



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

VYUŽITÍ FLUXAČNÍCH PŘÍRAD PRO ÚPRAVU VLASTNOSTÍ ASFALTOVÝCH POJIV

USE OF FLUXING ADDITIVES TO MODIFY THE PROPERTIES OF ASPHALT BINDERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Radka Šefránková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ONDŘEJ DAŠEK, Ph.D.

BRNO 2020



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. Radka Šefránková
Název	Využití fluxačních přísad pro úpravu vlastností asfaltových pojiv
Vedoucí práce	Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2019
Datum odevzdání	10. 1. 2020

V Brně dne 31. 3. 2019

doc. Dr. Ing. Michal Varaus
Vedoucí ústavu

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

PODKLADY A LITERATURA

Předané vzorky asfaltových pojiv a fluxačních přísad
Zkušební normy pro asfaltová pojiva
Literatura z internetu

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Cílem diplomové práce je popsat vliv různých fluxačních přísad na chování asfaltových pojiv především s důrazem na změnu reologických vlastností používaných k charakterizaci pojiv za běžných teplot a jejich stabilitu během stárnutí. Zvláštní zřetel bude věnován vlivu fluxačních přísad na nízkoteplotní vlastnosti pojiva. V rámci diplomové práce tak budou porovnány minimálně dva typy fluxačních přísad ve výchozím nemodifikovaném pojivu. Toto pojivo bude následně tvořit základ pro laboratorní přípravu modifikovaného asfaltu na bázi 4,0 % dotace polymeru SBS (Kraton 1101 nebo Calprene C 501).

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování 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

Předmětem diplomové práce je popsat vliv fluxačních přísad na chování asfaltových pojiv. Důraz bude kladen na změny reologických vlastností asfaltových pojiv za běžných teplot, na stabilitu během stárnutí a vliv fluxačních přísad na jejich nízkoteplotní vlastnosti. V teoretické části bude popsán princip stárnutí asfaltových pojiv a budou zde shrnuty poznatky o fluxačních přísadách. Dále zde budou popsány empirické a funkční zkoušky, které poslouží k hodnocení vlastností asfaltových pojiv. V praktické části budou všechny provedené laboratorní zkoušky vyhodnoceny a budou porovnány vlivy dvou odlišných fluxačních přísad.

KLÍČOVÁ SLOVA

Silniční asfalt, modifikovaný asfalt, asfaltové pojivo, stárnutí asfaltového pojiva, RTFOT, fluxační přísady, penetrace jehlou, bod měknutí, DSR, BBR, komplexní modul ve smyku, fázový úhel, dynamická viskozita, MSCR, kritická teplota, modul tuhosti za ohybu, skladovací stabilita

ABSTRACT

The subject of the thesis is to describe the effect of fluxing additives on the behaviour of asphalt binders. Emphasis will be placed on changes in rheological properties of asphalt binders at intermediate temperatures, stability during aging and influence of fluxing agents on their low-temperature properties. Theoretical part will deal with the principle of asphalt binders aging and it will summarize knowledge about fluxing additives. Further, empirical and functional tests will be described in order to evaluate asphalt binders. In the practical part, all laboratory tests will be evaluated and the effects of two different fluxing additives will be compared.

KEYWORDS

Paving bitumen, modified bitumen asphalt binder, aging of asphalt binder, RTFOT, fluxing additives, needle penetration, softening point, DSR, BBR, complex shear modulus, phase angle, dynamic viscosity, MSCR, critical temperature, creep stiffness, storage stability

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Radka Šefránková *Využití fluxačních přísad pro úpravu vlastností asfaltových pojiv*. Brno, 2020. 98 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Využití fluxačních přísad pro úpravu vlastností asfaltových pojiv* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 6. 1. 2020

Bc. Radka Šefránková
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Využití fluxačních přísad pro úpravu vlastností asfaltových pojiv* zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 6. 1. 2020

Bc. Radka Šefránková
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Chtěla bych poděkovat vedoucímu své diplomové práce Ing. Ondřeji Daškovi, Ph.D. a RNDr. Svatopluku Stokláškoví, za jejich pomoc, ochotu, čas a cenné rady, které mi poskytli během vypracování této diplomové práce. Dále bych ráda poděkovala všem pracovníkům silniční laboratoře Ústavu pozemních komunikací VUT v Brně za pomoc při práci v laboratoři. V neposlední řadě bych chtěla poděkovat své rodině a přátelům, za jejich podporu během celého studia.

OBSAH

1	ÚVOD	12
2	REŠERŠE LITERATURY	14
2.1.	Asfaltová pojiva	14
2.2.	Silniční asfalty	15
2.3.	Modifikované asfalty	16
2.4.	Stárnutí asfaltových pojiv	18
2.4.1.	Termooxidační stárnutí	18
2.4.2.	Destilační stárnutí	18
2.4.3.	Exudační stárnutí	19
2.4.4.	Strukturální stárnutí	19
2.5.	Simulace stárnutí asfaltových pojiv	19
2.5.1.	RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test)	20
2.5.2.	PAV (Pressure Ageing Vessel)	20
2.6.	Fluxační přísady	20
3	CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE	24
4	POUŽITÉ ZKUŠEBNÍ METODY	25
4.1.	Stanovení penetrace jehlou dle ČSN EN 1426	25
4.1.1.	Podstata zkoušky	25
4.1.2.	Přístroje a pomůcky	25
4.1.3.	Průběh zkoušky a její vyhodnocení	26
4.2.	Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička dle ČSN EN 1427	26
4.2.1.	Podstata zkoušky	26
4.2.2.	Přístroje a pomůcky	27
4.2.3.	Průběh zkoušky a její vyhodnocení	27

4.3. Stanovení dynamické viskozity modifikovaných asfaltů metodou kužel a deska dle ČSN EN 13702	28
4.3.1. Podstata zkoušky	28
4.3.2. Přístroje a pomůcky	29
4.3.3. Průběh zkoušky a její vyhodnocení.....	29
4.4. Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu – Dynamický smykový reometr (DSR) dle ČSN EN 14770	30
4.4.1. Podstata zkoušky	30
4.4.2. Přístroje a pomůcky	31
4.4.3. Průběh zkoušky a její vyhodnocení.....	31
4.5. Zkouška MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery Test) dle ČSN EN 16659.32	
4.5.1. Podstata zkoušky	32
4.5.2. Přístroje a pomůcky	33
4.5.3. Průběh zkoušky a její vyhodnocení.....	33
4.6. Stanovení bodu lámavosti podle Fraasse dle ČSN EN 12593	37
4.6.1. Podstata zkoušky	37
4.6.2. Přístroje a pomůcky	37
4.6.3. Průběh zkoušky a její vyhodnocení.....	38
4.7. Stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu – Část 1: Metoda RTFOT dle ČSN EN 12607-1	39
4.7.1. Podstata zkoušky	39
4.7.2. Přístroje a pomůcky	39
4.7.3. Průběh zkoušky a její vyhodnocení.....	40
4.8. Stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru (BBR) dle ČSN EN 14771	41
4.8.1. Podstata zkoušky	41

4.8.2. Přístroje a pomůcky	41
4.8.3. Průběh zkoušky a její vyhodnocení.....	42
4.9. Stanovení skladovací stability modifikovaných asfaltů dle ČSN EN 13399	44
4.9.1. Podstata zkoušky	44
4.9.2. Přístroje a pomůcky	44
4.9.3. Průběh zkoušky a její vyhodnocení.....	45
5 POUŽITÉ MATERIÁLY	46
5.1. Výroba modifikovaného asfaltu	47
5.2. Určení vhodného množství fluxačních přísad.....	49
5.2.1. Stanovení penetrace jehlou dle ČSN EN 1426	49
5.2.2. Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička dle ČSN EN 1427.....	50
5.2.3. Stanovení dynamické viskozity modifikovaných asfaltů metodou kužel a deska dle ČSN EN 13702	51
5.2.4. Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu – Dynamický smykový reometr (DSR) dle ČSN EN 14770.....	52
5.2.5. Zkouška MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery Test) dle ČSN EN 16659....	53
6 VÝSLEDKY ZKOUŠEK	55
6.1. Stanovení penetrace jehlou dle ČSN EN 1426	55
6.2. Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička dle ČSN EN 1427.....	56
6.3. Stanovení dynamické viskozity modifikovaných asfaltů metodou kužel a deska dle ČSN EN 13702	58
6.4. Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu – Dynamický smykový reometr (DSR) dle ČSN EN 14770	62
6.5. Zkouška MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery Test) dle ČSN EN 16659.	65
6.6. Stanovení bodu lámavosti podle Fraasse dle ČSN EN 12593	72
6.7. Změna hmotnosti vlivem tepla a vzduchu – Část 1: Metoda RTFOT dle ČSN EN 12607-1	73

6.8.	Stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru (BBR) dle ČSN EN 14771	74
6.9.	Stanovení skladovací stability modifikovaných asfaltů dle ČSN EN 13399	76
6.10.	Souhrnné výsledky laboratorních zkoušek	77
6.11.	Korelace výsledků	80
7	ZÁVĚR	89
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	91
9	SEZNAM OBRÁZKŮ	95
10	SEZNAM TABULEK	96
11	SEZNAM GRAFŮ	97

1 Úvod

Nejrozšířenějším druhem osobní dopravy u nás je silniční doprava. Stále rostoucí dopravní zatížení, především růst počtu nákladních vozidel, zvyšuje zatížení pozemních komunikací a vznik možných poruch. Z tohoto důvodu jsou kladeny větší nároky na chování a životnost vozovek. Přibližně 95 % celosvětové produkce asfaltu se každoročně využije v silničním odvětví. [1, 2]

Při výstavbě netuhých asfaltových vozovek se nejvíce uplatňuje asfaltová směs. Asfaltová směs je složena ze směsi kameniva a asfaltového pojiva. Jelikož je asfalt termoplastický materiál, jeho vlastnosti jsou závislé na teplotě. V letních měsících musí být zamezeno vyjíždění kolejí, a tedy vzniku trvalých deformací, v zimních měsících musí mít směs vhodné nízkoteplotních vlastnosti, aby nedocházelo k tvorbě mrazových trhlin. Zajistit, aby mez použitelnosti asfaltových pojiv byla co největší není tak jednoduché. [3]

V mnoha případech klasická silniční asfaltová pojiva nestačí a je potřeba aplikovat polymerem modifikované asfalty PMB, které se v České republice začaly masivně používat od devadesátých let minulého století. Modifikované asfalty vykazují lepší reologické vlastnosti, jsou schopné snášet větší zatížení, jsou odolnější vůči trvalým deformacím a zároveň se snižuje jejich teplotní citlivost. Vlastnosti PMB jsou ovlivněny výchozím pojivem a druhem a množstvím modifikační přísady. Rozhodující postavení mají pojiva na bázi termoplastických elastomerů. [3]

Klasická silniční asfaltová pojiva se mísí s kamenivem při vysokých teplotách okolo 165 °C, polymerem modifikovaná pojiva vyžadují teploty o něco vyšší, okolo 185 °C. Tyto vysoké pracovní teploty vykazují několik nevýhod, těmi jsou cena, bezpečnostní problémy a uvolňování výparů do ovzduší. Proto se používají organické sloučeniny, tzv. fluxy, které snižují viskozitu asfaltového pojiva. Tradiční fluxační přísady jsou nejčastěji petrochemického původu. Po rozprostření se tyto organické fluxační přísady částečně odpařují, čímž asfaltové pojivo získává svou počáteční viskozitu. Používání těchto organických fluxačních přísad nicméně může zvyšovat bezpečnostní rizika při práci, a to kvůli jejich relativně nízkému bodu vzplanutí a uvolňování organických sloučenin do atmosféry. [4]

V současné době se klade značný důraz na ochranu životního prostředí. Vznikají evropské směrnice, které požadují nahrazení těchto těkavých fluxačních přísad. Výzkumy se nyní soustředí na nový ekologicky šetrný substituent, tzv. rostlinné oleje. Bylo zjištěno, že tyto rostlinné oleje jsou velmi stabilní, a proto regenerace asfaltové viskozity po rozprostření

asfaltového pojiva nenastává jejich částečným odpařováním, ale tzv. zesítním fluxační přísady za přítomnosti kyslíku.

Fluxační přísady jsou tedy chemické látky, které se v určitém množství přidávají do asfaltových pojiv, přičemž jsou primárně určeny pro snížení dynamické viskozity asfaltových pojiv a pro zlepšení jejich zpracovatelnosti. Rostlinné fluxační přísady jsou šetrnější k životnímu prostředí, jsou to dobrá asfaltová rozpouštědla a mají vyšší bod vzplanutí než klasické organické fluxační přísady. [4]

2 Rešerše literatury

2.1. Asfaltová pojiva

Asfalt je jedním z materiálů, se kterým se setkáváme prakticky denně. Dopravní infrastruktura moderního světa je založena na asfaltu. Využívá se jako pojivo do asfaltových směsí, do prolévaných podkladních vrstev nebo pro výrobu asfaltových emulzí. [5, 6]

Asfaltové pojivo je koloidní směs vysoce molekulárních uhlovodíků, v které je zastoupeno až kolem tisíce různých sloučenin. Obsahuje pevné částice (asfaltény) a tekuté složky (ropné pryskyřice a nejtěžší ropné olejové podíly – označované jaké maltény). Asfaltové pojivo je označováno jako viskoelastický materiál a jeho nejdůležitější charakteristikou je jeho teplotní citlivost. U viskoelastického materiálu se část vložené mechanické energie využije při odlehčení tohoto materiálu, zbytek se disipuje. Za nízkých teplot se asfaltové pojivo chová jako pružná látka, za vysokých teplot jako kapalina, za normálních teplot má vlastnosti obou stavů. Rozmezí mezi teplotou bodu lámavosti a teplotou bodu měknutí se nazývá jako tzv. obor použitelnosti asfaltových pojiv. [7]



Obrázek 1: Přírodní asfaltové pojivo [10]

Základní zkoušky, které se používají pro charakterizaci asfaltů a jejich klasifikaci je zkouška penetrace jehlou, bod měknutí metodou kroužek a kulička, bod lámavosti podle Fraasse a viskozita. [8]

Asfaltové pojivo můžeme rozdělit podle jeho původu na přírodní a ropné asfalty.

Přírodní asfalty se dodnes těží na několika místech světa. Největším nalezištěm přírodních asfaltů je jezero Trinidad v Karibském moři. Detail tohoto přírodního asfaltu je zachycen na obrázku 1. V Evropě se s přírodním asfaltem můžeme setkat v Albánii (Selenica) nebo v okolí Mrtvého moře. Získává se zahřátím na 160 °C s následným prolitím přes síta, čímž se zachytí hrubé nečistoty. Aby mohl být používán jako pojivo do asfaltových směsí, musí být smíchán s měkkým silničním asfaltem. [7, 9]

Druhou skupinou jsou tzv ropné asfalty, které se získávají jako zbytek při atmosférické a vakuové destilaci z ropy v rafinériích. Odsolená ropa se dostává do atmosférické destilační kolony, kde se odstraní nejlehčí podíly. Další destilací se odděluje kerosin, benzín, petrolej a olej, zbytkem je mazut. Mazut se vede přes vakuovou destilační kolonu, kde se oddestilují za

podtlaku tři olejové frakce a zbytkem je asfalt, který je posledním produktem celého procesu. Vlastnosti takto získaných asfaltů je možné dále upravovat navazujícími procesy a technologiemi (oxidací, modifikací polymery, emulgováním, rozpouštěním atd). [7]

2.2. Silniční asfalty

Silniční asfalty jsou vyrobeny z destilačního zbytku vakuové destilace ropy a upravují se polofoukáním. Představují základní pojiva určená pro asfaltové směsi s kamenivem do hutněných vozovek pozemních komunikací. Asfaltové spodní vrstvy (podkladní a ložní) obsahují pojivo v množství obvykle 3,5 – 4,5 % hmotnosti asfaltové směsi, obrusné vrstvy většinou obsahují 5 – 6 % pojiva. V případě, že je potřeba zlepšit přilnavost ke kamenivu lze asfalty dodávat s přidavkem adhezní přísady. [11]

Silniční asfalty jsou označovány na základě výsledků měření penetrace jehlou, dle normy ČSN EN 1426 (např. asfalt třídy 70/100 – rozmezí od 70 do 100 penetračních jednotek). Penetrace je vyjádřena v desetinách milimetru (0,1 mm). [12]

Další norma, která se věnuje silničním asfaltům je norma ČSN EN 12591 Asfalty a asfaltová pojiva – Specifikace pro silniční asfalty. Jsou zde stanoveny požadavky na vlastnosti určitého asfaltu. Národní požadavky na vlastnosti silničních asfaltů jsou uvedeny v normě ČSN 65 7204 (viz tab. 1). V této diplomové práci bude používán silniční asfalt třídy 70/100. [13, 14]

Tabulka 1: Specifikace pro silniční asfalty podle ČSN EN 12591 [14]

Tabulka	Vlastnosti	Zkušební metoda	Jednotka	20/30	30/45	35/50	50/70	70/100	100/150	160/220
A	Penetrace při 25 °C	ČSN EN 1426	0,1 mm	20 až 30	30 až 45	35 až 50	50 až 70	70 až 100	100 až 150	160 až 220
	Bod měknutí	ČSN EN 1427	°C	55 až 63	52 až 60	50 až 58	46 až 54	43 až 51	39 až 47	35 až 43
	Odolnost proti stárnutí při 163 °C (RTFOT)	ČSN EN 12607-1								
	Změna hmotnosti		%	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,8	≤ 0,8	≤ 1,0
	Zbýlá penetrace	ČSN EN 1426	%	≥ 55	≥ 53	≥ 53	≥ 50	≥ 46	≥ 43	≥ 37
	Zvýšení bodu měknutí	ČSN EN 1427	°C	≤ 8	≤ 8	≤ 8	≤ 9	≤ 9	≤ 10	≤ 11
	Bod vzplanutí	ČSN EN ISO 2592	°C	≥ 240	≥ 240	≥ 240	≥ 230	≥ 230	≥ 230	≥ 220
	Rozpuštnost	ČSN EN 12592	%	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0
Bod lámavosti podle Fraasse	ČSN EN 12593	°C	≤ -3	≤ -5	≤ -5	≤ -8	≤ -10	≤ -12	≤ -15	
B	Dynamická viskozita při 135 °C	ČSN EN 13302	mPa·s	DV	DV	DV	DV	DV	DV	DV

DV = deklarovaná hodnota

2.3. Modifikované asfalty

Od roku 1990 došlo k ohromnému rozvoji automobilové dopravy a ke zvýšení počtu osobních i nákladních vozidel. Stále rostoucí zatížení silniční sítě zvyšuje nároky na chování vozovek, a tedy i na kvalitu asfaltů. Běžné silniční asfalty nestačí na toto vysoké dopravní zatížení, a proto jsou asfalty modifikovány aditivami. Mluvíme o tzv. modifikovaných asfaltech PMB (Polymer modified Bitumen), jejichž fyzikální a mechanické vlastnosti byly upraveny přísadou polymeru. [11]

V porovnání s běžnými silničními asfalty se u modifikovaných asfaltů zlepšují reologické vlastnosti, čímž dochází ke zvýšení odolnosti asfaltových směsí vůči trvalým deformacím – vyjždění kolejí a vůči tvorbě mrazových trhlin. Rozšiřuje se obor použitelnosti. Výrazně se také zlepšují únavové vlastnosti, a tím i trvanlivost vozovek. Dále se zlepšuje přilnavost asfaltu ke kamenivu, vlastnosti při nízkých teplotách a narůstá odolnost proti stárnutí. Důležitým předpokladem k dosažení požadovaných vlastností je správná volba základního asfaltu, druh a množství modifikátoru. [15]

Nejčastěji používanou modifikační přísadou jsou polymery, dalšími modifikátory mohou být přírodní kaučuky, pryžový granulát nebo latexy. [16]

Polymery lze rozdělit do dvou hlavních skupin:

- Termosetické polymery – pro modifikace se nepoužívají, protože při zahřátí tvrdnou
- Termoplastické polymery – zahřátím se stávají plastickými, vmíchávají se za vysokých teplot do asfaltů a vytváří vysoce viskózní směs. Rozhodující postavení mají termoplastické elastomery (kaučuk).

Termoplastický kaučuk je také zkráceně označován jako SBS (styren-butadien-styren) a používá se k úpravě asfaltů. Způsobuje primárně nárůst tažnosti a zvýšení teploty bodu měknutí. Při pokojové teplotě se chová jako elastomerní kaučuk, po zahřátí měkne a může být zpracován jako plast do různých tvarů. Do oblasti taveniny přechází zahřátím nad teplotu tání. Pátevní řetěz SBS se skládá ze tří segmentů: z dlouhého řetězce polystyrenu, polybutadienu a polystyrenu. Polystyren je tvrdý plast zajišťující trvanlivost SBS. Polybutadien se vyznačuje svými elastickými vlastnostmi. Nevýhodou elastomerů je jejich náchylnost k oddělování se od asfaltu. Tento problém se dá vyřešit například přidáním síry, která vytvoří tzv. sírné můstky a tím pojivo stabilizuje. [39, 40]

V dnešní době je nejrozšířenějším modifikátorem reaktivní elastomerní terpolymer (RET). Jedná se o termoplastický kaučuk, o tzn. kombinaci plastomeru a elastomeru. Chemicky etylen-glycidyl-akrylát. Jeho předností je schopnost zesíťovat strukturu modifikovaného asfaltového pojiva bez vzniku vedlejších škodlivých produktů. [11, 16]

Další technologií modifikace je modifikace asfaltu pryžovým granulátem (CRmB) vyrobeným drcením pneumatik. Díky této technologii dochází k využití pneumatik jako druhotné suroviny. V České republice byl první pokusný úsek s použitím pryžového granulátu realizován v roce 2007. Po přidání granulátu do asfaltu nastane bobtnání částic pryže a k prudkému růstu viskozity 5 až 50krát. Z tekutého pojiva se stává řídká kaše. Nevýhodou jsou vyšší počáteční náklady a vyšší náročnost při skladování. [17]

Polymerem modifikované asfalty se označují zkratkou PMB a klasifikují se podobně jako silniční asfalty, na základě penetrace a přidává se i minimální hodnota bodu měknutí, např. PMB 45/80-55 (rozsah penetrace je 45 – 80 penetračních jednotek, bod měknutí je minimálně 55 °C).

Norma, která specifikuje požadavky na polymerem modifikované asfalty je norma ČSN EN 14023 ZMĚNA Z1 Asfalty a asfaltová pojiva – Systém specifikace pro polymerem modifikované asfalty. Národní požadavky na vlastnosti polymerem modifikovaných asfaltů jsou uvedeny v normě ČSN 65 7222-1 (viz tab. 2). Jsou zde stanoveny požadavky na vlastnosti určitého asfaltu. [18, 19]

Tabulka 2: Specifikace polymerem modifikovaných asfaltů pro asfaltové směsi [19]

Vlastnost	jednotky	zkušební metoda	10/40-65	25/55-60	25/55-65	45/80-55	45/80-65	45/80-75	40/100-65
penetrace, 25 °C	0,1 mm	ČSN EN 1426	10-40	25-55	25-55	45-80	45-80	45-80	40-100
bod měknutí	°C	ČSN EN 1427	≥ 65	≥ 60	≥ 65	≥ 55	≥ 65	≥ 75 ^{b)}	≥ 65
silová duktilita teplota zkoušky ^{a)}	J/cm ² °C	ČSN EN 13589	≥ 1 15	≥ 2 10	≥ 3 10	≥ 1 5	≥ 3 5	≥ 3 5	≥ 3 5
bod lámavosti	°C	ČSN EN 12593	≤ -5	≤ -12	≤ -12	≤ -15	≤ -15	≤ -18	≤ -18
vratná duktilita, 25 °C	%	ČSN EN 13398	≥ 50	≥ 60	≥ 70	≥ 60	≥ 70	≥ 80	≥ 70
odolnost proti stárnutí RTFOT změna hmotnosti zbylá penetrace	%	ČSN EN 12607-1	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5
změna bodu měknutí	°C		≥ 60	≥ 60	≥ 60	≥ 60	≥ 60	≥ 60	≥ 60
vratná duktilita, 25 °C	%		-2/+8	-2/+8	-5/+10	-2/+8	-5/+10	-5/+10 ^{b)}	-5/+10
bod vzplanutí	°C	ČSN EN ISO 2592	≥ 235	≥ 235	≥ 235	≥ 235	≥ 235	≥ 235	≥ 235
skladovací stabilita rozdíl bodů měknutí	°C	ČSN EN 13399	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5

^{a)} Dojde-li k předčasnému přetržení, je dovoleno zvýšit zkušební teplotu o 5 °C.
^{b)} Zkouška bodu měknutí se provede v glycerinové lázni.

2.4. Stárnutí asfaltových pojiv

Asfalt je organická látka, která se skládá z rozmanitých uhlovodíkových sloučenin. Vlivem působení tepla, vzdušného kyslíku a ultrafialového elektromagnetického záření, nebo jejich kombinací může za určitých podmínek asfaltové pojivo podléhat degradaci. Změny vlastností v průběhu času, které jsou vyvolané těmito degradačními procesy se souhrnně označují jako stárnutí.

U materiálů předpokládáme, že se jejich vlastnosti nemění a zůstávají víceméně stále stejné po celou dobu jejich životnosti, u asfaltových pojiv to ale neplatí. Asfalty podléhají během skladování, výroby, transportu, pokládky asfaltové směsi a jejich užívání celé řadě změn, které zhoršují vlastnosti konstrukčních materiálů. Je to dáno vysokými teplotami při výrobě a vliv má i oxidační zemská atmosféra, která reaguje s molekulami kyslíku.

Stárnutí materiálu vede ke zvýšení komplexního modulu tuhosti, poklesu fázových úhlů, zvyšuje se gradace pojiva a jeho rezistence proti tvorbě trvalých deformací. Stoupá jeho schopnost přenášet zatížení. Stárnutí má ovšem i negativní dopady, a to na nízkoteplotní vlastnosti asfaltových pojiv: asfalt křehne, ztrácí flexibilitu, relaxační schopnosti a zvyšuje se jeho tendence ke vzniku trhlin. Bylo dokázáno, že modifikovaná pojiva mají vyšší odolnost proti stárnutí než nemodifikované asfalty. [20]

Změny vlastností asfaltových pojiv způsobují čtyři hlavní faktory:

- Termooxidační stárnutí
- Destilační stárnutí
- Exudační stárnutí
- Strukturální stárnutí

2.4.1. Termooxidační stárnutí

Podstatou termooxidačního stárnutí je především chemická reakce, která vede k zabudování kyslíkových atomů do organických uhlovodíkových molekul. Změny jsou vyvolány zvýšenou teplotou a vzdušným kyslíkem. Toto stárnutí způsobuje tvrdnutí a křehnutí asfaltových pojiv a může vést až ke vzniku trhlin za nízkých teplot. [20, 21]

2.4.2. Destilační stárnutí

Probíhá nejvíce při zpracování silničních asfaltů za horka a u asfaltů, které obsahují lehké olejovité podíly. Stárnutí odpařováním závisí na teplotě a okolních podmínkách. Odpařování

lehkých frakcí se zvyšuje s rostoucí teplotou, rostoucím povrchem a penetrací asfaltu. Penetrační asfalty by proto měly obsahovat jen nepatrný podíl nestabilních látek. [20, 21]

2.4.3. Exudační stárnutí

Obdobou destilačního stárnutí je tzv. exudační stárnutí neboli migrační procesy, které probíhají za normálních teplot a nižších rychlostí. Tento jev nastává, pokud je do asfaltového pojiva přidáno malé množství fluxačních olejů, nebo když nejsou při výrobě používány dostatečně výkonné destilační kolony, což způsobuje následné křehnutí asfaltů. Během migračních procesů se částice asfaltenu shlukují ve větší seskupení a asfaltové oleje vnikají do kameniva. Při tomto procesu ztrácí asfaltové pojivo plasticitu, elasticitu a křehne. Vzniká hrubá disperze a vícefázový systém. [20, 21]

2.4.4. Strukturální stárnutí

Vzniká, pokud je asfaltové pojivo vystaveno nízkým nebo pokojovým teplotám po delší dobu. Během tohoto procesu nedochází k chemickým změnám v materiálu, ale k reorganizaci a zafixování prostorového uspořádání molekul. Strukturální stárnutí vede zdánlivě ke zvýšení tuhosti pojiva, důvodem je ovšem jeho tepelná historie. [20, 21]

2.5. Simulace stárnutí asfaltových pojiv

Abychom zjistili, jak se asfalty chovají během své životnosti, byly zavedeny laboratorní zkoušky simulující stárnutí.

Stárnutí lze rozdělit do dvou skupin:

- Testy krátkodobého stárnutí (RTFOT, TFOT, RFT)
- Testy dlouhodobého stárnutí (PAV, RCAT, LTRFT, 3xRTFOT)

V praxi se používají převážně dvě základní metody: RTFOT pro krátkodobé stárnutí, které simuluje stárnutí při míchání na obalovně, během dopravy a následné pokládky a PAV pro dlouhodobé stárnutí, které simuluje stav asfaltového materiálu během své životnosti ve vozovce. [20, 21]

V této diplomové práci byla použita metoda krátkodobého stárnutí RTFOT.

