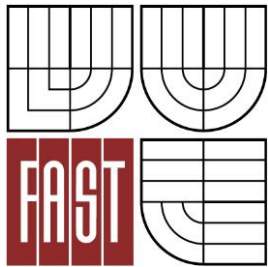




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

REOLOGICKÉ VLASTNOSTI ASFALTOVÝCH POJIV RHEOLOGICAL PROPERTIES OF ASPHALT BINDERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. MICHAL PĚNČÍK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PETR HÝZL, Ph.D.

BRNO 2015

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

Diplomant	Bc. Michal Pěňčík
Název	Reologické vlastnosti asfaltových pojiv
Vedoucí diplomové práce	Ing. Petr Hýzl, Ph.D.
Datum zadání diplomové práce	31. 3. 2014
Datum odevzdání diplomové práce	16. 1. 2015

V Brně dne 31. 3. 2014

.....
doc. Dr. Ing. Michal Varaus
Vedoucí ústavu

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

Podklady a literatura

Specifikační normy pro asfaltové směsi řady ČSN EN 13108
Zkušební normy pro asfaltové směsi za horka řady ČSN EN 12697
ČSN 736160 Zkoušení asfaltových směsí
Sborníky s konferencí Asfaltové vozovky 2011, 2013
Zkušební metody pro stárnutí asfaltových pojiv a směsí
Firemní materiály a internetové zdroje k dané problematice

Zásady pro vypracování

V diplomové práci bude věnována pozornost reologickým vlastnostem asfaltových pojiv a jejich stárnutí. Budou sledovány a porovnávány vybrané reologické vlastnosti zestárnutých a nezestárnutých asfaltových pojiv.

Předepsané přílohy

Licenční smlouva o zveřejňování vysokoškolských kvalifikačních prací

.....

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

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na reologické vlastnosti asfaltových pojiv a směsí. Zejména je popisována změna těchto vlastností u vzorků asfaltových pojiv a směsí, podrobených laboratornímu stárnutí, simulující reálný stav po zabudování ve vozovce. V teoretické části je pojednáno o reologii jako takové a metodách simulujících stárnutí asfaltových pojiv a směsí. Praktická část zahrnuje popis přípravy vzorků pojiv a směsí, které byly následně zkoušeny. Nejprve bylo provedeno stárnutí asfaltové směsi metodou BSA (Braunschweiger Alterung), vyrobená tělesa pro zkoušku modulu tuhosti na směsích a vyzkoušena. Ze zbylé směsi bylo vyextrahováno pojivo. Hlavní těžiště zkoušek pojiva je soustředěno k využití dynamického smykového reometru (komplexní modul tuhosti, dynamická viskozita). Na závěr jsou výsledky zkoušek vzájemně porovnány.

KLÍČOVÁ SLOVA

Reologie, asfaltové pojivo, asfaltová směs, dynamický smykový reometr, komplexní smykový modul, fázový úhel, dynamická viskozita, stárnutí

ABSTRACT

The Diploma thesis is focused on rheological properties of bituminous binders and mixtures. Above all, it describes the changes of these properties of samples of bituminous binders and mixtures. Those were brought by the process of laboratory aging, since it simulates the changes occurring in the pavement in the real-life conditions. The theoretical part depicts the field of rheology and methods utilized for simulating the ageing of binders and mixtures. The practical part describes the process of preparation of samples and its testing. Firstly, the ageing of bituminous mixture by the means of BSA method (Braunschweiger Alterung) took place, which was followed by preparing the solids for testing the modulus of stiffness and main testing. The rest of the mixture was used for extracting the binder. Tests with the binder were focused on

the usage of dynamic shear rheometer (complex shear modulus, dynamic viscosity). The last part of the work is dedicated to the comparison of the outcomes of testing.

KEYWORDS

Rheology, bituminous binder, bituminous mixture, dynamic share rheometer, complex shear modulus, phase angle, dynamic viscosity, ageing

Bc. Michal Pěňčík *Reologické vlastnosti asfaltových pojiv*. Brno, 2015. 81 s., 4 s. příl.
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Petr Hýzl, Ph.D.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně, a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 13.1.2015

.....
podpis autora
Bc. Michal Pěnčík

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce Ing. Petru Hýzlovi, Ph.D. za vzorné vedení při zpracování této práce. Dále děkuji Ing. Ondřeji Daškovi, Ph.D., Ing. Pavlu Coufalíkovi a také pracovníkům laboratoře Ústavu pozemních komunikací VUT FAST v Brně Pavlu Strakovi a Matěji Šafránkovi za poskytnuté materiály, ochotu a cenné rady.

OBSAH

1	ÚVOD	11
2	REOLOGIE	12
2.1	Viskozita	12
2.2	Ne-newtonovské kapaliny.....	14
2.3	Strategic Highway Research Program – SHRP	17
3	PROBLEMATIKA STÁRNUTÍ ASFALTOVÝCH POJIV	18
3.1	Změny vlastností asfaltových pojiv a směsí v závislosti na vnějších podmínkách.....	18
3.1.1	Termooxidační stárnutí.....	19
3.1.2	Destilační procesy	19
3.1.3	Migrační procesy.....	20
3.1.4	Strukturální stárnutí.....	20
3.2	Laboratorní metody simulující krátkodobé stárnutí asfaltových pojiv	21
3.2.1	RTFOT – Rolling Thin Film Oven Test	21
3.2.2	TFOT – Thin Film Oven Test	22
3.2.3	RTF – Rotating Flask Test.....	23
3.3	Laboratorní metody simulující dlouhodobé stárnutí asfaltových pojiv	24
3.3.1	PAV – Pressure Ageing Vessel.....	24
3.3.2	HiPat – High Pressure Ageing Test.....	25
3.3.3	3xRTFOT	26
3.4	Laboratorní metody simulující stárnutí asfaltových směsí	26
3.4.1	BSA – Braunschweiger Alterung.....	26
4	CÍLE PRÁCE	27
5	PRAKTICKÁ ČÁST	28
5.1	Zkoušené materiály	28
5.1.1	Základní parametry vstupních materiálů – asfaltové směsi	29
5.2	Příprava vzorků	31
5.2.1	Laboratorní stárnutí asfaltových směsí.....	31
5.2.2	Zkoušky pojiv	31

5.2.2.1	<i>Zpětná extrakce asfaltového pojiva</i>	31
5.2.2.2	<i>Formování vzorků</i>	33
5.2.3	Zkoušky směsí	35
5.3	Použité zkušební metody	39
5.3.1	Stanovení penetrace jehlou	39
5.3.2	Stanovení bodu měknutí metodou kroužek – kulička	41
5.3.3	Stanovení komplexního smykového modulu a fázového úhlu v DSR	41
5.3.4	Stanovení dynamické viskozity pomocí DSR.....	45
5.3.5	Stanovení modulu tuhosti na asfaltových směsích.....	47
5.4	Vyhodnocení dat	48
5.4.1	Stanovení penetrace jehlou	48
5.4.2	Stanovení bodu měknutí metodou kroužek – kulička	49
5.4.3	Komplexní smykový modul a fázový úhel	50
5.4.4	Dynamická viskozita	57
5.4.5	Modul tuhosti na směsích	62
5.4.6	Korelace mezi vyhodnocenými zkouškami	64
6	ZÁVĚR	67
7	POUŽITÁ LITERATURA	69
8	SEZNAM OBRÁZKŮ	71
9	SEZNAM TABULEK	73
10	SEZNAM GRAFŮ	74
11	SEZNAM ZKRATEK	76
12	SEZNAM PŘÍLOH	77
13	PŘÍLOHY	78

1 ÚVOD

V současné době stále se zvyšujícího dopravního zatížení pozemních komunikací, nárůstu intenzit jak nákladní, tak osobní automobilové dopravy, jsou kladeny stále větší nároky na kvalitu a spolehlivost konstrukcí silnic a dálnic. V neposlední řadě je třeba uvažovat i ekonomické hledisko, které je mnohdy rozhodujícím faktorem ve výstavbě.

Nejčastějšími vadami pozemních komunikací jsou poruchy krytu vozovky. Netuhé vozovky, tj. vozovky s krytem z asfaltových vrstev se vyznačují dvojitým chováním. Vlivem vysokých teplot dochází k trvalým deformacím povrchu. Naopak vlivem nízkých teplot se materiál stává pružnějším a tužším, což však může způsobit trhliny v povrchu krytu vozovky.

Asfaltové pojivo v průběhu životnosti stárne a tím se mění též jeho přetvárné, tj. reologické vlastnosti. Pojivo se stává křehčím, je náchylnější k poruchám, a to zejména charakteru trhlin. Existuje snaha tuto skutečnost postihovat při návrhu asfaltových směsí. Byla vyvinuta řada laboratorních postupů simulujících stárnutí asfaltových pojiv a směsí, které po následném vyzkoušení pomáhají předpovídat chování asfaltové vozovky v průběhu její životnosti.

Snahou je tedy využívat taková pojiva, která v co největší míře vyhoví kladeným požadavkům, a ve výsledku přinesou finanční úsporu v rámci životnosti pozemní komunikace.

2 REOLOGIE

Pojem „reologie“ byl poprvé zaveden Markusem Reinerem a Eugenem Cook Binghamem roku 1926. Slovo má svůj původ ve dvou řeckých slovech, „rheos“ – řeka, tok či proudění, a „logos“ – rozum. [1], [2]

Jedná se o vědní obor zabývající se přetvárným chováním hmot, tečením materiálů. Zkoumá též pohyb a napjatost viskóznějších kapalin, které neodpovídají klasickým zákonům viskózního a pružného chování. [1]

2.1 Viskozita

Viskozita, též vazkost, je základním reologickým parametrem. Tento parametr určuje míru odporu proti vnějšímu zatížení, resp. míru odporu proti toku. Platí, že čím je materiál, např. asfalt, viskóznější, tím je odpor proti přetvoření větší a naopak. Jednotkou viskozity je *Pa.s*. [2]

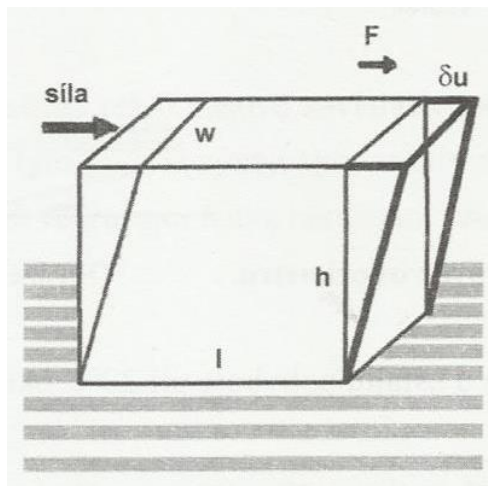
Asfaltové pojivo se může v zásadě nacházet ve třech stavech. Při vysokých teplotách nebo při pomalém zatížení se chová jako viskózní kapalina, „olej“. Lze jej míchat, přečerpávat a obalovat jím kamenivo. Při poklesu teploty se viskozita zvyšuje a asfalt vykazuje vlastnosti viskózní i pružné. Při nízkých teplotách nebo rychlém zatížení dosahuje viskozita vysokých hodnot a jedná se prakticky o látku pružnou. [1], [2], [6]

Dle způsobu měření rozlišujeme viskozitu kinematickou ν a dynamickou η . Tyto dvě veličiny jsou na sobě závislé a to prostřednictvím hustoty ρ dané látky dle vztahu

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}. [2]$$

Pro určení dynamické viskozity, která je v práci prakticky zjišťována je třeba definovat smykové napětí τ a smykové přetvoření γ . Toto lze ukázat prostřednictvím kvádry položené na podložce zatěžovaného bočně v horní části silou F (viz obrázek 2-1). V případě ideálně pružného tělesa dojde ke smykové deformaci a vychýlení do nové pozice. Smykové přetvoření pak lze vypočítat ze vzorce

$$\gamma = \frac{\delta u}{h} \cdot [6]$$



Obrázek 2-1: Smykové přetvoření [6]

Vlastní dynamická viskozita je definována, jako poměr mezi smykovým napětím τ a smykovou rychlostí (smykovým gradientem, stříhovým spádem) $\dot{\gamma}$. V klasické mechanice kapalin, která vychází z Newtonovské teorie kapalin (voda, vzduch) a je definována vztahem

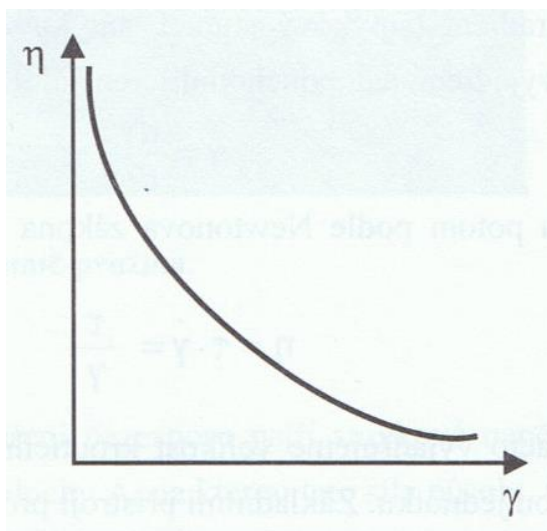
$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}, \text{ za současné platnosti } \dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt},$$

tj. Newtonovým zákonem viskozity, kde $d\gamma/dt$ představuje smykovou rychlost. [6], [7]

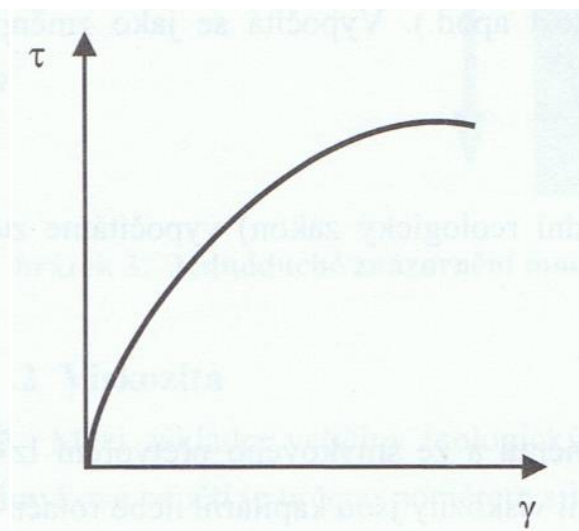
Viskozitu lze měřit kapilárními nebo rotačními viskozimetry. Kapilární viskozimetry měří nejpřesněji, avšak jsou použitelné pouze pro transparentní, tj. průhledné Newtonovské tekutiny. Typickým zástupcem je Höpplerův viskozimetr s padající kuličkou. Rotační viskozimetry pracují na základě relativního měření a používají se buď viskozimetry s kontrolovaným napětím, anebo s kontrolovanou smykovou rychlostí. Nejčastěji používaným je Brookfieldův viskozimetr. Lze však použít též s výhodou měření pomocí dynamického smykového reometru s geometrií kužel – destička, jehož užití vyžaduje velmi malé množství vzorku. [6]

Pro srovnání se dynamická viskozita při 20°C pohybuje u asfaltu okolo 10^8 mPa.s, zatímco např. dynamická viskozita řepkového oleje dosahuje 60 mPa.s. [6]

Graficky lze viskozitu znázornit pomocí viskózní křivky (viz obrázek 2-2). Spolu s tokovou křivkou (viz obrázek 2-3) nám dává komplexní informaci o chování kapaliny při určité teplotě. [6]



Obrázek 2-2: Viskózní křivka [6]



Obrázek 2-3: Toková křivka [6]

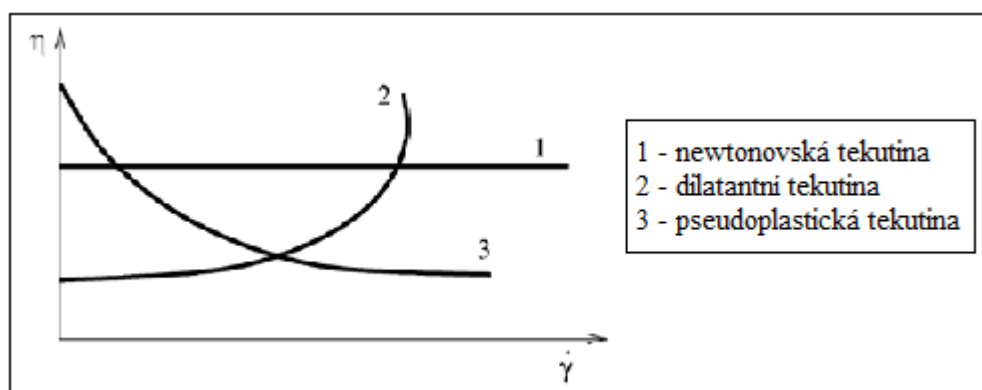
2.2 Ne-newtonovské kapaliny

Newtonovské kapaliny, např. voda, vykazují vždy přímou úměrnost rychlosti deformace a napětí. Naproti tomu ne-Newtonovské kapaliny tuto linearitu nedodrží a jejich reologický popis je proto složitější. Někdy se označují jako nelineárně viskózní a deformace je obecně funkcí času. Pro jejich popis je třeba definovat tzv. reologické veličiny. Do této skupiny látek patří též asfalty. [6], [18]

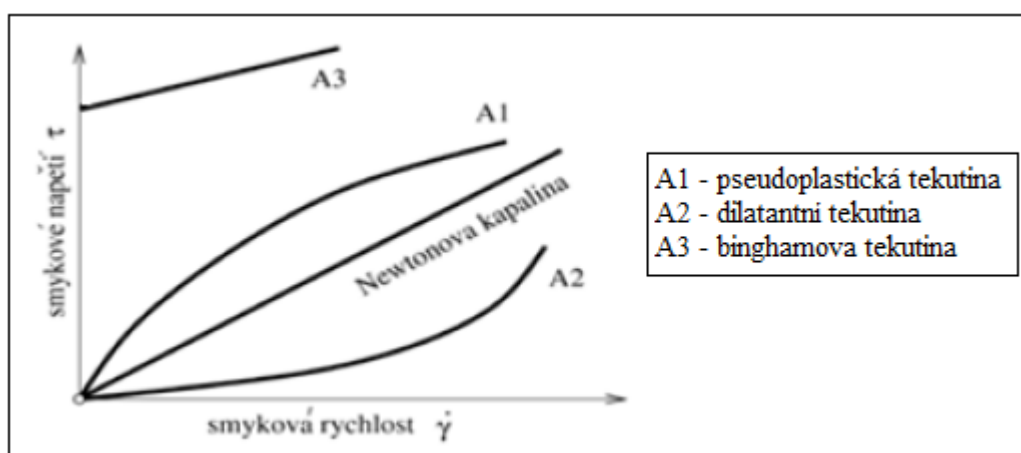
Ne-newtonovské kapaliny lze z pohledu závislosti jejich viskozity na různých faktorech dělit do několika skupin.

- zobecněné newtonovské kapaliny – binghamské tekutiny
 - pseudoplastické tekutiny
 - dilatantní tekutiny
- viskoelastické kapaliny
- kapaliny s časovou závislostí [18]

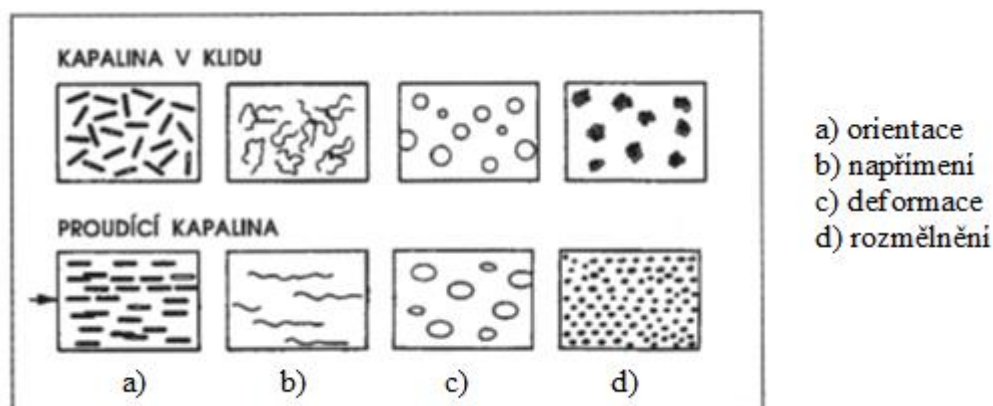
Binghamské tekutiny jsou látky, u kterých dochází k toku až po překročení určitého smykového napětí (suspenze křída, vápna, ...). U pseudoplastických tekutin viskozita klesá se zvyšující se smykovou rychlostí, což se označuje jako smykové řídnutí (např. kečup). U dilatantní tekutiny naopak se zvyšující se smykovou rychlostí viskozita roste. Tyto se označují se jako tekutiny smykově houstnoucí (např. škrobové suspenze). Jednotlivá chování ilustruje obrázek 2-4 a obrázek 2-5). Možné mechanismy těchto chování naznačuje také obrázek 2-6. [6], [18], [20]



Obrázek 2-4: Viskózní křivka pro různé tekutiny [18]

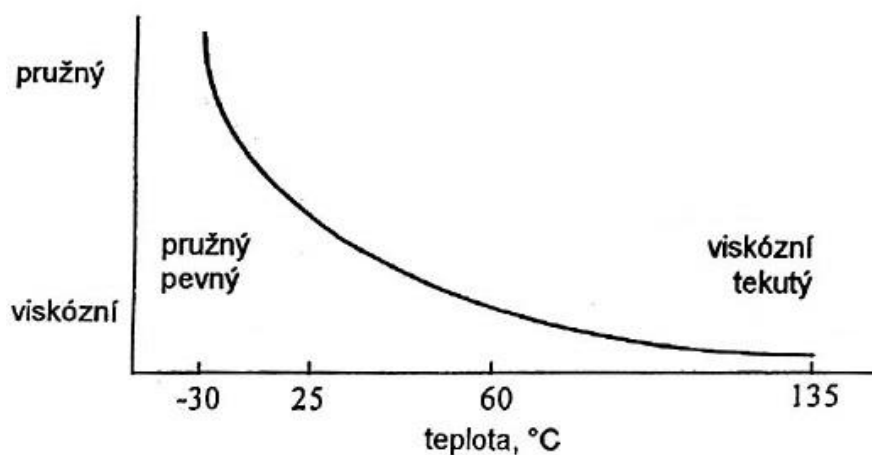


Obrázek 2-5: Toková křivka pro různé tekutiny [18]



Obrázek 2-6: Vliv toku na uspořádání částic v ne-newtonovské kapalině [20]

Asfalt spadá do skupiny látek viskoelastických. Jeho viskozita je silně závislá na teplotě. Za nízkých teplot se nachází ve stavu pevném a chová se jako pružná (elastická) látka. Za teplot vysokých (120 - 150 °C) přejde do stavu tekutého a lze jej přečerpávat a míchat s kamenivem pro vytvoření asfaltové směsi. Za běžných teplot má vlastnosti obou stavů (viz obrázek 2-7). [16], [19]



Obrázek 2-7: Viskoelastické chování asfaltu [19]

Tekutiny s časovou závislostí jsou závislé na době působení napětí. Jedná se o látky tixotropní, u kterých viskozita s dobou zatížení klesá. U látek reopexních se naopak s dobou zatížení viskozita zvyšuje. [18]

2.3 Strategic Highway Research Program – SHRP

Koncem 80. let 20. století byl v USA zahájen rozsáhlý výzkumný program zabývající se výzkumem asfaltových vozovek. Vzhledem k tomu, že empirické zkoušky asfaltových pojiv nevypovídají dostatečně o jejich funkčních praktických charakteristikách, dal si tento program za cíl provést revizi stávajících a zavést nové zkušební postupy lépe vystihující chování asfaltových pojiv a směsí. Tyto nové zkušební metody berou ve velké míře v potaz do té doby opomíjené reologické vlastnosti.

