



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

ZKOUŠKA MSCR V DYNAMICKÉM SMYKOVÉM REOMETRU

MSCR TEST IN DYNAMIC SHEAR RHEOMETER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MONIKA STŘASÁKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. JAN KUDRNA, CSc.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav pozemních komunikací

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Monika Štrasáková
Název	Zkouška MSCR v dynamickém smykovém reometru
Vedoucí bakalářské práce	prof. Ing. Jan Kudrna, CSc.
Datum zadání bakalářské práce	30. 11. 2013
Datum odevzdání bakalářské práce	30. 5. 2014
V Brně dne 30. 11. 2013	

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

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

Podklady a literatura

T. G. Mezger: The Rheology Handbook, 2011
Odborné články na internetu

Zásady pro vypracování

Nastudovat podstatu zkoušky Multiple Stress Creep-Recovery Test (MSCR). Provést zkoušku MSCR na vybraných asfaltových pojivech v dynamickém smykovém reometru při různých teplotách a empirické zkoušky pojiv včetně vyhodnocení a srovnání výsledků.

Předepsané přílohy

.....
prof. Ing. Jan Kudrna, CSc.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

V této bakalářské práci jsou popsány laboratorní vlastnosti asfaltových pojiv ve vztahu k trvalým deformacím. V teoretické části bude vysvětlena podstata a postup zkoušky MSCR. Dále bude popsán princip empirických zkoušek: penetrace jehlou, vratná duktilita a stanovení bodu měknutí. V praktické části budou vyhodnoceny vlastnosti čtyř zkoušených asfaltových pojiv a na základě výsledků bude provedeno jejich porovnání.

KLÍČOVÁ SLOVA

Asfalt, reologie, MSCR, dynamický smykový reometr, penetrace jehlou, vratná duktilita, bod měknutí.

ABSTRACT

The laboratory properties of bituminous binders in relation to permanent deformation are described in this bachelor's thesis. The principle and procedure of MSCR test will be explained in the theoretical part. The principle of empirical tests (needle penetration, elastic recovery and softening point) will be also described. The properties of four bituminous binders will be evaluated in practical part. The comparison of binders will be performed based on test results.

KEYWORDS

Bitumen, rheology, MSCR, dynamic shear rheometer, penetration, elastic recovery, softening point.

Střasáková, Monika. *Zkouška MSCR v dynamickém smykovém reometru*. Brno, 2014. 50 stran. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce prof. Ing. Jan Kudrna, CSc.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne

.....

podpis autora

Poděkování

Ráda bych zde poděkovala vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Janu Kudrnovi CSc. za umožnění této práce. Především bych poděkovala Ing. Ondřeji Daškovi a Ing. Pavlu Coufalíkovi za ochotu, pomoc a cenné rady, které mi poskytli během vypracování této bakalářské práce. Dále bych poděkovala všem zaměstnancům laboratoře ústavu pozemní komunikace VUT v Brně. V neposlední řadě bych ráda poděkovala celé své rodině, která mě podporovala během studia.

Obsah

1 Úvod	9
2 Cíle bakalářské práce	10
3 Reologie asfaltových pojiv	11
4 Použité zkušební metody	13
4.1 Penetrace jehlou	13
4.2 Stanovení bodu měknutí	15
4.3 Stanovení vratné duktility	18
4.4 Zkouška MSCR	20
5 Použité materiály	26
6 Výsledky zkoušek	27
6.1 Stanovení penetrace jehlou	27
6.2 Stanovení bodu měknutí	28
6.3 Stanovení vratné duktility	29
6.4 MSCR	30
6.4.1 Asfaltové pojivo PmB 25/55-65	30
6.4.2 Asfaltové pojivo PmB 25/55-55	31
6.4.3 Asfaltové pojivo PmB 45/80-50	32
6.4.4 Asfaltové pojivo 50/70	33
6.4.5 Výsledné hodnoty MSCR všech pojiv	35
6.4.6 Průběh zkoušky MSCR všech pojiv	38
6.4.7 Vliv změny tloušťky vzorku	40
7 Tabulka souhrnných výsledků	43
8 Korelace mezi vratnou duktilitou a zkouškou MSCR	44
9 Závěr	46
10 Seznam použité literatury	47
11 Seznam obrázků	48
12 Seznam grafů	49
13 Seznam tabulek	50

1 Úvod

Kvalita pozemních komunikací patří mezi základní potřeby společnosti, jelikož se s ní každý z nás setkává v průběhu celého života. Z tohoto důvodu je nutné udržovat silniční síť v České republice v adekvátním stavu, tak aby účelně plnila požadavky společnosti.

Většina pozemních komunikací v České republice je tvořena konstrukcí z asfaltových směsí. Ovšem při návrhu asfaltové směsi se často dostáváme do konfrontace, aby asfaltová vozovka vydržela jednak nízké teploty v zimních měsících, kdy hrozí vytvoření mrazových trhlin, a na druhou stranu, aby vydržela v letních měsících při vysoké teplotě, kdy hrozí vznik trvalých deformací. Z těchto důvodů je nutné dbát při správném návrhu ohledy na oba extrémy.

Jak již bylo zmíněno, asfaltová směs použitá v krytové vrstvě dosahuje v letních měsících vysokých teplot. Při těchto teplotách může docházet v asfaltových vrstvách k vzniku trvalých deformací, které jsou vyvolané především těžkou nákladní dopravou a pomalou dopravou. O kvalitě asfaltové směsi mohou rozhodovat i použitá asfaltová pojiva, která se v současné době posuzují nejčastěji pouze pomocí empirických zkoušek jako je stanovení penetrace jehlou, stanovení bodu měknutí metodou kroužek kulička nebo stanovením vratné duktility. Při stále zvyšujícím se dopravním zatížení a tudíž vyšší náročnosti na asfaltová pojiva se jeví empirické zkoušky již jako zastaralé a jsou vyvíjeny nové metody, které věrohodněji dokáží popsat vlastnosti asfaltových pojiv.

Vhodnou zkouškou, která může napovědět o vhodnosti asfaltového pojiva vůči vzniku trvalých deformací je zkouška The Multiple Stress Creep Recovery (dále MSCR), která byla vyvinuta ve Spojených státech amerických. Tato zkouška by měla věrohodněji popsat citlivost asfaltových pojiv vůči trvalým deformacím než empirické zkoušky.

2 Cíle bakalářské práce

Cílem práce je určení laboratorních vlastností vybraných asfaltových pojiv (tři polymerem modifikované asfalty a jeden silniční asfalt) pomocí empirických zkoušek a dále pomocí zkoušky MSCR.

V teoretické části práce budou vysvětleny základy reologie asfaltových pojiv a dále budou popsány jednotlivé zkušební metody a postupy.

V praktické části budou vybraná asfaltová pojiva podrobena třem empirickým zkouškám (stanovení penetrace jehlou, stanovení vratné duktility a stanovení bodu měknutí metodou kroužek kulička) a dále progresivní zkoušce MSCR, která je provedena v dynamickém smykovém reometru (DSR). Zkouška MSCR je zjišťována při teplotách 50 °C a 60 °C. Teploty byly vybrány z toho důvodu, že v současné době je v ČR při zkoušce vyjíždění kolem předepsána právě teplota 50 °C, která by měla být ovšem nahrazena při revizi specificačních norem teplotou 60 °C. V závěru bude provedeno vyhodnocení zkoušek a budou srovnány výsledky zkoušky MSCR s empirickými zkouškami.

Závěrem bakalářské práce by tedy měla být zjištěna použitelnost zkoušky MSCR, která je v současné době ve fázi přípravy pro přijetí do evropských norem.

3 Reologie asfaltových pojiv

Reologie je vědní obor zabývající se deformací a tokem materiálů. Je odvozena z řeckého slova rheos a znamená proudění či tok. Reologie se nezabývá pouze tokovým chováním kapalin ale i deformací tuhých těles. Každý materiál podléhá deformaci při působení síly. Materiál teče při zvětšující se deformaci v závislosti na čase [1] [2].

Základní veličinou charakterizující tokové chování je viskozita. Viskozita určuje míru vnitřního odporu materiálu vůči vnějšímu zatížení. S vysokou viskozitou materiály hůře tečou a s nízkou snadněji. Dynamická viskozita se označuje η (čteno éta) a jednotkou je $\text{Pa} \cdot \text{s}$ [2].

Asfaltové pojivo je charakterizováno viskoelastickým chováním a je závislé na čase a teplotě. To znamená že, polymerní materiál pod vlivem mechanického namáhání reaguje současně jako pevná hookovská látka i jako viskózní newtonovská kapalina. Polymerní materiál reaguje na deformaci vždy s určitým zpožděním. Chování různých materiálů lze popsat pomocí tzn. reologických modelů, pro viskoelastický materiál platí tyto základní modely: Maxwellův, Kelvinův a Burgesův model. Základními prvky modelů jsou ocelová pružina s elastickým modulem G odpovídající Hookovu modelu (pružný materiál) a tlumič odpovídající Newtonovu modelu (viskózní kapalina), který představuje válcovou nádobu naplněnou kapalinou o viskozitě η [3] [4].

Rozlišujeme dva základní typy experimentů viskoelastické odezvy:

- Relaxace – časová změna napětí při konstantní teplotě a přetvoření
- Tečení – časová změna přetvoření při konstantní teplotě a napětí

Maxwellův model

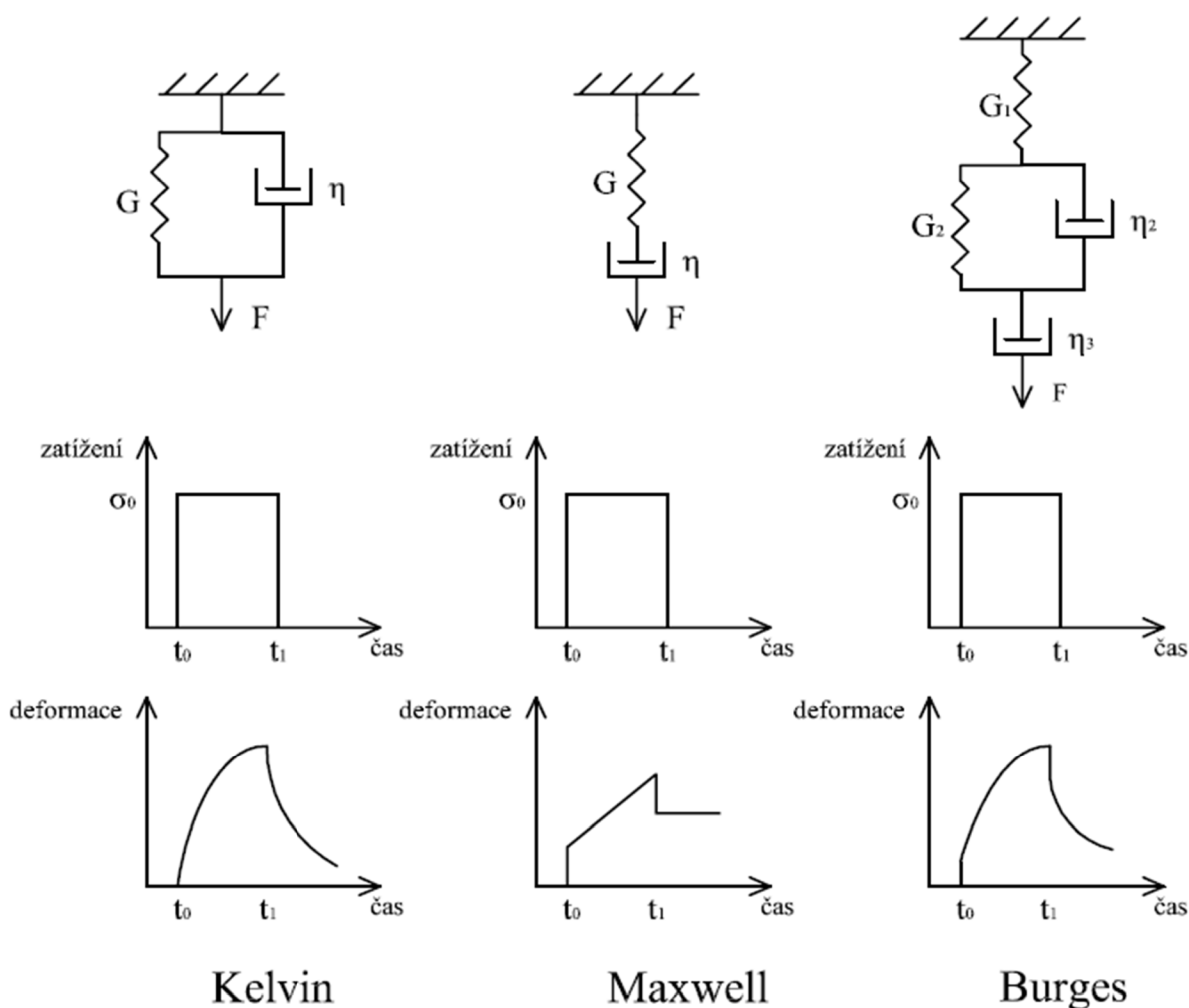
Základním modelem je Maxwellův model (viz Obrázek 1), který popisuje relaxační chování asfaltového pojiva. Prvky popisující tento model jsou řazeny do série a tím je celková deformace rovna součtu deformací jednotlivých prvků. Před zatížením jsou oba prvky v klidu (nedeformovány). Při působení zatížení na těleso dojde nejprve k protažení pružiny, která reaguje okamžitě. Pružina představuje elastické chování polymerního materiálu a její deformace odpovídá vratné deformaci. Při protažení pružiny se začne pohybovat i tlumič. Po určité době má tlumič i pružina stejnou deformaci, která je úměrná působícímu zatížení. Pružina se po ukončení zatížení ihned vrátí do původního stavu a naopak tlumič zůstane zdeformovaný. Napětí vyvolané působícím zatížením je stejné pro oba prvky. Pružina představuje vratnou část deformace a tlumič nevratnou část deformace [3] [4] [5].

