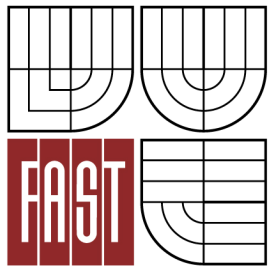




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

RELAXACE SMYKOVÉHO NAPĚTÍ ASFALTOVÝCH POJIV V DSR

SHEAR STRESS RELAXATION OF BITUMINOUS BINDERS IN DSR

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. VLADIMÍR MUSIL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. ONDŘEJ DAŠEK, Ph.D.

BRNO 2015



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. Vladimír Musil
Název	Relaxace smykového napětí asfaltových poživ v DSR
Vedoucí diplomové práce	Ing. Ondřej Dašek, 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

Předané vzorky asfaltových pojiv,
ČSN EN pro zkoušení asfaltových pojiv,
Valentin, J.: Užité vlastnosti a reologie asfaltových pojiv a směsí, 2003,
Mezger, T.: The Rheology Handbook, 2011,
dostupná odborná literatura

Zásady pro vypracování

Cílem práce bude zjistit relaxační vlastnosti vybraných asfaltových pojiv pomocí zkoušky relaxace smykového napětí v dynamickém smykovém reometru včetně popisu vlivu stárnutí pojiv. Dále budou na pojivech stanoveny empirické zkoušky - penetrace jehlou, bod měknutí a vratná duktilita před a po stárnutí.

Předepsané přílohy

Licenční smlouva o zveřejňování vysokoškolských kvalifikačních prací

.....

Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

Abstrakt

Práce se zabývá popisem relaxačních vlastností asfaltových pojiv zjišťovaných dynamickým smykovým reometrem (DSR). Pro srovnání byl vybrán silniční asfalt, polymerem modifikovaný asfalt (PmB) a asfalt modifikovaný pryžovým granulátem (CRmB). Aby bylo možné popsat vliv stárnutí asfaltových pojiv na relaxační vlastnosti, byla provedena laboratorní simulace stárnutí metodou RTFOT a zároveň modifikovanou metodou 3xRTFOT. U jednotlivých pojiv byly zároveň provedeny zkoušky penetrace jehlou, bod měknutí a vratná duktilita. Vybrané asfaltové pojivo bylo použito pro výrobu asfaltové směsi, na které byla provedena zkouška nízkoteplotních vlastností (TSRST), kdy byly výsledky srovnány s relaxačními vlastnostmi z DSR.

Klíčová slova

Penetrace jehlou, bod měknutí, vratná duktilita, reologie, DSR (dynamický smykový reometr), relaxace, smykové napětí, CRmB, nízkoteplotní vlastnosti, RTFOT, 3xRTFOT.

Abstract

The thesis describes the relaxation properties of bituminous binders determined in dynamic shear rheometer (DSR). Paving bitumen, polymer modified bitumen (PMB) and crumb rubber modified bitumen (CRmB) were chosen for comparison. In order to describe the effects of ageing on asphalt binders relaxation properties, the laboratory simulation of ageing using RTFOT and 3xRTFOT method was performed. For each binder were simultaneously conducted tests of needle penetration, softening point and elastic recovery. Selected bitumens were used for the production of asphalt mixtures. The low-temperature properties tests (TSRST) were performed for these mixtures, when the results were compared to the relaxation properties of binders determined in the DSR.

Keywords

Needle penetration, softening point, elastic recovery, rheology, DSR (dynamic shear rheometer), relaxation, shear stress, crumb rubber modified bitumen, low-temperature properties, RTFOT, 3xRTFOT.

Bibliografická citace VŠKP

Bc. Vladimír Musil *Relaxace smykového napětí asfaltových pojiv v DSR*. Brno, 2014. 72 s., 13s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.

Prohlášení:

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

V Brně dne 16.1.2015

.....

podpis autora

Bc. Vladimír Musil

Poděkování:

Opravdu srdečně děkuji Ondřeji Daškovi a Pavlu Coufalíkovi za možnost stát se alespoň na malý moment v mém životě součástí vědy.

OBSAH:

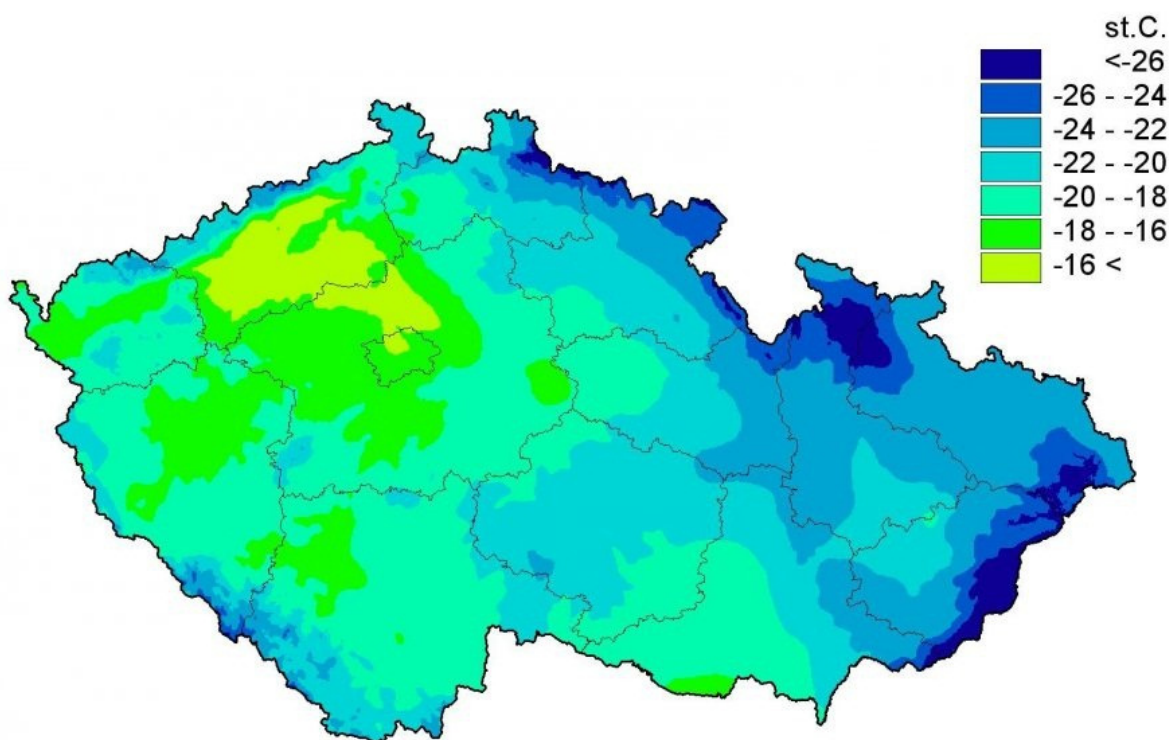
1	ÚVOD.....	8
2	CÍL DIPLOMOVÉPRÁCE	9
3	RELAXAČNÍ VLASTNOSTI ASFALTOVÝCH POJIV.....	10
	3.1 Reologie.....	10
	3.1.1 Hookova hmota	11
	3.1.2 Newtonova kapalina.....	12
	3.1.3 Maxwellův model.....	13
	3.1.4 Kelvinův model.....	13
	3.1.5 Složité reologické modely.....	14
	3.2 Reometrie.....	14
	3.2.1 Dynamický smykový reometr – DSR	15
	3.3 Stárnutí asfaltových pojiv	16
4	POUŽITÉ ZKUŠEBNÍ METODY.....	17
	4.1 Penetrace jehlou asfaltových pojiv	17
	4.2 Bod měknutí asfaltových pojiv	17
	4.3 Vratná duktilita asfaltových pojiv.....	18
	4.4 Odolnost proti stárnutí asfaltových pojiv	18
	4.4.1 Metoda RTFOT	19
	4.4.2 Metoda 3xRTFOT	20
	4.5 Relaxace smykového napětí asfaltových pojiv v DSR	20
	4.6 Zkouška nízkoteplotních vlastností (TSRST).....	23
5	POUŽITÉ MATERIÁLY	25
	5.1 Asfaltová pojiva.....	25
	5.2 Asfaltové směsi	25
6	VÝSLEDKY ZKOUŠEK	29
	6.1 Penetrace jehlou asfaltových pojiv při 25 °C	29
	6.2 Bod měknutí asfaltových pojiv	30
	6.3 Vratná duktilita asfaltových pojiv při 25 °C	31
	6.4 Relaxace smykového napětí asfaltových pojiv v DSR	32
	6.5 Zkouška nízkoteplotních vlastností (TSRST).....	48
	6.6 Porovnání zkoušky TSRST a zkoušky relaxace smykového napětí.....	49
7	ZÁVĚR	51
8	SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ	54
9	CITOVANÁ LITERATURA	57
10	PŘÍLOHY	58

1 ÚVOD

O poruchy asfaltových vozovek se zasadí mnoho faktorů. Mezi nejčastější příčiny patří nadměrné zatížení těžkými nákladními vozidly (TNV) při nepříznivé teplotě vozovky, která se v České republice pohybuje v extrémech od $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ v zimních měsících do $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ v měsících letních. Některé státy USA na svém území zastavují dopravu TNV při překročení určitých teplotních limitů. Tímto krokem si výrazně snižují náklady vynaložené na opravy a údržby své silniční sítě. V České republice je tento krok zatím nerealizovatelný.

Vysoké teploty asfaltového povrchu spojené s napětím od dopravy způsobují změny na obrusné vrstvě v podobě trvalých deformací. Na opačné straně teplotního spektra dochází k mrazovým trhlinám. Nízké teploty zapříčiňují smršťování asfaltového krytu vozovky a vyvolávají v něm tahová napětí, jež jsou zvyšována poježděním TNV. Vznikající trhliny se šíří krytem od nejvíce tažených vláken materiálu, tedy od obrusné vrstvy, kde je vznik mrazových trhlin indikovaný nejdříve.

Obrázek 1: Průměrné denní teploty v ČR 12. ledna 1987 [1]



Popisem právě těchto nízkoteplotních dějů v materiálech se zabývá tato práce. Mapa na obrázku 1 z 12. ledna 1987 dokazuje velmi nízké průměrné denní teploty v České republice. Ty nejsou v posledních letech tak razantní, ale přesto je důležité nadále řešit problém mrazových trhlin, které se stále objevují na vozovkách pozemních komunikací.

2 CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem práce je zjistit relaxační vlastnosti vybraných asfaltových pojiv pomocí zkoušky relaxace smykového napětí v dynamickém smykovém reometru (DSR) včetně popisu vlivu stárnutí pojiv na tuto materiálovou charakteristiku. Dále budou na pojivech stanoveny empirické zkoušky – penetrace jehlou, bod měknutí a vratná duktilita před i po stárnutí a budou určeny vzájemné závislosti jednotlivých zkoušek

Nad rámec zadání práce byly provedeny zkoušky nízkoteplotních vlastností a odolnost proti tvorbě trhlin pomocí jednoosé zkoušky tahem asfaltových směsí a s tím spojených zkoušek pro výrobu zkušebních těles podle normy ČSN EN 12697–46. Asfaltové směsi za horka určené pro zkoušky nízkoteplotních charakteristik obsahovaly vybraná asfaltová pojiva, u kterých byly zjištěny relaxační vlastnosti v DSR.

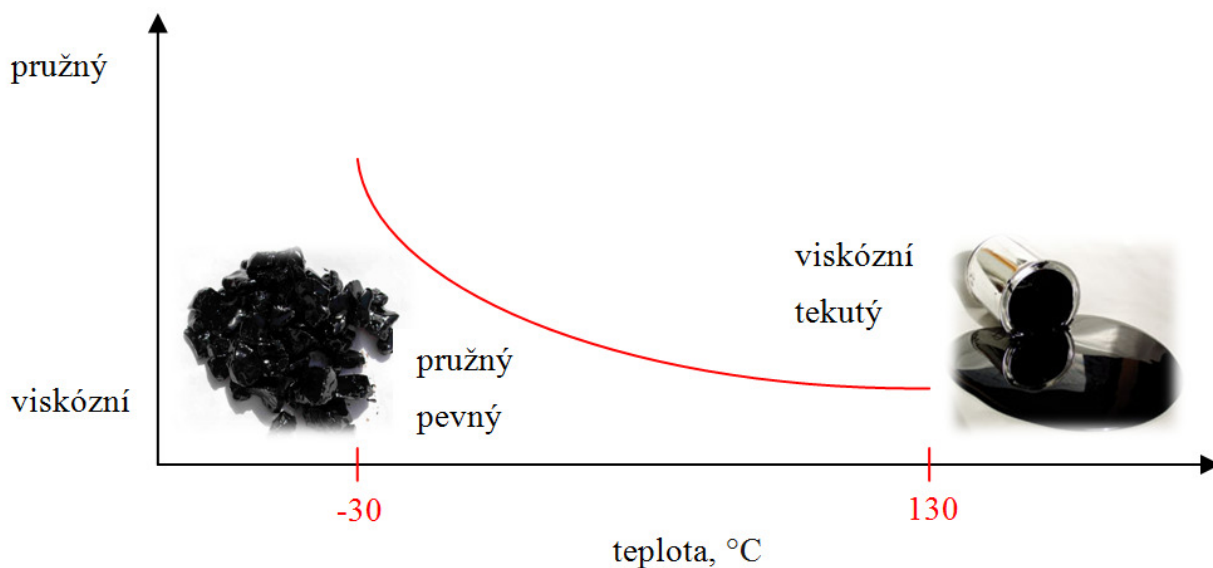
Provedeny byly následující zkoušky dle platných českých norem:

1. Empirické zkoušky asfaltových pojiv
 - a) Stanovení penetrace jehlou dle ČSN EN 1426
 - b) Stanovení bodu měknutí metodou kroužek a kulička dle ČSN EN 1427
 - c) Stanovení vratné duktility modifikovaných asfaltů dle ČSN EN 13398
2. Stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu (RTFOT) dle ČSN EN 12607–1 a její modifikovaná nenormovaná forma 3xRTFOT dle Rakouského vzoru
3. Relaxace smykového napětí v dynamickém smykovém reometru
4. Zkouška nízkoteplotních vlastností s rovnoměrným řízením poklesu teploty (TSRST) dle ČSN EN 12697–46

3 RELAXAČNÍ VLASTNOSTI ASFALTOVÝCH POJIV

Asfalt je amorfní látka (z řeckého *ámorfos*, beztvary). Je to látka pevná, avšak lze ji považovat za kapalinu s velmi vysokou viskozitou (vazkostí). Asfaltové pojivo se při běžných teplotách chová jako visko-elastická látka, tedy materiál, který obsahuje složky chovající se viskózně a složky, které reagují elasticky, jak je patrné z obrázku 2.

Obrázek 2: Asfaltové pojivo jako visko-elastická látka [2] [3]



Hranice mezi skupenstvími nelze u asfaltu jasně popsát, jak je tomu u nízkomolekulárních látek, jako například vody. Asfalt je látka složitě molekulární struktury s velkým množstvím nejrůznějších sloučenin, tudíž není možné jednoznačně určit přechod z pevné do tekuté fáze. [4]

Relaxace smykového napětí asfaltových pojiv je děj snížení vneseného napětí v závislosti na čase. Uvolňování napětí probíhá na základě viskózních vlastností asfaltu, které jsou velice důležitou charakteristikou pro odolnost asfaltových směsí proti vzniku mrazových trhlin. Čím nižší teplota pojiva, tím více se ztrácí schopnost jeho relaxace, stává se elastickým (pružným) a může se tedy porušit křehkým lomem (trhlinou). [5]

Kvalita a způsob modifikace asfaltového pojiva je tedy v asfaltové směsi při porušení mrazem rozhodujícím faktorem.

3.1 Reologie

Název tohoto oboru mechaniky kontinua vznikl z řeckého *panta rhei* (všechno plyne). Zabývá se tedy tokovými vlastnostmi nejen kapalných, ale i pevných látek. Jeho úkolem je popis vztahů mezi deformací, rychlostí deformace a napětím. Mezi těmito veličinami jsou vzájemné

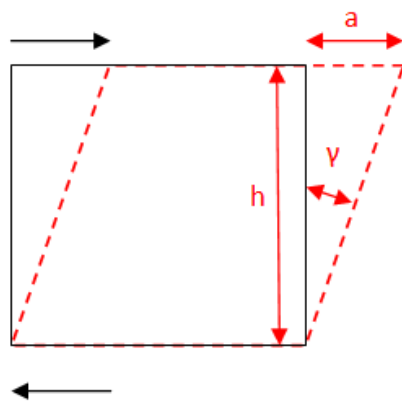
závislosti velice obtížně určitelné, proto se k jejich skutečným průběhům pouze přibližujeme různými reologickými modely. [4]

Pro popis naší visko-elastické látky, tedy asfaltového pojiva, která leží na pomezí mezi pevnou a kapalnou látkou, nám postačí kombinace dvou vlastností, a to pružné látky (Hookova hmota) a vazké kapaliny (Newtonova kapalina).

3.1.1 Hookova hmota

Pro přesnější definici Hookova zákona si nejprve přiblížíme bezrozměrnou veličinu, a to smykovou deformaci tzv. skos (smykové přetvoření). Skos (γ) je natočení roviny řezu vyjádřené poměrem výšky řezu h a vzdáleností mezi původní a novou polohou krajního bodu tělesa a , jak zobrazuje obrázek 3. Pohybujeme-li se v oboru malých deformací, můžeme předpokládat, že $\tan \gamma$ je rovno γ .

Obrázek 3: Smyková deformace tělesa, tzv. skos



$$\tan \gamma \approx \gamma = \frac{a}{h}$$

Obrázek 4: Reologický model hmoty dle Hooka



$$\gamma = \frac{1}{G} \tau$$

Kde je: γ smyková deformace, tzv. skos [-]

G modul pružnosti ve smyku [Pa]

τ smykové (tečné) napětí [Pa]

Charakteristická reologická rovnice na obrázku 4 vyjadřuje závislost, při které je napětí klasické elastické látky (Hookovy hmoty) přímo úměrné deformaci. Tato závislost mezi napětím a deformací je stejná, jako vztah mezi silou protahující kovovou pružinu a jejím relativním prodloužením, proto je kovová pružina označena písmenem H symbolem Hookovy hmoty. Kovová pružina se deformuje dokonale vratně, a to bez časového zpoždění. [4]

3.1.2 Newtonova kapalina

Za Newtonovy kapaliny je považována většina známých čistých kapalin, které jsou charakteristické nízkomolekulární strukturou, kterou má například voda. Newtonův viskózní zákon říká, že mezi jednotlivými částmi tekutiny probíhá proces podobný tření, jehož hodnota je přímo úměrná rychlosti oddělování těchto částí navzájem od sebe. Tuto vlastnost vneseme do výpočtů tzv. dynamickou viskozitou, odolností proti tečení, která má konstantní hodnotu.

Obrázek 5: Reologický model Newtonovské kapaliny



$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{1}{\eta} \tau$$

Kde je: γ smyková deformace, tzv. skos [-]

η dynamická viskozita [Pa.s]

τ smykové (tečné) napětí [Pa]

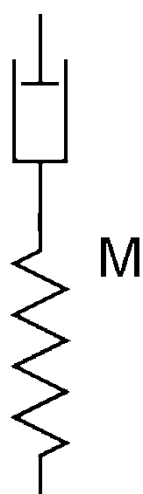
t..... čas [s]

Z rovnice na obrázku 5 je patrné, že díky předpokladu konstanty dynamické viskozity dostáváme přímou úměru mezi rychlostí smykové deformace a smykovým napětím. Symbol tlumiče označen N předpokládá rychlost pohybu pístu přímo úměrně síle na něj působící, tedy takovým poměrem, který je zaveden Newtonovým viskózním zákonem. Píst se deformuje nevratně, a to s časovým zpožděním. [4]

3.1.3 Maxwellův model

Maxwellův model (M) vychází ze sériového spojení pružiny a tlumiče, jak můžeme vidět na obrázku 6. Toto sériové zapojení můžeme stručně popsat rovnicí $M = H - N$. Celková deformace takového modelu je rovna součtu deformací jednotlivých prvků, nicméně napětí má po celé výšce stejnou hodnotu. Tento model je jednoduchým popisem visko-elastické látky, kdy při vnesení síly reaguje pružina okamžitě oproti tlumiči, který reaguje se zpožděním. V průběhu času však pružina způsobuje posun pístu, čímž uvolňuje napětí celé soustavy (relaxuje). Deformace na pístu je však většinou ne zcela vratná. [4]

Obrázek 6: Maxwellův reologický model



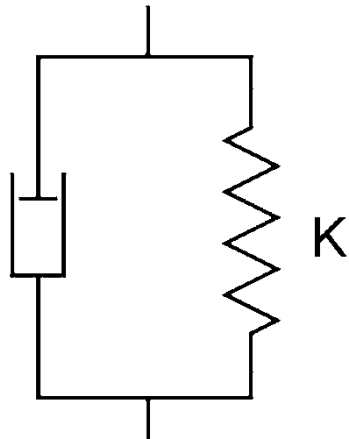
$$\frac{d\gamma}{dt} G = \frac{d\tau}{dt} + \frac{\tau}{\lambda}$$

V této diferenciální rovnici je nově zavedená nová visko-elastická veličina, a to relaxační čas (λ), který je roven podílu dynamické viskozity (η) a modulu pružnosti ve smyku (G). Relaxační čas pro Maxwellův model je roven zrelaxování materiálu na 36,8 % maximálního napětí.

3.1.4 Kelvinův model

Pro Kelvinův model (K na obrázku 7) visko-elastické hmoty je zavedeno sériové zapojení tlumiče a pružiny, vyjádřené základním vztahem $K=H/N$. V tomto modelu předpokládáme, že celkové napětí je součtem napětí v pružině a napětí v tlumiči. Deformace je pro oba komponenty stejná.

Obrázek 7: Kelvinův reologický model



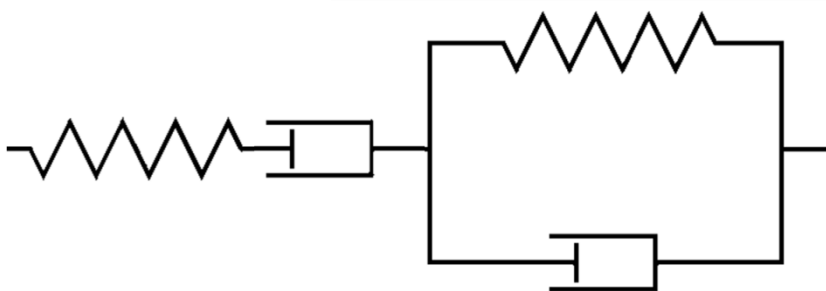
$$\eta \frac{d\gamma}{dt} + G\gamma = \tau$$

U tohoto modelu je relaxační čas doba, za kterou přejde vztah z nedeformovaného do deformovaného stavu. Za tento čas dosáhne Kelvinův model 63,2 % rovnovážné deformace.

3.1.5 Složité reologické modely

Kromě základních reologických modelů, jako je například model Kelvinův či Maxwellův, existuje ještě celá řada složitějších reologických modelů, které slouží pro přesnější popis chování různých visko-elastických materiálů. Nejčastěji se takové modely sestávají z již vytvořených prvků jiných modelů a využívá se přitom mnohanásobná sériová či paralelní zapojení. Takovým příkladem může být Burgersův reologický model na obrázku 8, který je sestaven sériovým zapojením Kelvinovy a Maxwellovy hmoty a představuje jeden ze základních modelů asfaltové směsi. [6]

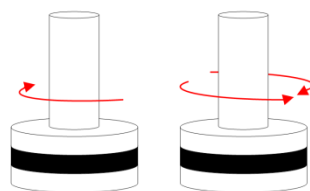
Obrázek 8: Burgersův reologický model



3.2 Reometrie

Kapitola 3.1 obsahuje základní popis oboru fyziky reologie, jehož měřitelnými veličinami se zabývá reometrie, která klade důraz zejména na měřicí systém, měřicí nástroje a testovací a analytické metody. Reologické vlastnosti kapalných i pevných látek lze měřit například rotačními či oscilačními reometry (obrázek 9). [6]

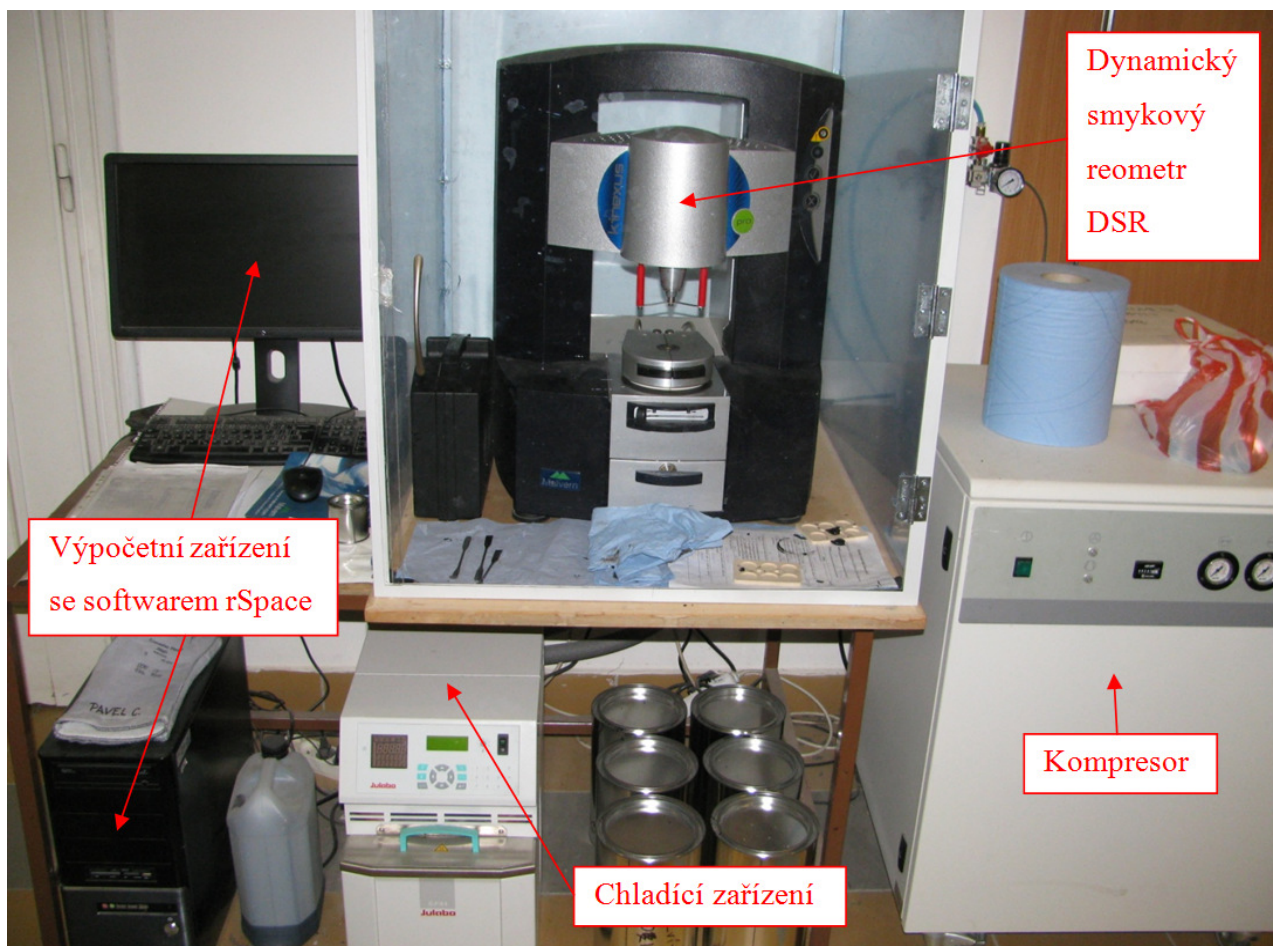
Obrázek 9: Pohyb geometrie u rotačního a oscilačního reometru



3.2.1 Dynamický smykový reometr – DSR

DSR (z anglické zkratky Dynamic Shear Rheometer) je laboratorní přístroj pro určení komplexních reologických vlastností či viskozit materiálů. Přístroj značky Malvern s názvem Kinexus pro+, na kterém byly vykonány provedené zkoušky, pokrývá rozsah zkušebních teplot od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ a je schopen dosáhnout krouticího momentu 200 mNm . Vybaven je kompresorem, chladičím zařízením a v neposlední řadě výpočetním zařízením, jehož součástí je software rSpace. V prostředí programu rSpace je možné naprogramovat téměř libovolný průběh zkoušky, omezený pouze možnostmi zařízení, což nabízí značně vědecké prostředí. Velice důležitou součástí přístroje je kompresor (externě umístěný), který v místě nad horní geometrií vytváří vzduchová ložiska, jenž přístroji poskytuje nástroj s velkou přesností vrstvy až $0,1\text{ }\mu\text{m}$.

