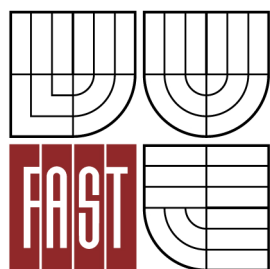




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

PROBLEMATIKA STÁRNUTÍ ASFALTOVÝCH POJIV A SMĚSÍ

AGEING OF ASPHALT BINDERS AND MIXTURES DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. VLASTIMIL ŠTĚPANOVSKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR
BRNO 2015

Ing. PETR HÝZL, Ph.D.



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant	Bc. Vlastimil Štěpanovský
Název	Problematika stárnutí asfaltových pojiv a směsí
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

ČSN 736121 Hutnění asfaltové vrstvy

Sborníky s konferencí Asfaltové vozovky 2009, 2011, 2013

Internetové zdroje o metodě BSA

Zkušební metody pro stárnutí asfaltových pojiv a směsí

Firemní materiály a internetové zdroje k dané problematice

Zásady pro vypracování

Cílem práce bude zpracovat problematiku stárnutí pojiv a směsí. Pozornost bude věnována nové metodě pro stárnutí směsí. Následně budou zjišťovány vybrané parametry.

Předepsané přílohy

Licenční smlouva o zveřejňování vysokoškolských kvalifikačních prací

Bibliografická citace VŠKP

Bc. Vlastimil Štěpanovský *Problematika stárnutí asfaltových pojiv a směsí*. Brno, 2015. 94s., Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Petr Hýzl, Ph.D.

Abstrakt

V této diplomové práci je věnována pozornost stárnutí asfaltových směsí a asfaltových pojiv. V teoretické části byly představeny metody, které simulují krátkodobé a dlouhodobé stárnutí asfaltových pojiv a směsí. V praktické části bylo provedeno stárnutí směsí dle metody BSA (Braunschweiger Alterung). Ze směsí se vyrobila zkušební tělesa pro stanovení modulu tuhosti dle ČSN EN 12697-26. Dále bylo z těchto asfaltových směsí vydestilováno asfaltové pojivo. Na pojivu byla provedena řada zkoušek - penetrace dle ČSN EN 1426, bod měknutí dle EN ČSN 1427, bod lámavosti dle ČSN EN 12593 a zkouška v dynamickém smykovém reometru (dynamická viskozita a komplexní smykový modul). V poslední části diplomové práce byly vzájemně porovnány výsledky naměřených hodnot s cílem určit míru degradace asfaltového pojiva stárnutím.

Klíčová slova

DSR, BSA, stárnutí, moduly tuhosti, penetrace, bod měknutí, bod lámavosti, dynamická viskozita, komplexní smykový modul, fázový úhel

Abstract

Diploma thesis is particularly focused on ageing of asphalt mixtures and asphalt binders. In the theoretical part an array of methods simulating short term and long term ageing consequently is introduced. The main objective of the practical part was to carry out the long-term ageing test method BSA (Braunschweiger Alterung). Thereafter, specimens testing for stiffness properties according to CSN EN 12697-26 were made. After conducting the measurement on those, asphalt binder was extracted and processed to follow-up testing. The testing consisted of a range of methods – Penetration CSN EN 1426, Ring and Ball test CSN EN 1427, Determination of the Frass breaking point CSN EN 12593, Determination of complex shear modulus CSN EN 14770 and Dynamic viscosity using a dynamic shear rheometer (DSR). The given results were assessed in the last part in order to evaluate the rate of the binder degradation caused by the method BSA.

Keywords

BSA, DSR, Ageing, stiffness modulus, penetration, softening point, Frass breaking point, dynamic viscosity, complex shear modulus, phase angle

Prohlášení:

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

V Brně dne 14.1.2015

.....

Bc. Vlastimil Štěpanovský

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Petru Hýzlovi, Ph.D., Ing. Ondřejovi Daškovi a Ing. Pavlu Coufalíkovi, Pavlu Strakovi, zaměstnancům laboratoře VUT FAST v Brně, za odborné vedení a cenné rady při vypracování diplomové práce.

OBSAH

OBSAH	5
1. ÚVOD A CÍLE PRÁCE	7
2. STÁRNUTÍ ASFALTOVÝCH POJIV A SMĚSÍ	8
2.1 ZMĚNY ASFALTOVÉHO POJIVA ZPŮSOBENÉ VNĚJŠÍMI VLIVY	8
2.2 LABORATORNÍ METODY SIMULUJÍCÍ KRÁTKODOBÉ STÁRNUTÍ ASFALTOVÝCH POJIV	10
2.3. LABORATORNÍ METODY SIMULUJÍCÍ DLOUHODOBÉ STÁRNUTÍ ASFALTOVÝCH POJIV	12
2.4. LABORATORNÍ METODY SIMULUJÍCÍ STÁRNUTÍ ASFALTOVÝCH SMĚSÍ	17
3. PRAKTICKÁ ČÁST	20
3.1 ZKOUŠENÉ SMĚSI	20
3.2 STÁRNUTÍ ASFALTOVÝCH SMĚSÍ.....	23
3.3 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES.....	24
___ 3.3.1 LAMELOVÝ ZHUTŇOVAČ.....	24
___ 3.3.2 MÍRA ZHUTNĚNÍ ZKUŠEBNÍCH DESEK.....	27
___ 3.3.3 ŘEZÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES	28
___ 3.3.4 PARAMETRY NAŘEZANÝCH ZKUŠEBNÍCH TĚLES	29
___ 3.3.5 LEPENÍ TĚLES.....	31
3.4 ZPĚTNÁ DESTILACE ASFALTOVÉHO POJIVA	31
3.5 POUŽITÉ ZKUŠEBNÍ METODY	34
___ 3.5.1 MODUL TUHOSTI ASFALTOVÉ SMĚSY.....	35
___ 3.5.2 PENETRACE JEHLOU.....	40
___ 3.5.3 BOD MĚKNUTÍ METODOU KROUŽEK KULIČKA	41
___ 3.5.4 STANOVENÍ BODU LÁMAVOSTI PODLE FRAASSE.....	42
___ 3.5.5 REOLOGICKÉ VLASTNOSTI SROVNÁVANÝCH POJIV	45
___ 3.5.5.1 DYNAMICKÁ VIZKOZITA V DSR.....	47
___ 3.5.5.2 KOMPLEXNÍ SMYKOVÝ MODUL A FÁZOVÝ ÚHEL	49
4. VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT	52
4.1 MODUL TUHOSTI	52
4.2 PENETRACE	52
4.3 BOD MĚKNUTÍ	60
4.4 BOD LÁMAVOSTI.....	62
4.5 DYNAMICKÁ VIZKOZITA V DSR.....	64
4.6 KOMPLEXNÍ MODUL TUHOSTI A FÁZOVÝ ÚHEL V DSR.....	71
4.7 KORELACE MEZI VYHODNOCENÝMI ZKOUŠKAMI	80
4.8 ZMĚNA OBORU PLASTICITY	83
5. ZÁVĚR	84

POUŽITÁ LITERATURA	86
SEZNAM OBRÁZKŮ	88
SEZNAM TABULEK.....	90
SEZNAM GRAFŮ	92
SEZNAM VZORCŮ.....	94

1. ÚVOD A CÍLE PRÁCE

Asfaltové pojivo je jedním z klíčových materiálů, který rozhoduje o kvalitě a životnosti asfaltových vozovek. Jde o organické pojivo, složené z uhlovodíkových sloučenin, které mění své vlastnosti po celou dobu životnosti.

Jednou z hlavních příčin, které vedou ke zhoršení funkčních vlastností asfaltového pojiva, jsou oxidativní změny označované jako stárnutí. V neposlední řadě se na zhoršení užitných vlastností vozovek podílí malý obsah pojiva ve směsi, který proces degradace ještě více urychluje.

V dnešní době se laboratorní metody snaží co nejvíce napodobit reálné stárnutí asfaltového pojiva, většinou pomocí tlaku a cirkulací teplého vzduchu. Metody simulují stárnutí pojiva přímo na obalovně asfaltových směsí, označovaného jako krátkodobé stárnutí nebo při užívání zhutněné vrstvy vozovky jako celku, při dlouhodobém stárnutí.

Mezi nejrozšířenější postupy určené pro krátkodobé stárnutí asfaltových pojiv je možné zařadit zkoušku tepelné stálosti v tenké pohybující se vrstvě – RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test). Pro dlouhodobé akcelerované stárnutí je to pak zkouška v tlakové nádobě – PAV (Pressure Ageing Vessel).

S novými metodami hodnotícími stárnutí asfaltových pojiv se prosazují i nové metody zkoušení pojiv. Jedná se mimo jiné o dynamický smykový reometr (DSR), který je schopen popsat vlastnosti asfaltového pojiva výstižněji než empirické zkoušky.

Cílem diplomové práce je zpracování problematiky stárnutí pojiv a směsí. Pozornost pak bude věnována Braunschweigské metodě stárnutí asfaltového pojiva v asfaltové směsi (Braunschweiger Alterung – BSA). Dále budou zjišťovány parametry asfaltových pojiv získaných z vybraných asfaltových směsí pomocí funkčních (DSR) a konvenčních zkoušek (penetrace, bod měknutí, bod lámavosti), které mají poukázat na míru degradace asfaltových pojiv. Změny vlastností asfaltových směsí byly hodnoceny změnou modulů tuhosti asfaltových směsí po simulaci stárnutí metodou BSA.

2. STÁRNUTÍ ASFALTOVÝCH POJIV A SMĚSÍ

Cílem diplomové práce je zpracování problematiky stárnutí pojiv a směsí. Pozornost pak bude věnována Braunschweigske metodě stárnutí asfaltové směsi (Braunschweiger Alterung – BSA). Dále pak budou zjišťovány vybrané parametry funkčních a konvenčních zkoušek, které mají poukázat na míru degradace asfaltových pojiv a směsí pomocí simulace urychleného stárnutí.

Obsah této kapitoly bude věnován laboratorním metodám, které modelují akcelerované stárnutí asfaltových pojiv a směsí. Laboratorní metody simulující stárnutí se snaží co nejvíce přiblížit skutečným procesům degradace asfaltového pojiva a asfaltových směsí při výrobě směsí na obalovně, nebo ve zhutněné formě v konstrukci vozovky.

2.1 Změny asfaltového pojiva způsobené vnějšími vlivy

V následujícím textu budou popsány základní procesy stárnutí asfaltového pojiva v průběhu jeho životnosti.

- **Termooxidační stárnutí**

Uvažujeme-li technologické procesy skladování asfaltového pojiva na obalovně, následné výroby, transportu a pokládky asfaltových obalovaných směsí, představuje nejvýznamnější typ degradačních procesů termooxidační reakce. Kinetika a průběh těchto termooxidačních reakcí má povětšinou povahu radikálových řetězových reakcí a je řízena především teplotou a přístupem kyslíku k pojivu. Při tom dochází k zabudování kyslíkových atomů do organických uhlovodíkových molekul a jejich přeměně na sloučeniny, ovlivňující následně fyzikální vlastnosti asfaltových pojiv jako je pružnost, moduly tuhosti, nízkoteplotní křehkost atd. Souhrnně označujeme tyto negativní degradační změny jako oxidační stárnutí pojiva. [8]

Oxidační stárnutí pojiva není spojeno pouze s technologickými procesy, ve kterých je asfaltová směs po určitou dobu udržována při významně zvýšené

teplotě, ale pokračuje po celou dobu životnosti asfaltových vrstev vozovky. Zde již vstupují do hry i další faktory jako jsou difúzní odpor asfaltového filmu (stoupá s jeho tloušťkou), permeabilita asfaltové vrstvy pro molekuly vzdušného kyslíku (úměrné mezerovitosti položené asfaltové vrstvy a její tloušťce), vliv ultrafialového slunečního záření atd. Tyto reakce jsou pomalé, nastávají při styku asfaltu se zemskou atmosférou a jsou podle zákonů chemické kinetiky rovněž řízeny teplotou. To znamená, že zvyšující se teplota ovlivňuje významně oxidační účinek. Oxidační reakce způsobují změny ve fyzikálních vlastnostech a vedou ke ztrátě pojivových vlastností. [10]

- **Destilační procesy**

Destilační procesy probíhají nejvíce při zpracování silničních asfaltů za horka a často se objevují u některých typů asfaltů, u kterých za vyšších teplot dochází ve zvýšené míře k štěpení uhlovodíkových molekul za vzniku nízkomolekulárních sloučenin (jako důsledek termooxidačních dějů) nebo obsahují lehké olejovité podíly. Pokud je zvýšená teplota aplikována déle, dochází k jejich vydestilování. Stárnutí odpařováním závisí na teplotě a okolních podmínkách. Odpar lehkých frakcí se zvyšuje s rostoucí teplotou, rostoucím povrchem a penetrací asfaltu. Stárnutí odpařováním je méně významné pro změnu vlastností asfaltu než oxidativní stárnutí. [9], [11]

- **Migrační procesy**

Migrační procesy probíhají za normálních teplot s podstatně menší rychlostí. Tyto jevy jsou typické pro situace, kdy jsou do asfaltového pojiva přimíchány malé podíly fluxačních olejů, nebo nejsou při výrobě používány dostatečně výkonné destilační kolony, což vede k následnému vytvrzování (křehnutí) asfaltů. Při migračním (strukturálním) stárnutí dochází k nárůstu velikosti koloidních částic. Částice asfaltů se shlukují ve větší seskupení, v asfaltové směsi oleje vnikají do kameniva. Je otázkou, zda prvotní spouštěcí mechanismus je migrace olejových podílů či agregace asfaltů. Při tomto

procesu asfaltové pojivo ztrácí plasticitu, elasticitu a křehne. Nárůstem velikosti částic postupně vznikne hrubá disperze a vícefázový systém. [10]

- **Fyzikální tvrdnutí**

Fyzikální tvrdnutí asfaltového pojiva vzniká, pokud je asfaltové pojivo vystaveno nízkým nebo pokojovým teplotám po delší časové období. Většinou jde o reverzibilní proces, který není spojen s chemickými změnami v materiálu. Jedná se spíše reorganizaci a zafixování konformace molekul a agregování sloučenin na bázi vodíkových vazeb (můstků). Přesto tyto fyzikální procesy ve svém důsledku vedou k zdánlivému zvýšení tvrdosti materiálu. V laboratoři se projevuje tím, že výsledná naměřená hodnota (například modulu tuhosti) je závislá na tepelné historii vzorku. [9], [12]

2.2. Laboratorní metody simulující krátkodobé stárnutí asfaltových pojiv

Krátkodobé stárnutí modeluje stárnutí pojiva při obalování kameniva na obalovně.

- **RTFOT - ROLLING THIN FILM OVEN TEST**

Jedná se o zkoušku tepelné stálosti v tenké pohybující se vrstvě. Zkouška je popsána v normě ČSN EN 12607-1.

Stárnutí asfaltového pojiva je ovlivněno vzdušným kyslíkem pouze do malých tlouštěk (přibližně 50 mikrometrů), proto se při zkoušce uplatňuje tenká pohybující se vrstva pojiva. Zkouška simuluje stárnutí, kterému je pojivo vystaveno při obalování kameniva na obalovně asfaltových směsí. Při zkoušce se pro stárnutí pojiva používá sušárna s dvojitou stěnou a elektrickým ohřevem s teplotou 163 °C. Pro umístění pojiva slouží osm válcových skleněných nádobek, do kterých se fouká ohřátý vzduch z trysky. Kombinovaný účinek tepla a vzduchu se stanoví změnou hmotnosti pojiva v nádobkách nebo změnou vlastností asfaltového pojiva, které jsou určovány před a po stárnutí. Pro popis změny vlastností se používají zkoušky penetrace jehlou, bodu měknutí nebo dynamické viskozity. Změny vlastností pojiva po stárnutí je

rovněž možné vyjádřit reologickými vlastnostmi zjištěnými v dynamickém smykovém reometru. [8]



Obrázek 1: Příklad přístroje pro metodu RTFOT. [13]



Obrázek 2: Detailní pohled dovnitř přístroje. [13]

- **RFT – ROTATING FLASK TEST**

Test odolnosti proti stárnutí rotující baňkou, který je popsán v normě ČSN EN 12607-3.

Při zkoušce se asfaltové pojivo podrobí stárnutí v baňce rotačního vakuového destilačního zařízení při teplotě nejčastěji 165 °C po dobu 150 minut. Vliv tepla a vzduchu se určí změnou hmotnosti nebo změnou charakteristik pojiva (např. penetrace, bod měknutí nebo dynamická viskozita před a po stárnutí). [8]

- **TFOT – THIN FILM OVEN TEST**

Zkouška tepelné stálosti tenkého filmu se provádí podle normy ČSN EN 12607-2. Asfaltové pojivo se nalije na ploché misky tak, aby vytvořilo vrstvu o tloušťce 3,2 mm a vloží se do sušárny s nuceným prouděním vzduchu na policičky, které se otáčejí rychlostí 5,5 ot./min. Běžně se zkouška provádí po dobu pěti hodin při teplotě 120 °C popř. 163 °C. Zestárnutí pojiva se určí změnou hmotnosti pojiva nebo změnou jeho vlastností v průběhu stárnutí (např. zkouškou kinematické viskozity podle ČSN EN 12595). [8]

- **3xRTFOT – MODIFIKOVANÁ ZKOUŠKA**

V Rakousku se používá modifikovaná zkouška RTFOT, při které se prodlouží doba stárnutí tenké pohybující se vrstvy pojiva na trojnásobek. Tím dojde k masivnějšímu projevu oxidace pojiva a vlastnosti pojiva se blíží pojivu zestárnutému během své životnosti ve vrstvě vozovky. [8]

2.3 Laboratorní metody simulující dlouhodobé stárnutí asfaltových pojiv

Dlouhodobé stárnutí modeluje degradaci asfaltového pojiva zabudovaného ve ztuhlé asfaltové vrstvě.

- **PAV – PRESSURE AGEING VESSEL**

Zkouška se provádí dle ČSN EN 14769.

PAV je akcelerovaný test dlouhodobého stárnutí, který modeluje předpokládané stárnutí asfaltového pojiva během 10 – 20 let. Podstatné je, že v systému PG tomuto testu předchází sekvence simulovaného krátkodobého stárnutí pomocí metody RTFOT, tedy výchozí vzorek je již termooxidačně zatížen. Údaje v literatuře se někdy liší, neboť je možné najít i hodnoty pouze 5 let. Tento rozpor vychází z vlivu okolního prostředí (klimatické podmínky, vliv vlhkosti, chemických látek, ozonu a především typu asfaltové směsi, její mezerovitost a tloušťky asfaltového filmu). PAV test patří do skupiny testů, které se provádí za přetlaku kyslíku (2,07 MPa, vzduch). Přetlak zajišťuje změnu difúzních poměrů

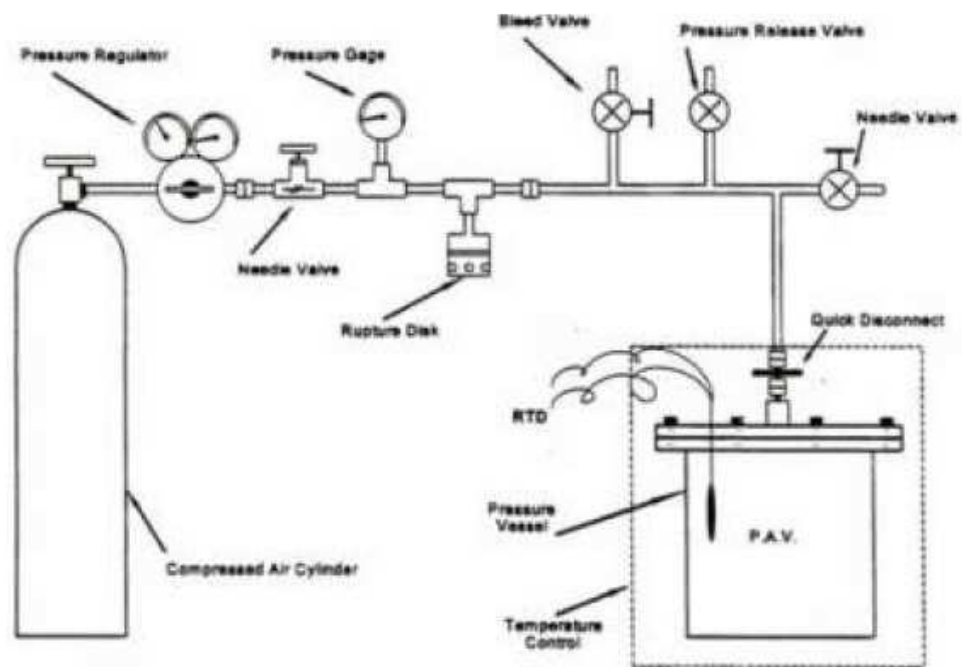
(zvětšení tlakového spádu) a tedy vnučenou migraci molekul kyslíku hluboko do zkoumaného materiálu, který je rozprostřen v tloušťce 3,2 mm .Provedení a základní parametry testu lze najít v tabulkách 1 a 2 [9]. Zkušební zařízení je zachyceno v obrázcích 3 až 5.



Obrázek 3:Přístroj PAV. [14]



Obrázek 4:Vzorky umístěné do přístroje PAV. [14]



Obrázek 5: Schéma pro provádění zkoušky PAV. [9], [15]

- **HIGH PRESSURE AGEING TEST (HiPAT/PAV85)**

Ve Velké Británii se používá varianta, kdy standardní teplota 90 °C a 110 °C (pouštní oblasti) je snížena na 85 °C a expoziční doba je prodloužena ze standardních 20 hodin na 65 hodin. Tato varianta testu je známa jako PAV85. Změnou teploty je nepatrně ovlivněna kinetika, především je dosaženo hlubší degradace. [9]

- **RCAT – ROTATING CYLINDER AGING TEST**

Metoda popsaná v normě ČSN EN 15323 simuluje dlouhodobé stárnutí asfaltového pojiva. Do horizontálně umístěného ocelového rotujícího válce s pojivem v laboratorní sušárně s teplotou 85 °C se vhání kyslík po dobu 140 hodin. Stárnutí pojiva se hodnotí změnou vlastností (např. penetrace nebo bod měknutí) před a po zkoušce. Po úpravě zkušebních podmínek lze metodu použít rovněž pro simulování krátkodobého stárnutí pojiva. [8]

Metody urychleného stárnutí	Název Metody (angl.)	Označení normy	Pracovní teplota.	Velikost vzorku	Čas expozice	Podmínky expozice	Rozměr geometrie	Nucená cirkulace	Přívod Vzduchu/ kyslíku
	-	-	[°C]	[g]	[min]	-	[mm]	-	[ml/min]
RTFOT	Rotation Thin Film Oven Test	EN 12607- 1	163	35,0 ± 0,5	75 ± 1	rotující film	140 x Ø 64	Ano (přerušovaná)	Atm. vzduch 4,5
TFOT	Thin Film Oven Test	EN 12607- 2	120 [163]	50 ± 0,5	300 (+ 15)	rotující film	9,5 x Ø 140	NE	-
RFT	Rotating Flask Test	EN 12607- 3	165	100 ± 1	150 ± 1	rotující film	1000 ml std. 29/32	ANO permanentní	Atm. vzduch 500
RCAT	Rotating Cylinder Aging Test	EN 15323	163	525 ± 25	235 ± 5	rotující film	300 x Ø 125	ANO permanentní	Kyslík 4,0
PAV	Pressure Aging Vessel	EN 14769	100 [90/110]	50 ± 0,5	1200	statický film	9,5 x Ø 140	Ne/Ano (nucený přetlak)	Atm. vzduch 2,1 MPa

Tabulka 1: Přehled metod urychleného stárnutí normovaných v Evropě. [9]

Metoda Stárnutí	Tepl. (°C)	Čas (h)	Navážka (g)	Tloušť filmu (mm)	Přech. test	Podmínky
Thin film oven test (TFOT)	163	5,0	50	3,2	-	-
Modified TFOT (MTFOT)	163	24,0	-	0,10	-	-
Rolling TFOT (RTFOT)	163	1,25	35	1,25	-	vzduch 4000 ml/min
Extended RTFOT (ETFOT)	163	8,0	35	1,25	-	vzduch 4000 ml/min
Nitrogen RTFOT (NRTFOT)	163	1,25	35	1,25	-	N ₂ 4000 ml/min
Modified RTFOT (MRTFOT)	163	1,25	35	1,25	-	Ocel. tyč. 6,4x127 mm
Rotating flask test (RFT)	165	2,5	100	-	-	Rotace 20 ot./min vzduch 500 ml/min
Modified German Rolling Flask (MGRF)	165	3,5	200	-	-	Rotace 20 ot./min vzduch 2000 ml/min
Shell microfilm test (SMT)	107	2,0	-	0,005	-	-
Modified Shell microfilm test (MSMT)	99	24,0	-	0,020	-	-
Modified Shell microfilm test 2 (MSMT2)	107	2,0	-	0,015	-	-
Rolling microfilm oven test (RMFOT)	99	24,0	-	0,5	-	Benzénové rozpouštědlo
Modified RMFOT	99	48	0,5	0,020	-	-
Tilt-oven durability test (TODT)	115	100	35	1,25	-	-
Alternative TODT	115	100	35	1,25	-	-
Thin film accelerated ageing test (TFAAT)	130/ 113	24/ 48	4	0,160	-	ø3 mm hrdla
lowa durability test	65	1000	50	3,2	TFOT	2,07 MPa čistý O ₂ , 1 ot/min
Pressure oxidation bomb	65	96	-	0,030	ERTFO T	2,07 MPa čistý O ₂
Rotating cylinder ageing test (RCAT)	70/ 110	144	500	2,0	-	4-5 l/h čistý O ₂
Pressure ageing vessel (PAV)	90/ 110	20	50	3,2	RTFOT	2,07 MPa vzduch
High pressure ageing test (HiPAT)	85	65	50	3,2	RTFOT	2,07 MPa vzduch

Tabulka 2: Přehled všech dosud navržených metod stárnutí. [9]

2.4 Laboratorní metody simulující stárnutí asfaltových směsí

Jedním z nejdůležitějších parametrů, který ovlivňuje stárnutí asfaltového pojiva je tloušťka asfaltového filmu příslušné asfaltové směsi. Z předchozích informací je patrné, že oxidace je urychlena, pokud má molekula kyslíku neomezený přístup k co největší ploše asfaltového pojiva. V takovém případě se silně zvyšuje dynamika stárnutí asfaltu a mění se únavové charakteristiky směsi, efektivita hutnění a celková trvanlivost. Bohužel, české návrhové metody vedou často z různých důvodů ke snížení tloušťky asfaltového filmu (například vysoká teplota hutnění laboratorních referenčních těles a vyšší hutnicí práce vložená pro jejich přípravu). Vzdůstá-li tloušťka asfaltového filmu, vzdůstá i exponenciálně difúzní odpor této vrstvy a pojivo nacházející se níže pod povrchem je méně ovlivněno stárnutím (degradací). Stejný efekt vykazuje i snížení mezerovitosti asfaltové směsi. Nedostatečné množství asfaltu, potažmo nedostatečná tloušťka asfaltového filmu, vede k nadměrnému stárnutí a ztrátě flexibility pojiva a ve svém důsledku může způsobovat předčasné poruchy asfaltového krytu vozovek. [9]

Pro laboratorní modelování stárnutí asfaltových směsí neexistuje v ČR žádný technický předpis.