2.5.1. RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test)

RTFOT je laboratorní metoda simulující krátkodobé stárnutí, která je popsána v normě ČSN EN 12607-1. Napodobuje procesy stárnutí asfaltového pojiva během výroby, transportu a pokládky asfaltové směsi. Přístroj pro měření RTFOT je na obrázku 2. Zkouška probíhá za přísunu tepla a vzduchu, působící na tenké pohyblivé se vrstvě asfaltového pojiva, projevuje se termooxidační stárnutí. Porovnáním hmotnostních změn před a po aplikaci RTFOT je možné identifikovat převládající chemické procesy: štěpení a destilace (úbytek hmotnosti) nebo oxidační zabudování kyslíku do organických uhlovodíkových molekul (přírůstek hmotnosti). Průběh zkoušky RTFOT bude popsán v kapitole 4.7. [20, 21]



Obrázek 2: Přístroj pro měření RTFOT [22]

2.5.2. PAV (Pressure Ageing Vessel)

PAV je metoda dlouhodobého stárnutí, která napodobuje změny v pojivu, ke kterým dochází během provozu vozovky. Podstatou metody, která je popsána v normě ČSN EN 14769 je zahřívání tenké nepohyblivé vrstvy pojiva při určité teplotě a tlaku vzduchu po danou dobu v tlakové nádobě (viz obr. 3). Nádoba se natlakuje vzduchem $2,1 \text{ MPa} \pm 0,1 \text{ MPa}$. Typická doba stárnutí pro zkušební teploty $90 \text{ }^\circ\text{C}$, $100 \text{ }^\circ\text{C}$ a $110 \text{ }^\circ\text{C}$ je $20 \text{ h} \pm 10 \text{ min}$, pro teplotu $85 \text{ }^\circ\text{C}$ je to $65 \text{ h} \pm 30 \text{ min}$. Podstatné je, že tomuto stárnutí předchází stárnutí RTFOT, kdy byl výchozí vzorek již termooxidačně zatížen. [20, 21]



Obrázek 3: Přístroj pro měření PAV [23]

2.6. Fluxační přísady

Odhaduje se, že více než 90 % z 5,2 milionů kilometrů evropských silnic a dálnic je pokryto asfaltem. Asfaltová směs, která tvoří obrusnou vrstvu vozovek, je složena z kameniva a asfaltového pojiva. Náklady potřebné na výstavbu těchto typů silnic rok od roku rostou. Asfalt se vyrábí převážně ze surové ropy, a protože se jedná o neobnovitelný zdroj, který se jednoho

dne vyčerpá, jeho cena stále roste. Také samotná těžba ropy s sebou nese vysokou spotřebu energie a znečištění ovzduší. [24]

V současné době svět čelí vážné hrozbě globálního oteplování a v důsledku toho jsou zavedeny přísnější požadavky na ochranu životního prostředí. Každý kilometr silnice pokrývá značné rozlohy půdy a během výstavby se spotřebovává velké množství materiálů a energie. Aby se snížil dopad výstavby silnic na životní prostředí, směřuje odvětví dopravy k přijímání udržitelnějších zdrojů do výstavby silniční infrastruktury. [24]

Snahy vedou k úplnému nebo částečnému nahrazení asfaltového pojiva bio materiály, tzv. fluxačními bio oleji, získanými z různých průmyslových procesů nebo odpadními materiály. Vývoj nových materiálů a technologií aplikovaných ve výrobním cyklu asfaltových směsí je řešením, které zlepšuje udržitelnost, hospodárnost, redukuje uhlíkovou stopu a využívá odpadní materiály, které by v opačném případě skončily na skládce. [25]

Aby byly fluxační oleje vhodné pro použití do asfaltových pojiv, musí splňovat několik požadavků: [25]

- nesmí představovat další rizika pro zdraví a bezpečnost pracovníků ani pro životní prostředí
- měly by zlepšovat vlastnosti asfaltových pojiv a být cenově přijatelné
- během skladování nesmí docházet k separaci olejů od asfaltového pojiva nebo chemickým změnám
- musí být zajištěna vhodná přilnavost ke kamenivu
- měly by být dostupné ve velkém množství a měly by se využívat místní zdroje fluxačních olejů
- musí být recyklovatelné na konci své životnosti
- je důležité zvolit vhodné množství fluxačního oleje v asfaltovém pojivu a zkoumat jejich vlastnosti, zejména s ohledem na klima, ve kterém se tato technologie používá

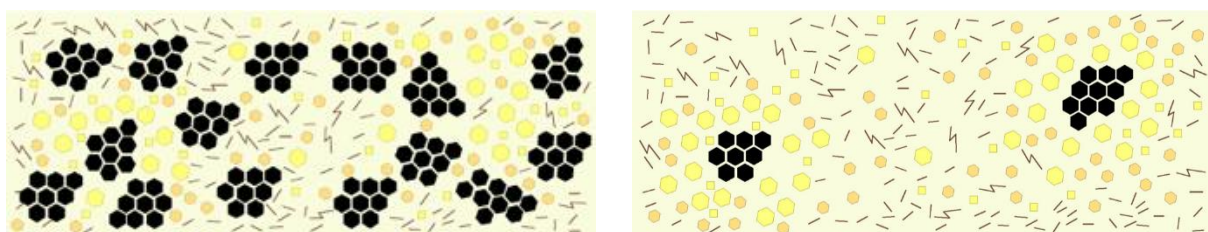
Přehled některých bio-olejů dosud zkoušených v asfaltovém pojivu: [25]

- bio oleje ze dřeva
- odpadní oleje na vaření
- rostlinné bio oleje (řepkový olej, slunečnicový olej, sojový olej, lněný olej)
- živočišné bio oleje

Tyto bio oleje se dají rozdělit do dvou kategorií:

- fluxační přísady – změkčovadla, jež mají za úkol snížit pouze viskozitu pojiva.
- rejuvenátory – rejuvenační přísady, jejichž cílem je obnovit chemickou strukturu pojiva a přerušit proces shlukování asfalténů. [26]

Rozdíl mezi účinkem fluxačních (změkčujících) přísad a účinkem rejuvenátoru lze vidět na obrázku 4. Vlevo je vidět, že po přidání fluxačních olejů nedojde k rozptýlení shluků asfalténů v asfaltovém pojivu, ale dojde pouze k zředění malténové fáze a tím ke snížení viskozity pojiva. Naopak vpravo je vidět struktura pojiva po úspěšném oživení (rejuvenaci), kdy je proces shlukování asfalténů úspěšně přerušen. [26]



Obrázek 4: Rozdíl mezi působením fluxační a rejuvenační přísady [26]

V současné době se míchání silničních asfaltů s kamenivem provádí při teplotě 165 °C, u polymerem modifikovaných asfaltů je požadovaná teplota okolo 185 °C. Vysoké teploty se používají pro snížení viskozity. Jak již bylo zmíněno v předchozím odstavci, fluxační přísady snižují viskozitu pojiva, a proto nejsou tak vysoké pracovní teploty potřebné. [4]

Laboratorními pokusy bylo zjištěno, že fluxační přísady kromě viskozity také snižují hodnotu komplexního modulu ve smyku a zvyšují hodnotu fázového úhlu, bez ohledu na typu nebo množství přísady. Dále zvyšují penetraci jehlou a snižují bod měknutí. Na jednu stranu zlepšují odolnost proti únavě a nízkoteplotní vlastnosti, na druhou stranu ale negativně ovlivňují vznik trvalých deformací a tedy tzv. vyjíždění kolejí za vysokých teplot. Možným řešením negativního vlivu na vysokoteplotní vlastnosti je použití tvrdšího silničního asfaltu nebo u polymerem modifikovaných asfaltů nahradit polymer SBS jiným bio polymerem (např. lignin), který upravuje elastické chování pojiva. [4, 25]

Dalším řešením je použití řepkového oleje. Tento rostlinný olej snižuje viskozitu asfaltového pojiva a následuje pomalý proces polymerizace, díky kterému se částečně navrácí viskozita asfaltového pojiva tzv. zesítním fluxační přísady za přítomnosti kyslíku. Tímto způsobem je zlepšena zpracovatelnost směsi během pokládky a není negativně ovlivněn vznik trvalých deformací během životnosti vozovky. [25]

Je zřejmé, že použití obnovitelných materiálů v asfaltových pojivech a směsích má významné environmentální a ekonomické přínosy. V současné době můžeme najít jen velmi málo informací o využití fluxačních přísad, a proto je potřeba se tomuto tématu více věnovat.

3 Cíl diplomové práce

Hlavním cílem diplomové práce bude získat zkušenosti a nové poznatky s použitím a chováním fluxačních přísad. V silničním stavitelství neexistuje mnoho informací o využití těchto přísad a je možné tvrdit, že se jedná o dosud nedostatečně popsanou problematiku.

V diplomové práci budou použity dvě různé fluxační přísady, které se přimíchají do silničního asfaltu gradace 70/100 a také do polymerem modifikovaného asfaltu, který bude vyroben v laboratoři z výchozího silničního asfaltu gradace 70/100 přidáním 3,8 % SBS. Přiměřené množství těchto dvou rozdílných fluxačních přísad bude ověřeno vstupním pokusem, při kterém se využije asfalt z výroby s dávkováním 2 % a 4 % fluxačních přísad a bude sledován vliv přídavku fluxační přísady na změnu výsledků provedených zkoušek.

Na asfaltových pojivech (silniční a polymerem modifikovaný asfalt) se bude zjišťovat, jak přidání fluxační přísady ovlivňuje jejich reologické chování, jaký mají fluxační přísady vliv na stárnutí asfaltových pojiv a jejich skladovací stabilitu. Dále se vybraná pojiva nechají zestárnout působením tepla a vzduchu metodou krátkodobého stárnutí RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) dle ČSN EN 12607-1 a budou porovnány jejich vlastnosti před a po stárnutí. Pozornost bude věnována i vlivu fluxačních přísad na nízkoteplotní vlastnosti.

Výčet všech zkušebních metod, které budou obsahem diplomové práce je následující:

- 1) Stanovení penetrace jehlou dle ČSN EN 1426
- 2) Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička dle ČSN EN 1427
- 3) Stanovení dynamické viskozity modifikovaných asfaltů metodou kužel a deska dle ČSN EN 13702
- 4) Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu – Dynamický smykový reometr (DSR) dle ČSN EN 14770
- 5) Zkouška MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery Test) dle ČSN EN 16659
- 6) Stanovení bodu lámavosti podle Fraasse dle ČSN EN 12593
- 7) Stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu – Část 1: Metoda RTFOT dle ČSN EN 12607-1
- 8) Stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru (BBR) dle ČSN EN 14771
- 9) Stanovení skladovací stability modifikovaných asfaltů dle ČSN EN 13399

4 Použité zkušební metody

4.1. Stanovení penetrace jehlou dle ČSN EN 1426

4.1.1. Podstata zkoušky

Tato zkouška je popsána v normě ČSN EN 1426 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou. Podstatou metody je stanovení průniku normalizované jehly do vzorku asfaltového pojiva za předepsaných podmínek. Vzorek asfaltového pojiva musí být vytemperován na teplotu 25 °C a zatěžován zkušební jehlou po dobu 5 s zatížením o velikosti 100 g. Na každém vzorku jsou provedena vždy 3 měření vpichu jehly. Výsledkem je jejich aritmetický průměr, který je vyjádřen v penetračních jednotkách (1 penetrační jednotka = 0,1 mm) zaokrouhlených na nejbližší celé číslo. Na základě penetrace jsme schopni asfaltová pojiva správně zařadit.

4.1.2. Přístroje a pomůcky

- Penetrometr (viz obr. 5) – přístroj pro měření penetrace, který je opatřen držákem jehly a podstavcem pro umístění přenosné misky, ve které je kelímek se zkušebním vzorkem.
- Penetrační jehla – vyrobená z plně tvrzené, popouštěné a leštěné oceli. Tělo jehly má průměr 1,00 mm až 1,02 mm. Konec jehly, který vniká do vzorku asfaltového pojiva je symetricky zkosený do kužele.
- Kelímek na zkušební vzorek – kovová nebo válcová nádoba s plochým dnem, do které se nalije asfaltové pojivo. Hloubka nádoby musí být nejméně o 10 mm větší než předpokládaná penetrace. Vnitřní průměr se smí pohybovat od 55 mm do 70 mm.
- Vodní lázeň – lázeň s konstantní teplotou 25 °C ± 0,15 °C, která slouží k temperaci asfaltového pojiva.
- Přenosná miska – používá se pro zkoušku mimo vodní lázeň. Do misky se umístí kelímek se zkušebním vzorkem. Miska musí být dostatečně hluboká, aby byl vzorek zcela ponořen ve vodě.
- Baterka – slouží pro nasvícení vzorku a správného nastavení hrotu jehly na jeho povrchu.



Obrázek 5:
Penetrometr

4.1.3. Průběh zkoušky a její vyhodnocení

Vzorek se v laboratorní sušárně nechá ohřát na požadovanou teplotu, tj. ne více než 100 °C nad předpokládaným bodem měknutí. Připraví se kelímky a ty se naplní rozehrátými vzorky do takové výšky, aby tato výška byla nejméně o 10 mm větší než hloubka průniku jehly. Naplněné kelímky se volně přikryjí a nechají vychladnout. Poté se umístí do vodní lázně a nechají se temperovat na teplotu 25 °C ± 0,15 °C. Po vytemperování se kelímek se zkušebním vzorkem umístí do přenosné misky, ve které je zcela ponořen ve vodě, a položí na podstavec penetrometru. Do přístroje se upevní jehla a nastaví se nulová hodnota měření. Podstavec penetrometru musí být v takové výšce, aby se hrot jehly právě dotýkal svého odrazu na povrchu vzorku, k tomuto nastavení poslouží baterka.

Pokud je vše správně nastaveno spustí se měření a jehla proniká do vzorku po dobu 5 s. Na stupnici se odečte hodnota hloubky vpichu tzn. penetrace. Tento postup se provede minimálně třikrát pro každý vzorek asfaltového pojiva. Důležité je, aby jednotlivé vpichy byly vzdáleny nejméně 10 mm od stran kelímku a nejméně 10 mm od sebe.

U zkoušek, které se provádí za podmínek 25 °C, 100 g a 5 s se třemi stanoveními, jsou výsledky akceptovatelné, pokud rozsah stanovených hodnot nepřekročí hodnoty uvedené v tabulce 3 (viz norma ČSN EN 1426). Výsledkem je jejich aritmetický průměr, který je vyjádřen v penetračních jednotkách (1 penetrační jednotka = 0,1 mm) zaokrouhlených na nejbližší celé číslo. [12]

Tabulka 3: Maximální rozdíl platných stanovení [12]

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

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

4.2.1. Podstata zkoušky

Tato zkouška je popsána v normě ČSN EN 1427 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička. Dva kotoučky z asfaltového pojiva se osadí do přístroje a na každém z nich se umístí ocelová kulička. Předepsanou rychlostí se začne ohřívat kapalná lázeň do doby, než kuličky propadnou změkklým asfaltovým pojivem o vzdálenost (25,0 ± 0,4) mm. Tyto dvě teploty se zaznamenají. Výsledkem je průměrná hodnota těchto teplot, tedy bod měknutí.

4.2.2. Přístroje a pomůcky

- 2 mosazné kroužky
- Odlévací destička
- Dvě ocelové korozivzdorné kuličky
- Středící prstenec na kuličky
- Držák kroužků a sestava
- Kádinka
- Lázeň (vodní lázeň nebo glycerin)
- Zařízení na měření teploty
- Míchadlo
- Automatické zařízení



Obrázek 6: Seřiznuté odlitky asfaltového pojiva pro stanovení bodu měknutí

4.2.3. Průběh zkoušky a její vyhodnocení

Dva mosazné kroužky se zahřejí na teplotu ne vyšší než 100 °C nad předpokládaný bod měknutí a umístí se na odlévací destičku, která je v tenké vrstvičce pokrytá separačním prostředkem. Do každého z kroužků se nalije mírný přebytek asfaltového pojiva a vzorky se nechají zchladit při laboratorní teplotě nejméně 30 minut. Po vychladnutí vzorků se nadbytečné asfaltové pojivo seřizne horkou špachtlí, aby byl povrch vzorku zarovnan s okrajem kroužku, což lze vidět na obrázku 6. Zvolí se kapalinová lázeň. Pokud je předpokládaný bod měknutím mezi 28 °C a 80 °C použije se převařená, ochlazená destilovaná voda. Pokud je bod měknutím nad 80 °C a do 150 °C použije se glycerín. Závislost teploty na kapalinové lázni je zaznamenána v tabulce 4. Připravené kroužky se umístí do otvorů držáku a osadí středícími prstenci. Držák se umístí do kádinky se zvolenou kapalinou a míchadlem a vloží se do chladicího zařízení po dobu 15 minut, aby se dosáhla správná počáteční teplota. Po 15 minutách se kádinka s celou sestavou umístí do zkušebního přístroje a pomocí kleští se do středících prstenců umístí 2 ocelové kuličky. Do kapaliny se vloží teploměr.

Spustí se měřicí zařízení (viz obr. 7) a míchadlo začne rovnoměrně ohřívat kapalinu rychlostí 5 °C/min. Vlivem vzrůstu teploty asfaltové pojivo měkne a pod tíhou kuliček se pomalu deformuje a propadá. Zkouška končí, když kulička obalená asfaltovým pojivem protáhne pojivo o velikosti $(25,0 \pm 0,4)$ mm. Přístroj automaticky zaznamená teploty, při kterých kuličky propadly a vypočítá se jejich aritmetický průměr. Tato výsledná zprůměrovaná teplota je tzv. bod měknutí. Pro bod měknutí do 80 °C nesmí být rozdíl mezi teplotami větší než 1 °C, pro bod měknutí nad 80 °C nesmí být rozdíl mezi teplotami větší než 2 °C, jinak se musí zkouška opakovat. [27]

Tabulka 4: Závislost teploty na kapalinové lázni [27]

	Teplota bodu měknutí do 80 °C	Teplota bodu měknutí nad 80 °C
Kapalinová lázeň	destilovaná voda	glycerín
Maximální rozdíl mezi teplotami, aby se zkouška nemusela opakovat	1 °C	2 °C
Zaokrouhlení průměru teplot na:	nejbližší 0,2 °C	nejbližší 0,5 °C



Obrázek 7: Probíhající zkouška Kroužek a kulička

4.3. Stanovení dynamické viskozity modifikovaných asfaltů metodou kužel a deska dle ČSN EN 13702

4.3.1. Podstata zkoušky

Tato zkouška je popsána v normě ČSN EN 13702 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení dynamické viskozity modifikovaných asfaltů metodou kužel a deska. Podstatou měření je zjistit viskozitu zkoušeného vzorku, tedy míru odporu vzorku proti vnesenému smykovému napětí při zvolené smykové rychlosti. Získáme tak relativní odpor geometrie (kužele o průměru 40 mm) k otáčení. Měření se provádí při 135 °C, tato teplota se považuje jako vhodný reprezentant pro určení úrovně zpracovatelnosti daného vzorku.

4.3.2. Přístroje a pomůcky

- Podložka z nepřilnavého materiálu – slouží pro rozlívání vzorků asfaltového pojiva. Musí být ze silikonu nebo obdobného materiálu, který nepřilne ke zkušebnímu vzorku.
- Špachtle k oříznutí stlačeného vzorku
- Dynamický smykový reometr (DSR) (viz obr. 8) – přístroj pro měření reologických vlastností asfaltů
- Kompresor a chladicí zařízení (součástí DSR)
- Zkušební geometrie kužel – deska (kužel o průměru 40 mm a úhlu stoupání 4 °)
- Počítač se softwarem



Obrázek 8: Dynamický smykový reometr (DSR)

4.3.3. Průběh zkoušky a její vyhodnocení

Nejprve se do nepřilnavých silikonových podložek rozlijí vzorky asfaltového pojiva (viz. obr. 9) a nechají se zchladnout na laboratorní teplotu.



Obrázek 9: Vzorky pro měření v DSR

Zapne se počítač a dynamický smykový reometr (DSR). K měření viskozity se do přístroje osadí vhodná geometrie kužel – deska. Geometrie se nahřeje na zkušební teplotu a poté se vzorek umístí do přístroje na nahřátou pevnou podložku. Horní část (kužel) se spustí do požadované polohy a stlačí vzorek. Vytlačené pojivo se seřízne horkou špachtlí.

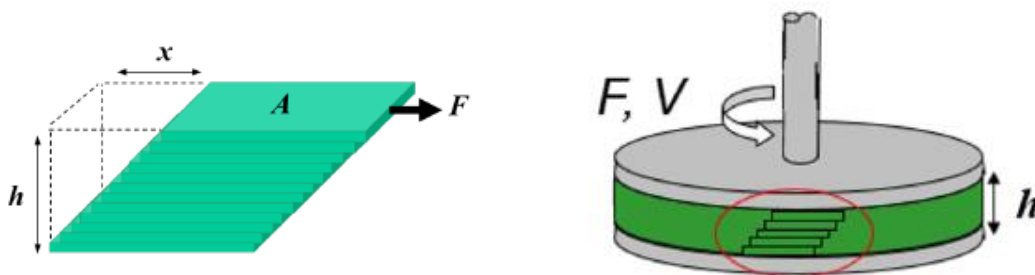
Započne se zkouška, teplota měření je nastavena na 135 °C. Během měření se kužel otáčí a měří se odpor vloženého asfaltového vzorku proti tomuto smykovému pohybu (viz obr. 10).

DSR je propojen s počítačem a naměřené hodnoty se zaznamenávají do programu R-space. Je možné si nastavit přesné hodnoty smykové rychlosti (v mém případě 6,8 s⁻¹ a 18,6 s⁻¹) nebo smykovou rychlost postupně zvyšovat a sledovat výslednou dynamickou viskozitu. [28]

Viskozita je odvozena z této rovnice:

$$\eta = \sigma / \dot{\gamma} \text{ [mPa.s]}$$

$\sigma = F/A$	smykové napětí [Pa]
$\dot{\gamma} = dy/dt$	smyková rychlost [s ⁻¹]
η	dynamická viskozita [mPa.s]



Obrázek 10: Profil toku v asfaltovém vzorku mezi nepohyblivou deskou a pohybujícím se kuželem [29]

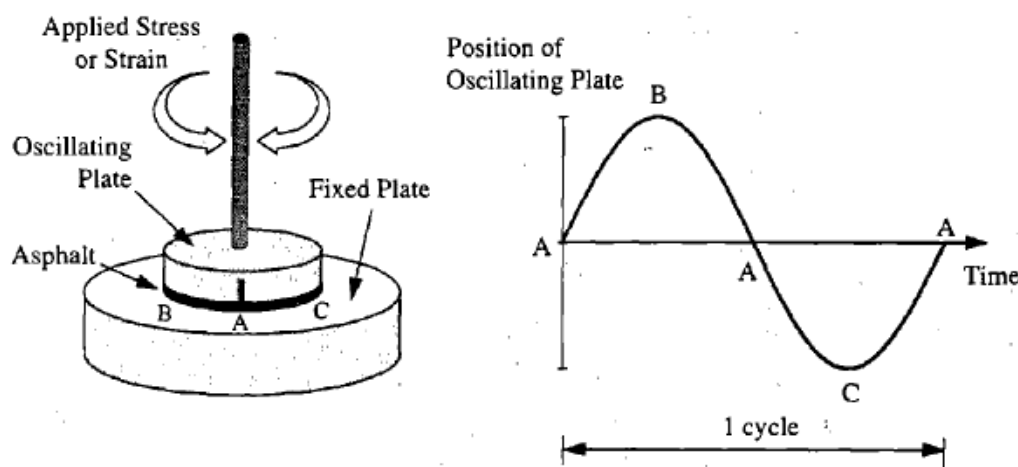
4.4. Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu – Dynamický smykový reometr (DSR) dle ČSN EN 14770

4.4.1. Podstata zkoušky

Tato zkouška je popsána v normě ČSN EN 14770 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu – Dynamický smykový reometr (DSR). DSR se používá pro měření reologických vlastností asfaltových pojiv. V této normě je popsána oscilace ve smyku, což je metoda měření, která umožňuje stanovení komplexního smykového modulu G^* a fázového úhlu δ .

Mezi dvě destičky dynamického smykového reometru se umístí vzorek asfaltového pojiva.

Spodní destička je pevná a horní destička je pohyblivá a vytváří oscilující smykové napětí (viz obr.11), které odpovídá zatěžování vozovky. Měří se odezva deformace pojiva na působící napětí.



Obrázek 11: Oscilující smykové napětí [30]

4.4.2. Přístroje a pomůcky

- Podložka z nepřilnavého materiálu – slouží pro rozlití vzorků asfaltového pojiva. Musí být ze silikonu nebo obdobného materiálu, který nepřilne ke zkušebnímu vzorku.
- Špachtle k oříznutí stlačeného vzorku
- Dynamický smykový reometr (DSR) – přístroj pro měření reologických vlastností asfaltů
- Kompresor a chladicí zařízení (součástí DSR)
- Zkušební geometrie deska – deska o průměru 25 mm s nastavením mezery 1 mm
- Počítač se softwarem

4.4.3. Průběh zkoušky a její vyhodnocení

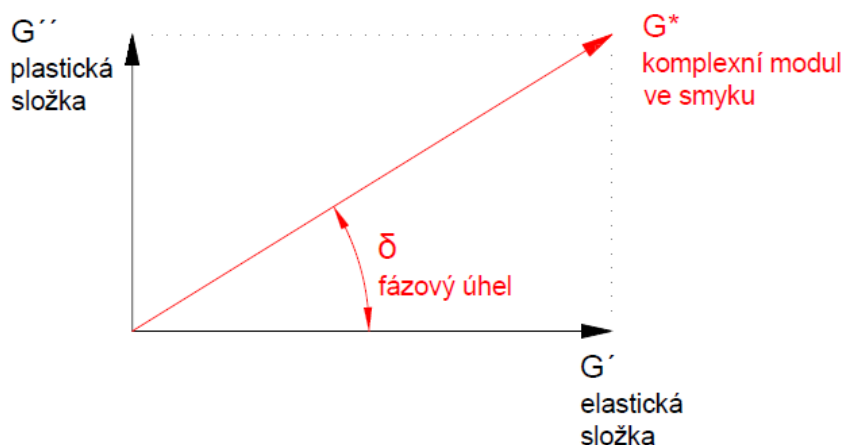
Nejprve se do nepřilnavých silikonových podložek rozlijí vzorky asfaltového pojiva viz. obr. 9 a nechají se zchladnout na laboratorní teplotu.

Zapne se počítač a dynamický smykový reometr (DSR). K měření oscilace se vybere správná měřící geometrie deska – deska. Průměr desky je 25 mm. Geometrie se nahřeje na zkušební teplotu a poté se vzorek umístí do přístroje na nahřátou pevnou podložku. Horní část (pohyblivá deska) se spustí do požadované polohy a stlačí vzorek. Přebytek vytlačeného pojiva se seřízne horkou špachtlí.

Započne se zkouška, zvolí se zkušební teplota vhodná pro zkoušené pojivo v intervalu od 25 °C do 85 °C. V této diplomové práci byla zvolena zkušební teplota 60 °C. Zkouška probíhá při frekvenci v rozsahu 0,1 Hz až 10,0 Hz v rámci lineárně viskoelastické oblasti. Během měření horní pohyblivá deska

osciluje a měří se odpor vloženého asfaltového vzorku proti tomuto smykovému pohybu. DSR je propojen s počítačem a naměřené hodnoty se zaznamenávají do programu R-space.

Oscilačním měřením se získá hodnota komplexního modulu ve smyku G^* a fázového úhlu δ . Komplexní modul ve smyku G^* vyjadřuje odpor asfaltového pojiva proti deformaci, které je vystaveno opakovaným pulzům smykového napětí. Skládá se ze dvou složek: elastické G' a plastické (tzv. ztrátový modul) G'' (viz obr. 12). Fázový úhel δ určuje vzájemný poměr elastického a plastického chování. U viskoelastických látek se fázový úhel pohybuje mezi 0° a 90° . Pokud se fázový úhel δ blíží k 0° , převládá elastická složka a materiál má tendenci se navracet do svého původního tvaru. Pokud se však fázový úhel δ blíží k 90° , převládá plastická složka, při zatížení se energie disipuje a materiál zůstává deformován. [31]



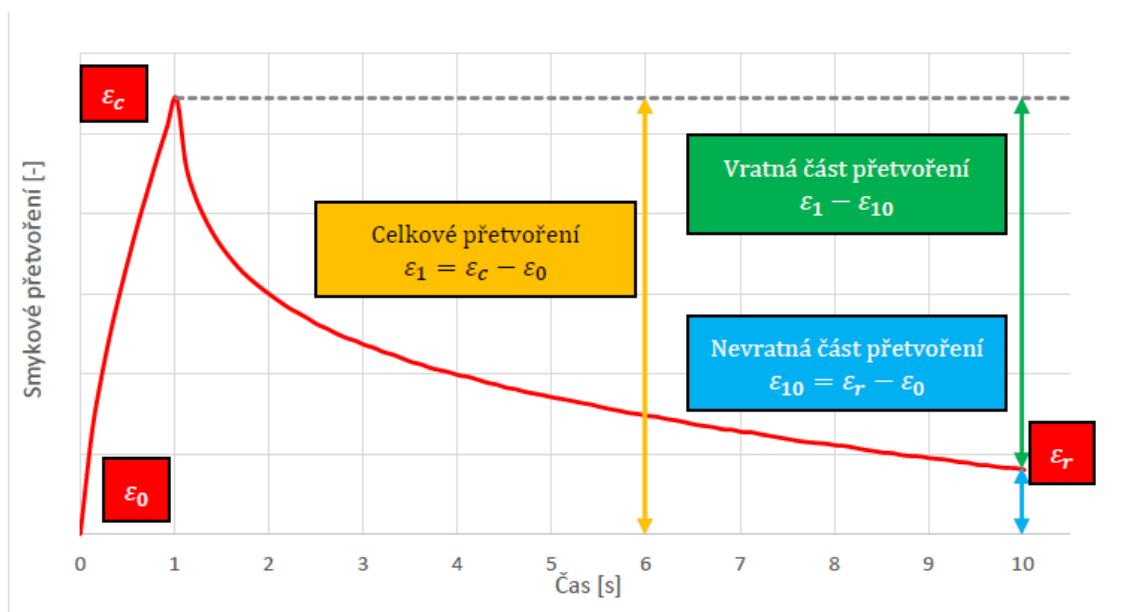
Obrázek 12: Složky komplexního smykového modulu

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

4.5.1. Podstata zkoušky

Norma ČSN EN 16659 popisuje zkoušku MSCR, která se zabývá stanovením procentuálního zotavení a nevratné smykové poddajnosti asfaltů a asfaltových pojiv. Veličina procentuální zotavení R [%] při opakovaném zatížení má stanovit přítomnost elastické odezvy. Veličina nevratná smyková poddajnost J_{nr} při opakovaném zatížení je indikátor citlivosti vůči vzniku trvalých plastických deformací.

Zkouška se provádí v DSR a je rozdělena do tří částí. V první části se vzorek zatěžuje konstantním smykovým napětím 0,1 kPa, během druhé 3,2 kPa a ve třetí části je hodnota napětí 10 kPa. Každá část obsahuje 10 cyklů. Jeden cyklus trvá 10 s a během něho je vzorek zatěžován konstantním smykovým napětím po dobu 1 s a poté je 9 s umožněno jeho dotvarování (viz obr. 13). Zkoušky se provádějí při vhodně zvolené teplotě (50 °C, 60 °C, 70 °C nebo 80 °C). Pro srovnávací účely mohou být použity i jiné zkušební teploty.



Obrázek 13: Průběh přetvoření [21]

4.5.2. Přístroje a pomůcky

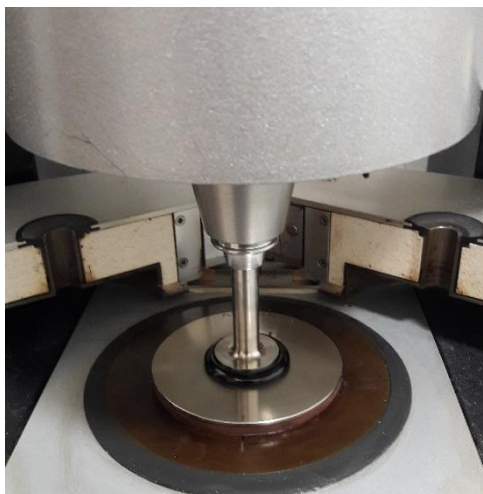
- Podložka z nepřilnavého materiálu – slouží pro rozlití vzorků asfaltového pojiva. Musí být ze silikonu nebo obdobného materiálu, který nepřilne ke zkušebnímu vzorku.
- Špachtle k oříznutí stlačeného vzorku
- Dynamický smykový reometr (DSR) – přístroj pro měření reologických vlastností asfaltů
- Kompresor a chladicí zařízení (součástí DSR)
- Zkušební geometrie deska – deska o průměru 25 mm s nastavením mezery 1 mm
- Počítač se softwarem

4.5.3. Průběh zkoušky a její vyhodnocení

Stejně jako u zkoušek popsaných výše se nejdříve do nepřilnavých silikonových podložek rozlijí vzorky asfaltového pojiva a nechají se zchladnout na laboratorní teplotu.

Zapne se počítač a dynamický smykový reometr (DSR). K měření MSCR se vybere správná měřicí geometrie deska – deska. Průměr desky je 25 mm. Geometrie se nahřeje na zkušební teplotu a poté

se vzorek umístí do přístroje na nahřátou pevnou podložku. Horní část (pohyblivá deska) se spustí do požadované polohy a stlačí vzorek (viz obr. 14). Přebytek vytlačeného pojiva se seřízne horkou špachtlí. Zvolí se zkušební teplota vhodná pro zkoušené pojivo a započne se zkouška. V této diplomové práci se MSCR test zkoušel při teplotě 50 °C.