Zejména jde o zkoušky stanovení viskozity asfaltového pojiva a stanovení dynamického smykového modulu, potažmo smykového úhlu asfaltových pojiv. Jako jeden z prvních se tento výzkumný program zabýval otázkou stárnutí asfaltů. V rámci SHRP byla vyvinuta, upravena, či zavedena řada zkušebních postupů a zařízení pro dokonalejší objasňování chování asfaltových pojiv, z nichž některé budou zmíněny v dalším textu. Patří sem dynamický smykový reometr (DSR), metody simulující jak krátkodobé stárnutí – RTFOT, TFOT, tak dlouhodobé stárnutí PAV a celá řada dalších přístrojů a zkoušek. [6]

3 PROBLEMATIKA STÁRNUTÍ ASFALTOVÝCH POJIV

Asfalt je materiál organického původu, jenž představuje koloidní systém vysokomolekulárních uhlovodíků. Tyto látky za určitých podmínek degradují vlivem působení tepla, působení vzdušného kyslíku, ultrafialového záření nebo jejich kombinací. Tím pádem dochází u asfaltového pojiva během životnosti asfaltové vrstvy ke změnám jeho vlastností. V průběhu času se mění přetvárné, tj. reologické vlastnosti pojiva. V důsledku toho se stává pojivo, resp. asfaltová směs, méně odolná vůči účinkům zatížení, v konstrukci krytu dochází k poruchám, a to zejména za nízkých teplot. [16], [22]

Výzvou pro pracovníky v silničních laboratořích je vyvíjet a využívat metody poskytující co nejdělejší obraz o stavu asfaltových vozovek v průběhu jejich životnosti. Mezi tyto metody patří postupy simulující stárnutí asfaltových pojiv a směsí popsané v této kapitole.

3.1 Změny vlastností asfaltových pojiv a směsí v závislosti na vnějších podmínkách

Obecně lze říci, že stárnutí materiálu v jakékoli fázi (výroba, pokládka, užívání) má negativní vliv na kvalitu, trvanlivost a užité vlastnosti asfaltových materiálů (odolnost proti vzniku trhlin, moduly pružnosti, adheze, ...). Na základě reologických zkoušek je potvrzeno, že vlivem stárnutí dochází u asfaltových pojiv ke zvýšení komplexního modulu tuhosti a snížení hodnot fázového úhlu. Asfaltové pojivo se tedy stává tužším a je schopno odolávat trvalým deformacím. Na druhé straně však dochází ke zkřehnutí pojiva, asfalt ztrácí flexibilitu, dochází ke zhoršení únavových charakteristik, je náchylnější k porušování při zatížení či tvorbě trhlin. Finálním výsledkem těchto změn je snížení životnosti asfaltové vozovky. [22]

Následující kapitoly vysvětlují možné mechanismy degradace asfaltového pojiva vlivem stárnutí.

3.1.1 Termooxidační stárnutí

Termooxidační procesy nejvýraznější měrou přispívají k degradaci asfaltových materiálů označované jako stárnutí. Jedná se o soubor chemických pochodů, mající povahu radikálových řetězových reakcí, a závisí v největší míře na teplotě a přístupu vzdušného kyslíku k pojivu (velikost kontaktní plochy pojiva se vzduchem). Tyto vedou k zabudování atomů kyslíku do chemických struktur asfaltu a jejich následné přeměny na sloučeniny ovlivňující jeho fyzikální vlastnosti. Soubor těchto dějů a degradačních procesů bývá označován jako oxidační stárnutí asfaltového pojiva.

Vliv oxidačního stárnutí je nejvýraznější ve fázích výroby, dopravy a pokládky asfaltové směsi, tj. v době, kdy je asfaltové pojivo zahřáto na vysoké teploty a oxidaci je vystavena velká plocha materiálu. Avšak ani po zhutnění asfaltové směsi oxidační stárnutí neustává. Procesy oxidativní degradace probíhají po celou dobu živostnosti materiálu. Ve fázi zhutněné směsi záleží také na dalších faktorech ovlivňujících stárnutí, jakými jsou difuzní odpor asfaltového filmu (stoupá s tloušťkou), permeabilita (propustnost) asfaltové vrstvy pro molekuly vzdušného kyslíku (závislé na mezerovitosti zhutněné asfaltové vrstvy, vliv ultrafialového záření, atd. Tyto reakce jsou výrazně pomalejší, ale též nastávají ve styku s atmosférou a jsou značně závislé na teplotě, tj. teplota výrazně ovlivňuje oxidační účinek. [22], [26]

3.1.2 Destilační procesy

Destilační procesy se uplatňují nejvíce při zpracování asfaltových silničních pojiv za horka. V největší míře se vyskytuje u asfaltů, u kterých dochází v důsledku termooxidačních dějů ke štěpení uhlovodíkových molekul za vzniku nízkomolekulárních sloučenin, či obsahují lehké olejové podíly. Pokud je asfalt udržován při vysoké teplotě déle, dochází k vydestilování (odpaření) těchto olejů a sloučenin. Odpar lehkých frakcí se zvyšuje s rostoucí teplotou, rostoucím povrchem a rostoucí penetrací asfaltu.

Změnou zastoupení látek v asfaltovém materiálu dochází k degradativním změnám obdobným jako u oxidačního stárnutí.

Obecně by asfaltová pojiva měla obsahovat jen velice nízké podíly volatilních (nestálých) látek. Z těchto důvodů se stanovuje TBP (True Boiling Point), což je chromatografická metoda simulované destilace, která stanovuje teplotu, při které musí být vydestilováno 95 % látky. [22]

3.1.3 Migrační procesy

Obdobou destilačních procesů stárnutí jsou migrační procesy, které však probíhají za běžných teplot a to podstatně pomaleji. Nejčastěji se migrační procesy uplatňují v případech, kdy jsou do asfaltového pojiva přimíchávány podíly fluxačních olejů, popř. nejsou používány dostatečně výkonné destilační kolony. U tohoto druhu stárnutí dochází k nárůstu velikosti koloidních částic. Asfaltény se shlukují do větších seskupení a fluxační oleje vnikají do kameniva. Těmito procesy dochází k vytvrzování (křehnutí) asfaltového pojiva, pojivo ztrácí plasticitu a pružnost. Vlivem nárůstu velikosti částic postupně vzniká hrubá disperze a vícefázový systém. [22], [26]

Exudační kapkový test (exudation droplet test) neboli „test vypocení na mramorové destičce“ dokáže poskytnout informace o možných potížích tohoto typu. Umožňuje totiž rozpoznat asfalty s olejovými komponentami. Zkouška spočívá v umístění kuličky pojiva na leštěnou mramorovou destičku a vložení této sestavy na 96 hodin do pece při 60°C v dusíkové atmosféře. Jakékoliv migrující podíly se vyroní v soustředných kroužcích kolem kuličky viditelných v ultrafialovém světle v mikroskopu. [22]

3.1.4 Strukturální stárnutí

Strukturální stárnutí (tvrdnutí) se uplatňuje, pokud je pojivo vystaveno nízkým teplotám delší časové období. Jedná se většinou o reverzibilní (vratný) proces, který není spojen s chemickými změnami materiálu. Jde spíš o reorganizaci a zafixování molekul a shlukování sloučenin na bázi vodíkových můstků. Ve svém důsledku vedou tyto procesy k zdánlivému zvýšení tvrdosti asfaltu. Při měření v laboratoři se projevuje tím, že měřená veličina, např. komplexní smykový modul je závislý na tepelné historii vzorku. [22], [26]

3.2 Laboratorní metody simulující krátkodobé stárnutí asfaltových pojiv

V angličtině se označují pojmem „Short Term Ageing“ (STA). Jedná se o postupy, při nichž je simulováno stárnutí pojiva probíhající při technologii výroby asfaltových směsí na obalovně, dopravě a pokládce. Mezi základní metody krátkodobého stárnutí patří metody označované RTFOT, TFOT, a RTF. [5], [22]

3.2.1 RTFOT – Rolling Thin Film Oven Test

Test byl vyvinut a základní výzkum byl proveden v 60. letech 20 století. V současné době jde o nejběžnější metodu simulující krátkodobé stárnutí. RTFOT je považován za test s dobrou možností předpovídat náchylnosti asfaltů k předčasnému stárnutí. [22]

Tato metoda je podrobně popsána v normě ČSN EN 12607-1. Jedná se o stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu. Je založena na principu tepelné stálosti tenké pohybuující se vrstvy filmu asfaltového pojiva, která se ohřívá v sušárně za přívodu přehřátého vzduchu. [3], [16]



Obrázek 3-1: Zkušební zařízení pro zkoušku RTFOT [4]

Do skleněné nádoby se nalije $35 \pm 0,5$ g pojiva a nádoba se vloží se do sušárny vytemperované na $163\text{ }^{\circ}\text{C}$. Naráz se zkouší 8 vzorků. Tloušťka filmu na stěnách nádobek dosahuje cca 1,25 mm. Během zkoušky, která trvá 75 minut, je nádobkami otáčeno, což zabraňuje vytvoření povrchové vrstvičky, a zároveň je přímo do nádobek vháněn horký vzduch. Po zkoušce je změřen úbytek hmotnosti po umělém stárnutí, bod měknutí, penetrace při $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a dynamická viskozita při $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. [3], [16], [22]

Hodnotí se úbytek hmotnosti po zkoušce. Metoda umožňuje porovnáním výsledné hmotnosti definovat převládající chemické procesy – štěpení a destilace (hmotnostní úbytky), proti oxidačnímu zabudování kyslíku do materiálu (hmotnostní přírůstky). Takto zestárlé vzorky jsou podrobeny dalším zkouškám pojiv a porovnány s pojivy nezestárlými. [3], [22]



Obrázek 3-2: Detailní pohled do komory zařízení pro RTFOT [5]

3.2.2 TFOT – Thin Film Oven Test

Metoda je podrobně popsána v normě ČSN EN 12607-2. Podobně jako u RTFOT jde o stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu. Metoda je založena na tepelné stálosti tenké vrstvy zkušebního materiálu. Princip je postaven na

vzorku uloženém na kovové misce, která je umístěna na vodorovně se otáčejícím kotouči za přístupu tepla.

Připraví se 3 misky s pojivem o hmotnosti 50 g, které se umístí do sušárny na kotouč, který se během zkoušky otáčí. Zkouška probíhá při teplotě 163 °C po dobu 5 hodin.

Výsledkem zkoušky je hmotnostní úbytek pojiva a zjištění poměrné kinematické viskozity. Vliv tepla a vzduchu lze prokázat také určením bodu měknutí a penetrací. Výsledky se opět porovnají s parametry nezestárlého pojiva. [3], [14], [16]



Obrázek 3-3: Vzorky pojiva v sušárně připravené ke zkoušce TFOT [5]

3.2.3 RTF – Rotating Flask Test

Metoda byla vyvinuta v Německu, a proto se někdy nazývá „German Rolling Flask method“. Je poměrně ekvivalentní k RTFOT. Princip metody RFT je založen na tenké pohybuující se vrstvě vzorku asfaltového pojiva, které se ohřívá v olejové lázni. Přesný postup je popsán v technické normě ČSN EN 12607-3. [15], [16], [22]

Vzorek o hmotnosti 100 g, který je ohříván při teplotě 165 °C po dobu 150 minut za konstantního přívodu vzduchu o objemu 500 ml/min, je umístěn ve skleněné baňce o objemu 1000 ml, do které je přiváděn vzduch. Baňka je uložena pod úhlem 45° a otáčí

se rychlostí 20 otáček/min. Takto zestárlé pojivo se podrobí empirickým i funkčním zkouškám a výsledky se porovnají s nezestárlým pojivem. [3], [15], [16]

RFT je poměrně ekvivalentní k RTFOT. Modifikací této zkoušky, tj. prodloužením doby působení a snížením teploty je možno simulovat dlouhodobé stárnutí. [22]



Obrázek 3-4: Zkušební zařízení pro zkoušku RFT [5]

3.3 Laboratorní metody simulující dlouhodobé stárnutí asfaltových pojiv

Tyto metody simulují dlouhodobé stárnutí pojiva (anglicky „Long Term Ageing – LTA) zabudovaného ve vozovce. Mezi základní metody dlouhodobého umělého stárnutí patří metody PAV, HiPat a trojnásobná metoda RTFOT. [5]

3.3.1 PAV – Pressure Ageing Vessel

Urychlené dlouhodobé stárnutí v tlakové nádobě (PAV) je popsáno v normě ČSN EN 14769. Postup simuluje stav asfaltu po 7 – 20 letech provozu. Simulovaná doba záleží na vnějších podmínkách, jako jsou klimatické poměry, vliv vlhkosti, ale

zejména na typu asfaltové směsi, její mezerovitosti a tloušťce filmu asfaltového pojiva. Princip zkoušky je založen na uchování misek s tenkou nepohyblivou vrstvou pojiva v tlakové nádobě za zvýšené teploty a tlaku. Je důležité, že dle metodiky SHRP tomuto testu předchází simulované stárnutí metodou RTFOT. Vzorek tedy už prošel jednou sekvencí stárnutí. [3], [22]

Aparatura je tvořena tlakovou nádobou, která se předehřeje na 100 °C. Poté jsou do PAV vloženy vzorky pojiva na miskách o hmotnosti 50 g pojiva v jedné misce. Po natlakování nádoby na 2,1 MPa probíhá zkouška za teploty 100 °C po dobu 20 hodin. Přetlak zajišťuje změnu difúzních poměrů (zvětšení tlakového spádu) a tedy nucenou migraci molekul kyslíku hluboko do zkoumaného materiálu. [3], [16], [22]



Obrázek 3-5: Aparatura pro zkoušku v tlakovém hrnci PAV [5]

3.3.2 HiPat – High Pressure Ageing Test

Tato varianta se používá ve Velké Británii, kdy standardní teplota při PAV (100°C) je snížena na 85 °C a doba zkoušky je prodloužena z 20 hodin na 65 hodin. Tato varianta testu je známa jako PAV₈₅. Změnou teploty je nepatrně ovlivněna kinetika, ale je dosaženo hlubší degradace. [22]

3.3.3 3xRTFOT

Jedná se o modifikaci metody simulace stárnutí RTFOT. Přístrojové vybavení i podmínky procesu jsou stejné jako u metody RTFOT, doba stárnutí je však trojnásobná. Tato metoda simuluje dlouhodobé stárnutí pojiva během životnosti asfaltové vrstvy. Zkouška je běžně používaná v Rakousku a rozsah využívání se zvyšuje též v silničních laboratořích v ČR. Metoda 3xRTFOT však není v českých předpisech normována. Uvedena je pouze v rakouské oborové specifikaci RVS 08.97.05. [22], [25]

3.4 Laboratorní metody simulující stárnutí asfaltových směsí

3.4.1 BSA – Braunschweiger Alterung

Jedná se o metodu simulace stárnutí asfaltové směsi vyvinutou na technické univerzitě v Braunschweigu v Německu. V ČR není metoda upravena žádnou normou. Vychází se tedy z německých předpisů.

Principem zkoušky je urychlení oxidativního stárnutí tenkého filmu asfaltového pojiva na povrchu kameniva směsi. Nezhotvená asfaltová směs (tj. směs s vysokou mezerovitostí) rozprostřená na ocelových pleších v tenké vrstvě, je při teplotě 80°C po dobu 96 hodin umístěna ve speciální peci s nuceným přívodem vzduchu. Dochází tedy neustále k přivádění čerstvého vzduchu do komory pece a zrychlené oxidaci asfaltového pojiva na povrchu zrn kameniva. Zvolená teplota zároveň zamezuje destilačním procesům v průběhu zkoušky.

Výsledný materiál lze využít k následným zkouškám jako např. měření modulu tuhosti v ohybu na zkušebních trámečcích. Lze též z takto zestárlé směsi vyextrahovat pojivo a porovnávat výsledky zkoušek tohoto zestárlého pojiva s pojivy nezestárlými.

Poměrně výrazný vliv na asfaltové pojivo zestárluté prostřednictvím BSA má tloušťka asfaltového filmu, přičemž směsi s vyšším obsahem asfaltu, tj. větší tloušťkou filmu, zestárnou méně oproti směsím s nižším obsahem pojiva. Tato skutečnost se přisuzuje vyššímu difuznímu odporu asfaltu proti pronikání molekul kyslíku do hloubky asfaltového filmu. Tím pádem pojivo dále od povrchu méně degraduje. Tentýž efekt jako zvýšení obsahu pojiva má též snížení mezerovitosti asfaltové směsi. [22]

4 CÍLE PRÁCE

Cílem této diplomové práce je zkoumat reologické vlastnosti asfaltových pojiv jak v rovině teoretické, tak praktické. Práce si zároveň klade za cíl zpracovat problematiku stárnutí asfaltových pojiv. Zaměřena je na simulaci procesů stárnutí a provedení laboratorních zkoušek zaměřených právě na reologické vlastnosti. Na základě porovnání výsledků zkoušek se snaží vyjádřit důsledky stárnutí na přetvárnost a odolnost asfaltových pojiv vůči zatížení v průběhu životnosti asfaltových krytů pozemních komunikací.

5 PRAKTICKÁ ČÁST

Praktická část práce zahrnuje přípravu vzorků, jejich zkoušení jak konvenčními, tak funkčními zkouškami a následné vyhodnocení a porovnání výsledků.

Byly zpracovány 3 různé asfaltové směsi. Každá směs byla rozdělena na poloviny, přičemž jedna polovina byla podrobena laboratornímu stárnutí metodou BSA (Braunschweiger Alterung). Ke zpracování tedy bylo 6 různých směsí (3 nezestárlé, 3 zestárlé). Z každé směsi byla vyrobena tělesa pro zkoušku stanovení modulu tuhosti na trapezoidech dle ČSN EN 12697-26. Ze zbylého materiálu bylo vyextrahováno pojivo a na něm provedeny zkoušky penetrace, zjištění bodu měknutí, stanovení dynamické viskozity, stanovení komplexního modulu tuhosti a fázového úhlu. Tyto zkoušky byly též provedeny na tzv. „panenských“ pojivech, které neprošly zpracováním na obalovně, popř. zpětnou extrakcí. Výsledná data byla mezi sebou vzájemně porovnána.

5.1 Zkoušené materiály

Výchozím materiálem pro přípravu vzorků a jejich zkoušení byly asfaltové směsi odebrané na obalovně. Byly zpracovány 3 směsi typu ACO11S, přičemž každá směs obsahovala pojivo stejné gradace (50/70) avšak z různých rafinerií.

Pro účely lepší orientace v textu budou směsi značeny následovně:

ACO11S, výrobce pojiva - ORLEN	- „ACO11S (Orlen)“
ACO11S, výrobce pojiva - LOTOS	- „ACO11S (Lotos)“
ACO11S, výrobce pojiva - CHZ LITVÍNOV	- „ACO11S (Litvínov)“

5.1.1 Základní parametry vstupních materiálů – asfaltové směsi

Tabulka 5-1: Základní vlastnosti nativních asfaltových pojiv

	Orlen 50/70	Lotos 50/70	Litvínov 50/70
Výrobce	Orlen (Polsko)	Lotos (Polsko)	CHZ Litvínov (ČR)
Bod měknutí [°C]	48,7	47,5	50,8
Penetrace [p. j.]	56	57	52

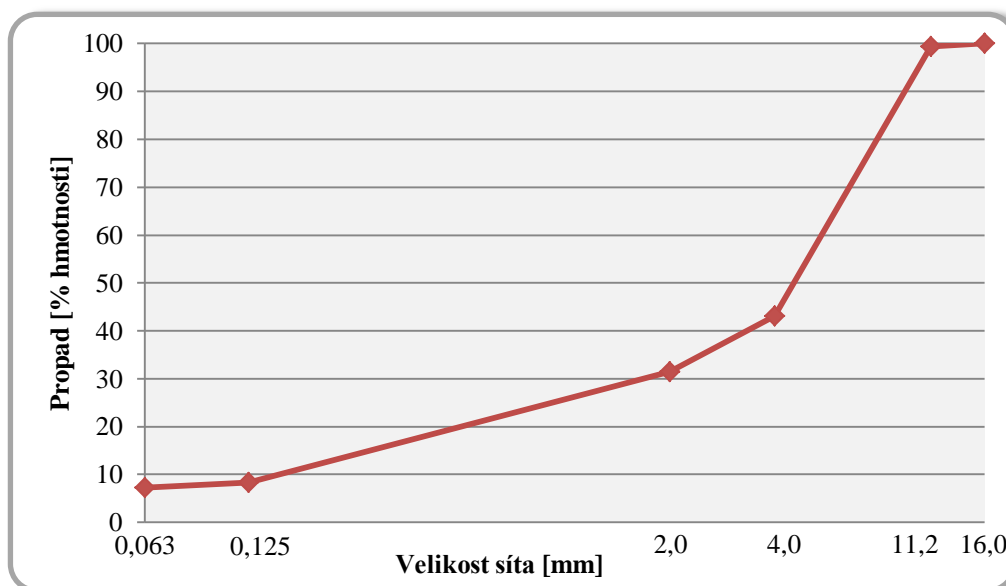
Tabulka 5-2: Základní vlastnosti původních asfaltových směsí

	ACO11S (Orlen)	ACO11S (Lotos)	ACO11S (Litvínov)
Teplota hutnění [°C]	156	156	156
Stanovená objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	2377	2377	2386
Obsah pojiva [%]	5,70	5,85	5,87
Mezerovitost [obj. %]	2,3	2,1	2,0

Tabulka 5-3: Parametry čáry zrnitosti – ACO11S (Orlen)

Síto [mm]	16,00	11,20	4,00	2,00	0,13	0,06
Propad [%]	100,00	99,40	43,10	31,40	8,30	7,30

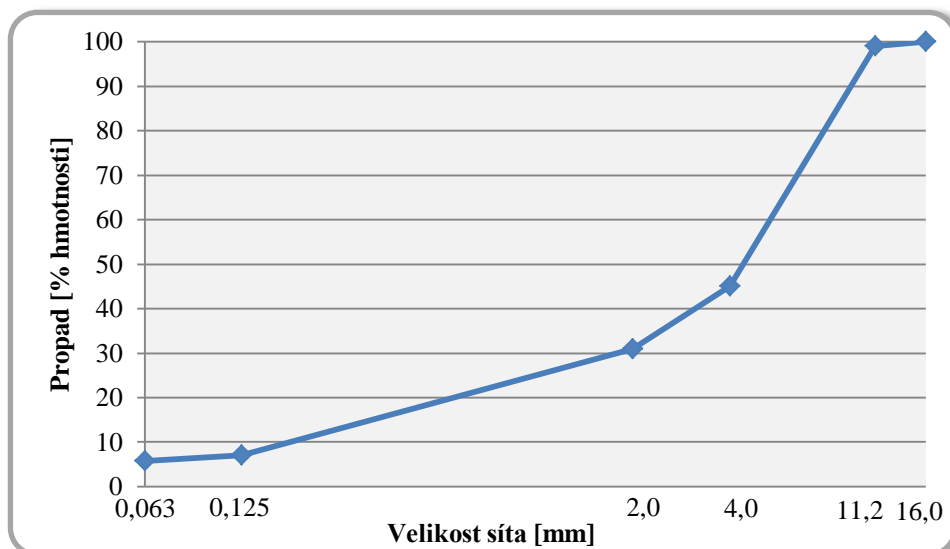
Graf 5-1: Čára zrnitosti – ACO11S (Orlen)



Tabulka 5-4: Parametry čáry zrnitosti – ACO11S (Lotos)

Síto [mm]	16,0	11,2	4,0	2,0	0,125	0,063
Propad [%]	100,0	99,0	45,1	31,0	7,1	5,7

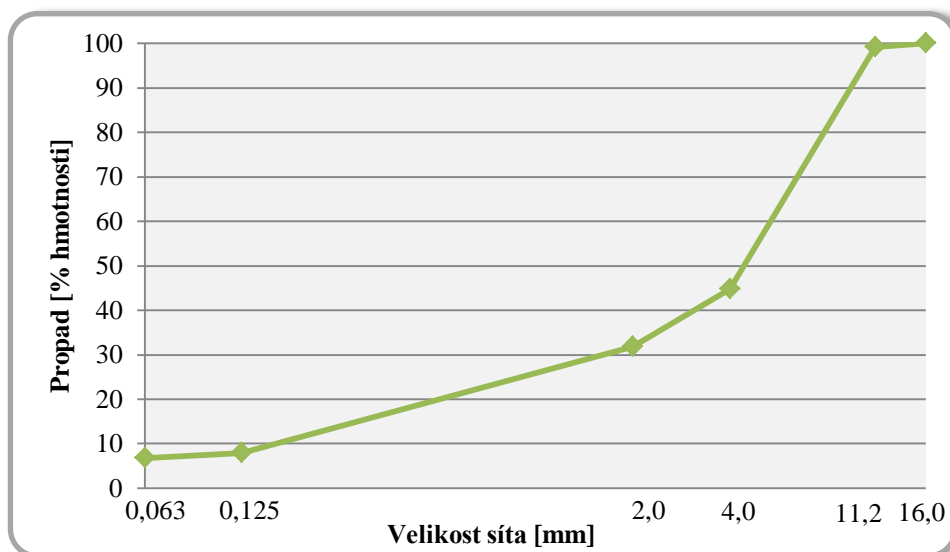
Graf 5-2: Čára zrnitosti – ACO11S (Lotos)



Tabulka 5-5: Parametry čáry zrnitosti – ACO11S (Litvínov)

Síto [mm]	16,0	11,2	4,0	2,0	0,125	0,063
Propad [%]	100,0	99,2	44,7	31,8	7,9	6,8

Graf 5-3: Čára zrnitosti – ACO11S (Litvínov)



5.2 Příprava vzorků

Pro jednoduchost bude popisována příprava vzorků pro jeden druh směsi. Vzorky ostatních směsí byly připravovány analogicky. Totéž platí pro nezestárlý i zestárlý materiál.