Avšak existují různé postupy hodnotící stárnutí asfaltových materiálů, které zahrnují chování pojiv přímo v asfaltových směsích. V těchto zkouškách jsou zahrnuty vlivy tloušťky asfaltového filmu, typu směsi a kvality kameniva. Následné funkční zkoušky jsou prováděny přímo na zestárlých směsích nebo na extrahovaném zestárlém pojivu. [8]

- **BSA – BRAUNSCHWEIGER ALTERUNG**

Metoda byla vyvinutá na technické univerzitě v Braunschweigu v Německu. Jde o posouzení termické stability asfaltového pojiva na vzorku reálné asfaltové směsi. Při tomto postupu se projevuje charakteristika asfaltové směsi, především pak tloušťky asfaltového filmu, popřípadě vliv kameniva. [9]

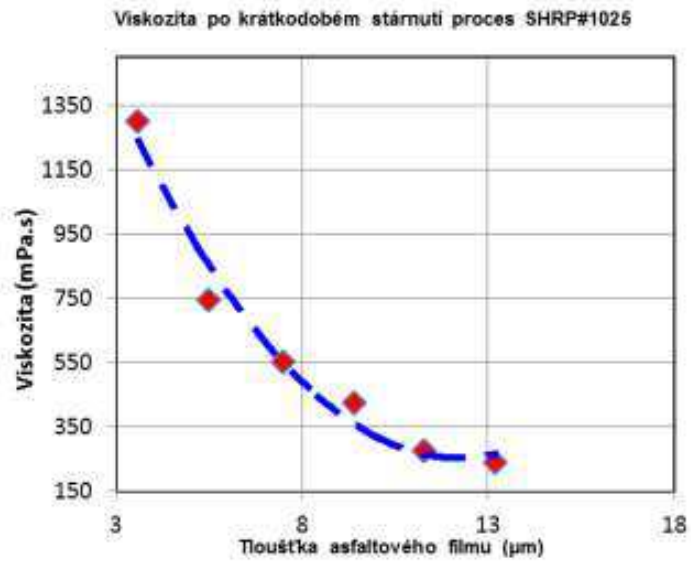
Při této metodě je nezhotněná asfaltová směs vystavena teplotě 80 °C po dobu 96 hodin. Vrstva nezhotněné asfaltové směsi tloušťky cca 40 mm je umístěna v

temperované zkušební komoře s nucenou cirkulací vzduchu. Následně jsou prováděny vybrané laboratorní zkoušky přímo na zkušebních vzorcích připravených z takto nuceně zestárlé asfaltové směsi a výsledky jsou porovnávány s nativní asfaltovou směsí. Metoda dle jejich autorů simuluje oxidativní stárnutí asfaltové směsi (vrstvy) jako v reálné vozovce [16]. Teplota zkoušky zajišťuje, že při simulovaném stárnutí se neobjevují destilační procesy, neboli tvorba nízkomolekulárních produktů je pouze okrajovou záležitostí. Podmínky tohoto testu simulovaného urychleného stárnutí produkují méně zestárlé pojivo než zkušební metoda PAV (Pressure Air Vessel) převzatá z programu SHRP. Nevýhodou této laboratorní simulace stárnutí je vysoká instrumentální a časová náročnost. [9]

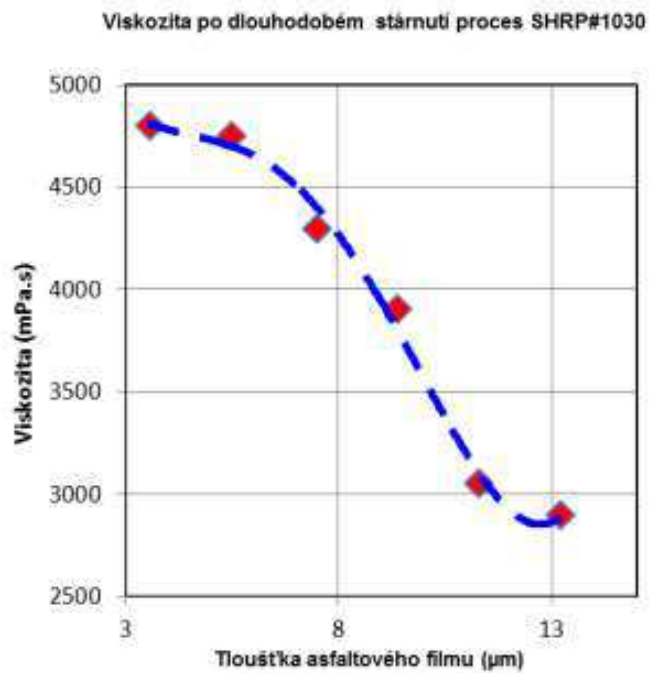
- **SHRP-STRATEGIC HIGHWAY RESEARCH PROGRAM**

Výsledkem amerického výzkumného programu SHRP (realizovaný v 80. a 90. letech 20. století) bylo zavedení zcela nového systému funkčních charakteristik vycházejících z teorie chování viskoelastických látek a založených na komplexních modulech tuhosti, jakož i zavedení nového systému specifikací silničních asfaltů, tzv. Superpave. Bylo prokázáno, že funkční charakteristiky lépe korelují s kritérii tvorby poruch na vozovce, tj. s hloubkou vyjíždění kolejí při zvýšených teplotách a se vznikem trhlin jak při nízkých teplotách, tak při opakovaném namáhání – únavě. [17]

Dlouhodobé stárnutí simuluje proces SHRP#1030 [18], kdy zhutněná asfaltová směs s mezerovitostí $8 \% \pm 1 \%$ je vystavena teplotě 85 °C po dobu 120 hodin. Následně je pojivo extrahováno a podrobena funkčním zkouškám. Postup SHRP#1025 [19] napodobuje krátkodobé stárnutí. V něm je nezhutněná asfaltová směs podrobena nucenému stárnutí po dobu 4 hodin při teplotě 135°C. Na obrázku 6 je zachycen příklad závislosti dynamické viskozity na tloušťce asfaltového filmu po krátkodobém stárnutí metodou podle SHRP#1025 a obrázek 7 zobrazuje viskozitu v závislosti na tloušťce asfaltového filmu po dlouhodobém stárnutí metodou SHRP#1030.



Obrázek 6: Závislost viskozity na tloušťce asfaltového filmu při krátkodobém stárnutí. [9], [20]



Obrázek 7: Závislost viskozity na tloušťce asfaltového filmu při dlouhodobém stárnutí. [9], [20]

3. PRAKTICKÁ ČÁST

V rámci diplomové práce byly odebrány 4 asfaltové směsi z obalovny. Směsi se nechaly zestárnout metodou BSA. Pro zjištění dalšího nárůstu degradace asfaltových pojiv v asfaltových směsích byla metoda modifikována a směsi se nechaly stárnout 3 x delší dobu než uvádějí autoři metody.

Ze směsí se následně vyrobila zkušební tělesa, na kterých byl měřen modul tuhosti. Ze zbytků asfaltových směsí pak bylo vydestilováno asfaltové pojivo, na kterém byly provedeny konvenční a funkční zkoušky. Výsledky byly následně porovnány s vlastnostmi odpovídajících nativních asfaltových směsí.

3.1 Zkoušené směsi

Byly zkoušeny tyto směsi:

- ACO 11S (1.8.2013) - směs 1
- ACO 11S (3.8.2013) - směs 2
- ACO 11+ (29.7.2013) - směs 3
- ACO 11+ (30.7.2013) - směs 4

Tabulka 3: Základní vlastnosti asfaltových pojiv jednotlivých směsí.

	Směs 1	Směs 2	Směs 3	Směs 4
Pokusný úsek	A		B	
Gradace pojiva	50/70	50/70	50/70	50/70
Výrobce	Orlen (Polsko)	CHZ Litvínov	Paramo (ČR)	Orlen (Polsko)
Bod měknutí [°C]	50,4	50,2	50,2	50,1
Penetrace [p.j.]	66	64	63	63

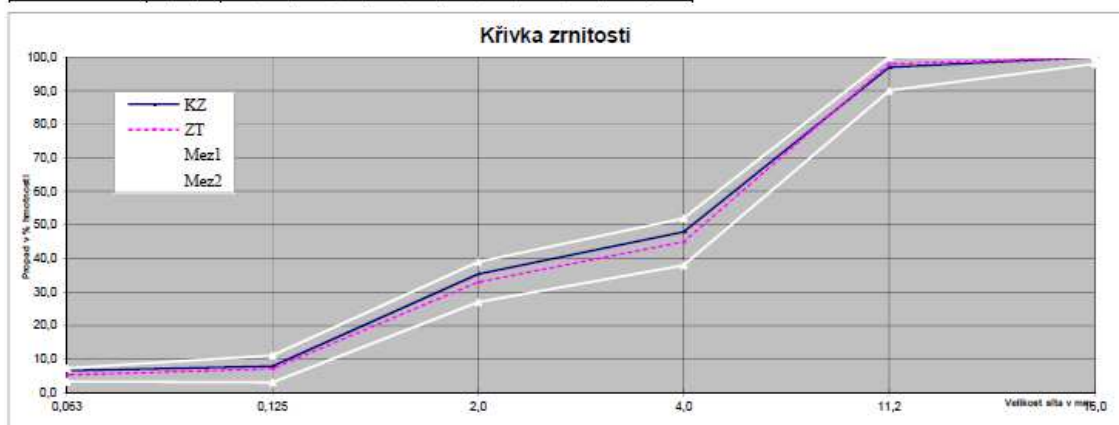
Tabulka 4: Základní vlastnosti asfaltových směsí.

	Směs 1	Směs 2	Směs 3	Směs 4
Teplota hutnění [°C]	155	155	155	155
Stanovená objemová hmotnost	2394	2399	2283	2384

[kg/m ³]				
Obsah pojiva [%]	5,91	5,91	5,54	5,91
Mezerovitost [obj.%]	2,2	2,2	7,9	2,0

SMĚS 1

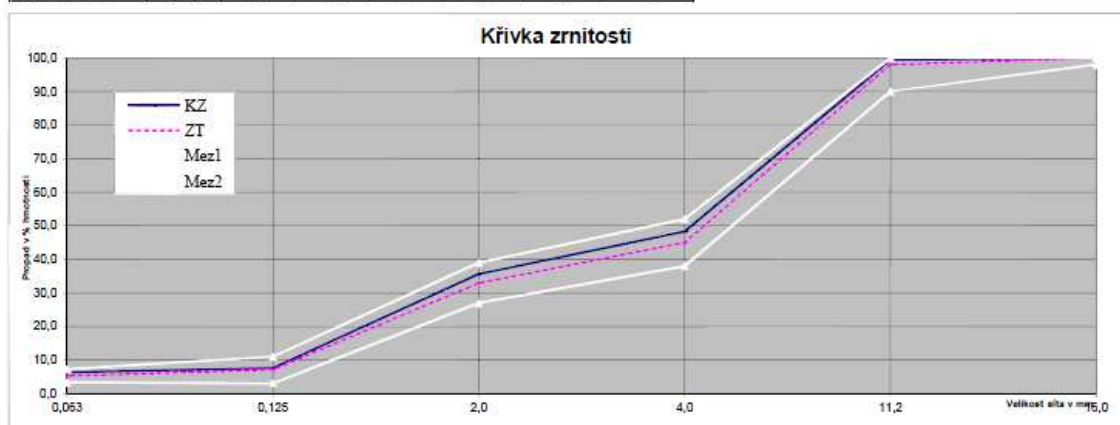
Sito	mm	16,0	11,2	4,0	2,0	0,125	0,063
Propad - KZ	%	100,0	97,0	47,9	35,4	7,9	6,6
Propad - ZT	%	100,0	98,0	45,0	33,0	7,1	5,3
Rozdíl KZ-PZ	(+-)	0,0	-1,0	2,9	2,4	0,8	1,3



Obrázek 8: Stanovená čára zrnitosti směsi 1.

SMĚS 2

Sito	mm	16,0	11,2	4,0	2,0	0,125	0,063
Propad - KZ	%	100,0	99,4	48,3	35,6	7,7	6,4
Propad - ZT	%	100,0	98,0	45,0	33,0	7,1	5,3
Rozdíl KZ-PZ	(+-)	0,0	1,4	3,3	2,6	0,6	1,1



Obrázek 9: Stanovená čára zrnitosti směsi 2.

SMĚS 3

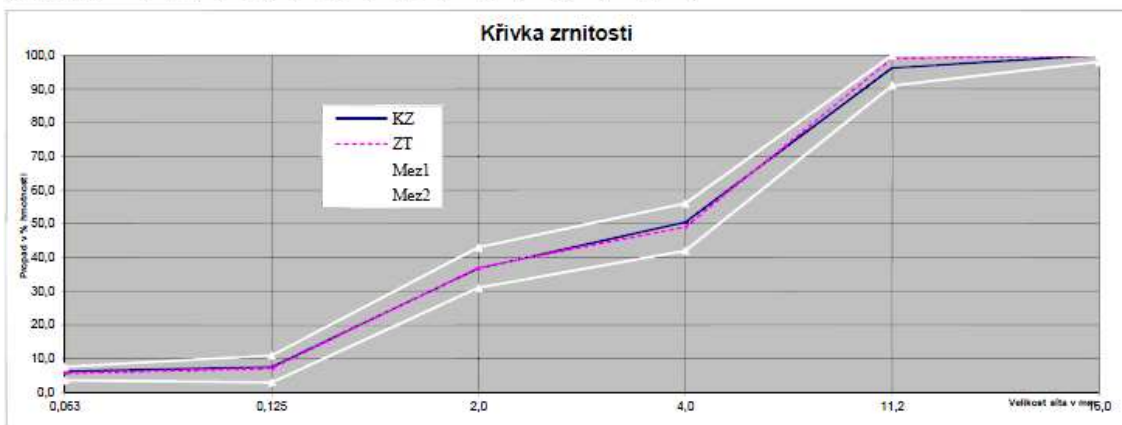
Síto	mm	16,0	11,2	4,0	2,0	0,125	0,063
Propad - KZ	%	100,0	100,0	41,3	29,5	6,9	5,6
Propad - ZT	%	100,0	99,0	49,0	37,0	7,0	5,6
Rozdíl KZ-PZ	(+-)	0,0	1,0	-7,7	-7,5	-0,1	0,0



Obrázek 10: Stanovená čára zrnitosti směsi 3.

SMĚS 4

Síto	mm	16,0	11,2	4,0	2,0	0,125	0,063
Propad - KZ	%	100,0	96,2	50,5	36,7	7,7	6,3
Propad - ZT	%	100,0	99,0	49,0	37,0	7,0	5,6
Rozdíl KZ-PZ	(+-)	0,0	-2,8	1,5	-0,3	0,7	0,7



Obrázek 11: Stanovená čára zrnitosti směsi 4.

3.2 Stárnutí asfaltových směsí

Laboratorní stárnutí asfaltových směsí není v ČR popsáno žádnou normou ani předpisem. Pro stárnutí směsí byla v této práci použita metoda BSA.

Nezhutněná rozmělněná asfaltová směs (viz obrázek 12 a 13) byla rozprostřena v tenké vrstvě a vložena do temperované komory s nucenou cirkulací teplého vzduchu.

Směs se nechala stárnout po dobu:

- 96 hodin při teplotě 80 °C - ozn. BSA
- 3x96 hodin při teplotě 80 °C - ozn. 3xBSA - MODIFIKOVANÁ
- nezestárnutá směs byla označena jako REFERENČNÍ



Obrázek 12: Nezhutněná asfaltová směs v laboratorní sušárně s nucenou cirkulací vzduchu.



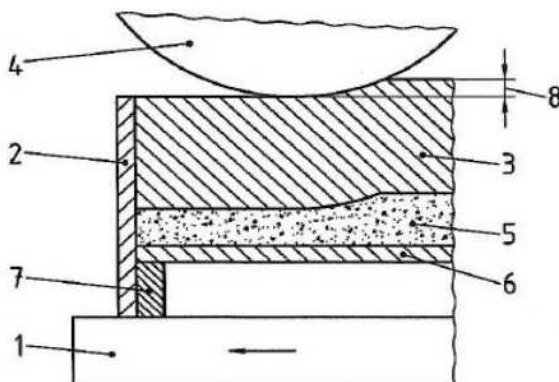
Obrázek 13: Tenká vrstva rozmělněné asfaltové směsi.

3.3 Výroba zkušebních těles

Zkušební tělesa pro zkoušku modulu tuhosti dle ČSN EN 12697-26 [3] byla vyrobena pomocí lamelového zhutňovače a kotoučové pily.

3.3.1 Lamelový zhutňovač

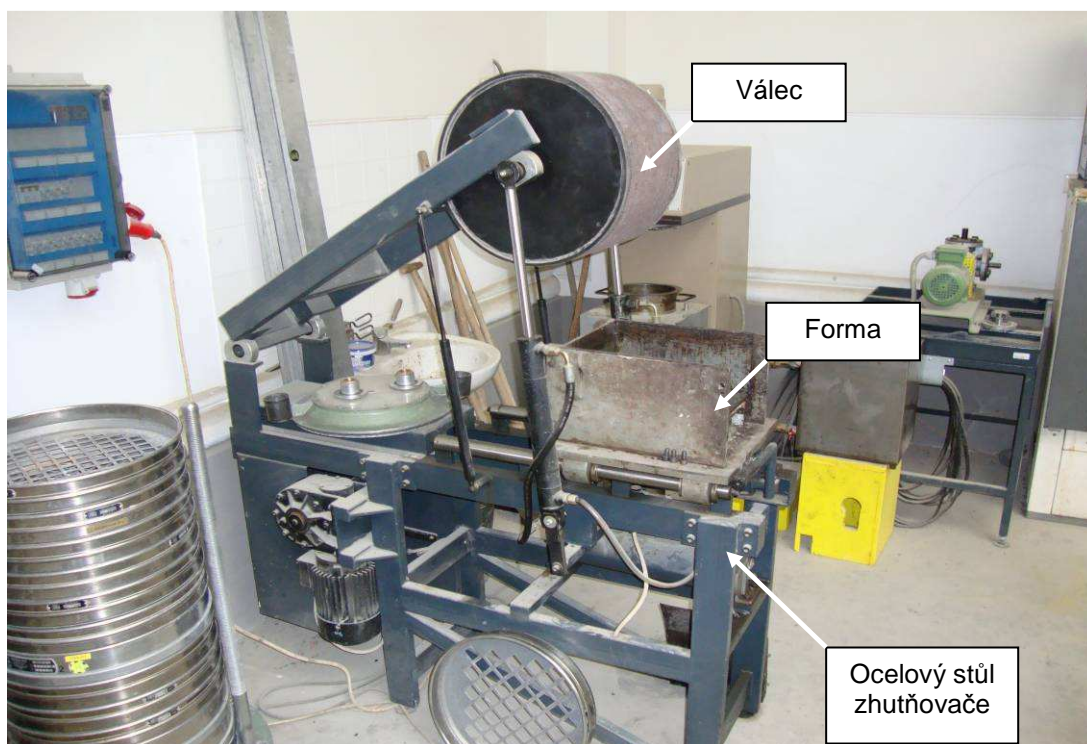
Lamelový zhutňovač dle ČSN EN 12697-33 [1] se skládá z ocelového stolu, na který je přišroubovaná rozebíratelná ocelová forma o rozměrech 260 mm x 320 mm s tolerancemi ± 1 mm. Ve formě jsou pod ocelovou podkladní deskou vloženy nastavovací (distanční) rámečky tak, aby výška zhutňované desky byla 50 mm. Do formy se na plech položený na povrchu asfaltové směsi vertikálně za sebe vkládají ocelové lamely, po kterých se ve vodorovném směru pohybuje dostatečně velký ocelový válec tam a zpět.



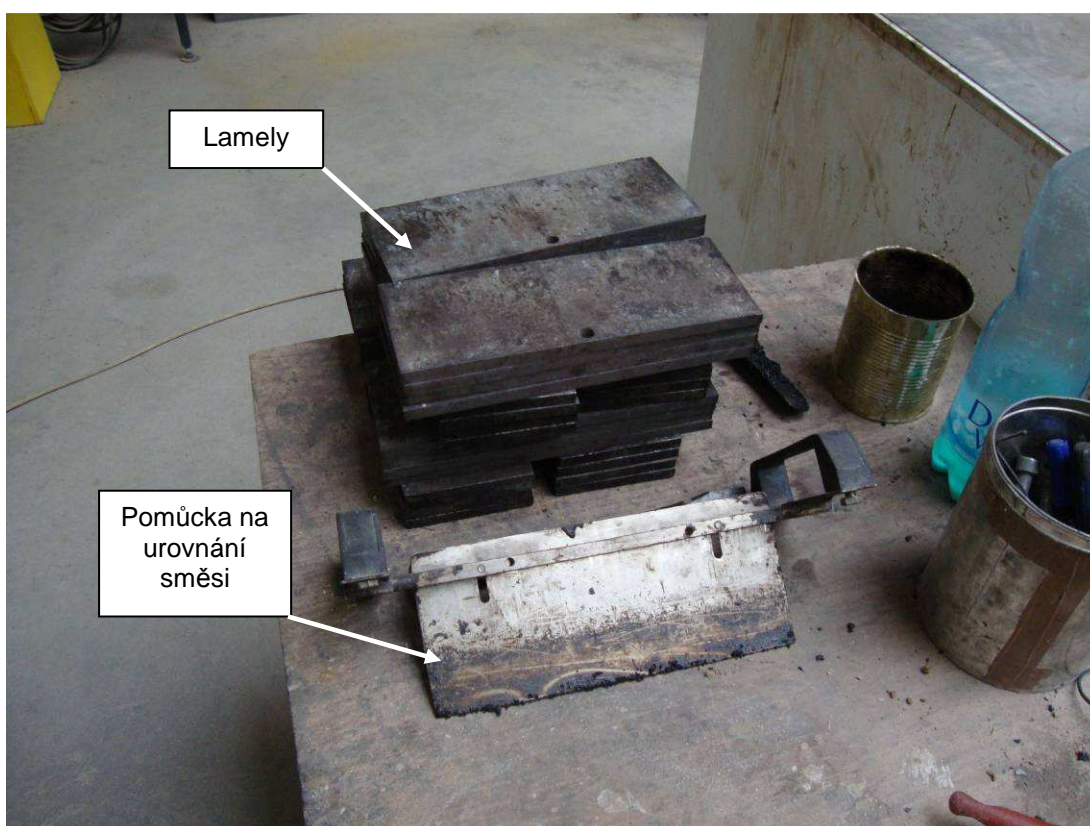
Legenda

- | | |
|--|--|
| 1 Stůl pohybující se ve směru šipky | 5 Asfaltová směs |
| 2 Forma, připevněná ke stolu pomocí šroubů | 6 Podkladní deska |
| 3 Lamely | 7 Distanční rám |
| 4 Válec | 8 Lamely válece jsou výše než forma a tento rozdíl se stává nulovým po určitém počtu pojezdů válce |

Obrázek 14: Hutnící zařízení se svislými lamelami a válcem, [1].



Obrázek 15: Lamelový zhutňovač desek.



Obrázek 16: Pomůcky pro lamelový zhutňovač.

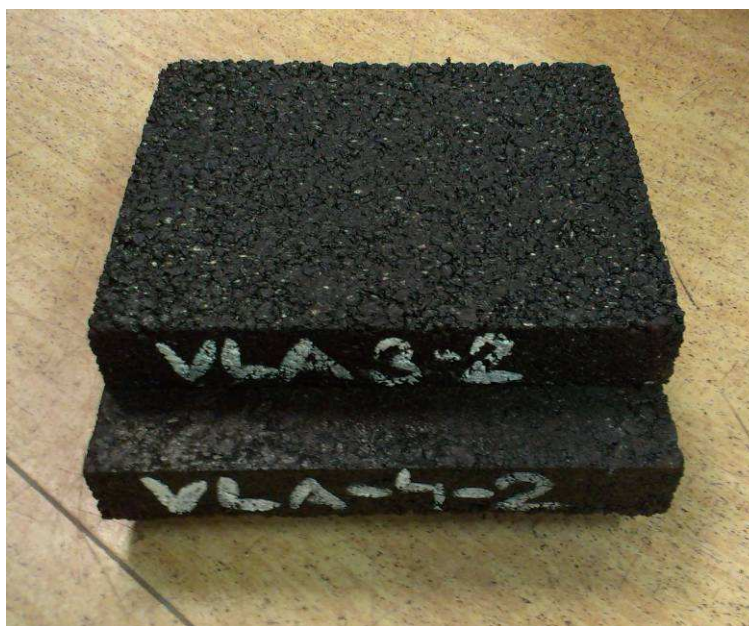
Po vyrobení směsi v laboratorní míchačce se určí hmotnost M asfaltové směsi, která má být vložena do formy:

$$M = 10^{-6} \cdot L \cdot l \cdot e \cdot \rho_m \cdot \left(\frac{100 - v}{100} \right) \quad (1)$$

kde:	M	hmotnost desky [kg]
	L	vnitřní délka formy [mm]
	l	vnitřní šířka formy [mm]
	e	konečná tloušťka desky [mm]
	ρ_m	maximální objemová hmotnost asfaltové směsi [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
	v	mezerovitost směsi v desce [%]

Tloušťka desky e je upravena o tloušťku plechu pod lamelami. Forma a podkladní deska se lehce potřou separačním prostředkem, který není rozpouštědlem pro asfaltové pojivo. Forma a lamely byly předeřhřány na stanovenou teplotu hutnění minimálně 2 hodiny, forma byla naplněna množstvím M ($\pm 0,1\%$) asfaltové směsi. Směs se opatrně a rovnoměrně rozprostřela pomocí lopatky do formy a upěchovala se tak, aby byly vyplněny rohy formy a povrch byl pokud možno co nejrovnější před tím, než se zahájilo hutnění.

Hutnicí lamely byly vkládány do formy ve svislé poloze na plech na povrchu asfaltové směsi. Pohyblivý válec se spustil na hutnicí lamely a uvedl se do pohybu, tím se lamely zatlačovaly konstantní silou až do dosednutí válce na formu. Po ukončení hutnicího procesu se desky před rozebráním formy nechaly vychladnout na laboratorní teplotu.[7]



Obrázek 17: Desky vyrobené v lamelovém zhutňovači.

3.3.2 Míra zhutnění zkušebních desek

Tabulka 5: Míra zhutnění vyrobených desek u směsi 1.

Směs 1	Deska	Objem. hmotnost [kg/m ³]	Míra zhutnění [%]
REFERNČNÍ	1-1	2417	101,0
1xBSA	1-2	2419	101,1
3xBSA	1-3	2417	101,0

Tabulka 6: Míra zhutnění vyrobených desek u směsi 2.

Směs 2	Deska	Objem. hmotnost [kg/m ³]	Míra zhutnění [%]
REFERNČNÍ	2-1	2417	100,7
1xBSA	2-2	2393	99,7
3xBSA	2-3	2393	99,8

Tabulka 7: Míra zhutnění vyrobených desek u směsi 3.

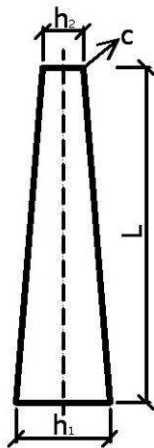
Směs 3	Deska	Objem. hmotnost [kg/m ³]	Míra zhutnění [%]
REFERNČNÍ	3-1	2289	100,3
1xBSA	3-2	2306	101,0
3xBSA	3-3	2291	100,4

Tabulka 8: Míra zhutnění vyrobených desek u směsi 4.

Směs 4	Deska	Objem. hmotnost [kg/m ³]	Míra zhutnění [%]
REFERENČNÍ	4-1	2395	100,5
1xBSA	4-2	2409	101,1
3xBSA	4-3	2388	100,2

3.3.3 Řezání zkušebních těles

Tělesa pro provedení potřebné zkoušky byla řezána na kotoučové diamantové pile, jež byla neustále skrápěná vodou z důvodu chlazení kotouče. Při řezání bylo dbáno na to, aby byla zhutněná deska správně opřena o pravítko stolu kotoučové pily, aby bylo dosaženo co nejpřesnějších rozměrů jednotlivých zkušebních těles. Tělesa měla tvar komolého klínu (trapezoidu).



rozměry komolého klínu:

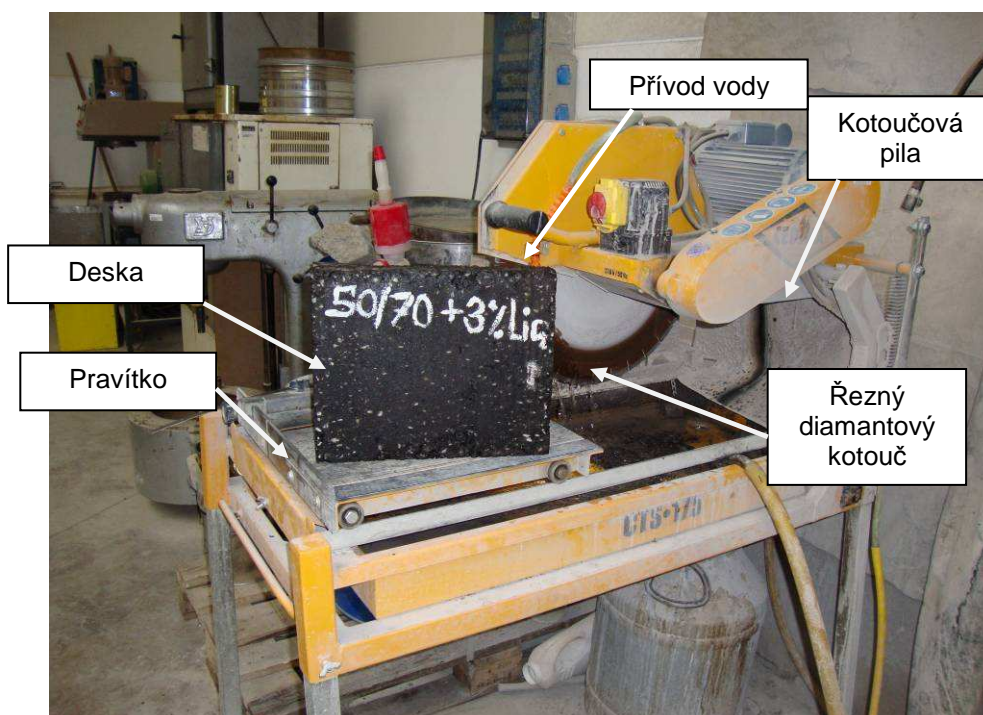
h_1 ... 70 mm

h_2 ... 25 mm

c ... 50 mm

L ... 250 mm

Obrázek 18: Standartní rozměry zkušebních těles



Obrázek 19: Kotoučová pila s diamantovým kotoučem.