Obrázek 14: Stlačený vzorek asfaltového pojiva v DSR

Průběh zkoušky je zaznamenáván každou 0,1 sekundu. Během zkoušky se vystřídají tři rozdílné hodnoty smykového napětí, které působí na vzorek. Nejprve se zatíží vzorek 0,1 kPa po dobu 1 s, což je tzv. fáze dotvarování a poté nastává fáze zotavení trvající 9 s. Tento jeden cyklus trvající 10 s se zopakuje celkem 10krát a potom se stejný postup zopakuje s tím rozdílem, že se aplikuje zatížení 3,2 kPa a nakonec 10kPa. Cyklus se smykovým napětím 10 kPa byl ke zkoušce MSCR připojen oproti podmínkám normy navíc s předpokladem, že zvýšené napětí bude lépe diferencovat náchylnost jednotlivých vzorků pojiva k deformaci. [32, 33]

Výsledky získané z MSCR testu slouží k výpočtu následujících hodnot:

- Elastické zotavení R_N

Počítá se pro všechna tři smyková napětí (0,1 kPa; 3,2 kPa a 10 kPa), pro každý z deseti cyklů daného napětí. Index N označuje pořadové číslo cyklu, protože se elastické zotavení počítá pro každý cyklus jednotlivě. Slouží jako indikátor návratu vzorku do původního stavu. Čím je hodnota vyšší, tím lépe vzorek odolává trvalým deformacím.

$$R_M(0,1kPa) = \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_{10})}{\varepsilon_1} \times 100$$

$$R_M(3,2kPa) = \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_{10})}{\varepsilon_1} \times 100$$

$$R_M(10kPa) = \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_{10})}{\varepsilon_1} \times 100$$

- R_N ... elastické zotavení [%]
 ϵ_1 ... celkové přetvoření [%]
 ϵ_{10} ... nevratná část přetvoření [%]

- Průměrné elastické zotavení R

$$R_{0,1kPa} = \frac{1}{10} \sum_{n=1}^{10} (R_{N(0,1kPa)})$$

$$R_{3,2kPa} = \frac{1}{10} \sum_{n=1}^{10} (R_{N(3,2kPa)})$$

$$R_{10kPa} = \frac{1}{10} \sum_{n=1}^{10} (R_{N(10kPa)})$$

- R... průměrné elastické zotavení [%]

- Rozdíl v průměrném elastickém zotavení R_{diff}

$$R_{diff(3,2-0,1kPa)} = \frac{(R_{0,1kPa} - R_{3,2kPa})}{(R_{0,1kPa})} \times 100$$

$$R_{diff(10-0,1kPa)} = \frac{(R_{0,1kPa} - R_{10kPa})}{(R_{0,1kPa})} \times 100$$

$$R_{diff(10-3,2kPa)} = \frac{(R_{3,2kPa} - R_{10kPa})}{(R_{3,2kPa})} \times 100$$

- R_{diff} ... rozdíl v průměrném elastickém zotavení [%]

- Nevratná smyková poddajnost J_{nrN}

Počítá se pro všechna tři smyková napětí (0,1 kPa; 3,2 kPa a 10 kPa), pro každý z deseti cyklů daného napětí. Index N označuje pořadové číslo cyklu, protože se nevratná smyková poddajnost počítá pro každý cyklus jednotlivě. Je mírou nevratného přetvoření a slouží k posouzení náchylnosti asfaltového pojiva odolávat trvalým deformacím při vyšších teplotách. Čím nižší je hodnota J_{nr} , tím větší podíl napětí je pojivo schopno absorbovat a je méně náchylné k plastické deformaci. V české ani evropské normě ovšem nejsou stanoveny žádné limitní hodnoty.

$$J_{nrN}(0,1kPa) = \frac{(\epsilon_{10})}{0,1}$$

$$J_{nrN}(3,2kPa) = \frac{(\varepsilon_{10})}{3,2}$$

$$J_{nrN}(10kPa) = \frac{(\varepsilon_{10})}{10}$$

J_{nrN} ... nevratná smyková poddajnost [kPa^{-1}]

ε_{10} ... nevratná část přetvoření [%]

- Průměrná nevratná smyková poddajnost J_{nr}

$$J_{nr(0,1kPa)} = \frac{1}{10} \sum_{n=1}^{10} (J_{nrN(0,1kPa)})$$

$$J_{nr(3,2kPa)} = \frac{1}{10} \sum_{n=1}^{10} (J_{nrN(3,2kPa)})$$

$$J_{nr(10kPa)} = \frac{1}{10} \sum_{n=1}^{10} (J_{nrN(10kPa)})$$

J_{nr} ... průměrná nevratná smyková poddajnost [kPa^{-1}]

- Rozdíl nevratné smykové poddajnosti $J_{nr-diff}$

$$J_{nr-diff(3,2-0,1kPa)} = \frac{(J_{nr(3,2kPa)} - J_{nr(0,1kPa)})}{J_{nr(0,1kPa)}} \times 100$$

$$J_{nr-diff(10-0,1kPa)} = \frac{(J_{nr(10kPa)} - J_{nr(0,1kPa)})}{J_{nr(0,1kPa)}} \times 100$$

$$J_{nr-diff(10-3,2kPa)} = \frac{(J_{nr(10kPa)} - J_{nr(3,2kPa)})}{J_{nr(3,2kPa)}} \times 100$$

$J_{nr-diff}$... rozdíl nevratné smykové poddajnosti [kPa^{-1}]

4.6. Stanovení bodu lámavosti podle Fraasse dle ČSN EN 12593

4.6.1. Podstata zkoušky

Zkouška stanovení bodu lámavosti podle Fraasse se provádí dle ČSN EN 12593 a měří křehkost asfaltů a asfaltových pojiv při nízké teplotě. Tenká vrstva asfaltového pojiva je nanášena na kovový plíšek tak, aby se dosáhlo rovnoměrné tloušťky vrstvy. Plíšek se stálou rychlostí ochlazuje a opakovaně ohýbá, dokud se nevytvoří na povrchu asfaltového pojiva prasklina. Teplota, při které pojivo praskne, se zaznamená jako bod lámavosti dle Fraasse.

4.6.2. Přístroje a pomůcky

- Váha – pro navážení přesného množství asfaltového pojiva
- Plíšky – z popouštěné pružné oceli. Musí být uchovány na hladké ploše a chráněny proti korozi. Na plíšky se rovnoměrně rozlije asfaltové pojivo (viz obr. 15).
- Zařízení pro přípravu plíšků – slouží k rozehrání zkoušeného vzorku
- Magnetický blok – s rovným a hladkým povrchem
- Kovový podstavec – pro umístění připravených plíšků
- Přístroj pro měření lámavosti podle Fraasse (viz obr. 16)
- Ohýbací zařízení (součást měřicího přístroje)
- Chladicí zařízení – z vnitřní a vnější zkumavky a ze skleněného válce
- Manipulační kleště – pro vkládání zkušebních plíšků do ohýbacího zařízení
- Teploměr
- Suchý led – pro postupné ochlazování
- Stopky



Obrázek 15: Příprava plíšků pro měření bodu lámavosti podle Fraasse



Obrázek 16: Příklad přístroje pro měření bodu lámavosti podle Fraasse

4.6.3. Průběh zkoušky a její vyhodnocení

Před začátkem každého měření se připraví dva zkušební plíšky očištěné vhodným odmašťovacím rozpouštědlem. Plíšky se vždy ohýbají jedním směrem a na tuto mírně prohnutou stranu se vždy nanáší vzorek asfaltového pojiva. Pojiva s bodem měknutí nižším nebo rovným 100 °C se na plíšek nanáší ručně s přesností (410 ± 10) mg a po zvážení se přemístí na magnetický blok. Magnetický blok se začne vyhřívat na teplotu, která nepřesahuje bod měknutí asfaltového pojiva. Jakmile je pojivo dostatečně tekuté, asfaltové pojivo se rovnoměrně roznese po plíšku. Plíšek se ponechá 1–2 minuty v klidu, aby se zajistilo rovnoměrné pokrytí a rovný povrch bez vzduchových bublin. Musí se zabránit přehřátí vrstvičky asfaltového pojiva. Plíšek se odebere z magnetického bloku a nechá se vychladnout pod snímatelným krytem, aby se ochránil před prachem.

Zkouška se provádí 30 min až 240 min po nanesení vzorku na plíšek. Počáteční teplota před ochlazováním musí být nejméně 15 °C nad očekávaným bodem lámavosti. Ochazuje se rychlostí 1 °C/min a ohýbá se při každém stupni Celsia počínaje nejméně 8 °C a ne více než 12 °C nad očekávaným bodem lámavosti.

Plíšek pokrytý vzorkem se pomocí manipulačních kleští upevní mezi patky ohýbacího zařízení. Ohýbací zařízení se vloží do vnitřní zkumavky chladicího zařízení a instaluje se teploměr. Poté se zahájí

ochlazování rychlostí 1 °C/min. Teplota se reguluje přidáváním malých kousků tuhého oxidu uhličitýho tzv. suchého ledu. Ohýbání plíšku se zahajuje při teplotě (10 ± 2) °C nad očekávaným bodem lámavosti. Plíšek se stálou rychlostí ochlazuje a opakovaně prohýbá, dokud se na asfaltovém pojivu neobjeví první prasklina, v tomto okamžiku se zaznamená teplota tzv. bod lámavosti podle Fraasse.

Zkouška se provede na dvou plíščích a výsledkem je jejich aritmetický průměr zaokrouhlený na nejbližší celé číslo. Pokud se výsledky těchto dvou měření neliší o více než 3 °C lze považovat zkoušku za platnou. [34]

4.7. Stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu – Část 1: Metoda RTFOT dle ČSN EN 12607-1

4.7.1. Podstata zkoušky

RTFOT neboli Rolling Thin Film Oven Test, v češtině: Tepelná stálost v tenké pohybující se vrstvě, je zkušební metoda, která je popsána v normě ČSN EN 12607-1. RTFOT napodobuje krátkodobé stárnutí pojiva při obalování kameniva na obalovně. Pohybující se tenká vrstvička asfaltového pojiva se ohřívá v sušárně určitou dobu při stanovené teplotě a za konstantního přívodu vzduchu. Kombinovaný účinek tepla a vzduchu se stanoví změnou hmotnosti (v %) nebo změnou vlastností asfaltového pojiva před a po stárnutí. Mezi vhodné zkušební metody, které slouží k porovnání účinků RTFOT stárnutí jsou penetrace podle EN 1426, bod měknutí podle EN 1427 nebo dynamická viskozita podle EN 13302 nebo EN 13702. Referenční teplota je 163 °C.

4.7.2. Přístroje a pomůcky

- Sušárna – s dvojitou stěnou a elektrickým ohřevem (viz obr. 18)
- Průtokoměr – schopný měřit průtok vzduchu v množství $(4,0 \pm 0,2)$ l/min
- Teplotní měřicí zařízení – rozmezí 150 °C až 200 °C
- Skleněné nádoby – z teplotvzdorného skla, nalijí se do nich vzorky asfaltového pojiva ($35 \pm 0,5$) g do každé (viz obr. 17)
- Váhy



Obrázek 17: Připravené skleněné nádoby s asfaltovým pojivem

4.7.3. Průběh zkoušky a její vyhodnocení

Vzorek asfaltového pojiva se ohřeje v nádobce s volně přiloženým víčkem v sušárně při teplotě o 10 °C nižší, než je zkušební teplota po dobu nezbytně nutnou k úplnému rozehrátí vzorku. Sušárna se předeřeje na zkušební teplotu (163 ± 1) °C.

Připraví se dostatečný počet skleněných nádobek tak, aby stačily k provedení všech plánovaných zkoušek po zestárnutí asfaltového pojiva. Nejméně dvě z nich se označí (např. A; B) a zváží se odděleně s přesností na 1 mg (m_{0A} ; m_{0B}). Potom se do všech nádobek nalije (35 ± 0,5) g asfaltového pojiva.

Ke stanovení změny hmotnosti v % se vezmou dvě označené nádoby, které již obsahují asfaltové pojivo a nechají se zchladnout na laboratorní teplotu asi 1 h v exsikátoru, zváží se s přesností na 1 mg a zaznamená se jejich hmotnost (m_{1A} ; m_{1B}).

Nádoby se vodorovně vloží do držáku sušárny vyhřáté na zkušební teplotu tak, aby byl držák vyvážen. Nepoužité otvory držáku se zaplní prázdnými nádobkami. Zavřou se dvířka sušárny a spustí se otáčení držáku s frekvencí otáčení (15,0 ± 0,2) min⁻¹, také se nastaví proudění vzduchu (4,0 ± 0,2) l/min. Zkouška trvá (75 ± 1) min od doby, kdy teplota v sušárně dosáhla hodnoty o 1 °C nižší, než je zkušební teplota.

Po uplynutí zkoušky se obě označené nádoby vloží do exsikátoru a nechají po dobu 1 h zchladnout. Potom se opět zváží s přesností na 1 mg a zjistí se hmotnost (m_{2A} ; m_{2B}). Ostatní nádoby se postupně vytahují ze sušárny a přelijí do jediné sběrné nádoby. Vlastnosti zestárlého pojiva se měří pomocí vhodných zkušebních metod: penetrace, bod měknutí kroužek a kulička a dynamická viskozita. Změna hmotnosti v % se vypočítá podle následujících rovnic:

$$\text{Nádobka A} = \frac{m_{2A} - m_{1A}}{m_{1A} - m_{0A}} \times 100 [\%]$$

$$\text{Nádobka B} = \frac{m_{2B} - m_{1B}}{m_{1B} - m_{0B}} \times 100 [\%]$$

$m_0 \dots$ hmotnost skleněné nádoby [mg]

$m_1 \dots$ hmotnost skleněné nádoby s vychladlým asfaltovým pojivem před zkouškou RTFOT [mg]

$m_2 \dots$ hmotnost skleněné nádoby s vychladlým asfaltovým pojivem po proběhnutí zkoušky RTFOT [mg]

Ztráta hmotnosti se vyjádří jako záporná změna v procentech a přírůstek hmotnosti jako kladná změna v procentech. Získané výsledky změny hmotnosti ze dvou nádobek A a B jsou platné, pokud se neliší

o více než 0,05 %. Změna hmotnosti v % se vyjádří jako průměr dvou platných stanovení zaokrouhlených na 0,01 %. [35]



Obrázek 18: Sušárna používaná pro zkoušku RTFOT

4.8. Stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru (BBR) dle ČSN EN 14771

4.8.1. Podstata zkoušky

Stanovení modulu tuhosti za ohybu při pomalém toku asfaltových pojiv je zkušební metoda normy ČSN EN 14771 a slouží k popsání nízkoteplotních vlastností asfaltových pojiv. K měření se používá průhybový trámečkový reometr (Bending Beam Rheometer = BBR), který zaznamenává průhyb ve středu trámečku, při třibodovém ohybu trámečku asfaltového pojiva. Trámeček je uložen v chladičí lázni a na jeho střed se po dobu 240 s vkládá konstantní zatížení a měří se průhyb jako funkce času. Modul tuhosti za ohybu v určeném čase zatížení se vypočítává z ohybového napětí a ohybové deformace.

4.8.2. Přístroje a pomůcky

- Formy pro zkušební tělíska
- Špachtle pro seříznutí trámečků
- Průhybový trámečkový reometr (BBR) (viz obr.20) – složen ze zatěžovacího rámu s podpěrami zkušebního tělesa, temperační lázně, míchadla, kalibrovaného snímače teploty a systému na snímání dat



Obrázek 19: Seříznuté trámečky ve formách



Obrázek 20: Průhybový trámečkový reometr (BBR)

4.8.3. Průběh zkoušky a její vyhodnocení

Do předem sestavených kovových forem, které jsou vytemperovány na laboratorní teplotu, se s mírným přesahem nalije horké asfaltové pojivo. Pojivo se nalévá kontinuálně od jednoho konce formy k druhému a nechá se vychladnout po dobu 45 až 60 minut. Po ochlazení se horní část tělíška seřízne horkou špachtlí do roviny s okraji formy (viz obr. 19).

Před odformováním se zkušební tělíska ochlazují v chlazené komoře, aby zkušební tělísko ztuhlo a snadněji se z formy uvolňovalo bez pokroucení. Teplota v chlazené komoře ovšem nemůže být nižší než teplota zkoušení. Při každé teplotě se zkouší nejméně dvě tělíska.

Před zkouškou každé sady zkušebních tělísek se zkontroluje nastavení kontaktního zatížení a zkušebního zatížení. Přístroj se musí nakalibrovat.

Podle očekávané úrovně tuhosti se zvolí první teplota zkoušení a přístroj se nechá vytemperovat. Teplota lázně musí být na teplotě zkoušení $\pm 0,2$ °C.

Po uvolnění z formy se zkušební tělísko ihned umístí do zkušební lázně a temperuje se při zkušební teplotě po dobu $60 \text{ min} \pm 2 \text{ min}$. Po ukončení temperace se zkušební tělísko umístí na podpěry a vloží se zkušební zatížení 930 mN až 1030 mN . V průběhu 240 s se zaznamenává hodnota zkušebního zatížení a průhyb.

V době mezi $0,5 \text{ s}$ a $5,0 \text{ s}$ musí být zatížení v rozmezí $\pm 50 \text{ mN}$ od průměrného zkušebního zatížení a po zbývající dobu $\pm 10 \text{ mN}$ od průměrného zkušebního zatížení. Pokud je průhyb menší než $0,08 \text{ mm}$, nebo větší než $4,0 \text{ mm}$, je měření nevěrohodné.

Vypočte se:

- modul tuhosti za ohybu zkušebního tělíska v časech zatížení 8 s , 15 s , 30 s , 60 s , 120 s , 240 s z rozměrů zkušebního tělíska, změřeného zkušebního zatížení a změřeného průhybu, za použití rovnice:

$$S_m(t) = \frac{PL^3}{4bh^3\delta(t)}$$

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

- m -hodnota, tedy sklon křivky dotvarování. Je směnicí tečny ke křivce závislosti logaritmu modulu tuhosti na logaritmu času.

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

B, C...	regresní koeficienty
t...	doba zatěžování [s]

Teplota, při které je ohybová tuhost $S(60s) = 300\text{MPa}$, resp. m-hodnota $m(60s) = 0,3$, je označována jako tzv. kritická teplota. Kritickou teplotu můžeme získat interpolací hodnot ohybové tuhosti $S(60s)$, resp. m-hodnoty $m(60s)$, stanovených při alespoň třech teplotách (např. $-16\text{ }^\circ\text{C}$, $-22\text{ }^\circ\text{C}$, $-28\text{ }^\circ\text{C}$). Cílem měření je nalézt tuto teplotu, při které se $S(t)$ blíží hodnotě 300 MPa zdola a $m(t)$ se shora blíží hodnotě $0,3$. Předpokládá se, že při teplotě o $10\text{ }^\circ\text{C}$ nižší, než je kritická teplota, dochází ke vzniku trhlin ve vozovce. [36, 37]

4.9. Stanovení skladovací stability modifikovaných asfaltů dle ČSN EN 13399

4.9.1. Podstata zkoušky

Měření skladovací stability modifikovaných asfaltů při vyšších teplotách specifikuje evropská norma ČSN EN 13399. Zejména polymerem modifikované asfalty mohou za určitých podmínek vykazovat separaci fází. Homogenní vzorek modifikovaného asfaltu se ponechá ve svislé nádobce při $180\text{ }^\circ\text{C}$ po dobu tří dnů. Po chlazení se vzorek příčným řezem rozdělí na tři stejné části. Krajní části (vrchní a spodní část) se dále analyzují a vyhodnocují se změny v parametrech.

4.9.2. Přístroje a pomůcky

- Tuba – z tenkého hliníku, s minimální výškou 160 mm a průměrem 25 až 40 mm , uzavřená na jednom konci (viz obr. 21)
- Kleště – k uzavírání tub naplněných vzorkem
- Sušárna – schopná udržovat teplotu $(180 \pm 5)\text{ }^\circ\text{C}$ po dobu tří po sobě jdoucích dní
- Misky – jedna označená jako „vrch“ a druhá jako „spodek“
- Řezací nástroj – určen k řezání tub se vzorkem při nízké teplotě



Obrázek 21: Tuba připravená pro stanovení skladovací stability

4.9.3. Průběh zkoušky a její vyhodnocení

Nejprve se připraví tuby a na nich se vyznačí výška úrovně maximálního plnění. Zhomogenizovaný ztekucený vzorek se pečlivě nalije do tuby. Po nalití zkušebního materiálu se stiskne otevřený konec tuby těsně nad povrchem ochlazeného vzorku a pomocí kleští se pečlivě uzavře a nejméně dvakrát přehne. Tím se zajistí, aby nedošlo k působení vzduchu během skladování při vyšší teplotě.

Tuba se umístí ve svislé poloze do předehřáté sušárny do 1 h od naplnění a ponechá se zde tři dny při 180 °C. Po uplynutí tří dnů se vyjme ze sušárny, nechá se stále ve svisle poloze zchladnout na laboratorní teplotu a nařeže se na tři stejné díly. Střední část se vyloučí, nemá své využití. Vrchní a spodní část se umístí odděleně do misek. Misky se zahřejí v sušárně, hliníkový obal se odstraní a obě části – horní i spodní, jsou připraveny pro další zkoušení. [38]

5 Použité materiály

V této diplomové práci bylo zkoušeno 10 různých asfaltových pojiv. Jejich seznam je přehledně uveden v tabulce 5.

Základ všech pojiv tvořil silniční asfalt třídy 70/100. Z tohoto silničního asfaltu byl v laboratoři vyroben polymerem modifikovaný asfalt PMB 45/80-55. Pro výrobu tohoto modifikovaného asfaltu byla použita přísada SBS = Styren-butadien-styrenový kaučuk (KRATON D1101) v množství 3,8 %.

K silničnímu i modifikovanému asfaltu byly přimíchány dvě odlišné fluxační přísady v množství 2 % a 4 %. Přiměřené dávkování fluxačních přísad bylo ověřeno vstupním pokusem.

Na pojivech byly aplikovány konvenční zkoušky (stanovení penetrace jehlou, stanovení bodu měknutí a stanovení bodu lámavosti podle Fraasse) a moderní reologické zkoušky využívající dynamický smykový reometr (DSR) a průhybový trámečkový reometr (BBR). Vybraná pojiva byla zestárnutá metodou simulovaného stárnutí RTFOT.

Tabulka 5: Seznam porovnávaných pojiv v diplomové práci

Označení	Pojivo	Polymer	Fluxační přísada	Množství fluxační přísady
A	70/100	-	-	-
AN_2 %	70/100	-	NYTEX 820	2 %
AN_4 %	70/100	-	NYTEX 820	4 %
AO_2 %	70/100	-	TRIUMF EXOP 24	2 %
AO_4 %	70/100	-	TRIUMF EXOP 24	4 %
SBS	70/100	3,8 % SBS	-	-
SBSN_2 %	70/100	3,8 % SBS	NYTEX 820	2 %
SBSN_4 %	70/100	3,8 % SBS	NYTEX 820	4 %
SBSO_2 %	70/100	3,8 % SBS	TRIUMF EXOP 24	2 %
SBSO_4 %	70/100	3,8 % SBS	TRIUMF EXOP 24	4 %

Fluxační přísady:

- NYTEX 820 (viz obr. 22)
 - výrobce NYNAS
 - naftenický olej s vysokou viskozitou, nízkou těkavostí a velmi dobrými nízkoteplotními vlastnostmi
 - z chemického hlediska je naftenický olej založen na cykloalkanech
 - vynikající rozpouštědlo
 - hustota oleje při 15 °C je 910 kg/m³
 - bod vzplanutí je 206 °C



Obrázek 22:
NYTEX 820

- dobrá kompatibilita s celou řadou polymerů
- používá se pro výrobu pneumatik, gum, barev do tiskáren, pro ošetření dřeva atd.

- TRIUMF EXOP 24 (viz obr. 23)

- aromatický olej
- výrobce PARAMO
- z chemického hlediska je aromatický olej založen na aromatických uhlovodících
- hustota oleje při 15 °C je 980 kg/m³
- bod vzplanutí je 230 °C



Obrázek 23:
TRIUMF EXOP 24

Tabulka 6: Srovnání vlastností použitých fluxačních přísad

	1. fluxační přísada	2. fluxační přísada
Název	NYTEX 820	TRIUMF EXOP 24
Typ oleje	Naftenický olej	Aromatický olej
Výrobce	NYNAS	PARAMO
Z chemického hlediska	založen na cykloalkanech	založen na aromatických uhlovodících
Viskozita, 100 °C [mm ² /s]	8,8	50
Hustota, 15 °C [kg/m ³]	910	980
Bod vzplanutí [°C]	206	230
Bod tečení [°C]	-15	30
Obsah síry [%]	0,11	4

5.1. Výroba modifikovaného asfaltu

Výroba modifikovaného asfaltu probíhala ve výzkumném centru AdMaS. Plechovka se silničním asfaltem 70/100 se vložila do sušárny a asfalt se rozežřál na teplotu 175 °C. Plechovka s horkým asfaltem se poté umístila na vařič, kterým bylo pojivo kontinuálně zahříváno na teplotu cca 175 °C. Do horkého asfaltu se za pomoci koloidního mlýnu (typ Silverson) (viz obr. 24) postupně vmíchalo 3,8 % SBS (KRATON D1101) (viz obr. 25). Míchání probíhalo přibližně 3 hodiny. Za tuto dobu byla dosažena

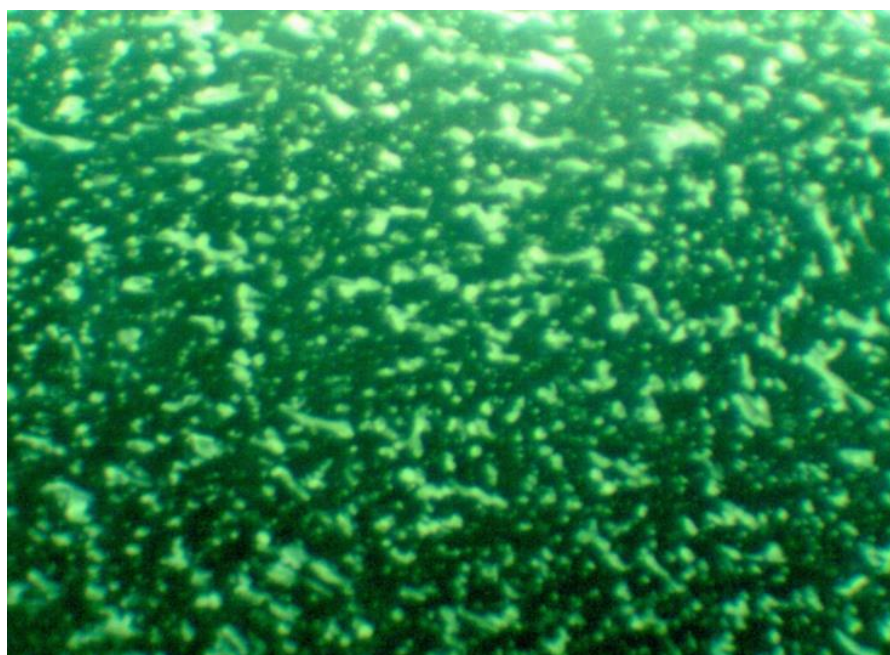
částečná disperze SBS v asfaltovém pojivu a byl odebrán vzorek pro pozorování disperze fluorescenčním mikroskopem Novel NIB-100F (viz obrázek 26). Po dalších 6 hodinách míchání se přidalo 0,06 % síry, která pojivo stabilizovala. Cílem bylo dosažení úplné stupně disperze. Bylo důležité sledovat teplotu asfaltu a udržovat ji na maximálně 180 °C. Pokud by se teplota vyšplhala na více než 200 °C, mohlo by dojít k přehřátí asfaltového pojiva a následné degradaci polymeru. Tímto postupem byl vyroben polymerem modifikovaný asfalt PMB 45/80- 55.



Obrázek 25: SBS [41]



Obrázek 24: Koloidní mlýn



Obrázek 26: Disperze SBS v asfaltovém pojivu po cca 3 hodinách míchání

5.2. Určení vhodného množství fluxačních přísad

Pro určení množství dávkování fluxačních přísad byl vybrán běžný modifikovaný asfalt PMB 45/80–65, který byl poskytnut od výrobce polymerem modifikovaných asfaltů. Do tohoto modifikovaného asfaltu se dávkovala fluxační přísada NYTEX 820 v množství 2 % a 4 % (viz tab. 7). Na základě provedených zkoušek: stanovení penetrace jehlou, bodu měknutí a moderních reologických zkoušek využívající dynamický smykový reometr bylo zjištěno, že i toto malé množství fluxační přísady (2 % a 4 %) ovlivňuje chování asfaltového pojiva. Pokusem se také zjistilo, že nedochází k nadměrnému poklesu viskozity. Takto stanovené množství bylo později přimícháno do asfaltových pojiv (70/100 a 70/100 modifikovaného SBS) a zkoušeno.

Na následujících stranách jsou v grafech (1 – 8) a tabulkách (8 – 11) znázorněny výsledky vstupního zkoušení, které bylo použito pro odhad vhodného dávkování fluxační přísady. Kapitola 6 obsahuje praktickou část diplomové práce, tzn. vyhodnocení zkoušek aplikovaných na silničním asfaltu 70/100 a tohoto asfaltu polymerem modifikovaného, který byl vyroben v laboratoři s určením vlivu přítomnosti fluxačních přísad.

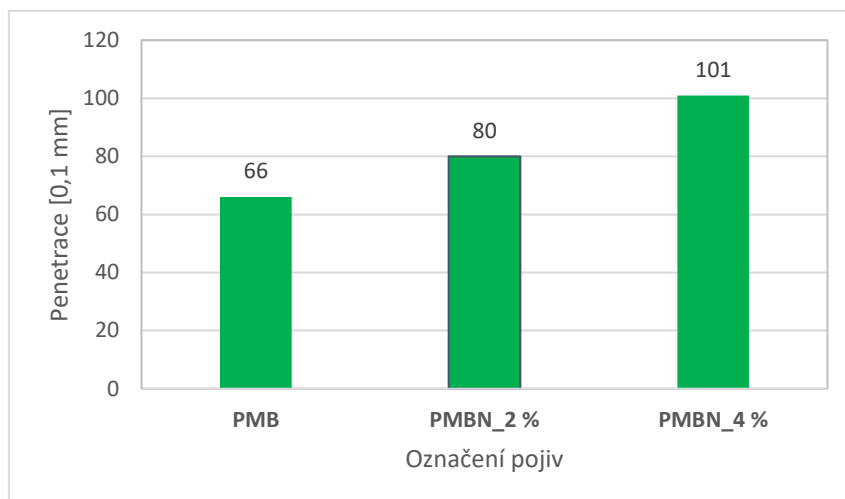
Tabulka 7: Označení modifikovaných asfaltů pro určení vhodného množství fluxačních přísad

	Pojivo	fluxační přísada
PMB	modifikovaný asfalt	-
PMBN_2 %	modifikovaný asfalt	NYTEX 820 (2 %)
PMBN_4 %	modifikovaný asfalt	NYTEX 820 (4 %)

5.2.1. Stanovení penetrace jehlou dle ČSN EN 1426

Tabulka 8: Hodnoty penetrace jehlou

Označení pojiv	Penetrace jehlou před RTFOT [0,1 mm]
PMB	66
PMBN_2 %	80
PMBN_4 %	101

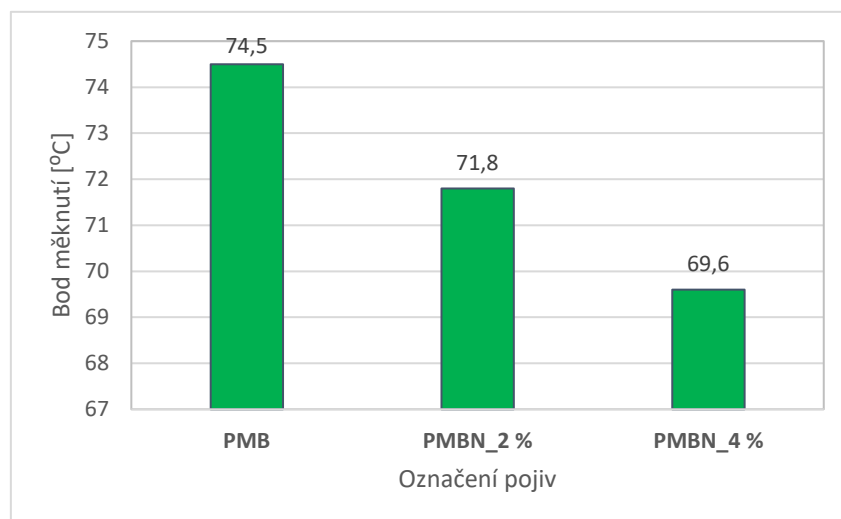


Graf 1: Hodnoty penetrace jehlou

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

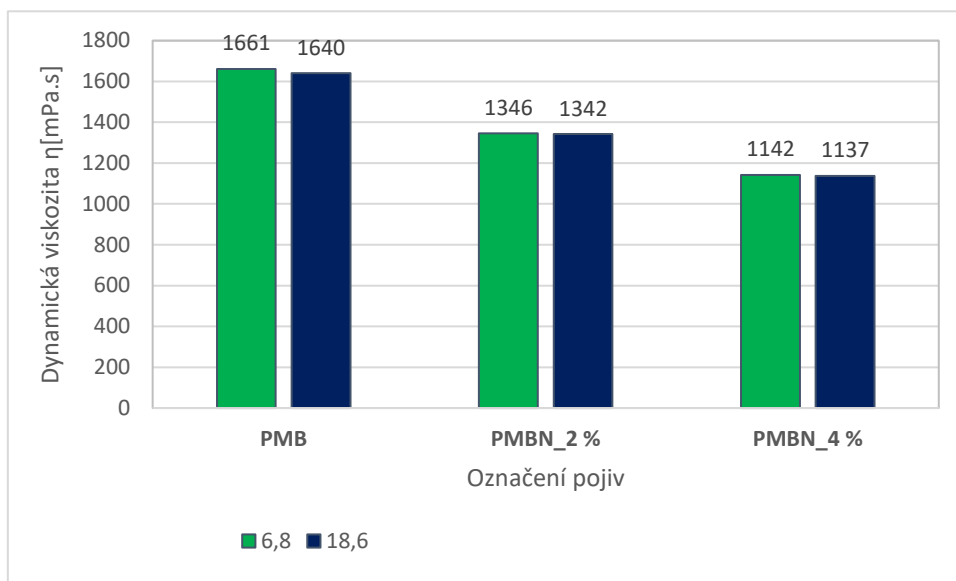
Tabulka 9: Hodnoty bodu měknutí

Označení pojiv	Bod měknutí před RTFOT [°C]
PMB	74,5
PMBN_2 %	71,8
PMBN_4 %	69,6

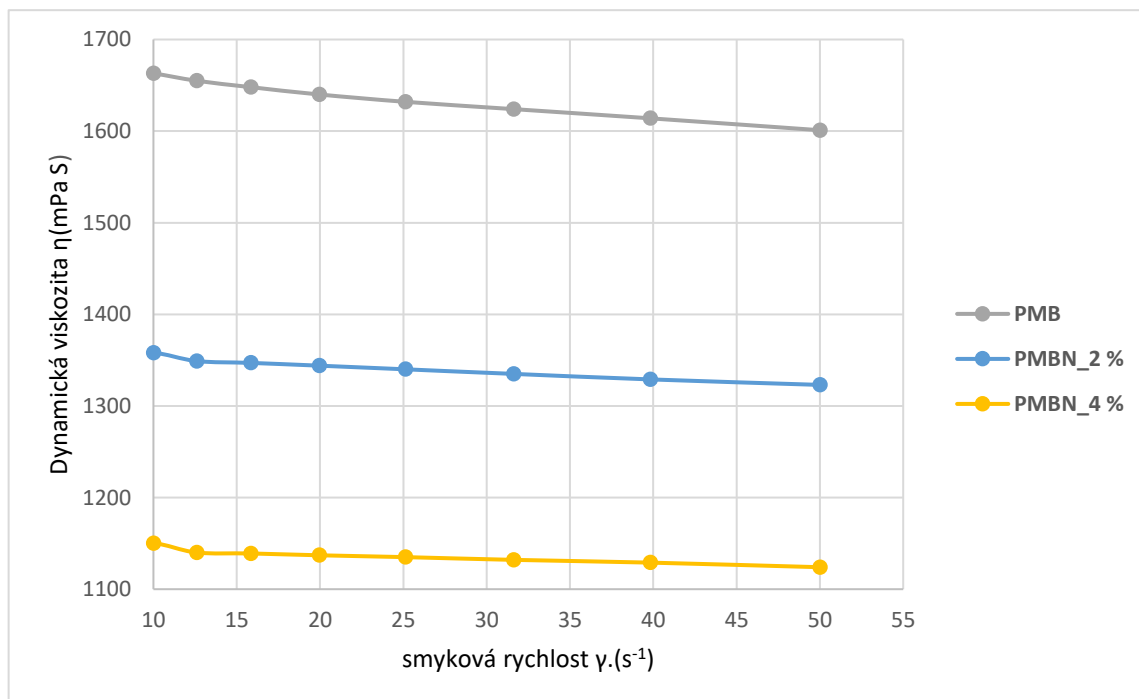


Graf 2: Hodnoty bodu měknutí

5.2.3. Stanovení dynamické viskozity modifikovaných asfaltů metodou kužel a deska dle ČSN EN 13702



Graf 3: Hodnoty dynamické viskozity při teplotě 135 °C a smykové rychlosti 6,8 s⁻¹ a 18,6 s⁻¹