5.2.1 Laboratorní stárnutí asfaltových směsí

Směs byla rozdělena na poloviny, z nichž jedna polovina byla podrobena laboratornímu stárnutí. Stárnutí asfaltových směsí není v českých předpisech popsáno. V tomto případě byla vybrána metoda BSA (Brauschweiger Alterung).

Nezhutněná asfaltová směs rozprostřená na plechy v tloušťce cca 4 cm se v sušárně s nucenou cirkulací vzduchu nechala uměle zestárnout. Směs byla zahřívána po dobu 96 hodin při teplotě 80°C.

5.2.2 Zkoušky pojiv

5.2.2.1 Zpětná extrakce asfaltového pojiva

Pro zkoušky pojiv bylo třeba pojivo zpětně vyzískat z asfaltové směsi.

Asfaltová směs byla po dobu cca 3 hodin ponořena do trichlorethylenu, a občasně promíchána. Za tuto dobu dojde k dostatečnému oddělení asfaltu od kameniva. Takto vzniklá směs byla přes sadu sít (dolní síto 0,063 mm) postupně dávkována do odstředivacího zařízení (viz obrázek 5-1 a obrázek 5-2), ve kterém se zachytily zbylé jemné částice, a výsledkem byla odstředěná směs asfaltu a trichlorethylenu.

Následujícím krokem bylo oddestilování trichlorethylenu ze směsi. Toto se provádí v destilačním zařízení (viz obrázek 5-3). Postup je popsán v normě ČSN EN 12697-3: Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 3: Znovuzískání extrahovaného pojiva – Rotační vakuové destilační zařízení.

Směs asfaltu a trichlorethylenu se nasává do skleněné baňky ponořené v olejové lázni s teplotou 90°C. Baňka se otáčí rychlostí 75 ot/min a tlak v uzavřené aparatuře se sníží na 40 kPa.



Obrázek 5-1: Odstřed'ovací zařízení



Obrázek 5-2: Pohled dovnitř odstředivky



Obrázek 5-3: Destilační zařízení

Působením teploty a sníženého tlaku je trichlorethylen ze směsi odpařován, poté putuje do chladicího válce, uvnitř kterého je spirála, jíž protéká studená voda. V chladicím válci trichlorethylen kondenzuje a je jímán do skleněné baňky. Tento postup se opakuje až do nasátí veškeré směsi. Poté se zvýší teplota olejové lázně na 160°C a postupně se sníží tlak v aparatuře na 2,0 kPa. Dochází k dalšímu odpařování zbylého trichlorethylenu. Po vydestilování veškerého trichlorethylenu je proces ukončen. Výsledkem je čisté asfaltové pojivo, které zbyde v baňce.

5.2.2.2 Formování vzorků

Přímo z baňky destilačního přístroje byly odlity vzorky pro zkoušku penetrace (viz obr. 5-4), stanovení bodu měknutí – metoda kroužek a kulička (viz obr. 5-5) a zkoušky v DSR, tj. komplexní smykový modul, fázový úhel a dynamická viskozita (viz obr. 5-6).



Obrázek 5-4: Miska s asfaltovým pojivem pro zkoušku penetrace jehlou



Obrázek 5-5: Tělíska pro zkoušku „Kroužek – kulička“



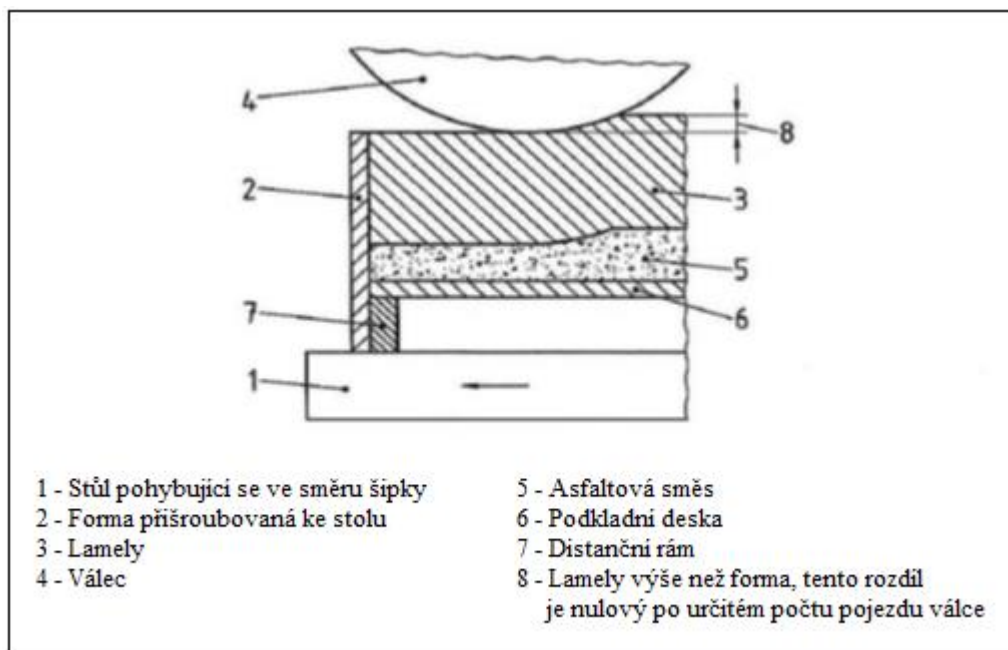
Obrázek 5-6: Tělíška pro zkoušky v DSR

5.2.3 Zkoušky směsí

Jedinou zkouškou prováděnou na zhutněné asfaltové směsi byla zkouška stanovení modulu tuhosti dle ČSN EN 12697-26. Pro tuto zkoušku je nutné nejdříve asfaltovou směs zhutnit do podoby desky o rozměrech 0,32x0,26x0,05 [m]. Toto bylo provedeno pomocí lamelového zhutňovače desek (viz obrázek 5-7). Postup zhutňování je popsán v normě ČSN EN 12697-33. [8]

Lamelový zhutňovač se skládá z kovového stolu, ke kterému je přišroubována ocelová rozebíratelná forma rozměrů 260x320 mm. Výška výsledné desky se nastavuje pomocí sady podložek vložených pod spodní desku formy. Před hutněním směsi je nutno formu vytříbit vhodným separačním prostředkem. Přesně navážené množství směsi, vytemperované na teplotu hutnění, se uloží do formy, povrch se zarovná a špachtlí předhutní. Přes roznášecí plech, taktéž natřený separačním prostředkem se uložená směs zatíží svisle za sebe poskládanými ocelovými lamelami. Celá forma i lamely se nechá před hutněním alespoň 2 hodiny temperovat na teplotu hutnění. Tato sestava se pomocí posuvného zařízení pohybuje po ližinách tam a zpět za současného pojíždění válcem, Válec lamely zatlačuje konstantní silou do hutněného materiálu až do dosednutí na

horní hranu formy. Po ukončení hutnění se sestava nechá vychladnout na laboratorní teplotu a až poté se sestava rozebere. [8]

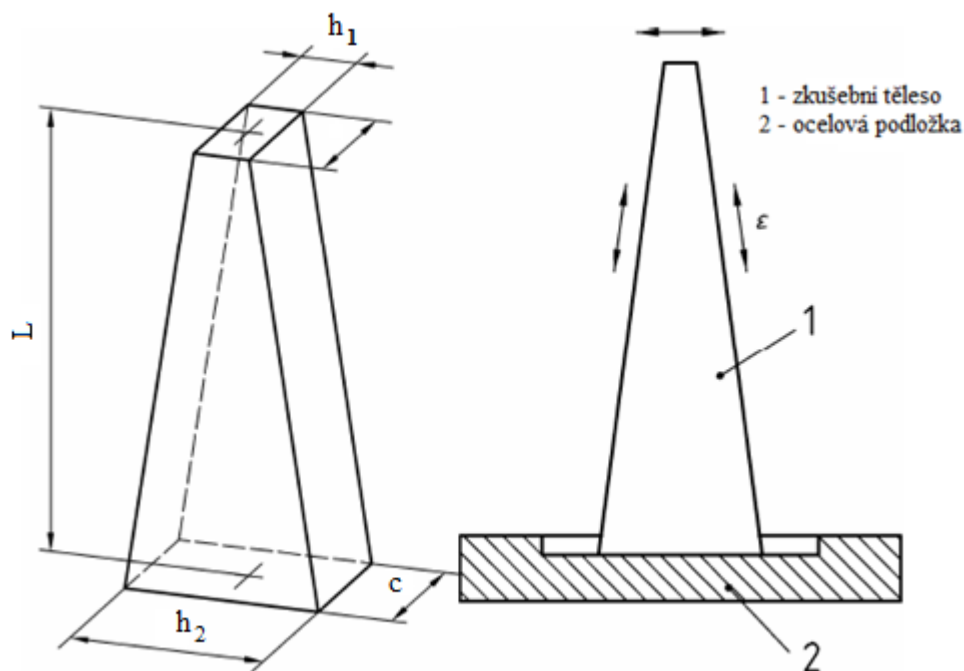


Obrázek 5-7: Schéma lamelového zhutňovače desek [8]



Obrázek 5-8: Zkušební desky před nařezáním

Takto vytvořené desky se zváží a určí se míra zhutnění. Poté se pomocí kotoučové pily s diamantovým kotoučem (viz obrázek 5-10) nařezou do požadovaných rozměrů komolých klínů – trapézoidů (viz obrázek 5-9).



Obrázek 5-9: Rozměry a schéma upevnění trapézoidů [9]

Standartní rozměry trapézoidů: $L=250$ mm
 $c=50$ mm
 $h_1=70$ mm
 $h_2=25$ mm

Rozměry nařezaných těles je nutno změřit a tělesa zvážit (viz příloha 1 – 6). Poslední fází přípravy je nalepení těles do ocelových podložek a přilepení háčků k horní podstavě trapézoidu. K lepení bylo použito dvousložkové epoxidové lepidlo složené z epoxidu, tvrdidla a vysušené vápencové moučky (plnivo). Takto nachystaná tělesa jsou připravena pro zkoušku stanovení modulu tuhosti ve 2 bodovém ohybu dle ČSN EN 12697-26.



Obrázek 5-10: Kotoučová pila pro řezání trapézoidů



Obrázek 5-11: Trapézoidy připravené pro zkoušku stanovení modulu tuhosti

5.3 Použité zkušební metody

Zkoušky asfaltového pojiva:

- Penetrace jehlou dle ČSN EN 1426
- Stanovení bodu měknutí metodou kroužek - kulička dle ČSN EN 1427
- Stanovení dynamické viskozity pomocí DSR
- Stanovení komplexního modulu tuhosti a fázového úhlu v DSR dle ČSN EN 14770

Zkoušky asfaltové směsi:

- Stanovení modulu tuhosti dle ČSN EN 12697-26

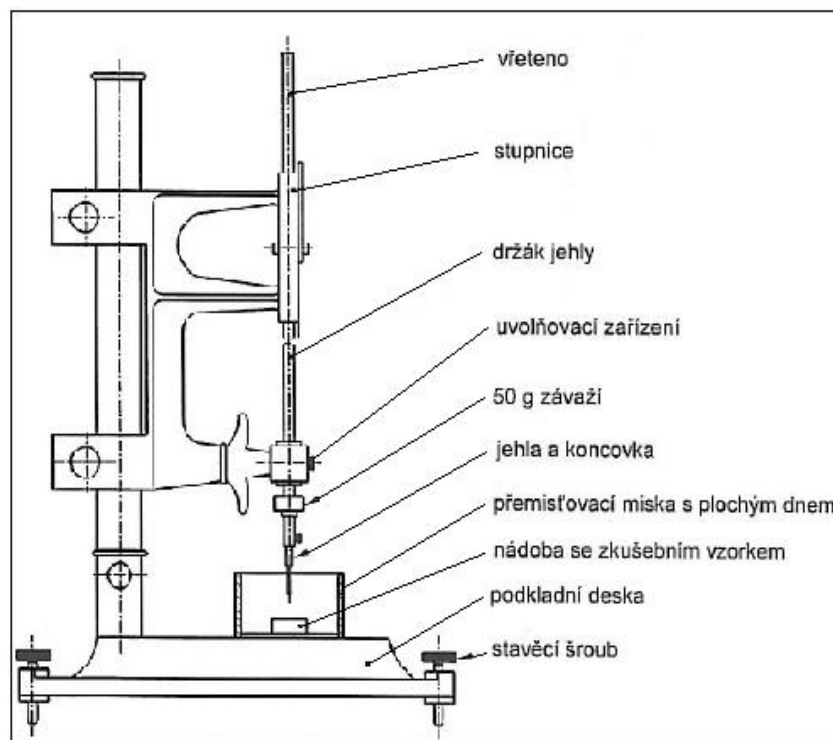
5.3.1 Stanovení penetrace jehlou

Postup zkoušení asfaltového pojiva pro zjištění penetrace stanovuje norma ČSN EN 1426. Používá se jako základní parametr hodnocení jakosti asfaltů. Lze ji použít pro pojiva o penetraci do 330 p. j.

Definice penetrace: Konzistence vzorku materiálu vyjádřená jako hloubka v desetinách milimetru, do které svisle vnikne normalizovaná jehla za stanovených podmínek teploty, zatížení a doby zatěžování. [10]

Postup zkoušky je následující. Nádoba se zkušebním vzorkem zchlazeným na laboratorní teplotu je temperována ve vodní lázni po dobu cca 2 hodin na 25°C. Vzorek musí být zcela ponořen ve vodě. Po stanovené době se těsně k povrchu hladiny zkušebního vzorku přiblíží očištěná penetrační jehla. Po uvolnění jehly, která vyvozuje na zkoušený vzorek celkové zatížení $100 \text{ g} \pm 0,10 \text{ g}$, je hrot jehly tímto zatížením zatlačován do zkušebního vzorku po dobu 5 vteřin. Poté se odečítá hodnota penetrace. Jedna penetrační jednotka je rovna desetina milimetru.

Při rádném provedení je třeba provést 3 zkoušky penetrace na jednom zkušebním vzorku. Místa penetrování musí být nejméně 10 mm od okraje nádoby se vzorkem a 10 mm od sebe navzájem. Z těchto 3 stanovení se vypočte aritmetický průměr, který je zaokrouhlen na nejbližší celou penetrační jednotku (0,1 mm). [10]



Obrázek 5-12: Schéma penetrometru [10]



Obrázek 5-13: Příklad penetrometru [11]

5.3.2 Stanovení bodu měknutí metodou kroužek – kulička

Postup zkoušení asfaltového pojiva pro zjištění teploty bodu měknutí stanovuje norma ČSN EN 1427 „Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení bodu měknutí - Metoda kroužek a kulička“. Lze ji použít pro pojiva o bodu měknutí od 28°C do 150°C. Určuje horní mez oboru plasticity.

Zkouška začíná přípravou vzorků. Do 2 nahřátých mosazných kroužků se nalije pojivo s mírným přebytkem, které po 30 minutách chladnutí seřízíme, podle kroužků. Tloušťka vzorků činí 6,4 mm. Tyto jsou osazeny do zkušební aparatury, která je umístěna ve vodní lázni. V případě zkoušení pojiva s předpokládaným bodem měknutí nad 80°C je zkouška prováděna v glycerinu. Na každý z vzorků je položena kovová kulička. Poté následuje temperování na 5°C. Po naterování začíná zahřívání kádinky s lázní, za stálého míchání rychlostí 5°C/min. Sleduje se teplota v okamžiku, kdy asfalt obklopující kuličku dosáhne 25 mm propadu. Tato teplota se měří s přesností na 0,2 °C. [11]

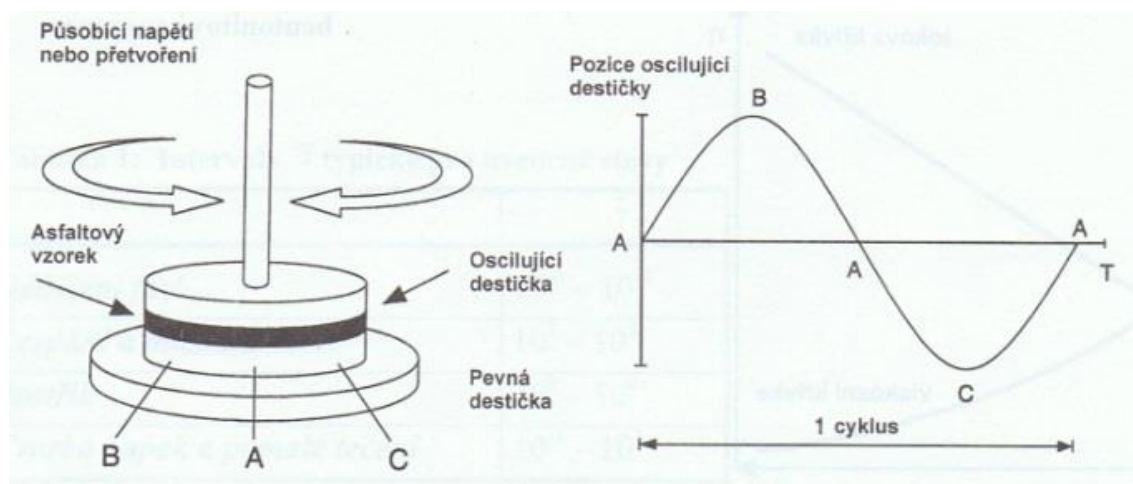


Obrázek 5-14: Zkouška stanovení bodu měknutí kroužkem a kuličkou [13]

5.3.3 Stanovení komplexního smykového modulu a fázového úhlu v DSR

Zkoušení komplexního smykového modulu a fázového úhlu u asfaltových pojiv je nejčastěji prováděno pomocí dynamického smykového reometru. Jedná se o funkční zkoušku, která je definována v normě ČSN EN 14770. Zkouška slouží k určení přetvárných a únavových vlastností asfaltového pojiva.

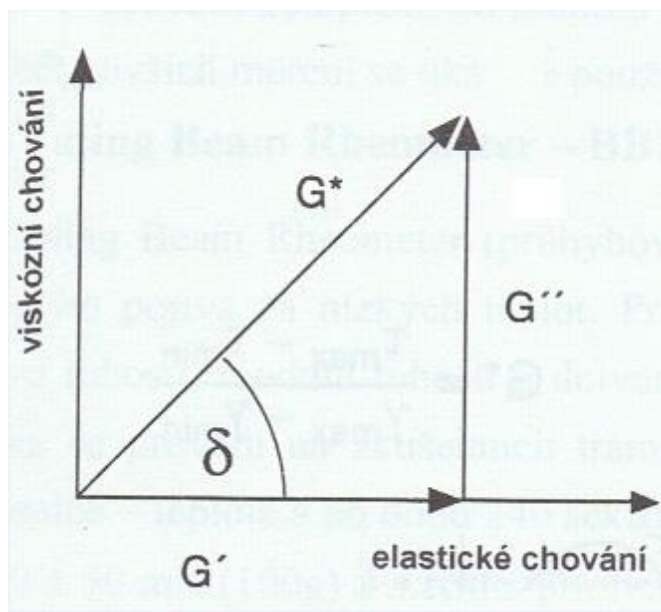
Vzorek asfaltového pojiva je umístěn mezi 2 destičky. Pevnou a oscilující. Působením točivého momentu je vzorek namáhán sinusovým zatížením, oscilací, jež odpovídá zatěžování vozovky. Je měřen odpor proti tomuto pohybu a přetvoření vzorku (viz obrázek 5-15). [6]



Obrázek 5-15: Princip DSR [6]

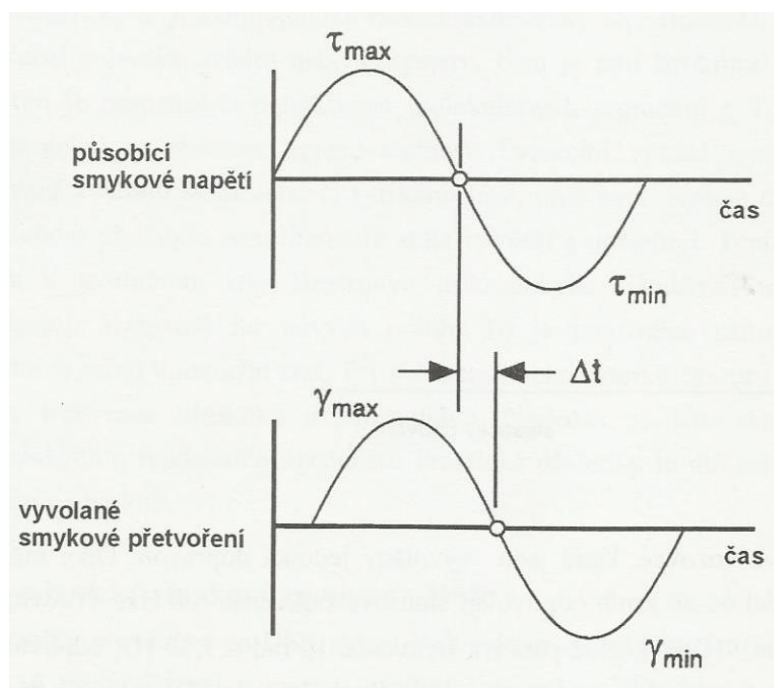
Asfaltové pojivo bývá označováno pojmem viskoelastický materiál. Jeho chování je velmi závislé na teplotě a frekvenci zatěžování. Za teplot nízkých se chová jako pevná, pružná látka a za teplot vysokých získává vlastnosti kapalin. Mezi těmito extrémy má obojaké vlastnosti. Zejména při malé rychlosti zatěžování a vysoké teplotě dochází k nevratným deformacím materiálu. [19]

Komplexním smykovým modulem (G^*) je vyjádřena míra celkové odolnosti proti přetvoření, v případě zatěžování opakujícím se zatížením. Skládá se ze dvou složek, a to z reálné a imaginární. Reálná složka komplexního modulu (G'), určuje míru elastického (pružného) chování, zatímco imaginární část (G'') vystihuje viskózní chování asfaltu. Viskózní složka se někdy označuje pojmem „ztrátový modul.“ Jejich vzájemný poměr určuje fázový úhel δ (viz obrázek 5-16). Za vysokých teplot a nízkých frekvencí zatížení je G^* nejmenší a δ se blíží 90° . Se snižující se teplotou či rostoucí frekvencí zatížení je G^* největší a δ se blíží 0° . Mezi těmito extrémy se fázový úhel nachází v rozmezí $0^\circ < \delta < 90^\circ$. [6]



Obrázek 5-16: Složky komplexního smykového modulu [6]

S fázovým úhlem souvisí časové zpoždění mezi vneseným napětím a odezvou na zatížení (viz obrázek 5-17).



$$G^* = \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{\gamma_{\max} - \gamma_{\min}}$$

$\Delta t =$ časové zpoždění

$\Delta t \longrightarrow \delta$

Obrázek 5-17: Průběh smykového napětí a vyvolaného smykového přetvoření [6]

Samotné měření bylo prováděno v dynamickém smykovém reometru Kinexus od britského výrobce Malvern (viz obrázek 5-18). Byla použita geometrie destička - destička, přičemž z důvodu co nejlepšího vystihnutí vlastností v celém měřeném rozsahu teplot, bylo nutné použít 2 různé geometrie a tím pádem zkoušku rozdělit na 2 části.