3.3.4 Parametry nařezaných zkušebních těles

Tabulka 9: Parametry těles směsi 1.

vzorek	h1	h2	c	L	m
1-1-1	70,7	27,8	49,6	249,3	1465
1-1-2	70,6	27,4	49,6	249,6	1453,3
1-1-3	70,8	29,6	49,6	249,5	1485,7
1-1-4	71,0	26,2	49,6	249,5	1443,1
1-1-5	70,6	28,5	49,6	249,5	1478,9
1-2-1	70,5	26,8	49,6	250,2	1454,3
1-2-2	70,6	27,4	49,6	250,2	1458,9
1-2-3	70,4	26,8	49,4	250,2	1446,6
1-2-4	71,0	27,9	49,5	250,1	1471,5
1-2-5	70,7	27,6	49,5	250,1	1447,2
1-3-1	70,3	27,5	49,5	250,9	1443
1-3-2	70,7	27,4	49,6	250,7	1466,7
1-3-3	70,7	27,4	49,5	251,0	1471,5
1-3-4	70,8	27,1	49,7	250,7	1473
1-3-5	70,6	27,7	49,7	250,6	1485,9

Tabulka 10: Parametry těles směsi 2.

vzorek	h1	h2	c	L	m
2-1-1	71,1	28,1	49,6	251	1460,6
2-1-2	71,2	28,0	49,6	250,7	1471,1
2-1-3	71,0	27,9	49,6	250,6	1479,7
2-1-4	69,7	28,0	49,8	250,5	1463,9
2-1-5	71,0	27,9	49,7	250,2	1493,7
2-2-1	69,5	27,2	50,2	251,0	1470,6
2-2-2	69,3	28,4	50,5	250,9	1470,3
2-2-3	69,6	27,2	50,7	250,8	1444,7
2-2-4	69,2	58,6	50,6	250,8	1454,8
2-2-5	69,6	26,9	51,0	250,5	1384,4
2-3-1	69,0	27,3	51,0	249,5	1441,3
2-3-2	68,9	28,5	50,9	249,6	1461,4
2-3-3	69,5	27,1	50,5	249,8	1432,8
2-3-4	69,4	27,1	50,5	249,8	1438,1
2-3-5	68,5	27,7	50,6	249,8	1427,1

Tabulka 11: Parametry těles směsi 3.

vzorek	h1	h2	c	L	m
3-1-1	69,3	27,2	50,7	250,0	1366,9
3-1-2	69,8	27,8	50,8	250,0	1396,9
3-1-3	69,4	27,4	50,5	250,0	1353,7
3-1-4	69,4	28,4	50,7	249,8	1393,1
3-1-5	70,0	27,7	50,7	249,8	1365,1
3-2-1	69,8	27,1	50,2	251,0	1364,4
3-2-2	70,0	28,7	50,3	251,0	1414,3
3-2-3	70,0	29,0	50,3	250,7	1413,5
3-2-4	70,0	29,1	50,3	250,5	1409,7
3-2-5	69,8	27,1	50,5	250,3	1359,6
3-3-1	69,6	28,8	51,0	251,0	1416
3-3-2	69,2	28,5	50,5	251,0	1382,2
3-3-3	69,8	27,5	50,4	251,0	1364,2
3-3-4	69,8	28,5	50,5	251,2	1384,6
3-3-5	70,0	27,0	50,6	251,2	1384,1

Tabulka 12: Parametry těles směsi 4.

vzorek	h1	h2	c	L	m
4-1-1	69,6	28,1	50,1	249,6	1431,5
4-1-2	70,0	28,0	50,5	250	1443,4
4-1-3	69,8	27,8	50,5	249,6	1453,2
4-1-4	69,4	27,9	50,2	250,0	1445,3
4-1-5	69,8	27,9	50,2	250,0	1452,8
4-2-1	70,0	28,0	49,6	249,8	1410,4
4-2-2	70,1	29,0	49,6	249,9	1435,5
4-2-3	70,1	28,1	49,8	249,9	1433,8
4-2-4	69,0	28,1	49,8	250,0	1469,2
4-2-5	69,5	29,0	49,8	250,0	1451,8
4-3-1	69,7	27,5	49,6	249,8	1410,4
4-3-2	69,2	28,7	49,6	249,9	1435,5
4-3-3	69,0	27,9	49,8	249,9	1433,8
4-3-4	69,6	28,3	49,8	250,0	1469,2
4-3-5	69,0	28,0	49,8	250,0	1451,8

3.3.5 Lepení těles

Po zvážení a změření rozměrů byly trapezoidy ve spodní části nalepeny dvousložkovým epoxidovým lepidlem (epoxid, tvrdidlo, vysušená vápencová moučka) do speciálních kovových podložek a k horní části trapezoidu se přilepil stejným lepidlem kovový háček pro uchycení volného konce komolého klínu ke zkušebnímu zařízení, což je vidět v obrázku 20. Na obrázku 21 jsou zachycena zkušební tělesa pro určení komplexních modulů tuhosti jednotlivých směsí.



Obrázek 20: Zkušební těleso[7]



Obrázek 21: Nařezaná zkušební tělesa.

3.4 Zpětná destilace asfaltového pojiva

Před destilací nejprve necháme na asfaltovou směs působit rozpouštědlo. Jako rozpouštědlo byl při extrakci za studena použit trichlorethylen. Rozpouštědlo se nechá na směs působit 3-4 hodiny za občasného promíchání. Za tuto dobu dojde k dostatečnému oddělení kameniva od asfaltového pojiva a zároveň nedojde k přílišnému negativnímu ovlivnění vlastností asfaltového pojiva. Rozpuštěné asfaltové pojivo se postupně přelévá na ochranná síta, dále pak putuje spolu s jemnými částicemi (do 0,063 mm) do odstředivého zařízení, kde se díky ohnutému okraji patроны zachytí jemné částice. Trichlorethylen s rozpuštěným asfaltem se odstředí do připravené záchytné nádoby.



Obrázek 22: Extrakční přístroj.

Po extrakci za studena zůstane asfaltové pojivo rozpuštěné v trichlorethylenu. Aby bylo možné zjistit vlastnosti asfaltového pojiva, musí se asfaltové pojivo oddělit od trichlorethylenu. Oddělení se provede zpětnou destilací podle ČSN EN 12697-3 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – část 3: Znovuzískávání extrahovaného pojiva: Rotační vakuové destilační zařízení. Destilace se provádí v destilačním přístroji.

Po extrakci bylo označení pojiv následující:

- ze směsi 1 → pojivo 1
- ze směsi 2 → pojivo 2
- ze směsi 3 → pojivo 3
- ze směsi 4 → pojivo 4



Obrázek 23: Destilační přístroj.

Na destilačním přístroji se nastaví teplota olejové lázně na 90 °C a po čtřítáček na 75 otáček/minutu. Pomocí uzavíracího ventilu na přívod vzduchu se nastaví tlak na 40 kPa. Směs asfaltového pojiva a trichlorethylenu se postupně nasává hadičkou do skleněné baňky ponořené v olejové lázni. Díky podtlaku a vysoké teplotě se trichlorethylen začne odpařovat a putuje do chladícího válce. Uvnitř chladícího válce je spirála s protékající vodou (chladící medium). Trichlorethylen kondenzuje a stéká do skleněné baňky, která je umístěna pod chladícím válcem. V momentě, kdy se trichlorethylen přestane odpařovat, zvýší se teplota olejové lázně na 160 °C a sníží se tlak na 2,0 kPa. Pokud se po delší době (cca 60 minut) trichlorethylen stále odpařuje, zvýší se teplota olejové lázně na 185 °C, tlak se ponechá na 2,0 kPa a pokračuje se v destilaci, dokud se trichlorethylen zcela neodpaří (na hladině asfaltu se přestanou tvořit bublinky odpařujícího se trichlorethylenu). Čas destilace při teplotě 185 °C se zaznamená. [2]

Naměřená hodnota:

U referenční a BSA byl trichlorethylen zcela vydestilován při teplotě 160 °C.

U směsi 3x BSA bylo nutné teplotu zvyšovat až na 185 °C. Doba potřebná k úplné destilaci byla :

-pojivo 1 - 34 min.

-pojivo 2 - 25min.

-pojivo 3 - 30 min.

-pojivo 4 - 28min.

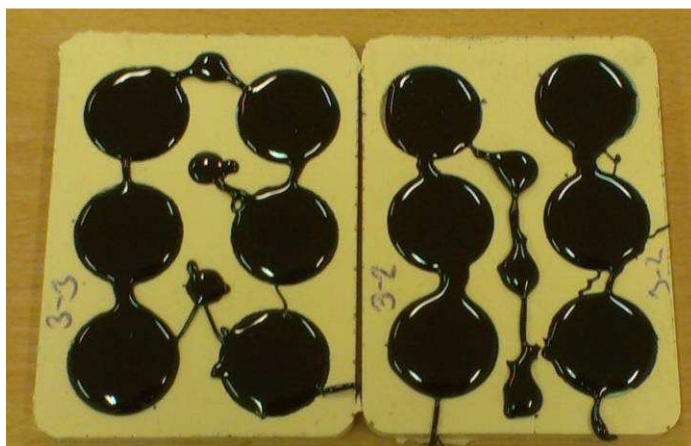
Horké asfaltové pojivo bylo následně nalito do penetrační misky, do kroužků pro stanovení zkoušky bodu měknutí a do formy na vzorky určené pro reologické zkoušky v dynamickém smykovém reometru (DSR).



Obrázek 24: Nalité kroužky pro měření bodu měknutí.



Obrázek 25: Vzorek pro měření penetrace.



Obrázek 26: Vzorky asfaltového pojiva pro měření reologických vlastností.

3.5 Použité zkušební postupy

Zkoušky asfaltové směsi:

-modul tuhosti dle ČSN EN 12697-26

Zkoušky asfaltového pojiva:

-penetrace jehlou dle ČSN EN 1426

-bod měknutí metoda kroužek a kulička dle ČSN EN 1427

-bod lámavosti podle Fraasseho dle ČSN EN 12593

-dynamická viskozita v DSR

-komplexní modul tuhosti a fázový úhel v DSR dle ČSN EN 14770

3.5.1 Modul tuhosti asfaltové směsi

Komplexní modul tuhosti je materiálová, teplotně a časově proměnná charakteristika vazkopružného přetváření při krátkodobém namáhání harmonicky proměnným zatížením

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \cos(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

kde: σ okamžité napětí [MPa]
 σ_0 amplituda maximálního napětí ve zkušebním tělese [MPa]
 ω úhlová rychlost [s^{-1}], $\omega = 2\pi f$
 φ fázový úhel posunu průběhu přetvoření za průběhem síly [°]

Pro lineárně vazkopružnou hmotu při vynuceném kmitání je i deformace harmonicky proměnná:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \cos(\omega t + \psi) \quad (3)$$

kde: ε okamžité poměrné přetvoření [-]
 ε_0 amplituda maximálního přetvoření ve zkušebním tělese [-]
 ω úhlová rychlost [s^{-1}], $\omega = 2\pi f$
 ψ fázový úhel posunu průhybu a síly [°]

Přitom však z důvodů viskoelastických vlastností asfaltových směsí dochází k fázovému opožďení mezi σ a ε . Fázový posun φ způsobují setrvačné síly, vznikající při harmonickém kmitání při zkoušce, kdy se zkušební těleso pohybuje při vychýlení volného konce jedním směrem a setrvačné síly působí opačným směrem.

Velikost harmonického zatěžování odpovídá maximálnímu přetvoření (střídavé protažení a stlačení) krajních vláken zkušebního tělesa o velikosti do $5 \cdot 10^{-5}$ m/m. Při těchto přetvářeních se neprojevuje únava materiálu.

Komplexní modul je komplexním číslem, které se uvádí ve tvaru:

$$E^* = E_1 + iE_2 \quad (4)$$

$$E_1 = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot \cos \varphi$$

$$E_2 = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot \sin \varphi$$

kde: E^* komplexní modul
 E_1 reálná složka charakterizující pružné vlastnosti
 E_2 imaginární složka charakterizující vazké vlastnosti
ostatní viz výše

Složky komplexního modulu E_1 , E_2 , jeho absolutní hodnota S a úhel φ se vypočítávají za podmínek vynuceného ustáleného harmonického kmitání z rovnic:

$$E_1 = \frac{K_1}{c} \left(\frac{P_0}{y_0} \cos \psi + m\omega^2 \right) \quad (5)$$

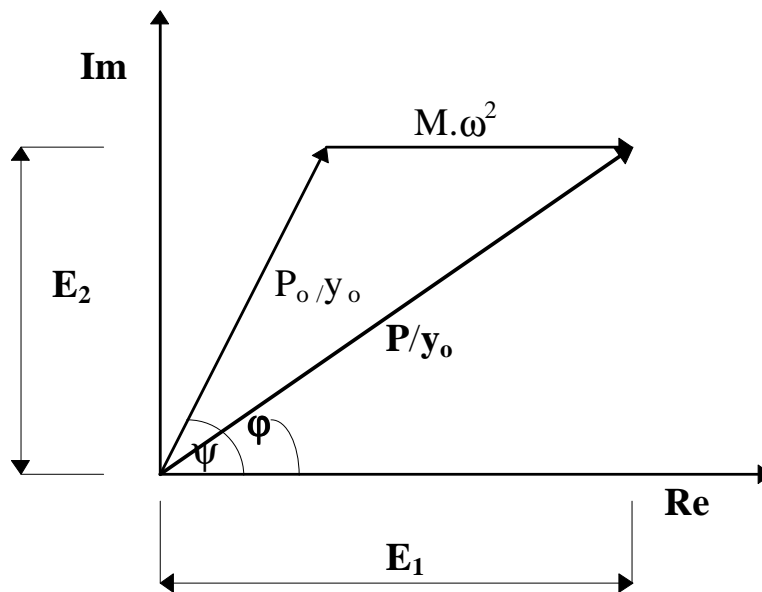
$$E_2 = \frac{K_1}{c} \cdot \frac{P_0}{y_0} \cdot \sin \psi$$

$$\varphi = \arctg \frac{E_2}{E_1}$$

kde: P_0 naměřená velikost maximální amplitudy budící síly [N]
 y_0 velikost maximální amplitudy průhybu volného konce tělesa [m]
 c tloušťka zkušebního tělesa [mm]
 m hmotnost kmitajících hmot [kg], stanovená ze vztahu
 $m = m_1 + K_2 \cdot m_2$
 m_1 součet hmotností kmitající části snímačů síly a dráhy, přípojného táhla zatěžovacího zařízení a přichytka zkušebního tělesa
 m_2 hmotnost zkušebního tělesa [kg]
 K_1 součinitel závislý na rozměrech zkušebního tělesa [m^{-1}]

$$K_1 = \frac{12L^3}{(h_1 - h_2)^3} \left[\ln \frac{h_1}{h_2} - \frac{(h_1 - h_2)(3h_1 - h_2)}{2h_1^2} \right] \quad (6)$$

kde: K_2 redukční součinitel závislý na rozměrech zkušebního tělesa [mm^{-1}]
 L výška zkušebního tělesa [mm]
 h_1 šířka dolní základny komolého klínu [mm]
 h_2 šířka horní základny komolého klínu [mm]
ostatní viz výše



Obrázek 27: Impedanční diagram.

Podíl $\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}$, který se rovná absolutní hodnotě komplexního modulu, se nazývá

modulem tuhosti S

$$S = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} = |E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \quad (7)$$

kde: S modul tuhosti [MPa]

ostatní viz výše

Vzdálenost nebezpečného průřezu komolého klínu od paty vetknutí \bar{x} o maximálním napětí se stanoví z rovnice:

$$\bar{x} = L \frac{h_1 - 2h_2}{h_1 - h_2} \quad (8)$$

kde: \bar{x} Vzdálenost nebezpečného průřezu komolého klínu od
paty vetknutí [mm]

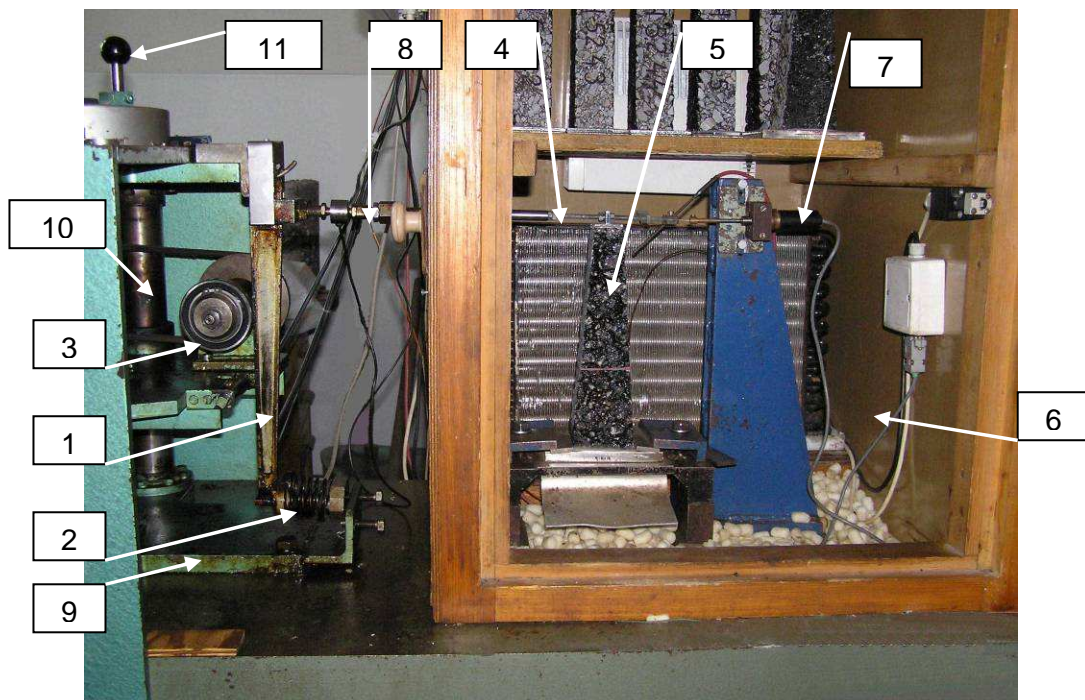
ostatní viz výše

Výsledkem měření je aritmetický průměr osmi dílčích výsledků modulu tuhosti S a fázového posunu φ při dané teplotě a frekvenci. [7]

Měřicí zařízení pro měření modulů tuhosti (harmonické zatěžování volného konce vetknutého trámečku či komolého klínu) bylo vyrobeno v Silničním vývoji Brno, nyní se nachází na VUT FAST v Brně na Ústavu pozemních komunikací a je zachyceno na obrázcích 28 a 29.

Zařízení se skládá z elektrického motoru, který svou rotační energii předává přes nerovnoramennou páku (1), která je přitlačována přitlačnými pružinami (2) na otáčející se excentricky tvarovanou vačku (3). Vzniklá výchylka je pak táhlem (4) přenášena jako posuv do horní části zkušební vzorku – trapezoidu (5), který je umístěn v temperovaném prostoru (6). Nucený posuv táhla a vzniklá silová reakce vzorku se měří snímačem deformace (7) a snímačem síly (8).

Poměr ramen páky (1) lze v průběhu zkoušky plynule měnit výškovým posuvem vačky na desce (9) s motorem. Tím se mění výchylka volného konce trapezoidu (5). Posun desky po vodících sloupcích (10) zabezpečuje silový vodící šroub pomocí kliky (11). [7]



Obrázek 28: Zařízení pro měření modulů tuhosti asfaltových směsí. [7]



Obrázek 29: Celkový pohled na zařízení pro měření modulů tuhosti asfaltových směsí. [7]

Při měření je zkušební těleso vytemperováno na zkušební teplotu, která se standardně volí -5, +10, +15, +25 a +40 °C (s tolerancí ±0,5 °C) a vetknuto v klimatizované komoře. Na horní část trapezoidu se přichytí táhlo se snímačem síly a deformace. Na boční obdélníkovou plochu tělesa se připojí čidlo teploměru. Modul tuhosti se měří při pěti frekvencích: 5, 10, 15, 20 a 25 Hz (s tolerancí ±0,5 Hz).

Návrhovou hodnotou v souladu s TP 170 [8] je modul stanovený při teplotě 15°C a frekvenci zatěžování 10 Hz.

Zkušební zařízení se uvede do činnosti, změří se amplituda síly a průhybu zkušebního tělesa a fázový úhel posunu průběhu deformace za průběhem síly.

3.5.2 Penetrace jehlou

Penetrace asfaltového pojiva se provádí podle ČSN EN 1426 – Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou.



Obrázek 30: Penetrometr.

Od této zkoušky je odvozeno označení asfaltů, určuje viskozitu asfaltu při teplotě 25 °C, výsledkem zkoušky je míra průniku jehly (teplota 25 °C, zatížení 100 g, doba zatížení 5 s) do vzorku asfaltového pojiva, udává se v desetinách milimetru. Zkušební nádobka s asfaltem se vytemperuje ve vodní lázni na teplotu (25±0,1) °C. Jehla se zasune do posuvného zařízení penetrometru a upevní se dotažením matice. Stupnice penetrometru se nastaví na nulu a hrot jehly se nastaví přesně na dotek povrchu asfaltu. Následně se uvolní jehla (se zatížením 100 g) a po pěti vteřinách se odečte hodnota na stupnici penetrometru. Výsledná hodnota je průměrem ze tří stanovení. [4]

3.5.3 Bod měknutí metodou kroužek-kulička

Zjištění bodu měknutí pro asfaltová pojiva se provádí podle normy ČSN EN 1427 – Asfalty a asfaltová pojiva – stanovení bodu měknutí – metoda kroužek kulička.



Obrázek 31: Zkušební zařízení pro měření bodu měknutí.

Rozehřáté asfaltové pojivo se nalije do připravených kovových kroužku. Ty se pro lepší manipulaci umístí na plech potřený separačním prostředkem a nechají se při laboratorní teplotě 30 minut vychladnout. Dalším krokem je seříznutí nadbytečného asfaltového pojiva a zarovnání s horním okrajem kroužku. Kroužky se poté umístí do sestavy opatřené základní deskou. Na kroužky se nasadí středící zařízení pro kuličky a celá sestava se vloží do kádinky s lázní (pro bod měknutí ležící v rozmezí 28 °C až 80 °C se používá destilovaná voda). Počáteční teplota zkoušky musí být (5 ± 1) °C. Kádinka s lázní a sestavou se umístí do zkušebního zařízení. Zkouška se provádí řízeným ohříváním rychlostí 5 °C/min za stálého míchání magnetickým míchadlem. Zkouška je ukončena v okamžiku, kdy se kulička obalená pojivem propadne na základní desku. Odečtou se příslušné hodnoty, ze kterých se průměrem stanoví výsledný bod měknutí. [5]

Na obrázku 30 je zachyceno zkušební zařízení pro určení hodnoty bodu měknutí a v obrázku 31 je zachycen průběh zkoušky.



Obrázek 32: Postupné měknutí během metody kroužek-kulička. [23]

3.5.4 Stanovení bodu lámavosti podle Fraase

Bod lámavosti podle Fraase se určuje podle ČSN EN 12593.

Asfaltové pojivo se nanese na odmaštěné zkušební plíšky. Na plíšek se naváže 410 mg \pm 10 mg asfaltového pojiva a plíšek se umístí na magnetický blok. Magnetický blok se potom položí na vyhřívanou část kovového podstavce, která je udržovaná na teplotě nepřekračující bod měknutí asfaltového pojiva, stanovený zkouškou kroužek a kulička o více než 80 °C. Jakmile je pojivo

dostatečně tekuté, zabezpečí se rovnoměrné nanesení asfaltového pojiva nakláněním vyhřívacího podstavce. Zůstane-li na plíšku méně asfaltového pojiva než se požaduje, připraví se nový plíšek. Plíšek se ponechá 2 min v klidu, aby se zajistilo jeho rovnoměrné pokrytí asfaltovým pojivem. Plíšek se přikryje a nechá se chladnout při laboratorní teplotě.

Zkouška se provádí 30 až 240 minut pro nanesení vzorku na plíšek. Plíšek pokrytý vzorkem se upevní mezi patky ohýbacího zařízení. Při vkládání zkušební vzorku je nutno dbát na to, aby nebyl vzorek poškozen.

Ohýbací zařízení se vloží do vnitřní zkumavky chladícího zařízení. Poté se zahájí ochlazování rychlostí 1 °C/minutu. Aby se do sáhlo předepsaného ochlazování, musí být prostor mezi vnitřní a vnější zkumavkou vyplněn do výšky nejméně 100 mm kapalinou lázně, v našem případě lihem. Teplota se reguluje přidáváním suchého ledu.

Ohýbání plíšku se zahajuje při teplotě 10 °C ± 2 °C nad o čekávaným bodem lámavosti. Zkušební plíšek se ohýbá otáčením kličky rovnoměrnou rychlostí 1 ot/s až na doraz, prohlíží se vrstvička pojiva, zda se objeví první prasklina a v tomto okamžiku se zaznamená teplota s přesností 1 °C.

Jestliže se ohýbací zařízení během zkoušky vyjme, musí se zkouška ukončit.

Dvě měření jsou vyhovující, jestliže je jejich rozdíl menší nebo roven 3 °C.

Jestliže je rozdíl větší, provedou se další dvě měření. Výsledná hodnota bodu lámavosti se vyjádří jako průměr dvou platných stanovení zaokrouhlený na celé číslo. V obrázku 32 jsou zachyceny dva plíšky s nanesenou vrstvou asfaltového pojiva a obrázek 33 znázorňuje zkušební zařízení pro určení bodu lámavosti asfaltového pojiva.



Obrázek 33: Vzorky asfaltového pojiva pro bod lámavosti.



Obrázek 34: Příklad pro měření bodu lámavosti podle Fraaseho.

3.5.5 Reologické vlastnosti srovnávaných pojiv

Reologie je relativně mladá vědní disciplína, která se zabývá chováním látek, které jsou vystaveny vlivům vnějších sil. Oproti klasickým empirickým zkouškám tedy dovolují reologické zkoušky popisovat vlastnosti látek v závislosti na teplotních intervalech, dobách či frekvencích zatížení a při různě velkých zatížení v čase, tzn. je umožněno sledovat dynamický vývoj zkoušených vlastností v čase, což je bezesporu důležitá vlastnost reologických zkoušek.

V oblasti asfaltových pojiv, která řadíme do skupiny viskoelastických látek, to znamená možnost definovat a popsat celou škálu v praxi se vyskytujících zatížení a vlivů. Díky reologickým zkouškám lze zjišťovat viskózní a elastický podíl veličin u asfaltu, či možnost simulovat vliv dynamického zatížení vyvolaného pojíždějící dopravou. [21]

Pro reologická měření byl využit rotační reometr Kinexus britského výrobce Malvern, který je zachycen na obrázku 32. Zařízení slouží k určování reologických vlastností materiálů (oscilací a rotací), zvláště pak asfaltů a asfaltových pojiv. Reometr umožňuje mimo jiné měření komplexního smykového modulu a úhlu fázového posunu v širokém rozsahu zkušebních frekvencí (1 μ Hz až 150 Hz) a teplot (-40 $^{\circ}$ C až 200 $^{\circ}$ C). Přístroj je schopen vyvinout krouticí moment v rozsahu 0,05 μ Nm až 200 mNm při měření viskozity i při oscilačních zkouškách. Rotační reometr je složen z tuhého rámu, vzduchem poháněného motoru, ovládacího panelu, výměnné horní a dolní geometrie (slouží pro umístění a zatěžování vzorku materiálu) a uchycení horní geometrie. Výměnné cartridge slouží pro uchycení spodních geometrií a regulaci teploty geometrie a vzorku. Teplotní regulace (Peltier) je prováděna z obou stran vzorku, aby se zamezilo teplotním spádům po výšce vzorku. [8]



Obrázek 35: Rotační reometr kinexus.

3.5.5.1 Dynamická viskozita v DSR

Viskozita je základní veličinou v reologii, která charakterizuje tokové chování a určuje míru vnitřního odporu látky vůči vnějšímu zatížení, jinak řečeno odpor proti toku. Pro nejjednodušší viskózní kapaliny – newtonské kapaliny – se předpokládá platnost Newtonova viskózního zákona, tj. zákona o přímé úměrnosti mezi napětím a rychlostí deformace. Dynamická viskozita je tedy konstantou, která není závislá na velikosti tečného napětí ani na smykové rychlosti. Viskozitu Newtonské kapaliny namáhané smykem je možné popsat Newtonovou rovnicí:

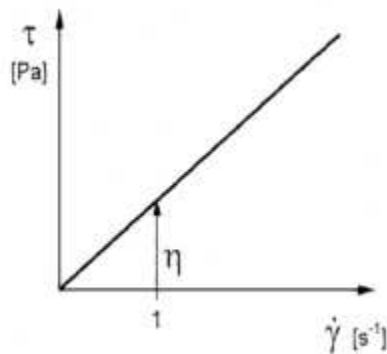
$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (9)$$

τ ... smykové napětí [Pa]

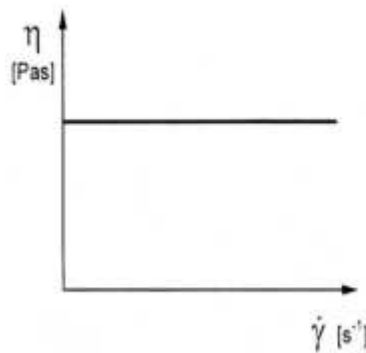
η ... dynamická viskozita [Pa·s]

$\dot{\gamma}$... smyková rychlost, rychlost smykové deformace [s^{-1}] [8]

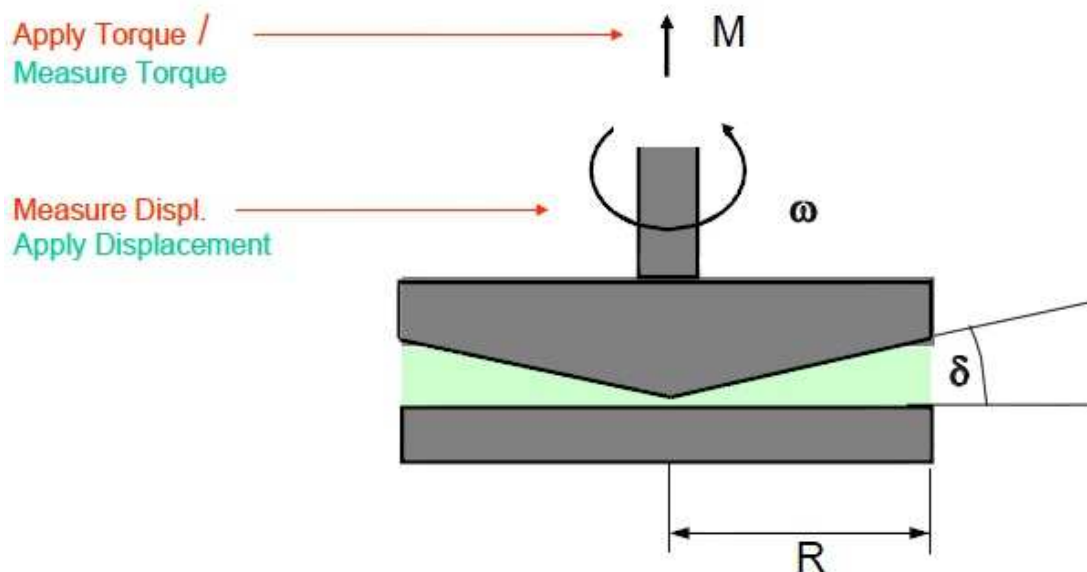
Dynamická viskozita se u asfaltů pohybuje při teplotě 20 °C okolo 10^8 mPa·s. Například řepkový olej má při stejné teplotě viskozitu 60 mPa·s.