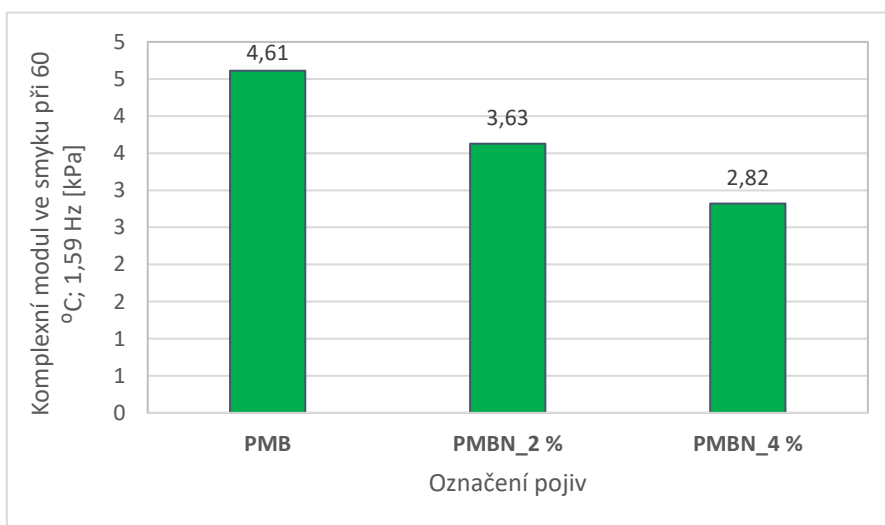


Graf 4: Závislost dynamické viskozity na smykové rychlosti při teplotě 135 °C

5.2.4. Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu – Dynamický smykový reometr (DSR) dle ČSN EN 14770

Tabulka 10: Hodnoty komplexního modulu ve smyku při 60 °C; 1,59 Hz

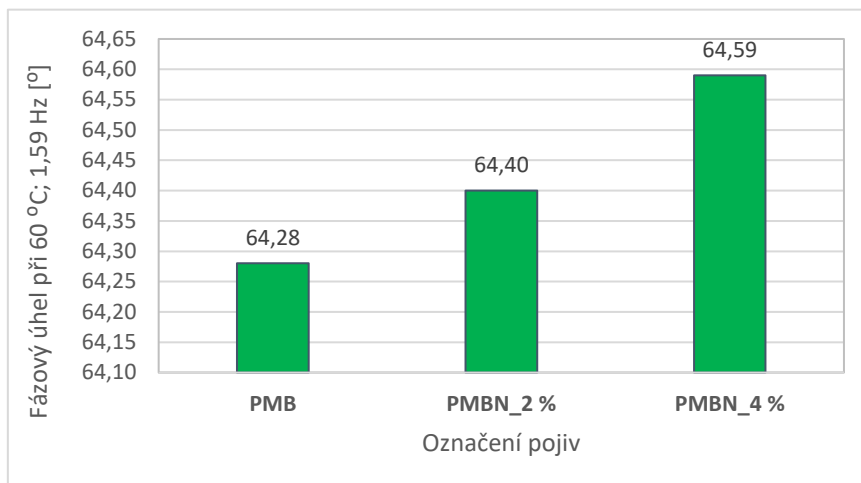
Označení pojiv	Komplexní modul ve smyku při 60 °C; 1,59 Hz [kPa]
PMB	4,61
PMBN_2 %	3,63
PMBN_4 %	2,82



Graf 5: Hodnoty komplexního modulu ve smyku při 60 °C; 1,59 Hz

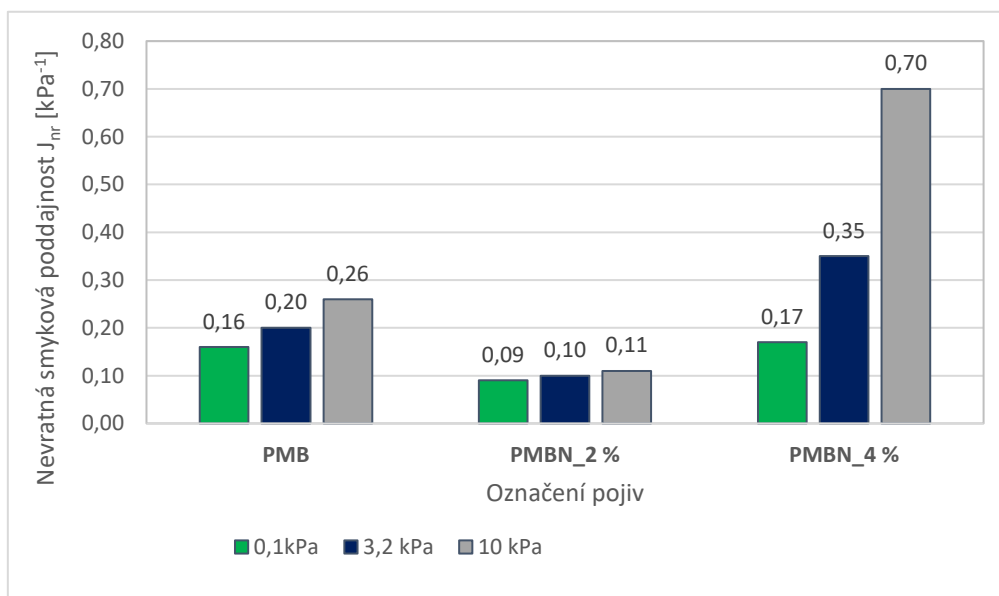
Tabulka 11: Hodnoty fázového úhlu při 60 °C; 1,59 Hz

Označení pojiv	Fázový úhel při 60 °C; 1,59 Hz [°]
PMB	64,28
PMBN_2 %	64,40
PMBN_4 %	64,59

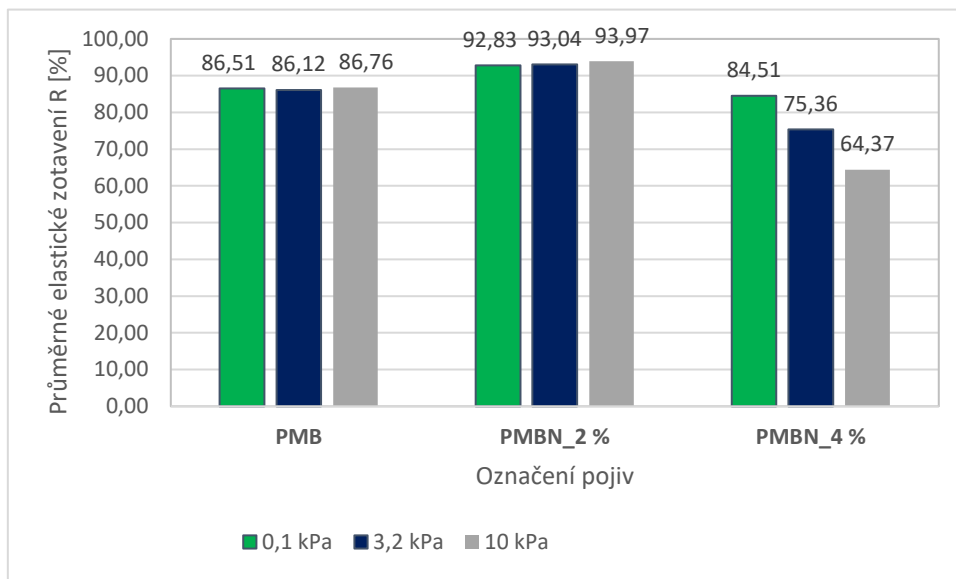


Graf 6: Hodnoty fázového úhlu při 60 °C; 1,59 Hz

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



Graf 7: Nevratná smyková poddajnost J_{nr} při teplotě 60 °C



Graf 8: Průměrné elastické zotavení R při teplotě 60 °C

Z výsledků vstupního pokusu, který měl za cíl učít vhodné dávkování fluxačních přísad tak, aby došlo k mírnému poklesu viskozity (grafy 1 – 8), lze vidět, že i malé množství fluxační přísady (2 % a 4 %) zřetelně ovlivňuje chování asfaltového pojiva. Proto bylo toto množství fluxační přísady použito v praktické části této diplomové práce, v kapitole 6. Dva rozdílné typy fluxačních přísad byly přimíchány do asfaltových pojiv (70/100 a 70/100 modifikovaného SBS).

6 Výsledky zkoušek

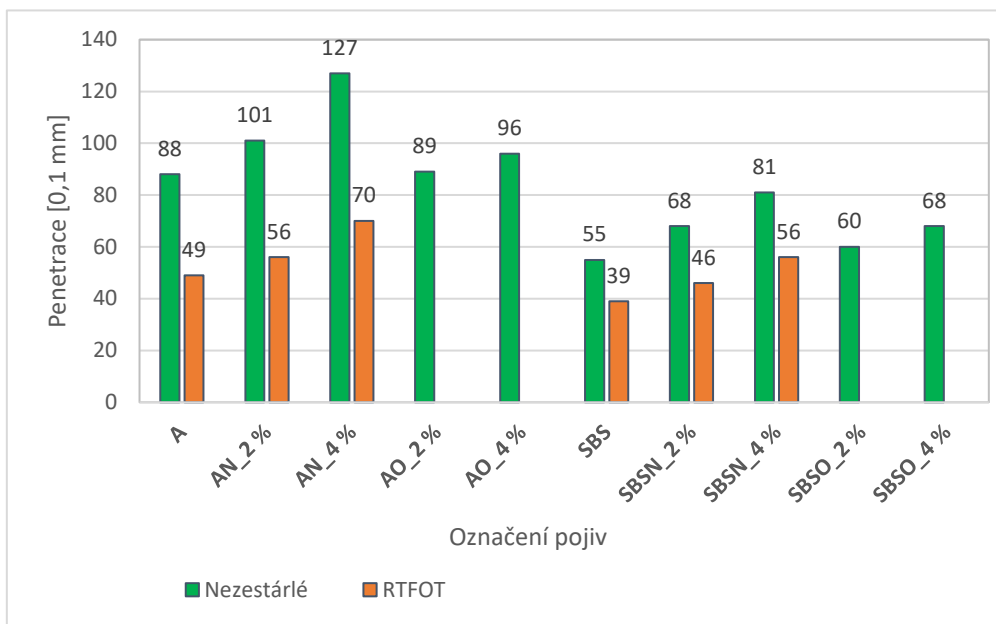
Obsahem této kapitoly je vyhodnocení všech prováděných zkoušek, které probíhaly podle platných norem a jsou podrobněji popsány v kapitole 4. Výsledky jsou pro přehlednost vyjádřeny v tabulkách a grafech a náležitě okomentovány. Zkoušky byly prováděny jak na nemodifikovaných pojivech, tak i na polymerem modifikovaných asfaltech, přičemž jejich přehled je uveden v tab. 12. Pro určení vlivu stárnutí na vlastnosti pojiv obsahujících fluxační přísady byla vybraná pojiva zestárnutá metodou simulovaného stárnutí RTFOT.

6.1. Stanovení penetrace jehlou dle ČSN EN 1426

Princip zkoušky je popsán v kapitole 4.1. Zkouška byla provedena na vzorcích nemodifikovaných a modifikovaných asfaltových pojiv před provedením laboratorního stárnutí a po laboratorní simulaci krátkodobého stárnutí metodou RTFOT. V tabulce 12 jsou zaznamenány všechny naměřené hodnoty penetrace jehlou. Výchozím asfaltem je pojivo A třídy 70/100, požadovaný rozsah penetrace je dle normy ČSN 65 7204: 70 až 100 penetračních jednotek. Z grafu 9 je patrné, že přidáním fluxačních přísad do nemodifikovaného asfaltu A i do polymerem modifikovaného asfaltu, který je označen jako SBS, narůstají hodnoty penetrace. Výraznější nárůst penetrace lze pozorovat u fluxační přísady Nytex 820, která má tekutější konzistenci než druhé fluxační činidlo. Dále je zřejmé, že stárnutí (RTFOT) způsobuje snížení hodnoty penetrace jehlou oproti nezestárlému pojivu, neboť dochází k oxidativnímu tvrdnutí a stárnutí asfaltového pojiva. Výchozí pojivo A se po zestárnutí RTFOT propadá na rozhraní tříd 35/50 a 50/70. Přidání fluxačních přísad nemělo na hodnotu zbylé penetrace prakticky žádný vliv. Zbylá penetrace ovšem splňuje normové požadavky.

Tabulka 12: Hodnoty penetrace jehlou

Označení pojiv	Penetrace jehlou před RTFOT [0,1 mm]	Penetrace jehlou po RTFOT [0,1 mm]	Zbylá penetrace [%]	Zbylá penetrace – požadavek norem (ČSN 65 7204; ČSN 65 7222-1) [%]
A	88	49	56	≥ 46
AN_2 %	101	56	55	
AN_4 %	127	70	55	
AO_2 %	89	-	-	
AO_4 %	96	-	-	
SBS	55	39	71	≥ 60
SBSN_2 %	68	46	68	
SBSN_4 %	81	56	69	
SBSO_2 %	60	-	-	
SBSO_4 %	68	-	-	



Graf 9: Hodnoty penetrace jehlou

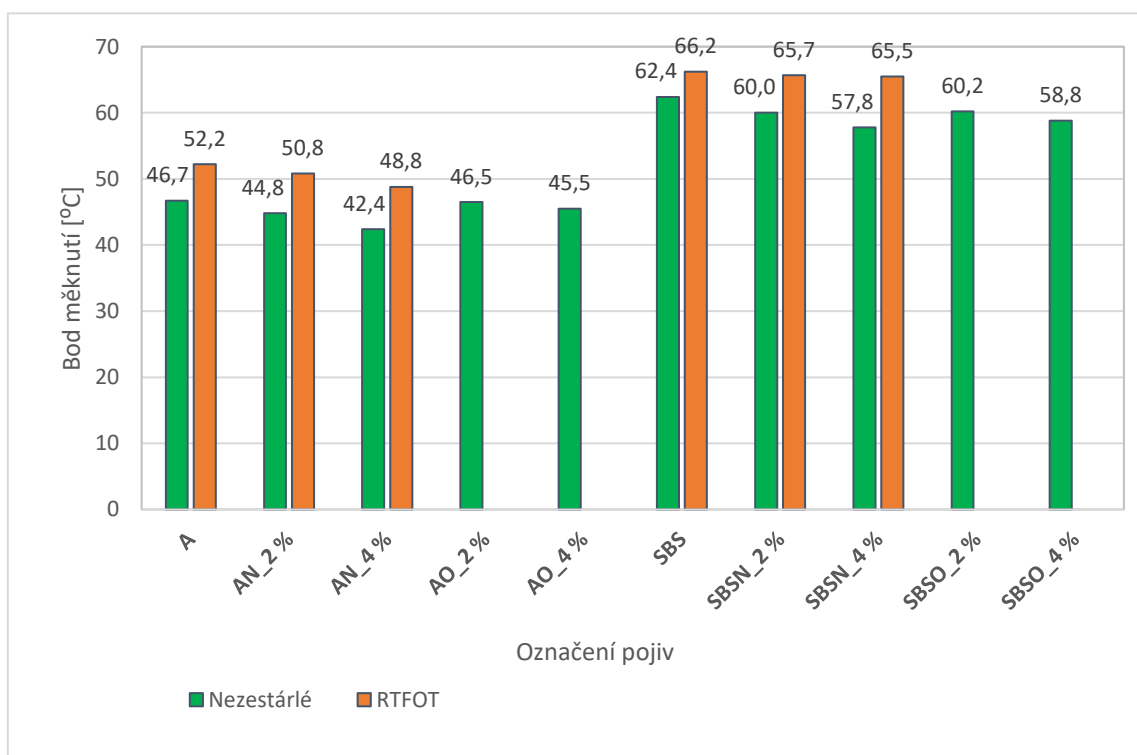
6.2. Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička dle ČSN EN 1427

Stanovení bodu měknutí je podrobně popsáno v kapitole 4.2. Zkouška byla provedena na vzorcích nemodifikovaných a modifikovaných asfaltových pojiv před provedením laboratorního stárnutí a po krátkodobém laboratorním stárnutí RTFOT. V tabulce 13 jsou zaznamenány všechny naměřené hodnoty bodu měknutí. Výchozím asfaltem je pojivo A třídy 70/100, požadovaný rozsah bodu měknutí tohoto asfaltového pojiva je dle normy ČSN 65 7204: 43 °C – 51 °C. Z grafu 10 lze vypočítat, že se přidáním fluxačních přísad snižuje teplota bodu měknutí. Avšak v případě aromatického oleje (fluxační přísada s označením O) v množství 2 % je pokles teploty pouze o 0,2 °C, množství 4 % aromatického oleje snižuje teplotu bodu měknutí o 1,2 °C. Stárnutím RTFOT dochází k tvrdnutí asfaltového pojiva, proto teplota bodu měknutí narůstá oproti nezestárlému pojivu. Maximální zvýšení bodu měknutí po stárnutí RTFOT vyhovuje požadavkům norem: ČSN 65 7204 a ČSN 65 7222-1.

S rostoucím dávkováním fluxační přísady se zvyšuje hodnota zvýšení bodu měknutí po RTFOT, takže při vyhodnocení pomocí tohoto parametru je vidět, že pojiva s fluxačními přísadami více stárnou. Maximální zvýšení bodu měknutí po stárnutí RTFOT všech pojiv ovšem vyhovuje požadavkům norem: ČSN 65 7204 a ČSN 65 7222-1.

Tabulka 13: Hodnoty bodu měknutí

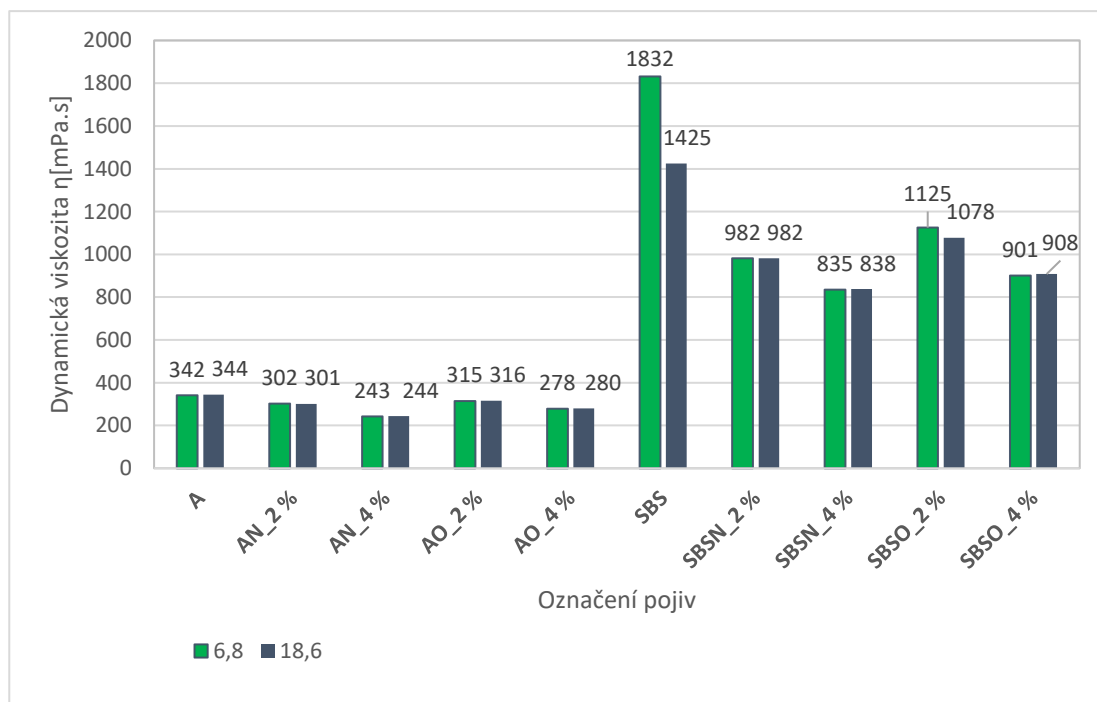
Označení pojiv	Bod měknutí před RTFOT [°C]	Bod měknutí po RTFOT [°C]	Zvýšení bodu měknutí [°C]	Zvýšení bodu měknutí, max. – požadavek norem (ČSN 65 7204; ČSN 65 7222-1) [°C]
A	46,7	52,2	5,5	≤ 9
AN_2 %	44,8	50,8	6,0	
AN_4 %	42,4	48,8	6,4	
AO_2 %	46,5	-	-	
AO_4 %	45,5	-	-	
SBS	62,4	66,2	3,8	≤ 10
SBSN_2 %	60,0	65,7	5,7	
SBSN_4 %	57,8	65,5	7,7	
SBSO_2 %	60,2	-	-	
SBSO_4 %	58,8	-	-	



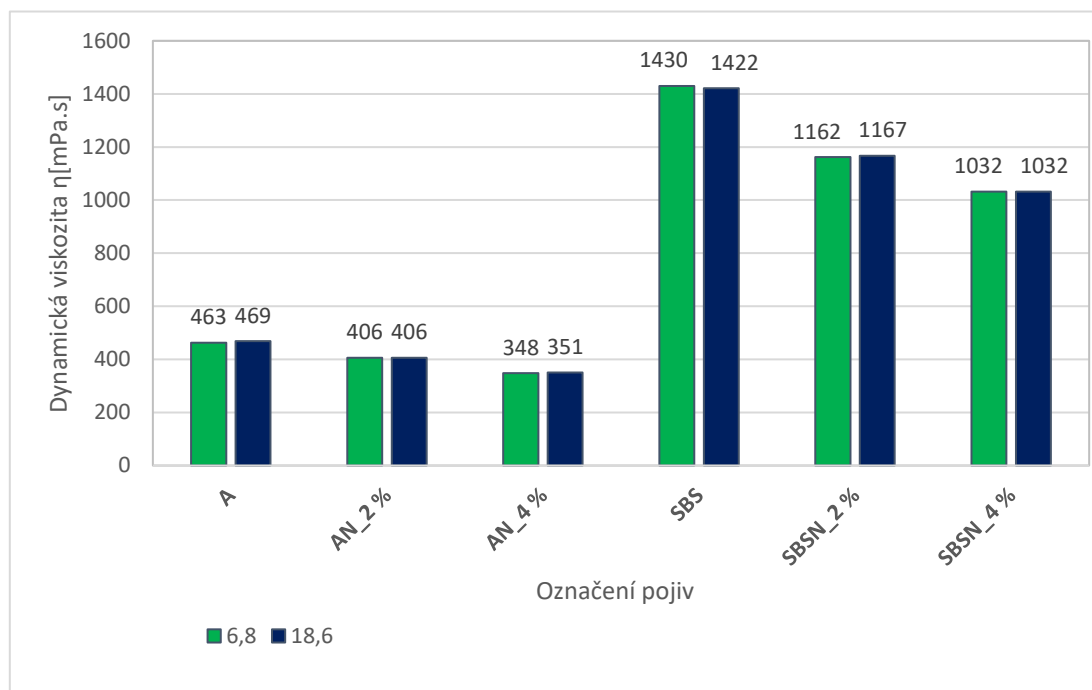
Graf 10: Hodnoty bodu měknutí

6.3. Stanovení dynamické viskozity modifikovaných asfaltů metodou kužel a deska dle ČSN EN 13702

Dynamická viskozita byla naměřena v dynamickém smykovém reometru DSR při teplotě 135 °C s využitím geometrie kužel – deska. Postup měření je popsán v kapitole 4.3. Měření bylo rozděleno do dvou částí, nejprve se zjišťovala dynamická viskozita při smykové rychlosti 6,8 s⁻¹ a 18,6 s⁻¹. Výsledky jsou zobrazeny v grafu 11 (nezestárlá pojiva) a grafu 12 (zestárlá pojiva po RTFOT). V grafech je patrné, že se hodnoty viskozity při rozdílných smykových rychlostech téměř nemění. Znamená to tedy, že dynamická viskozita není závislá na smykové rychlosti, a tedy použité asfalty se chovají převážně jako newtonovská látka. Největší viskozita byla naměřena u polymerem modifikovaného asfaltu SBS. Polymerem modifikovaná pojiva méně tečou i při vyšších teplotách než běžný silniční asfalt. Z grafů také vyplývá, že přidáním fluxačních pojiv se stávají asfalty tekutější a méně viskózní, klesá odpor proti toku.



Graf 11: Hodnoty dynamické viskozity při teplotě 135 °C a smykové rychlosti 6,8 s⁻¹ a 18,6 s⁻¹



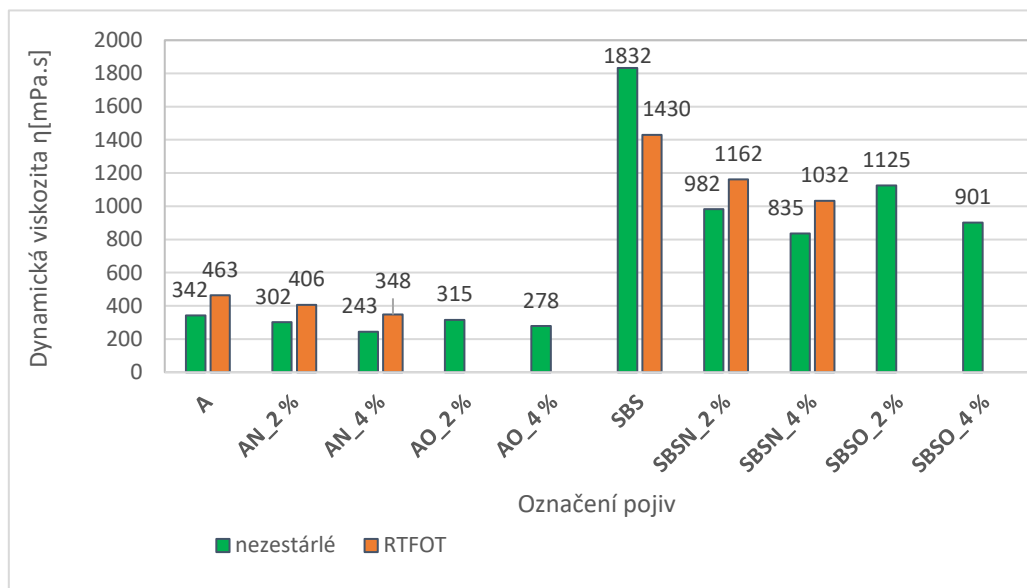
Graf 12: Hodnoty dynamické viskozity při teplotě 135 °C a smykové rychlosti 6,8 s⁻¹ a 18,6 s⁻¹ po zestárnutí asfaltových pojiv RTFOT

V grafu 13 je patrné, že hodnoty dynamické viskozity při smykové rychlosti 6,8 s⁻¹ zestárých asfaltových pojiv výrazně stouply. Protože je asfalt organickou látkou, reaguje s kyslíkem z okolního prostředí a dochází k tzv. oxidativnímu tvrdnutí a stárnutí. K oxidaci dochází rychleji za vysokých teplot. Tím, že se asfaltové pojivo po krátkodobém stárnutí RTFOT stalo tvrdším, zvýšil se odpor proti toku, došlo tedy k nárůstu viskozity oproti nezestárlému asfaltovému pojivu. Výjimka nastala u polymerem modifikovaného asfaltu bez přidání fluxační přísady, kdy po stárnutí RTFOT došlo překvapivě k mírnému poklesu dynamické viskozity. To může být způsobeno „doreagováním“ modifikační přísady s asfaltovým pojivem během procesu stárnutí. Větší množství fluxačních přísad znamenalo snížení viskozity. Naftenický olej Nytex 820 je tekutější a měl větší vliv na snížení viskozity než aromatický olej.

Vliv fluxačních přísad na viskozitu asfaltových pojiv je zaznamenán v tabulce 14. U výchozího nemodifikovaného asfaltového pojiva došlo vlivem 2 % naftenického oleje ke snížení viskozity o 12 %, vlivem 4 % naftenického oleje došlo ke snížení viskozity o 29 %. Aromatický olej měl menší vliv na změnu viskozity, v množství 2 % snížil viskozitu o 8 % a v množství 4 % snížil viskozitu o 19 %.

U polymerem modifikovaného asfaltového pojiva došlo vlivem 2 % naftenického oleje ke snížení viskozity o 46 %, vlivem 4 % naftenického oleje došlo ke snížení viskozity o 54 %. Aromatický olej měl i v tomto případě menší vliv na změnu viskozity, v množství 2 % snížil viskozitu o 39 % a v množství 4 % snížil viskozitu o 51 %. Tyto vysoké procentuální hodnoty změny viskozit mohou být důsledkem toho, že asfaltové pojivo SBS v době měření nebylo dostatečně zreagované s modifikační přísadou.

Po stárnutí RTFOT si lze všimnout, že u nemodifikovaného asfaltu s 2 % a 4 % naftenického oleje je pokles viskozity srovnatelný s nezestárlým nemodifikovaným asfaltovým pojivem (pokles 12 % a 25 %). U polymerem modifikovaného asfaltu s 2 % a 4 % naftenického oleje je pokles viskozity mnohem menší, než s nezestárlým polymerem modifikovaným asfaltovým pojivem (pokles 19 % a 28 %). To může být způsobeno „doreagováním“ modifikační přísady s asfaltovým pojivem během procesu stárnutí RTFOT.

