



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA DOPRAVNÍ**

Bc. Jiří Kudlík

**VLIV DLOUHODOBÉHO STÁRNUTÍ NA VYBRANÁ  
ASFALTOVÁ POJIVA**

Diplomová práce

**2018**



**K612..... Ústav dopravních systémů**

**ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

**Bc. Jiří Kudlík**

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

**N 3710 – DS – Dopravní systémy a technika**

Název tématu (česky): **Vliv dlouhodobého stárnutí na vybraná asfaltová pojiva**

Název tématu (anglicky): The Effect of Long Term Ageing on Selected Asphalt Binders

**Zásady pro vypracování**

Při zpracování diplomové práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

- rešerše literatury asfaltových pojiv - problematika stárnutí
- znalost norem řady ČSN EN - asfalty a asfaltová pojiva
- zajištění materiálů pro praktické zkoušky asfaltových pojiv
- popis výroby vzorků modifikovaných asfaltů
- vyhodnocení výsledků zkoušek pro různá pojiva
- vliv dlouhodobého stárnutí na vybrané mechanicko-fyzikální vlastnosti



Rozsah grafických prací: stanoví vedoucí diplomové práce

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: stanoví vedoucí diplomové práce

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Otakar Vacín, Ph.D.**  
**Ing. Martin Höfler**

Datum zadání diplomové práce: **30. června 2017**  
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce: **29. května 2018**

- a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
- b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

doc. Ing. Otakar Vacín, Ph.D.  
vedoucí  
Ústavu dopravních systémů



prof. Dr. Ing. Miroslav Svítek, dr. h. c.  
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.

Bc. Jiří Kudlík  
jméno a podpis studenta

V Praze dne .....30. června 2017

## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mi poskytli podklady pro vypracování této práce. Zvláště pak děkuji doc. Ing. Otakaru Vacínovi, Ph.D. za odborné vedení a konzultování diplomové práce a za rady, které mi poskytoval po celou dobu mého studia. V neposlední řadě je mou milou povinností poděkovat svým rodičům a blízkým za morální a materiální podporu, které se mi dostávalo po celou dobu studia.

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na ČVUT v Praze Fakultě dopravní.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 28. května 2018

.....

podpis

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

VLIV DLOUHODOBÉHO STÁRNUTÍ NA VYBRANÁ ASFALTOVÁ POJIVA

Diplomová práce

Červen 2018

Bc. Kudlík Jiří

## ABSTRAKT

Předmětem diplomové práce „**Vliv dlouhodobého stárnutí na vybraná asfaltová pojiva**“ pojednává o vlivu krátkodobého a dlouhodobého stárnutí na modifikovaná asfaltová pojiva. Práce je pomyslně rozdělena na teoretickou a praktickou část. V teoretické části je rozebrána složení asfaltových pojiv a typy modifikátorů. Praktická část je zaměřena na výrobu zkušebních vzorků, postup prováděných zkoušek a jejich výsledky.

## ABSTRACT

The subject of the master thesis „**The Effect of Long Term Ageing on Selected Asphalt Binders**“ is short term and long term aging effect of modified asphalt binders resistance. Thesis consist of theoretical part and practical part. In theoretical part is discussed composition of asphalt binders and types modifiers. Practical part is focused to production of test samples, process of test methods and their results.

**Klíčová slova**

Asfaltové pojivo, modifikovaná asfaltová pojiva, stárnutí asfaltových pojiv, DSR, MSCRT, RTFOT, PAV

**Keywords**

Asphalt binders, modified asphalt binders, asphalt binders ageing, DSR, MSCRT, RTFOT, PAV

## Obsah

Obsah.....	5
Seznam použitých zkratk ..... 7	7
1. ÚVOD.....	8
1.1. Cíl diplomové práce.....	8
1.2. Úvod do problematiky.....	8
2. TEORIE MATERIÁLŮ.....	12
2.1. Polymery modifikující asfaltová pojiva.....	15
2.1.1. Modifikace termoplastickými elastomery.....	15
2.1.2. Modifikace termoplastickými polymery (plastomery).....	16
2.1.3. Modifikace reaktivními TER polymery.....	17
2.2. Druhy použitých modifikovaných asfaltových pojiv.....	18
3. PŘÍPRAVA VZORKŮ A POPIS POUŽITÝCH ZKOUŠEK.....	19
3.1. Příprava modifikovaného asfaltového pojiva.....	19
3.2. Bod měknutí asfaltového pojiva metodou kroužek a kulička.....	20
3.3. Stanovení viskozity asfaltu rotačním vřetenovým viskozimetrem.....	22
3.4. Zkoušky dynamickým smykovým reometrem DSR.....	23
3.4.1. Příprava vzorků a reometru na zkoušky.....	24
3.4.2. Stanovení komplexního modulu ve smyku, fázového úhlu.....	25
3.4.3. MSCRT (Multiple Stress Creep Recovery Test).....	28
3.5. Laboratorní metody simulující stárnutí asfaltových pojiv.....	30
3.5.1. RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test).....	31
3.5.2. PAV (Pressure Ageing Vessel).....	32
3.6. Mikroskop.....	35
4. VÝSLEDKY ZKOUŠEK.....	37
4.1. Bod měknutí asfaltového pojiva metodou kroužek a kulička.....	37

4.2.	Stanovení viskozity asfaltu rotačním vřetenovým viskozimetrem .....	37
4.3.	Stanovení komplexního modulu ve smyku, fázového úhlu .....	39
4.4.	MSCRT (Multiple Stress Creep Recovery Test).....	40
4.5.	Mikroskop .....	41
5.	ZÁVĚR .....	42
5.1.	Bod měknutí asfaltového pojiva metodou kroužek a kulička .....	42
5.2.	Stanovení viskozity asfaltu rotačním vřetenovým viskozimetrem .....	43
5.3.	Stanovení komplexního modulu ve smyku, fázového úhlu .....	44
5.4.	MSCRT (Multiple Stress Creep Recovery Test).....	49
5.5.	Celkové zhodnocení .....	52
6.	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	54
7.	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	56
8.	SEZNAM TABULEK .....	57
9.	SEZNAM GRAFŮ .....	58
10.	PŘÍLOHY .....	59



## Seznam použitých zkratk

BBR	Stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru (Bending Beam Rheometer)
DSR	Dynamický smykový reometr
EMA	Ethylen-metyl acrylat
EVA	Ethylen-vinyl acetat
MSCRT	Multiple Stress Creep and Recovery Test
PAV	Urychlené dlouhodobé stárnutí v tlakové nádobě (Pressure Ageing Vessel)
PMB	Polymerem modifikovaný asfalt (Polymer Modified Bitumen)
PE	Polyethylen
PP	Polypropylen
PS	Polystyren
RET	Reaktivní elastomerní terpolymer
RTFOT	Rolling Thin Film Oven Test
SBR	Styren-butadien-rubber (guma)
SBS	Styren-butadien-styren
SEBS	Styren-ethyl-butadien-styren
SIS	Styren-isoprene-styren

# 1. ÚVOD

## 1.1. Cíl diplomové práce

Cílem této diplomové práce je zjištění vlivu krátkodobého a dlouhodobého stárnutí na modifikovaná asfaltová pojiva. Byly provedeny funkční zkoušky Superpave® a některé zkoušky empirické na modifikovaných asfaltových pojivech za účelem porovnání jednak výsledků stárnutí, ale také porovnání zkoušek funkčních a empirických. S neustále rostoucím objemem dopravy a zatížením na komunikacích se použití modifikovaných asfaltů stává běžnou věcí, téměř nutností. K lepšímu popisu charakteristik a to zejména modifikovaných asfaltových poživ slouží funkční zkoušky vyvinuté na přelomu 90. let 19. století. Z naměřených výsledků je dále možné zjistit vhodnost použitých modifikátorů a jejich kombinací.

## 1.2. Úvod do problematiky

Pro většinu pozemních komunikací jsou vhodná běžná asfaltová pojiva a asfaltové směsi s uspokojivou přilnavostí a mechanickými vlastnostmi pro dané dopravní a klimatické podmínky. Nicméně požadavky na kvalitu pozemních komunikací se každoročně zvyšují a v některých případech je dosaženo mezních stavů pro běžné asfalty během velmi krátké doby. Důvody neustále vzrůstajících požadavků jsou:

- nárůst teplotních změn;
- nárůst hmotností náprav, tlaku v pneumatikách a nákladu, což vede k vyšším požadavkům na údržbu a tím zvyšujícím se nákladům pro vlastníky silnic;
- tendence používat tenčí vrstvy asfaltových krytů;
- poptávka po finanční efektivitě, úsporám nákladů s cílem snížit frekvenci údržby, která je nutná, aby se minimalizovalo narušení dopravního toku;
- zvýšení životnosti.

Životnost asfaltových komunikací ovlivňuje mnoho poruch. Jednou z velkých potíží je vznik trvalých deformací ve formě vyjíždění kolejí. V těchto místech se poté snáze drží voda a může docházet k aquaplaningu vozidel. Dále tento typ trvalé deformace zhoršuje příčný pohyb vozidel, zejména motocyklů, při změně jízdních pruhů či předjíždění. Vznik trvalých deformací probíhá ve dvou fázích. Nejdříve dochází k sedání a stačování jednotlivých konstrukčních vrstev vozovky. Druhou fází jsou smykové deformace a tečení. K vyjíždění kolejí dochází na vysoce zatížených úsecích, v městských částech a místech, kde se těžká vozidla pohybují nízkou rychlostí, viz obrázek 1. Poměrně novou metodou k určení vhodnosti asfaltových poživ na takto zatížené úseky je zkušební metoda MSCRT, viz kapitola 3.4.3. [1]



**Obrázek 1. Vyjeté koleje na autobusové zastávce v Újezdě nad Lesy (foto autor).**

Opakovaným zatěžováním dopravou také vznikají únavové trhliny, které jsou na obrázku 2. Tyto trhliny se vzájemně propojují a mohou vytvořit mozaiku. Existuje několik důvodů pro toto poškození vozovky. U tenkých konstrukcí vozovek dochází k velkým ohybovým napětím na spodní části konstrukce vozovky. Spodní část konstrukce tak začne praskat a trhlina se postupně prokopíruje na povrch. U vozovek silnějších konstrukcí mají naopak horní vrstvy nejvyšší zatížení, díky aktivitě pneumatik, stárnutí pojiva v asfaltové směsi a dalším druhům opotřebení. Z těchto důvodů poté vznikají trhliny v horní části a postupně praskají hlouběji do konstrukce. [2]



**Obrázek 2. Únavové trhliny na komunikaci I/12 v Újezdě nad Lesy (foto autor).**

Dalším významným problémem je vznik nízkoteplotních trhlín a to především v zemích a místech s chladným podnebím. Tento typ problému se projevuje skupinou příčných trhlín, které se rozšiřují do celé šířky komunikace a opakují se v poměrně pravidelných vzdálenostech, viz obrázek č. 3. Do těchto trhlín poté vniká voda, dochází k vymývání a prohlubování trhlín. V zimních měsících navíc tato voda v trhlínách zmrzne, vytvářejí se ledové čočky a ty poté zvedají okraje trhlín. Tím je jednak snížena životnost vozovky, ale také komfort jízdy v dopravě. Vznik těchto trhlín je způsoben smršťováním komunikace. V podélném směru tak dochází k tvorbě napětí. Jakmile dosáhne velikost tohoto podélného napětí pevnosti dané vozovky v tahu, dochází k prasknutí a tvorbě trhlín. Tato problematika tedy nijak nesouvisí se zatížením dopravou, ale je způsobena prostředím. [3]



**Obrázek 3. Opakující se nízkoteplotní trhliny na cyklostezce v Pardubicích (foto autor).**

Životní prostředí také způsobuje stárnutí asfaltového pojiva v konstrukci vozovky a pojivo tak mění své vlastnosti. Dochází k oxidaci, stárnutí vlivem UV záření a tím k neustálému vytvrzování asfaltu. Toto postupné vytvrzování asfaltového pojiva může v krajních případech způsobit jeho křehkost a lámavost. [4]

Problémy na vozovkách se mnohdy objevují dříve, než se očekává a oprava či údržba se stává pro majitele nákladnější. Jedním z řešení těchto problémů je použití modifikovaných asfaltových směsí. Modifikátory mohou být polymery nebo jiné přísady, které zlepší vlastnosti vozovky. Technologie modifikace závisí na konkrétních aplikacích a místech použití.

## 2. TEORIE MATERIÁLŮ

Drtivá většina asfaltových pojiv je ve stavebnictví využita v krytech vozovek, v zastřešení (střešních krytinách) a izolacích. Díky skvělým voděodolným vlastnostem a termoplastickému chování je asfalt ideální pro široké spektrum aplikací. Při teplotách 100 °C až 200 °C se mění ve viskózní kapalinu a může být namíchán s ostatními materiály a tvarován, dle potřeb. Jestliže je ochlazen, stává se inertní pevnou látkou, která je trvanlivá a odpuzuje vodu.

Z průzkumu společnostmi Eurobitume a Asphalt Institute v roce 2011 bylo zjištěno, že je ve světě ročně použito 102 miliónů tun asfaltu. Ze 102 miliónů tun asfaltu je 85 % použito v konstrukcích vozovek a ostatních ploch, jako jsou například parkoviště a letiště. 10 % je použito v zastřešení a zbylých 5 % se používá hlavně pro těsnící a izolační účely v různých stavebních materiálech, jako jsou potrubní nátěry, podložky koberců, těsnící hmoty a barvy. [5]

Nejčastěji používanými materiály s asfalty jsou:

- běžná asfaltová pojiva různých penetrací - penetrace dle normy ČSN EN 12591 [6] mají devět tříd (20/30, 30/45, 35/50, 40/60, 50/70, 70/100, 100/150, 160/220 a 250/330).
- fluxované asfalty - jsou asfalty, do nichž bylo přidáno rozpouštědlo (benzin, kerosin či nafta) a používají se pro postřik a míchání;
- modifikované asfalty - polymerem modifikované asfalty (PMB) jsou asfalty modifikované tak, aby se zlepšily některé jejich vlastnosti, jako je pružnost, pevnost, lepivost atd. Mezi modifikující látky patří polymery, vosky, kaučukové drtě, síra a kyseliny;
- asfaltové emulze - jsou produkty, ve kterých jsou kapičky asfaltu ve vodném médiu. K stabilizaci směsi se používá emulgátor. Asfaltové emulze umožňují manipulaci, přepravu a aplikaci asfaltu při nižších teplotách a používají se hlavně k povrchovým úpravám silnic a spojení jednotlivých vrstev.

Asfalt je směs organických sloučenin složených z lineárních alifatických, cykloalifatických a aromatických derivátů. Lineární alifatické sloučeniny jsou nasycené uhlíkové sloučeniny s přímým řetězcem, například n-heptan. Cykloalifatické sloučeniny jsou uzavřené řetězce skládající se z nasycených atomů uhlíku (například cyklohexan) nebo cyklické struktury s malým počtem nenasycených atomů (například cyklohexen). Aromatické sloučeniny neboli areny jsou sloučeniny obsahující alespoň jeden aromatický kruh, například benzen. Chemické složení asfaltů je velmi složité a závislé na jejich původu. Kompletní analýza asfaltu by byla velice pracná a přinesla by obrovské množství dat, která by bylo nepraktické. Navíc by se týkala jen daného testovaného vzorku asfaltu.

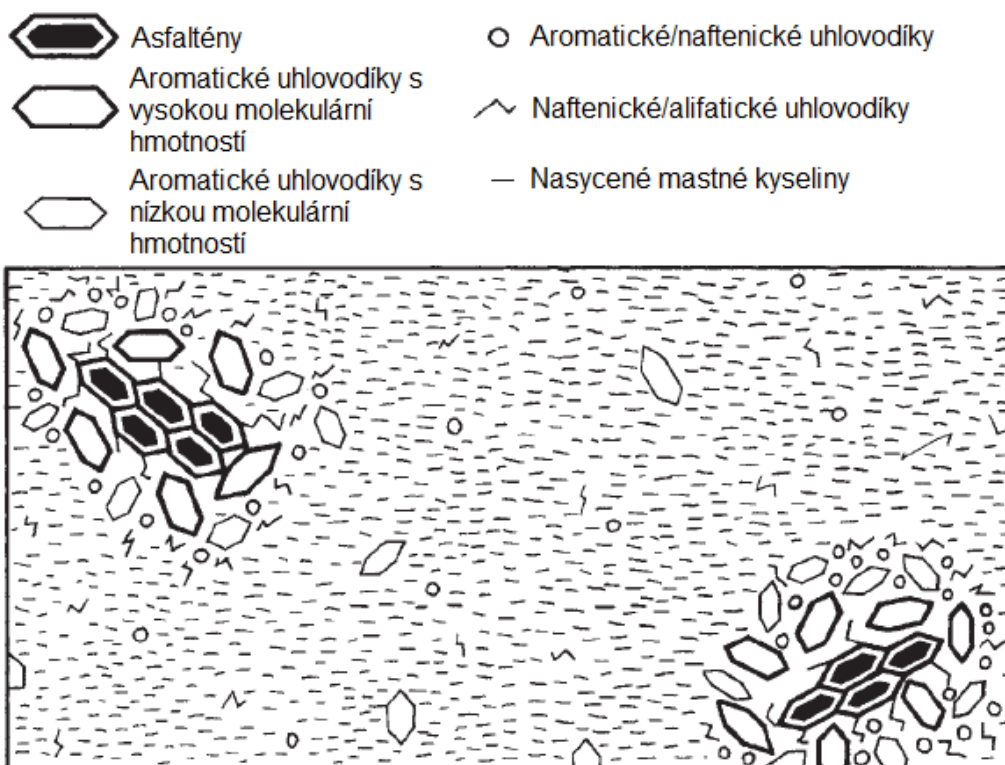
Z praktického hlediska se složení asfaltu dělí na asfaltény a maltény. Maltény mohou být dále rozděleny na nasycené mastné kyseliny, aromáty a pryskyřice. Tyto čtyři skupiny nejsou přesně definovány a je mezi nimi jisté překrývání.

Asfaltény jsou uhlovodíky (n-heptany), nerozpustné amorfnní látky s černou až hnědou barvou. Kromě atomů uhlíku a vodíku mohou obsahovat i atomy dusíku, síry či kyslíku. Všeobecně jsou považovány za vysoce polární a složité aromatické materiály s vysokou molekulární hmotností (800 až 3500 g/mol). Velikost částic je 2 až 5 nanometrů. Asfaltény mají velký vliv na reologické vlastnosti asfaltu. Se zvyšováním asfalténu v asfaltu dochází k jeho vyšší tvrdosti, zvýšení bodu měknutí a tedy k větší viskozitě. Asfalt se skládá z 5 až 25 % z asfalténů.