Obrázek 10: DSR Kinexus pro+ s externím příslušenstvím



Zkušební vzorek se umísťuje mezi dvě geometrie (horní a spodní), z nichž horní je dynamická a spodní statická. Geometrie se volí podle druhu zkušební metody a viskózních charakteristik zkoušeného materiálu, a to zpravidla s menšími průměry pro zkušební teploty nižší a s většími průměry pro teploty vyšší.

3.3 Stárnutí asfaltových pojiv

Asfaltová pojiva přirozeně stárnou, a tím dochází k degradaci požadovaných vlastností, která s sebou nese nejen zhoršující se schopnost relaxace, ale i celkové snížení životnosti vozovky. Stárnutí asfaltových pojiv začíná již při samotném zpracování ropy, kdy je asfalt, spodní těžká frakce, vystavován vysokým teplotám za účelem destilace lehčích frakcí. Stárnutí pokračuje skladováním, zpracováním a pro nás nejdůležitější částí, a to dobou strávenou funkčností ve vozovce. Na stárnutí se podílí celá řada chemických či fyzikálních procesů, kde mezi nejvýznamnější tři patří: odpařování, oxidace a přeskupování částic (stárnutí strukturní). [7]

Jak zde již bylo uvedeno, asfalt je visko-elastická látka. Obsahuje tedy látky viskózní (olejové frakce) asfaltény a látky elastické maltény. Při zpracování asfaltové směsi je pojivo vystaveno vysokým teplotám, díky nimž dochází k **odpařování** těkavých olejnatých látek a nevratné ztrátě viskózních složek. Proces stárnutí odpařováním však nemá zásadní význam na celkovou degradaci asfaltového pojiva. [7]

Nejvýznamnější typ stárnutí asfaltového pojiva je způsoben oxidativními činiteli. Mezi ně patří vzduch (kyslík) či ozón, UV záření, teplota a v neposlední řadě čas. K oxidaci dochází při styku asfaltu se vzduchem a má za následek jeho tvrdnutí (křehnutí). Proces **oxidace** je významně urychlen se vzrůstající teplotou vzduchu, a to přibližně o dvojnásobek s každým nárůstem teploty o 10 °C. Při dopadu UV záření na povrch krytu vozovky se rovněž proces oxidace zrychluje.

Tvrdnutí (křehnutí) je závislé i na strukturálních změnách tzv. **stárnutí strukturní**. V asfaltovém pojivu dochází k shlukům do větších částic při uvolňování olejnatých složek, které se vsakují nejčastěji do kameniva. [7]

Důležité je brát zřetel na vliv stárnutí polymerů obsažených v asfaltových pojivech. Tyto polymery stárnutím zkracují své řetězové struktury a ztrácejí tak síťové vlastnosti, díky kterým jsou do modifikovaných asfaltů přidávány. [8]

4 POUŽITÉ ZKUŠEBNÍ METODY

4.1 Penetrace jehlou asfaltových pojiv

Předpis ČSN EN 1426 uvádí postup pro stanovení hodnoty penetrace jehlou (obrázek 11) asfaltových pojiv. Penetrace jehlou je vyjádřena penetrační jednotkou [0,1mm], která udává hloubku průniku jehly stanoveného tvaru, hmotnosti a rozměrů do asfaltového pojiva temperovaného na teplotu 25 °C pod zatížením 100 g po dobu 5 s. Výsledek se určí ze tří platných měřených hodnot. Penetrace asfaltového pojiva modifikovaného pryžovým granulátem (CRmB) se měří na místech hladkých a lesklých a stanovují se 4 výsledky; do průměru se nejnižší naměřená penetrace nezapočítává.

Obrázek 11: Penetrace jehlou



4.2 Bod měknutí asfaltových pojiv

Norma ČSN EN 1427 popisuje určení bodu měknutí metodou kroužek a kulička. Stanovuje se teplota propadu kuličky asfaltovým pojivem o 25 mm ponořeného v kapalině, ve které se konstantně zvyšuje teplota o 5 °C/min. Výsledná hodnota se určí jako průměr ze dvou výsledných hodnot ve °C. Pro platný výsledek zkoušky nesmí být rozdíl mezi dvěma výsledky větší jak 1 °C u nemodifikovaných asfaltových pojiv.

Z důvodu větších částic pryže v asfaltovém pojivu (obrázek 12), lze u CRmB pozorovat porušení dříve než kulička protne předepsanou hodnotu, z důvodu vypadnutí kuličky z asfaltové kapsy. V tomto případě lze výsledek považovat za platný, pokud rozdíl dvou teplot je menší než 2 °C.

Obrázek 12: Stanovení bodu měknutí metodou kroužek kulička



4.3 Vratná duktilita asfaltových pojiv

Zkouška se provádí dle normy ČSN EN 13398. Připravený vzorek se temperuje na teplotu 25 °C, následně je protahován rychlostí 50 mm/min na cílovou hodnotu 200 mm. Hned po dosažení hranice 200 mm se protažený vzorek uprostřed přeručí přestřihnutím, jak zobrazuje obrázek 13. Výsledná hodnota je procentuální navrácení vzorku do původního stavu za 30 min.

Obrázek 13: Stanovení vratné duktility v duktilometru



4.4 Odolnost proti stárnutí asfaltových pojiv

Simulace stárnutí asfaltového pojiva v laboratorních podmínkách je možné provádět několika různými metodami, které se dělí do dvou hlavních skupin, a to stárnutí krátkodobé a stárnutí dlouhodobé.

Mezi nejčastěji používané metody **krátkodobého** stárnutí patří metoda TFOT (TFOT – thin film oven test), tedy tepelná stálost tenkého filmu asfaltového pojiva, a metoda RTFOT.

Nejběžnější metodou pro simulaci **dlouhodobého** stárnutí je PAV (PAV – pressurized agging vessel). Dále se lze setkat i s modifikovanou metodou 3xRTFOT, kdy je čas expozice trojnásobně prodloužen oproti běžné zkoušce RTFOT. [9]

V následujících kapitolách se blíže seznámíme s metodami, které byly použity v diplomové práci. Jedná se o metody RTFOT a 3xRTFOT, které jak později zjistíme, mají velký význam na celkový popis výsledků.

4.4.1 Metoda RTFOT

Stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu metodou RTFOT (RollingThin Film Oven Test) je popsáno v ČSN EN 12607–1. Metoda popisuje simulaci stárnutí asfaltového pojiva, která zahrnuje následující činnosti: přepravu asfaltového pojiva, skladování při vysokých teplotách, přečerpávání, míchání na obalovně, přepravu asfaltové směsi na stavenišťe, aplikace asfaltové směsi. Vzorek podrobený zkušební metodě RTFOT by měl tedy modelovat vlastnosti asfaltového pojiva obsaženého v asfaltové směsi těsně po pokládce.

Zkouška probíhá ve speciálně upravené laboratorní sušárně (obrázek 14) vybavené průtokoměrem vzduchu zajišťujícím rovnoměrný proud teplého vzduchu, teploměry a rotujícími hliníkovými disky sloužícími pro uchycení skleněných nádobek. Zkoušené asfaltové pojivo se rozlije do skleněných nádobek za zpracovatelné teploty vždy po 35 g na jednu skleněnou nádobku. Celá sada 8 nádobek se vloží do sušárny, kde se temperuje na teplotu 163 °C po dobu jedné hodiny. Poté jsou skleněné válcovité nádobky vloženy pomocí hliníkových disků do vodorovné polohy. Průběh této části musí probíhat bez zbytečných prodlev v zájmu minimální změny teploty. Samotná délka zkoušky je stanovena na 75 min při průtoku vzduchu 4 l/min. Držák rotuje s frekvencí 15 otáček za minutu při teplotě 163 °C, přičemž musí sušárna této teploty dosáhnout do 15 min od zavření dvířek, jinak je zkouška prohlášena za neplatnou.

Obrázek 14: Sušárna pro provedení zkoušky RTFOT



Problémový je průběh zkoušky RTFOT při použití některých modifikovaných pojiv či asfaltových pojiv modifikovaných pryžovým granulátem (CRmB) z důvodů jejich vysoké viskozity. Tato pojiva nevytvářejí požadovanou tenkou vrstvu, a dokonce i přes použití skleněných nádob s vnitřním konkávním otvorem, může docházet k vytékání pojiva z nádobek. Určení hmotnostních ztrát vlivem stárnutí je u takovýchto pojiv obtížné, stejně tak kvalita zestárnutí se může značně odlišovat od skutečnosti. Nevýhodou této metody je pracné čištění použitých nádobek po provedené zkoušce, zvláště pak u modifikovaných asfaltů.

Interpretace výsledků je v tomto případě velice rozsáhlá, jelikož asfaltové pojivo můžeme srovnávat před a po provedení zkoušky. Výsledkem může být procentuální ztráta hmotnosti, rozdíl penetrace jehlou, rozdíl bodu měknutí, změna dynamické viskozity a řada dalších laboratorních zkoušek.

4.4.2 Metoda 3xRTFOT

Motivací pro vznik této metody, vycházející z RTFOT, je najít vhodnou alternativu k RTFOT + PAV, tedy kombinaci těchto dvou simulací dlouhodobého stárnutí. RTFOT + PAV je velice náročná na čas a vybavenost laboratoře, proto vznikla v Rakousku metoda 3xRTFOT, která zatím není zakotvena v evropských normách. Stárnutí pomocí metody 3xRTFOT je naprosto stejné jako metodou RTFOT s jediným rozdílem, a to ztrojnásobenou dobou vystavení asfaltového pojiva teplému vzduchu, tedy základní doba 75 min je prodloužena na 225 min. Takto zestárlé pojivo vykazuje vlastnosti rovné přibližně životnosti vozovky, to je asi 10–15 let.

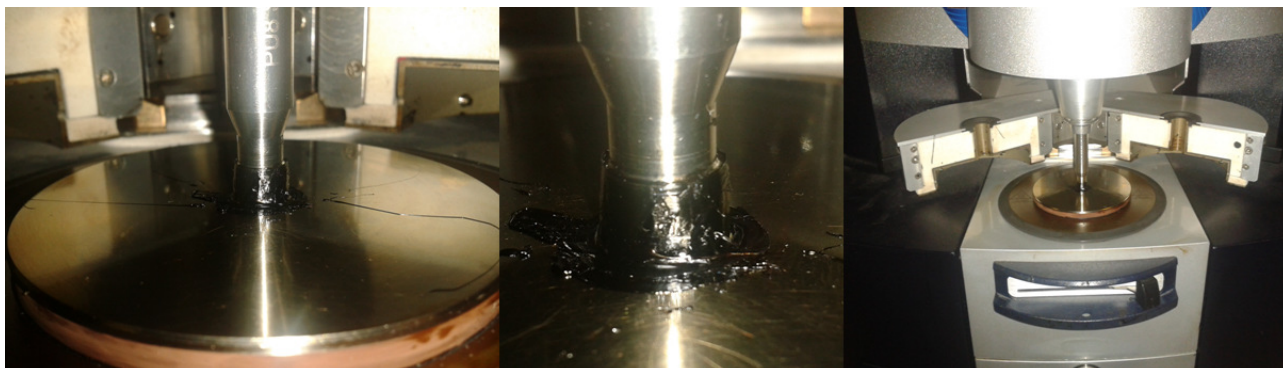
Srovnáním metody 3xRTFOT a PAV se zabýval ve své diplomové práci například Markus Hospodka z Vídeňské univerzity, který přišel na jednotlivá úskalí testu. Zdůrazňuje, že metoda 3xRTFOT plně neodpovídá metodě PAV. [10]

4.5 Relaxace smykového napětí asfaltových pojiv v DSR

Zkouška tohoto typu není dosud příliš známá a v zahraniční literatuře je věnováno zkoušce minimum vědeckých příspěvků. Do válcového vzorku asfaltového pojiva, mocnosti vrstvy 2 mm a průměru 8 mm (obrázek 15), je vneseno smykové napětí pomocí horní geometrie, která se pootočí po obvodu o 1 % tloušťky vrstvy rovnoměrně za 60 s. V našem případě je to tedy 0,02 mm, maximální a konstantní hodnota smykového přetvoření v době měření relaxace, jak je možné vidět na obrázku 16 zeleně zobrazený průběh smykového přetvoření. Takto vnesené smykové napětí, jehož průběh uvnitř vzorku pojiva zobrazuje obrázek 17, se uvolňuje (relaxuje) po dobu 900 s, což je doba měření relaxace smykového napětí. Takto nastavená zkouška byla prováděna při teplotách $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Teplota měření je závislá na možnostech přístroje, který při nižších

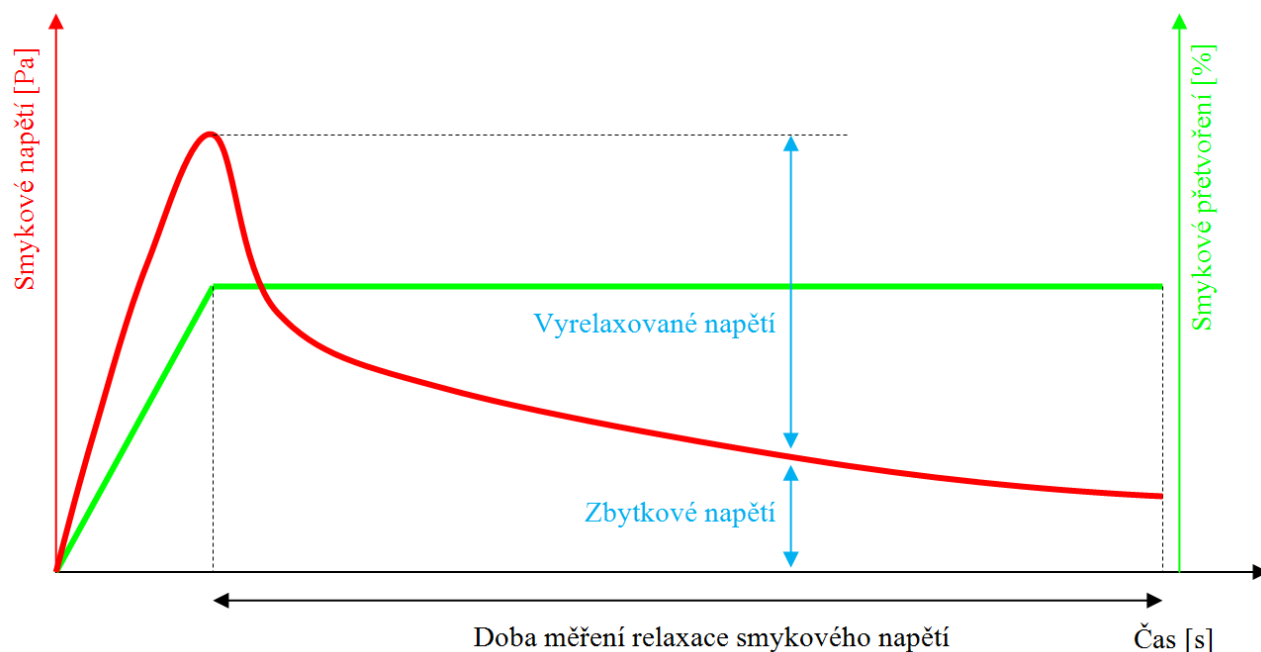
teplotách není schopen vyvinout potřebný krouticí moment. Teplota zkoušky může být snížena zvolením geometrie o menším průměru.

Obrázek 15: Zkouška relaxace smykového napětí v DSR

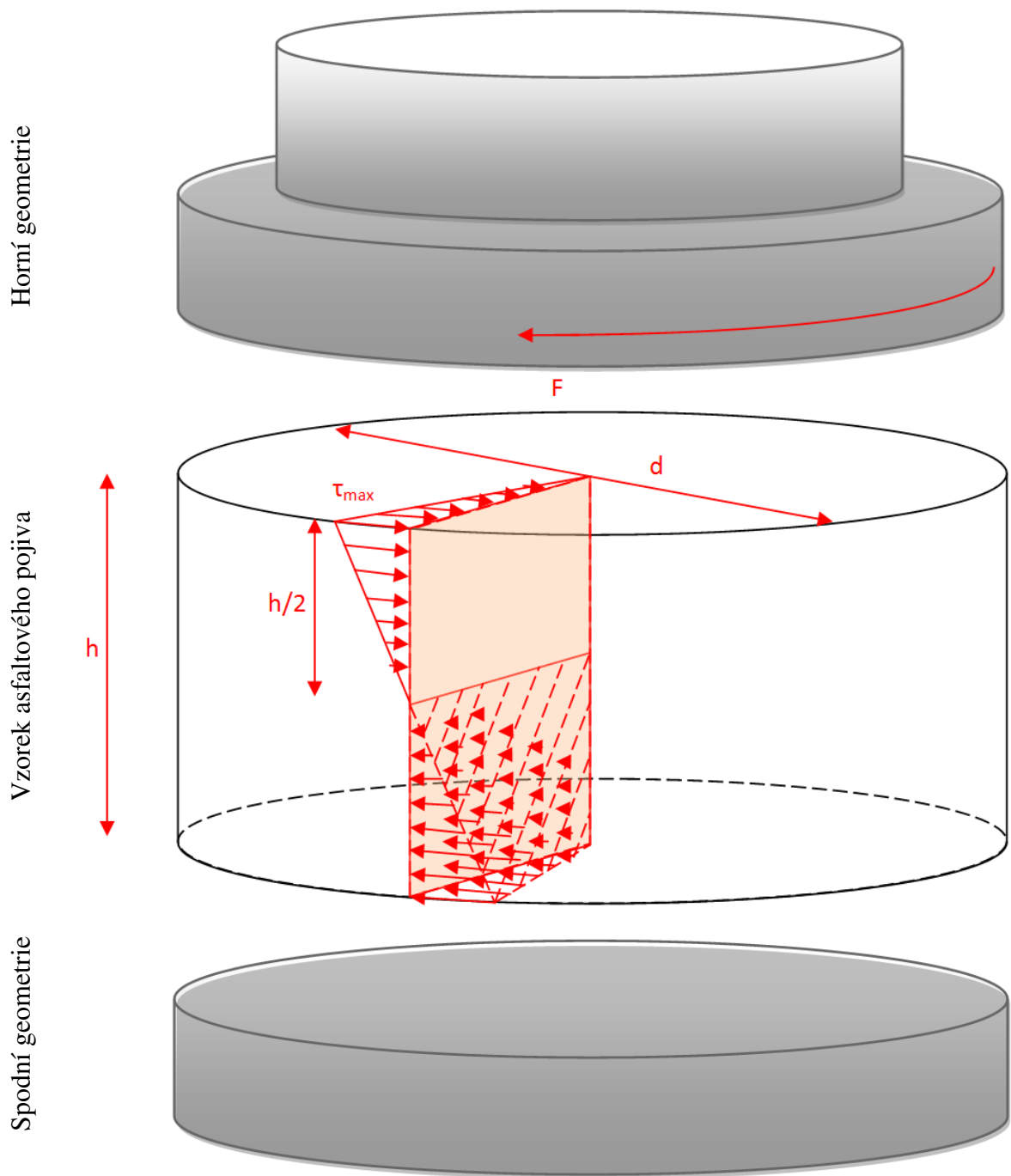


Obrázek 17 popisuje výsledný záznam změny smykového napětí (červeně zobrazené křivky) v závislosti na čase. Podle takto získaných výsledků je možné určit hodnotu vyrelaxovaného a zbytkového napětí v libovolně zvoleném čase od začátku měření relaxace smykového napětí.

Obrázek 16: Průběh zkoušky relaxace smykového napětí



Obrázek 17: Průběh smykového napětí na zkoušeném vzorku v DSR



Kde je: F tečná síla [N]
 d průměr vzorku [mm]
 h výška vzorku [mm]
 τ_{max} maximální smykové (tečné) napětí [Pa]

4.6 Zkouška nízkoteplotních vlastností (TSRST)

Zkouška nízkoteplotních vlastností s rovnoměrným řízením poklesu teploty (TSRST) dle ČSN EN 12697-46 probíhá při zachování konstantní délky zkoušeného vzorku a rovnoměrně snižující se teploty. Zkoušeným vzorkem je v tomto případě asfaltová směs, u které zjišťujeme minimální teplotu nutnou pro porušení tahem. Tahové napětí je přitom vyvoláno kryogenním napětím, tedy napětím vyvolaným vlastností materiálu smršťovat se při klesající teplotě (teplotní smršťování). Výsledky se získávají vždy z tří provedených zkoušek na jedné asfaltové směsi.

Vzorky asfaltové směsi určené pro tuto zkoušku se získávají rozřezáním desky vyrobené dle EN 12697-33 na požadovaný rozměr (200 mm × 50 mm × 50 mm). Z jedné desky je možné získat pět zkušebních těles, z nichž se zkoušky ideálně provádí na třech tělesech umístěných blíže ke středu desky z důvodů předpokladu jejich kvalitnějšího zhutnění. Jak je možné vidět na obrázku 18, jedná se nejčastěji o vzorek 2,3 a 4. Všechny rozměry hranolů jsou před zkouškou změřeny pro přesnější interpretaci získaných výsledků. Zkušební tělesa se následně přilepí pomocí epoxidové pryskyřice do upínacích čelistí a vloží se do fixační formy, sloužící pro centraci vzorku po dobu nutnou pro potřebné zatvrdnutí epoxidové pryskyřice, která bývá obvykle 24 hodin.

Obrázek 18: Příprava zkušebních těles pro zkoušku nízkoteplotních vlastností

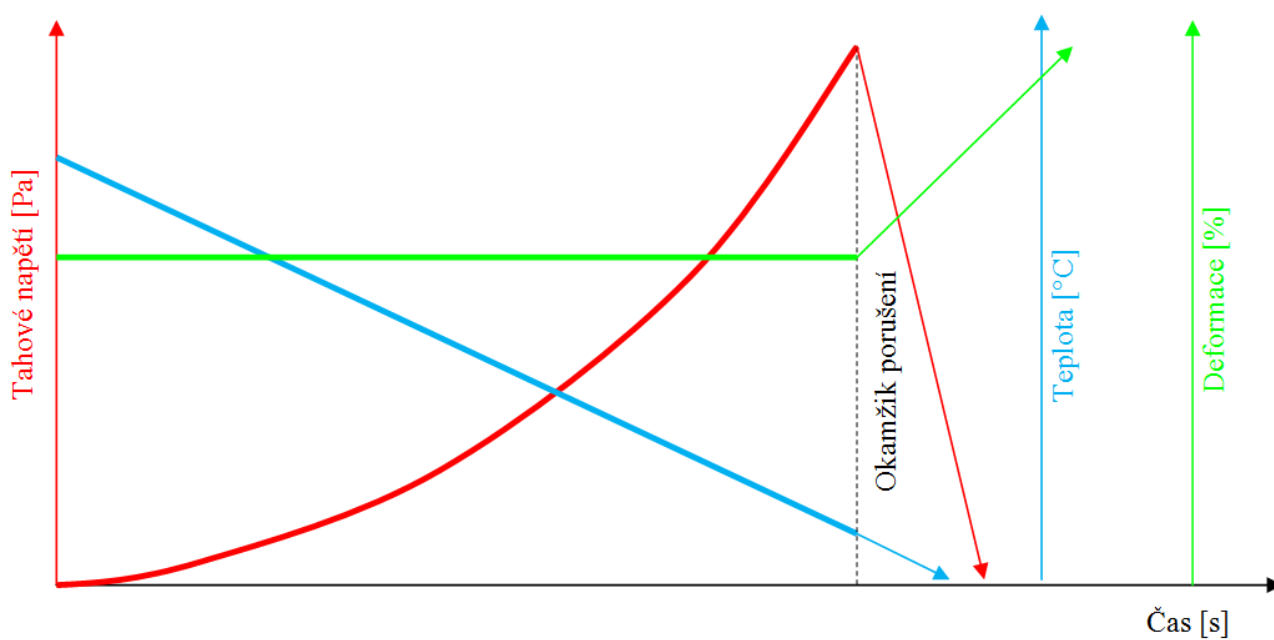


Poté se zkušební těleso opatřené upínacími čelistmi umístí do zkušební komory (obrázek 19) a našroubuje se oboustranně k zatěžovacímu rámu pomocí šroubení, jimž jsou opatřeny upínací čelisti. Poté je vzorek temperován na požadovanou počáteční teplotu, která v našem případě činí 10 °C. Teplota je snižována rychlostí -10 °C/hod a zároveň je ověřována teplotním čidlem umístěným uprostřed pomocného zkušebního tělesa. Díky takto umístěnému čidlu je možné určit rozdíl teploty ve zkušební komoře a skutečné teploty ve zkušebním vzorku. Pohyb veličin v průběhu zkoušky je zobrazen na obrázku 20.

Obrázek 19: Zkušební zařízení pro zkoušku nízkoteplotních vlastností



Obrázek 20: Průběh zkoušky nízkoteplotních vlastností



5 POUŽITÉ MATERIÁLY

5.1 Asfaltová pojiva

Pro provedení zkoušek bylo zvoleno celkem 7 asfaltových pojiv tak, aby bylo možné získat popis rozdílů vybraných druhů modifikací. 2 nemodifikovaná asfaltová pojiva byla zvolena z běžně dostupných asfaltových pojiv, a to výrobce Shell gradace 50/70 a OMV gradace 50/70. Ostatních 5 modifikovaných asfaltových pojiv bylo připraveno v laboratoři pomocí dvou druhů modifikací. Modifikací přidáním různého množství pryžového granulátu a modifikací přidání různého množství SBS (styrene butadiene styrene). Díky vybraným druhům modifikací je možné srovnávat mnoho výsledků a materiálových charakteristik. Například chování nízko-viskózního asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem (CRmB) oproti vysoko-viskóznímu CRmB či vliv modifikace pryžovým granulátem oproti termoplastickému elastomeru SBS. Všechny zkoušky byly provedeny i na materiálech degradovaných krátkodobým stárnutím RTFOT a dlouhodobým stárnutím 3xRTFOT. V tabulce 1 je zobrazen přehled všech zkoušených asfaltových pojiv včetně provedených zkoušek.