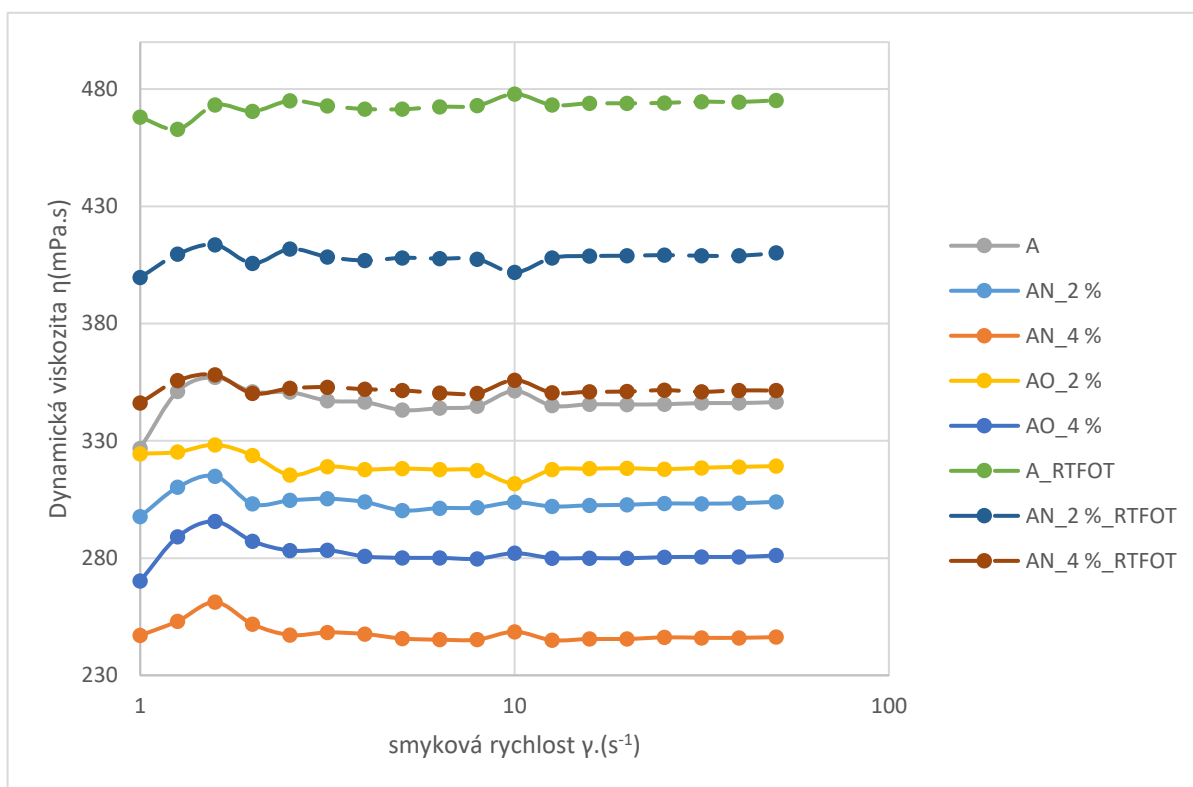


Graf 13: Hodnoty dynamické viskozity při teplotě 135 °C a smykové rychlosti 6,8 s⁻¹

Tabulka 14: Vliv fluxačních přísad na viskozitu asfaltových pojiv při teplotě 135 °C a smykové rychlosti 6,8 s⁻¹

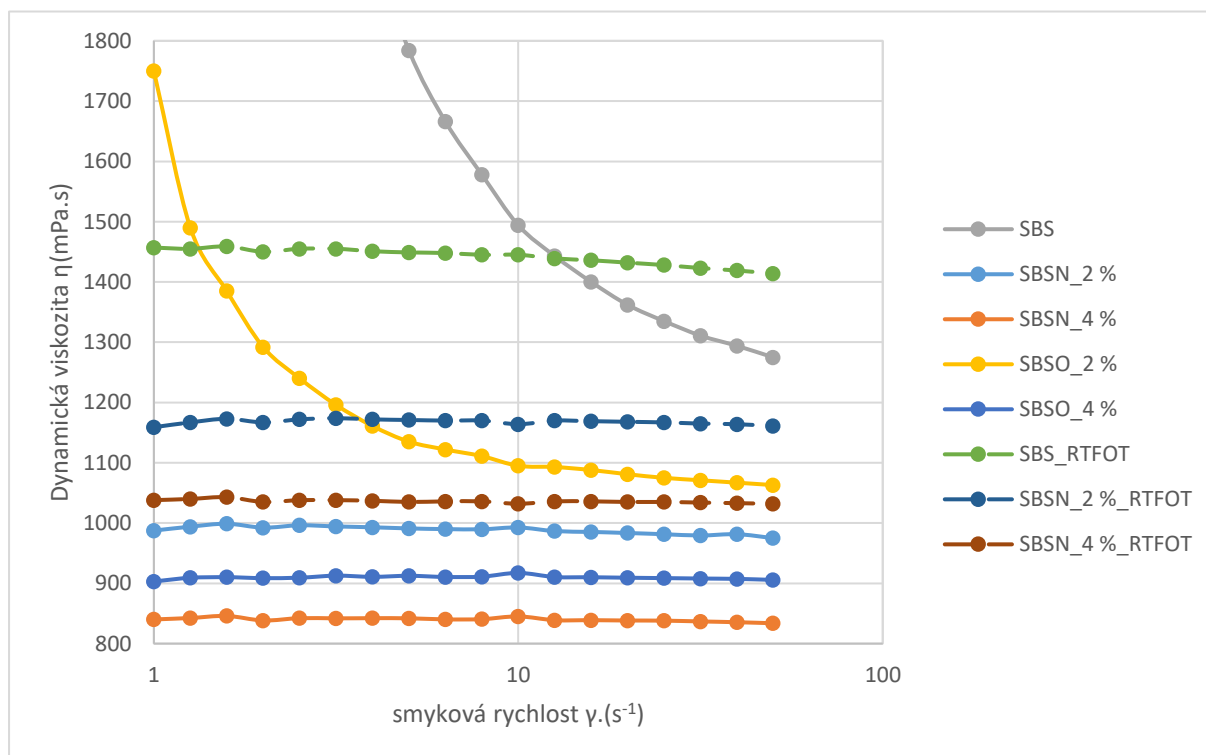
Označení pojiv	η (mPa.s)	Podíl viskozity oproti výchozímu asfaltovému pojivu (A; SBS)	η (mPa.s) - RTFOT	Podíl viskozity oproti výchozímu asfaltovému pojivu (A; SBS) - RTFOT
A	342	-	463	-
AN_2%	302	0,88	406	0,88
AN_4%	243	0,71	348	0,75
AO_2%	315	0,92	-	-
AO_4%	278	0,81	-	-
SBS	1832	-	1430	-
SBSN_2%	982	0,54	1162	0,81
SBSN_4%	835	0,46	1032	0,72
SBSO_2%	1125	0,61	-	-
SBSO_4%	901	0,49	-	-

Druhá část měření probíhala v rozsahu smykových rychlostí od 1 s^{-1} do 50 s^{-1} . I tady bylo možné posoudit závislost dynamické viskozity na smykové rychlosti. V grafu 14 jsou vyneseny křivky závislosti dynamické viskozity na smykové rychlosti nemodifikovaného silničního asfaltu 70/100. Od rychlosti 12 s^{-1} je průběh lineární, se zvyšující se smykovou rychlostí se viskozita nemění, asfalt se chová jako newtonovská látka.



Graf 14: Závislost dynamické viskozity na smykové rychlosti při teplotě $135 \text{ }^\circ\text{C}$ (u nemodifikovaných pojiv)

V grafu 15 jsou vyneseny křivky závislosti dynamické viskozity na smykové rychlosti polymerem modifikovaného asfaltu při teplotě $135 \text{ }^\circ\text{C}$. V případě polymerem modifikovaného asfaltu s přísadou SBS a stejného pojiva s 2% přísadou fluxační přísady dochází k poklesu dynamické viskozity v závislosti na smykové rychlosti, tyto asfalty se tudíž chovají jako nenewtonovská látka. Ostatní pojiva se chovala víceméně newtonovsky.



Graf 15: Závislost dynamické viskozity na smykové rychlosti při teplotě 135 °C (u modifikovaných pojiv)

6.4. Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu – Dynamický smykový reometr (DSR) dle ČSN EN 14770

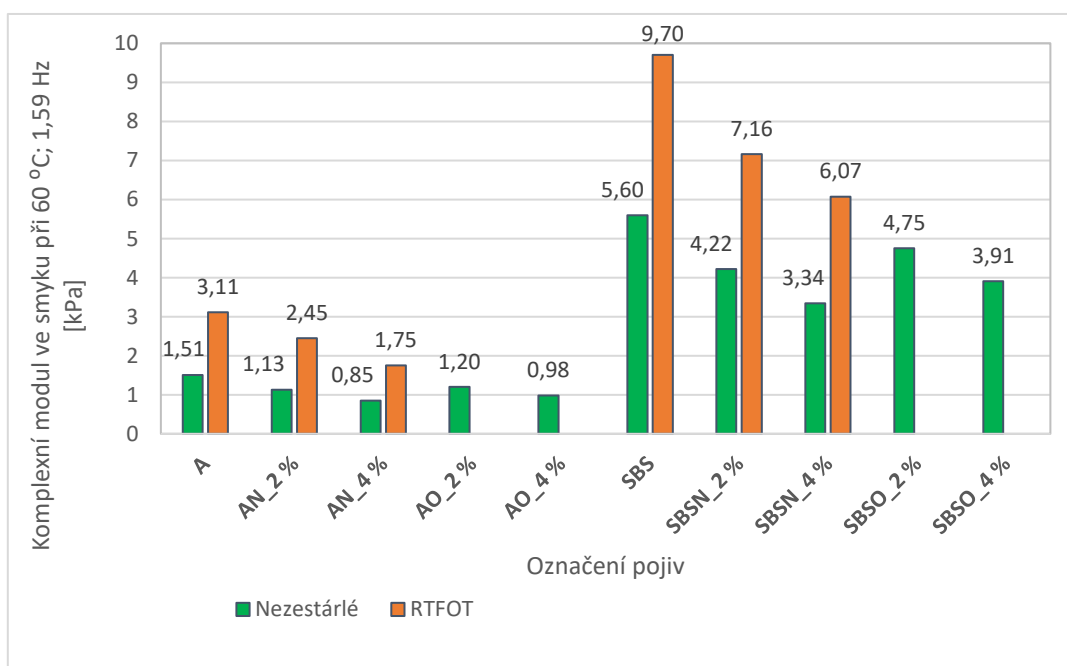
Komplexní modul ve smyku G^* a fázový úhel δ byl stanoven na základě měření v dynamickém smykovém reometru DSR při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz, s využitím geometrie deska – deska. Princip zkoušky byl popsán v kapitole 4.4. Komplexní smykový modul a fázový úhel byl stanoven na pojivech nezestárlých a zestárlých metodou RTFOF. Naměřené hodnoty jsou součástí tabulky 15 a 16. Pro lepší představu jsou hodnoty vyneseny do dvou sloupcových grafů 16 a 17.

Výchozí nezestárlý asfalt A (70/100) v porovnání s modifikovaným asfaltem SBS vykazuje několikanásobně nižší hodnotu komplexního smykového modulu a je tedy méně odolný vůči trvalým deformacím. Pojivo s přísadou SBS má lepší pružnost, což je patrné z nižších hodnot fázového úhlu. Fluxační přísady svou přítomností hodnoty komplexního modulu snižují, což můžeme vidět v grafu 16. Menší vliv je zaznamenán u aromatického oleje (AO, SBSO) než u naftenického oleje (AN, SBSN).

Po zestárnutí metodou RTFOF došlo ke značnému nárůstu hodnot komplexního smykového modulu. U nemodifikovaných pojiv je navýšení oproti nezestárlému pojivu více jak dvojnásobné. Modifikovaná pojiva jsou o něco méně citlivá na proces stárnutí. Komplexní smykový modul byl u výchozího asfaltu A navýšen 2,06 krát; modifikovaný asfalt SBS 1,73 krát.

Tabulka 15: Hodnoty komplexního modulu ve smyku (60 °C; 1,59 Hz)

Označení pojiv	Komplexní modul ve smyku při 60 °C; 1,59 Hz [kPa]	Komplexní modul ve smyku při 60 °C; 1,59 Hz [kPa] po RTFOT
A	1,51	3,11
AN_2 %	1,13	2,45
AN_4 %	0,85	1,75
AO_2 %	1,20	-
AO_4 %	0,98	-
SBS	5,60	9,70
SBSN_2 %	4,22	7,16
SBSN_4 %	3,34	6,07
SBSO_2 %	4,75	-
SBSO_4 %	3,91	-



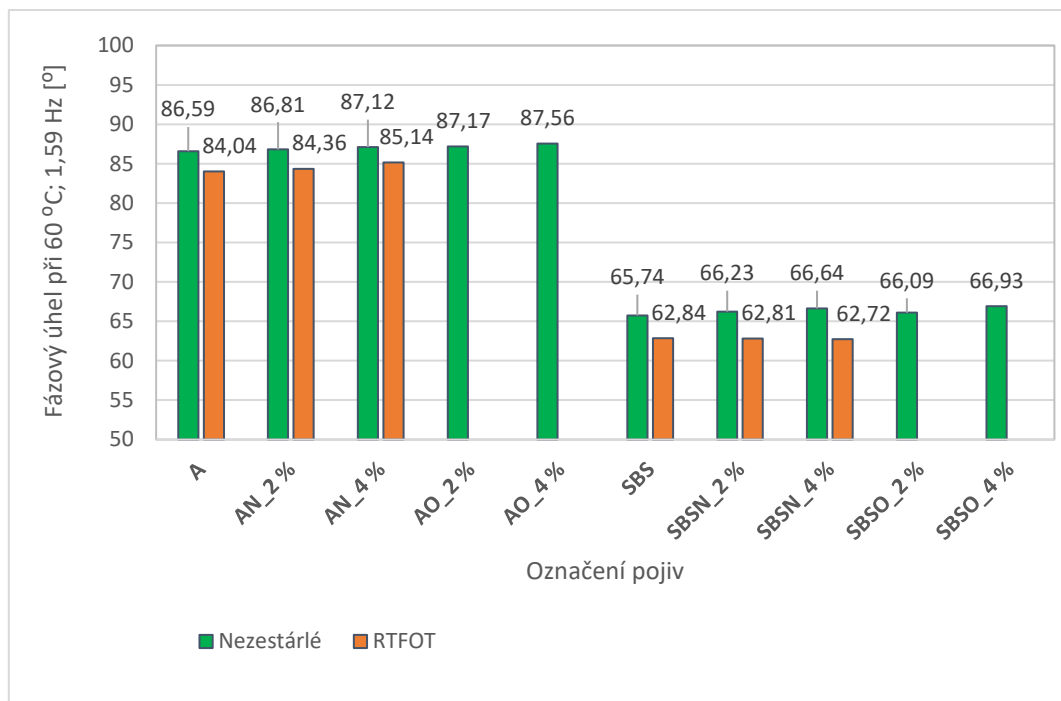
Graf 16: Hodnoty komplexního modulu ve smyku (60 °C; 1,59 Hz)

V grafu 17 byly vyneseny všechny hodnoty fázových úhlů, které jsou přehledně zapsány v tabulce 16. U nemodifikovaného pojiva převládá plastická složka, fázový úhel se pohybuje v rozmezí od 86,59° do 87,56°, δ se tedy blíží 90°. Jak už bylo zmíněno v předchozím odstavci, fluxační přísady pojiva tzv. naředují a zvyšují tedy hodnoty fázového úhlu. U modifikovaných nezestárých pojiv jsou hodnoty fázového úhlu od 65,74° do 66,93°. Pojiva vykazují elastičtější chování, navrací se do svého původního tvaru více než nemodifikovaná pojiva, jsou tedy pružnější. Díky fluxačním pojivům dochází k malému nárůstu fázového úhlu. Největší změna je zaznamenána u pojiva SBSO 4 %, aromatický olej zvyšuje fázový úhel o 1,19° v porovnání s pojivem SBS.

Vlivem stárnutí dochází ke snížení fázového úhlu u všech zestárých pojiv. Asfalty se stávají tvrdší, ale také křehčí. U výchozího asfaltu A je pokles o 2,55°. u SBS je pokles o 2,9° v porovnání s nezestárým pojivem. Lze si ale všimnout, že modifikovaná pojiva s obsahem naftenického oleje nejsou tak náchylná na stárnutí jako modifikované asfaltové pojivo. Jejich fázový úhel je dokonce nižší než fázový úhel SBS po stárnutí.

Tabulka 16: Hodnoty fázového úhlu (60 °C; 1,59 Hz)

Označení pojiv	Fázový úhel při 60 °C; 1,59 Hz [°]	Fázový úhel při 60 °C; 1,59 Hz [°] po RTFOT
A	86,59	84,04
AN_2 %	86,81	84,36
AN_4 %	87,12	85,14
AO_2 %	87,17	-
AO_4 %	87,56	-
SBS	65,74	62,84
SBSN_2 %	66,23	62,81
SBSN_4 %	66,64	62,72
SBSO_2 %	66,09	-
SBSO_4 %	66,93	-

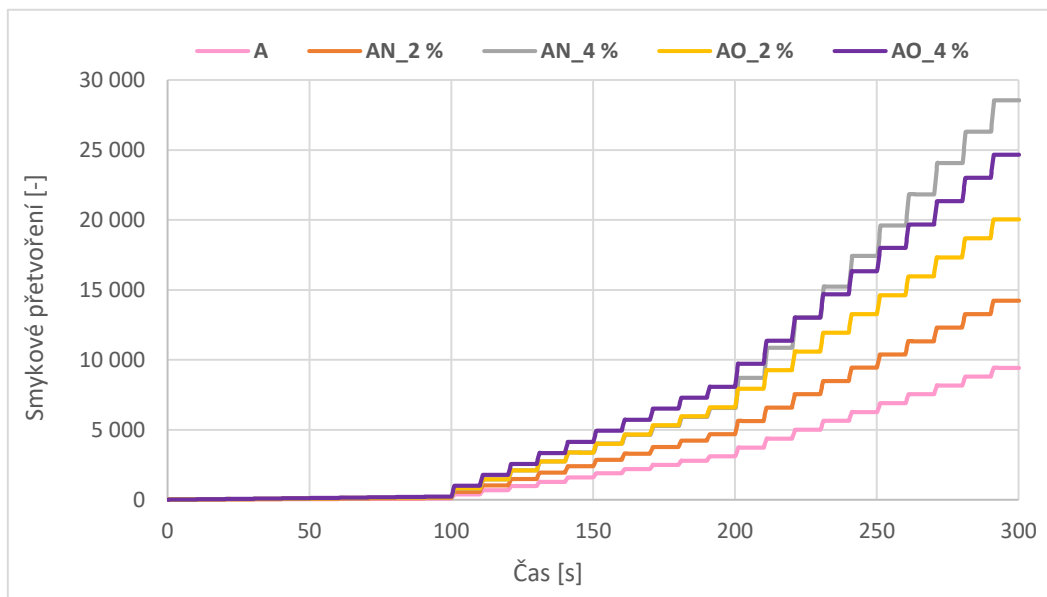


Graf 17: Hodnoty fázového úhlu (60 °C; 1,59 Hz)

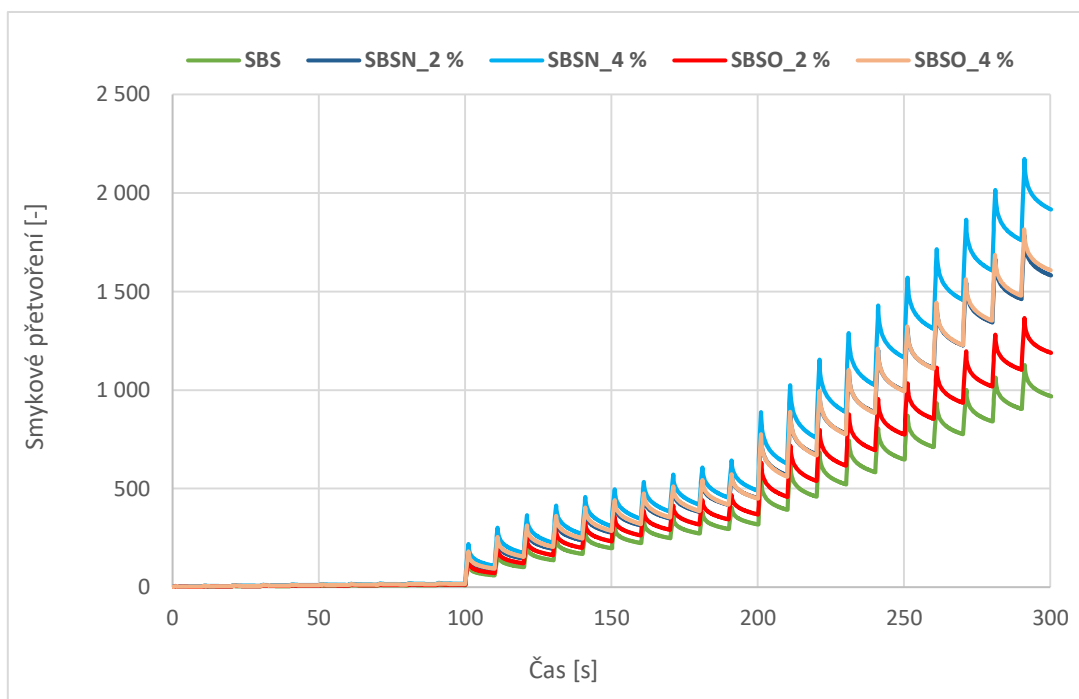
6.5. Zkouška MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery Test) dle ČSN EN 16659

Další zkouška prováděná v dynamickém smykovém reometru byla zkouška MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery Test), kterou shrnuje kapitola 4.5.

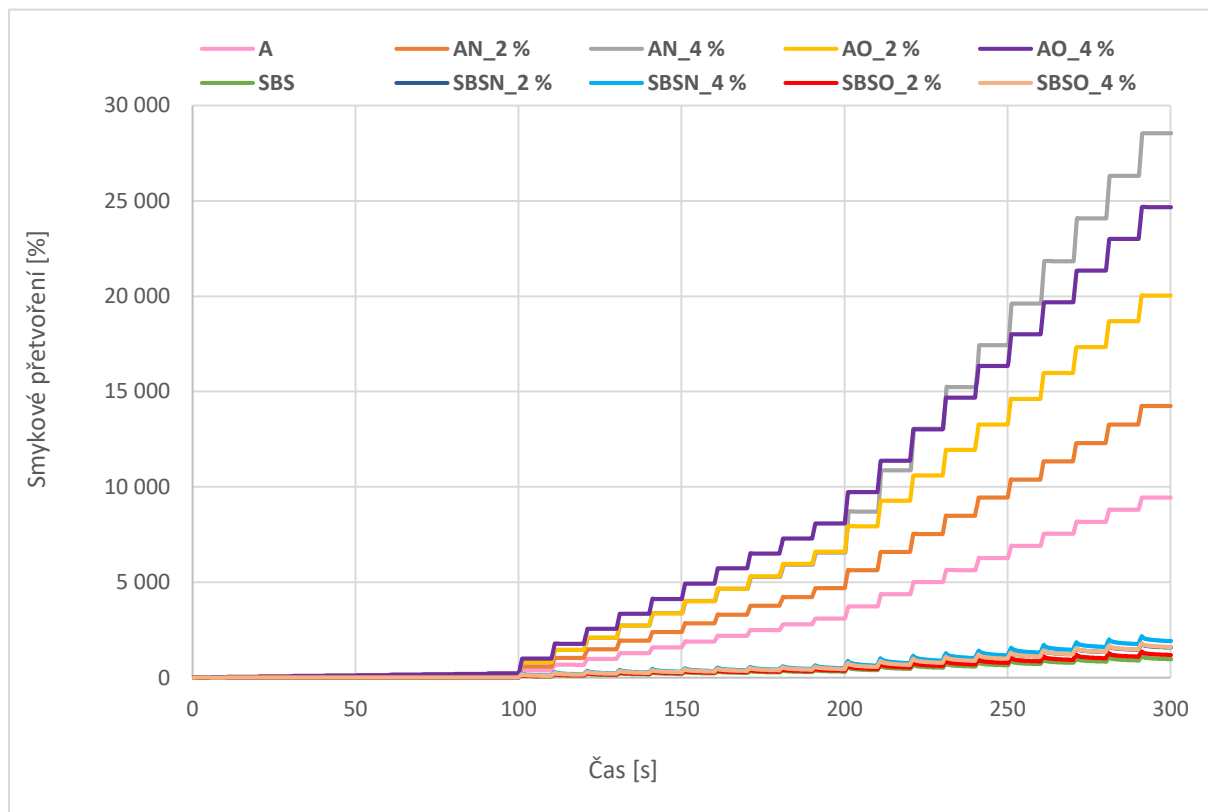
Grafy 18 – 20 zobrazují schodovitý průběh měření při teplotě 50 °C. Smykové přetvoření u zatěžovacího cyklu 0,1 kPa je nepatrné, přetvoření se projevuje od času 100 s, kdy se mění cyklus smykového napětí na 3,2 kPa a následuje zatížení 10 kPa. V grafu 18 lze vidět, že největší smykové přetvoření nastává u nemodifikovaného pojiva s příměsí 4 % fluxačních přísad (AN_4 % a AO_4 %). V grafu 19 lze tento jev také vidět, a to u modifikovaného pojiva s příměsí 4 % fluxačních přísad (SBSN_4 % a SBSO_4 %). Všechny průběhy zkoušek MSCR jak na modifikovaných, tak na nemodifikovaných pojivech, jsou součástí grafu 20. Smykové přetvoření nemodifikovaných pojiv je mnohonásobně vyšší než u modifikovaných asfaltových pojiv.



Graf 18: Průběh zkoušky MSCR při 50 °C nemodifikovaných asfaltových pojiv



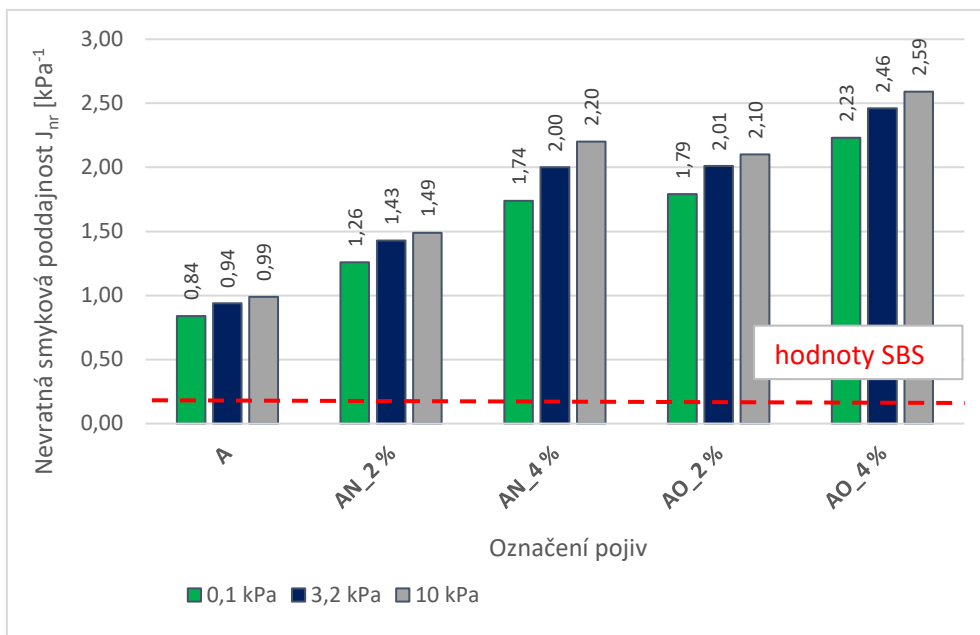
Graf 19: Průběh zkoušky MSCR při 50 °C modifikovaných asfaltových pojiv



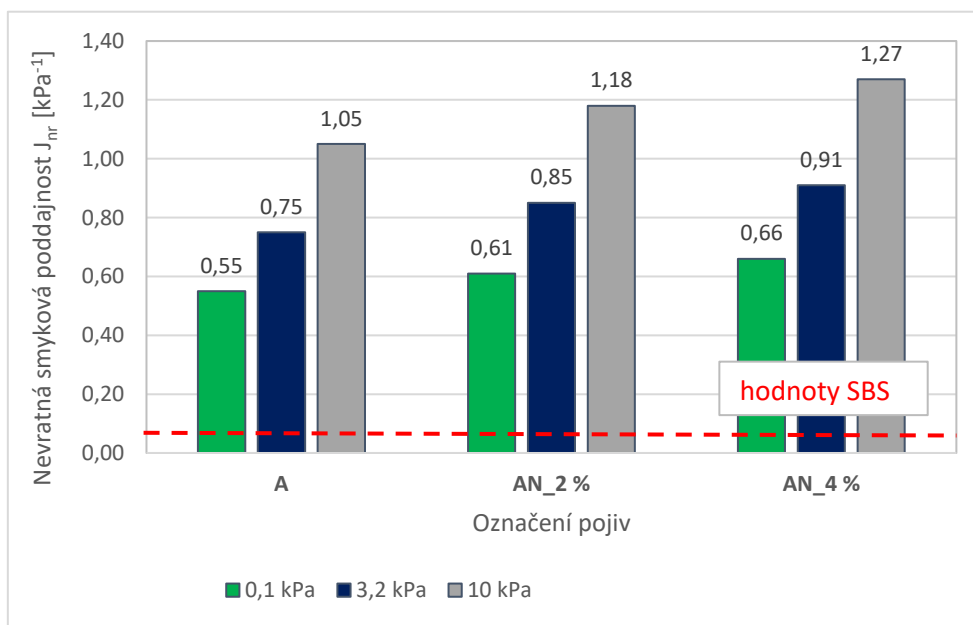
Graf 20: Průběh zkoušky MSCR při 50 °C všech zkoušených asfaltových pojiv

V následujících grafech 21 – 24 jsou vyneseny hodnoty nevratné smykové poddajnosti J_{nr} u nezestárých a zestárých asfaltových pojiv. Čím nižší je hodnota J_{nr} , tím je asfaltové pojivo méně poddajné a tím pádem více odolné vůči tvorbě trvalých deformací. V grafech si lze povšimnout rostoucí tendence, čím vyšší smykové zatížení, tím vyšší nevratná smyková poddajnost. Mnohem horší výsledky má silniční asfalt než polymrem modifikovaný asfalt, který je díky obsahu polymeru elastičtější. Fluxační přísady u MSCR testu zvyšují hodnotu J_{nr} .

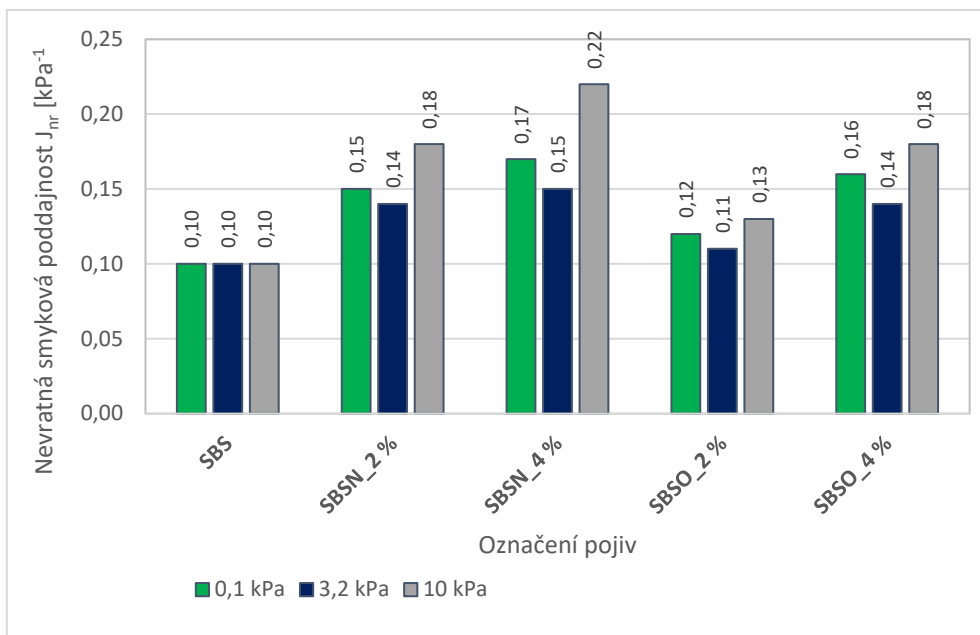
Stárnutím RTFOT se nevratná smyková poddajnost snižuje.