Kelvinův model

Druhým základním modelem je Kelvinův model, který se skládá z paralelně spojené pružiny a tlumiče. Tento model popisuje tečení materiálu. Přechod pružiny ze stavu deformovaného a nedeformovaného je brzděn pomocí tlumiče. V tomto modelu vznikají vratné deformace a elasticita zpožděná - závislá na čase. Vzniklá deformace u obou prvků je stejná. Celkové napětí je součtem napětí jednotlivých prvků [3] [5].

Burgesův model

Tento model je jedním z možných a často používaných reologických modelů pro popis MSCR testu. V modelu jsou prvky nakombinovány takovým způsobem, který odpovídá zapojení dvou základních reologických struktur a to Maxwellova a Kelvinova modelu. Model je seřazen do série pomocí pružiny s modulem G_1 , Kelvinova modelu s modulem G_2 a viskozitou η_2 a tlumičem s viskozitou η_3 [3] [5].



Obrázek 1: Reologické modely

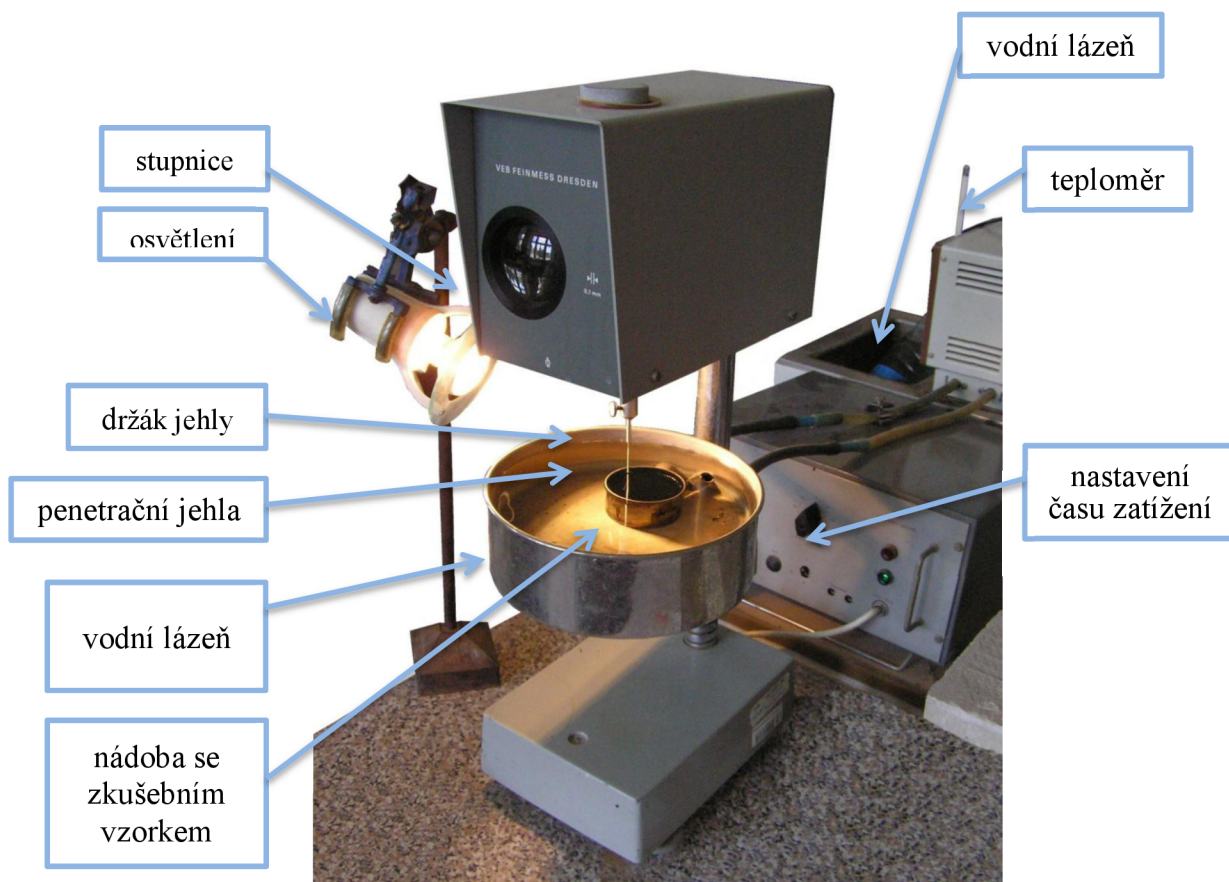
4 Použité zkušební metody

V následujícím textu bude vysvětlen postup laboratorních zkoušek, který je dán v příslušných normách a předpisech. Popisovány budou zkoušky empirické: stanovení penetrace jehlou, stanovení bodu měknutí a stanovení vratné duktility. Dále bude popsána podstata a postup provádění zkoušky MSCR.

4.1 Stanovení penetrace jehlou

Postup zkoušky je popsán v normě ČSN EN 1426 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou.

Penetrace vyjadřuje hloubku průniku normalizované jehly do vzorku asfaltového pojiva za předepsaných podmínek (teplota, aplikované zatížení a čas zatěžování). Naměřená hloubka jehly je vyčíslena v penetračních jednotkách, která se rovná desetině milimetru. Jehla vniká do vzorku při zatížení 100 g po dobu 5 s, který je umístěn ve vodní lázni předepsané teploty 25 °C.



Obrázek 2: Měřicí sestava pro stanovení penetrace jehlou [6]

Pomůcky:

Penetrometr – zařízení pro měření penetrace, který umožňuje penetrační jehle se pohybovat pouze ve svislém směru. Dokáže stanovit penetraci na nejbližších 0,1 mm. Vzorek umístěný na podstavci musí být ve vodorovné rovině.

Penetrační jehla – průměr 1 mm, ke konci zkosená do kužele s průměrem konce jehly 0,14 mm až 0,16 mm

Nádoba na vzorek – kovová nebo skleněná válcová nádoba s vnitřním průměrem 55 mm až 70 mm

Vodní lázeň – s objemem nejméně 10 l schopna udržet teplotu vzorku $\pm 0,15$ °C

Teploměr

Příprava vzorku:

Zkušební vzorek pojiva se zahřeje na bod měknutí a nalije do zkušební nádoby. Nechá se ochladnout na teplotu 15 °C až 30 °C zhruba 1,5 hod a umístí se do vodní lázně na stejnou dobu, po kterou vzorky chladly. Poté se může provést samotná zkouška.

Postup zkoušky:

Připraví se měřicí zařízení a zkontroluje se držák jehly, jestli se pohybuje volně ve svém zařízení a jestli je zbaven nečistot. Penetrační jehlu očistíme například toluenem, osušíme hadříkem a vložíme do držáku. Zkouška se provádí ve vodní lázni, kde je umístěn vzorek asfaltového pojiva, můžeme vidět na obrázku 3. Po dobu měření musí být zachována předepsaná teplota (25 °C \pm $0,15$ °C). Vzorek se umístí do požadované pozice, vynulují se hodnoty a postupně se sníží jehla až na povrch vzorku. Na přístroji se nastaví doba zatěžování jehly 5 s a spustí se měření. Na stupnici se přečte měření a zapíše se.



Obrázek 3: Vpich jehly do vzorku

Vyjme se jehla ze vzorku a očistí se hrot. Tento postup se opakuje nejméně třikrát. Vzdálenost vpichů od sebe a od strany nádoby je nejméně 10 mm.

Vyhodnocení zkoušky:

Výsledná hodnota penetrace je aritmetický průměr třech platných měření, která se zaokrouhlí na celé číslo. Norma udává maximální rozdíl platných hodnot, které se změřilo za podmínek 25 °C, 100 g, 5 s. Jednotlivé hodnoty jsou uznány, pokud se od sebe neliší o hodnoty uvedené v tabulce 1. Pro měření probíhající za jiných podmínek nebo při měření modifikovaných asfaltů je možno brát tuto tabulku pouze jako vodítko [7].

Tabulka 1: Maximální rozdíl platných stanovení

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

4.2 Stanovení bodu měknutí metodou kroužek kulička

Postup zkoušky je popsán v normě ČSN EN 1427 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek kulička.

Bod měknutí je teplota, při které materiál za normalizovaných podmínek zkušebních podmínek dosáhne určité konzistence.

Ve dvou mosazných kroužcích jsou odlity kotoučky asfaltového pojiva a na každém z nich je umístěna ocelová kulička. V kapalně lázni se zahřívají. Bod měknutí je teplota, při které kotoučky změknu natolik, aby obě kuličky obaleny v asfaltovém pojivu propadly na vzdálenost 25 mm ± 0,4 mm.

Pomůcky:

Automatické zkušební zařízení – viz Obrázek 4

Kroužky – dva mosazné kroužky s osazením vyhovující rozměrům

Odlévací destičky – hladký, rovný plech se zahnutými hranami směrem dolu

Kuličky – dvě z korozivzdorné oceli o průměru 9,5 mm a hmotnosti 3,5 g

- Středící prstence pro kuličky – dva mosazené na středění kovových kuliček
- Držák kroužků – z korozi-vzdorné oceli, upevňuje kroužky ve vodorovné rovině
- Lázeň – skleněná kádinka s možností zahřívání o průměru nejméně 85 mm, výšky nejméně 120 mm
- Teploměr – součást přístroje



Obrázek 4: Zkouška bodu měknutí

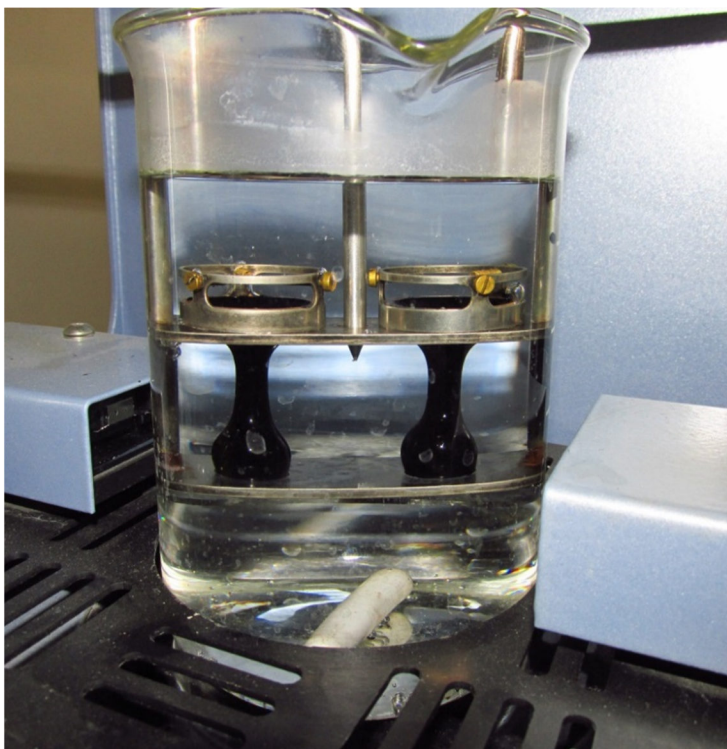
Příprava vzorku:

Zkušební kroužky se zahřejí na teplotu zhruba 90 °C, které se dále osadí na odlévací destičku. Ta je opatřena tenkou vrstvou separačního prostředku pro snadnější odebrání vzorku po vychladnutí. Nyní se do kroužků nalije nahřáté asfaltové pojivo. Takto připravený vzorek se nechá vychladnout přibližně 30 min na laboratorní teplotu. Po vychladnutí se zarovná horní část vzorku s okrajem kroužku pomocí zahřáté špachtle.

