asfaltových pojiv na vybranou standardizovanou směs SMA 11+ se sníženou teplotou míchání o 20-25 °C ve vztahu k referenční směsi. [5]

Polo-teplé nebo teplé asfaltové směsi představují v dnešní době zavedený standard v silniční stavební praxi. Bohužel, Česká republika spolu s ostatními evropskými zeměmi stále nevyužívá nebo dokonce plně neoceňuje potenciál této nízkoteplotní směsi. Příčiny lze nalézt v mnoha oblastech, nedostatkem důvěry v inovativní technická řešení, hodnocení všech stavebních činností výhradně prostřednictvím hranice nejnižší ceny. Můžeme se setkávat s názorem, že snížení provozních teplot není pro veřejnost vůbec důležité. Pokud nebereme v úvahu společenskou zodpovědnost, každá entita v průmyslu má do jisté míry takové stanovisko, zvláště pokud studená směs neposkytuje žádnou přidanou hodnotu, což by mohlo být více kvalitou pokládání nebo zhutnění. Samozřejmě mohou být i další problémy v této oblasti týkající se výrobních limitů směšovacích zařízení než v budování silnic, zejména kvůli existenci tzv. "rosného bodu" a nebezpečí kondenzace a ucpání, zejména v mísící oblasti filtru. Nicméně nemohou působit jako argumenty, které by měly vést k nedostatečné podpoře polo teplé nebo teplé asfaltové směsi. Nakonec musí být vždy vytvořena potřebná energie. Generace používá především neobnovitelné zdroje, které však nejsou nekonečné, nemluvě o napjatém problému emisí skleníkových plynů. [5]

2.4.4.2 Rozsah experimentálního hodnocení PMB pojiv

Na základě zjištění získaných v rámci aktivit výzkumného centra CESTI v roce 2013, kdy došlo k 50/70 a 70/100 asfaltového pojiva byly hodnoceny v kombinaci s různými přísadami pro snížení viskozity nebo zlepšení povrchové aktivity. Posouzení vlivů různých přísad a aplikování řešení odpovídající pro výrobu teplých asfaltových směsí zahrnovaly srovnání různých typů polymerem modifikovaných pojiv. Kromě různých typů charakterizovaných různou klasifikací založenou na penetraci a bodu měknutí. Toto zahrnuje srovnání stejných typů PMB od dvou různých výrobců. Sada alternativ s různými typy přísad (buď syntetické vosky – FTP, RH, nebo nanochemické přísady) byly zvoleny pro použití v pojivech a zobrazeny v tabulce 7. [5]

Tabulka 7: Posuzovaná asfaltová pojiva dvou analyzovaných variant

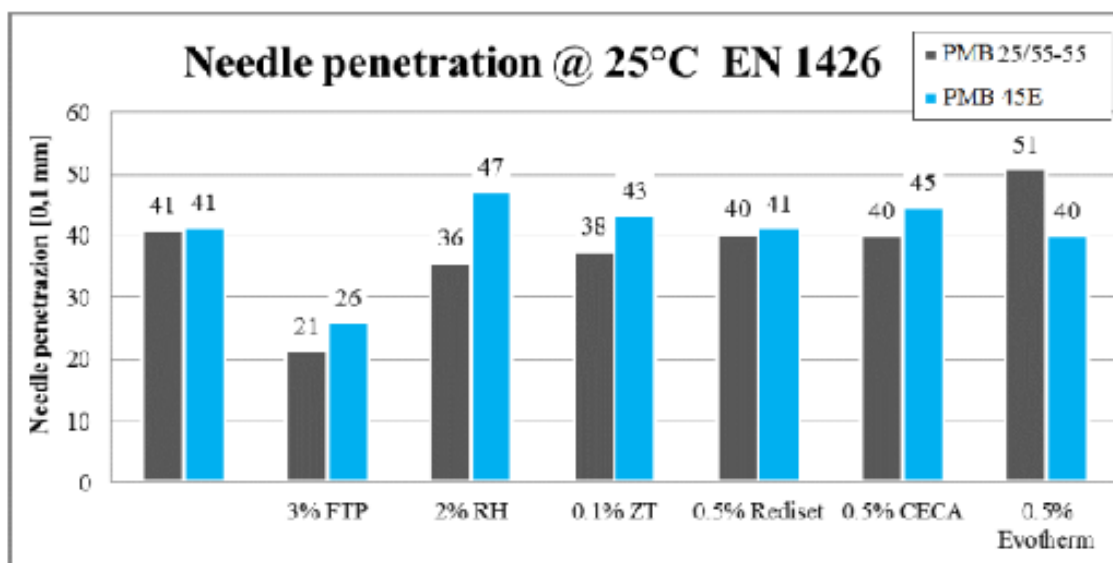
Asfalt	Označení	Asfalt	Označení
PMB 25/55-55	PMB 25/55-55	PMB 45E	PMB 45E
PMB 25/55 + FTP	3% FT paraffin	PMB 45E + FTP	3% FT paraffin
PMB 25/55 + RH	2% RH	PMB 45E + RH	2% RH
PMB 25/55 + Zycotherm	0,1% Zycotherm	PMB 45E + Zycotherm	0,1% Zycotherm
PMB 25/55 + Rediset	0,5% Rediset	PMB 45E + Rediset	0,5% Rediset
PMB 25/55 + CECA	0,5% CECA	PMB 45E + CECA	0,5% CECA
PMB 25/55 + Evotherm	0,5% Evotherm	PMB 45E + Evotherm	0,5% Evotherm

Pro první sadu byl vybrán standardní polymerem modifikovaný asfalt od zahraničního výrobce (PMB 25/55-55) a dále v kombinaci se šesti různými přísadami. Druhá sada je identický typ pojiva dodávaný jiným výrobcem se stejnými přísadami. Srovnání z hlediska standardních požadavků je na základě specifikací stanovených normou ČSN EN 14023 (asfalty a asfaltová pojiva – specifikace pro polymerem modifikované asfalty) pro jednotlivé typy PMB. Výše uvedený seznam obsahuje pouze charakteristiky požadované standardem, které byly měřeny u dotyčných asfaltových pojiv. Oscilační zkoušky v DSR a test MSCR, aby se ověřily funkční charakteristiky. [5]

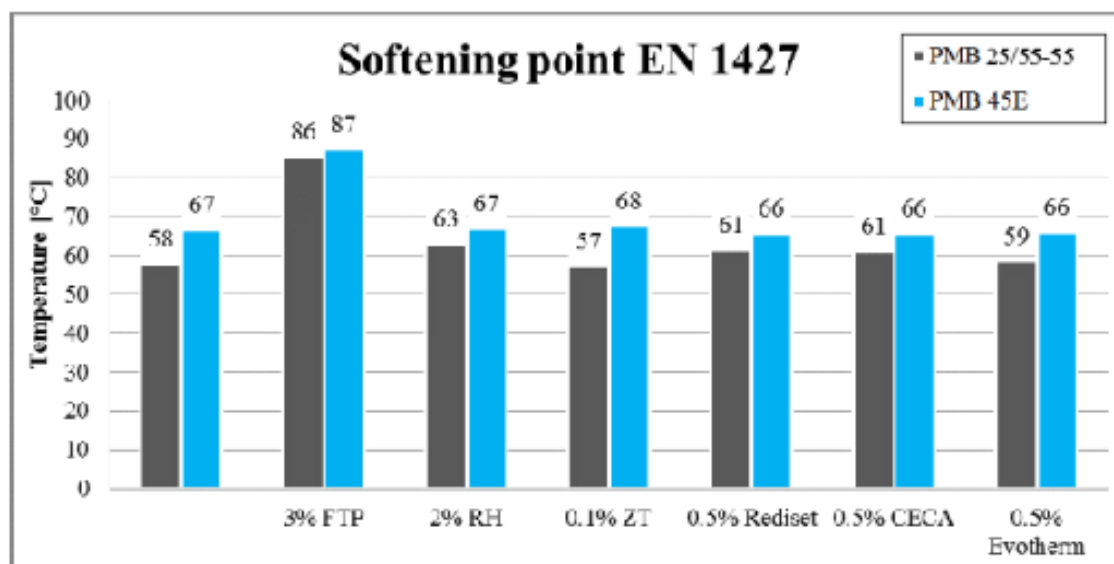
2.4.4.3 Výsledky posuzovaných variant PMB

Empirické testy

Podobně jako u vybraných zkušebních sestav jsou výsledky z důvodu srozumitelnosti rozděleny na empirické a funkční testy. Základní empirické vlastnosti, včetně vratné duktility jsou shrnuty v tabulce 8 a na obrázcích 13, 14 a 15. Společné porovnání penetrace a bodu měknutí prvních a druhých sad asfaltových pojiv můžeme stanovit následující závěry. Z hlediska penetrace jsou obě referenční pojiva identická, v případě bodu měknutí PMB 45E prokazuje vyšší hodnotu podle standardu specifikací. Pro PMB 25/55-55 se u tohoto pojiva rozšířil rozsah plasticity, lze očekávat, že asfaltu selepší odolnost proti deformaci při vyšších teplotách. To se projevuje také hodnotou penetračního indexu, která naznačuje nižší tepelnou citlivost. [5]



Obrázek 13: Penetrace jehlou PMB sad 1 a 2



Obrázek 14: Bod měknutí PMB sad 1 a 2

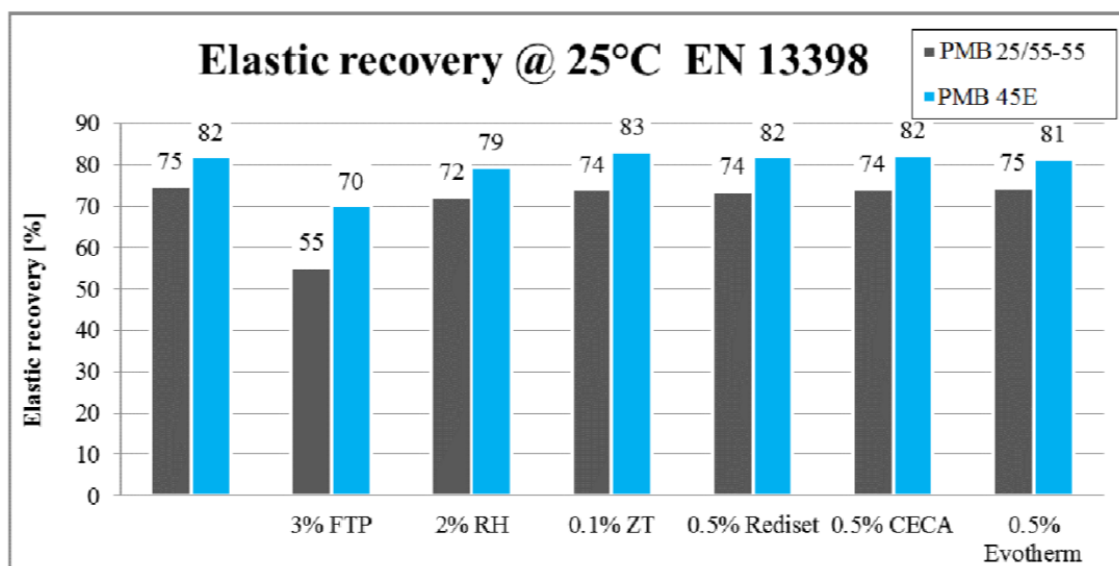
Z hlediska přísad používaných pro snížení viskozity nebo ke zlepšení povrchové aktivity lze usoudit, že aditiva Rediset LQ, Zycotherm a CECA nemají vliv na penetraci. Z hlediska bodu měknutí, kde je mírné zvýšení prokázáno pouze u PMB 25/55-55 s přísadou Rediset a CECA. Syntetické vosky mají jiný způsob chování. Zatímco FTP tradičně snižují penetraci (u variant odhadnutých téměř o polovinu), RH způsobuje v jednom případě jen nepatrný pokles proniknutí, nicméně v druhém případě poměrně nelogicky zvyšuje penetraci s rozdílem 6 penetračních jednotek. S respektem k bodu měknutí, FTP znovu potvrdil standardní očekávání s výrazným nárůstem ve vlastnostech což má za následek podstatné zvýšení samotného indexu penetrace (očekává se, že asfaltu se zlepší odpor k trvalým deformacím a

nižší tepelné náchylnosti). U přísad RH je výsledkem bodu měknutí mizivý efekt výsledkem penetrace. V případě PMB 25/55-55 je zvýšený bod měknutí ve srovnání s referenčním asfaltem, je logické a očekávané, protože hodnota penetrace byla mírně nižší, nicméně, bod měknutí zůstává prakticky nezměněný pro PMB 45E. Výsledky obou vlastností pro varianty s Evotherm je podobně dvojznačný. Vyšší hodnoty indexu penetrace pro jednotlivé varianty pojiv s PMB 45E odpovídají s vyšším indexem penetrace samotného pojiva. [5, 25]

Tabulka 8: Výsledky empirických testů PMB

Asfaltové pojivo	Penetrace	Bod měknutí	Index penetrace	Vratná duktilita
	[0,1 mm]	[°C]	[-]	[%]
PMB 25/55-55	41	57,8	0,1	74,9
PMB 25/55 + FTP	21	85,4	3	55,2
PMB 25/55 + RH	36	62,8	0,8	72,3
PMB 25/55 + Zycotherm	38	57,0	-0,2	74,1
PMB 25/55 + Rediset	40	61,2	0,8	73,6
PMB 25/55 + CECA	40	61,2	0,7	74,3
PMB 25/55 + Evotherm	51	58,4	0,8	74,6
PMB 45E	41	66,6	1,8	81,8
PMB 45E + FTP	26	87,2	3,7	70,0
PMB 45E + RH	47	66,8	2,2	79,3
PMB 45E + Zycotherm	43	67,4	2,1	83,1
PMB 45E + Rediset	41	65,8	1,6	81,8
PMB 45E + CECA	45	65,6	1,8	82,3
PMB 45E + Evotherm	40	66,0	1,6	81,3

Vratná duktilita představuje rychlý a jednoduchý test, kde lze výsledky použít jako indikátor úrovně elasticity modifikovaného asfaltového pojiva. Hodnoty získané pro jednotlivé vyhodnocené verze PMB jsou zobrazeny na obrázku 15. Z pohledu posuzování obou PMB sad je zřejmé, že vratná duktilita je ve všech případech lepší pro varianty s PMB 45E, kde byly dosaženy hodnoty > 80 %. Hodnoty variant s PMB 25/55-55 jsou průměrně o 9 % nižší. S výjimkou přísady FTP, zbývající přísady nemají vliv na výsledky vratné duktility. Při použití FT parafinu se vratná duktilita sníží o 15-25 % zatímco vyšší pokles byl zaznamenán v kombinaci s PMB 25/55-55. [5, 25]



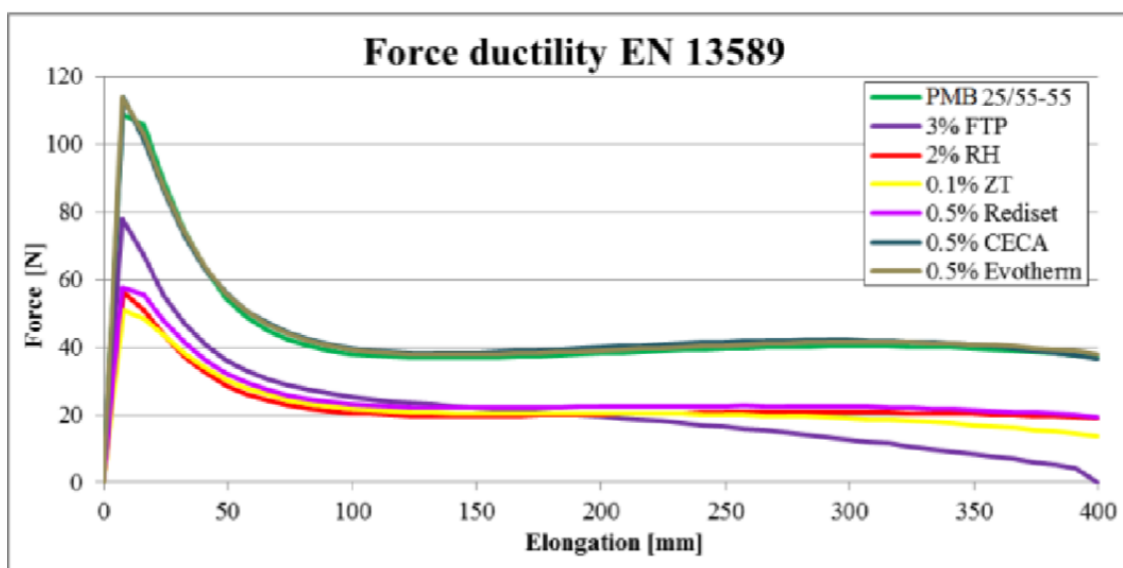
Obrázek 15: Vratná duktilita PMB pojiv sad 1 a 2

Již dlouho používanou zkouškou pro PMB je metoda silové duktility, při níž je asfaltové vlákno napínáno na protažení 400 mm pod stanovenou teplotou. V tomto ohledu je potřeba zdůraznit, že teplota, pod kterou zkouška probíhala, není totožná pro všechny testovaná pojiva. Zkoušky byly zahájeny s teplotou 5 °C, pokud ovšem dva zkušební vzorky selhaly před dosažením 400 mm, teplota vody byla zvýšena o 5 °C. Výsledné hodnoty uvedené v tabulce 9 představují střední hodnotu alespoň dvou platných měření, teplota, pod kterou se podmínka splnila je uvedena pro každou posuzovanou variantou. Jednotlivé sloupce představují hodnoty deformace energie (E_s = deformační energie při dosažení maximální síly F_s ; $E_{0,2}$ = deformační energie po prodloužení 200 mm; $E_{0,4}$ = deformační energie po prodloužení na 400 mm a E_{2-4} = deformační energie připisovaná na interval prodloužení mezi 200 mm a 400 mm). Deformační energie E_s může být také definována jako energie asfaltového pojiva, která ovlivňuje její odolnost proti prasknutí. Čím vyšší je energie, tím větší je pravděpodobnost, že asfaltové pojivo bude mít lepší odolnost proti deformaci. V tomto ohledu byly nejvyšší hodnoty dosaženy pomocí PMB 25/55-55. Obě varianty s přísadou CECA a v zásadě také obě varianty s přísadou Evotherm MA3. To se také odráží v nejvyšší hodnotě síly F_s . Pojiva byla testována při teplotě 5 °C a 10 °C. Jediný případ, kdy měření bylo provedeno při teplotě 15 °C bylo u pojiva PMB 25/55-55 + FTP. Z pohledu E_{2-4} hodnoty deformace odpovídají. [5]

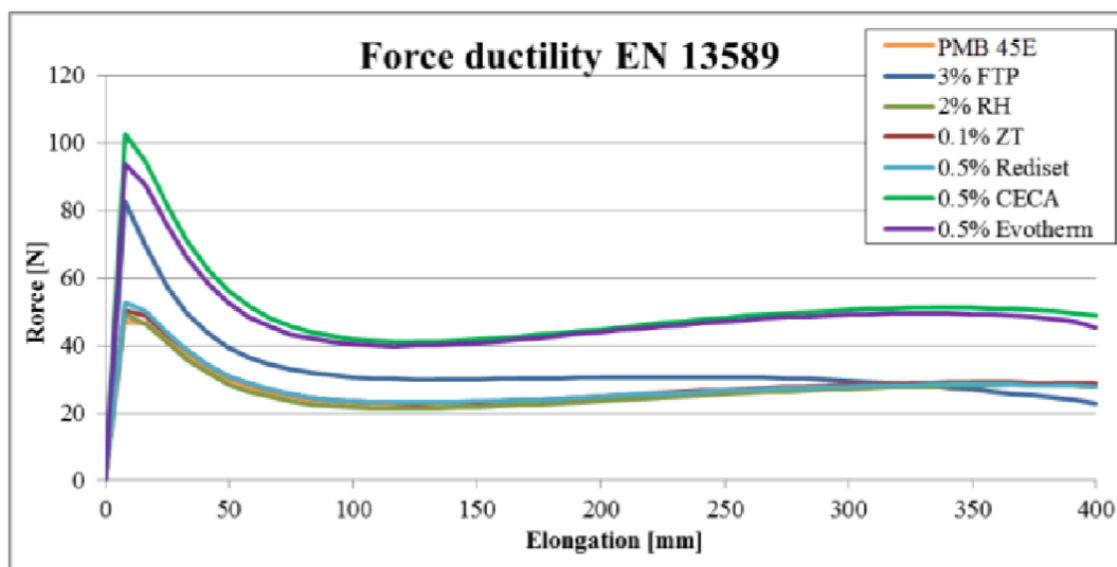
Tabulka 9: Výsledky silové duktility posuzovaných pojiv

Asfaltové pojivo	Síla F_s	Deformační energie				Teplota T
		E_s	$E_{0,2}$	$E_{0,4}$	E_{2-4}	
	[N]	[J]	[J]	[J]	[J]	[°C]
PMB 25/55-55	108,70	0,42	9,76	17,65	7,88	5
PMB 25/55 + FTP	78,00	0,30	6,22	8,67	2,45	15
PMB 25/55 + RH	56,10	0,22	5,1	9,17	4,07	10
PMB 25/55 + Zycotherm	51,00	0,20	5,21	8,89	3,67	10
PMB 25/55 + Rediset	57,73	0,22	5,65	10,03	4,38	10
PMB 25/55 + CECA	113,87	0,45	9,99	18,12	8,15	5
PMB 25/55 + Evotherm	113,67	0,44	9,96	18,05	8,09	5
PMB 45E	46,90	0,18	5,42	10,85	5,43	10
PMB 45E + FTP	82,53	0,33	7,37	13,08	5,71	10
PMB 45E + RH	49,00	0,20	5,23	10,58	5,35	10
PMB 45E + Zycotherm	50,57	0,20	5,58	11,14	5,56	10
PMB 45E + Rediset	52,53	0,21	5,63	11,09	5,47	10
PMB 45E + CECA	102,57	0,42	10,22	20,09	9,87	5
PMB 45E + Evotherm	93,80	0,38	9,73	19,29	9,56	5

Průběh diagramu silové duktility je naznačen na obrázku 16 a 17 ukazuje, že existuje podstatnější síla snižující se zvyšujícím se protažením v asfaltech s FTP. Významné rozdíly v křivkách nastávají v důsledku různých teplot, za kterých byla měření provedena. U vzorků s FTP v první sadě byla naměřena vysoká tahová síla na začátku prodloužení, ačkoliv tento test byl jediný měřený při 15 °C. S nižší teplotou, vzorky s FTP selhaly před dosažením stanoveného prodloužení, to naznačuje špatné tvárné vlastnosti, které zdůrazňují potřebu řádného ověření pojiva a následně chování asfaltové směsi v rámci nízkoteplotního rozsahu. Podobné vysoké tahové síly jsou také uvedeny pro vzorek FTP v sadě 2. [5]



Obrázek 16: Diagram silové duktility PMB pojiv sady 1



Obrázek 17: Diagram silové duktility PMB pojiv sady 2

2.4.4.4 Dynamická viskozita

Dynamická viskozita je důležitá hodnota pro účely popisu zpracovatelnosti asfaltu. Charakteristickým znakem je také důležité z pohledu transportu a manipulace asfaltu např. na obalovnách. Na základě tohoto důvodu, vzorky asfaltu jsou porovnány při teplotě nejméně 135 °C a 150 °C k měření nebo konverzi dokončenému při smykové rychlosti $6,8 \text{ s}^{-1}$ [32, 45]. Měří se také měření pro jiné smykové rychlosti a pro teplotní rozsah 100-150 °C, který umožňuje zobrazit křivky toku viskozity [45]. Výsledky vyhodnocení dynamické viskozity jsou uvedeny v tabulce 10. Test dynamické viskozity definovaný pro smykovou rychlost $6,8 \text{ s}^{-1}$ bylo podle očekávání, přičemž nejnižší hodnota byla demonstrována variantami pojiv s FTP (v případě PMB 25/55-55, snížení viskozity min. 35%, v případě PMB

45E nejméně o 22 %). Účinky zbývajících přísad nejsou příliš významné. Zajímavé hodnoty dynamické viskozity byly zaznamenány u PMB s přísadami RH, která by měla fungovat podobně jako parafín FT. V případě PMB 25/55-55 se viskozita mírně zvýšila ve srovnání s referenčním pojivem, to může být považováno za ne zcela důvěryhodný výsledek. Kontrastně, aplikace s PMB 45E se zaznamenanou viskozitou sniženou na úroveň srovnatelnou s přísadami FTP. [5]

Tabulka 10: Hodnoty dynamické viskozity při smykové rychlosti $6,8 \text{ s}^{-1}$

Asfaltové pojivo	Dynamická viskozita η T	
	135 °C	150 °C
	[Pa·s]	[Pa·s]
PMB 25/55-55	41	57,8
PMB 25/55 + FTP	21	85,4
PMB 25/55 + RH	36	62,8
PMB 25/55 + Zycotherm	38	57,0
PMB 25/55 + Rediset	40	61,2
PMB 25/55 + CECA	40	61,2
PMB 25/55 + Evotherm	51	58,4
PMB 45E	41	66,6
PMB 45E + FTP	26	87,2
PMB 45E + RH	47	66,8
PMB 45E + Zycotherm	43	67,4
PMB 45E + Rediset	41	65,8
PMB 45E + CECA	45	65,6
PMB 45E + Evotherm	40	66,0

2.4.4.5 Oscilační test a stanovení komplexního modulu ve smyku

Funkční testy představují obecný trend, který umožňuje lepší a komplexnější předpovědi chování asfaltu a asfaltové směsi. V oblasti asfaltových pojiv mohou reologické vlastnosti při středních a vysokých provozních teplotách být určeny pomocí široké škály zkušebních metod, které určují komplexní smykový modul G^* , fázový úhel δ nebo dynamická viskozita a smyková odolnost materiálu za použití dynamického smykového reometru (DSR) pro tepelné rozsahy dosahující od -30 °C do 200 °C . Užší intervaly, například $20\text{-}60 \text{ °C}$, jsou obvykle zvoleny ve vztahu ke středním nebo vyšším teplotám vyskytující se na silnicích během provozu. [5]

Obvyklá oscilační zkouška se provádí za konstantní smykové rychlosti (zvolená hodnota $\tau = 2000 \text{ Pa}$) ve zvoleném intervalu frekvence, které se nazývají frekvenční stupně (frequency sweep – FS). Zkouška je určena k ověření chování asfaltových pojiv při různých teplotách a frekvencích nebo

trvání zatížení, které by mohly simulovat různé složení a rychlosti vícenásobné namáhání v činnosti, jak se následně vyskytuje v silnicích. U dotýčných pojev byly zvoleny frekvence v rozmezí 0,1 – 10 Hz. Na základě dřívějších zjištění a závěrů US SHRP, hodnota 1,59 Hz má velký význam (podle nomogramu Van der Poel, zhruba odpovídá smykový efekt provozní zátěži při rychlosti 90 km/h nebo trvání zatížení 0,13 s). Výsledná hlavní charakteristika komplexního modulu ve smyku popisuje zejména odolnost proti trvalým deformacím a definuje únavové chování materiálu. Měření dynamického modulu dále vytváří komplexní hodnotu, také viskózní a elastické chování asfaltu založené na fázovém úhlu při změně teploty a frekvence, to pokrývá širokou škálu možných podmínek, kterým je asfalt vystaven. V případě následné transformace dat, například pro vybranou teplotu, čas a teplotu princip superpozice umožňuje získat hlavní křivku. [5, 29]

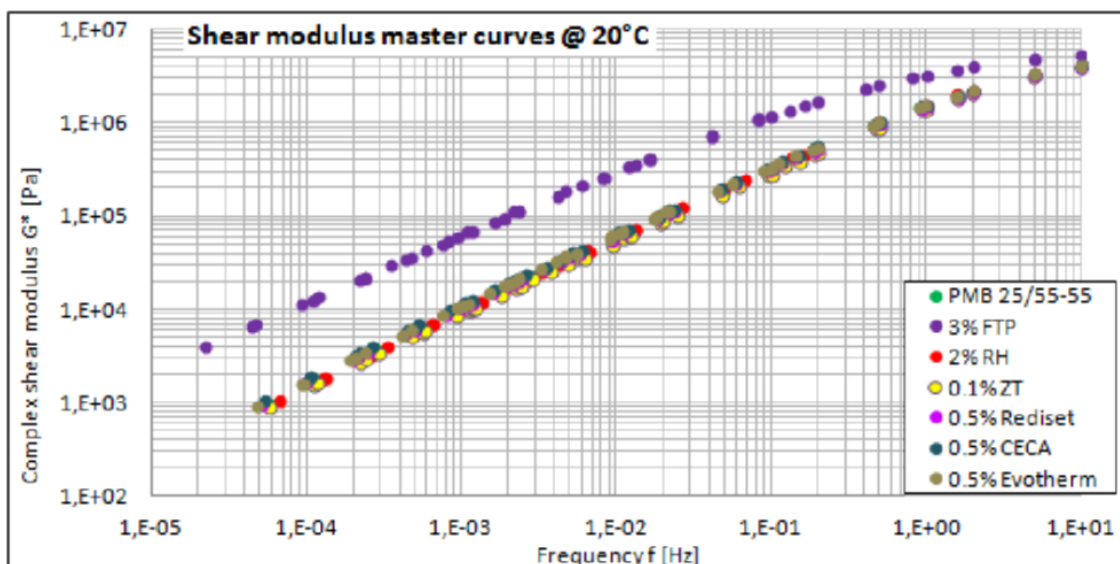
Tabulka 11 shrnuje hodnoty komplexního modulu ve smyku G^* , fázového úhlu a charakteristik $G^*/\sin\delta$ nebo $G^*\times\sin\delta$. Hodnoty jsou uvedeny pro zkušební teploty 40 °C a 60 °C. Byla provedena měření s geometrií deska a deska (PP25) s mezerou 1 mm. [5]

Tabulka 11: Hodnoty komplexního smykového modul při teplotách 40 a 60 °C

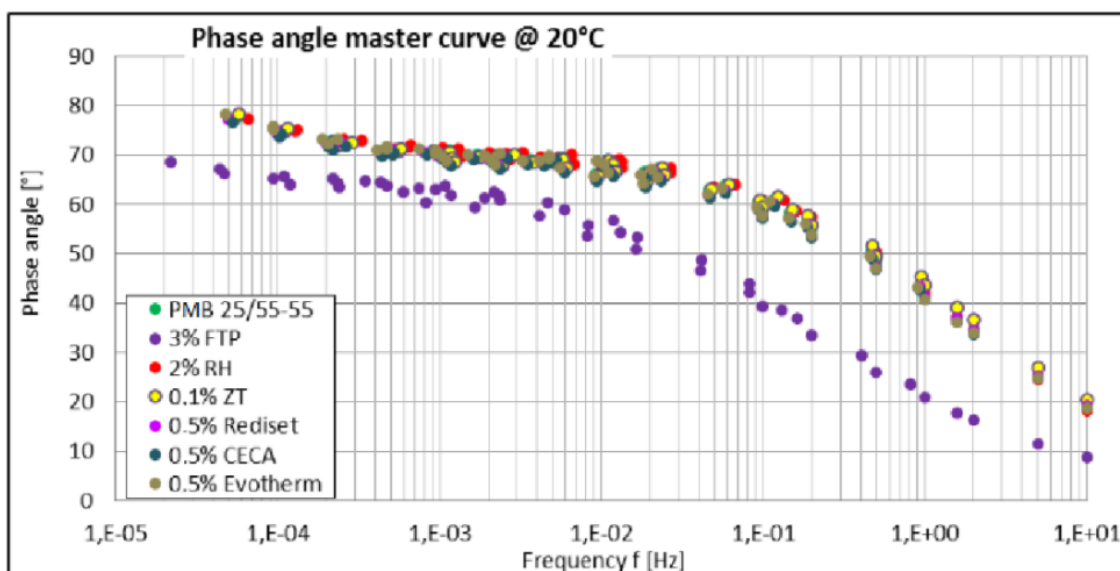
Asfaltové pojivo	1,59 Hz T= 40 °C				1,59 Hz T= 60 °C			
	G^* [kPa]	δ [°]	$G^*/\sin(\delta)$ [kPa]	$G^*\times\sin(\delta)$ [kPa]	G^* [kPa]	δ [°]	$G^*/\sin(\delta)$ [kPa]	$G^*\times\sin(\delta)$ [kPa]
PMB 25/55-55	93,8	66,6	102,2	86,1	9,5	71,1	10,0	9,0
PMB 25/55-55 FTP	351,0	54,4	431,7	285,4	29,8	64,8	32,9	27,0
PMB 25/55-55 RH	104,0	66,8	113,1	95,6	10,2	71,4	10,8	9,7
PMB 25/55-55 Zycotherm	86,2	66,3	94,1	78,9	8,6	70,7	9,1	8,1
PMB 25/55-55 Rediset	95,5	65,5	104,9	86,9	8,9	70,6	9,4	8,4
PMB 25/55-55 CECA	101,2	65,1	111,5	91,8	9,9	70,0	10,5	9,3
PMB 25/55-55 Evotherm	95,8	66,0	104,8	87,5	8,8	71,2	9,3	8,3
PMB 45E	131,0	62,7	147,4	116,4	13,4	66,6	14,6	12,2
PMB 45E FTP	160,0	60,9	183,1	139,8	14,8	65,8	16,2	13,5
PMB 45E RH	67,6	66,0	74,0	61,7	7,3	68,6	7,9	6,8
PMB 45E Zycotherm	83,6	65,3	92,0	75,9	8,4	68,1	9,1	7,8
PMB 45E Rediset	90,5	65,0	99,9	82,0	9,1	68,1	9,8	8,4
PMB 45E CECA	104,9	65,0	115,7	95,0	10,4	68,9	11,1	9,7
PMB 45E Evotherm	99,0	64,8	109,4	89,5	8,9	68,3	9,5	8,2

Z hlediska hodnocení mohou být dynamická měření oscilací rozdělena do dvou přístupů provedení analýzy. V prvním případě byly vyhodnoceny hodnoty smykového modulu a fázového úhlu při frekvenci 1,59 Hz a pro dvě vybrané teploty. Získané výsledky jsou shrnuty v tabulce 5. Komplexní smykový modul G^* označuje celkovou odolnost materiálu proti deformaci. Nejvyšší hodnoty G^* a nejnižší hodnoty δ jsou dosaženy pomocí pojiva s přísadou FTP, proto se jeví jako pružnější a odolnější vůči trvalé deformaci při vyšších teplotách. V případě PMB 25/55-55 s 3 % FTP může být výsledek považován za extrémní zejména ve srovnání s poměrem stanoveným v jiném případě, kdy se použije pojivo PMB 45E. Některé výsledky prezentovány dříve je účinkem přísady RH, která v případě souboru 1 vede k mírnému zvýšení G^* při zachování fázového úhlu, kontrastně pro soubor 2, varianta s RH v podstatě zaznamená 50 % pokles v G^* . Podobně je účinek zbývajících přísad v obou sadách docela překvapivý, zatímco v sadě 1 zbývajících přísady ani nezlepší ani nezhorší hodnoty G^* a hodnota úhlu δ zůstane beze změn, v sadě 2 všechny zbývajících přísady vedou k nižší hodnotě G^* a mírně vyšší hodnotě δ jako kdyby použití přísady mělo negativní vliv na tuhost, zatímco pojivo ztrácí malou část jeho elasticity. Teoreticky je takové odlišné chování přísad jistě možné, obecná znalost reologie nebo mechaniky nedokáže vysvětlit pro tento druh materiálu. Navíc je pravděpodobné, že s těmito aspekty nebude souviset a v rámci chemického složení musí být prozkoumáno vysvětlení a případně odlišný účinek a spolupůsobení přísad pojiva, které jsou navzdory tomu, že jsou stejné klasifikace, materiály a použití elastomerů různých původů. [5]

Druhý zvolený přístup předpokládá, že frekvenční rozsahy oscilace budou dokončeny v teplotním rozmezí 20-60 °C s frekvencemi od intervalu 0,1-10 Hz. Následně se aplikuje výše zmíněný princip teplotní a časové superpozice a všechny naměřené hodnoty se vztahují ke zvolené teplotě, v případě výsledků to bylo 20 °C viz obrázky 18 a 19. Tato skutečnost umožňuje dobré posouzení deformačních účinků jednotlivých poživ v rámci širokého frekvenčního rozsahu, což nám dává příležitost interpretovat různé dopady zatížení a intenzity dopravy, které ovlivňují materiály v konstrukci vozovky. Grafické zobrazení použité v tomto případě se nazývá hlavní křivka. [5]



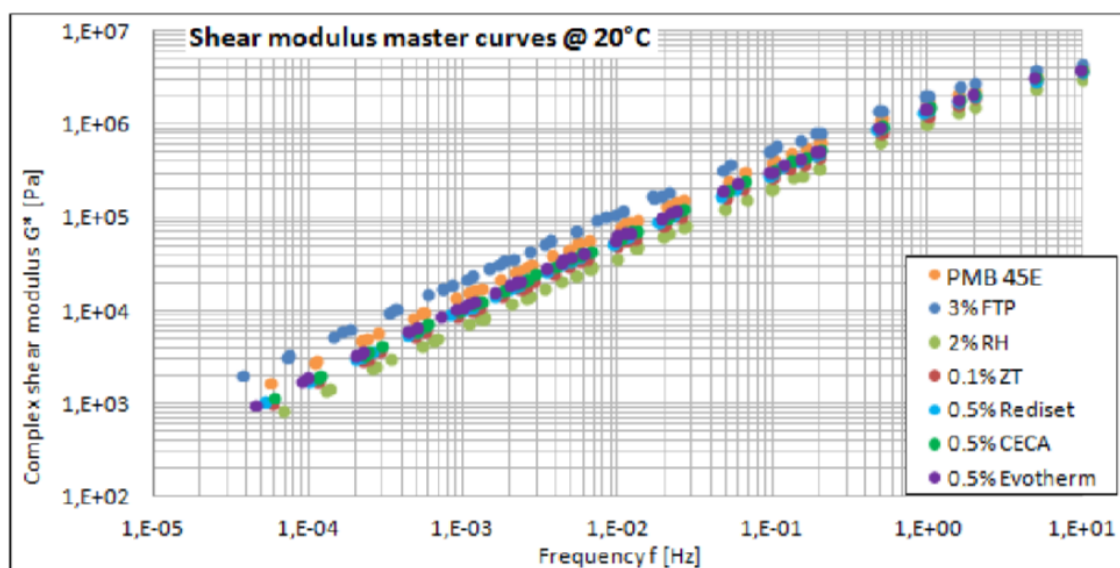
Obrázek 18: Hlavní křivky komplexního smykového modulu PMB pojiv sady 1



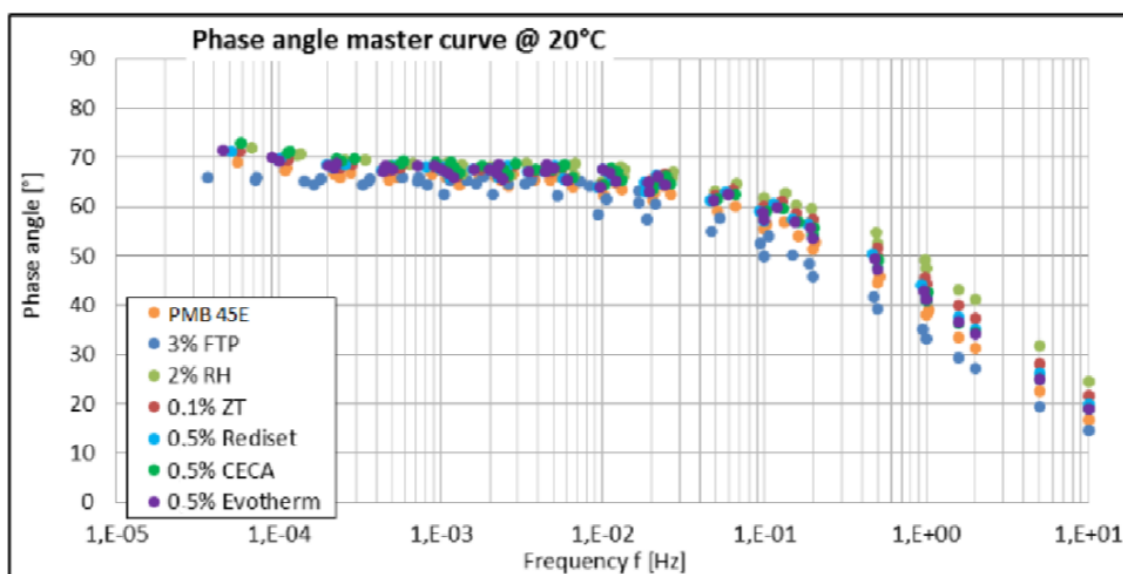
Obrázek 19: Hlavní křivky fázového úhlu PMB pojiv sady 1

Hlavní křivky také poskytují hodnoty pro frekvence mimo funkční rozsah zařízení. Nicméně, chování asfaltů může být vyjádřeno v jediném diagramu pro široký rozsah možných zatížení asfaltu ve vozovce. V případě sady 1 posuzovaných pojiv, obr 24 jasně naznačuje, že pojivo s FTP přísadou dosahuje významně vyšší hodnoty G^* , to znamená vyšší tuhost asfaltu v rámci celého frekvenčního rozsahu. Tento potenciál asfaltu byl již viditelný v předchozím výsledku, hlavní křivka potvrzuje jeho platnost. Pokud by byly křivky doprovázeny tangentami a jejich sklon použitý jako ukazatel tepelné citlivosti, varianty PMB s přídavkem FTP stále vykazují mírně lepší chování. Výše uvedené výsledky, zejména pokud jde o zlepšenou odolnost proti deformacím, také odpovídají výsledkům získaným z empirických testů. Zbývající pojiva v sadě 1 nemají zásadní rozdíly od základního pojiva 25/55-

55. [5]



Obrázek 20: Hlavní křivky komplexního smykového modulu PMB pojiv sady 2



Obrázek 21: Hlavní křivky fázového úhlu PMB pojiv sady 2

V případě asfaltových pojiv v sadě 2, jednotlivé varianty vykazují mírně odlišné chování od pohledu hlavní křivky. Vyšší odolnost proti deformaci je prokázána variantou s FTP s menším rozdílem oproti PMB 45E, rozdíl již není vidět pod frekvencí cca > 5 Hz. Proto je potvrzena nižší tepelná citlivost pojiva s touto přísadou, která byla objevena v předchozí sadě. Zbývající přísada vede k mírnému zhoršení hlavních křivek, pojivo s RH je charakterizováno křivkou s nejnižšími hodnotami. [5]

2.4.4.6 Multiple Stress Creep and Recovery Test

Posledním provedeným testem je multiple stress and recovery test asfaltových vzorků z hlediska odolnosti proti plastické deformaci, tzv. MSCR testu. Elastické zotavení slouží jako indikátor návratu vzorku do původního tvaru při napětí a několikanásobném zotavení. Procento se používá k určení stupně pružné odezvy a závislosti pevnosti u modifikovaných i nemodifikovaných asfaltových pojiv, je velmi dobrým indikátorem úrovně elasticity obou typů asfaltových pojiv. [5]

Metoda je vhodná pro hodnocení chování asfaltu při vysokých teplotách. Výhoda zkoušky oproti dříve popsané vratné duktilitě je rychlost zkoušky a možnost výběru různých teplot a různých úrovní zatížení pro test. Vysoká vratná duktilita modifikovaného pojiva má za následek mnohem menší trvalé deformace. Proto z hlediska hodnocení kvality se předpokládá, že asfalty s vysokými hodnotami vratné duktility jsou vhodnější a lepší. Současně se očekává, že takový pojiva dosáhnou nejnižší smykové poddajnosti. [5, 26]

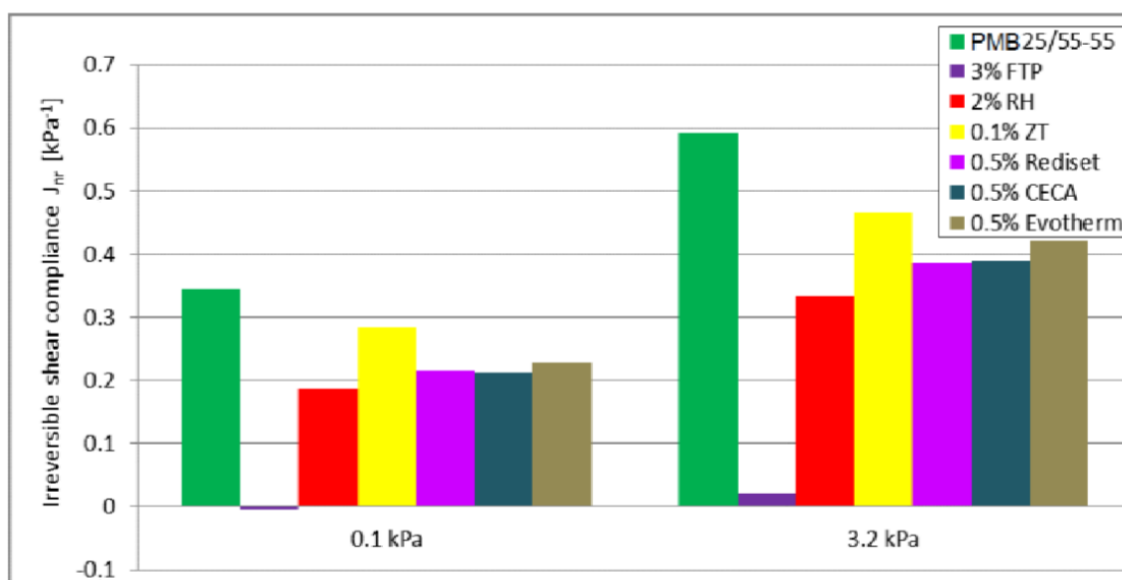
Tabulka 12: Výsledky zkoušky MSCR posuzovaných asfaltů

Asfalt	0,1 kPa			3,2 kPa		
	ϵ	R	J_{nr}	ϵ	R	J_{nr}
	[-]	[%]	[kPa ⁻¹]	[-]	[%]	[kPa ⁻¹]
PMB 25/55-55	2,39	50,16	0,34	33,21	27,87	0,59
PMB 25/55-55 + FTP	0,54	103,58	0,00	4,27	84,28	0,02
PMB 25/55-55 + RH	1,63	62,10	0,19	21,45	42,70	0,33
PMB 25/55-55 + Zycotherm	1,80	47,83	0,28	26,55	27,39	0,47
PMB 25/55-55 + Rediset	1,52	56,86	0,21	23,52	35,09	0,39
PMB 25/55-55 + CECA	1,89	58,29	0,21	24,48	37,41	0,39
PMB 25/55-55 + Evotherm	1,70	55,00	0,23	24,69	32,60	0,42
PMB 45E	1,03	13,50	-0,01	7,64	104,95	-0,01
PMB 45E + FTP	1,06	136,23	-0,07	4,86	138,71	-0,09
PMB 45E + RH	1,92	107,27	-0,03	11,20	107,30	-0,03
PMB 45E + Zycotherm	2,05	61,70	0,27	29,87	37,13	0,51
PMB 45E + Rediset	1,26	104,22	-0,01	10,83	100,57	0,00
PMB 45E + CECA	1,50	90,77	0,04	9,67	100,26	0,00
PMB 45E + Evotherm	1,36	117,10	-0,06	8,59	107,51	-0,03

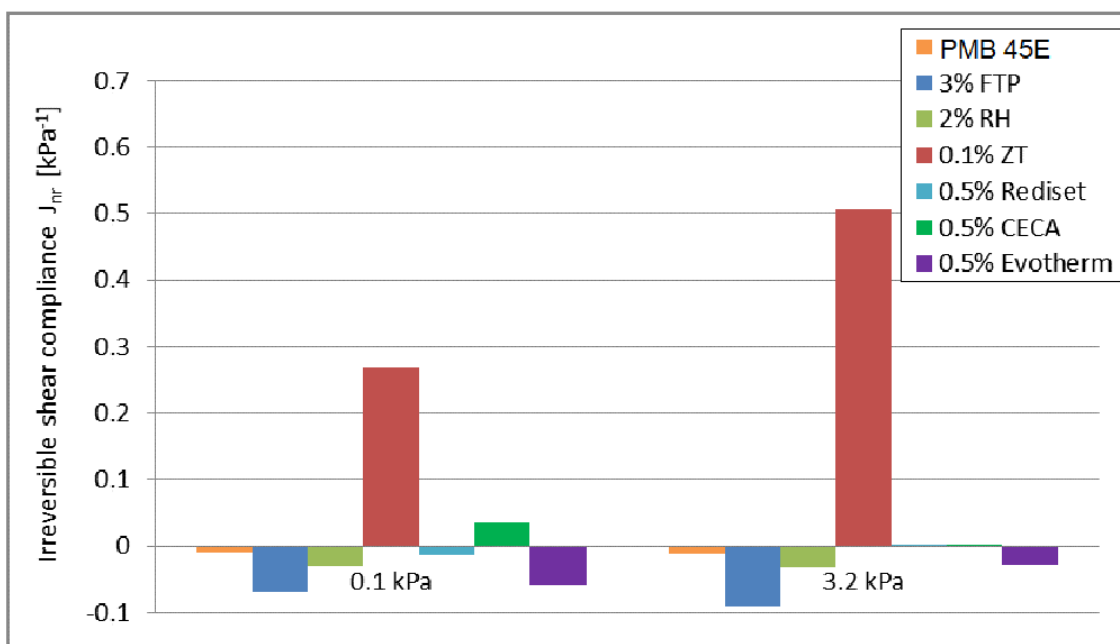
Zkouška popisuje chování asfaltu při zvolené teplotě 60 °C se souběžným smykovým namáháním 0,1 kPa a 3,2 kPa, vždy v deseti zatěžovacích cyklech pro každou úroveň napětí. Měření dosahuje hodnoty elasticity asfaltu, vyjádřené jako hodnota nevratné smykové poddajnosti J_{nr}

ve stejnou dobu. Čím je tato hodnota nižší, tím vyšší je poměr napětí, který pojivo může absorbovat, aniž by bylo příliš náchylné k plastické deformaci. Na základě současných poznatků je nutné, aby zatížené vozovky měly konečný $J_{nr} < 1 \text{ kPa}^{-1}$ pro napětí 3,2 kPa a teplotu 60 °C. Test byl dokončen pro všechny možnosti, výsledky jsou mediány získané nejméně ze dvou vzorků viz tabulka 9. [5, 26]

V sadě 1 jsou zdaleka nejlepší výsledky dosažené variantou PMB s FTP viz obr. 23. Nevratná smyková poddajnost je prakticky nula a pojiva vykazuje vysokou elastickou hodnotu zotavení. Zbývající asfalty vykazují podobné hodnoty, zjištění většího zlepšení oproti referenčnímu pojivu pro obě pozorované charakteristiky je překvapující. Ve všech případech byla hodnota J_{nr} pod tlakem 3,2 kPa podstatně nižší než požadovaná hodnota 1 kPa^{-1} . S výjimkou asfaltu se Zycothermem lze výsledky dosažené sadou 2 viz obr. 24 považovat za poměrně vyrovnané. Varianta s FTP opět ukázala mírné zlepšení. V celkovém poměru to dobře koreluje s porovnáním hlavní křivky. Neberou-li v úvahu výše uvedenou výjimku, asfalty vykazují prakticky nulovou smykovou poddajnost a vysoké elastické zotavení. Důvod pro výrazně horší výsledek varianty s Zycotherm není jasný, protože přísady obecně nemají vliv na odolnost proti trvalé deformaci. Pro toto pojivo se předpokládají další měření. Negativní měření byla opakovaně potvrzena opakovanými měřeními některých vzorků. Otázka spočívá v tom, zda jsou splněním požadavků tak nízké kvůli vysoké vratné duktilitě, že nelze dosáhnout potřebné přesnosti měření, nebo je to systémová chyba testovacího zařízení. [5]



Obrázek 22: Nevratná smyková poddajnost pro PMB asfalty sady 1



Obrázek 23: Nevratná smyková poddajnost pro PMB asfalty sady 2

2.4.5 Experimentální ověřování vybraného souboru nízkoviskózních přísad pro nízkoteplotní asfaltové směsi. [6]

2.4.5.1 Úvod

V tomto příspěvku bylo použito celkem 6 druhů vzorků: [6]

- Evotherm MA3
- Ceca Base RT
- Rediset LQ
- ZycoTherm
- Sasobit (FTP)
- IterLow T

Také bylo použito nízkoviskózní asfaltové pojivo 50/70 ECO2 firmy Total. Dále byla použita pojiva společností Paramo s označením NV40, NV41 a 407. [6]

Pro zkoušenou směs ACO 11+ s pojivem 50/70 byly zkoušeny vlastnosti typu: [6]

- Poměr ITSr – vodní citlivost asfaltové směsi
- Odolnost proti tvorbě trvalých deformací
- Zkouška relaxace – odbourání tahových napětí
- Tuhost směsi při různých teplotách
- Stanovení dynamického komplexního modulu
- Stanovení odolnosti proti šíření trhlin

Množství přísad ve směsi se řídilo dle doporučení výrobců. V první fázi se vybrala teplota hutnění 125 °C. Nejprve se zkušební tělesa z asfaltové směsi hutnila Marshallovým zhutňovačem a poté v další fázi pomocí gyrátoru. [6]

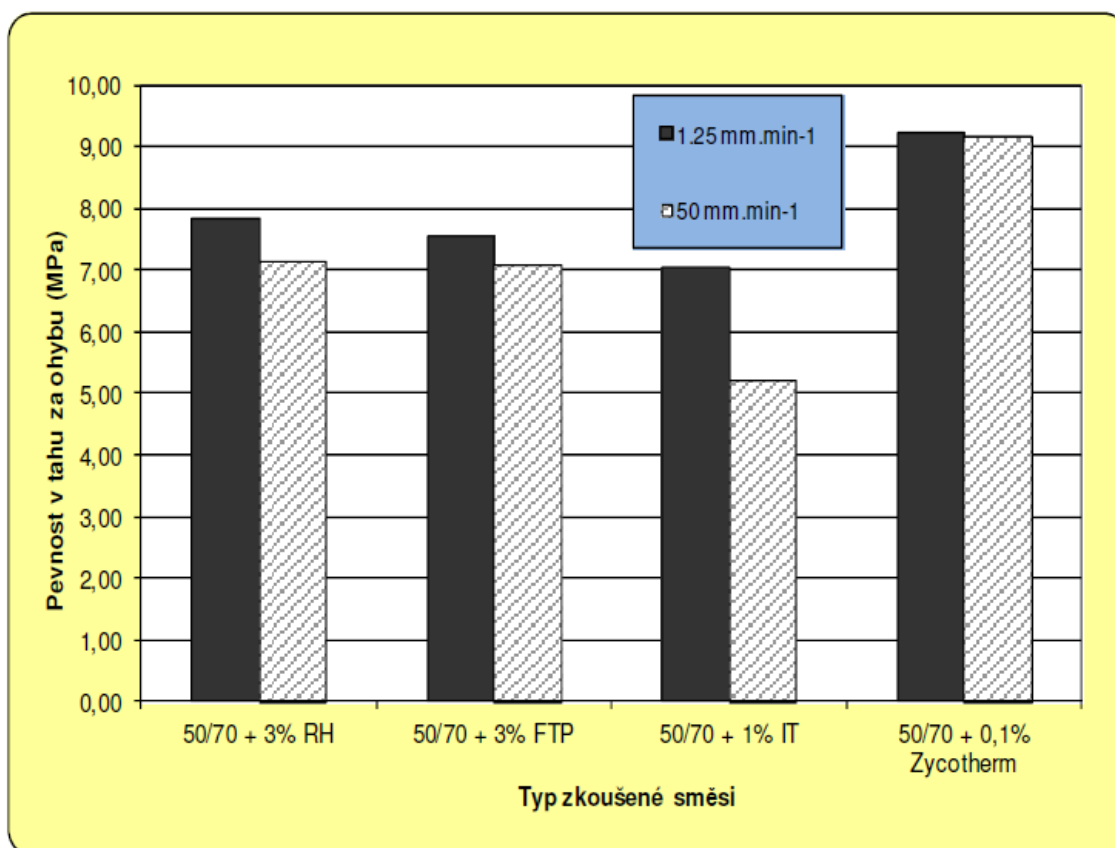
2.4.5.2 Výsledky

Stanovené množství asfaltového pojiva pro optimalizaci směsi bylo 5,2 % hmotnosti. Referenční směs byla vyrobena při teplotě 150 °C, pro ostatní varianty byla uskutečněna teplotní optimalizace s výrobou zkušebních těles. Teploty pro jednotlivé nízkoteplotní asfaltové směsi byly v rozmezí 120-130 °C. [6]

Tabulka 13: Výsledné hodnoty ze zkušebních těles

Směs	Teplota hutnění	Zhutněná objemová hmotnost	Maximální objemová hmotnost	Mezerovitost
	(°C)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(%)
ACO 11+ REF Paramo 50/70	150	2,673	2,745	2,61
ACO 11+ Paramo NV40	120	2,661	2,740	2,88
ACO 11+ Paramo NV41	130	2,639	2,747	3,93
ACO 11+ 407	120	2,676	2,740	4,16
ACO 11+ 3% RH	120	2,620	2,722	3,76
ACO 11+ 3% FTP	130	2,584	2,722	5,07
ACO 11+ 1% IT	130	2,570	2,722	5,57
ACO 11+ 0,1 Zycotherm	150	2,621	2,722	3,71
ACO 11+ ECO2 (130°C)	130	2,520	2,657	5,16
ACO 11+ ECO2 (120°C)	120	2,537	2,657	4,53

Z výše uvedených výsledků hlavně objemová hmotnost a mezerovitost je nejdůležitější hodnotou mezerovitost. Z tabulky je patrné, že kromě směsi s 3 % FTP ostatní směsi splňují požadavky pro směsi ACO 11+ dle ČSN EN 13108-1 (2,5-4,5 % objemu). U směsi s pojivem NV41, u které bylo doporučeno snížení teploty, došlo ke zvýšení mezerovitosti oproti referenční směsi. Z dané skutečnosti se upřednostňuje pojivo NV40. U pojiva 407 by neměla být hraniční teplota 130 °, aby se dosáhlo lepšího zhutnění a ke snížení mezerovitosti. [6]



Obrázek 24: Pevnost v tahu za ohybu zkoušených směsí

Z měření můžeme dojít k závěrům, že při použití nízkoviskózních přísad lze docílit u řady případů snížení pracovních teplot okolo 20-30 °C. U všech variant nebyl zjištěn problém se zhoršenou odolností směsi proti účinkům vody. U většiny vzorků vedou přísady ke zlepšení tuhostních parametrů, avšak nízkoteplotní charakteristiky nejsou změněny. [6, 35]

2.5 Shrnutí poznatků z rešerší

Pro snížení viskozity asfaltových pojiv se používají vosky získané zpracováním hnědého uhlí, syntézou syntézního plynu a také minerální látky jako jsou zeolity. Vosky se aplikují přímo do míchačky obalovny nebo je lze přímo namíchat do asfaltu v rafinérii a dopravit na obalovnu jako hotový výrobek. Dávkování vosků do asfaltů je výrobcí vosků limitováno na množství 3 % hmotnosti asfaltového pojiva.