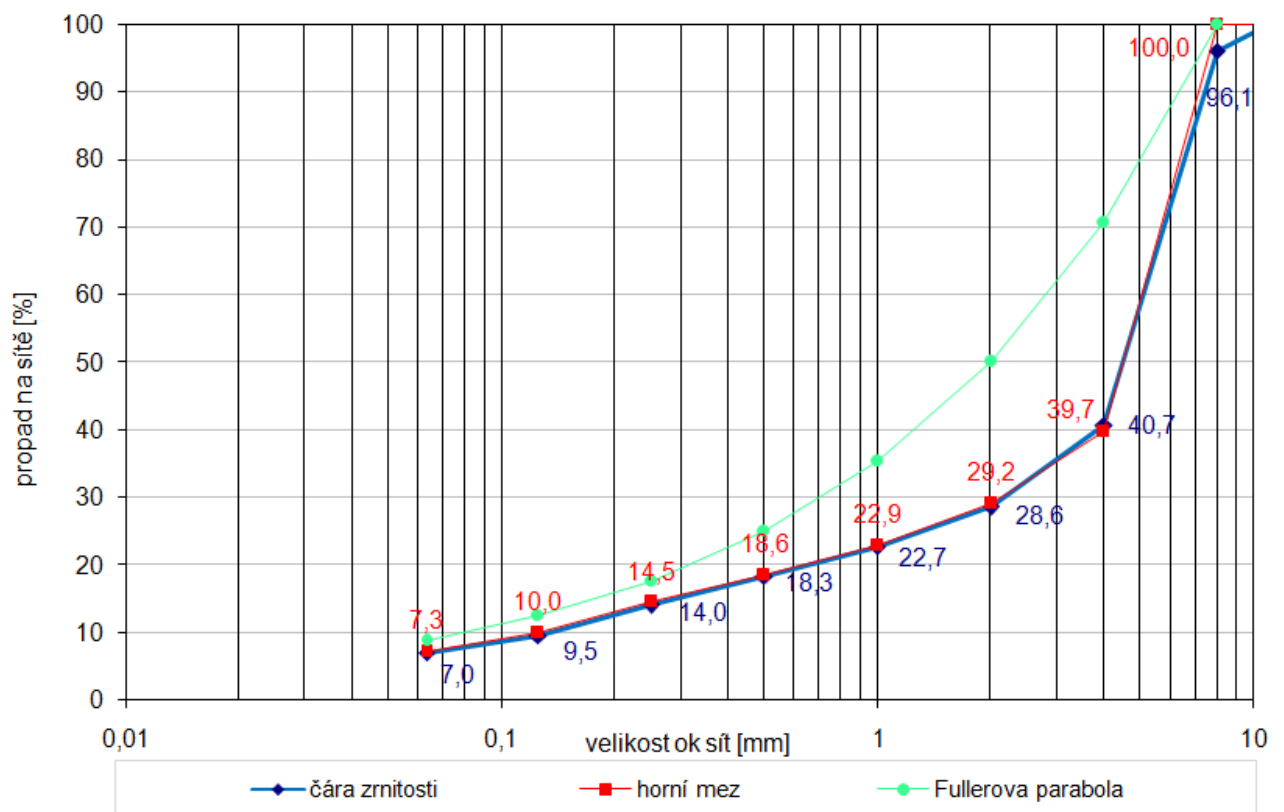
5.2 Asfaltové směsi

Asfaltové směsi použité v této práci byly navrženy pro zkoušku nízkoteplotních vlastností (TSRST) tak, aby nejvýznamnějším materiálem pro výsledek této zkoušky bylo asfaltové pojivo. Tyto podmínky splňuje směs BBTM A 8, asfaltový beton pro velmi tenké vrstvy od 20 mm, s vyšším podílem asfaltového pojiva 8,5% a mezerovitostí 7% až 10%. Mezerovitost asfaltové směsi byla určena z objemových hmotností určených dle ČSN EN 12697–6 podle dvou různých postupů, a to postupem B – nasycený suchý povrch (SSD) a postupem D – podle rozměrů (tabulka 1). Návrh čáry zrnitosti zobrazuje graf 1. Frakce kameniva 0/4 mm a 4/8 mm, zvolené pro tuto asfaltovou směs, pochází z lomu Luleč a jejich síťové rozbory jsou součástí přílohy. Vyrobeny byly dvě desky dle EN 12697–33 se stejným složením kameniva i množstvím pojiva, rozdílné byly pouze v použitém množství pryžového granulátu. Pro první desku bylo použito pojivo obsahující silniční asfalt OMV 50/70 a 11 % pryžového granulátu a pro druhou desku pojivo obsahující silniční asfalt OMV 50/70 a 17 % pryžového granulátu. Na obrázku 21 je zobrazeno kamenivo a vytvořená Marshallova tělesa, nezbytná pro návrh asfaltové směsi.

Obrázek 21: Návrh a příprava asfaltové směsi BBTM A 8



Graf 1: Návrh čáry zrnitosti pro asfaltovou směs BBTM A



Tabulka 1: Stanovení mezerovitosti asfaltové směsi BBTM A

Stanovení mezerovitosti z rozměrů:

těleso	obsah pojiva [%]	výška tělesa [mm]	průměr tělesa [mm]	hmotnost suchá [g]	obj. hm. z rozměrů [kg/m ³]	průměrná obj.hm. [kg/m ³]	maximální obj. hm. [kg/m ³]	mezerovitost [%]	průměrná mezerovitost [%]
1	8,5	63,60	102,15	1130,0	2168,0	2186,7	2377	8,8	8,0
3	8,5	64,10	101,65	1130,0	2172,3			8,6	
4	8,5	62,30	102,00	1130,0	2219,7			6,6	

Stanovení mezerovitosti z hmotností:

těleso	obsah pojiva [%]	hmotnost suchá [g]	hmotnost ve vodě [g]	hmotnost po vytažení [g]	obj. hm. z vážení [kg/m ³]	průměrná obj.hm. [kg/m ³]	maximální obj. hm. [kg/m ³]	mezerovitost [%]	průměrná mezerovitost [%]
1	8,5	1125,1	622,2	1130,9	2205,3	2197,8	2377	7,2	7,5
3	8,5	1117,2	614,5	1121,1	2198,9			7,5	
4	8,5	1091,4	599,0	1096,1	2189,2			7,9	

Tabulka 2: Seznam asfaltových pojiv a provedených zkoušek

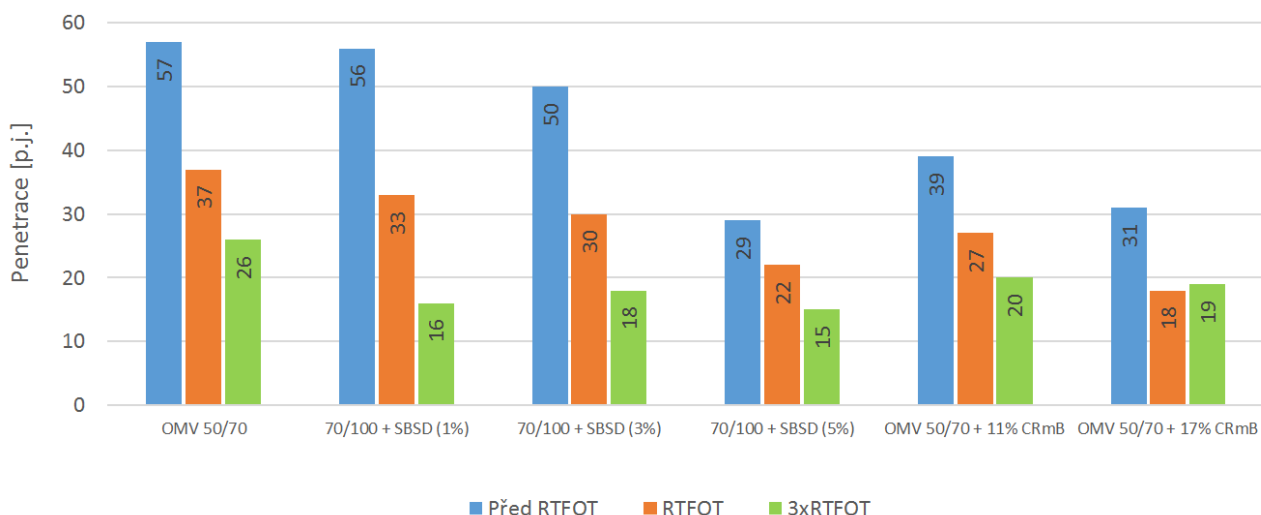
Asfaltové pojivo	Penetrace jehlou	Bod měknutí KK	Vratná duktilita	Relaxace v DSR
OMV 50/70	✓	✓	✗	✓
OMV 50/70 (RTFOT)	✓	✓	✗	✓
OMV 50/70 (3xRTFOT)	✓	✓	✗	✓
Shell 50/70	✗	✗	✗	✓
Shell 50/70 (RTFOT)	✗	✗	✗	✓
Shell 50/70 (3xRTFOT)	✗	✗	✗	✓
70/100 + SBS (1%)	✓	✓	✓	✓
70/100 + SBS (1%) (RTFOT)	✓	✓	✓	✓
70/100 + SBS (1%) (3xRTFOT)	✓	✓	✓	✓
70/100 + SBS (3%)	✓	✓	✓	✓
70/100 + SBS (3%) (RTFOT)	✓	✓	✓	✓
70/100 + SBS (3%) (3xRTFOT)	✓	✓	✓	✓
70/100 + SBS (5%)	✓	✓	✓	✓
70/100 + SBS (5%) (RTFOT)	✓	✓	✓	✓
70/100 + SBS (5%) (3xRTFOT)	✓	✓	✓	✓
OMV 50/70 + 11% CRmB	✓	✓	✓	✓
OMV 50/70 + 11% CRmB (RTFOT)	✓	✓	✓	✓
OMV 50/70 + 11% CRmB (3xRTFOT)	✓	✓	✓	✓
OMV 50/70 + 17% CRmB	✓	✓	✓	✓
OMV 50/70 + 17% CRmB (RTFOT)	✓	✓	✓	✓
OMV 50/70 + 17% CRmB (3xRTFOT)	✓	✓	✓	✓

6 VÝSLEDKY ZKOUŠEK

6.1 Penetrace jehlou asfaltových pojiv při 25 °C

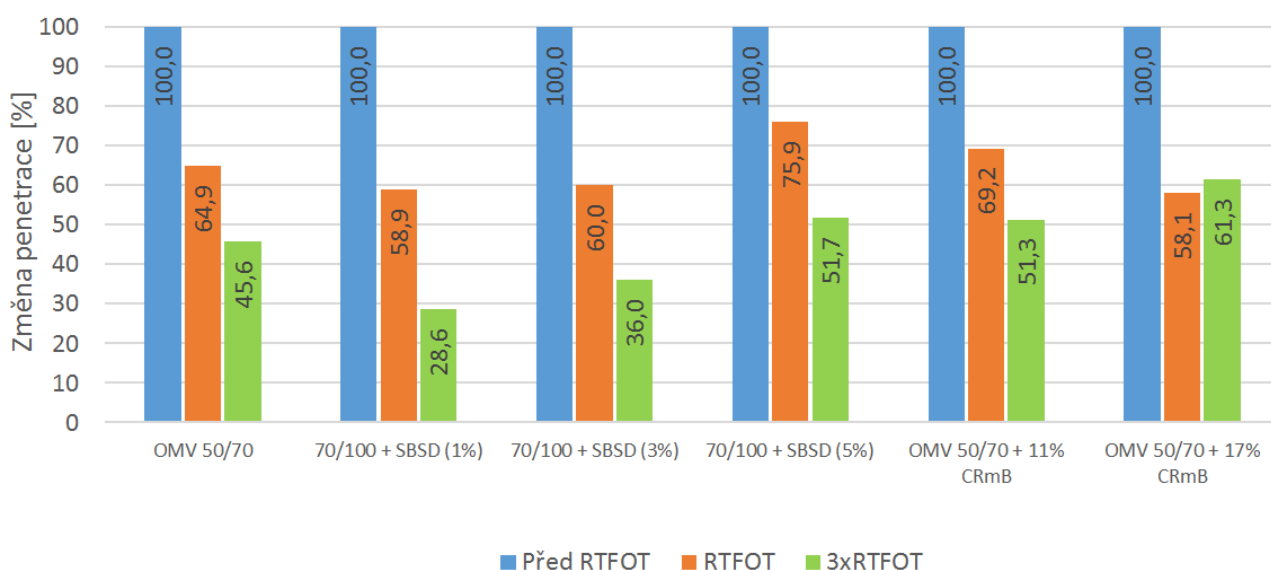
Výsledky této základní empirické zkoušky poukazují na vliv množství a způsobu modifikace asfaltových pojiv. Nejvyšších hodnot penetrace dosahoval nemodifikovaný silniční asfalt. Polymerem modifikovaná pojiva, pomocí například SBS (styrene butadiene styrene), mají oproti běžným asfaltům pevnější chemické vazby mezi částicemi, čímž zvyšují odpor proti vniknutí zkušební jehly. Polymery vytvářejí v asfaltovém pojivu „vlasovou“ strukturu, která však výrazně ztrácí své vlastnosti s rostoucí degradací stárnutím. Z grafů 2 a 3 je patrné, že stárnutím metodou RTFOT dochází k poklesu hodnoty penetrace a metoda 3xRTFOT hodnotu penetrace ještě více snižuje. Také se zvyšujícím se podílem polymerní přísady v asfaltovém pojivu klesá hodnota penetrace. Zvýšením stupně modifikace klesá vliv stárnutí na změnu hodnoty penetrace, tj. podíl hodnoty nezestárlého pojiva k hodnotě penetrace pojiva nezestárlého.

Graf 2: Penetrace jehlou při 25 °C



Asfaltová pojiva modifikovaná pryžovým granulátem (CRmB) ovlivňují penetraci jehlou zejména svou nehomogenitou. Jehle při průniku tímto pojivem klade odpor pryžový granulát, a to nejen případně v ose jejího hrotu, ale i třením po vnikajícím povrchu jehly. Díky tomu je penetrace jehlou snižována při zvyšování podílu pryžového granulátu. Stárnutí v tomto případě výsledné hodnoty zkoušky penetrace jehlou snižuje, nemá však na ně významnější vliv. V případě CRmB obsahujícího 17 % pryžového granulátu došlo k omezení vlivu dlouhodobého stárnutí na snížení hodnoty penetrace, což vyplývá z téměř shodné hodnoty penetrace pojiva po stárnutí metodou RTFOT a 3xRTFOT.

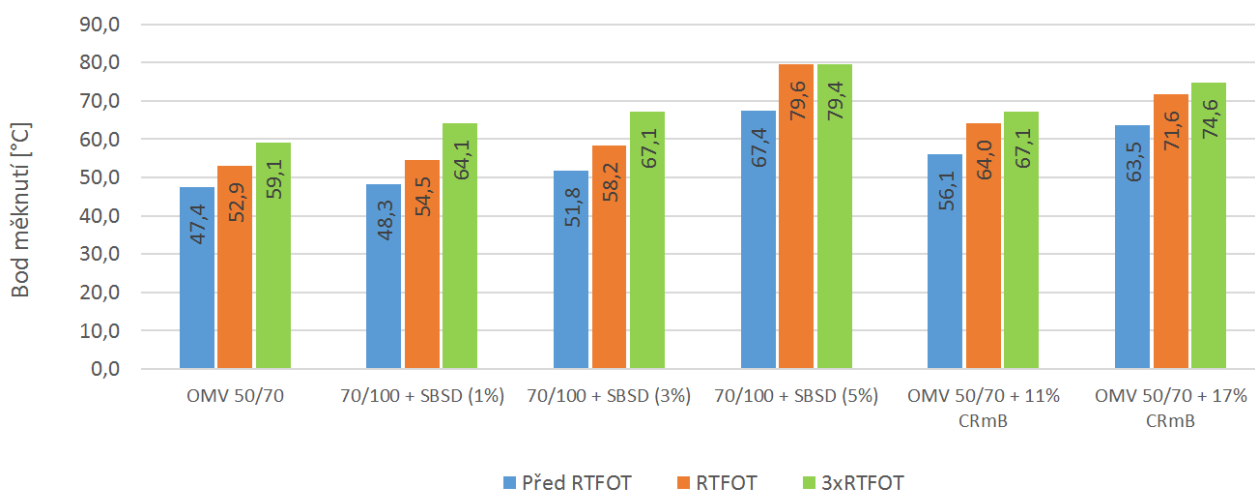
Graf 3: Změna penetrace jehlou při 25 °C v procentech



6.2 Bod měknutí asfaltových pojev

Ztrátou lehkých olejů (asfalténů) z asfaltového pojiva při jeho stárnutí se zvyšuje bod měknutí určený zkouškou kroužek kulička. Hodnota bodu měknutí tedy stoupá s prodlužující se dobou stárnutí asfaltových pojev, pouze větší podíl modifikujících polymerů tento trend omezuje (viz graf 4). Asfaltová pojiva modifikovaná pryžovým granulátem prokazují mírnější stoupaní bodu měknutí při stárnutí. Nejnižší nárůst hodnoty bodu měknutí po dlouhodobém stárnutí 3xRTFOT dosáhla nejvíce modifikovaná asfaltová pojiva (asfalt modifikovaný 5 % SBS a CRmB se 17 % pryžového granulátu), což je vidět v grafu 5.

Graf 4: Bod měknutí



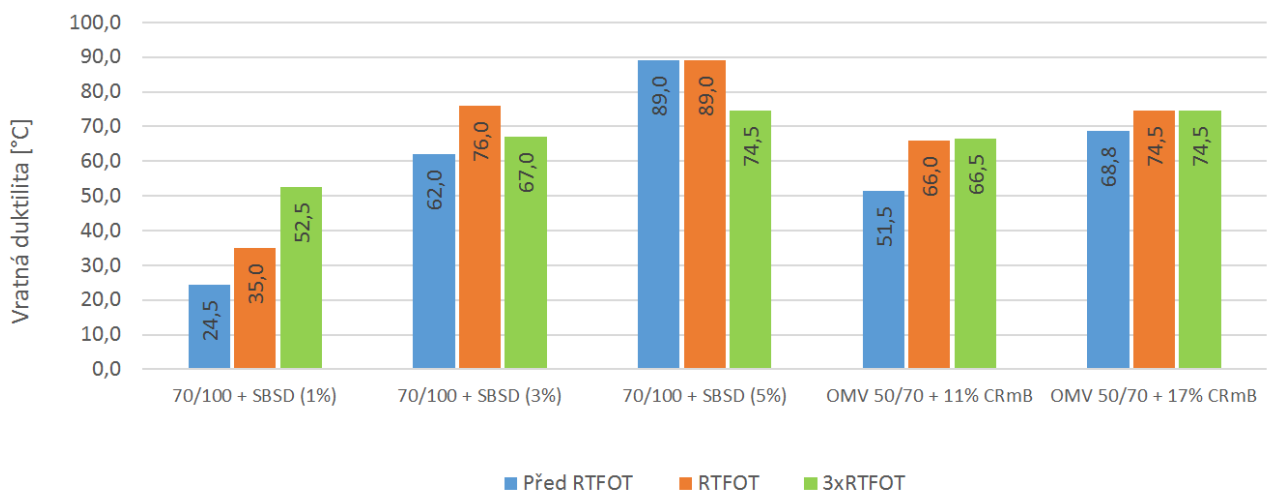
Graf 5: Změna bodu měknutí v procentech



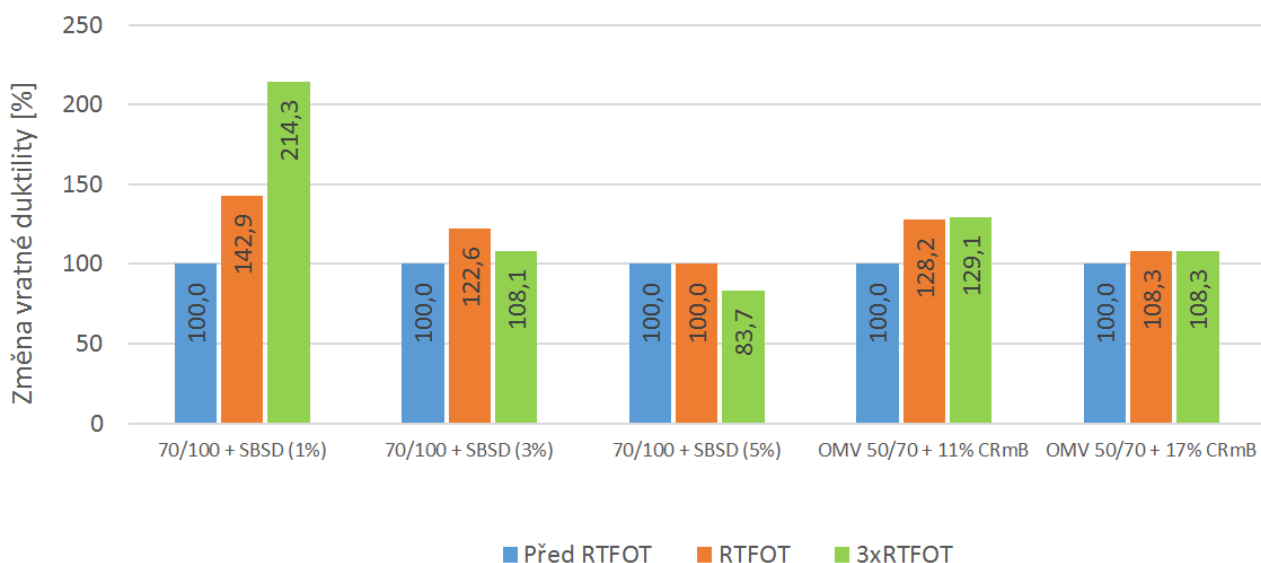
6.3 Vratná duktilita asfaltových pojiv při 25 °C

Zkouška pro stanovení vratné duktility se provádí na modifikovaných asfaltech, proto na běžných silničních asfaltech nebyla provedena. Výsledky této zkoušky jasně odlišují způsob modifikace asfaltových pojiv. Zatímco modifikace polymerem je velice proměnlivá v závislosti na množství polymeru a úrovni zestárnutí, modifikace pryžovým granulátem nepodléhá při stárnutí velkým změnám vratné duktility a jen ji mírně zvyšuje. Na modifikovaných asfaltech s nižším podílem polymeru zřetelně stoupá hodnota vratné duktility. Se zvyšujícím se množstvím modifikace se tento trend obrací a díky přetřhaným strukturním vazbám vlivem stárnutí hodnota vratné duktility klesá. Vratná duktilita CRmB byla stárnutím ovlivněna méně.

Graf 6: Vratná duktilita při 25 °C



Graf 7: Změna vratné duktility při 25 °C v procentech

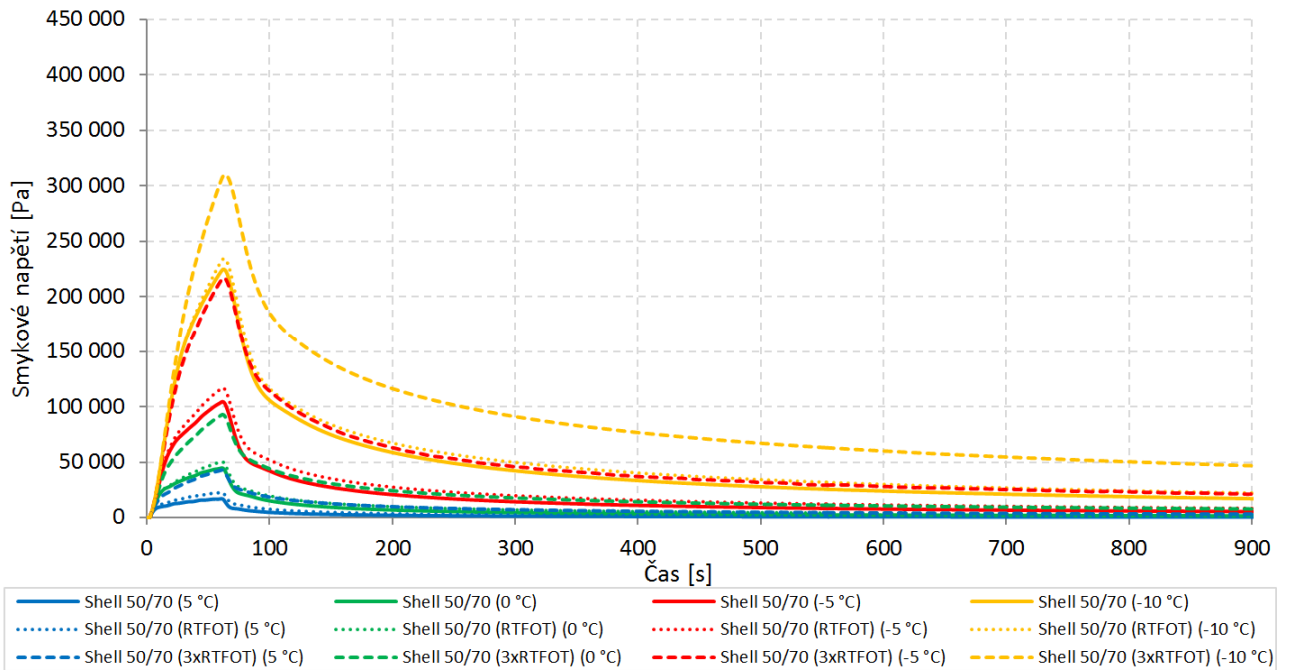


6.4 Relaxace smykového napětí asfaltových pojiv v DSR

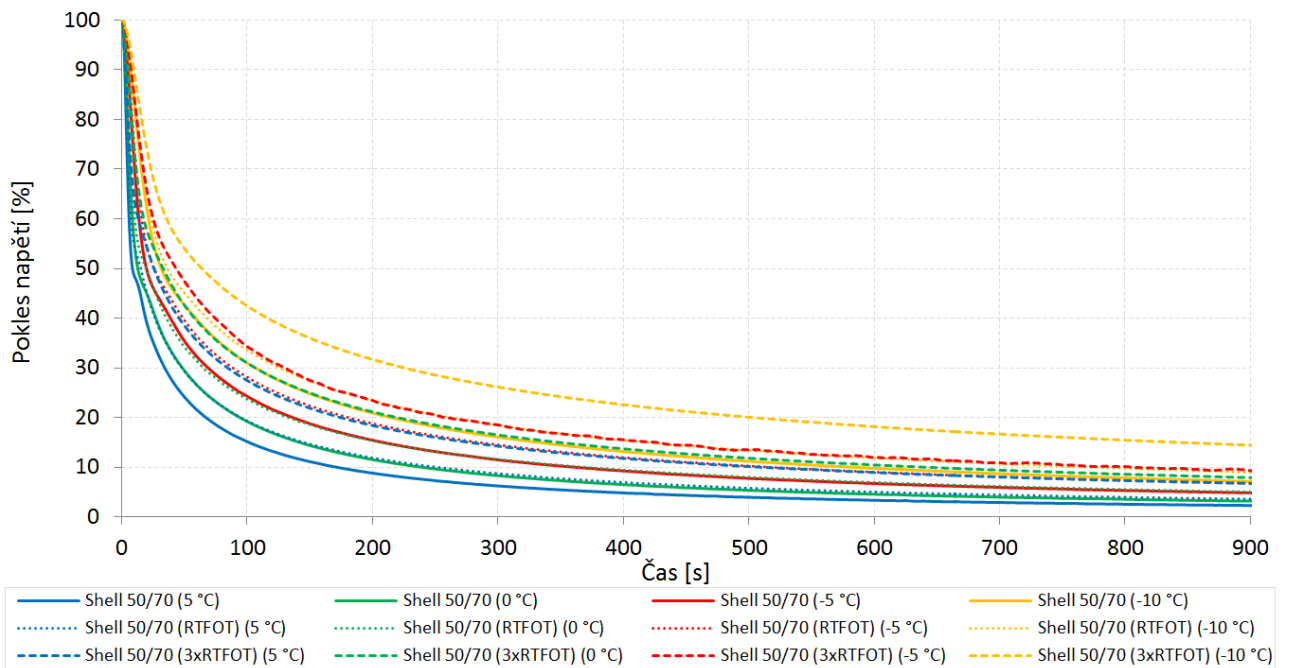
Jedním z cílů zkoušek relaxace smykového napětí v DSR bylo porovnání dvou běžně dostupných nemodifikovaných asfaltových pojiv stejné gradace od dvou různých výrobců, a to Shell 50/70 a OMV 50/70. Ač by tato pojiva měla mít téměř stejné vlastnosti, relaxací smykového napětí v DSR se ověřily jejich drobné rozdíly. Průběhy zkoušek relaxace smykového napětí v DSR těchto pojiv zobrazují při teplotách 5 °C, 0 °C, -5 °C a -10 °C včetně popisu stárnutí RTFOT a 3xRTFOT grafy 8 až 11 pomocí závislosti průběhu smykového napětí na čase zkoušky. Z grafů je patrná velká závislost smykového napětí i rychlosti relaxace smykového napětí na teplotě.