Postup zkoušky:

Seříznuté vzorky se osadí do otvorů nerezového stojanu, na ně se nasadí středící prstence. Tato soustava se vloží do skleněné kádinky naplněné odzdušněnou destilovanou vodou a ponechá se chladnout na teplotu 5 °C ± 1 °C po dobu 15 min. Po té se vyjme stojan, do středu každého vzorku se vloží kuličky a vloží se zpět do nádoby. Takto připravená nádoba se umístí do zkušebního zařízení na topnou desku a začínáme měřit.

V kádince je na dně položen magnet, který svým rotačním pohybem zapříčiňuje rovnoměrné ohřívání destilované vody. Teplota stoupá rychlostí 5 °C/min. Se vzrůstající teplotou roste deformace a kulička se tak propadá. Průběh zkoušky trvá tak dlouho, dokud se kulička obalená v pojivu nepropadne – viz Obrázek 5. Propad každé kuličky zaznamená světelný paprsek. Přístroj automaticky запиše teploty obou propadů a nesmí se lišit o více než 1 °C pro bod měknutí do 80 °C. U modifikovaných asfaltů může být rozdíl teplot až 2 °C. Při bodu měknutí nad 80 °C ve vodní lázni se výsledek zavrhne a provede se zkouška v glycerinu.



Obrázek 5: Propad kuliček

Vyhodnocení zkoušky:

Pro bod měknutí nižší nebo rovný 80 °C se výsledná hodnota vyjádří jako průměr zaznamenaných teplot. Výsledek se zaokrouhlí na 0,2 °C. Při bodu měknutí nad 80 °C se výsledná hodnota zaokrouhlí na 0,5 °C [8].

4.3 Stanovení vratné duktility

Postup zkoušky je popsán v normě ČSN EN 13398 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení vratné duktility modifikovaných asfaltů.

Vratná duktilita je vyjádřena v procentech a popisuje vzdálenost mezi konci polovláken protažených na délku 200 mm změřená 30 minut po přestřížení. Polovlákná jsou dva díly asfaltového vlákna vzniklá přestřížením a protažením na stanovenou délku.

Podstatou je stanovení délky v mm mezi konci přestřížených asfaltových vláken po uplynutí stanovené doby pro navrácení a vyjádří se jako procento z délky protažení.

Pomůcky:

Formovací souprava – vyrobená z kovu a složena ze čtyř dílků, rozměry dané normou

Duktilometr – tvořen vodní lázní s regulací teploty a protahovacího zařízení

Vodní lázeň – konstruována tak, aby umožnil současně měření nejméně dvou zkušebních vzorků protažených na délku nejméně 200 mm, umístěné formy musí mít mezi sebou a stěnami lázně vzdálenost nejméně 10 mm a od dna a hladiny vody vzdáleny o 25 mm

Protahovací zařízení – musí umožnit posun trnů s konstantní rychlostí 50 mm/min \pm 2,5 mm/min

Regulace teploty – udržuje konstantní teplotu lázně s odchylkou \pm 0,5 °C

Seřezávací nůž

Nůžky

Pravítko



Obrázek 6: Průběh zkoušky vratné duktility

Příprava vzorku:

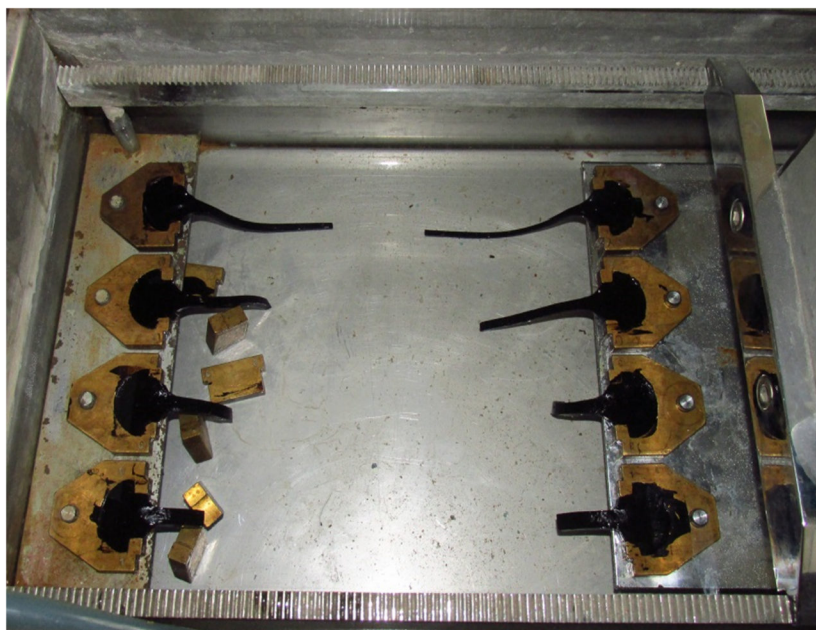
Boční dílky formovací soupravy a podkladní destičku očistíme a potřeme tenkou vrstvou separačního prostředku pro snadnější manipulaci, které se před zahájením zkoušky odloupnou. Koncové díly se naopak nepotírají, aby se zabránilo odtržení při napínání pojiva. Do sestavených dílků se na podkladní destičku naleje vzorek asfaltového pojiva. Nechá se chlادnout zhruba 60 min na laboratorní teplotu. Po vychladnutí se seřízne nadbytečné pojivo nahřátou špachtlí a tak se vytvoří rovný povrch. Takto připravené vzorky se dají do vodní lázně temperovat na zkušební teplotu 25 °C, která se nesmí lišit o více než $\pm 0,5$ °C. Temperuje se přibližně 90 min před začátkem zkoušky.

Postup zkoušky:

Po temperování se sejme formovací souprava z podkladní destičky a vloží se do vodící desky, tak aby trny vodící desky byly v otvorech formy. A nyní se opatrně odloupne boční dílky formy. Zapne se protahovací zařízení s rychlostí 50 mm/min $\pm 2,5$ mm/min. Vzorek se protahuje při teplotě 25 °C $\pm 0,5$ °C na délku 200 mm ± 1 mm. Délku protažení se měří pomocí trvale připevněného metru. Po dosažení zkušební délky protažení se vypne protahovací zařízení. Do 10 s se natažené asfaltové pojivo v polovině přestříhne a tak vzniknou dvě polovlákná. Po 30 min od přestřížení pravítkem se změří na mm vzdálenost mezi konci polovláken. Pokud konce polovláken nebudou naproti sobě, lehce se s nimi pohne.



Obrázek 7: Přestřížení asfaltového vlákna



Obrázek 8: Návratnost polovláken

Vyhodnocení zkoušky:

Pro výpočet vratné duktility R_E nám slouží vzoreček, do kterého se vkládá naměřená hodnota vzdálenosti polovláken \underline{d} v mm a délka protažení \underline{L} v mm (200 mm).

$$R_E = \frac{d}{L} \cdot 100$$

Vypočtená hodnota vratné duktility je vyjádřena v procentech a zaokrouhlí se na 1 procento. Pokud se hodnota dvou vzorků liší nanejvýš o 5 procent, provede se průměr těchto hodnot. V opačném případě se musí provést další měření [9].

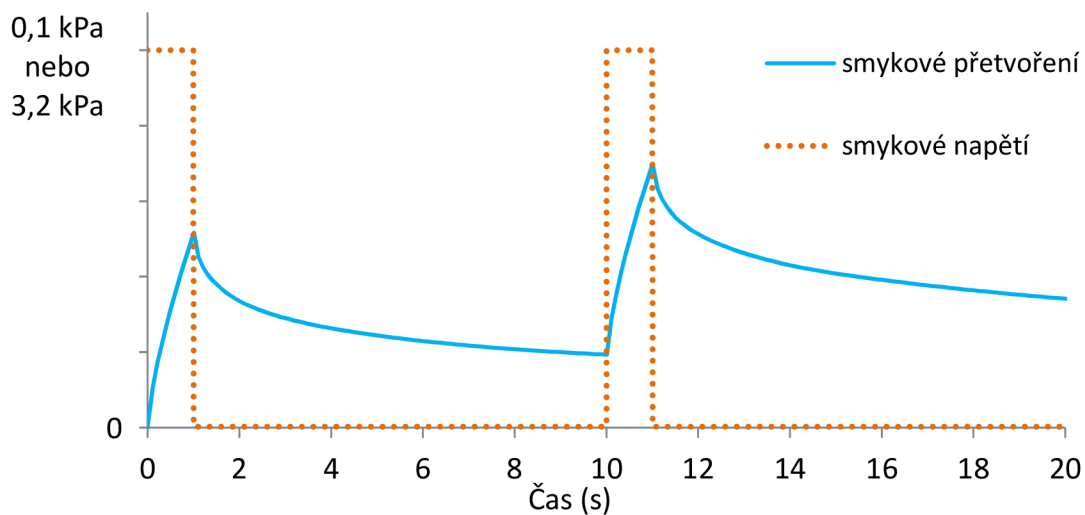
4.4 Zkouška MSCR

Postup zkoušky je popsán v normě prEN 16659 Asfalty a asfaltová pojiva – MSCR.

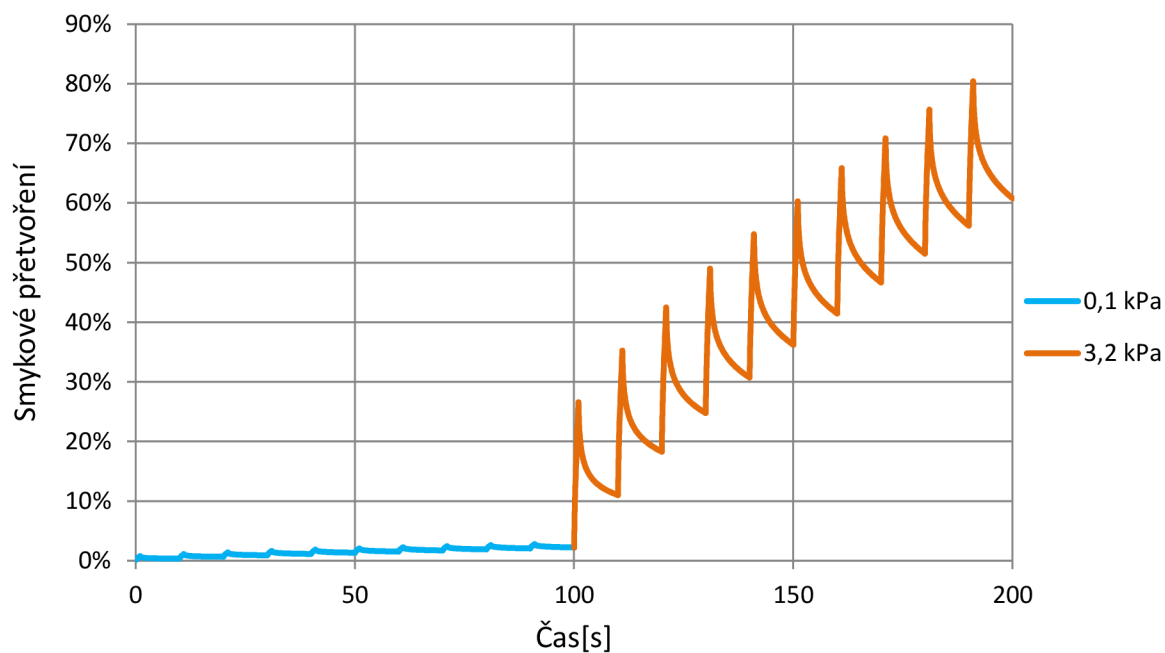
MSCR test byl zaveden relativně nedávno v USA. Nyní se dostává i do Evropy, kde je zpracován pouze draft normy. Tato zkouška lépe vystihuje vlastnosti v závislosti na dopravním zatížení než empirické zkoušky. Při zatížení hodnotí stabilitu asfaltových pojiv za použití vyšších teplot. Předpokládá se, že lépe vystihne vlastnosti pojiva nadměrně citlivá i v nelineární oblasti zatěžované odezvy.

Zkouška MSCR se skládá ze dvou částí, kdy každá z nich zahrnuje deset cyklů. Každý cyklus obsahuje smykové zatížení po dobu jedné sekundy a následné odlehčení po dobu devíti

sekund – viz Graf 1. Prvních deset cyklů probíhá při nastaveném smykovém napětí 0,1 kPa a ihned následuje deset cyklů při napětí 3,2 kPa. Průběh smykového přetvoření během zkoušky MSCR znázorňuje graf 2.