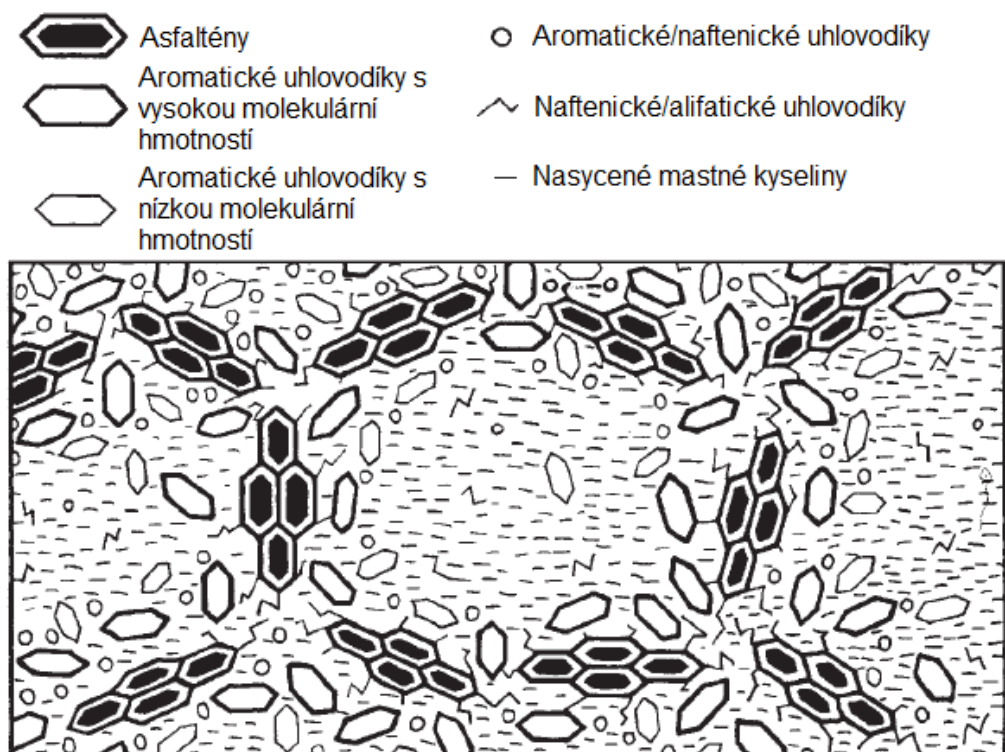
Nasycené mastné kyseliny jsou tvořeny z přímého a rozvětveného řetězce alifatických uhlovodíků s cykloalifatickými sloučeninami. Jsou to nepolární viskózní oleje žluté až čiré barvy. Průměrná molekulární hmotnost kolísá mezi 470 až 880 g/mol. Obsah nasycených mastných kyselin v asfaltu je 5 až 20 %.

Aromáty obsahují naftenické aromatické sloučeniny s nejnižší molekulární hmotností. Skládají se z nepolárních uhlíkových řetězců připojených k nenasyceným aromatickým kruhům. Představují hlavní podíl disperzního média pro asfatény v asfaltu. Jsou to tmavě hnědé viskózní tekutiny. Jejich obsah v asfaltu je 40 až 65 % a průměrná molekulární hmotnost se pohybuje v rozmezí 570 až 980 g/mol.

Pryskyřice jsou rozpustné v uhlovodíku (n-heptanu). Převážně se skládají z vodíku a uhlíku a obsahují malé množství atomů kyslíku, síry a dusíku. Mají tmavě hnědou barvu, jsou tuhé či polotuhé a velice přilnavé. Podíl pryskyřice a asfaténů v asfaltu do jisté míry udává, zda má asfalt charakter Sol nebo Gel, viz obrázek 4 a 5. Molekulární hmotnost pryskyřic v asfaltu se pohybuje mezi 780 až 1400 g/mol. [5]



Obrázek 4. Schématické znázornění asfaltu s charakterem Sol [5].



Obrázek 5. Schématické znázornění asfaltu s charakterem Gel [5].



## 2.1. Polymery modifikující asfaltová pojiva

Za účelem zlepšení vlastností asfaltového pojiva se do něho přidávají modifikátory a to především v podobě polymerů. Polymerem se rozumí makromolekula sestávající z mnoha opakujících se molekul jednoho nebo více druhů atomů nebo skupin spojených navzájem. Přidáním polymeru do asfaltového pojiva dochází ke zlepšení vlastností celé asfaltové směsi, ve které bylo modifikované asfaltové pojivo použito. V rozsahu teplot vyskytujícím se v asfaltové vozovce během roku si polymery zachovávají téměř konstantní tuhost. V zimě při nízkých teplotách je asfaltové pojivo křehké, ale polymer má stále svou pružnost a stává se ve směsi měkkou složkou. Díky tomu dochází ke snížení rizika vzniku nízkoteplotních trhlin. Oproti tomu v létě při vysokých teplotách dochází k měknutí asfaltového pojiva a polymer se stává tuhým složkou směsi. Tím se zvyšuje odolnost asfaltové směsi proti vyjíždění kolejí.

Polymery používané k modifikaci asfaltového pojiva lze rozdělit do tří skupin: termoplastické elastomery, termoplastické polymery neboli plastomery a reaktivní terpolymery. Nejrozšířenější zástupci z jednotlivých skupin jsou:

elastomery - styren-butadien-styren (SBS), styren-ethylen-butadien-styren (SEBS), styren-isoprene-styren (SIS), Styren-butadien-rubber (SBR);

plastomery - Ethylen-vinyl acetat (EVA), Ethylen-metyl acrylat (EMA), polyethylen (PE), polypropylen (PP), polystyren (PS);

reaktivní terpolymery - epoxidové pryskyřice, akrylové pryskyřice, polyuretanové pryskyřice.  
[7]

V následujících podkapitolách 2.1.1., 2.1.2. a 2.1.3. jsou blíže specifikovány modifikátory použité v této diplomové práci.

### 2.1.1. Modifikace termoplastickými elastomery

V dnešní době nejvíce používaným elastomerem k modifikaci asfaltu je styren-butadien-styren, dále jen SBS. SBS kopolymer se skládá z pevných polystyrenových domén v pružné matici polybutadienu. Při běžných provozních teplotách asfaltové vozovky jsou polystyrenové složky skelné a přispívají k tuhosti směsi, zatímco polybutadienové složky jsou gumové a přispívají k pružnosti asfaltové směsi.

Smísením SBS kopolymeru a asfaltového pojiva dochází k interakci mezi polystyrenovými složkami a některými nasycenými mastnými kyselinami a aromatickými kruhy. Kopolymery vstřebávají tyto lehké složky asfaltového pojiva, což vede k bobtnání polystyrenu a zvyšování

tvrdosti asfaltu. Pokud je obsah kopolymeru v asfaltovém pojivu nízký, je v něm SBS rozptýlen. Se zvyšováním koncentrace kopolymeru dochází k inverzi a v asfaltovém pojivu se vytváří gumová podpůrná síť, kterou vyplňuje asfalt.

Takto modifikovaný asfalt má vyšší komplexní modul a viskozitu, lepší pružnost a zvýšenou odolnost proti nízkoteplotním trhlinám a trvalým deformacím. Nevýhodou asfaltového pojiva modifikovaného SBS kopolymerem je nestabilita při skladování, jelikož dochází stále ke vstřebávání lehkých složek asfaltu termoplastickými elastomery. S úbytkem lehkých složek v modifikovaném asfaltovém pojivu může dojít k oddělení pojiva a kopolymeru. Dalším problémem je nízká odolnost vůči žáru, oxidaci a ultrafialovému záření. [6]

V této diplomové práci byl použit elastomer SBS značky Kraton® D1101 od společnosti Kraton.

### **2.1.2. Modifikace termoplastickými polymery (plastomery)**

Velmi používanými plastomery pro modifikaci asfaltů jsou etylenové kopolymery, jako je například ethylen-vinyl acetát neboli EVA. Vlastnosti EVA úzce souvisí s obsahem vinylacetátu v tomto kopolymeru. Jestliže je obsah vinyl acetátu nízký, stupeň krystalizace je vysoký a vlastnosti EVA jsou podobné vlastnostem polyetylenu s nízkou hustotou. S přibývajícím obsahem vinyl acetátu EVA kopolymer získává dvoufázovou mikrostrukturu z pevné polyetylenové krystalové fáze a pružné vinyl acetátové fáze a snižuje se stupeň krystalizace. Pokud je stupeň krystalizace vysoký může dojít k nedostatku interakcí v asfaltovém pojivu. Naopak pokud je stupeň krystalizace nízký může docházet k narušení mikrostruktury v kopolymeru.

Po přidání EVA kopolymeru do asfaltového pojiva dochází k interakci s lehkými složkami asfaltového pojiva a kopolymery bobtnají. Při malém množství EVA kopolymeru v asfaltu je kopolymer rozptýlen. S narůstajícím množstvím kopolymeru se stává asfalt rozptýlenou fází. Jestliže se vytvoří dvě vzájemně propojené fáze kopolymeru a asfaltového pojiva, vlastnosti takto modifikovaného asfaltu lze do značné míry zlepšit. EVA vytváří v asfaltu tuhou a pevnou síť.

Asfaltové pojivo modifikované kopolymerem EVA má vyšší odolnost proti vyjíždění kolejí při vysokých teplotách. Další výhodou je relativně dobrá skladovací stabilita. Nevýhodou aplikace tohoto kopolymeru je, že nijak nezlepšuje pružnost asfaltového pojiva. [7]

V této diplomové práci byl použit plastomer EVA značky Evatane® od společnosti Arkema S.A.

### 2.1.3. Modifikace reaktivními TER polymery

V současnosti je nejnovějším trendem modifikace asfaltů pomocí reaktivních elastomerních terpolymerů (RET). Reaktivní elastomerní terpolymer je schopen chemického provázání s asfaltovou maticí, nejde tak pouze o rozptýlení modifikátoru v asfaltovém pojivu, ale dochází k homogennímu pojiva. Reaktivní elastomerní terpolymer je v horkém asfaltovém pojivu dobře rozpustitelný.

Přidáním RET do asfaltového pojiva dochází k adiční reakci s karboxylovými skupinami asfaltu. Přesnější reakce však není zatím známa, například zda vzniká vlastní polymerní síť, která nemusí obsahovat uhlíkové řetězce.

V této diplomové práci byl použit reaktivní elastomerní terpolymer značky Elvaloy®RET od společnosti DuPont. Chemické složení je ethylen-glycidyl-akrylát. Základem modifikace asfaltového pojiva pomocí Elvaloy®RET je polymerace tří monomerů: ethylen, butylakrylátu a glycidylmetakrylátu. Přítomnost glycidylové složky v tomto modifikátoru způsobuje, že při chemické vazbě s asfaltem se se polymer chová jako epoxid pryskyřice.

Výhodou modifikace asfaltového pojiva reaktivním elastomerním terpolymerem je stabilita při skladování díky chemickým vazbám, takže nedochází k separaci asfaltu a terpolymeru. Dalšími výhodami jsou delší životnost a lepší odolnost proti tvoření kolejí, praskání, únavě materiálu a působení chemikálií. Nevýhodou však je výrazně vyšší doba potřebná k namíchání asfaltového pojiva modifikovaného reaktivním elastomerním terpolymerem. [8]

## 2.2. Druhy použitých modifikovaných asfaltových pojiv

V této diplomové práci byli použity následující modifikátory a asfaltové pojivo:

**Vzorek 1 (SBS + RET)** - asfaltové pojivo od společnosti Total penetrace 50/70 modifikované 4 % SBS (Kraton D1101), 2 % RET (Elvaloy 5160) a 0,2 % N400 (kyselina dodaná pro lepší zpracovatelnost pojiva a reaktivního elastomerního terpolymeru).

**Vzorek 2 (SBS + EVA)** - asfaltové pojivo od společnosti Total penetrace 50/70 modifikované 4 % SBS (Kraton D1101) a 3 % EVA (Evatane).

**Vzorek 3 (RET)** - asfaltové pojivo od společnosti Total penetrace 50/70 modifikované 2% RET (Elvaloy 5160) a 0,2 % N400 (kyselina dodaná pro lepší zpracovatelnost pojiva a reaktivního elastomerního terpolymeru).

Na obrázku č. 6 jsou patrné rozdíly mezi granulami použitých modifikátorů a to především mezi SBS a RET nebo EVA.



Obrázek 6. Granule použitých modifikátorů (foto autor).

### 3. PŘÍPRAVA VZORKŮ A POPIS POUŽITÝCH ZKOUŠEK

Zkoušky asfaltových pojiv je možné rozdělit do dvou kategorií: zkoušky empirické (základní) a zkoušky funkční (Superpave®).

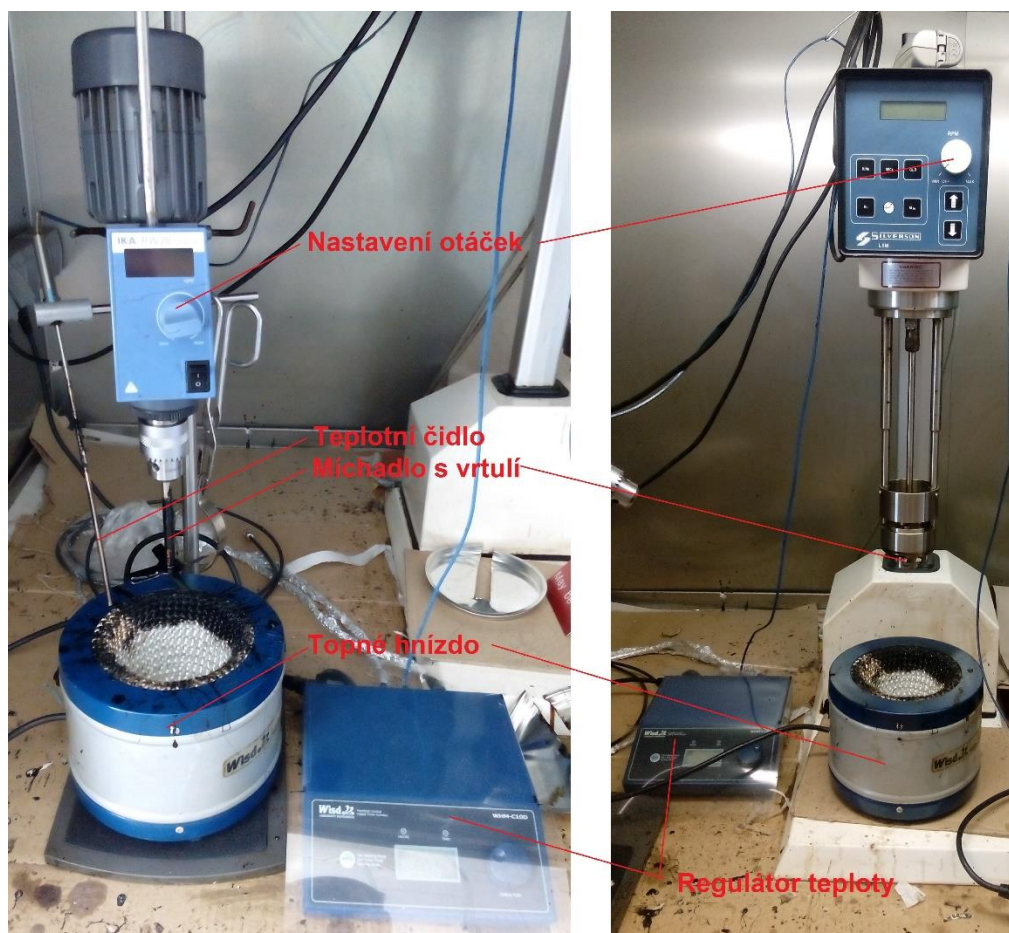
Po mnoho let jsou asfaltová pojiva charakterizována použitím empirických zkoušek. Nejpoužívanější empirické zkoušky jsou stanovení penetrace jehlou, duktilita, bod lámavosti, bod měknutí metodou kroužek a kulička a stanovení viskozity. Tyto zkoušky jsou jednoduché a rychlé. Problém však je zkušební teplota. Při zkouškách jsou použity teploty, které nerepresentují reálné rozpětí teplot v položených asfaltových vrstvách v provozu. Také nedokáží přesněji charakterizovat vlastnosti asfaltových pojiv při nízkých teplotách, výrobě směsi a jejich stárnutí. Dalším problémem je špatná charakteristika modifikovaných asfaltových pojiv, jelikož jejich elastické chování nemusí být lineární.

Z těchto důvodů byl v Americe od roku 1987 do roku 1993 proveden výzkum Strategic Highway Research Program k vyvinutí nových metod ke zkoušení a specifikaci asfaltových pojiv. S tímto výzkumem byli představeny funkční zkoušky Superpave a také byl představen dynamický smykový reometr, jako přístroj k charakterizování viskoelastického chování asfaltových pojiv a zjištění odolnosti asfaltových pojiv proti vyjíždění kolejí. Funkční zkoušky jsou: zkoušky na dynamickém smykovém reometru (DSR), Multiple Stress Creep and Recovery Test (MSCRT), Stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru (BBR), Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) a Urychlené dlouhodobé stárnutí v tlakové nádobě (PAV). [9]

#### 3.1. Příprava modifikovaného asfaltového pojiva

Asfaltové pojivo dodané ve velké plechové nádobě je v sušárně rozehráno při teplotě 180 °C až 200 °C a je nalito v dostatečném množství do plechovky menší, jejíž velikost umožňuje její vložení do topného hnízda. Asfaltového pojiva by mělo být v takovém množství, aby dostačovalo na provedení všech požadovaných zkoušek. Plechovka však nesmí být naplněna až po okraj, aby při následném míchání nedocházelo k vytečení asfaltu z plechovky, znečištění topného hnízda a prostředí laboratoře. Naplněná menší plechovka se poté umístí do topného hnízda a zahřívá se na teplotu 180 °C. Teplota je automaticky udržována za pomoci externího regulátoru s teplotním čidlem vloženým v asfaltovém pojivu. Rozehřáté asfaltové pojivo je mícháno pomocí hřídelového míchadla s vrtulí, pokud se jedná o reaktivní terpolymer (RET) či plastomer (EVA) nebo na vysokosmykovém mlýnu pokud je modifikátorem elastomer (SBS). Rychlost míchání je v rozmezí 400 až 600 otáček za minutu u hřídelového míchadla s vrtulí. U vysokosmykovém mlýnu je rychlost 4000 otáček za minutu. Jestliže je dosaženo požadované

teploty, tedy 180 °C, může se do asfaltového pojiva přisypat požadované množství modifikátoru. Následně je modifikované pojivo dále mícháno. Doba míchání je závislá na typu použitého modifikátoru. Jestliže se jedná o elastomery (SBS) či plastomery (EVA), doba míchání je 20 až 30 minut, tak aby došlo k jejich rozpuštění v pojivu. Pokud je do asfaltového pojiva přidáván reaktivní terpolymer doba míchání se pohybuje v rozmezí 5 až 6 hodin. Po uplynutí této doby je míchání ukončeno a plechovka s modifikovaným asfaltovým pojivem je vyjmuta z topného hnízda. Takto namíchané modifikované asfaltové pojivo lze podrobit požadovaným zkušebními metodám. Soustava míchadla a vysokosmykového mlýnu, topného hnízda a externího regulátoru s teplotním čidlem viz obrázek č. 7.

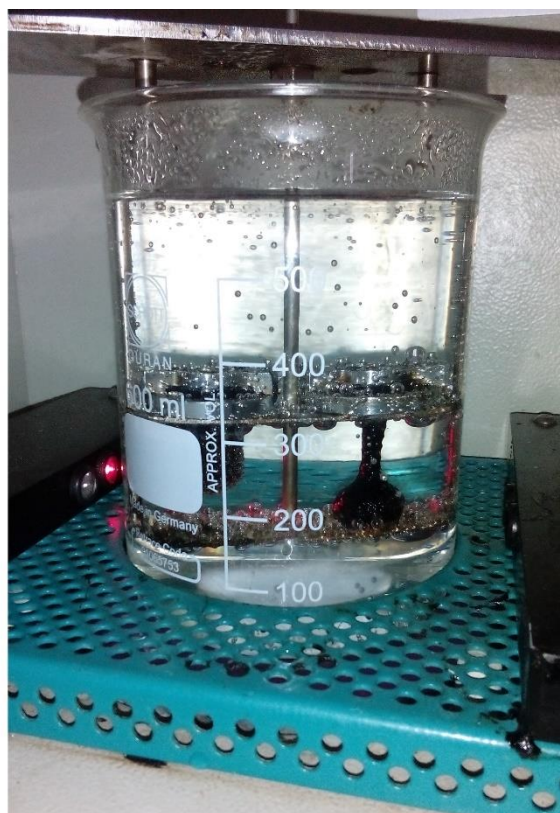


**Obrázek 7. Míchací soustavy, vlevo míchadlo s vrtulí a vpravo vysokosmykový mlýn (foto autor).**

### 3.2. Bod měknutí asfaltového pojiva metodou kroužek a kulička

Metoda stanovení bodu měknutí asfaltových pojiv je přesně popsána v normě ČSN EN 1427 - Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení bodu měknutí - Metoda kroužek a kulička [10].