Obrázek 36: Křivka proudění (toková křivka) Newtonovské kapaliny. [23]



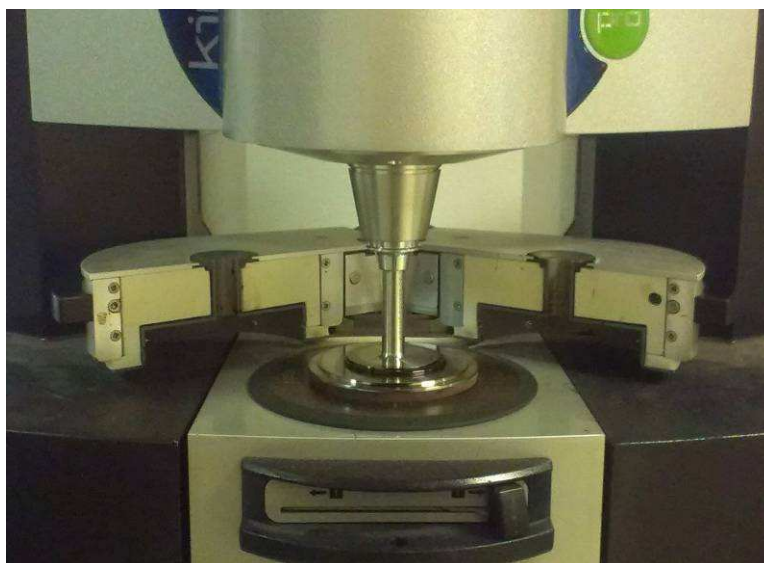
Obrázek 37: Křivka viskozity Newtonovské kapaliny. [23]



Obrázek 38: Geometrie pro měření viskozity. [22]

Dynamická viskozita asfaltových pojiv se nejčastěji určuje geometrií válec – válec vřetenovými viskozimetry (např. typu Brookfield), protože toto zařízení je finančně dostupnější než rotační reometr. Dynamická viskozita byla měřena v DSR při teplotách 75 °C až 165 °C s teplotním krokem 15 °C a při smykové rychlosti 1 s⁻¹ až 100 s⁻¹ pomocí geometrie kužel – deska o průměru 40 mm a s úhlem stoupání kužele 4 °. Značnou výhodou tohoto typu geometrie je, že rychlost smykového přetvoření i smykové napětí jsou nezávislé na pozici mezi kuželem a deskou.

Při měření byla sledována hodnota dynamické viskozity, která byla do určitého bodu nezávislá na smykové rychlosti. Ovšem při nejnižších teplotách zkoušky se v některých případech viskozita začala mírně snižovat, což souviselo s počínajícím porušováním vzorku, na který působilo smykové přetvoření. V tomto případě se test při poklesu hodnoty viskozity o cca 20 % ze své původní hodnoty přerušil a pokračovalo se měřením viskozity při dalším teplotním kroku.



Obrázek 39: Měření viskozity.

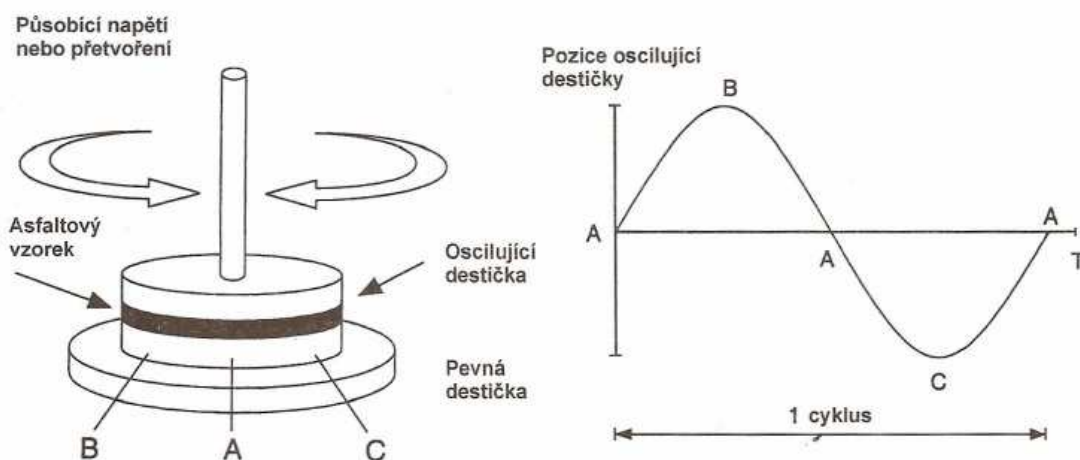
3.5.5.2 Komplexní smykový modul a fázový úhel v DSR

DSR se nejčastěji používá pro charakterizování chování asfaltových pojiv při oscilaci měřením komplexního smykového modulu ($|G^*|$) a fázového úhlu (δ) pojiva. Komplexní smykový modul $|G^*|$ popisuje celkový odpor asfaltového pojiva proti deformaci při vystavení opakovaným pulzům smykového napětí. Je složen ze dvou složek: elastické (vratné) G' označované jako reálná část komplexního modulu a viskózní (nevratné) G'' označované jako ztrátový modul. Fázový úhel δ je indikátorem relativní velikosti vratné a nevratné deformace. Veličiny G^* a δ pro asfaltové pojivo jsou vysoce závislé na teplotě a frekvenci zatěžování. Při vysokých teplotách se pojiva chovají jako viskózní kapaliny bez schopnosti navrácení do původního tvaru. V tomto případě převládá viskózní složka, přičemž $\delta = 90^\circ$. Při velice nízkých teplotách se asfalty chovají jako elastické materiály, které se navracejí z deformace zcela. Tato vlastnost je reprezentována elastickou složkou, přičemž $\delta = 0^\circ$.

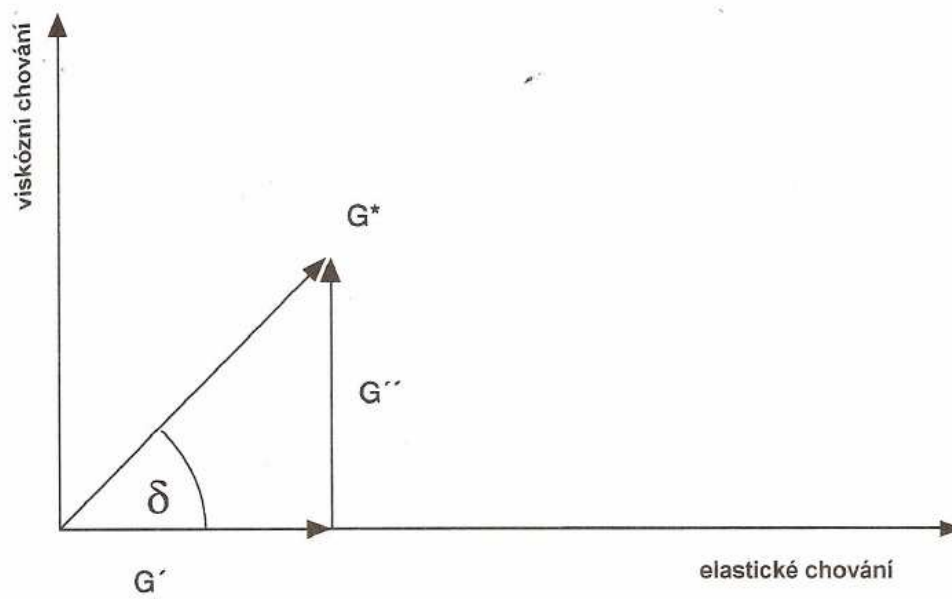
Při oscilační zkoušce v DSR se amplituda napětí měří na základě stanovení točivého momentu přenášeného vzorkem pojiva v reakci na aplikované napětí. Dynamický smykový reometr měří točivý moment a úhlové pootočení a z těchto hodnot dopočítává smykové napětí a přetvoření. [8]

Na pojivech byla provedena reologická měření v oscilaci s řízeným smykovým přetvořením (controlled strain). Byl určen komplexní smykový modul pojiv (G^*) a úhel fázového posunu (δ) při běžně dosahovaných teplotách: 10 °C, 15 °C, 20 °C, 25 °C, 30 °C, 35 °C, 40 °C, 45 °C, 50 °C, 55 °C, 60 °C, 65 °C a 70 °C (čas na přetemperování byl vždy nejméně 10 minut) a při sadách frekvencí zatěžování 0,1 Hz až 10 Hz (frequency sweeps). Pro zkoušky byly použity dvě měřící geometrie deska – deska – s průměrem 8 mm (tloušťka vzorku, tj. velikost mezery byla 2 mm) a 25 mm (tloušťka vzorku 1 mm). Geometrie průměru 8 mm byla použita pro teplotní rozsah 40 °C až 10 °C a geometrie průměru 25 mm se použila při teplotách 70 °C až 40 °C (od nejvyšší teploty k nejnižší). Při zkouškách byla použita kompenzace tloušťky vzorku z důvodu změny jeho objemu s teplotou.

Nastavené smykové přetvoření bylo udržováno v rámci lineárně viskoelastické oblasti. Při použití geometrie deska – deska průměru 8 mm tedy bylo s rezervou při teplotách 40 °C až 35 °C zvoleno smykové přetvoření 2,0 %, při teplotách 30 °C až 20 °C smykové přetvoření 1,5 % a při teplotách 15 °C až 10 °C smykové přetvoření 1,0 % souhrnně pro všechna pojiva. Při použití geometrie deska – deska průměru 25 mm bylo s rezervou při teplotách 70 °C až 65 °C zvoleno smykové přetvoření 2,0 %, při teplotách 60 °C až 50 °C smykové přetvoření 1,5 % a při teplotách 45 °C až 40 °C smykové přetvoření 1,0 % souhrnně pro všechna pojiva.



Obrázek 40: Princip dynamického smykového reometru. [21]



Obrázek 41: Složky komplexního modulu. [21]



Obrázek 42: Měření oscilace, průměr geometrie 25mm, vzorek před seříznutím.

4. VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT

4.1 Modul tuhosti

Modul tuhosti byl stanoven při teplotě 15°C. Výsledky měření jsou shrnuty v následujících tabulkách a grafech.

Tabulka 13: Naměřené moduly tuhosti u směsi 1

SMĚS 1	MODUL TUHOSTI PŘI 15 °C				
	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz
REF	8380	9185	9625	9903	10141
BSA	9360	10077	10519	10886	11079
3XBSA	9422	10074	10391	10654	10909

Tabulka 14: Naměřené moduly tuhosti u směsi 2

SMĚS 2	MODUL TUHOSTI PŘI 15 °C				
	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz
REF	7393	8146	8568	8909	9231
BSA	7961	8618	8999	9310	9504
3XBSA	8072	8755	9019	9282	9422

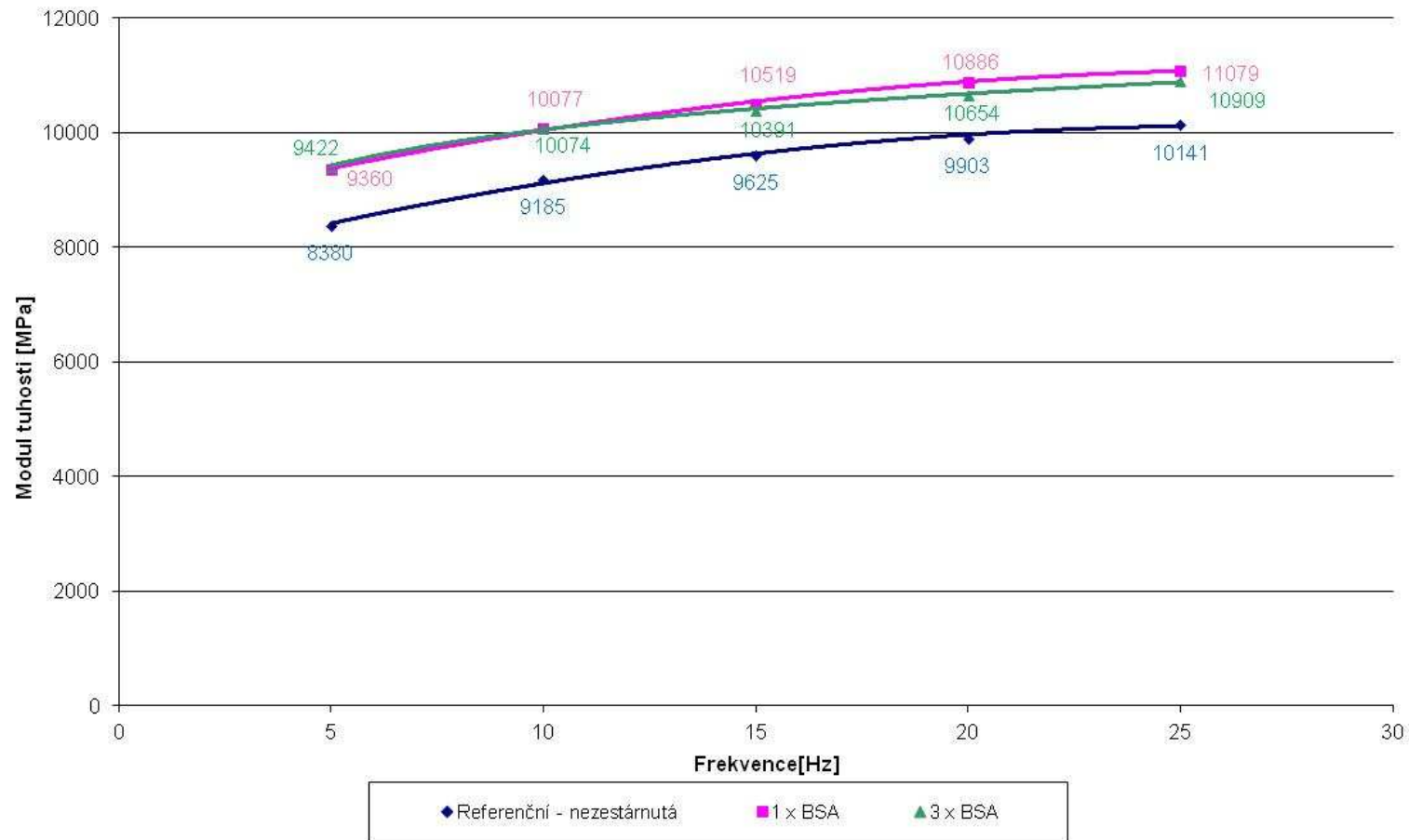
Tabulka 15: Naměřené moduly tuhosti u směsi 3

SMĚS 3	MODUL TUHOSTI PŘI 15 °C				
	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz
REF	5810	6472	6836	7100	7319
BSA	7060	7724	8104	8357	8541
3XBSA	7068	7631,8	7993	8256	8458

Tabulka 16: Naměřené moduly tuhosti u směsi 4

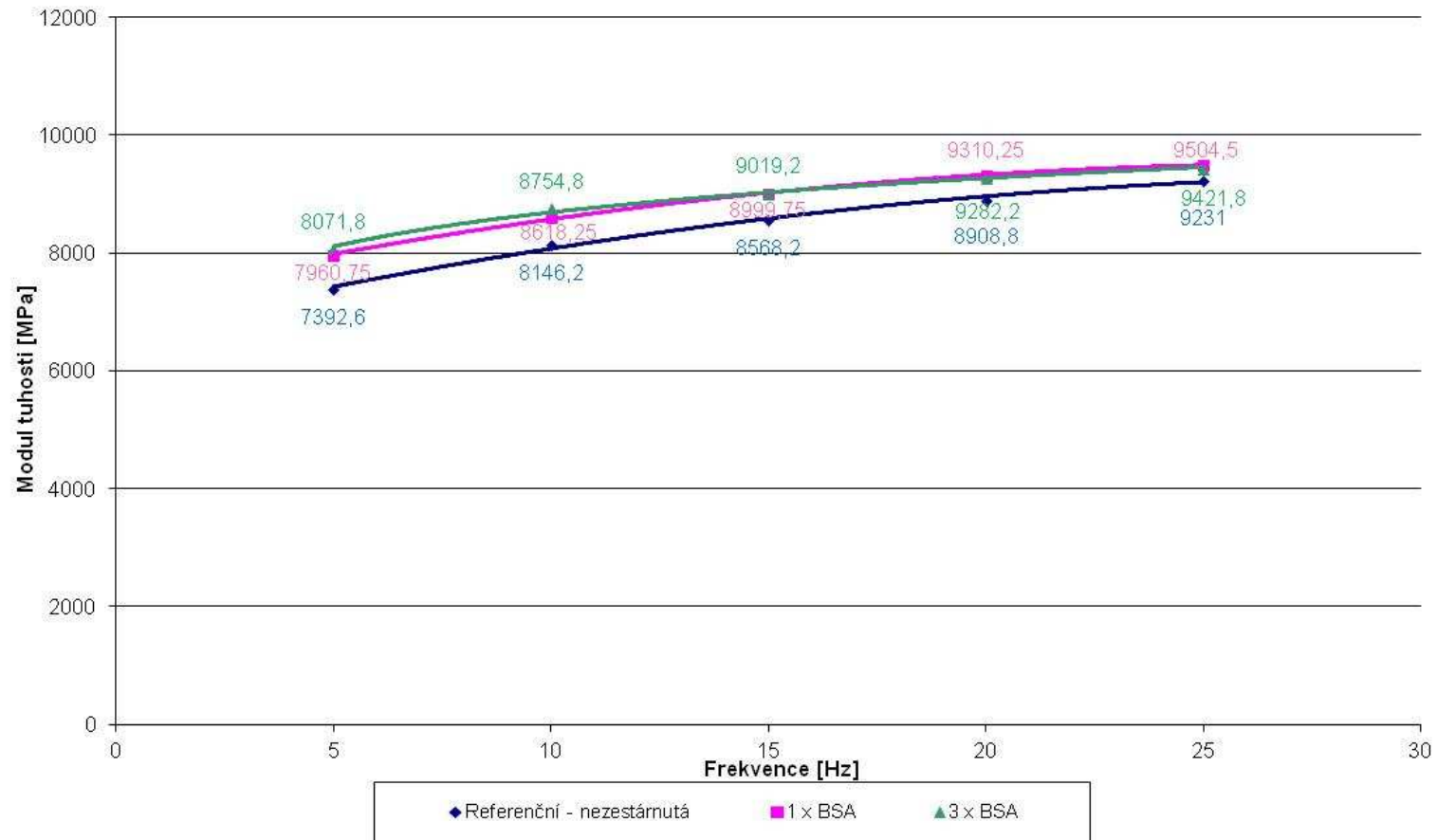
SMĚS 4	MODUL TUHOSTI PŘI 15 °C				
	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz
REF	8037	8878	9321	9720	9862
BSA	8810	9517	9890	10178	10406
3XBSA	9753	10465	10883	11171	11365

Modul tuhosti při 15°C - Směs 1



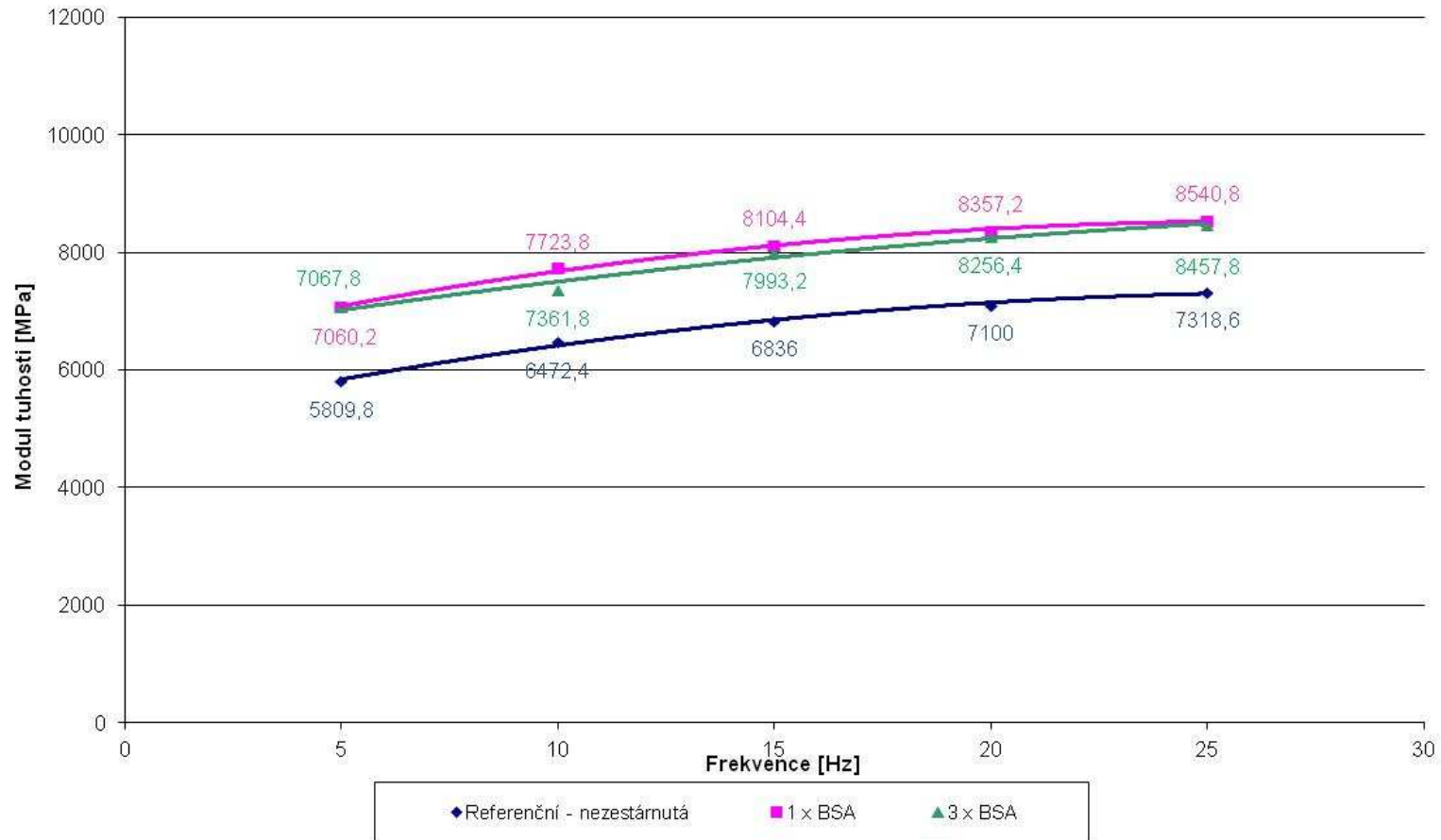
Graf 1: Moduly tuhosti směsi 1 při teplotě 15°C.

Modul tuhosti při 15°C - Směs 2



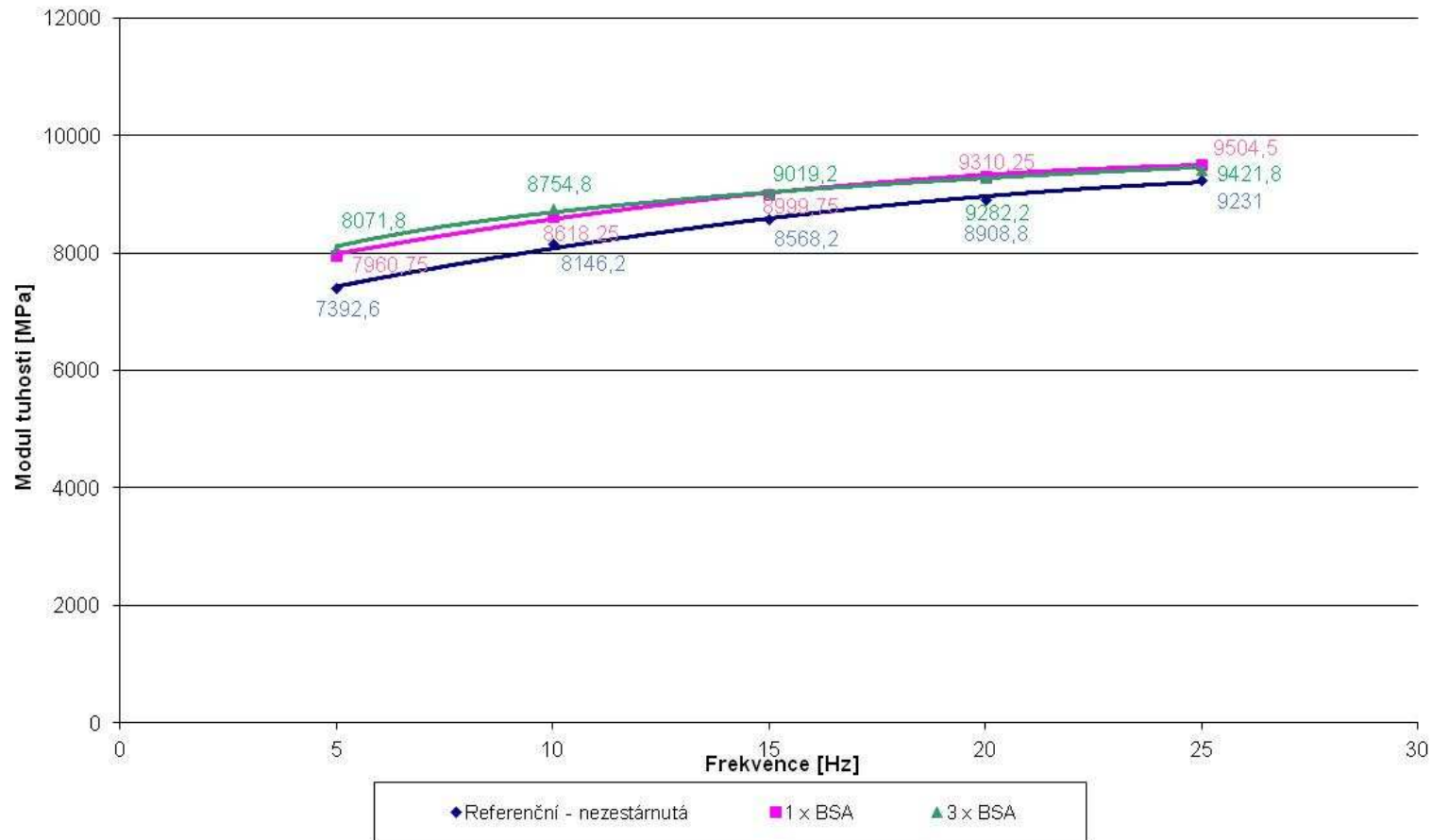
Graf 2: Moduly tuhosti směsi 2 při teplotě 15°C.

Modul tuhosti při 15°C - Směs 3

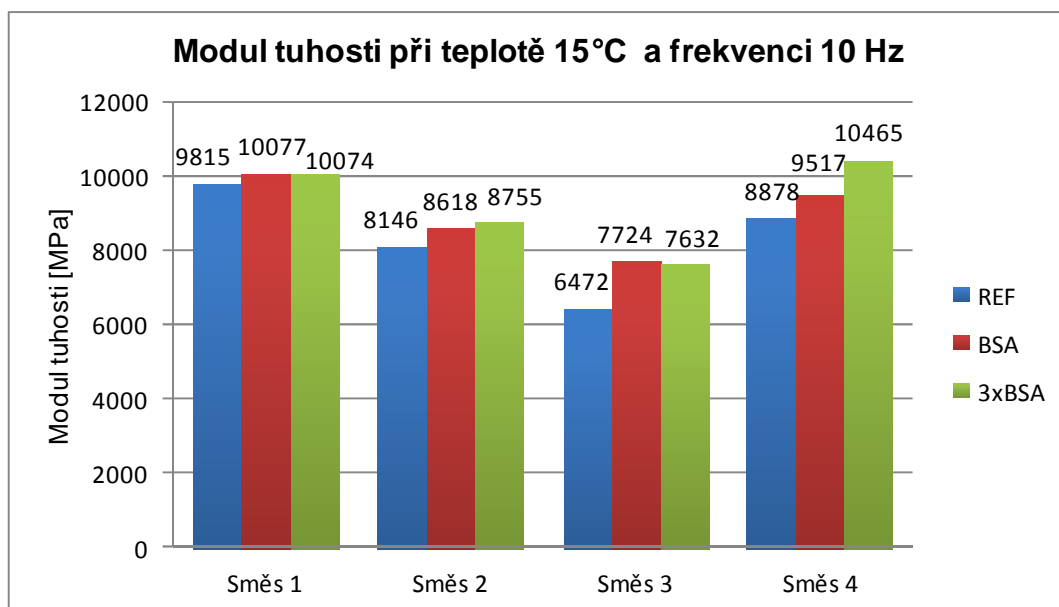


Graf 3: Moduly tuhosti směsi 3 při teplotě 15°C.