Obrázek 5-18: DSR Kinexus

Parametry geometrie a teploty pro měření při nižších teplotách (10°C – 40 °C):

Průměr destičky: 8 mm

Velikost mezery: 2 mm

Měření při teplotách: 10°C, 15°C, 20°C, 25°C, 30°C, 35°C, 40°C

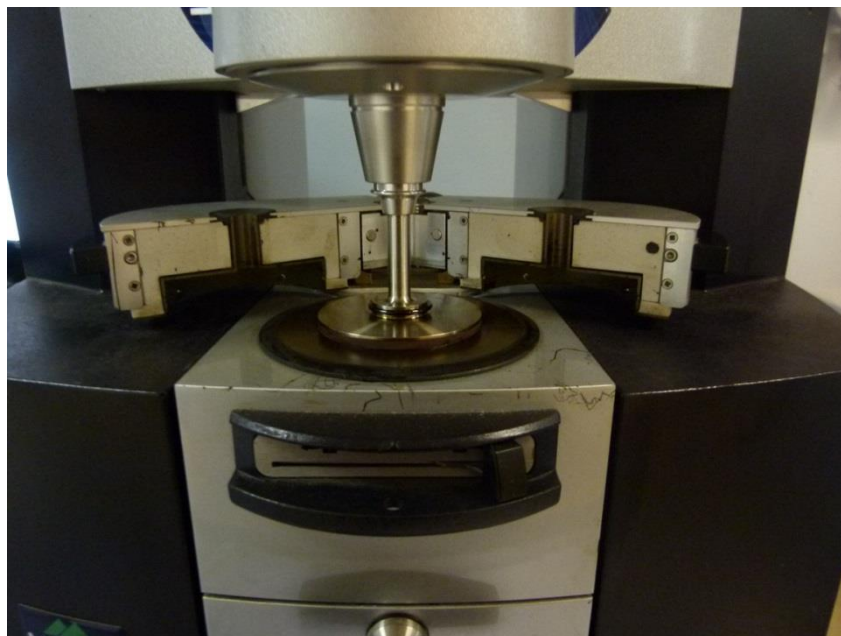
Parametry geometrie a teploty pro měření při vyšších teplotách (40°C – 70°C):

Průměr destičky: 25 mm

Velikost mezery: 1 mm

Měření při teplotách: 40°C, 45°C, 50°C, 55°C, 60°C, 65°C, 70°C

Před vložením vzorků do reometru bylo nutno geometrii reometru natemperovat na teplotu cca o 5°C vyšší (z důvodu částečného zchladnutí geometrie během umístění vzorku), než byla počáteční zkušební teplota (70°C).



Obrázek 5-19: Umístění vzorku mezi destičkami reometru před měřením

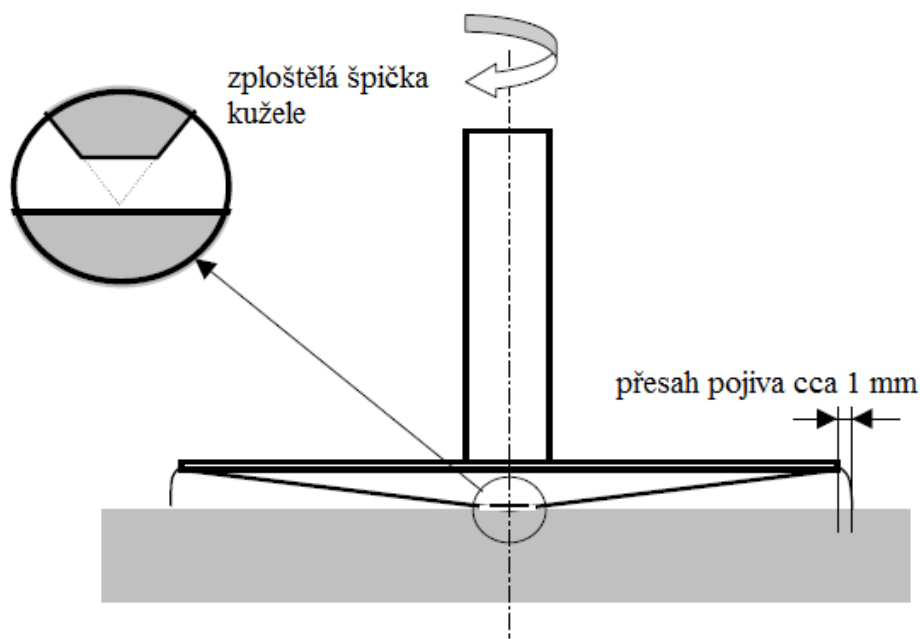
Po natemperování geometrie bylo možné umístit vzorek mezi destičky reometru (viz obrázek 5-19). Po ustálení zkušební teploty se spustilo měření při frekvencích od 10 Hz do 0,1 Hz sestupně. Poté následovala změna teploty vždy o 5°C, přičemž doba temperování byly alespoň 10 minut, a opětovné měření při snižujících se frekvencích. Tento postup byl zachováván až do konce zkoušky. Zkouška s užitím druhé geometrie (průměr destičky 8 mm, mezera 2 mm) probíhala analogicky.

Tato zkouška byla provedena se vzorky všech pojiv a to jak nativních, tak extrahovaných nezestárých i zestárých metodou BSA.

5.3.4 Stanovení dynamické viskozity pomocí DSR

Dynamická viskozita asfaltu je většinou určována vřetenovými viskozimetry s geometrií válec – válec, například pomocí Brookfieldova viskozimetru, z důvodu lepší finanční dostupnosti tohoto přístroje. V tomto případě však byl k tomuto účelu opět použit dynamický smykový reometr Kinexus s použitím geometrie kužel - destička (viz

obrázek 5-20). Výhodou použití DSR je potřeba podstatně menšího množství pojiva. Výhodou této geometrie je nezávislost smykového přetvoření i smykového napětí na pozici mezi kuželem a deskou. Použitý vzorek pojiva byl totožný se vzorkem použitým pro zkoušku v oscilaci s geometrií destička – destička ϕ 25 mm.



Obrázek 5-20: Umístění vzorku mezi kuželem a destičkou v reometru [21]

Parametry geometrie a teploty pro měření dynamické viskozity

Průměr destičky:	40 mm
Průměr podstavy kužele:	40 mm
Úhel stoupání kužele:	4°
Měření při teplotách:	75°C, 90°C, 105°C, 120°C, 135°C, 150°C, 165°C
Smyková rychlost:	1 s ⁻¹ až 100 s ⁻¹

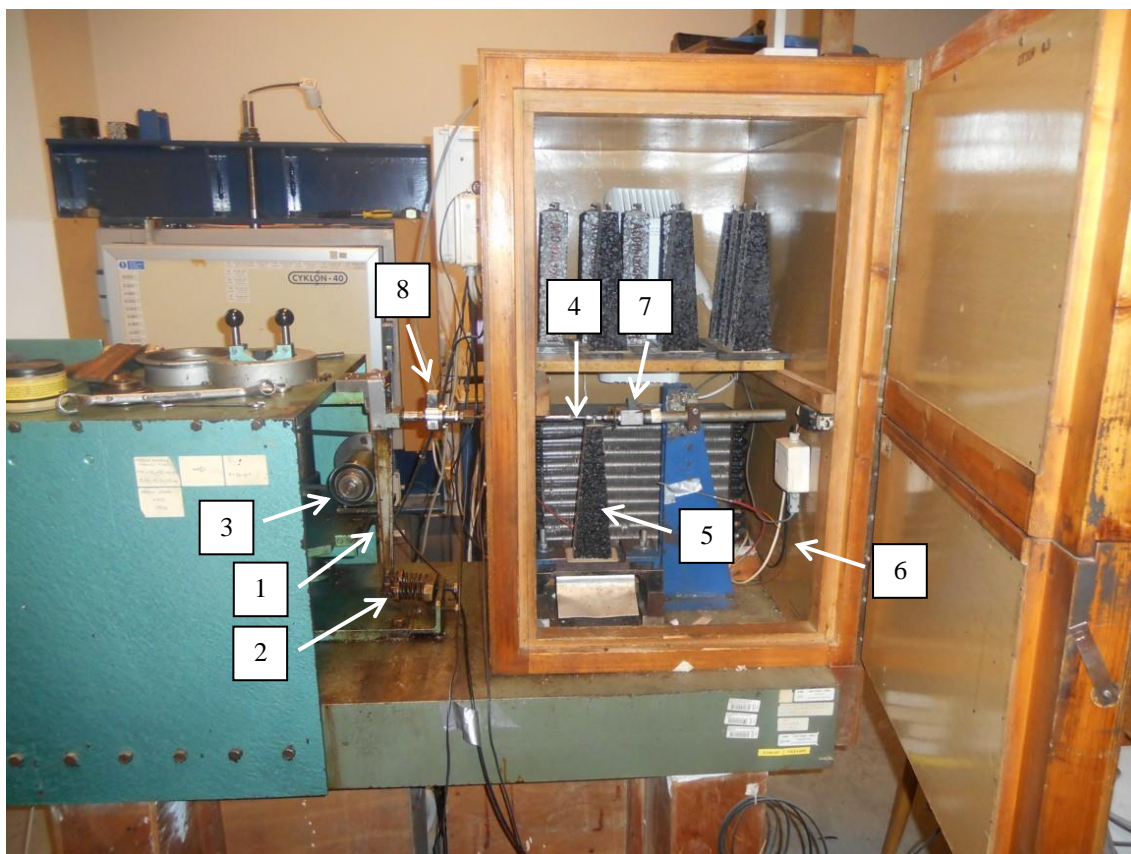
Postup zkoušky je velmi podobný zkoušce komplexního modulu tuhosti a fázového úhlu popsané v předchozí kapitole. Po natepování geometrie na teplotu o cca 5°C vyšší, než je počáteční teplota měření (75°C), byl mezi kužel a desku vložen vzorek asfaltového pojiva. Po natepování vzorku na zkušební teplotu mohlo začít měření. Při měření se kužel otáčí a měří se odpor proti pohybu. Během měření smyková rychlost postupně narůstá.

V průběhu měření byla sledována hodnota dynamické viskozity. Při vyšších teplotách je dynamická viskozita nezávislá na smykové rychlosti. Avšak při měření viskozity za nižších teplot (75°C, 90°C, ...) došlo několikrát k výraznému poklesu hodnoty viskozity (cca 20%), což naznačuje na porušování vzorku smykem. V takovémto případě bylo měření přerušeno a pokračovalo při další teplotě.

Tímto způsobem byla ozkoušena všechna pojiva, a to jak nativní, tak extrahovaná nezestárlá i zestárlá metodou BSA.

5.3.5 Stanovení modulu tuhosti na asfaltových směsích

Určování modulu tuhosti na zhutněných asfaltových směsích bylo provedeno v souladu s ČSN EN 12697-26.



Obrázek 5-21: Pohled na zkušební zařízení pro měření modulu tuhosti na směsích

Samotné zkušební zařízení využitě pro účely této práce bylo vyrobeno v Silničním vývoji Brno (viz obrázek 5-21). Zkoušeným vzorkem bylo těleso ve formě

komolého klínu (trapézoidu). Zkušební zařízení pohání elektrický motor. Otáčející se excentricky tvarovaná vačka (3) vychyluje páku (1) přitlačovanou pružinami (2). Výchylka páky je přenášena táhlem (4) jako horní posuv měřeného vzorku tvaru trapézoidu (5) umístěném v temperované komoře (6). Posuv táhla a silová reakce se měří snímačem deformace (7) a snímačem síly (8). Výsledky měření jsou automaticky ukládány do paměti počítače.

Zkouška probíhala za konstantní teploty 15°C. Byly zaznamenávány hodnoty komplexního modulu tuhosti a fázového úhlu. Měřeno bylo při frekvencích 5, 10, 15, 20 a 25 Hz. Ozkoušeno bylo celkem 30 těles (od každého druhu asfaltové směsi 5 vzorků).

5.4 Vyhodnocení dat

Pro potřeby vyhodnocení výsledků platí následující označování

Pojiva:

- „ref“ —> pojivo původní, nativní, nezestárlé
- „-“ —> pojivo extrahované ze směsi, bez umělého zestárnutí
- „BSA“ —> pojivo extrahované ze směsi, uměle zestárlé metodou BSA

Směsi:

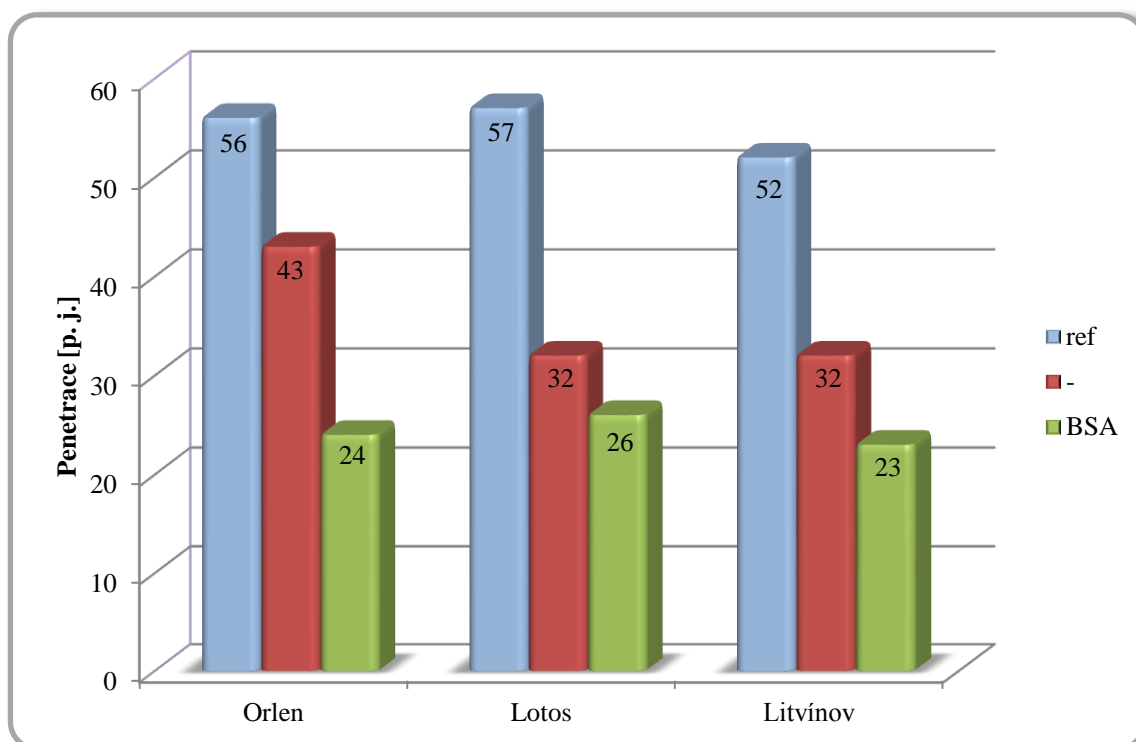
- „-“ —> asfaltová směs bez umělého stárnutí
- „BSA“ —> asfaltová směs po umělém stárnutí metodou BSA

5.4.1 Stanovení penetrace jehlou

Referenční (ref) tj. nativní pojiva jsou všechna gradace 50/70. Při srovnání výsledků zkoušky penetrace jehlou je patrný výrazný pokles hodnoty penetrace, u pojiv zestárlých metodou BSA. Všechna pojiva po BSA lze zařadit do gradace 20/30. To odpovídá snížení hodnoty penetrace až o 2 gradace. Poměrně značný vliv na hodnotu penetrace má také výroba směsi a následná extrakce pojiva.

Tabulka 5-6: Hodnoty penetrace [p. j.]

	Orlen	Lotos	Litvínov
ref	56	57	52
-	43	32	32
BSA	24	26	23

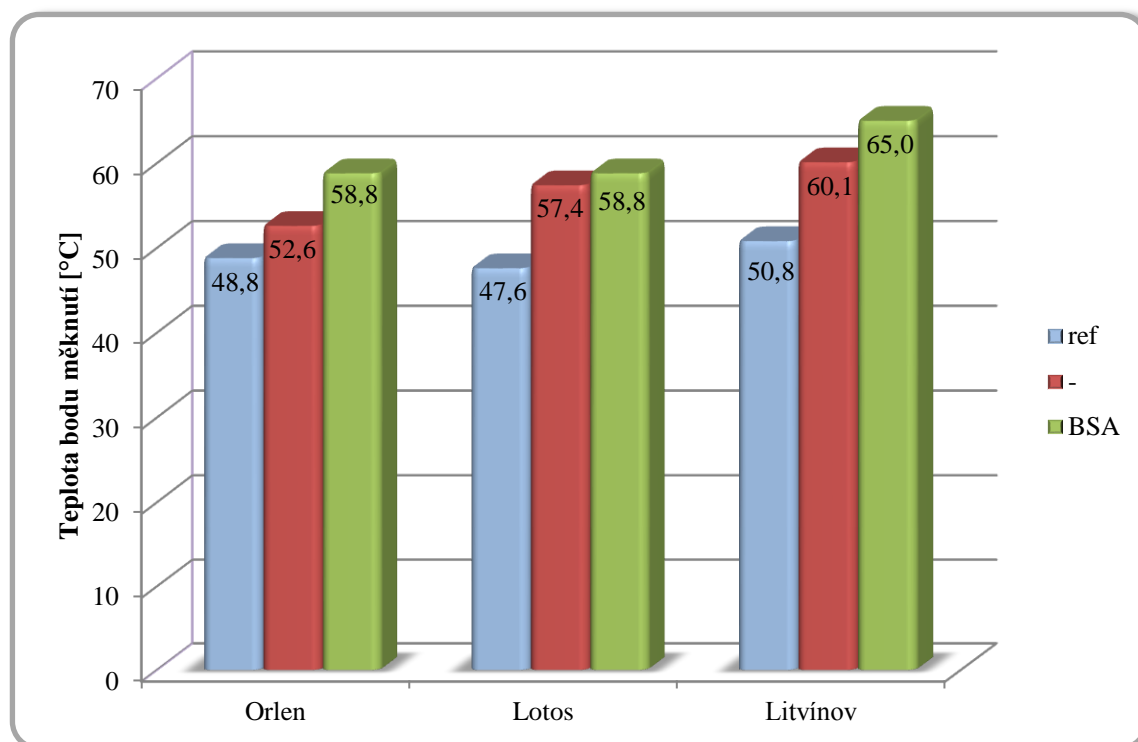
Graf 5-4: Vyjádření výsledků zkoušky penetrace

5.4.2 Stanovení bodu měknutí metodou kroužek – kulička

Působením teploty a oxidačními procesy dochází ke zvýšení teploty bodu měknutí a asfalty se stávají tvrdšími. Teplota bodu měknutí se u měřených pojiv zvýšila o 10 – 14%. Největší nárůst bodu měknutí byl zaznamenán u pojiva „Litvínov.“ Výsledky jsou shrnuty níže.

Tabulka 5-7: Hodnoty teplot bodu měknutí [°C]

	Orlen	Lotos	Litvínov
referenční	48,8	47,6	50,8
-	52,6	57,4	60,1
BSA	58,8	58,8	65,0

Graf 5-5: Vyjádření výsledků zkoušky penetrace

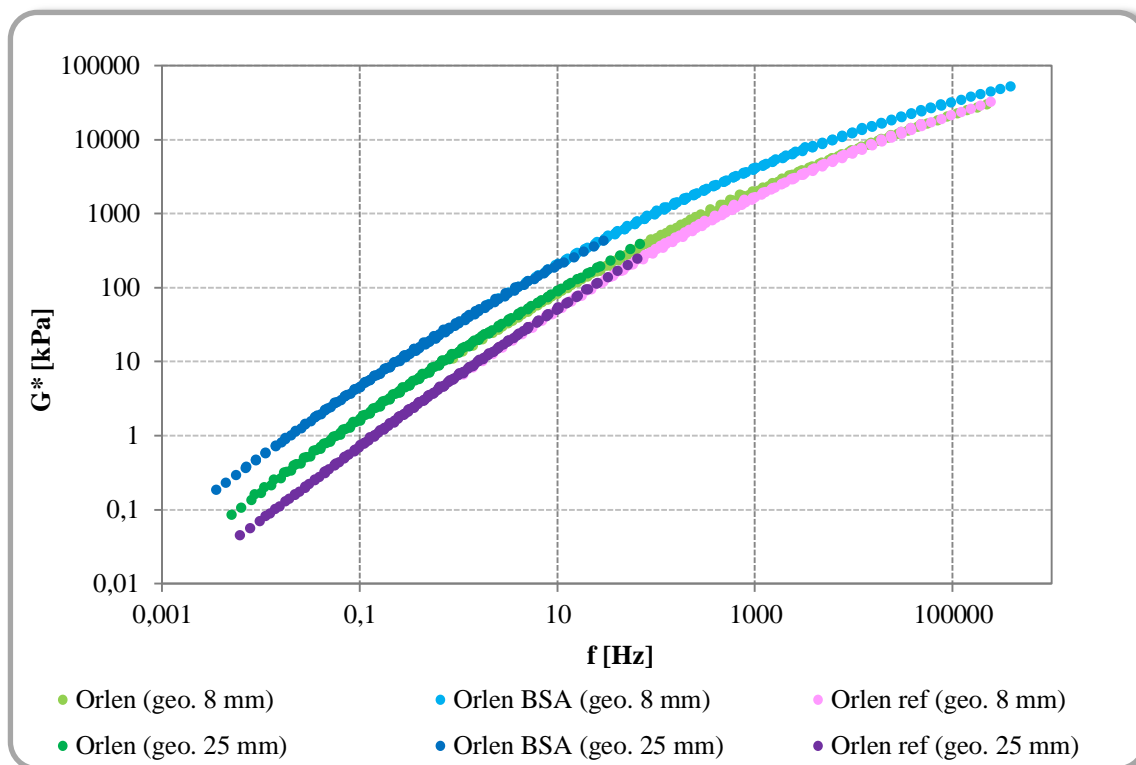
5.4.3 Komplexní smykový modul a fázový úhel

Pojiva byla podrobena reologickým měřením v oscilaci s řízeným smykovým přetvořením. Byl zjišťován dynamický smykový modul G^* a fázový úhel δ v teplotních mezích (10 – 70°C).