Běžně dostupná nemodifikovaná asfaltová pojiva neprojevují velkou ztrátu schopnosti relaxace smykového napětí vlivem stárnutí metodou RTFOT. Relaxační vlastnosti těchto pojiv jsou znatelně omezeny až po degradaci metodou 3xRTFOT, což se projevuje vyvozováním vyšších maximálních smykových napětí a následně zhoršenou možností snižovat napětí (relaxovat). Z porovnání dvojice pojiv Shell 50/70 a OMV 50/70 vychází lepší relaxační vlastnosti u OMV 50/70, které bylo následně použito pro modifikaci pryžovým granulátem.

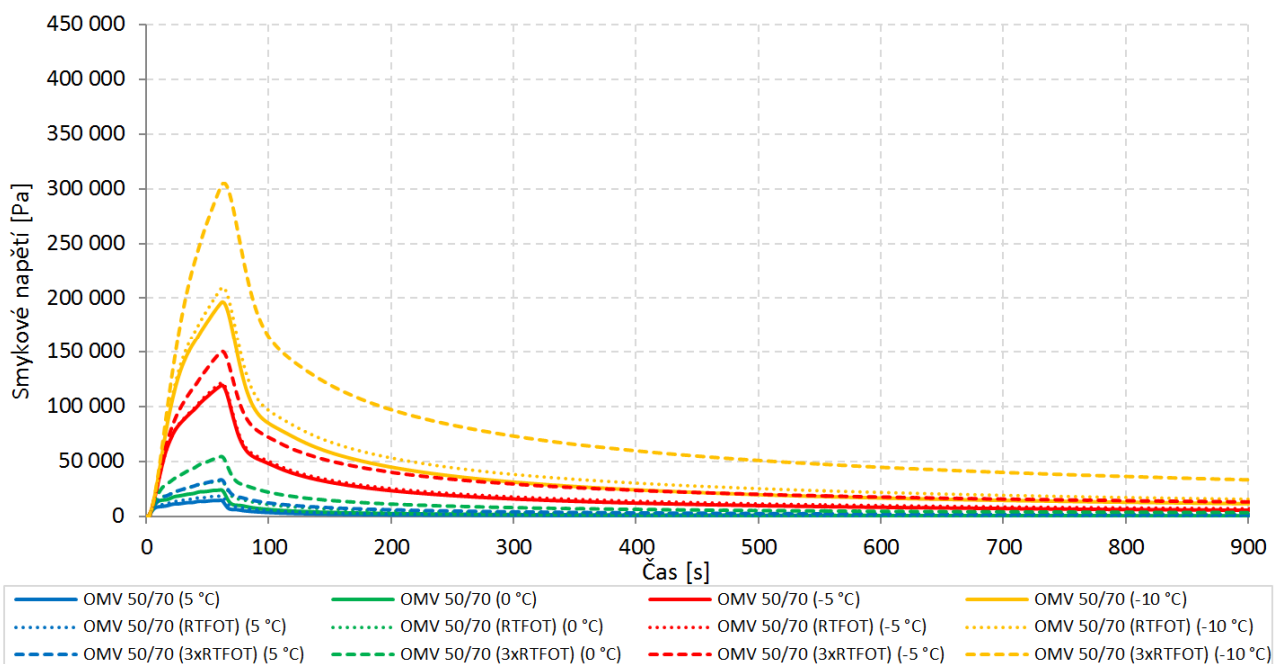
Graf 8: Průběh zkoušky relaxace Shell 50/70



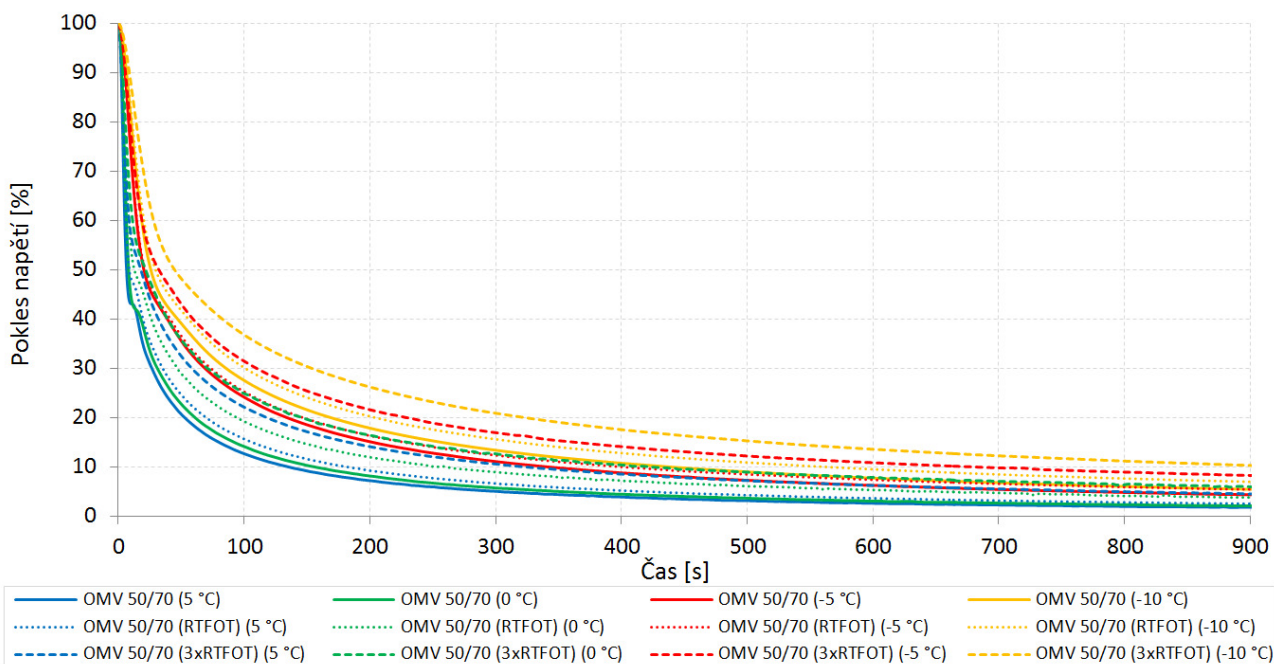
Graf 9: Pokles smykového napětí Shell 50/70 v procentech



Graf 10: Průběh zkoušky relaxace OMV 50/70

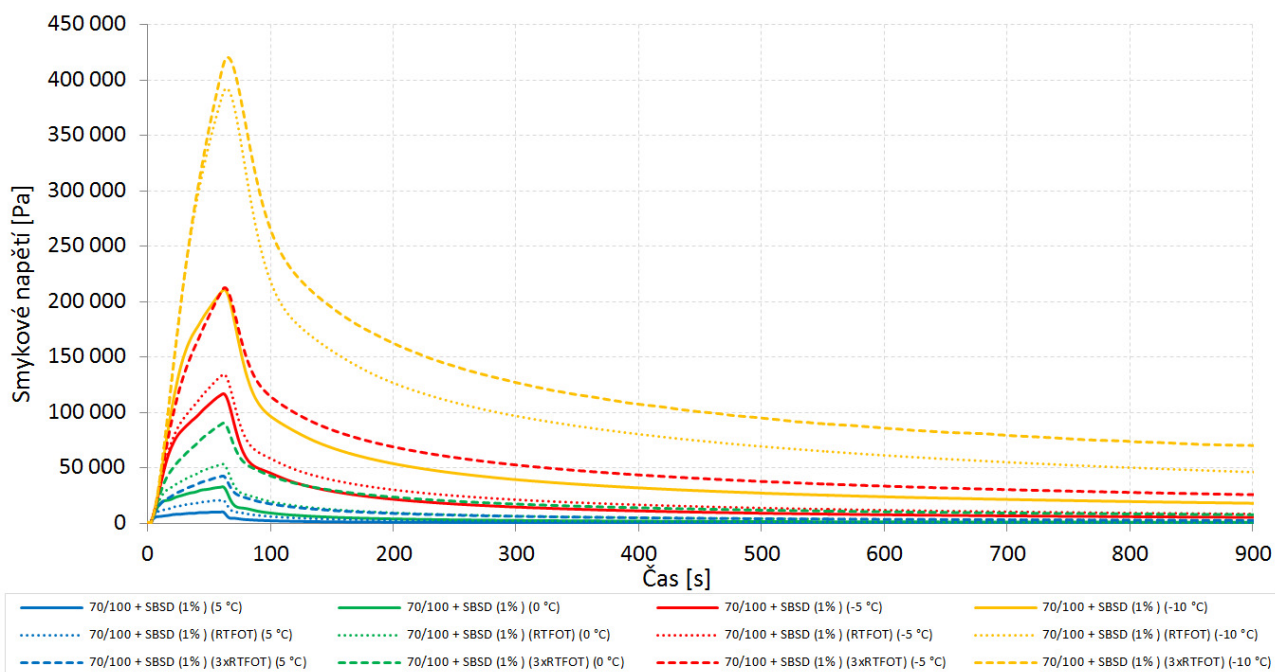


Graf 11: Pokles smykového napětí OMV 50/70 v procentech

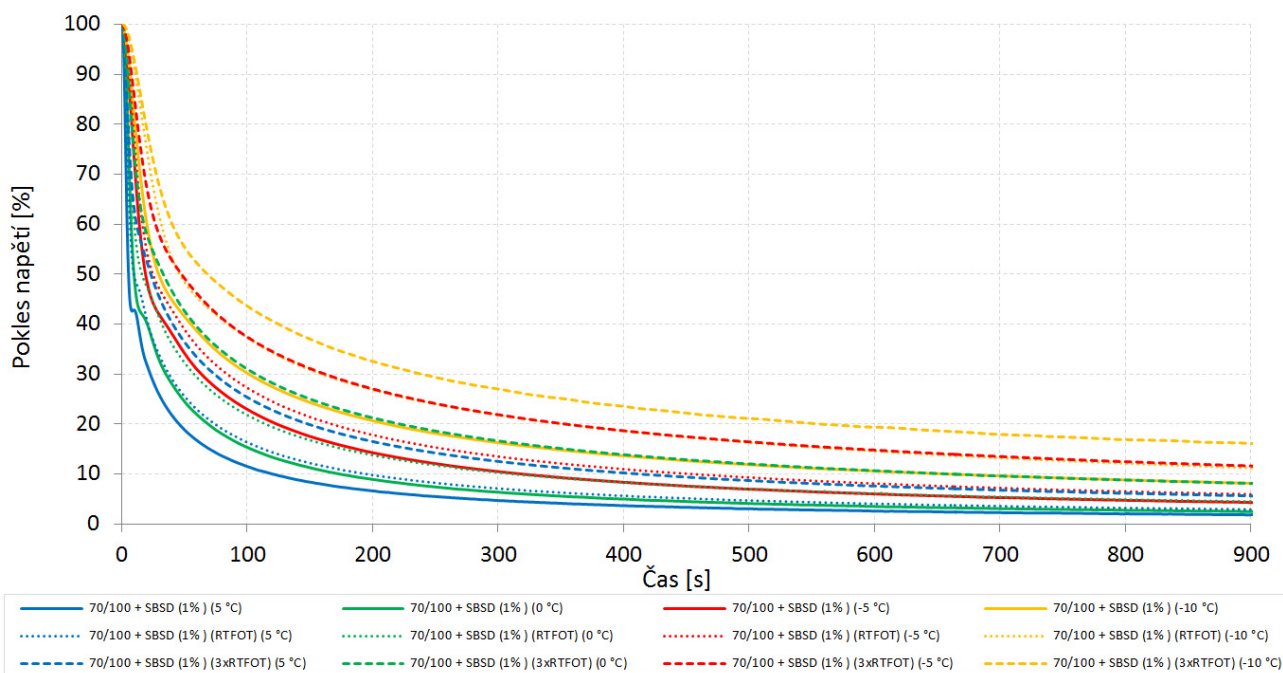


Průběhy zkoušek relaxace polymerem modifikovaných asfaltových pojiv zobrazují grafy 12–17. U pojiv s nižším podílem polymeru SBS (1% a 3%) je zřejmá malá odolnost vůči stárnutí metodou RTFOT při nižších teplotách.

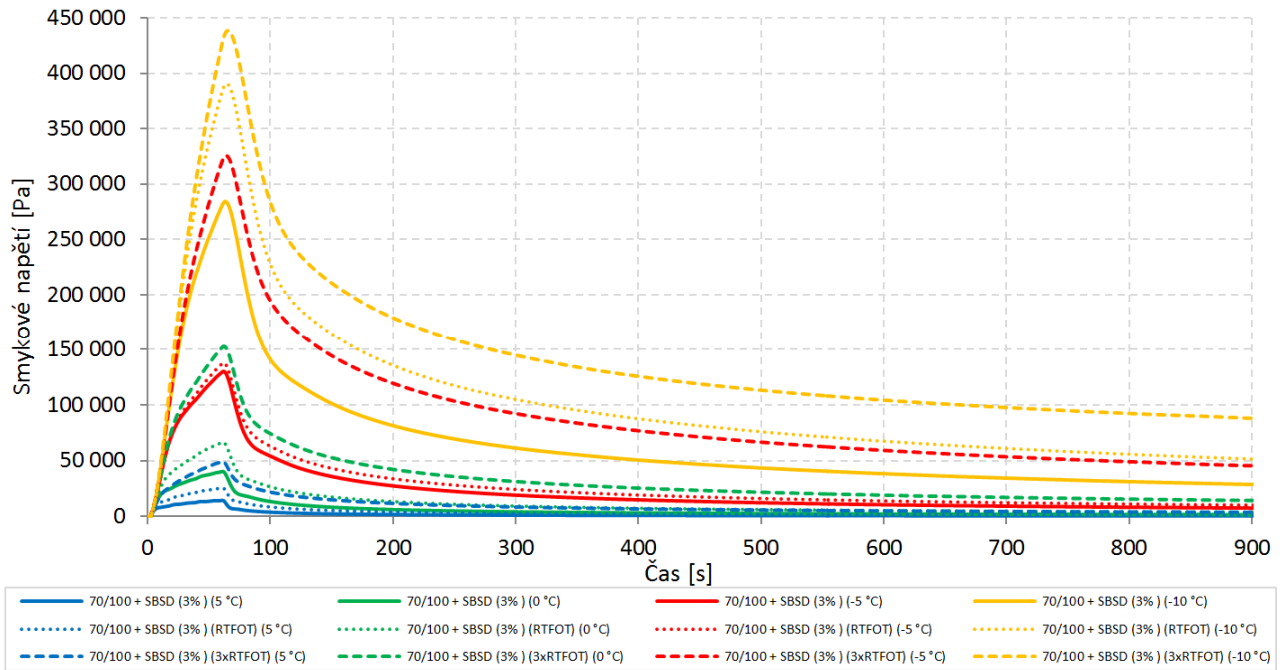
Graf 12: Průběh zkoušky relaxace 70/100 + SBS (1%)



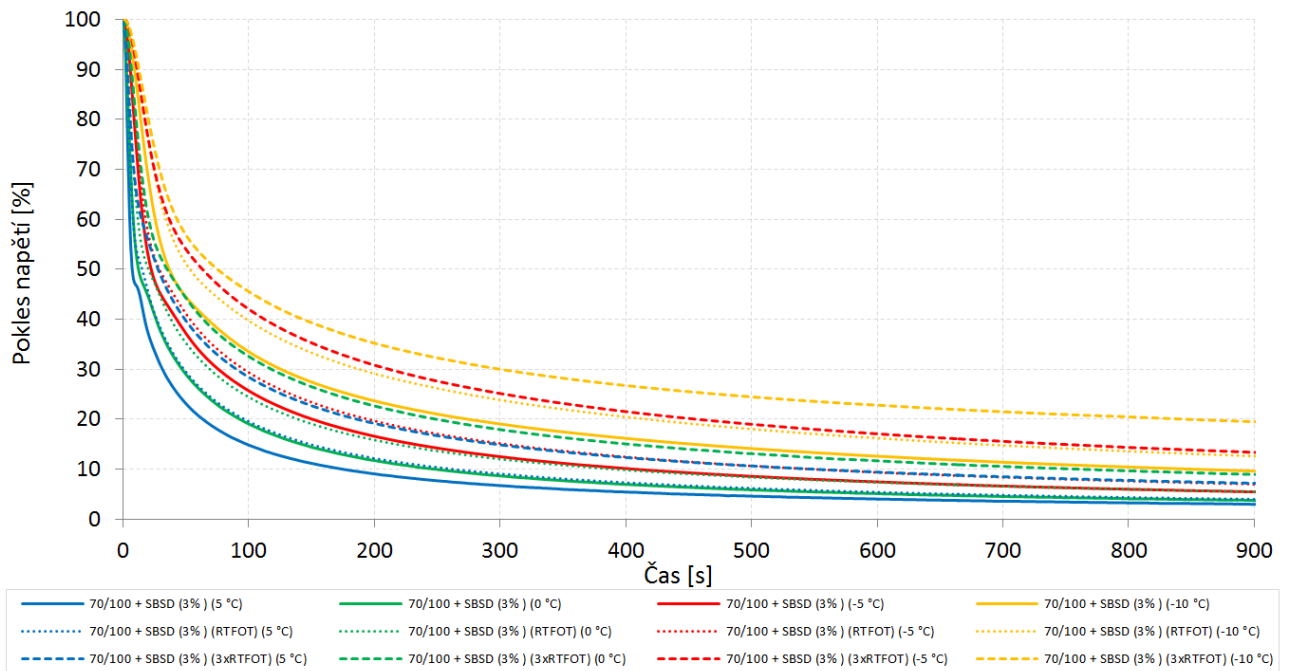
Graf 13: Pokles smykového napětí 70/100 + SBS (1%) v procentech



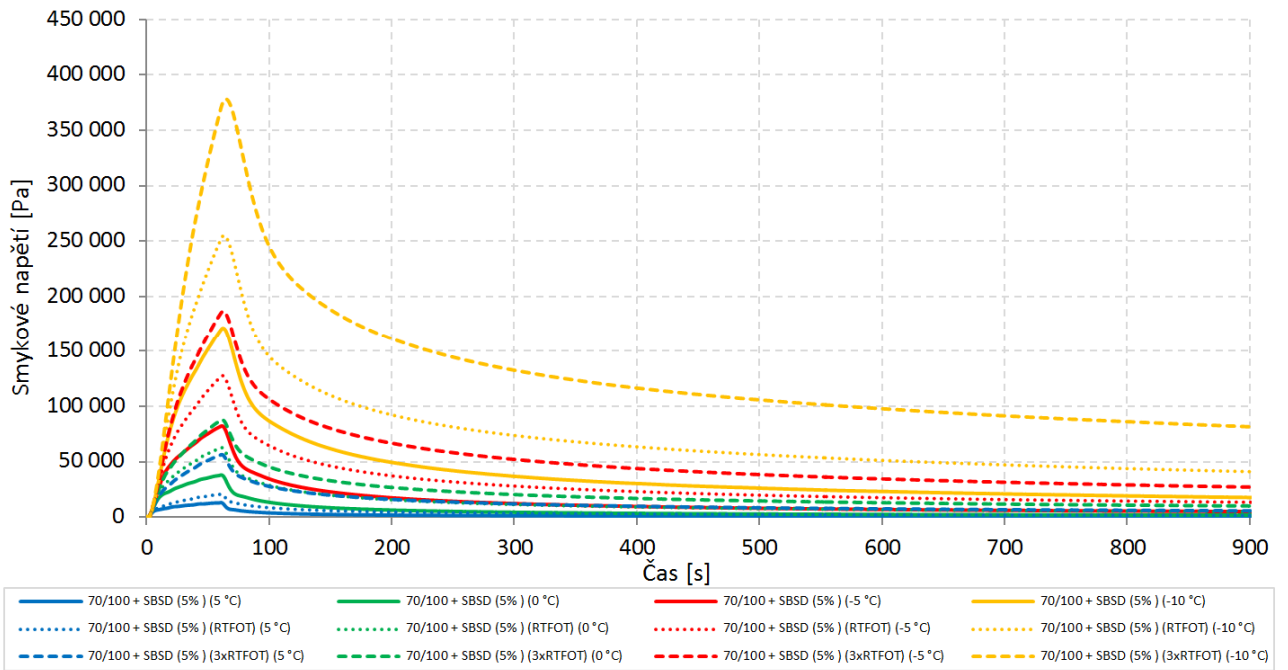
Graf 14: Průběh zkoušky relaxace 70/100 + SBS (3%)



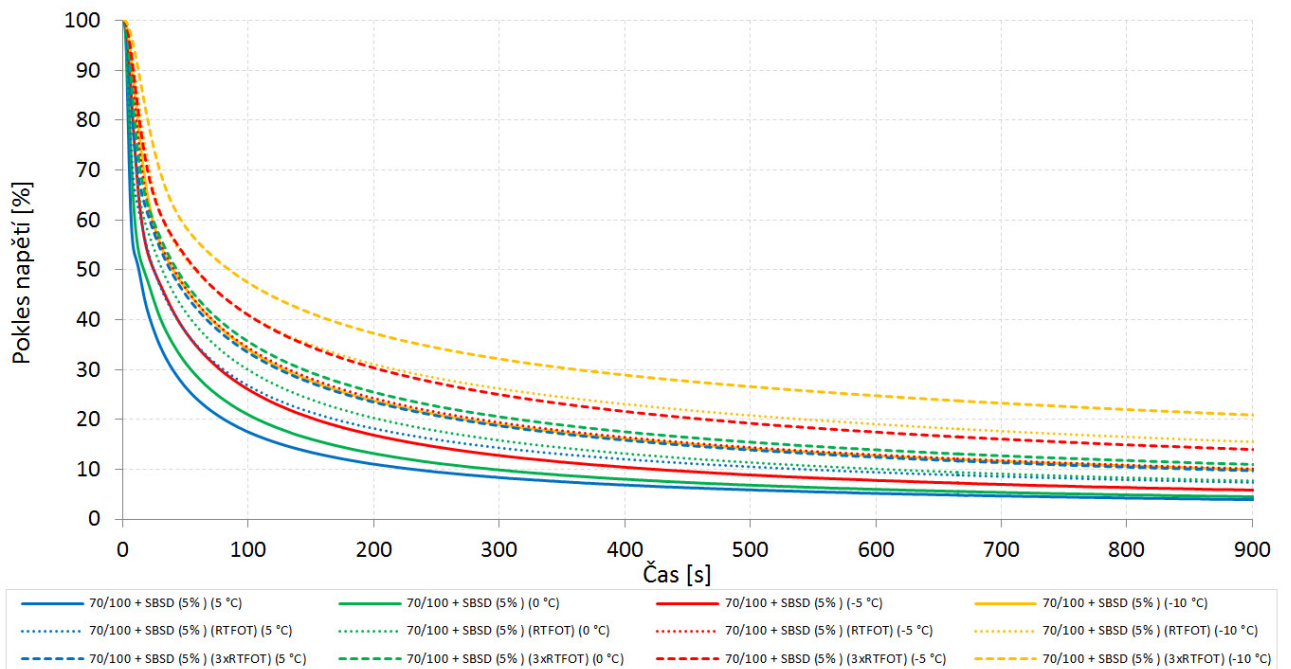
Graf 15: Pokles smykového napětí 70/100 + SBS (3%) v procentech



Graf 16: Průběh zkoušky relaxace 70/100 + SBS (5%)

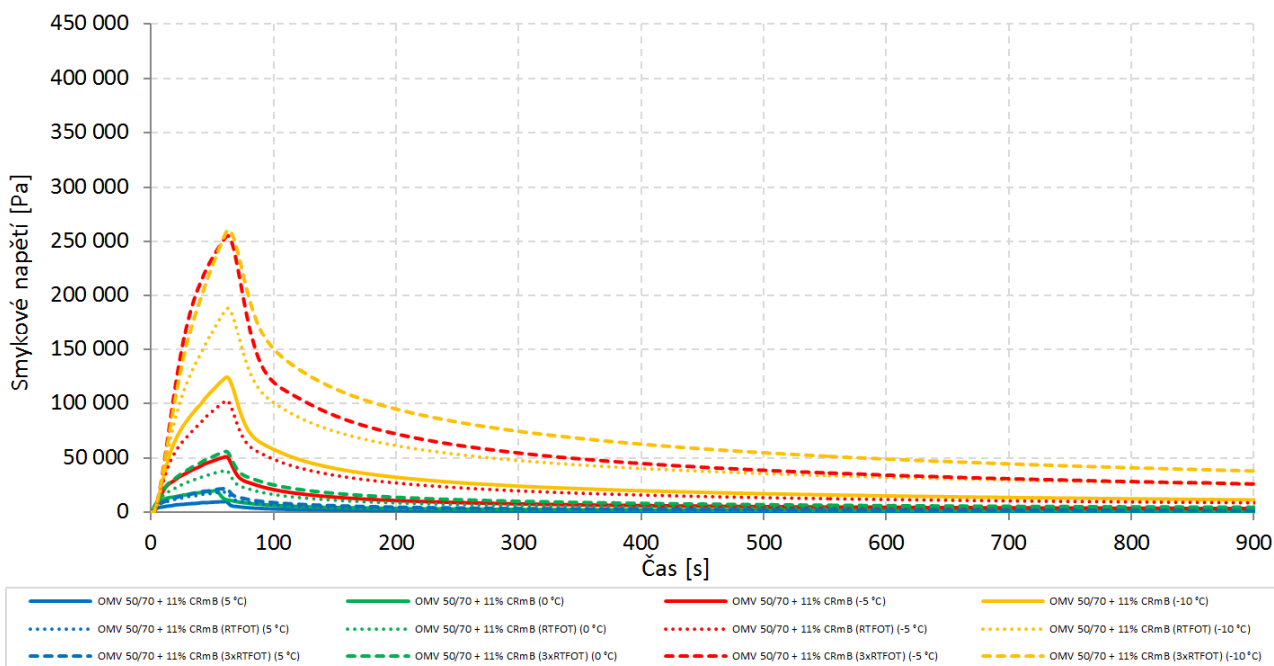


Graf 17: Pokles smykového napětí 70/100 + SBS (5%) v procentech

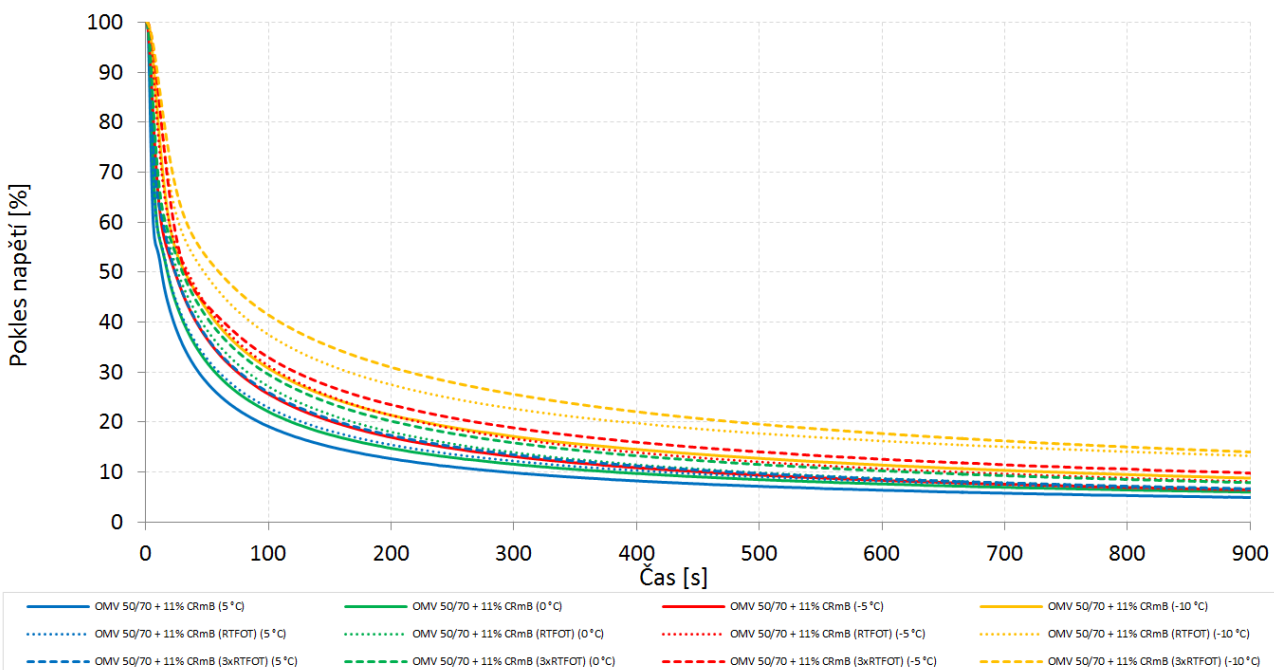


Grafy 18 až 21 zobrazují průběhy zkoušky relaxace smykového napětí v DSR asfaltových pojiv modifikovaných pryžovým granulátem. Tento způsob modifikace zaručuje nízké maximální smykové napětí, a tím i celkově lepší průběhy relaxací. Díky tomu, že tento materiál je oproti ostatním zkoušeným asfaltovým pojivům značně nehomogenní, bylo potřebné některé zkoušky i několikrát opakovat pro velký rozptyl výsledků, a to zejména při nižších teplotách.