Z reologie asfaltů s vosky lze dojít k závěrům, že vosky mohou způsobovat náhlý pokles viskozity vlivem tavení krystalického vosku, zvýšení křehkosti, snížení tažnosti a špatné přilnavosti asfaltu ke kamenivu. Parafinové vosky snižují nízkoteplotní vlastnosti asfaltů a také tuhost asfaltů. Při použití FT parafinů dochází ke zvýšení tuhosti a pružnosti asfaltů, ale snižuje se vratná duktilita až o 25 %.

Použitím vosků lze snížit výrobní teplotu asfaltové směsi až o 30 °C.

Asfalty, které obsahují vosky, se vyznačují vyšším bodem měknutí oproti jejich původním pojivům, do kterých byly vosky přidány. Tato vlastnost má výhodu, jelikož se rozšiřuje obor použitelnosti asfaltového pojiva a tím se zvyšuje odpor proti vzniku trvalých deformací při vysokých teplotách.

Použití vosků může v asfaltové směsi způsobit náhlé zvýšení viskozity a zhoršení hutnění směsi. Vosky, které krystalizují při teplotách nad 60 °C, vykazují největší ztužující efekt v asfaltovém pojivu a zlepšují odolnost proti tvorbě trvalých deformací. Ve většině případů asfaltová pojiva s vosky vykazují větší smluvní energii v silové duktilitě oproti běžným asfaltům a tím zajišťují větší soudržnost a tažnost pojiv. Vosky většinou negativně ovlivňují nízkoteplotní vlastnosti asfaltových pojiv, jelikož je narušena jejich vnitřní stabilita a asfaltová pojiva se více stávají náchylná na křehký lom.

Použitím asfaltových pojiv s vosky v asfaltových směsích lze zvýšit jejich zpracovatelnost i při nižších výrobních a provozních teplotách, než se zvýší viskozita z důvodu krystalizace vosku a tím také ztužení směsi a získání větší odolnosti proti tvorbě trvalých deformací. Asfaltové směsi pak mohou být křehčí a náchylnější na vznik trhlin při nízkých teplotách.

3 Cíle diplomové práce

V několika posledních letech, kdy se všeobecně začaly prosazovat přísnější kritéria jak z ekonomického, ekologického a zdravotního hlediska, postihla tato zpřísněná kritéria i silniční stavitelství. Využití nízkoteplotních silničních asfaltů i polymerem modifikovaných asfaltových pojiv může pomoci tato kritéria splnit. Tato pojiva jsou charakterizována svojí nízkou viskozitou, umožňující vyrábět a pokládat asfaltové směsi při nižších teplotách. Při výrobě asfaltových směsí při použití těchto pojiv lze snížit teplotu ohřevu pojiva s následkem nižší energetické náročnosti obaloven a také nižší produkci CO₂. Rovněž klesá teplota pokládky těchto směsí, takže výpary z pokládky asfaltových vrstev nejsou tolik škodlivé pro pracovníky.

Tato diplomová práce reaguje na vznik nové normy ČSN 65 7222-3 Asfalty a asfaltová pojiva – Silniční modifikované asfalty – Část 3: Speciální polymerem modifikované asfalty. Do této normy byly zahrnuty některé zkušební postupy, se kterými je v ČR získáno doposud málo zkušeností.

Cílem diplomové práce je ověřit možnosti aplikace některých laboratorních zkoušek, které jsou v normě ČSN 65 7222-3 zahrnuty, pro hodnocení vlastností nízkoteplotních asfaltových pojiv. Pro tuto práci bylo zvoleno pět nízkoteplotních pojiv, která byla podrobena sérii zkoušek jak empirických tak funkčních. Pro srovnání byly zkoušky provedeny i na běžném polymerem modifikovaném asfaltu třídy PMB 25/55-60 specifikovaném podle normy ČSN 65 7222-1 a na silničním asfaltu třídy 50/70, specifikovaném normou ČSN 65 7204.

Dalším cílem bylo popsat vliv stárnutí na změnu vlastností výše uvedených pojiv. Zkoušení asfaltových pojiv proto bylo prováděno na čerstvých (nezestárých) pojivech, pojivech po krátkodobém stárnutí metodou RTFOT a po dlouhodobém stárnutí metodou RTFOT+PAV. Všechny zkoušky byly provedeny v silniční laboratoři Ústavu pozemních komunikací, kromě metody PAV, která byla provedena ve výzkumné laboratoři společnosti Eurovia.

4 Použité metody

4.1 Stanovení penetrace jehlou podle ČSN EN 1426

Postup stanovení penetrace jehlou je popsán v normě ČSN EN 1426 [7]. Penetrace jehlou je základní parametr pro stanovení gradace asfaltových pojiv. Penetrací jehlou se měří průnik jehly do vytemperovaného vzorku při teplotě 25 °C po dobu 5 s a s aplikováním zatížení 100 g závaží na penetrační jehlu.

Zkoušený asfalt se nechá zahřát maximálně na 100 °C nad očekávaný bod měknutí [7] a naplní se s ním dvě penetrační misky s minimálním množstvím 100 g asfaltu. Tyto penetrační misky se nechají schladit na laboratorní teplotu a poté se umístí do temperační lázně po dobu 90 minut a teplotě 25 °C. Tento vytemperovaný vzorek se umístí do větší misky s vodou vytemperovanou na stejnou zkušební metodu. Vzorek se umístí pod penetrometr na kterém je uchycena očištěná penetrační jehla. S penetrační jehlou se přiblíží k povrchu zkoumaného vzorku a vynulují hodnoty na posuvném měřidle. Penetrační jehla se nechá vniknout do vrstvy asfaltu po dobu 5 s a zatížení 100 ± 10 g [7]. Po provedeném zkušebním vpichu se odejme jehla a očistí se. Pro další vpich je nutné vybrat místo, které je od původního místa vpichu vzdálené min 10 mm ve všech směrech a 10 mm od stran penetrační misky [7]. Celkově se provedenou tři zkušební vpichy (pro ověření lze provést i čtyři vpichy).

Výsledek zkoušky je hodnota penetrace, která se vyjádří jako aritmetický průměr hodnot akceptovaných stanovení v desetinách milimetru zaokrouhlený na nejbližší celé číslo [7].



Obrázek 25: Penetrometr

4.2 Stanovení bodu měknutí dle ČSN EN 1427 – Metoda kroužek a kulička

Podstatou metody je stanovení teploty, při které dojde k propadnutí ocelových kuliček o vzdálenost $(25,0 \pm 0,4)$ mm umístěných na mosazných kroužcích vyplněných asfaltovým pojivem. Bližší popis metody je popsán v normě ČSN EN 1427. [8]

Postup zkoušky je takový, že mosazné kroužky, které jsou umístěny na odlévací destičce se vyplní asfaltovým pojivem s přebytkem. Po vychladnutí asfaltu se přebytek asfaltu seřízne pomocí nahřáté špachtle. Seříznuté kroužky se umístí do držáků a osadí se na ně středící prstence s ocelovými kuličkami. Celá tato sestava se umístí do kádinky s destilovanou vodou nebo glycerínem. Kádinka se sestavou se umístí do zařízení na kroužek a kuličku a nechá se provádět zkouška.

Výsledkem zkoušky je aritmetický průměr pro bod měknutí nižší nebo rovný 80 °C se bod měknutí vyjádří jako průměr teplot zaokrouhleny na nejbližší 0,2 °C. Pro bod měknutí nad 80 °C se bod měknutí vyjádří jako průměr teplot zaokrouhleny na nejbližší 0,5 °C. [8]



Obrázek 26: Zařízení pro metodu kroužek a kulička

4.3 Stanovení bodu lámavosti podle Fraasse dle ČSN EN 12593

Podstata metody je nalezení teploty, při které se objeví první prasklina na asfaltovém zkušebním vzorku.

Zkouška probíhá tak, že se před začátkem každého měření nachystají dva kovové plíšky z pružné oceli, které se mezi dvěma prsty stlačí, aby se vybrala ploška, na kterou se nanese vzorek asfaltového pojiva. Před nanesením vzorku asfaltového pojiva je nutné tyto plochy očistit od mastnot pomocí toluenu nebo trichloru. Z nádoby, kde je uskladněn asfalt je nutné navážít 410 ± 10 mg [9] vzorku asfaltového pojiva. Plíšek se umístí na magnetický podstavec na plotýnce a poté se vzorek pojiva umístí na plíšek a zahřívá se po dobu než je plíšek zcela pokryt rovnoměrnou vrstvou asfaltového pojiva. Při rovnoměrném pokrývání plíšku asfaltovým pojivem je nutné dbát na to, aby nevznikaly vzduchové bublinky, které by mohly způsobit oslabený průřez asfaltového vzorku. Po ochlazení asfaltového vzorku se pomocí manipulačních kleští umístí plíšek s asfaltem do ohýbacího zařízení. Do chladicího zařízení se nalije kapalina schopna odolávat nízkým teplotám, převážně líh. Následně na chladicí zařízení se umístí vnitřní zkumavka, do které se vloží ohýbací zařízení se zkoušeným vzorkem a teploměrem. Za pomoci suchého ledu se ochlazuje kapalina s rychlostí 1 °C/min [9]. Jakmile je teplota minimálně 8 °C nebo maximálně 12 °C [9] nad očekávaným bodem lámavosti začne se ohýbáním kovové

plíšku pomocí kličky na ohýbacím zařízení s rychlostí 1 s^{-1} [9] až na doraz a stejnou rychlostí zpět. Během ohýbání se sleduje vrstva asfaltu, zda-li nedojde k prasklině.

Výsledkem zkoušky je průměrná teplota, při které dojde k prasklině na dvou vzorcích asfaltu. [9]

Dle ČSN 65 7222-3 je pro speciální polymerem modifikované asfalty teplota bodu lámavosti podle Fraasse pro PMB 25/55-60 NT $\leq -10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a pro PMB 45/80-55 NT $\leq -12 \text{ }^{\circ}\text{C}$.



Obrázek 27: Zařízení pro stanovení bodu lámavosti [36]

4.4 Stanovení vratné duktility modifikovaných asfaltů dle ČSN EN 13398

Stanovení vratné duktility je definováno v normě ČSN EN 13398. Podstatou metody je protažení asfaltového tělíska na prodloužení 200 mm s následným přestřihnutím uprostřed pro získání dvou polovin vlákna. Po uplynutí 30 minut po přestřihnutí tělíska se změří vzdálenost mezi polovlákný a vyjádří se jako procento z délky protažení. [10]

Postup zkoušky je, že podkladní destičky se opatří separačním prostředkem, na které se umístí smontované formy na vratnou duktilitu. Do těchto forem se nalije asfaltové pojivo s mírným přebytkem asfaltového pojiva. Po ochlazení asfaltových poživ na laboratorní teplotu se přebytek asfaltového pojiva pomocí horké špachtle seřízne. Zkušební tělesa se umístí do vodní lázně duktilometru po dobu $90 \text{ minut} \pm 10 \text{ minut}$ při teplotě $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [10]. Po vytemperování se tělesa umístí do protahovacího zařízení duktilometru. Asfaltová tělíska se protahují na protažení 200 mm rychlostí $50,0 \text{ mm/min} \pm 2,5 \text{ mm/min}$. Po dosažení 200 mm se tato tělíska uprostřed přestřihnou pomocí nůžek. Po uplynutí 30 minut se pomocí pravítka změří vzdálenosti mezi polovlákný a vyjádří se k původnímu protažení 200 mm.

[10]

Vratná duktilita RE se vyjádří v procentech, zaokrouhlena na 1 % se vypočte podle následující rovnice [10]:

Rovnice 1: Výpočet vratné duktility

$$RE = \frac{d}{L} \cdot 100$$

Kde d - vzdálenost mezi polovlákný [mm]
L - protažení tělíska [mm]



Obrázek 28: Ovládání duktometru



Obrázek 29: Vzorky na vratnou duktilitu



Obrázek 29: Protažené vzorky



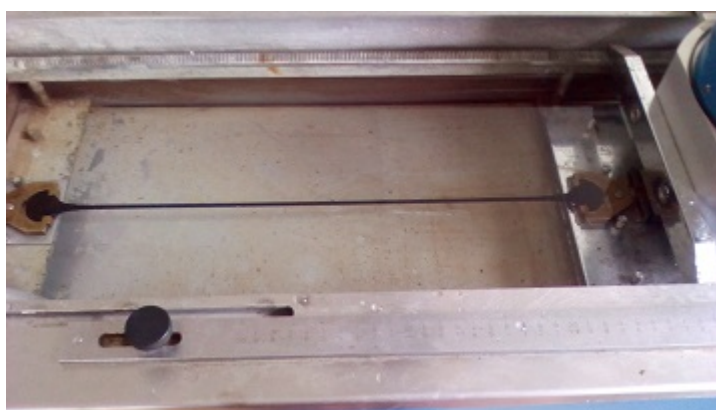
Obrázek 30: Přestřižené vzorky

4.5 Stanovení tažných vlastností modifikovaných asfaltů metodou silové duktility dle ČSN EN 13589

Metody je popsána v normě ČSN EN 13589. Podstatou metody je stanovení smluvní energie jako plocha pod křivkou pro protažení 200 mm do 400 mm. [11]

Asfaltové pojivo se nalije do forem pro silovou duktilitu s mírným přebytkem pojiva. Po ochlazení těles na laboratorní teplotu se tělesa seříznou a umístí se do vodní lázně duktilometru. Zkušební tělíska se nechají temperovat 90 minut $\pm$ 10 minut. Po vytemperování se tělíska protahují každé zvlášť rychlostí 50,0 mm/min $\pm$ 2,5 mm/min na protažení 400 mm při teplotě 10,0 °C $\pm$ 0,5 °C. Dojde-li při této teplotě ke křehkému lomu, umístí se do zařízení další vzorek do duktilometru. Nastane-li křehký lom i u tohoto vzorku přetemperuje se teplota na teplotu o 5,0 °C $\pm$ 0,5 °C vyšší. [11]

Výsledek (smluvní energie) se vypočítá jako plocha pod křivkou pro protažení 200 mm až 400 mm podle EN 13703. [11]



Obrázek 31: Vzorek protažen na 400 mm



Obrázek 32: Protahování vzorku

4.6 Stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu – Metoda RTFOT dle ČSN EN 12607-1

Popis metody je popsán v normě ČSN EN 12607-1. Pohybující se tenká vrstva asfaltového pojiva se ohřívá v sušárně při stanovené teplotě po danou dobu za konstantního přívodu vzduchu. Kombinovaný účinek tepla a vzduchu se stanoví vlastnostmi asfaltového pojiva, jako jsou penetrace podle EN 1426, bod měknutí podle EN 1427 nebo dynamická viskozita podle EN 12596 nebo EN 13302, které jsou měřené před zkouškou a po zkoušce. Referenční teplota této metody stárnutí je 163 °C. [12]

Do skleněných nádobek se nalije $(35,0 \pm 0,5)$ g vzorku. Volba počtu nádobek je závislá na množství plánovaných zkoušek. Nádobky s asfaltovým pojivem se vloží do vyhřátého držáku sušárny při zkušební teplotě tak, aby držák byl vyvážen. Otvory v držáku, jenž nejsou využity se vyplní prázdnými skleněnými nádobkami. Jakmile jsou nádobky v držáku, uzavřou se dvířka a spustí se otáčení držáku s frekvencí otáčení $(15,0 \pm 0,2) \text{ min}^{-1}$. Po spuštění otáčení držáku je nutné nastavení průtoku vzduchu $(4,0 \pm 0,2) \text{ l/min}$. Doba zkoušky je $(75 \pm 1) \text{ min}$. Po uplynutí zkušební doby se skleněné nádobky vyjmou ze sušárny a veškeré zestárnuté pojivo se přelije do jediné nádoby. [12]



Obrázek 33: Sušárna pro RTFOT



Obrázek 34: Držák pro skleněné nádoby sušárny RTFOT [37]

4.7 Urychlené dlouhodobé stárnutí v tlakové nádobě PAV dle ČSN EN 14769

Popis metody je definován v normě ČSN EN 14769. Tenká nepohyblivá vrstva pojiva se zahřívá při určité teplotě a za určitého tlaku vzduchu po danou dobu. Napodobují se tím změny, ke kterým dochází v pojivu během provozu vozovky. [13]

Nádoba PAV se předeheje na teplotu zkoušky. Miska se předeheje na teplotu zkoušky PAV, položí na váhy a naváží se do ní $50 \text{ g} \pm 0,5 \text{ g}$ pojiva. Pojivo musí pokrývat celou plochu dna misky. Držák misek se umístí do předeheřaté tlakové nádoby a teplota stárnutí se nastaví na požadovanou teplotu. Proces stárnutí asphaltových pojiv je složitý a mechanismus se mění se vzrůstající teplotou. Z toho důvodu je teplota temperování co nejnižší. Vyšší teploty mohou způsobit, že postup stárnutí není reprezentativní pro skutečné stárnutí. Teplota $110 \text{ }^{\circ}\text{C}$ se vymezuje jen k temperování pojiv určených pro oblasti vysokých teplot. Pojiva obsahující polymery se mohou vyznačovat separováním a/nebo degradací způsobem, který se nevyskytuje

při přirozeném stárnutí. Naplněné misky se umístí do držáku misek. Zkompleťovaný držák misek se umístí do tlakové nádoby. Proces vkládání do tlakové nádoby se provádí tak rychle, jak je to možné, aby se minimalizoval pokles teploty. Teplota a tlak se udržují po stanovenou dobu stárnutí. Po uplynutí předepsané doby stárnutí se pomalu uvolní vnitřní tlak v PAV prostřednictvím uvolňovacího ventilu pro pomalé uvolnění tlaku. Uvolňovací ventil se nastaví tak, aby pokles tlaku byl plynulý a k vyrovnání s atmosférickým tlakem došlo za 8 minut až 15 minut. Doba pro uvolnění tlaku se nepočítá do doby stárnutí 20 h nebo 65 h. V rámci této práce byla použita teplota 100 °C a doba 20 hodin. [13]

Po ukončení stárnutí se asphaltové pojivo přelije do jedné sběrné nádoby.



Obrázek 35: Zkušební nádoba PAV [38]

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

Postup metody stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu je definována v normě ČSN EN 14770. Měření se provádí pomocí dynamického smykového reometru a programu rSpace. Na zkušební vzorek se nechá působit oscilující smykové napětí a měří se vzniklá smyková deformace. Zkouška se provádí v oblasti lineárního viskoelastického chování. V rámci měření bylo v této práci použito dvou geometrií. Pro teploty od 10 °C do 40 °C s krokem 5 °C byla použita geometrie deska-deska průměru 8 mm a tloušťkou vzorku 2 mm a pro teploty 40 °C do 70 °C s krokem 5 °C byla použita geometrie deska-deska průměru 25 mm a tloušťkou vzorku 1 mm. Frekvenci zatěžování byla zvolena od 0,1 Hz do 10

Hz. [14]

Postup zkoušky spočívá v odlití zkoušeného asfaltového pojiva do forem s otvory po 8 mm a 25 mm. Do dynamického smykového reometru se vloží zkušební geometrie a nastaví se nulová mezera. Po nastavení nulové mezery se v programu rSpace zvolí zkušební metoda pro stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu. Nastaví se tloušťka vzorku, teplota vložení a teplota zkoušky. Teplota vložení vzorku se volí 50 °C pro geometrii 8 mm a 80 °C pro geometrii 25 mm. Po natemperování dynamického smykového reometru se vloží zkušební vzorek na dolní geometrii a nechá se zahřát. Po zahřátí se nechá sjet horní geometrie na zkušební vzorek a po stlačení se vzorek seřízne. Po správně seříznutém vzorku se nechá horní geometrie dosednout na výslednou tloušťku vzorku. Zkouška se zahájí při první zvolené teplotě s tím, že se začne na nejnižší frekvenci a pokračuje se k nejvyšší. Po dokončení zkoušení pro první zkušební teplotu se přejde na další zkušební teplotu rychlostí nepřesahující 5 °C za minutu. Zkouška pokračuje, dokud se nenaměří komplexní modul ve smyku mimo rozsah zvolené zkušební geometrie soupravy. [14]



Obrázek 36: Dynamický smykový reometr ústavu PKO



Obrázek 37: Zkušební vzorky pro DSR

4.9 Stanovení komplexního modulu ve smyku dle ČSN 65 7222-3 příloha A

Měření se provádí na dynamickém smykovém reometru v oscilačním režimu při použití geometrie deska – deska dle ČSN 65 7222-3 přílohy A. Zkouška se provádí v režimu řízeného přetvoření. Zjišťuje se teplota, při které dosáhne komplexní modul ve smyku hodnotu $G^* = 15$ kPa. Teplota zkoušky probíhá od 30 °C do 90 °C s krokem 10 °C. Frekvence, při které se provádí oscilační měření je 1,59 Hz. Při každé teplotě měření se změří deset hodnot komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu. [15]

Postup zkoušky spočívá v odlití zkoušeného asfaltového pojiva do forem s otvory průměru 25 mm. Do dynamického smykového reometru se vloží zkušební geometrie a nastaví se nulová mezera. Po nastavení nulové mezery se v programu rSpace zvolí zkušební metoda pro stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu. Nastaví se tloušťka vzorku, teplota vložení a teplota zkoušky. Teplota vložení vzorku se volí 80 °C. Po natemperování dynamického smykového reometru se vloží zkušební vzorek na dolní geometrii a nechá se zahřát. Po zahřátí se nechá sjet horní geometrie na zkušební vzorek a po stlačení se vzorek seřízne. Po správně seříznutém vzorku se nechá horní geometrie dosednout na výslednou tloušťku vzorku. Zkouška se zahájí při teplotě 30 °C s krokem po 10 °C. Zkouška je ukončena při teplotě 90 °C. [15]

Výsledkem zkoušky je teplota, při které je dosaženo $G^* = 15$ kPa. [15]

4.10 Stanovení komplexního modulu ve smyku dle AL BTSV (DSR)

Měření se provádí na dynamickém smykovém reometru v oscilačním režimu při použití geometrie deska – deska dle AL BTSV (DSR). Zjišťuje se teplota, při které dosáhne komplexní modul ve smyku hodnotu $G^* = 15$ kPa. Teplota zkoušky probíhá od 20 °C do 90 °C v režimu teplotní rampy s krokem 1,2 °C. Frekvence, při které se provádí oscilační měření je 1,59 Hz.

[16]

Postup zkoušky spočívá v odlití zkoušeného asfaltového pojiva do forem s otvory průměru 25 mm. Do dynamického smykového reometru se vloží zkušební geometrie a nastaví se nulová mezera. Po nastavení nulové mezery se v programu rSpace zvolí zkušební metoda pro stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu. Nastaví se tloušťka vzorku, teplota vložení a teplota zkoušky. Teplota vložení vzorku se volí 80 °C. Po natemperování dynamického smykového reometru se vloží zkušební vzorek na dolní geometrii a nechá se zahřát. Po zahřátí se nechá sjet horní geometrie na zkušební vzorek a po stlačení se vzorek seřízne. Po správně seříznutém vzorku se nechá horní geometrie dosednout na výslednou tloušťku vzorku. Zkouška se zahájí při teplotě 20 °C v režimu teplotní rampy po 1,2 °C. Zkouška je ukončena při teplotě 90 °C. [16]

Výsledkem zkoušky je teplota, při které je dosaženo $G^* = 15$ kPa. [16]

4.11 Stanovení teploty přechodu fáze T_{PF} dle ČSN 65 7222-3 příloha B

Stanovení teploty přechodu fáze se zjistí dle normy ČSN 65 7222-3 dle přílohy B. Měření se provádí na dynamickém smykovém reometru provedeném v rotačním režimu, při kterém se stanoví smykové napětí při zvolených teplotách od 150 °C do 70 °C s gradientem 0,02 °C/s a při nastavení konstantní hodnoty smykového spádu 2 s^{-1} . Za teplotu přechodu fáze se považuje teplota, při které dojde k výraznému nárůstu smykového napětí. [15]

Postup zkoušky spočívá v odlití zkoušeného asfaltového pojiva do forem s otvory průměru 25 mm. Do dynamického smykového reometru se vloží zkušební geometrie a nastaví se nulová mezera. Po nastavení nulové mezery se v programu rSpace zvolí zkušební metoda pro stanovení teploty přechodu fáze. Nastaví se tloušťka vzorku, teplota vložení a teplota zkoušky. Teplota vložení vzorku se volí 90 °C. Po natemperování dynamického smykového reometru se vloží zkušební vzorek na dolní geometrii a nechá se zahřát. Po zahřátí se nechá sjet horní geometrie na zkušební vzorek a po stlačení se vzorek seřízne. Po správně seříznutém vzorku se nechá horní geometrie dosednout na výslednou tloušťku vzorku 1 mm. [15]

Výsledkem je závislost smykového napětí na teplotě. Z průběhu se určí teplota, při které došlo k výraznému nárůstu smykového napětí. Jako teplota přechodu fáze T_{PF} se vyjádří jako průměr z dvou platných stanovení zaokrouhlených s přesností na 1,0 °C. [15]

4.12 Stanovení dynamické viskozity dle ČSN EN 13702

Dynamická viskozita se stanovuje pomocí dynamického smykového

reometru s programem rSpace a s geometrií kužel a deska s úhlem stoupání kužele 4 °, který zajišťuje stejnou smykovou rychlost na všech řezech kužele. [17]

Podstata metody je, že na vzorek, který je umístěn mezi geometriemi, je aplikováno napětí v rotačním režimu. Během měření jsou zaznamenány hodnoty smykového napětí τ a smykové rychlosti γ ze které se následně vypočítá hodnota dynamické viskozity μ .

Rovnice 2: Výpočet dynamické viskozity

$$\mu = \frac{\tau}{\gamma}$$

Kde τ - smykové napětí [Pa]
 γ - smyková rychlost [s^{-1}]
 μ - dynamická viskozita [$Pa \cdot s$]

Testované vzorky jsou zatěžovány smykovou rychlostí 1 s^{-1} až 100 s^{-1} a teplotou od 90 °C do 165 °C s krokem 15 °C. [17]

Postup zkoušky je, že se zkoušený asfalt nechá zahřát v laboratorní sušárně a poté se odlijí vzorky pojiva. Do reometru se umístí geometrie kužel a deska a nechá se temperovat na zkušební teplotu 90 °C, která je současně počátek zkoušky. Do této vytemperované geometrie se umístí vzorek pojiva a přebytek pojiva se ořízne. Zkoušený vzorek se nechá zatěžovat při všech teplotách a smykové rychlosti otáčením kužele. Na začátku zkoušky je nutné sledovat hodnoty dynamické viskozity a za předpokladu, že hodnota dynamické viskozity klesne o 5 % od nejvyšší hodnoty je nutné přetemperovat vzorek na další teplotu o 15 °C vyšší. [17]

Výsledkem zkoušky je viskozita při teplotě 135 °C a smykové rychlosti 1 s^{-1} .

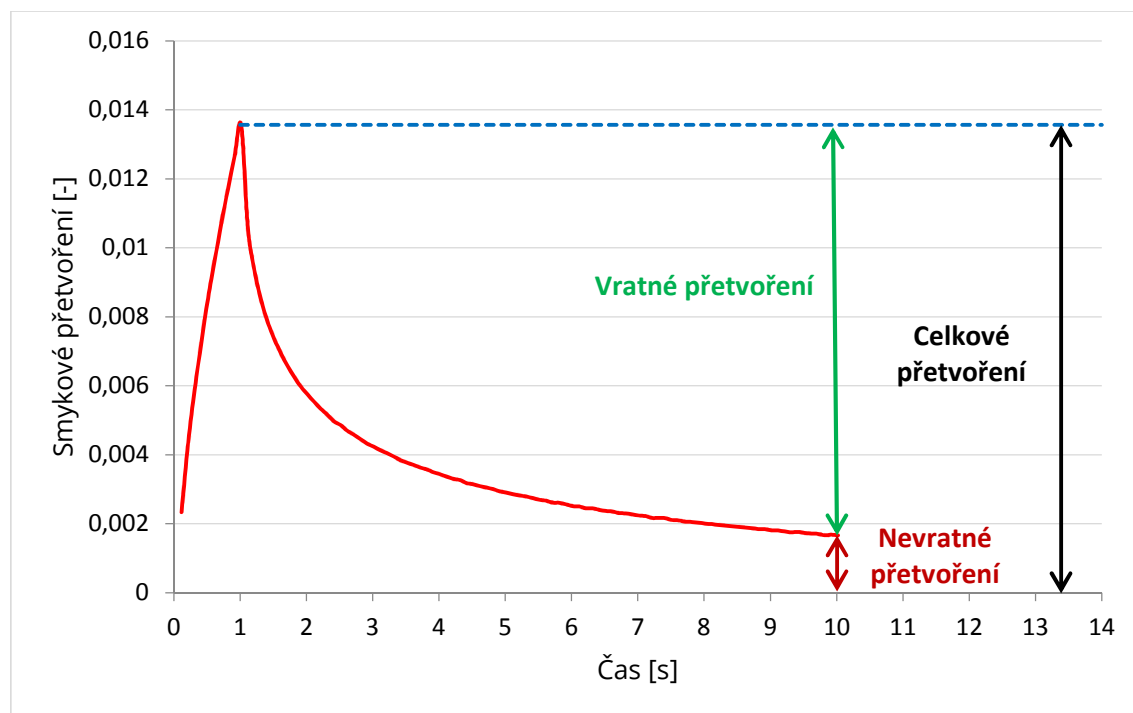
4.13 Zkouška MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery Test) dle ČSN EN 16659

Tato zkušební metoda je popsána v normě ČSN EN 16659. Tato metoda se používá ke stanovení elastické odezvy asfaltu a asfaltových poživ za podmínek smykového dotvarování a následného zotavení stanoveného při dvou různých hodnotách smykového napětí 0,100 kPa a 3,200 kPa při teplotě 60 °C a 70 °C. Elastická odezva materiálu je kvantifikována měřením procentuálního zotavení R a nevratné smykové poddajnosti J_{nr} asfaltového pojiva proti tvorbě trvalých deformací při opakovaném zatížení. [18]

Pro měření se používá dynamický smykový reometr s geometrií deska-deska o průměru 25 mm s nastavením mezery na 1 mm. Zkušební vzorek je zatížen konstantním napětím po dobu 1 sekundy, poté je po dobu 9 sekund

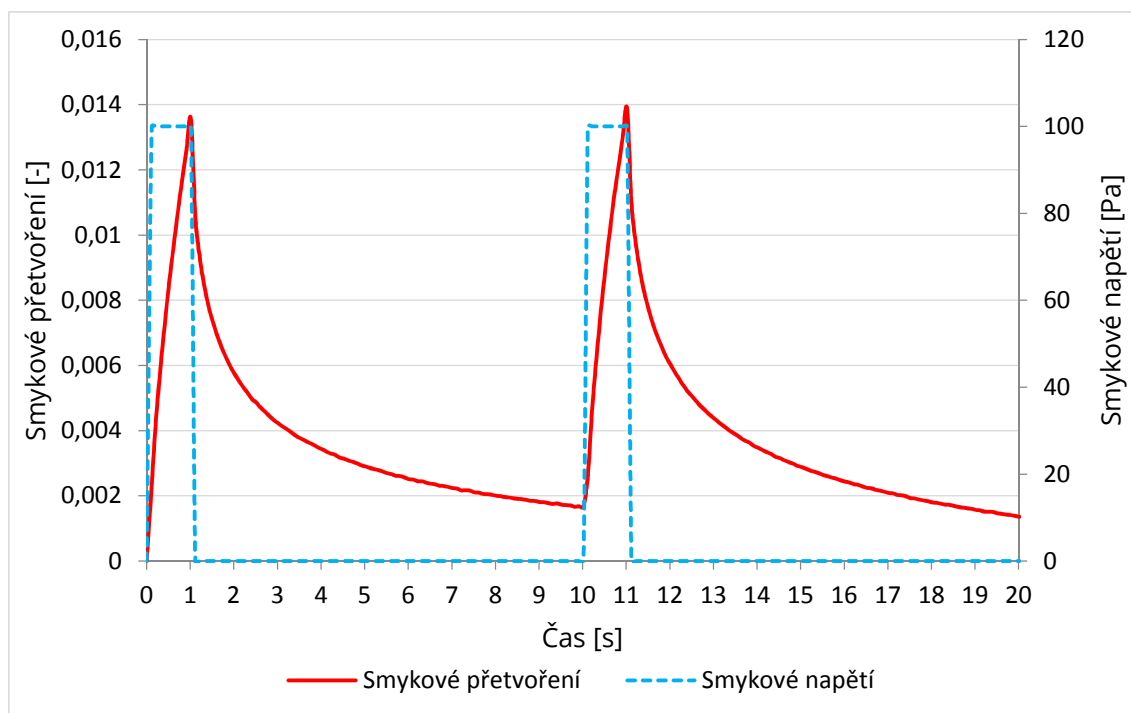
umožněno jeho zotavení. Provede se celkem 10 cyklů při smykovém napětí 0,100 kPa, následovaných dalšími 10 cykly při smykovém napětí 3,200 kPa. [18]

Graf 1: Typický cyklus dotvarování a zotavení



Vzorek asfaltového pojiva se umístí do reometru mezi dolní a horní geometrií. Mezera mezi geometriemi se nastaví v rozmezí 1,025 mm až 1,050 mm a při zkušební teplotě se odstraní přebytečné pojivo. Po oříznutí se zkušební geometrie posunou na velikost mezery 1 mm. Vzorek se zatíží konstantním smykovým napětím 0,100 kPa po dobu 1 sekundy trvání fáze dotvarování a zotavení při nulovém smykovém napětí v trvání 9 sekund. Hodnota napětí a přetvoření se zaznamenává každou 0,10 sekundy pro fázi dotvarování a zotavování. [18]

Graf 2: Průběh dvou cyklů MSCR testu



Výsledky získané pro zkoušené asfalty se určí průměrné procentuální zotavení R a nevratná smyková poddajnost J_{nr} při smykovém napětí 0,1 kPa a 3,2 kPa zaokrouhlená na nejbližší 0,1 %. [18]

4.14 Stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru dle ČSN EN 14771

Stanovení modulu tuhosti za ohybu se provádí podle normy ČSN EN 14771. Průhybový trámečkový reometr (BBR) se používá k měření průhybu při třibodovém ohybu trámečku asfaltového pojiva. Na střed zkoušeného tělesa se po stanovenou dobu vkládá konstantní zatížení a měří se průhyb trámečku jako funkce času. Modul tuhosti za ohybu se vypočítá z ohybového napětí a ohybové deformace. [19]



Obrázek 38: Průhybový trámečkový reometr (BBR) výzkumného centra AdMaS

Postup zkoušky je, že zkoušené pojivo se nalije do sestavené formy s mírným přebytkem pojiva. Pojivo se nalévá rovnoměrně od jednoho konce k druhému konci formy. Naplněná forma se nechá 45 min až 60 min při laboratorní teplotě vychladnout. Po ochlazení se horní část tělíska seřízne ohřátou špachtlí do roviny s okraji formy. [19]

Všechny vzorky se před zkoušením ponechají ve formách při laboratorní teplotě. Před odstraněním tělíska z formy se forma ochlazuje v chlazené komoře méně než 5 min, aby zkušební těleso ztuhlo a snadněji se z formy uvolňovalo. Zkouší se nejméně dvě tělesa při každé teplotě zkoušení. [19]



Obrázek 39: Forma pro zkušební tělesa na zkoušku BBR

Před zkouškou každé sady zkušebních těles se zkontroluje nastavení kontaktního zatížení a zkušebního zatížení. Postupuje se podle pokynů k přístroji v části kalibrace. [19]

Podle očekávané úrovně tuhosti se zvolí první teplota zkoušení. Teplota se nastaví na požadovanou teplotu zkoušení a přístroj se nechá vytemperovat. Provede se kontrola, zda teplota lázně je stálá nejméně po dobu 20 min. [19]

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. [19]



Obrázek 40: Asfaltové těleso pro stanovení kritické teploty

Po ukončení temperace se zkušební těleso umístí na podpěry průhybového trámečkového reometru. [19]

Při měření se vytvoří graf závislosti naměřeného zatížení a naměřeného průhybu zkušebního tělíska na době zatížení. Vypočítají se následující hodnoty: [19]

- Naměřený modul tuhosti za ohybu
- Vypočtený modul tuhosti za ohybu
- m-hodnota

Dvě vypočtené hodnoty pro tuhost a m-hodnotu při době zatěžování 60 s by se neměly lišit o více, než připouští hodnota opakovatelnosti. [19]

Modul tuhosti za ohybu a m-hodnota se vyjádří v čase zatížení 60 s. Modul tuhosti za ohybu se udává v MPa zaokrouhlený na tři platná místa a m-hodnota se udává zaokrouhlená na tři platná místa. [19]

5 Použité materiály

V této diplomové práci bylo zkoušeno 7 druhů pojiv:

- A – PMB 25/55-55 NV Cariphalte S (Shell)
- B – PMB 45/80 NV Starfalt (OMV)
- C – 50/70 NV (OMV)
- D – PMB 25/55 NV Starfalt (OMV)
- E – PMB 25/55-60 (Eurovia) – srovnávací polymerem modifikovaný asfalt
- F – PMB 25/55-60 + 0,5 % Evotherm (Eurovia)
- G – 50/70 (Total) – srovnávací silniční asfalt

Asfaltové pojivo F vzniklo laboratorním smísením s 0,5 % vosku Evotherm k hmotnosti asfaltového pojiva E. Evotherm je jedním ze zástupců amidů mastných kyselin. Do asfaltového pojiva A (výrobce Shell) byly použity amidické vosky. U pojiv B, C a D (výrobce OMV) je možné předpokládat, že byla použita přísada Sasobit, která je typickým představitelem FT parafínů. Všechny zkoušky byly provedeny na čerstvých pojivech, zestárlých pojivech metodou RTFOT a také metodou RTFOT+PAV.

6 Výsledky zkoušek

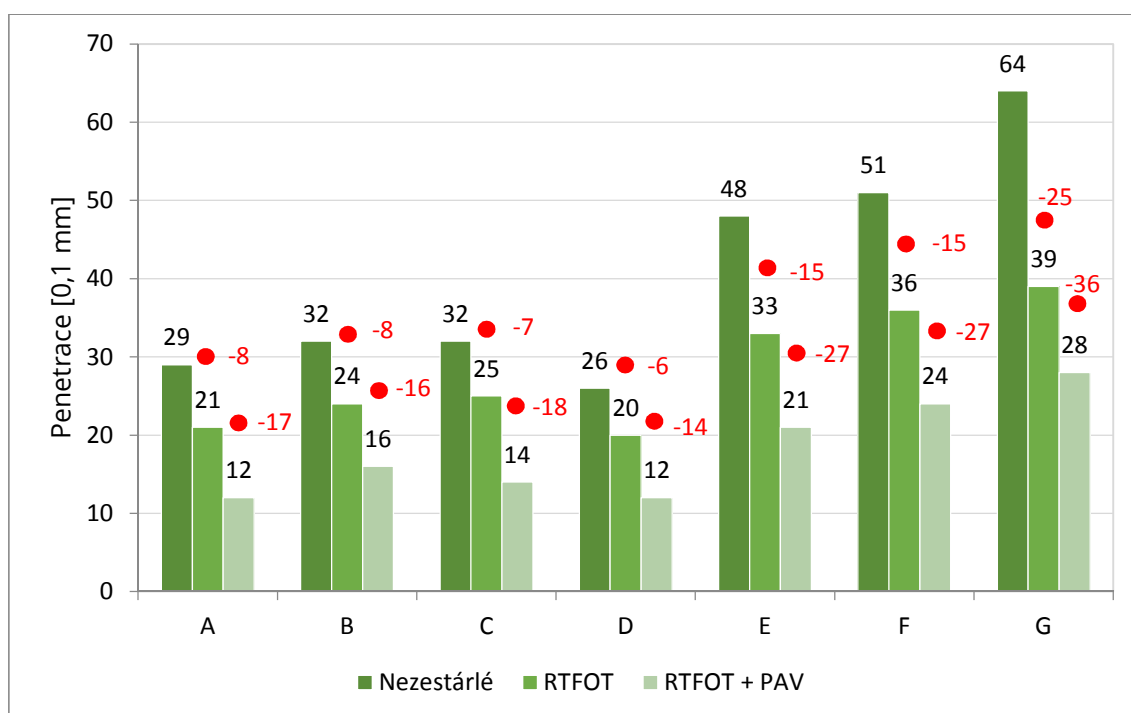
V této kapitole jsou uvedeny výsledky všech zkoušek dané rozsahem této práce. Zkoušky byly prováděny na asfaltových pojivech

nezestárých, asfaltových pojivech zestárých metodou RTFOT a po zestárnutí metodou RTFOT+PAV.

6.1 Penetrace jehlou

Stanovení hodnot penetrace speciálních polymerem modifikovaných asfaltů, které byly naměřeny a vyhodnoceny podle ČSN EN 1426 jsou zobrazeny v grafu 3. Všechna pojiva zobrazena v grafu 3 byla naměřena podle kapitoly 4.1. V grafu jsou uvedeny výsledky penetrace asfaltových pojiv nezestárých, asfaltových pojiv zestárých metodou RTFOT a asfaltových pojiv zestárých metodou RTFOT+PAV.

Graf 3: Penetrace jehlou

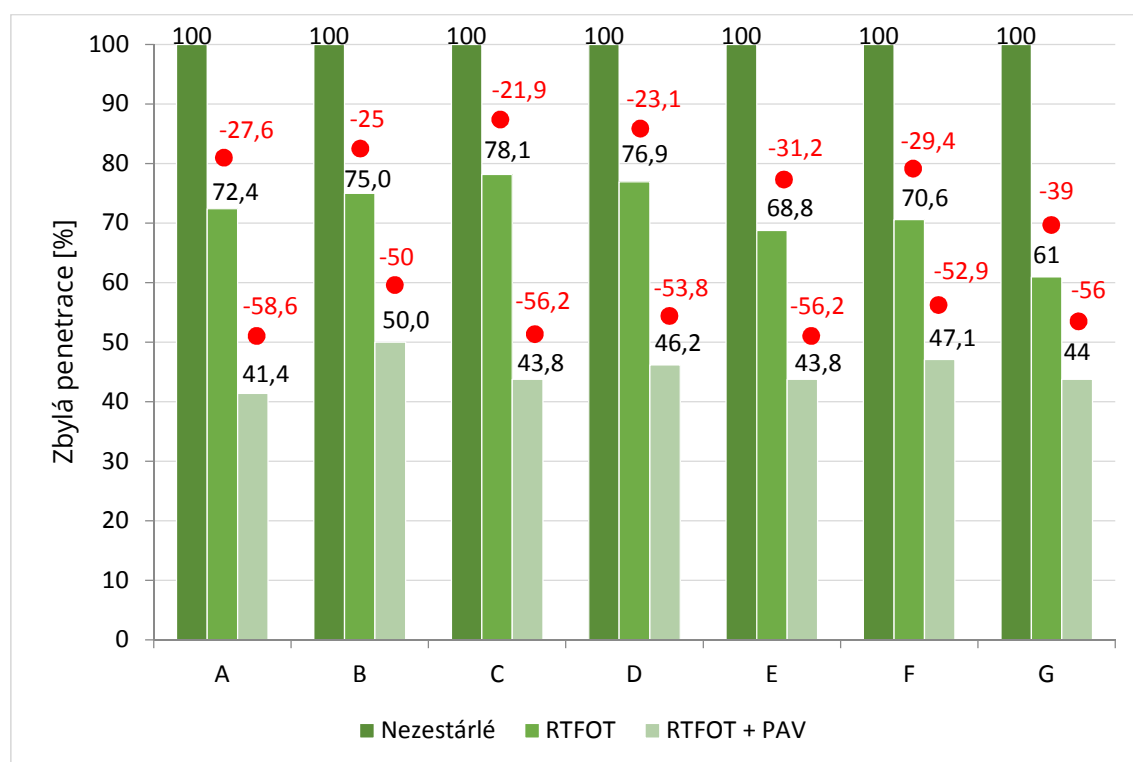


Z výsledných hodnot penetrací u nezestárých pojiv uvedených v grafu 3 je patrné, že pojiva PMB 45/80 NV (pojivo B) a 50/70 NV (pojivo C) nedosahují hodnot penetrace definovaných v jejich označení. Důvodem nízkých hodnot penetrací těchto pojiv je pravděpodobně způsobeno přidavkem přísad snižující viskozitu těchto pojiv.

Z výše uvedeného grafu lze odvodit závěr, že vlivem stárnutí metodou RTFOT dochází k poklesu penetrace a metoda RTFOT+PAV tyto penetrace pojiv dále významně snižuje. Penetrace pojiva PMB 25/55-55 NV (pojivo A) klesla při stárnutí metodou RTFOT o 8 [0,1 mm] a dále o 9 [0,1 mm] metodou RTFOT+PAV. U pojiva PMB 45/80 NV (pojivo B) došlo k poklesu o 8 [0,1 mm] metodou RTFOT a o dalších 8 [0,1 mm] metodou RTFOT+PAV. Pokles penetrace metodou RTFOT u pojiva 50/70 NV (pojivo C) byla 7 [0,1

mm] a 11 [0,1 mm] metodou RTFOT+PAV. U pojiva PMB 25/55 NV (pojivo D) došlo k poklesu penetrace o 6 [0,1 mm] metodou RTFOT a o 8 [0,1 mm] metodou RTFOT+PAV. Snížení penetrace u srovnávacího pojiva PMB 25/55-60 (pojivo E) o 15 [0,1 mm] metodou RTFOT a o 12 [0,1 mm] metodou RTFOT+PAV. Pokles penetrace pojiva PMB 25/55-60+0,5% Evotherm (pojivo F) bylo 15 [0,1 mm] metodou RTFOT a 12 [0,1 mm] metodou RTFOT+PAV. K největšímu snížení penetrace došlo u srovnávacího pojiva 50/70 (pojivo G) kdy metodou stárnutí RTFOT došlo ke snížení o 25 [0,1 mm] a snížení penetrace metodou RTFOT+PAV o 36 [0,1 mm].

Graf 4: Zbýlá penetrace asfaltových pojiv v procentech

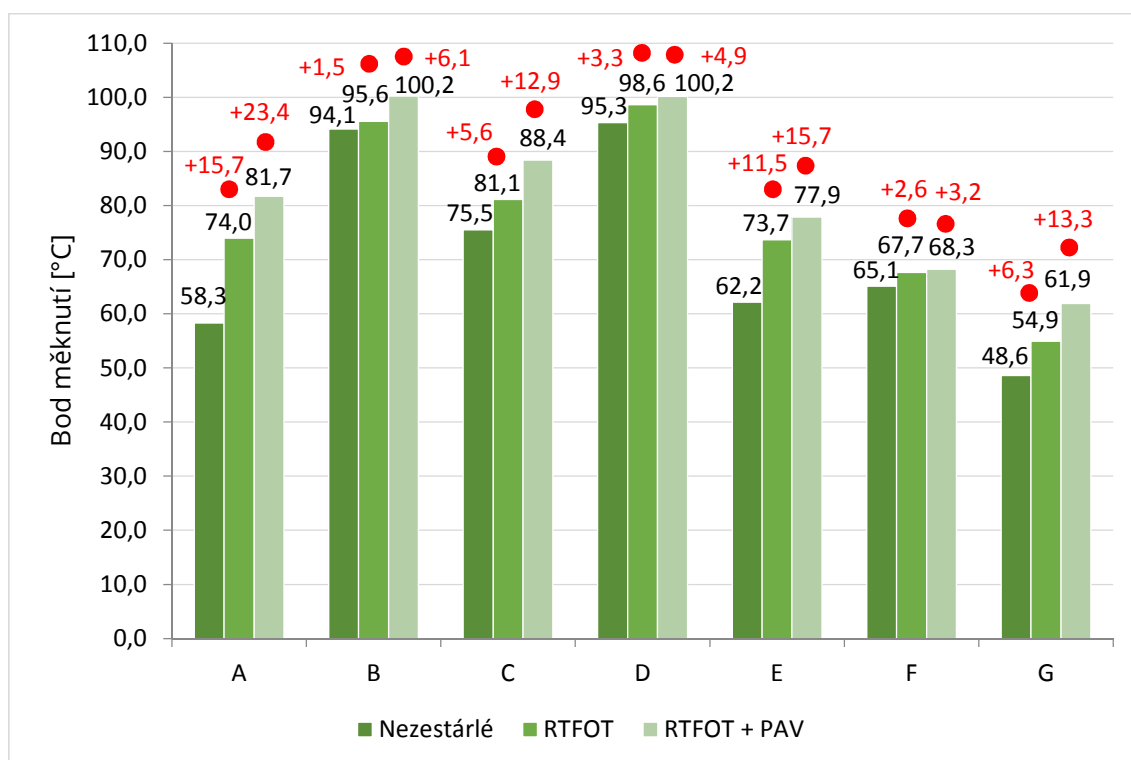


Na grafu 4 je vynesena změna penetrace asfaltových pojiv vlivem stárnutí metodou RTFOT a metodou RTFOT+PAV. Snížení penetrace asfaltových pojiv po metodě stárnutí RTFOT se pohybuje v intervalu od 21,9 % do 39 %. Po stárnutí metodou RTFOT+PAV došlo ke snížení penetrace od 50 % do 58,6 %. K nejmenšímu poklesu penetrace po metodě stárnutí RTFOT došlo u pojiva 50/70 NV (pojivo C) oproti tomu největší změna penetrace nastala u srovnávacího pojiva PMB 25/55-60 (pojivo E) a PMB 25/55-60+0,5 % Evotherm (pojivo F). Po stárnutí metodou RTFOT+PAV došlo k nejmenšímu snížení penetrace u pojiva PMB 45/80 NV (pojivo B) zatímco největší pokles penetrace nastal u pojiv PMB 25/55-55 NV (pojivo A), 50/70 NV (pojivo C), srovnávacího pojiva PMB 25/55-60 (pojivo E) a srovnávacího silničního asfaltu 50/70 (pojivo G).

6.2 Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička

Nalezení bodu měknutí bylo provedeno podle normy ČSN EN 1427. Postup stanovení bodu měknutí je popsán v kapitole 4.2. Stanovení bodu měknutí bylo provedeno na nezestárlých pojivech, pojivech zestárlých metodou RTFOT a metodou RTFOT+PAV. Jednotlivé výsledky bodu měknutí pro všechna pojiva jsou zobrazeny v grafu 5.