Modul tuhosti při 15°C - Směs 4



Graf 4: Moduly tuhosti směsi 4 při teplotě 15°C.



Graf 5: Porovnání modulů tuhostí jednotlivých směsí při teplotě 15°C a frekvenci zatěžování 10 Hz.

Z výsledků je patrné, že komplexní moduly tuhosti jednotlivých směsí se nacházely v poměrně širokém rozsahu (6472 MPa až 9185 MPa při frekvenci 10 Hz). Při měření bylo možné zaznamenat jasně patrnou závislost hodnoty modulu tuhosti na frekvenci – se zvyšující se frekvencí docházelo ke zvýšení komplexních modulů všech směsí. Při stárnutí metodou BSA dojde ke zvýšení komplexních modulů tuhosti všech směsí v rozmezí 2,6 % až 19,3 % oproti odpovídajícím referenčním směsím. Prodloužené stárnutí metodou 3 x BSA již na hodnotu komplexního modulu tuhosti asphaltových směsí nemělo přesvědčivý vliv.

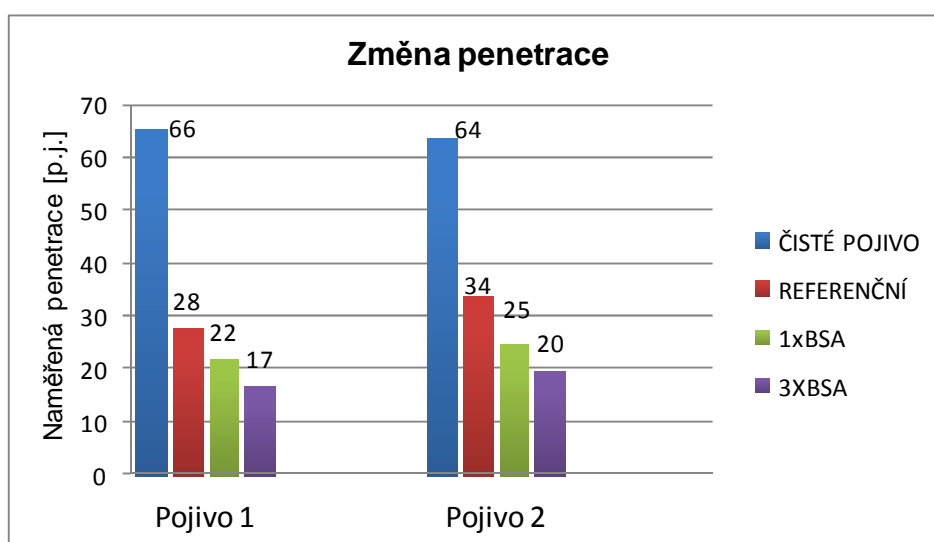
4.2 Penetrace

Penetrace byla měřena dle ČSN EN 1426 – Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou. Naměřené hodnoty jsou zaznamenány níže.

Tabulka 17: Naměřené hodnoty penetrace u asf. pojiva 1 a 2.

Změna penetrace [p.j.]		
	Pojivo 1	Pojivo 2
ČISTÉ POJIVO	66	64
REFERENČNÍ POJIVO	28	34
BSA	22	25
3XBSA	17	20

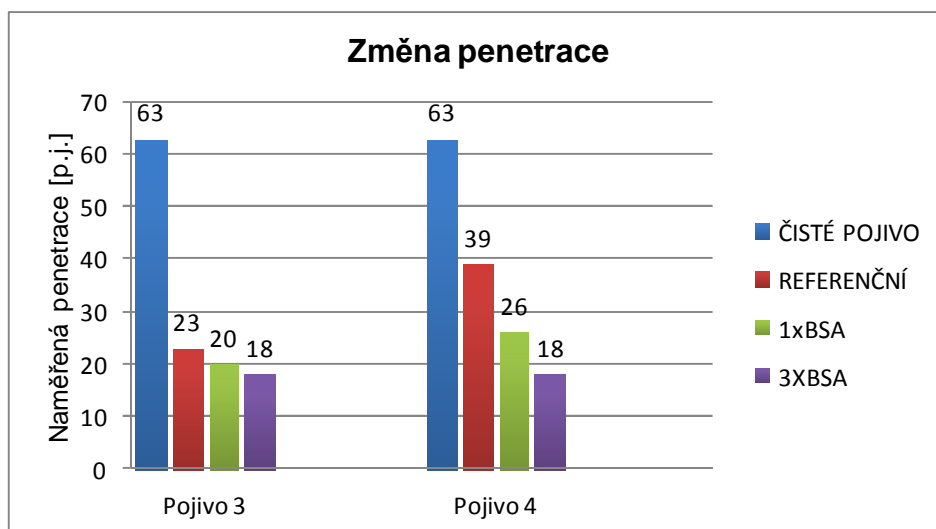
Pozn.: „Čisté pojivo“ je označení pro použitý silniční asfalt před vyrobením asfaltové směsi a „referenční pojivo“ je označení pro vydestilovaný asfalt z asfaltové směsi.



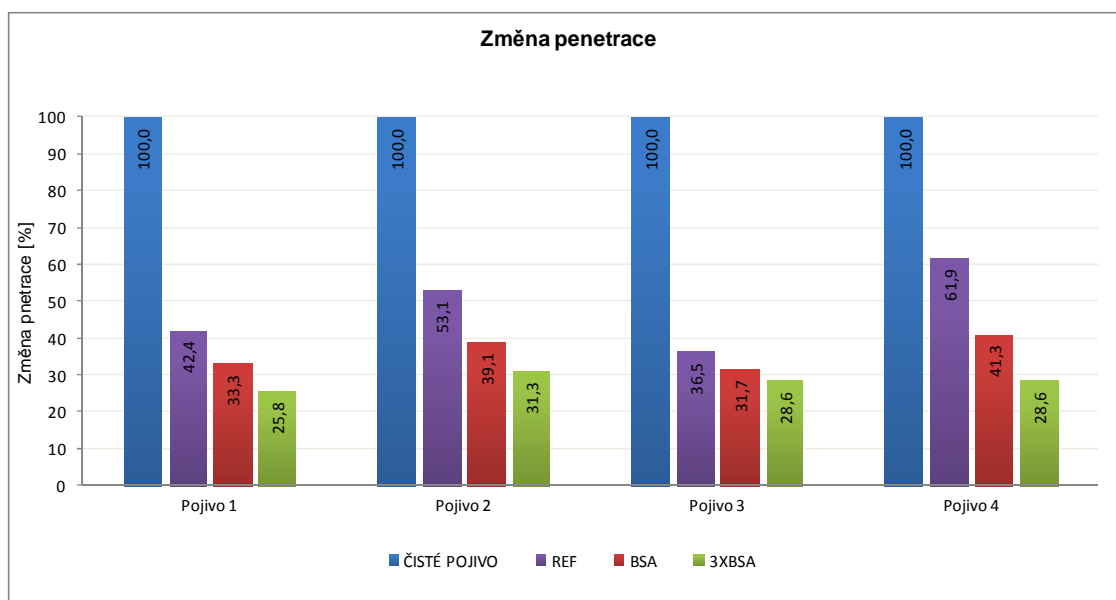
Graf 6: Naměřené hodnoty penetrace u asf. pojiva 1 a 2.

Tabulka 18: Naměřené hodnoty penetrace u asf. pojiva 3 a 4.

Změna penetrace [p.j.]		
	Pojivo 3	Pojivo 4
ČISTÉ POJIVO	63	63
REFERENČNÍ POJIVO	23	39
BSA	20	26
3XBSA	18	18



Graf 7: Naměřené hodnoty penetrace u asf. pojiva 3 a 4.



Graf 8: Pokles penetrace.

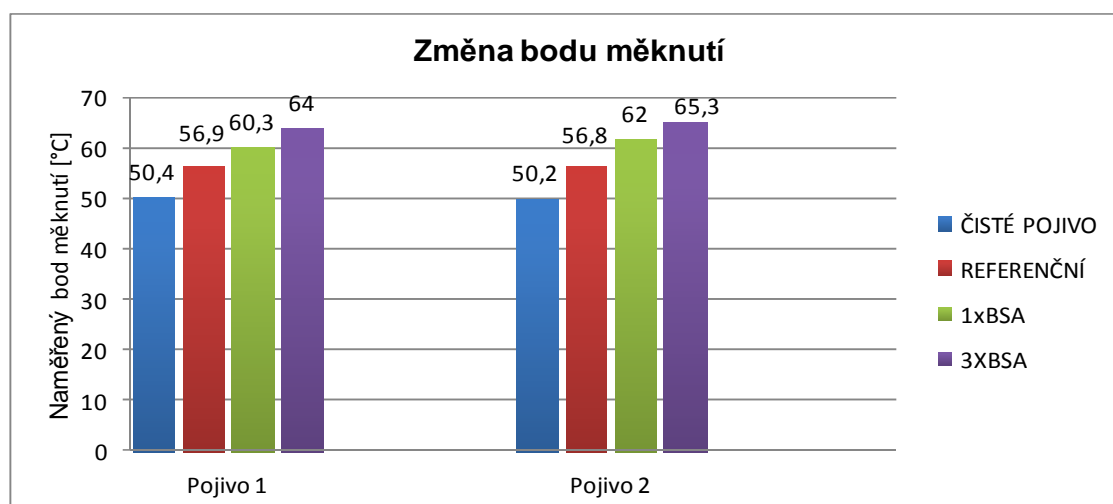
Penetrace silničních asfaltů použitých pro výrobu asfaltové směsi gradace 50/70 se pohybovala v úzkém rozmezí 63 (0,1 mm) až 66 (0,1 mm). Výrobou asfaltové směsi došlo k poklesu hodnoty penetrace na 23 (0,1 mm) až 39 (0,1 mm), tzn. pojivo zestárlo o jednu až o dvě gradace. Nejvíce zestárlo pojivo při výrobě asfaltové směsi 3. Stárnutím BSA a 3 x BSA došlo k dalšímu snížení hodnoty penetrace všech pojiv.

4.3 Bod měknutí

Stanovení bodu měknutí metodou kroužek-kulička se provádí podle ČSN EN 1427 - Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička.

Tabulka 19: Naměřené hodnoty bodu měknutí u asf. pojiva 1 a 2

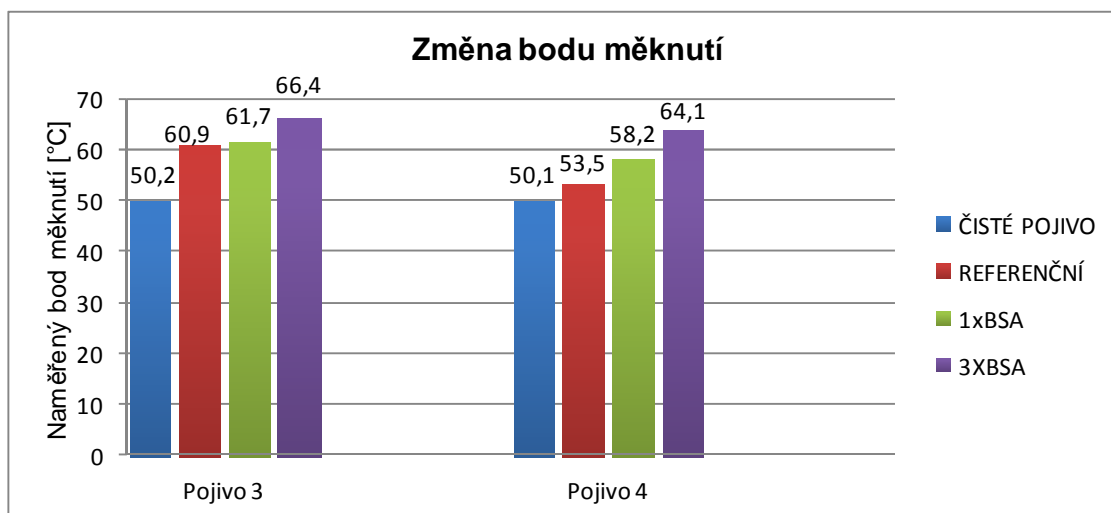
Změna bodu měknutí [°C]		
	Pojivo 1	Pojivo 2
ČISTÉ POJIVO	50,4	50,2
REFERENČNÍ POJIVO	56,9	56,8
BSA	60,3	62
3XBSA	64	65,3



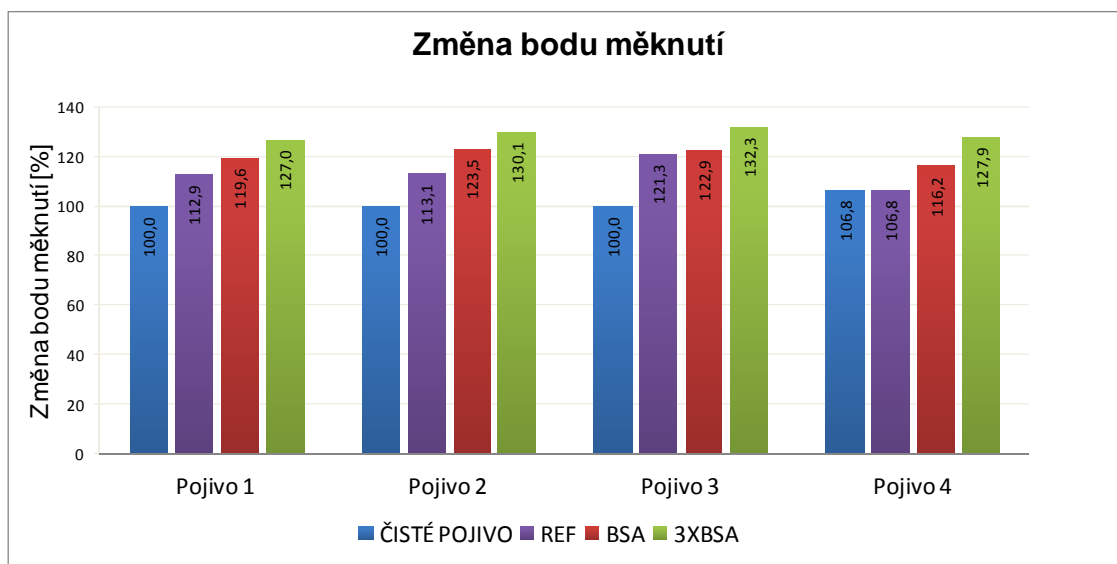
Graf 9: Naměřené hodnoty bodu měknutí asf. pojiva 1 a 2.

Tabulka 20: Naměřené hodnoty bodu měknutí u asf. pojiva 3 a 4.

Změna bodu měknutí [°C]		
	Pojivo 3	pojivo 4
ČISTÉ POJIVO	50,2	50,1
REFERENČNÍ POJIVO	60,9	53,5
BSA	61,7	58,2
3XBSA	66,4	64,1



Graf 10: Naměřené hodnoty bodu měknutí u asf. pojiva 3 a 4.



Graf 11: Zvýšení bodu měknutí.

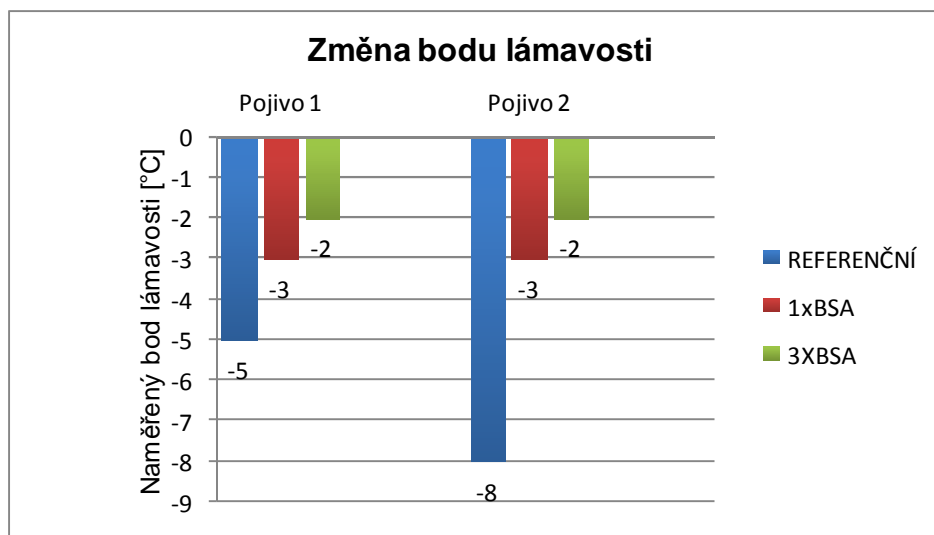
Počáteční hodnota bodu měknutí všech pojiv se nacházela mírně nad 50 °C. Výrobou asfaltové směsi na obalovně došlo ke zvýšení bodu měknutí o cca 3 °C až 11 °C, přičemž nejvíce se zvýšil bod měknutí pojiva získaného ze směsi 3, což odpovídá výsledkům penetrace jehlou. Stárnutím BSE došlo k dalšímu zvýšení bodu měknutí o 1,6 % až 9,4 % a stárnutím BSE o dalších 6,6 % až 11,7 %.

4.3 Bod lámavosti

Bod lámavosti podle Fraasseho byl stanoven dle ČSN EN 12593.

Tabulka 21: Naměřené hodnoty bodu lámavosti u asf. pojiva 1 a 2.

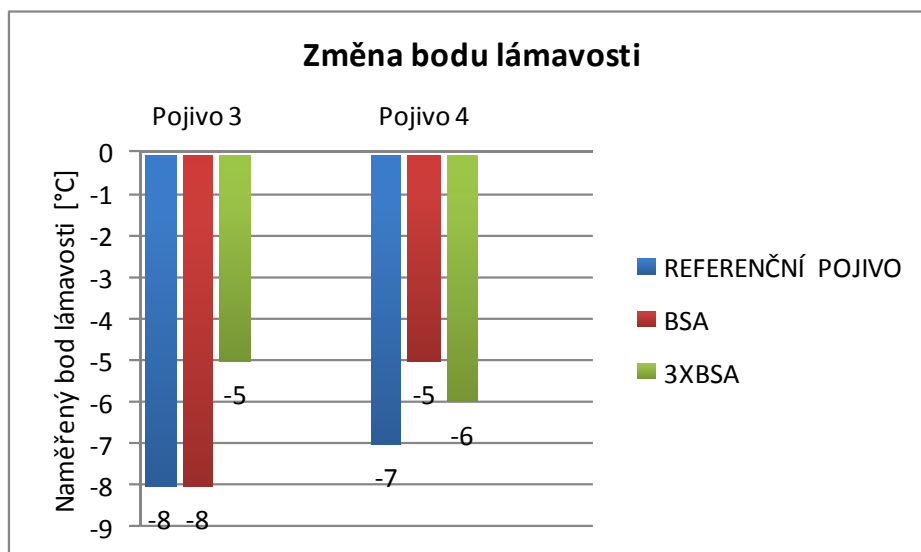
Změna bodu lámavosti [°C]		
	Pojivo 1	pojivo 2
REFERENČNÍ POJIVO	-5	-8
BSA	-3	-3
3XBSA	-2	-2



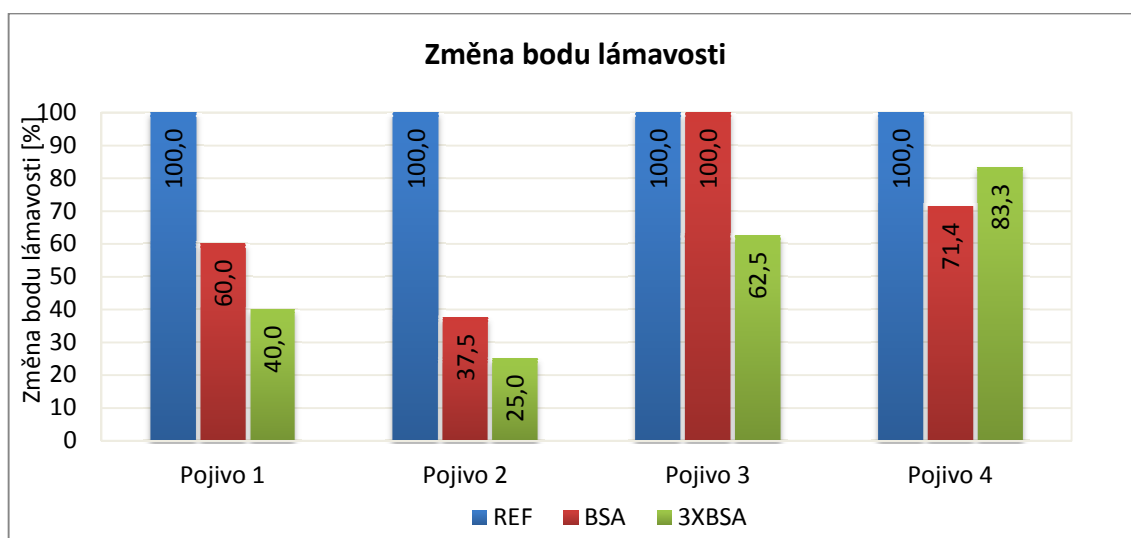
Graf 12: Naměřené hodnoty bodu lámavosti u pojiva 1 a 2.

Tabulka22: Naměřené hodnoty bodu lámavosti u směsi 3 a 4.

Změna bodu lámavosti [°C]		
	Pojivo 3	pojivo 4
REFERENČNÍ POJIVO	-8	-7
BSA	-8	-5
3XBSA	-5	-5



Graf 13: Naměřené hodnoty bodu lámavosti u pojiva 3 a 4.



Graf 14: Snížení bodu lámavosti.

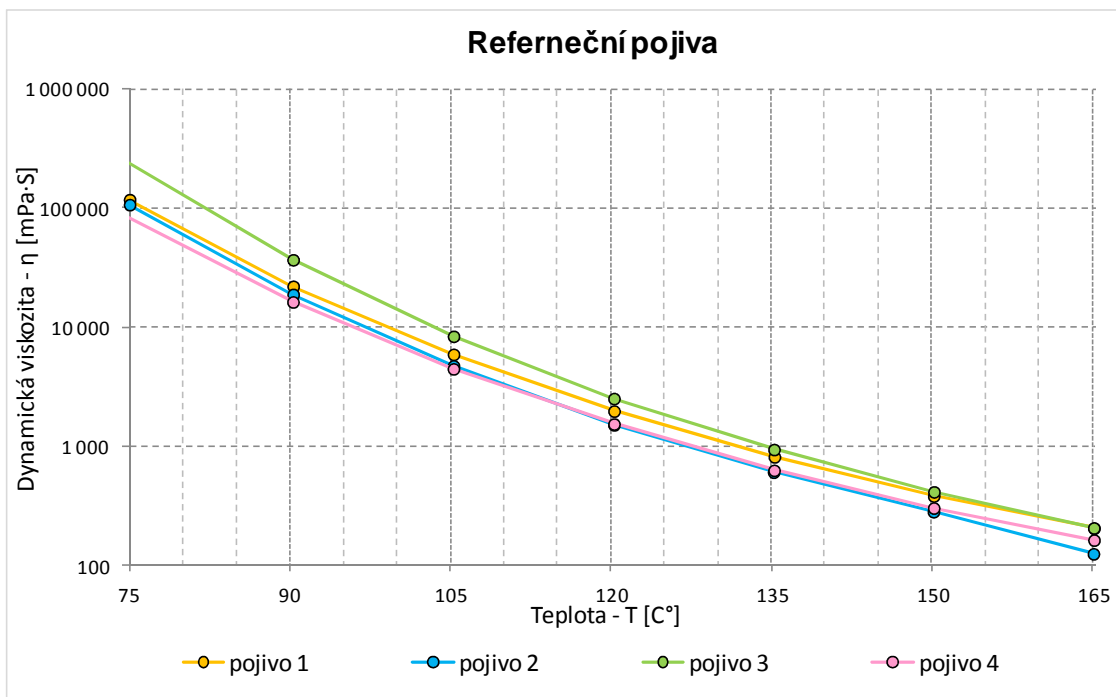
Stárnutím BSA došlo k dalšímu snížení bodu lámavosti o 28,6% až 40%. Pojivo 3 nevykázalo stárnutím BSA žádné změny Trojnásobné BSA nemá na bod lámavosti zásadní vliv.

4.4 Dynamická viskozita v DSR

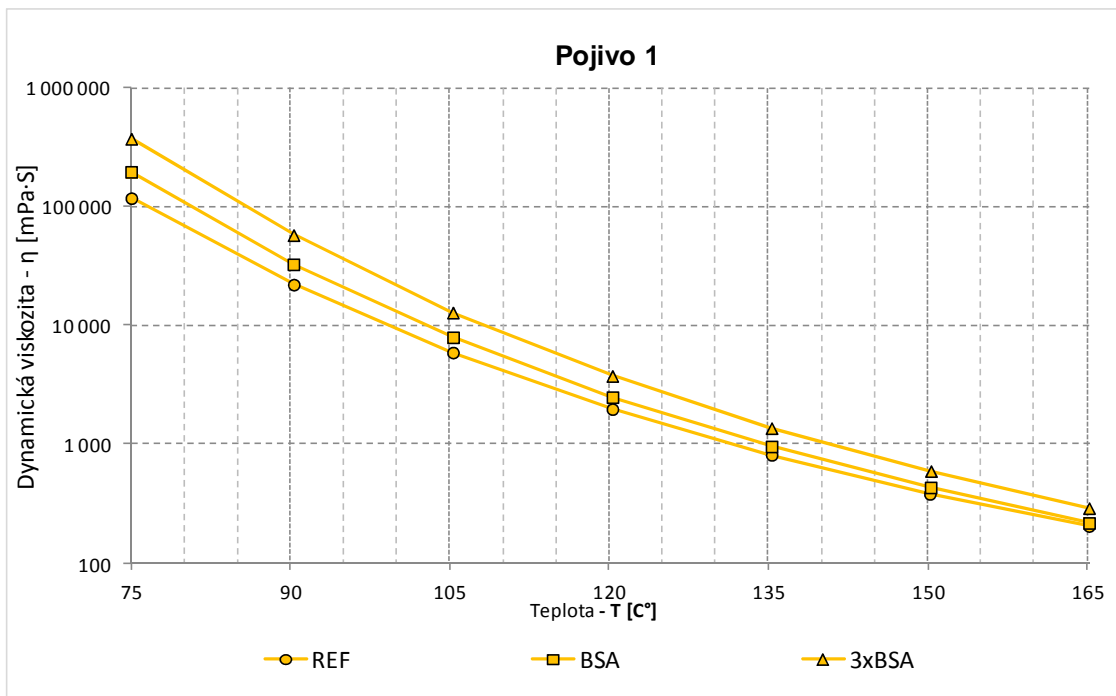
Viskozita srovnávaných pojiv byla měřena v DSR při teplotách 75 °C až 165 °C s krokem 15 °C a při smykové rychlosti 1 s⁻¹ až 100 s⁻¹ pomocí geometrie kužel deska o průměru 40 mm a s úhlem stoupání kužele 4 °. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 20 a závislost viskozity na teplotě jednotlivých pojiv při smykové rychlosti 1,0 s⁻¹ jsou zachyceny v grafech 15 až 19. Teplotní závislost dynamické viskozity vykazuje silně logaritmický průběh. Pojiva zestárnutá postupem BSA vykazala vyšší hodnoty viskozit než odpovídající nezestárlá pojiva a nejvyšších hodnot viskozity dosáhly silniční asfalty zestárlé trojnásobným BSA.