Graf 1: Průběh prvních dvou cyklů



Graf 2: Průběh zkoušky MSCR

Mezi Amerikou a Evropou jsou rozdíly v měření týkající se teplot při provádění zkoušky. V Evropě se provádí zkouška při teplotě 50 °C, 55 °C nebo 60 °C podle teploty, při které se provádí zkouška poježdění kolem v dané zemi. Výsledek zkoušky MSCR dokáže

věrně vystihnout náchylnost pojiva ke vzniku plastické deformace vznikající v reálné asfaltové vozovce.

Pomůcky:

Dynamický smykový reometr – viz Obrázek 9. Měří reologické vlastnosti asfaltových pojiv ve smykovém nebo oscilačním testu. Je opatřen rovnoběžnými geometriemi, kde jedna z nich je pohyblivá (horní) a druhá pevná (spodní). Mezi tyto geometrie se vkládá vzorek asfaltového pojiva. Reometr dokáže temperovat vzorek na $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ s přesností $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ po celou dobu zkoušky. Má rozsah frekvence $1\text{ }\mu\text{Hz}$ až 150 Hz . Musí být schopen sbírat data každých $0,1$ sekundy.

Měkký hadřík nebo papír

Seřezávací nůž



Obrázek 9: Dynamický smykový reometr [10]

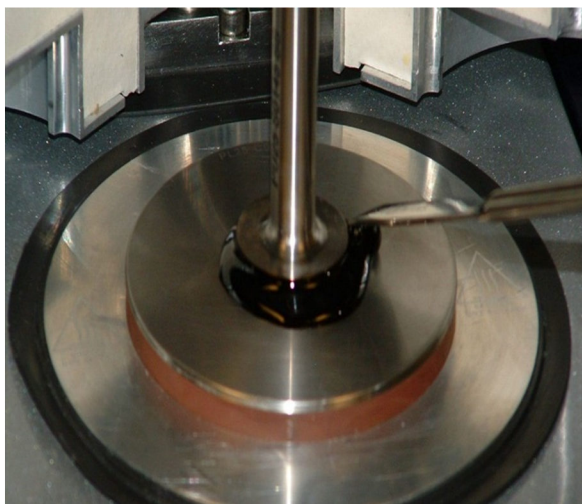
Příprava vzorku:

Vzorek asfaltového pojiva se nahřeje a nalije do formy ze silikonu, která nepřilne ke zkušebnímu vzorku. Nepoužívají se žádné separační prostředky, protože by mohly ovlivnit přilnavost vzorku k destičkám reometru. Takto připravený vzorek se nechá zchladnout na laboratorní teplotu.

Postup zkoušky:

Připraví se geometrie pro daný vzorek – průměr 25 mm . Očistí se pomocí rozpouštědla a měkkého hadříku (nepoužívají se kovové ani žádné jiné materiály, které by mohly poškodit povrch geometrie). Tento krok můžeme vidět na obrázku 11. Pomocí DSR se spustí horní geometrie, tak aby byla ve styku s dolní geometrií, a nastaví se předehřívání na zkušební teplotu. Po nahřátí vyjede horní geometrie nahoru a umístí se vzorek na spodní geometrii. Po umístění vzorku se spustí horní geometrie do takové polohy, aby byla dodržena požadovaná tloušťka mezi jednotlivými geometriemi (tloušťka mezery je zvětšena o 5% z toho důvodu, aby měření nebylo ovlivněno seřiznutím vzorku). Při sjetí horní geometrie vytlačí pojivo do

stran a je možné nahřátou špachtlí odstranit přebytečné pojivo – viz Obrázek 10. Po seříznutí DSR nastaví požadovanou tloušťku mezi geometriemi, což zaručí minimální vliv seříznutí na výsledek měření. Následně se nastaví přesná zkušební teplota a je zahájeno měření. Horní geometrie se začne otáčet a tak bude vnášet do vzorku smykové napětí nejdříve 0,1 kPa a následně 3,2 kPa v deseti krocích. Na monitoru počítače můžeme vidět postupně vykreslující se graf zaznamenávající hodnoty každou 0,1 s. Graf znázorňuje závislost časového průběhu zkoušky a smykového přetvoření vzorku pojiva vyvolané působením smykového napětí.



Obrázek 10: Seřezávání vzorku pojiva [11]



Obrázek 11: Čistění destiček [11]

Vyhodnocení:

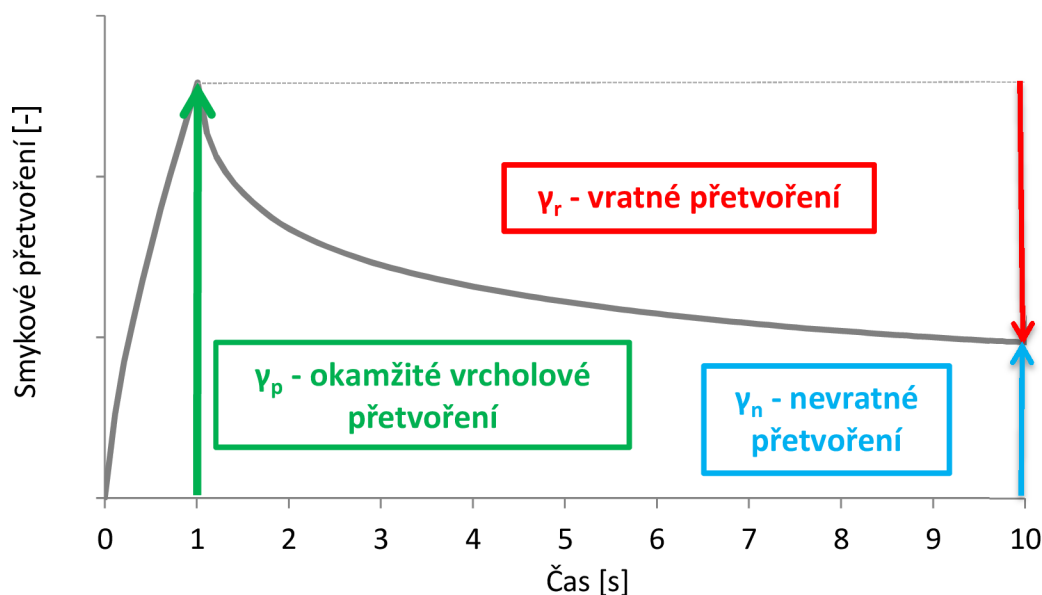
Naměřené hodnoty se pomocí programu R-space zaznamenají do souboru, z kterého je možné data převést do MS Excel pro zpracování výsledků a vykreslování různých grafů. Ze zkoušky MSCR se dostane programem R-space pouze surová data. Abychom dostali správné vykreslení průběhu celé zkoušky, musíme přepočítat hodnotu smykového přetvoření z úhlového pootočení a to podle vzorečku:

$$\text{Smykové přetvoření} = \frac{\theta \cdot r}{t}$$

Θ ... úhlové pootočení [rad]

r ... poloměr vzorku/geometrie (průměr geometrie 25 mm)

t ... tloušťka vzorku (2 mm nebo 1 mm)



Graf 3: Průběh přetvoření

Výstupem zkoušky jsou následující hodnoty vypočtené z přetvoření vznikajících ve vzorku pojiva. Jednotlivá přetvoření zobrazuje graf 3.

- **Průměrné elastické zotavení R** po 10 testovacích cyklech při napětí 0,1 kPa nebo 3,2 kPa. Hodnota popisuje návratnost pojiva do původního stavu. Zaokrouhluje se na 0,1 %.

$$R_{0,1\text{kPa}} = \frac{1}{10} \sum_{n=1}^{n=10} \frac{\text{přetvoření } \gamma_r}{\text{přetvoření } \gamma_p} \cdot 100 [\%]$$

$$R_{3,2\text{kPa}} = \frac{1}{10} \sum_{n=1}^{n=10} \frac{\text{přetvoření } \gamma_r}{\text{přetvoření } \gamma_p} \cdot 100 [\%]$$

- **Nevratná smyková poddajnost J_{nr}** po 10 testovacích cyklech při napětí 0,1 kPa nebo 3,2 kPa. Klasifikuje pojiva podle odolnosti vůči trvalým deformacím vznikajícím v asfaltových směsích. Zaokrouhluje se na tři platné číslice.

$$J_{nr0,1\text{kPa}} = \frac{1}{10} \sum_{n=1}^{n=10} \frac{\text{přetvoření } \gamma_n}{0,1} [1/\text{kPa}]$$

$$J_{nr3,2\text{kPa}} = \frac{1}{10} \sum_{n=1}^{n=10} \frac{\text{přetvoření } \gamma_n}{3,2} [1/\text{kPa}]$$

- **Rozdíl v elastickém zotavení R_{diff}** při napětí 0,1 kPa a 3,2 kPa, zaokrouhlení na 0,1 %

$$R_{\text{diff}} = \left(\frac{R_{0,1\text{kPa}} - R_{3,2\text{kPa}}}{R_{0,1\text{kPa}}} \right) \cdot 100 [\%]$$

- **Rozdíl v nevratné smykové poddajnosti $J_{\text{nr diff}}$** při napětí 3,2 kPa a 0,1 kPa, zaokrouhlení na 0,1 % [12] [13].

$$J_{\text{nr diff}} = \left(\frac{J_{n\text{ }3,2\text{kPa}} - J_{n\text{ }0,1\text{kPa}}}{J_{n\text{ }0,1\text{kPa}}} \right) \cdot 100 [\%]$$

5 Použité materiály

K bakalářské práci byla použita modifikovaná pojiva Shell Bitumen 25/55-65, Shell Bitumen 25/55-55 a Shell Bitumen 45/80-50. Jedná se o asfaltová pojiva s přísadou polymeru vyráběná z destilačních nebo polofoukaných asfaltů. Modifikovaná asfaltová pojiva se v silničním stavitelství používají na vysoce namáhané komunikace anebo na zálivky. Asfaltové směsi obsahující modifikované asfalty lépe odolávají tvorbě trvalých deformací a vzniku trhlin. Dále byl pro srovnání použit silniční asfalt Shell Bitumen 50/70 [13].

Tabulka 2: Označení vzorků

Označení pojiva výrobcem	Označení pojiva v bakalářské práci
Shell 25/55-65	PmB 25/55-65
Shell 25/55-55	PmB 25/55-55
Shell 45/80-50	PmB 45/80-50
Shell 50/70	50/70

6 Výsledky zkoušek

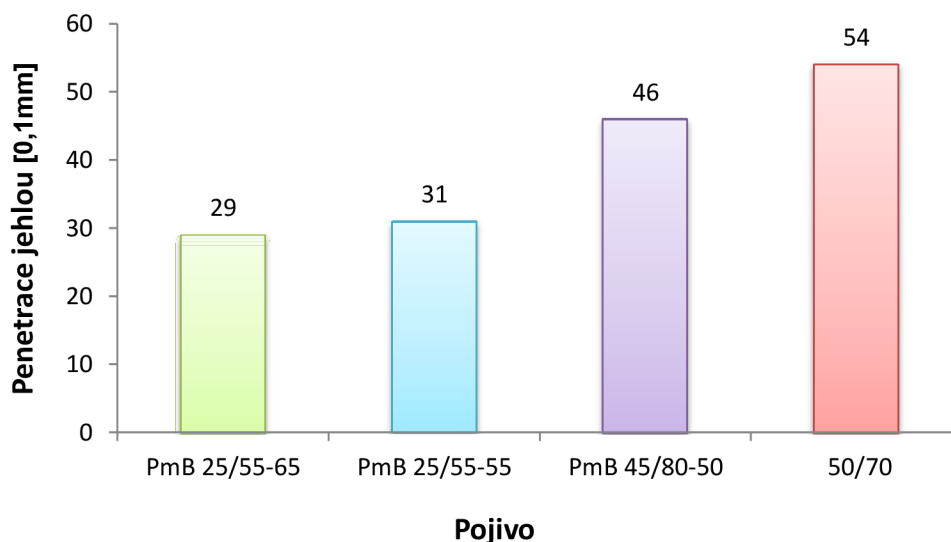
V této kapitole jsou zaznamenány v tabulkách výsledky všech prováděných zkoušek, které jsou dále vyneseny do grafů.

6.1 Stanovení penetrace jehlou

Zkouška penetrace jehlou je vysvětlena v kapitole 4.1. U každého vzorku byla provedena čtyři měření, která byla při dodržení předepsaných podmínek zprůměrována a jsou vypsána v tabulce 3. Všechny naměřené hodnoty vyhovují mezím penetrace dle normy ČSN EN 14023.