Testované asfaltové pojivo se nechá dostatečně rozeřhát v sušárně (cca 180°C až 200 °C) v plechovce volně přikryté víčkem, aby nedocházelo k oxidaci. Poté se zamíchá pro zachování homogenity a je nalito do dvou předem připravených kovových kroužků. Kroužky jsou umístěny na pevném podkladě opatřeném separační vrstvou, například na kovové desce s pečícím papírem. Naplněné kroužky se nechají po dobu 30 minut vychladnout v laboratorní (pokojové) teplotě. Po vychladnutí je seříznuo a zarovnáno přebytečné pojivo s horním okrajem kroužku. Následně se kroužky umístí do speciální konstrukce a na kroužky se nasadí středící prstence s kuličkami. Tato celá sestava je vložena do kádinky s lázní, nacházející se na měřicím zařízení, zobrazením na obrázku 8. Kádinka obsahuje vodní lázeň, pokud předpokládáme, že bod měknutí se nachází v rozmezí 28 °C až 90 °C, nebo obsahuje glycerinovou lázeň, jestliže má být bod měknutí vyšší. Dále je kádinka s lázní a celou sestavou na měřicím přístroji ochlazována na počáteční teplotu zkoušky ( $5 \pm 1$ ) °C. Jakmile se teplota lázně ustálí na ( $5 \pm 1$ ) °C, může být započata zkouška. Měřicí přístroj řízeně ohřívá kádinku s lázní a vzorky rychlostí 5 °C za minutu a to za stálého míchání magnetickým míchadlem. Zkouška se ukončí, jakmile dojde k propadu kuliček asfaltovým pojivem na spodní desku speciální konstrukce. Jsou zaznamenány teploty, při kterých došlo k propadu a jejich průměr stanovuje výsledný bod měknutí.



**Obrázek 8.** Přístroj na stanovení bodu měknutí metodou kroužek a kulička a detail propadu kuličky (foto autor).

### 3.3. Stanovení viskozity asfaltu rotačním vřetenovým viskozimetrem

Metoda stanovení viskozity asfaltu rotačním vřetenovým viskozimetrem je přesně popsána v normě ČSN EN 13302 - Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení dynamické viskozity asfaltových pojiv rotačním vřetenovým viskozimetrem [11].

Zkoušené asfaltové pojivo se umístí do sušárny v plechovce s víčkem, aby nezoxidovalo. Následně je zahříváno, dokud není tekuté (teplota cca 180 °C až 200 °C). Pojivo se zamíchá pro zachování homogenity. Poté je 10,7 gramů asfaltového pojiva nalito do předem připravené hliníkové nádoby. Nádoba se vzorkem asfaltu se umístí do topného hnízda pod viskozimetrem a je předehřívána společně s vřetenem na požadovanou zkušební teplotu. Hloubka ponoření vřetene je udána výrobcem zkušebního zařízení. Vřeteno by však mělo být ponořeno celé. Zkušební teplota v této diplomové práci má hodnoty 135 °C a 165 °C. Během doby předehřívání již můžeme nechat vřeteno otáčet malou smykovou rychlostí. Jakmile je dosaženo požadované teploty (135 °C), nastaví se smyková rychlost vřetene, tak aby hodnota byla v rozmezí 20 % až 80 % pracovního rozsahu přístroje. Měření se nechá ustálit a pak je zaznamenána hodnota, viskozita, smyková rychlost a teplota, zobrazená na rotačním viskozimetru. Dále se může přistoupit k předehřívání na teplotu vyšší, v tomto případě tedy 165 °C. Jakmile je dosaženo požadované teploty, opět se nastaví smyková rychlost vřetene v rozmezí 20 % až 80 % pracovního rozsahu přístroje. Po ustálení měřených hodnot dojde k jejich zaznamenání a zkouška může být ukončena. Výsledkem je dynamická viskozita v Pa\*s či mPa\*s a to jako aritmetický průměr dvou výsledků získaných ze dvou samostatných vzorků.





Obrázek 9. Rotační vřetenový viskozimetr a nádoby se vzorky asfaltu (foto autor).

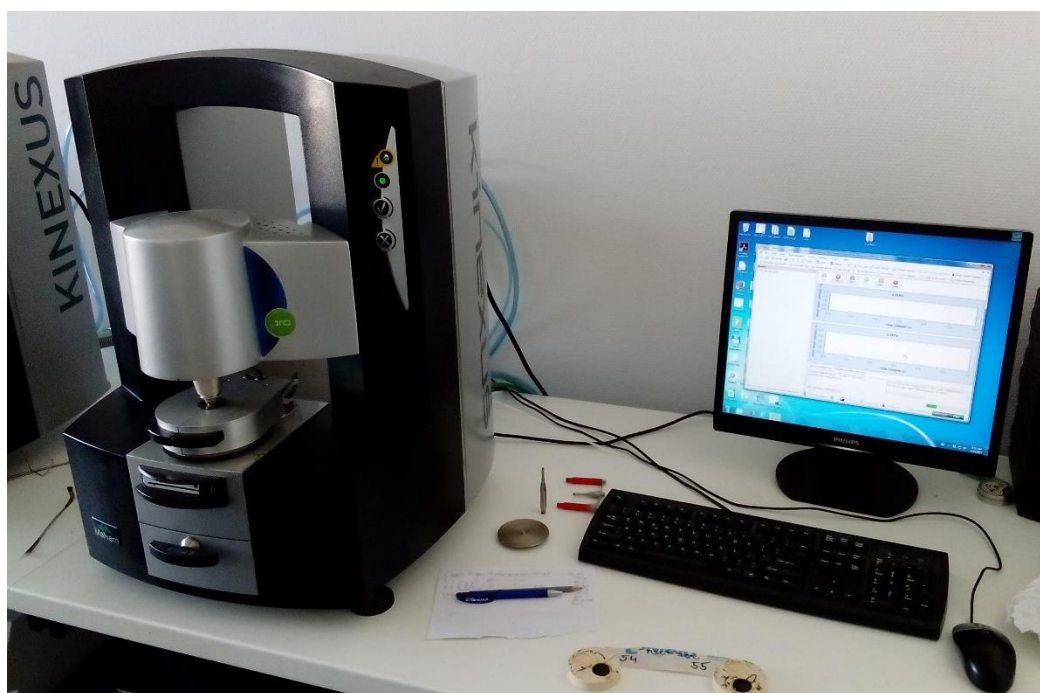
### 3.4. Zkoušky dynamickým smykovým reometrem DSR

Reometr je komplexní laboratorní zařízení určené k měření reologických vlastností různých materiálů. Používá se především pro látky, které nemohou být definovány pouze jednou hodnotou viskozity a je tedy třeba změřit i další parametry. Existují dva základní typy reometrů. Rotační neboli smykový reometr a tahový reometr.

Měření mé diplomové práce bylo prováděno na dynamickém smykovém reometru Kinexus od Britské firmy Malvern, viz obrázek 10. Použitý reometr mimo jiné umožňuje komplexní měření modulu ve smyku a úhlu fázového posunu a to v širokém rozsahu zkušebních frekvencí (1  $\mu\text{Hz}$  až 150 Hz) a teplot (- 40  $^{\circ}\text{C}$  až 200  $^{\circ}\text{C}$ ). Rychlost ohřevu či chlazení prostoru se vzorkem je 30  $^{\circ}\text{C}$  za minutu. Přístroj je dále schopen vyvinout kroutící moment od 0,05  $\mu\text{Nm}$  do 200 mNm.

Tyto přístroje však mají stále vysokou pořizovací cenu, i když s vývojem výpočetní techniky pomalu klesá. [12]

Použitý reometr Kinexus se skládá z rámu, kde ve spodní části je stator a ve vrchní polovině se pohybuje rotor. Mezi statorem a rotorem je během zkoušky umístěný vzorek. Pohyblivá geometrie rotoru, pohybujícího se na rámu, je uložena ve vzduchovém ložisku. Vzduchové ložisko má minimální tření a umožňuje velmi přesné měření. Proto při používání tohoto reometru musí být dosaženo vždy potřebného tlaku v přístroji, aby nedošlo k jeho poškození, což zajišťuje kompresor. Ohřev případně chlazení geometrie a vzorku je zajištěno ze spodu i z vrchu, tak aby v každém místě vzorku byla daná teplota. Teplotní regulaci zajišťuje Peltierův článek společně s chladícím zařízením Julabo. Ovládání reometru Kinexus probíhá přes připojený počítač a software rSpace. Tento software je dodáván společně s přístrojem. Samotný reometr má pouze strohý ovládací panel.



**Obrázek 10. Dynamický smykový reometr Kinexus (foto autor).**

### **3.4.1. Příprava vzorků a reometru na zkoušky**

Vzorky pojiv používaných při zkouškách v dynamickém smykovém reometru mají tvar disků. Velikost disku závisí na geometrii použité na reometru. V této diplomové práci byla pro všechna měření na reometru použita geometrie (paralelní uspořádání destiček) s průměrem 25 mm.

Asfaltové pojivo se nechá v sušárně dostatečně rozeřát (teplota cca 180°C až 200 °C), aby mohlo být odlito do forem. Pojivo se zamíchá pro zachování homogenity a je odlito do silikonových forem, které zaručují dobré vyloupenutí a žádné znehodnocení vzorků, jak je možné vidět na obrázku 11. Poté se odlité vzorky nechají stabilizovat na dobu alespoň 30 minut v laboratorní teplotě.



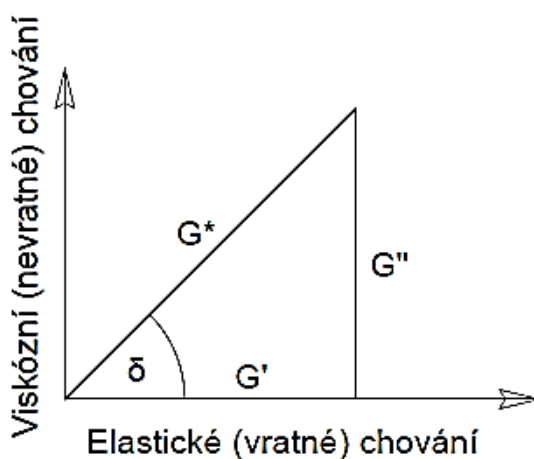
**Obrázek 11. Vzorky asfaltových pojiv v silikonové formě pro zkoušku na dynamickém smykovém reometru (foto autor).**

Příprava dynamického smykového reometru začíná spuštěním kompresoru, chladícího zařízení, počítače, samotného reometru a nakonec softwaru rSpace. Dále je do reometru umístěna požadovaná geometrie. Provede se inicializace reometru, tedy stanovení nulové mezery a maximálního rozsahu přístroje. V softwaru rSpace se zvolí typ zkoušky, který má být proveden, v případě této diplomové práce se jedná o zkoušku stanovení modulu ve smyku, fázového úhlu a kritické teploty nebo zkoušku MSCR. Pokračuje se nastavením počáteční teploty zkoušky, na kterou má být vzorek temperován před stlačením a také se nastaví požadovaná zkušební mezera. Pro zkoušku stanovení modulu ve smyku, fázového úhlu a kritické teploty byla nastavena počáteční teplota 60 °C a 76 °C a pro zkoušku MSCR teplota 76 °C. Zkušební mezera, na kterou je vzorek stlačen, byla pro všechna měření zvolena ( $1 \pm 0,01$ ) mm. Následně je geometrie reometru zahřáta na nastavenou teplotu, vloží se disk asfaltového pojiva a je stlačen. Předem nahřátou špachtlí se seřízne přebývající materiál kolem zkušební geometrie s patřičnou přesností. Reometr poté vzorek přesně domáčkne na nastavenou zkušební mezera. Dále následuje již samotná zkouška asfaltového pojiva (viz kapitola 3.3.2 nebo 3.3.3.).

### **3.4.2. Stanovení komplexního modulu ve smyku, fázového úhlu**

Přesný popis zkoušky je uveden v normě ČSN EN 14770 - Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu - Dynamický smykový reometr (DSR) [13].

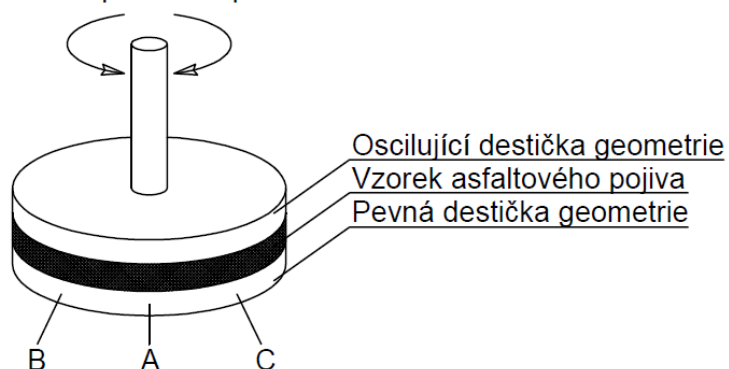
Podstatou této oscilační zkoušky je měření odezvy deformace pojiva na působící napětí při široké škále teplot a frekvencí zatěžování. Komplexní smykový modul udává celkový odpor pojiva, vystaveného opakujícímu se smykovému napětí, proti deformaci. Smykový modul se skládá z elastické a viskózní složky. Elastická (vratná) složka  $G'$  reprezentuje reálnou část komplexního smykového modulu  $G^*$ . Viskózní (nevratná) složka  $G''$  reprezentuje ztrátový modul. Poměr mezi těmito dvěma složkami je dán fázovým úhlem  $\delta$ . Vlastnosti asfaltového pojiva jsou závislé na teplotě a frekvenci zatěžování. Při nízkých teplotách je asfaltové pojivo elastické a po odstranění zatížení je schopno se vrátit do původního tvaru. Tomuto stavu odpovídá elastická složka s fázovým úhlem  $\delta$  blízcím se  $0^\circ$ . Oproti tomu při teplotách vysokých je asfaltové pojivo viskózní a po odstranění zatížení není schopno navrácení do původního stavu. V tomto stavu je fázový úhel  $\delta$  blízký  $90^\circ$ . [14]



**Obrázek 12. Složky komplexního smykového modulu (graf autor).**

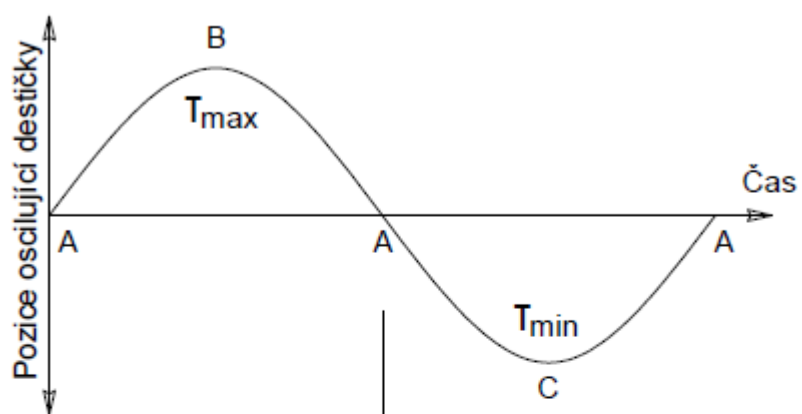
Zkouška se zahájí při první zvolené teplotě, v této diplomové práci při  $60^\circ\text{C}$  nebo při  $76^\circ\text{C}$ . Geometrie reometru osciluje na upevněném vzorku, čímž se vnáší sinusové smykové zatížení, které odpovídá zatěžování vozovky. Postupně se oscilační frekvence zvyšuje v nastaveném rozsahu. Po dokončení měření pro první teplotu se přechází na teplotu vyšší. V této práci se teplota měření zvyšovala o  $6^\circ\text{C}$ . Rychlost ohřevu však nesmí přesáhnout  $5^\circ\text{C}$  za minutu. Zkouška pokračuje, dokud se nenaměří komplexní modul ve smyku mimo rozsah použité zkušební geometrie. Během zkoušky je měřen torzní moment a zpoždění, neboli fázový posun, mezi smykovým napětím a smykovým přetvořením. Torzní moment je možné přepočítat smykové napětí. Z těchto naměřených veličin lze vypočítat smykový modul  $G^*$  a fázový úhel  $\delta$ . [13]

Působení napětí nebo přetvoření

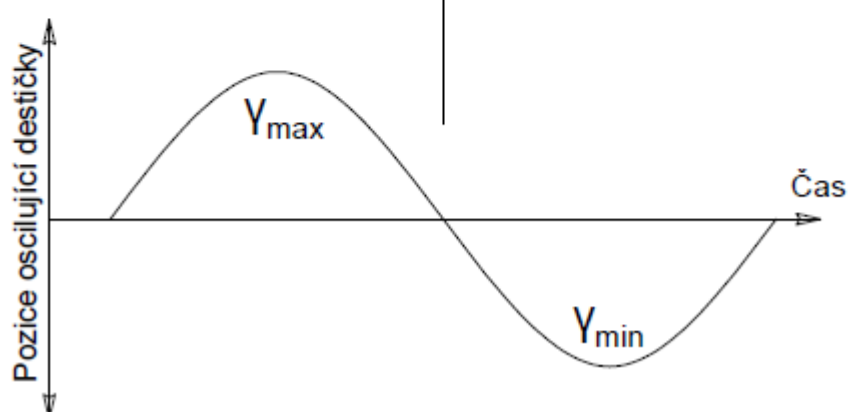


Obrázek 13. Oscilace geometrie DSR (obrázek autor).

Působící smykové napětí



Vyvolané smykové přetvoření



Obrázek 14. Graf smykového napětí a přetvoření a fázového úhlu (graf autor).

Výsledné hodnoty jsou vypočteny následovně:

$$\tau_{max} = \frac{2T}{\pi * r^3} \qquad \gamma_{max} = \frac{\theta * r}{h} \qquad G^* = \frac{\tau_{max}}{\gamma_{max}}$$

- $\tau_{max}$  maximální smykové napětí [Nm<sup>-2</sup>];
- $\gamma_{max}$  maximální smykové přetvoření [-];
- $G^*$  smykový modul [kPa];
- $T$  maximální torzní moment [Nm];
- $r$  poloměr vzorku [mm] (zvolená geometrie 20 mm);
- $\theta$  úhlové vybočení [rad];
- $h$  výška vzorku [mm] (zvolená zkušební mezera 1 mm).

V softwaru rSpace jsou již přednastaveny určité sekvence měření. Pro měření této diplomové práce byla použita sekvence AASHTO.

### 3.4.3. MSCRT (Multiple Stress Creep Recovery Test)

Tato zkouška je přesně popsána v normě ČSN EN 16659 - Asfalty a asfaltová pojiva - Zkouška MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery Test). [15]

Metoda MSCR je poměrně nová, byla zavedena až s koncem minulého tisíciletí. Cílem tohoto testu je určení odolnosti daného asfaltového pojiva proti vyjíždění kolejí na vozovce. Výhodou tohoto testu je jeho rychlost a snadnost. Nevýhodou je, že jelikož je tato metoda nová, není ještě zcela jasné, zda používaná napětí či počet cyklů zatěžování je nejlepší pro charakterizování odolnosti proti vyjíždění kolejí, vzhledem k různým druhům dopravního zatížení a rychlostem vozidel. Tato zkouška se provádí na krátkodobě zestárých (RTFOT) vzorcích asfaltových pojiv.