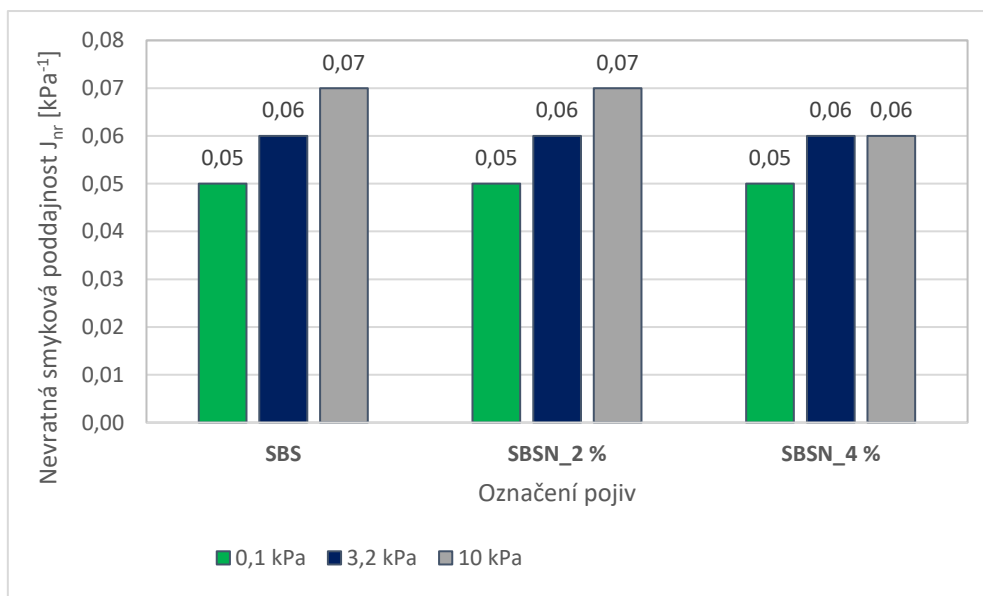
Graf 21: Nevratná smyková poddajnost J_{nr} při teplotě 50 °C u nemodifikovaných asfaltových pojiv



Graf 22: Nevratná smyková poddajnost J_{nr} při teplotě 50 °C u nemodifikovaných asfaltových pojiv **po RTFOT**



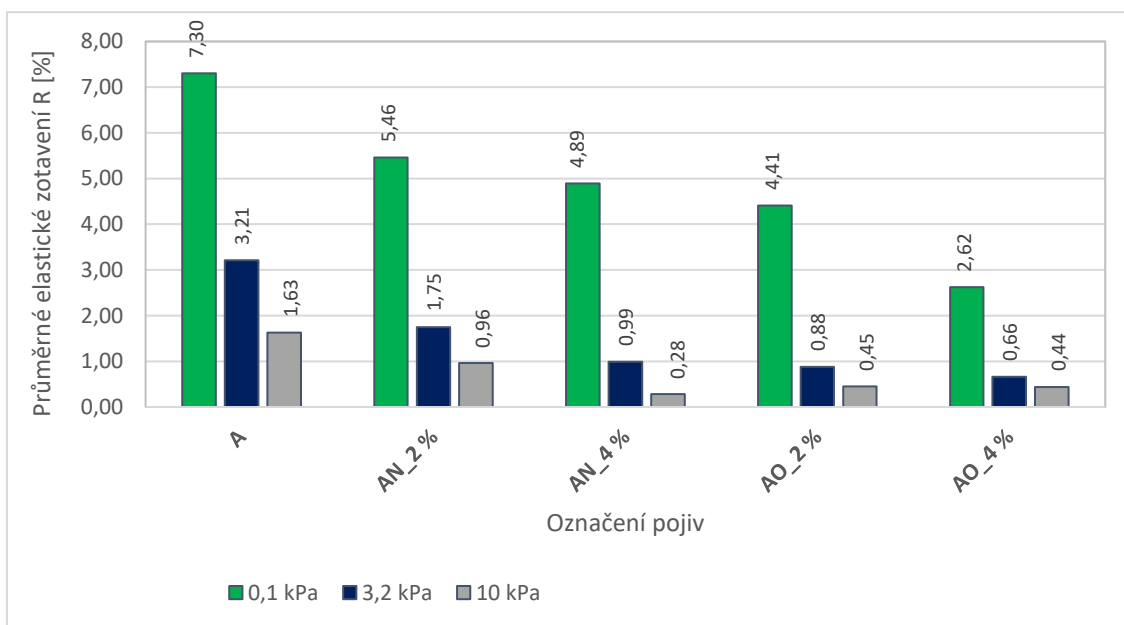
Graf 23: Nevratná smyková poddajnost J_{nr} při teplotě 50 °C u modifikovaných asfaltových pojiv



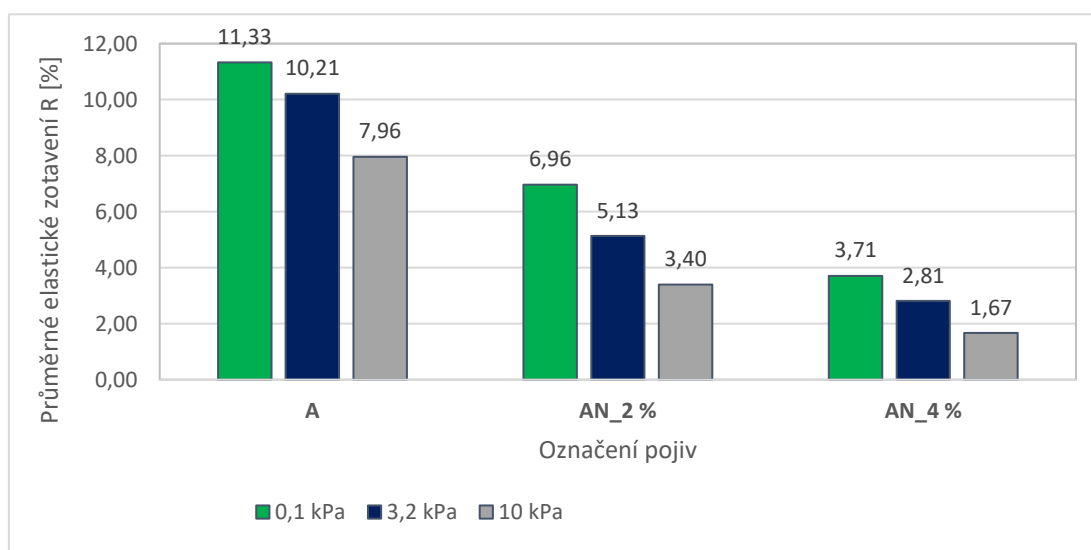
Graf 24: Nevratná smyková poddajnost J_{nr} při teplotě 50 °C u modifikovaných asfaltových pojiv **po RTFOT**

V následujících grafech 25 – 28 jsou vyneseny hodnoty průměrného elastického zotavení u nezestárých a zestárých asfaltových pojiv. Průměrné elastické zotavení [%] říká, nakolik se pojivo poměrově vrací do původního stavu. Čím jsou hodnoty vyšší, tím je asfaltové pojivo odolnější vůči tvorbě trvalých deformací.

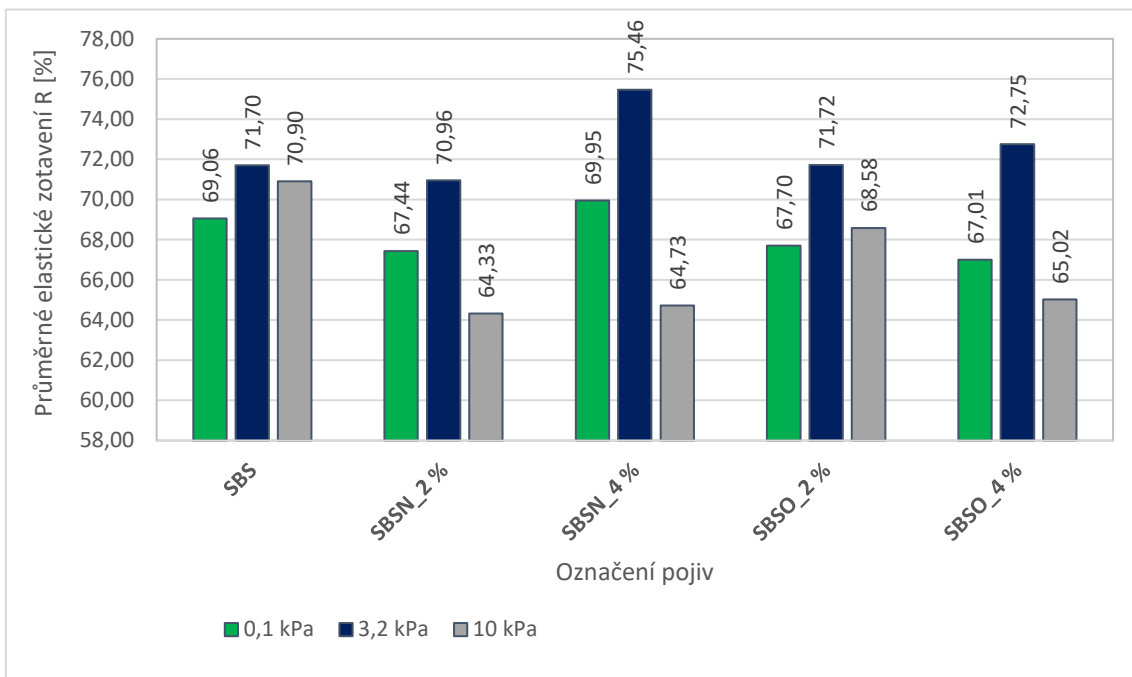
Z grafů je patrné, že elastické zotavení při všech zatěžovacích cyklech je nejvyšší u polymerem modifikovaných asfaltů. Po stárnutí RTFOT se elastické zotavení u všech pojiv mírně zvyšuje. Nemodifikované pojivo se chová jako newtonovská látka, čím je smykové napětí vyšší, tím se pojivo méně navrácí do svého původního stavu. Fluxační přísady snižují elastické zotavení, pojivo se stává plastičtější. Modifikované asfalty se chovají jako nenewtonovská látka. Smykové zatížení zvýšené z 0,1 kPa na 3,2 kPa má pozitivní vliv (dochází k tzv. předepnutí polymerního řetězce), zatížení 10 kPa je ale již příliš vysoké, elastické zotavení klesá.



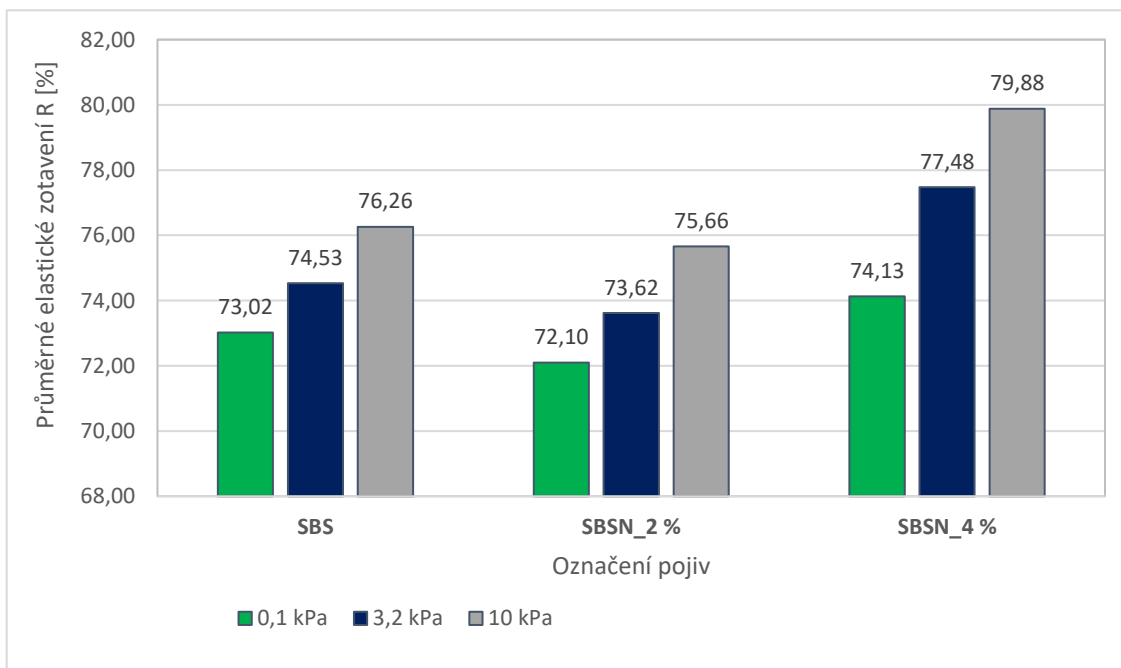
Graf 25: Průměrné elastické zotavení R při teplotě 50 °C u nemodifikovaných asfaltových pojiv



Graf 26: Průměrné elastické zotavení R při teplotě 50 °C u nemodifikovaných asfaltových pojiv **po RTFOT**



Graf 28: Průměrné elastické zotavení R při teplotě 50 °C u modifikovaných asfaltových pojiv



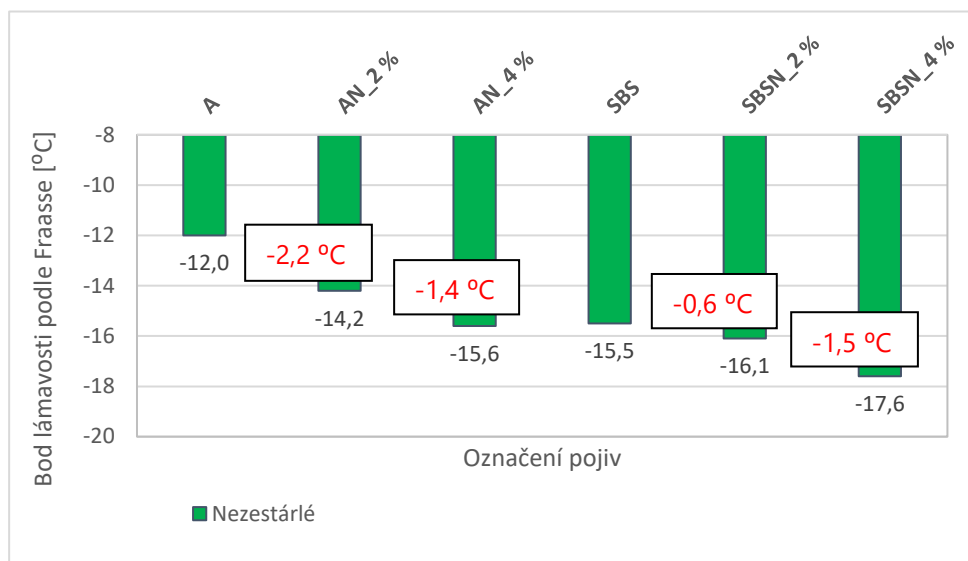
Graf 27: Průměrné elastické zotavení R při teplotě 50 °C u modifikovaných asfaltových pojiv **po RTFOT**

6.6. Stanovení bodu lámavosti podle Fraasse dle ČSN EN 12593

Pro stanovení nízkoteplotních vlastností asfaltových pojiv byla použita empirická zkouška stanovení bodu lámavosti podle Fraasse, která je popsána v kapitole 4.6. U každého vzorku asfaltového pojiva byla provedena dvě měření a výsledky byly zprůměrovány a zapsány do tabulky 17 a vyneseny do grafu 29. V normě ČSN 65 7204 Asfalty a asfaltová pojiva – Silniční asfalty je pro pojivo 70/100 stanoven požadavek pro bod lámavosti dle Fraasse ≤ -10 °C, v normě ČSN 65 7222-1 Asfalty a asfaltová pojiva – Silniční modifikované asfalty – Část 1: Polymerem modifikované asfalty pro pojivo 45/80-55 hodnota ≤ -15 °C. V tabulce 17 můžeme vidět, že všechna pojiva vyhověla přísným požadavkům těchto norem. Ze sloupcového grafu 29 je jasně patrné, že se na modifikovaném pojivu objevila první trhлина při nižší teplotě než u normálního silničního asfaltu 70/100. Fluxační přísada má pozitivní vliv na nízkoteplotní vlastnosti, snižuje hodnoty bodu lámavosti. Bod lámavosti podle Fraasse byl naměřen pouze u asfaltových pojiv s naftenickým olejem NYTEX 820. Velikost poklesu teploty bodu lámavosti přidáním naftenického oleje je zaznamenán v grafu 29.

Tabulka 17: Hodnoty bodu lámavosti podle Fraasse

Označení pojiv	Bod lámavosti podle Fraasse [°C]	Bod lámavosti podle Fraasse – požadavek norem (ČSN 65 7204; ČSN 65 7222-1) [°C]
A	-12,0	≤ -10
AN_2 %	-14,2	
AN_4 %	-15,6	
SBS	-15,5	≤ -15
SBSN_2 %	-16,1	
SBSN_4 %	-17,6	



Graf 29: Hodnoty bodu lámavosti podle Fraasse

6.7. Změna hmotnosti vlivem tepla a vzduchu – Část 1: Metoda RTFOT dle ČSN EN 12607-1

Změna hmotnosti vlivem působení tepla a vzduchu byla zjišťována u modifikovaného asfaltu a modifikovaného asfaltu s obsahem 2 % a 4 % naftenického oleje (zkouška RTFOT – pojivo s 2 % a 4 % aromatického oleje nebyla součástí diplomové práce). Na základě vážení skleněných nádobek s asfaltovým pojivem před a po proběhnutí krátkodobého stárnutí asfaltových pojiv byla dle rovnice z normy ČSN EN 12607-1 vypočítána změna hmotnosti. Všechny údaje jsou zaznamenány v tabulce 18.

U modifikovaného asfaltu došlo k nepatrnému nárůstu hmotnosti, v průměru o 0,01 %. Termooxidační stárnutí vyvolalo chemickou reakci, která vedla k zabudování kyslíkových atomů do organických uhlovodíkových molekul.

U modifikovaných asfaltů s fluxační přísadou došlo naopak k malému poklesu hmotnosti. Je to typický jev, oleje jsou těkavější. Během termooxidačního stárnutí dochází k jejich vypařování. U pojiva s 2 % fluxační přísady se vypařilo 0,03 %, u pojiva se 4 % fluxační přísady se vypařilo 0,13 %.

Změna hmotnosti do 0,5 % je přijatelná, můžeme tedy říci, že jsou oleje stabilní.

Tabulka 18: Změna hmotnosti vlivem tepla a vzduchu

Označení pojiv	m_0	m_1	m_2	změna hmotnosti [%]	průměrná změna hmotnosti [%]
SBS	156,298	191,303	191,306	0,009	0,01
	165,574	200,606	200,608	0,006	
	160,000	195,029	195,036	0,020	
	150,870	185,868	185,869	0,003	
SBSN_2 %	154,650	189,702	189,691	-0,031	-0,03
	164,939	199,908	199,898	-0,029	
	167,373	202,396	202,384	-0,034	
	162,313	197,379	197,376	-0,009	
SBSN_4 %	164,577	199,672	199,629	-0,123	-0,13
	166,742	201,732	201,693	-0,111	
	157,857	193,110	193,054	-0,159	
	150,732	185,965	185,924	-0,116	

6.8. Stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru (BBR) dle ČSN EN 14771

Další zkouška zabývající se stanovením nízkoteplotních vlastností asfaltových pojiv byla funkční zkouška stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru (BBR), která je popsána v kapitole 4.8. Úkolem měření bylo určit teplotu, při které je modul tuhosti za ohybu $S_m(60) = 300$ MPa a m-hodnota $m(60) = 0,3$. Větší z hodnot ($S_m(60)$ a m-hodnota) je tzv. kritická teplota. Podle předešlých výzkumů se předpokládá, že při teplotě o 10 °C nižší, než je kritická teplota, hrozí vznik mrazových trhlin. [11, 21]

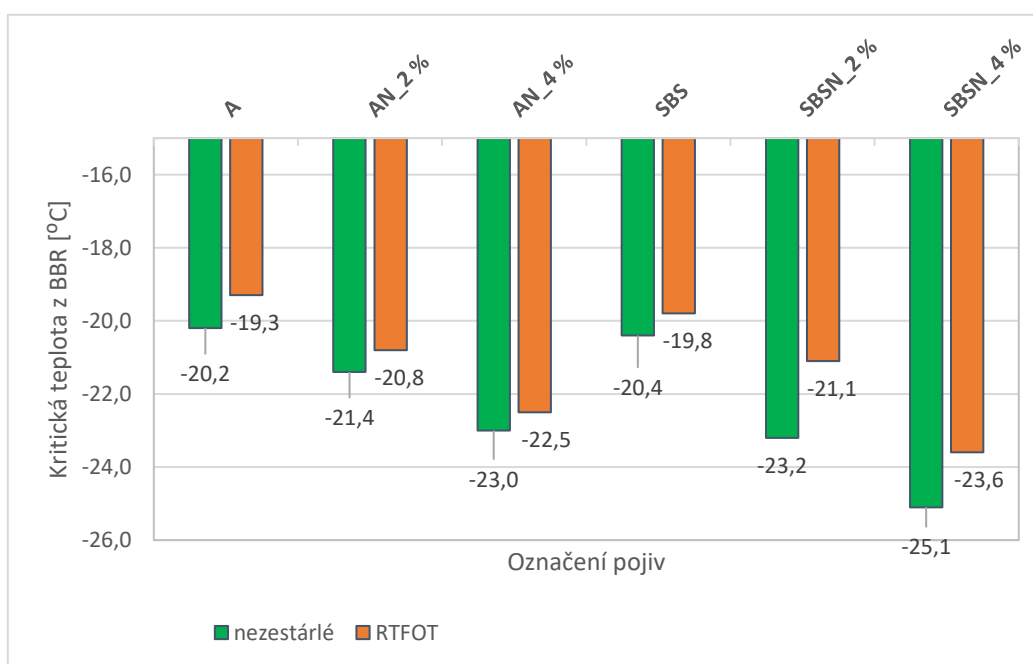
Kritické teploty jsou zaznamenány v tabulce 19 a znázorňuje je graf 30. Je patrné, že oleje pozitivně ovlivňují nízkoteplotní vlastnosti asfaltových pojiv. Větší množství fluxační přísady snižuje kritickou teplotu, pojivo se stává odolnějším a méně náchylné na vznik mrazových trhlin. U silničního asfaltu s 2 % fluxačního činidla je změna teploty -1,2 °C, se 4 % přísady je změna -2,8 °C. U modifikovaného asfaltu s 2 % fluxační přísady je změna teploty -2,8 °C, se 4 % přísady je změna -4,7 °C. Stárnutím RTFOT se pojivo stává křehčím, i když

zvýšení kritické teploty oproti nezestárlým pojivům nabývalo poměrně nízkých hodnot (- 19,3 °C až -23,6 °C).

Nejnižší kritická teplota je -19,3 °C u obyčejného silničního asfaltu 70/100 po stárnutí RTFOT. Nejlepší výsledek je sledován u modifikovaného asfaltového pojiva se 4 % fluxačního naftenického oleje, kritická teplota dosahuje -25,1 °C.

Tabulka 19: Hodnoty kritických teplot dle BBR

Označení pojiv	Kritická teplota z BBR [°C]	Kritická teplota z BBR [°C] RTFOT
A	-20,2	-19,3
AN_2 %	-21,4	-20,8
AN_4 %	-23,0	-22,5
SBS	-20,4	-19,8
SBSN_2 %	-23,2	-21,1
SBSN_4 %	-25,1	-23,6



Graf 30: Hodnoty kritických teplot dle BBR

6.9. Stanovení skladovací stability modifikovaných asfaltů dle ČSN EN 13399

Skladovací stabilita se zjišťovala na modifikovaných asfaltech, zkouška trvala tři dny. Asfalt z vrchní a spodní části tuby sloužil ke stanovení bodu měknutí a dynamické viskozity. Měřily se rozdíly mezi těmito dvěma částmi (horní a spodní). Díky tomu, že je polymer lehčí, plave a má tendenci migrovat do horní části tuby, což poté ovlivňuje výsledky zkoušek. Stejnou vlastnost bylo možné očekávat i v případě přidání fluxační přísady. Jak je ale vidět v tabulkách 20 a 21 rozdíly jsou velice malé. Předpokládá se, že by vrchní část měla mít vyšší teplotu bodu měknutí a vyšší viskozitu. Tento jev je vidět u polymerem modifikovaného asfaltu od výrobce se 4 % fluxační přísady NYTEX 820. V ostatním případech jsou hodnoty téměř totožné, všechna zkoušená asfaltová pojiva jsou stabilní.

Tabulka 20: Hodnoty bodu měknutí po měření skladovací stability

		KK1	KK2	ØKK	Dif. KK
PMBN_2 %	VR	66,4	67,1	66,8	0,1
	SP	65,9	67,7	66,8	
PMBN_4 %	VR	65,0	65,0	65,0	2,1
	SP	62,9	63,0	63,0	
SBSN_2 %	VR	69,8	70,5	70,2	0,3
	SP	69,5	70,2	69,9	
SBSN_4 %	VR	69,5	69,7	69,6	0,8
	SP	69,5	71,2	70,4	

Tabulka 21: Komplexní modul ve smyku a fázový úhel po měření skladovací stability

		G*	δ	G*	Dif. Δ
PMBN_2 %	VR	3,5	64,2	0,1	0
	SP	3,4	64,3		
PMBN_4 %	VR	2,7	64,6	0,1	0
	SP	2,59	64,6		
SBSN_2 %	VR	3,90	62,32	0,0	0
	SP	3,87	62,30		
SBSN_4 %	VR	2,79	62,11	-0,2	0
	SP	3,02	62,38		

6.10. Souhrnné výsledky laboratorních zkoušek

V tabulkách 22 až 24 jsou přehledně shrnuty všechny dosažené výsledky laboratorních zkoušek nezestárých i zestárých asfaltových pojiv.

Tabulka 22: Souhrnné výsledky zkoušených pojiv – část 1

Zkoušky	Penetrace jehlou		Bod měknutí		Dynamická viskozita η při 135 °C ($\gamma=6,8s^{-1}$)		Dynamická viskozita η při 135 °C ($\gamma=18,6s^{-1}$)		Komplexní modul ve smyku při 60 °C; 1,59 Hz		Fázový úhel při 60 °C; 1,59 Hz	
		RTFOT		RTFOT		RTFOT		RTFOT		RTFOT		RTFOT
Označení pojiv	[p.j.]		[°C]		[mPa.s]		[mPa.s]		[kPa]		[°]	
A	88	49	46,7	52,2	342	463	344	469	1,51	3,11	86,59	84,04
AN_2 %	101	56	44,8	50,8	302	406	301	406	1,13	2,45	86,81	84,36
AN_4 %	127	70	42,4	48,8	243	348	244	351	0,85	1,75	87,12	85,14
AO_2 %	83	-	46,5	-	315	-	316	-	1,20	-	87,17	-
AO_4 %	96	-	45,5	-	278	-	280	-	0,98	-	87,56	-
SBS	55	39	62,4	66,2	1832	1430	1425	1422	5,60	9,70	65,74	62,84
SBSN_2 %	68	46	60,0	65,7	982	1162	982	1167	4,22	7,16	66,23	62,81
SBSN_4 %	81	56	57,8	65,5	835	1032	838	1032	3,34	6,07	66,64	62,72
SBSO_2 %	60	-	60,2	-	1125	-	1078	-	4,75	-	66,09	-
SBSO_4 %	68	-	58,8	-	901	-	908	-	3,91	-	66,93	-

Tabulka 23: Souhrnné výsledky zkoušených pojiv – část 2

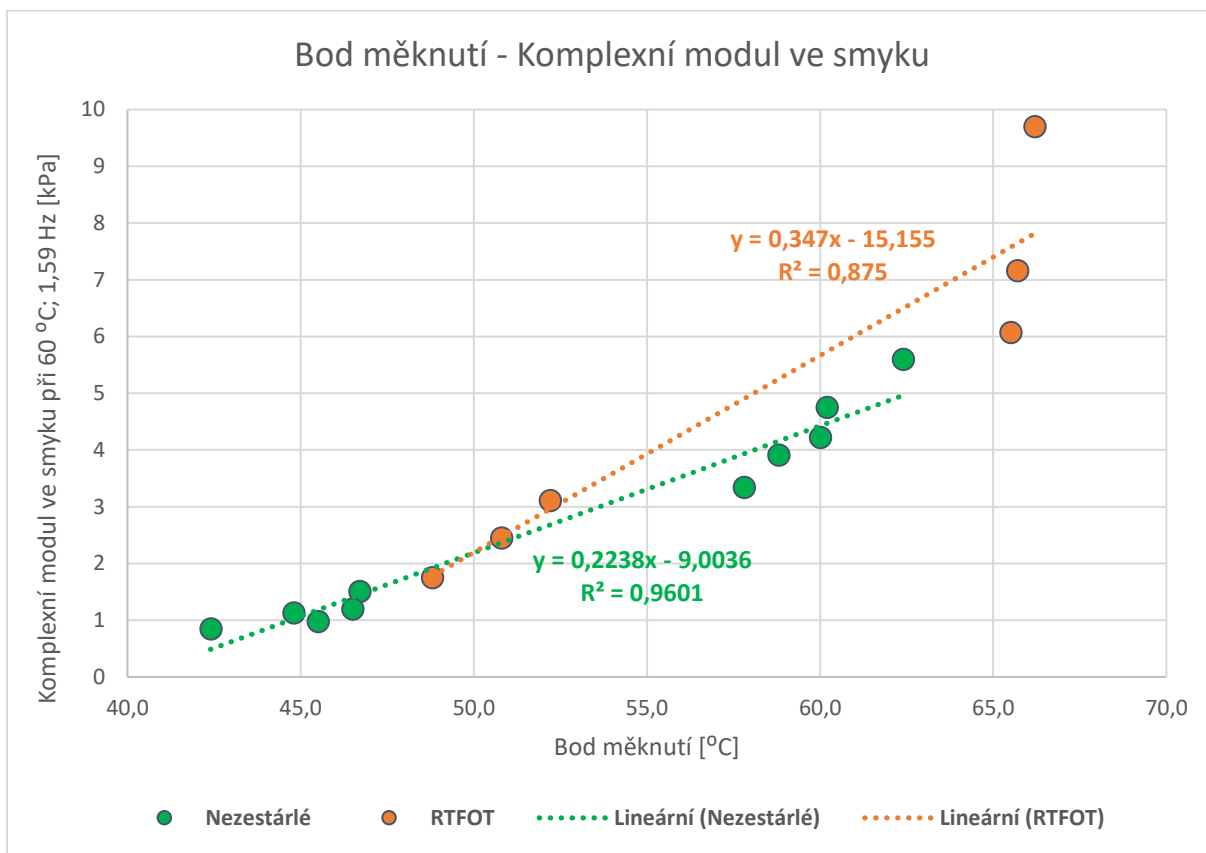
Zkoušky	MSCR 50 °C; 0,1 kPa				MSCR 50 °C; 3,2 kPa				MSCR 50 °C; 10 kPa			
			RTFOT				RTFOT				RTFOT	
Označení pojiv	$J_{nr0,1}$ [kPa ⁻¹]	$R_{0,1}$ [%]	$J_{nr0,1}$ [kPa ⁻¹]	$R_{0,1}$ [%]	$J_{nr3,2}$ [kPa-1]	$R_{3,2}$ [%]	$J_{nr3,2}$ [kPa-1]	$R_{3,2}$ [%]	J_{nr10} [kPa-1]	R_{10} [%]	J_{nr10} [kPa-1]	R_{10} [%]
A	0,84	7,30	0,55	11,33	0,94	3,21	0,61	6,96	0,99	1,63	0,66	3,71
AN_2 %	1,26	5,46	0,75	10,21	1,43	1,75	0,85	5,13	1,49	0,96	0,91	2,81
AN_4 %	1,74	4,89	1,05	7,96	2,00	0,99	1,18	3,40	2,20	0,28	1,27	1,67
AO_2 %	1,79	4,41	-	-	2,01	0,88	-	-	2,10	0,45	-	-
AO_4 %	2,23	2,62	-	-	2,46	0,66	-	-	2,59	0,44	-	-
SBS	0,10	69,06	0,05	73,02	0,10	71,70	0,05	72,10	0,10	70,90	0,05	74,13
SBSN_2 %	0,15	67,44	0,06	74,53	0,14	70,96	0,06	73,62	0,18	64,33	0,06	77,48
SBSN_4 %	0,17	69,95	0,07	76,26	0,15	75,46	0,07	75,66	0,22	64,73	0,06	79,88
SBSO_2 %	0,12	67,70	-	-	0,11	71,72	-	-	0,13	68,58	-	-
SBSO_4 %	0,16	67,01	-	-	0,14	72,75	-	-	0,18	65,02	-	-