Tabulka 3: Výsledky penetrace jehlou

Pojivo	Penetrace [0,1 mm]
PmB 25/55-65	29
PmB 25/55-55	31
PmB 45/80-50	46
50/70	54



Graf 4: Penetrace jehlou

Z grafu je zřejmé, že výsledné hodnoty penetrace jehlou při teplotě 25 °C závisí na druhu pojiva. Logicky nejnižší hodnota penetrace jehlou, byla zjištěna u modifikovaných

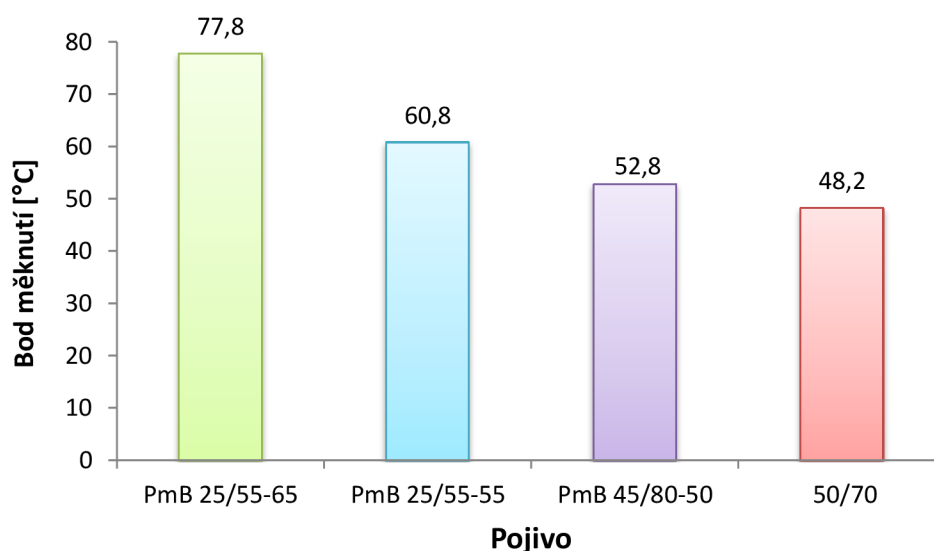
pojiv gradace 25/55. U pojiva PmB 45/80-50 byla zjištěna hodnota penetrace pouze o jednotku vyšší než předepisuje norma, tedy 46 p.j. Nejvyšší hodnota penetrace byla naměřena u silničního asfaltu 50/70.

6.2 Stanovení bodu měknutí metodou kroužek kulička

Zkouška stanovení bodu měknutí metodou kroužek kulička je vysvětlena v kapitole 4.2. V tabulce 4 jsou zobrazeny výsledky měření. Pro bod měknutí nižší nebo rovný 80 °C se výsledná hodnota vyjádří jako průměr zaznamenaných teplot a zaokrouhlí se na 0,2 °C. Hodnoty bodu měknutí jsou zobrazeny též v grafu 5.

Tabulka 4: Výsledky bodu měknutí

Pojivo	Bod měknutí [°C]
PmB 25/55-65	77,8
PmB 25/55-55	60,8
PmB 45/80-50	52,8
50/70	48,2



Graf 5: Bod měknutí

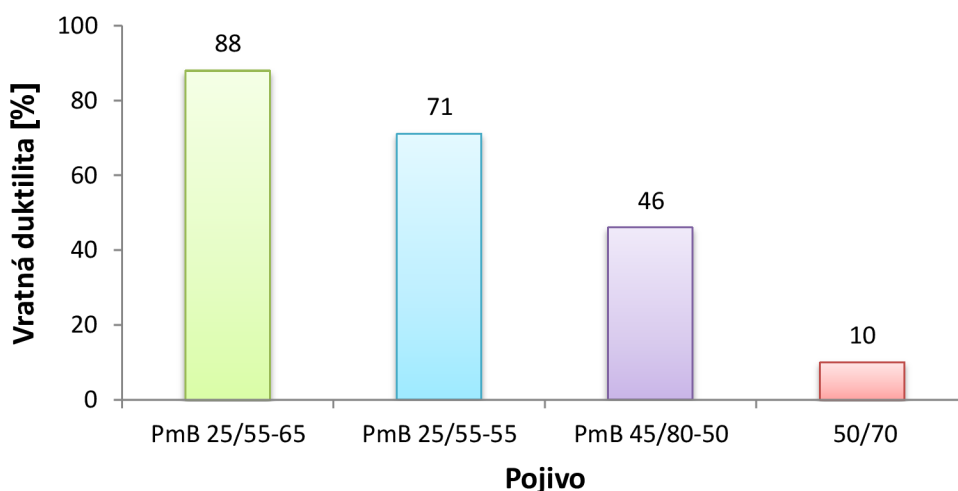
Hodnoty bodu měknutí jsou opět ovlivněny modifikací asfaltových pojiv. Modifikovaná asfaltová pojiva dosahují vyšších hodnot při zkoušce bodu měknutí než silniční asfalt. To znamená, že u modifikovaných pojiv je třeba vyšší teploty pro propad kuličky. Lze tedy říct, že by měla lépe odolávat trvalým deformacím i při vysokých teplotách. Dle výsledků a označení jednotlivých modifikovaných asfaltů je patrné, že jednotlivá pojiva vyhověla požadavkům minimální teploty při propadu kuliček.

6.3 Stanovení vratné duktility

Zkouška vratné duktility je vysvětlena v kapitole 4.3. Výsledná hodnota je vypočtena ze vzorce uvedeného v kapitole 4.3. V tabulce 5 jsou zobrazeny výsledky měření vyjádřeny v procentech a zaokrouhleny na 1 procento. Výsledné hodnoty vratné duktility všech vzorků byly vyneseny do grafu 6.

Tabulka 5: Výsledky vratné duktility

Pojivo	Vratná duktilita [%]
PmB 25/55-65	88
PmB 25/55-55	71
PmB 45/80-50	46
50/70	10



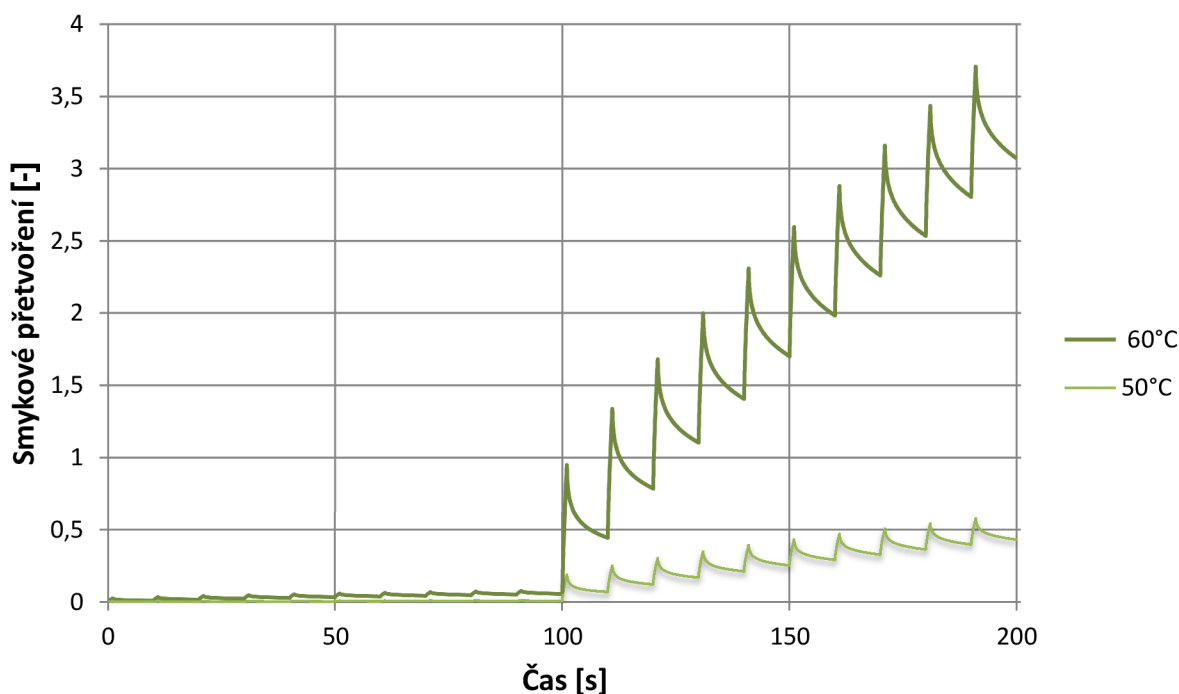
Graf 6: Vratná duktilita

Z grafu je opět patrné, že polymerem modifikovaná pojiva mají větší schopnost se navracet do původního stavu než pojiva nemodifikovaná, jelikož u silničního asfaltu 50/70 došlo k hodnotě vratné duktility pouze 10 %. Zkouška vratné duktility i poměrně významně rozlišila jednotlivé asfalty modifikované pomocí polymerů. Nejvyšší návratnost byla zjištěna u pojiva PmB 25/55-65 v hodnotě 88 %. U pojiva PmB 25/55-55 byla zjištěna hodnota 71 % a u pojiva PmB 45/80-50 pouze hodnota 46 %.

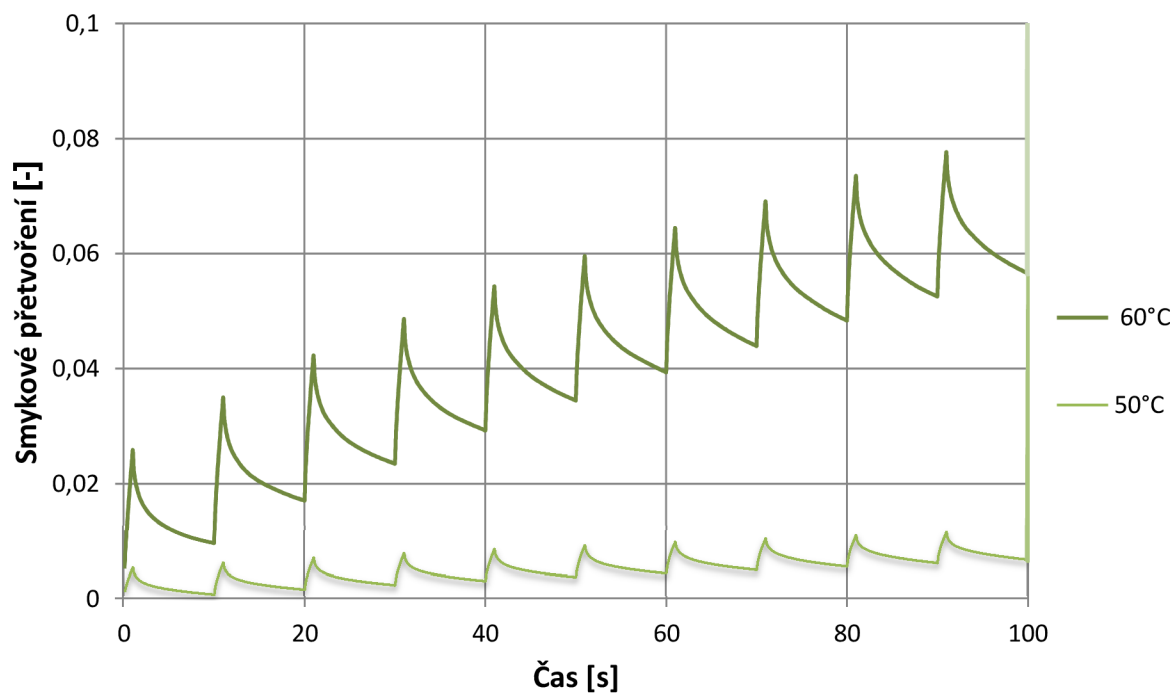
6.4 MSCR

Zkouška MSCR je popsána v kapitole 4.4. Nejprve je pro každé pojivo vykreslen graf znázorňující průběh zkoušky společně pro teplotu 50 °C a 60 °C (viz. Graf 7, 9, 11 a 13). Aby bylo vidět smykové přetvoření pro napětí 0,1 kPa, je proveden u těchto grafů výřez v čase do 100 s (viz. Graf 8, 10, 12 a 14). Dále jsou vypsány veškeré výsledné hodnoty, grafy zobrazující průběh zkoušky společně pro všechna pojiva a na konec je popsán vliv rozdílné tloušťky pojiva.