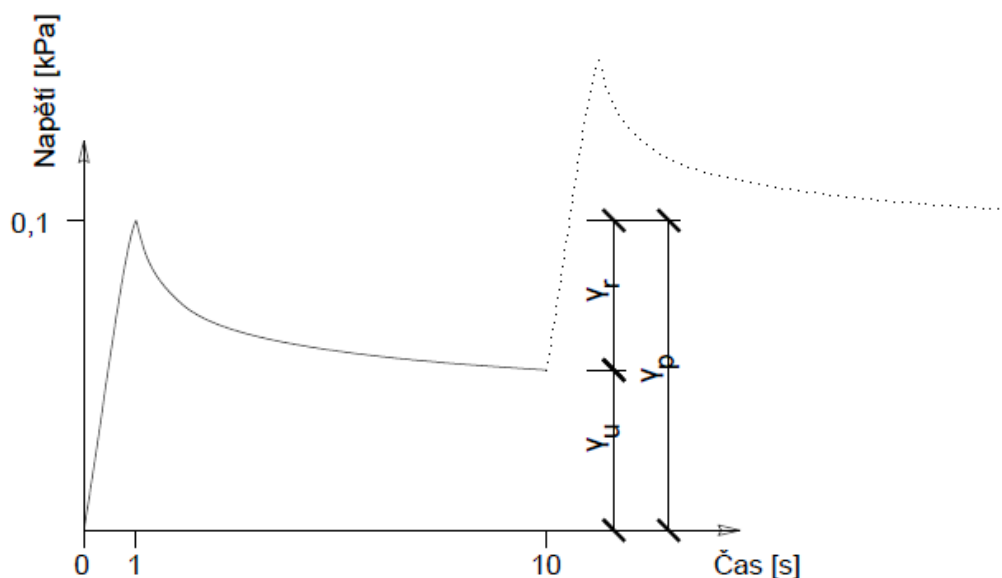
Metoda je prováděna dynamickém smykovém reometru při teplotě 76 °C. Zkouška probíhá tak, že je na vzorek asfaltového pojiva v dynamickém smykovém reometru po dobu 1 vteřiny aplikováno napětí 0.1 kPa. Následně je napětí odstraněno a na 9 vteřin je ponecháno asfaltové pojivo k navrácení do původního stavu. Tento cyklus je opakován desetkrát a poté je napětí zvýšeno na 3,2 kPa. Opět je jednu vteřinu aplikováno napětí a devět vteřin ponecháno relaxaci a to vše opět desetkrát. [16]

Výsledkem měření je nevratná smyková poddajnost  $J_{nr}$  při opakovaném zatížení a slouží jako indikátor citlivosti a napěťové závislosti asfaltových pojiv vůči vzniku trvalých plastických deformací. Další veličinou je procentuální zotavení recovery při opakovaném zatížení na různé úrovni smykového napětí a má u asfaltových pojiv stanovit přítomnost elastické odezvy a její napěťovou závislost.

Výpočty výše zmíněných hodnot jsou následující:

$$J_{nr} = \frac{\gamma_u}{\gamma_p} \quad \text{recovery} = \frac{\gamma_r}{\gamma_p} * 100$$

- $J_{nr}$     nevratná smyková poddajnost [ $\text{kPa}^{-1}$ ];  
 $\gamma_p$     aplikované napětí [ $\text{kPa}$ ];  
 $\gamma_r$     napětí elastické (vratné) deformace [ $\text{kPa}$ ];  
 $\gamma_u$     napětí plastické (nevratné) deformace [ $\text{kPa}$ ];  
*recovery*    procentuální zotavení [%];



**Obrázek 15. Graf průběhu napětí při zkoušce MSCR během cyklu (graf autor).**

Dle nevratné smykové poddajnosti  $J_{nr}$  vypočtené pro vzorky pojiv po krátkodobém stárnutí metodou RTFOT je možné zkoušené asfaltové pojivo zařadit podle americké standardizace AASHTO MP 19 [17] do následujících skupin:

- S    Standard Grade -  $J_{nr} 4 - 2 \text{ kPa}^{-1}$
- H    Heavy Grade -  $J_{nr} 2 - 1 \text{ kPa}^{-1}$
- V    Very Heavy Grade -  $J_{nr} 1 - 0,5 \text{ kPa}^{-1}$
- E    Extreme Grade -  $J_{nr} 0,5 - 0 \text{ kPa}^{-1}$

Podle těchto skupin je možné v tabulce 1 zvolit vhodné pojivo pro danou komunikaci v závislosti na rychlosti pohybu dopravy a zatížení dané komunikace.

**Tabulka 1. Návrh pro zvolení vhodného asfaltového pojiva pro danou komunikaci na období 20 let [17].**

Návrh pro zvolení asfaltového pojiva			
ESALs (milion)	Rychlost dopravy		
	Stojící (0 - 20 km/h)	Pomalá (20 - 70 km/h)	Standardní (70 a více km/h)
< 0,3	S	S	S
0,3 - < 3	H	S	S
3 - < 10	V	H	H
10 - 30	E	V	V
≥ 30	E	E	E

ESAL (Equivalent Single Axle Load) vyjadřuje ekvivalentní zatížení na jednu nápravu v USA. Velikost zatížení referenční nápravy je 80 kN a jedná se o nápravu s dvojitými pneumatikami. Koncept výpočtu ESAL je vyvinutý z dat naměřených při testu asociací AASHTO, tak aby reprezentoval vztah deformace různé nápravy s různým zatížením.

Standard Grade (S) je nejtypičtější situací, jestliže je dopravní zatížení menší než 10 milionů ekvivalentních jednonápravových zatížení (ESALs) a rychlost vozidel vyšší než 70 km/h.

High Grade (H) je nejčastější situací, když je zatížení v rozmezí 10 až 30 milionů ESALs a doprava se pohybuje rychlostí 20 až 70 km/h.

Very High Grade (V) je nejčastější situací pokud je zatížení vyšší než 30 milionů ESALs nebo je rychlost dopravy nízká, tedy 20 km/h a méně.

Extreme High Grade (E) je nejčastější situací, když je zatížení vyšší než 30 milionů ESALs a zároveň je rychlost dopravy menší než 20 km/h. [17]

### 3.5. Laboratorní metody simulující stárnutí asfaltových pojiv

Odolnost asfaltových pojiv proti stárnutí se posuzuje pomocí laboratorních zkoušek simulujících stárnutí pojiva. Tyto zkoušky je možné provádět na neupravených asfaltových pojivech nebo na modifikovaných asfaltových pojivech. Asfaltové pojivo, jakožto organická sloučenina, podléhá vlivu stárnutí. Tím dochází ke změnám jeho mechanických a chemických vlastností. Ke stárnutí dochází působením ultrafialového záření, oxidací vzduchem, opakovaným namáháním a tak dále.

Stárnutí asfaltových pojiv však nastává ihned po výrobě při skladování, převozu a zpracování. Laboratorní zkoušky asfaltových pojiv proti stárnutí lze dělit na krátkodobé stárnutí a dlouhodobé stárnutí.



Krátkodobé stárnutí (Short Term Ageing, STA) modeluje stárnutí pojiva při přípravě asfaltové směsi na obalovně, dopravě a pokládce na stavbě. Základními zkouškami krátkodobého stárnutí jsou metody RTFOT, TFOT a RFT. V této diplomové práci byla použita metoda RTFOT.

Dlouhodobé stárnutí (Long Term Ageing, LTA) oproti tomu modeluje stárnutí asfaltového pojiva již ve zhutněné asfaltové směsi ve vozovce zhruba mezi 7 - 10 rokem životnosti. Mezi základní metody popisující dlouhodobé stárnutí patří metody PAV, RCAT a 3xRTFOT (trojnásobná doba zkoušky RTFOT). Pro tuto diplomovou práci byla použita metoda PAV při třech různých zkušebních teplotách. [18]

### **3.5.1. RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test)**

Průběh zkušební metody je přesně popsán v normě ČSN EN 12607-1 - Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu - Část 1: Metoda RTFOT. [19]

Tato metoda byla vyvinuta a poprvé vyzkoušena v 60. letech 20 století a dokáže velmi dobře předpovídat náchylnost asfaltových pojiv k předčasnému stárnutí. V dnešní době je tato metoda nejpoužívanější laboratorní metodou simulující krátkodobé stárnutí asfaltového pojiva. Výsledkem jsou změny fyzikálních vlastností, které lze vyjádřit porovnáním hodnot asfaltových pojiv před stárnutím a po zestárnutí.

Zkouška probíhá v laboratorní RTFOT sušárně, ve které se nachází otáčivý hliníkový držák pro uchycení až osmi skleněných nádobek s asfaltovými pojivy. Nejdříve se nechá zkoušené asfaltové pojivo dostatečně rozehtát v plechovkách v sušárně. Následně je nalito ( $35 \pm 0,5$ ) gramu pojiva do každé skleněné nádoby. Použité nádoby jsou na obrázku č. 16. Během toho se RTFOT sušárna nechá předehřát na teplotu ( $163 \pm 1$ ) °C. Jakmile je sušárna předehřáta, jsou do ní vloženy skleněné nádoby se vzorky asfaltových pojiv a může být započata zkouška, viz obrázek 17. Podstatou této metody je pohybující se tenká vrstva pojiva ve skleněných nádobkách, ohřívána v sušárně na teplotu 163 °C s konstantním přívodem vzduchu. Vzduch je foukán rychlostí ( $4 \pm 0,2$ ) l/min přímo do otáčejících se nádobek. Rychlost otáčení nádobek je ( $15 \pm 0,5$ ) otáček za minutu a zkouška trvá ( $75 \pm 1$ ) minut. Po uplynutí této doby se otáčení zastaví a skleněné nádoby se vzorky pojiv jsou vyjmuty.



**Obrázek 16.** Prázdňá skleněná nádobka, nádobka s 35 gramy pojiva před zkouškou RTFOT a nádobka s 35 gramy pojiva po zkoušce RTFOT (foto autor).



**Obrázek 17.** Sušárna pro zkoušku RTFOT a vkládání skleněných nádobek s asfaltovým pojivem (foto autor).

Na zestárlých asfaltových pojivech metodou RTFOT jsou poté provedeny zkoušky, jako například bod měknutí metodou kroužek a kulička, nebo je provedena zkouška dlouhodobého stárnutí PAV.

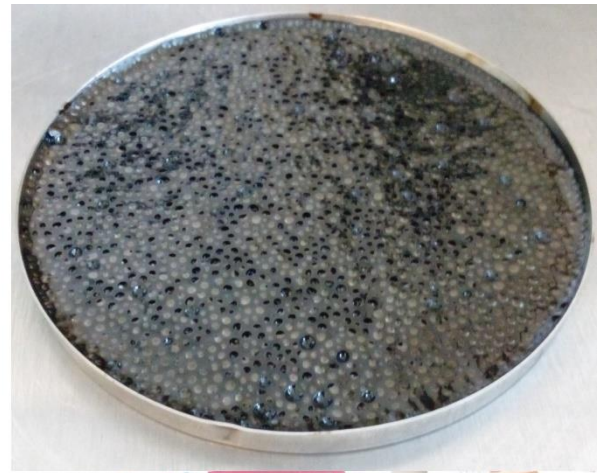
### **3.5.2. PAV (Pressure Ageing Vessel)**

Přesný popis zkoušky je uveden v normě ČSN EN 14769 - Asfalty a asfaltová pojiva - Urychlené dlouhodobé stárnutí v tlakové nádobě (PAV). [20]

Tato metoda byla vyvinuta v 90. letech 20. století a jedná se o urychlené dlouhodobé stárnutí v tlakové nádobě. Metoda PAV je v současné době nejpoužívanější laboratorní metodou

simulující dlouhodobé stárnutí asfaltového pojiva. Vzorek asfaltového pojiva, který má být podroben zkušební metodě PAV, musí být již termooxidačně zatížen zkušební metodou RTFOT (viz kapitola 3.4.1.). Výsledkem jsou změny fyzikálních vlastností, které lze vyjádřit porovnáním hodnot asfaltových pojiv před stárnutím a po zestárnutí.

Zkušební metoda je prováděna ve speciálním přístroji určenému pro metodu PAV. Tento přístroj má tlakovou nádobu, do které se umísťuje stojan s miskami obsahujícími vzorky asfaltových pojiv. Prvním krokem při provádění této zkušební metody je zapnutí přístroje PAV a nastavení parametrů stárnutí. Nastavované parametry jsou následující: zkušební teplota, která v této diplomové práci činí 90 °C, 100 °C a 110 °C a doba stárnutí 20 hodin ± 10 minut. Po nastavení a spuštění programu se sepne sekvence předehřívání tlakové nádoby se stojanem na misky. Mezitím se nechá v sušárně rozehtát zkoušené asfaltové pojivo, tak aby bylo možné ho najít do misek. Do misky je nalito ( $50 \pm 0,5$ ) gramu pojiva v celé její ploše a tloušťka pojiva je přibližně 3,2 mm. Jakmile skončí sekvence předehřívání, jsou misky s asfaltovým pojivem umístěny do stojanu do tlakové nádoby. Tlaková nádoba se pevně uzavře pomocí šroubů, aby neunikal tlak při zkoušce. Poté je tlaková nádoba s miskami ještě dohřívána na požadovanou zkušební teplotu. Zkouška je spuštěna a tlaková nádoba natlakována na ( $2,1 \pm 0,1$ ) MPa ve chvíli, kdy je dosažena teplota v nádobě o 5 - 20 °C nižší než je teplota zkušební. Asfaltové pojivo je po dobu 20 hodin vystaveno tlaku 2,1 MPa a zkušební teplotě. Přetlak zajišťuje změnu difúzních poměrů a vnucenou migraci molekul kyslíku hluboko do zkoumaného materiálu. Po uplynutí 20 hodin se tlak vypustí a misky se vzorky zestárých asfaltových pojiv mohou být vyjmuty.



**Obrázek 18. Zkušební přístroj pro dlouhodobé stárnutí PAV a misky se zestárým asfaltovým pojivem (foto autor).**

Z důvodu použití přetlaku v této zkušební metodě je nutné pojivo v miskách po zkoušce PAV odvzdušnit. K tomuto kroku se používá odvzdušňovací zařízení zobrazené na obrázku 19. Odvzdušňovací zařízení se nechá přehřát na teplotu 163 °C. Poté se misky se zestárým asfaltovým pojivem postupně po jedné vkládají do odvzdušňovacího zařízení. Zde jsou po dobu 30 minut vystaveny podtlaku a zbaveny přebytečného kyslíku. Na odvzdušněných zestárých vzorcích asfaltového pojiva již mohou být prováděny zkoušky, pro zjištění změn fyzikálních či chemických vlastností.



**Obrázek 19. Odvzdušňovací zařízení (foto autor).**

### **3.6. Mikroskop**

Mikroskopické snímky asfaltových pojiv použitých v této diplomové práci byli pořízeny pomocí mikroskopu Leica DM ILM, viz obrázek č. 20. Snímky byly vytvořeny na nezestárlém pojivu a zestárlém pojivu při metodě RTFOT a PAV. Z porovnání snímků jsou patrné změny struktury během stárnutí pojiv a také samotné rozdíly mezi použitými modifikátory.



**Obrázek 20. Mikroskop Leica DM ILM (foto autor).**

Postup tvorby snímků je následující. Nedříve jsou odlity vzorky asfaltového pojiva ve tvaru disků do silikonových forem. Tyto formy zajišťují dobré vyloupenutí vzorků bez jejich porušení. Po odlití se vzorky asfaltového pojiva nechají po dobu 30 minut stabilizovat v laboratorní teplotě a následně jsou vloženy do mrazáku k řádnému vytvrzení. Přibližně po 30 minutách je forma se vzorkem z mrazáku vyjmuta a vzorek asfaltového pojiva je vyloupenut a zlomen v polovině. Jestliže nelze zlomit, ponechá se ještě v mrazáku, dokud neztvrdne. Zlomený vzorek je lomovou stranou přitisknut na laboratorní podložní mikroskop. Mikroskop společně se vzorkem asfaltového pojiva je vloženo do mikroskopu. Pomocí počítače připojeného k mikroskopu se vytvoří zaostřený snímek daného pojiva, na kterém je dobře vidět jeho struktura. Vytvořené snímky zkoušených asfaltových pojiv jsou v příloze č. 1.

## 4. VÝSLEDKY ZKOUŠEK

### 4.1. Bod měknutí asfaltového pojiva metodou kroužek a kulička

Bod měknutí asfaltového pojiva metodou kroužek a kulička byl stanoven dle postupu popsaného v kapitole 3.2. Naměřené hodnoty pro všechny vzorky zkoušených modifikovaných asfaltových pojiv v různých stádiích stárnutí jsou uvedeny v následující tabulce č. 2. Naměřené teploty bodu měknutí jsou dále vyneseny v grafu číslo 1 v kapitole 5.1.

**Tabulka 2. Bod měknutí asfaltového pojiva metodou kroužek a kulička.**

<b>Bod měknutí asfaltového pojiva [°C]</b>					
Vzorek	Nezestárlé	RTFOT	PAV 90	PAV 100	PAV 110
SBS + RET	85,00	84,65	84,70	87,10	89,80
SBS + EVA	68,70	77,00	82,60	83,50	84,00
RET	67,40	71,50	73,90	76,80	79,20

### 4.2. Stanovení viskozity asfaltu rotačním vřetenovým viskozimetrem

Měření této zkoušky bylo provedeno podle postupu uvedeného v kapitole 3.3. Hodnoty viskozit asfaltových pojiv naměřené rotačním vřetenovým viskozimetrem jsou uvedené v tabulkách č. 3 a 4. Kompletní tabulky s naměřenými otáčkami, rozsahem využití přístroje a viskozitami jsou uvedeny v tabulce číslo 5,6 a 7 pro zkušební teplotu 135 °C a v tabulce číslo 8,9 a 10 pro zkušební teplotu 165 °C. V kapitole 5.2. jsou v grafem č. 2 a 3 vyneseny jednotlivé hodnoty viskozit modifikovaných asfaltových pojiv.

**Tabulka 3. Hodnoty viskozity asfaltu naměřené rotačním vřetenovým viskozimetrem při teplotě 135 °C.**

<b>Viskozita při 135°C [mPas]</b>					
Vzorek	Nezestárlé	RTFOT	PAV 90	PAV 100	PAV 110
SBS + RET	10 480,00	12 200,00	16 480,00	17 680,00	23 880,00
SBS + EVA	1 260,00	1 928,00	3 047,00	3 490,00	5 210,00
RET	2 313,00	3 320,00	3 880,00	4 580,00	4 990,00

**Tabulka 4. Hodnoty viskozity asfaltu naměřené rotačním vřetenovým viskozimetrem při teplotě 165 °C.**

<b>Viskozita při 165°C [mPas]</b>					
Vzorek	Nezestárlé	RTFOT	PAV 90	PAV 100	PAV 110
SBS + RET	1 697,00	1 820,00	2 200,00	2 280,00	2 620,00
SBS + EVA	500,00	558,90	662,90	710,00	830,00
RET	453,30	553,30	641,70	674,30	816,70

**Tabulka 5, 6 a 7. Otáčky, rozsah viskozimetru a hodnoty viskozity asfaltu neměřené rotačním vřetenovým viskozimetrem při teplotě 135 °C.**

<b>Vzorek 1 (SBS + RET)</b>					
	Nezestárlé	RTFOT	PAV 90	PAV 100	PAV 110
Otáčky [rpm]	10,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Rozsah přístroje [%]	52,40	30,50	39,60	44,20	59,70
Viskozita [mPas]	10 480,00	12 200,00	16 480,00	17 680,00	23 880,00

<b>Vzorek 2 (SBS + EVA)</b>					
	Nezestárlé	RTFOT	PAV 90	PAV 100	PAV 110
Otáčky [rpm]	50,00	50,00	30,00	20,00	20,00
Rozsah přístroje [%]	31,50	48,20	45,70	34,90	52,10
Viskozita [mPas]	1 260,00	1 928,00	3 047,00	3 490,00	5 210,00

<b>Vzorek 3 (RET)</b>					
	Nezestárlé	RTFOT	PAV 90	PAV 100	PAV 110
Otáčky [rpm]	30,00	20,00	20,00	20,00	20,00
Rozsah přístroje [%]	34,70	33,20	38,80	45,80	49,90
Viskozita [mPas]	2 313,00	3 320,00	3 880,00	4 580,00	4 990,00

**Tabulka 8, 9 a 10. Otáčky, rozsah viskozimetru a hodnoty viskozity asfaltu neměřené rotačním vřetenovým viskozimetrem při teplotě 165 °C.**

<b>Vzorek 1 (SBS + RET)</b>					
	Nezestárlé	RTFOT	PAV 90	PAV 100	PAV 110
Otáčky [rpm]	60,00	50,00	50,00	50,00	50,00
Rozsah přístroje [%]	50,90	45,50	53,50	57,00	65,50
Viskozita [mPas]	1 697,00	1 820,00	2 200,00	2 280,00	2 620,00

<b>Vzorek 2 (SBS + EVA)</b>					
	Nezestárlé	RTFOT	PAV 90	PAV 100	PAV 110
Otáčky [rpm]	120,00	180,00	140,00	100,00	120,00
Rozsah přístroje [%]	30,00	50,20	46,40	35,50	49,80
Viskozita [mPas]	500,00	558,90	662,90	710,00	830,00

<b>Vzorek 3 (RET)</b>					
	Nezestárlé	RTFOT	PAV 90	PAV 100	PAV 110
Otáčky [rpm]	150,00	120,00	120,00	140,00	120,00
Rozsah přístroje [%]	34,00	33,20	38,50	47,20	49,00
Viskozita [mPas]	453,30	553,30	641,70	674,30	816,70



### 4.3. Stanovení komplexního modulu ve smyku, fázového úhlu

Tato zkouška byla provedena dynamickým smykovým reometrem v souladu s postupem v kapitole 3.4.2. Výsledky již komplexního modulu děleného fázovým úhlem spočtené softwarem rSpace jsou uvedeny v tabulkách č. 11 a 12 pro každý vzorek asfaltového pojiva. Kompletní tabulky s naměřenými komplexními moduly a fázovými úhly jsou uvedeny v tabulce číslo 13,14 a 15 pro zkušební teplotu 60 °C a v tabulce číslo 16,17 a 18 pro zkušební teplotu 76 °C. Výsledky podílu komplexního smykového modulu a fázového uhlu jsou vyneseny v grafu č. 6 a 9 v kapitole 5.3.