Tabulka 24: Souhrnné výsledky zkoušených pojiv – část 3

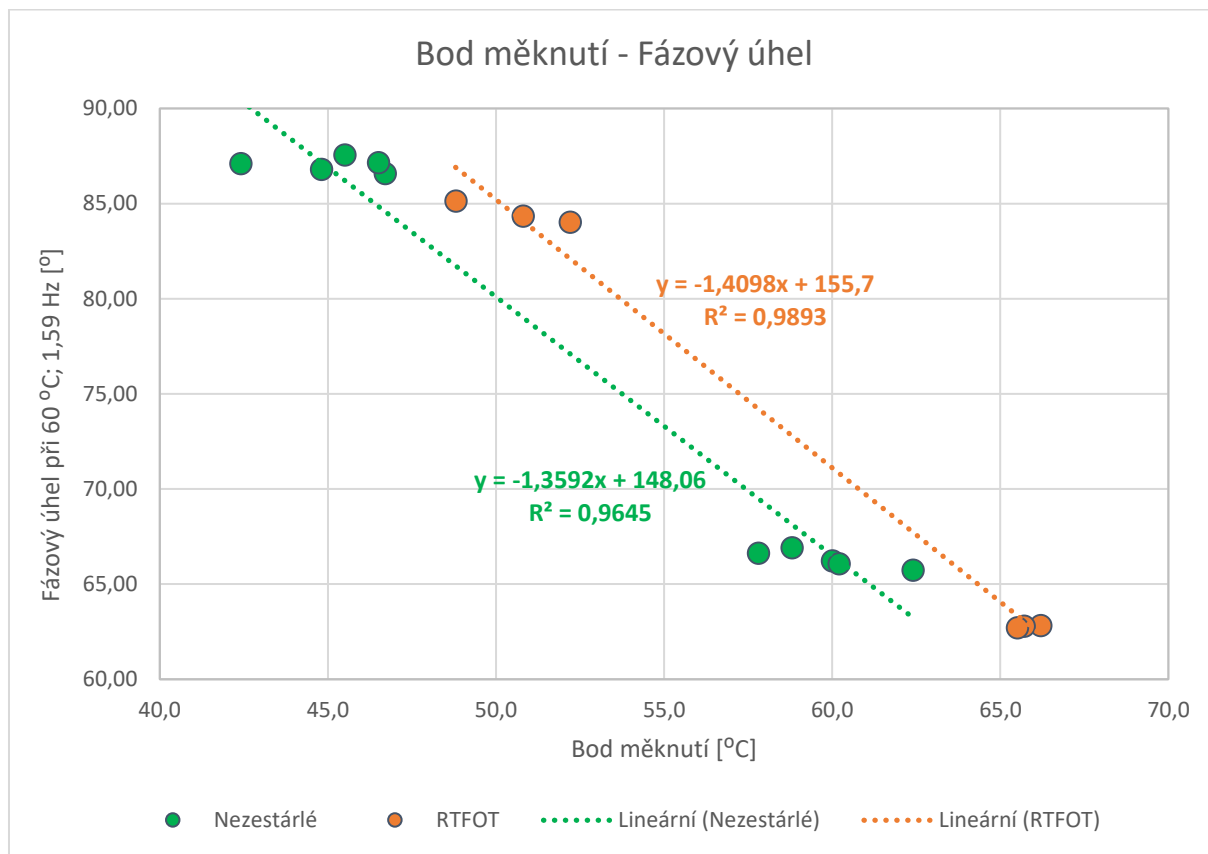
Zkoušky	Bod lámavosti podle Fraasse	Změna hmotnosti po RTFOT	Kritická teplota z BBR [°C]		Skladovací stabilita					
					Bod měknutí		Komplexní modul ve smyku při 60 °C; 1,59 Hz		Fázový úhel při 60 °C; 1,59 Hz	
					VR	SP	VR	SP	VR	SP
Označení pojiv	[°C]	[%]	[°C]		[°C]		[kPa]		[°]	
A	-12,0	-	-20,2	-19,3	-	-	-	-	-	-
AN_2 %	-14,2	-	-21,4	-20,8	-	-	-	-	-	-
AN_4 %	-15,6	-	-23,0	-22,5	-	-	-	-	-	-
SBS	-15,5	0,01	-20,4	-19,8	-	-	-	-	-	-
SBSN_2 %	-16,1	-0,03	-23,2	-21,1	70,2	69,9	3,9	3,87	62,32	62,3
SBSN_4 %	-17,6	-0,13	-25,1	-23,6	69,6	70,4	2,79	3,02	62,11	62,38

6.11. Korelace výsledků

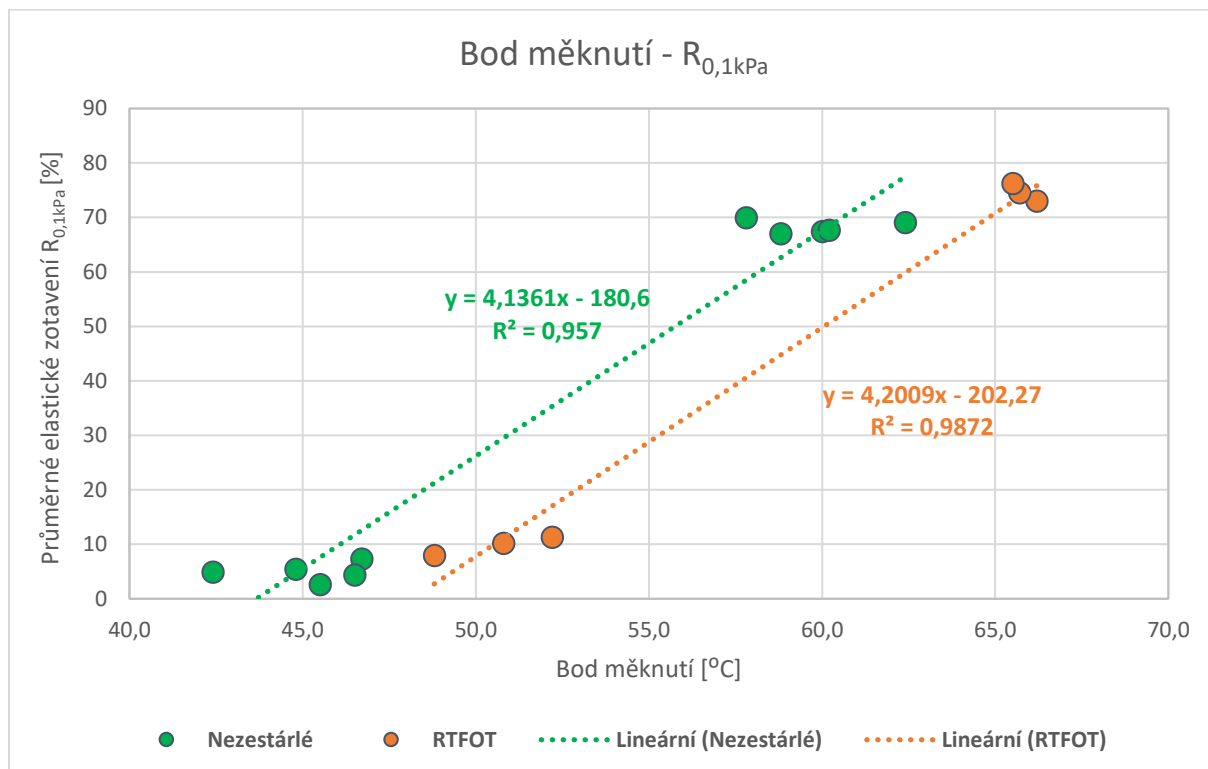
Tato kapitola se věnuje korelacím mezi všemi provedenými zkouškami. Jednotlivé závislosti jsou vyjádřeny rovnicemi regresní funkce y a korelačním součinitelem R^2 . Pokud se korelační součinitel blíží hodnotě 1, pak se jedná o silnou závislost. Naopak pokud se hodnota blíží 0, závislost neexistuje. V následujících grafech 31 – 43 jsou znázorněny zkoušky, mezi kterými byly zjištěny nejsilnější korelace zvláště pro výsledky nezestárlých pojiv a pojiv zestárlých metodou RTFOT. Všechny korelační součinitele R^2 jsou přehledně zapsány v tabulce 25. Je patrné, že ne všechny zkoušky jsou vzájemně závislé.



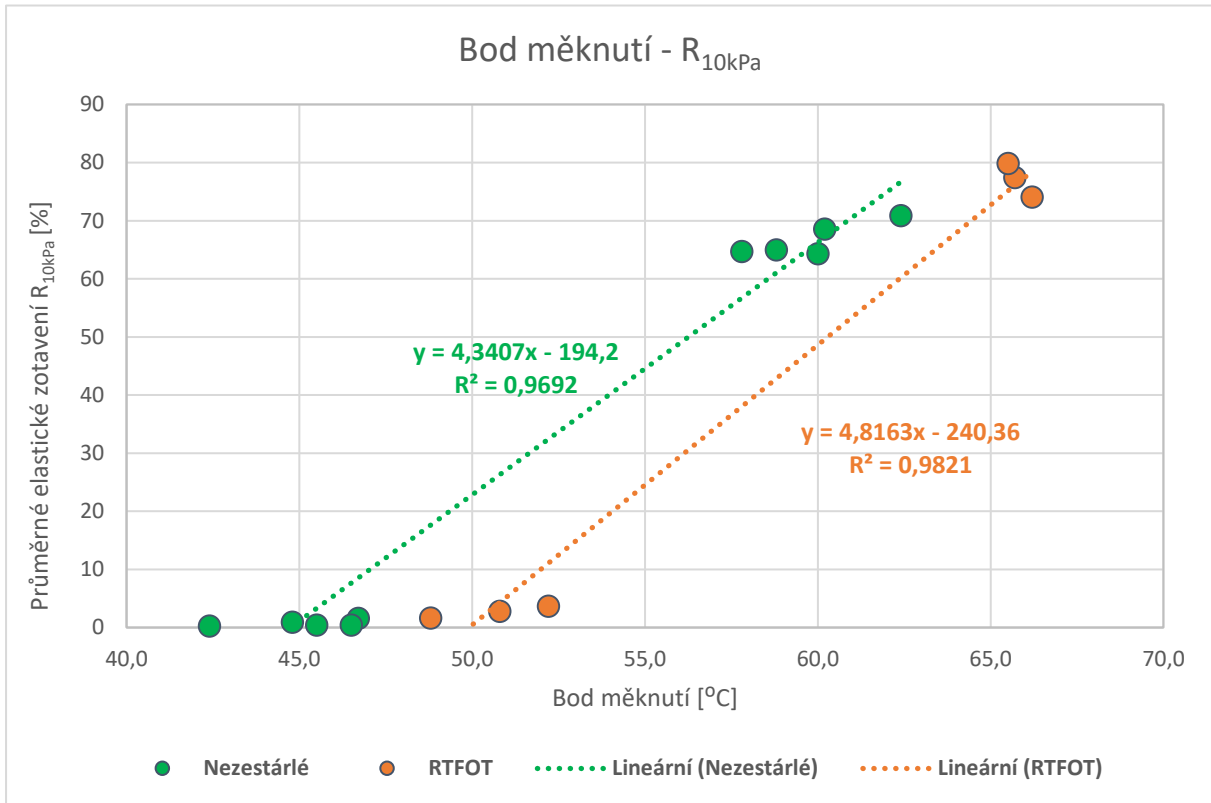
Graf 31: Závislost mezi bodem měknutí a komplexním modulem ve smyku



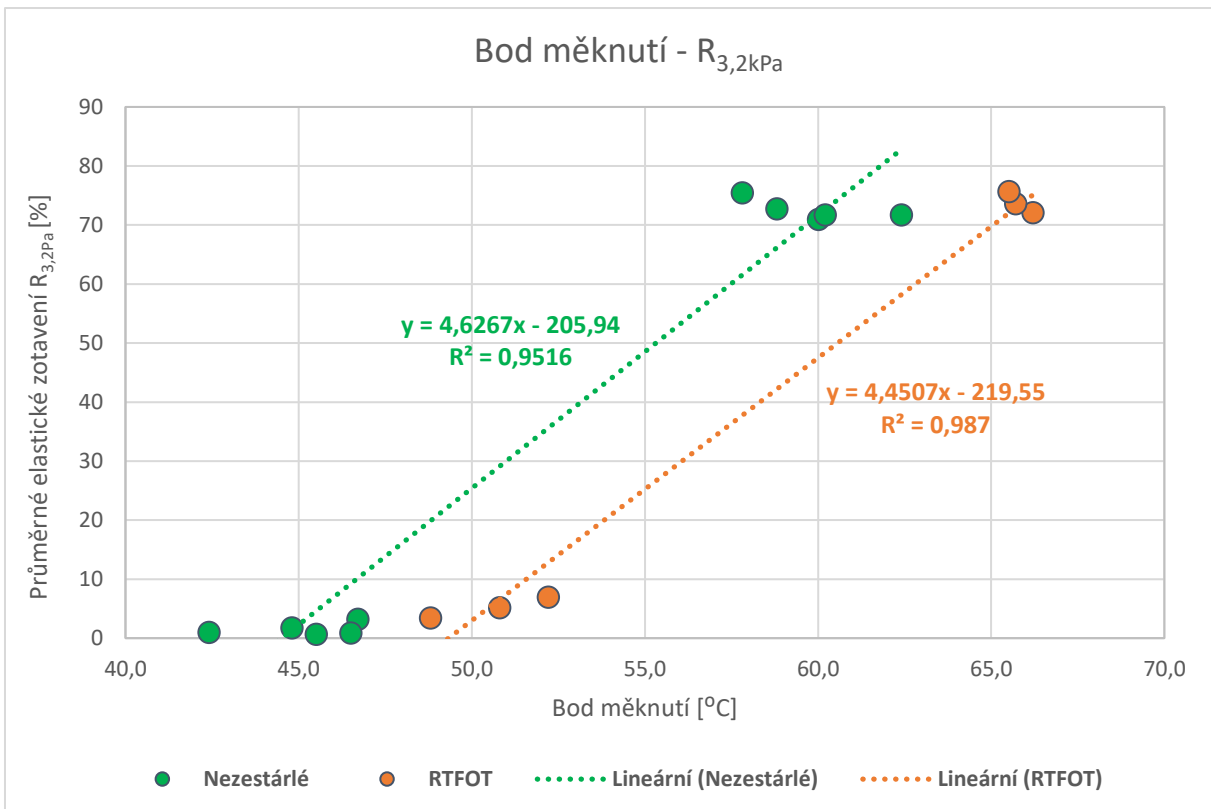
Graf 32: Závislost mezi bodem měknutí a fázovým úhlem



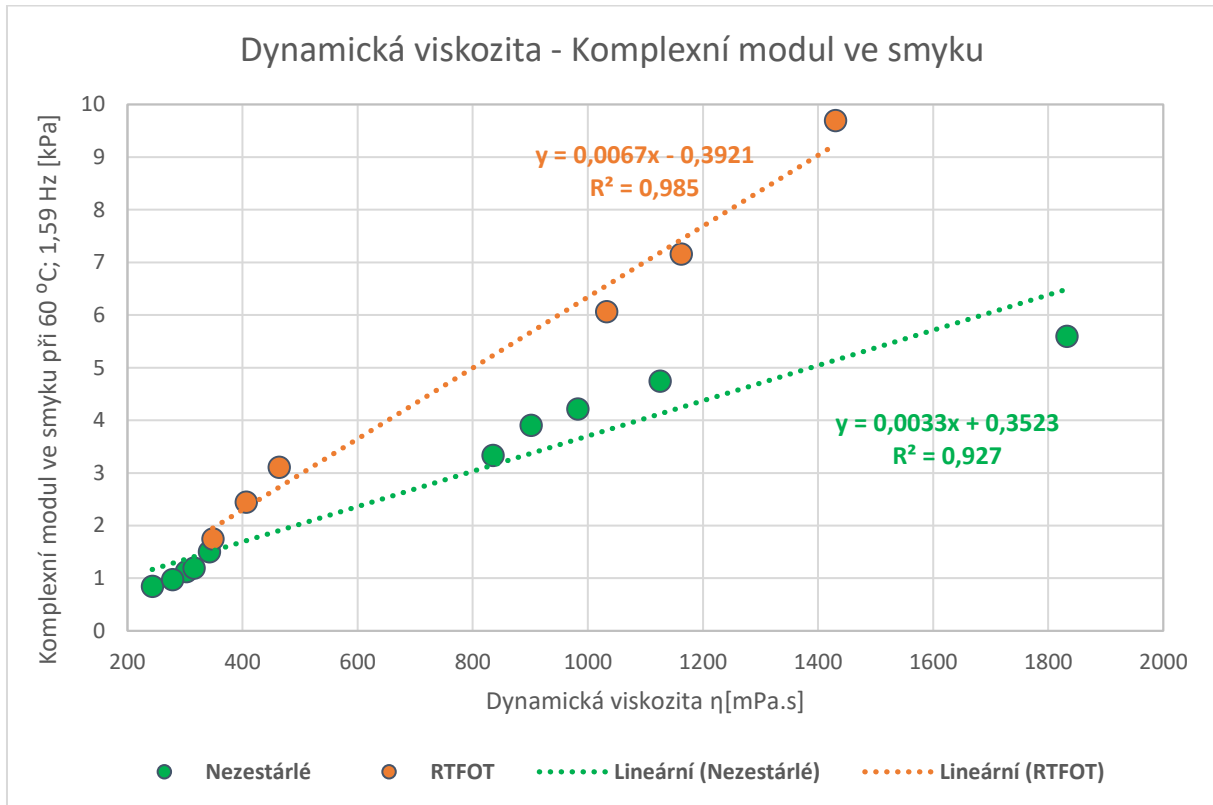
Graf 33: Závislost mezi bodem měknutí a průměrným elastickým zotavením $R_{0,1kPa}$



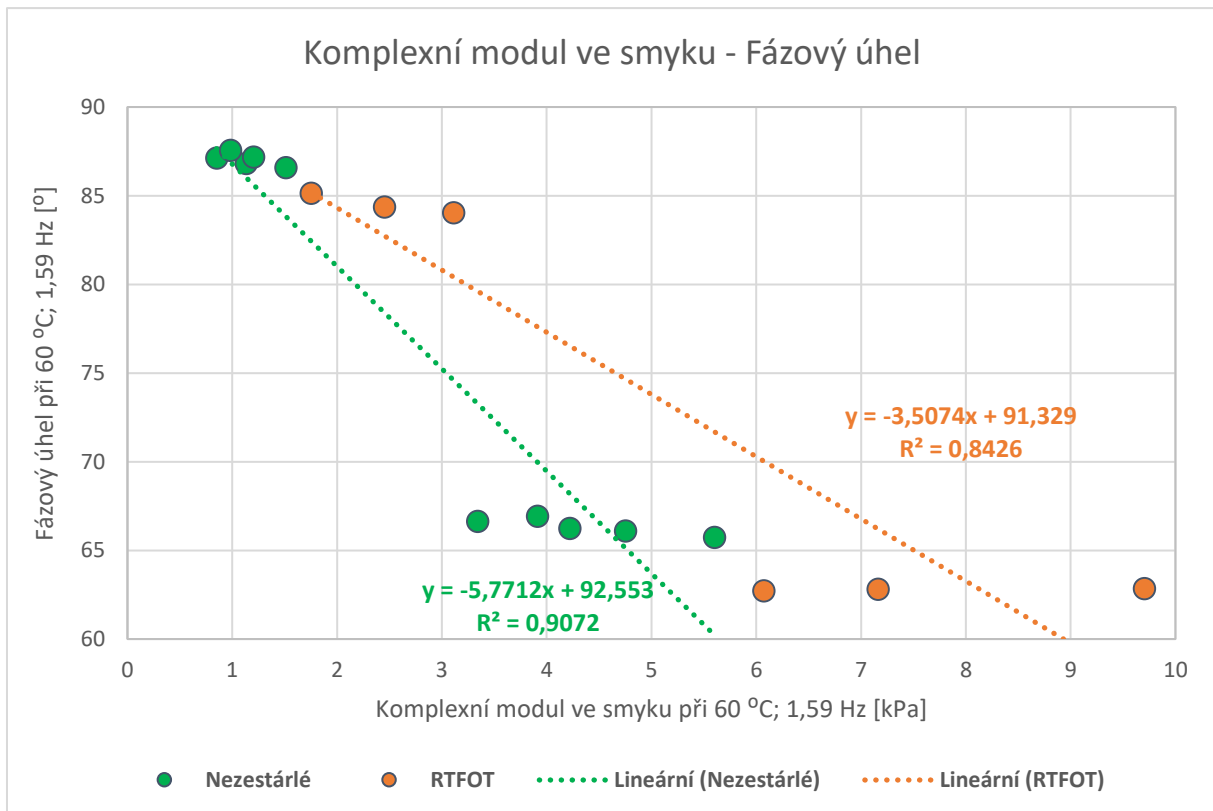
Graf 35: Závislost mezi bodem měknutí a průměrným elastickým zotavením $R_{3,2kPa}$



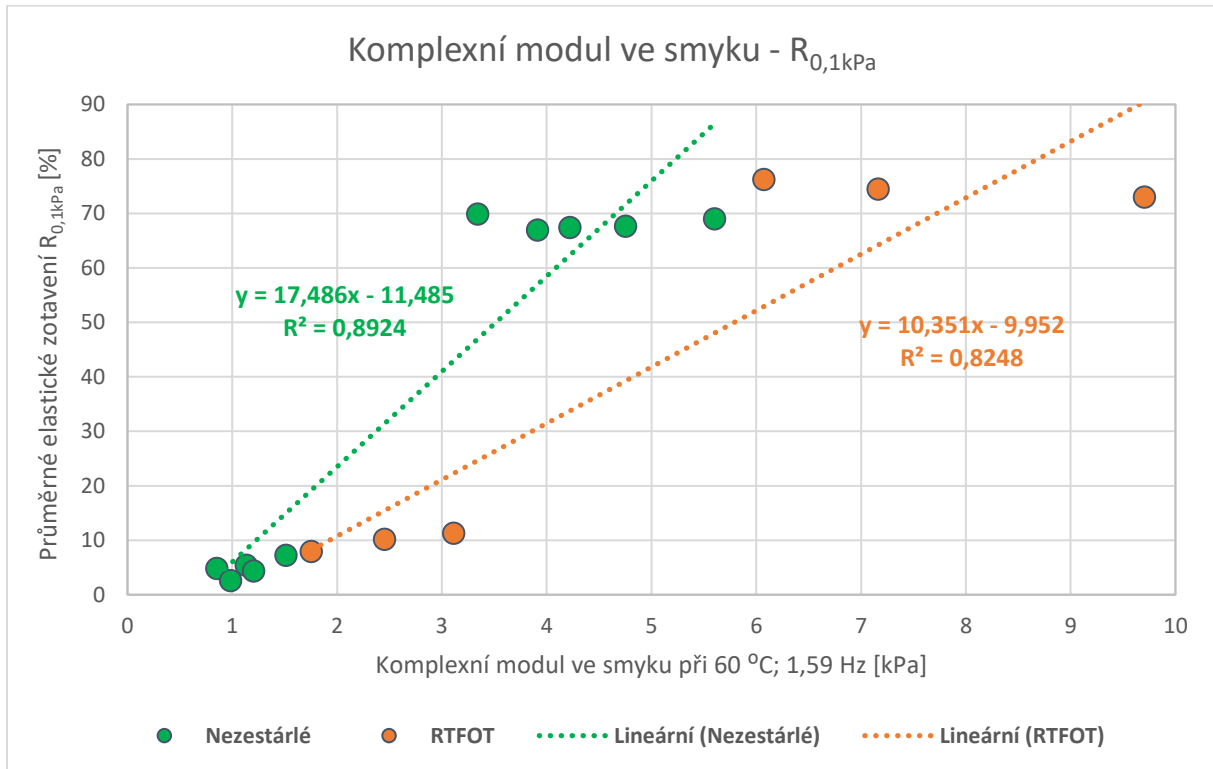
Graf 34: Závislost mezi bodem měknutí a průměrným elastickým zotavením R_{10kPa}



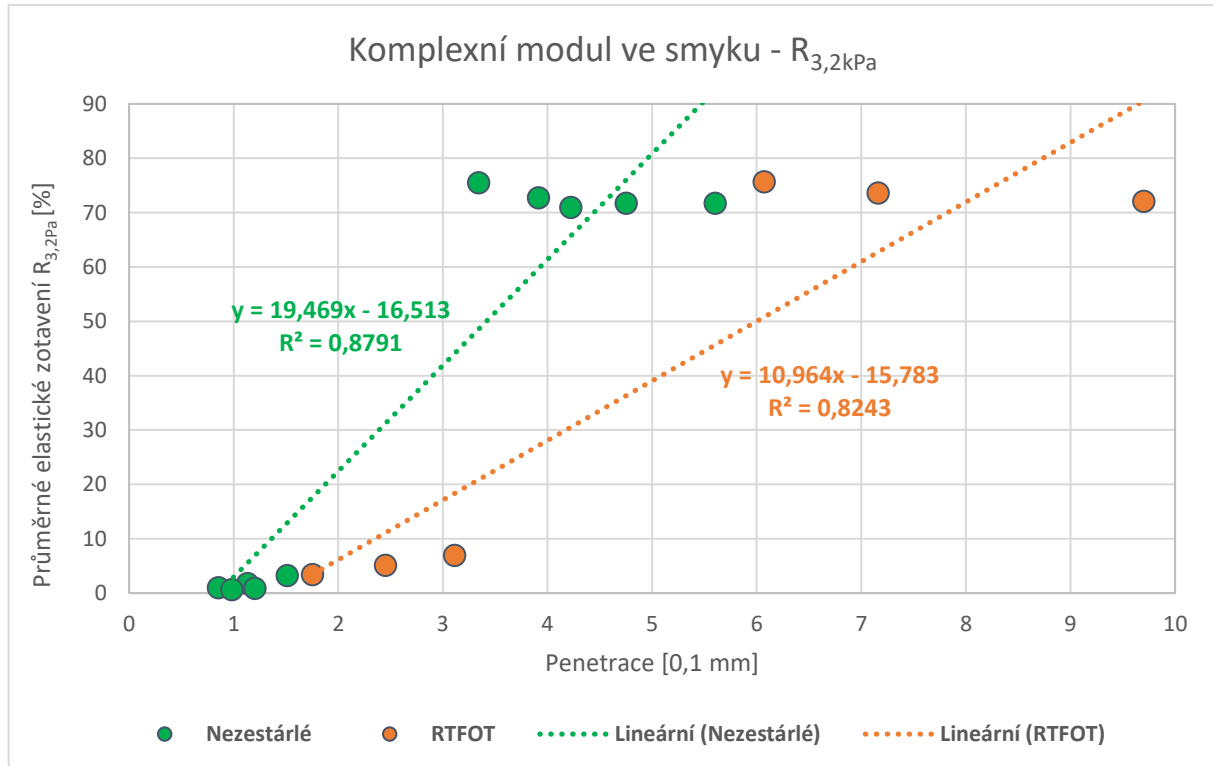
Graf 36: Závislost mezi dynamickou viskozitou a komplexním modulem ve smyku



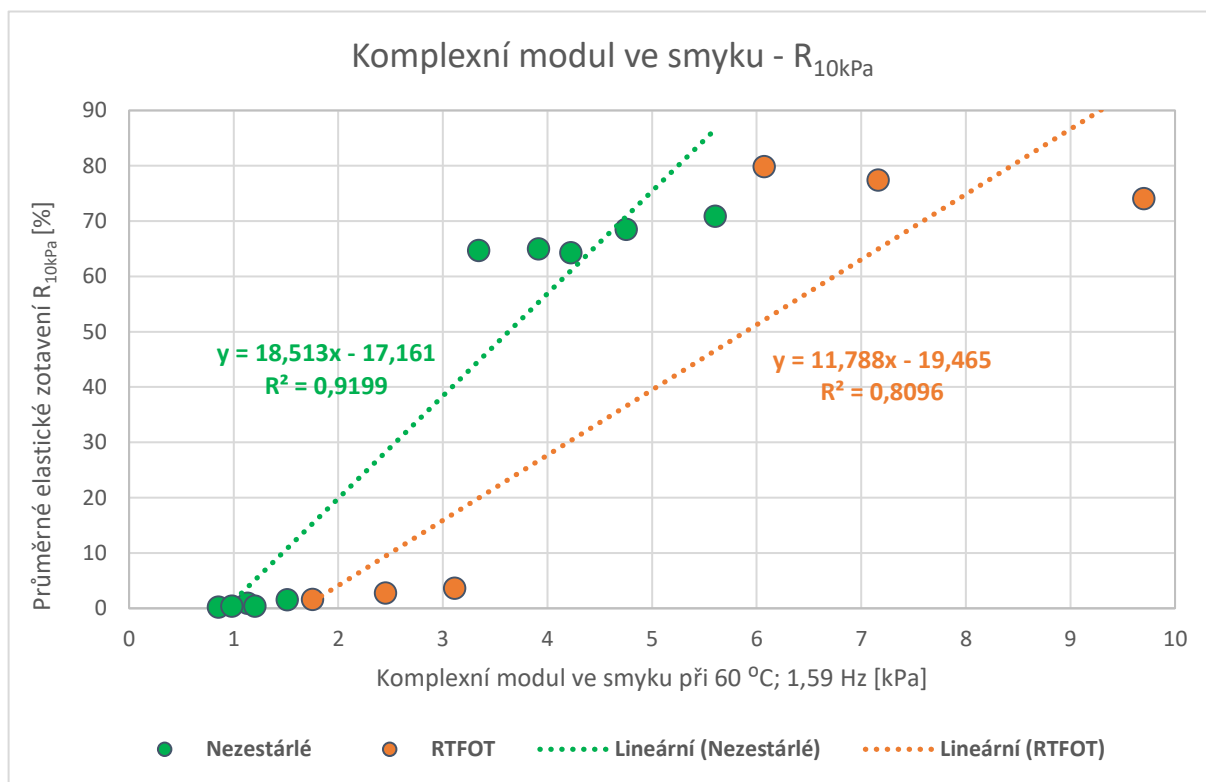
Graf 37: Závislost mezi komplexním modulem ve smyku a fázovým úhlem



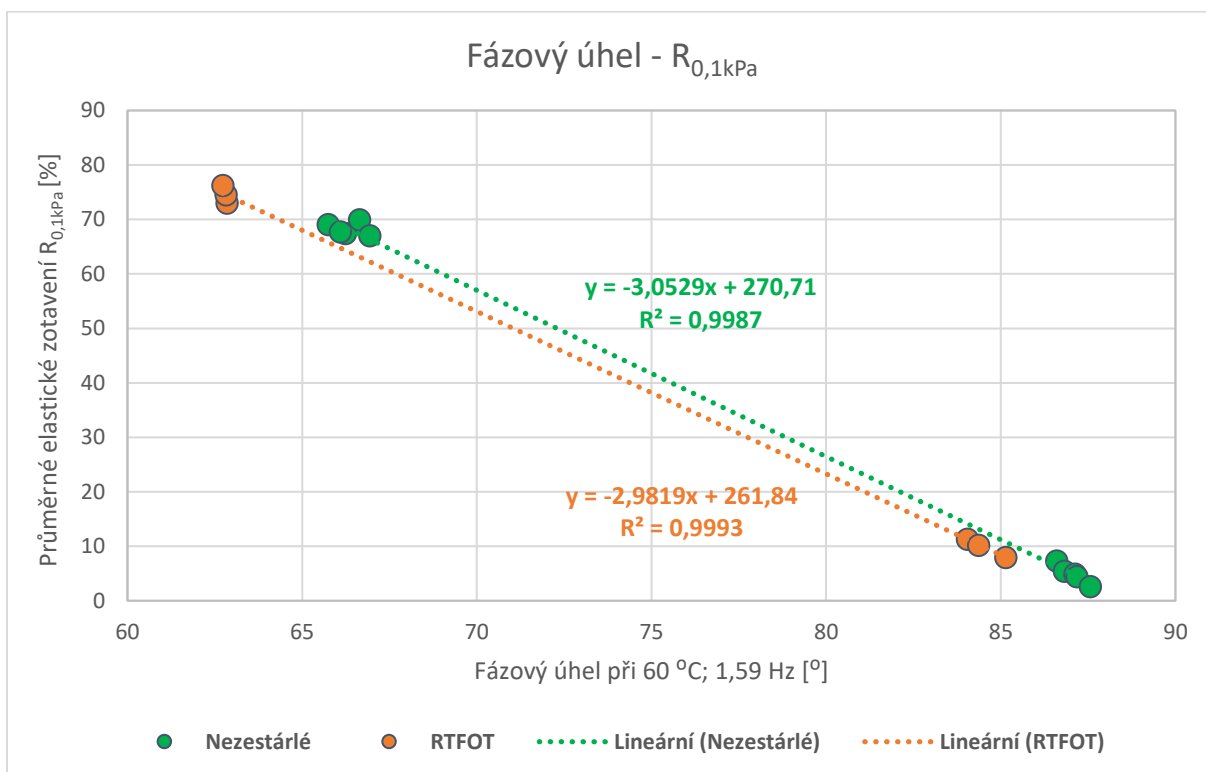
Graf 38: Závislost mezi komplexním modulem ve smyku a průměrným elastickým zotavením $R_{0,1kPa}$