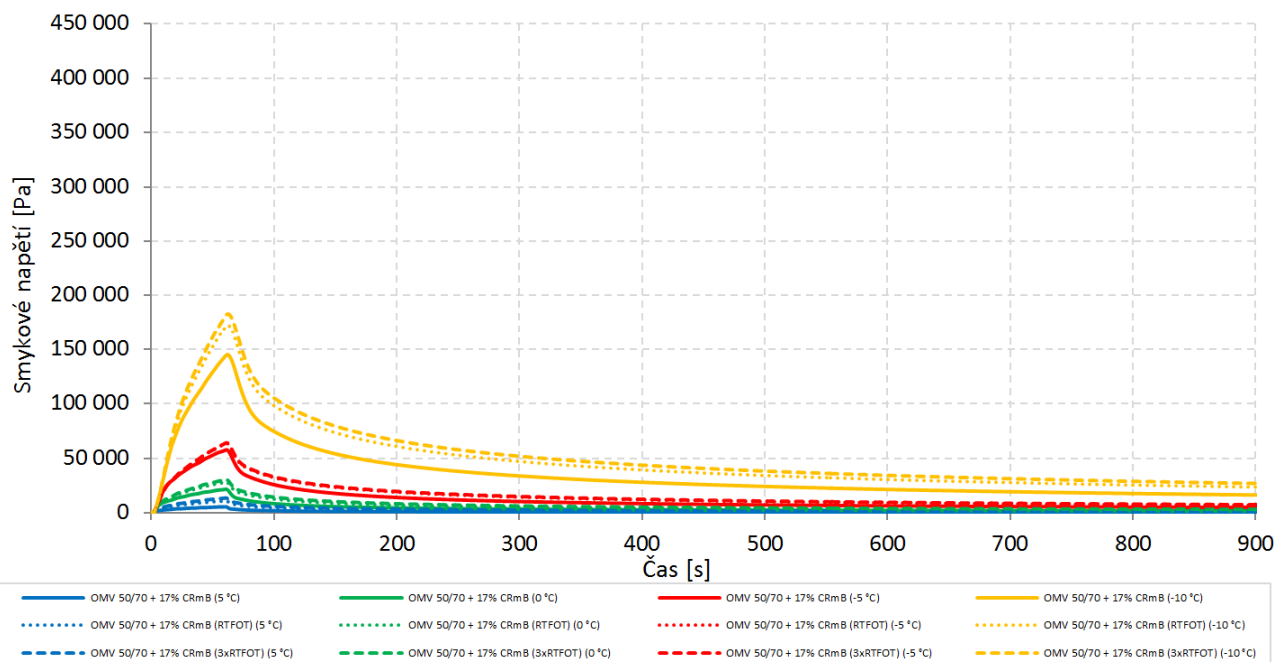
Graf 18: Průběh zkoušky relaxace OMV 50/70 + 11% CRmB



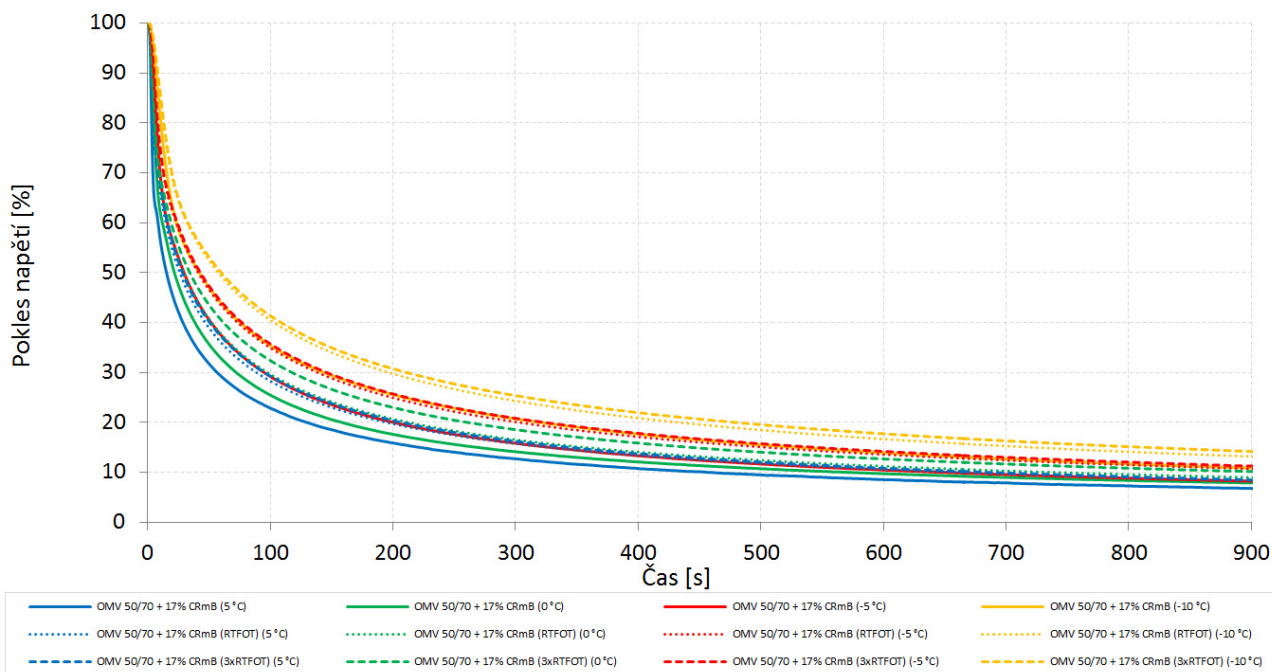
Graf 19: Pokles smykového napětí OMV 50/70 + 11% CRmBv procentech



Graf 20: Průběh zkoušky relaxace OMV 50/70 + 17% CRmB

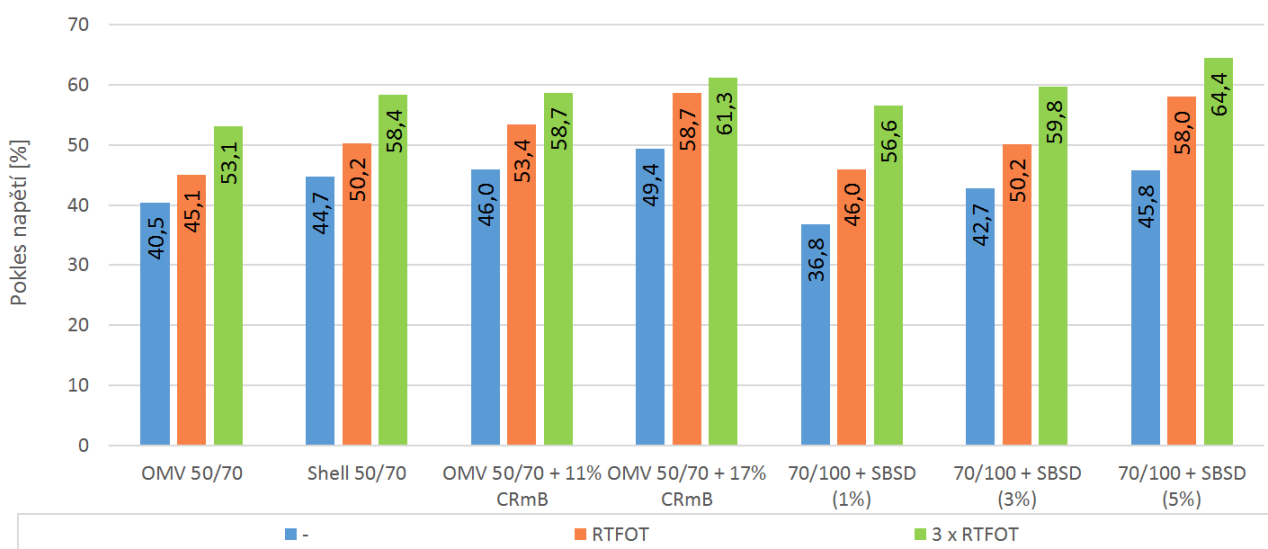


Graf 21: Pokles smykového napětí OMV 50/70 + 17% CRmBv procentech

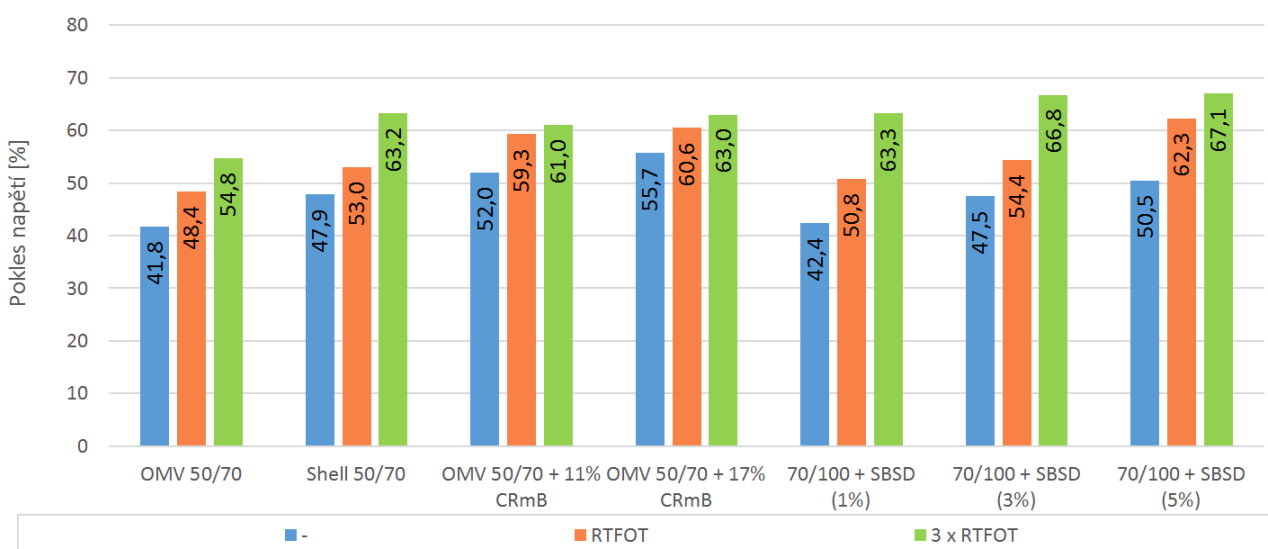


Při počátku relaxace, za který dobu 15 sekund považovat lze, se při teplotě 5 °C (graf 21) neprojevují znatelné rozdíly asfaltových pojiv ve smyslu relaxace smykového napětí (procentuální hodnoty zbytkového napětí) v DSR. S postupně se snižující teplotou (grafy 22 až 24) vykazují lepší výsledky asfaltová pojiva modifikovaná vyšším množstvím pryžového granulátu díky pryži, která reaguje na vnesené smykové napětí okamžitě a nepodléhá výrazněji degradaci stárnutím.

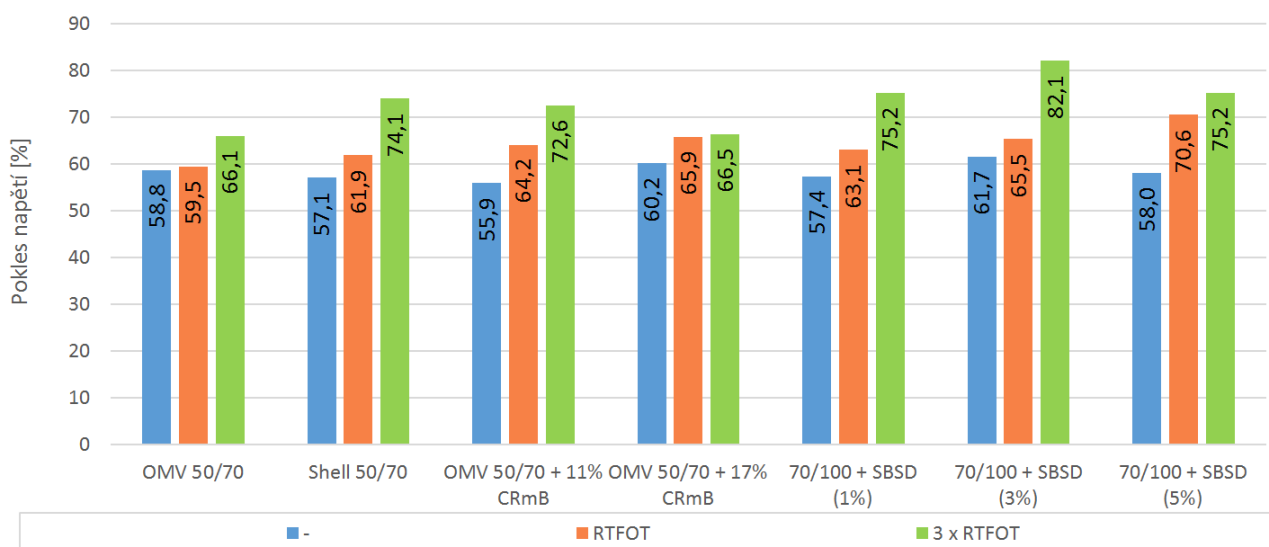
Graf 22: Relaxace smykového napětí v čase 15 sec při teplotě 5 °C



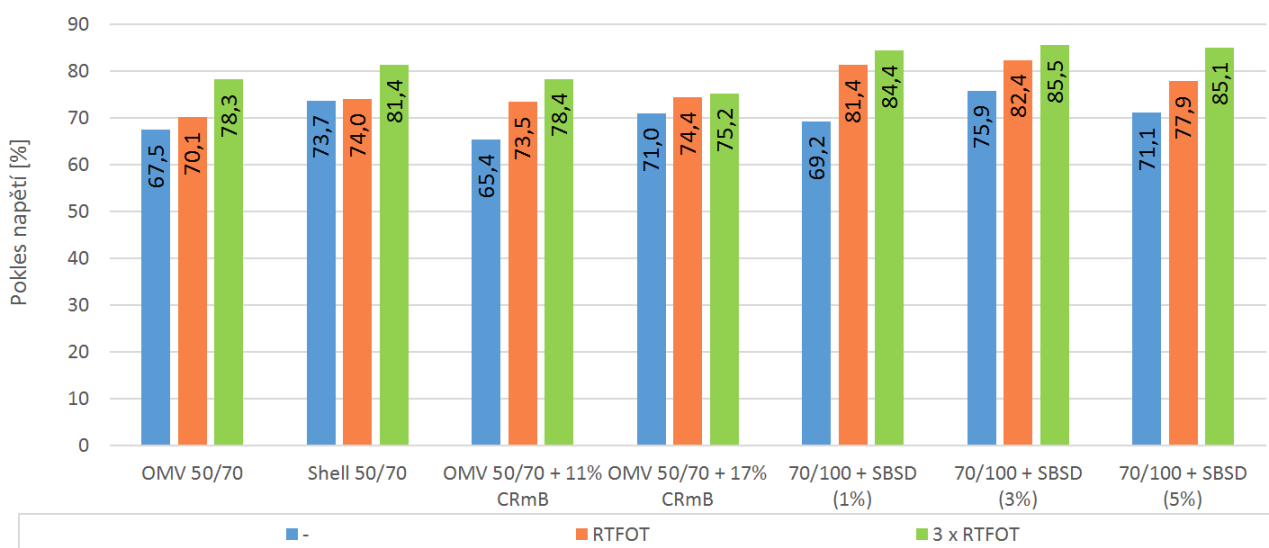
Graf 23: Relaxace smykového napětí v čase 15 sec při teplotě 0 °C



Graf 24: Relaxace smykového napětí v čase 15 sec při teplotě -5 °C

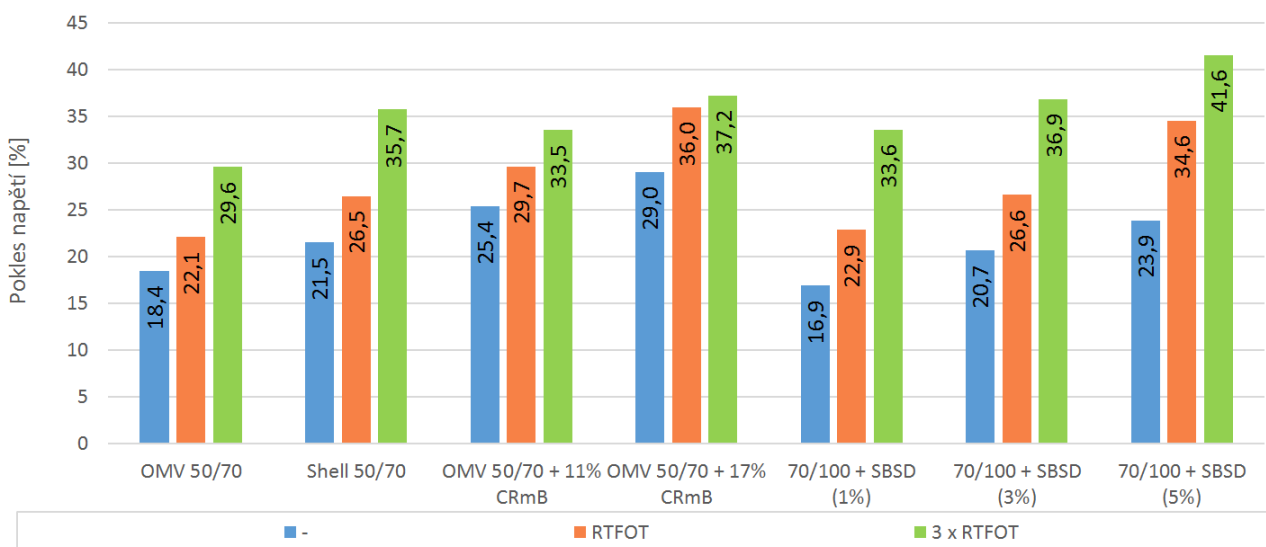


Graf 25: Relaxace smykového napětí v čase 15 sec při teplotě -10 °C

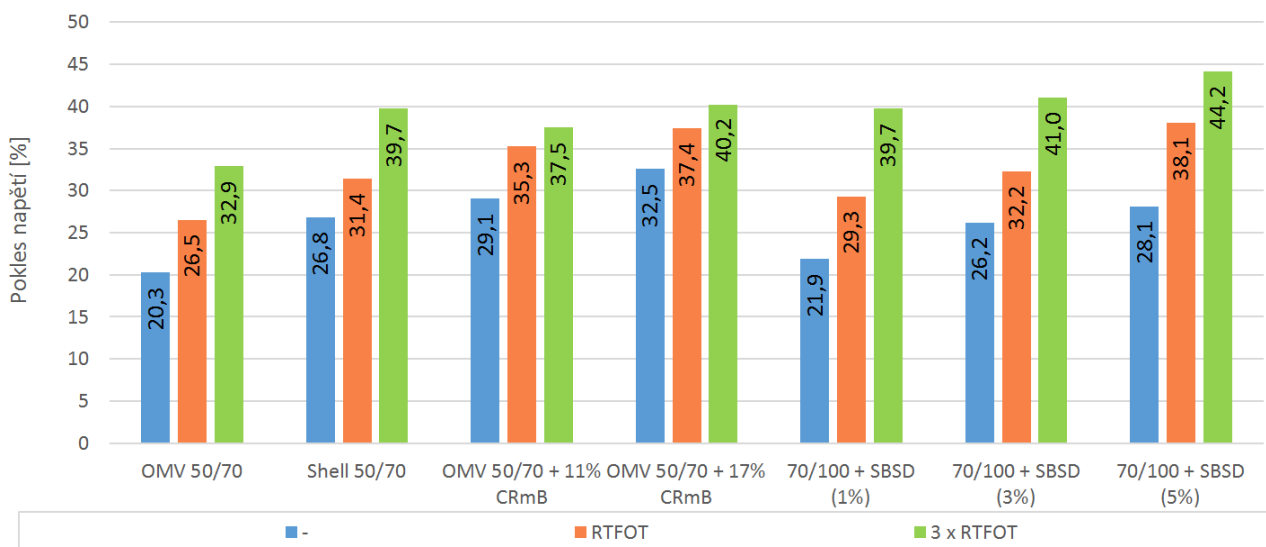


V čase 60 sekund jsou znatelné způsoby modifikace, kdy nezestárlé a zestárlé RTFOT polymerem modifikovaná pojiva dosahují nejnižších (nejlepších) hodnot zbytkového napětí, tzn. nejvyšší hodnoty relaxace smykového napětí (grafy 26 až 29). Při degradaci stárnutím metodou 3xRTFOT, dlouhodobým stárnutím, však tento trend rapidně ustupuje.

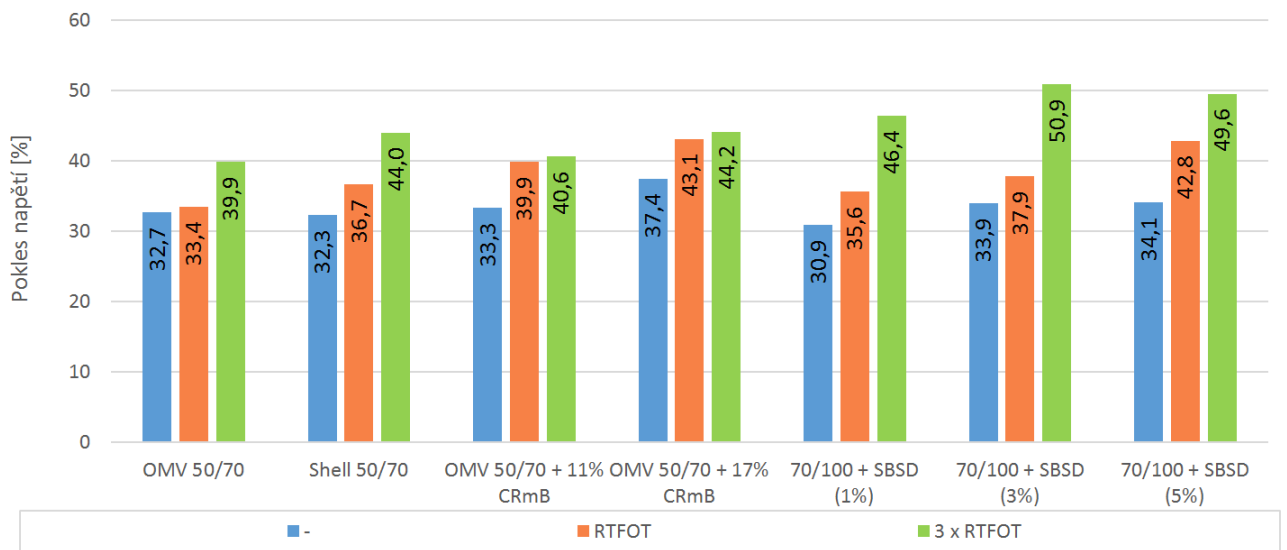
Graf 26: Relaxace smykového napětí v čase 60 sec při teplotě 5 °C



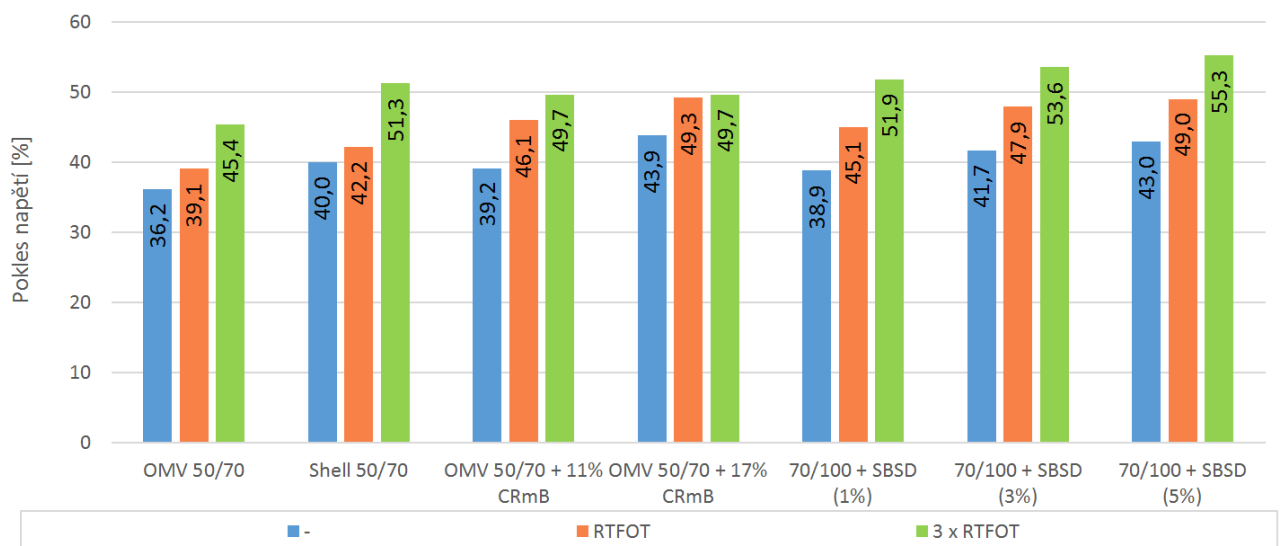
Graf 27: Relaxace smykového napětí v čase 60 sec při teplotě 0 °C