**Tabulka 11. Naměřený komplexní modul ve smyku dělený fázovým úhlem při teplotě 60 °C.**

DSR 60°C [G*/sind]					
Vzorek	Nezestárlé	RTFOT	PAV 90	PAV 100	PAV 110
SBS + RET	12,47	20,63	37,63	46,85	64,67
SBS + EVA	8,82	19,10	38,23	50,57	92,23
RET	6,88	10,50	23,62	23,79	42,67

**Tabulka 12. Naměřený komplexní modul ve smyku dělený fázovým úhlem při teplotě 76 °C.**

DSR 76°C [G*/sind]					
Vzorek	Nezestárlé	RTFOT	PAV 90	PAV 100	PAV 110
SBS + RET	3,29	5,90	7,75	9,88	13,59
SBS + EVA	1,59	2,96	5,47	10,05	13,66
RET	1,67	2,43	4,42	5,17	8,43

**Tabulky 13, 14 a 15. Naměřený komplexní modul ve smyku a fázový úhel pro všechna asfaltová pojiva při teplotě 60 °C.**

Vzorek 1 (SBS + RET)					
	Nezestárlé	RTFOT	PAV 90	PAV 100	PAV 110
G*/sinδ	12,47	20,63	37,63	46,85	64,67
Modul ve smyku [kPa]	10,46	16,61	30,86	38,57	52,39
Fázový úhel [°]	56,98	53,65	55,10	55,41	54,11

Vzorek 2 (SBS + EVA)					
	Nezestárlé	RTFOT	PAV 90	PAV 100	PAV 110
G*/sinδ	8,82	19,10	38,23	50,57	92,23
Modul ve smyku [kPa]	8,30	17,12	32,71	42,80	78,97
Fázový úhel [°]	70,24	63,64	58,81	57,81	58,89

<b>Vzorek 3 (RET)</b>					
	Nezestárlé	RTFOT	PAV 90	PAV 100	PAV 110
G*/sinδ	6,88	10,50	23,62	23,79	42,67
Modul ve smyku [kPa]	6,16	9,34	21,15	21,23	37,64
Fázový úhel [°]	63,50	62,77	63,64	63,20	61,92

**Tabulky 16, 17 a 18. Naměřený komplexní modul ve smyku a fázový úhel pro všechna asfaltová pojiva při teplotě 76 °C.**

<b>Vzorek 1 (SBS + RET)</b>					
	Nezestárlé	RTFOT	PAV 90	PAV 100	PAV 110
G*/sinδ	3,29	5,90	7,75	9,88	13,59
Modul ve smyku [kPa]	2,74	4,80	6,50	7,11	11,14
Fázový úhel [°]	56,20	54,43	57,01	55,66	55,02

<b>Vzorek 2 (SBS + EVA)</b>					
	Nezestárlé	RTFOT	PAV 90	PAV 100	PAV 110
G*/sinδ	1,59	2,96	5,47	10,05	13,66
Modul ve smyku [kPa]	1,54	2,86	5,03	9,17	12,61
Fázový úhel [°]	76,63	75,01	67,03	65,80	67,42

<b>Vzorek 3 (RET)</b>					
	Nezestárlé	RTFOT	PAV 90	PAV 100	PAV 110
G*/sinδ	1,67	2,43	4,42	5,17	8,43
Modul ve smyku [kPa]	1,48	2,11	3,95	4,62	7,54
Fázový úhel [°]	63,37	60,57	63,46	63,33	63,32

#### **4.4. MSCRT (Multiple Stress Creep Recovery Test)**

Metoda MSCRT byla také provedena dynamickým smykovým reometrem v souladu s postupem v kapitole 3.4.3. Výsledky naměřené a spočtené softwarem rSpace jsou uvedeny v tabulkách č. 19 a 20. Vypočtené nevratné smykové poddajnosti  $J_{nr}$  jsou dále zobrazeny v grafech 10 a 11 v kapitole 5.4.

**Tabulka 19. Vypočtené hodnoty nevratné smykové poddajnosti  $J_{nr}$  při teplotě 76 °C a napětí 0,1 kPa.**

<b>MSCR 0,1 kPa, <math>J_{nr}</math> [kPa<sup>-1</sup>]</b>					
Vzorek	Nezestárlé	RTFOT	PAV 90	PAV 100	PAV 110
SBS + RET	0,11	0,06	0,09	0,05	0,04
SBS + EVA	3,03	1,40	0,38	0,21	0,17
RET	1,40	0,64	0,54	0,43	0,27

**Tabulka 20. Vypočtené hodnoty nevratné smykové poddajnosti  $J_{nr}$  při teplotě 76 °C a napětí 3,2 kPa.**

<b>MSCR 3,2 kPa, <math>J_{nr}</math> [kPa<sup>-1</sup>]</b>					
Vzorek	Nezestárlé	RTFOT	PAV 90	PAV 100	PAV 110
SBS + RET	0,16	0,08	0,10	0,09	0,06
SBS + EVA	6,48	2,95	0,78	0,66	0,29
RET	1,52	0,66	0,63	0,52	0,35

#### **4.5. Mikroskop**

Snímky z mikroskopu jsou vytvořeny s 20ti násobným zvětšením. Snímky jsou seřazeny podle průběhu a typu stárnutí v příloze č. 1. Mezi jednotlivými snímky je znatelný rozdíl jednak, co se týče typu modifikátoru, ale také ve změně struktury modifikovaného asfaltového pojiva vlivem stárnutí.

U vzorku 1 (4 % SBS, 2 % RET a 0,2% N400) a vzorku 2 (4% SBS a 3 % EVA) jsou v tmavém asfaltovém pojivu jasně vidět světlé shluky polymerů. Vzorek 1 má shluky polymerů (elastomerů) o malé velikosti, jelikož jsou rozptýleny v síti reaktivních terpolymerů a asfaltového pojiva. Po krátkodobém stárnutí metodou RTFOT mají tyto shluky ještě menší velikost a jsou více rozptýleny. Při následném dlouhodobém stárnutí metodou PAV při 90 °C dochází k lehkému zvětšení velikost shluků, ale snížení jejich rozptylu. Po dlouhodobém stárnutí metodou PAV při 100 °C mají shluky také lehce větší velikost než po RTFOT, ale jejich rozptyl je stejný jako po krátkodobém stárnutí metodou RTFOT. Po dlouhodobém stárnutí metodou PAV při 110 °C jsou shluky drobné s vysokým rozptylem.

Vzorek 2 má shluky polymerů značně větší než vzorek 1. Důvodem je vysoký obsah polymeru v asfaltovém pojivu. Krátkodobým stárnutím metodou RTFOT dochází opět ke zmenšení velikosti shluků a jejich rozptýlení. Velikost shluků je však různorodá. Po dlouhodobém stárnutí metodou PAV při 90 °C jsou v asfaltovém pojivu rozptýleny shluky o malých velikostech zároveň se shluky o velikostech velkých. Při dlouhodobém stárnutí metodou PAV s teplotou 100 °C je rozptyl polymerů menší a zanikají shluky o malých velikostech. Po dlouhodobém stárnutí metodou PAV při 110 °C jsou v asfaltovém pojivu rozptýleny shluky malých a středních velikostí.

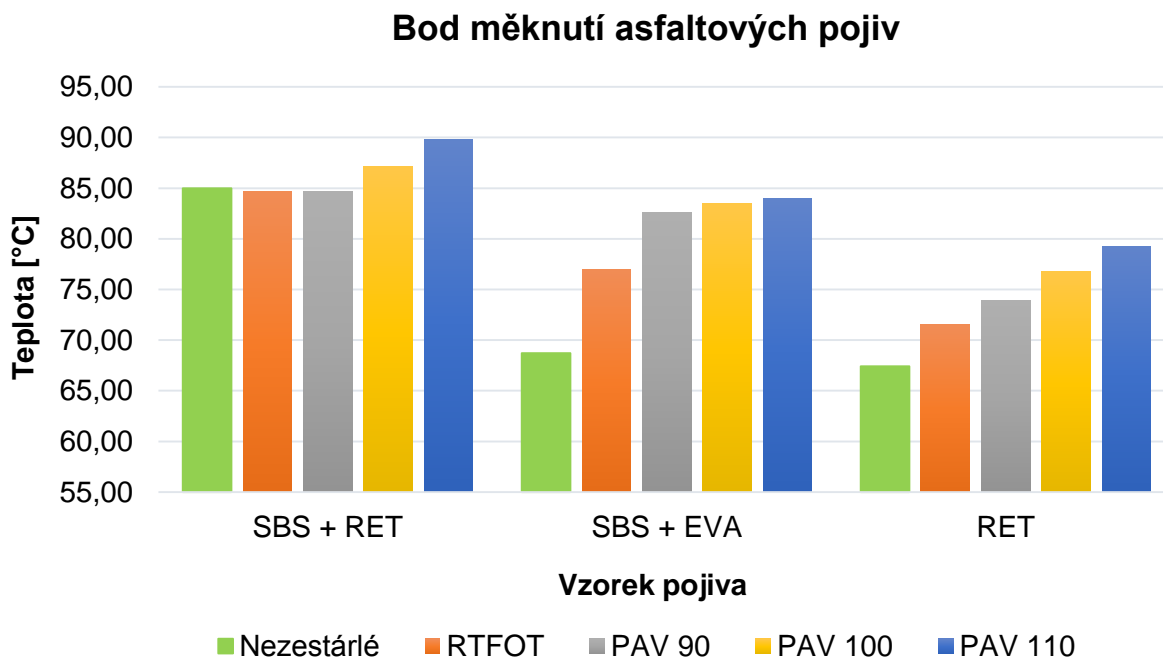
U vzorku 3 (2 % RET a 0,2% N400) modifikátor v nezestárlém pojivu není téměř vidět. To je způsobeno chemickou reakcí mezi terpolymerem a asfaltem a jejich vzájemným propojením. Po krátkodobém stárnutí metodou RTFOT se v modifikovaném asfaltovém pojivu objevuje lineární struktura. Dlouhodobé stárnutí metodou PAV způsobuje rozptyl této struktury a snižuje její viditelnost.

## 5. ZÁVĚR

### 5.1. Bod měknutí asfaltového pojiva metodou kroužek a kulička

V následujícím grafu č. 1 jsou vyneseny jednotlivé naměřené hodnoty bodu měknutí zkoušených asfaltových pojiv v daných stádiích stárnutí. Tabulka s přesnými hodnotami bodu měknutí je uvedena v kapitole 4.1. Popis samotné zkoušky je uveden v kapitole 3.2.

Z grafu je patrné, že nejvyšší bod měknutí má vzorek 1, který obsahuje 4 % SBS, 2 % RET a 0,2 % N400. Pro první tři stadia stárnutí zůstává bod měknutí přibližně stejný a ke zvýšení bodu měknutí dochází až po dlouhodobém stárnutí PAV při 100 °C a po PAV při 110 °C. Rozdíl mezi nejnižším a nejvyšším bodem měknutí vzorku 1 při stárnutí je 4,8 °C, což je nejnižší hodnota ze všech tří zkoušených modifikovaných asfaltových pojiv. Z výsledků této zkoušky lze říci, že asfaltové pojivo SBS + RET je z těchto tří nejméně náchylné ke stárnutí a to především ke krátkodobému. Vzorek 2 asfaltového pojiva se složením 4 % SBS a 3 % EVA má znatelný nárůst bodu měknutí pro pojivo zestárlé metodou RTFOT. Po dlouhodobém stárnutí metodou PAV nárůst bodu měknutí již není tak razantní, jako při krátkodobém stárnutí RTFOT. Takto modifikované pojivo je nejméně náchylné k dlouhodobému stárnutí ze tří zkoušených asfaltových pojiv. Vzorek 3 asfaltového pojiva modifikovaný 2 % RET a 0,2% N400 má nárůst bodu měknutí s jistou odchylkou lineární s postupem stárnutí.

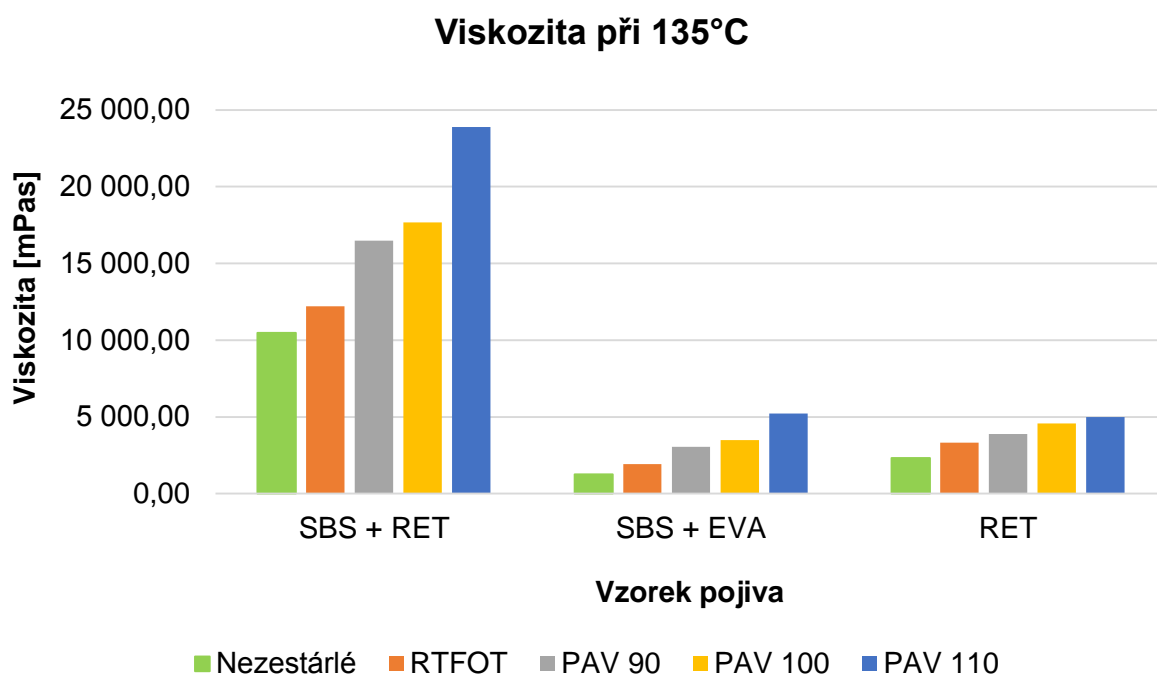


**Graf 1.** Naměřené teploty bodu měknutí modifikovaných asfaltových pojiv metodou kroužek a kulička.

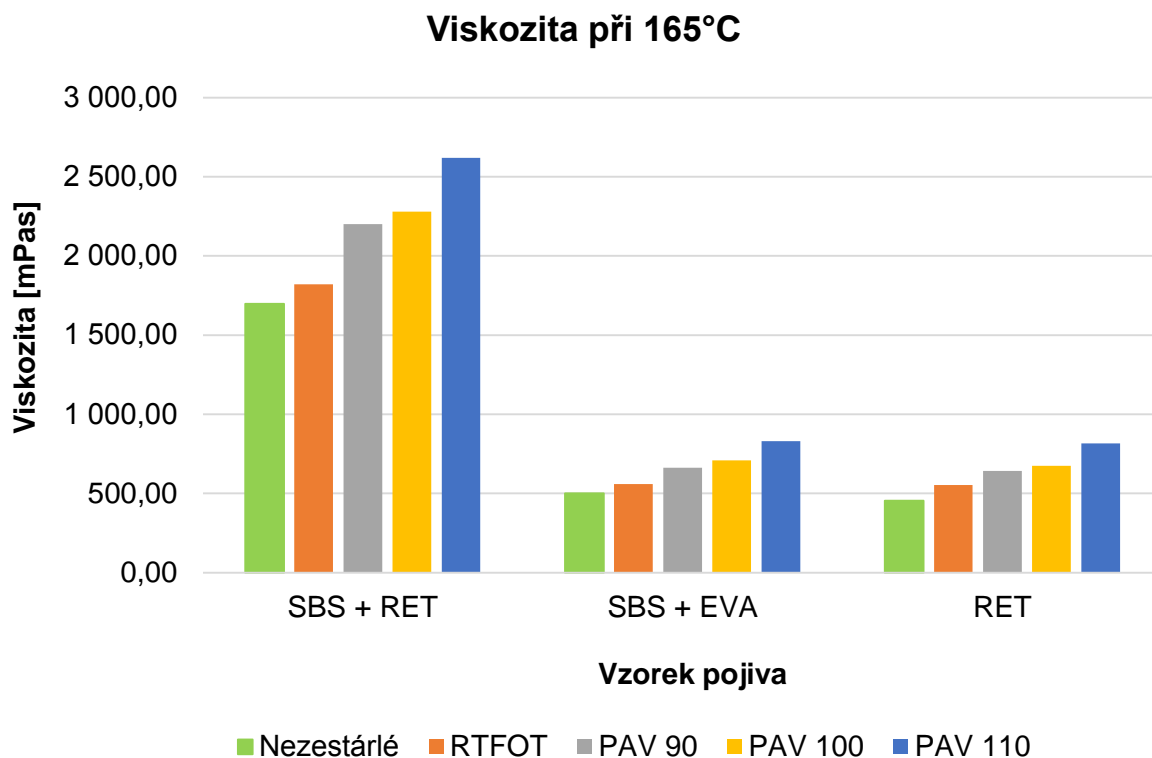
## 5.2. Stanovení viskozity asfaltu rotačním vřetenovým viskozimetrem

Naměřené hodnoty viskozit z tabulky 3 pro teplotu 135 °C a z tabulky 4 pro teplotu 165 °C z kapitoly 4.2. jsou uvedeny v následujících grafech č. 2 a 3. Postup provádění zkoušky je uveden v kapitole 3.3.

Vzorek asfaltového pojiva číslo 1 modifikovaný 4 % SBS, 2 % RET a 0,2 % N400 má několikanásobně vyšší viskozitu než zbylé dva vzorky, jak je vidět v grafech 2 a 3. Z tohoto důvodu je také práce s tímto vzorkem a jeho zpracování nejnáročnější a to kvůli jeho vysoké hustotě. Viskozita u všech tří zkoušených vzorků asfaltových pojiv je vzrůstající s postupem stárnutí. Vzorek 1 (4 % SBS, 2 % RET a 0,2% N400) však nemá nárůst plynulý. Vzorek 2 (4 % SBS a 3 % EVA) a vzorek 3 (2 % RET a 0,2% N400) má nárůst viskozity menší a postupný vzhledem k postupu stárnutí. Se stárnutím asfaltu tedy dochází k jeho tvrdnutí.