6.4.1 Asfaltové pojivo PmB 25/55-65

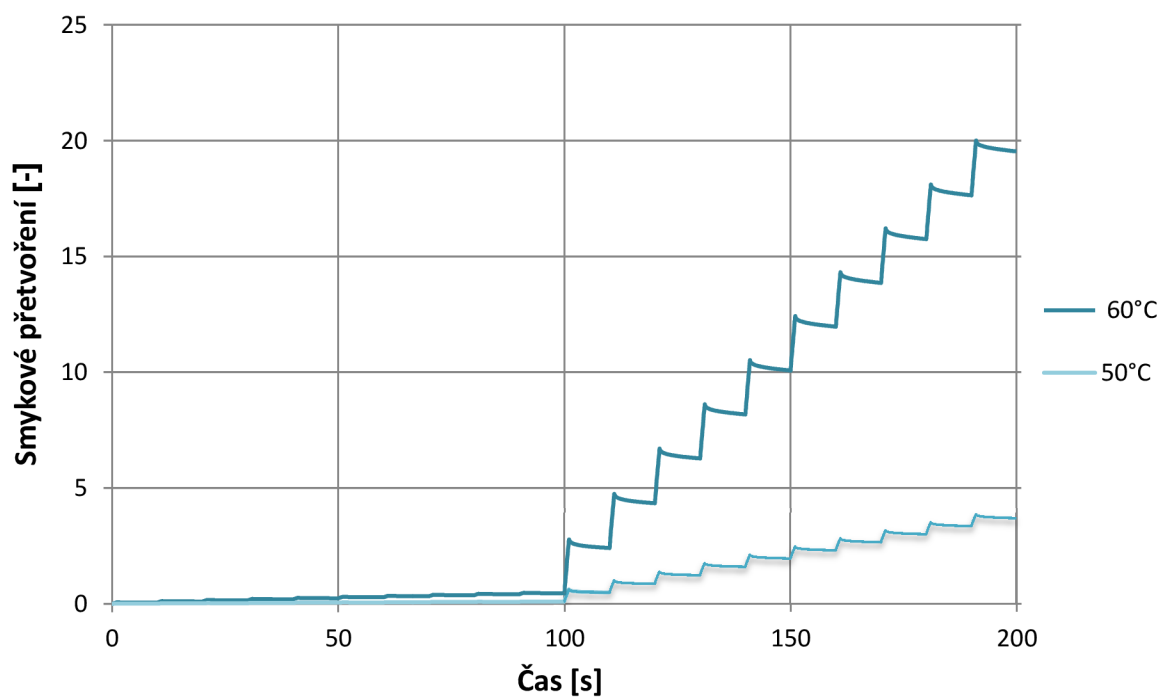


Graf 7: Průběh zkoušky MSCR - PmB 25/55-65

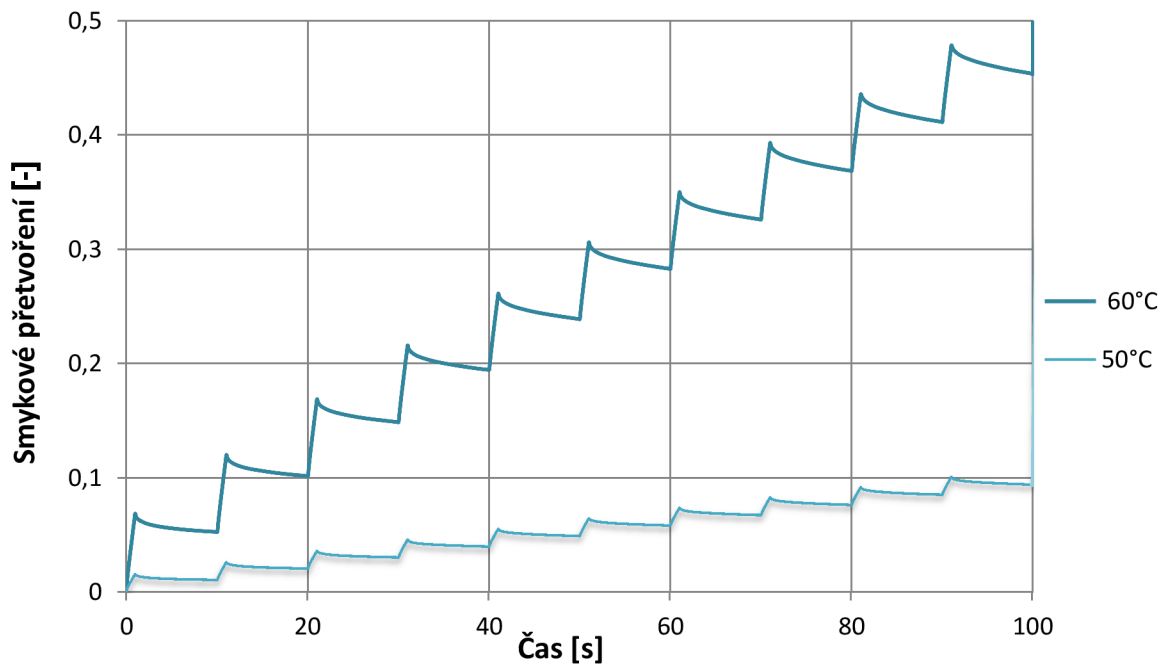


Graf 8: Výřez 0,1 kPa - PmB 25/55-65

6.4.2 Asfaltové pojivo PmB 25/55-55

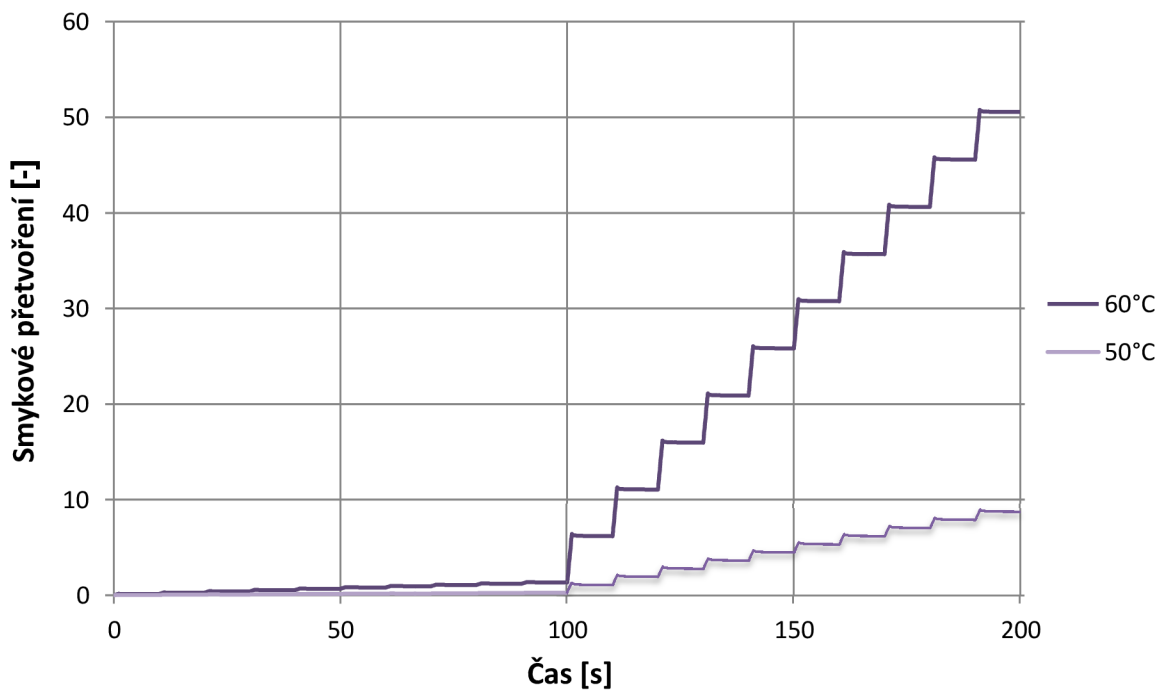


Graf 9: Průběh zkoušky MSCR - PmB 25/55-55

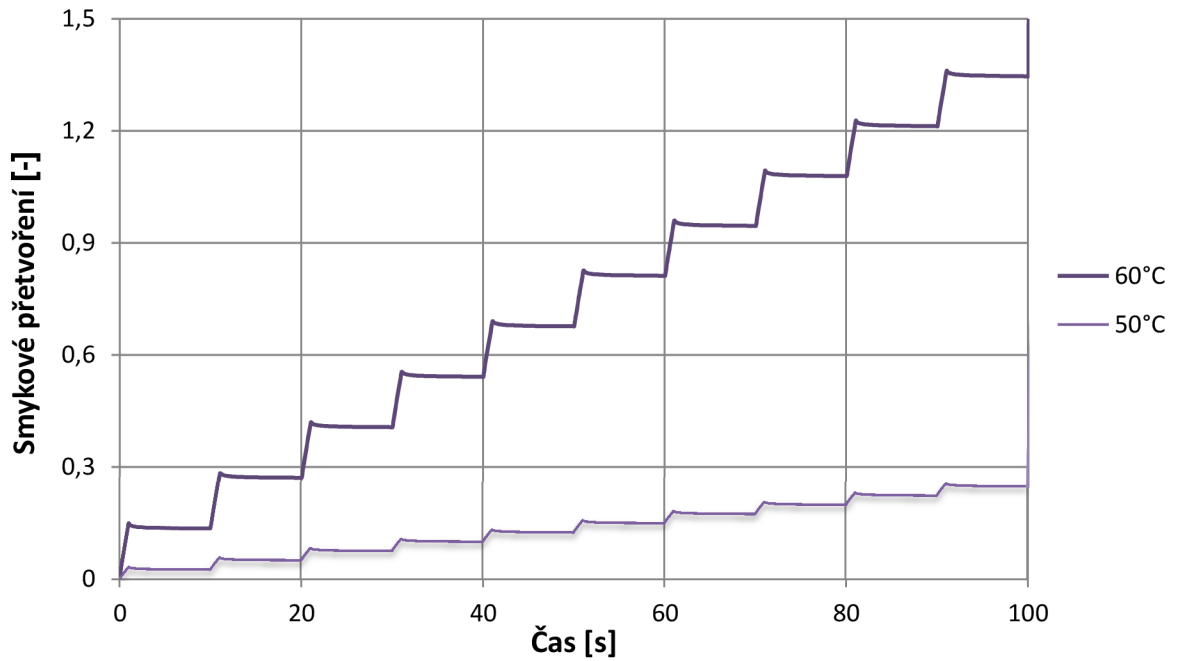


Graf 10: Výřez 0,1 kPa - PmB 25/55-55

6.4.3 Asfaltové pojivo PmB 45/80-50

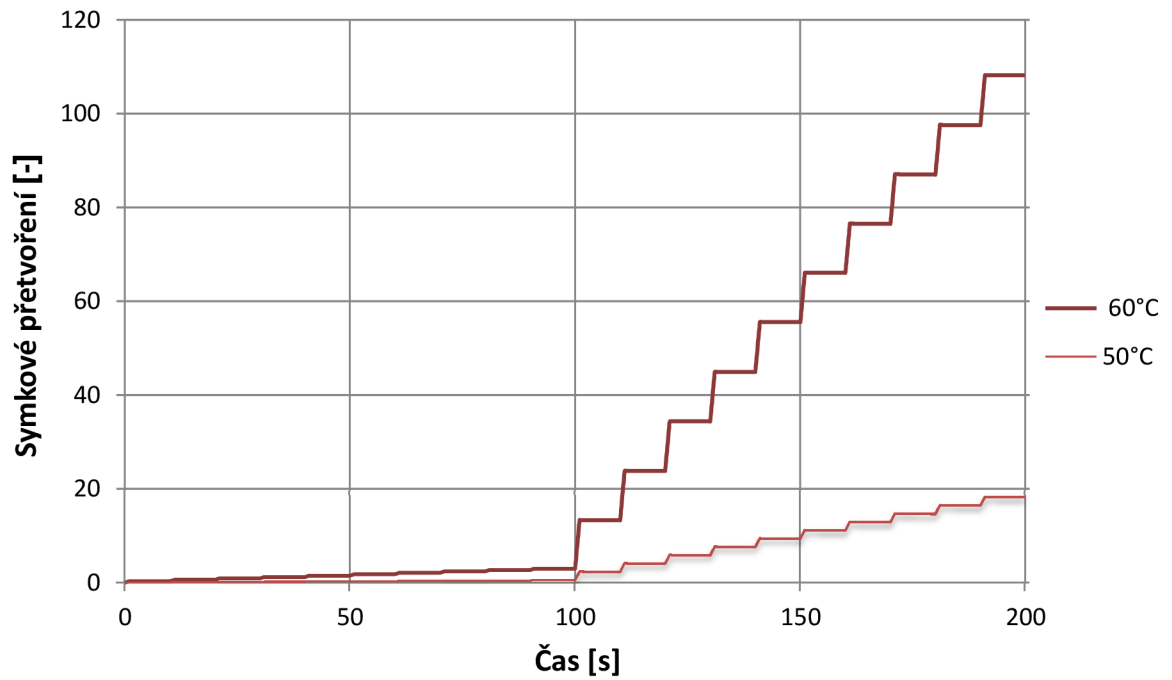


Graf 11: Průběh zkoušky MSCR - PmB 45/80-50

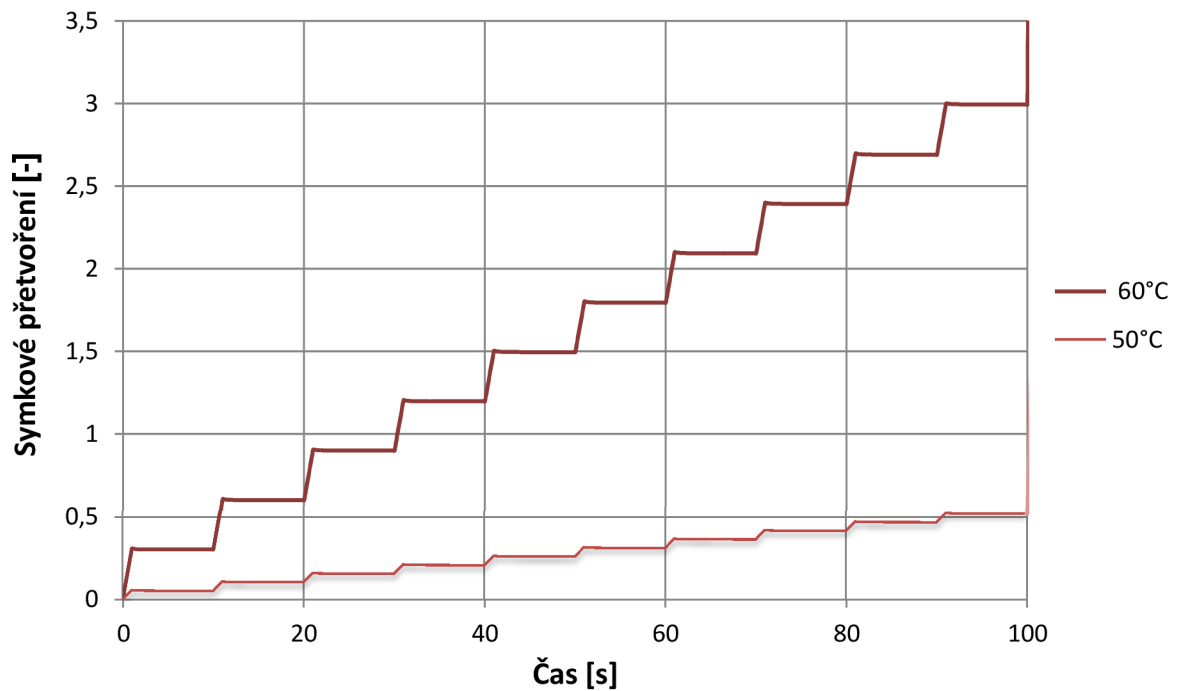


Graf 12: Výřez 0,1 kPa - PmB 45/80-50

6.4.4 Asfaltové pojivo 50/70



Graf 13: Průběh zkoušky MSCR - 50/70



Graf 14: Výřez 0,1 kPa - 50/70

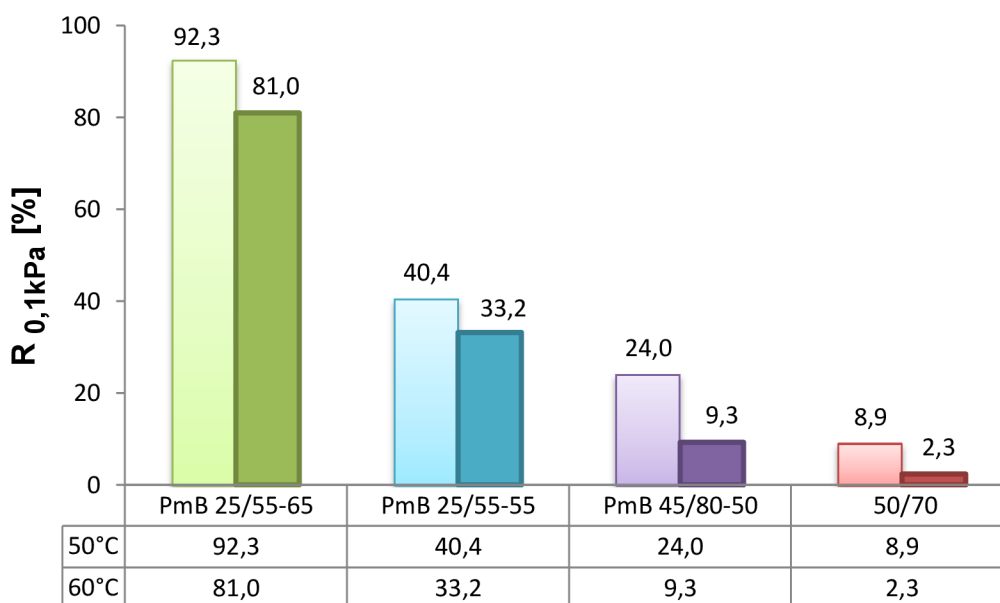
V grafech 7 až 14 je zobrazen průběh zkoušky MSCR všech pojiv pro teplotu 50 °C a 60 °C. Z těchto grafů lze pozorovat změnu chování asfaltových pojiv vzhledem k teplotě. Zvýšená teplota má velký vliv na hodnotu smykového přetvoření. Při teplotě 60 °C dosahuje smykové přetvoření u všech pojiv větších hodnot než při teplotě 50 °C. Dále je chování asfaltového pojiva ovlivněno i modifikací. Průběh zkoušky silničního asfaltu 50/70 zaznamenaného v grafu 13 připomíná tvar schodiště. To znamená, že u silničního asfaltu při působení smykového