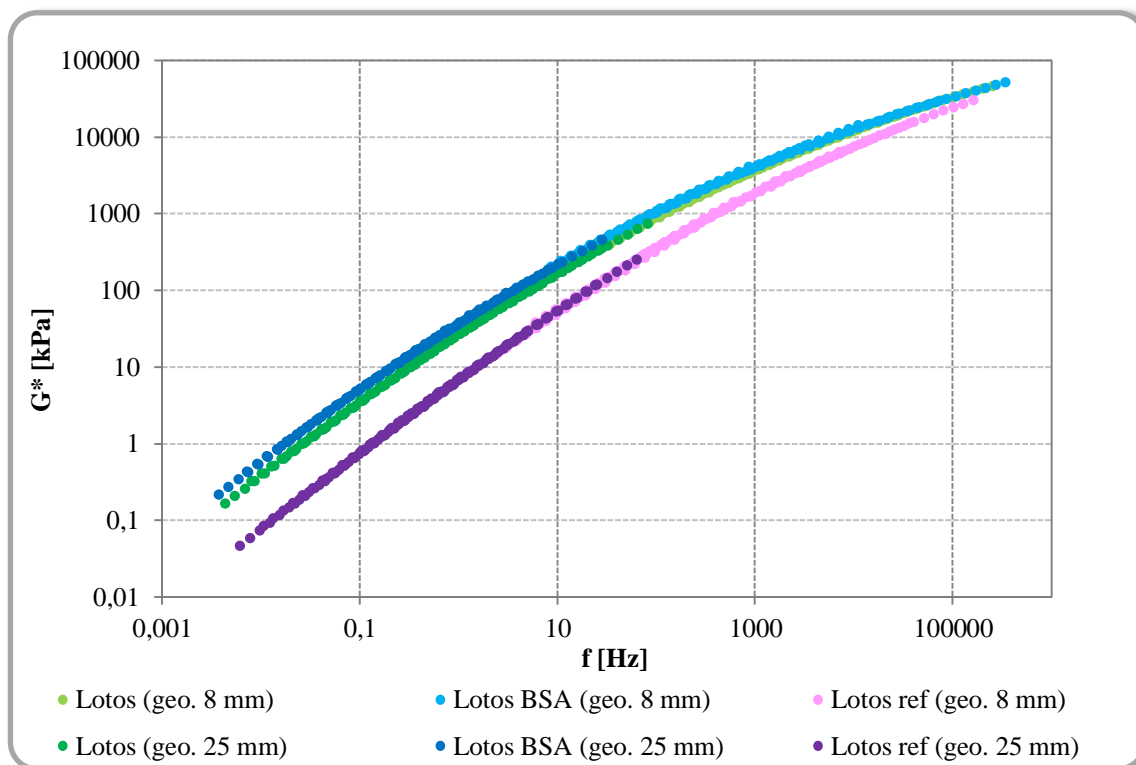
Komplexní smykový modul lze graficky vyjádřit pomocí tzv. hlavních křivek (master curves), které jsou díky principu superpozice teploty a času zatížení, schopny zajistit zobrazení hodnot komplexního smykového modulu v širokém frekvenčním rozsahu. Pro všechna pojiva jsou tyto křivky vykresleny v grafech „5-6“ – „5-8“. Jako referenční (řídící) byla zvolena teplota 50°C.

Analogicky k hlavním křivkám komplexního smykového modulu G^* , lze sestavit hlavní křivky fázového úhlu δ . Grafy „5-9“ – „5-11“ představují hlavní křivky fázového úhlu. Pro všechna srovnávaná pojiva platí, že pojiva zestárlá vykazují vyšší hodnoty G^* a nižší hodnoty δ než pojiva nativní. Z toho vyplývá, že stárnutím pojivo tuhne a stává se tužším, avšak snižuje se možnost plastického přetváření.

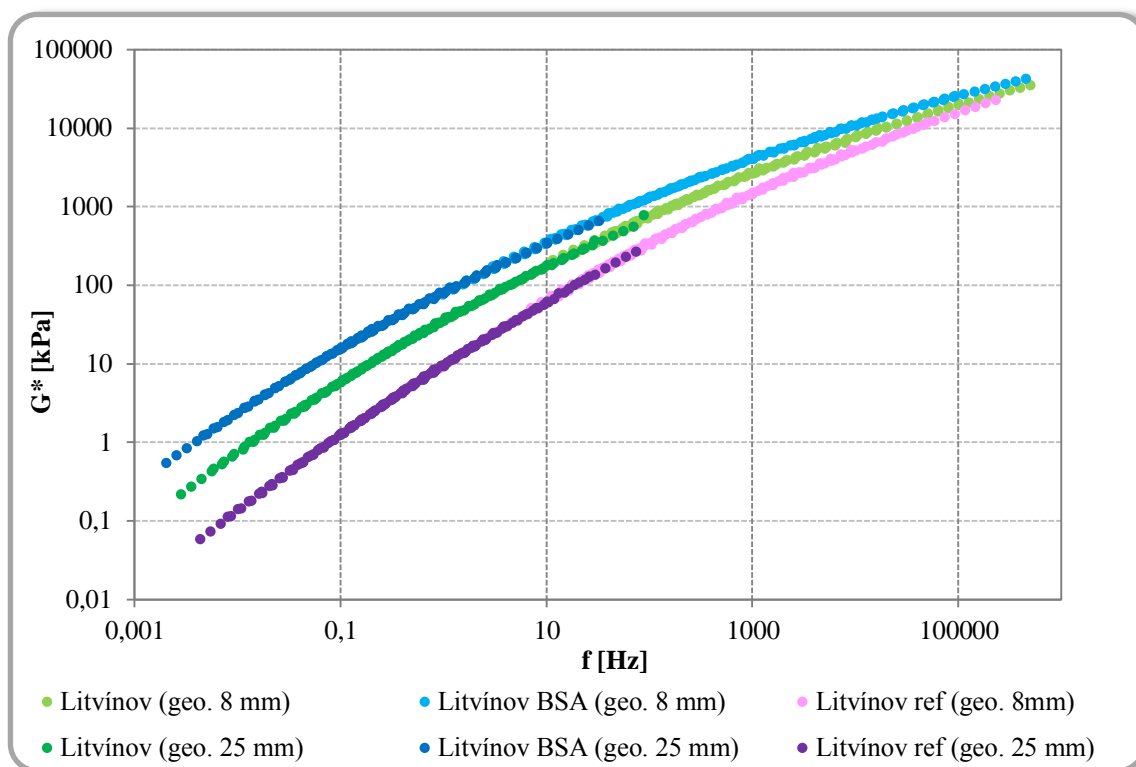
Graf 5-6: Hlavní křivky komplexního modulu G^* – Orlen



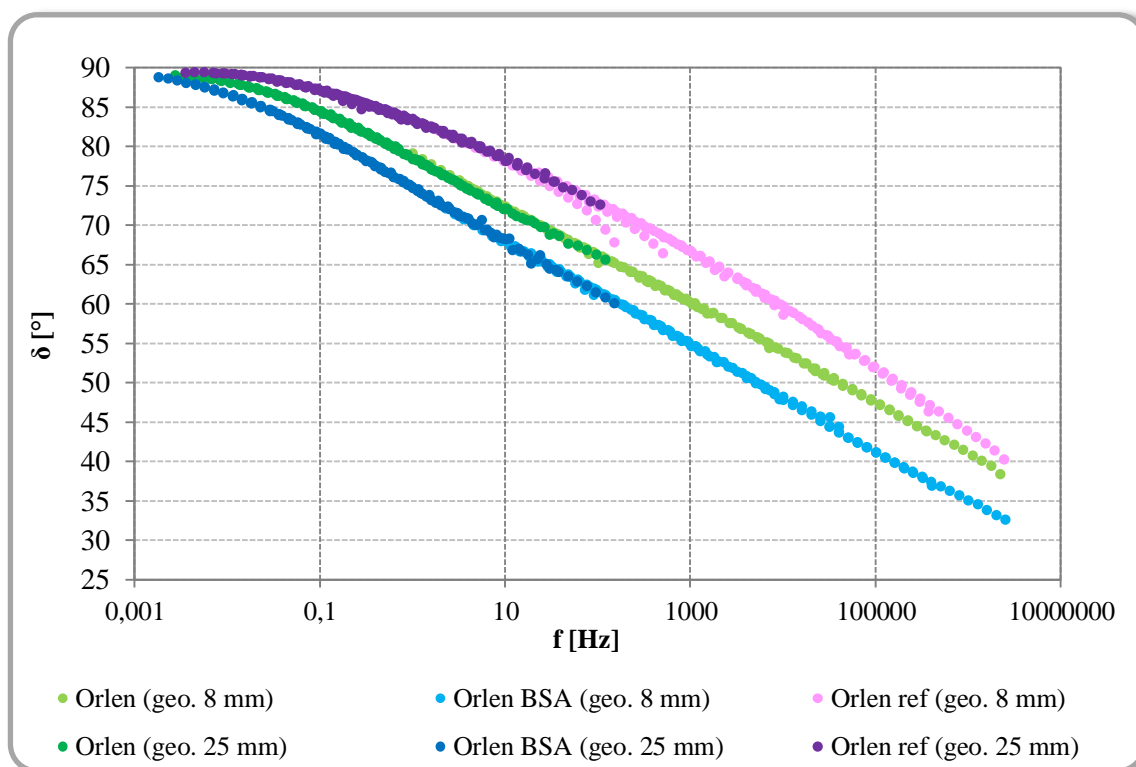
Graf 5-7: Hlavní křivky komplexního modulu G^* – Lotos



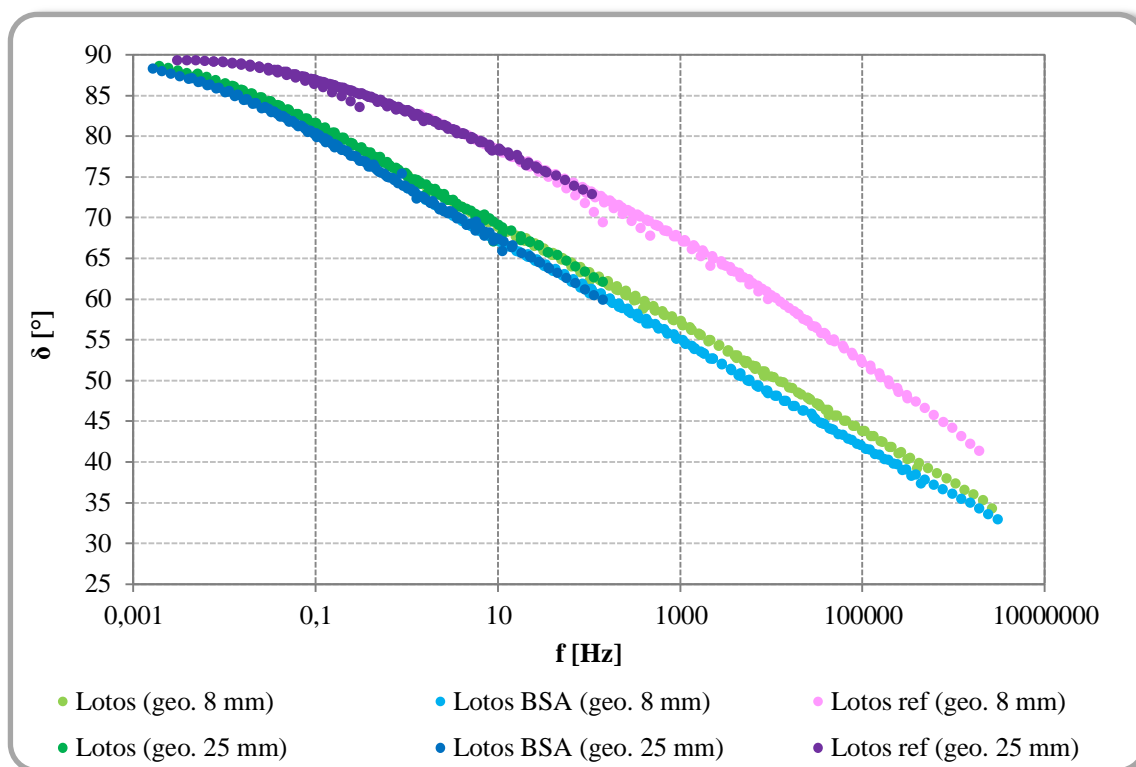
Graf 5-8: Hlavní křivky komplexního modulu G^* – Litvínov



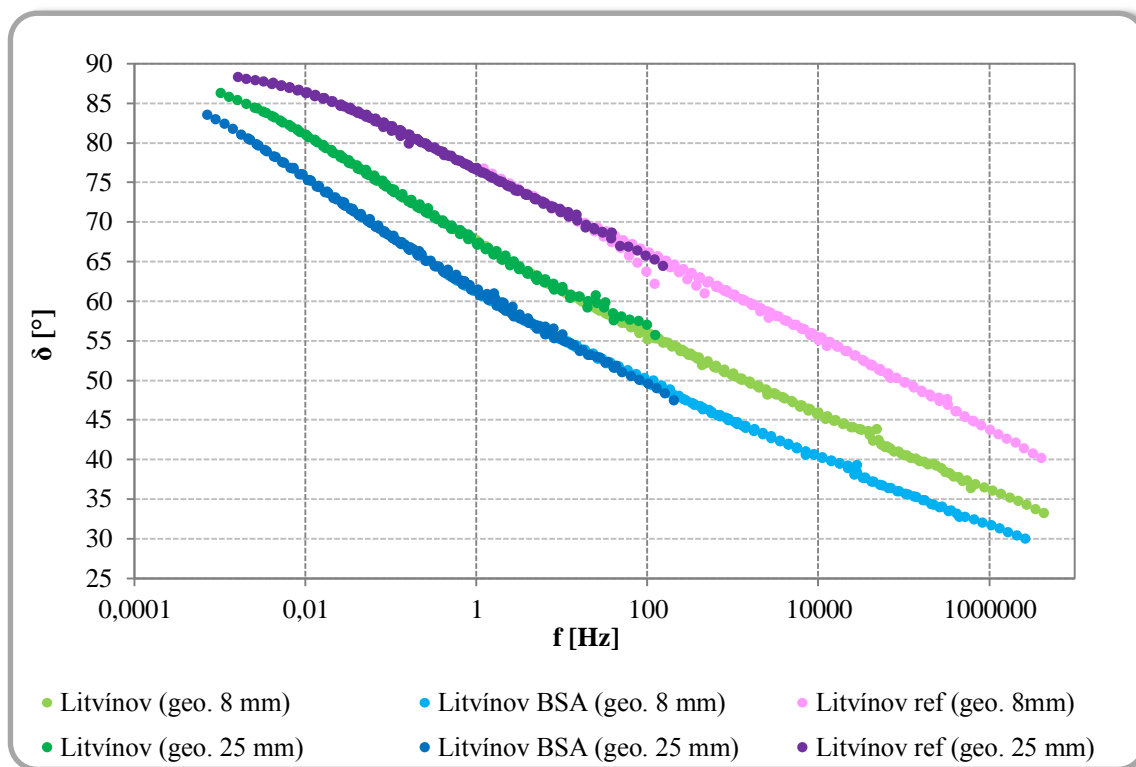
Graf 5-9: Hlavní křivky fázového úhlu δ – Orlen



Graf 5-10: Hlavní křivky fázového úhlu δ – Orlen



Graf 5-11: Hlavní křivky fázového úhlu δ – Litvínov

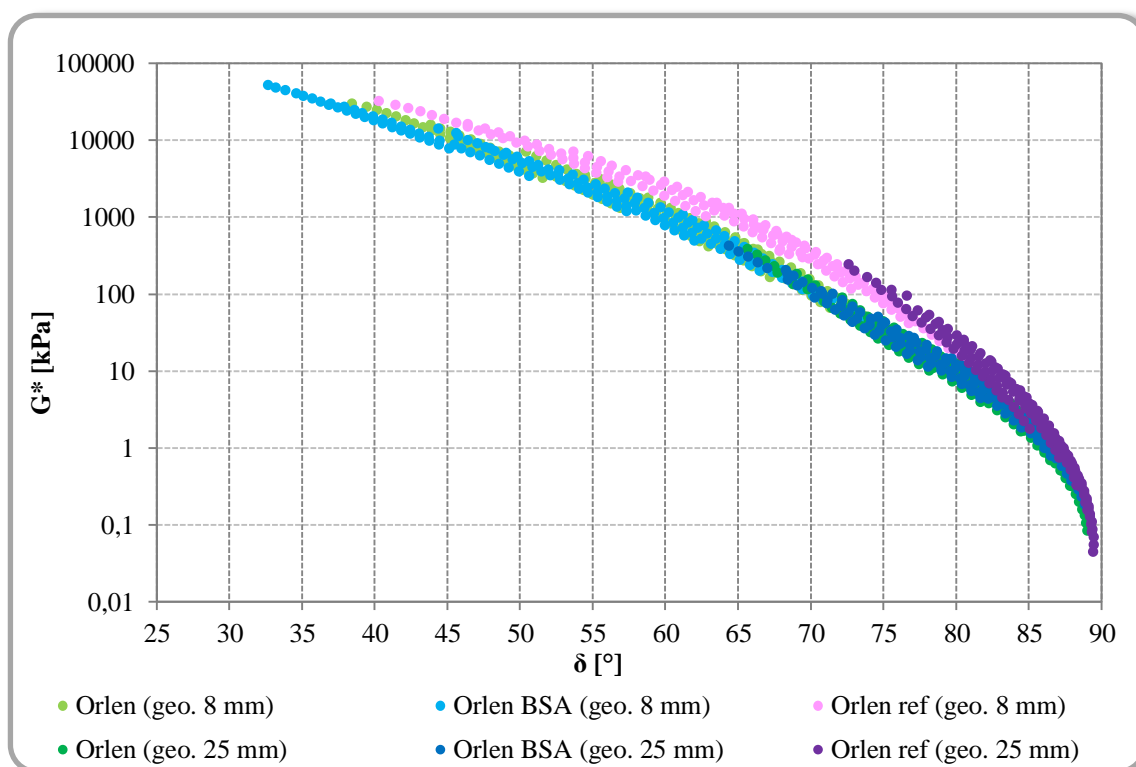


Z hlavních křivek komplexního smykového modulu pojiva Lotos (graf 5-7) je zřejmé, že stárnutí metodou BSA nemělo na toto pojivo příliš velký vliv (křivky nezestárlého a zestárlého pojiva metodou BSA jsou si velmi podobné). Můžeme si to vysvětlit například tím, že pojivo výrazně zestárlo už při výrobě asfaltové směsi. Tato skutečnost je v korelaci i s ostatními provedenými zkouškami.

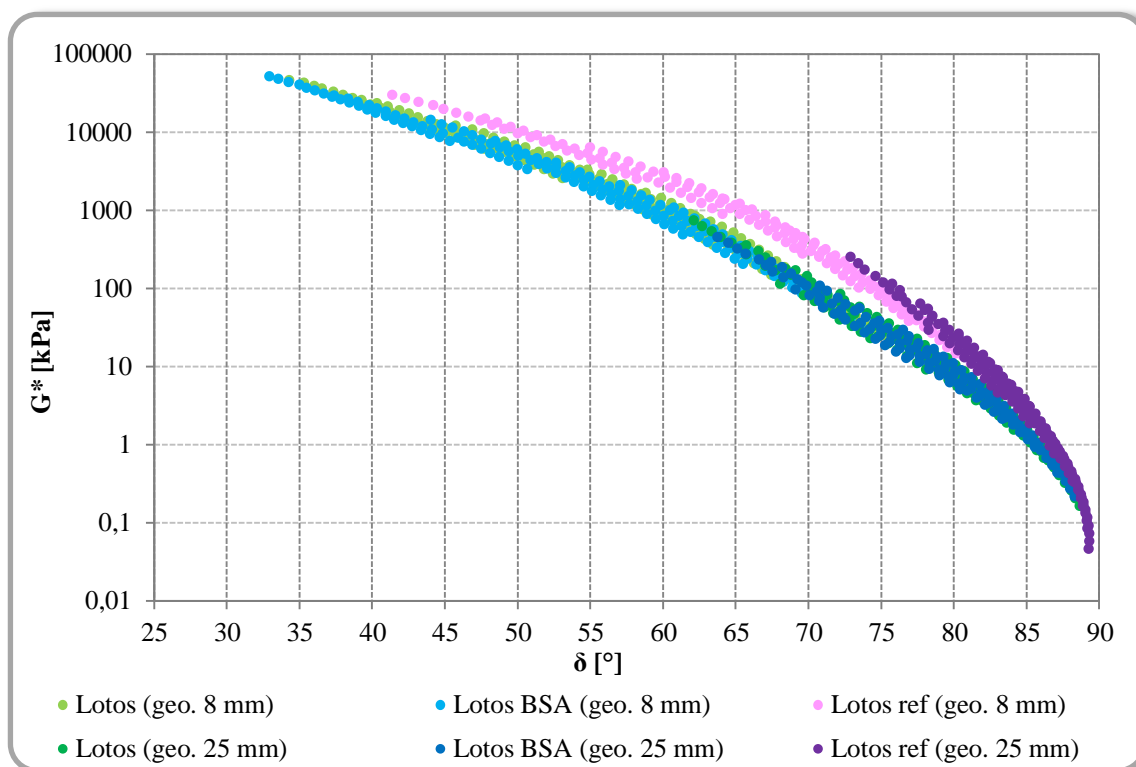
Na grafech „5-12“ – „5-14“ jsou tzv. Blackovy diagramy. Jedná se o zobrazení závislosti mezi komplexním smykovým modulem a fázovým úhlem. Opět lze pozorovat nižší hodnoty fázového úhlu δ a vyšší hodnoty komplexního smykového modulu G^* u zestárlých pojiv, což naznačuje na vyšší elasticitu a odolnost proti deformaci. Nejvyšší fázový úhel δ a nejnižší hodnoty G^* naopak vykazují referenční (nativní) pojiva. U nich je více zastoupena viskózní složka komplexního smykového modulu.

Grafy „5-15“ – „5-17“ zobrazují tzv. izochrony tj. křivky stejné frekvence. Jde o vyjádření závislosti komplexního smykového modulu a fázového úhlu na teplotě, při referenční frekvenci 1 Hz.