Graf 5: Bod měknutí



Z grafu 5 vyplývá, že vlivem stárnutí metodou RTFOT i metodou RTFOT+PAV dochází ke zvýšení bodů měknutí všech pojiv. Zvýšení bodu měknutí je výhodné z hlediska odolnosti proti tvorbě trvalých deformací. Nevýhodou zvýšení bodu měknutí je ale snížení penetrace pojiv a jejich následná náchylnost na vznik trhlin.

Nejnižší změny bodu měknutí byly naměřeny u pojiva PMB 45/80 NV (pojivo B) kde se zvýšil bod měknutí o 1,5 °C metodou RTFOT a o 6,1 °C metodou RTFOT+PAV dále u pojiva PMB 25/55 NV (pojivo D) došlo ke zvýšení bodu měknutí metodou RTFOT o 3,3 °C a metodou RTFOT+PAV o 4,9 °C. Poslední pojivo, u kterého se zaznamenal nejnižší nárůst bodu měknutí je PMB 25/55-60+0,5 % Evotherm (pojivo F) s navýšením o 2,6 °C metodou stárnutí RTFOT a 3,2 °C metodou stárnutí RTFOT+PAV.

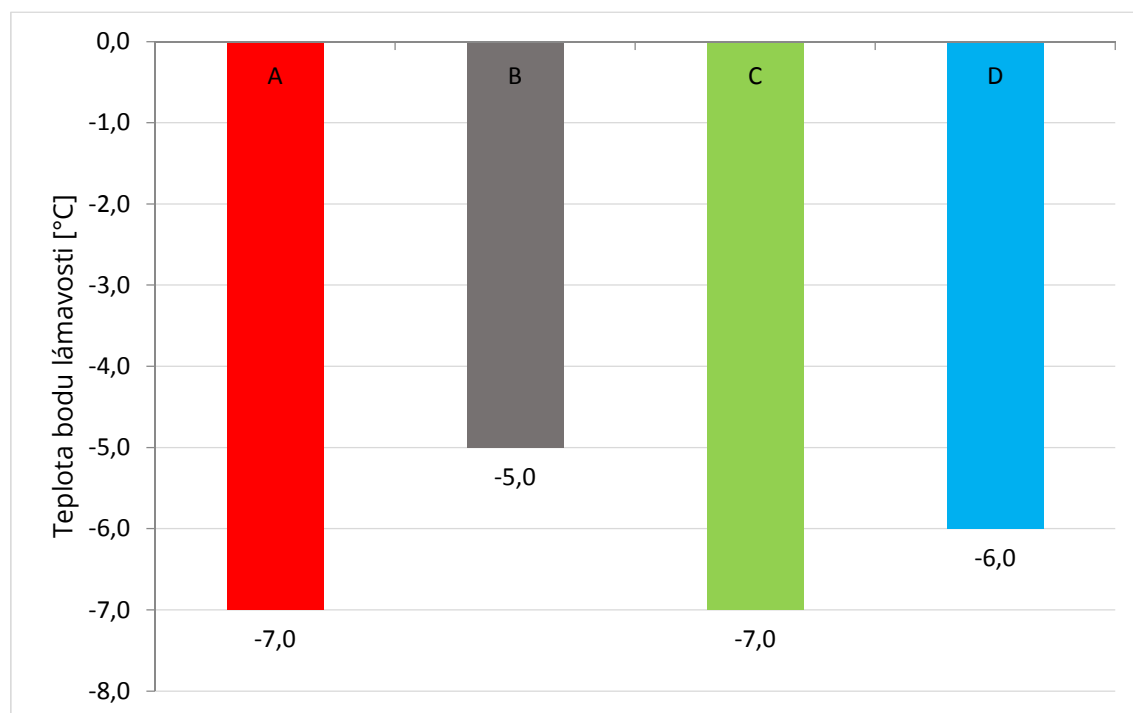
Nejvyšší změny bodu měknutí vykazovalo pojivo PMB 25/55-55 NV

(pojivo A) s navýšením bodu měknutí o 15,7 °C metodou stárnutí RTFOT a 23,4 °C metodou RTFOT+PAV dále asfalt 50/70 NV (pojivo C) s nárůstem bodu měknutí metodou RTFOT o 5,6 °C a metodou stárnutí RTFOT+PAV o 12,9 °C. U srovnávacího pojiva PMB 25/55-60 (pojivo E) nárůst bodu měknutí o 11,5 °C metodou RTFOT a o 15,7 °C metodou RTFOT+PAV. U srovnávacího silničního asfaltu 50/70 (pojivo G) vzrostl bod měknutí o 6,3 °C metodou stárnutí RTFOT a o 13,3 °C metodou stárnutí RTFOT+PAV.

6.3 Stanovení bodu lámavosti podle Fraasse

Stanovení bodu lámavosti podle Fraasse pro zkoušená asfaltová pojiva se provádí podle normy ČSN EN 12593. Postup této zkoušky je popsán v kapitole 4.3. Teploty bodu lámavosti pro jednotlivá nezestárlá asfaltová pojiva jsou vyneseny v grafu 6.

Graf 6: Teplota bodu lámavosti podle Fraasse

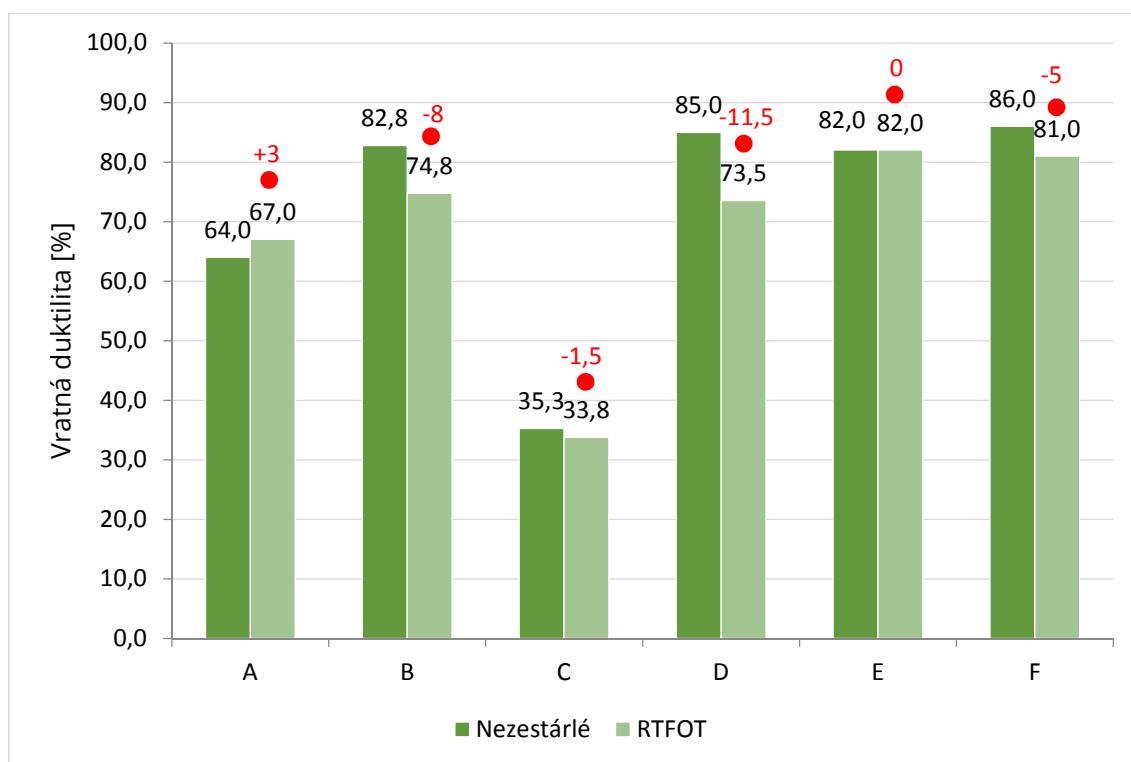


V normě ČSN 65 7222-3 v tabulce 1 jsou uvedeny hodnoty teploty bodu lámavosti pro jednotlivá asfaltová pojiva. Pro asfalty PMB 25/55-60 NT je teplota bodu lámavosti podle Fraasse ≤ -10 °C a pro asfalty PMB 45/80-55 NT ≤ -12 °C. V grafu 6 je vidět, že ani jedno hodnocené pojivo A až D tomuto požadavku nevyhovuje. Nejvyšší (nejhorší) hodnoty bodu lámavosti dosáhl asfalt PMB 45/80 NV (pojivo B) oproti tomu nejnižších (nejlepších) hodnot bodu lámavosti podle Fraasse dosáhla asfaltová pojiva PMB 25/55-55 NV (pojivo A) a 50/70 NV (pojivo C). Výsledky bodu lámavosti srovnávaných pojiv byly ovšem velice srovnatelné s rozptylem pouze 2 °C.

6.4 Stanovení vratné duktility modifikovaných asfaltů

Vratná duktilita asfaltových pojiv byla provedena v souladu s normou ČSN EN 13398. Postup této zkoušky detailněji popisuje kapitola 4.4. Zkouška byla provedena na nezestárlých asfaltových vzorcích a vzorcích zestárlých metodou RTFOT. Výsledky zkoušky jsou zobrazeny v grafu 7.

Graf 7: Vratná duktilita asfaltových pojiv



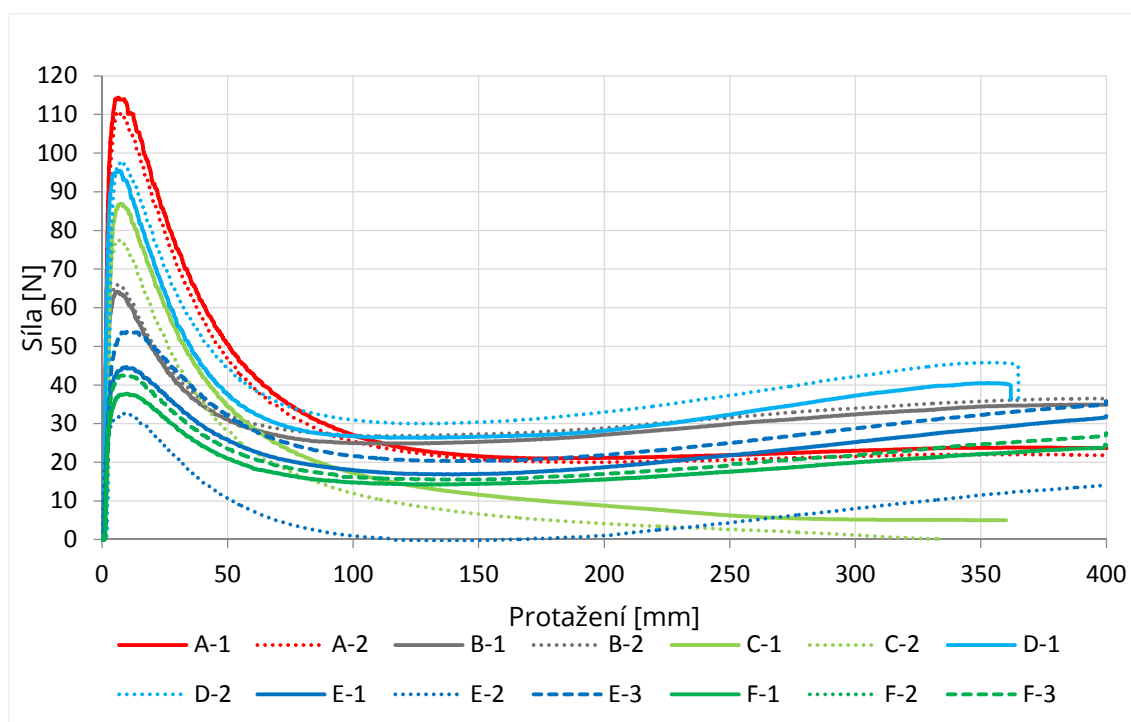
Z grafu 7 je zřejmé, že u asfaltu PMB 25/55-55 NV (pojivo A) došlo vlivem stárnutí metodou RTFOT k nárůstu vratné duktility o 3 %. U srovnávacího asfaltu PMB 25/55-60 (pojivo E) nevznikla vlivem stárnutí žádná změna vratné duktility pojiva. U ostatních asfaltových pojiv nastalo vlivem stárnutí RTFOT pokles vratné duktility. Největší pokles vratné duktility vznikl u PMB 25/55 NV (pojivo D) v hodnotě 11,5 % oproti nezestárlému vzorku oproti tomu u 50/70 NV (pojivo C) nastala nejmenší změna vratné duktility pouhých 1,5 %.

Nejvyšších vratných schopností dosahují asfalty PMB 25/55-60+0,5 % Evotherm (pojivo F) s 86,0 %, PMB 25/55 NV (pojivo D) s 85,0 %, PMB 45/80 NV (pojivo B) s 82,8 % a u srovnávacího asfaltu PMB 25/55-60 (pojivo E) s 82,0 %. Nižší hodnotou vratné duktility se vyznačuje PMB 25/55-55 NV (pojivo A) s hodnotou vratné duktility 64,0 %. Nejmenší vratné schopnosti má 50/70 NV (pojivo C) pouze 35,3 %.

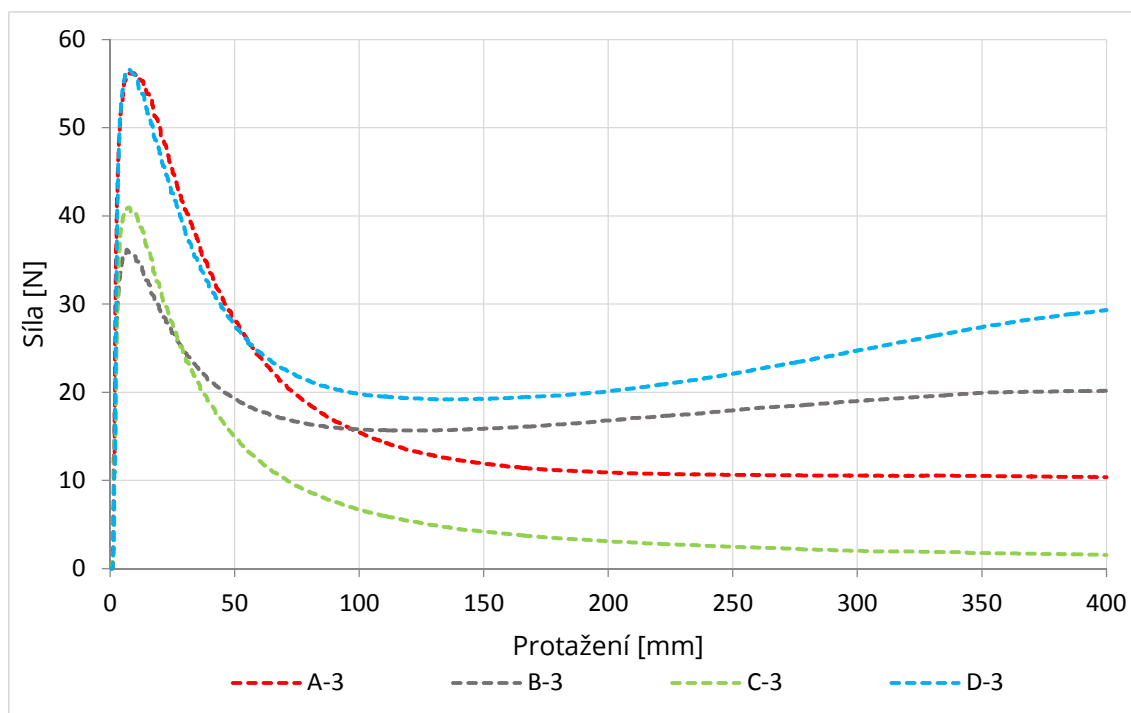
6.5 Stanovení tažných vlastností modifikovaných asfaltů metodou silové duktility

Stanovení tažných vlastností bylo provedeno dle normy ČSN EN 13589. Postup této zkoušky je popsán v kapitole 4.5. Silová duktilita byla zhotovena pro dvě teploty 10 °C a 15 °C. Pro stanovení smluvní energie $A_{400-200}$ a maximální síly $F_{\max}$ byla zkoušena nezestárlá pojiva. Výsledky jednotlivých vzorků asfaltových pojiv jsou zobrazeny v grafu 8 a 9 a v tabulce 14.

Graf 8: Tažné vlastnosti asfaltových pojiv při teplotě 10 °C



Graf 9: Tažné vlastnosti asfaltových pojiv při teplotě 15 °C



Tabulka 14: Výsledky silové duktility

Pojivo	Vzorek	Teplota	Maximální protažení	$F_{\max}$	$A_{400-200}$
		[°C]	[mm]	[N]	[J/cm ²]
A - PMB 25/55-55	1	10	400	114,36	4,55
	2	10	400	110,81	4,26
	3	15	400	56,19	2,11
B - PMB 45/80 NV	1	10	400	64,10	6,39
	2	10	400	65,88	6,71
	3	15	400	36,17	3,77
C - 50/70 NV	1	10	360	86,87	0,96
	2	10	335	77,51	0,28
	3	15	400	40,95	0,43
D - PMB 25/55 NV	1	10	362	95,45	5,68
	2	10	365	97,88	6,63
	3	15	400	56,56	4,95
E - PMB 25/55-60	1	10	400	44,69	5,04
	2	10	400	32,61	1,57
	3	10	400	53,96	5,72
F - PMB 25/55-60 +0,5% Evotherm	1	10	400	37,10	3,68
	2	10	400	37,71	3,97
	3	10	400	42,55	4,38

Z grafu 8 a 9 a tabulky 14 je vidět, že asfalt PMB 25/55-55 NV (pojivo A) má nejvyšší sílu $F_{\max}$ ze všech zkoušených pojiv. Hodnota síly $F_{\max}$ při teplotě 10 °C je průměrně 112,59 N a 56,19 N při teplotě 15 °C. U tohoto pojiva je průměrná smluvní energie $A_{400-200}$ při 10 °C 4,41 J/cm² a 2,11 J/cm² při 15 °C.

Asfaltové pojivo PMB 45/80 NV (pojivo B) dosahuje průměrné maximální síly při 10 °C hodnotě $F_{\max}$ 64,99 N a 36,17 N při teplotě 15 °C. Průměrná smluvní energie $A_{400-200}$ je 6,55 J/cm² při 10 °C a 3,77 J/cm² při teplotě 15 °C.

U pojiva 50/70 NV (pojivo C) je průměrná hodnota maximální síly $F_{\max}$ 82,19 N při 10 °C a 40,95 N při 15 °C. Průměrná smluvní energie $A_{400-200}$ u tohoto asfaltu 0,62 J/cm² při 10 °C a 0,43 J/cm² při 15 °C.

Asfalt PMB 25/55 NV (pojivo D) je druhé pojivo, které dosáhlo nejvyšší průměrné maximální síly $F_{\max}$ při zkoušení. Velikost průměrné síly $F_{\max}$ pro 10 °C je 96,67 N a pro 15 °C 56,56 N. Průměrná smluvní energie $A_{400-200}$ je 6,16 J/cm² pro 10 °C a 4,95 J/cm² pro 15 °C.

Srovnávací pojivo PMB 25/55-60 (pojivo E) bylo zkoušeno pouze při teplotě 10 °C, jelikož nedošlo během zkoušení ke křehkému lomu. Průměrná hodnota maximální síly $F_{\max}$ je 43,75 N. Průměrná smluvní energie $A_{400-200}$ pojiva je 4,11 J/cm².

Vzorek asfaltového pojiva PMB 25/55-60+0,5 % Evotherm (pojivo F) bylo také zkoušeno pouze při teplotě 10 °C, poněvadž nenastal křehký lom pojiva. Hodnota průměrné maximální síly $F_{\max}$ je 39,12 N a velikost průměrné smluvní energie $A_{400-200}$ je 4,01 J/cm².

V grafu 8 a 9 je možné pozorovat, že u asfaltů PMB 45/80 NV (pojivo B), PMB 25/55 NV (pojivo D), srovnávacího pojiva PMB 25/55-60 (pojivo E) a PMB 25/55-60+0,5 % Evotherm (pojivo F) dochází vlivem modifikačních přísad k opětovnému nárůstu tahové síly ke konci tahové zkoušky. Asfalty PMB 25/55-55 NV (pojivo A) a 50/70 NV (pojivo C) vykazují na počátku zkoušky velký nárůst tahové síly, ale s rostoucím protažením jejich tahová síla postupně klesá bez dalšího nárůstu síly.

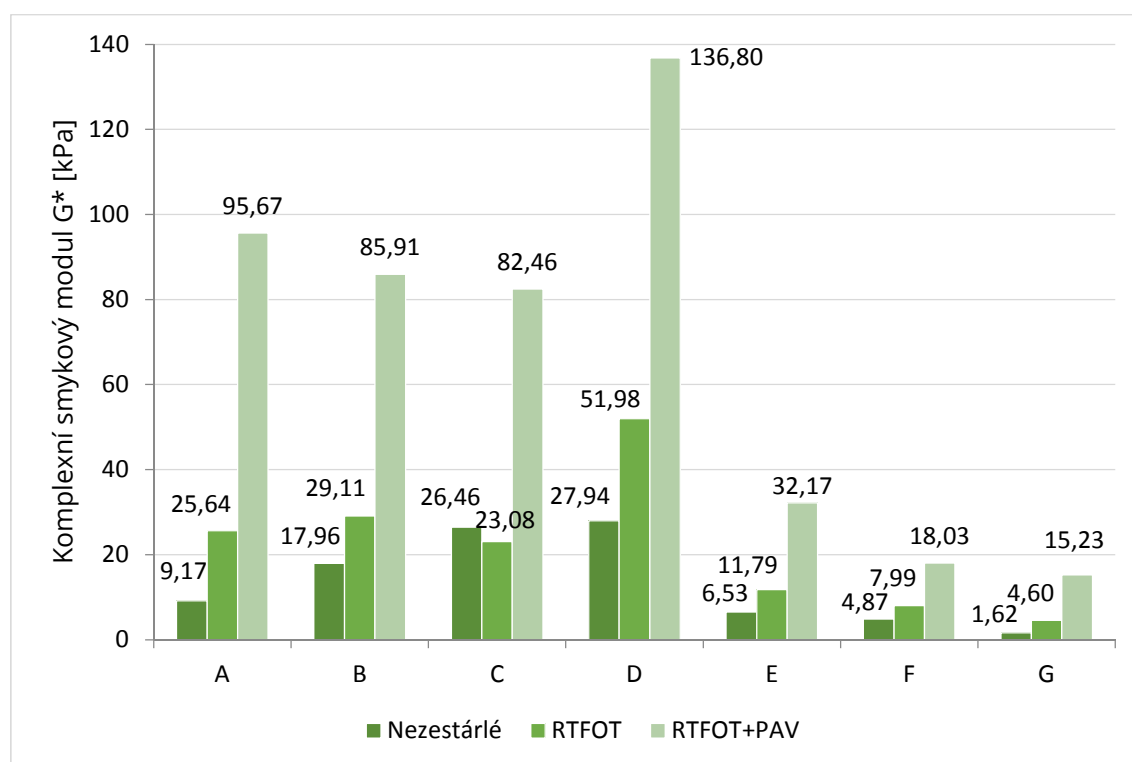
6.6 Komplexní smykový modul a fázový úhel dle ČSN EN 14770

Stanovení komplexního smykového modulu a fázového úhlu bylo provedeno dle ČSN EN 14770. Postup zkoušky je definován v kapitole 4.8. Pro stanovení komplexního smykového modulu a fázového úhlu byl použit dynamický smykový reometr s geometrií typu deska – deska s průměrem 8 mm s tloušťkou vzorku 2 mm a průměru 25 mm s tloušťkou vzorku 1 mm. Pro zkušební geometrii průměru 8 mm byl zvolen teplotní rozsah od 40 °C do 10 °C s krokem 5 °C. U geometrie 25 mm byl definován teplotní interval

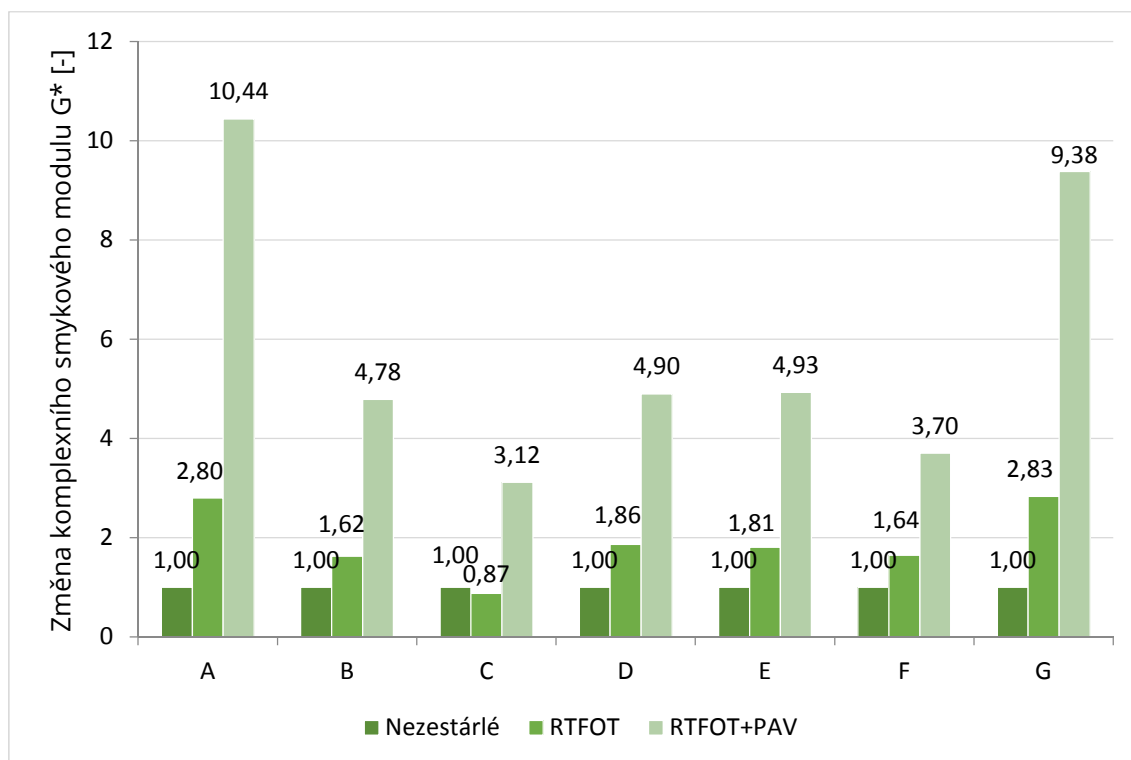
od 70 °C do 40 °C s krokem 5 °C. Komplexní smykový modul a fázový úhel byl stanoven na pojivech nezestárých, zestárých metodou RTFOT a zestárnutých metodou RTFOT+PAV v režimu oscilace s řízeným smykovým přetvořením. Při měření byl nastaven frekvenční rozsah zatěžování od 0,1 Hz do 10 Hz.

Vyhodnocení komplexního smykového modulu a fázového úhlu se provedlo při zkušební teplotě 60 °C a frekvenci zatěžování 1,59 Hz. Výsledky měření komplexního modulu a fázového úhlu jsou znázorněny na grafech 10 a 11.

Graf 10: Komplexní smykový modul G^* při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz



Graf 11: Změna komplexního smykového modulu G^* při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz



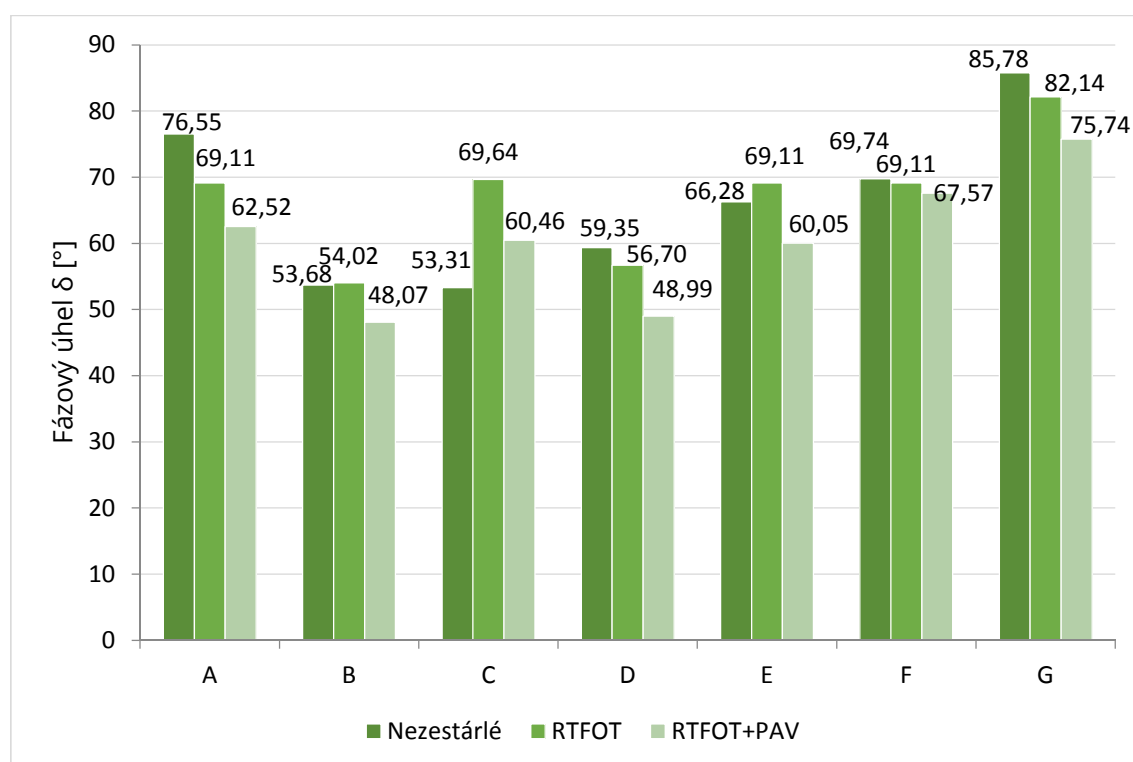
Z grafu 10 můžeme dojít k závěru, že vlivem stárnutí dochází ke zvyšování komplexního smykového modulu. U nezestárlých asfaltových pojiv dosahovalo nejnižší hodnoty komplexního smykového modulu u srovnávacího asfaltu 50/70 (pojivo G) hodnoty 1,62 kPa. Nejvyšší hodnoty komplexního smykového modulu v nezestárlém stavu dosáhl vzorek PMB 25/55 NV (pojivo D) s hodnotou 27,94 kPa. Po metodě stárnutí RTFOT se hodnota komplexního smykového modulu pohyboval v rozsahu od 4,60 kPa u srovnávacího asfaltu 50/70 (pojivo G) do 51,98 kPa u asfaltu PMB 25/55 NV (pojivo D). Nejvyšší nárůst smykového modulu byl naměřen u pojiv zestárlých metodou RTFOT+PAV. Nejnižší hodnota smykového modulu pojiv zestárlých metodou RTFOT+PAV byla 15,23 kPa u srovnávacího asfaltu 50/70 (pojivo G) a nejvyšší hodnota naměřena u pojiva PMB 25/55 NV (pojivo D) byla 136,80 kPa.

Ačkoliv srovnávací asfaltové pojivo 50/70 (pojivo G) dosahovalo nejnižších hodnot komplexního smykového modulu ve stavu nezestárlém a také po metodě stárnutí RTFOT a metodě stárnutí RTFOT+PAV byla změna ve velikosti smykového modulu oproti ostatním asfaltovým pojivům nejvyšší, je možné pozorovat na grafu 11. Nárůst komplexního smykového modulu u srovnávacího pojiva 50/70 (pojivo G) po metodě stárnutí RTFOT byl zvýšen 2,83 krát a po metodě stárnutí RTFOT+PAV zvýšen o 9,38 krát proti původnímu nezestárlému stavu. Asfalt, u kterého byl nárůst

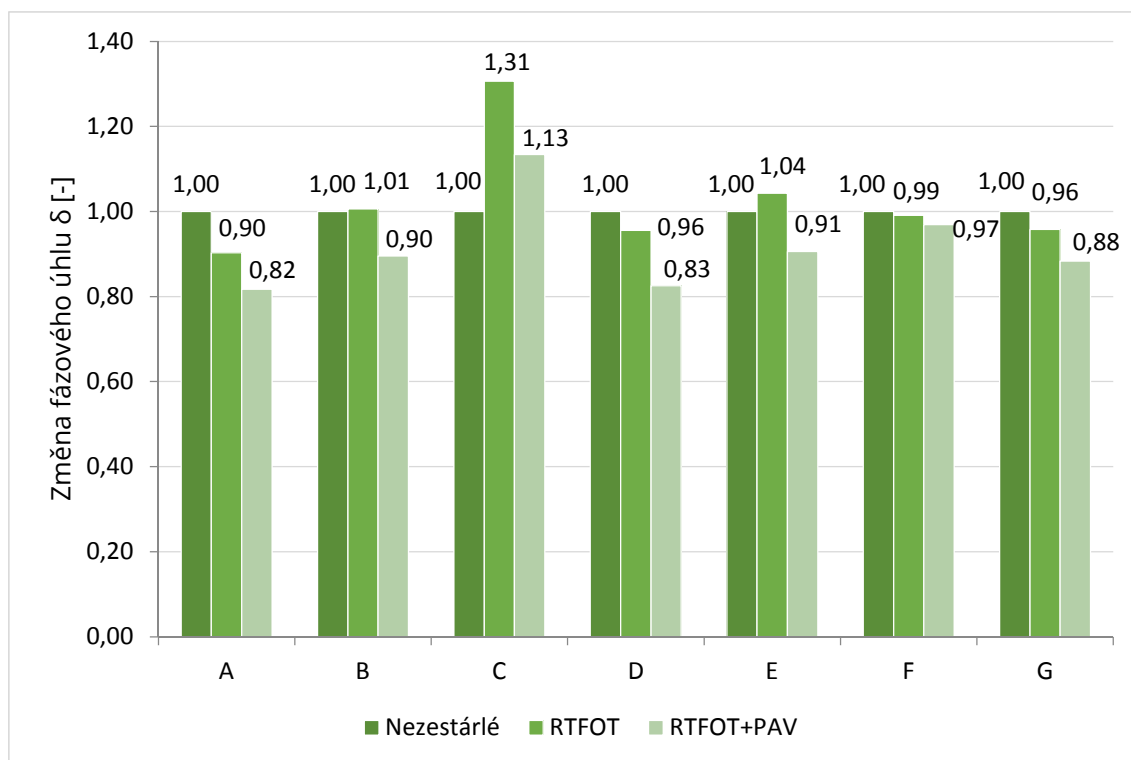
komplexního smykového nejvyšší je PMB 25/55-55 NV (pojivo A), kdy metodě stárnutí RTFOT vzrostl komplexní smykový modul o 2,80 krát a po metodě RTFOT+PAV o 10,44 krát oproti nezestárlému pojivu. U těchto asfaltů lze dojít k závěru, že tyto pojiva jsou velmi citlivá na proces stárnutí.

U ostatních asfaltů došlo k menšímu nárůstu komplexního modulu po metodě stárnutí RTFOT v rozsahu od 0,87 krát (pojivo C) do 1,86 krát (pojivo D). Stárnutím metodou RTFOT+PAV se zvýšil komplexní smykový modul od 3,70 krát (pojivo F) do 4,93 krát (srovnávací pojivo E). Vzhledem k nižším nárůstům komplexních smykových modulů vlivem stárnutí lze usoudit nižší citlivost pojiv na proces stárnutí.

Graf 12: Fázový úhel δ při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz



Graf 13: Změna fázového úhlu δ při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz



Dle grafu 12 je velikost fázových úhlů všech zkoumaných pojiv vůči srovnávacímu pojivu 50/70 (pojivo G) v nezestárlém stavu nižší, to znamená, že u těchto pojiv převahuje složka elastická oproti viskózní složce srovnávacího pojiva 50/70 (pojivo G). Hodnoty fázových úhlů v nezestárlém stavu se pohybují od 53,31° (pojivo C) do 85,78° (srovnávací pojivo G). Nejnižší hodnotu fázového úhlu v nezestárlém stavu lze pozorovat u pojiva 50/70 NV (pojivo C) v hodnotě 53,31 °C z toho lze vyvodit vyšší podíl elastického smykového modulu G' .

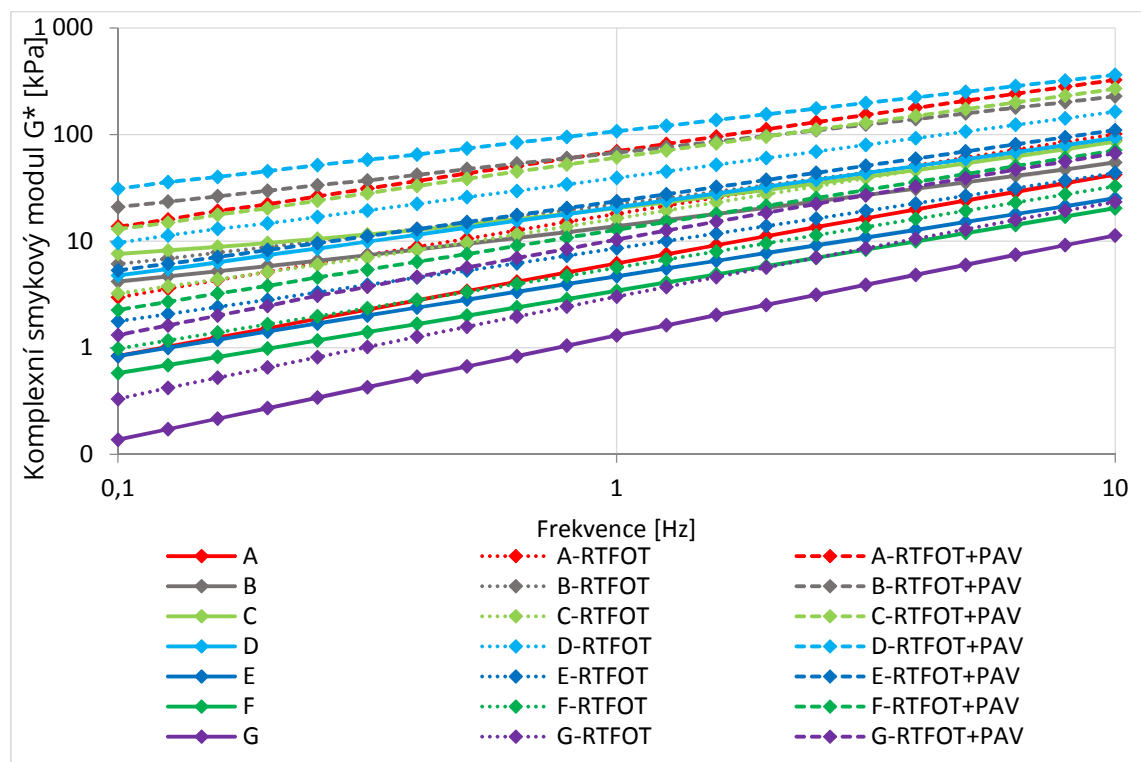
Po simulaci stárnutí metodou RTFOT lze u asfaltů PMB 25/55-55 NV (pojivo A), PMB 25/55 NV (pojivo D), PMB 25/55-60+0,5 % Evotherm (pojivo F) a srovnávacího asfaltu 50/70 (pojivo G) pozorovat pokles fázových úhlů. U asfaltů PMB 45/80 NV, 50/70 NV (pojivo C) a srovnávacího asfaltu PMB 25/55-60 (pojivo E) došlo překvapivě k nárůstu fázového úhlu vlivem stárnutí metodou RTFOT.

U asfaltových pojiv A – G lze dle grafu 13 povšimnout si poklesu fázových úhlů simulací stárnutí metodou RTFOT+PAV. Po stárnutí metodou RTFOT+PAV se u těchto pojiv více projevuje elastická složka.

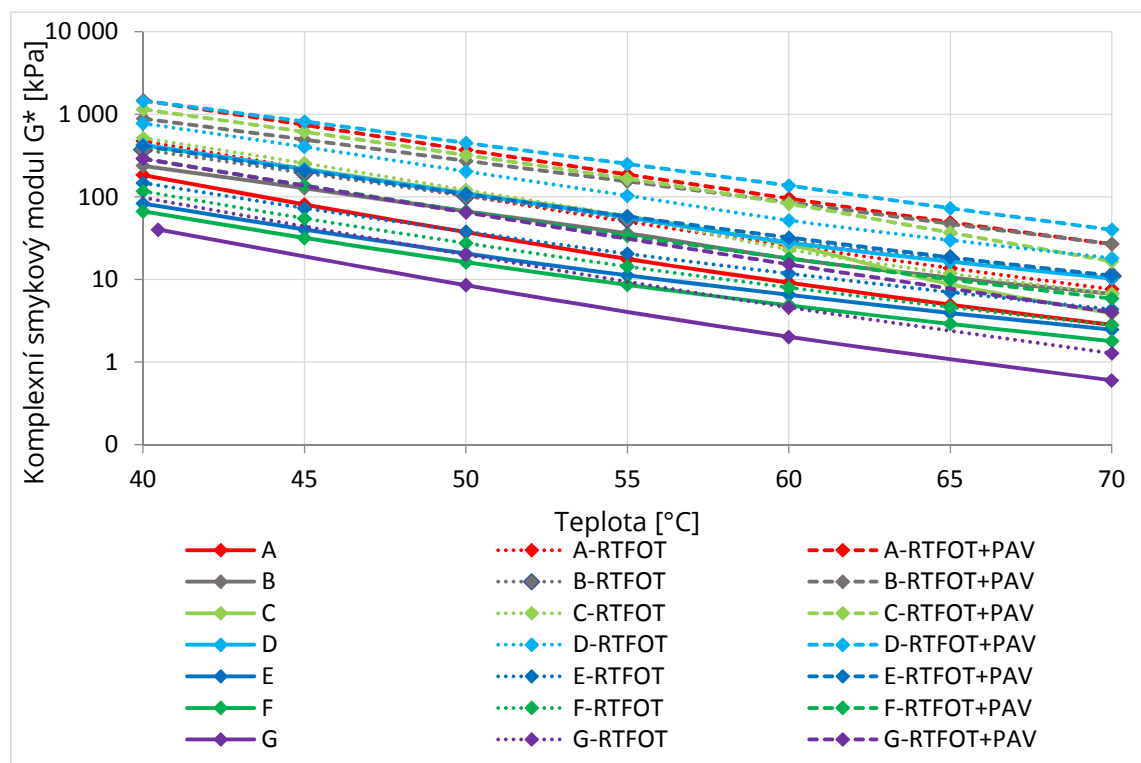
Z grafu 13 lze odvodit u pojiv PMB 25/55-55 NV (pojivo A), 50/70 NV (pojivo C), PMB 25/55 NV (pojivo D) a srovnávacího asfaltu 50/70 (pojivo G), že jsou velmi citlivé na změnu fázového úhlu vlivem stárnutí pojiva metodou RTFOT a metodou RTFOT+PAV. Naopak u pojiv PMB 45/80 NV (pojivo B), srovnávacího asfaltu PMB 25/55-60 (pojivo E) a PMB 25/55-60+0,5 %

Evotherm (pojivo F) lze pozorovat menší citlivost na změnu fázového úhlu vlivem stárnutí.

Graf 14: Isotermny komplexního smykového modulu při teplotě 60 °C

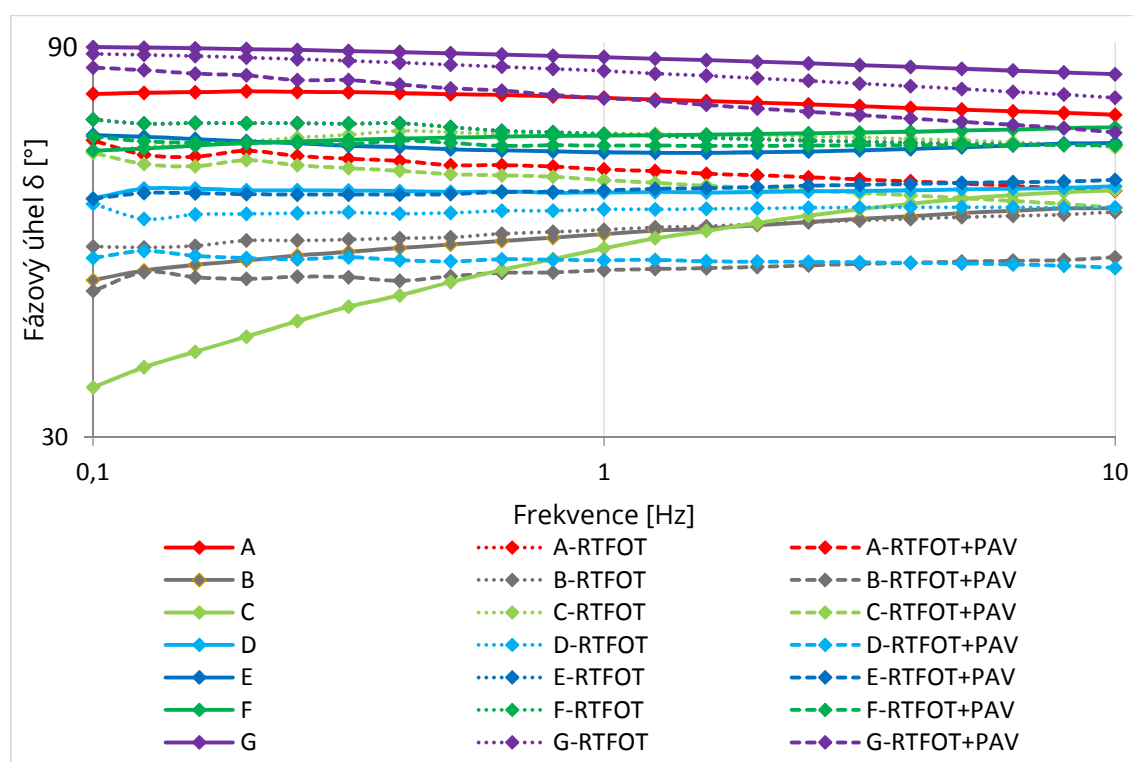


Graf 15: Isochrony komplexního smykového modulu při frekvenci 1,59 Hz

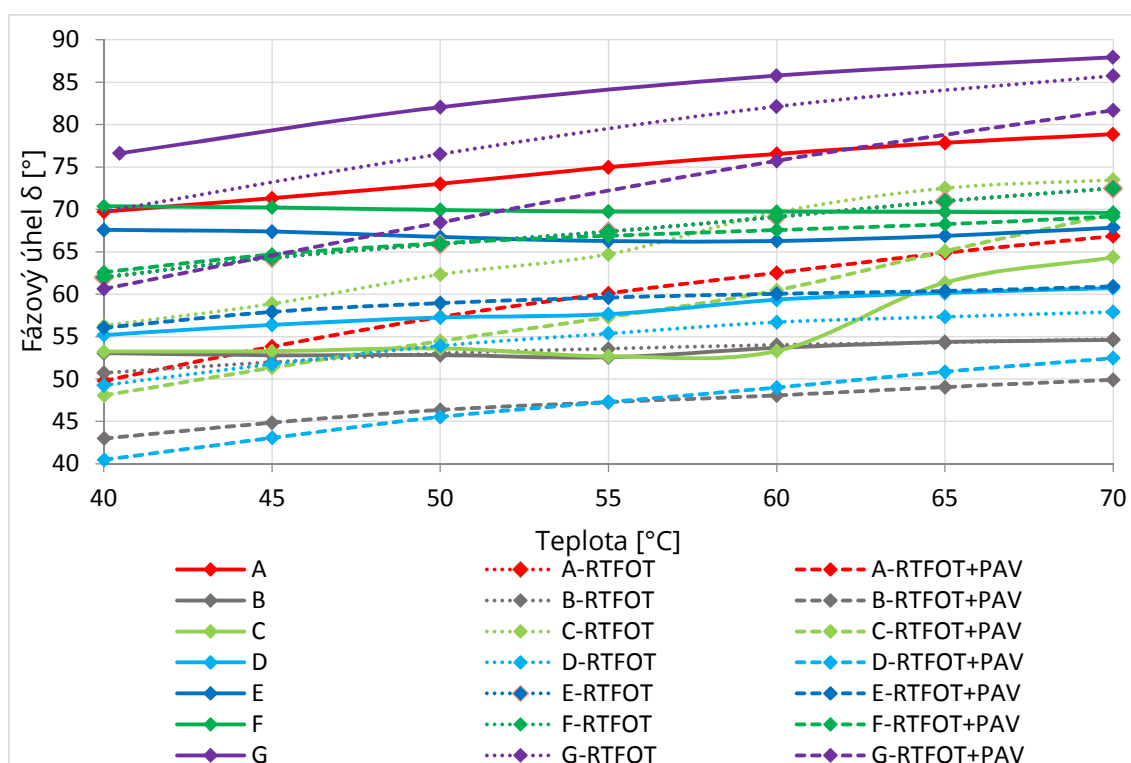


Frekvenční závislost komplexních smykových modulů je zachycena v grafu 14 isotermami komplexních modulů při teplotě 60 °C. Teplotní závislost komplexních smykových modulů je zachycena v grafu 15 isochronami komplexních modulů při frekvenci 1,59 Hz. Z grafu 14 je vidět silná závislost asfaltových pojiv na frekvenci zatěžování, kdy s rostoucí frekvencí zatížení roste komplexní smykový modul asfaltových pojiv. V grafu 15 jsou zobrazeny průběhy komplexních smykových modulů všech asfaltových pojiv, jejichž hodnoty komplexních smykových modulů s rostoucí teplotou klesají.

Graf 16: Isotermie fázových úhlů při teplotě 60 °C

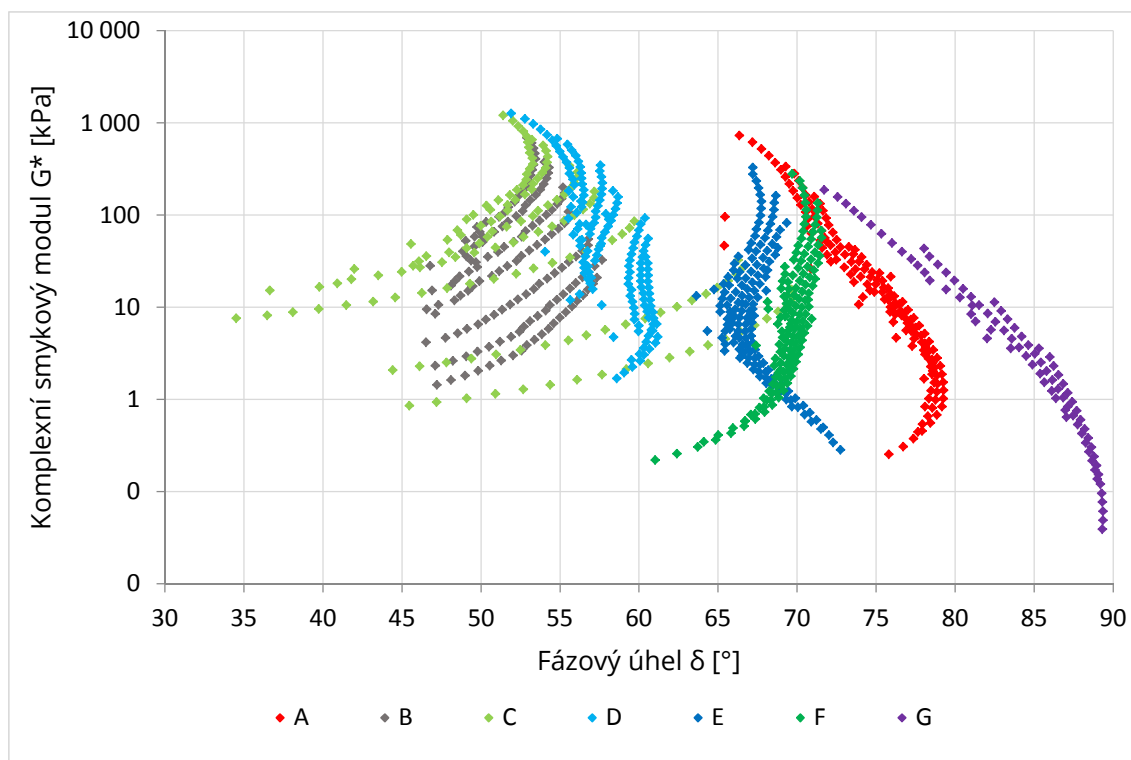


Graf 17: Isochrony fázových úhlů při frekvenci 1,59 Hz



Se zvyšujícím množstvím polymerních přísad přidávaných do asfaltových pojiv dochází ke snižování fázových úhlů a tím současně klesání viskózní složky asfaltů jak je zobrazeno v grafech 16 a 17. U grafu 17 je nutné poznamenat, že s rostoucí teplotou se fázový úhel zvyšuje. Vlivem stárnutí metodou RTFOT a i metodou stárnutí RTFOT+PAV se fázový úhel pojiv snižuje.