napětí vzniká velmi malé vratné přetvoření. Naopak vzniká vyšší okamžité přetvoření, což má za následek dosahující vyšších hodnot smykového přetvoření než u asfaltových pojiv modifikovaných pomocí polymeru. Velký rozdíl průběhu zkoušky je zřejmý v grafu 7 pro PmB 25/55-65, u kterého je vratné přetvoření viditelně větší než u silničního asfaltu a u modifikačních asfaltů nižší gradace.

6.4.5 Výsledné hodnoty MSCR všech pojiv

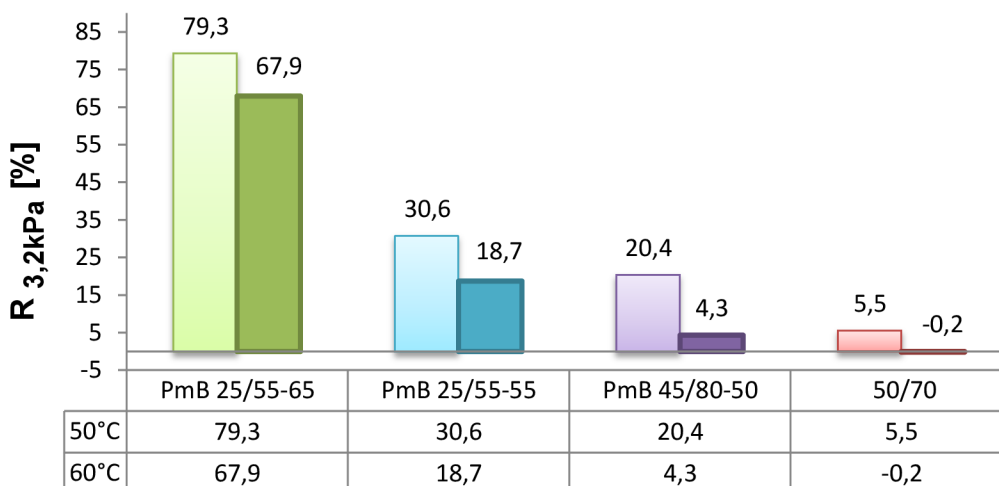
V této části textu jsou vypsané do tabulky výsledné hodnoty zkoušky MSCR vypočtené ze vzorců uvedených v kapitole 4.4. Jednotlivé hodnoty všech pojiv jsou vyneseny do grafů pro obě teploty (50 °C a 60 °C).

Tabulka 6: Výsledné hodnoty MSCR všech pojiv

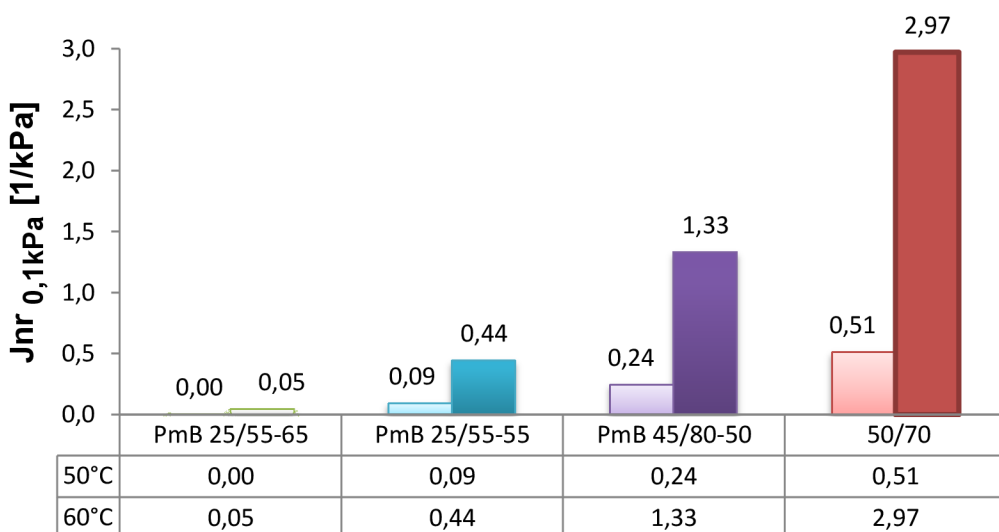
		PmB 25/55-65	PmB 25/55-55	PmB 45/80-50	50/70
R_{0,1kPa} [%]	50°C	92,3	40,4	24,0	8,9
	60°C	81,0	33,2	9,3	2,3
R_{3,2kPa} [%]	50°C	79,3	30,6	20,4	5,5
	60°C	67,9	18,7	4,3	-0,2
J_{nr0,1kPa} [1/kPa]	50°C	0,00	0,09	0,24	0,51
	60°C	0,05	0,44	1,33	2,97
J_{nr3,2kPa} [1/kPa]	50°C	0,01	0,11	0,26	0,55
	60°C	0,09	0,59	1,53	3,26
R_{diff} [%]	50°C	14,1	24,2	15,0	38,2
	60°C	16,1	43,6	53,9	108,2
J_{nrdiff} [%]	50°C	183,8	22,9	7,6	6,6
	60°C	91,0	34,0	15,1	9,7



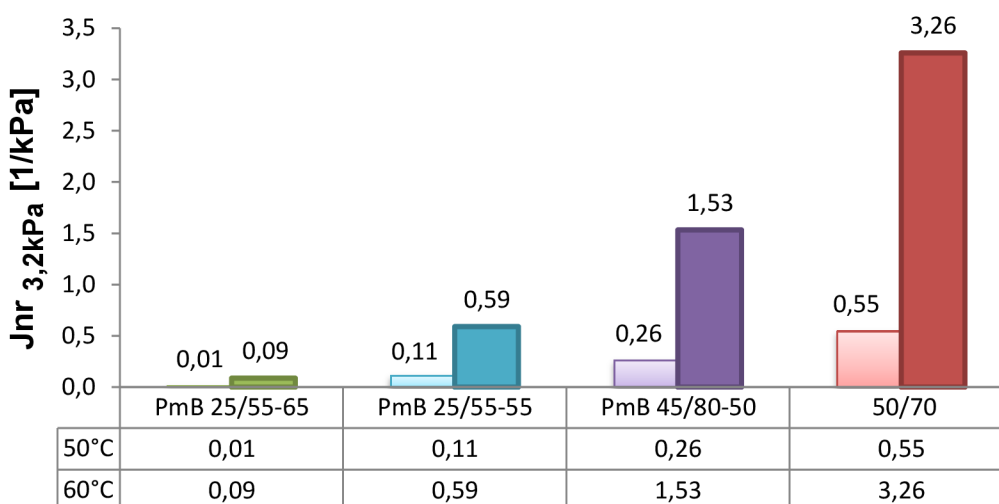
Graf 15: Průměrné elastické zotavení R_{0,1kPa}