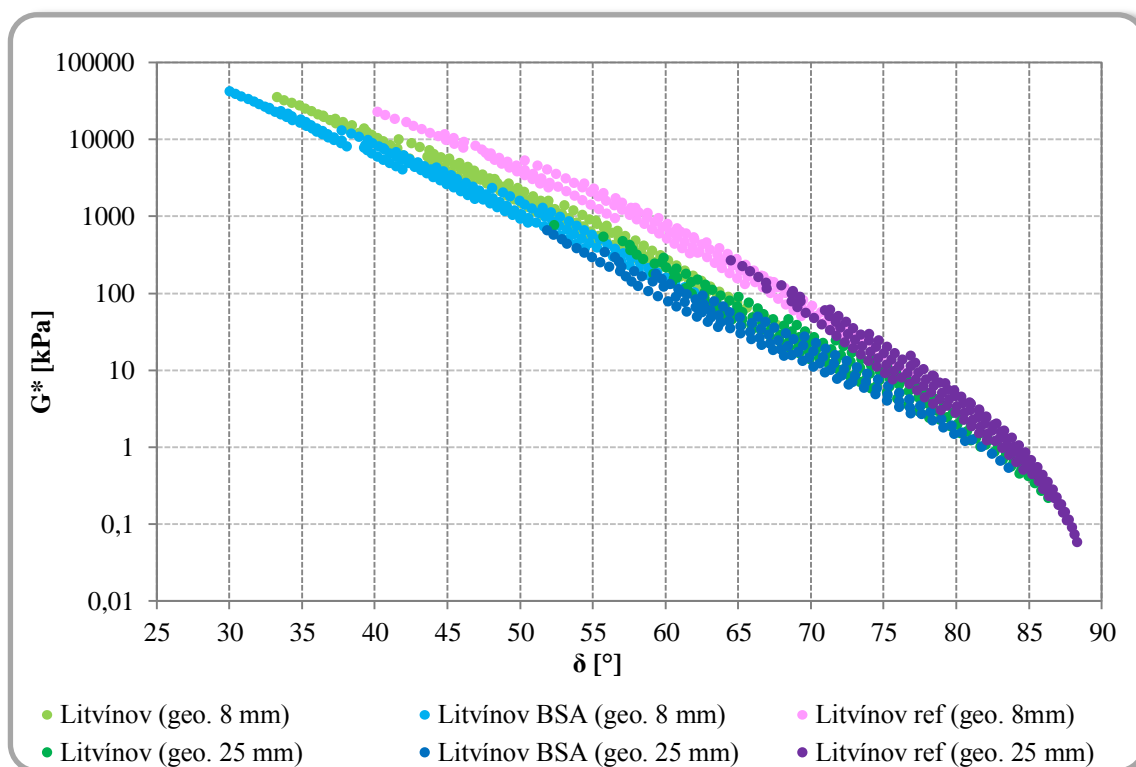
Graf 5-12: Blackův diagram – Orlen



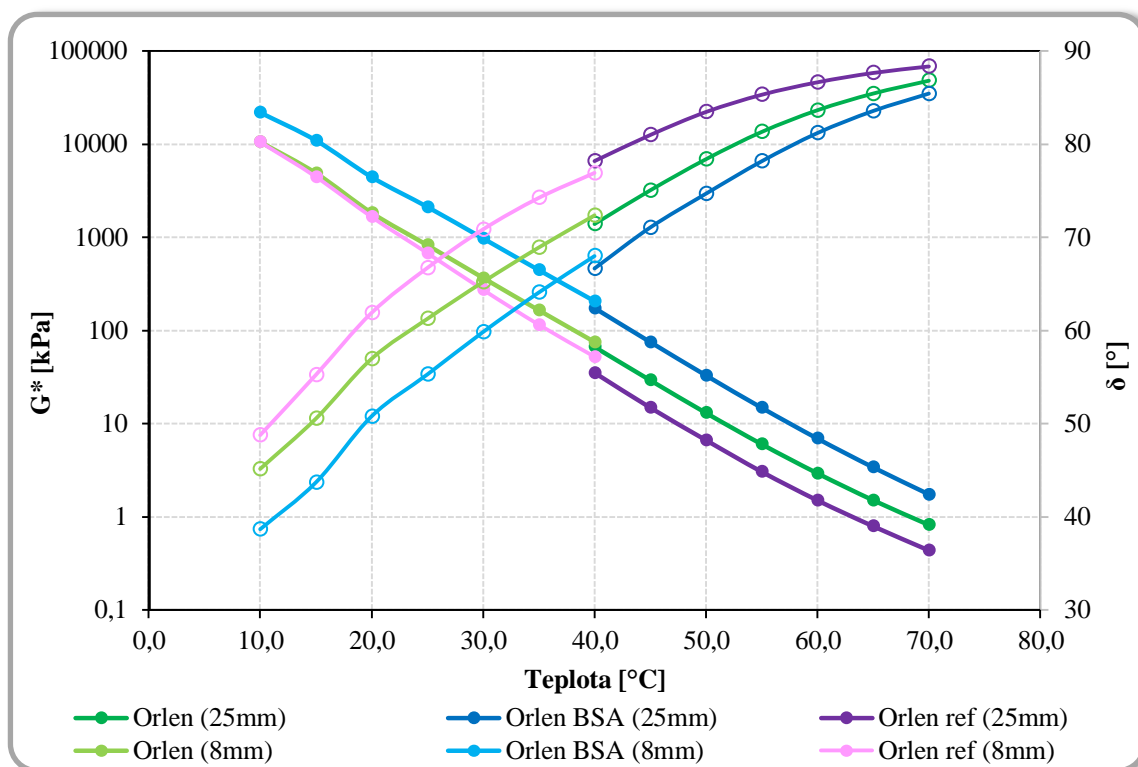
Graf 5-13: Blackův diagram – Lotos



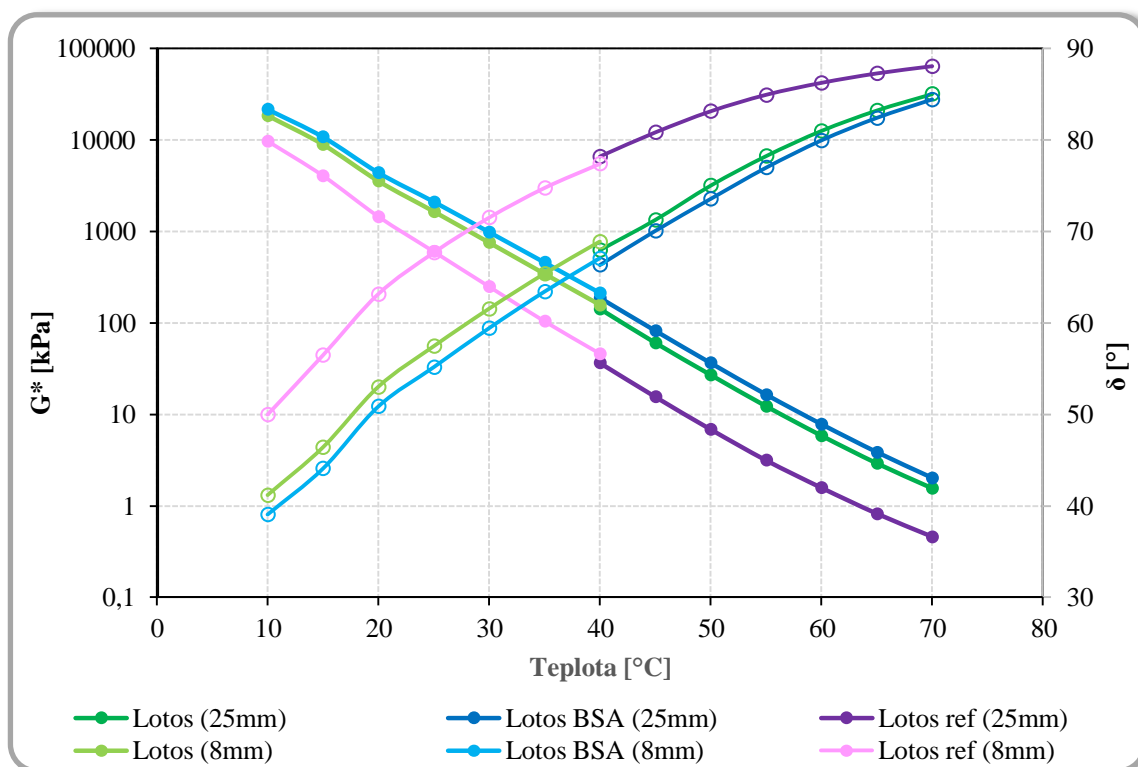
Graf 5-14: Blackův diagram – Litvínov

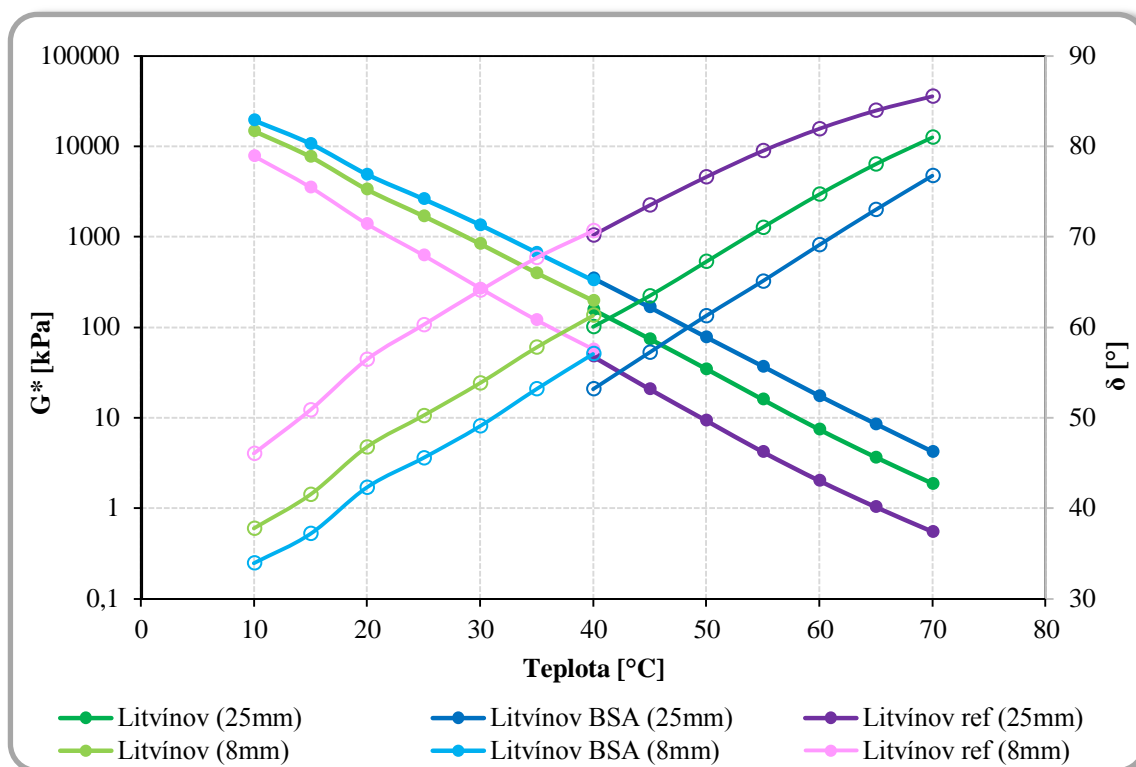


Graf 5-15: Izochrony komplexního modulu a fázového úhlu – Orlen ($f=1$ Hz)



Graf 5-16: Izochrony komplexního modulu a fázového úhlu – Lotos ($f=1$ Hz)



Graf 5-17: Izochrony komplexního modulu a fázového úhlu – Litvínov ($f=1$ Hz)


5.4.4 Dynamická viskozita

Dynamická viskozita byla měřena pomocí DSR s geometrií kužel – destička. Výsledky jsou vyjádřeny níže v tabulkách a grafech.

Tabulka 5-8: Dynamická viskozita [mPa.s] – Orlen ($\dot{\gamma}=1$ s⁻¹)

Teplota [°C]	ref	-	BSA
75	35471	69098	146706
90	8133	14055	25478
105	2501	3991	6415
120	954	1411	2063
135	420	613	817
150	212	293	378
165	119	163	194

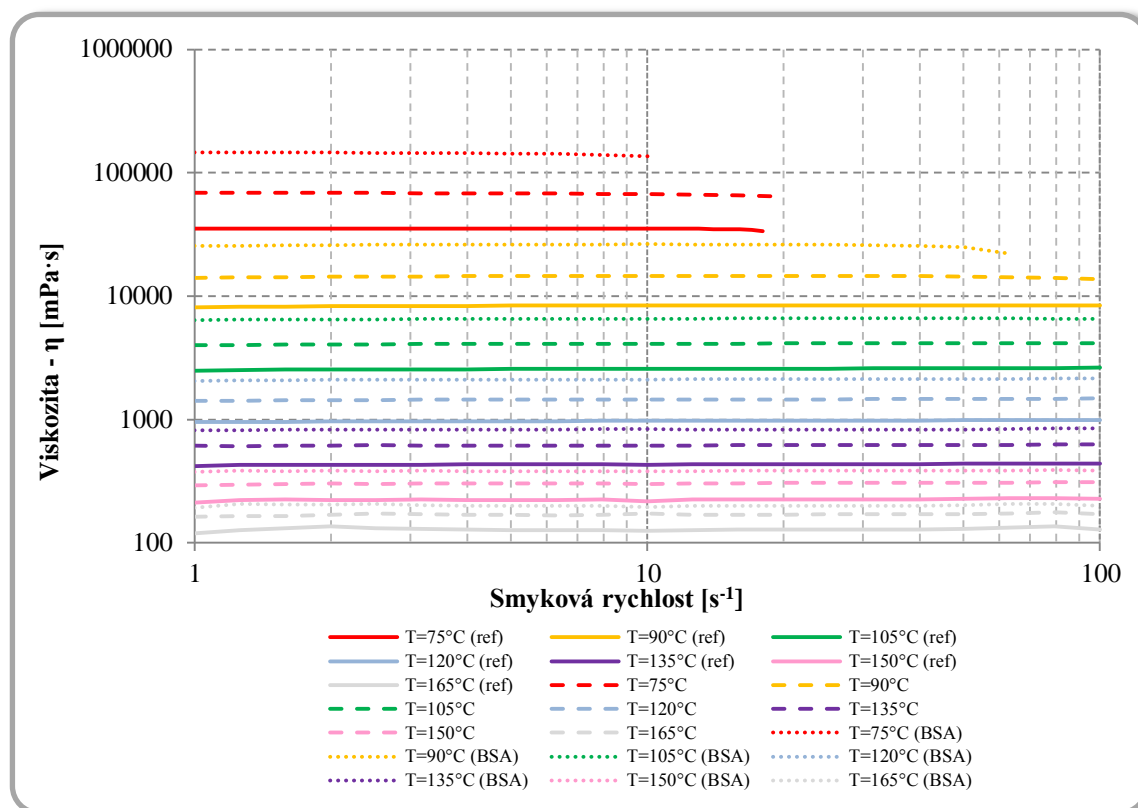
Tabulka 5-9: Dynamická viskozita [mPa.s] – Lotos ($\dot{\gamma} = 1 \text{ s}^{-1}$)

Teplota [°C]	ref	-	BSA
75	40440	131256	158968
90	9225	23878	27945
105	2792	8118	7145
120	1042	2057	2300
135	459	828	906
150	236	399	427
165	132	208	219

Tabulka 5-10: Dynamická viskozita [mPa.s] – Litvínov ($\dot{\gamma} = 1 \text{ s}^{-1}$)

Teplota [°C]	ref	-	BSA
75	38545	158314	378665
90	7970	25214	50694
105	2308	5919	10296
120	835	1826	2828
135	371	698	996
150	175	315	434
165	97	172	208

Z grafu závislosti dynamické viskozity na smykové rychlosti (graf 5-18) je zřejmé, že za vyšších teplot není hodnota dynamické viskozity na smykové rychlosti závislá. Při nižších teplotách (75°C, 90°C, ...) však začala viskozita při vyšších smykových rychlostech klesat, což značí porušování vzorku smykem a měření bylo přerušeno. Na grafu 5-18 je vyjádřena závislost pro pojivo Orlen. Grafy pro pojiva Lotos a Litvínov viz příloha 7 a 8.

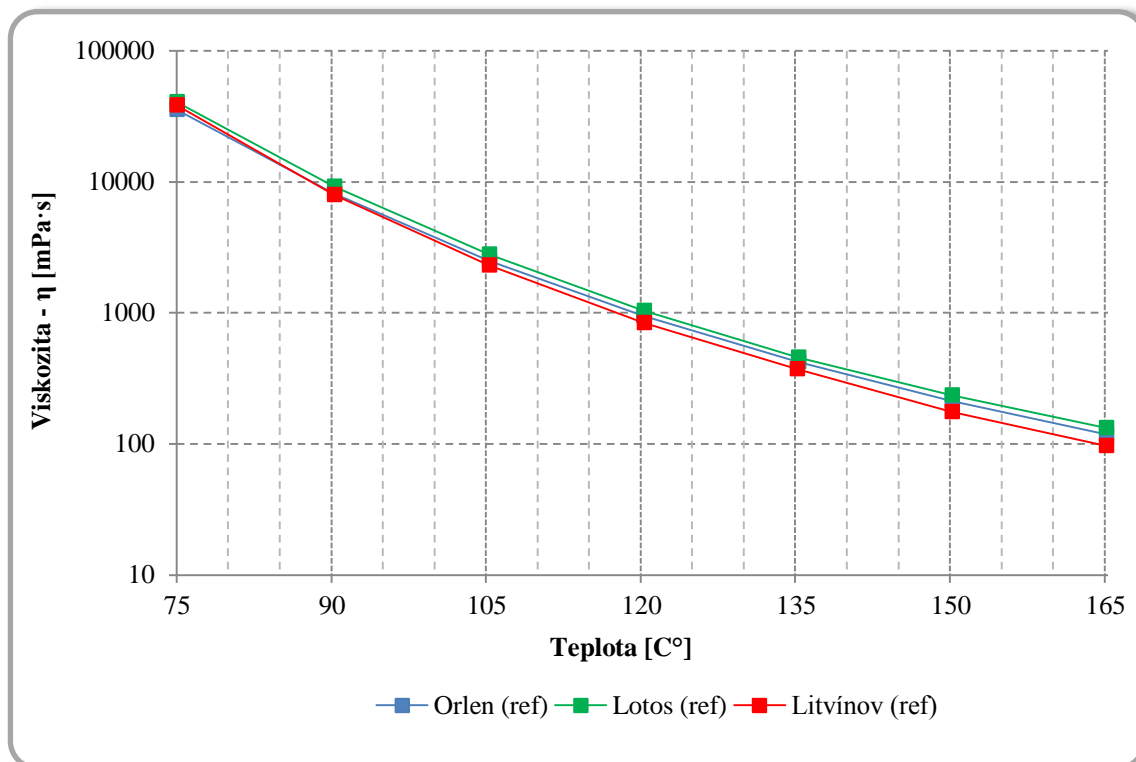
Graf 5-18: Závislost dyn. viskozity na sm. rychlosti při různých teplotách – Orlen

Při referenční teplotě 135°C a smykové rychlosti $1\ s^{-1}$ dosahovala viskozita hodnot (371 – 459) mPa.s u referenčních pojiv (ref), (613 – 828) mPa.s u pojiv nezestárnutých (-) a (817 – 996) mPa.s u pojiv stárnutých (BSA).

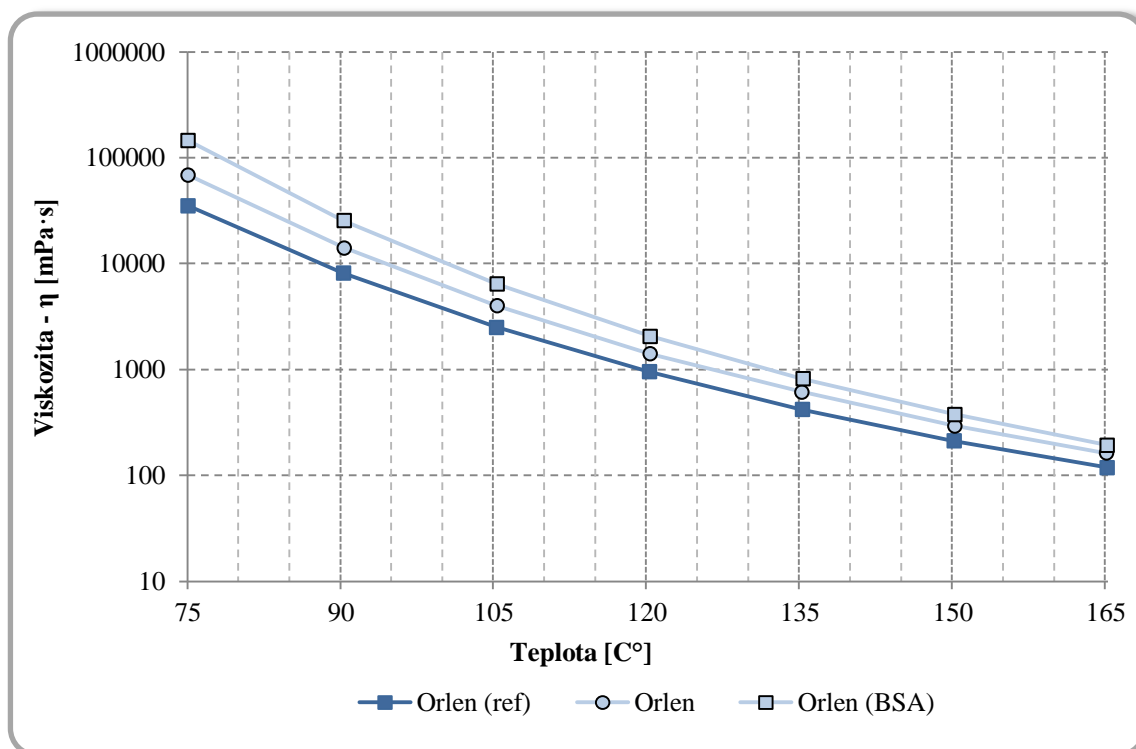
Vlivem výroby a procesu extrakce se viskozita pojiv zvýšila o 46 – 88%. Vlivem stárnutí (BSA) došlo k dalšímu navýšení hodnoty viskozity na 80 – 168% oproti referenčnímu pojivu (viz graf 5-21). Lze tedy říci, že stárnutí asfaltového pojiva má na hodnotu dynamické viskozity značný vliv.

Zajímavý je též poměrně malý rozdíl dynamické viskozity mezi pojivem Lotos a Lotos BSA. Stárnutí BSA nemělo na toto pojivo příliš výrazný vliv, což rovněž koresponduje s výsledky ostatních provedených zkoušek.