**Graf 2. Naměřené hodnoty viskozit modifikovaných asfaltových pojiv rotačním vřetenovým viskozimetrem při teplotě 135 °C.**

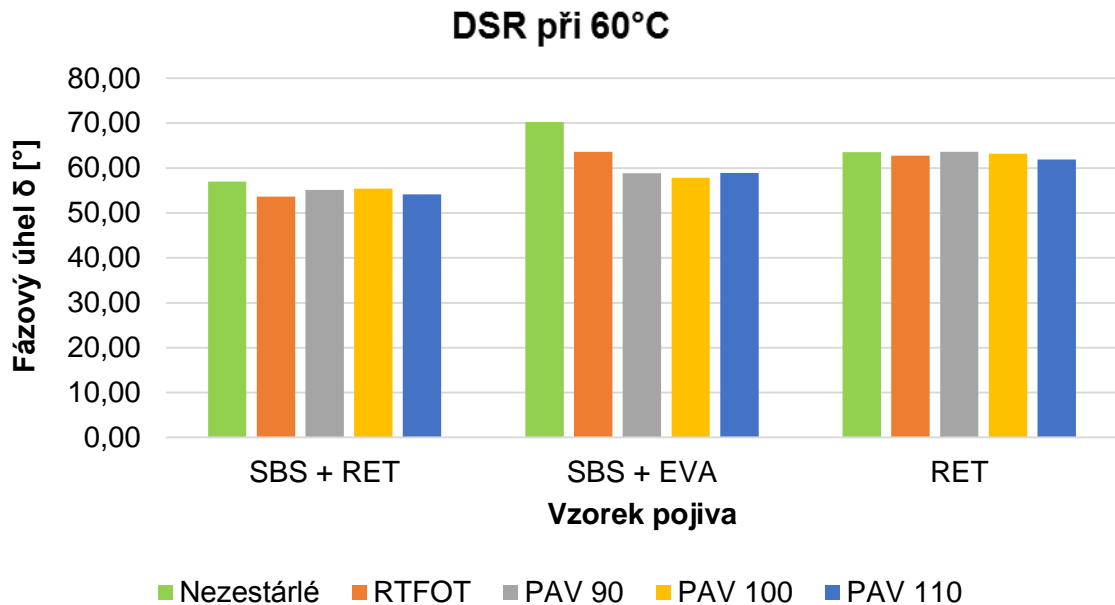


**Graf 3. Naměřené hodnoty viskozit modifikovaných asfaltových pojiv rotačním vřetenovým viskozimetrem při teplotě 165 °C.**

### 5.3. Stanovení komplexního modulu ve smyku, fázového úhlu

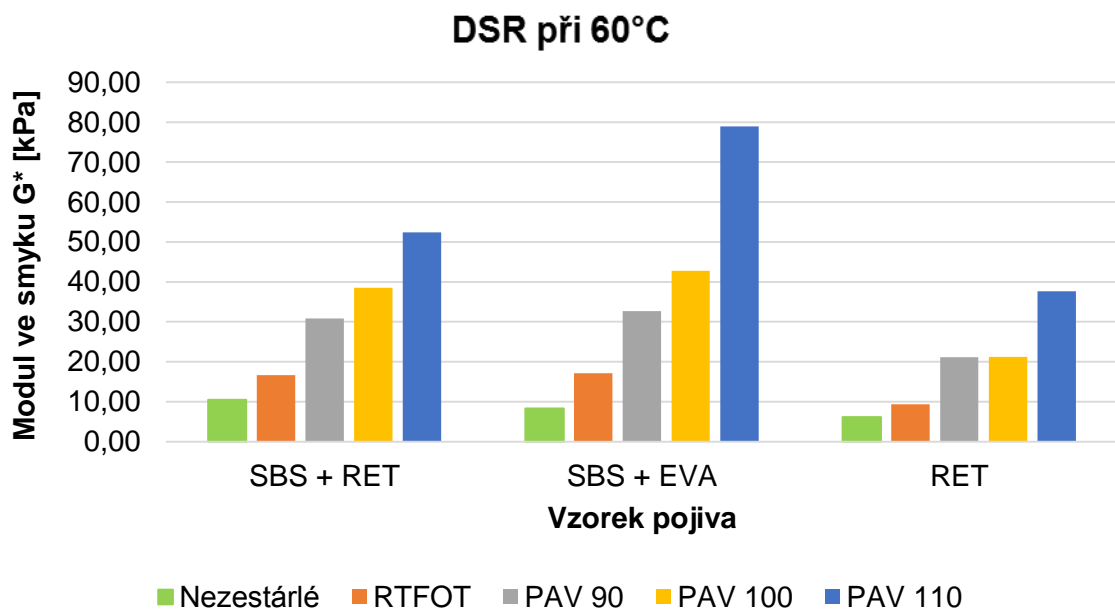
Data z následujících grafů jsou uvedena v tabulkách v kapitole 4.3. Postup této zkoušky se všemi náležitostmi je popsán v kapitole 3.4.2.

Naměřený fázový úhel  $\delta$ , zaznamenaný v tabulkách 13, 14 a 15 a v grafu č. 4 pro zkoušku při 60 °C, se u vzorku 1 (4 % SBS, 2 % RET a 0,2 % N400) a 3 (2 % RET a 0,2 % N400) s jistou tolerancí téměř nemění. Vzorek modifikovaného asfaltového pojiva 1 má nejnižší hodnoty fázového úhlu a je tedy nejelastičtější ze všech tří zkoušených vzorků. Pouze u vzorku 2 (4 % SBS a 3 % EVA) dochází k poklesu fázového úhlu vlivem stárnutí a to s maximální hodnotou poklesu 12,43 °.



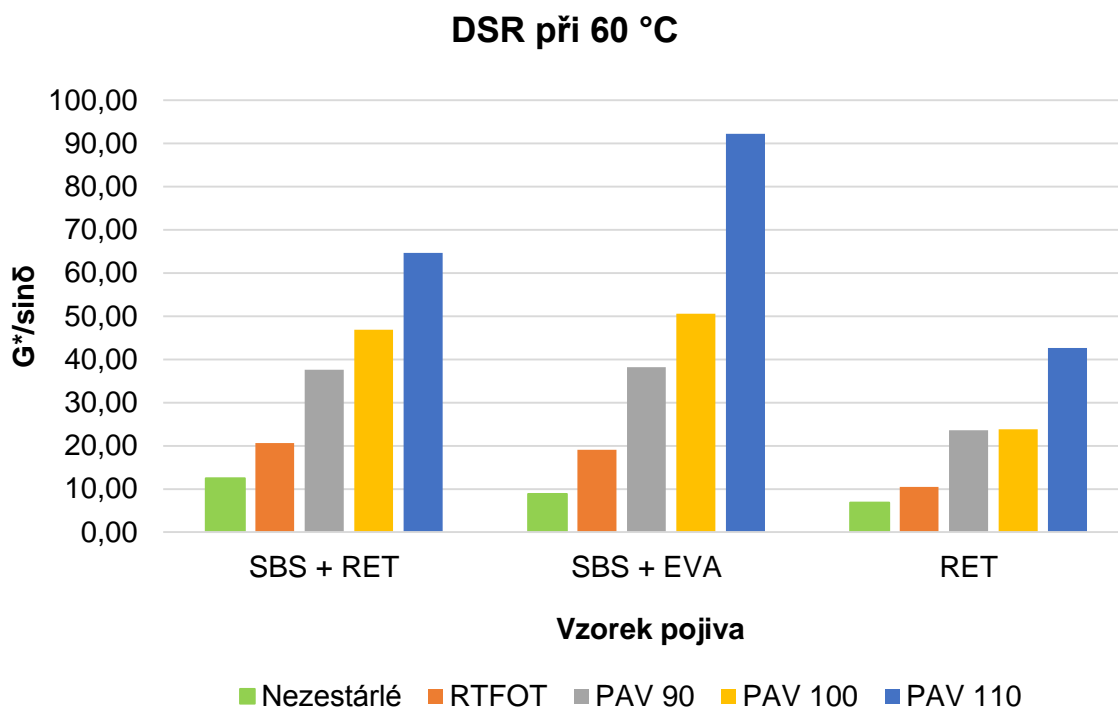
**Graf 4. Změna fázového úhlu při teplotě 60 °C.**

Komplexní modul ve smyku  $G^*$  udává celkový odpor pojiva, vystaveného opakujícímu se smykovému napětí, proti deformaci. Hodnoty komplexního modulu ve smyku  $G^*$ , vynesené v grafu č. 5, jsou vlivem stárnutí asfaltového pojiva vzrůstající, až jednu výjimku. Výjimkou jsou hodnoty  $G^*$  pro vzorek 3 po dlouhodobém stárnutí PAV při 90 °C a 100 °C, kdy jejich velikosti jsou přibližně stejné. U vzorku 2 je viditelný rapidní nárůst komplexního modulu ve smyku pro asfaltové pojivo po dlouhodobém stárnutí PAV při 110 °C oproti pojivům po dlouhodobém stárnutí PAV při 90 °C a 100 °C.



**Graf 5. Změna komplexního modulu ve smyku při teplotě 60 °C.**

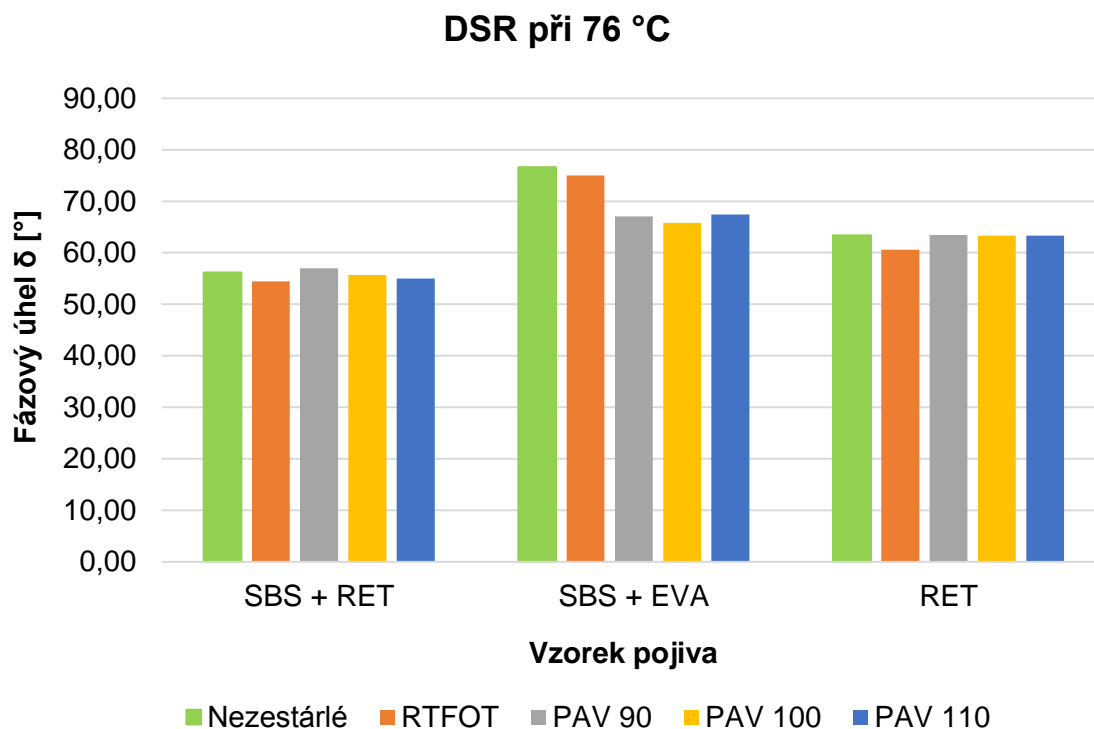
Podíl komplexního modulu ve smyku  $G^*$  a fázového úhlu  $\delta$  je smlouvenou veličinou. Podíly pro jednotlivé vzorky asfaltových pojiv jsou vyneseny v grafu č. 6. Hodnoty podílů mají vzrůstající tendenci vlivem stárnutí asfaltového pojiva. Výjimku tvoří dvojice vzorků 3 po dlouhodobém stárnutí PAV při 90 °C a 100 °C, jejichž hodnoty jsou velice podobné. V grafu je opět znatelný nárůst komplexního modulu ve smyku pro asfaltové pojivo po dlouhodobém stárnutí PAV při 110 °C oproti pojivům po dlouhodobém stárnutí PAV při 90 °C a 100 °C.



**Graf 6. Poměr komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu při teplotě 60 °C.**

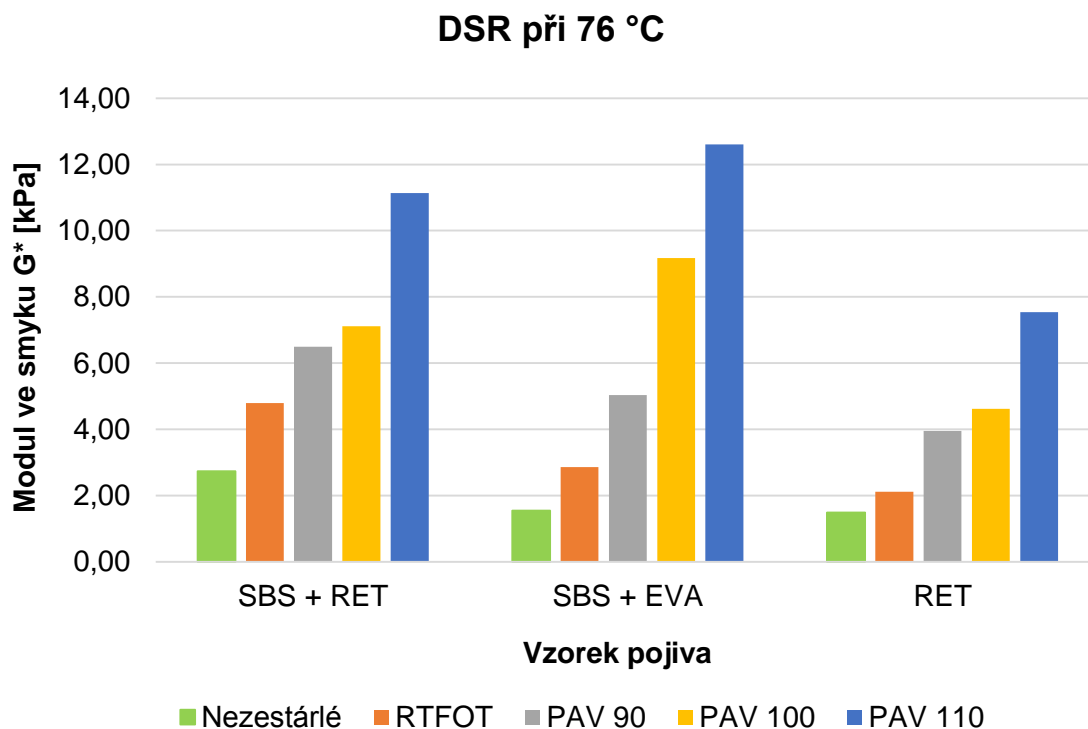
Naměřené fázové úhly  $\delta$ , zaznamenané v tabulkách 16, 17 a 18 jsou vyneseny v grafu č. 7 pro zkoušku při teplotě 76 °C. Pro vzorek 1 a 3 je rozptyl naměřených výsledků nízký. Elasticitu těchto vzorků lze tedy považovat s jistou tolerancí za stabilní. Vzorek 1 má nejmenší fázový úhel a je tedy nejelastičtější ze tří zkoušených pojiv. U vzorku 2 fázový úhel postupně s vlivem stárnutí klesá až po vzorek po dlouhodobém stárnutí PAV při 100 °C. U vzorku 2 po dlouhodobém stárnutí PAV při teplotě 110 °C dochází k drobnému nárůstu. Maximální rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší hodnotou fázového úhlu u Vzorku 2 je 10,83 °.





**Graf 7. Změna fázového úhlu při teplotě 76 °C.**

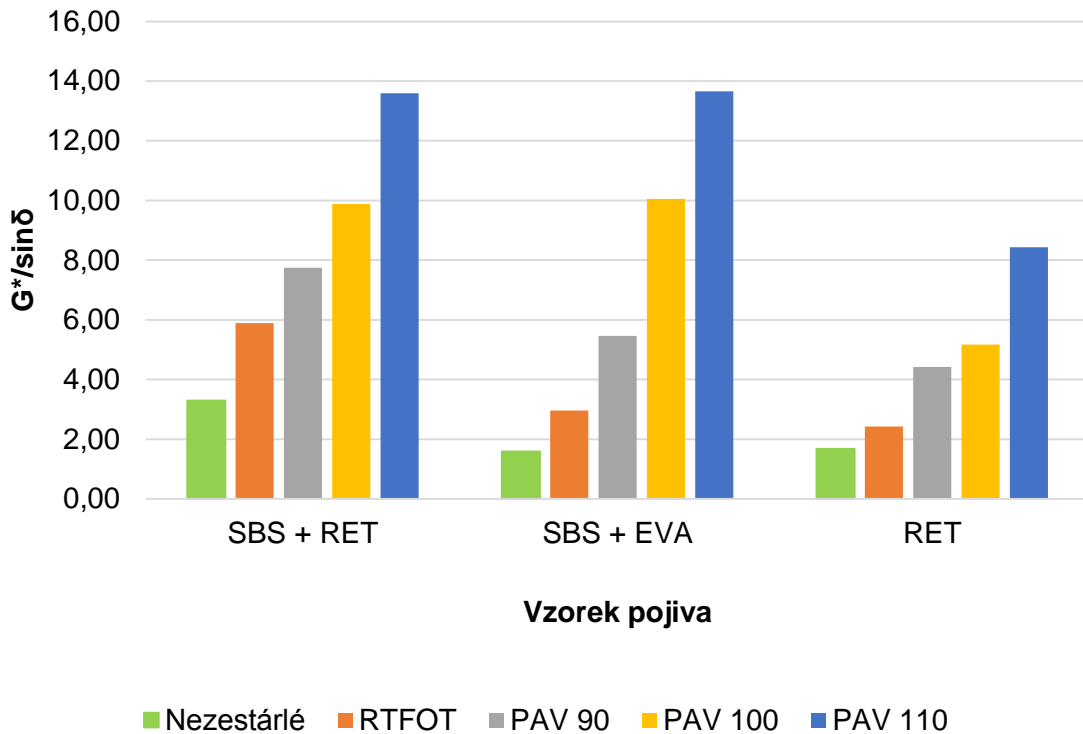
V grafu č. 8 jsou znázorněny naměřené hodnoty komplexního modulu ve smyku při zkušební teplotě 76 °C. U všech vzorků je postupný nárůst vlivem stárnutí. U vzorku 1 a 3 je nejzřetelnější nárůst komplexního modulu ve smyku pro vzorky po dlouhodobém stárnutí PAV při 110 °C. Dále jsou si blízké hodnoty komplexního modulu ve smyku vzorků po dlouhodobém stárnutí metodou PAV při 90 °C a 100 °C Vzorků 1 a 3. U vzorku 2 se nárůst komplexního smykového modulu postupně (parabolicky) zvyšuje. Dochází tedy k souvislejšímu tvrdnutí modifikovaného asfaltového pojiva s vlivem stárnutí oproti vzorkům 1 a 3. Fázové úhly mají stejný trend při teplotě 76 °C jako při teplotě 60 °C.