Tabulka 23: Naměřené hodnoty dynamických viskozit jednotlivých pojiv při smykové rychlosti 1,0 s⁻¹

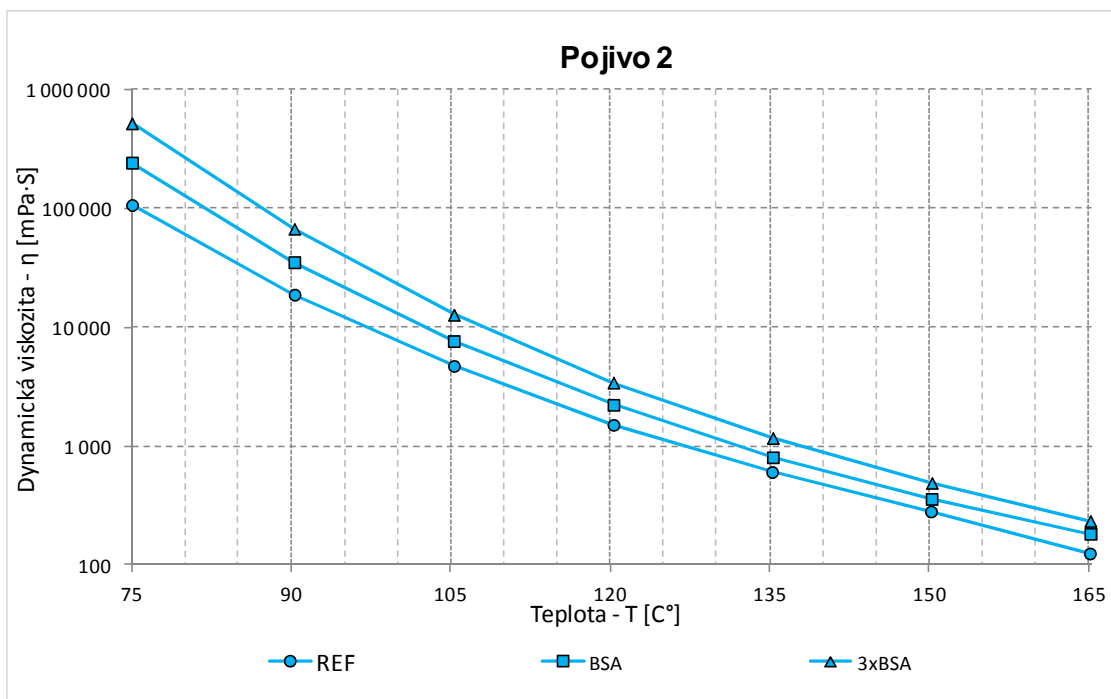
	Pojivo 1			Pojivo 2		
	Referenční	BSA	3xBSA	Referenční	BSA	3xBSA
T [°C]	η [mPa·s]			η [mPa·s]		
75	117 704	195 896	372 389	106 947	243 066	520 047
90	22 043	32 702	57 533	18 830	35 332	67 450
105	5 911	7 928	12 839	4 730	7 672	12 748
120	1 975	2 493	3 759	1 511	2 223	3 429
135	814	958	1 367	606	805	1 172
150	382	432	594	282	359	490
165	205	218	290	125	183	235
	Pojivo 3			Pojivo 4		
	Referenční	BSA	3xBSA	Referenční	BSA	3xBSA
T [°C]	η [mPa·s]			η [mPa·s]		
75	233 675	249 340	527 693	81 961	156 532	371 538
90	36 774	38 832	72 886	16 288	28 182	80 809
105	8 383	8 835	14 909	4 465	7 191	12 855
120	2 515	2 634	4 103	1 537	2 310	3 819
135	939	980	1 418	628	898	1 382
150	414	437	602	303	417	602
165	206	214	293	163	212	297



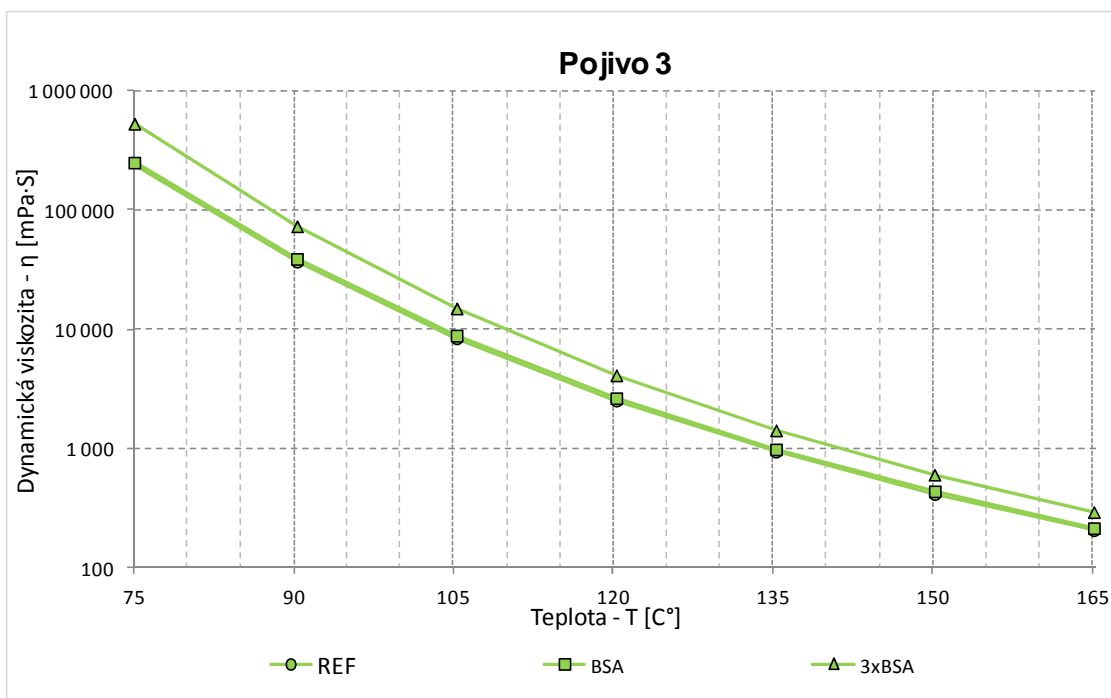
Graf 15: Srovnání závislosti dynamické viskozity na teplotě u referenčních pojiv.



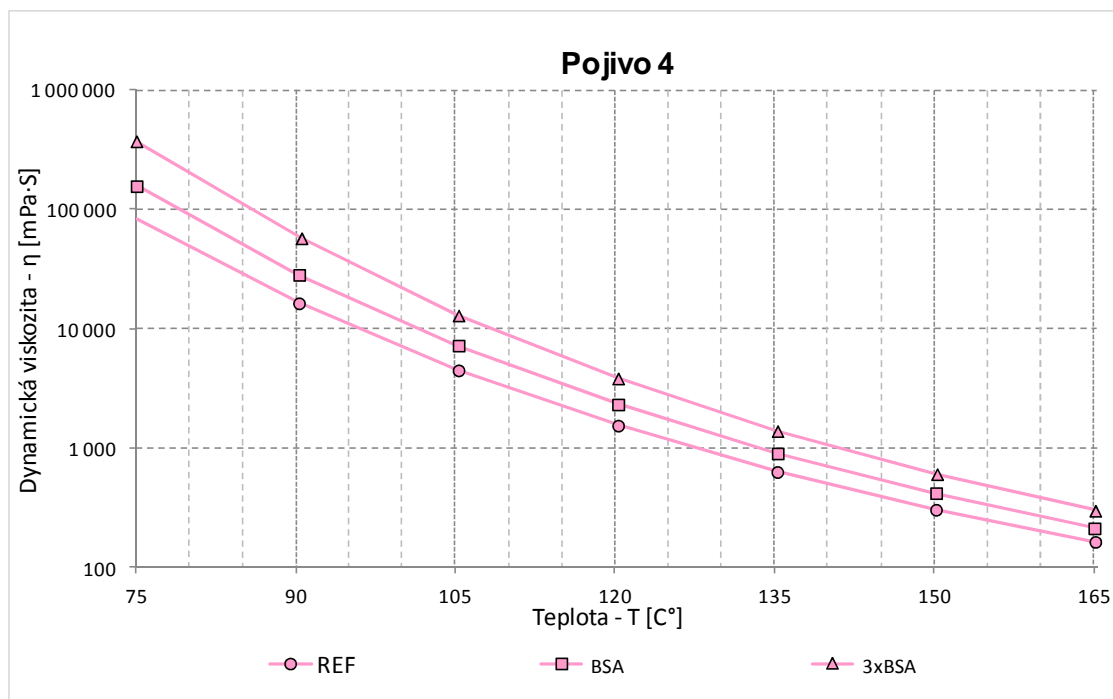
Graf 16: Závislost dynamické viskozity na teplotě u pojiva 1



Graf 17: Závislost dynamické viskozity na teplotě u pojiva 2

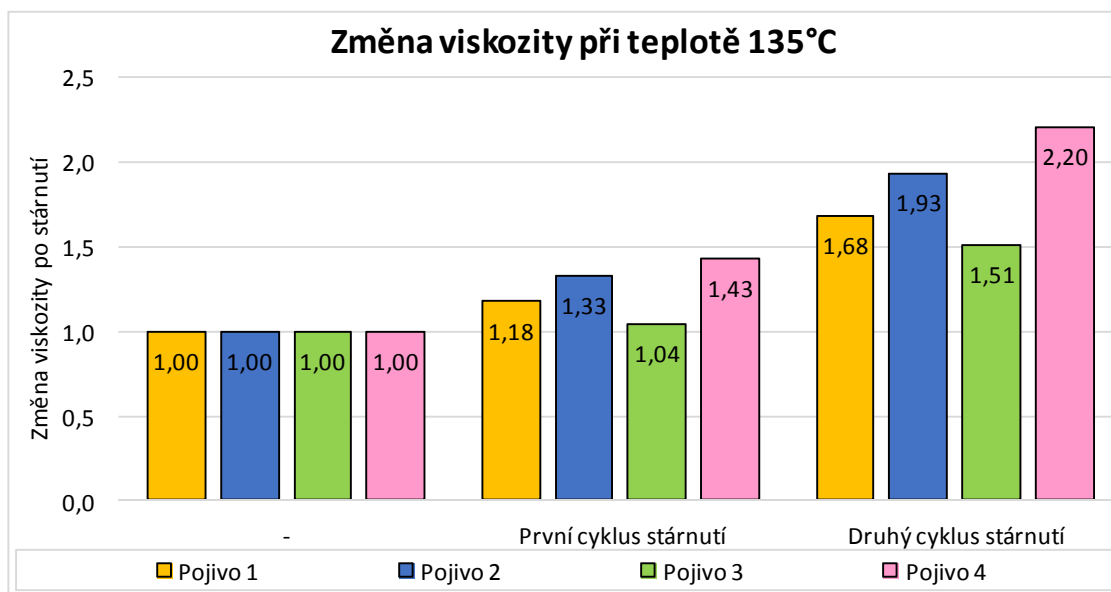


Graf 18: Závislost dynamické viskozity na teplotě u pojiva 3



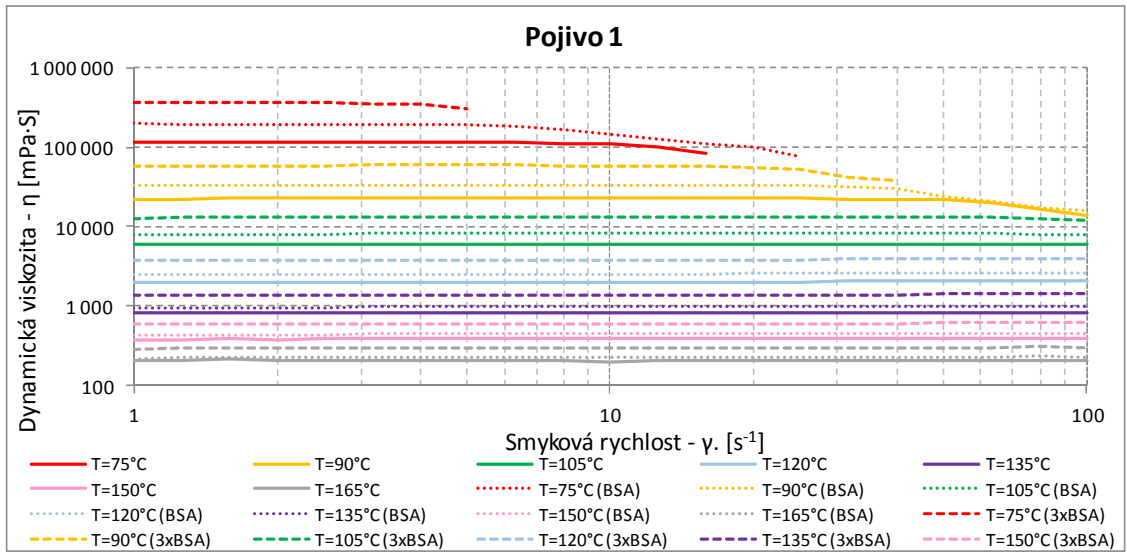
Graf 19: Závislost dynamické viskozity na teplotě při u pojiva 4

Na grafu 20 je zachycena změna hodnoty dynamické viskozity stanovené při teplotě 135 °C a smykové rychlosti 1,0 s⁻¹ srovnávaných pojiv po stárnutí metodou BSA a 3xBSA vyjádřená podílem oproti dynamické viskozitě odpovídajícího nezestárlého pojiva. Z obrázku je patrné, že zvláště postup stárnutí 3xBSA dokáže dobře odlišit náchylnost ke změně dynamické viskozity stárnutím kombinovaným účinkem tepla a vzduchu, protože rozdíly mezi jednotlivými výsledky jsou vyšší.

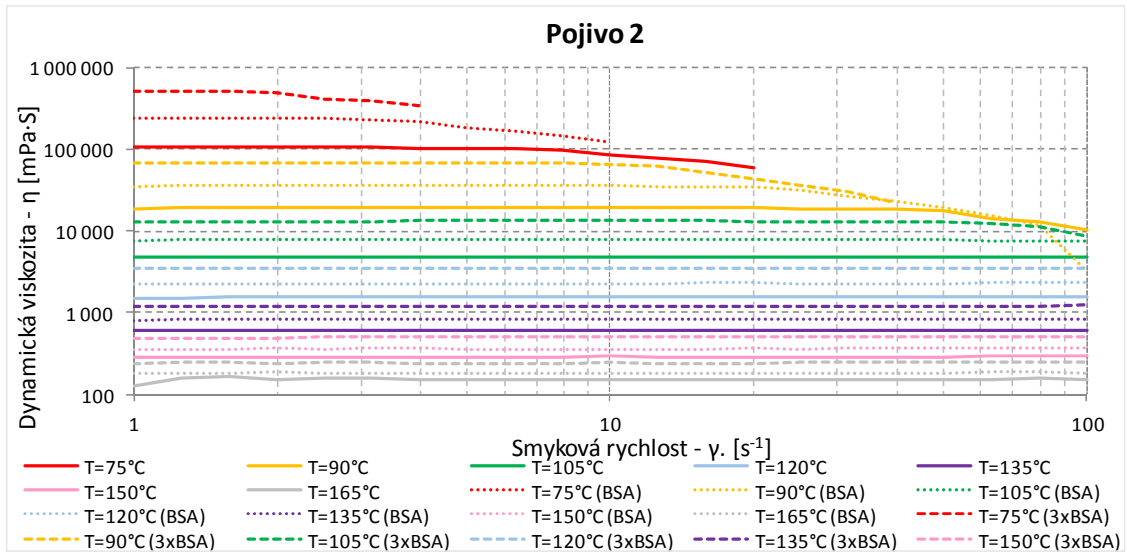


Graf 20: Nárůst dynamické viskozity u jednotlivých pojiv.

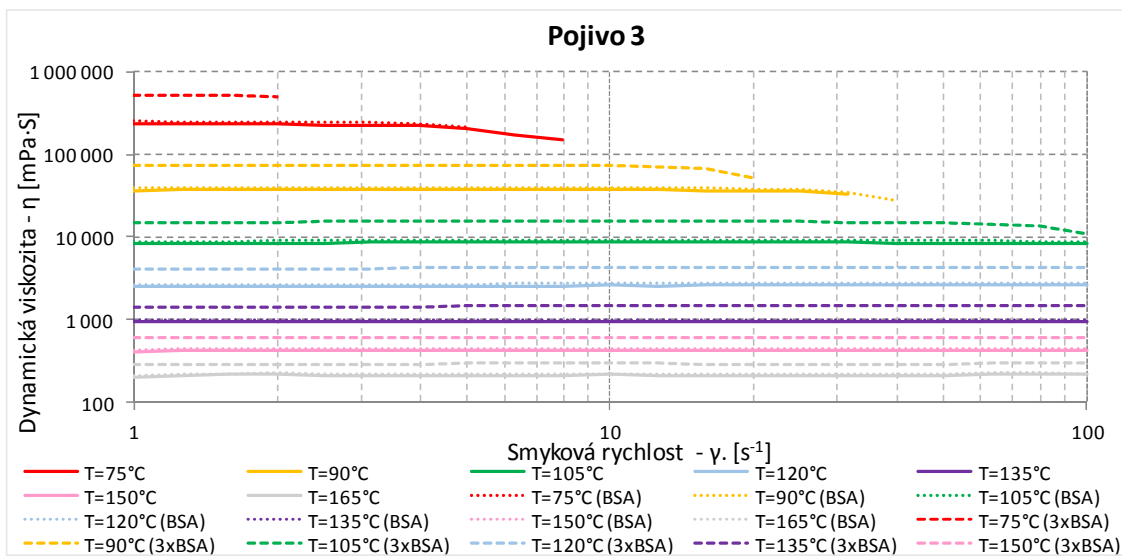
V grafech 21 až 24 je zachycena závislost dynamické viskozity na smykové rychlosti při teplotách 75 °C až 165 °C u jednotlivých pojiv v četně popisu vlivu stárnutí metodami BSA i 3xBSA. Dynamické viskozity všech zkoušených pojiv jsou nezávislé na smykové rychlosti, a proto lze říct, že vykazují newtonské chování. Při teplotě 75 °C a částečně i 90 °C dochází při rostoucí smykové rychlosti od určité její hodnoty k poklesu dynamické viskozity pojiv (nenewtonské chování), což je způsobeno postupným porušováním vzorku asfaltu.



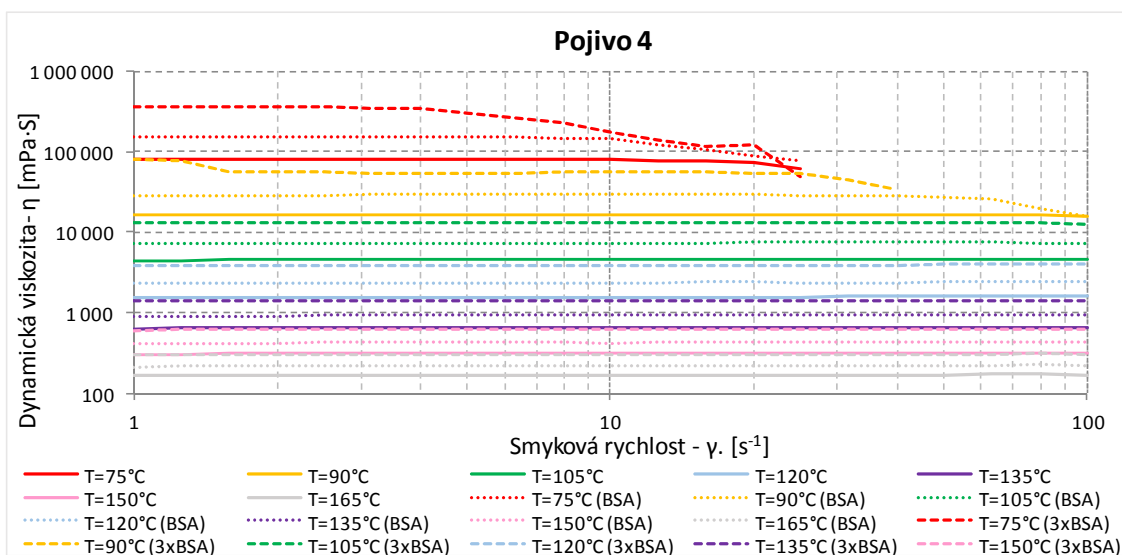
Graf 21: Závislost dynamické viskozity na smykové rychlosti při teplotách 75 až 165 °C u pojiva 1



Graf 22 Závislost dynamické viskozity na smykové rychlosti při teplotách 75 až 165 °C u pojiva 2



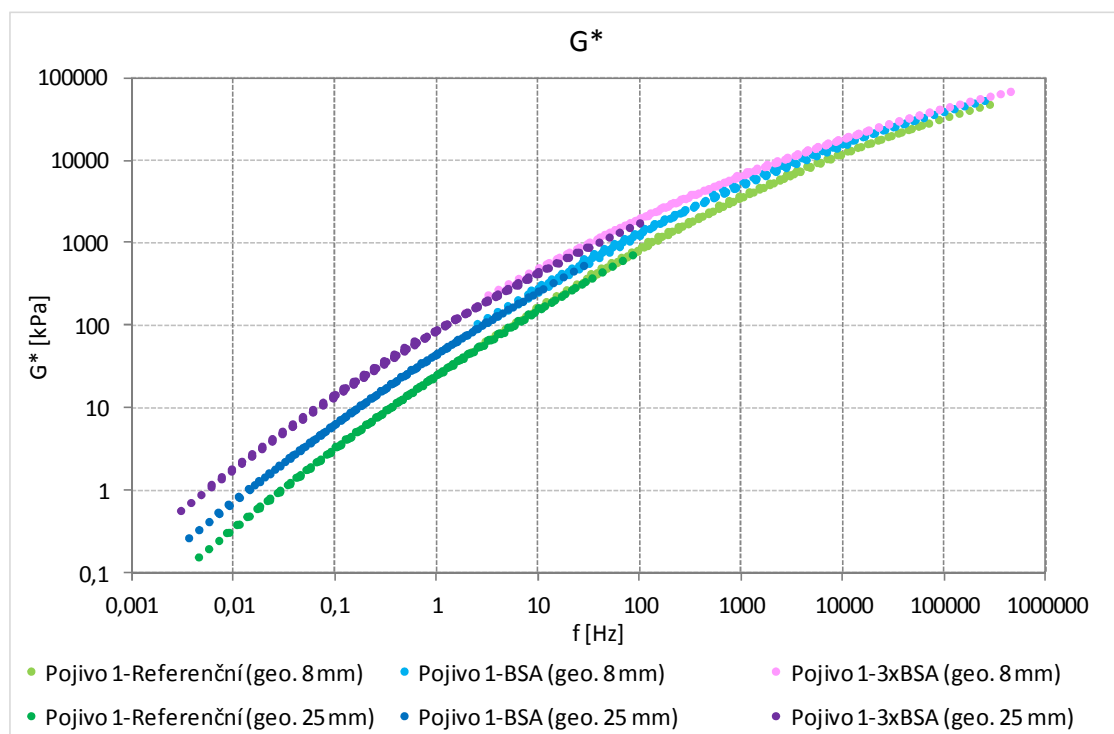
Graf 23: Závislost dynamické viskozity na smykové rychlosti při teplotách 75 až 165 °C u pojiva 3



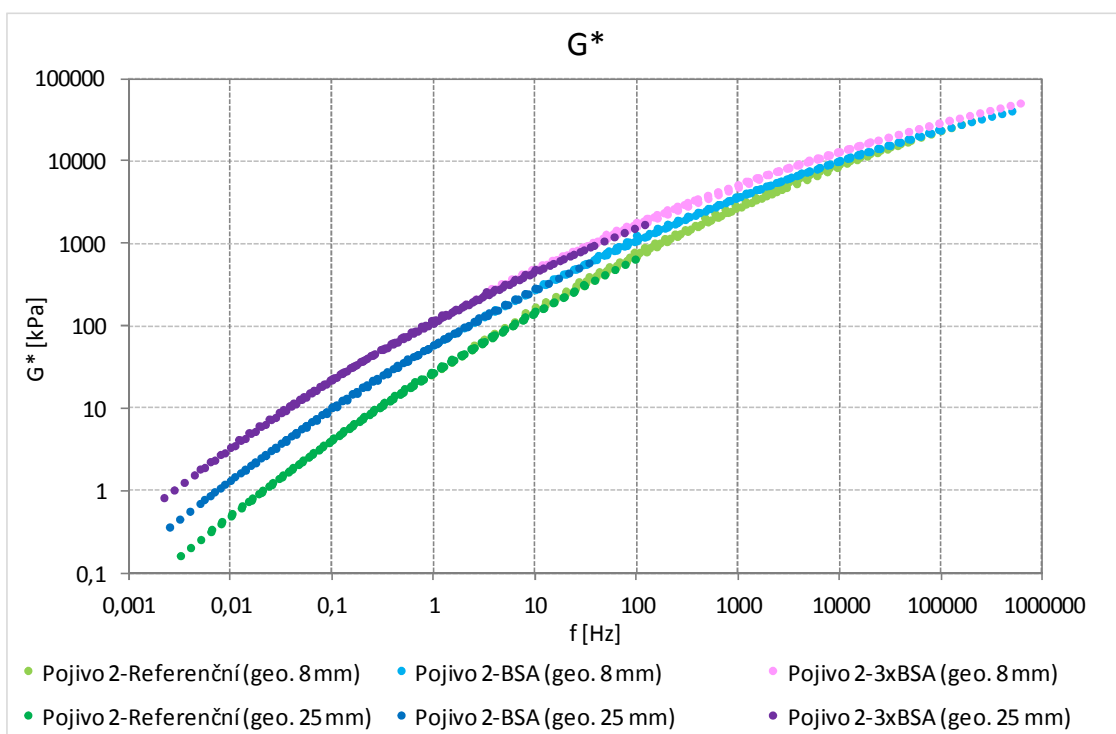
Graf 24: Závislost dynamické viskozity na smykové rychlosti při teplotách 75 až 165 °C u pojiva 4

4.5 Komplexní modul tuhosti a fázový úhel v DSR

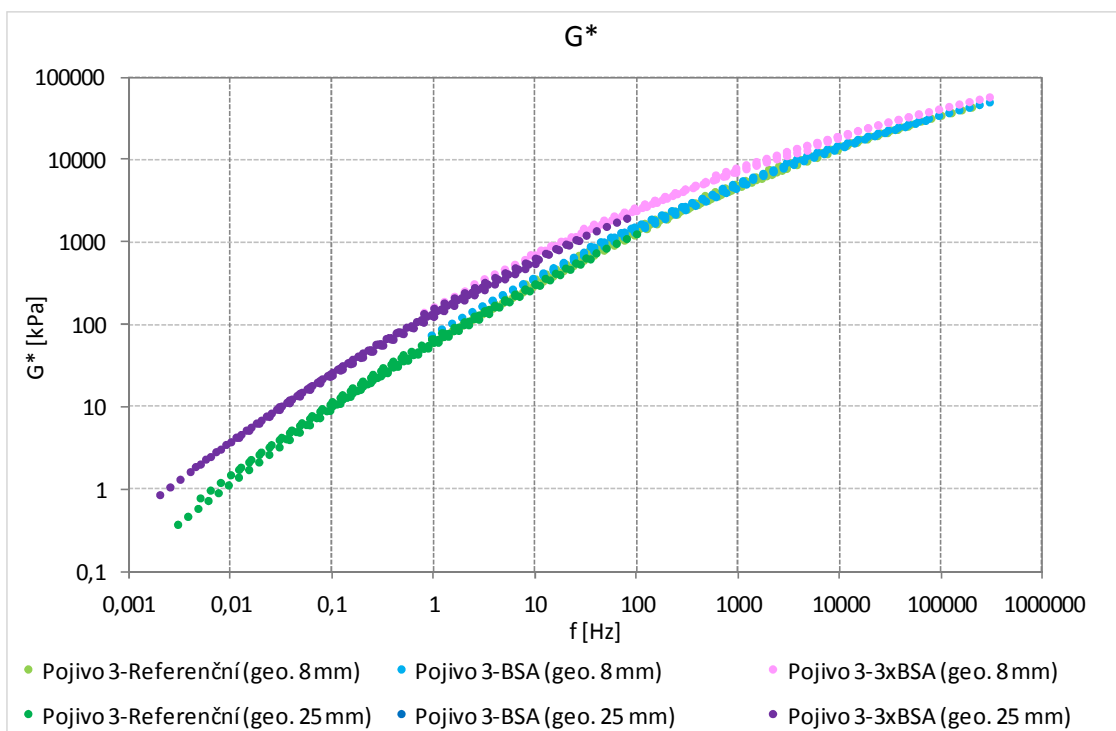
Na pojivech byla provedena reologická měření v oscilaci s řízeným smykovým přetvořením. Byl určen komplexní smykový modul pojiv (G^*), který je znázorněn v grafech 25 až 28. Měření bylo provedeno pro běžně se vyskytující teploty 10 °C, 15 °C, 20 °C, 25 °C, 30 °C, 35 °C, 40 °C, 45 °C, 50 °C, 55 °C, 60 °C, 65 °C a 70 °C. Pojiva zestárnutá postupem BSA v ykázala vyšší hodnoty modulu tuhosti než odpovídající nezestárlá pojiva a nejvyšších hodnot modulu tuhosti dosáhly silniční asfalty zestárlé trojnásobným BSA.



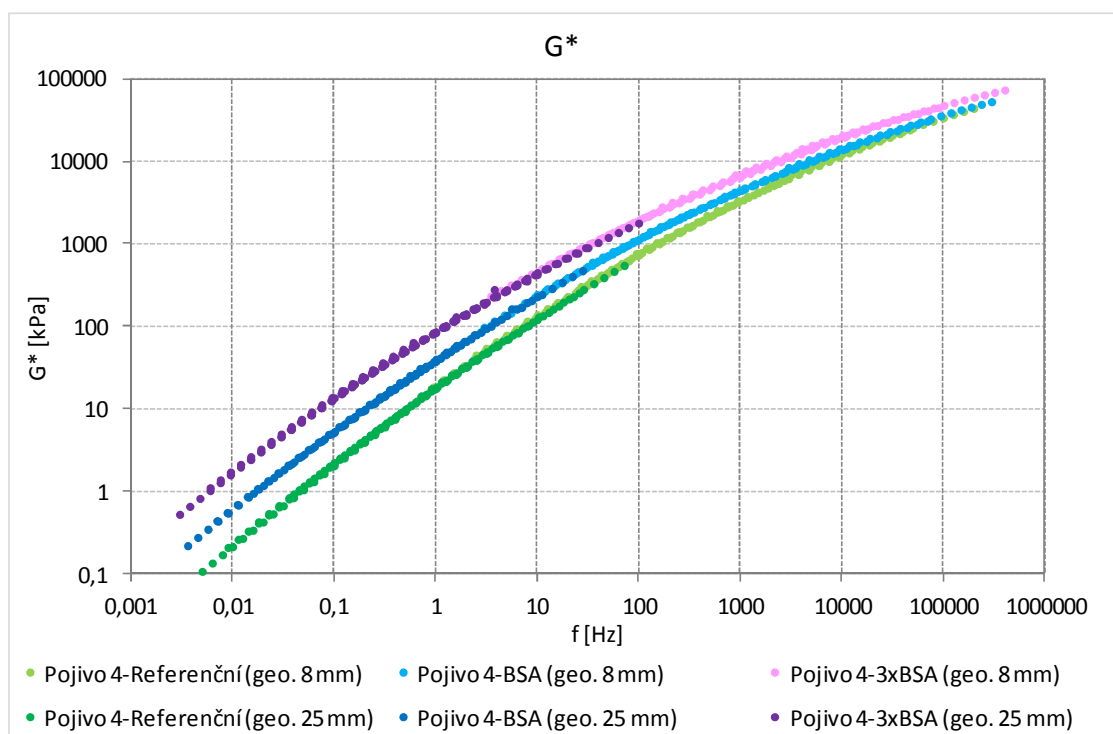
Graf 25: Hlavní křivky komplexního modulu tuhosti u pojiva 1.