Graf 28: Relaxace smykového napětí v čase 60 sec při teplotě -5 °C

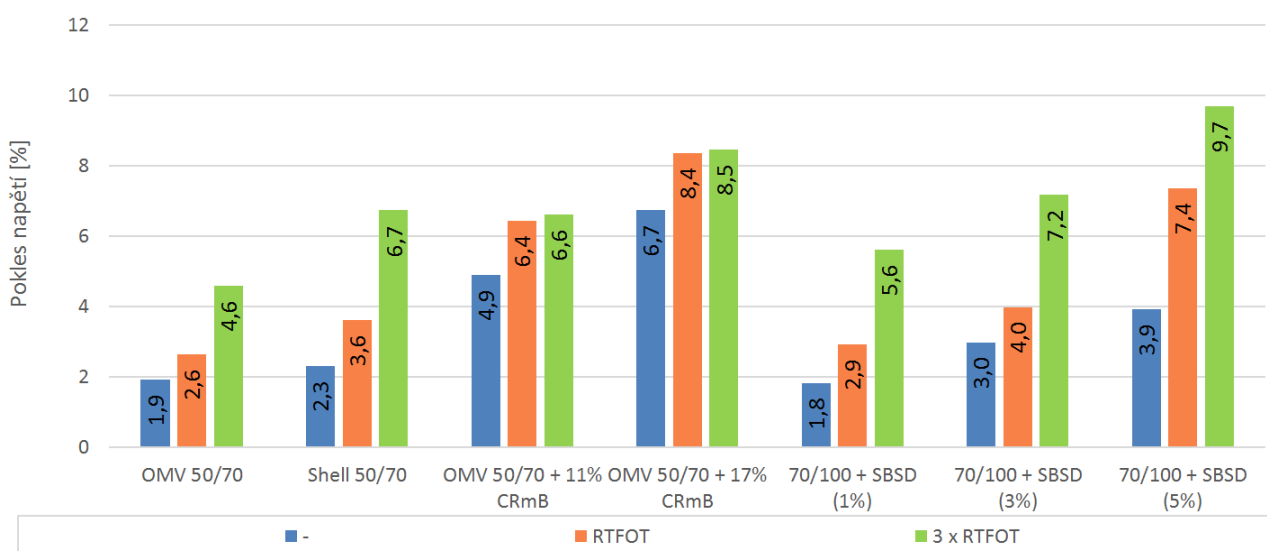


Graf 29: Relaxace smykového napětí v čase 60 sec při teplotě -10 °C

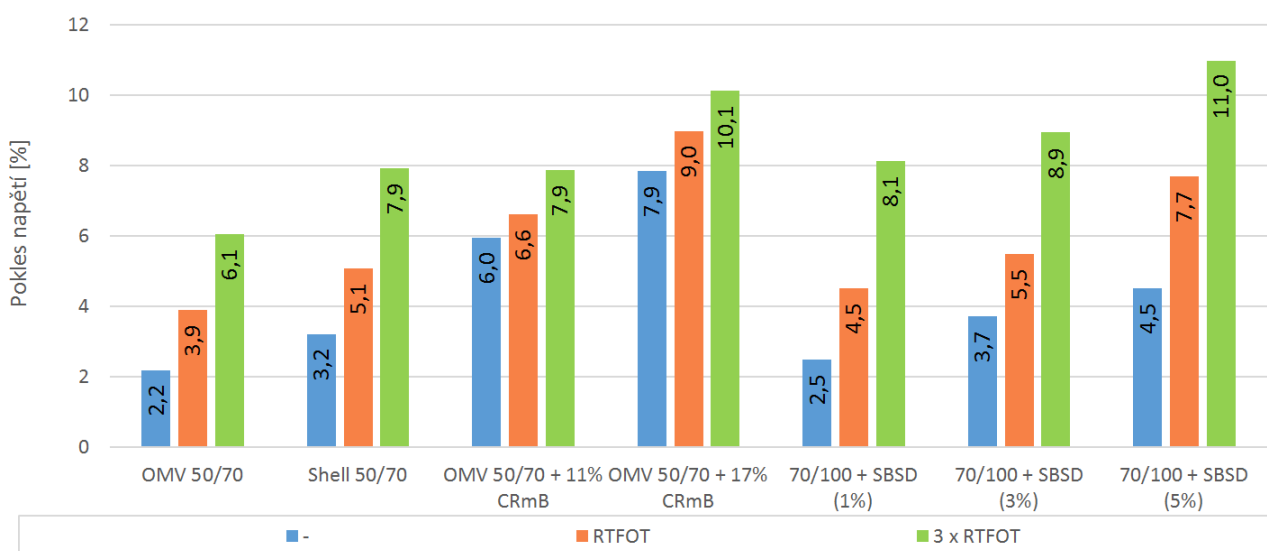


V čase 900 sekund lze předpokládat, že relaxace smykového napětí je téměř ukončena a projevuje se tak plně schopnost jednotlivých pojiv uvolňovat smykové napětí (grafy 30 až 33). Rozdíly jsou i mezi nemodifikovanými asfaltovými pojivy. Asfaltová pojiva modifikovaná pryžovým granulátem nepodléhají po degradaci stárnutím velkým rozdílům relaxace smykového napětí. Polymerem modifikované asfalty dlouhodobě zestárnuté pomocí metody 3xRTFOT projevují zvláště při nízkých teplotách zkoušky velmi špatnou schopnost relaxovat smykové napětí, protože procentuální zbytkové napětí dosahovala nejvyšších hodnot.

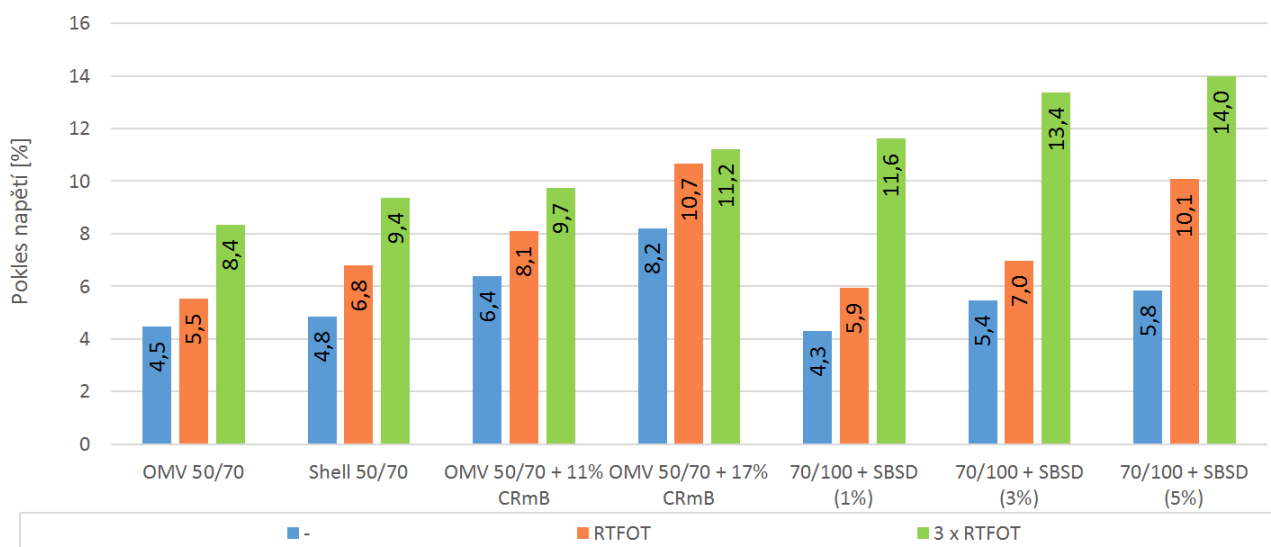
Graf 30: Relaxace smykového napětí v čase 900 sec při teplotě 5 °C



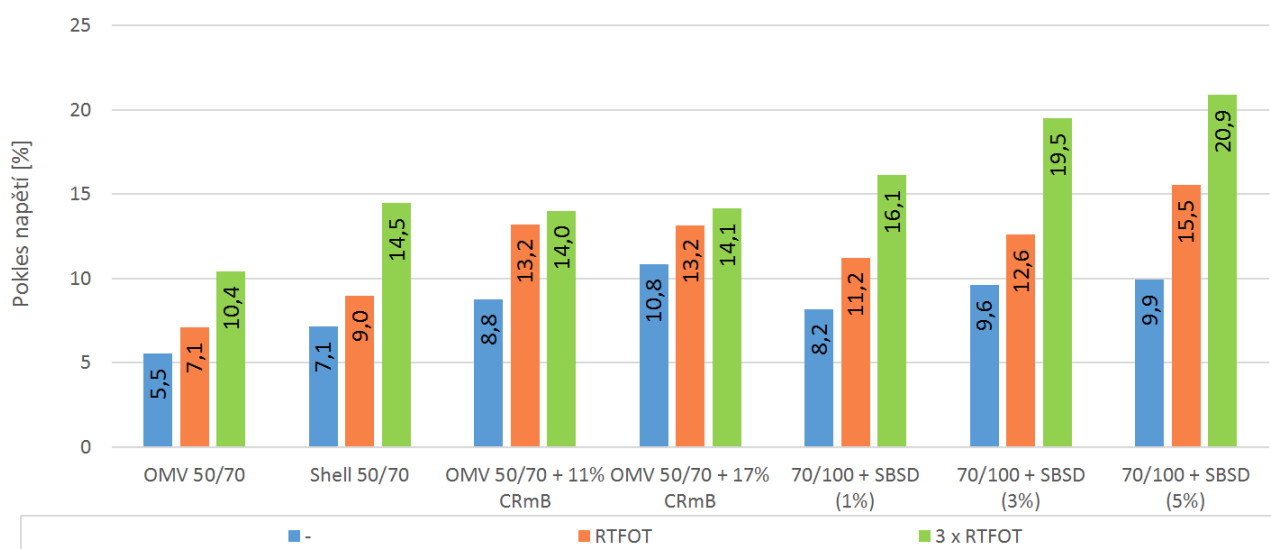
Graf 31: Relaxace smykového napětí v čase 900 sec při teplotě 0 °C



Graf 32: Relaxace smykového napětí v čase 900 sec při teplotě -5 °C

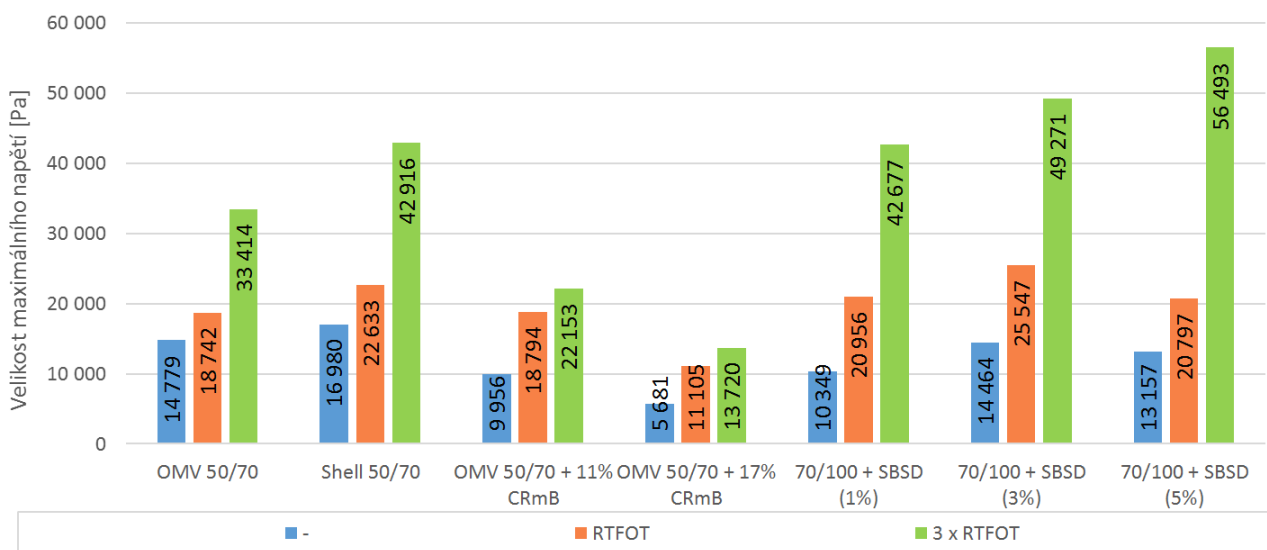


Graf 33: Relaxace smykového napětí v čase 900 sec při teplotě -10 °C

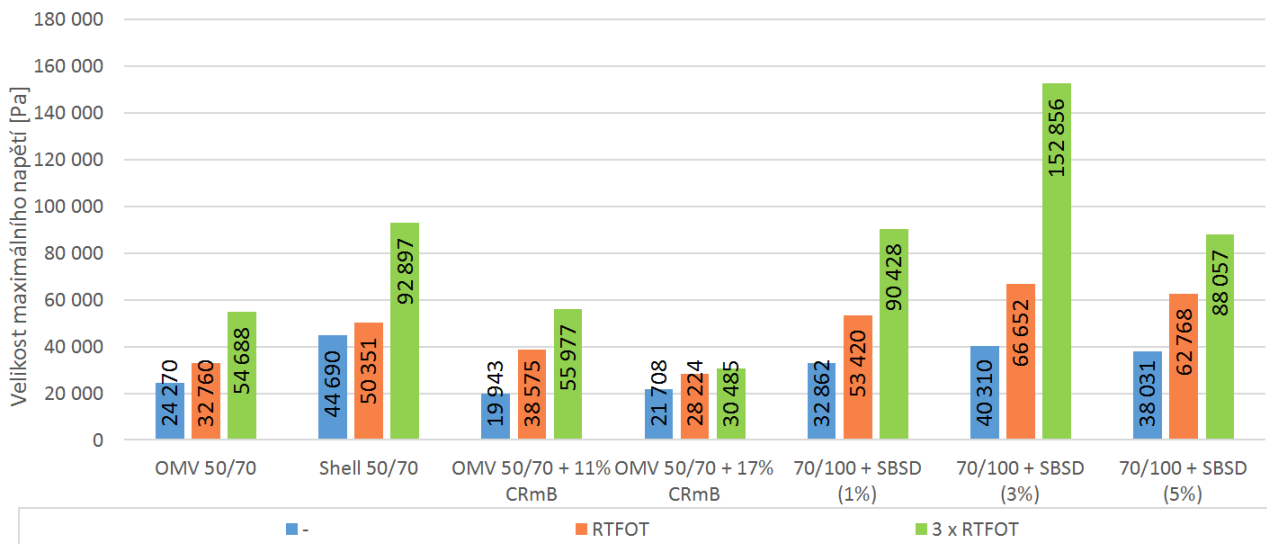


Velikost maximálního smykového napětí vyvolaného pootočením geometrie v DSR o 1% je zobrazena na grafech 34 až 37. Vysoká maximální smyková napětí nejen při nízkých teplotách projevují opět asfaltová pojiva modifikovaná polymerem po zestárnutí metodou 3xRTFOT. Zajímavým výsledkem jsou velmi nízká smyková napětí při větším množství pryžového granulátu a výrazněji lepší odolnost proti stárnutí než u asfaltových pojiv modifikovaných menším množstvím pryžového granulátu, a to i se snižující se teplotou.

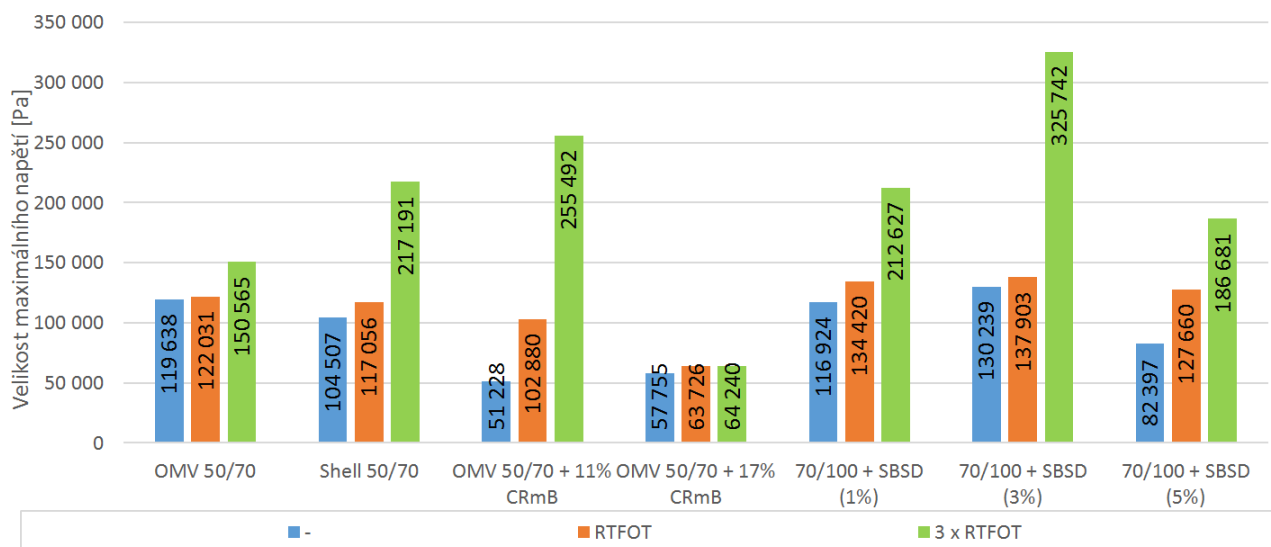
Graf 34: Velikost maximálního smykového napětí při teplotě 5 °C



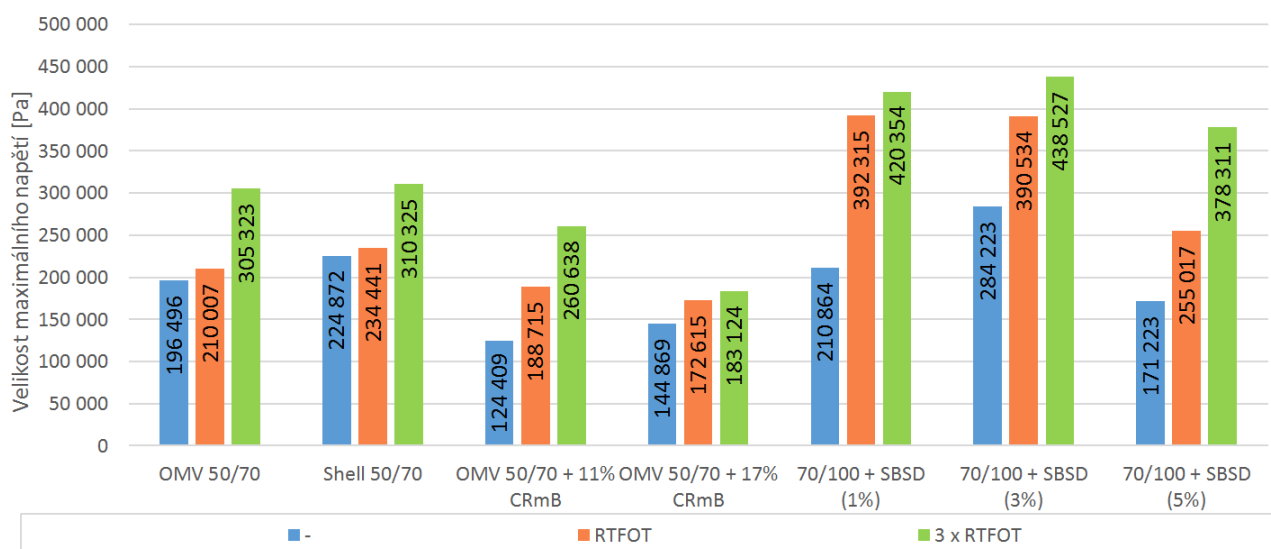
Graf 35: Velikost maximálního smykového napětí při teplotě 0 °C



Graf 36: Velikost maximálního smykového napětí při teplotě -5 °C



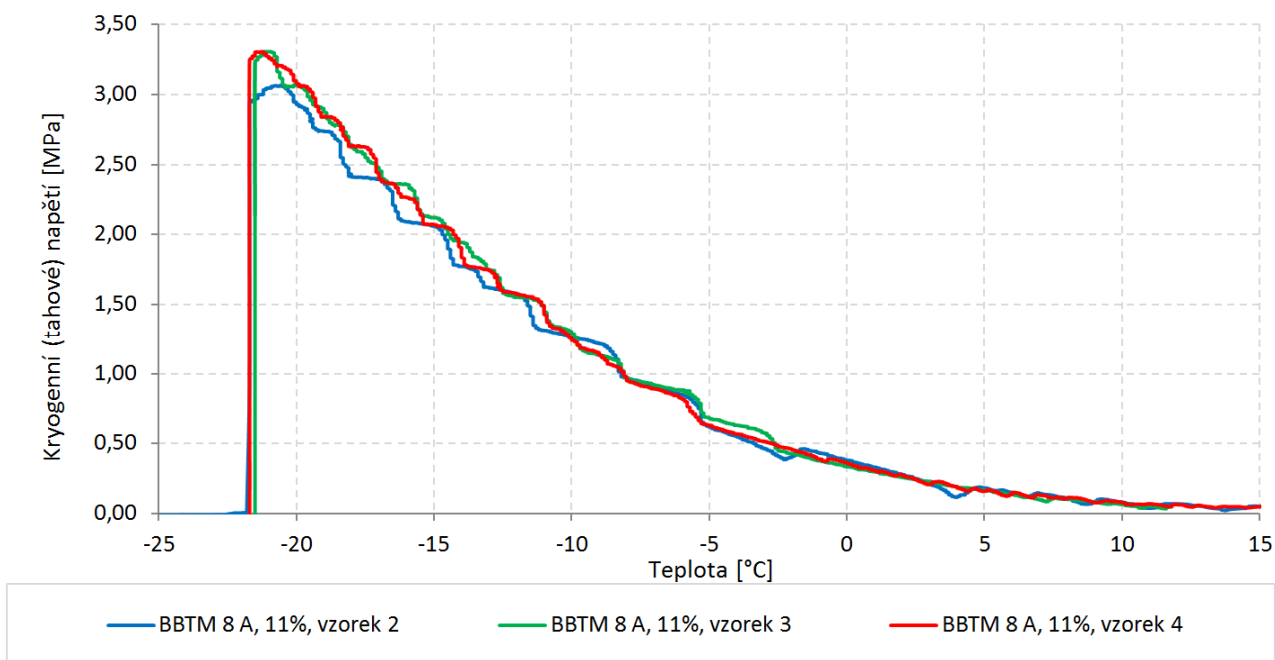
Graf 37: Velikost maximálního smykového napětí při teplotě -10 °C



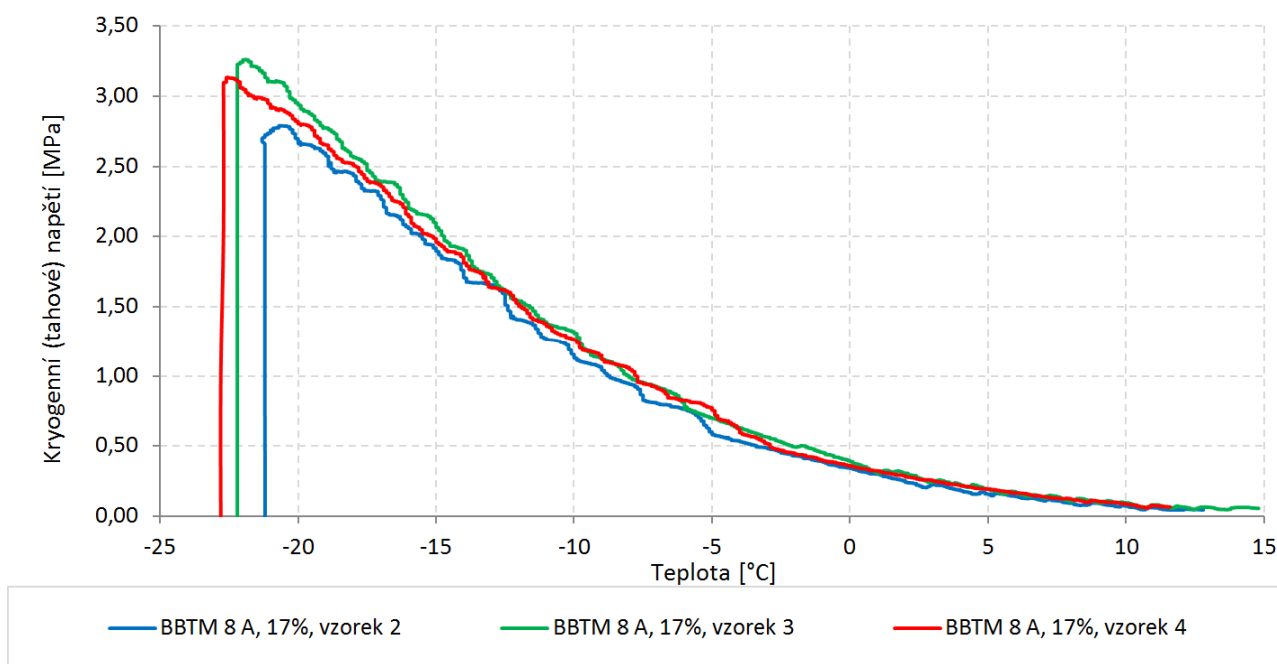
6.5 Zkouška nízkoteplotních vlastností (TSRST)

Provedeno bylo celkem 6 zkoušek TSRST po 3 zkoušených tělesech na jedné asfaltové směsi. Výsledkem jsou průběhy kryogenního (tahového) napětí v průběhu zkoušky a teploty vzorku při jeho porušení. Zkouška probíhá při rovnoměrném snižování teploty, to znamená, že na zobrazených výsledných grafech je začátek zkoušky na pravé straně grafu (grafy 38 a 39). Pro asfaltovou směs BBTM 8 A vyrobenou s pojivem OMV 50/70 + 11% CRmB je průměrná teplota vzorku při porušení $-21,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. U asfaltové směsi vyrobené s pojivem OMV 50/70 + 17% CRmB byl výsledek vzorku 2 prohlášen za neplatný, pro vyšší hodnotu rozptylu snímačů podélného přetvoření (kroucení vzorku). Průměrná teplota vzorku při porušení byla tedy stanovena na $-22,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Protokoly o průběhu provedených zkoušek jsou součástí přílohy.