**Graf 8. Změna komplexního modulu ve smyku při teplotě 76 °C.**

Podíl komplexního modulu ve smyku  $G^*$  a fázového úhlu  $\delta$  je vyneseno v následujícím grafu č. 9. Vzorek 1 se složením 4 % SBS, 2 % RET a 0,2 % N400 má nárůst podílu plynulý, téměř lineární. Vzorek 2 se složením 4 % SBS a 3 % EVA má nárůst podílu postupně zvyšující parabolický. Vzorek 3 se složením 2 % RET a 0,2 % N400 má nárůst podílu schodovitý, kdy jsou si blízké sousední hodnoty. Blízké jsou si výsledky komplexního modulu ve smyku pro vzorek nezestárlý a vzorek po krátkodobém stárnutí metodou RTFOT a dále jsou si blízké hodnoty po dlouhodobém stárnutí metodou PAV při zkušební teplotě 90 °C a 100 °C.

## DSR při 76 °C



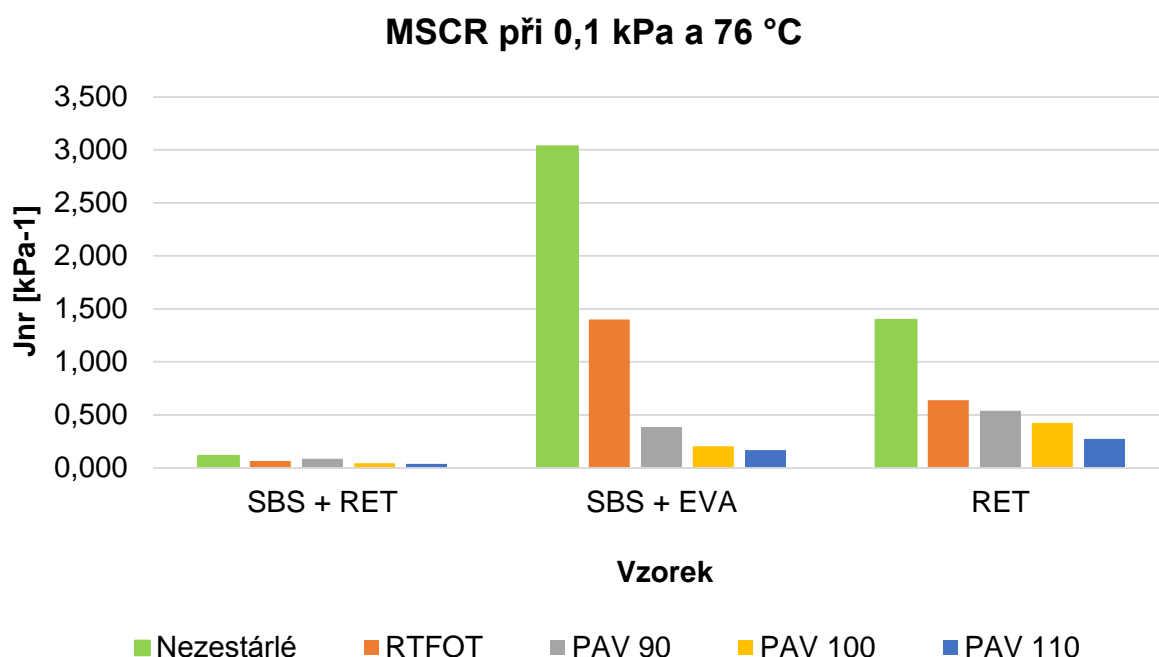
**Graf 9.** Poměr komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu při teplotě 76 °C.

### 5.4. MSCRT (Multiple Stress Creep Recovery Test)

Přesný popis této zkušební metody je uveden v kapitole 3.4.3. Data vynesena v následujících grafech jsou uvedena v tabulkách č. 19 a 20 v kapitole 4.4.

Výsledkem měření je nevratná smyková poddajnost  $J_{nr}$  při opakovaném zatížení a slouží jako indikátor citlivosti a napěťové závislosti asfaltových pojiv vůči vzniku trvalých plastických deformací. Referenčními hodnotami této zkušební metody jsou data naměřená na vzorcích po krátkodobém stárnutí RTFOT při 3,2 kPa. Zbylá naměřená data jsou doplňková pro jejich přesnější charakteristiku a zjištění změn během stárnutí. Graf č. 10 obsahuje naměřené výsledky nevratné smykové poddajnosti  $J_{nr}$  se zatížením 0,1 kPa při zkušební teplotě 76 °C. Tyto hodnoty jsou doplňkovou informací k hodnotám naměřeným se zatížením 3,2 kPa. Vzorek 1 (4 % SBS, 2 % RET a 0,2 % N400) má nízké hodnoty nevratné smykové poddajnosti, což svědčí o jeho vysokém stupni tvrdosti a měřené hodnoty jsou na pokraji měřitelnosti. Vzorek 2 (4 % SBS a 3 % EVA) v nezestárlém stavu má velkou hodnotu  $J_{nr}$ , která se však s vlivem stárnutí značně snižuje. Příčinou může být postupné vytvrzování polymerové sítě v modifikovaném asfaltovém pojivu, která však stále zachovává jistou elasticitu. Vzorek 3 (2

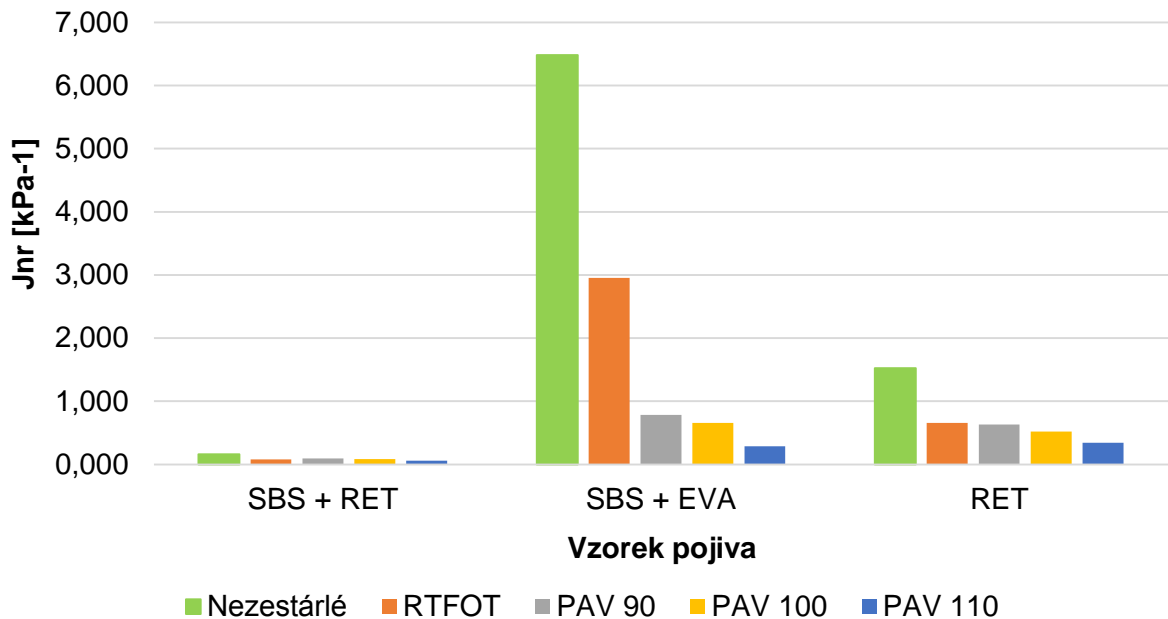
% RET a 0,2 % N400) má počáteční hodnotu  $J_{nr}$  více jak o polovinu nižší než Vzorek 2, ale postupné vytvrzování není tak značné. Po dlouhodobém stárnutí metodou PAV jsou hodnoty nevratné smykové poddajnosti u vzorku 3 dokonce vyšší než u vzorku 2.



**Graf 10. Vypočtené hodnoty nevratné smykové poddajnosti  $J_{nr}$  při teplotě 76 °C a napětí 0,1 kPa.**

Následující graf č. 11 obsahuje naměřená data zkoušky MSCR při zatížení 3,2 kPa a zkušební teplotě 76 °C. První vzorek 1 má velmi nízké hodnoty nevratné smykové poddajnosti  $J_{nr}$ , které jsou na hranici měřitelnosti. Takto modifikované asfaltové pojivo má vysokou tvrdost a je vhodné do asfaltových směsí pro komunikace s vysokým zatížením. Vzorek 2 má vysokou nevratnou smykovou poddajnost v nezestárlém stavu. Jeho nevratná smyková poddajnost však rapidně klesá s jeho stárnutím. Příčinou tohoto jevu může být postupné vytvrzování polymerové sítě v modifikovaném asfaltovém pojivu, která však stále zachovává jistou elasticitu. Vzorek 3 má přibližně čtyřnásobně menší hodnotu nevratné smykové poddajnosti  $J_{nr}$  než vzorek 2 v nezestárlém stavu. Po krátkodobém stárnutí metodou RTFOT je hodnota  $J_{nr}$  přibližně poloviční než v počátečním nezestárlém stavu. Pokles  $J_{nr}$  po dlouhodobém stárnutí metodou PAV je již nižší.

### MSCR při 3,2 kPa a 76 °C



**Graf 11. Vypočtené hodnoty nevratné smykové poddajnosti Jnr při teplotě 76 °C a napětí 3,2 kPa.**

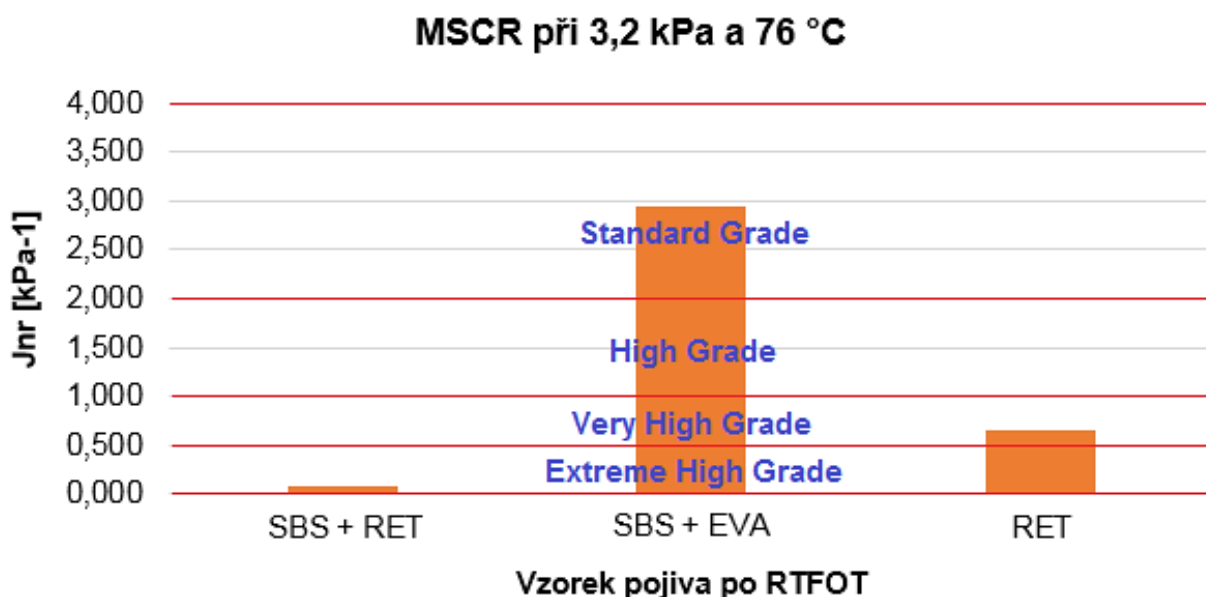
V následujícím grafu č. 12 jsou vyneseny hodnoty nevratné smykové poddajnosti Jnr pouze pro vzorky pojiv po krátkodobém stárnutí metodou RTFOT. Podle vypočtených hodnot Jnr lze jednotlivá zkoušená asfaltová pojiva zatřídit do skupin dle americké standardizace AASHTO MP 19 [17], zmíněné v kapitole 3.4.3. Podle zatřídění v těchto skupinách je možné určit vhodnost asfaltového pojiva pro danou komunikaci, viz tabulka č. 1.

Metoda stárnutí RTFOT reprezentuje vlastnosti asfaltového pojiva v asfaltové směsi po namíchání, přepravě a pokládce při výstavbě dopravní komunikace. Z těchto výsledků je tedy možné usoudit vhodnost či nevhodnost zkoušených asfaltových pojiv pro dané komunikace v závislosti na velikosti dopravního zatížení a rychlosti vozidel.

Modifikované asfaltové pojivo SBS + RET (4 % SBS, 2 % RET a 0,2 % N400) má zatřídění Extreme High Grade (E) a je vhodné pro vysoce zatížené komunikace, kdy je zatížení vyšší než 30 milionů ekvivalentních jednonápravových zatížení ESALs a zároveň je rychlost dopravy menší než 20 km/h.

Modifikované asfaltové pojivo SBS + EVA (4 % SBS a 3 % EVA) má zatřídění Standard Grade (S) a je vhodné pro komunikace s dopravním zatížením menším než 10 milionů ESALs a rychlost vozidel vyšší než 70 km/h.

Modifikované asfaltové pojivo RET (2 % RET a 0,2 % N400) má zařídění Very High Grade (V) a je vhodné pro komunikace se zatížením vyšším než 30 milionů ESALs nebo pokud je rychlost dopravy nízká, tedy 20 km/h a méně.



**Graf 12.** Vypočtené hodnoty nevratné smykové poddajnosti Jnr při teplotě 76 °C a napětí 3,2 kPa pro vzorek pojiva po krátkodobém stárnutí RTFOT.

### 5.5. Celkové zhodnocení

Vzorek 1 modifikovaný 4 % SBS, 2 % RET a 0,2 % N400 má nejvyšší bod měknutí metodou kroužek a kulička. Vzorek 2 modifikovaný 4 % SBS a 3 % EVA má druhý nejvyšší bod měknutí a vzorek 3 modifikovaný 2 % RET a 0,2 % N400 má nejnižší bod měknutí.

Vzorek 1 má viskozitu ze všech tří zkoušených modifikovaných pojiv několika násobně nejvyšší. Viskozity vzorků 2 a 3 jsou si podobné. Vzorek modifikovaného asfaltového pojiva V1 je však díky takto vysoké viskozitě těžce měnitelný.

Nejnižší fázový úhel při zkoušce na dynamickém smykovém reometru při obou zkušebních teplotách (60 °C a 76 °C) byl naměřen taktéž vzorku 1. Z tohoto výsledku lze vzorek 1 považovat za nejelastičtější. Vzorek 2 měl největší rozptyl naměřených hodnot vlivem stárnutí. Vzorky V1 a V3 měli rozptyl hodnot fázových úhlů nízký.

Výsledný poměr  $G^*/\sin\delta$  při obou zkušebních teplotách vyšel nejvyšší pro vzorek V1 pro pojiva nezestárá, zestárá krátkodobě metodou RTFOT a zestárá dlouhodobě metodou PAV při teplotě 90 °C. Nejvyššího poměru  $G^*/\sin\delta$  pro dlouhodobě zestárá pojiva metodou PAV při

100 °C a 110 °C dosáhlo modifikované asfaltové pojivo V2 a to zejména při zkušební teplotě 60 °C. Ukazuje se, že hodnoty fázových úhlů zůstávají přibližně stejné pro všechny tři zkoušené vzorky a hlavní roly má tedy komplexní modul ve smyku  $G^*$ .

Z dat naměřených při zkušební metodě MSCRT je jednoznačné, že modifikované asfaltové pojivo 1 je extrémně elastické, má nejvyšší odolnost vůči vyjíždění kolejí a je vhodné na vysoce zatížené úseky pozemních komunikací. Druhé elastické modifikované asfaltové pojivo v této práci je dle této zkušební metody vzorek pojiva 3 vhodné pro velmi vytížené úseky. Vzorek pojiva 2 je v nezestárlém stavu a po krátkodobém stárnutí metodou RTFOT ze zkoušených pojiv nejméně elastický. Při dlouhodobém stárnutí však rapidně tvrdne, což značí špatnou odolnost vůči dlouhodobému stárnutí.

Novodobé funkční zkoušky (Superpave®) dokáží lépe popsat chování modifikovaných asfaltových pojiv než zkoušky empirické (základní) a to zejména s ohledem na stárnutí. Pomocí dynamického smykového reometru můžeme velmi přesně stanovit reologii asfaltů v různém rozsahu teplot. Dále jsou funkční zkoušky mnohdy méně pracné a náročné, nežli zkoušky empirické.

Ze snímků z mikroskopu je u asfaltových pojiv modifikovaných elastomery či plastomery patrné „zjemňování struktury“. To může znamenat rozpad polymerů vlivem stárnutí a snížení jejich mechanických vlastností. U asfaltového pojiva modifikovaného reaktivním terpolymerem je struktura lineární a její změna není tak patrná jako u elastomerů či plastomerů.

## 6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] VERHAEGHE, B. M. J. A., P. A., MYBURGH, a E. DENNEMAN. *Asphalt Rutting And Its Prevention*. In: 9th CONFERENCE ON ASPHALT PAVEMENTS FOR SOUTHERN AFRICA 2007. Gaborone, Botswana. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: [https://researchspace.csir.co.za/dspace/bitstream/handle/10204/1241/Verhaeghe\\_2007.pdf](https://researchspace.csir.co.za/dspace/bitstream/handle/10204/1241/Verhaeghe_2007.pdf)
- [2] PAVEMENT INTERACTIVE. Fatigue Cracking. [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <http://www.pavementinteractive.org/fatigue-cracking/>
- [3] KSAIBATI, Khaled a Ryan ERICKSON. *Evaluation Of Low Temperature Cracking In Asphalt Pavement Mixes*. Dept. of Civil and Architectural Engineering, The University of Wyoming, 1998. [cit. 2018-05-20] Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.536.2394&rep=rep1&type=pdf>
- [4] TRAXLER, R. N.. *Hardening Of Asphalt Cements By Exposure To Ultraviolet And Short Wave Lenght Visible Light*. Texas Transportation Institute, Texas A&M University [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <https://static.tti.tamu.edu/tti.tamu.edu/documents/9-15.pdf>
- [5] HUNTER, R. N., A. SELF a J. READ. *The Shell Bitumen Handbook, Sixth Edition*. ICE Publishing, London, UK, 2015. ISBN 978-0-7277-5837-8
- [6] ČSN EN 12591
- [7] JIGING, Z., B. BIRGISSON a N. KRINGOS. Polymer modification of bitumen: Advances and challenges. *European Polymer Journal* [online]. 2014, č. 54 [cit. 2018-04-01]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.02.005>
- [8] PLITZ, Jiří a František SVOBODA. Modifikace silničních asfaltů RET polymerem. *Silnice a mosty*. 2008, roč. 2008, č. 2, [cit. 2018-04-02]. Dostupné z: [www.stavbaroku.cz/db\\_binary\\_file/other/368](http://www.stavbaroku.cz/db_binary_file/other/368)
- [9] WARREN, R.S., R. B. MCGENNIS a H.U. BAHIA. *Superpave Asphalt Binder Test Methods An Illustrated Overview*. Federal Highway Administration, 1994. Dostupné z: <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/pubs/013174.pdf>
- [10] ČSN EN 1427 - *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení bodu měknutí - Metoda kroužek a kulička*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015. Třídící znak 657060.