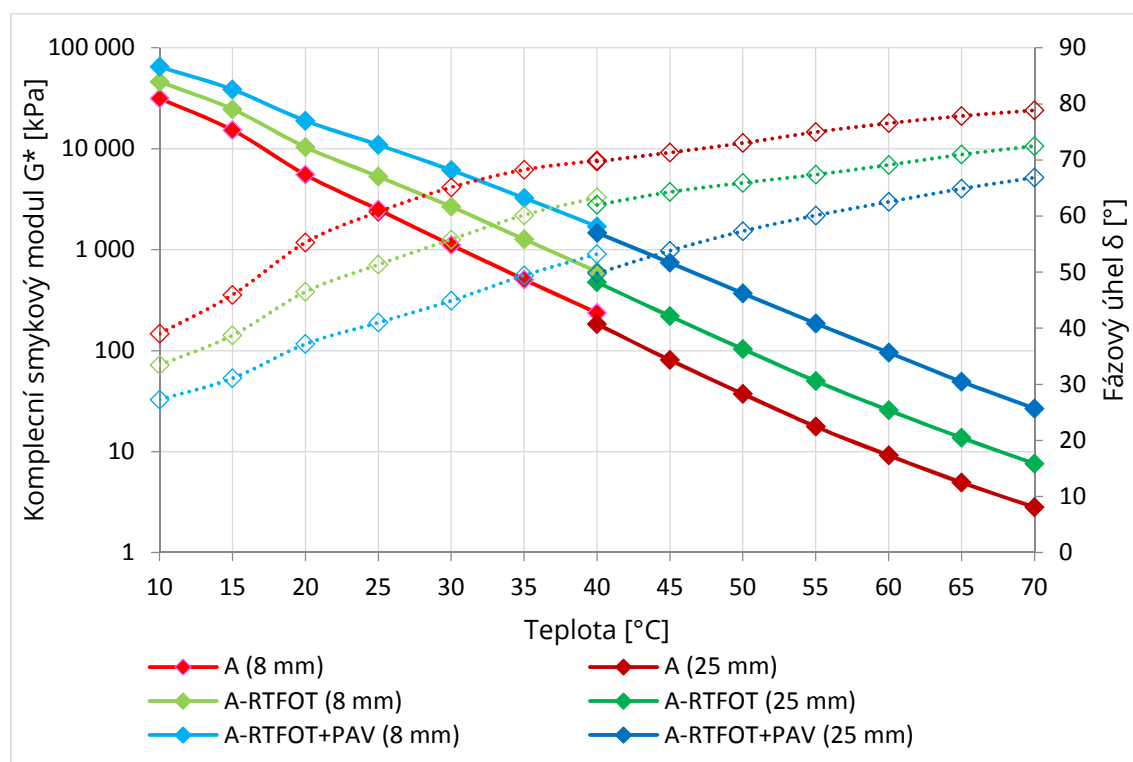
Graf 18: Blackův diagram dle ČSN EN 14770 nezestárých asfaltových pojiv



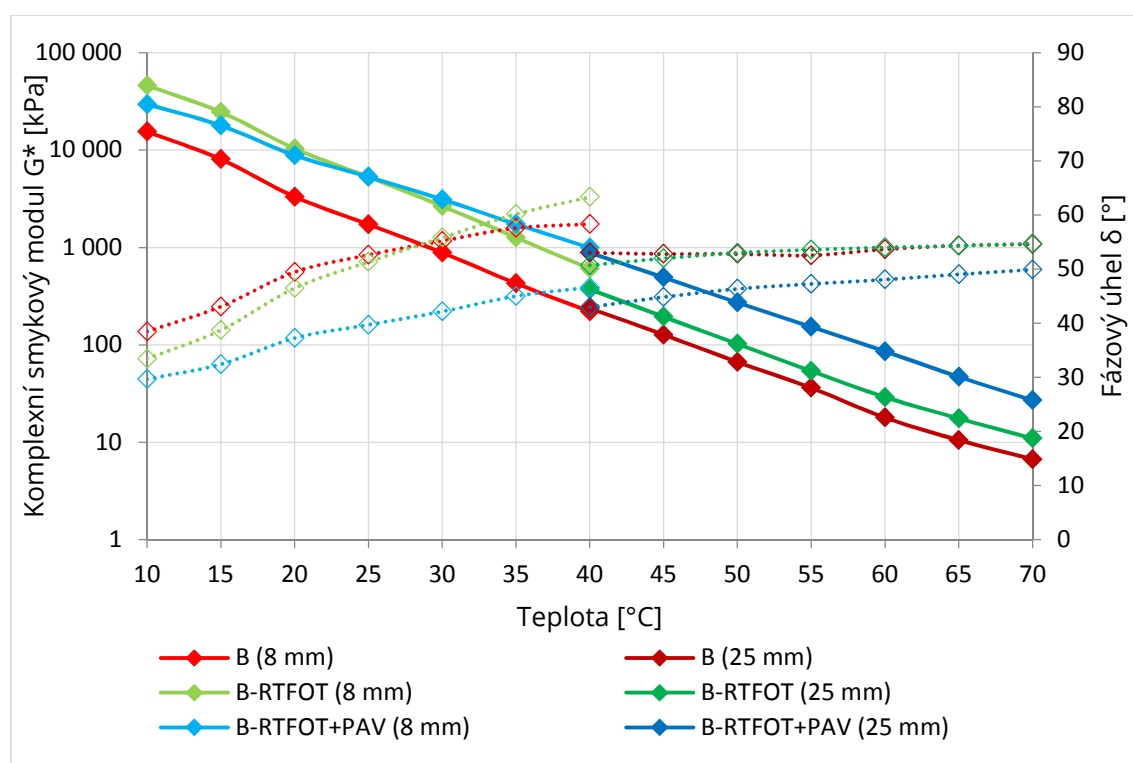
Z Blackova diagramu – graf 18 je vidět, že asfaltová pojiva PMB 25/55-55 NV (pojivo A), PMB 25/55-60+0,5 % Evotherm (pojivo F) a srovnávací silniční asfalt 50/70 (pojivo G) mají hladký průběh, oproti tomu u asfaltů PMB 45/80 NV (pojivo B) a 50/70 NV (pojivo C) není jejich průběh hladký, spíše jejich průběh vypadá jako „hřebínek“. U těchto pojiv lze pozorovat, že jsou silně závislá na frekvenci zatížení a s rostoucí frekvencí zatížení se jejich fázové úhly a hodnoty komplexního smykového modulu prudce zvyšují. Tento průběh Blackova diagramu dosahují často pojiva s porušenou disperzní (koloidní) stabilitou.

Dalším poznatkem, na který je potřeba poukázat je, že u asfaltu PMB 45/80 NV (pojivo B), 50/70 NV (pojivo C) a PMB 25/55 NV (pojivo D) se nachází v průbězích jejich Blackova diagramu přetržka mezi dvěma teplotami. U asfaltu PMB 45/80 NV (pojivo B) mezi teplotami 55 °C a 60 °C. U pojiva 50/70 NV (pojivo C) je přetržka mezi 60 °C a 65 °C a u pojiva PMB 25/55 NV (pojivo D) mezi teplotami 55 °C a 60 °C. Toto chování je často typické pro pojiva obsahující plastomerové přísady.

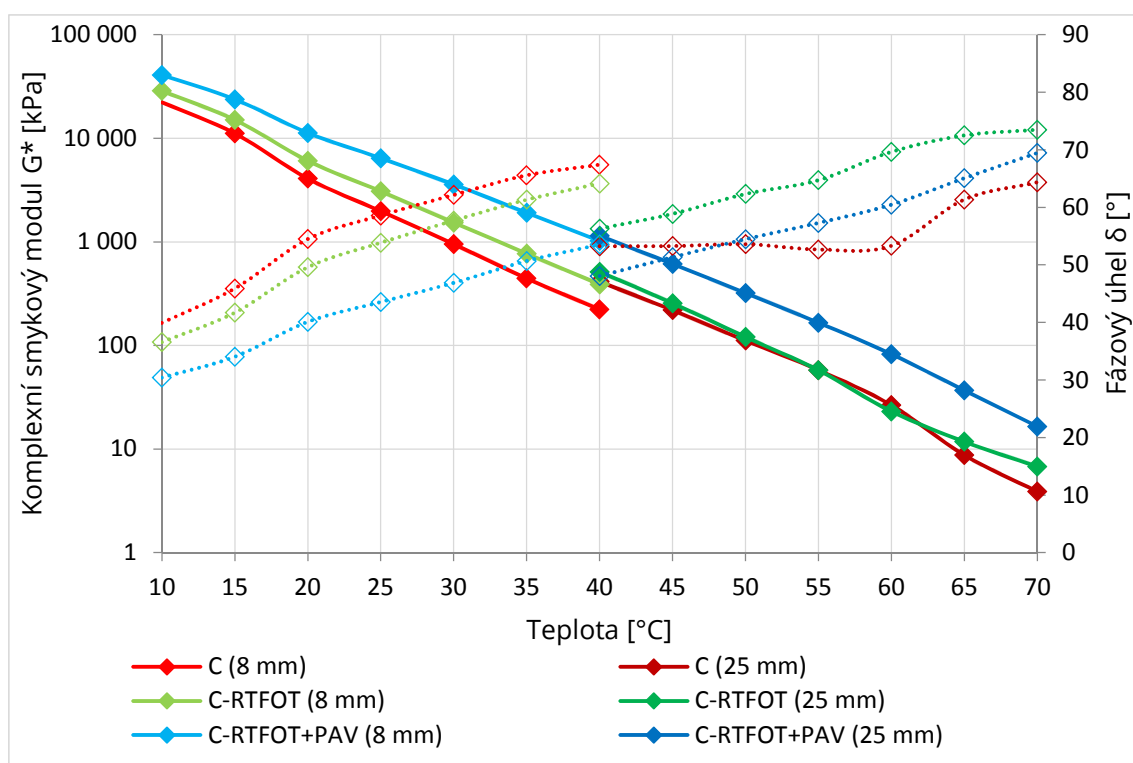
Graf 19: Průběh smykového modulu a fázového úhlu asfaltu PMB 25/55-55 NV (pojivo A)



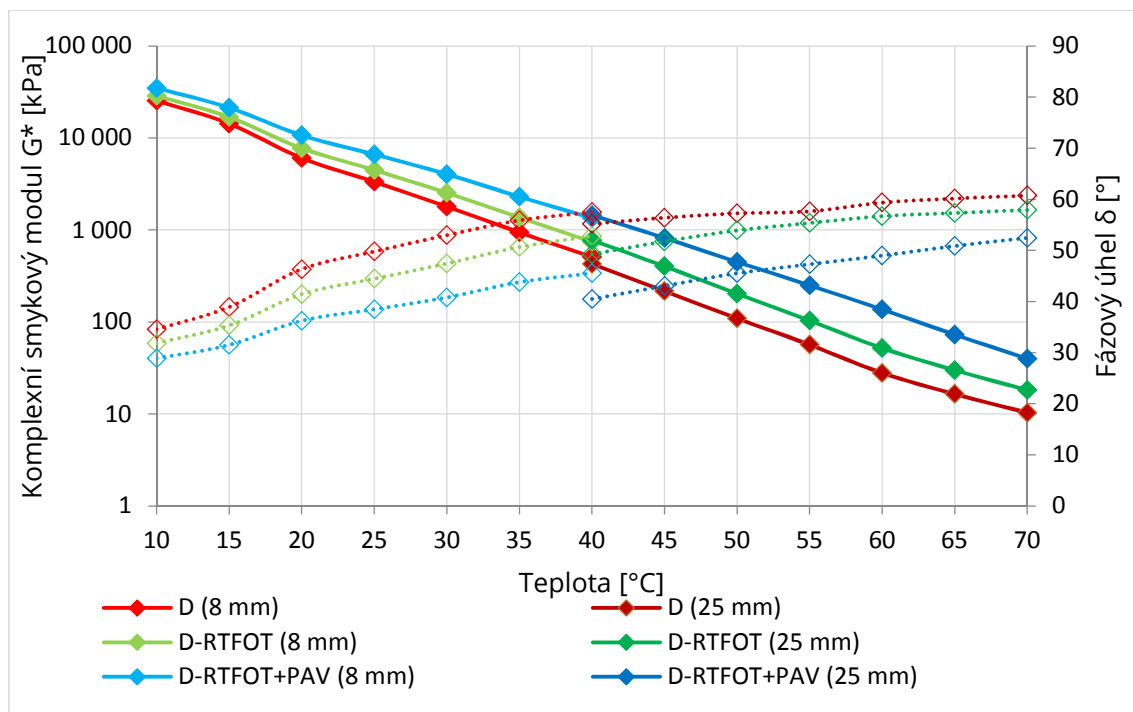
Graf 20: Průběh smykového modulu a fázového úhlu asfaltu PMB 45/80 NV (pojivo B)



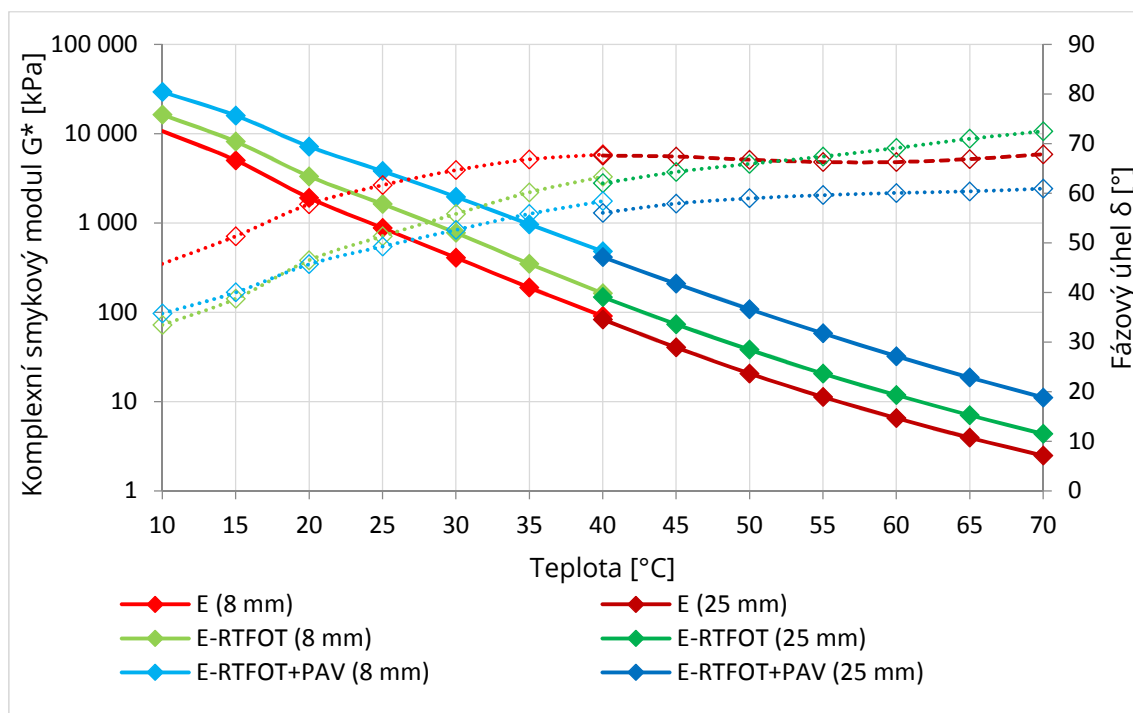
Graf 21: Průběh smykového modulu a fázového úhlu asfaltu 50/70 NV (pojivo C)



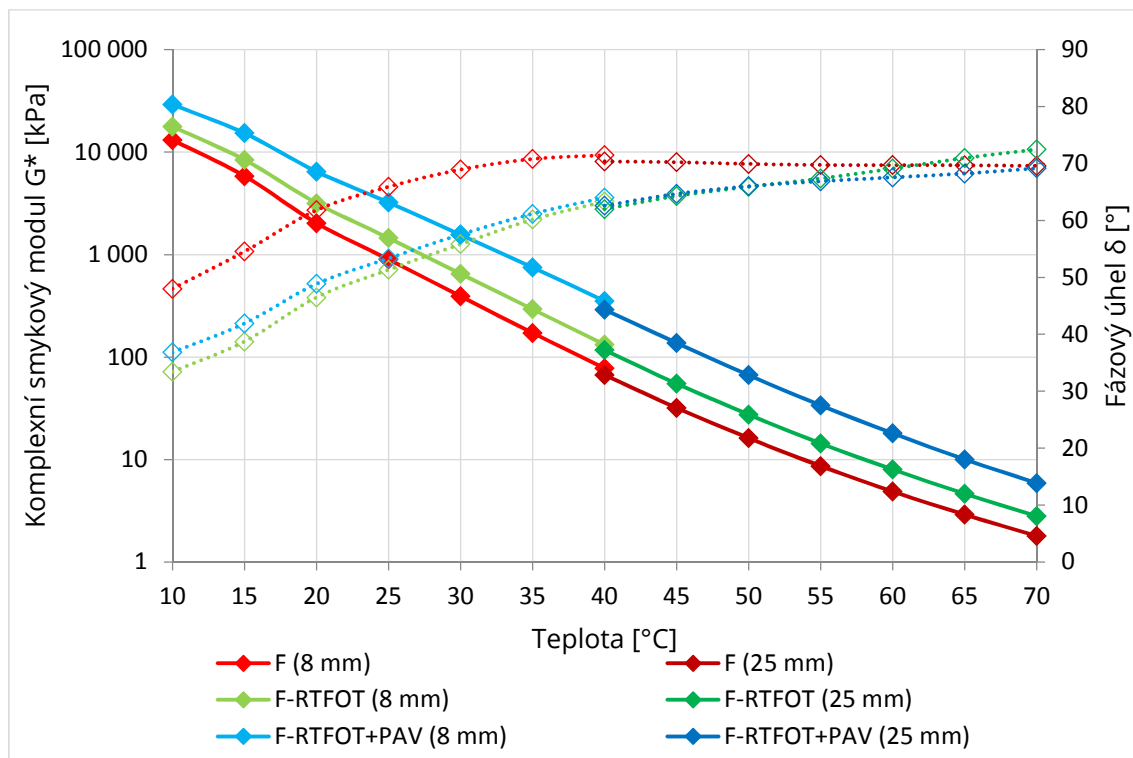
Graf 22: Průběh smykového modulu a fázového úhlu asfaltu PMB 25/55 NV (pojivo D)



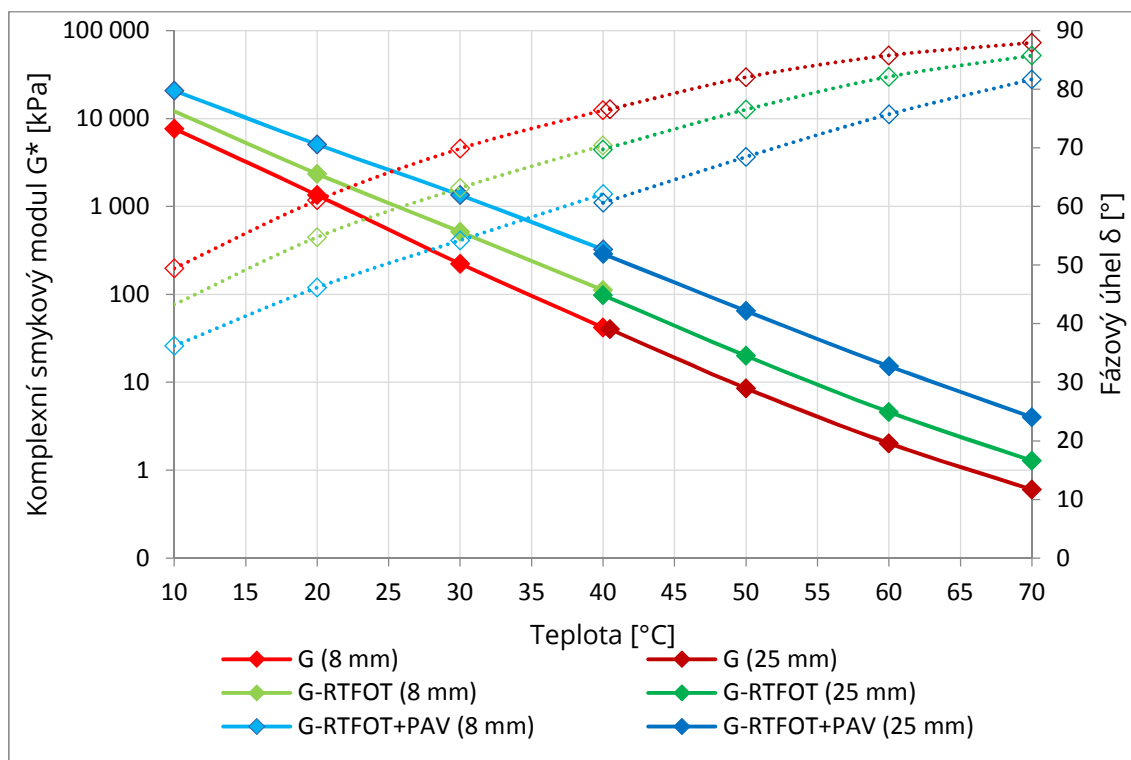
Graf 23: Průběh smykového modulu a fázového úhlu srovnávacího asfaltu PMB 25/55-60 (pojivo E)



Graf 24: Průběh smykového modulu a fázového úhlu asfaltu PMB 25/55-60+0,5 % Evotherm (pojivo F)



Graf 25: Průběh smykového modulu a fázového úhlu srovnávacího silničního asfaltu 50/70 (pojivo G)



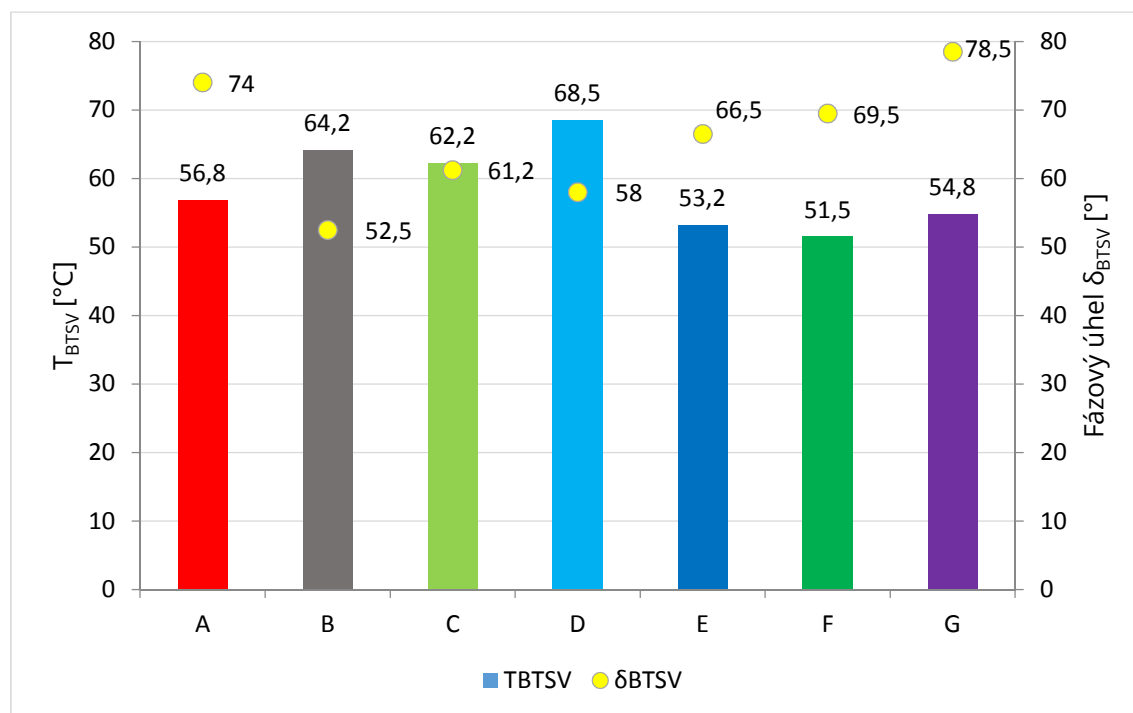
V grafech 19 – 25 jsou zobrazeny průběhy komplexního smykového modulu G^* a fázového úhlu δ určené v DSR s použitou geometrií průměru 8 mm a průměru 25 mm. V grafech jsou zobrazeny průběhy smykových modulů a fázových úhlů v nezestárlém stavu, zestárnuté metodou RTFOT a metodou RTFOT+PAV. Ve výše uvedených grafech je zřejmé, jak se vlivem stárnutí jednotlivé moduly posouvají směrem nahoru, což může predikovat křehnutí asfaltových pojiv a také pokles fázových úhlů, kdy vlivem stárnutí se více projevuje elastická složka pojiv. V grafech 20, 21 a 22 je vidět, že na sebe fázové úhly a smykové moduly při přechodu z 8 mm geometrie na 25 mm geometrii nenavazují. Důvodem může být nesprávné seříznutí zkušební vzorku, ale při pohledu na Blackův diagram těchto pojiv, který je na grafu 18 je vidět, že se jedná o pojiva, jejichž průběh není plynulý.

6.7 Měření komplexního modulu ve smyku dle ČSN 65 7222-3 (Příloha A)

Tato zkouška byla provedena podle normy ČSN 65 7222-3, příloha A. Tento postup uvedený v normě ČSN 65 7222-3 byl inspirován postupem popsáním v německém předpise AL BTSV (DSR). Postup této zkoušky je popsán v kapitole 4.9. Při stanovení komplexního smykového modulu byla použita geometrie deska – deska průměru 25 mm s tloušťkou mezery 1 mm

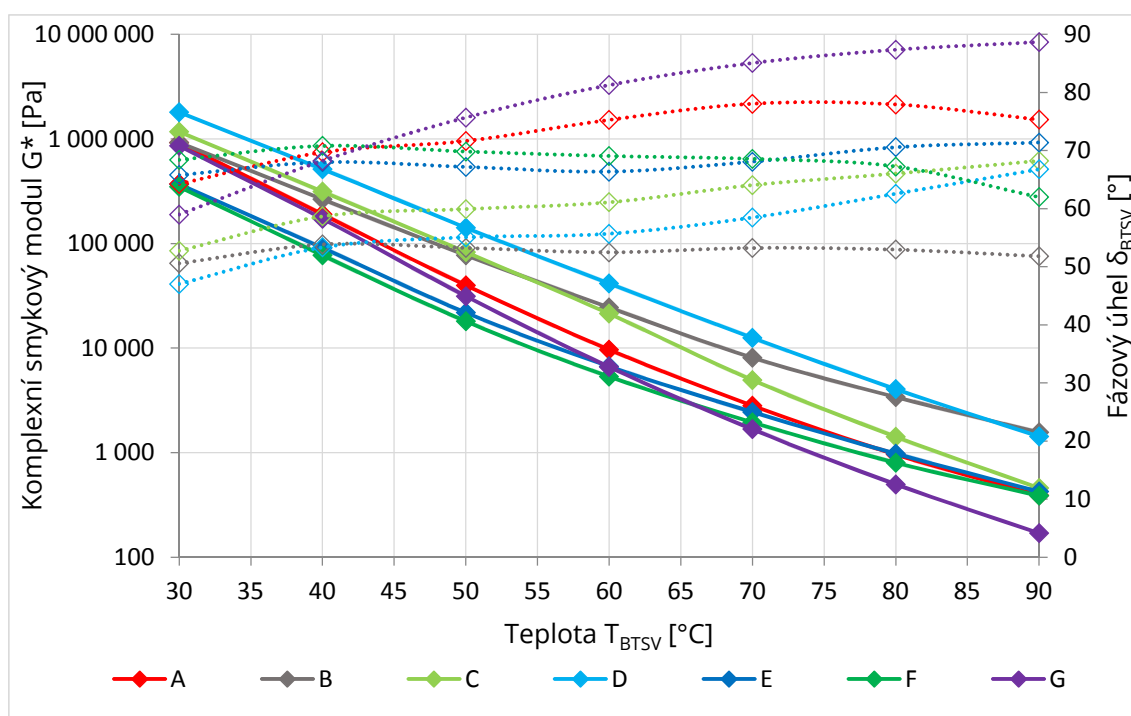
s rozsahem teplot od 30 °C do 90 °C s krokem 10 °C při konstantní zatěžovací frekvenci 1,59 Hz. Zkouška probíhá v režimu řízeného přetvoření. Výsledkem zkoušky je teplota T_{BTSV} a fázový úhel δ_{BTSV} , kdy je komplexní smykový modul $G^* = 15$ kPa. Měření bylo provedeno na nezestárnutých vzorcích asfaltových pojiv. Naměřené teploty a odpovídající fázové úhly jsou zobrazeny v grafu 26.

Graf 26: Teplota T_{BTSV} a fázový úhel δ_{BTSV} při dosažení $G^* = 15$ kPa



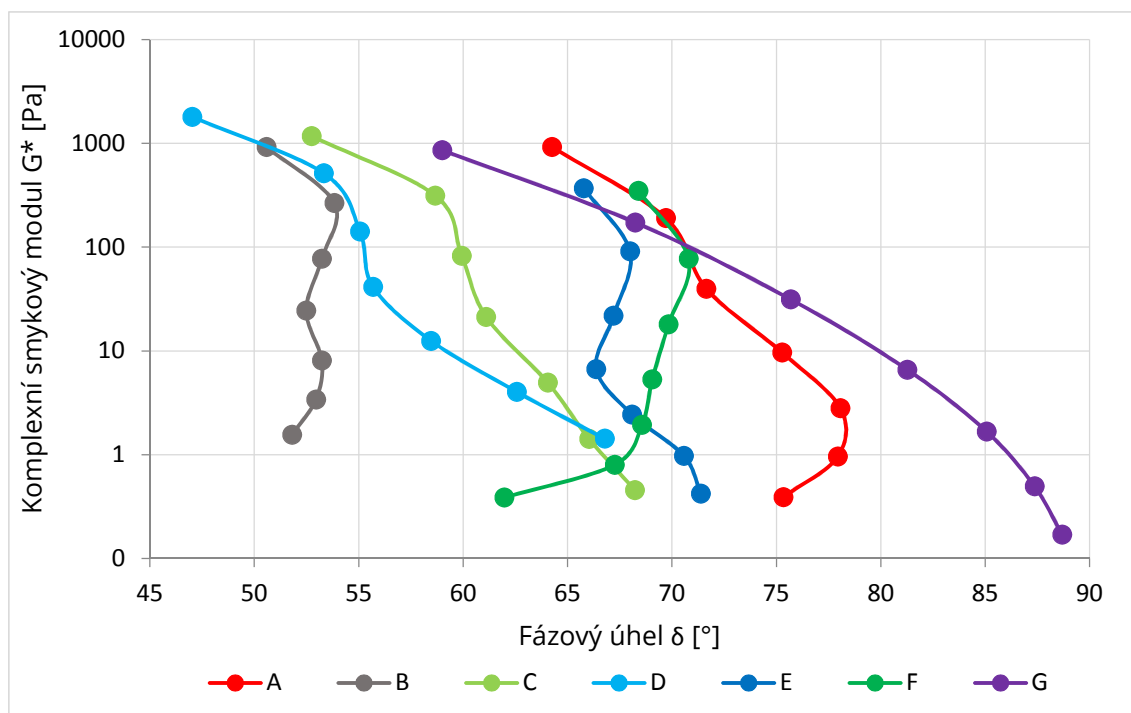
Z grafu 26 lze vyčíst, že u asfaltu PMB 25/55-55 NV (pojivo A) došlo k dosažení komplexního smykového modulu $G^* = 15$ kPa při teplotě $T_{\text{BTSV}} = 56,8$ °C a fázovém úhlu $\delta_{\text{BTSV}} = 74$ °. Hodnota komplexního modulu ve smyku dosáhla u asfaltu PMB 45/80 NV (pojivo B) při teplotě $T_{\text{BTSV}} = 64,2$ °C a fázového úhlu $\delta_{\text{BTSV}} = 52,5$ °. Komplexní smykový modul pojiva 50/70 NV (pojivo C) při hodnotě $G^* = 15$ kPa odpovídá teplotě $T_{\text{BTSV}} = 62,2$ °C a fázovému úhlu $\delta_{\text{BTSV}} = 61,2$ °. U pojiva PMB 25/55 NV (pojivo D) byla odečtena teplota $T_{\text{BTSV}} = 68,5$ °C a fázový úhel $\delta_{\text{BTSV}} = 58$ °. Teplota $T_{\text{BTSV}} = 53,2$ °C a fázový úhel $\delta_{\text{BTSV}} = 66,5$ ° u srovnávacího asfaltu PMB 25/55-60 (pojivo E). U pojiva PMB 25/55-60+0,5 % Evotherm (pojivo F) byla odečtena teplota $T_{\text{BTSV}} = 51,5$ °C a fázový úhel $\delta_{\text{BTSV}} = 69,5$ °. U běžně používaného silničního asfaltu 50/70 (pojivo G) byla změřena teplota $T_{\text{BTSV}} = 54,8$ °C a fázový úhel $\delta_{\text{BTSV}} = 78,5$ °.

Graf 27: Průběh komplexních smykových modulů a fázových úhlů zkoušených poжив



Průběhy komplexních smykových modulů G^* a fázových úhlů stanovené postupem uvedeným v Příloze A normy ČSN 65 7222-3 všech zkoumaných poжив jsou zobrazeny v grafu 27. Z grafu můžeme vyvodit závěr, že s rostoucí teplotou komplexní smykový modul klesá. Nejnížší hodnoty komplexního smykového modulu dosahuje srovnávací silniční asfalt 50/70 (poжив G) naproti tomu polymerem modifikované asfalty (poживa A – B a D - F) mají při vyšších teplotách vyšší hodnoty komplexního smykového modulu. U této zkoušky je zajímavý průběh fázových úhlů. Průběh fázového úhlu u srovnávacího silničního asfaltu 50/70 (poжив G) je podobný jako při stanovení dle ČSN EN 14770. U polymerem modifikovaných asfaltů (poживa A – B a D - F) se hodnoty fázových úhlů pohybují v úzkém intervalu od 45 ° do 75 °. U silničního asfaltu modifikovaného nízkoteplotní přísadou (poжив C) se hodnoty fázového úhlu pohybují od 50 ° do 70 °.

Graf 28: Blackův diagram dle ČSN 65 7222-3

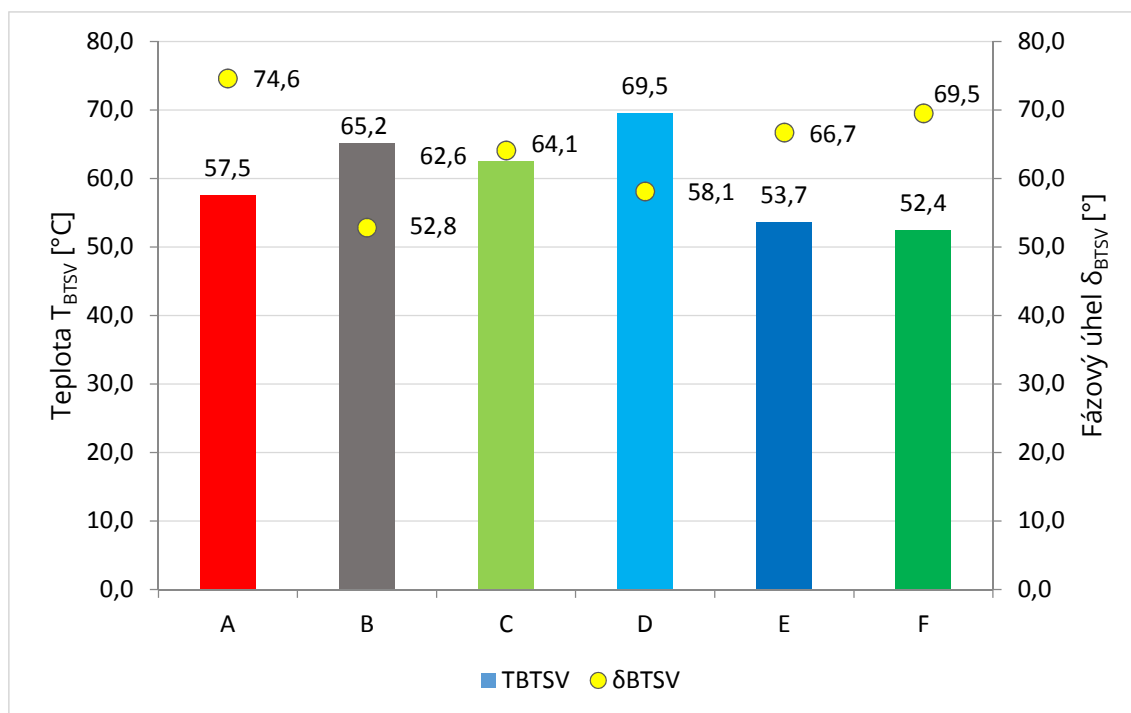


Graf 28 zobrazuje Blackův diagram dle ČSN 65 7222-3, závislost komplexního smykového modulu na fázovém úhlu asfaltových pojiv. V grafu můžeme vidět, že srovnávací silniční asfalt 50/70 (pojivo G) se asymptoticky přibližuje k 90 °. Ostatní pojiva jsou charakterizována zvlněným tvarem při nižších fázových úhlech, což je typické pro polymerem modifikovaná asfaltová pojiva.

6.8 Stanovení komplexního modulu ve smyku dle AL BTSV (DSR)

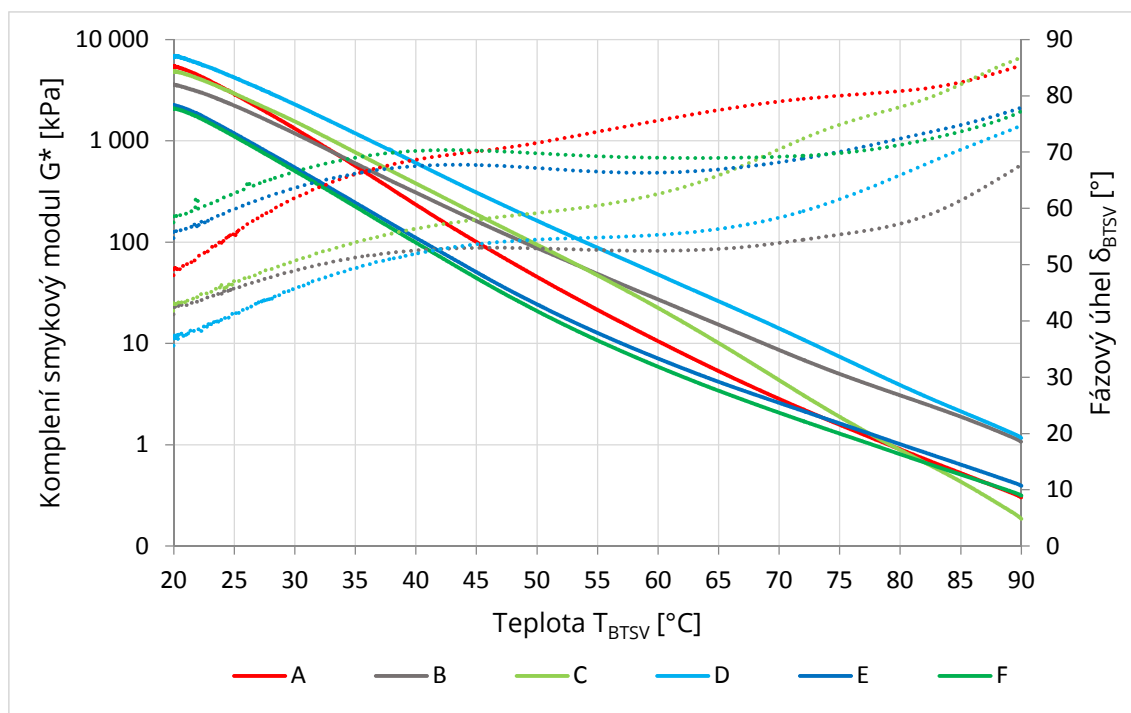
Stanovení komplexního modulu ve smyku bylo provedeno podle německé normy AL BTSV (DSR). Měření bylo provedeno v dynamickém smykovém reometru s geometrií deska – deska průměru 25 mm a tloušťky vzorku 1 mm. U této metody je konstantní frekvence zatěžování 1,59 Hz v teplotním intervalu od 20 °C do 90 °C v režimu teplotní rampy s rychlostí nárůstu teploty 1,2 °C/min. Výsledkem zkoušky je teplota T_{BTSV} a fázový úhel δ_{BTSV} při hodnotě komplexního smykového modulu $G^* = 15 \text{ kPa}$.

Graf 29: Teplota T_{BTSV} a fázový úhel δ_{BTSV} při dosažení $G^* = 15 \text{ kPa}$



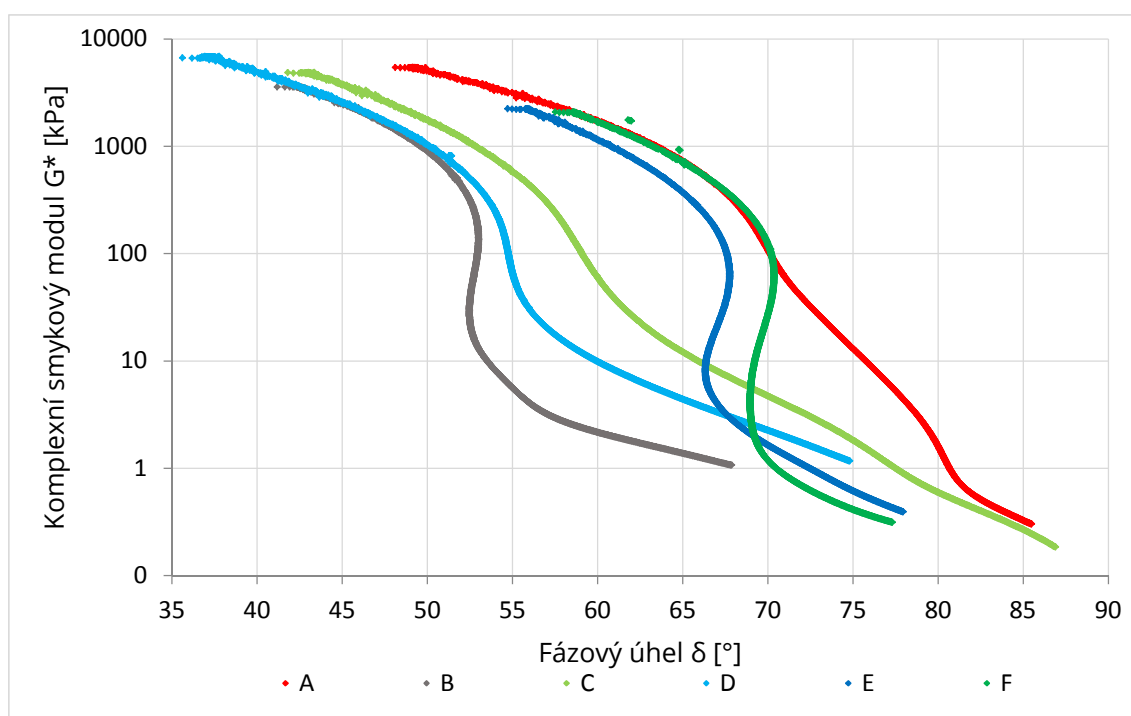
Graf 29 zobrazuje hodnoty teplot T_{BTSV} a fázových úhlů δ_{BTSV} při dosažení komplexního smykového modulu $G^* = 15 \text{ kPa}$. U asfaltového pojiva PMB 25/55-55 NV (pojivo A) došlo k dosažení komplexního smykového modulu $G^* = 15 \text{ kPa}$ při teplotě $T_{\text{BTSV}} = 57,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a fázovém úhlu $\delta_{\text{BTSV}} = 74,6 \text{ }^{\circ}$. Pro pojivo PMB 45/80 NV (pojivo B) je tato teplota $T_{\text{BTSV}} = 65,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a fázový úhel $\delta_{\text{BTSV}} = 52,8 \text{ }^{\circ}$, 50/70 NV (pojivo C) teplota $T_{\text{BTSV}} = 62,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a fázový úhel $\delta_{\text{BTSV}} = 64,1 \text{ }^{\circ}$, PMB 25/55 NV (pojivo D) teplota $T_{\text{BTSV}} = 69,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a fázový úhel $\delta_{\text{BTSV}} = 58,1 \text{ }^{\circ}$, srovnávací asfalt PMB 25/55-60 (pojivo E) teplota $T_{\text{BTSV}} = 53,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a fázový úhel $\delta_{\text{BTSV}} = 66,7 \text{ }^{\circ}$, PMB 25/55-60+0,5% Evotherm (pojivo F) teplota $T_{\text{BTSV}} = 52,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a fázový úhel $\delta_{\text{BTSV}} = 69,5 \text{ }^{\circ}$.

Graf 30: Průběh komplexních smykových modulů a fázových úhlů zkoušených pojiv



Průběh komplexních smykových modulů a fázových úhlů jednotlivých pojiv jsou vyneseny v grafu 30. Komplexní smykový modul s rostoucí teplotou klesá, oproti tomu fázový úhel s rostoucí teplotou se zvyšuje. V grafu 30 je také vidět, že při teplotách od 50 °C do 60 °C dochází u asfaltů PMB 45/80 NV (pojivo B), PMB 25/55 NV (pojivo D), srovnávacího asfaltu PMB 25/55-60 (pojivo E) a PMB 25/55-60+0,5 % Evotherm k ustálení fázového úhlu.

Graf 31: Blackův diagram dle AL BTSV (DSR)



Graf 31 zobrazuje Blackův diagram závislosti komplexního smykového modulu na fázovém úhlu asfaltových pojiv. V grafu je pozorováno, že polymerem modifikovaná pojiva jsou charakterizována zvlněným tvarem při nižších fázových úhlech. Je zajímavé, že průběh křivek jednotlivých pojiv se s rostoucí teplotou a s tím související pokles komplexního modulu ve smyku a blížení se jejich fázové úhly k 90 °, mají za následek, že u těchto pojiv začíná převažovat viskózní složka nad elastickou.

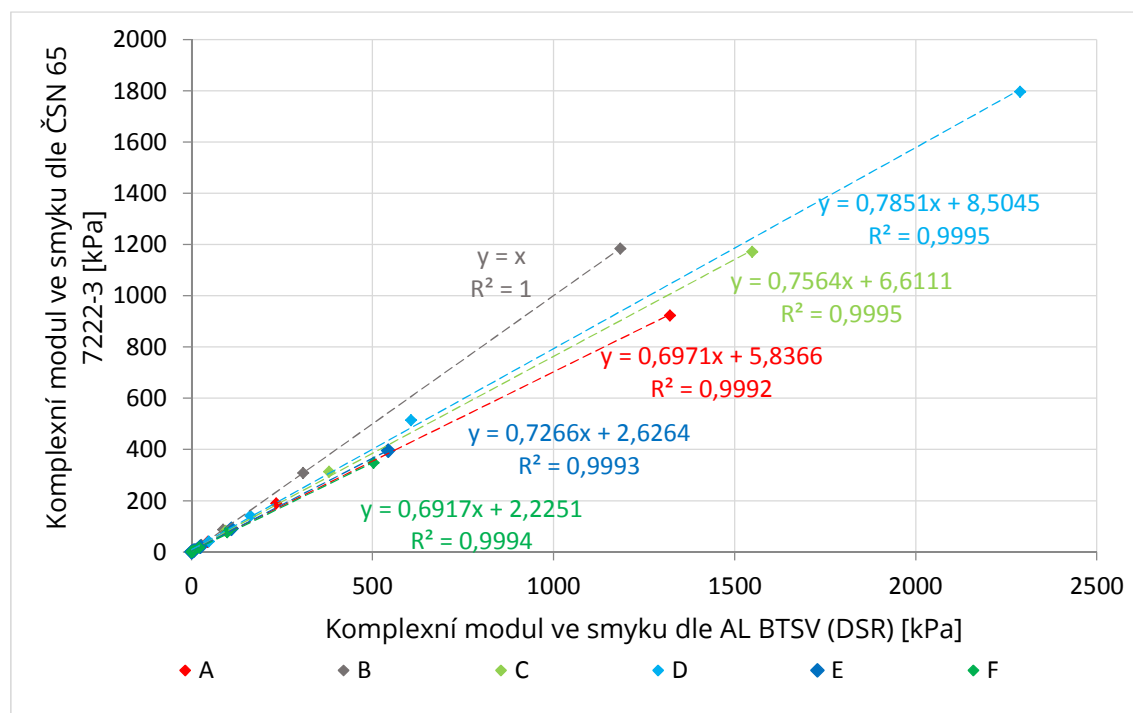
6.9 Porovnání komplexních smykových modulů G^*

Cílem této kapitoly je porovnání komplexních smykových modulů G^* , které byly měřeny v rámci této práce, jelikož tyto veličiny byly změřeny podle tří norem a to dle ČSN EN 14770, ČSN 65 7222-3 (příloha A) a AL BTSV (DSR). V tabulce 15 jsou shrnuty základní rozdíly těchto postupů.

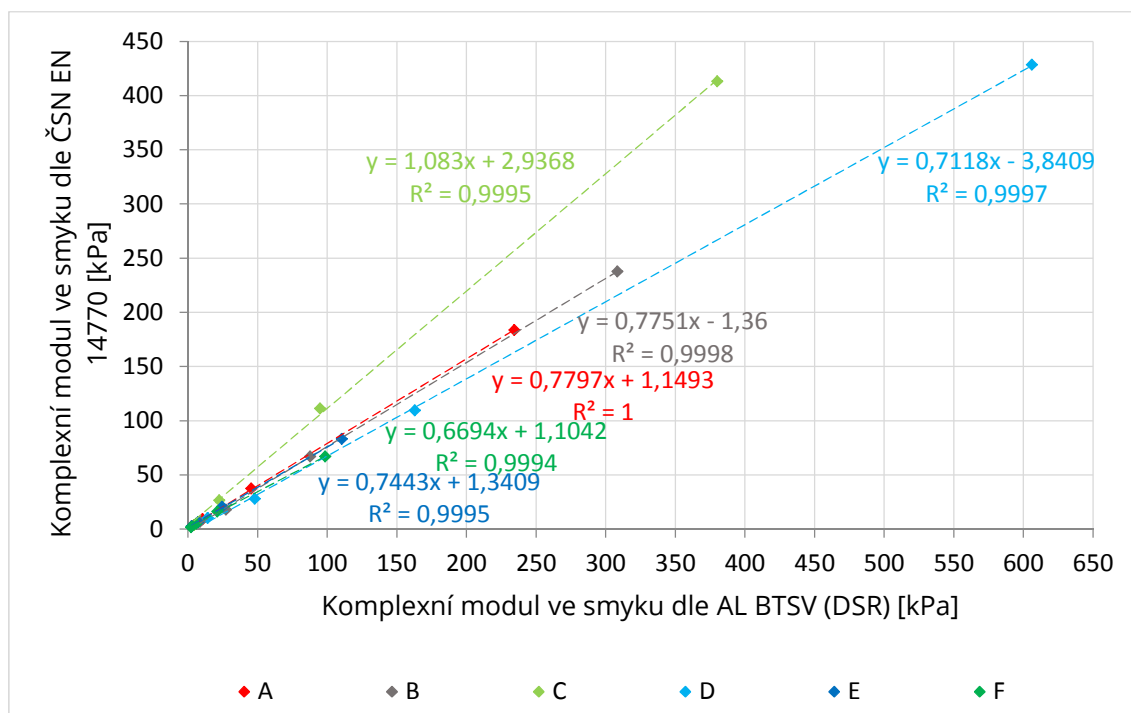
Tabulka 15: Základní přehled použitých norem v rámci práce

		ČSN EN 14770	ČSN 65 7222-3	AL BTSV (DSR)
Geometrie průměr	[mm]	8 a 25	25	25
Frekvence	[Hz]	0,1 až 10	1,59	1,59
Teplota zkoušky	[°C]	40 - 10, 70 - 40	30 - 90	20 - 90
Teplotní krok	[°C]	5,0	10,0	-
Změna teploty	[°C/min]	-	-	1,2
Průběh měření	[-]	Bodový	Bodový	Teplotní rampa
Režim zkoušky	[-]	Oscilační	Oscilační	Oscilační
Výsledek měření	[-]	Změřená hodnota	Průměr z 10 měření	Změřená hodnota
Výsledek zkoušky	[°C, °, kPa]	Komplexní modul ve smyku a fázový úhel	Teplota a fázový úhel	Teplota a fázový úhel

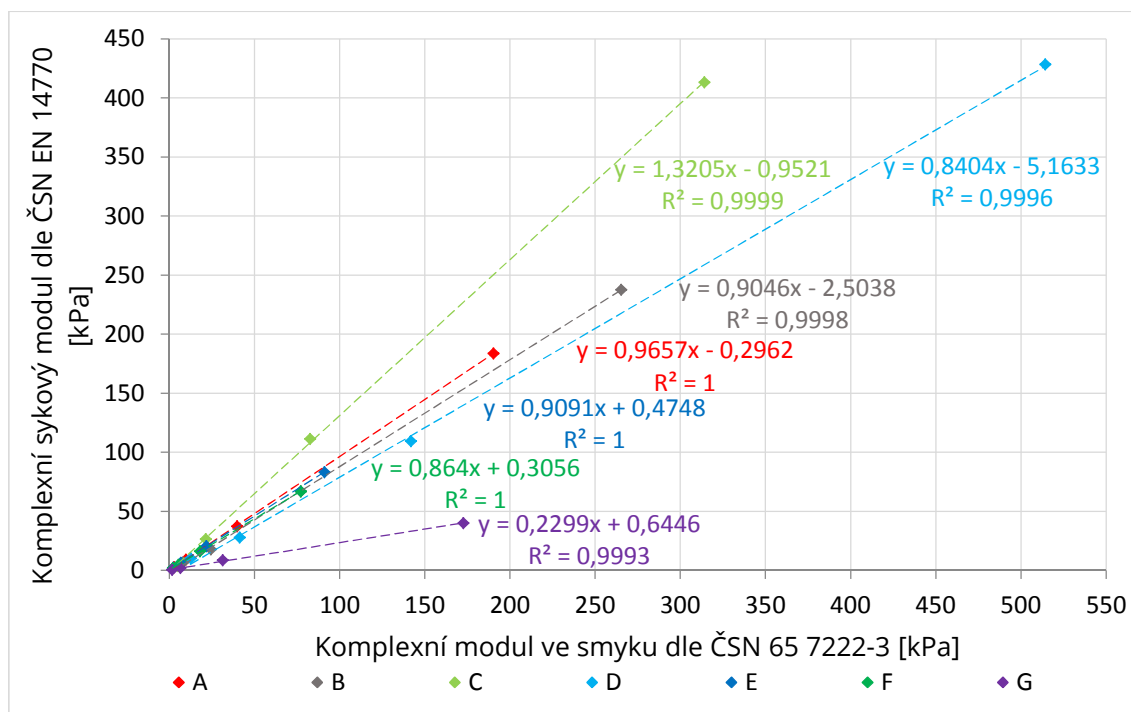
Graf 32: Porovnání normy ČSN 65 7222-3 a AL BTSV (DSR) při frekvenci 1,59 Hz a teplotě od 30 °C do 90 °C



Graf 33: Porovnání normy ČSN EN 14770 a AL BTSV (DSR) při frekvenci 1,59 Hz a teplotě od 40 °C do 70 °C



Graf 34: Porovnání norem ČSN EN 14770 a ČSN 65 7222-3 při frekvenci 1,59 Hz a teplotě od 40 °C do 70 °C



Porovnání závislostí mezi jednotlivými normami pro stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu jsou zobrazeny v grafech

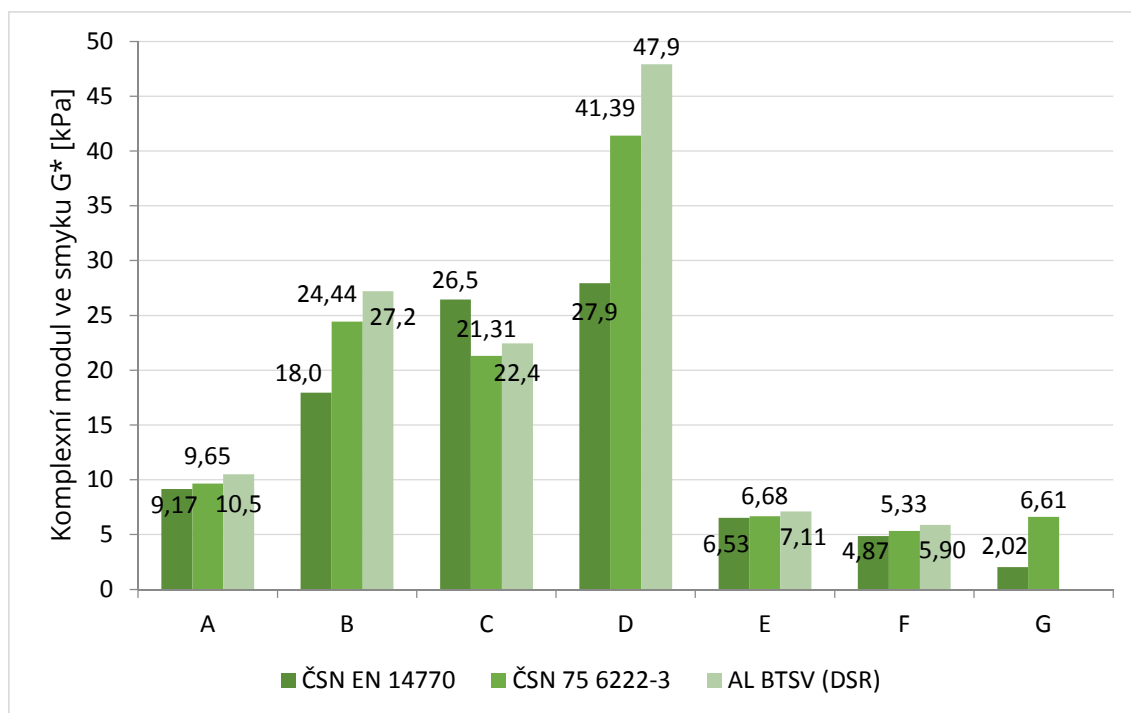
32 až 34. Závislost jednotlivých norem mezi sebou lze popsat matematicky tak, že sklon přímky, která je proložena mezi body metodou nejmenších čtverců má sklon 45° , popřípadě chceme-li tuto závislost popsat pomocí funkce, musí být funkce ve tvaru $y = x$. Nachází-li se před členem x v rovnici násobitel, který je větší jak 1,0, znamená to, že sklon přímky je větší jak 45° a hodnoty na svislé ose dosahují vyšších hodnot než na ose vodorovné. Na druhé straně, je-li násobitel před veličinou x v rovnici menší jak 1,0, je sklon tečny menší než 45° a hodnoty uvedené na ose vodorovné jsou větší než na ose svislé. Hodnota R^2 (koeficient determinace) udává, jak moc jsou hodnoty rozptýlené okolo proložené přímky v ideálním případě, kdy $R^2 = 1,0$, leží tyto body na přímce.