Graf 38: Průběh zkoušky TSRST BBTM 8 A (OMV 50/70 + 11% CRmB)



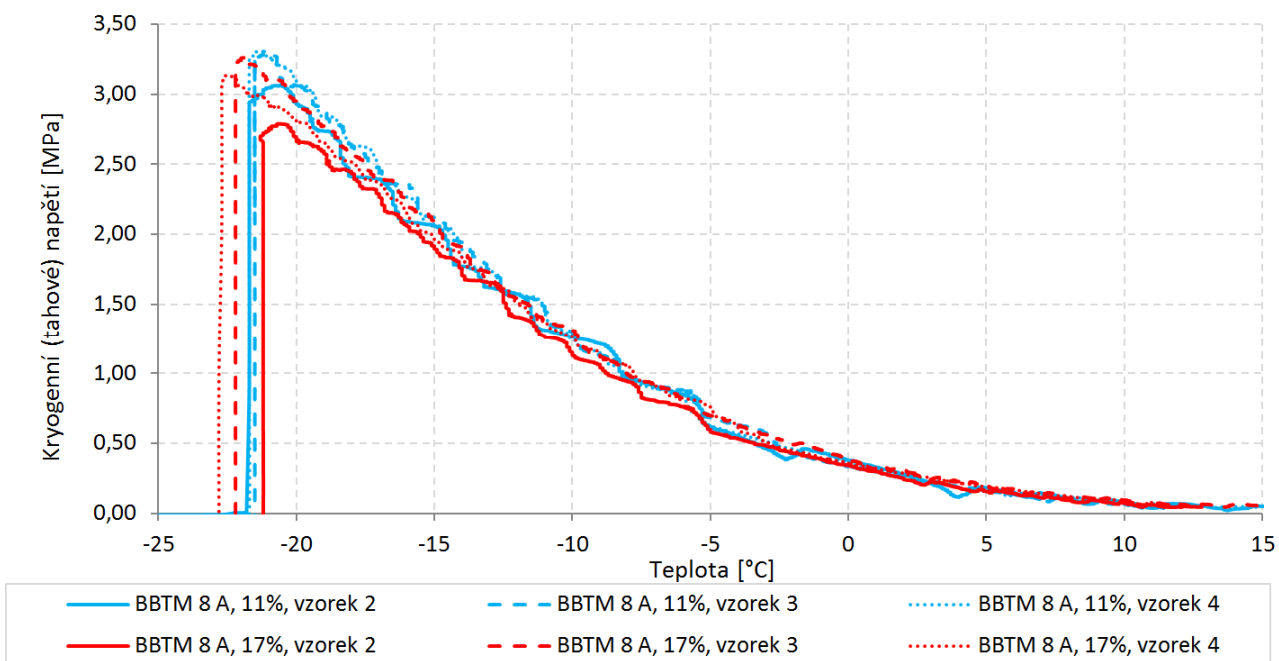
Graf 39: Průběh zkoušky TSRST BBTM 8 A (OMV 50/70 + 17% CRmB)



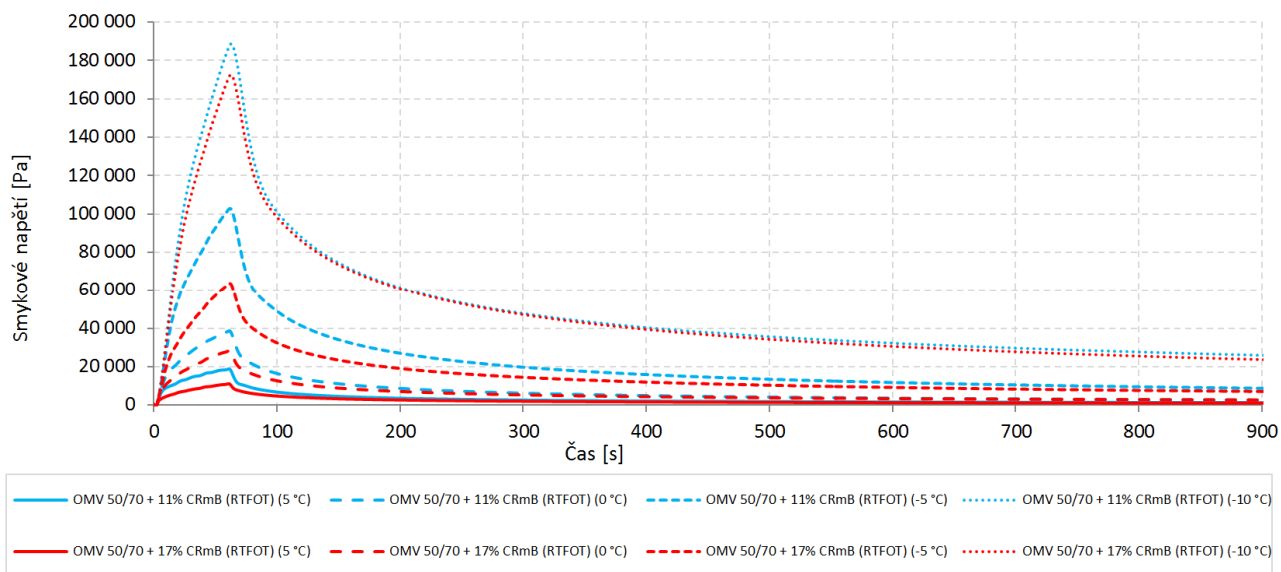
6.6 Porovnání zkoušky TSRST a zkoušky relaxace smykového napětí

Předpokladem pro porovnání výsledků těchto dvou zkoušek byla odlišná relaxace smykového napětí dvou vybraných pojiv, která by se projevila na zkoušce TSRST. Bylo snahou zjistit, zda rozdílná relaxace smykového napětí bude patrná i na nízkoteplotních vlastnostech asfaltové směsi. Vybraná asfaltová pojiva (OMV 50/70 + 11% CRmB a OMV 50/70 + 17% CRmB) byla porovnána pomocí zkoušky relaxace v DSR po zestárnutí metodou RTFOT, což by mělo odpovídat skutečným (degradovaným zestárnutím) vlastnostem asfaltového pojiva v asfaltové směsi. Průběh relaxací smykových napětí uvedených pojiv je zobrazen na grafu 41 a poukazuje na skutečnost, že dvě vybraná asfaltová pojiva se při nižších teplotách chovají velice podobně, jak je možné vidět i na průběhu TSRST (graf 40). Mírně lepší relaxační vlastnosti smykového napětí při nízkých teplotách vykazuje asfaltové pojivo s vyšším obsahem pryžového granulátu, což prokázaly i výsledky zkoušky TSRST nižší hodnotou teploty při porušení těles tahovou trhlinou.

Graf 40: Průběh zkoušek TSRST BBTM 8 A



Graf 41: Průběh zkoušky relaxace smykového napětí OMV 50/70 + 11 % a 17 % pryžového granulátu



7 ZÁVĚR

V rámci diplomové práce bylo provedeno celkem 51 empirických zkoušek a 84 platných zkoušek relaxace smykového napětí v DSR na sedmi vybraných asfaltových pojivech podrobených zestárnutí metodou RTFOT a její modifikovanou verzí 3xRTFOT. Získané empirické zkoušky bylo možné srovnávat s výsledky relaxace smykového napětí v DSR.

Výsledky relaxace smykových vlastností v DSR nabízí značně široké spektrum interpretace výsledků. Rozdíly mezi asfaltovými pojivy je zde možné vyvozovat i na zdánlivě stejných materiálech, což prokazuje vysokou rozlišovací schopnost této zkoušky. Pro ještě podrobnější popisy chování asfaltových pojiv či vlivu jejich způsobu modifikace je možné rozšířit interval zkušebních teplot a získat tak podrobné závislosti relaxace smykového napětí na větším teplotním rozsahu.

Zajímavých výsledků bylo dosaženo vzájemným srovnáním relaxačního chování jednotlivých pojiv. Z výsledků měření lze shrnout, že s rostoucím relaxačním časem zbytkové napětí klesá. Pojiva zestárlá pomocí metody RTFOT, respektive 3xRTFOT, dosahují vyššího smykového napětí a mají vyšší tuhost při počátečním smykovém přetvoření oproti pojivům nezestárnutým.

Rovněž zbytkové napětí v průběhu relaxační fáze (doplňk k hodnotě relaxace napětí v daném relaxačním čase) je vyšší v případě zestárnutých pojiv a další stárnutí (3xRTFOT) toto zbytkové napětí ještě zvyšuje. V případě normování počátečního (maximálního) smykového napětí na hodnotu 100 % rovněž platí, že procentuální hodnota zbytkového napětí se v případě všech sledovaných relaxačních časů u všech pojiv s narůstajícím stárnutím zvyšuje.

Čím nižší byla zkušební teplota (-10 °C), tím bylo maximální dosažené napětí všech srovnávaných pojiv vyšší. Rovněž na absolutní i relativní hodnoty zbytkového napětí měla zkušební teplota silný vliv – u všech sledovaných relaxačních časů bylo dosaženo se snižující se teplotou zvýšení zbytkového napětí.

Při srovnání hodnot maximálního (počátečního) smykového napětí je patrné, že nejnižších hodnot dosahovaly asfalty modifikované pryžovým granulátem, a to jak v nezestárnutém stavu, tak i po simulaci stárnutí metodami RTFOT a 3xRTFOT. To je při těchto nízkých teplotách výhodné z hlediska omezení možnosti vzniku trhlin na vozovce.

Zajímavé je hodnocení výsledků podílem zbytkového smykového napětí získaného při zkušební teplotě -10 °C a zbytkového smykového napětí získaného při zkušební teplotě 5 °C. Tento podíl umožní popsat vliv teploty na velikost zbytkového smykového napětí, čili na změnu hodnoty

relaxace smykového napětí jednotlivých pojiv v závislosti na teplotě. Nejnižší hodnotu podílu zbytkového smykového napětí při teplotě $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ nezestárých pojiv prokázal (průměrně pro všechny sledované relaxační časy) CRmB se 17 % pryžového granulátu (1,52) a CRmB s 11 % pryžového granulátu (1,59). Následoval asfalt modifikovaný 5 % SBS (1,96) a silniční asfalt 50/70 (2,18). Nejvyšší poměr dosáhl asfalt modifikovaný 3 % SBS (2,35) a asfalt modifikovaný 1 % SBS (2,89). V případě pojiv zestárnutých metodou RTFOT i 3xRTFOT se pojiva podle poměru zbytkových napětí při $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ seřadila totožně: nejnižšího poměru zbytkových napětí při $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ dosáhl opět asfalt modifikovaný 17 % pryžového granulátu a následně asfalt modifikovaný 5 % SBS a asfalt modifikovaný 11 % pryžového granulátu (přibližně na stejné úrovni). Na 4. místo se zařadil silniční asfalt 50/70 a nejvyššího podílu dosáhl asfalt modifikovaný 3 % SBS a 1 % SBS. Z těchto výsledků vyplývá, že přítomnost pryžového granulátu příznivě ovlivňuje relaxaci vneseného napětí při nízkých teplotách, což je zásadní pro omezení vzniku trhlin ve vrstvě vozovky. S rostoucím obsahem pryžového granulátu je možné dosáhnout zlepšení relaxačních vlastností CRmB při nízkých teplotách.

Polymerem modifikovaná asfaltová pojiva (PmB), v našem případě pomocí termoplastického elastomeru SBS, projevují při nižších podílech polymeru jeho neefektivní využití jeho vlastností ověřené nejen zkouškou relaxace smykových vlastností v DSR. Způsobeno je to především stárnutím. Neefektivita je nejvíce znatelná při nižších zkušebních teplotách, kdy krátkodobě zestárnuté pojivo pomocí metody RTFOT neprojevuje přítomnost polymeru. Polymery ovlivňují asfaltová pojiva efektivně až při jejich vyšším obsahu a dokážou tak lépe odolávat i dlouhodobému stárnutí.

Asfaltová pojiva modifikovaná pryžovým granulátem (CRmB) jsou odolnější proti degradaci stárnutím. Obsažený pryžový granulát při nízkých teplotách nekřehne, snižuje maximální dosažené smykové napětí a tím i zlepšuje celkový průběh relaxace. Je všeobecně známo, že při vysokých teplotách mají CRmB vyšší viskozitu než konvenční pojiva, což CRmB uděluje nižší teplotní citlivost.

Vhodnost korelace výsledků zkoušky relaxace smykového napětí v DSR a zkoušky nízkoteplotních vlastností TSRST se nepodařilo potvrdit pro značnou podobnost nízkoteplotních vlastností dvou vybraných asfaltových směsí. Pro další pokračování v porovnávání zkoušky relaxace smykového napětí v DSR a zkoušky nízkoteplotních vlastností TSRST by bylo vhodné zvolit druhy asfaltových pojiv tak, aby jejich relaxace smykových napětí po zestárnutí metodou RTFOT byly při nízkých teplotách zřetelně odlišné. Relaxace smykových napětí takových

asfaltových pojiv by bylo rovněž vhodnější zkoušet i při nižších teplotách pomocí menších geometrií v DSR.

8 SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ

Obrázek 1: Průměrné denní teploty v ČR 12. ledna 1987

Obrázek 2: Asfaltové pojivo jako visko-elastická látka

Obrázek 3: Smyková deformace tělesa, tzv. skos

Obrázek 4: Reologický model hmoty dle Hooka

Obrázek 5: Reologický model Newtonovské kapaliny

Obrázek 6: Maxwellův reologický model

Obrázek 7: Kelvinův reologický model

Obrázek 8: Burgersův reologický model

Obrázek 9: Pohyb geometrie u rotačního a oscilačního reometru

Obrázek 10: DSR Kinexus pro+ s externím příslušenstvím

Obrázek 11: Penetrace jehlou

Obrázek 12: Stanovení bodu měknutí metodou kroužek kulička

Obrázek 13: Stanovení vratné duktility v duktilometru

Obrázek 14: Sušárna pro provedení zkoušky RTFOT

Obrázek 15: Zkouška relaxace smykového napětí v DSR

Obrázek 16: Průběh zkoušky relaxace smykového napětí

Obrázek 17: Průběh smykového napětí na zkoušeném vzorku v DSR

Obrázek 18: Příprava zkušebních těles pro zkoušku nízkoteplotních vlastností

Obrázek 19: Zkušební zařízení pro zkoušku nízkoteplotních vlastností

Obrázek 20: Průběh zkoušky nízkoteplotních vlastností

Obrázek 21: Návrh a příprava asfaltové směsi BBTM A 8

Tabulka 1: Stanovení mezerovitosti asfaltové směsi BBTM A

Tabulka 2: Seznam asfaltových pojiv a provedených zkoušek

Graf 1: Návrh čáry zrnitosti pro asfaltovou směs BBTM A

Graf 2: Penetrace jehlou při 25 °C

Graf 3: Změna penetrace jehlou při 25 °C v procentech

Graf 4: Bod měknutí

Graf 5: Změna bodu měknutí v procentech

Graf 6: Vratná duktilita při 25 °C

Graf 7: Změna vratné duktility při 25 °C v procentech

Graf 8: Průběh zkoušky relaxace Shell 50/70

Graf 9: Pokles smykového napětí Shell 50/70 v procentech

Graf 10: Průběh zkoušky relaxace OMV 50/70

Graf 11: Pokles smykového napětí OMV 50/70 v procentech

Graf 12: Průběh zkoušky relaxace 70/100 + SBS (1%)

Graf 13: Pokles smykového napětí 70/100 + SBS (1%) v procentech

Graf 14: Průběh zkoušky relaxace 70/100 + SBS (3%)

Graf 15: Pokles smykového napětí 70/100 + SBS (3%) v procentech

Graf 16: Průběh zkoušky relaxace 70/100 + SBS (5%)

Graf 17: Pokles smykového napětí 70/100 + SBS (5%) v procentech

Graf 18: Průběh zkoušky relaxace OMV 50/70 + 11% CRmB

Graf 19: Pokles smykového napětí OMV 50/70 + 11% CRmB v procentech

Graf 20: Průběh zkoušky relaxace OMV 50/70 + 17% CRmB

Graf 21: Pokles smykového napětí OMV 50/70 + 17% CRmB v procentech

Graf 22: Relaxace smykového napětí v čase 15 sec při teplotě 5 °C

Graf 23: Relaxace smykového napětí v čase 15 sec při teplotě 0 °C

Graf 24: Relaxace smykového napětí v čase 15 sec při teplotě -5 °C

Graf 25: Relaxace smykového napětí v čase 15 sec při teplotě -10 °C

Graf 26: Relaxace smykového napětí v čase 60 sec při teplotě 5 °C

Graf 27: Relaxace smykového napětí v čase 60 sec při teplotě 0 °C

Graf 28: Relaxace smykového napětí v čase 60 sec při teplotě -5 °C

Graf 29: Relaxace smykového napětí v čase 60 sec při teplotě -10 °C

Graf 30: Relaxace smykového napětí v čase 900 sec při teplotě 5 °C

- Graf 31: Relaxace smykového napětí v čase 900 sec při teplotě 0 °C
- Graf 32: Relaxace smykového napětí v čase 900 sec při teplotě -5 °C
- Graf 33: Relaxace smykového napětí v čase 900 sec při teplotě -10 °C
- Graf 34: Velikost maximálního smykového napětí při teplotě 5 °C
- Graf 35: Velikost maximálního smykového napětí při teplotě 0 °C
- Graf 36: Velikost maximálního smykového napětí při teplotě -5 °C
- Graf 37: Velikost maximálního smykového napětí při teplotě -10 °C
- Graf 38: Průběh zkoušky TSRST BBTM 8 A (OMV 50/70 + 11% CRmB)
- Graf 39: Průběh zkoušky TSRST BBTM 8 A (OMV 50/70 + 17% CRmB)
- Graf 40: Průběh zkoušek TSRST BBTM 8 A
- Graf 41: Průběh zkoušky relaxace smykového napětí OMV 50/70 + 11 % a 17 % pryžového granulátu

9 CITOVANÁ LITERATURA

1. **ČHMÚ.** Český hydrometeorologický ústav. *http://www.infomet.cz.* [Online] Český hydrometeorologický ústav, 3. Prosinec 2014. [Citace:] *http://www.infomet.cz/pix/pix1326371599-3.jpg.*
2. **Petrodunes.** *http://petrodunes.com/. Petrodunes.com.* [Online] 2013. *http://petrodunes.com/product_details/sub/22.*
3. **SCI.** *http://www.soci.org/. SCI.* [Online] 2014. *http://www.soci.org/News/Construction/Construction-Bitumen-and-Dark-Arts-Papers-2012.*
4. **Katedra fyziky povrchů, plazmatu.** Katedra fyziky povrchů a plazmatu. *http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/.* [Online] Univerzita karlova, 10. Duben 2008. *http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/kontinuum/2_3.*
5. **Michal, Varaus.** Silnice, železnice. *http://www.silnice-zeleznice.cz.* [Online] Konstrukce Media, s.r.o., 18. Prosinec 2008. *http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/nizkoteplotni-chovani-asfaltovych-smesi/.*
6. **Mezger, Thomas G.** *The Rheology Handbook.* Hanover : Vincentz Network, 2011. ISBN 978-3-86630-864-0.
7. *Stárnutí silničních pojiv.* **Plitz, Jiří.** Pardubice : Paramo a.s., 1997.
8. **Lesueur, Didier.** *The colloidal structure of bitumen: Consequences on the reology and on the mechanisms of bitumen modification.* Madrid : Eurovia España, 2009.
9. **Rous, Vojtěch.** *Odolnost asfaltových pojiv proti stárnutí.* Brno : Vysoké učení technické v Brně, fakulta stavební, 2013.
10. **Hospodka, Markus.** *Alterungsmechanismen von Bitumen und Simulation der Alterung im Labor.* Wien : Universität für Bodenkultur Wien, 2013.
11. **Raab, Miroslav.** Otevřená věda. *http://archiv.otevrena-veda.cz/.* [Online] Akademie věd České republiky, 1999. *http://archiv.otevrena-veda.cz/users/Image/default/C1Kurzy/NH2006pdf/9.pdf.*
12. *The stress relaxation of modified bitumens.* **Pavel Coufalík, Ondřej Dašek, Jan Kudrna, Svatopluk Stoklásek.**

10 PŘÍLOHY

- 1 Sítové rozbory kameniva Luleč 0/4 mm a 4/8 mm**
- 2 Pokles smykového napětí**
- 3 Zkouška odolnosti asfaltové směsi proti vzniku mrazových trhlin**

PŘÍLOHA 1

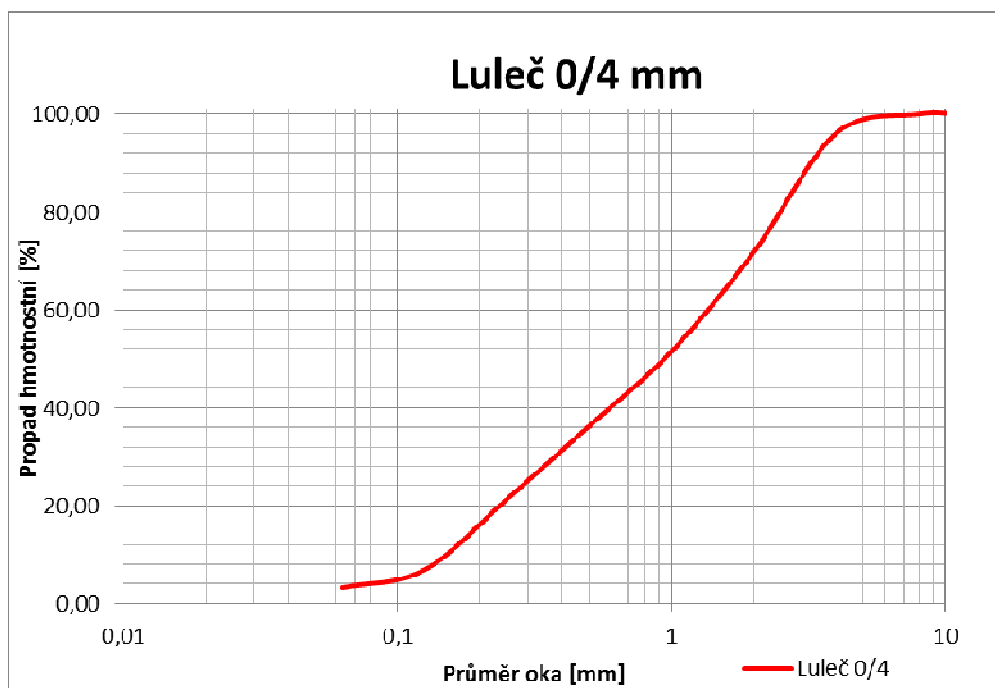
SÍTOVÉ ROZBORY KAMENIVA LULEČ 0/4 MM A 4/8 MM

Stanovení zrnitosti - Síťový rozbor

Název vzorku	Luleč 0/4
Hmotnost vysušené navážky před promýváním (M_1) [g]	414,5
Hmotnost vysušeného zůstatku na síť 0,063 mm (M_2) [g]	401,8

Stanovení zrnitosti

Velikost ok sít [mm]	Zbytky [g]	Zbytky [%]	Propad [%]
22,4	0	0,00	100,00
16	0	0,00	100,00
11,2	0	0,00	100,00
8	0	0,00	100,00
4	15,9	3,84	96,16
2	100,8	24,32	71,85
1	84,4	20,36	51,48
0,5	63,2	15,25	36,24
0,25	62,3	15,03	21,21
0,125	59,8	14,43	6,78
0,063	14,5	3,50	3,28
Dno	síťový rozbor (P)	Jemné částice (M1-M2)	
	0,9	12,7	0,22 3,06 3,06 0,00
	13,6		3,28
Celkem	414,5	100,00	0,00

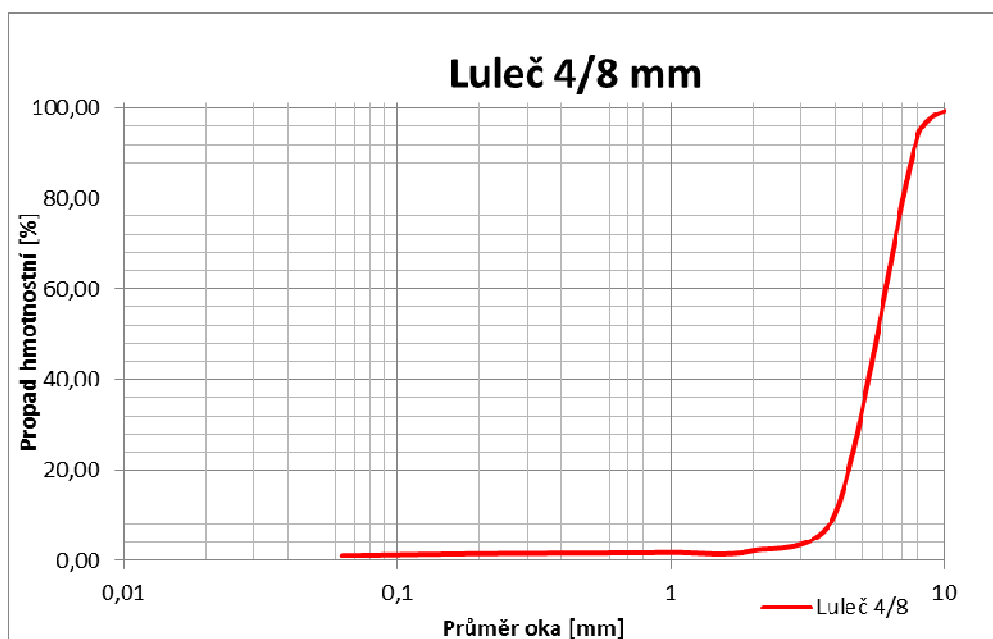


Stanovení zrnitosti - Síťový rozbor

Název vzorku	Luleč 4/8
Hmotnost vysušené navážky před promýváním (M_1) [g]	620,7
Hmotnost vysušeného zůstatku na síti 0,063 mm (M_2) [g]	613,6

Stanovení zrnitosti

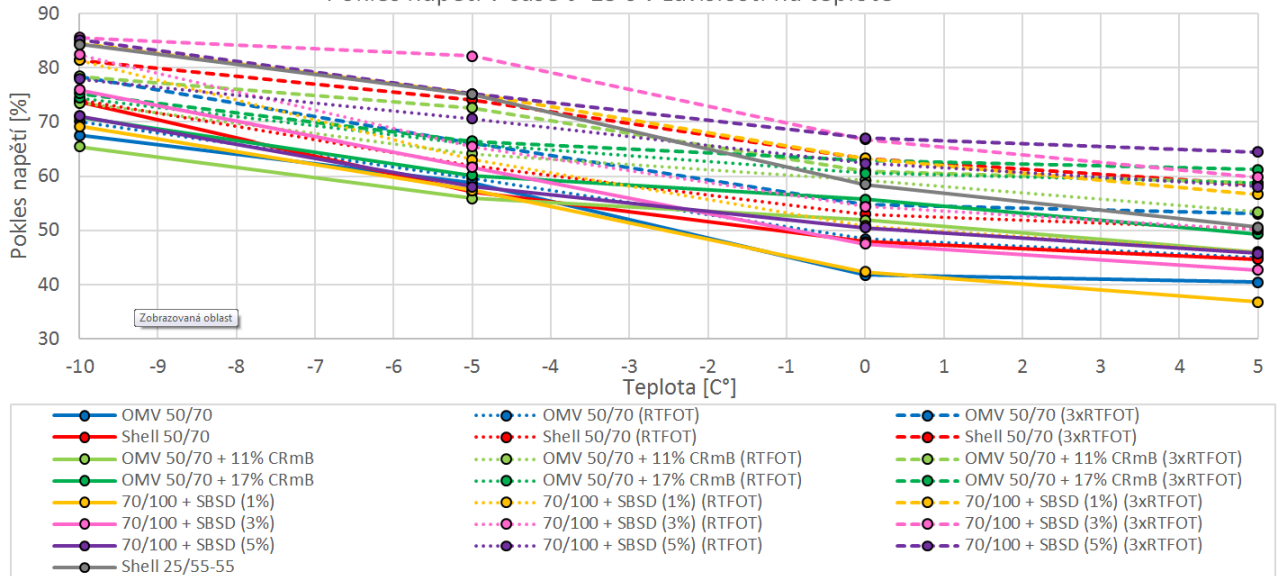
Velikost ok sít [mm]	Zbytky [g]	Zbytky [%]	Propad [%]
22,4	0	0,00	100,00
16	0	0,00	100,00
11,2	0	0,00	100,00
8	37,9	6,11	93,89
4	518,2	83,49	10,41
2	50,3	8,10	2,30
1	2,5	0,40	1,90
0,5	0,7	0,11	1,79
0,25	0,6	0,10	1,69
0,125	1,2	0,19	1,50
0,063	1,8	0,29	1,21
Dno	síťový rozbor (P)	Jemné částice (M1-M2)	
	0,4	7,1	0,06 1,14 1,14 0,00
	7,5		1,21
Celkem	620,7	100,00	0,00