- [11] ČSN EN 13302 - *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení dynamické viskozity asfaltových pojiv rotačním vřetenovým viskozimetrem*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010. Třídící znak 657074.
- [12] MALVERN. *Kinexus Series Redefining Rheometer Capabilities*. Malvern, ©2017.
- [13] ČSN EN 14770 - *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu - Dynamický smykový reometr (DSR)*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013. Třídící znak 657091.
- [14] VALENTIN, Jan. *Užitné vlastnosti a reologie asfaltových pojiv a směsí - charakteristiky, nové zkušební metody, vývojové trendy*. Praha 2003.
- [15] ČSN EN 16659 - *Asfalty a asfaltová pojiva - Zkouška MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery Test)*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016. Třídící znak 657096.
- [16] GOLALIPOUR, Amir. *Modification of Multiple Stress Creep and Recovery Test Procedure and Usage in Specification*. Madison, 2011. Diplomová práce. University Of Wisconsin, Civil & Environmental Engineering.
- [17] AASHTO 19 - *Standard Specification For Performance - Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test*. American Association of State Highway and Transportation Officials, 2010.
- [18] DAŠEK, O., P. COUFALÍK, P. HÝZL, M. VARAUS, P. ŠPAČEK, Z. HEGR, a S. STOKLÁSEK. *Nové zkušební metody umožňující predikovat prodloužení životnosti asfaltových vozovek*. In: *Sborník příspěvků konference Asfaltové vozovky 2013*. České Budějovice, 2013. ISBN: 978-80-903925-3-3.
- [19] ČSN EN 12607-1 - *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu - Část 1: Metoda RTFOT*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015. Třídící znak 657070.
- [20] ČSN EN 14769 - *Asfalty a asfaltová pojiva - Urychlené dlouhodobé stárnutí v tlakové nádobě (PAV)*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013. Třídící znak 657092.
- [21] ČSN EN 14769 - *Asfalty a asfaltová pojiva - Urychlené dlouhodobé stárnutí v tlakové*

## 7. SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obrázek 1.** Vyjeté koleje na autobusové zastávce v Újezdě nad Lesy (foto autor).
- Obrázek 2.** Únavové trhliny na komunikaci I/12 v Újezdě nad Lesy (foto autor).
- Obrázek 3.** Opakující se nízkoteplotní trhliny na cyklostezce v Pardubicích (foto autor).
- Obrázek 4.** Schématické znázornění asfaltu s charakterem Sol (zdroj SHELL[x]).
- Obrázek 5.** Schématické znázornění asfaltu s charakterem Gel (zdroj SHELL).
- Obrázek 6.** Granule použitých modifikátorů (foto autor).
- Obrázek 7.** Míchací soustavy, vlevo míchadlo s vrtulí a vpravo vysokosmykový mlýn (foto autor).
- Obrázek 8.** Přístroj na stanovení bodu měknutí metodou kroužek a kulička a detail propadu kuličky (foto autor).
- Obrázek 9.** Rotační vřetenový viskozimetr a nádoby se vzorky asfaltu (foto autor).
- Obrázek 10.** Dynamický smykový reometr Kinexus (foto autor).
- Obrázek 11.** Vzorky asfaltových pojiv v silikonové formě pro zkoušku na dynamickém smykovém reometru (foto autor).
- Obrázek 12.** Složky komplexního smykového modulu (graf autor).
- Obrázek 13.** Oscilace geometrie DSR (obrázek autor).
- Obrázek 14.** Graf smykového napětí a přetvoření a fázového úhlu (graf autor).
- Obrázek 15.** Graf průběhu napětí při zkoušce MSCR během cyklu (graf autor).
- Obrázek 16.** Prázdná skleněná nádoba, nádoba s 35 gramy pojiva před zkouškou RTFOT a nádoba s 35 gramy pojiva po zkoušce RTFOT (foto autor).
- Obrázek 17.** Sušárna pro zkoušku RTFOT a vkládání skleněných nádobek s asfaltovým pojivem (foto autor).
- Obrázek 18.** Zkušební přístroj pro dlouhodobé stárnutí PAV a misky se zestárlým asfaltovým pojivem (foto autor).
- Obrázek 19.** Odvzdušňovací zařízení (foto autor).
- Obrázek 20.** Mikroskop Leica DM ILM (foto autor).

## 8. SEZNAM TABULEK

- Tabulka 1.** Návrh pro zvolení vhodného asfaltového pojiva pro danou komunikaci na období 20 let.
- Tabulka 2.** Bod měknutí asfaltového pojiva metodou kroužek a kulička.
- Tabulka 3.** Hodnoty viskozity asfaltu naměřené rotačním vřetenovým viskozimetrem při teplotě 135 °C.
- Tabulka 4.** Hodnoty viskozity asfaltu naměřené rotačním vřetenovým viskozimetrem při teplotě 165 °C.
- Tabulka 5,6 a 7.** Otáčky, rozsah viskozimetru a hodnoty viskozity asfaltu neměřené rotačním vřetenovým viskozimetrem při teplotě 135 °C.
- Tabulka 8, 9 a 10.** Otáčky, rozsah viskozimetru a hodnoty viskozity asfaltu neměřené rotačním vřetenovým viskozimetrem při teplotě 165 °C.
- Tabulka 11.** Naměřený komplexní modul ve smyku dělený fázovým úhlem při teplotě 60 °C.
- Tabulka 12.** Naměřený komplexní modul ve smyku dělený fázovým úhlem při teplotě 76 °C.
- Tabulka 13, 14 a 15.** Naměřený komplexní modul ve smyku a fázový úhel pro všechna asfaltová pojiva při teplotě 60 °C.
- Tabulka 16, 17 a 18.** Naměřený komplexní modul ve smyku a fázový úhel pro všechna asfaltová pojiva při teplotě 76 °C.
- Tabulka 19.** Vypočtené hodnoty nevratné smykové poddajnosti  $J_{nr}$  při teplotě 76 °C a napětí 0,1 kPa.
- Tabulka 20.** Vypočtené hodnoty nevratné smykové poddajnosti  $J_{nr}$  při teplotě 76 °C a napětí 3,2 kPa.

## 9. SEZNAM GRAFŮ

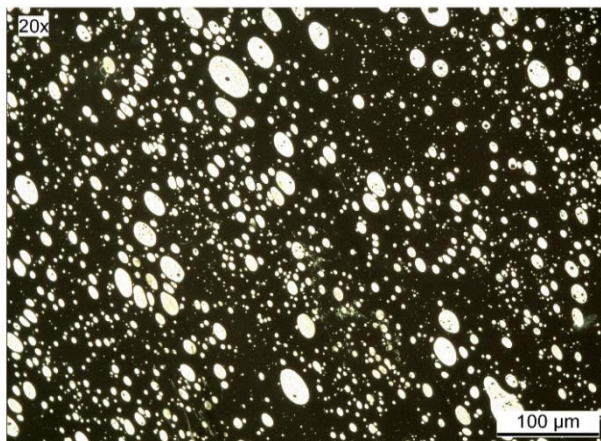
- Graf 1.** Naměřené teploty bodu měknutí modifikovaných asfaltových pojiv metodou kroužek a kulička.
- Graf 2.** Naměřené hodnoty viskozit modifikovaných asfaltových pojiv rotačním vřetenovým viskozimetrem při teplotě 135 °C.
- Graf 3.** Naměřené hodnoty viskozit modifikovaných asfaltových pojiv rotačním vřetenovým viskozimetrem při teplotě 165 °C.
- Graf 4.** Změna fázového úhlu při teplotě 60 °C.
- Graf 5.** Změna komplexního modulu ve smyku při teplotě 60 °C.
- Graf 6.** Poměr komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu při teplotě 60 °C.
- Graf 7.** Změna fázového úhlu při teplotě 76 °C.
- Graf 8.** Změna komplexního modulu ve smyku při teplotě 76 °C.
- Graf 9.** Poměr komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu při teplotě 76 °C.
- Graf 10.** Vypočtené hodnoty nevratné smykové poddajnosti  $J_{nr}$  při teplotě 76 °C a napětí 0,1 kPa.
- Graf 11.** Vypočtené hodnoty nevratné smykové poddajnosti  $J_{nr}$  při teplotě 76 °C a napětí 3,2 kPa.
- Graf 12.** Vypočtené hodnoty nevratné smykové poddajnosti  $J_{nr}$  při teplotě 76 °C a napětí 3,2 kPa pro vzorek pojiva po krátkodobém stárnutí RTFOT.

## 10. PŘÍLOHY

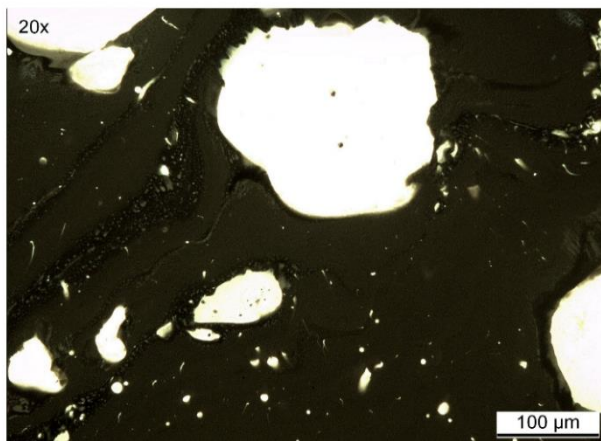
Příloha č. 1. Snímky asfaltového pojiva z mikroskopu seřazené v průběhu stárnutí.

### Nezestárlé pojivo

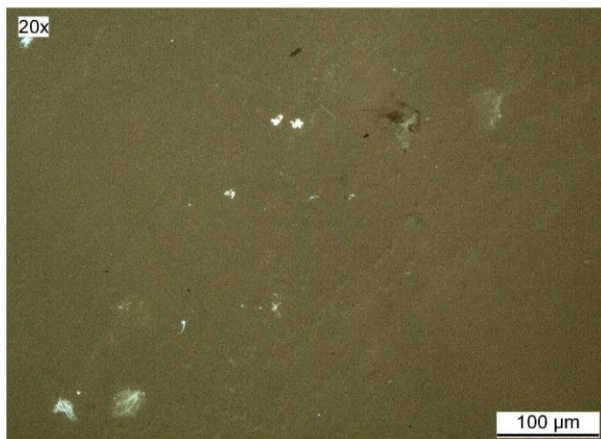
**Vzorek 1**  
**4 % SBS, 2 % RET**



**Vzorek 2**  
**4 % SBS, 3 % EVA**

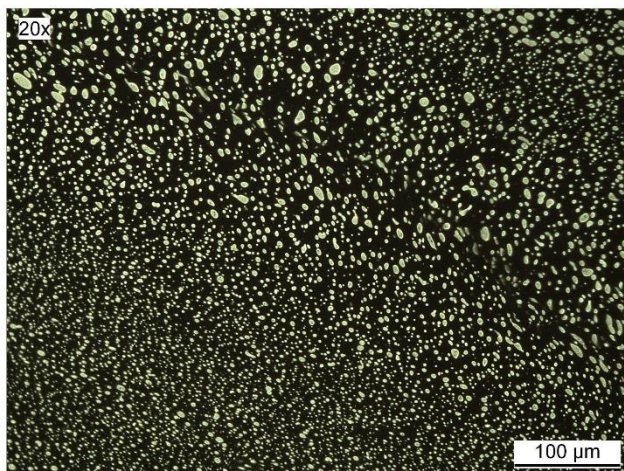


**Vzorek 3**  
**2 % RET**

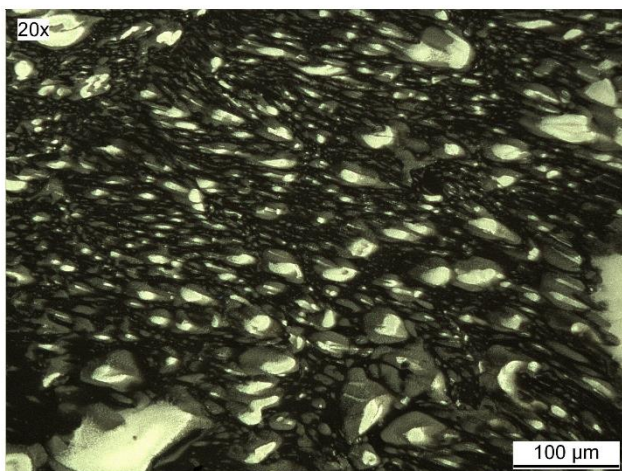


## Pojivo po RTFOT

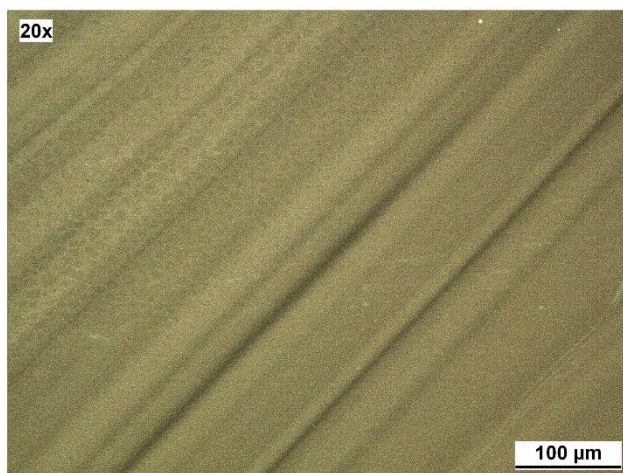
**Vzorek 1**  
**4 % SBS, 2 % RET**



**Vzorek 2**  
**4 % SBS, 3 % EVA**

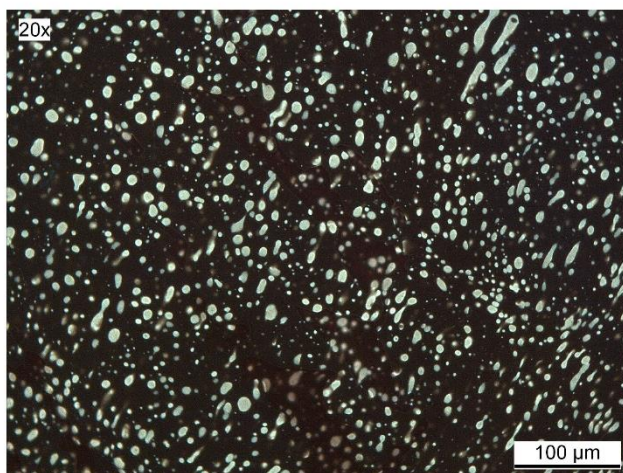


**Vzorek 3**  
**2 % RET**

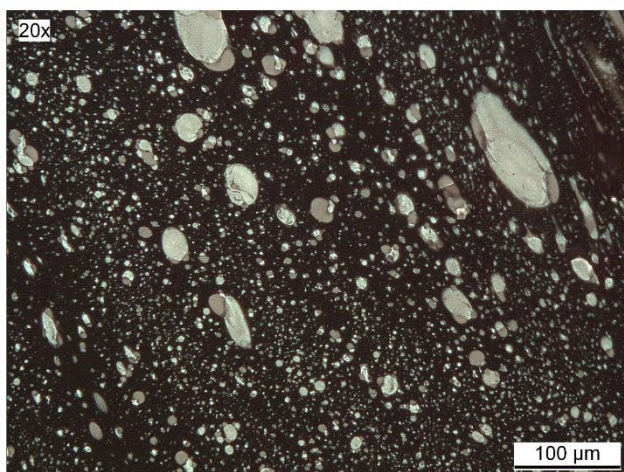


## Pojivo po PAV 90 °C

**Vzorek 1**  
**4 % SBS, 2 % RET**



**Vzorek 2**  
**4 % SBS, 3 % EVA**

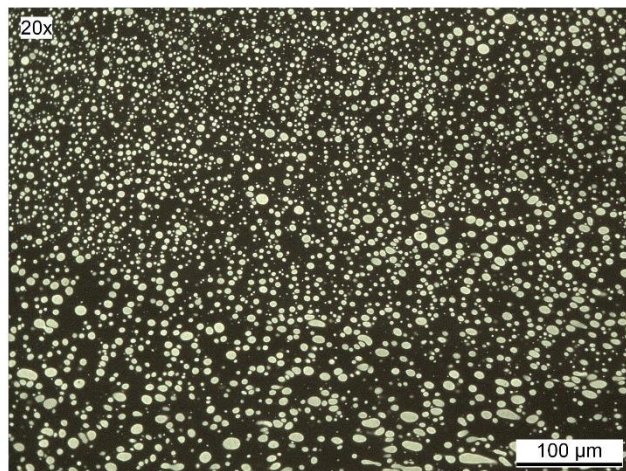


**Vzorek 3**  
**2 % RET**

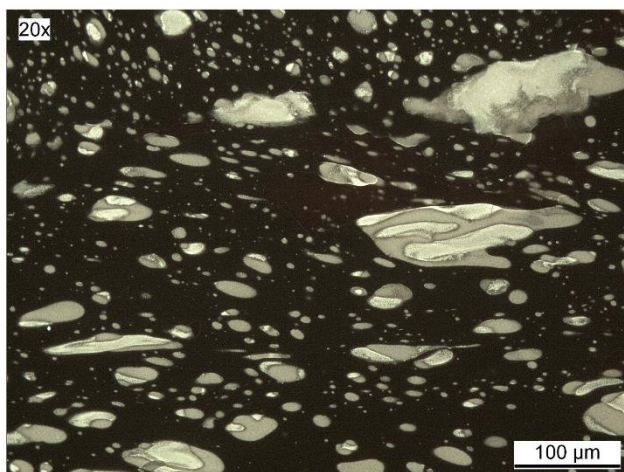


## Pojivo po PAV 100°C

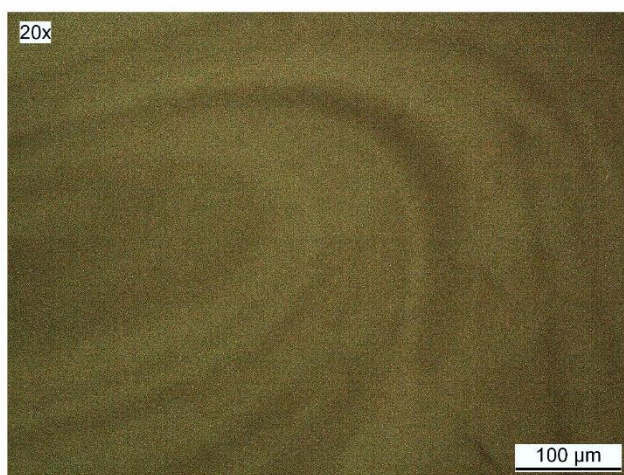
**Vzorek 1**  
**4 % SBS, 2 % RET**



**Vzorek 2**  
**4 % SBS, 3 % EVA**



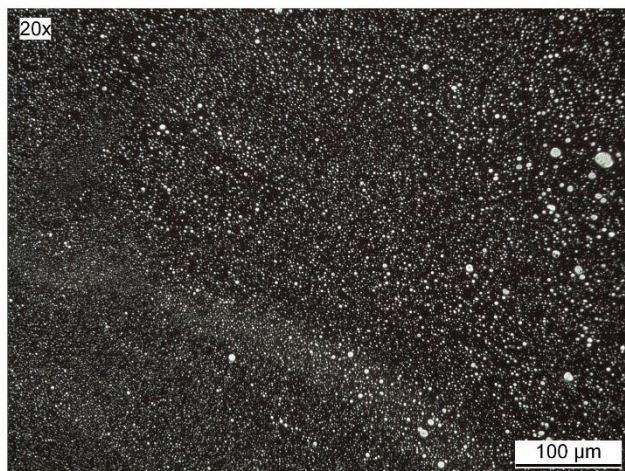
**Vzorek 3**  
**2 % RET**



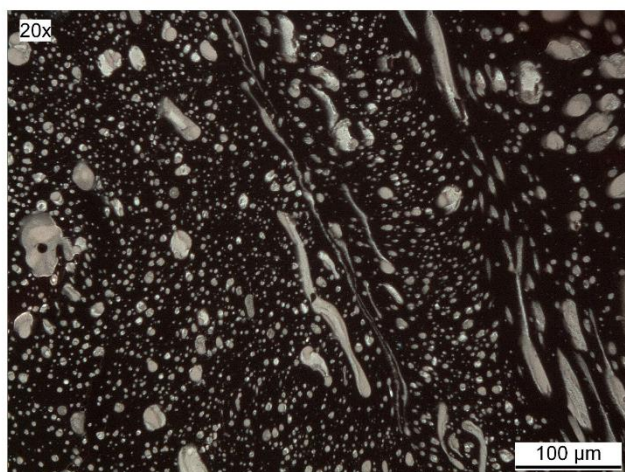


## Pojivo po PAV 110°C

**Vzorek 1**  
**4 % SBS, 2 % RET**



**Vzorek 2**  
**4 % SBS, 3 % EVA**



**Vzorek 3**  
**2 % RET**