Graf 26: Hlavní křivky komplexního modulu tuhosti u pojiva 2.

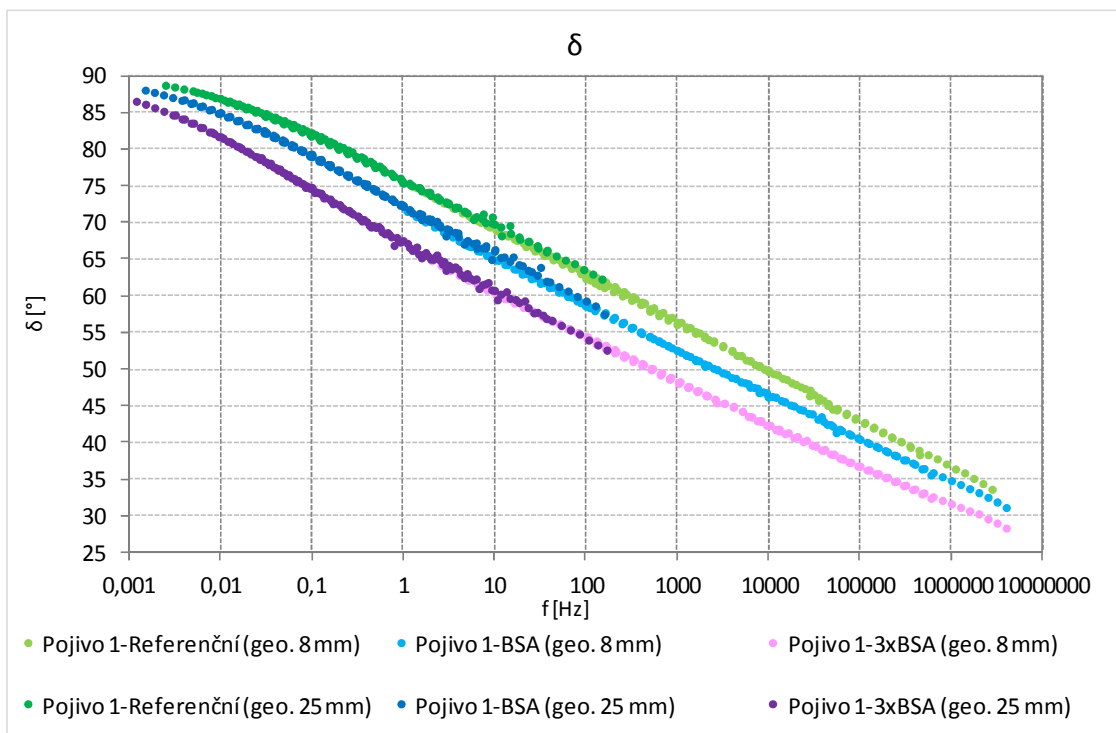


Graf 27: Hlavní křivky komplexního modulu tuhosti u pojiva 3.

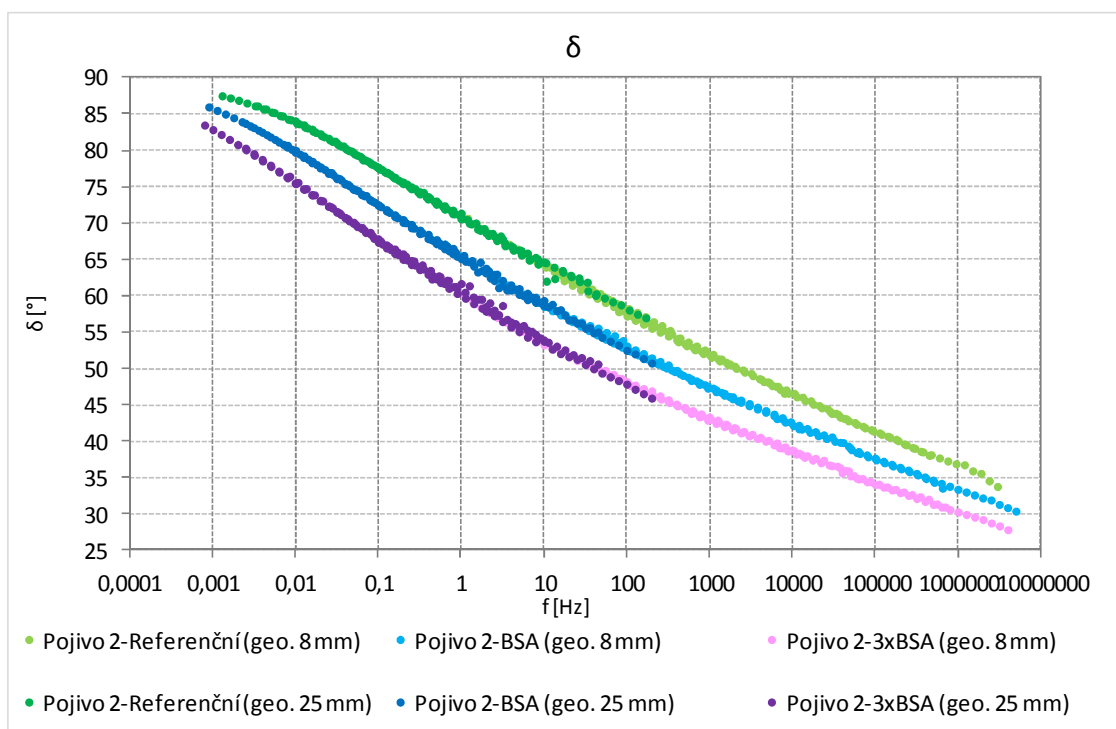


Graf 28: Hlavní křivky komplexního modulu tuhosti u pojiva 4.

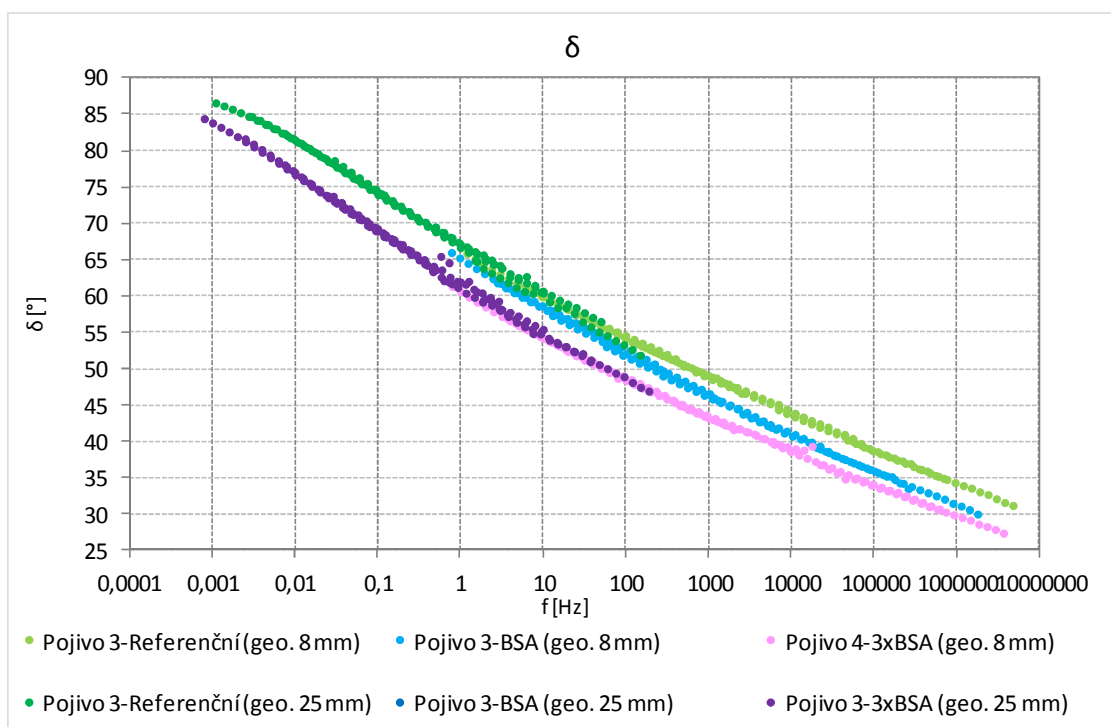
Další měřenou veličinou, vycházející z komplexního modulu tuhosti, je fázový úhel, který je také silně závislý na teplotě a frekvencích zatěžování. Při vysokých teplotách a nízkých frekvencích se asfalt chová jako kapalina, to znamená, že komplexní modul se snižuje a fázový úhel se zvyšuje. V grafech 29 až 32 jsou znázorněny hlavní křivky fázových úhlů jednotlivých pojiv, které jsou seřazeny podle jejich míry stárnutí, přičemž nejmenší fázový úhel má asfaltové pojivo zestárlé 3xBSA a naopak největší fázový úhel vykazuje referenční pojivo. Z grafů je patrné, že nejnižšího zestárnutí metodou BSA a 3xBSA dosáhlo pojivo 3 (hlavní křivky si téměř odpovídají), což potvrzuje výsledky dynamických viskozit. Může to být zapříčiněno tím, že pojivo silně zestárlo již při výrobě asfaltové směsi na obalovně, což je vidět v grafech 7 a 10 a další změny vlastností pojiva při laboratorním stárnutí již nebyly tak patrné.



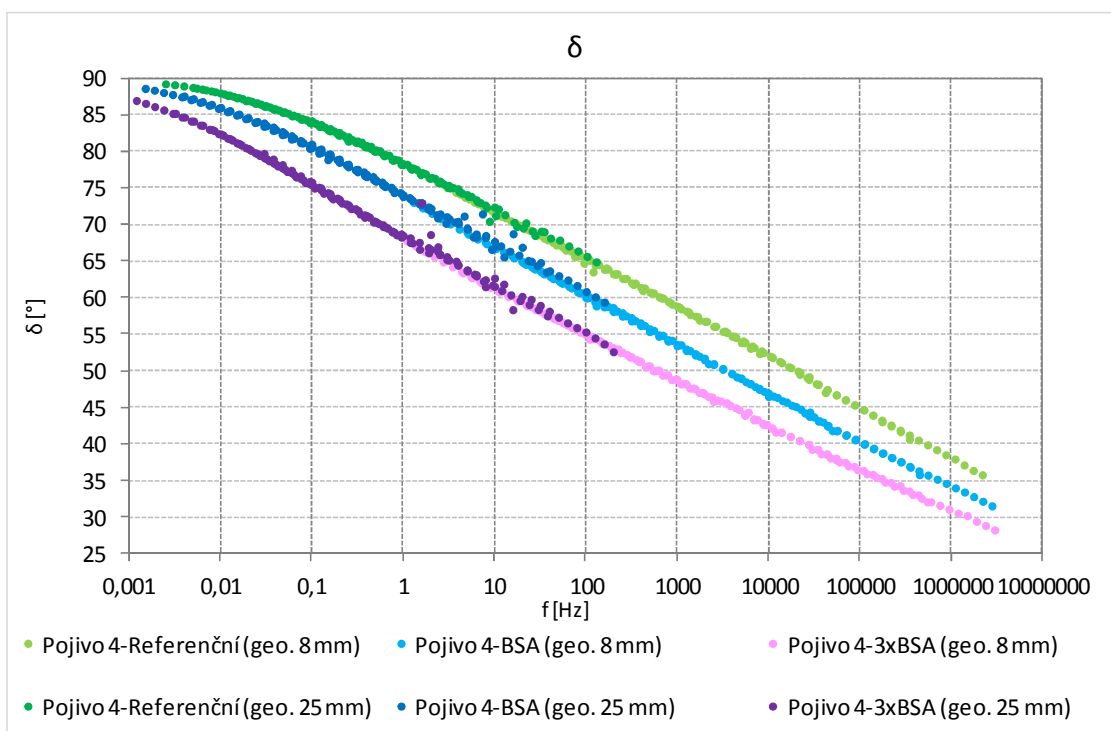
Graf 29: Hlavní křivky fázového úhlu u pojiva 1.



Graf 30: Hlavní křivky fázového úhlu u pojiva 2.

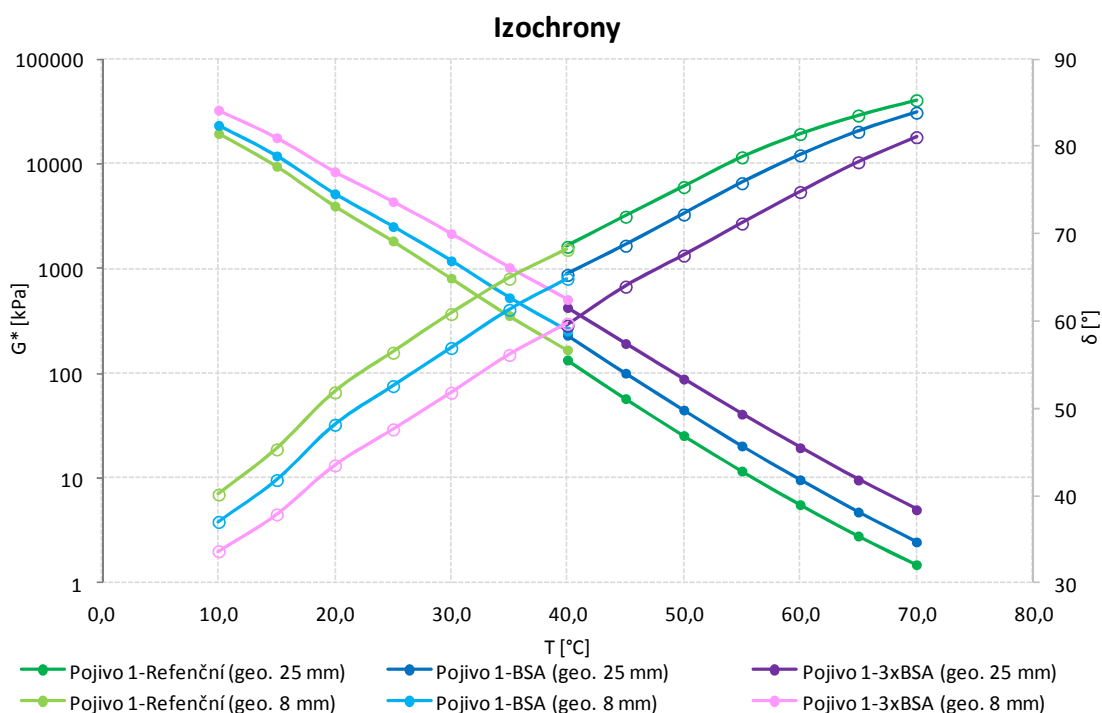


Graf 31: Hlavní křivky fázového úhlu u pojiva 3.

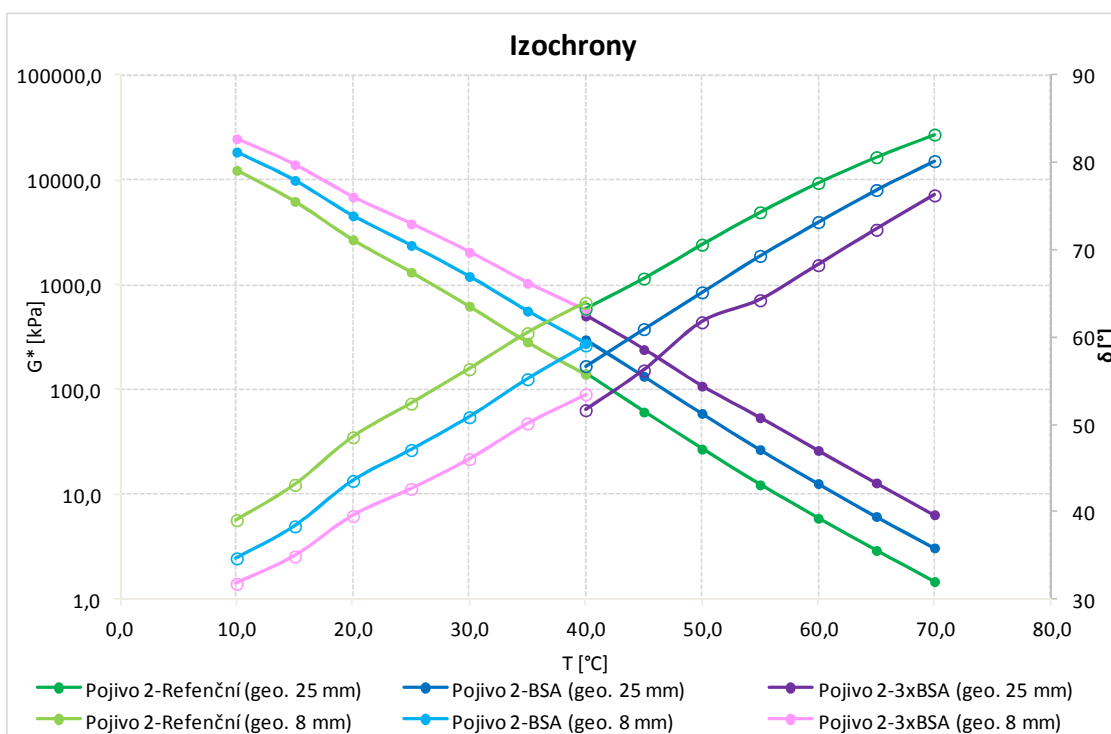


Graf 32: Hlavní křivky fázového úhlu u pojiva 4.

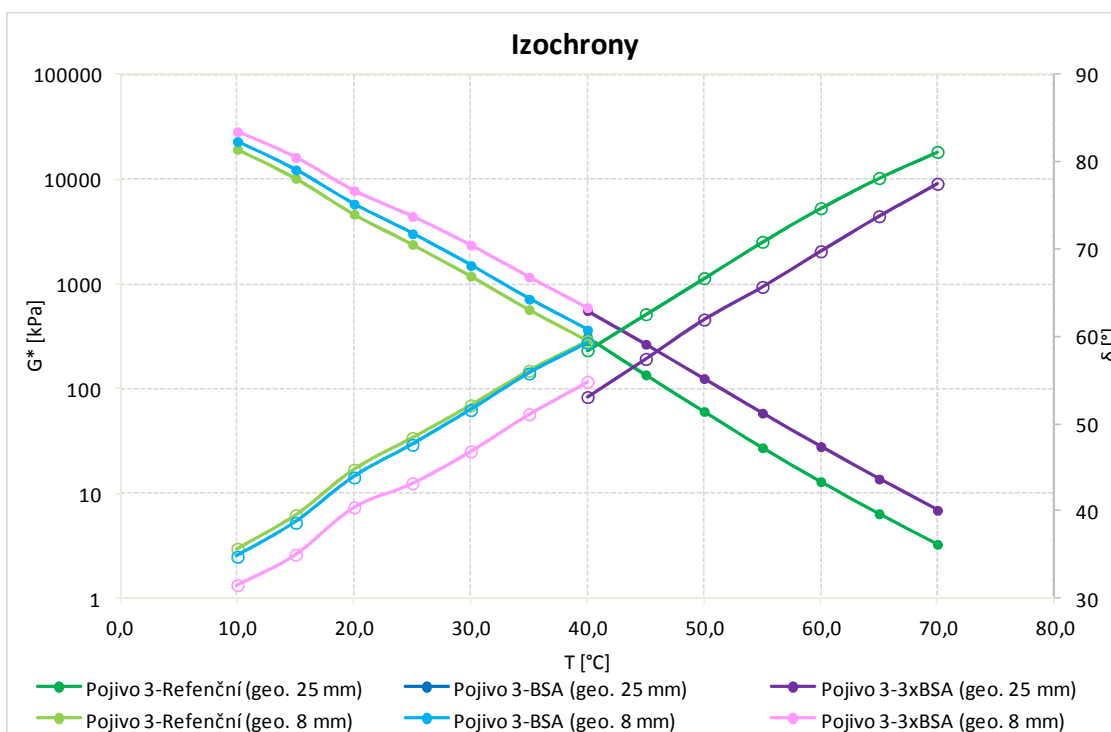
V grafech 33 až 36 jsou znázorněny izochrony komplexního smykového modulu a fázového úhlu při frekvenci zatěžování 1 Hz jednotlivých pojiv včetně vlivu stárnutí metodou BSA a 3xBSA. Nespojitost průběhů izochron při teplotě 40 °C je zapříčiněna napojením izochron získaných měření vlastností pojiv geometrií o průměru 8 mm a 25 mm a nedokonalým seříznutím přebytečného pojiva okolo geometrií. Rozdíl ovšem splňuje požadavek normy ČSN EN 14770.



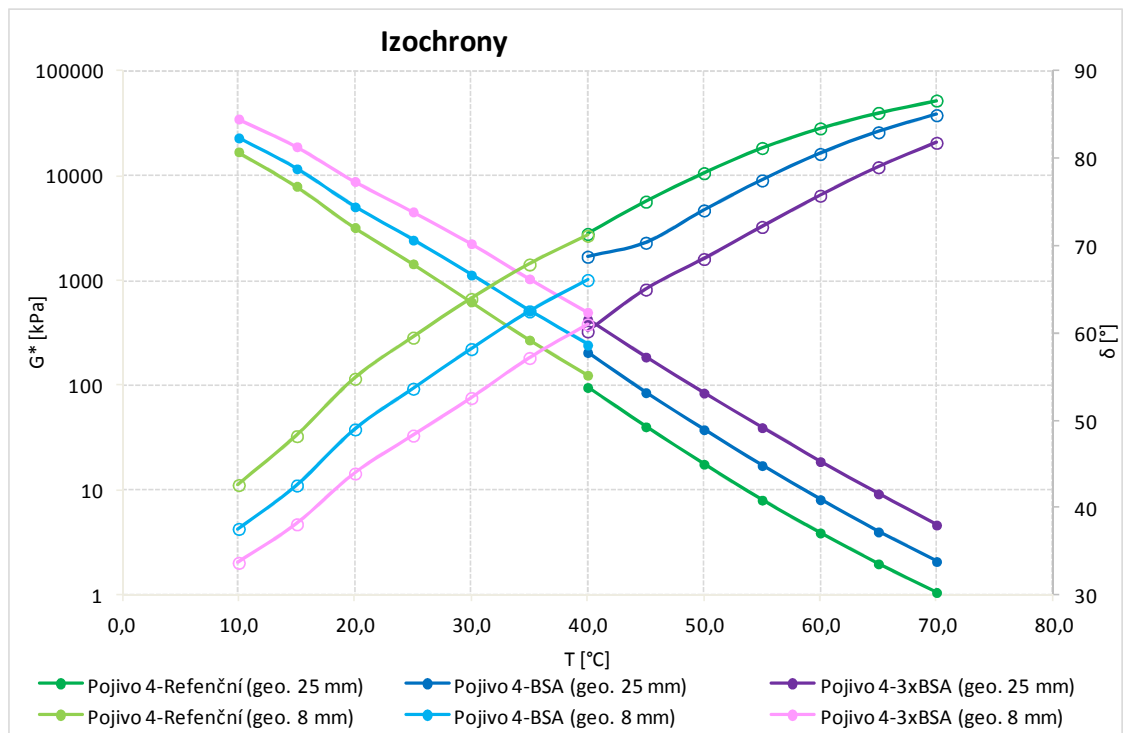
Graf 33: Izochrony komplexního smykového modulu a fázového úhlu při frekvenci zatěžování 1 Hz pojiva 1.



Graf 34: Izochrony komplexního smykového modulu a fázového úhlu při frekvenci zatěžování 1 Hz pojiva 2.

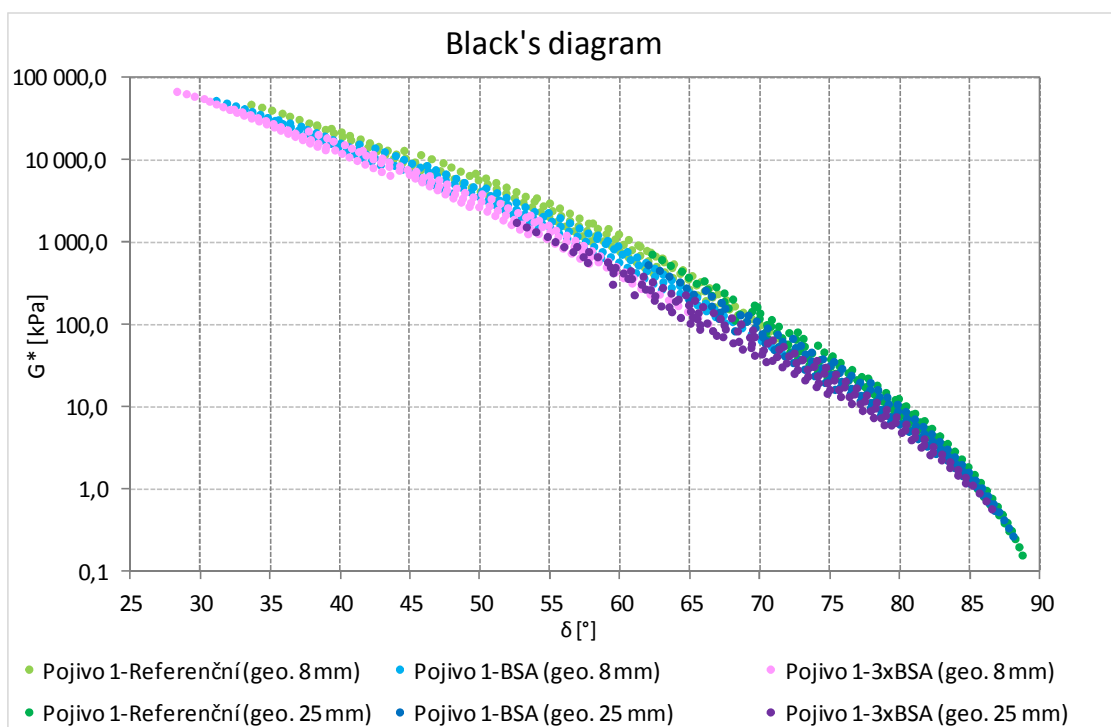


Graf 35: Izochrony komplexního smykového modulu a fázového úhlu při frekvenci zatěžování 1 Hz pojiva 3.

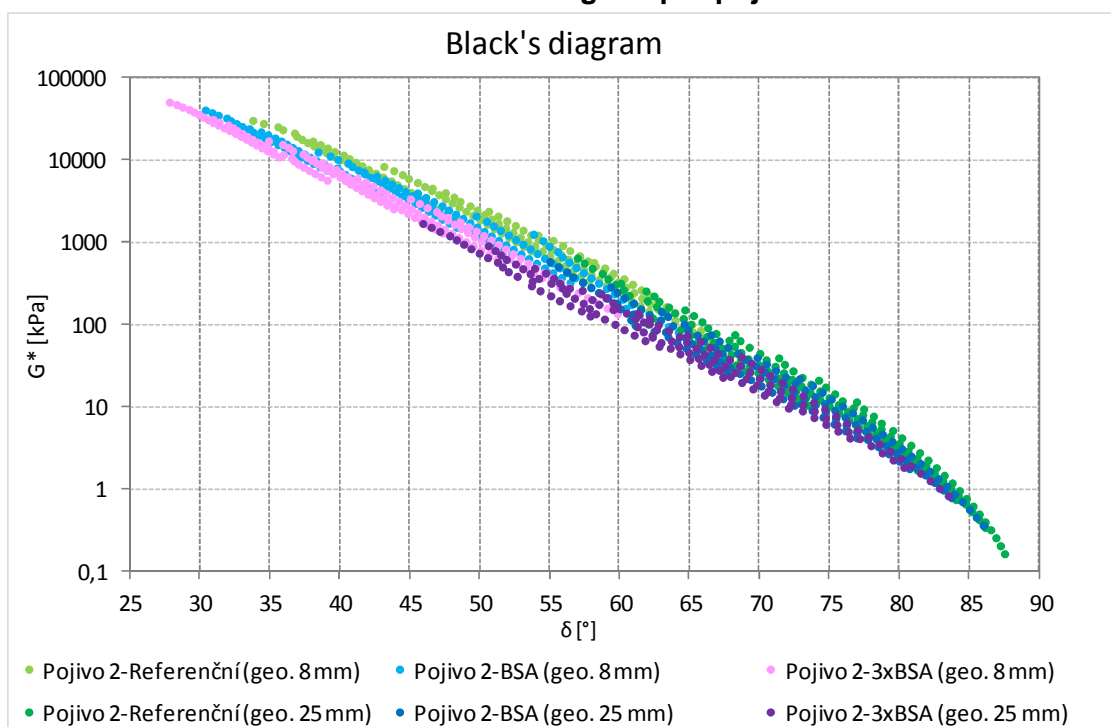


Graf 36: Izochrony komplexního smykového modulu a fázového úhlu při frekvenci zatěžování 1 Hz pojiva 4.