Nejpodstatnější grafem je graf 32, který vyjadřuje závislost mezi nově platnou normou ČSN 65 7222-3 a normou AL BTSV (DSR), ze které byly čerpány postupy pro stanovení komplexního modulu ve smyku G^* a fázového úhlu δ . V grafu 32 je vidět, že asfalt PMB 45/80 NV (pojivo B) má rovnici ve tvaru $y = x$ a rozptyl hodnot $R^2 = 1,0$, to znamená, že hodnoty naměřené podle normy ČSN 65 7222-3 a AL BTSV (DSR) jsou totožné. U ostatních asfaltových pojiv se nachází násobitelé před členem x menší jak 1,0. Násobitelé před členem x se pohybují od 0,6917 (pojivo F) po 0,7851 (pojivo D). Závěr ke grafu 32 je tedy, že hodnoty komplexního modulu ve smyku stanovené dle AL BTSV jsou větší než hodnoty stanovené dle ČSN 65 7222-3. Rozdíly v naměřených hodnotách mohou být způsobeny vlivem rozdílným postupů pro stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu. Rozdíly mezi těmito normami jsou zobrazeny v tabulce 15.

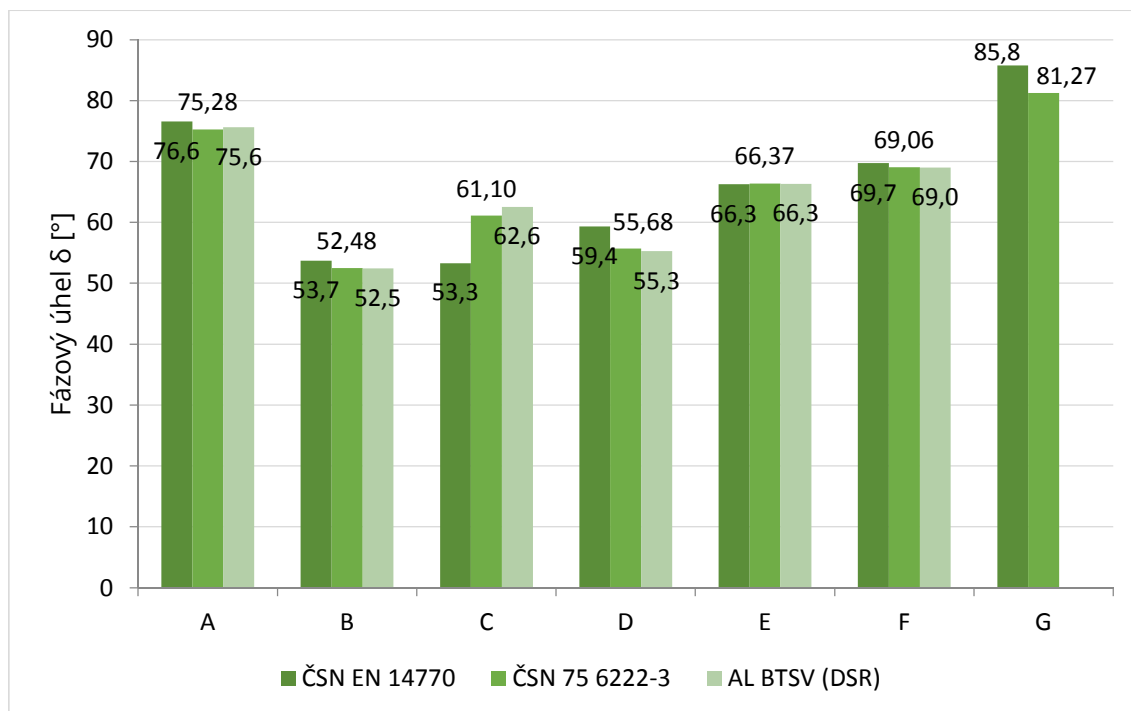
V grafu 33 je zobrazena závislost mezi normou ČSN EN 14770 a AL BTSV (DSR). I u tohoto grafu vidět, že komplexní smykový modul stanovený dle AL BTSV (DSR) dosahuje vyšších hodnot než komplexní smykový modul stanovený dle ČSN EN 14770.

Závislost normy ČSN EN 14770 a ČSN 65 7222-3 je zobrazena v grafu 34. V grafu je vidět, že kromě asfaltu 50/70 NV (pojivo C) dosahují vyšších hodnot komplexního modulu ve smyku dle normy ČSN 65 7222-3. U většiny asfaltů lze pozorovat, kromě asfaltů 50/70 NV (pojivo C) a srovnávacího silničního asfaltu 50/70 (pojivo G), že jejich násobitel před členem x dosahuje hodnot od 0,864 (pojivo F) až po 0,9657 (pojivo A). Lze říci, že hodnoty komplexního modulu ve smyku stanovené podle těchto norem jsou si velmi blízké. Hodnota komplexního smykového modulu srovnávacího silničního asfaltu 50/70 (pojivo G) stanová podle normy ČSN 65 7222-3 je mnohem vyšší než hodnota stanovená dle ČSN EN 14770.

Graf 35: Komplexní modul ve smyku G^* při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz



Graf 36: Fázový úhel δ při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz

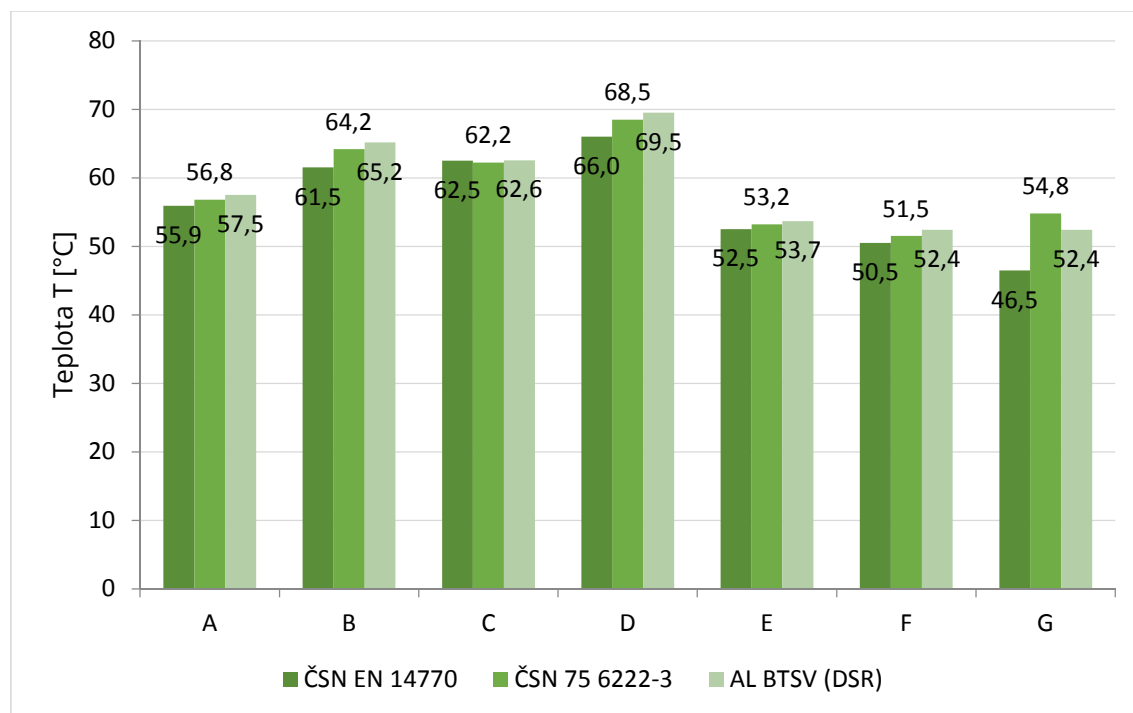


V grafu 35 jsou zobrazeny hodnoty komplexních modulů ve smyku při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz stanovené podle norem ČSN EN 14770, ČSN 75 6222-3 a AL BTSV (DSR). Lze pozorovat, že u asfaltů PMB 25/55-55 NV (pojivo A), srovnávací asfalt PMB 25/55-60 (pojivo E) a

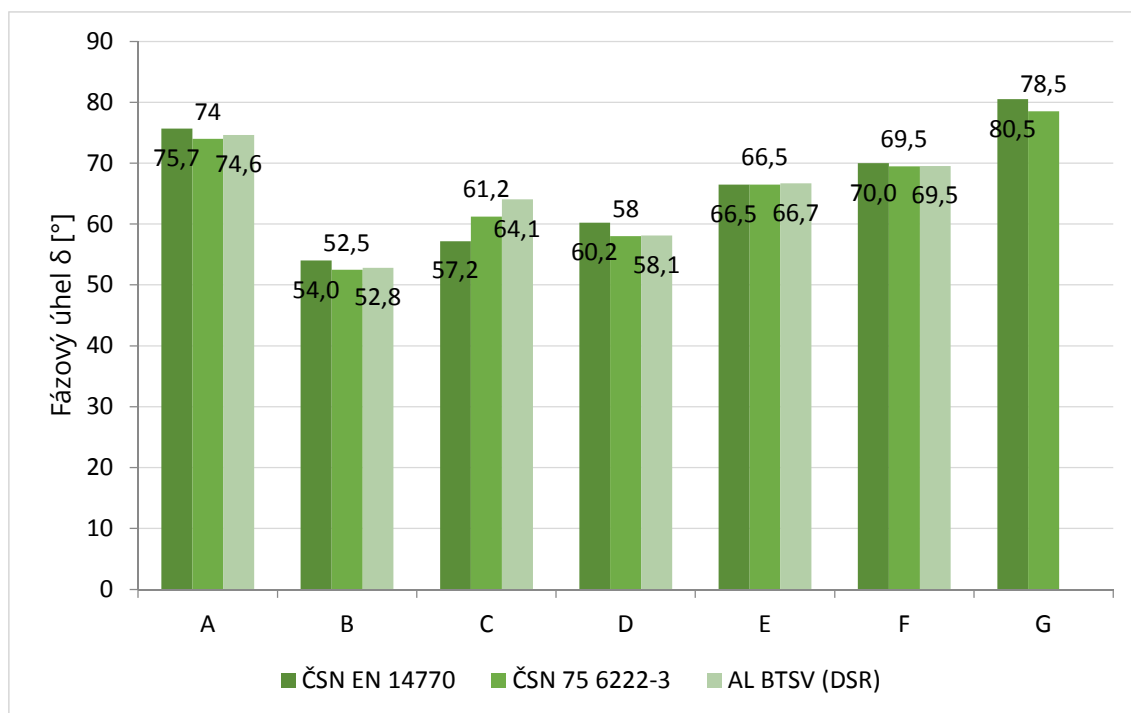
PMB 25/55-60+0,5 % Evotherm (pojivo F) je rozdíl v hodnotách komplexního modulu ve smyku okolo 1,0 kPa. Největší rozdíly v komplexních smykových modulech jsou u asfaltů PMB 45/80 NV (pojivo B), 50/70 NV (pojivo C) a u asfaltu PMB 25/55 NV (pojivo D), kde rozdíl v komplexních smykových modulech největší.

Rozdíly mezi fázovými úhly naměřenými podle srovnávaných norem jsou uvedeny v grafu 36. Je zajímavé, že fázové úhly se tak příliš neliší od sebe (jako komplexní moduly ve smyku). U asfaltů PMB 25/55-55 NV (pojivo A), PMB 45/80 NV (pojivo B), srovnávacího asfaltu PMB 25/55-55 (pojivo E) a PMB 25/55-55+0,5 % Evotherm (pojivo F) jsou rozdíly mezi fázovými úhly do 1,0 °. U asfaltů 50/70 NV (pojivo C), PMB 25/55 NV (pojivo D) a srovnávacího asfaltu 50/70 (pojivo G) jsou rozdíly v hodnotách fázových úhlů mezi jednotlivými normami mnohem vyšší.

Graf 37: Teplota T, při dosažení $G^* = 15$ kPa



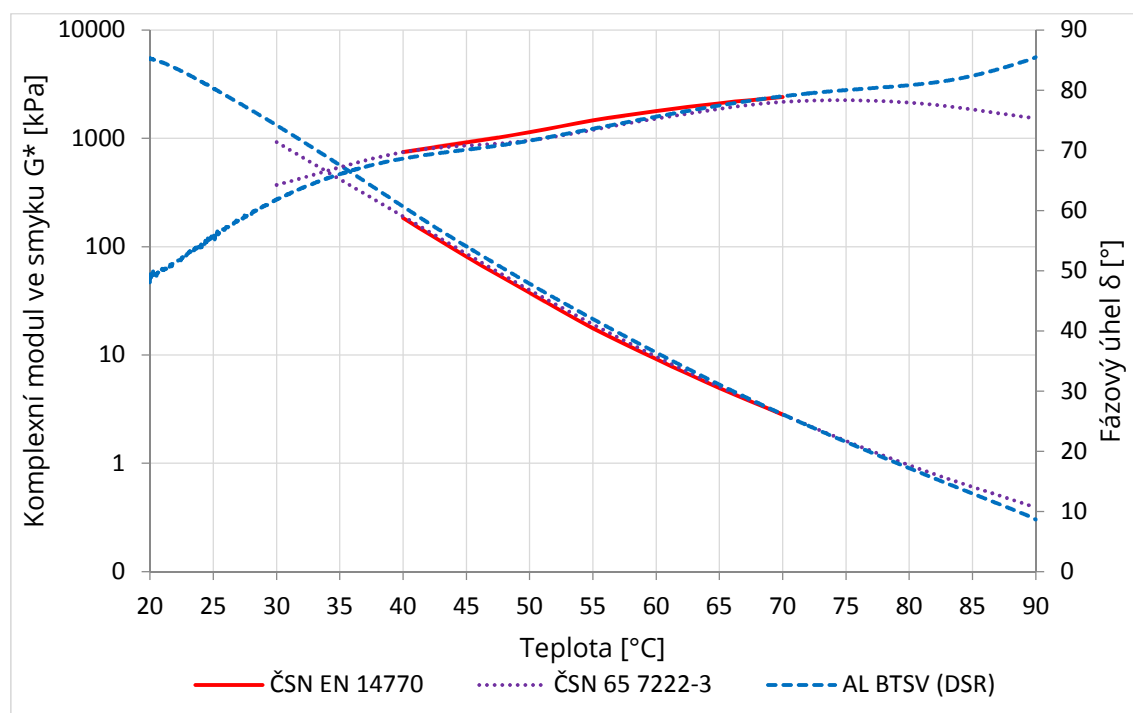
Graf 38: Fázový úhel δ při dosažení $G^* = 15$ kPa



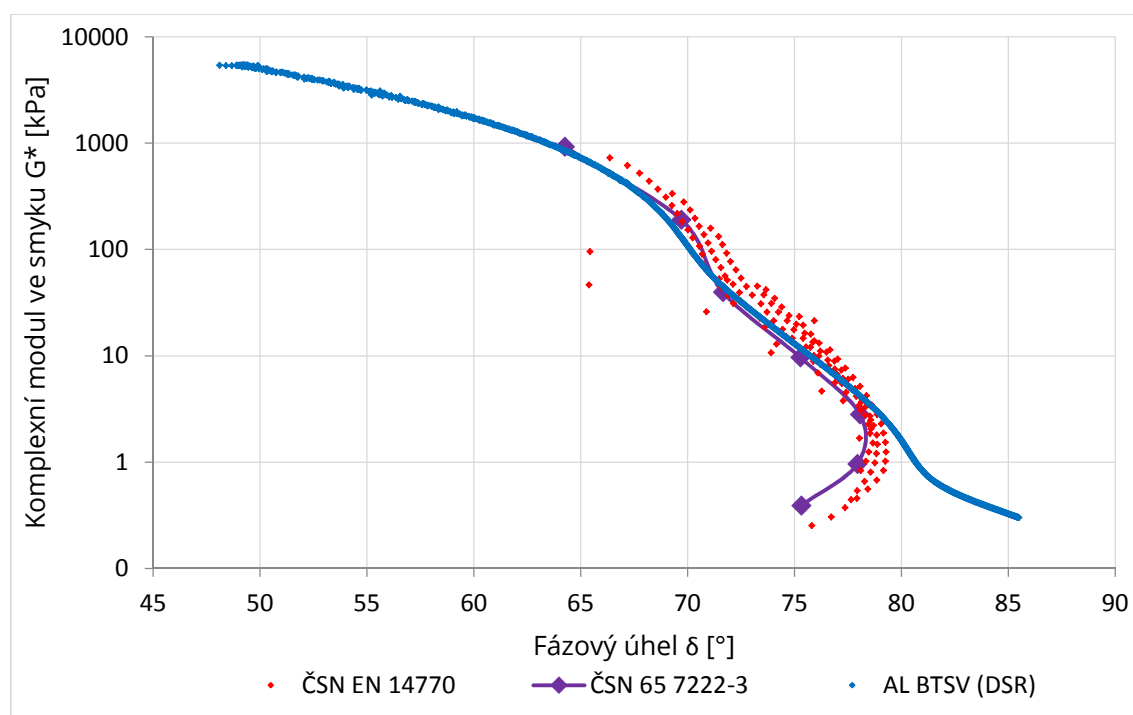
Graf 37 srovnává teploty, při níž bylo dosaženo komplexního modulu ve smyku $G^* = 15$ kPa. U asfaltů PMB 25/55-55 NV (pojivo A), 50/70 NV (pojivo C), srovnávací asfalt PMB 25/55-60 (pojivo E) a PMB 25/55-60+0,5 % Evotharm (pojivo F) se teploty, při nichž bylo dosaženo hodnoty $G^* = 15$ kPa pohybují s rozdílem do 2,0 °C. U asfaltů PMB 45/80 NV (pojivo B), PMB 25/55 NV (pojivo D) a srovnávací silniční asfalt 50/70 (pojivo G) jsou rozdíly v teplotách značné.

Graf 38 srovnává fázové úhly, které byly dosaženy při hodnotě komplexního modulu ve smyku $G^* = 15$ kPa. U asfaltů PMB 25/55-55 (pojivo A), PMB 25/55 NV (pojivo D), srovnávací asfalt PMB 25/55-60 (pojivo E) a PMB 25/55-60+0,5 % Evotharm (pojivo F) byl rozdíl mezi fázovými úhly okolo 1,0 °. Větší rozdíly u fázových úhlů se projevují u asfaltů PMB 45/80 NV (pojivo B), 50/70 NV (pojivo C) a u srovnávacího silničního asfaltu 50/70 (pojivo G).

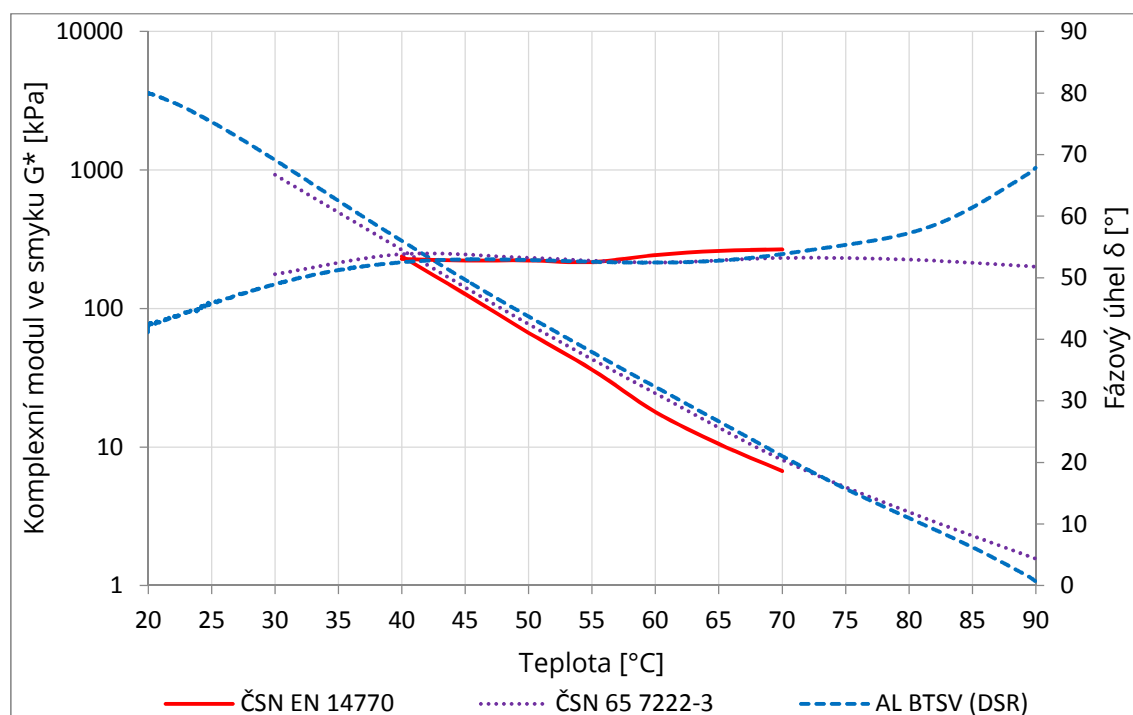
Graf 39: Porovnání komplexních smykových modulů a fázových úhlů asfaltu PMB 25/55-55 NV (pojivo A)



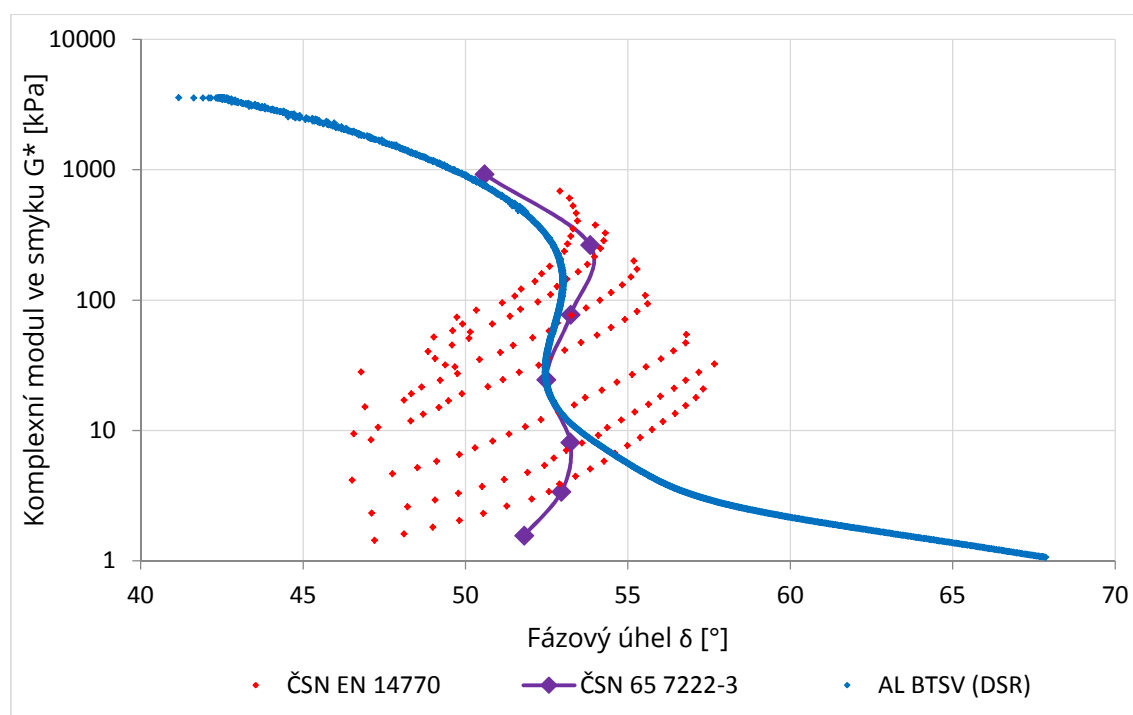
Graf 40: Porovnání Blackových diagramů asfaltu PMB 25/55-55 NV (pojivo A)



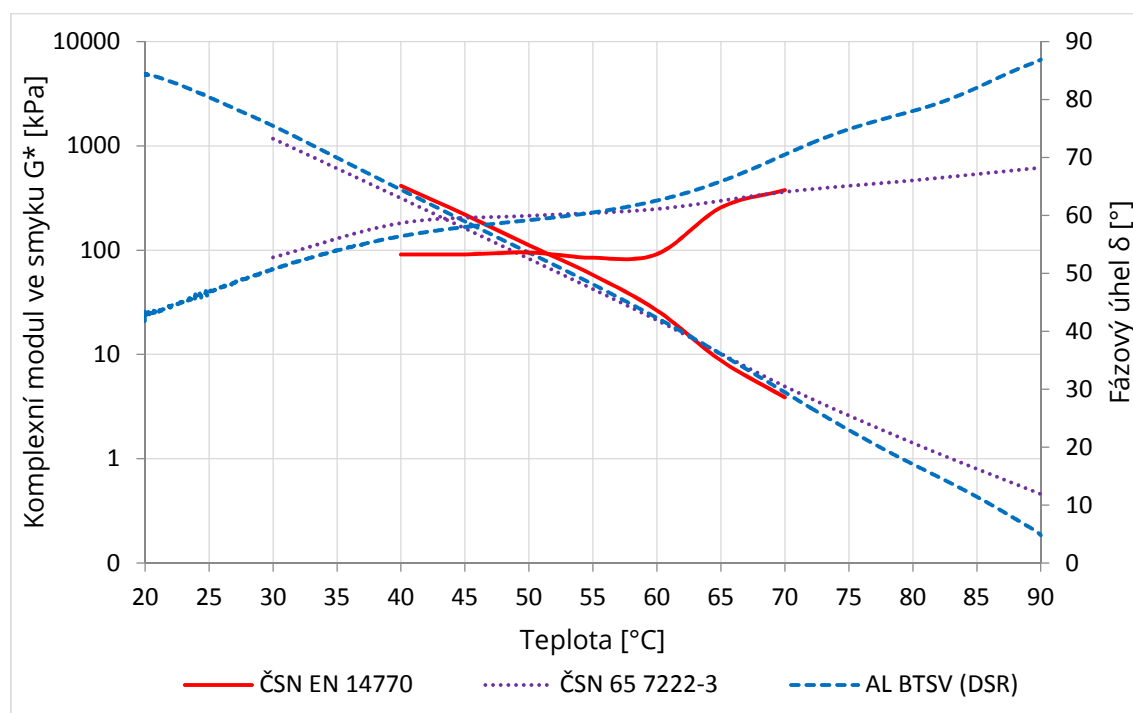
Graf 41: Porovnání komplexních smykových modulů a fázových úhlů asfaltu PMB 45/80 NV (pojivo B)



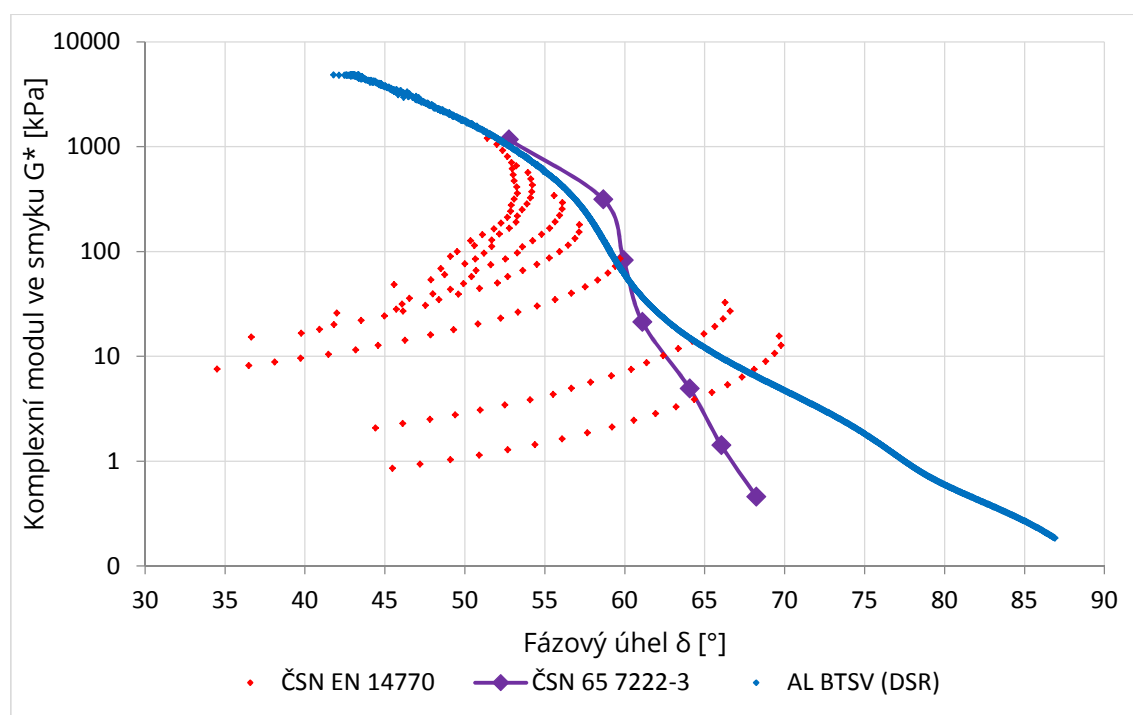
Graf 42: Porovnání Blackových diagramů asfaltu PMB 45/80 NV (pojivo B)



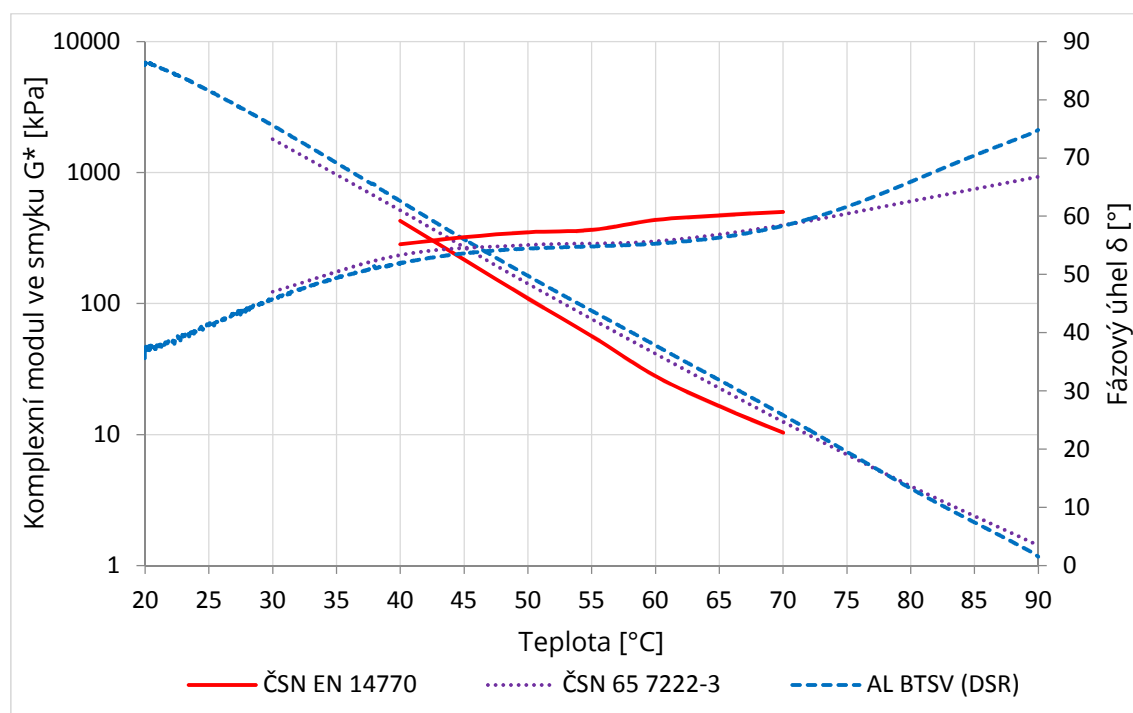
Graf 43: Porovnání komplexních smykových modulů a fázových úhlů asfaltu 50/70 NV (pojivo C)



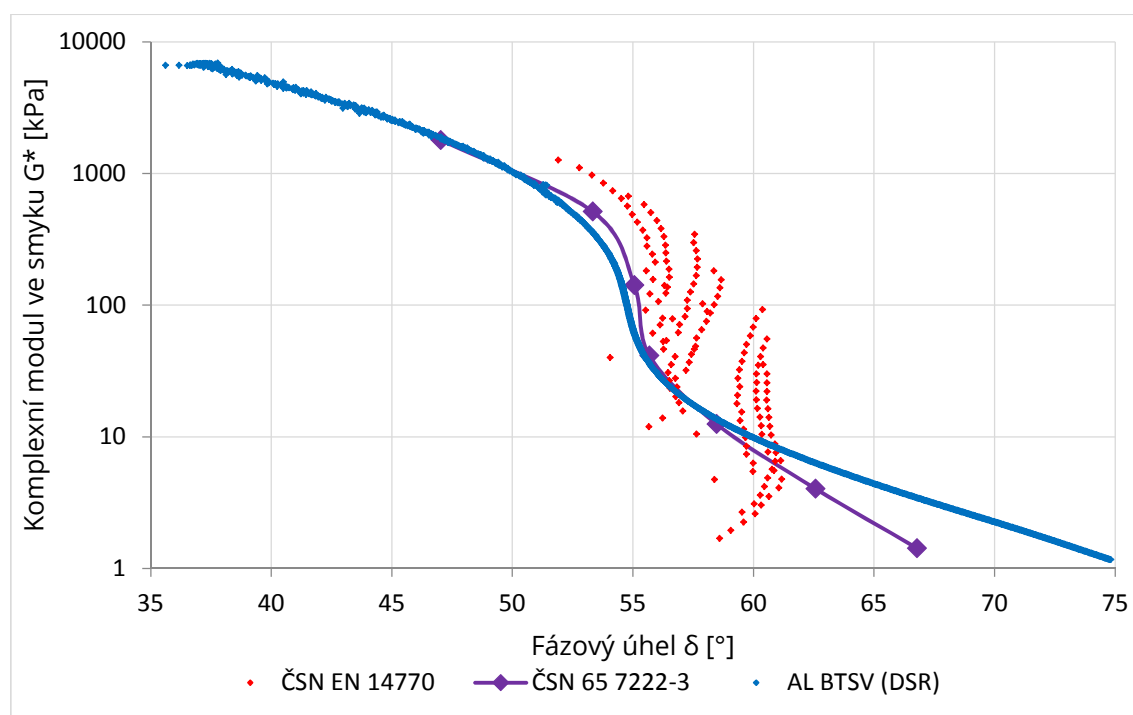
Graf 44: Porovnání Blackových diagramů asfaltu 50/70 NV (pojivo C)



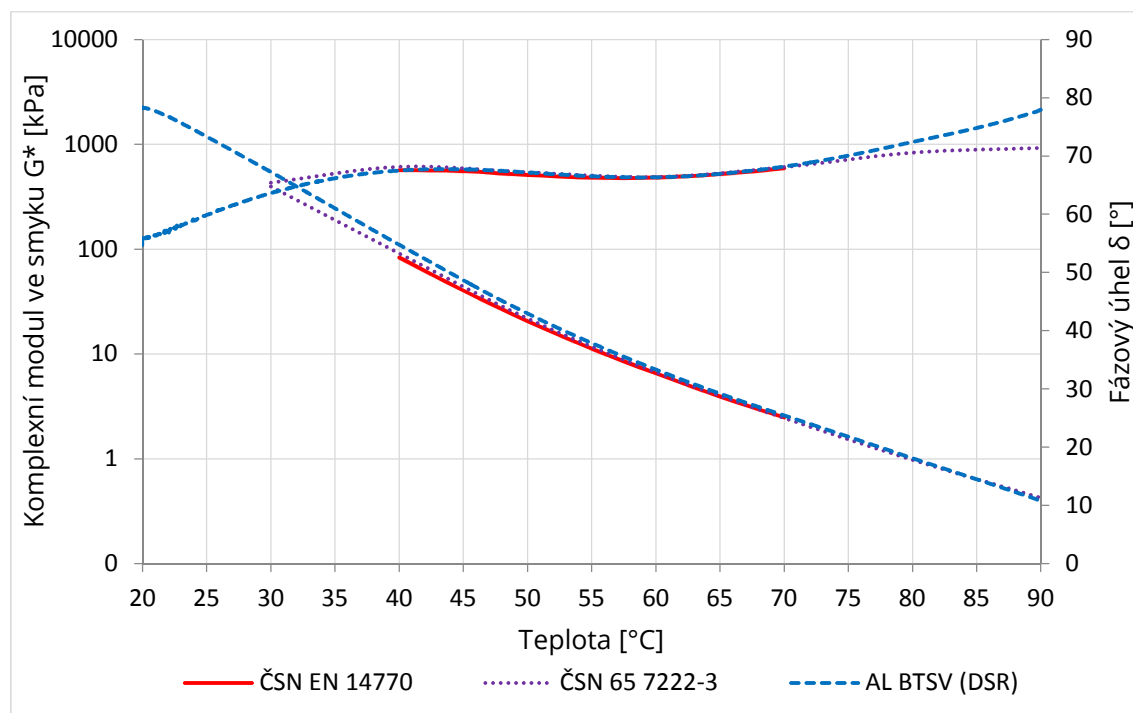
Graf 45: Porovnání komplexních smykových modulů a fázových úhlů asfaltu PMB 25/55 NV (pojivo D)



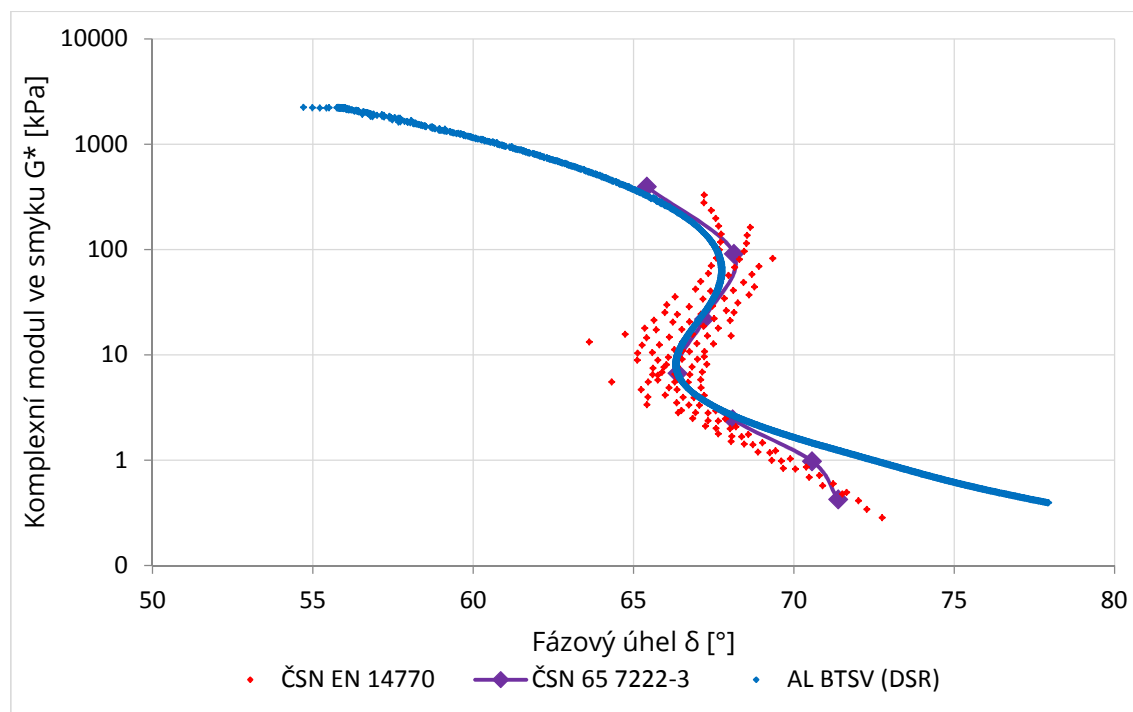
Graf 46: Porovnání Blackových diagramů asfaltu PMB 25/55 NV (pojivo D)



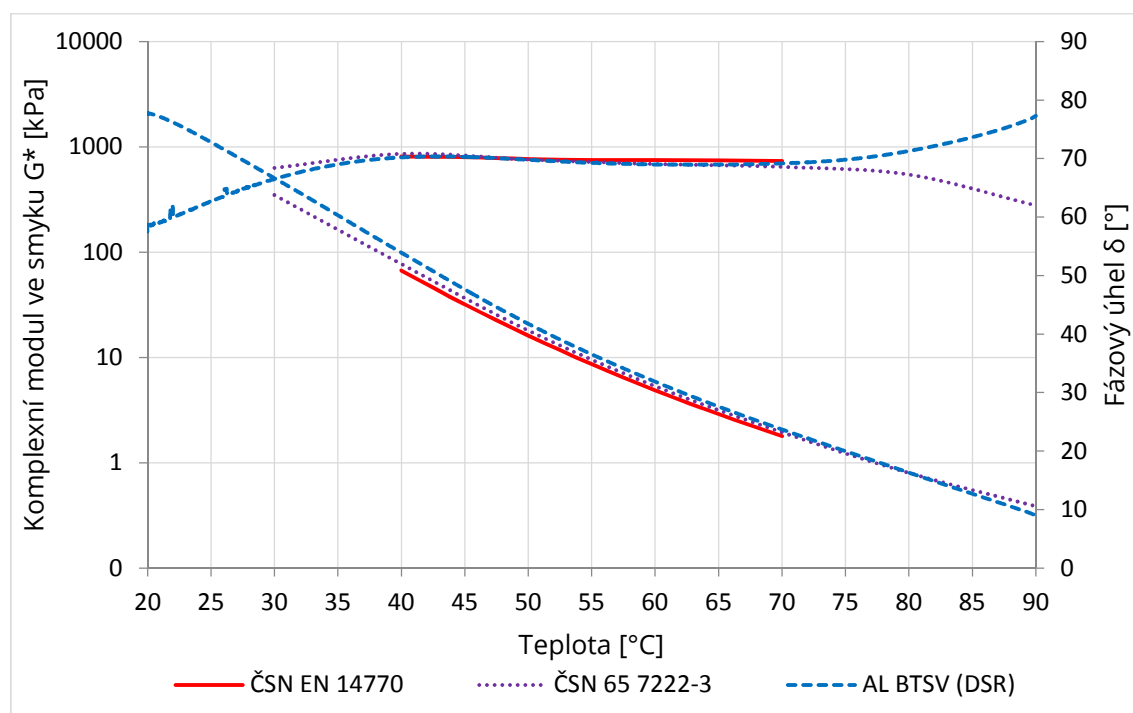
Graf 47: Porovnání komplexních smykových modulů a fázových úhlů srovnávacího asfaltu PMB 25/55-60 (pojivo E)



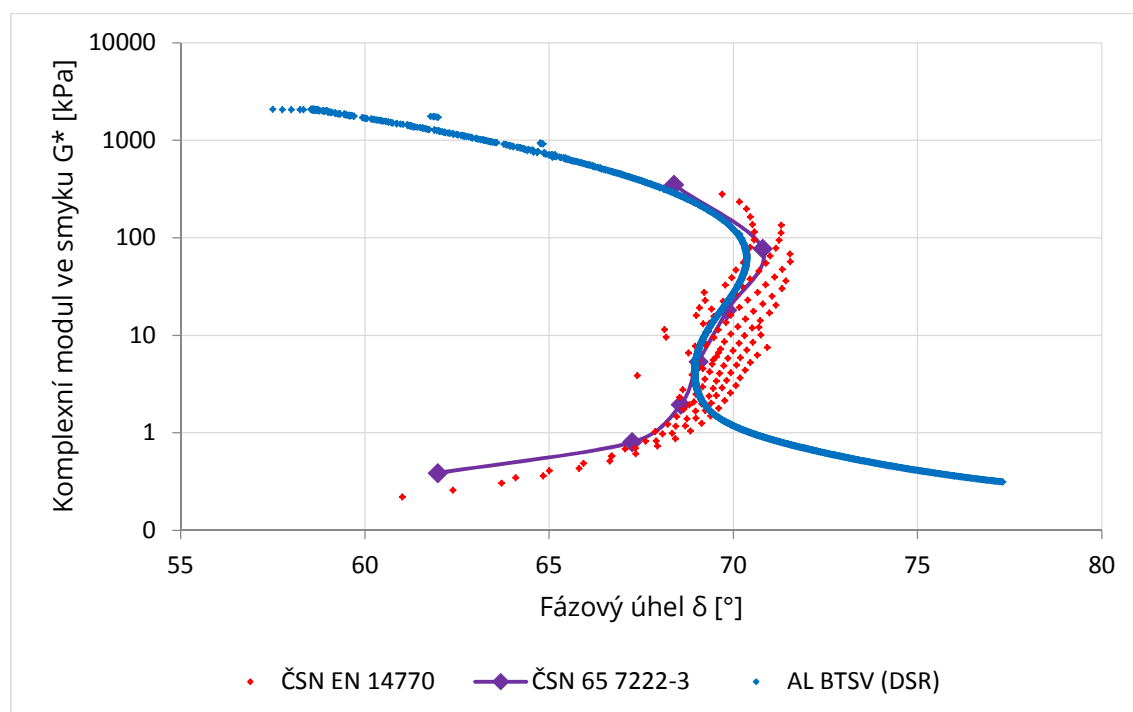
Graf 48: Porovnání Blackových diagramů srovnávacího asfaltu PMB 25/55-60 (pojivo E)



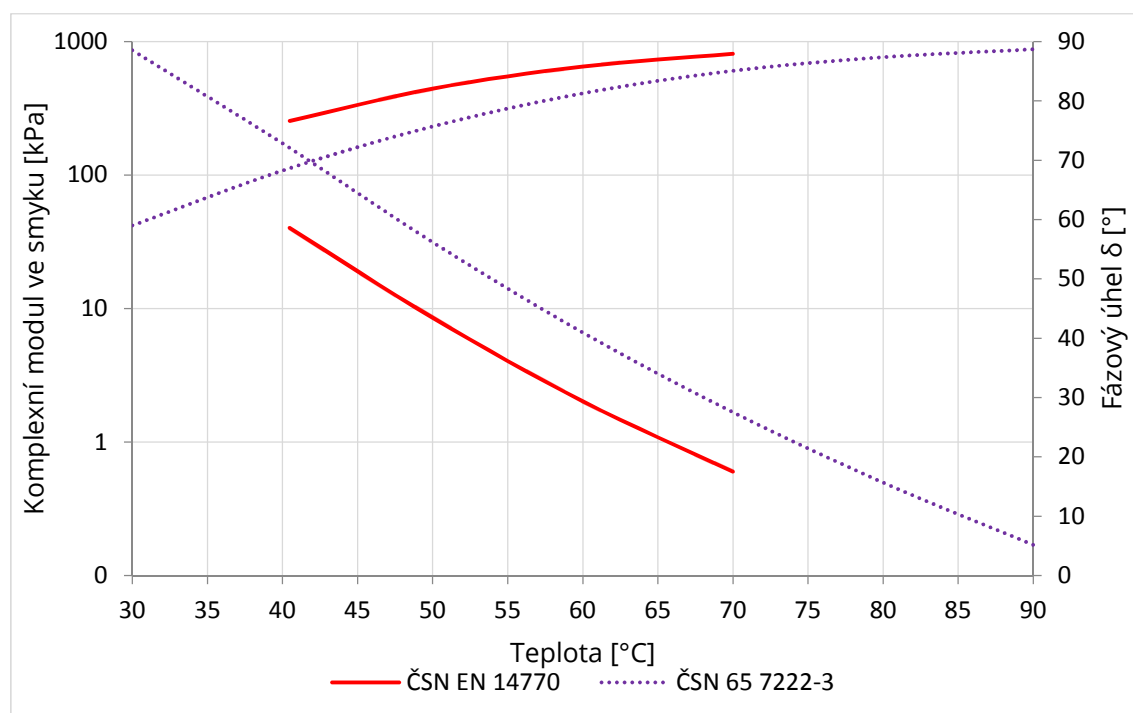
Graf 49: Porovnání komplexních smykových modulů a fázových úhlu asfaltu PMB 25/55-60+0,5 % Evotherm (pojivo F)



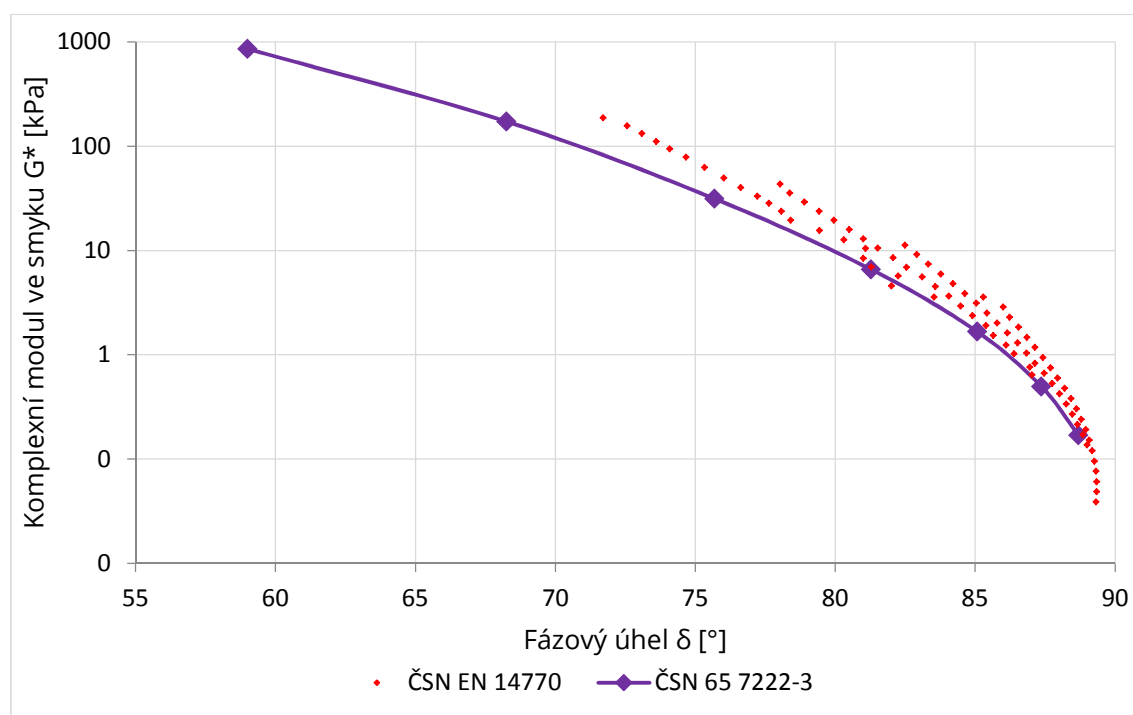
Graf 50: Porovnání Blackových diagramů asfaltu PMB 25/55-60+0,5 % Evotherm (pojivo F)



Graf 51: Porovnání komplexních smykových modulů a fázových úhlů srovnávacího asfaltu 50/70 (pojivo G)



Graf 52: Porovnání Blackových diagramů srovnávacího asfaltu 50/70 (pojivo G)



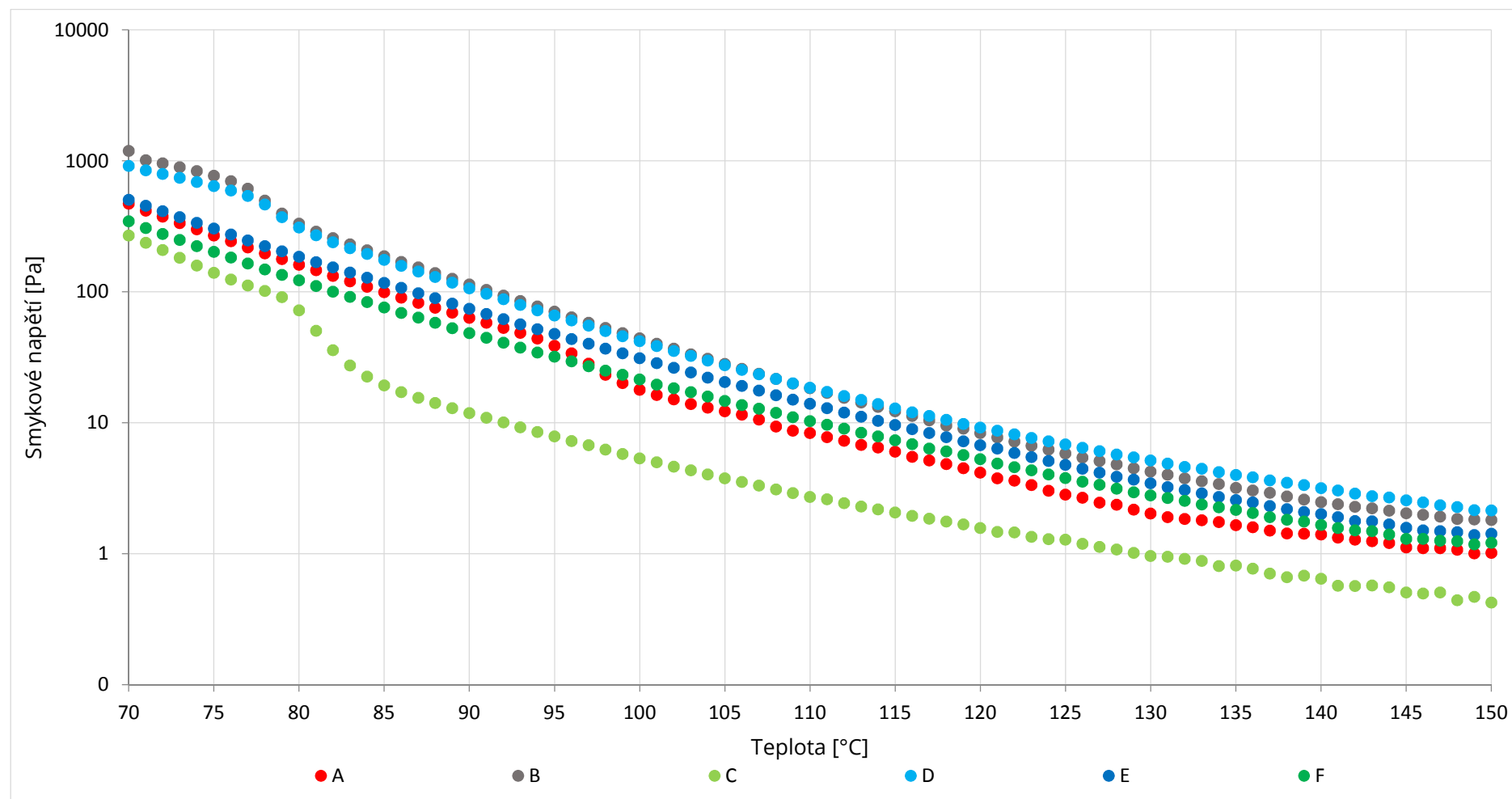
V grafech 39 – 52 jsou porovnány průběhy komplexních smykových modulů, fázových úhlů a Blackových diagramů podle použitých norem ČSN EN 14770, ČSN 65 7222-3 a AL BTSV (DSR). Závěry k jednotlivým grafům

byly vysvětleny v předchozích kapitolách, kde byly netypické vlastnosti komentovány.