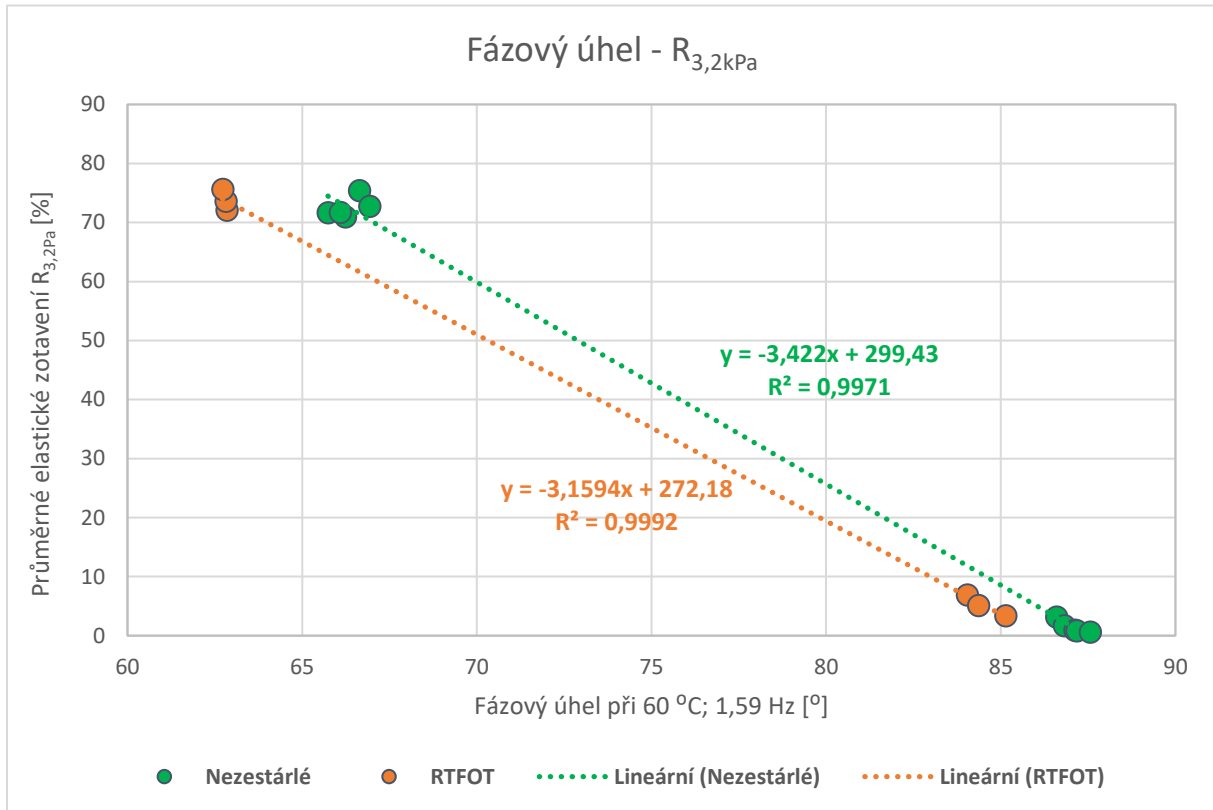
Graf 39: Závislost mezi komplexním modulem ve smyku a průměrným elastickým zotavením $R_{3,2kPa}$



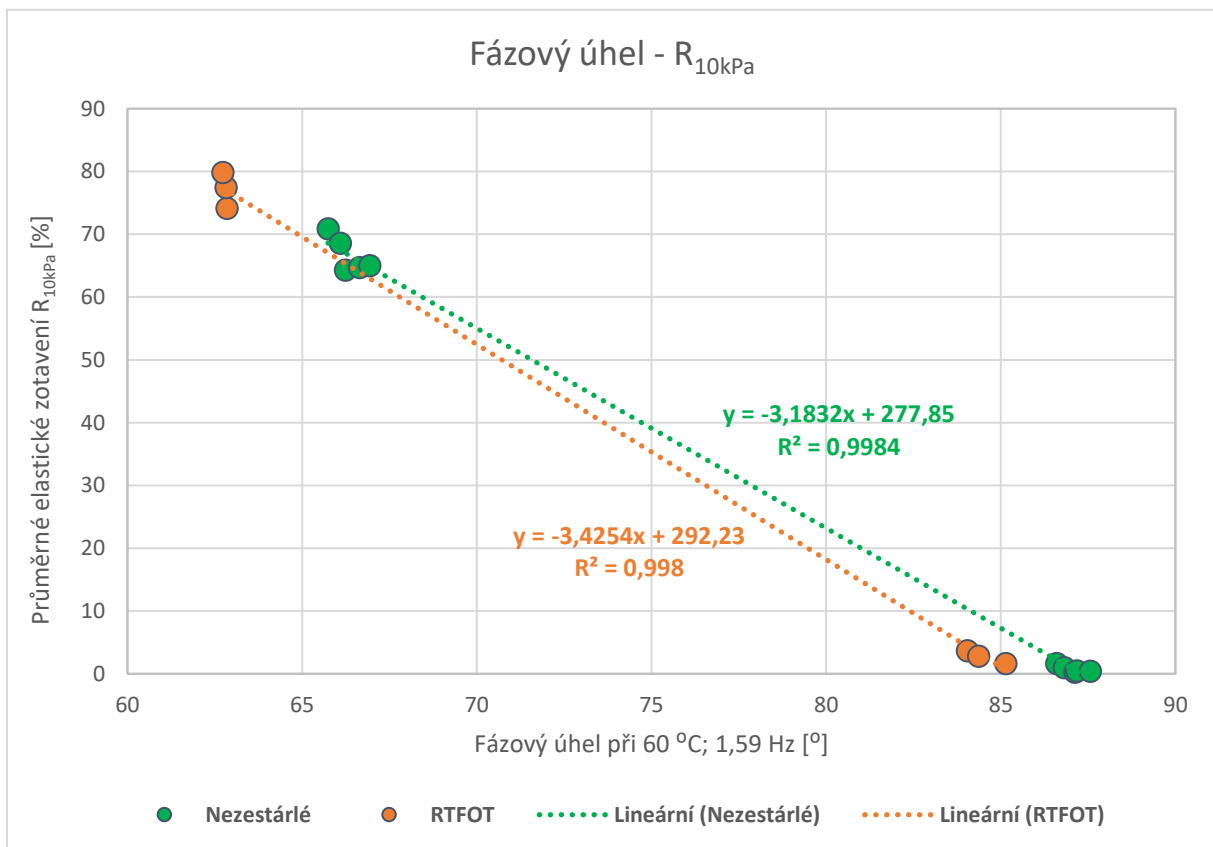
Graf 40: Závislost mezi komplexním modulem ve smyku a průměrným elastickým zotavením R_{10kPa}



Graf 41: Závislost mezi fázovým úhlem a průměrným elastickým zotavením $R_{0,1kPa}$



Graf 42: Závislost mezi fázovým úhlem a průměrným elastickým zotavením $R_{3,2kPa}$



Graf 43: Závislost mezi fázovým úhlem a průměrným elastickým zotavením R_{10kPa}

V grafech 31 – 43 si lze všimnout, že se body jednotlivých závislostí často rozpadají do dvou skupin tzv. chumlů. Je to způsobeno tím, že se jedná o dva velice odlišné asfalty (silniční asfalt 70/100 a polymerem modifikovaný asfalt PMB 45/80-55).

Tabulka 25: Koeficienty determinace R^2

Koeficient determinace R^2	Penetrace		Bod měknutí		Dynamická viskozita		Komplexní modul ve smyku při 60 °C; 1,59 Hz		Fázový úhel při 60 °C; 1,59 Hz		MSCR										Kritická teplota (BBR)		Bod lámavosti podle Fraasse		
	nezestárně	RTFOT	nezestárně	RTFOT	nezestárně	RTFOT	nezestárně	RTFOT	nezestárně	RTFOT	Nevratná smyková poddajnost $J_{nr,0,10kPa}$		Nevratná smyková poddajnost $J_{nr,3,20kPa}$		Nevratná smyková poddajnost $J_{nr,10kPa}$		Průměrné elastické zotavení $R_{0,10kPa}$		Průměrné elastické zotavení $R_{3,20kPa}$		Průměrné elastické zotavení R_{10kPa}		nezestárně	RTFOT	nezestárně
											nezestárně	RTFOT	nezestárně	RTFOT	nezestárně	RTFOT	nezestárně	RTFOT	nezestárně	RTFOT	nezestárně	RTFOT			
Penetrace	-	-	0,8334	0,4516	0,7164	0,5513	0,8098	0,6422	0,6836	0,3599	0,6336	0,6149	0,6496	0,6134	0,6745	0,6055	0,6694	0,3446	0,6632	0,3429	0,6965	0,3247	0,0278	0,4186	0,0309
Bod měknutí	-	-	-	-	0,8311	0,9337	0,9601	0,8750	0,9645	0,9893	0,8172	0,9372	0,8295	0,9367	0,8328	0,9386	0,9570	0,9872	0,9516	0,9870	0,9692	0,9821	0,0322	0,0128	0,2925
Dynamická viskozita	-	-	-	-	-	-	0,9270	0,9850	0,7486	0,9176	0,6328	0,8486	0,6348	0,8473	0,6425	0,8465	0,7329	0,9036	0,7152	0,9031	0,7710	0,8923	0,0148	0,0016	0,1564
Komplexní modul ve smyku při 60 °C; 1,59 Hz	-	-	-	-	-	-	-	-	0,9072	0,8426	0,7933	0,8208	0,7989	0,8195	0,8038	0,8170	0,8924	0,8248	0,8791	0,8243	0,9199	0,8096	0,0003	0,0230	0,2138
Fázový úhel při 60 °C; 1,59 Hz	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,8348	0,8807	0,8448	0,8800	0,8373	0,8831	0,9987	0,9993	0,9971	0,9992	0,9984	0,9980	0,1356	0,0390	0,4806
MSCR	Nevratná smyková poddajnost $J_{nr,10kPa}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,0193	0,0020	0,1512
	Nevratná smyková poddajnost $J_{nr,3,20kPa}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,0214	0,0020	0,1518
	Nevratná smyková poddajnost $J_{nr,10kPa}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,0133	0,0013	0,1260
	Průměrné elastické zotavení $R_{0,10kPa}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1517	0,0467	0,4923
	Průměrné elastické zotavení $R_{3,20kPa}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1669	0,0472	0,5071
Průměrné elastické zotavení R_{10kPa}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1179	0,0556	0,4713	
Kritická teplota (BBR)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,6807
Bod lámavosti podle Fraasse	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

7 Závěr

Cílem diplomové práce bylo popsat vliv různých fluxačních přísad na chování asfaltových pojiv, zejména jejich vliv na změnu reologických vlastností pojiv za běžných teplot, nízkých teplot a jejich stabilitu během stárnutí a skladování. Z toho důvodu byly vybrány dvě fluxační přísady – NYTEX 820 (naftenický olej) a TRIUMF EXOP 24 (aromatický olej). Tyto fluxační přísady byly na základě výsledků vstupního pokusu dávkovány v množství 2 % a 4 % do silničního asfaltu třídy 70/100 a do polymerem modifikovaného asfaltu třídy 45/80-55, který byl vyroben laboratorně smísením silničního asfaltu 70/100 s 3,8 % SBS a 0,06 % síry. Proces stárnutí byl v laboratoři simulován metodou krátkodobého stárnutí RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) na asfaltových pojivech s jedním typem fluxační přísady (NYTEX 820).

Z laboratorních výsledků je patrný vliv přítomnosti fluxačních přísad, tzv. změkčovadel, na změnu vlastností asfaltových pojiv. Hodnoty penetrace narůstají se zvyšujícím se obsahem fluxační přísady. Výraznější nárůst penetrace byl zaznamenán u přísady Nytex 820, která měla tekutější konzistenci než druhé fluxační činidlo. Stárnutí (RTFOT) způsobilo snížení hodnoty penetrace jehlou oproti nezestárlému pojivu, neboť došlo k oxidativnímu tvrdnutí a stárnutí asfaltového pojiva. Opačný vliv měly fluxační přísady na bod měknutí, kdy s rostoucím obsahem fluxační přísady klesala teplota bodu měknutí. Vliv Nytexu 820 byl opět o něco výraznější než viskóznější aromatický olej Triumf Exop 24. Stárnutím se navýšila hodnota bodu měknutí oproti výchozímu asfaltovému pojivu 70/100 o 5,5 °C, u modifikovaného asfaltového pojiva byl nárůst o 3,8 °C.

Nejvyšší viskozitu vykazoval polymerem modifikovaný asfalt 45/80-55 bez fluxační přísady. Přidáním fluxačních přísad došlo vždy ke snížení viskozity obou pojiv, což má pozitivní vliv na zpracovatelnost pojiv. Dynamické viskozity zestárlých asfaltových pojiv výrazně stouply. Výjimka nastala u polymerem modifikovaného asfaltu 45/80-55 bez přidání fluxační přísady, kdy po stárnutí RTFOT došlo překvapivě k mírnému poklesu dynamické viskozity. To mohlo být způsobeno „doreagováním“ modifikační přísady s asfaltovým pojivem během procesu stárnutí. Naftenický olej Nytex 820 měl větší vliv na snížení viskozity než aromatický olej.

Z oscilačních zkoušek v DSR bylo zjištěno, že fluxační přísady svou přítomností hodnoty komplexního smykového modulu značně snižují, a naopak se mírně zvyšuje fázový úhel pojiv. Menší vliv byl zaznamenán u aromatického oleje než u naftenického oleje. Po zestárnutí metodou RTFOT došlo ke značnému nárůstu hodnot komplexního smykového modulu obou

pojiv. U nemodifikovaných pojiv bylo navýšení oproti nezestárlému pojivu více jak dvojnásobné. Modifikovaná pojiva jsou o něco méně citlivá na proces stárnutí.

Dále byla na pojivech provedena zkouška MSCR při teplotě 50 °C. Největší smykové přetvoření a nevratnou smykovou poddajnost J_{nr} bylo možné vysledovat u nemodifikovaného pojiva s příměsí 4 % fluxačních přísad, tento jev bylo možné vidět také u modifikovaného pojiva s příměsí 4 % fluxačních přísad, z čehož vyplývá, že fluxační přísady mají podle očekávání negativní vliv na odolnost vůči deformaci. Smykové přetvoření nemodifikovaných pojiv bylo samozřejmě mnohonásobně vyšší než u modifikovaných asfaltových pojiv. Stárnutím RTFOT se nevratná smyková poddajnost snížila a elastické zotavení se u všech pojiv mírně zvýšilo.

Pojiva byla dále podrobena dvěma nízkoteplotním zkouškám, a to stanovení bodu lámavosti podle Fraasse a stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru. Je patrné, že oleje pozitivně ovlivňují nízkoteplotní vlastnosti asfaltových pojiv, protože snižují hodnoty bodu lámavosti i dolní kritickou teplotu při zkoušce v BBR. Stárnutím RTFOT se pojivo stává křehčím. Nejnižší kritická teplota byla -19,3 °C u obyčejného silničního asfaltu 70/100 po stárnutí RTFOT.

Vlivem stárnutí RTFOT došlo u modifikovaného asfaltu ke zcela nepatrnému nárůstu hmotnosti, což může být přičítáno zabudování kyslíkových atomů do organických uhlovodíkových molekul. U modifikovaných asfaltů s fluxační přísadou došlo naopak k malému poklesu hmotnosti, což je to typický jev, oleje jsou těžavější. Změna hmotnosti nepřekročila 0,5 %, můžeme tedy tvrdit, že použitý naftenický olej Nytex 820 byl v této koncentraci stabilní. Vyhodnocením zkoušky skladovací stability je možné usuzovat, že všechna zkoušená asfaltová pojiva (a to včetně přídatku fluxačních činidel v množství 2 % a 4 %) jsou při skladování při vysoké teplotě stabilní.

Pomocí výše uvedených výsledků bylo potvrzeno, že obě fluxační přísady se při smísení se silničním asfaltem i polymerem modifikovaným asfaltem chovají logicky podle očekávání a jsou tudíž vhodné pro snížení dynamické viskozity asfaltových pojiv, přičemž nedochází k nadměrnému negativnímu ovlivnění ostatních vlastností uvedených pojiv.

8 Seznam použitých zdrojů

- [1] Asfaltové silniční výrobky. *petroleum.cz* [online] [cit. 10.12.2019]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/vyrobky/asfalty-silnicni.aspx>
- [2] Asfalty a asfaltové výrobky. *petroleum.cz* [online] [cit. 10.12.2019]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/vyrobky/asfalty.aspx>
- [3] DUBŠÍKOVÁ, Karolína. *Odolnost asfaltového pojiva a asfaltové směsi vůči deformaci*. Brno, 2018. 77 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.
- [4] Morgan DURAND, Adrien MOURET, Valérie MOLINIER, Thierry FÉRON a Jean-Marie AUBRY. *Bitumen fluxing properties of a new class of sustainable solvents: The isosorbide di-alkyl ethers*. Elsevier. 2010, 2729-2734. DIO: 10.1016/j.fuel.2010.03.027
- [5] ČUMÍČKOVÁ, Markéta. *Dávkování oživovacích přísad do asfaltové směsi s vysokým obsahem R-materiálu*. Brno, 2019. 115 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.
- [6] HORČÍK, Jan, 2010. Silnice budoucnosti? Biologicky tvrzený pískovec místo asfaltu. *Ekologické bydlení* [online] [cit. 10.12.2019]. Dostupné z: <http://www.ekobydleni.eu/zivotni-prostredi/silnice-budoucnosti-biologicky-tvrzeny-piskovec-misto-asfaltu>
- [7] VARAUS, Michal. *Pozemní komunikace II: Asfaltová pojiva*. Brno, 2005
- [8] BUCHTA, Jaroslav. *Asfalty a asfaltové výrobky* [online]. [cit. 10.12.2019]. Dostupné z: <http://old.cappo.cz/res/archive/000111.pdf?seek=1367580385>
- [9] FAJKOŠ, Antonín, 2008. Historie a současnost hydroizolačních materiálů. *SILNICE ŽELEZNICE* [online] [cit. 10.12.2019]. ISSN 1803-8441. Dostupné z: <http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/historie-a-soucasnost-hydroizolacnich-materialu/>
- [10] Po hladině jezera Pitch Lake se můžete projít. Opravdu. Není v něm totiž voda, ale asfalt. *National Geographic* [online] 2013 [cit. 10.12.2019]. Dostupné z: <https://www.national-geographic.cz/galerie/pitch-lake-g-1589.html?mm=5650442&photo=2>
- [11] PĚNČÍK, Michal. *Pojiva do netuhých vozovek*. Brno, 2013. 73 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Petr Hýzl, Ph.D.

- [12] ČSN EN 1426 *Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou*. Praha: 2015, 16 s.
- [13] ČSN EN 12591 *Asfalty a asfaltová pojiva – Specifikace pro silniční asfalty*. Praha: 2009, 26 s.
- [14] ČSN 65 7204 *Asfalty a asfaltová pojiva – Silniční asfalty*. Praha: 2016, 10 s.
- [15] *Asfaltové silniční výrobky*. *petroleum.cz* [online] [cit. 10.12.2019]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/vyrobky/asfalty-silnicni.aspx>
- [16] MĚŠŤÁNOVÁ, Petra. *Nízkoteplotní chování asfaltových pojiv*. Brno, 2019. 55 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.
- [17] NĚMEC, Miroslav; SYNEK, Jiří a KOŘÍNEK, Rudolf. 2018. Zkušenosti s použitím technologie modifikace asfaltu pryžovým granulátem (CRmB) v praxi na silnicích v Pardubickém kraji. *SILNICE ŽELEZNICE* [online] 2002 [cit. 10.12.2019]. ISSN 1803-8441. Dostupné z: <http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/zkusenosti-s-pouzitim-technologie-modifikace-asfaltu-pryzovym-granulatem-crmb-v-praxi-na-silnicich-v-pardubickem-kraji/>
- [18] ČSN EN 14023 *Asfalty a asfaltová pojiva – Systém specifikace pro polymerem modifikované asfalty*. Praha: 2013, 4 s.
- [19] ČSN 65 7222-1 *Asfalty a asfaltová pojiva – Silniční modifikované asfalty modifikované asfalty – Část 1: Polymerem modifikované asfalty*. Praha: 2017, 8 s.
- [20] STOKLÁSEK, Svatopluk. *Výzkumný projekt TA 03030381 Nové zkušební metody asfaltových pojiv a směsí umožňující prodloužení životnosti asfaltových vozovek – Příloha B 4.2: Stárnutí asfaltových pojiv jako důležitý aspekt životnosti asfaltových vozovek*. Brno, 2013.
- [21] COUFALÍK, Pavel. *Reologické vlastnosti asfaltových pojiv*. Brno, 2017. 245 s. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Petr Hýzl, Ph.D.
- [22] Bitumen Oven for Rolling Thin-Film Oven Test (RTFOT). *ParsRos* [online]. 2018. [cit. 10.12.2019]. Dostupné z: <https://parsrostest.com/en/urun/bitumen-oven-for-rolling-thin-film-oven-test-rtfot>
- [23] Tlaková nádoba pro zkoušku PAV. *Labtech* [online]. 2018. [cit. 10.12.2019]. Dostupné z: <https://www.strojeprozkusebnictvi.cz/tlakova-nadoba-pro-zkousku-pav.html>

- [24] *Use of eco-friendly materials for a new concept of Asphalt Pavements for a Sustainable Environment.* Comisión Europea. 2018. Dostupné z: <https://cordis.europa.eu/project/id/603862/reporting/es>
- [25] Lorenzo Paolo INGRASSIA, Xiaohu LU, Gilda FERROTTI, Francesco CANESTRARI. *Renewable materials in bituminous binders and mixtures: Speculative pretext or reliable opportunity?* Elsevier. 2019, 209-222. DIO: 10.1016/j.resconrec.2019.01.034
- [26] COUFALÍKOVÁ, Iva. *Použití R-materiálu do asfaltových směsí typu asfaltový koberec mastixový.* Brno, 2019. 172 s. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Petr Hýzl, Ph.D.
- [27] ČSN EN 1427 *Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička.* Praha: 2015, 20 s.
- [28] ČSN EN 13702 *Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení dynamické viskozity modifikovaných asfaltů metodou kužel a deska.* Praha: 2010, 12 s.
- [29] *A Basic Introduction to Rheology.* Malvern Instruments Limited. 2016
- [30] R. B. MCGENNIS, S. SHULER a H. U. BAHIA, *Background of Superpave Asphalt Binder Test Methods.* Asphalt Institute. 1994. FHWA-SA-94-069.
- [31] ČSN EN 14770 *Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu – Dynamický smykový reometr (DSR).* Praha: 2012, 16 s.
- [32] ČSN EN 16659 *Asfalty a asfaltová pojiva – Zkouška MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery Test).* Praha: 2016, 16 s.
- [33] BENEŠOVÁ, Lucie a VALENTIN, Jan. *Vliv vybraných vstupních parametrů na naměřené hodnoty zkoušky MSCR.* Silnice mosty [online] [cit. 10.12.2019]. Dostupné z: <https://www.silnice-mosty.cz/464-vliv-vybranych-vstupnich-parametru-na-namerene-hodnoty-zkousky-mscr/>
- [34] ČSN EN 12593 *Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu lámavosti podle Fraasse.* Praha: 2015, 16 s.
- [35] ČSN EN 12607-1 *Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu – Část 1: Metoda RTFOT.* Praha: 2015, 16 s.
- [36] ČSN EN 14771 *Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru (BBR).* Praha: 2012, 16 s.

- [37] ČUMÍČKOVÁ, Markéta. *Nízkoteplotní chování asfaltových pojiv*. Brno, 2017. 64 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.
- [38] ČSN EN 13399 *Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení skladovací stability modifikovaných asfaltů*. Praha: 2018, 8 s.
- [39] Termoplastické elastomery. [online] [cit. 10.12.2019]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/23.html>
- [40] Polymer Science Learning Center [online] [cit. 10.12.2019]. Dostupné z: <https://pslc.ws/macrog/sbs.htm>
- [41] High Quality Styrene Butadiene Styrene, Manufacturer Styrene Butadiene. *Marketplace - Indian Exporters* [online]. 1998 [cit. 10.12.2019]. Dostupné z: <https://www.exportersindia.com/a-k-max-trading-limited/high-quality-styrene-butadiene-styrene-manufacturer-styrene-butadiene-chiangmai-thailand-1991149.htm>

9 Seznam obrázků

Obrázek 1: Přírodní asfaltové pojivo [10].....	14
Obrázek 2: Přístroj pro měření RTFOT [22].....	20
Obrázek 3: Přístroj pro měření PAV [23]	20
Obrázek 4: Rozdíl mezi působením fluxační a rejuvenační přísady	22
Obrázek 5: Penetrometr.....	25
Obrázek 6: Seříznuté odlitky asfaltového pojiva pro stanovení bodu měknutí.....	27
Obrázek 7: Probíhající zkouška Kroužek a kulička	28
Obrázek 8: Dynamický smykový reometr (DSR)	29
Obrázek 9: Vzorčky pro měření v DSR	29
Obrázek 10: Profil toku v asfaltovém vzorku mezi nepohyblivou deskou a pohybujícím se kuželem [29].....	30
Obrázek 11: Oscilující smykové napětí [30].....	31
Obrázek 12: Složky komplexního smykového modulu	32
Obrázek 13: Průběh přetvoření [21].....	33
Obrázek 14: Stlačený vzorek asfaltového pojiva v DSR	34
Obrázek 15: Příprava plíšků pro měření bodu lámavosti podle Fraasse	38
Obrázek 16: Přístroj pro měření bodu lámavosti podle Fraase	38
Obrázek 17: Připravené skleněné nádoby s asfaltovým pojivem.....	39
Obrázek 18: Sušárna používaná pro zkoušku RTFOT.....	41
Obrázek 19: Seříznuté trámečky ve formách	42
Obrázek 20: Průhybový trámečkový reometr (BBR).....	42
Obrázek 21: Tuba připravená pro stanovení skladovací stability	44
Obrázek 22: NYTEX 820.....	46
Obrázek 23: TRIUMF EXOP 24.....	47
Obrázek 24: Koloidní mlýn.....	48
Obrázek 25: SBS [41]	48
Obrázek 26: Disperze SBS v asfaltovém pojivu po cca 3 hodinách míchání	48

10 Seznam tabulek

Tabulka 1: Specifikace pro silniční asfalty podle ČSN EN 12591 [14].....	15
Tabulka 2: Specifikace polymerem modifikovaných asfaltů pro asfaltové směsi [19]	17
Tabulka 3: Maximální rozdíl platných stanovení [12]	26
Tabulka 4: Závislost teploty na kapalinové lázni [27]	28
Tabulka 5: Seznam porovnávaných pojiv v diplomové práci	46
Tabulka 6: Srovnání vlastností použitých fluxačních přísad	47
Tabulka 7: Označení modifikovaných asfaltů pro určení vhodného množství fluxačních přísad	49
Tabulka 8: Hodnoty penetrace jehlou	49
Tabulka 9: Hodnoty bodu měknutí.....	50
Tabulka 10: Hodnoty komplexního modulu ve smyku při 60 °C; 1,59 Hz	52
Tabulka 11: Hodnoty fázového úhlu při 60 °C; 1,59 Hz	52
Tabulka 12: Hodnoty penetrace jehlou	55
Tabulka 13: Hodnoty bodu měknutí.....	57
Tabulka 14: Vliv fluxačních přísad na viskozitu asfaltových pojiv při teplotě 135 °C a smykové rychlosti 6,8 s ⁻¹	60
Tabulka 15: Hodnoty komplexního modulu ve smyku (60 °C; 1,59 Hz)	63
Tabulka 16: Hodnoty fázového úhlu (60 °C; 1,59 Hz)	64
Tabulka 17: Hodnoty bodu lámavosti podle Fraasse	72
Tabulka 18: Změna hmotnosti vlivem tepla a vzduchu	74
Tabulka 19: Hodnoty kritických teplot dle BBR	75
Tabulka 20: Hodnoty bodu měknutí po měření skladovací stability.....	76
Tabulka 21: Komplexní modul ve smyku a fázový úhel po měření skladovací stability	76
Tabulka 22: Souhrnné výsledky zkoušených pojiv – část 1.....	77
Tabulka 23: Souhrnné výsledky zkoušených pojiv – část 2.....	78
Tabulka 24: Souhrnné výsledky zkoušených pojiv – část 3.....	79
Tabulka 25: Koeficienty determinace R ²	88

11 Seznam grafů

Graf 1: Hodnoty penetrace jehlou	50
Graf 2: Hodnoty bodu měknutí	50
Graf 3: Hodnoty dynamické viskozity při teplotě 135 °C a smykové rychlosti 6,8 s ⁻¹ a 18,6 s ⁻¹	51
Graf 4: Závislost dynamické viskozity na smykové rychlosti při teplotě 135 °C.....	51
Graf 5: Hodnoty komplexního modulu ve smyku při 60 °C; 1,59 Hz	52
Graf 6: Hodnoty fázového úhlu při 60 °C; 1,59 Hz	53
Graf 7: Nevratná smyková poddajnost Jnr při teplotě 60 °C	53
Graf 8: Průměrné elastické zotavení R při teplotě 60 °C	54
Graf 9: Hodnoty penetrace jehlou	56
Graf 10: Hodnoty bodu měknutí	57
Graf 11: Hodnoty dynamické viskozity při teplotě 135 °C a smykové rychlosti 6,8 s ⁻¹ a 18,6 s ⁻¹	58
Graf 12: Hodnoty dynamické viskozity při teplotě 135 °C a smykové rychlosti 6,8 s ⁻¹ a 18,6 s ⁻¹ po zestárnutí asfaltových pojiv RTFOT.....	59
Graf 13: Hodnoty dynamické viskozity při teplotě 135 °C a smykové rychlosti 6,8 s ⁻¹	60
Graf 14: Závislost dynamické viskozity na smykové rychlosti při teplotě 135 °C (u nemodifikovaných pojiv)	61
Graf 15: Závislost dynamické viskozity na smykové rychlosti při teplotě 135 °C (u modifikovaných pojiv).....	62
Graf 16: Hodnoty komplexního modulu ve smyku (60 °C; 1,59 Hz).....	63
Graf 17: Hodnoty fázového úhlu (60 °C; 1,59 Hz).....	65
Graf 18: Průběh zkoušky MSCR při 50 °C nemodifikovaných asfaltových pojiv	66
Graf 19: Průběh zkoušky MSCR při 50 °C modifikovaných asfaltových pojiv	66
Graf 20: Průběh zkoušky MSCR při 50 °C všech zkoušených asfaltových pojiv	67
Graf 21: Nevratná smyková poddajnost Jnr při teplotě 50 °C u nemodifikovaných asfaltových pojiv.....	68
Graf 22: Nevratná smyková poddajnost Jnr při teplotě 50 °C u nemodifikovaných asfaltových pojiv po RTFOT	68
Graf 23: Nevratná smyková poddajnost Jnr při teplotě 50 °C u modifikovaných asfaltových pojiv.....	69

Graf 24: Nevratná smyková poddajnost J_{nr} při teplotě 50 °C u modifikovaných asfaltových pojiv po RTFOT	69
Graf 25: Průměrné elastické zotavení R při teplotě 50 °C u nemodifikovaných asfaltových pojiv.....	70
Graf 26: Průměrné elastické zotavení R při teplotě 50 °C u nemodifikovaných asfaltových pojiv po RTFOT	70
Graf 27: Průměrné elastické zotavení R při teplotě 50 °C u modifikovaných asfaltových pojiv	71
Graf 28: Průměrné elastické zotavení R při teplotě 50 °C u modifikovaných asfaltových pojiv po RTFOT	71
Graf 29: Hodnoty bodu lámavosti podle Fraasse	73
Graf 30: Hodnoty kritických teplot dle BBR	75
Graf 31: Závislost mezi bodem měknutí a komplexním modulem ve smyku.....	80
Graf 32: Závislost mezi bodem měknutí a fázovým úhlem	81
Graf 33: Závislost mezi bodem měknutí a průměrným elastickým zotavením $R_{0,1kPa}$	81
Graf 34: Závislost mezi bodem měknutí a průměrným elastickým zotavením $R_{3,2kPa}$	82
Graf 35: Závislost mezi bodem měknutí a průměrným elastickým zotavením R_{10kPa}	82
Graf 36: Závislost mezi dynamickou viskozitou a komplexním modulem ve smyku	83
Graf 37: Závislost mezi komplexním modulem ve smyku a fázovým úhlem	83
Graf 38: Závislost mezi komplexním modulem ve smyku a průměrným elastickým zotavením $R_{0,1kPa}$	84
Graf 39: Závislost mezi komplexním modulem ve smyku a průměrným elastickým zotavením $R_{3,2kPa}$	84
Graf 40: Závislost mezi komplexním modulem ve smyku a průměrným elastickým zotavením R_{10kPa}	85
Graf 41: Závislost mezi fázovým úhlem a průměrným elastickým zotavením $R_{0,1kPa}$	85
Graf 42: Závislost mezi fázovým úhlem a průměrným elastickým zotavením $R_{3,2kPa}$	86
Graf 43: Závislost mezi fázovým úhlem a průměrným elastickým zotavením R_{10kPa}	86