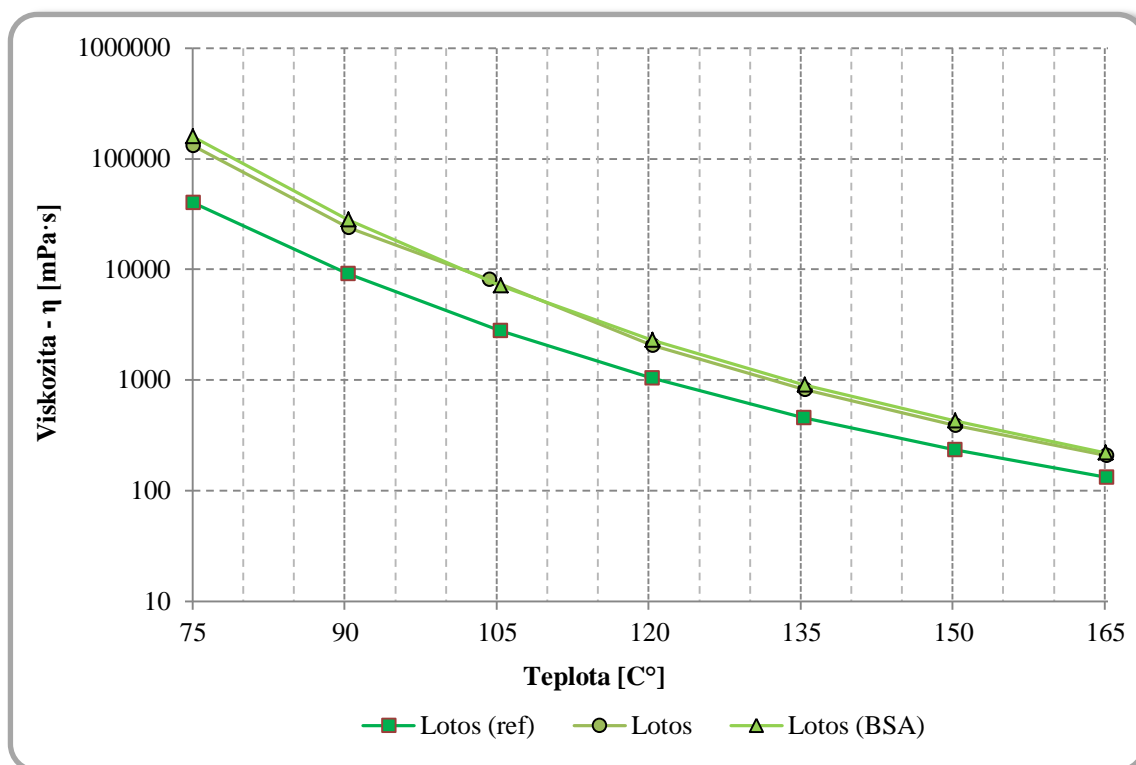
Graf 5-19: Závislost dynamické viskozity na teplotě – referenční pojiva ($\dot{\gamma} = 1 \text{ s}^{-1}$)



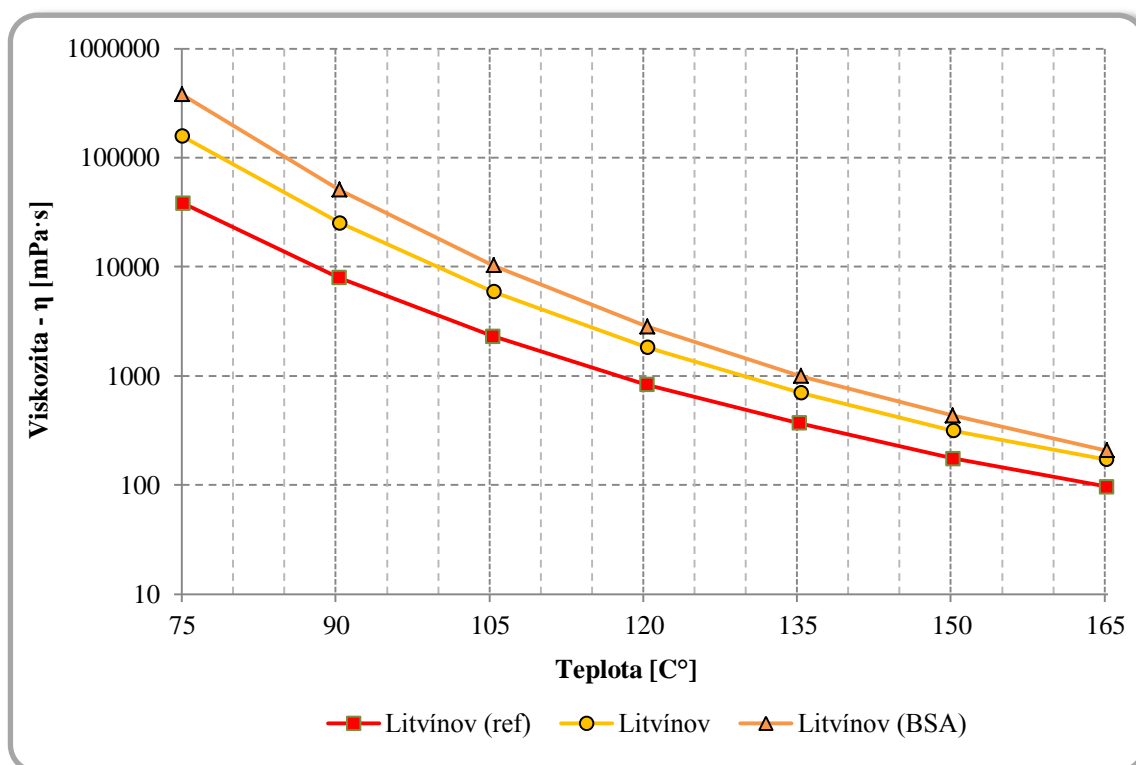
Graf 5-20: Závislost dynamické viskozity na teplotě – Orlen ($\dot{\gamma} = 1 \text{ s}^{-1}$)

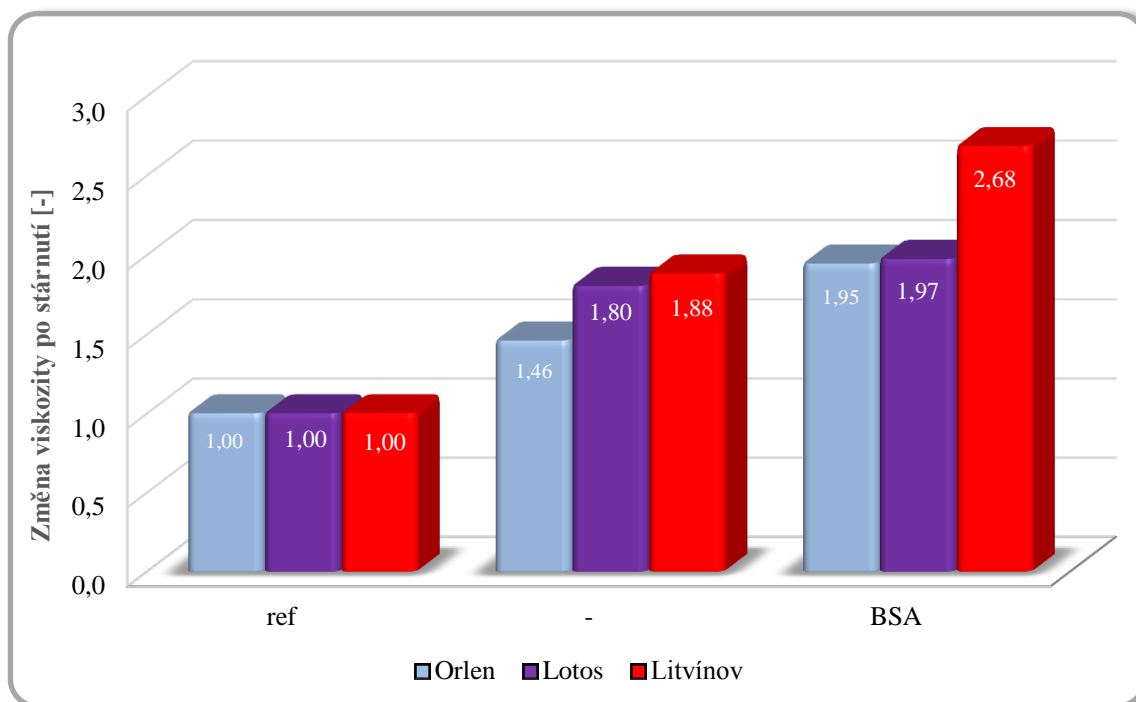


Graf 5-21: Závislost dynamické viskozity na teplotě – Lotos ($\dot{\gamma} = 1 \text{ s}^{-1}$)



Graf 5-22: Závislost dynamické viskozity na teplotě – Litvínov ($\dot{\gamma} = 1 \text{ s}^{-1}$)



Graf 5-23: Relativní porovnání viskozity všech pojiv ($T=135^{\circ}\text{C}$, $\dot{\gamma}=1\text{ s}^{-1}$)

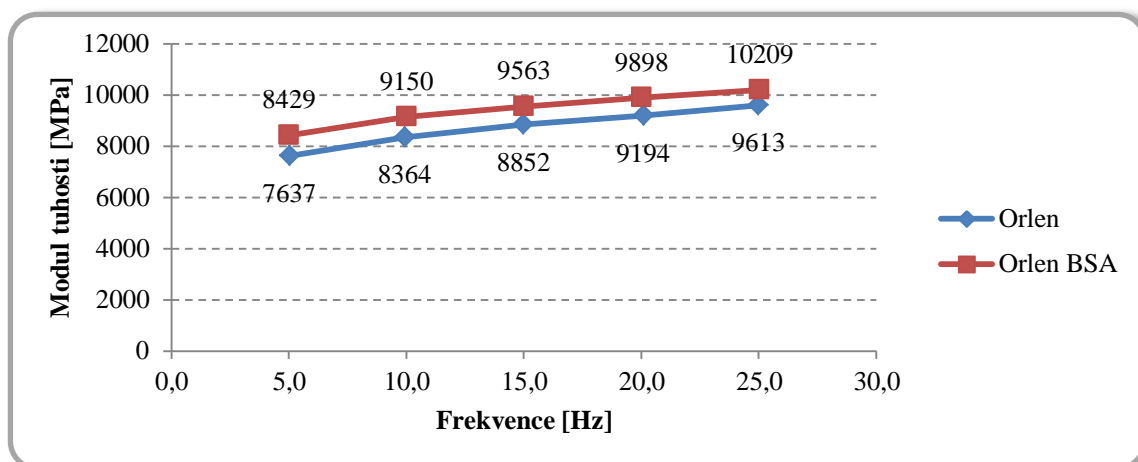
5.4.5 Modul tuhosti na směsích

Modul tuhosti ztuhnutých asfaltových směsí byl zjišťován při teplotě 15°C . Výsledky měření jsou shrnuty v tabulkách a grafech (viz níže). U všech směsí dochází s nárůstem frekvence zatěžování k nárůstu modulu tuhosti. Vyšších hodnot dosahují směsi zestárlé metodou BSA. Hodnoty modulů u směsi Lotos jsou téměř shodné jak u zestárlé tak i nezestárlé směsi. Toto lze vysvětlit výrazným zestárnutím asfaltového pojiva při výrobě směsi na obalovně.

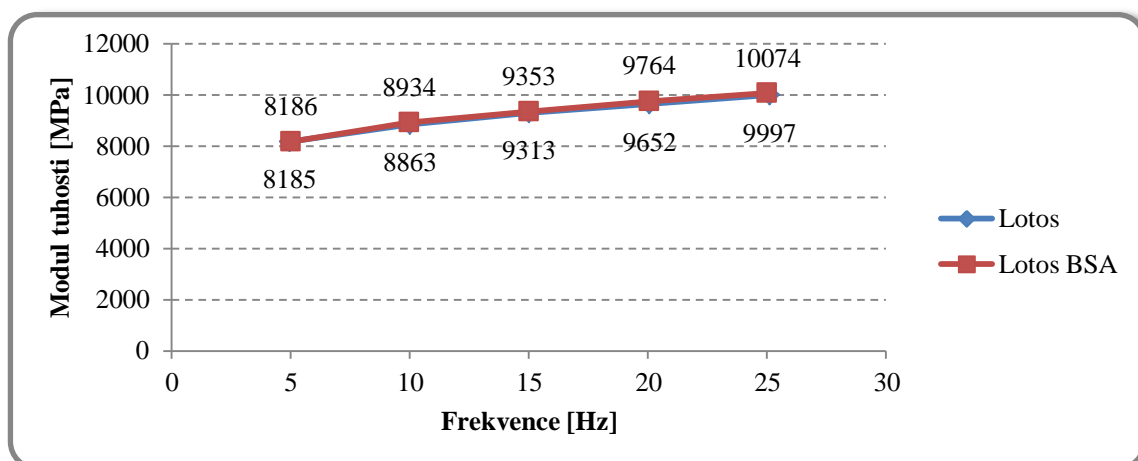
Tabulka 5-11: Hodnoty modulu tuhosti [MPa] asfaltových směsí při 15°C

Směs	Frekvence [Hz]				
	5	10	15	20	25
Orlen	7637	8364	8852	9194	9613
Orlen BSA	8429	9150	9563	9898	10209
Lotos	8185	8863	9313	9652	9997
Lotos BSA	8186	8934	9353	9764	10074
Litvínov	6734	7433	7833	8189	8494
Litvínov BSA	7425	8030	8402	8716	8975

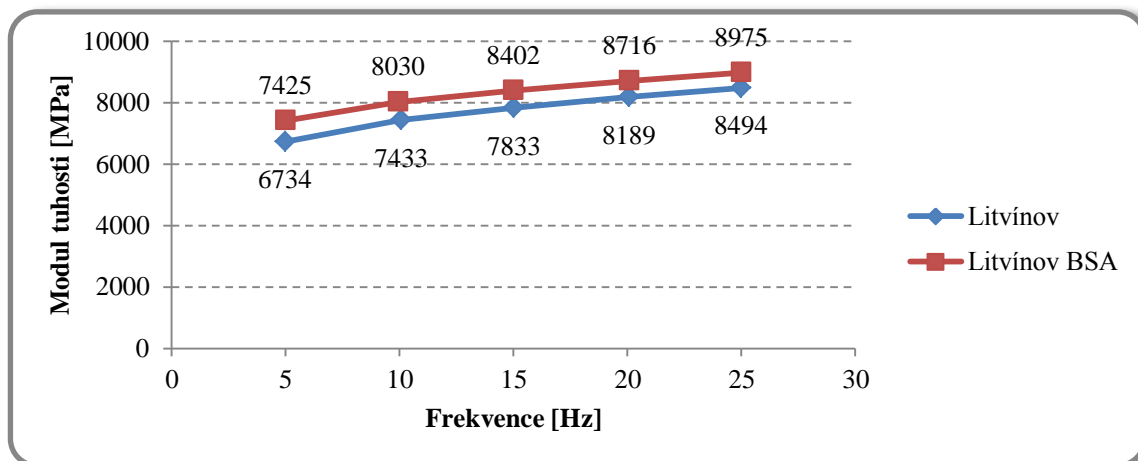
Graf 5-24: Moduly tuhosti naměřené u směsi s pojivy Orlen

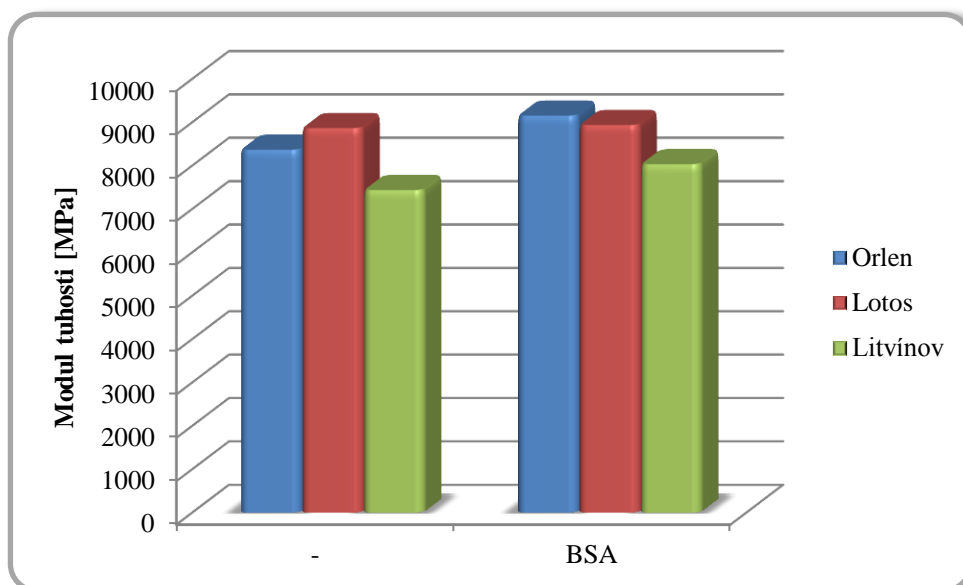


Graf 5-25: Moduly tuhosti naměřené u směsi s pojivy Lotos



Graf 5-26: Moduly tuhosti naměřené u směsi s pojivy Litvínov



Graf 5-27: Srovnání hodnot modulů tuhosti ($f=10$ Hz)

Z grafu 5-25 vyplývá, že nejvyšší nárůst modulu tuhosti vlivem stárnutí nastal u směsi s pojivem Orlen. Naopak směs s pojivem Lotos nevykázala téměř žádný nárůst, z již dříve zmíněných důvodů (viz výše).

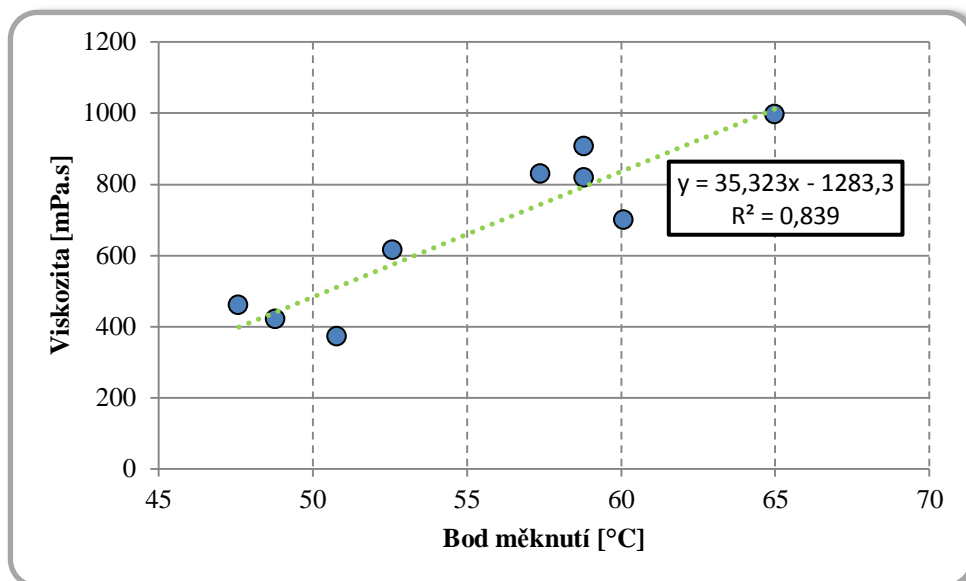
5.4.6 Korelace mezi vyhodnocenými zkouškami

Následující kapitola se zabývá korelací výsledků empirických zkoušek (penetrace, bod měknutí) a dynamické viskozity prováděné v DSR. Na grafu 5-25 je znázorněna poměrně uspokojivá korelace mezi bodem měknutí a dynamickou viskozitou měřenou v DSR při teplotě 135 °C. Po proložení jednotlivých bodů lineární spojnicí trendu dosahuje korelační koeficient uspokojivé hodnoty 0,84.

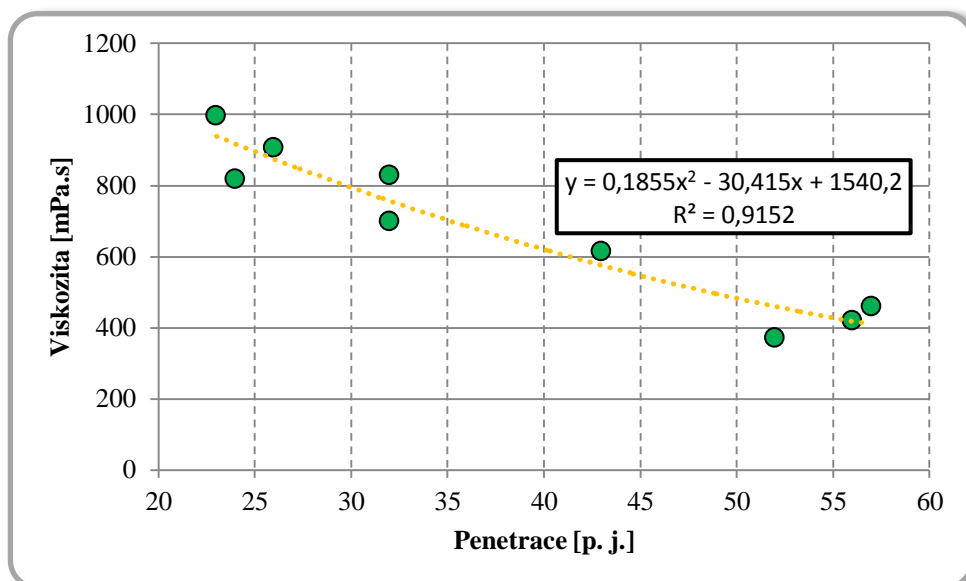
Graf 5-26 zase zobrazuje korelaci mezi penetrací a dynamickou viskozitou se spojnicí trendu tentokrát pomocí polynomicke funkce s vysokým korelačním koeficientem 0,92.

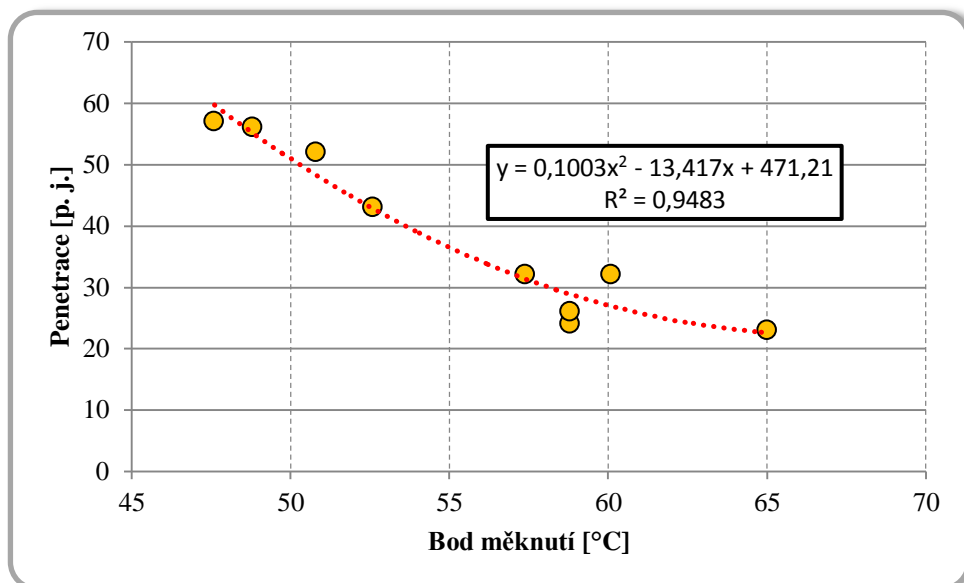
Na posledním grafu 5-27 je vykreslena korelační závislost mezi teplotou bodu měknutí určenou metodou kroužek – kulička a penetrací. Po proložení bodů polynomickou spojnicí trendu vykazuje koeficient korelace velmi vysokou hodnotu 0,95, což umožňuje dobře odhadovat teplotu bodu měknutí při znalosti hodnoty penetrace a naopak.

Graf 5-28: Korelace mezi dynamickou viskozitou při 135°C a bodem měknutí



Graf 5-29: Korelace mezi dynamickou viskozitou při 135°C a zkoušky penetrace



Graf 5-30: Korelace mezi výsledky zkoušky penetrace a bodem měknutí

6 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo zkoumat a hodnotit reologické vlastnosti asfaltových pojiv s přihlédnutím ke stárnutí asfaltových pojiv, resp. směsí. Procesy stárnutí byly v práci vysvětleny a prakticky aplikovány prostřednictvím metod simulujících stárnutí asfaltových pojiv a směsí v laboratorních podmínkách.

Pro účely práce byly zpracovány 3 vzorky asfaltových směsí s užitím silničního asfaltu různých výrobců. Každá směs byla rozdělena na poloviny, z nichž jedna polovina byla uměle zestárnutá prostřednictvím metody Braunschweiger Alterung – BSA. Takto vzniklo celkem 6 různých směsí. Z každé směsi byla vytvořena tělesa pro zkoušku stanovení modulu tuhosti ztuhlé asfaltové směsi, přičemž ze zbylé směsi se vyextrahovalo asfaltové pojivo. Toto pojivo bylo následně podrobena jak empirickým (penetrace, teplota bodu měknutí), tak funkčním zkouškám v dynamickém smykovém reometru. Pomocí DSR byl zjišťován komplexní smykový modul s fázovým úhlem a dynamická viskozita.