6.10 Teplota přechodu fáze podle Přílohy B normy ČSN 65 7222-3

Stanovení teploty přechodu fáze bylo provedeno dle normy ČSN 65 7222-3 příloha B. Postup této zkoušky je podrobně popsán v kapitole 4.11. Pro stanovení teploty přechodu fáze byl využit dynamický smykový reometr s geometrií deska – deska průměru 25 mm a tloušťkou mezery 1 mm. Zkouška probíhá v rotačním režimu se smykovým spádem 2 s^{-1} v rozsahu teplot od $150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ do $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ s poklesem teploty gradientem $0,02 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$. Výsledky zkoumaných pojiv jsou zobrazeny v grafech 53 a 54. Srovnávací silniční asfalt 50/70 (pojivo G) není v grafech uveden, jelikož tato zkouška se vztahuje na nízkoteplotní polymerem modifikované asfalty. U nemodifikovaných asfaltů se za teplotu přechodu fáze uvažuje bod měknutí asfaltových pojiv.

Graf 53: Teplota přechodu fáze T_{PF} asfaltových pojiv



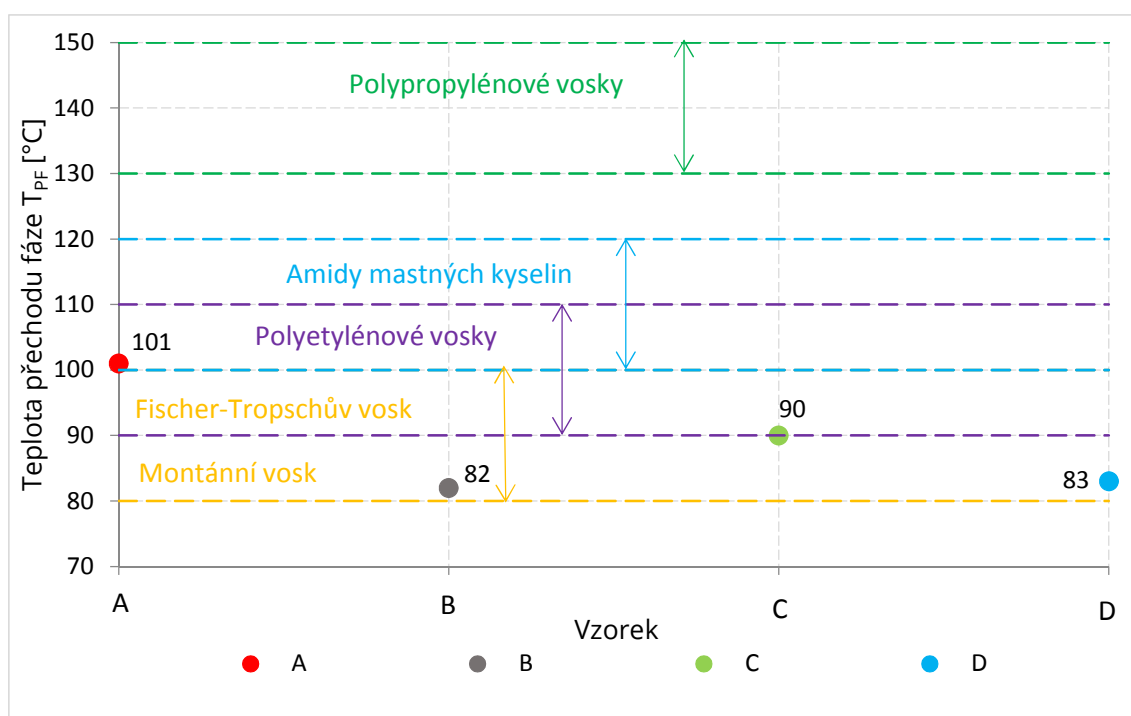
V grafu 53 jsou znázorněny průběhy hodnotící teplotu přechodu fáze srovnávaných asfaltových pojiv (pojiva A – F). U asfaltových pojiv, obsahujících organické přísady na bázi syntetických vosků, dochází vlivem změny teploty k výraznějšímu přechodu fáze. Druh použitého vosku a také volba základního asfaltového pojiva má zásadní vliv na viskoelastické chování asfaltů. V grafu 53 u asfaltu 50/70 NV (pojivo C) je nejvýraznější zobrazení přechodu teploty fáze T_{PF} . Další asfaltová pojiva, u kterých lze pozorovat teplotu přechodu fáze T_{PF} jsou PMB 25/55-55 NV (pojivo A), PMB 25/55 NV (pojivo D) a PMB 45/80 NV (pojivo B). U pojiva PMB 25/55-60 (pojivo E) nenastala žádná změna, jelikož se jedná o srovnávací polymerem modifikované pojivo bez nízkoteplotní přísady. U PMB 25/55-60+0,5 % Evotherm (pojivo F) nenastalo vlivem použité přísady Evotherm (amid mastné kyseliny) k výraznému skokovému nárůstu napětí a tím také není zřetelná teplota přechodu fáze T_{PF} .

Při stanovení teploty přechodu fáze T_{PF} z grafu 53 lze říci, že se jedná o teplotu, při které musí být ukončeno hutnění asfaltové směsi. Dále lze podle nalezené teploty T_{PF} zobrazené v tabulce 16 a grafu 54 určit, jaká nízkoteplotní přísada byla do asfaltu přidána. Vzhledem k tomu, že asfalt PMB 25/55-60+0,5 % Evotherm (pojivo F) obsahuje vosk, ale nedošlo ke skokové změně v napětí, může znamenat, aby nastal skok v napětí, mělo by být množství vosku v asfaltech větší než 0,5 % hmotnosti pojiva. Lze pozorovat mezi srovnávacím asfaltovým pojivem PMB 25/55-60 (pojivo E) a asfaltem PMB 25/55-60+0,5 % Evotherm rozdíly v průběhu smykového napětí na teplotě, kde se s klesající teplotou tyto průběhy rozbíhají, takže obsah vosku v tomto asfaltu lze potvrdit a také lze říci, že asfalt PMB 25/55-60+0,5 % Evotherm (pojivo F) je méně citlivý na působící napětí. Podle průběhu napětí asfaltu 50/70 NV (pojivo C), u kterého je největší skok v napětí, lze říci, že tento asfalt obsahuje větší množství nízkoteplotní přísady.

Tabulka 16: Zjištěné teploty přechodu fáze T_{PF}

Asfalt	Označení	T_{PF} [°C]
PMB 25/55-55 NV	A	101
PMB 45/80 NV	B	82
50/70 NV	C	90
PMB 25/55 NV	D	83
PMB 25/55-60+0,5 % Evotherm	F	-

Graf 54: Teplota přechodu fáze T_{PF} asfaltových pojiv



Zjištěné teploty přechodu fáze T_{PF} pojiv A až D jsou zobrazeny v grafu 54. Intervaly, ve kterých se pohybují teploty přechodu fáze T_{PF} byly přejaty z normy ČSN 65 7222-3 příloha B, tabulka 3. Pro asfalt PMB 25/55-55 NV (pojivo A) byla zjištěna hodnota $T_{PF} = 101,0$ °C. U asfaltu PMB 45/80 NV (pojivo B) je teplota přechodu fáze $T_{PF} = 82,0$ °C. Teplota přechodu fáze asfaltu 50/70 NV (pojivo C) je $T_{PF} = 90,0$ °C. Pro asfalt PMB 25/55 NV (pojivo D) je odečtena teplota přechodu fáze $T_{PF} = 83$ °C.

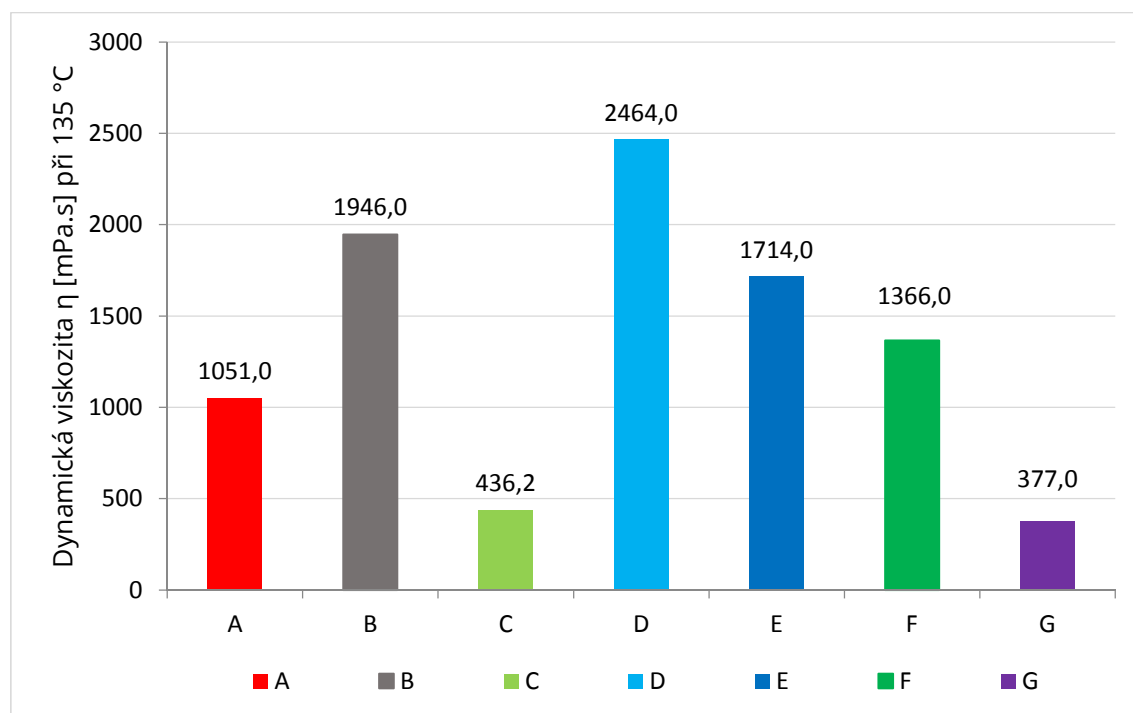
V grafu 54 jsou také vyznačeny teplotní hranice jednotlivých používaných vosků pro modifikace pojiv, kde vlivem použití těchto vosků dochází mezi těmito hranicemi k přechodu teploty fáze T_{PF} . U asfaltu PMB 25/55-55 NV (pojivo A), u kterého pro modifikaci byly použity amidové vosky, a který má $T_{PF} = 101,0$ °C lze dojít k závěru podle grafu 54, že měřením se tato informace potvrdila a daná teplota přechodu se nachází v intervalu definovaném pro amidové vosky (Amidy mastných kyselin). Pro asfalt PMB 45/80 NV (pojivo B), 50/70 NV (pojivo C) a u asfaltu PMB 25/55 NV (pojivo D) lze předpokládat, že jako nízkoteplotní přísada byl použit vosk Sasobit, který je typickým zástupcem Fischer-Tropschových vosků. Z grafu 54 je vidět, že teploty přechodu fáze pro tato pojiva se nacházejí v intervalu, ve kterém dochází ke skokovému nárůstu napětí a tím potvrzení použití těchto vosků v asfaltech.

6.11 Dynamická viskozita

Stanovení dynamické viskozity asfaltových pojiv bylo provedeno

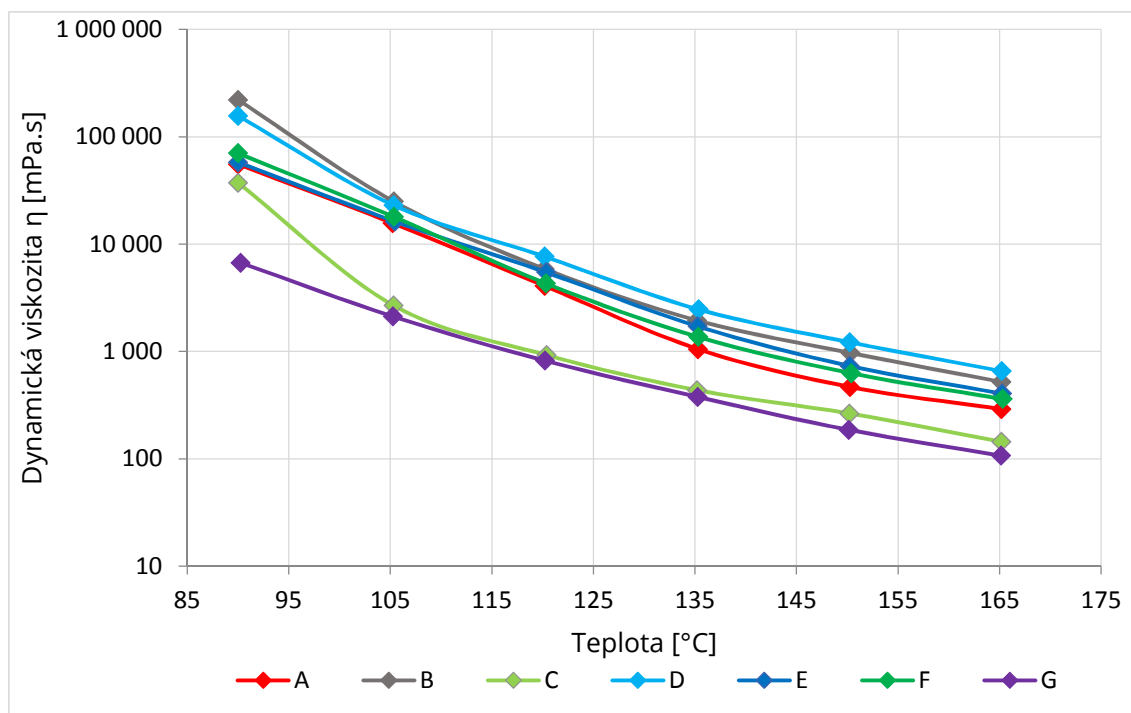
pomocí dynamického smykového reometru s geometrií kužel – deska. Dynamická viskozita se provádí podle normy ČSN EN 13702. Postup této zkoušky je popsán v kapitole 4.12. Teplotní rozsah zkoušené dynamické viskozity byl v rozsahu od 90 °C do 165 °C. Zkoušené asfaltové pojivo bylo měřeno v rozsahu smykové rychlosti od 1 s⁻¹ do 100 s⁻¹. Pro stanovení dynamické viskozity asfaltových pojiv byla použita nezestárlá asfaltová pojiva.

Graf 55: Hodnoty dynamické viskozity při teplotě 135 °C a smykové rychlosti 1 s⁻¹

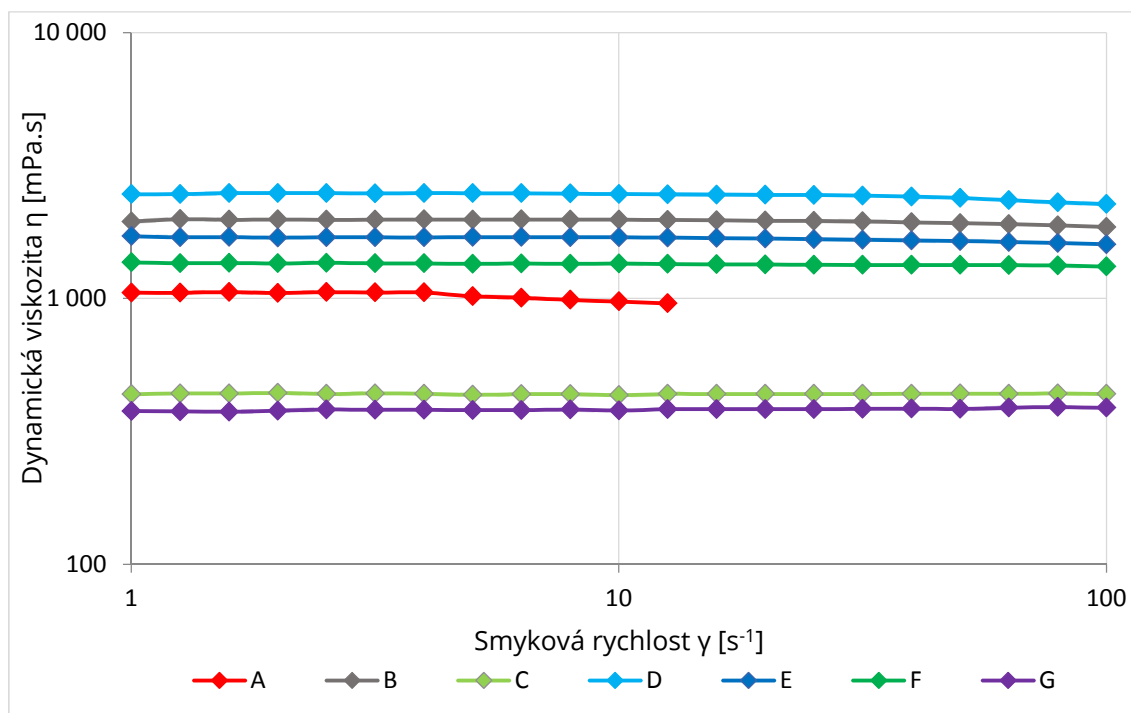


V grafu 55 jsou uvedeny výsledky všech zkoušených asfaltových pojiv. Nejnižší hodnota dynamické viskozity byla dosažena u srovnávacího silničního ropného asfaltu 50/70 (pojivo G) v hodnotě $\eta = 377,0$ mPa.s. U asfaltu PMB 45/80 NV (pojivo C) byla také naměřena velmi nízká hodnota dynamické viskozity $\eta = 436,2$ mPa.s. Nejvyšší hodnota dynamické viskozity byla naměřena u asfaltového pojiva PMB 25/55 NV (pojivo D) v hodnotě $\eta = 2464$ mPa.s. U ostatních asfaltů se naměřená hodnota dynamické viskozity pohybovala v rozsahu od 1051,0 mPa.s do 1946,0 mPa.s.

Graf 56: Závislost dynamické viskozity na teplotě při smykové rychlosti 1 s^{-1}



Graf 57: Závislost dynamické viskozity na smykové rychlosti při teplotě 135 °C

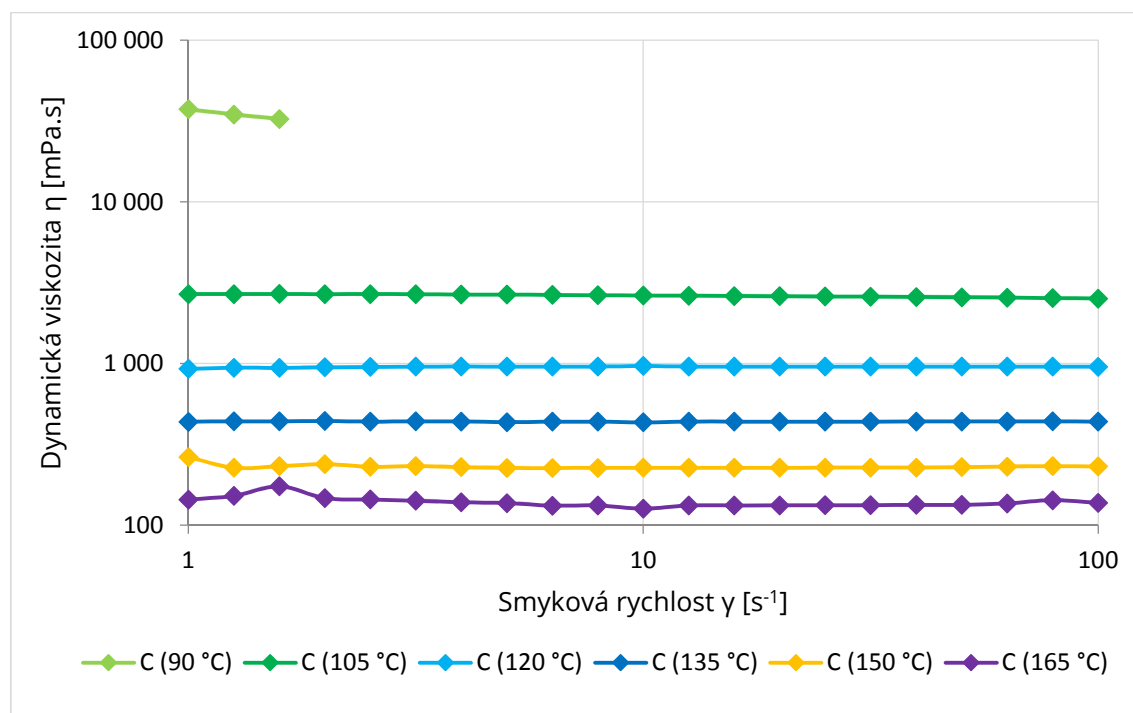


Z grafu 56 můžeme vyvodit závěr, že dynamická viskozita asfaltových pojiv v rostoucí teplotou klesá. Nejnižší viskozita byla naměřena u srovnávacího silničního asfaltu 50/70 (pojivo G) oproti tomu modifikovaná asfaltová pojiva dosahovala dynamické viskozity mnohem vyšší při všech

teplotách zkoušení. Lze tedy z grafu 56 říci, že modifikovaná asfaltová pojiva méně tečou i při vyšších teplotách než běžné používané silniční asfalty.

V grafu 57 jsou uvedeny průběhy dynamické viskozity v závislosti na smykové rychlosti při teplotě 135 °C. Z průběhu jednotlivých křivek je vidět, že dynamická viskozita není závislá na smykové rychlosti a tudíž lze říci, že se zkoušená asfaltová pojiva chovala při této vysoké teplotě jako newtonovská látka.

Graf 58: Závislost dynamické viskozity na smykové rychlosti při různých teplotách

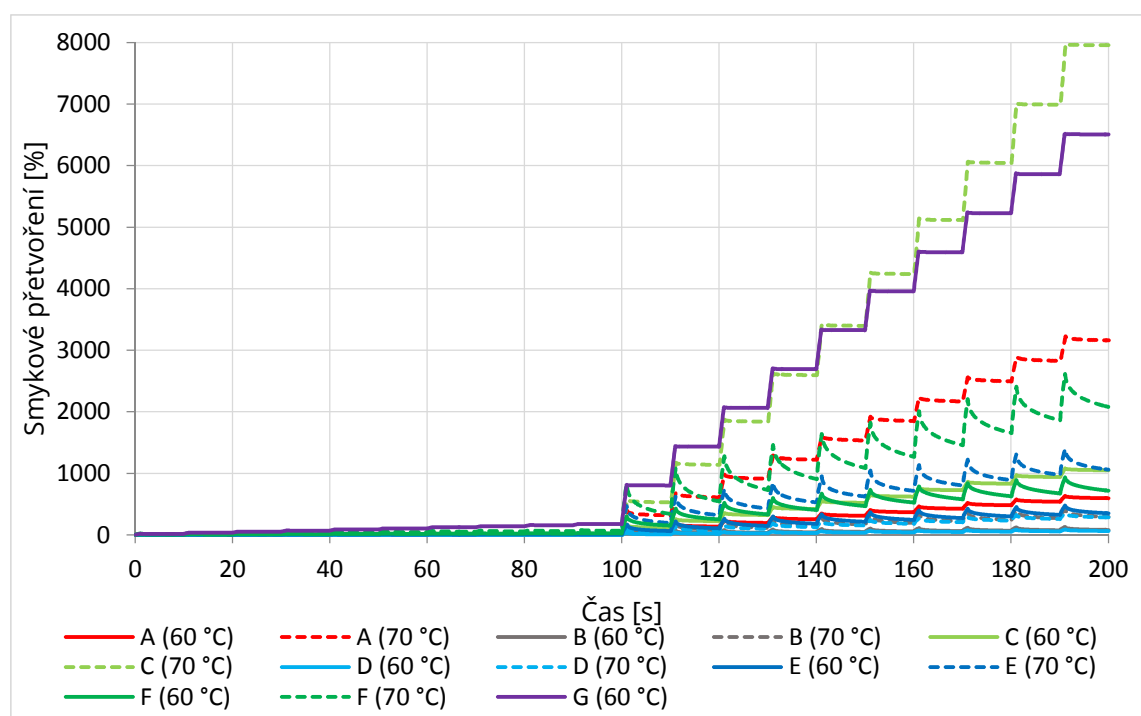


Graf 58 názorně zobrazuje, že dynamická viskozita nezávisí na smykové rychlosti, ale závislá velmi na teplotě zkoušení pojiv. V grafu 58 je zobrazeno asfaltové pojivo 50/70 NV (pojivo C) jehož viskozita je nejvyšší při teplotě 90 °C a poté vlivem teploty strmě klesá.

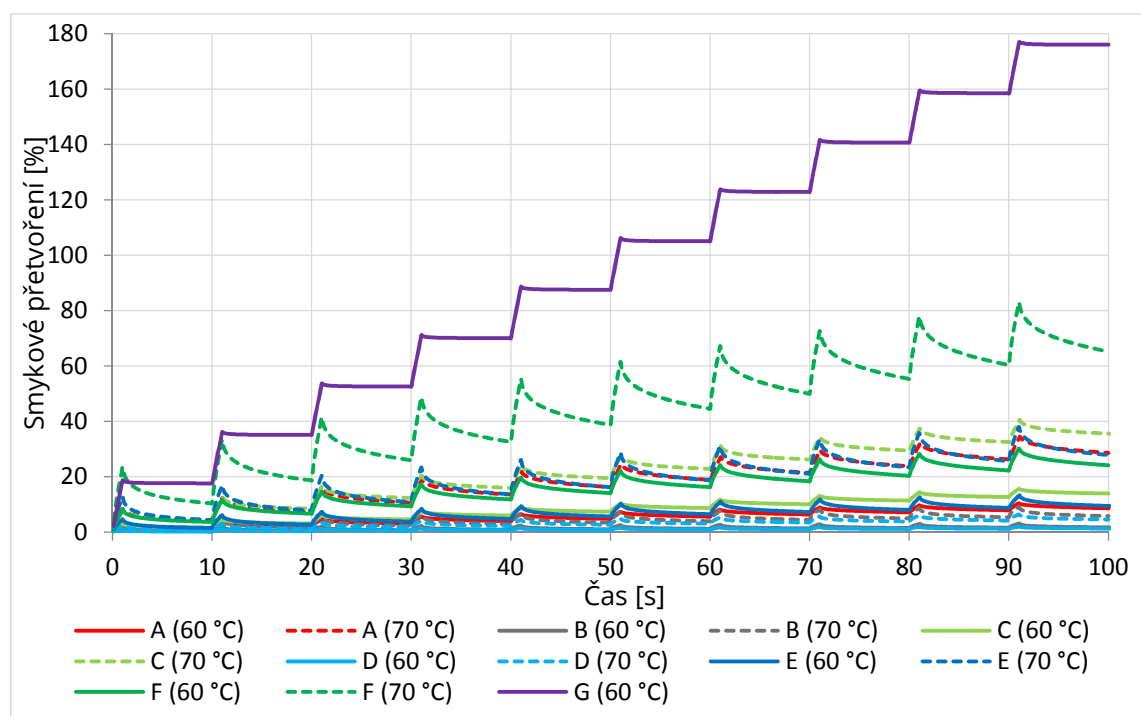
6.12 Zkouška MSCR

Poslední zkouška provedená pomocí dynamického smykového reometru je zkouška MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery Test) dle normy ČSN EN 16659. Postup zkoušky je popsán v kapitole 4.13. Pro stanovení jednotlivých veličin byla použita geometrie deska-deska průměru 25 mm s tloušťkou vzorku 1 mm. V této zkoušce byly testovány vzorky zestárnuté metodou RTFOT, jelikož v této fázi dochází nejčastěji u asfaltových směsí k tvorbě trvalých deformací. Při měření byly vzorky zkoušeny pro teploty 60 °C a 70 °C.

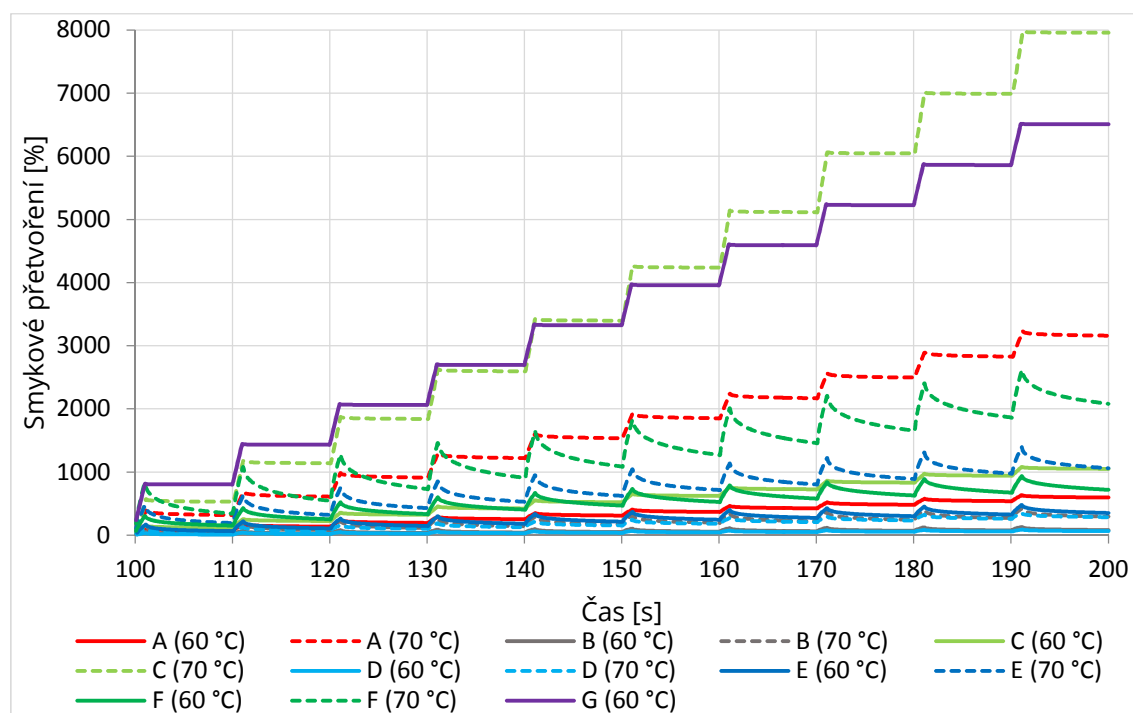
Graf 59: Smykové přetvoření zkoušených pojiv při 60 °C a 70 °C



Graf 60: Smykové přetvoření zkoušených pojiv při teplotě 60 °C a 70 °C při napětí 0,1 kPa

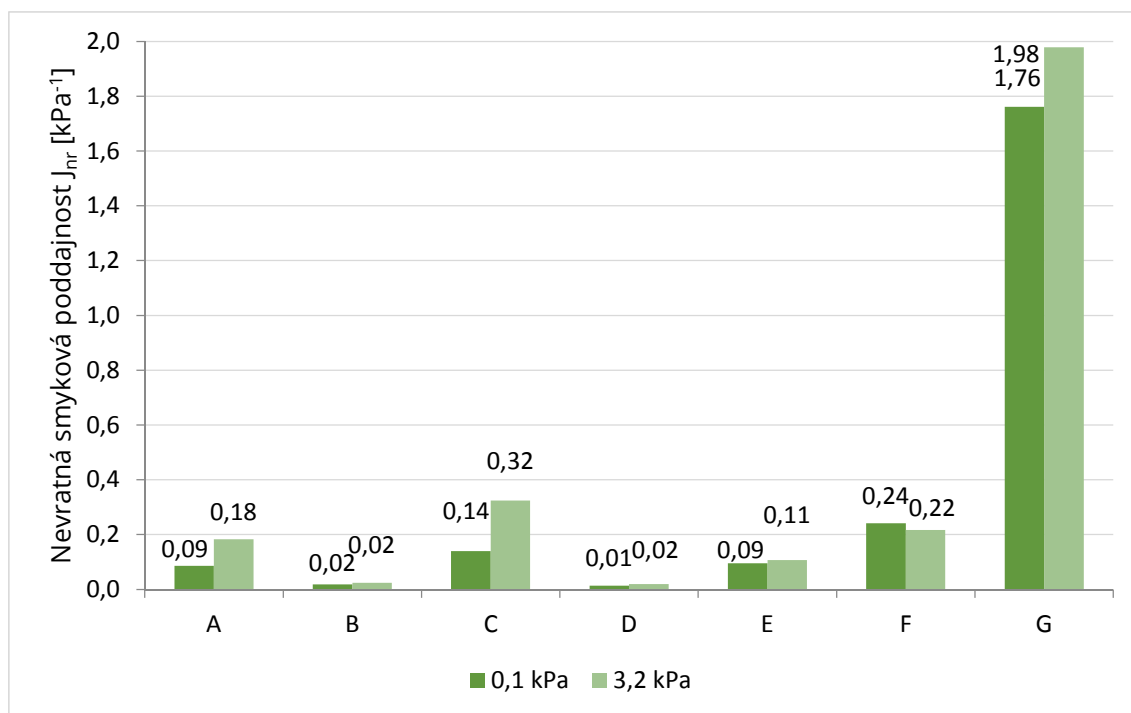


Graf 61: Smykové přetvoření zkoušených pojiv při teplotě 60 °C a 70 °C při napětí 3,2 kPa

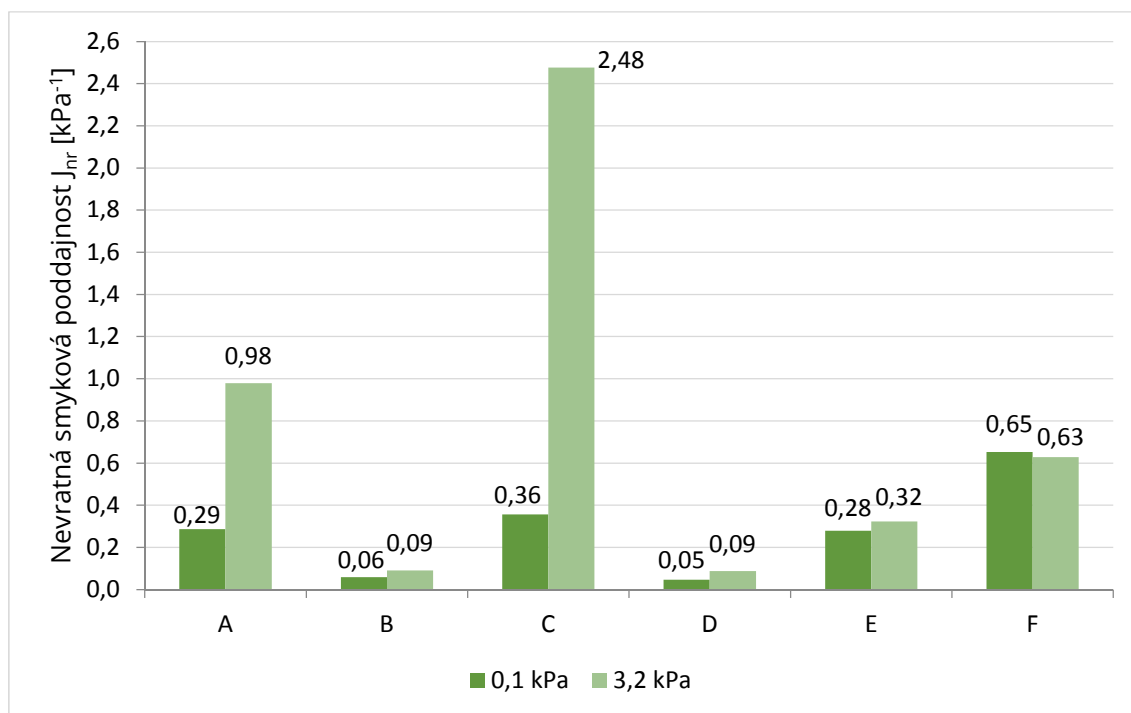


V grafech 59 – 61 je zobrazen průběh měření asfaltových pojiv metodou MSCR. Smykové přetvoření u zatěžovacího cyklu 0,1 kPa není tolik zřetelné jako u zatěžovacího cyklu 3,2 kPa. Z grafů lze dojít k závěru, že největší smykové přetvoření nastalo u 50/70 NV (pojivo C) při teplotě 70 °C, u srovnávacího silničního asfaltu 50/70 (pojivo G) při teplotě 60 °C (proto již také nebyl postup MSCR na toto pojivo aplikován při zvýšené teplotě 70 °C) dále u asfaltů PMB 25/55-55 NV (pojivo A) při teplotě 70 °C a u PMB 25/55-60+0,5 % Evotherm (pojivo F) při teplotě 70 °C. Nejnižších hodnot smykového přetvoření dosáhla pojiva PMB 45/80 NV (pojivo B) při teplotách 60 °C a 70 °C dále PMB 25/55 NV (pojivo D) při teplotách 60 °C a 70 °C.

Graf 62: Nevratná smyková poddajnost J_{nr} při teplotě 60 °C



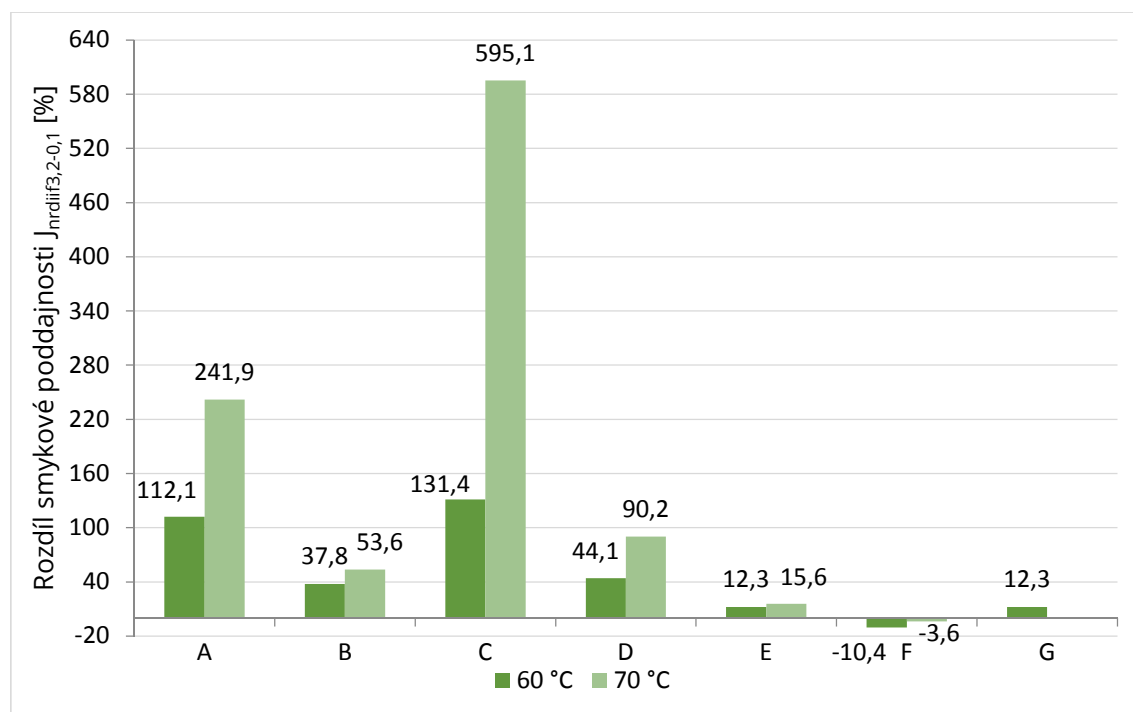
Graf 63: Nevratná smyková poddajnost J_{nr} při teplotě 70 °C



Zkouška MSCR se vyhodnocuje pomocí hodnoty nevratné smykové poddajnosti J_{nr} , která musí být co nejnižší, aby asfaltové pojivo ve směsi bylo odolné proti vzniku trvalých deformací. V grafech 62 a 63 jsou vyneseny hodnoty nevratné smykové poddajnosti při napětí 0,1 kPa a 3,2 kPa a

v obou teplotách jak 60 °C tak i 70 °C. Lze si povšimnout, že s rostoucí teplotou a napětím při zatížení hodnoty nevratné smykové poddajnosti rostou. Tato skutečnost má za následek, že asfaltové pojivo bude ve směsi více náchylné na vznik trvalých deformací. Z grafu 62 dosáhlo nejvyšší nevratné smykové poddajnosti při teplotě 60 °C u srovnávacího silničního asfaltového pojiva 50/70 (pojivo G) dále 50/70 NV (pojivo C) a PMB 25/55-60+0,5 % Evotherm (pojivo F). Z grafu 63 dosáhlo nejvyšší smykové poddajnosti při teplotě 70 °C asfaltové pojivo 50/70 NV (pojivo C) následováno pojivem PMB 25/55-55 NV (pojivo A) a pojivo PMB 25/55-60+0,5% Evotherm (pojivo F).

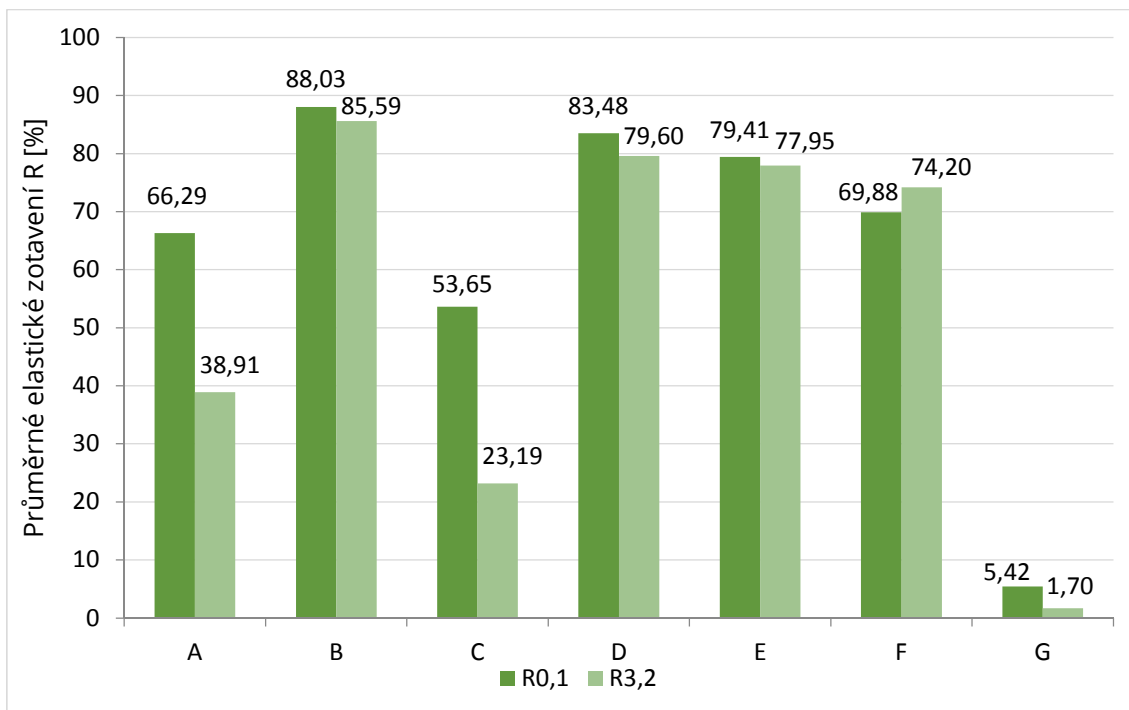
Graf 64: Procentuální rozdíl ve smykové poddajnosti $J_{nr diff 3,2-0,1}$ při teplotách 60 °C a 70 °C



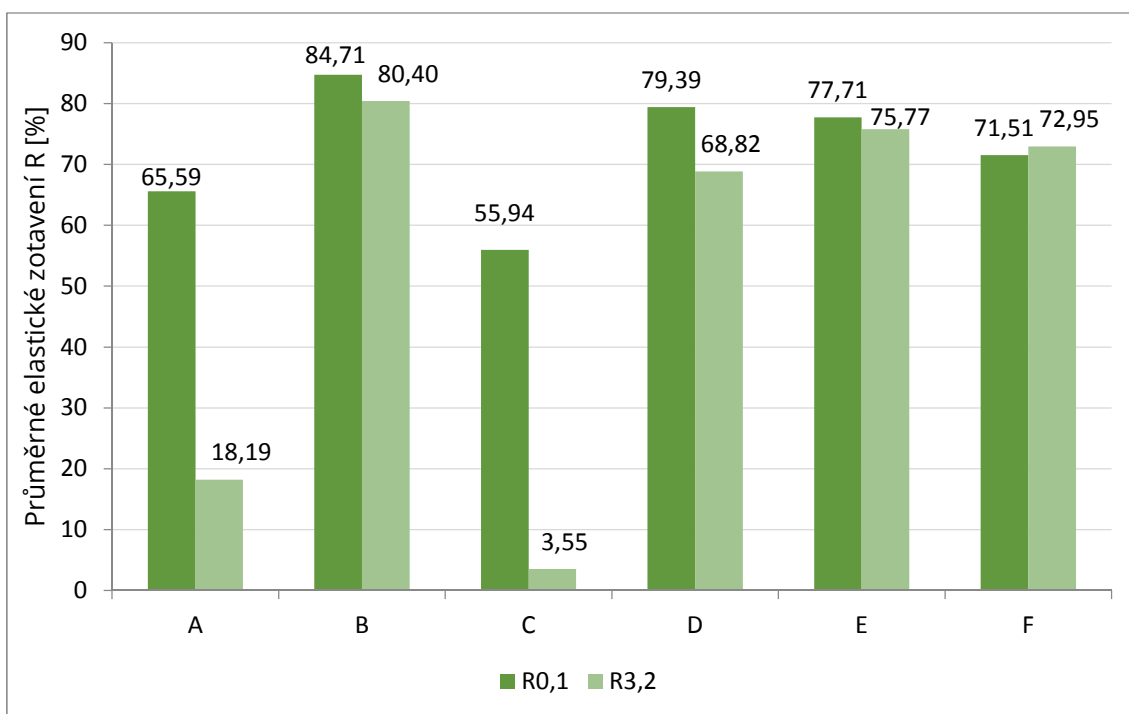
Hodnota procentuálního rozdílu ve smykové poddajnosti porovnává první fázi zatěžování 0,1 kPa s druhou fází zatěžování 3,2 kPa. Maximální hodnota procentuálního rozdílu ve smykové poddajnosti dle požadavků USA je stanovena na hranici 75 %. Z grafu 64 si lze povšimnout, že při teplotě 60 °C splňují tuto podmínku pouze asfalty PMB 45/80 NV (pojivo B), PMB 25/55 NV (pojivo D), srovnávací asfalt PMB 25/55-60 (pojivo E), PMB 25/55-60+0,5% Evotherm (pojivo F) a srovnávací silniční asfalt 50/70 (pojivo G). Pro teplotu 70 °C tuto podmínku splnilo pojivo PMB 45/80 NV (pojivo B), srovnávací pojivo PMB 25/55-60 (pojivo E) a PMB 25/55-60+0,5% Evotherm (pojivo F). U asfaltu PMB 25/55-60+0,5% Evotherm (pojivo F) se rozdíl smykové poddajnosti pohybuje v záporných hodnotách to lze vysvětlit

tím, že největší nevratná smyková poddajnost nastala v první fázi zatěžování tj. při napětí 0,1 kPa.

Graf 65: Průměrné elastické zotavení R při teplotě 60 °C



Graf 66: Průměrné procentuální zotavení R při teplotě 70 °C



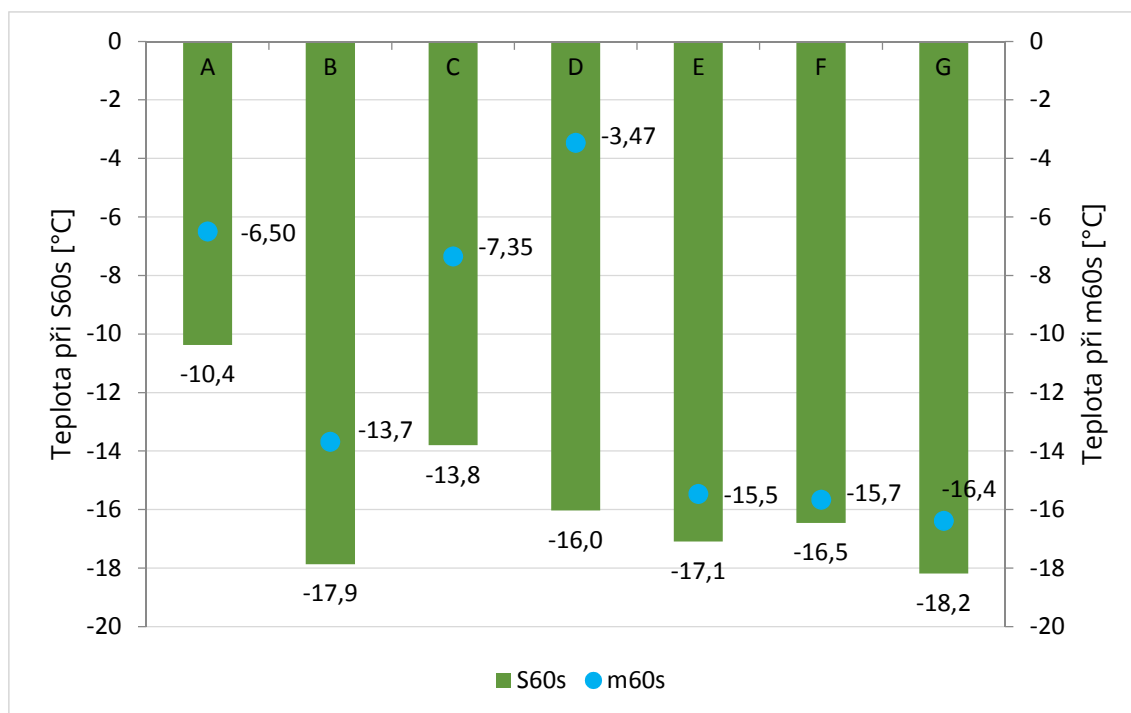
Hodnota průměrné elastické zotavení R popisuje odolnost

asfaltového pojiva na vznik trvalých deformací. Vychází se z předpokladu, že čím je větší hodnota průměrné elastické zotavení R, tím je asfaltové pojivo více odolné na vznik trvalých deformací a má vyšší schopnost se navracet do původního tvaru. Jak je vidět na grafu 65 a 66 hodnota průměrného elastického zotavení R klesá s rostoucí teplotou zatěžování, z toho vyplývá, že čím nižší teplota, tím vyšší hodnota průměrného elastického zotavení R. Z grafu 65 je nejvyšší hodnota průměrného elastického zotavení při teplotě zkoušky 60 °C nejvyšší u fáze zatížení 0,1 kPa. Nejvyšší hodnoty dosahuje asfalt PMB 45/80 NV (pojivo B) oproti tomu nejnižší hodnoty dosahuje srovnávací silniční asfalt 50/70 (pojivo G). V grafu 66 je hodnota průměrného elastického zotavení při teplotě 70 °C také nejvyšší dosažena při fázi zatížení 0,1 kPa. Nejvyšší hodnoty dosáhl asfalt PMB 45/80 NV (pojivo B) a nejnižší hodnoty dosáhl asfalt 50/70 NV (pojivo C). U jediného asfaltu PMB 25/55-60+0,5 % Evotherm (pojivo F) nastala hodnota průměrného elastického zotavení vyšší při fázi zatížení 3,2 kPa.