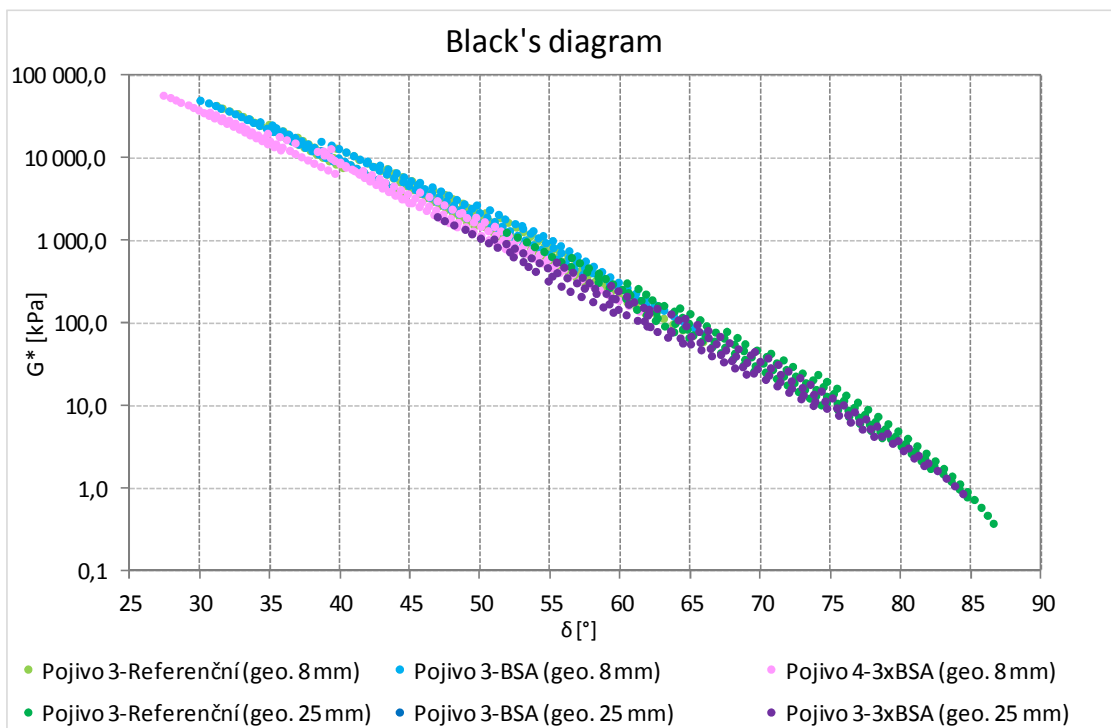
Blackův diagram jednotlivých pojiv (závislost komplexního smykového modulu a fázového úhlu) je znázorněn v grafech 37 až 40.



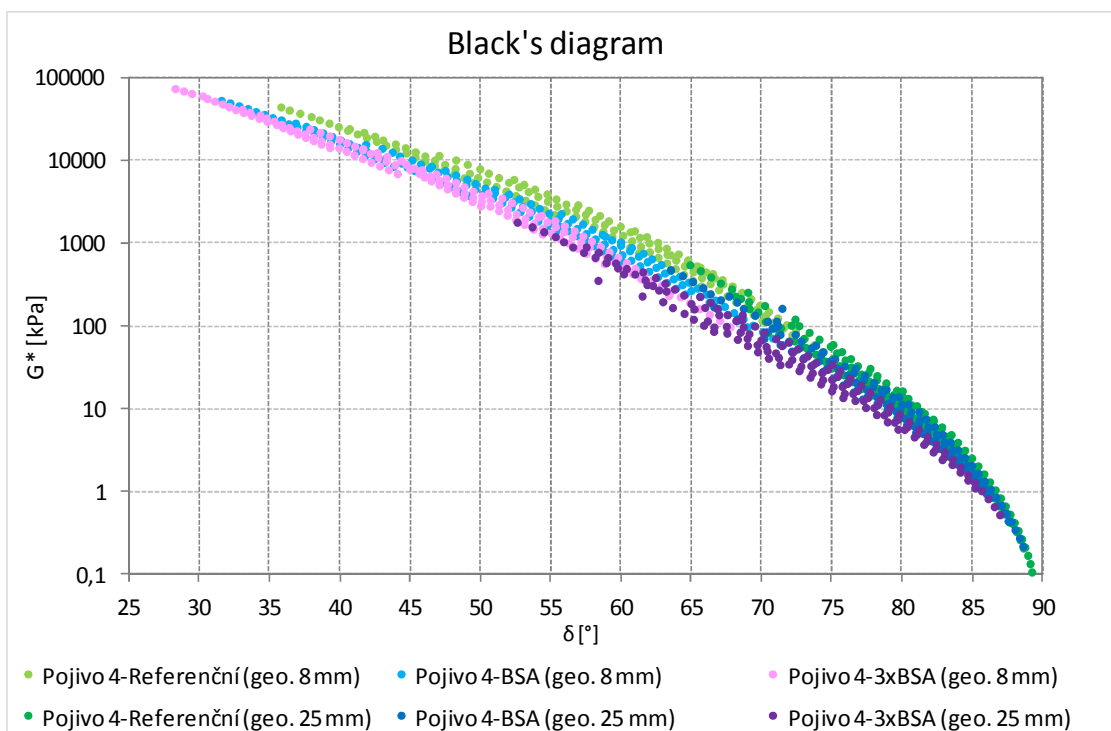
Graf 37: Blackův diagram pro pojivo 1.



Graf 38: Blackův diagram pro pojivo 2.



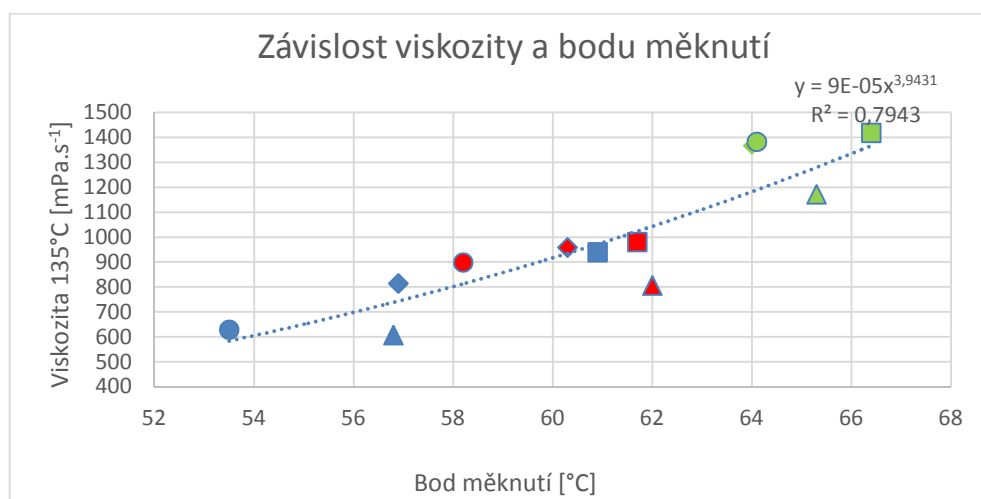
Graf 39: Blackův diagram pro pojivo 3.



Graf 40: Blackův diagram pro pojivo 4.

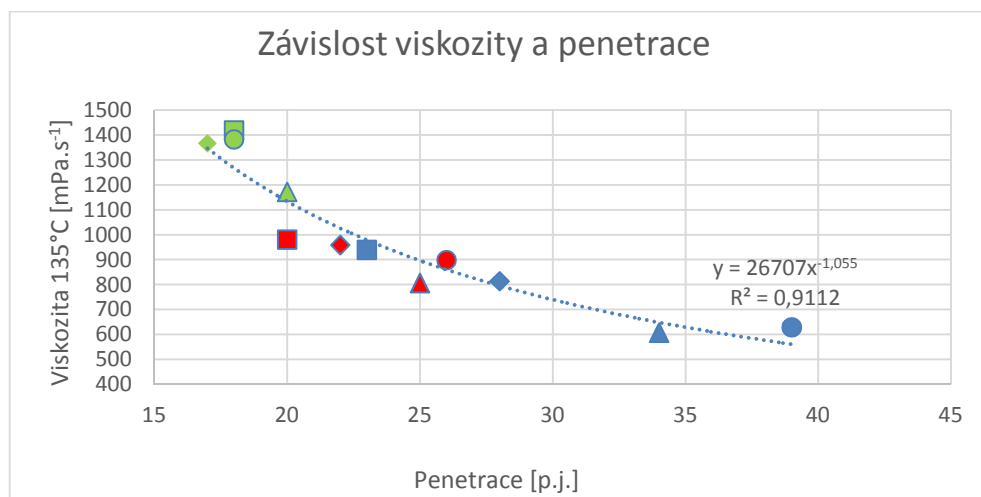
4.6 Korelace mezi vyhodnocenými zkouškami

Graf 41 znázorňuje vysokou korelaci mezi bodem měknutí a dynamickou viskozitou měřenou v DSR při teplotě 135 °C. Z grafu je zřejmé, že při proložení jednotlivých bodů mocninnou spojnicí trendu má korelační koeficient relativně vysokou hodnotu 0,79.



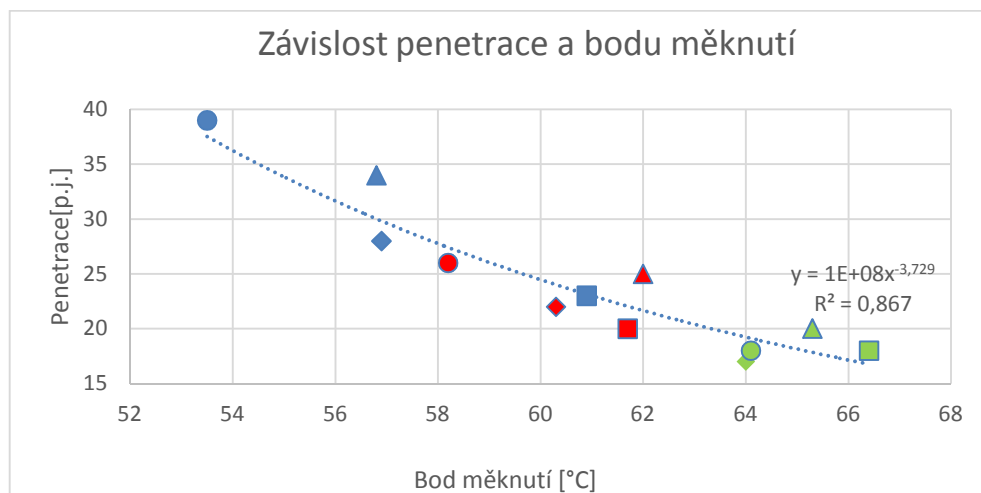
Graf 41: Korelace mezi viskozitou při 135 °C a bodem měknutí.

Následující graf 42 zobrazuje korelaci mezi dynamickou viskozitou a penetrací. Proložení bodů je opět provedeno mocninnou spojnicí trendu s vysokou hodnotou korelace 0,91.



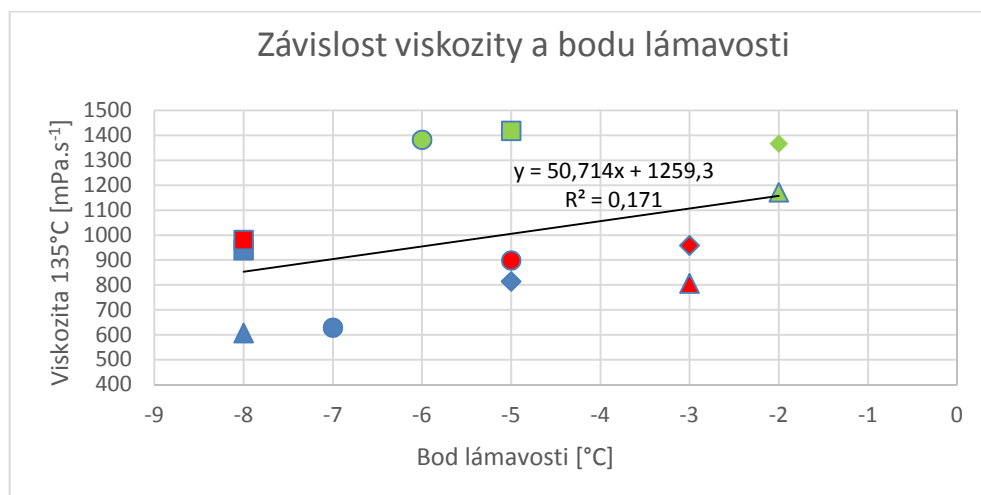
Graf 42: Korelace mezi viskozitou při 135 °C a penetrací.

V grafu 43 je vynesena korelační závislost mezi bodem měknutí a penetrací.



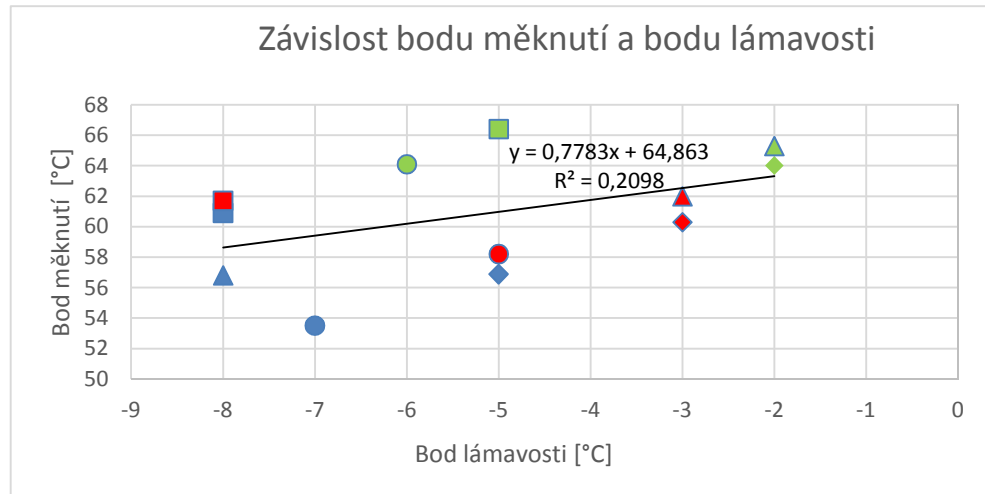
Graf 43: Korelace mezi penetrací a bodem měknutí.

V grafu 44 je znázorněna korelace mezi viskozitou a bodem lámavosti s nízkou hodnotou korelace 0,171.

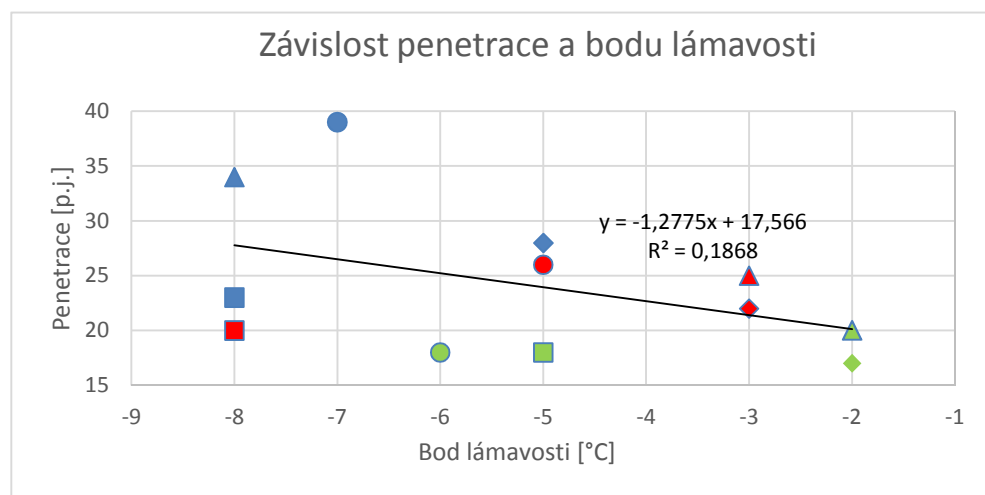


Graf 44: Korelace mezi viskozitou při 135 °C a bodem lámavosti.

V grafu 45 je vynesena korelační závislost mezi bodem měknutí a bodem lámavosti. Hodnota korelace je opět velmi nízká.



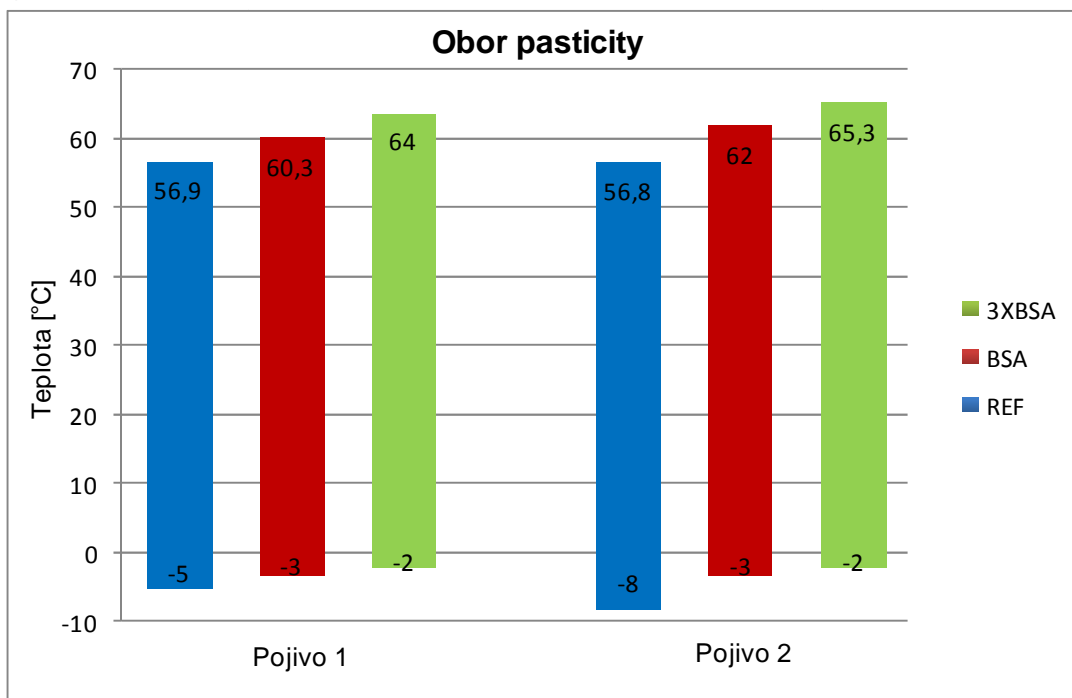
Graf 45: Korelace mezi bodem měknutí a bodem lámavosti.



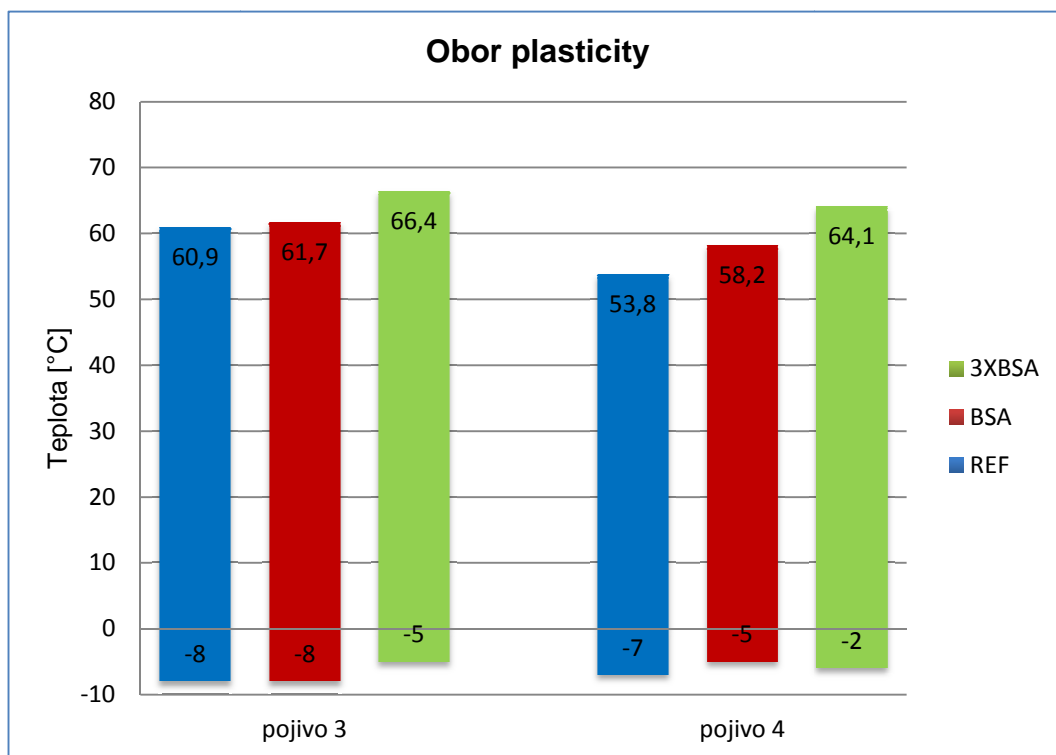
Graf 46: Korelace mezi penetrací a bodem lámavosti.

4.7 Změna oboru plasticity

V grafech 47 a 48 je znázorněny posuny oborů plasticity.



Graf 47: Změna oboru plasticity o pojivo 1 a 2.



Graf 48: Změna oboru plasticity o pojiva 3 a 4.

5. ZÁVĚR

Výsledky zkoušek prokázaly, že asfaltová směs podrobená stárnutí mění své vlastnosti.

Při stárnutí metodou BSA dojde ke zvýšení komplexních modulů tuhosti všech směsí v rozmezí 2,6 % až 19,3 % oproti odpovídajícím referenčním směsím. Prodloužené stárnutí metodou 3 x BSE již na hodnotu komplexního modulu tuhosti asfaltových směsí nemělo přesvědčivý vliv.

Penetrace silničních asfaltů použitých pro výrobu asfaltové směsi gradace 50/70 se pohybovala v úzkém rozmezí 63 (0,1 mm) až 66 (0,1 mm). Výrobou asfaltové směsi došlo k poklesu hodnoty penetrace na 23 (0,1 mm) až 39 (0,1 mm), tzn. pojivo zestárlo o jednu až o dvě gradace. Nejvíce zestárlo pojivo při výrobě asfaltové směsi 3. Stárnutím BSA a 3 x BSA došlo k dalšímu snížení hodnoty penetrace všech pojiv.

Dále byla zjišťována změna bodu měknutí. Počáteční hodnota bodu měknutí všech pojiv se nacházela mírně nad 50 °C. Výrobou asfaltové směsi na obalovně došlo ke zvýšení bodu měknutí o cca 3 °C až 11 °C, přičemž nejvíce se zvýšil bod měknutí pojiva získaného ze směsi 3, což odpovídá výsledkům penetrace jehlou. Stárnutím BSE došlo k dalšímu zvýšení bodu měknutí o 1,6 % až 9,4 % a stárnutím BSA o dalších 6,6 % až 11,7 %.

V neposlední řadě byl zjišťován vliv stárnutí na bod lámavosti. Stárnutím BSA došlo ke snížení bodu lámavosti o 28,6% až 40%. Pojivo 3 nevykázalo stárnutím BSA žádné změny. Trojnásobné BSA nemá na bod lámavosti zásadní vliv.

V další části byla změřena dynamická smyková viskozita v DSR, která prokázala, že silniční asfalty se chovají jako Newtonovská kapalina. Bylo zjištěno, že dynamická viskozita roste se snižující se teplotou a po zestárnutí. Na grafu 20 je zachycena změna hodnoty dynamické viskozity stanovené při teplotě 135 °C a smykové rychlosti 1,0 s⁻¹ srovnávaných pojiv po stárnutí metodou BSA a 3xBSA vyjádřená podílem oproti dynamické viskozitě odpovídajícího nezestárlého pojiva. Z obrázku je patrné, že zvláště postup

stárnutí 3xBSA dokáže dobře odlišit náchylnost ke změně dynamické viskozity stárnutím kombinovaným účinkem tepla a vzduchu, protože rozdíly mezi jednotlivými výsledky jsou vyšší.

Na pojivech byla provedena reologická měření v oscilaci s řízeným smykovým přetvořením. Byl určen komplexní smykový modul pojiv (G^*), který je znázorněn v grafech 25 až 28. Pojiva zestárnutá postupem BSA vykázala vyšší hodnoty modulu tuhosti než odpovídající nezestárlá pojiva a nejvyšších hodnot modulu tuhosti dosáhly silniční asfalty zestárlé trojnásobným BSA.

Další měřenou veličinou, vycházející z komplexního modulu tuhosti, je fázový úhel, který je také silně závislý na teplotě a frekvencích zatěžování. Při vysokých teplotách a nízkých frekvencích se asfalt chová jako kapalina, to znamená, že komplexní modul se snižuje a fázový úhel se zvyšuje. V grafech 29 až 32 jsou znázorněny hlavní křivky fázových úhlů jednotlivých pojiv, které jsou seřazeny podle jejich míry stárnutí, přičemž nejmenší fázový úhel má asfaltové pojivo zestárlé 3xBSA a naopak největší fázový úhel vykazuje referenční pojivo. Z grafů je patrné, že nejnižšího zestárnutí metodou BSA a 3xBSA dosáhlo pojivo 3 (hlavní křivky si téměř odpovídají), což potvrzuje výsledky dynamických viskozit. Může to být zapříčiněno tím, že pojivo silně zestárlo již při výrobě asfaltové směsi na obalovně, což je vidět v grafech 7 a 10 a další změny vlastností pojiva při laboratorním stárnutí již nebyly tak patrné.

V poslední části byla provedena korelace mezi empirickými zkouškami a dynamickou smykovou viskozitou měřenou v DSR. Bylo zjištěno, že zkoušky mezi sebou korelují s velice vysokým korelačním součinitelem. Po provedení zkoušky dynamické viskozity lze pomocí korelačního součinitele určit s poměrně vysokou spolehlivostí bod měknutí nebo penetraci

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] ČSN EN 12697-33 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 33: Příprava zkušebních těles zhutňovačem desek.
- [2] EN 12697-3 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka
Část 3: Znovuzískání extrahovaného pojiva: Rotační vakuové destilační zařízení
- [3] ČSN EN 12697-26 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 26: Tuhost.
- [4] ČSN EN 1426 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou
- [5] ČSN EN 1427 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknutí – Metoda
kroužek a kulička
- [6] ČSN EN 12593-Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení bodu lámavosti podle Fraasse
- [7] Dašek, O.: Vliv míry zhutnění na funkční charakteristiky asfaltových směsí, Diplomová práce, VUT v Brně, FAST, 2006.
- [8] Dašek, O., Coufalík, P., Hýzl, P., Varaus, M.: Nové zkušební metody umožňující predikovat prodloužení životnosti asfaltových vozovek, VUT v Brně, FAST, 2014
- [9] Stoklásek, S.: Kapitola 1-Stárnutí asfaltových pojiv, 2014
- [10] PLITZ, J. Stárnutí silničních pojiv. Asfaltové vozovky 97. České Budějovice. 1997.
- [11] J. PLITZ: "Stárnutí silničních pojiv", konference Asfaltové vozovky 97, České Budějovice, 1997.
- [12] J. Read, D. Whiteoak: "The Shell Bitumen Handbook", Thomas Telford Publishing, 2003, ISBN: 0 7277 220X.
- [13] <http://www.strassenbau.uni-wuppertal.de/SeSb/Labor/Geraete/rtfot.html>
- [14] Vojíř, J.: Modifikace asfaltových pojiv, Diplomová práce, ČVUT v Praze, FAST, katedra silničních staveb, 2009

- [15] FEHRL report, BitVal, phase I: „Analysis of Available Data for Validation of Bitumen Tests“, Brussel, Belgium, 2006.
- [16] BÜCHLER, S., RENKEN, P., MOLLENHAUER, K. Relation between rheological bitumen characteristic and resistance of asphalt against fatigue and cold temperatures. Paper No.402-077. Euroasphalt and Eurobitume Congress. Copenhagen. 2008.
- [17] Černý,R., Plitz,J.,Švadlák,D., Maxa,D., Procháska,F.:Nové zkušební metody pro silniční asfaty
- [18] Standard Practice for Long Term Aging of Asphalt Concrete Mixtures. SHRP #1030. 1992.
- [19] Standard Practice for Short Term Aging of Asphalt Concrete Mixtures. SHRP #1025. 1992.
- [20] A. Kumar: "Effect of Film Thickness, Voids, and Permeability on Asphalt Hardening in Asphalt Mixtures: Final Report" (1976). Joint Transportation Research Program. Paper 786.
- [21] Valentin, J.:Užité vlastnosti a reologie asfaltových pojiv a směsí- charakteristiky, nové zkušební metody, vývojové trendy, Praha, 2003
- [22] School of reology , Brno, 2012
- [23] <http://d2051.fsv.cvut.cz/predmety/stpk/reologieuvod.pdf>
- [24] Petr Mondschein,P., Valentin, J.:Asfaltová pojiva- Aktualizace a rozšíření výuky předmětu experimentální analýza konstrukcí, Projekt 1716/2011, F1