Z výsledků zkoušek je patrný značný vliv stárnutí asfaltových materiálů na reologické vlastnosti. Hodnoty penetrace se procesy stárnutí snížily až o 32 penetračních jednotek, což představuje snížení gradace asfaltového pojiva o 2 třídy. Co se týče penetrace, tak se jako nejcitlivější ukázalo pojivo výrobce Orlen. Podobný vliv mělo stárnutí také na teplotu bodu měknutí. Největší změnu zaznamenalo pojivo z rafinerie Litvínov, u kterého došlo vlivem stárnutí a následné extrakce ke zvýšení bodu měknutí cca o 14°C.

Hlavní těžiště práce bylo soustředěno na zkoušení reologických vlastností v DSR. Na tomto moderním přístroji byla zjišťována dynamická viskozita, komplexní modul tuhosti a fázový úhel. Dynamická viskozita s každým dalším stupněm zestárnutí stoupala a pojivo se stávalo tužším. Co do viskozity bylo nejméně citlivým pojivo výrobce Orlen – nárůst 95 %. Nejvíce ze všech a to o 168 % se zvýšila viskozita pojiva z rafinerie Litvínov. Zajímavý je poměrně malý rozdíl mezi pojivem vyextrahovaným a zestárlým u pojiva výrobce Lotos. Tuto skutečnosti si vysvětlují tím, že materiál už výrazně zestárl během procesu výroby asfaltové směsi. Pravděpodobně nejde o chybu

měření, jelikož podobně malé rozdíly výsledků byly zaznamenány i u ostatních typů zkoušek.

Z výsledků zkoušek stanovení komplexního smykového modulu a fázového úhlu všech pojiv zkoušených v DSR vyplývá, že stárnutím komplexní smykový modul roste a fázový úhel klesá. Toto lze interpretovat jako celkově vyšší odolnost vůči zatížení zestárnuté asfaltové vrstvy a zvýšení odolnosti proti trvalým deformacím. Na druhou stranu dochází k potlačení vlivu tzv. viskózní složky komplexního modulu, což má za následek snížení odolnosti proti únavě, zkrěhnutí asfaltu a větší náchylnost ke tvorbě trhlin ve vozovce za nízkých teplot.

Posledním prováděným testem bylo stanovení modulu tuhosti na tělesech zhutněné asfaltové směsi v ohybu dle ČSN EN 12697-26. Nejvyšší nárůst modulu tuhosti vlivem stárnutí nastal u směsi s pojivem Orlen. Naopak směs s pojivem Lotos nevykázala nárůst téměř žádný, z již dříve zmíněných důvodů.

Závěrem lze říci, že stárnutí asfaltů ať už při výrobě, či během životnosti asfaltové vozovky má na vlastnosti silničního materiálu značný vliv. Tuto skutečnost je třeba zohlednit při návrhu asfaltové směsi a vybírat vhodná pojiva vzhledem ke klimatickým podmínkám a intenzitě dopravního zatížení. Pro zjišťování reologických vlastností asfaltových materiálů se jeví jako velmi vhodné využití dynamického smykového reometru, a to zejména z důvodu poměrně přesného vystihnutí reologického chování asfaltových pojiv a velké variability a univerzálnosti tohoto přístroje.

7 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] VALENTIN, Jan. ČVUT. *Reologie asfaltových směsí a pojiv*. 2011. Dostupné z: <http://d2051.fsv.cvut.cz/predmety/stpk/reologieuvod.pdf>
- [2] UNIVERZITA TOMÁŠE BATI VE ZLÍNĚ, Fakulta technologická. *Reologie*. 2014. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_03.pdf
- [3] MONDSCHNEIN, Petr a Jan VALENTIN. *Asfaltová pojiva: Zkušební postupy*. ČVUT. [online]. [cit. 2014-12-30]. Dostupné z: http://d2051.fsv.cvut.cz/predmety/eak/asfaltova_pojiva_cast3.pdf
- [4] Rolling Thin Film Oven Test. Matest.com [online]. 2014 [cit. 2015-01-02]. Dostupné z: <http://matest.com/en/Products/bitumen-asphalt/Macro-Category/rolling-thin-film-oven/b066-kit-rolling-thin-film-oven---astm-0>
- [5] Zkoušení asfaltových pojiv: Prezentace projektu 1716/2011 Aktualizace a rozšíření výuky předmětu experimentální analýza konstrukcí. ČVUT. [cit. 2015-01-01]. Dostupné z: <http://d2051.fsv.cvut.cz/predmety/eak/>
- [6] VALENTIN, Jan. ČVUT, Fakulta stavební, Katedra silničních staveb. *Užitné vlastnosti a reologie asfaltových pojiv a směsí: charakteristiky, nové zkušební metody, vývojové trendy*. Praha: INPRESS a.s., 2003, 224 s.
- [7] MILÁČKOVÁ, K. *Porovnání metod využitelných pro stanovení dynamické viskozity asfaltových pojiv*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, 2012. 17 s., 3 s. příloh. Studentská vysokoškolská odborná činnost. Vedoucí práce: Ing. Jan Valentin Ph.D.
- [8] ČSN EN 12697-33. *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 33: Příprava zkušebních těles zhutňovačem desek*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [9] PĚCH, P. *Použití speciálních pojiv při recyklaci asfaltových směsí na obalovně*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. 2013. 64 s., 7 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce doc. Dr. Ing. Michal Varaus.
- [10] ČSN EN 1426. *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení penetrace jehlou*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [11] Penetrometr automatyczny do badania penetracji asfaltów. www.ztmind.il.pw.edu.pl [online]. 2014 [cit. 2015-01-03]. Dostupné z: <http://www.ztmind.il.pw.edu.pl/wp-content/uploads/2012/03/labasfaltu03.jpg>
- [12] ČSN EN 1427. *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení bodu měknutí - Metoda kroužek a kulička*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [13] HÝZL, Petr. VUT. *Zkoušení asfaltových pojiv*. Přednáška předmětu: Pozemní komunikace II, 2011.

- [14] ČSN EN 12607-1. *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu - Část 1: Metoda RTFOT*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [15] ČSN EN 12607-3. *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu - Část 3: Metoda RFT*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [16] PĚNČÍK, M. *Pojiva do netuhých vozovek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební Ústav pozemních komunikací, 2013. 73 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Petr Hýzl, Ph.D.
- [17] ČSN EN 14770. *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu - Dynamický smykový reometr (DSR)*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [18] VALOUCHOVÁ, H. a M. RŮČKA. ČVUT, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská. *Nenewtonovské kapaliny*. Praha, 2014, 4 s. Dostupné z: <http://fyzsem.fjfi.cvut.cz/2011-2012/Zima11/proc/newtkap.pdf>
- [19] VARAUS, Michal, *Pozemní komunikace II, Modul 3, Asfaltová pojiva*. Elektronické skriptum, FAST VUT, Brno, 17 s.
- [20] PIRKL, Slavomír. UNIVERZITA PARDUBICE. *Základy reologie a reometrie kapalin*. 2014, 11 s. Dostupné z: kf.upce.cz/Reologie%20a%20reometrie%20kapalin.doc
- [21] RHEOTEC. *Introduction to Rheology*. 49 s. Dostupné z: <http://www.dongjins.com/service/file/Introduction%20to%20rheology.pdf>
- [22] STOKLÁSEK, Svatopluk a kol.: *Nové zkušební metody asfaltových pojiv a směsí umožňující prodloužení životnosti asfaltových vozovek, Zpráva k výzkumnému projektu TA 03030381*, 101 s., 2014.
- [23] ČSN EN 12697-26. *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - část 26: Tuhost*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [24] MEZGER, T.G. *The Rheology Handbook. For users of rotational and oscillatory rheometers*. 3rd revised edition. ISBN 978-3-86630-864-0. Germany. 2011.
- [25] COUFALÍK, Pavel. VLASTNOSTI SILNIČNÍCH ASFALTŮ S URČENÍM Vlivu stárnutí metodou RTFOT. In: *JUNIORSTAV 2014*. Brno, 2014, s. 8.
- [26] DAŠEK, Ondřej, Pavel COUFALÍK, Petr HÝZL, Michal VARAUS, Petr ŠPAČEK, Zdeněk HEGR a Svatopluk STOKLÁSEK. *Nové zkušební metody umožňující predikovat prodloužení životnosti asfaltových vozovek*. 2013.

8 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 2-1: Smykové přetvoření [6].....	13
Obrázek 2-2: Viskózní křivka [6]	14
Obrázek 2-3: Toková křivka [6].....	14
Obrázek 2-4: Viskózní křivka pro různé tekutiny [18]	15
Obrázek 2-5: Toková křivka pro různé tekutiny [18].....	15
Obrázek 2-6: Vliv toku na uspořádání částic v ne-newtonovské kapalině [20]	16
Obrázek 2-7: Viskoelastické chování asfaltu [19]	16
Obrázek 3-1: Zkušební zařízení pro zkoušku RTFOT [4].....	21
Obrázek 3-2: Detailní pohled do komory zařízení pro RTFOT [5]	22
Obrázek 3-3: Vzorky pojiva v sušárně připravené ke zkoušce TFOT [5].....	23
Obrázek 3-4: Zkušební zařízení pro zkoušku RFT [5].....	24
Obrázek 3-5: Aparatura pro zkoušku v tlakovém hrnci PAV [5]	25
Obrázek 5-1: Odstřed'ovací zařízení	32
Obrázek 5-2: Pohled dovnitř odstředivky.....	32
Obrázek 5-3: Destilační zařízení.....	33
Obrázek 5-4: Miska s asfaltovým pojivem pro zkoušku penetrace jehlou.....	34
Obrázek 5-5: Tělíska pro zkoušku „Kroužek – kulička“	34
Obrázek 5-6: Tělíska pro zkoušky v DSR	35
Obrázek 5-7: Schéma lamelového zhutňovače desek [8].....	36
Obrázek 5-8: Zkušební desky před nařezáním.....	36
Obrázek 5-9: Rozměry a schéma upevnění trapézoidů [9].....	37
Obrázek 5-10: Kotoučová pila pro řezání trapézoidů	38

Obrázek 5-11: Trapézoidy připravené pro zkoušku stanovení modulu tuhosti	38
Obrázek 5-12: Schéma penetrometru [10].....	40
Obrázek 5-13: Příklad penetrometru [11].....	40
Obrázek 5-14: Zkouška stanovení bodu měknutí kroužkem a kuličkou [13].....	41
Obrázek 5-15: Princip DSR [6].....	42
Obrázek 5-16: Složky komplexního smykového modulu [6].....	43
Obrázek 5-17: Průběh smykového napětí a vyvolaného smykového přetvoření [6]	43
Obrázek 5-18: DSR Kinexus	44
Obrázek 5-19: Umístění vzorku mezi destičkami reometru před měřením.....	45
Obrázek 5-20: Umístění vzorku mezi kuželem a destičkou v reometru [21]	46
Obrázek 5-21: Pohled na zkušební zařízení pro měření modulu tuhosti na směsích	47

9 SEZNAM TABULEK

Tabulka 5-1: Základní vlastnosti nativních asfaltových pojiv	29
Tabulka 5-2: Základní vlastnosti původních asfaltových směsí	29
Tabulka 5-3: Parametry čáry zrnitosti – ACO11S (Orlen)	29
Tabulka 5-4: Parametry čáry zrnitosti – ACO11S (Lotos)	30
Tabulka 5-5: Parametry čáry zrnitosti – ACO11S (Litvínov)	30
Tabulka 5-6: Hodnoty penetrace [p. j.]	49
Tabulka 5-7: Hodnoty teplot bodu měknutí [°C]	49
Tabulka 5-8: Dynamická viskozita [mPa.s] – Orlen ($\dot{\gamma} = 1 \text{ s}^{-1}$)	57
Tabulka 5-9: Dynamická viskozita [mPa.s] – Lotos ($\dot{\gamma} = 1 \text{ s}^{-1}$)	58
Tabulka 5-10: Dynamická viskozita [mPa.s] – Litvínov ($\dot{\gamma} = 1 \text{ s}^{-1}$)	58
Tabulka 5-11: Hodnoty modulu tuhosti [MPa] asfaltových směsí při 15°C	62

10 SEZNAM GRAFŮ

Graf 5-1: Čára zrnitosti – ACO11S (Orlen)	29
Graf 5-2: Čára zrnitosti – ACO11S (Lotos)	30
Graf 5-3: Čára zrnitosti – ACO11S (Litvínov)	30
Graf 5-4: Vyjádření výsledků zkoušky penetrace	49
Graf 5-5: Vyjádření výsledků zkoušky penetrace	50
Graf 5-6: Hlavní křivky komplexního modulu G^* – Orlen	51
Graf 5-7: Hlavní křivky komplexního modulu G^* – Lotos	51
Graf 5-8: Hlavní křivky komplexního modulu G^* – Litvínov	52
Graf 5-9: Hlavní křivky fázového úhlu δ – Orlen	52
Graf 5-10: Hlavní křivky fázového úhlu δ – Orlen	53
Graf 5-11: Hlavní křivky fázového úhlu δ – Litvínov	53
Graf 5-12: Blackův diagram – Orlen	54
Graf 5-13: Blackův diagram – Lotos	55
Graf 5-14: Blackův diagram – Litvínov	55
Graf 5-15: Izochrony komplexního modulu a fázového úhlu – Orlen ($f=1$ Hz)	56
Graf 5-16: Izochrony komplexního modulu a fázového úhlu – Lotos ($f=1$ Hz)	56
Graf 5-17: Izochrony komplexního modulu a fázového úhlu – Litvínov ($f=1$ Hz)	57
Graf 5-18: Závislost dyn. viskozity na sm. rychlosti při různých teplotách – Orlen	59
Graf 5-19: Závislost dynamické viskozity na teplotě – referenční pojiva ($\dot{\gamma}=1$ s ⁻¹)	60
Graf 5-20: Závislost dynamické viskozity na teplotě	60
Graf 5-21: Závislost dynamické viskozity na teplotě	61
Graf 5-22: Závislost dynamické viskozity na teplotě	61

Graf 5-23: Relativní porovnání viskozity všech pojiv ($T=135^{\circ}\text{C}$, $\dot{\gamma}=1\text{ s}^{-1}$)	62
Graf 5-24: Moduly tuhosti naměřené u směsi s pojivy Orlen	63
Graf 5-25: Moduly tuhosti naměřené u směsi s pojivy Lotos	63
Graf 5-26: Moduly tuhosti naměřené u směsi s pojivy Litvínov	63
Graf 5-27: Srovnání hodnot modulů tuhosti ($f=10\text{ Hz}$)	64
Graf 5-28: Korelace mezi dynamickou viskozitou při 135°C a bodem měknutí	65
Graf 5-29: Korelace mezi dynamickou viskozitou při 135°C a zkoušky penetrace.....	65
Graf 5-30: Korelace mezi výsledky zkoušky penetrace a bodem měknutí.....	66

11 SEZNAM ZKRATEK

SHRP	Strategic Highway Research Program
STA	Short Term Ageing
LTA	Long Term Ageing
RTFOT	Rolling Thin Film Oven Test
TFOT	Thin Film Oven Test
RTF	Rotating Flask Method
PAV	Pressure Aging Vessel
DSR	Dynamický smykový reometr
TBP	True Boiling Point

12 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Parametry zkušebních těles pro zkoušku modulu tuhosti – Orlen	78
Příloha 2: Parametry zkušebních těles pro zkoušku modulu tuhosti – Orlen BSA.....	78
Příloha 3: Parametry zkušebních těles pro zkoušku modulu tuhosti – Lotos	79
Příloha 4: Parametry zkušebních těles pro zkoušku modulu tuhosti – Lotos BSA.....	79
Příloha 5: Parametry zkušebních těles pro zkoušku modulu tuhosti – Litvínov.....	79
Příloha 6: Parametry zkušebních těles pro zkoušku modulu tuhosti – Litvínov BSA ..	80
Příloha 7: Závislost dynamické viskozity na smykové rychlosti – Lotos.....	80
Příloha 8: Závislost dynamické viskozity na smykové rychlosti – Litvínov	81

13 PŘÍLOHY

Příloha 1: Parametry zkušebních těles pro zkoušku modulu tuhosti – Orlen

Orlen						
označení	I	II	III	IV	V	průměr
h_1 [mm]	70,20	70,84	69,66	69,70	68,20	
h_2 [mm]	27,88	27,56	26,80	26,78	27,52	
L [mm]	252,26	252,14	251,90	250,94	250,84	
c [mm]	50,04	49,90	49,38	49,90	49,64	
m [g]	1414,80	1444,80	1413,60	1427,10	1400,40	
obj. hmotnost [kg/m^3]	2285	2334	2356	2363	2350	1764
obj. hm. desky [kg/m^3]	2393					
obj. hm. Marshalla [kg/m^3]	2377					
míra zhutnění [%]	100,7					

Příloha 2: Parametry zkušebních těles pro zkoušku modulu tuhosti – Orlen BSA

Orlen BSA						
označení	I	II	III	IV	V	průměr
h_1 [mm]	70,30	70,56	69,76	68,84	68,34	
h_2 [mm]	26,10	27,70	28,44	27,74	28,34	
L [mm]	252,94	253,24	253,42	253,34	253,44	
c [mm]	49,82	49,94	49,90	49,92	49,96	
m [g]	1403,30	1446,40	1451,00	1435,10	1404,10	
obj. hmotnost [kg/m^3]	2310	2328	2337	2350	2294	2324
obj. hm. desky [kg/m^3]	2388					
obj. hm. Marshalla [kg/m^3]	2377					
míra zhutnění [%]	100,5					

Příloha 3: Parametry zkušebních těles pro zkoušku modulu tuhosti – Lotos

Lotos						
označení	I	II	III	IV	V	průměr
h_1 [mm]	69,82	70,10	69,36	69,46	69,54	
h_2 [mm]	26,88	26,96	26,72	26,76	27,82	
L [mm]	252,46	252,76	252,68	252,16	252,00	
c [mm]	50,10	49,92	49,98	49,78	49,90	
m [g]	1403,60	1425,60	1422,30	1416,00	1427,60	
obj. hmotnost [kg/m^3]	2295	2328	2344	2345	2332	2329
obj. hm. desky [kg/m^3]	2387					
obj. hm. Marshalla [kg/m^3]	2377					
míra zhutnění [%]	100,4					

Příloha 4: Parametry zkušebních těles pro zkoušku modulu tuhosti – Lotos BSA

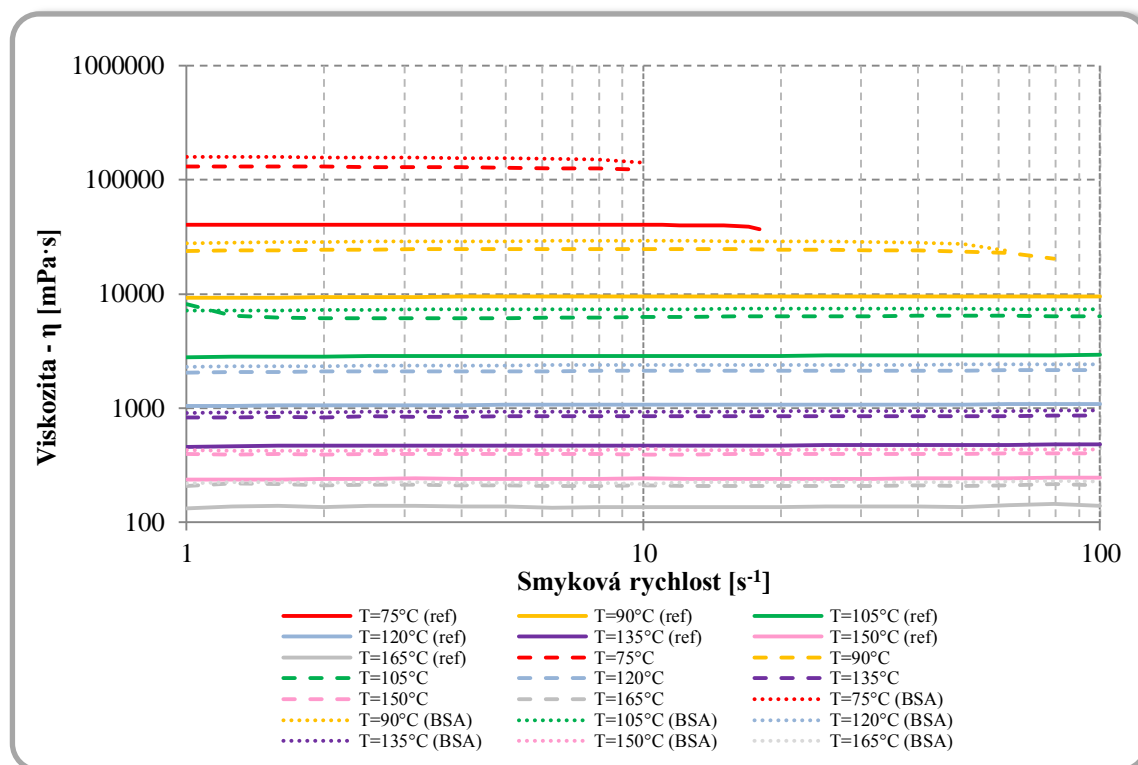
Lotos BSA						
označení	I	II	III	IV	V	průměr
h_1 [mm]	69,00	69,90	69,50	71,40	68,78	
h_2 [mm]	26,38	25,54	26,74	26,28	26,46	
L [mm]	251,58	252,10	252,52	252,78	252,92	
c [mm]	50,30	49,88	50,22	50,04	50,12	
m [g]	1444,40	1462,70	1421,90	1431,20	1388,30	
obj. hmotnost [kg/m^3]	2326	2337	2338	2319	2291	2322
obj. hm. desky [kg/m^3]	2376					
obj. hm. Marshalla [kg/m^3]	2386					
míra zhutnění [%]	99,6					

Příloha 5: Parametry zkušebních těles pro zkoušku modulu tuhosti – Litvínov

Litvínov						
označení	I	II	III	IV	V	průměr
h_1 [mm]	71,24	70,16	70,88	69,30	69,20	
h_2 [mm]	26,26	27,56	25,34	27,44	28,38	
L [mm]	251,92	251,92	251,94	252,18	252,24	
c [mm]	49,94	50,18	49,86	50,10	49,86	
m [g]	1444,40	1462,70	1421,90	1431,20	1388,30	
obj. hmotnost [kg/m^3]	2355	2368	2353	2342	2262	2336
obj. hm. desky [kg/m^3]	2367					
obj. hm. Marshalla [kg/m^3]	2386					
míra zhutnění [%]	99,2					

Příloha 6: Parametry zkušebních těles pro zkoušku modulu tuhosti – Litvínov BSA

Litvínov BSA						
označení	I	II	III	IV	V	průměr
h_1 [mm]	69,40	70,34	70,30	70,98	68,84	
h_2 [mm]	26,26	25,58	25,70	26,80	27,20	
L [mm]	252,50	252,16	252,90	253,44	253,40	
c [mm]	50,32	50,60	50,30	50,92	50,38	
m [g]	1403,50	1421,70	1414,60	1458,40	1404,90	
obj. hmotnost [kg/m^3]	2309	2323	2317	2311	2292	2311
obj. hm. desky [kg/m^3]	2367					
obj. hm. Marshalla [kg/m^3]	2386					
míra zhutnění [%]	99,2					

Příloha 7: Závislost dynamické viskozity na smykové rychlosti – Lotos


Příloha 8: Závislost dynamické viskozity na smykové rychlosti – Litvínov