6.13 Stanovení modulu tuhosti za ohybu

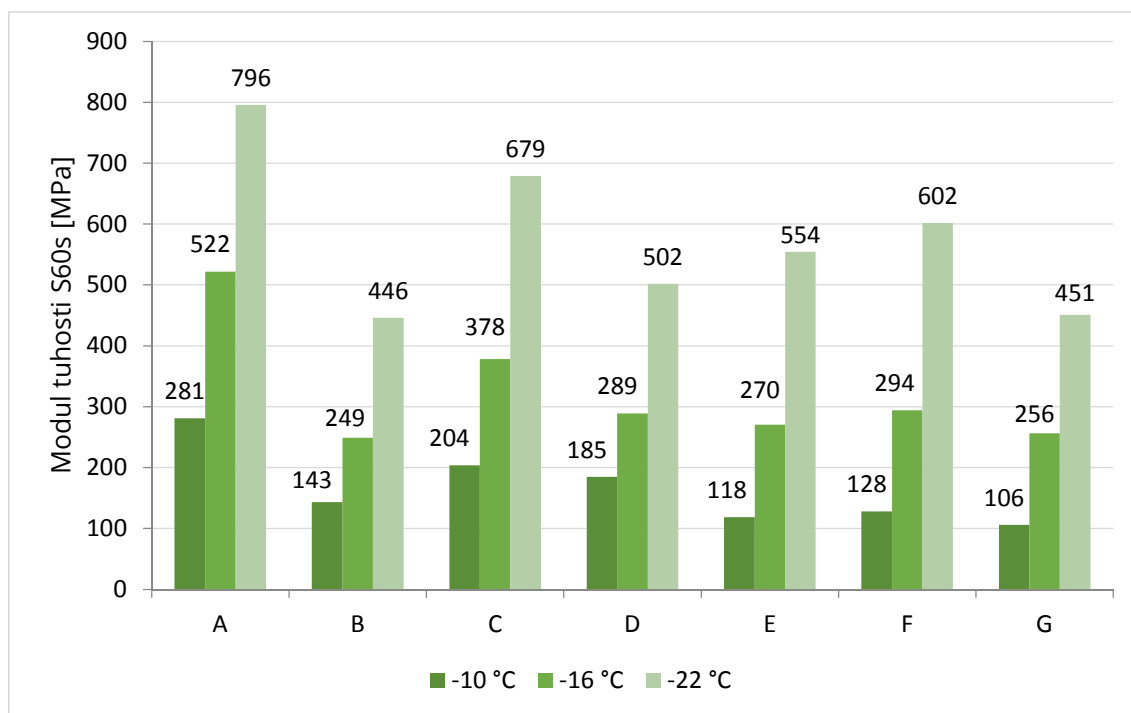
Modul tuhosti za ohybu asfaltových pojiv byl stanoven dle ČSN EN 14771. Postup stanovení modulu tuhosti je popsán v kapitole 4.14. Pro změření modulu tuhosti bylo použito průhybového trámečkového reometru (Bending Beam Rheometer – BBR) výzkumného centra AdMaS. Při měření modulu tuhosti byly vytvořeny trámečky asfaltového pojiva, které byly zkoušeny při teplotách -10 °C, 16 °C a -22 °C. Cílem tohoto měření bylo stanovit kritickou teplotu, při které dojde k porušení asfaltového trámečku. Kritická se stanovovala ze dvou hodnot a to z modulu tuhosti, který má hodnotu při 60 s $S_{60s} = 300$ MPa nebo z m-hodnoty při 60 s $m_{60s} = 0,3$.

Graf 67: Zjištěné kritické teploty zkoušených asfaltů z S_{60s} a m_{60s}



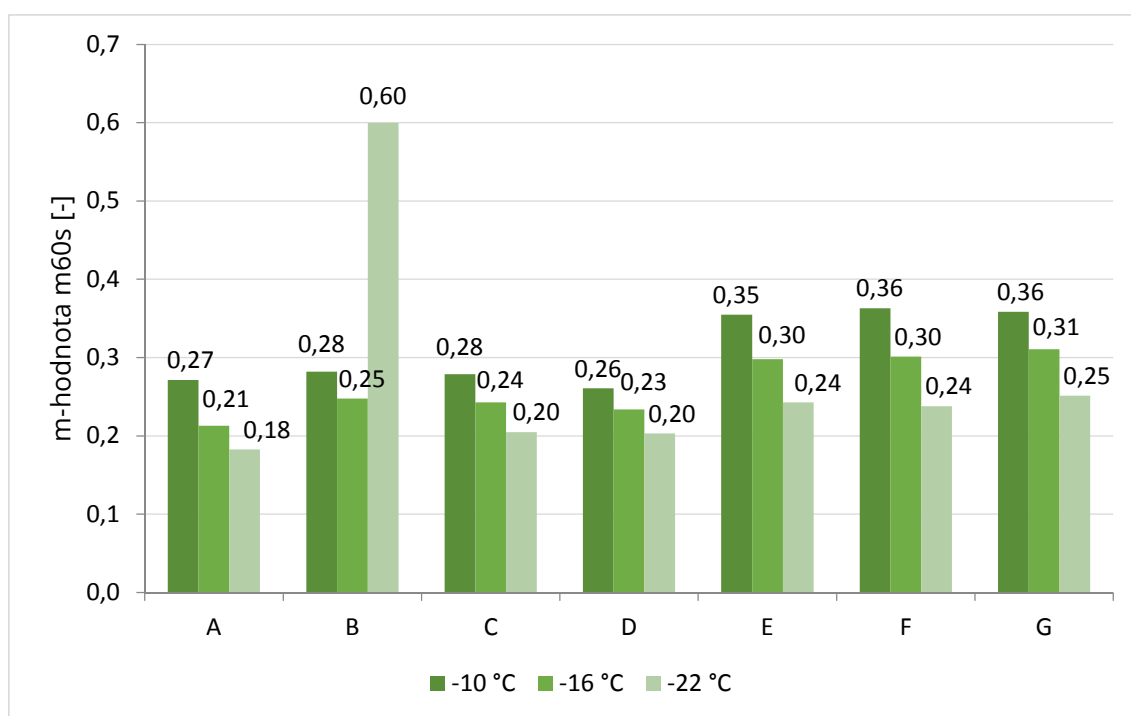
Graf 67 zobrazuje výsledky kritických teplot při dosažení $S_{60s} = 300$ MPa a $m_{60s} = 0,3$. Nejnižší (nejlepší) kritické teploty a současně i m-hodnoty dosáhl srovnávací silniční asfalt 50/70 (pojivo G) $S_{60s} = -18,2$ °C a $m_{60s} = -16,4$ °C. Nejvyšší (nejhorší) kritické teploty dosáhl asfalt PMB 25/55-55 NV (pojivo A) $S_{60s} = -10,4$ °C a $m_{60s} = -6,5$ °C. Zbylé asfalty dosahovaly kritických teplot od $-13,8$ °C do $-17,9$ °C. Asfalt PMB 25/55 NV (pojivo D) dosáhl nejnižší m-hodnoty $m_{60s} = -3,47$ °C. Toto pojivo také dosáhlo značného rozdílu mezi kritickou teplotou určenou z modulu tuhosti za ohybu a m-hodnoty ($12,5$ °C). Z grafu 67 lze vyvodit závěr, že ke křehkému lomu je nejvíce náchylné pojivo PMB 25/55 NV (pojivo D), PMB 25/55-55 NV (pojivo A) a také pojivo 50/70 NV (pojivo C).

Graf 68: Nárůst modulu tuhosti asfaltů s klesající teplotou



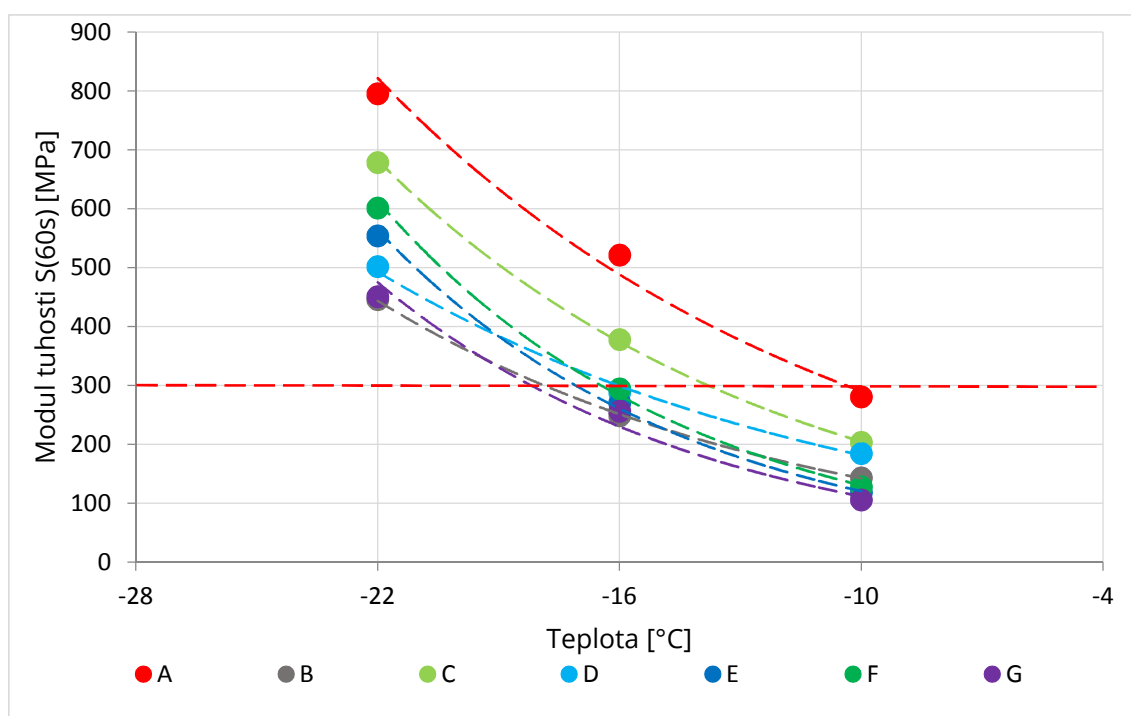
Nárůst modulu tuhosti za ohybu v závislosti na klesající teplotě je zobrazen v grafu 68. Z grafu lze vyčíst, že s klesající teplotou roste modul tuhosti. U asfaltů, jejichž modul tuhosti je vysoký při vyšších teplotách (-10 °C) jsou nejvíce citlivé na vznik křehkého lomu. Tato skutečnost se nejvíce týká pojiva PMB 25/55-55 NV (pojivo A), která má hodnotu modulu tuhosti při -10 °C ze všech nejvyšší blížící se skoro normě požadované hodnoty 300 MPa. Nejnížší hodnotu modulu tuhosti při 10 °C mají srovnávací asfalty PMB 25/55-60 (pojivo E) a silniční asfalt 50/70 (pojivo G). U těchto asfaltů lze konstatovat, že jsou méně citlivá na vznik křehkého lomu při vyšších teplotách (-10 °C). Nejvyšší hodnoty modulu tuhosti dosahují při nejnižší teplotě (-22 °C) asfalty PMB 25/55-55 NV (pojivo A) a 50/70 NV (pojivo C). Asfalty PMB 45/80 NV (pojivo B) a srovnávací asfalt 50/70 (pojivo G) dosahují při nejnižších teplotách (-22 °C) nejmenší hodnotu modulu tuhosti. Lze říci, že asfalt PMB 45/80 NV (pojivo B) a srovnávací asfalt 50/70 (pojivo G) jsou nejméně náchylné na vznik křehkého lomu.

Graf 69: Pokles m-hodnoty s klesající teplotou

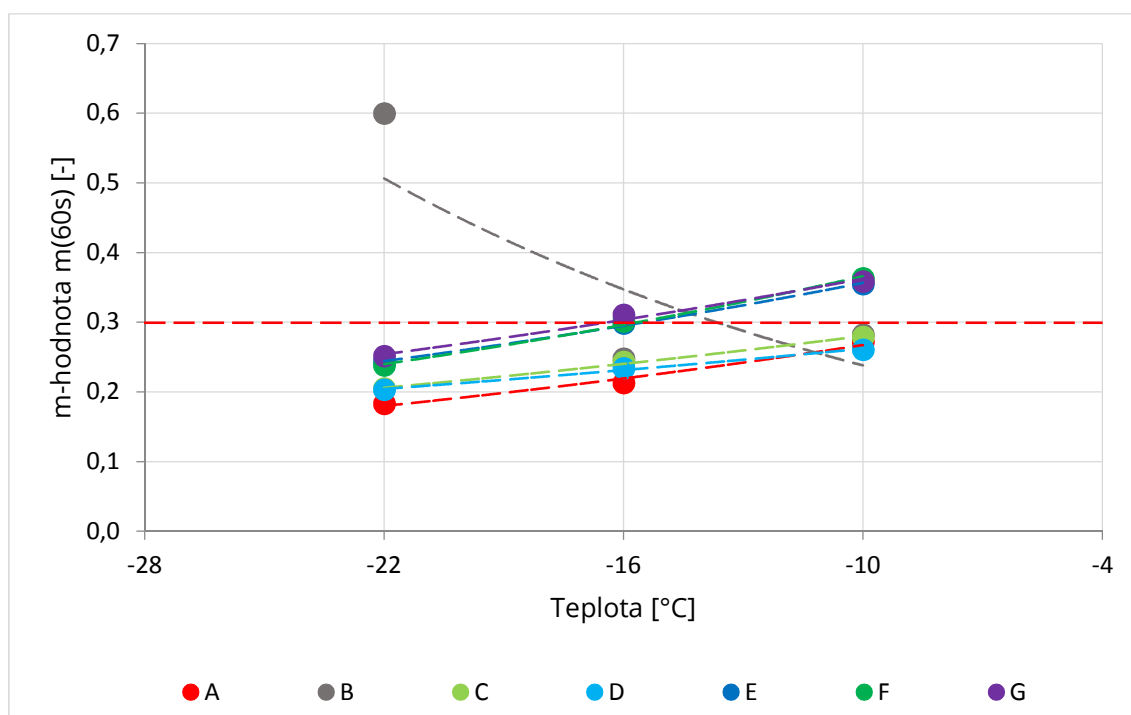


V grafu 69 jsou zobrazeny m-hodnoty při všech zkoušených teplotách. Na první pohled je vidět, že s klesající teplotou klesá velikost m-hodnoty. Nejnižších hodnot m-hodnoty při nejvyšší zkoušené teplotě (-10 °C) dosahují asfalty PMB 25/55-55 NV (pojivo A), PMB 45/80 NV (pojivo B), 50/70 NV (pojivo C) a PMB 25/55 NV (pojivo D), které nedosahují ani normou daný požadavek $m = 0,3$ to znamená, že jejich kritická teplota se bude pohybovat při vyšší teplotě než -10 °C. U asfaltů PMB 25/55-60 (pojivo E), PMB 25/55-60+0,5 % Evotherm (pojivo F) a srovnávacího silničního asfaltu 50/70 (pojivo G) přesahuje velikost m-hodnoty hranici $m = 0,3$ už při vyšších teplotách (-10 °C). Lze usoudit tedy, že tyto asfalty budou méně citlivé na vznik křehkého lomu. Pro asfalt PMB 45/80 NV (pojivo B) je velikost m-hodnoty při nejnižší teplotě značně vysoká. Tato skutečnost je způsobená tím, že při zatěžování došlo ke konci zkoušky k velkému poklesu modulu tuhosti a tudíž k nárůstu m-hodnoty.

Graf 70: Stanovení kritické teploty při modulu tuhosti $S_{60s} = 300$ MPa

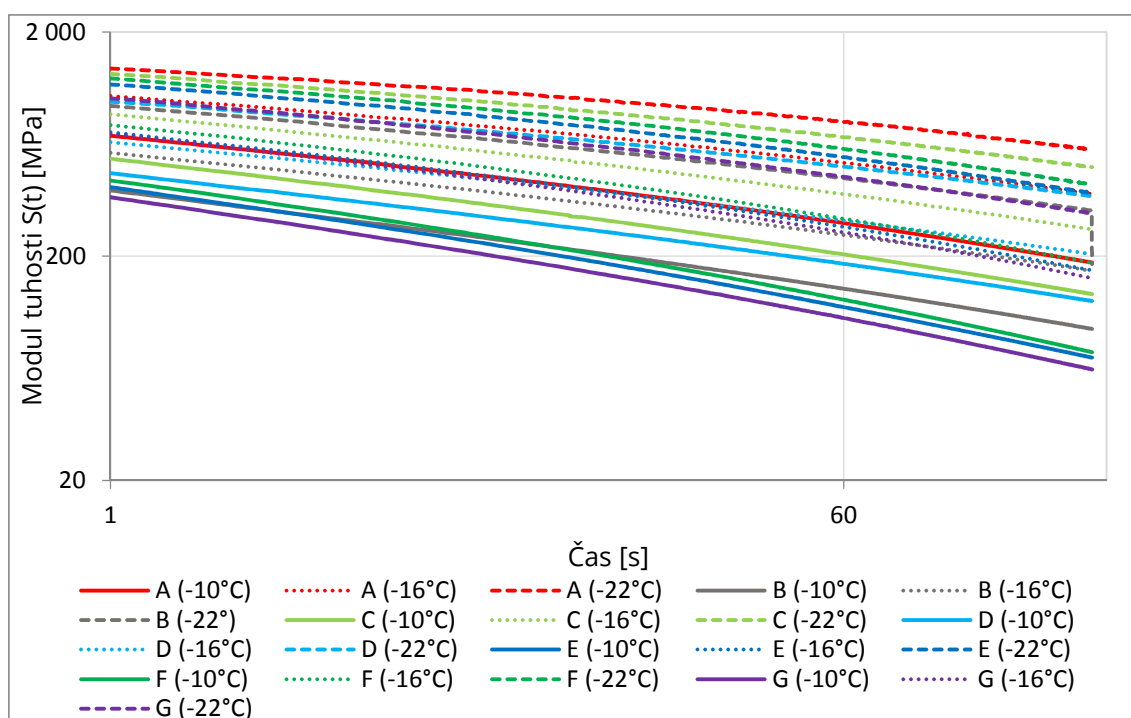


Graf 71: Stanovení kritické teploty při dosažení m-hodnoty $m_{60s} = 0,3$



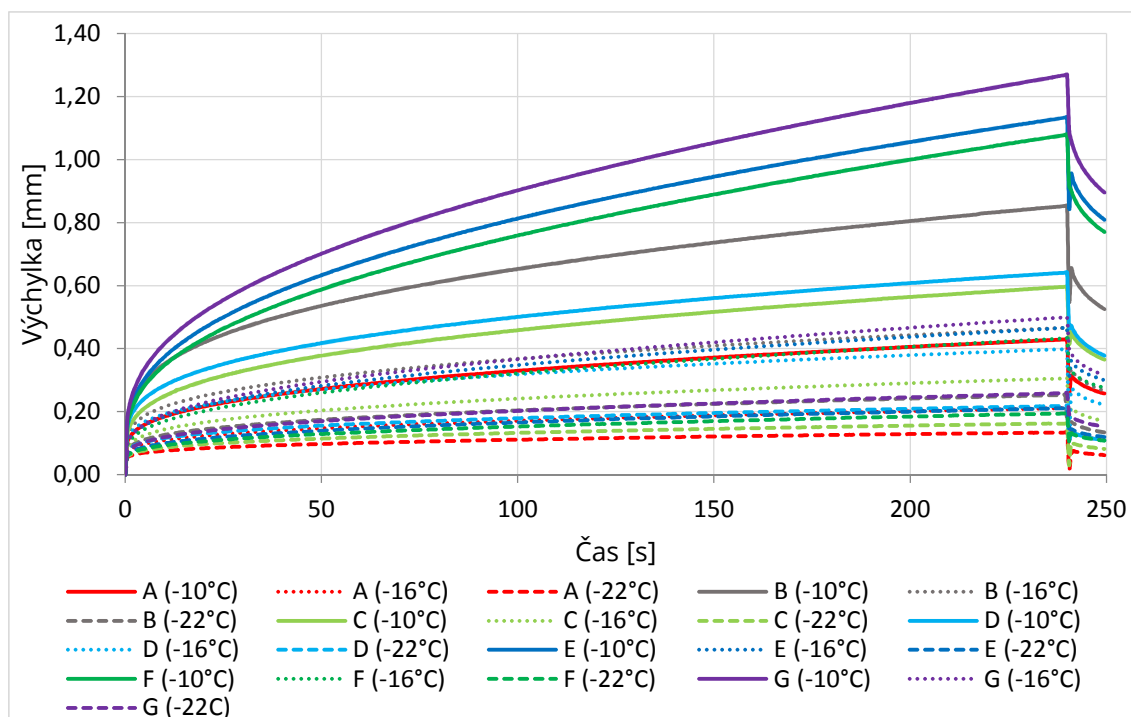
Na grafech 70 a 71 jsou zobrazeny průběhy modulu tuhosti a m-hodnoty při čase 60 s vhodně proloženou křivkou (exponenciální) pro stanovení kritické teploty zkoušených asfaltů.

Graf 72: Závislost modulu tuhosti na čase s klesající teplotou



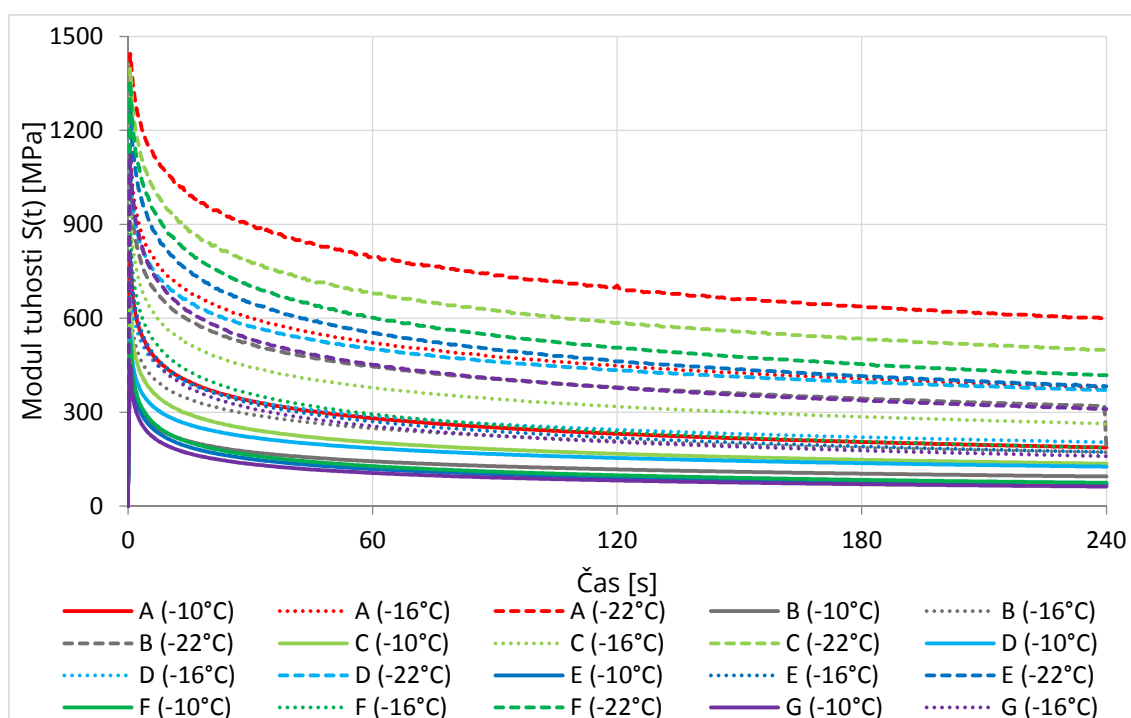
Graf 72 vyjadřuje závislost modulu tuhosti na čase. Tohoto průběhu se využívá pro stanovení m -hodnoty, jelikož m -hodnota vyjadřuje směrnici tečny k modulu tuhosti S . Velikost m -hodnoty a také modulu tuhosti se odečítají při čase 60 s. Jak je vidět na grafu 72 v tomto čase dochází k většímu zalomení křivek než v rozsahu od 0 s do 60 s.

Graf 73: Průběh výchylky zkoušených asfaltů na čase s klesající teplotou



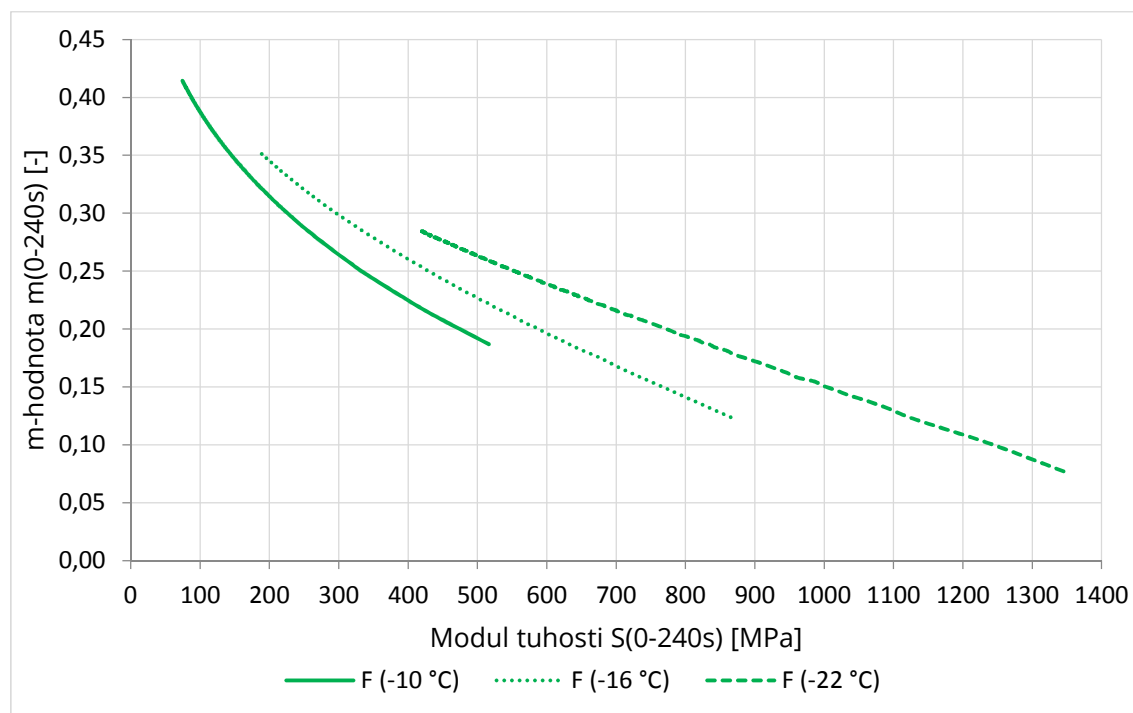
Průběh výchylky asfaltů při zkušebních teplotách je zobrazen v grafu 73. Lze pozorovat, že největší výchylka nastává při nejvyšší teplotě tj. -10 °C. Nejvyšší výchylky dosahuje srovnávací silniční asfalt 50/70 (pojivo G), PMB 25/55 NV (pojivo D) a PMB 25/55-60+0,5 % Evotherm (pojivo F). Se snižováním teploty se u asfaltů zmenšuje výchylka vzhledem k tomu, že s klesající teplotou se zvyšuje modul tuhosti a tím klesá výchylka zkoušených asfaltů. Nejmenších výchylek při teplotě -22 °C dosahuje PMB 25/55-55 NV (pojivo A) a 50/70 NV (pojivo C). Z průběhu křivek výchylek v grafu 73 lze pozorovat, že asfalty po ukončení zkoušky v čase 240 s jsou schopny po odtížení se opět částečně vrátit na stav před zatížením, z toho vyplývá, že nenastává celková trvalá plastická deformace.

Graf 74: Průběh modulu tuhosti zkoušených asfaltů na čase s klesající teplotou

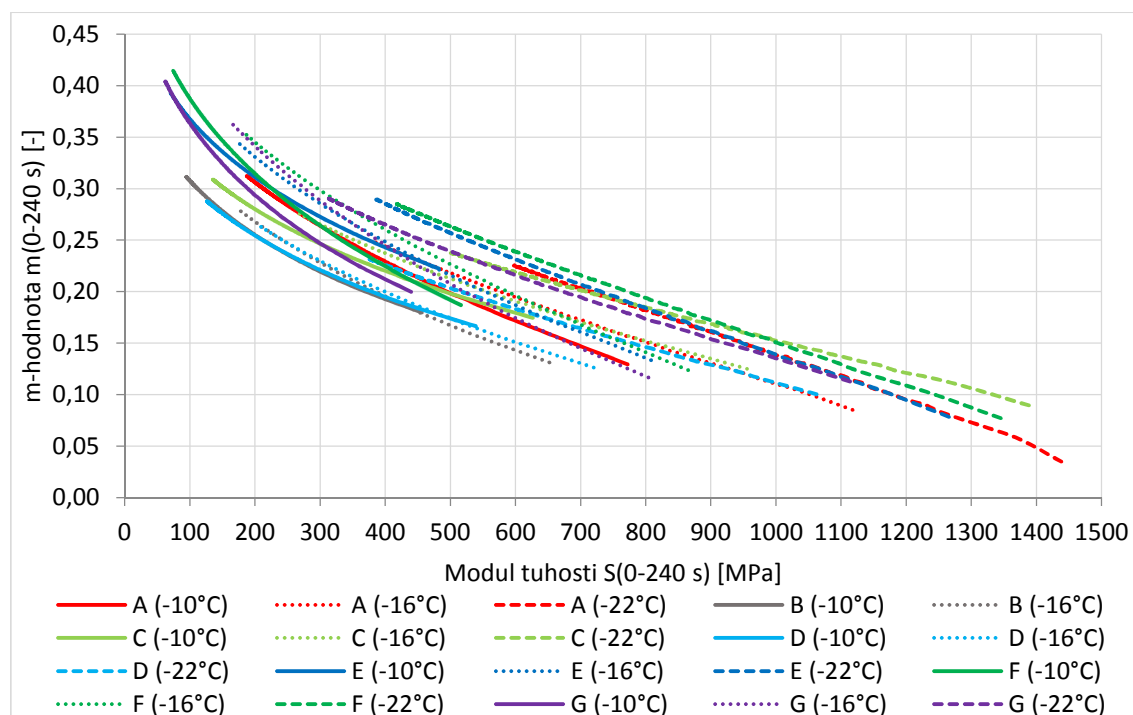


Graf 74 zobrazuje průběhy modulu tuhosti v závislosti na čase. Je vidět, že s klesající teplotou (k -22 °C) moduly tuhosti rostou. Největších hodnotu modulu tuhostí dosahují asfaltů PMB 25/55-55 NV (pojivo A), 50/70 NV (pojivo C) a PMB 25/55-60+0,5 % Evotherm (pojivo F).

Graf 75: Závislost m-hodnoty na modulu tuhosti S v čase 0 - 240 s asfaltu PMB 25/55-60+0,5 % Evotherm (pojivo F)



Graf 76: Závislost m-hodnoty na modulu tuhosti S v čase 0 - 240 s



Grafy 75 a 76 popisují průběh m-hodnoty v závislosti na modulu tuhosti S v čase zkoušení vzorku od 0 do 240 s. Graf 75 byl sestaven pro ukázkou, jak se mění m-hodnota v závislosti na modulu tuhosti s klesající

teplotou. Je vidět, že průběh m -hodnoty v závislosti na modulu tuhosti při teplotě $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ má tvar exponenciální funkce na úzkém intervalu modulu tuhosti. Při dalším snižování teploty na $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ se tvar průběhu m -hodnoty v závislosti na modulu tuhosti linearizuje na širokém intervalu modulu tuhosti. Graf 76 byl sestaven pro zobrazení průběhů m -hodnoty v závislosti na modulu tuhosti všech asfaltových pojiv při každé zkoušené teplotě.

6.14 Závěr

Cílem diplomové práce je provést srovnání vybraných nízkoteplotních pojiv a stanovit jejich vlastnosti podle nové normy ČSN 65 7222-3.

Podle kapitol 6.7 a 6.8 bylo provedeno měření komplexních smykových modulů a fázových úhlů dle ČSN 65 7222-3 příloha A a AL BTSV (DSR). Výsledkem těchto zkoušek je teplota T_{BTSV} a fázový úhel δ_{BTSV} při dosažení komplexního smykového modulu $G^* = 15\text{ kPa}$. Průměrný rozdíl v teplotách při dosažení $G^* = 15\text{ kPa}$ je okolo $1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Průměrné rozdíly ve fázových úhlech při $G^* = 15\text{ kPa}$ se pohybují do $3,0\text{ }^{\circ}$. Norma ČSN 65 7222-3 s účinností od roku 2018 má jako výchozí podklad normu AL BTSV (DSR) s rozdíly, že průběh měření u normy ČSN 65 7222-3 je s diskrétními teplotními skoky, kdy při každé teplotě se změří deset hodnot, které se zprůměrují. U normy AL BTSV je průběh měření v režimu teplotní rampy od $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ s krokem $1,2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

V kapitole 6.10 byla asfaltová pojiva zkoušena dle normy ČSN 65 7222-3 přílohy B na stanovení teploty přechodu fáze T_{PF} . Z pěti asfaltových pojiv, která byla modifikována vosky snižujícími viskozitu se u čtyř pojiv projevil náhlý skok v napětí v asfaltovém pojivu, který je možný vidět v grafu 53. Zjištěné teploty přechodu fáze T_{PF} stanovené podle grafu 53 byly zobrazeny v grafu 54 a následně proběhlo zjištění, o jaké použité vosky se jedná. Dle dostupných informací o použitých voscích se tyto předpoklady potvrdily.

V kapitole 6.13 jsou popsány výsledky ze stanovení kritické teploty pomocí modulu tuhosti S a m -hodnoty. Zajímavé je, že kritické teploty pro asfalty modifikované vosky byly horší než u běžných silničních asfaltů. Tato skutečnost by se dala vysvětlit, že vlivem modifikace asfaltů vosky dochází k narušení vnitřní stability asfaltových pojiv a tím se tato pojiva stávají citlivější na nízké teploty. Z grafu 68 je vidět, že tato modifikovaná asfaltová pojiva mají už při vyšších teplotách ($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$) vyšší hodnotu modulu tuhosti S , než běžné silniční asfalty, to znamená, že už při vyšších teplotách jsou tuhá a zároveň křehká s možností porušení vlivem křehkého lomu.

Výsledné hodnoty zkoušených pojiv jsou souhrnně zobrazeny v tabulkách 17 a 18.

Tabulka 17: Výsledky zkoušených poživ - část 1

Zkoušky		Penetrace jehlou	Bod měknutí	Bod lámavosti	Vratná duktilita	Silová duktilita 10°C	Silová duktilita 15°C	Komplexní modul ve smyku G*=15kPa ČSN EN 14770		Komplexní modul ve smyku G*=15kPa ČSN 65 7222-3		Komplexní modul ve smyku G*=15kPa AL BTSV (DSR)		Teplota přechodu fáze T _{PF}
Asfalty		[p.j.]	[°C]	[°C]	[%]	[J/cm ²]	[J/cm ²]	τ [°C]	δ [°]	T _{BTSV} [°C]	δ _{BTSV} [°]	T _{BTSV} [°C]	δ _{BTSV} [°]	[°C]
PMB 25/55-55	Nezestárlé	29	58,3	-7	64,0	4,41	2,11	55,9	75,7	56,8	74,0	57,5	74,6	101,0
	RTFOT	21	74,0	-	67,0	-	-	64,2	70,8	-	-	-	-	-
	RTFOT+PAV	12	81,7	-	-	-	-	74,2	68,8	-	-	-	-	-
PMB 45/80NV	Nezestárlé	32	94,1	-5	82,8	6,55	3,77	61,5	54,0	64,2	52,5	65,2	52,8	82,0
	RTFOT	24	95,6	-	74,8	-	-	66,8	54,2	-	-	-	-	-
	RTFOT+PAV	16	100,2	-	-	-	-	74,5	51,0	-	-	-	-	-
50/70 NV	Nezestárlé	32	75,5	-7	35,3	0,62	0,43	62,5	57,2	62,2	61,2	62,6	64,1	90,0
	RTFOT	25	81,1	-	33,8	-	-	63,2	71,5	-	-	-	-	-
	RTFOT+PAV	14	88,4	-	-	-	-	70,8	70,0	-	-	-	-	-
PMB 25/55 NV	Nezestárlé	26	95,3	-6	85,0	6,16	4,95	66,0	60,2	68,5	58,0	69,5	58,1	83,0
	RTFOT	20	98,6	-	73,5	-	-	72,0	61,0	-	-	-	-	-
	RTFOT+PAV	12	100,2	-	-	-	-	78,0	55,0	-	-	-	-	-
PMB 25/55-60	Nezestárlé	48	62,2	-	82,0	4,11	-	52,5	66,5	53,2	66,5	53,7	66,7	-
	RTFOT	33	73,7	-	82,0	-	-	57,5	68,5	-	-	-	-	-
	RTFOT+PAV	21	77,9	-	-	-	-	67,0	60,5	-	-	-	-	-
PMB 25/55-60 0,5% Evotherm	Nezestárlé	51	65,1	-	86,0	4,01	-	50,5	70,0	51,5	69,5	52,4	69,5	-
	RTFOT	36	67,7	-	81,0	-	-	55,0	67,0	-	-	-	-	-
	RTFOT+PAV	24	68,3	-	-	-	-	61,5	67,5	-	-	-	-	-
50/70	Nezestárlé	64	48,6	-	-	-	-	46,5	80,5	54,8	78,5	-	-	-
	RTFOT	39	54,9	-	-	-	-	52,0	77,5	-	-	-	-	-
	RTFOT+PAV	28	61,9	-	-	-	-	60,0	76,0	-	-	-	-	-

Tabulka 18: Výsledky zkoušených pojiv - část 2

Zkoušky		Dynamická viskozita η při 135 °C	MSCR 60 °C 3,2 kPa			MSCR 70 °C 3,2 kPa			Modul tuhosti za ohybu (BBR)	
Asfalty		[mPa·s]	J_{nr} [kPa ⁻¹]	$J_{nr diff}$ [%]	R [%]	J_{nr} [kPa ⁻¹]	$J_{nr diff}$ [%]	R [%]	S_{60s} [MPa]	m_{60s} [-]
PMB 25/55-55	Nezestárlé	1051,0	-	-	-	-	-	-	-	-
	RTFOT	-	0,18	112,1	38,91	0,98	241,90	18,19	-	-
	RTFOT+PAV	-	-	-	-	-	-	-	-10,4	-6,50
PMB 45/80 NV	Nezestárlé	1946,0	-	-	-	-	-	-	-	-
	RTFOT	-	0,02	37,8	85,59	0,09	53,60	80,40	-	-
	RTFOT+PAV	-	-	-	-	-	-	-	-17,9	-13,7
50/70 NV	Nezestárlé	436,2	-	-	-	-	-	-	-	-
	RTFOT	-	0,32	131,4	23,19	2,48	595,10	3,55	-	-
	RTFOT+PAV	-	-	-	-	-	-	-	-13,8	-7,35
PMB 25/55 NV	Nezestárlé	2464,0	-	-	-	-	-	-	-	-
	RTFOT	-	0,02	44,1	79,60	0,09	90,20	68,82	-	-
	RTFOT+PAV	-	-	-	-	-	-	-	-16,0	-3,47
PMB 25/55-60	Nezestárlé	1714,0	-	-	-	-	-	-	-	-
	RTFOT	-	0,11	12,3	79,60	0,32	15,60	75,77	-	-
	RTFOT+PAV	-	-	-	-	-	-	-	-17,1	-15,5
PMB 25/55-60 0,5% Evotherm	Nezestárlé	1366,0	-	-	-	-	-	-	-	-
	RTFOT	-	0,22	-10,4	77,95	0,63	-3,60	72,95	-	-
	RTFOT+PAV	-	-	-	-	-	-	-	-16,5	-15,7
50/70	Nezestárlé	377,0	-	-	-	-	-	-	-	-
	RTFOT	-	1,98	12,3	1,70	-	-	-	-	-
	RTFOT+PAV	-	-	-	-	-	-	-	-18,2	-16,4

7 Zdroje

[1] TP 238. Nízkoteplotní asfaltové směsi (NTAS). Praha: Ministerstvo dopravy Odbor pozemních komunikací, 2012.

[2] SOENEN, E, TANGHE, T, REDELIUS, P, VISSCHER DE, J, VERVAECKE, F, VANELSTRAETE, A. A laboratory study on the use of waxes to reduce paving temperatures. 2008, 12 stran.

[3] EDWARDS, Y, a REDELIUS, P. Rheological Effects of Waxes in Bitumen. 2003, 10 stran.

[4] EDWARDS, Y. Royal Institute of Technology, Highway Engineering. Influence of waxes on polymer modified mastic asphalt performance [online]. Švédsko, 2008, 6 stran. [cit. 2018-12-14]. Dostupné z: <http://vpp.sbuf.se/Public/Documents/ProjectDocuments/945559c3-6975-4822-afec-b0800a50bde3/WebPublishings/SBUF%2011933%20Bilaga%20G%20Paper%20Influence%20of%20waxes%20on%20polymer%20modified%20mastic%20asphalt%20performance.pdf>

[5] VALENTIN, Jan, VALENTOVÁ, Tereza, SOUKUPOVÁ, Lucie, BUREŠ, Petr, KAŠPAR, Jiří. Impact of selected WMA additives on normal PMB used for a standardized SMA. 2016, 14 stran.

[6] VALENTIN, Jan, MONDSCHIEIN, Petr, BUREŠ, Petr, KAŠPAR, Jiří, BENEŠ, Jan, ŠPAČEK, Petr, ŽALMAN, Lubomír. Experimentální ověřování vybraného souboru nízkoviskózních přísad pro nízkoteplotní asfaltové směsi [online]. 2013 [cit. 2018-12-14]. Dostupné z: http://www.cesti.cz/technicke_listy/tl2013/2013_WP1_TL1_1_5.pdf

[7] ČSN EN 1426. Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení penetrace jehlou. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.

[8] ČSN EN 1427. Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknutí - Metoda kroužek a kulička. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.

[9] ČSN EN 12593. Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu lámavosti podle Fraasse. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní

zkušebnictví, 2015.

[10] ČSN EN 13398. Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení vratné duktility modifikovaných asfaltů. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.

[11] ČSN EN 13589. Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení tažných vlastností modifikovaných asfaltů metodou silové duktility. Praha: Český normalizační institut, 2008.

[12] ČSN EN 12607-1. Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu – Část 1: Metoda RTFOT. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.

[13] ČSN EN 14769. Asfalty a asfaltová pojiva – Urychlené dlouhodobé stárnutí v tlakové nádobě (PAV). Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.

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

[15] ČSN 65 7222-3. Asfalty a asfaltová pojiva – Silniční modifikované asfalty – Část 3: Speciální polymerem modifikované asfalty. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.

[16] AL BTSV (DSR). Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Verformungsverhaltens von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln im Dynamischen Scherrheometer (DSR) – Teil 4: Durchführung des BTSV (Bitumen-Typisierungs-Schnell-Verfahrens). FGSV, Ausgabe 2017.

[17] ČSN EN 13702. Stanovení dynamické viskozity modifikovaných asfaltů metodou kužel a deska. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.

[18] ČSN EN 16659. Asfalty a asfaltová pojiva – Zkouška MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery Test). Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.

[19] ČSN EN 14771. Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru (BBR). Praha: Úřad

pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.

[20] MASTNÝ, Jan. *Vliv syntetických vosků a rejuvenátorů na vlastnosti asfaltové směsi s R-materiálem*. Praha, 2017. 106 stran. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební Katedra silničních staveb. Vedoucí práce: Ing. Jan Valentin, Ph.D.

[21] CHMELÍKOVÁ, Monika. *Nízkoteplotní asfaltové směsi s vyšším obsahem R-materiálu*. Praha, 2018. 124 stran. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební Katedra silničních staveb. Vedoucí práce: Ing. Jan Valentin, Ph.D.

[22] ŽALMAN, Lubomír a KRÁLOVÁ Eva. *Amidové vosky a jejich použití v silničním stavitelství* [online]. 9. 10. 2014 [cit. 2018-12-14]. Dostupné z: <http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/amidove-vosky-a-jejich-pouziti-v-silnicnim-stavitelstvi/>

[23] EUROPEAN ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION. *Low temperature Asphalt*. 2005, 10 stran.

[24] OMARI, Isaac, AGGARWAL, Vivek, HESP, Simon. *Investigation of two Warm Mix Asphalt additives* [online]. March, 2016 [cit. 2018-12-14]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1996681416000195>

[25] PEREIRA, Raul, ALMEIDA-COSTA, Ana, DUARTE, Cátia, BENTA, Agostinho. *Warm mix asphalt: Chemical additives effects on bitumen properties and limestone aggregates mixture compactibility* [online]. October, 2017 [cit. 2018-12-14]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1996681417300639>

[26] WAJAHAT ALI, Ahmed, HWAN KIM, Hyun, MAZUMDER, Mithil, LEE, Moon.Sup, LEE, Soon-Jae. *Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) characterization of polymer modified asphalt binder containing wax additives* [online]. May, 2018 [cit. 2018-12-14]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1996681418300063>

[27] AZHAR BUTT, Ali. *Low temperature performance of wax modified mastic asphalt*. Stockholm, 2009. 42 stran. Diplomová práce. Royal Institute of Technology, Division of Highway and Railway Engineering.

[28] LU, Xiaohu, KALMAN, Björn, REDELIUS, Per. *A simple test method for*

determination of waxes in crude oils and bitumens [online]. [cit. 2018-12-14]. Dostupné z:

https://www.researchgate.net/publication/266000674_A_SIMPLE_TEST_METHOD_FOR_DETERMINATION_OF_WAXES_IN_CRUDE_OILS_AND_BITUMENS

[29] ZHANG, Jiupeng, LIU, Guoqiang, XU, Li, PEI, Jianzhong. *Effects of WMA Additive on the Rheological Properties of Asphalt Binder and High Temperature Performance Grade* [online]. April, 2015 [cit. 2018-12-14]. Dostupné z: <https://www.hindawi.com/journals/amse/2015/467891/>

[30] EDWARDS, Ylva, TASDEMIR, Yuksel, BUTT, Ali Azhar. *Energy saving and enviromental friendly wax concept for polymer modified mastic asphalt* [online]. April, 2010 [cit. 2018-12-14]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-010-9603-y>

[31] BUTT, Ali Azhar, JELAGIN, Denis, TASDEMIR, Yüksel, BIRGISSON, Björn. *The effect of wax modification on the performance of mastic asphalt* [online]. January, 2010 [cit. 2018-12-14]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/257959638_The_Effect_of_Wax_Modification_on_the_Performance_of_Mastic_Aspphalt

[32] YERO, Arafat Suleiman, HAININ, Mohd Rosli. *The effect of commercial wax on viscosity characteristic of modified asphalt* [online]. August, 2011 [cit. 2018-12-14]. Dostupné z: https://www.arpapress.com/Volumes/Vol8Issue2/IJRRAS_8_2_06.pdf

[33] KIM, Hakseo, LEE, Soon-Jae, AMIRKHANIAN, Serji N. *Effects of warm mix asphalt additives on performance properties of polymer modified asphalt binders* [online]. January 2010 [cit. 2018-12-14]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/237152014_Effects_of_warm_mix_asphalt_additives_on_performance_properties_of_polymer_modified_asphalt_binders

[34] MERUSI, Filippo, GIULIANI, Felice. *Rheological characterization of wax-modified asphalt binders at high service temperatures* [online]. May, 2011 [cit. 2018-12-14]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-011-9739-4>

[35] VALENTIN, Jan, BENEŠ, Jan, MONDSCHN, Petr. *Vliv nízkoviskózních přísad na charakteristiky asfaltové směsi* [online]. [cit. 2018-12-14]. Dostupné z: http://www.cesti.cz/wc13/WP1_02.pdf

[36] Stanovení bodu lámavosti podle Fraasse. In: www.strojeprozkusebnictvi.cz [online]. [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: <https://www.strojeprozkusebnictvi.cz/stanoveni-bodu-lamavosti-podle-fraasse.html#zalozka-1>

[37] Aparat RTFOT (Rolling Thin Film oven Test). In: www.ztmind.il.pw.edu.pl [online]. 2012 [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: <https://www.ztmind.il.pw.edu.pl/wp-content/uploads/2012/03/labasfaltu07-2.jpg>

[38] Tlaková nádoba pro zkoušku PAV. In: www.strojeprozkusebnictvi.cz [online]. [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: <https://www.strojeprozkusebnictvi.cz/tlakova-nadoba-pro-zkousku-pav.html>

[39] Výroba obalované asfaltové směsi. In: www.edb.cz [online]. 2012 [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: <https://www.edb.cz/firma-580509-obalovna-ostava-ostava-kuncice>

[40] Pokládání asfaltu v Palackého ulici v Přerově. In: www.denik.cz [online]. [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: <https://www.denik.cz/galerie/pokladani-asfaltu-v-palackeho-ulici-v-prerove.html?photo=5>

[41] SHAW, John. *TWG – Warm mix asphalt* [online]. December, 2007 [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: http://www.warmmixasphalt.org/submissions/53_20080101_John%20Shaw%20-%20Sasobit.pdf

[42] Sasobit pellets. In: www.researchgate.net [online]. [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Figure-A1-Sasobit-pellets_fig5_279450367

[43] ACAR CHEMICALS. *Additives Waxes* [online]. [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: http://www.acarchemicals.com/Assets/Documents/Clariant__Waxes__Acar_Chemicals_20150514_153544.pdf

[44] ZEOLIT jemný. In: www.prima-receptar.cz [online]. [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: <https://prima-receptar.cz/zeolit%E2%80%933prirodni-novinka-ktera-vam-pohlida-cistotu-vody/>

[45] BUTZ, Thorsen. *Warm Mix Asphalt Pavements based on the Fischer – Tropsch Wax Sasobit* [online]. [cit. 2018-12-14]. Dostupné z:

<http://www.petersenasphaltconference.org/download/2008/4-3--Butz.pdf>

8 Seznam obrázků

Obrázek 1: Obalovna produkující emise CO ₂ [39]	11
Obrázek 2: Výpary při pokládce asfaltové směsi [40]	12
Obrázek 3: Pelety Sasobitu [42]	13
Obrázek 4: Licomont ve formě prášku [57]	14
Obrázek 5: Zeolit ve formě prášku [44]	14
Obrázek 6: Závislost tepelného toku na teplotě vosků.....	18
Obrázek 7: Závislost dynamické viskozity na teplotě referenčního pojiva B55 a čistých vosků.	19
Obrázek 8: Závislost tepelného toku na teplotě u DSC chlazení 3 % u asfaltového pojiva s vosky s porovnáním k referenčnímu pojivu (chlazení -10 °C/min).....	20
Obrázek 9: Komplexní viskozita během chlazení pro různé 3 % asfalty s vosky a pro referenční asfalt (chlazení rozsahu 2 °C/min; 1 Hz; 1 % přetvoření).....	21
Obrázek 10: Přetvářející závislost při 50 °C a 0,01 Hz pro vybraná asfaltová pojiva s vosky, pro polymerem modifikovaná asfaltová pojiva a pro nemodifikovaná pojiva.....	23
Obrázek 11: DSR při teplotním rozsahu -30 do 80 °C a frekvenci 10 rad/s pro PmB 32 obsahující vosky.....	31
Obrázek 12: DSR při teplotním rozsahu od -30 do 80 °C při frekvenci 10 rad/s pro PmB 32 obsahující vosk po laboratorním zestárnutí RTFOT	31
Obrázek 13: Penetrace jehlou PMB sad 1 a 2	35
Obrázek 14: Bod měknutí PMB sad 1 a 2	35
Obrázek 15: Vratná duktilita PMB pojiv sad 1 a 2.....	37
Obrázek 16: Diagram silové duktility PMB pojiv sady 1	39
Obrázek 17: Diagram silové duktility PMB pojiv sady 2.....	39
Obrázek 18: Hlavní křivky komplexního smykového modulu PMB pojiv sady 1	43
Obrázek 19: Hlavní křivky fázového úhlu PMB pojiv sady 1	43
Obrázek 20: Hlavní křivky komplexního smykového modulu PMB pojiv sady 2.....	44
Obrázek 21: Hlavní křivky fázového úhlu PMB pojiv sady 2.....	44
Obrázek 22: Nevratná smyková poddajnost pro PMB asfalty sady 1	46
Obrázek 23: Nevratná smyková poddajnost pro PMB asfalty sady 2	47
Obrázek 24: Pevnost v tahu za ohybu zkoušených směsí	49
Obrázek 25: Penetrometr	52
Obrázek 26: Zařízení pro metodu kroužek a kulička.....	53
Obrázek 27: Zařízení pro stanovení bodu lámavosti [36].....	54
Obrázek 28: Ovládání duktilometru Obrázek 29: Vzorky na vratnou duktiliu	

Obrázek 30: Protažené vzorky.....	55
Obrázek 31: Přestřižené vzorky.....	56
Obrázek 32: Vzorek protažen na 400 mm.....	56
Obrázek 33: Protahování vzorku.....	57
Obrázek 34: Sušárna pro RTFOT	58
Obrázek 35: Držák pro skleněné nádoby sušárny RTFOT [37].....	58
Obrázek 36: Zkušební nádoba PAV [38]	59
Obrázek 37: Dynamický smykový reometr ústavu PKO	60
Obrázek 38: Zkušební vzorky pro DSR.....	61
Obrázek 39: Průhybový trámečkový reometr (BBR) výzkumného centra AdMaS.....	66
Obrázek 40: Forma pro zkušební tělesa na zkoušku BBR	66
Obrázek 41: Asfaltové těleso pro stanovení kritické teploty	67

9 Seznam tabulek

Tabulka 1: Technické charakteristiky organických přísad a jejich účinek na asfalt 50/70 [1]	15
Tabulka 2: Kalorimetrie a viskozní vlastnosti vosků v referenčním asfaltu B50/70.....	17
Tabulka 3: Kalorimetrie a viskozní vlastnosti asfaltů s 3 % vosků a referenčního pojiva	20
Tabulka 4: Konvenční a reologické vlastnosti referenčního pojiva a asfaltových pojiv s vosky. Všechna pojiva konzistence 3 % vosku v pojivu B50/70 referenčního pojiva.	22
Tabulka 5: Informace týkající se přísad použitých v tomto příspěvku získány z technických listů produktu.....	28
Tabulka 6: Výsledky pro asfalt PmB 32 s a bez přísady vosku	30
Tabulka 7: Posuzovaná asfaltová pojiva dvou analyzovaných variant.....	34
Tabulka 8: Výsledky empirických testů PMB.....	36
Tabulka 9: Výsledky silové duktility posuzovaných pojiv	38
Tabulka 10: Hodnoty dynamické viskozity při smykové rychlosti $6,8 \text{ s}^{-1}$	40
Tabulka 11: Hodnoty komplexního smykového modul při teplotách 40 a 60 °C.....	41
Tabulka 12: Výsledky zkoušky MSCR posuzovaných asfaltů	45
Tabulka 13: Výsledné hodnoty ze zkušebních těles	48
Tabulka 14: Výsledky silové duktility.....	74
Tabulka 15: Základní přehled použitých norem v rámci práce.....	94
Tabulka 16: Zjištěné teploty přechodu fáze T_{PF}	109
Tabulka 17: Výsledky zkoušených pojiv - část 1	129
Tabulka 18: Výsledky zkoušených pojiv - část 2.....	130

10Seznam rovnic

Rovnice 1: Výpočet vratné duktility	55
Rovnice 2: Výpočet dynamické viskozity.....	63