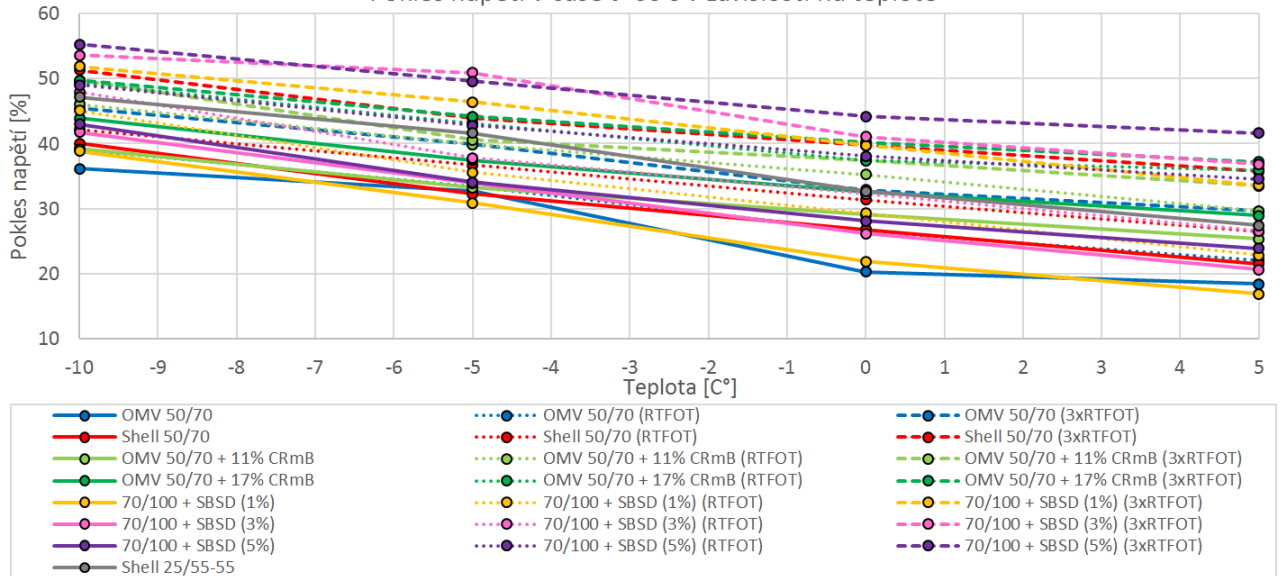
PŘÍLOHA 2

POKLES SMYKOVÉHO NAPĚTÍ

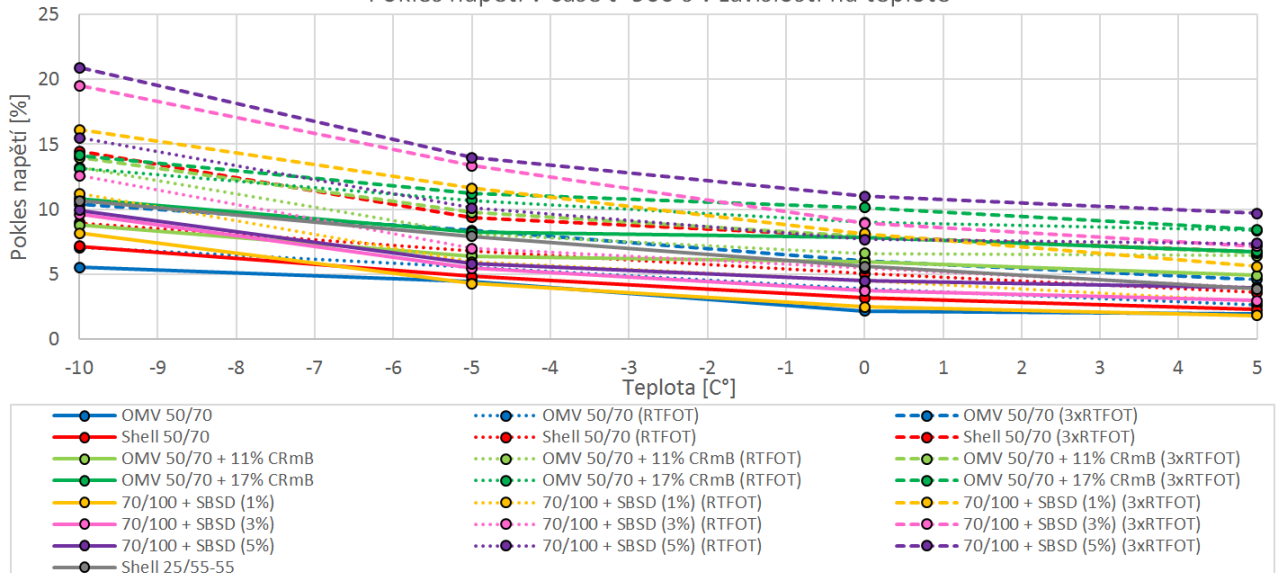
Pokles napětí v čase t=15 s v závislosti na teplotě



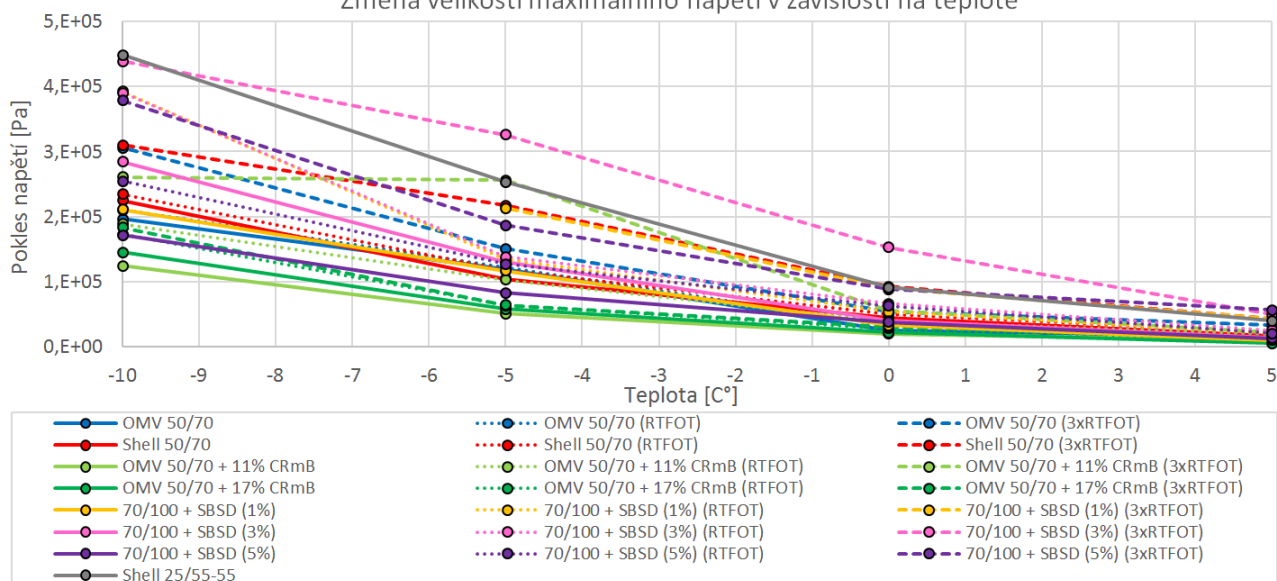
Pokles napětí v čase t=60 s v závislosti na teplotě



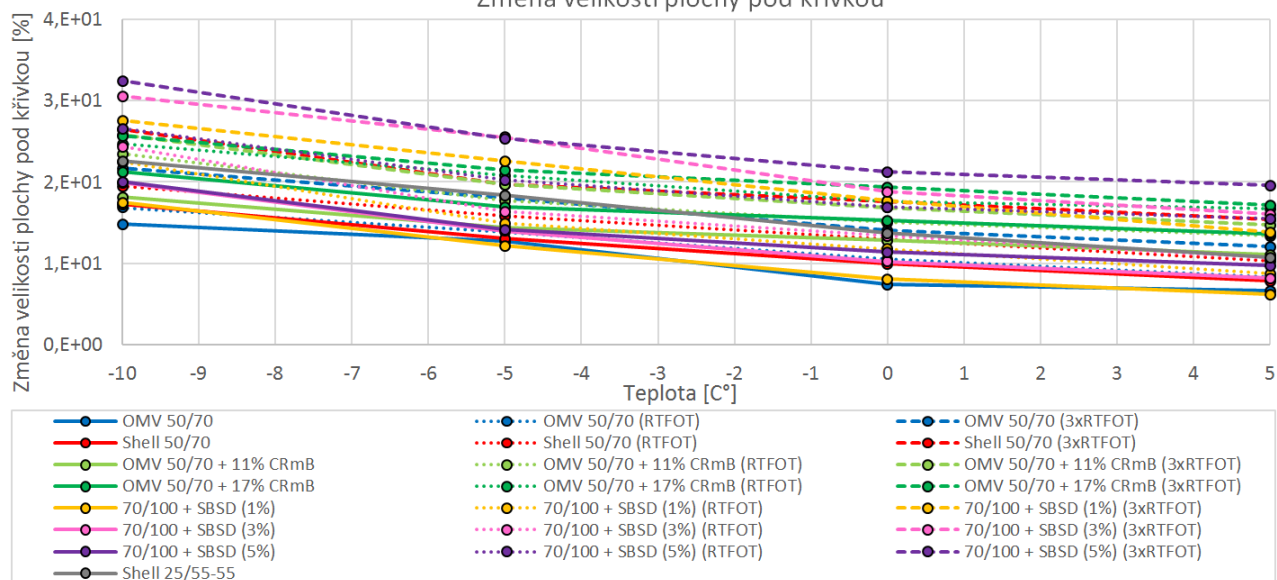
Pokles napětí v čase t=900 s v závislosti na teplotě



Změna velikosti maximálního napětí v závislosti na teplotě



Změna velikosti plochy pod křivkou

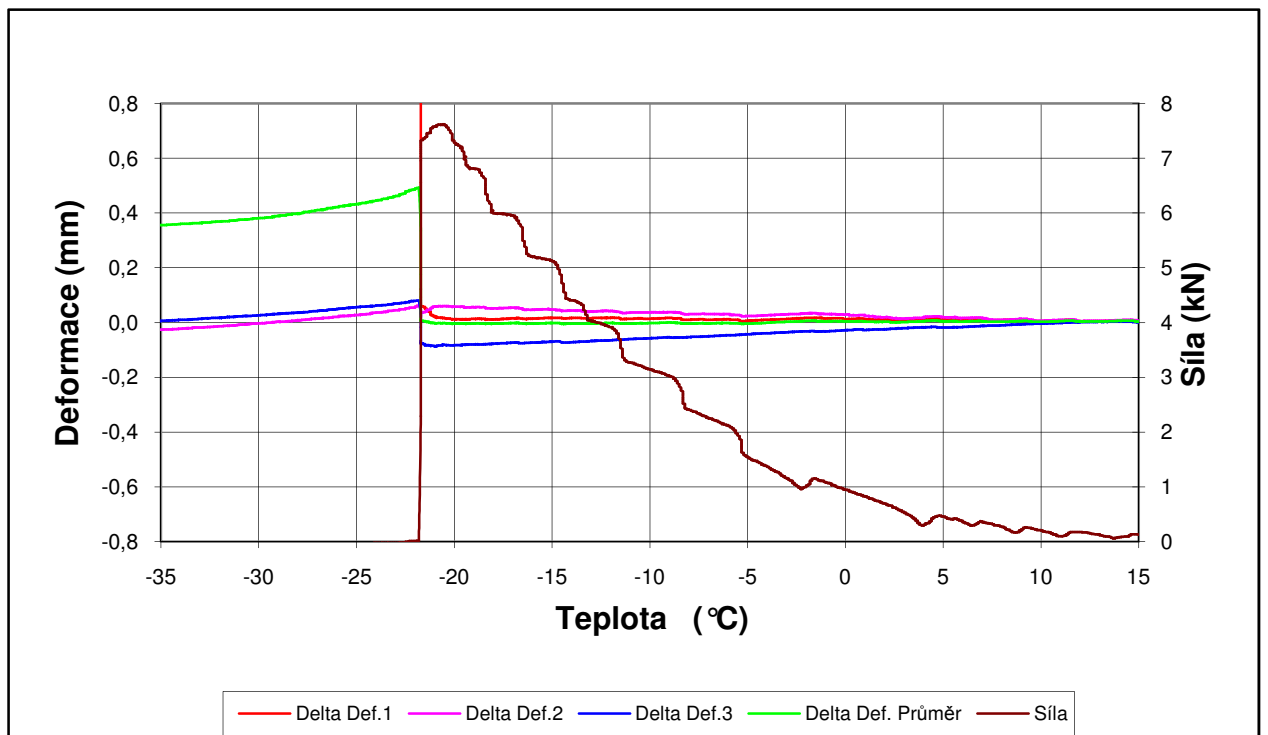


PŘÍLOHA 3

ZKOUŠKA ODOLNOSTI ASFALTOVÉ SMĚSI PROTI VZNIKU MRAZOVÝCH TRHLIN

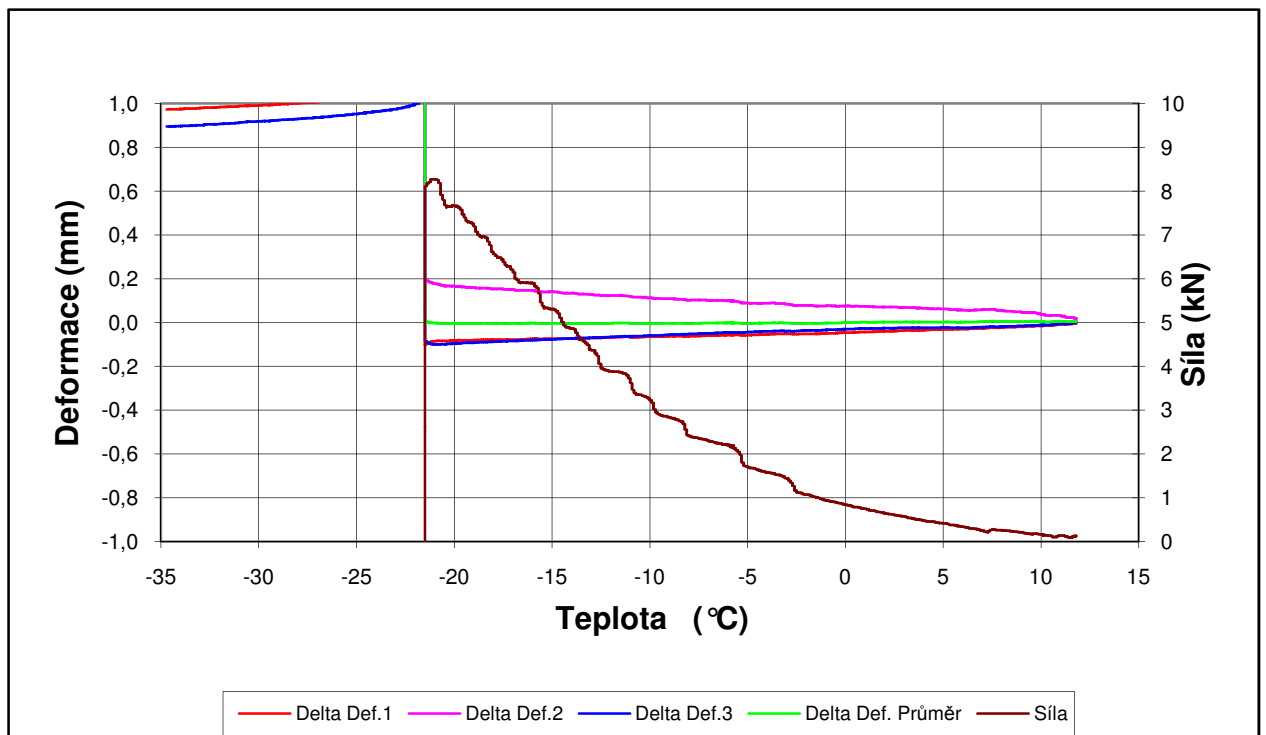
Zkouška odolnosti asfaltové směsi proti vzniku mrazových trhlin

Akce :	Musil DP
Asfaltová směs :	BBTM 8 11% 2
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	50.7 x 48.9 x 200.1
Datum zkoušky :	31.10.2014
Zkoušku provedl :	MUSIL
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	7,62
Max. napětí při porušení - MPa :	3,07
Teplota v komoře při porušení - °C :	-24,4
Teplota vzorku při porušení - °C :	-20,6



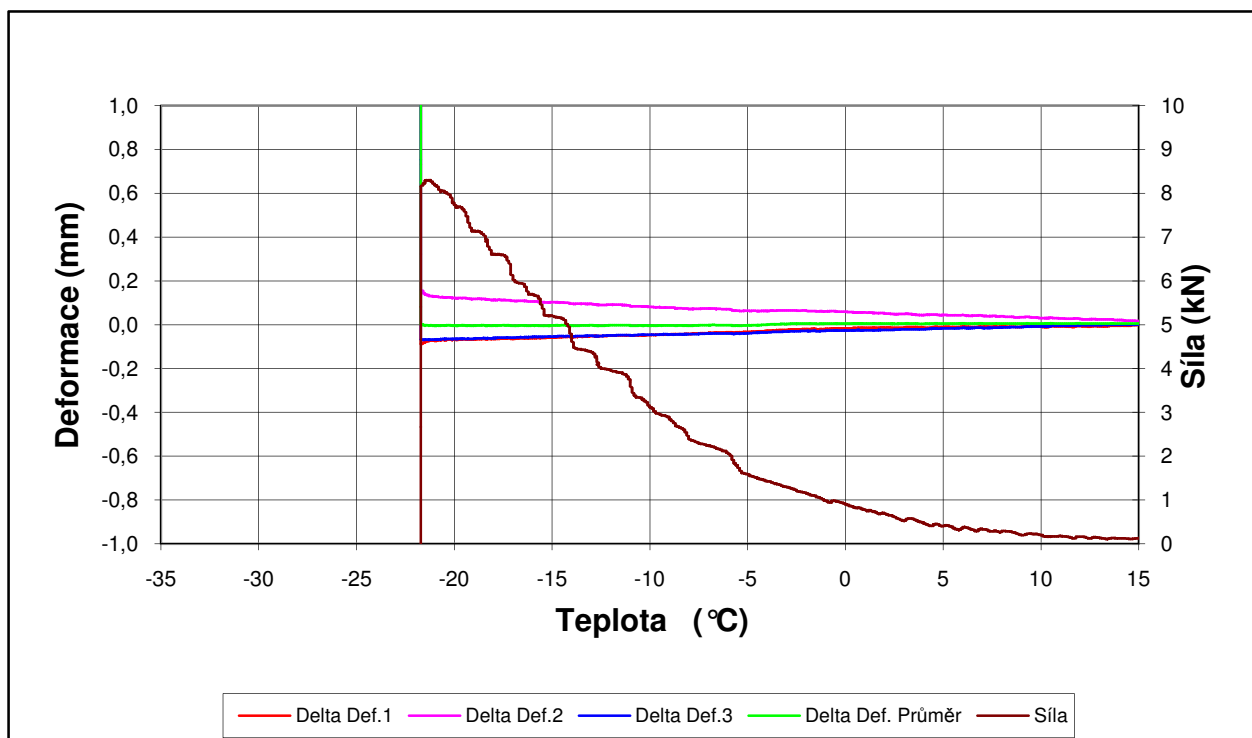
Zkouška odolnosti asfaltové směsi proti vzniku mrazových trhlin

Akce :	Musil DP
Asfaltová směs :	BBTM 8 11% 3
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	50.83 x 49.2 x 200.25
Datum zkoušky :	4.11.2014
Zkoušku provedl :	Musil
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	8,27
Max. napětí při porušení - MPa :	3,31
Teplota v komoře při porušení - °C :	-24,0
Teplota vzorku při porušení - °C :	-20,9



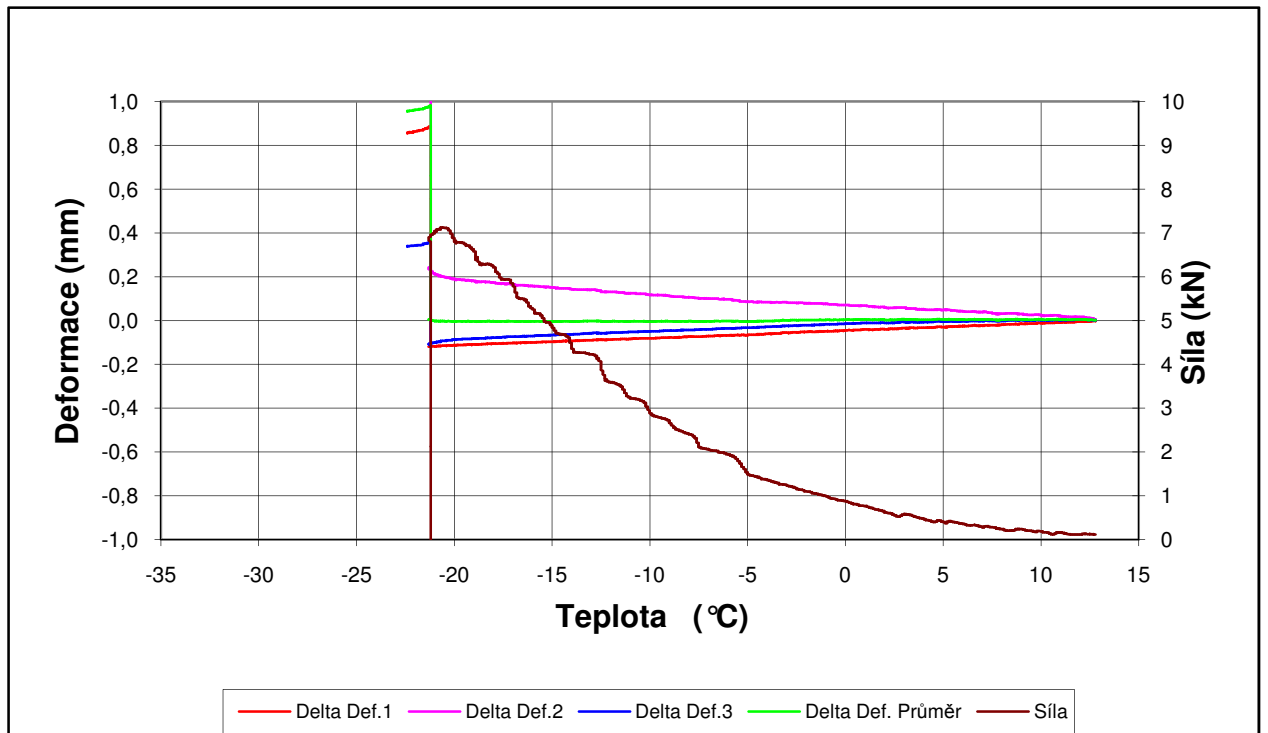
Zkouška odolnosti asfaltové směsi proti vzniku mrazových trhlin

Akce :	Musil DP
Asfaltová směs :	BBTM 8 11% 4
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	50.5 x 49.7 x 200.35
Datum zkoušky :	5.11.2014
Zkoušku provedl :	Musil
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	8,30
Max. napětí při porušení - MPa :	3,31
Teplota v komoře při porušení - °C :	-25,1
Teplota vzorku při porušení - °C :	-21,3



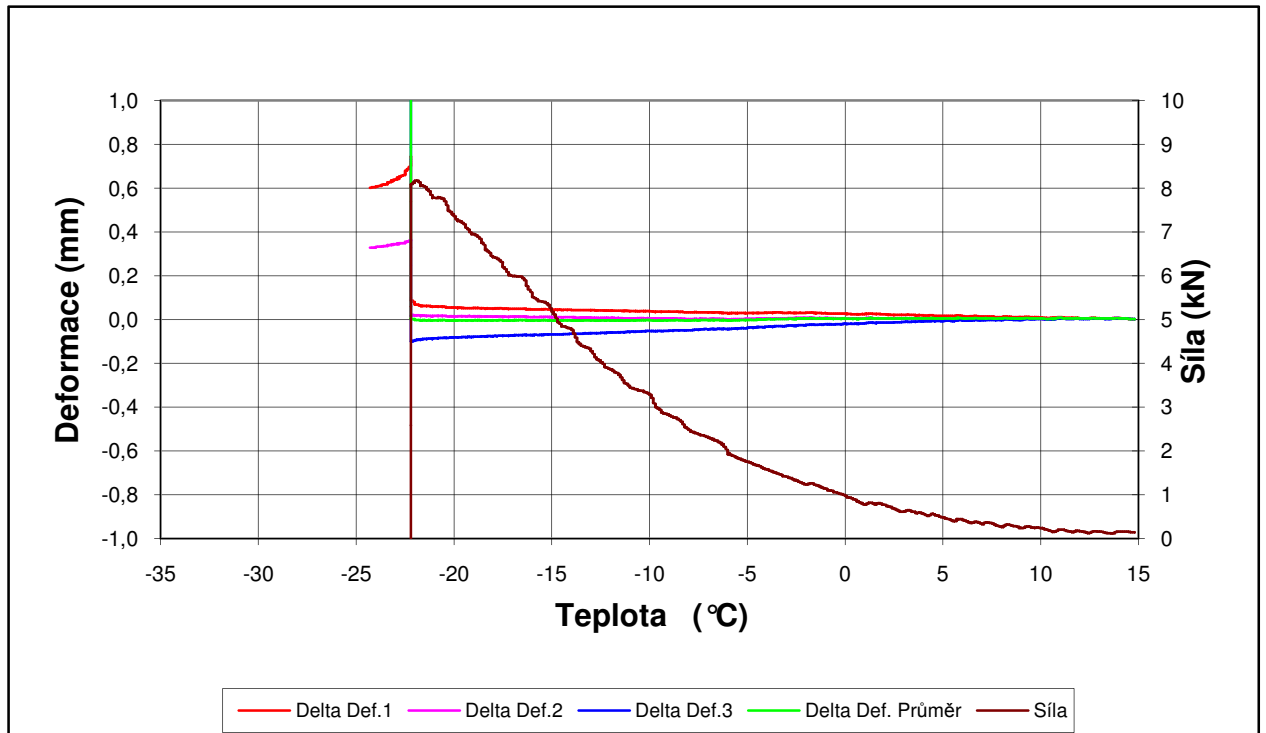
Zkouška odolnosti asfaltové směsi proti vzniku mrazových trhlin

Akce :	Musil DP
Asfaltová směs :	BBTM 8 17% 2
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	50.67 x 50.37 x 199.95
Datum zkoušky :	12.11.2014
Zkoušku provedl :	Musil
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	7,12
Max. napětí při porušení - MPa :	2,79
Teplota v komoře při porušení - °C :	-25,4
Teplota vzorku při porušení - °C :	-20,6



Zkouška odolnosti asfaltové směsi proti vzniku mrazových trhlin

Akce :	Musil DP
Asfaltová směs :	BBTM 8 17% 3
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	50.5 x 49.6 x 199.75
Datum zkoušky :	3.12.2014
Zkoušku provedl :	Musil
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	8,17
Max. napětí při porušení - MPa :	3,26
Teplota v komoře při porušení - °C :	-26,0
Teplota vzorku při porušení - °C :	-21,9



Zkouška odolnosti asfaltové směsi proti vzniku mrazových trhlin

Akce :	Musil DP
Asfaltová směs :	M8 17% 4
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	50.93 x 49.37 x 199.55
Datum zkoušky :	18.12.2014
Zkoušku provedl :	Musil
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	7,88
Max. napětí při porušení - MPa :	3,15
Teplota v komoře při porušení - °C :	-26,9
Teplota vzorku při porušení - °C :	-22,6