11 Seznam grafů

Graf 1: Typický cyklus dotvarování a zotavení	64
Graf 2: Průběh dvou cyklů MSCR testu.....	65
Graf 3: Penetrace jehlou	68
Graf 4: Zbýlá penetrace asfaltových pojiv v procentech.....	69
Graf 5: Bod měknutí	70
Graf 6: Teplota bodu lámavosti podle Fraasse	71
Graf 7: Vratná duktilita asfaltových pojiv	72
Graf 8: Tažné vlastnosti asfaltových pojiv při teplotě 10 °C	73
Graf 9: Tažné vlastnosti asfaltových pojiv při teplotě 15 °C	74
Graf 10: Komplexní smykový modul G^* při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz	76
Graf 11: Změna komplexního smykového modulu G^* při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz.....	77
Graf 12: Fázový úhel δ při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz.....	78
Graf 13: Změna fázového úhlu δ při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz	79
Graf 14: Isotermie komplexního smykového modulu při teplotě 60 °C	80
Graf 15: Isochrony komplexního smykového modulu při frekvenci 1,59 Hz	80
Graf 16: Isotermie fázových úhlů při teplotě 60 °C	81
Graf 17: Isochrony fázových úhlů při frekvenci 1,59 Hz.....	82
Graf 18: Blackův diagram dle ČSN EN 14770 nezestárých asfaltových pojiv	83
Graf 19: Průběh smykového modulu a fázového úhlu asfaltu PMB 25/55-55 NV (pojivo A)	84
Graf 20: Průběh smykového modulu a fázového úhlu asfaltu PMB 45/80 NV (pojivo B).....	84
Graf 21: Průběh smykového modulu a fázového úhlu asfaltu 50/70 NV (pojivo C).....	85
Graf 22: Průběh smykového modulu a fázového úhlu asfaltu PMB 25/55 NV (pojivo D).....	85
Graf 23: Průběh smykového modulu a fázového úhlu srovnávacího asfaltu PMB 25/55-60 (pojivo E)	86
Graf 24: Průběh smykového modulu a fázového úhlu asfaltu PMB 25/55-60+0,5 % Evotherm (pojivo F)	86
Graf 25: Průběh smykového modulu a fázového úhlu srovnávacího silničního asfaltu 50/70 (pojivo G)	87
Graf 26: Teplota T_{BTSV} a fázový úhel δ_{BTSV} při dosažení $G^* = 15$ kPa	88
Graf 27: Průběh komplexních smykových modulů a fázových úhlů zkoušených pojiv	89
Graf 28: Blackův diagram dle ČSN 65 7222-3	90

Graf 29: Teplota T_{BTSV} a fázový úhel δ_{BTSV} při dosažení $G^* = 15 \text{ kPa}$	91
Graf 30: Průběh komplexních smykových modulů a fázových úhlů zkoušených poživ	92
Graf 31: Blackův diagram dle AL BTSV (DSR)	93
Graf 32: Porovnání normy ČSN 65 7222-3 a AL BTSV (DSR) při frekvenci 1,59 Hz a teplotě od 30 °C do 90 °C	94
Graf 33: Porovnání normy ČSN EN 14770 a AL BTSV (DSR) při frekvenci 1,59 Hz a teplotě od 40 °C do 70 °C	95
Graf 34: Porovnání norem ČSN EN 14770 a ČSN 65 7222-3 při frekvenci 1,59 Hz a teplotě od 40 °C do 70 °C	95
Graf 35: Komplexní modul ve smyku G^* při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz	97
Graf 36: Fázový úhel δ při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz	97
Graf 37: Teplota T , při dosažení $G^* = 15 \text{ kPa}$	98
Graf 38: Fázový úhel δ při dosažení $G^* = 15 \text{ kPa}$	99
Graf 39: Porovnání komplexních smykových modulů a fázových úhlů asfaltu PMB 25/55-55 NV (pojivo A)	100
Graf 40: Porovnání Blackových diagramů asfaltu PMB 25/55-55 NV (pojivo A)	100
Graf 41: Porovnání komplexních smykových modulů a fázových úhlů asfaltu PMB 45/80 NV (pojivo B)	101
Graf 42: Porovnání Blackových diagramů asfaltu PMB 45/80 NV (pojivo B)	101
Graf 43: Porovnání komplexních smykových modulů a fázových úhlů asfaltu 50/70 NV (pojivo C)	102
Graf 44: Porovnání Blackových diagramů asfaltu 50/70 NV (pojivo C)	102
Graf 45: Porovnání komplexních smykových modulů a fázových úhlů asfaltu PMB 25/55 NV (pojivo D)	103
Graf 46: Porovnání Blackových diagramů asfaltu PMB 25/55 NV (pojivo D)	103
Graf 47: Porovnání komplexních smykových modulů a fázových úhlů srovnávacího asfaltu PMB 25/55-60 (pojivo E)	104
Graf 48: Porovnání Blackových diagramů srovnávacího asfaltu PMB 25/55-60 (pojivo E)	104
Graf 49: Porovnání komplexních smykových modulů a fázových úhlů asfaltu PMB 25/55-60+0,5 % Evotherm (pojivo F)	105
Graf 50: Porovnání Blackových diagramů asfaltu PMB 25/55-60+0,5 % Evotherm (pojivo F)	105
Graf 51: Porovnání komplexních smykových modulů a fázových úhlů srovnávacího asfaltu 50/70 (pojivo G)	106
Graf 52: Porovnání Blackových diagramů srovnávacího asfaltu 50/70 (pojivo G)	106

Graf 53: Teplota přechodu fáze T_{PF} asfaltových pojiv	108
Graf 54: Teplota přechodu fáze T_{PF} asfaltových pojiv	110
Graf 55: Hodnoty dynamické viskozity při teplotě 135 °C a smykové rychlosti 1 s^{-1}	111
Graf 56: Závislost dynamické viskozity na teplotě při smykové rychlosti 1 s^{-1}	112
Graf 57: Závislost dynamické viskozity na smykové rychlosti při teplotě 135 °C	112
Graf 58: Závislost dynamické viskozity na smykové rychlosti při různých teplotách.....	113
Graf 59: Smykové přetvoření zkoušených pojiv při 60 °C a 70 °C	114
Graf 60: Smykové přetvoření zkoušených pojiv při teplotě 60 °C a 70 °C při napětí 0,1 kPa.....	114
Graf 61: Smykové přetvoření zkoušených pojiv při teplotě 60 °C a 70 °C při napětí 3,2 kPa.....	115
Graf 62: Nevratná smyková poddajnost J_{nr} při teplotě 60 °C	116
Graf 63: Nevratná smyková poddajnost J_{nr} při teplotě 70 °C	116
Graf 64: Procentuální rozdíl ve smykové poddajnosti $J_{nr\text{diff}3,2-0,1}$ při teplotách 60 °C a 70 °C.....	117
Graf 65: Průměrné elastické zotavení R při teplotě 60 °C	118
Graf 66: Průměrné procentuální zotavení R při teplotě 70 °C	118
Graf 67: Zjištěné kritické teploty zkoušených asfaltů z S_{60s} a m_{60s}	120
Graf 68: Nárůst modulu tuhosti asfaltů s klesající teplotou.....	121
Graf 69: Pokles m -hodnoty s klesající teplotou	122
Graf 70: Stanovení kritické teploty při modulu tuhosti $S_{60s} = 300\text{ MPa}$	123
Graf 71: Stanovení kritické teploty při dosažení m -hodnoty $m_{60s} = 0,3$	123
Graf 72: Závislost modulu tuhosti na čase s klesající teplotou	124
Graf 73: Průběh výchyly zkoušených asfaltů na čase s klesající teplotou.....	125
Graf 74: Průběh modulu tuhosti zkoušených asfaltů na čase s klesající teplotou	126
Graf 75: Závislost m -hodnoty na modulu tuhosti S v čase 0 - 240 s asfaltu PMB 25/55-60+0,5 % Evotherm (pojivo F)	127
Graf 76: Závislost m -hodnoty na modulu tuhosti S v čase 0 - 240 s.....	127

12 Seznam použitých zkratek a symbolů

Symbole a zkratky

$A_{400-200}$	[J/cm ²]	Smluvní energie
BBR		Průhybový trámečkový reometr
d	[mm]	Vzdálenost mezi polovlákný
DSR		Dynamický smykový reometr
f	[Hz]	frekvence zatížení
F_{max}	[N]	Maximální síla při protažení
G^*	[kPa]	Komplexní modul ve smyku
J_{nr}	[kPa ⁻¹]	Nevratná smyková poddajnost
$J_{nr diff}$	[%]	Rozdíl smykové poddajnosti
L	[mm]	Protažení
m	[-]	m-hodnota
MSCR		Multiple Stress and Creep Recovery Test
PAV		Pressure Aging Vessel
RTFOT		Rolling Thin Film Oven Test
R_E	[%]	Vratná duktilita
R	[%]	Průměrné procentuální zotavení
S	[kPa]	Modul tuhosti za ohybu
T	[°C]	Teplota
T_{PF}	[°C]	Teplota přechodu faze
T_{BTSV}	[°C]	Teplota stanovená dle AL BTSV (DSR)

Řecké symboly

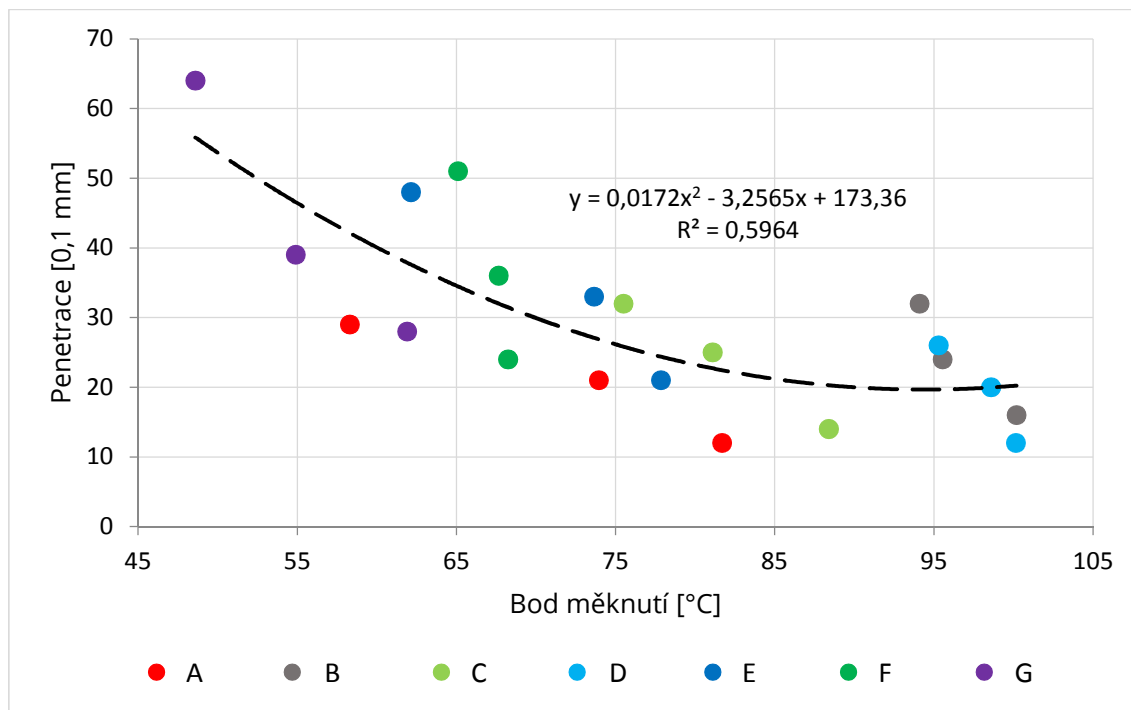
γ	[s ⁻¹]	Smyková rychlost
δ	[°]	Fázový úhel
δ_{BTSV}	[°]	Fázový úhel stanovený dle AL BTSV (DSR)
η	[Pa·s]	Dynamická viskozita
τ	[Pa]	Smykové napětí

13 Seznam příloh

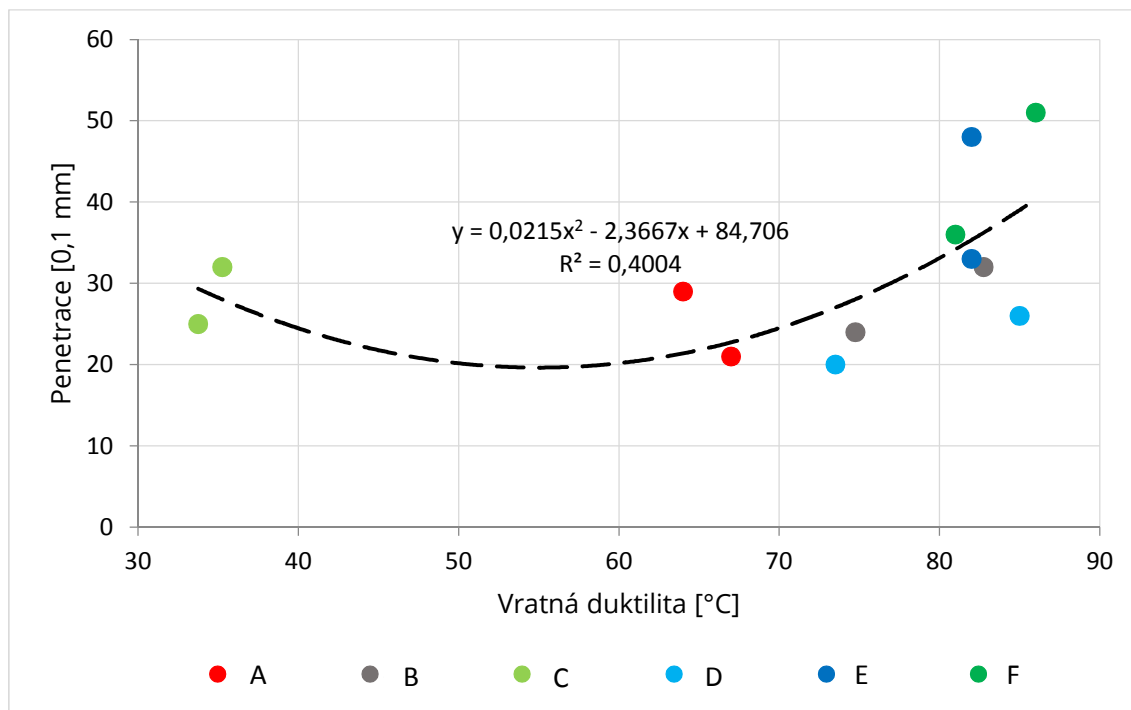
Příloha 1: Závislost penetrace na bodu měknutí	146
Příloha 2: Závislost penetrace na vratné duktilitě	146
Příloha 3: Závislost vratné duktility na bodu měknutí	147
Příloha 4: Závislost penetrace na komplexním modulu ve smyku při $T = 60$ °C a $f = 1,59$ Hz dle ČSN EN 14770	147
Příloha 5: Závislost penetrace na fázovém úhlu při $T = 60$ °C a $f = 1,59$ Hz dle ČSN EN 14770	148
Příloha 6: Závislost bodu měknutí na komplexním modulu ve smyku při $T = 60$ °C a $f = 1,59$ Hz dle ČSN EN 14770	148
Příloha 7: Závislost bodu měknutí na fázovém úhlu při $T = 60$ °C a $f = 1,59$ Hz dle ČSN EN 14770	149
Příloha 8: Blackův diagram asfaltu PMB 25/55-55 NV (pojivo A) dle ČSN EN 14770	149
Příloha 9: Blackův diagram asfaltu PMB 45/80 NV (pojivo B) dle ČSN EN 14770	150
Příloha 10: Blackův diagram asfaltu 50/70 NV (pojivo C) dle ČSN EN 14770	150
Příloha 11: Blackův diagram asfaltu PMB 25/55 NV (pojivo D) dle ČSN EN 14770	151
Příloha 12: Blackův diagram srovnávacího asfaltu PMB 25/55-60 (pojivo E) dle ČSN EN 14770	151
Příloha 13: Blackův diagram asfaltu PMB 25/55-60+0,5 % Evotherm (pojivo F) dle ČSN EN 14770	152
Příloha 14: Blackův diagram srovnávacího silničního asfaltu 50/70 (pojivo G) dle ČSN EN 14770	152
Příloha 15: Závislost komplexního modulu ve smyku dle ČSN 65 7222-3 na komplexním modulu ve smyku dle AL BTSV (DSR).....	153
Příloha 16: Závislost komplexního modulu ve smyku dle ČSN EN 14770 na komplexním modulu ve smyku dle AL BTSV (DSR).....	153
Příloha 17: Závislost komplexního modulu ve smyku dle ČSN EN 14770 na komplexním modulu ve smyku dle ČSN 65 7222-3.....	154

14 Přílohy

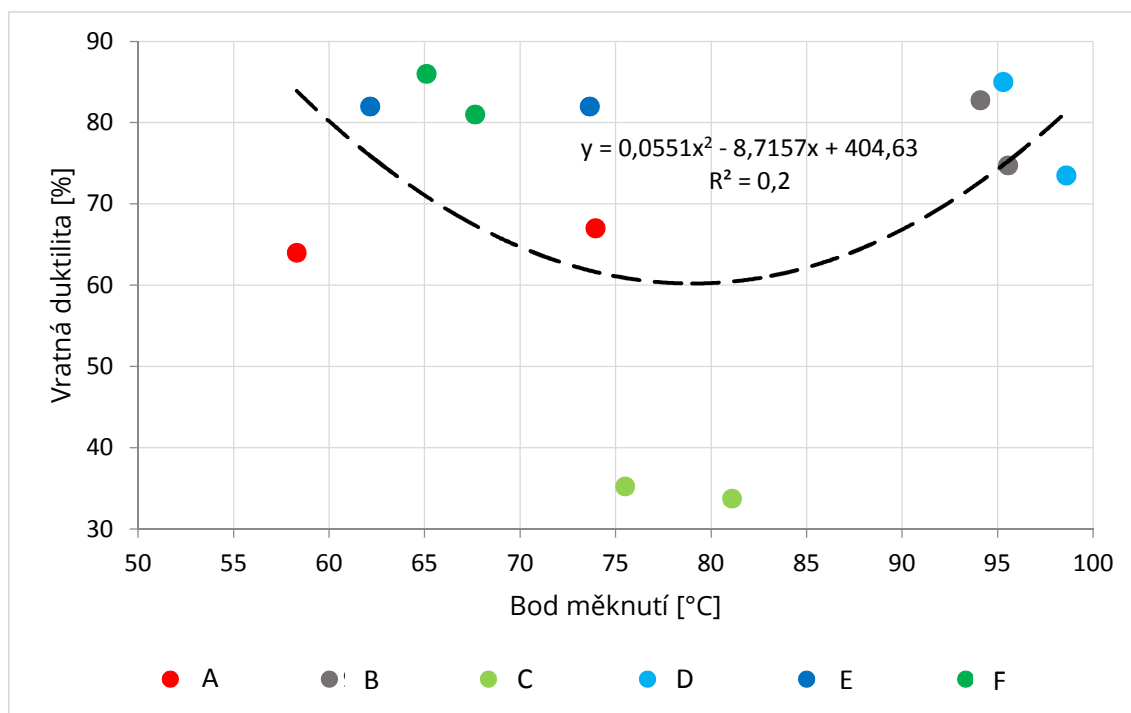
Příloha 1: Závislost penetrace na bodu měknutí



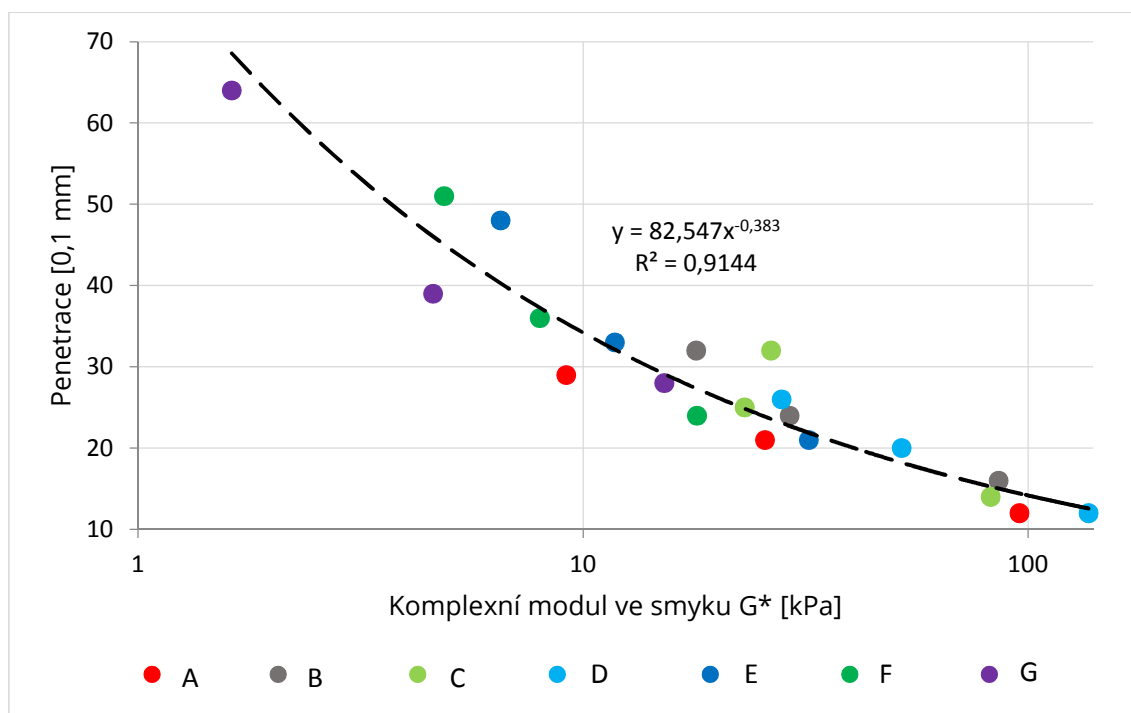
Příloha 2: Závislost penetrace na vratné duktilitě



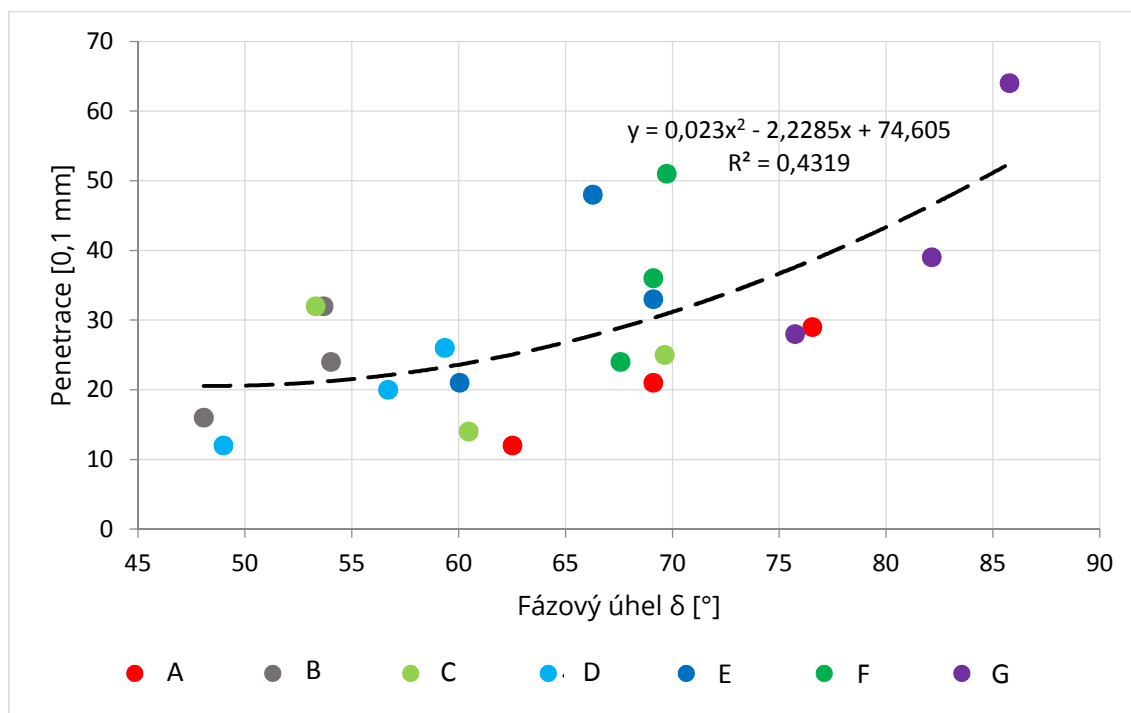
Příloha 3: Závislost vratné duktility na bodu měknutí



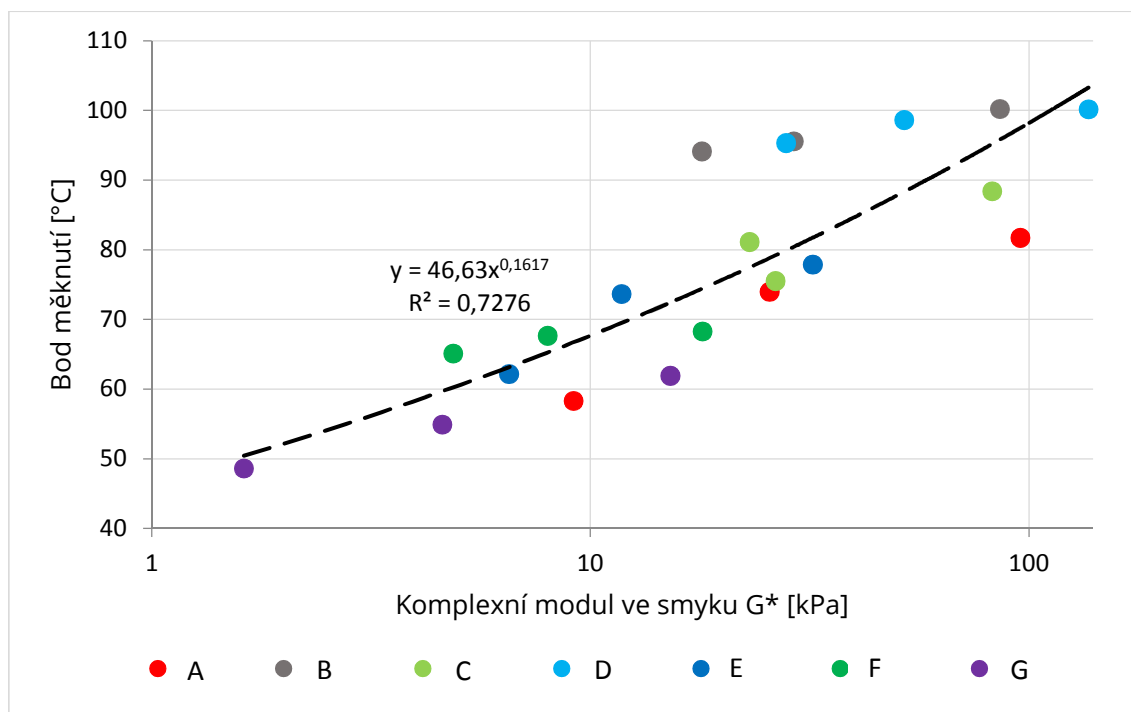
Příloha 4: Závislost penetrace na komplexním modulu ve smyku při T = 60 °C a f = 1,59 Hz dle ČSN EN 14770



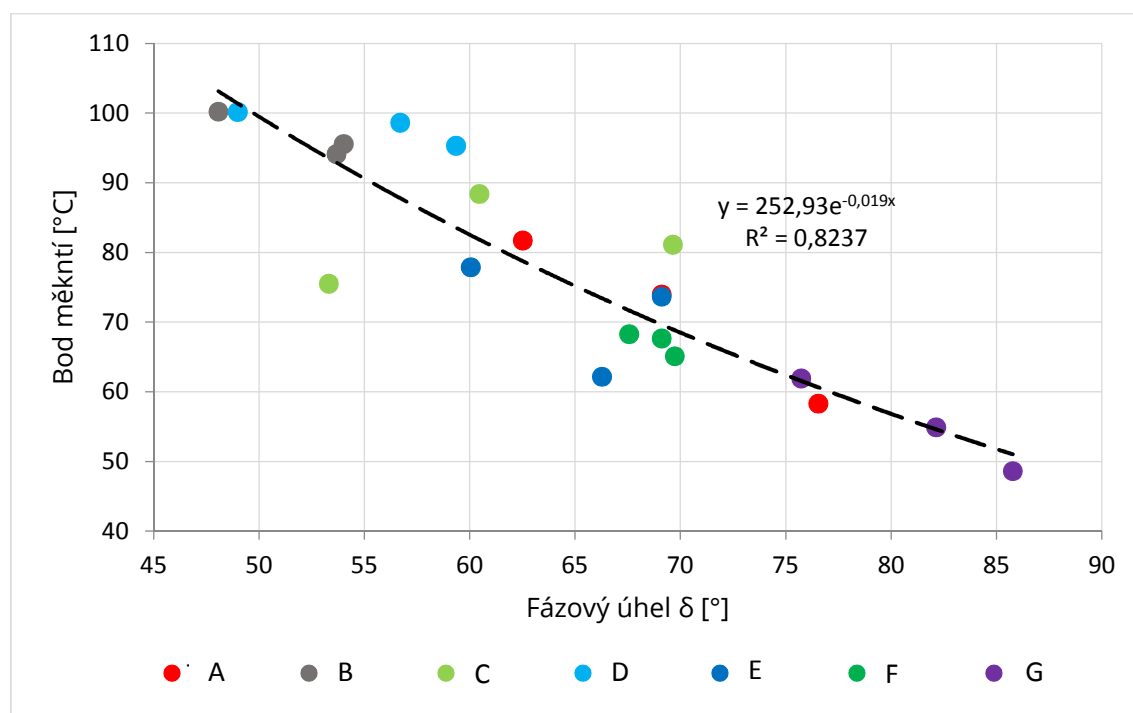
Příloha 5: Závislost penetrace na fázovém úhlu při $T = 60\text{ °C}$ a $f = 1,59\text{ Hz}$ dle ČSN EN 14770



Příloha 6: Závislost bodu měknutí na komplexním modulu ve smyku při $T = 60\text{ °C}$ a $f = 1,59\text{ Hz}$ dle ČSN EN 14770

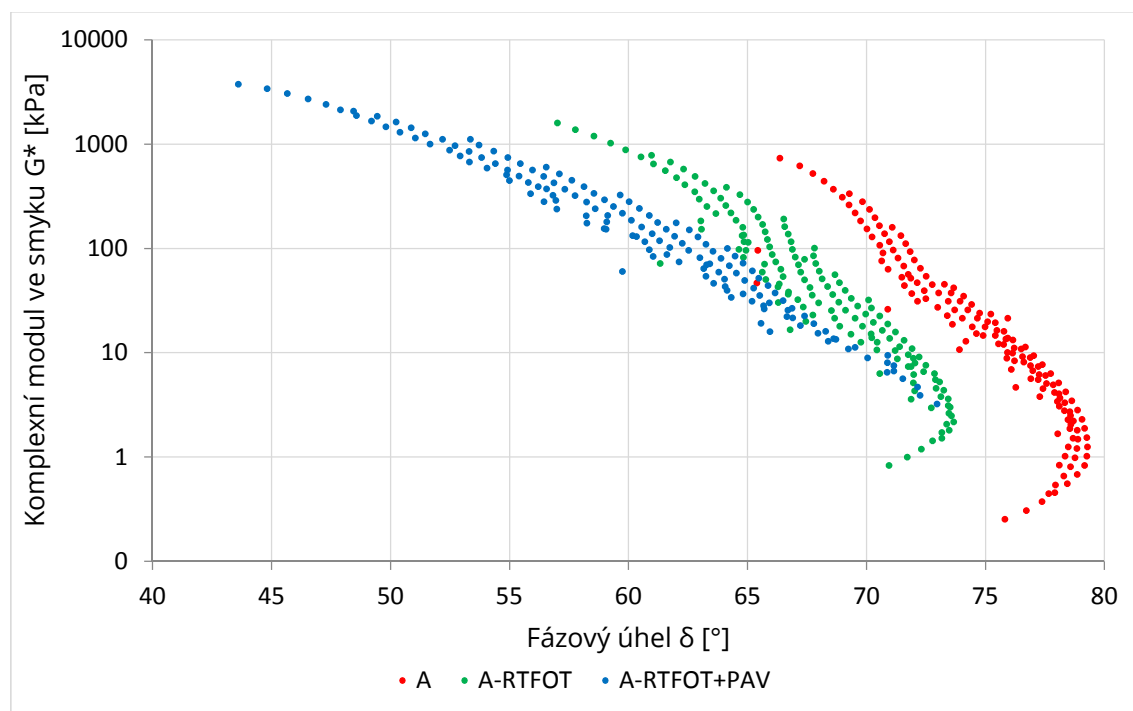


Příloha 7: Závislost bodu měknutí na fázovém úhlu při $T = 60\text{ °C}$ a $f = 1,59\text{ Hz}$ dle ČSN EN 14770

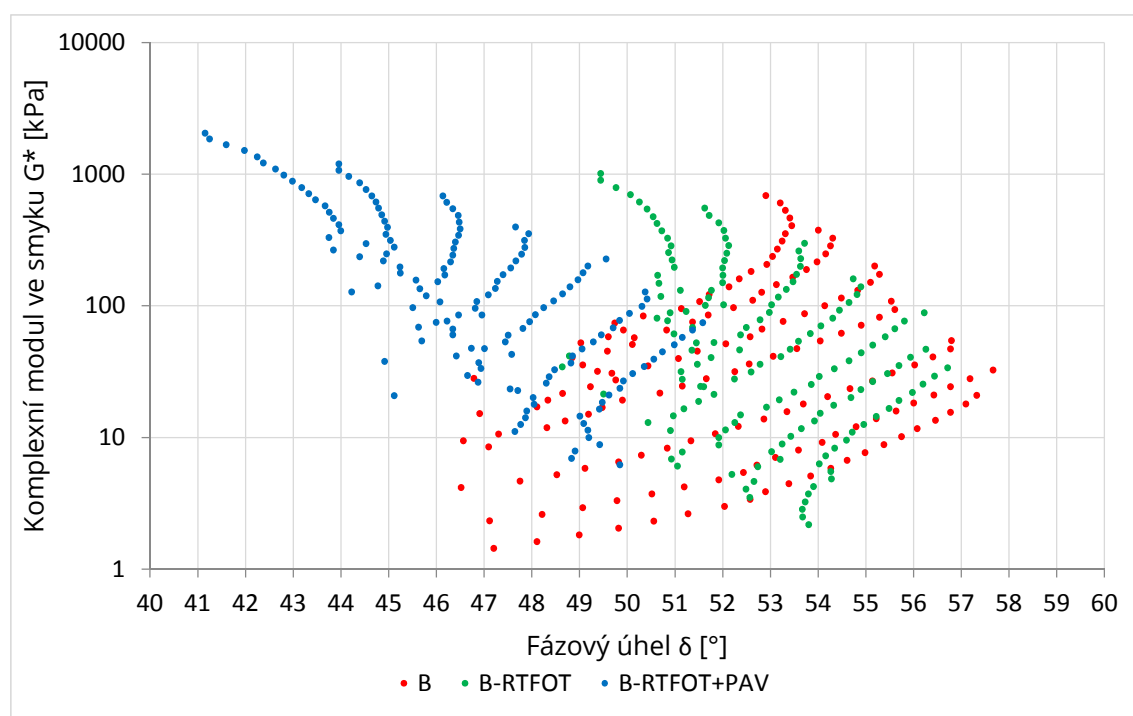


Na grafech příloh 8 - 14 níže, je vidět vliv stárnutí na změnu vedení Blackova diagramu zkoušených poviv.

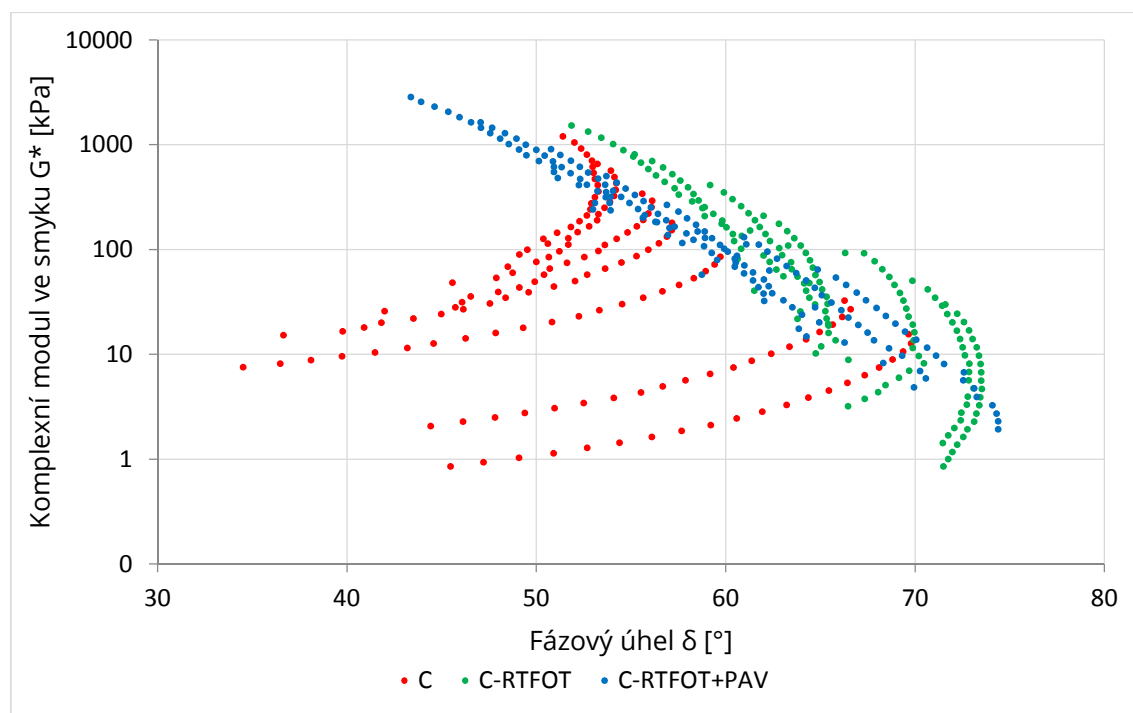
Příloha 8: Blackův diagram asfaltu PMB 25/55-55 NV (pojivo A) dle ČSN EN 14770



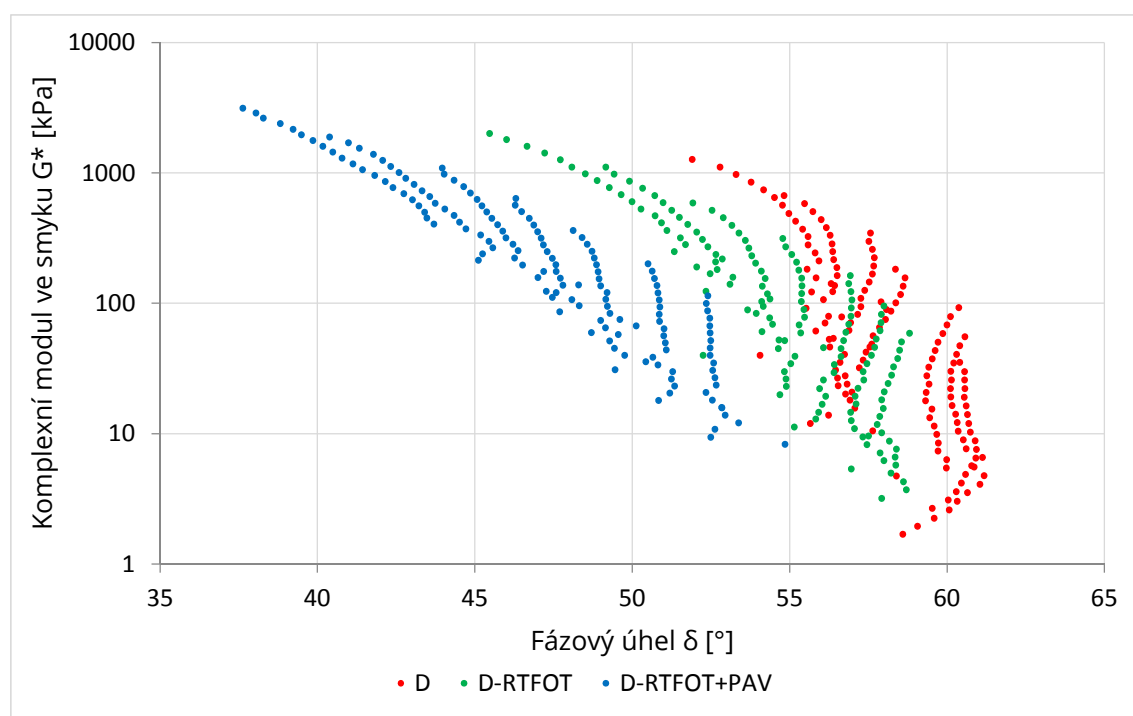
Příloha 9: Blackův diagram asfaltu PMB 45/80 NV (pojivo B) dle ČSN EN 14770



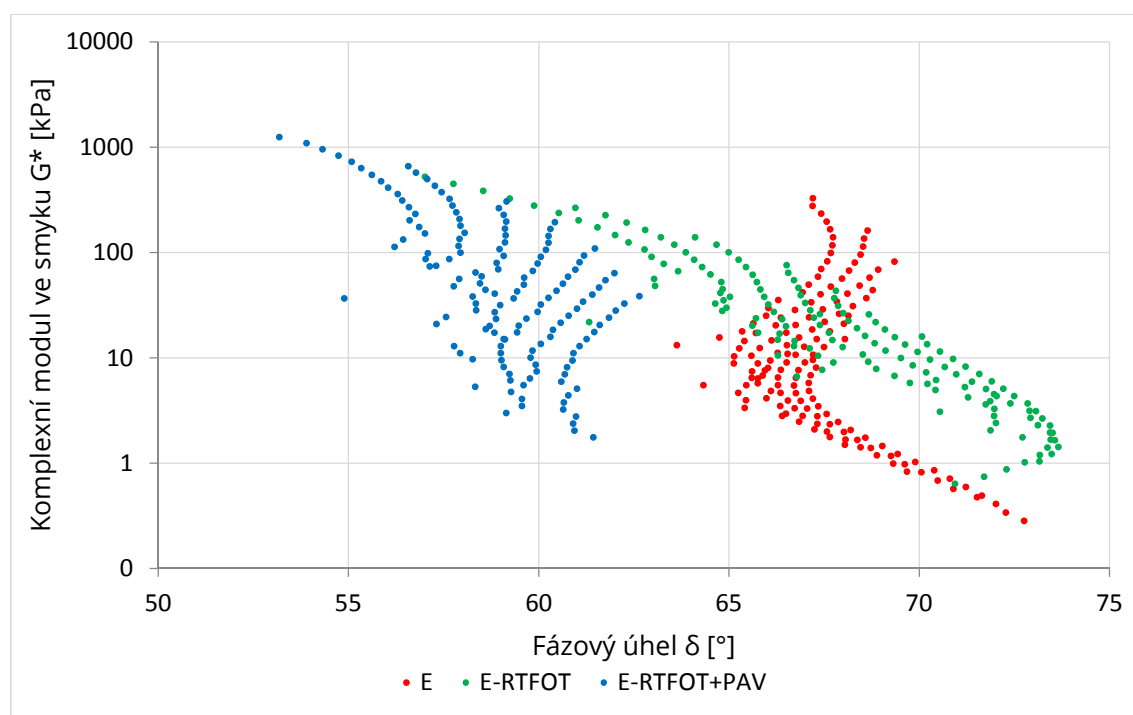
Příloha 10: Blackův diagram asfaltu 50/70 NV (pojivo C) dle ČSN EN 14770



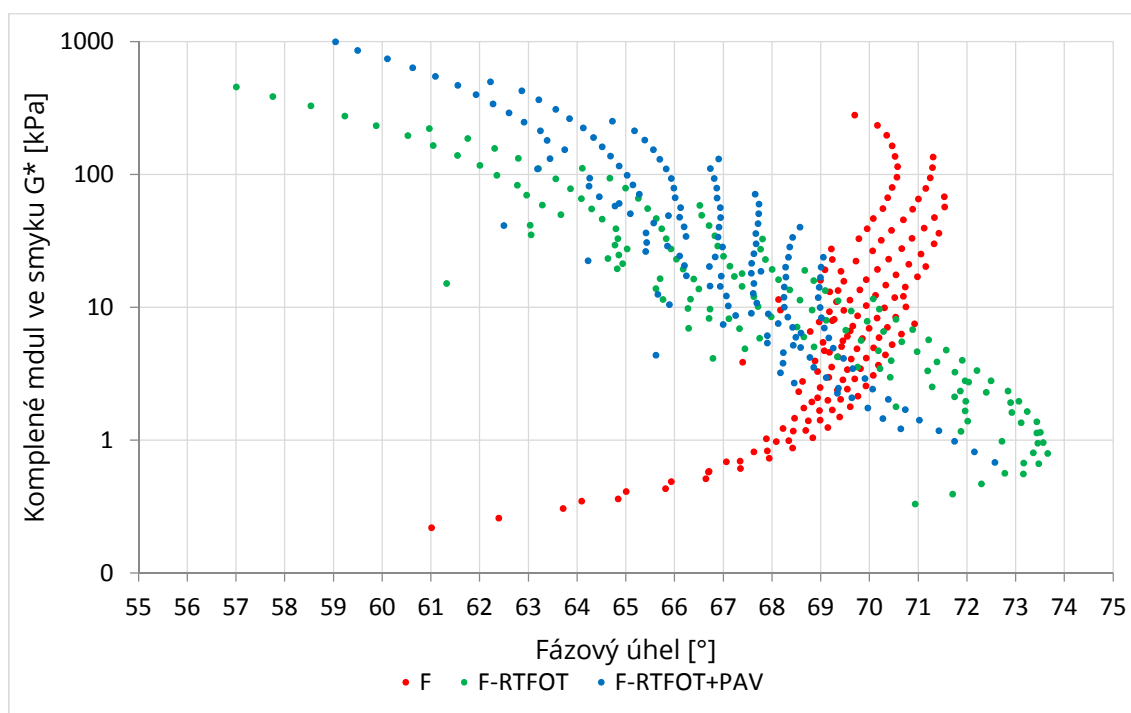
Příloha 11: Blackův diagram asfaltu PMB 25/55 NV (pojivo D) dle ČSN EN 14770



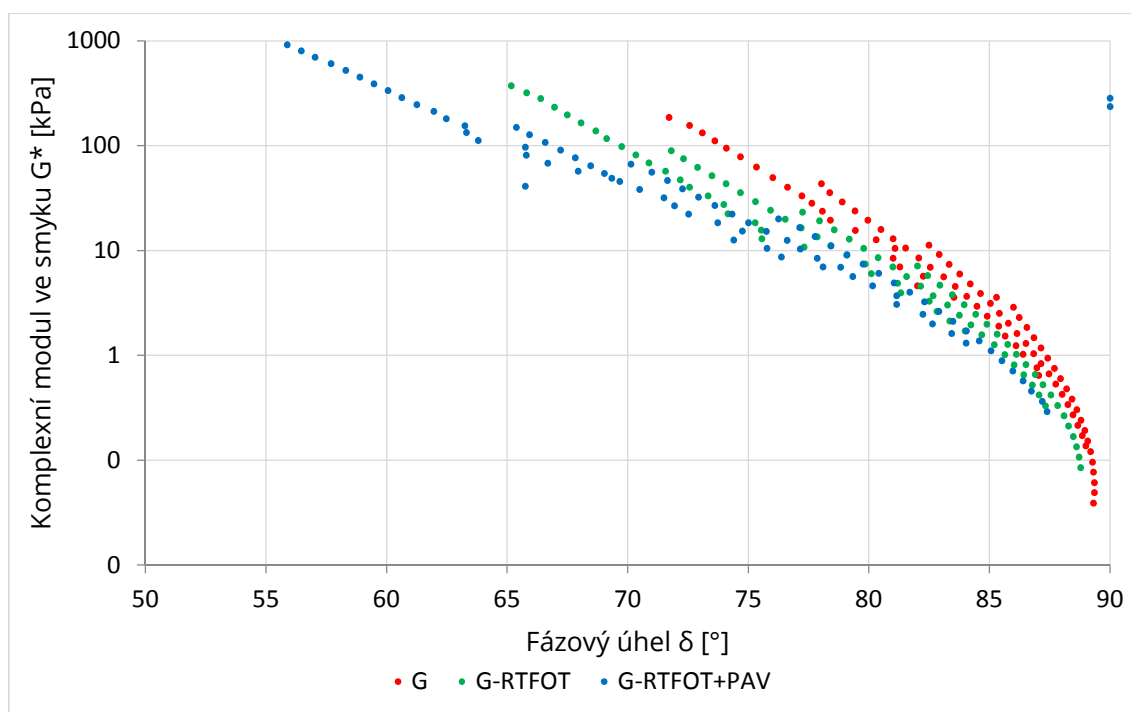
Příloha 12: Blackův diagram srovnávacího asfaltu PMB 25/55-60 (pojivo E) dle ČSN EN 14770



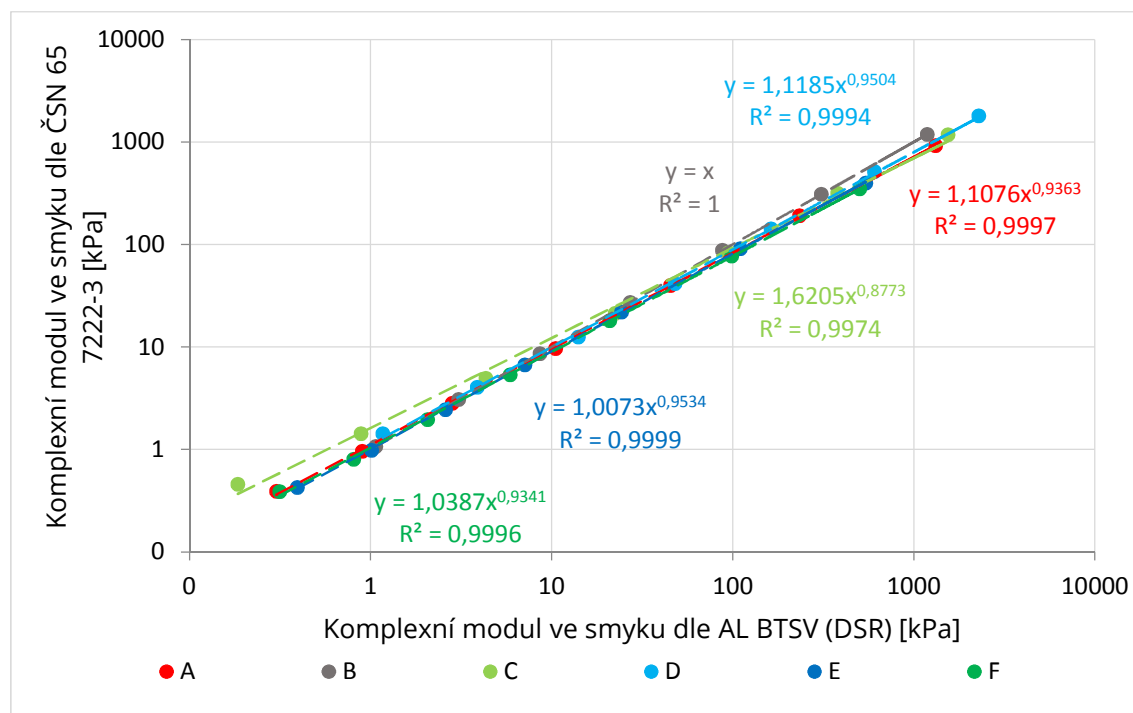
Příloha 13: Blackův diagram asfaltu PMB 25/55-60+0,5 % Evotherm (pojivo F) dle ČSN EN 14770



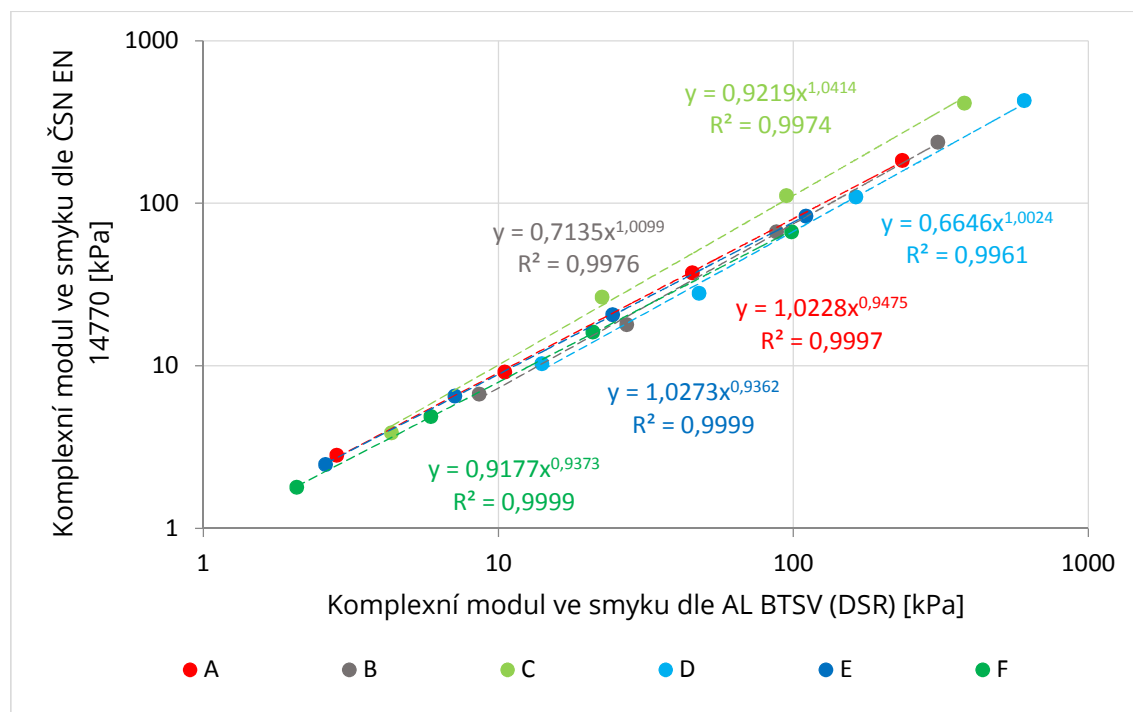
Příloha 14: Blackův diagram srovnávacího silničního asfaltu 50/70 (pojivo G) dle ČSN EN 14770



Příloha 15: Závislost komplexního modulu ve smyku dle ČSN 65 7222-3 na komplexním modulu ve smyku dle AL BTSV (DSR)



Příloha 16: Závislost komplexního modulu ve smyku dle ČSN EN 14770 na komplexním modulu ve smyku dle AL BTSV (DSR)



Příloha 17: Závislost komplexního modulu ve smyku dle ČSN EN 14770 na komplexním modulu ve smyku dle ČSN 65 7222-3