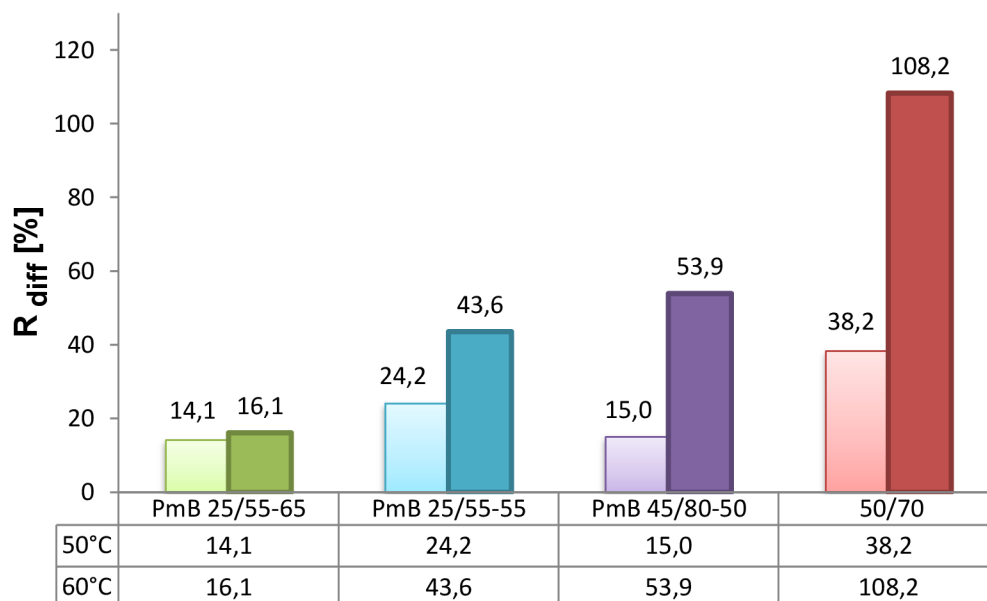
Graf 16: Průměrné elastické zotavení $R_{3,2kPa}$



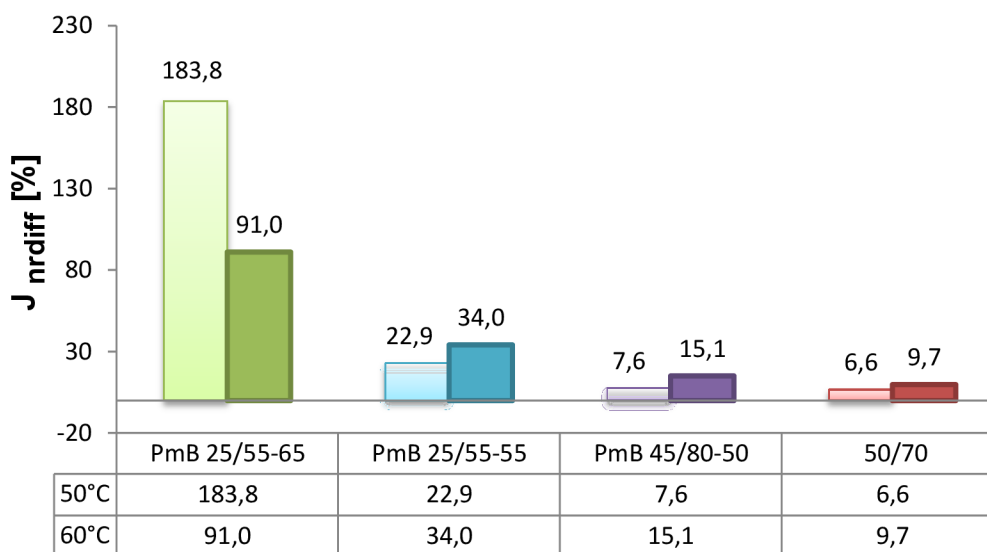
Graf 17 16: Nevratná smyková poddajnost $Jnr_{0,1kPa}$



Graf 18: Nevratná smyková poddajnost $Jnr_{3,2kPa}$



Graf 19: Rozdíl v elastickém zotavení R_{diff}

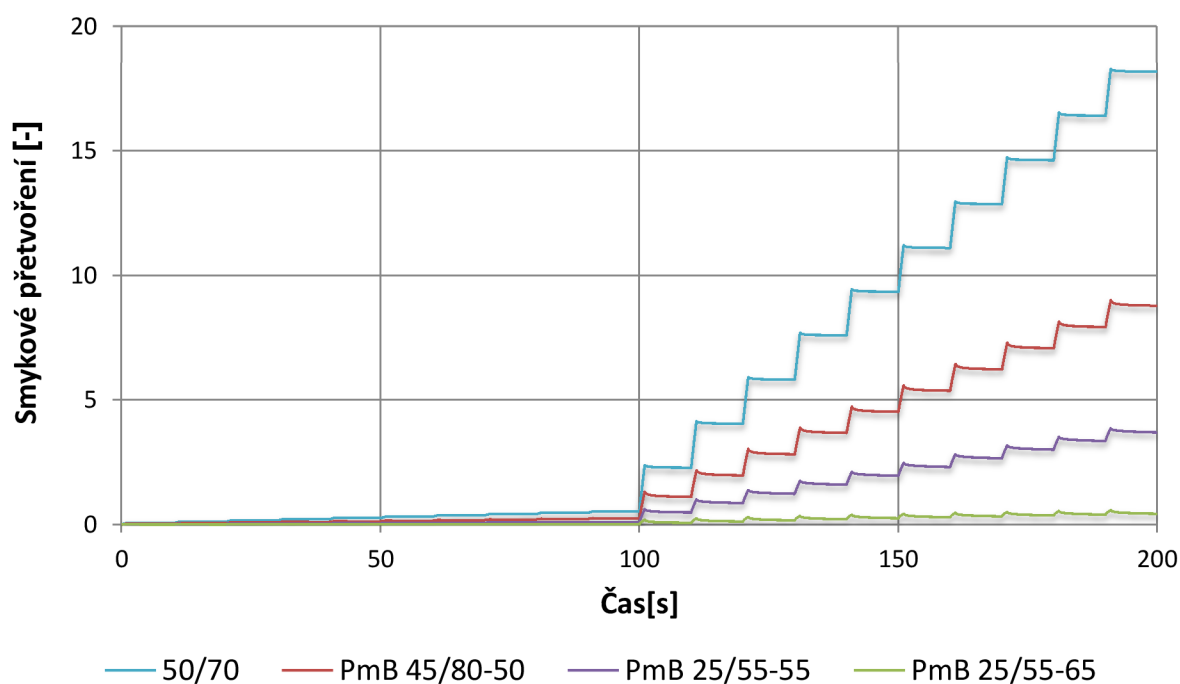


Graf 20: Rozdíl v nevratné smykové poddajnosti J_{nrdiff}

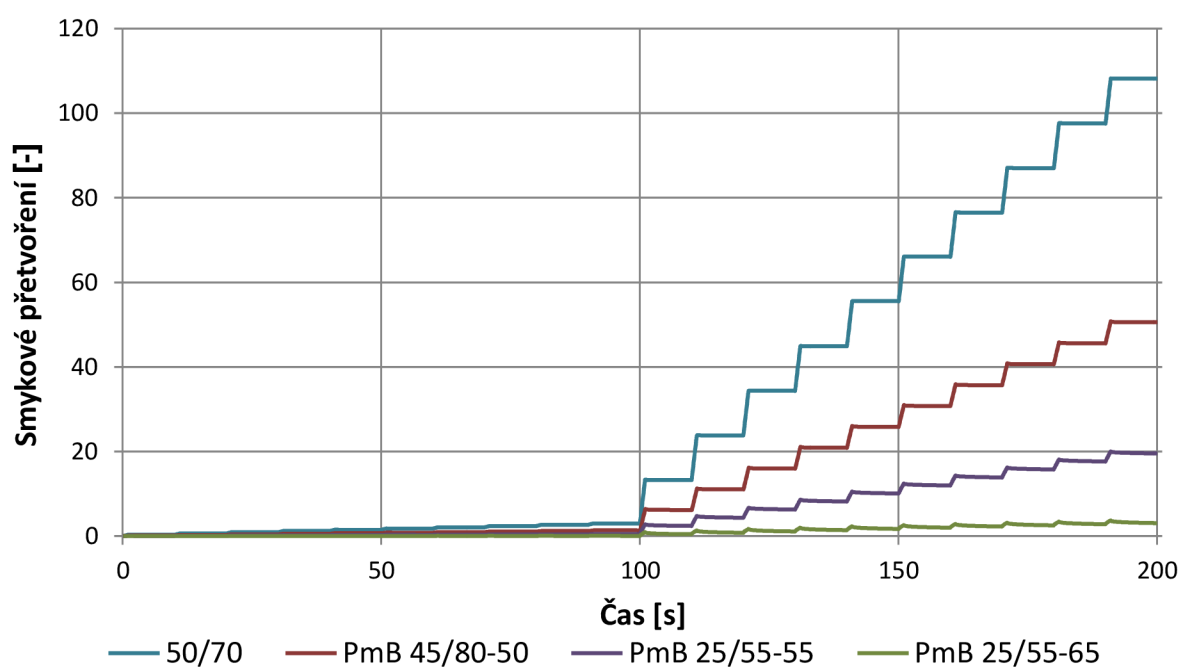
Z těchto grafů je opět viditelný rozdíl hodnot mezi teplotami 50 °C a 60 °C. Hodnota průměrného elastického zotavení říká, nakolik se pojivo poměrově vrací do původního stavu. Modifikovaná pojiva mají hodnotu elastického zotavení vyšší než silniční asfalt. Čím je tedy hodnota vyšší, tím je asfaltové pojivo odolnější vůči trvalým deformacím. Také je hodnota vyšší u všech pojiv pro teplotu 50 °C. Naopak nižší hodnota nevratného smykového přetvoření je u odolnějších asfaltových pojiv.

6.4.6 Průběh zkoušky MSCR všech pojev

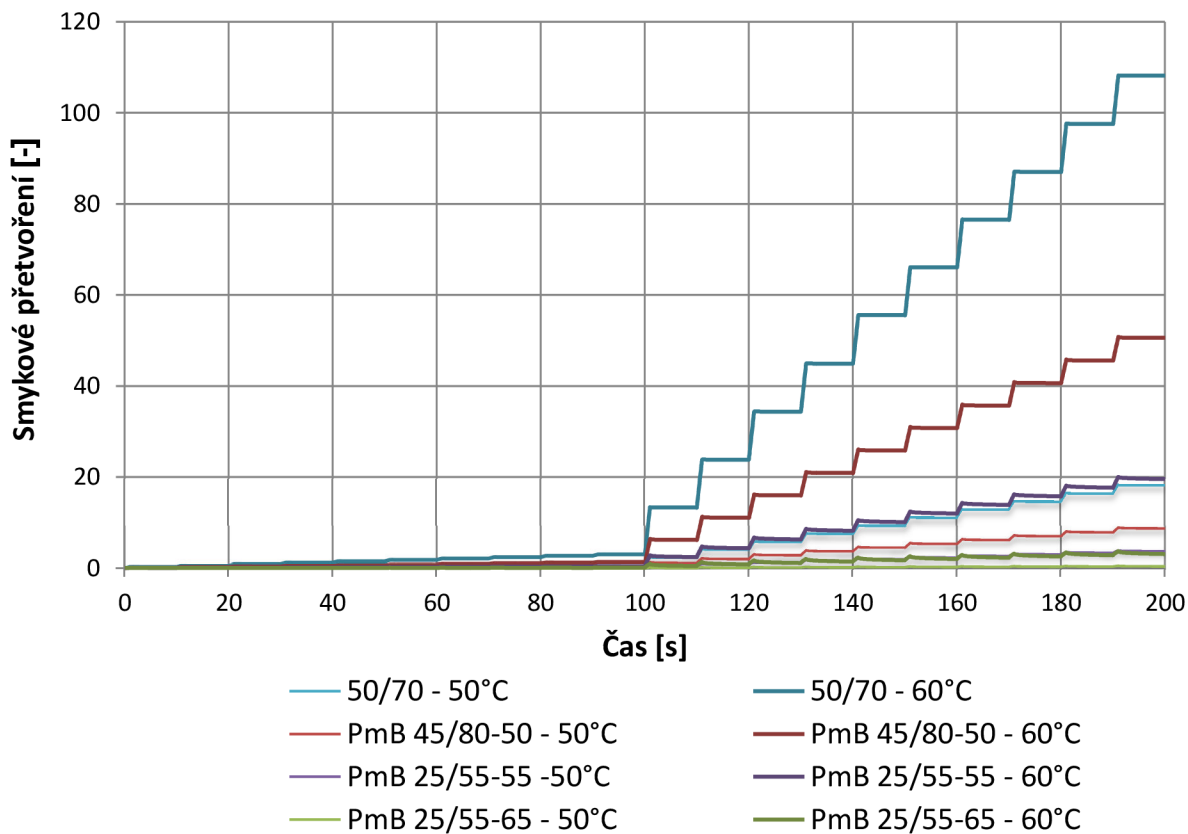
V této části jsou zobrazeny grafy popisující průběh zkoušky všech pojev zvlášť pro teplotu 50 °C a 60 °C a jeden graf společně pro obě teploty.



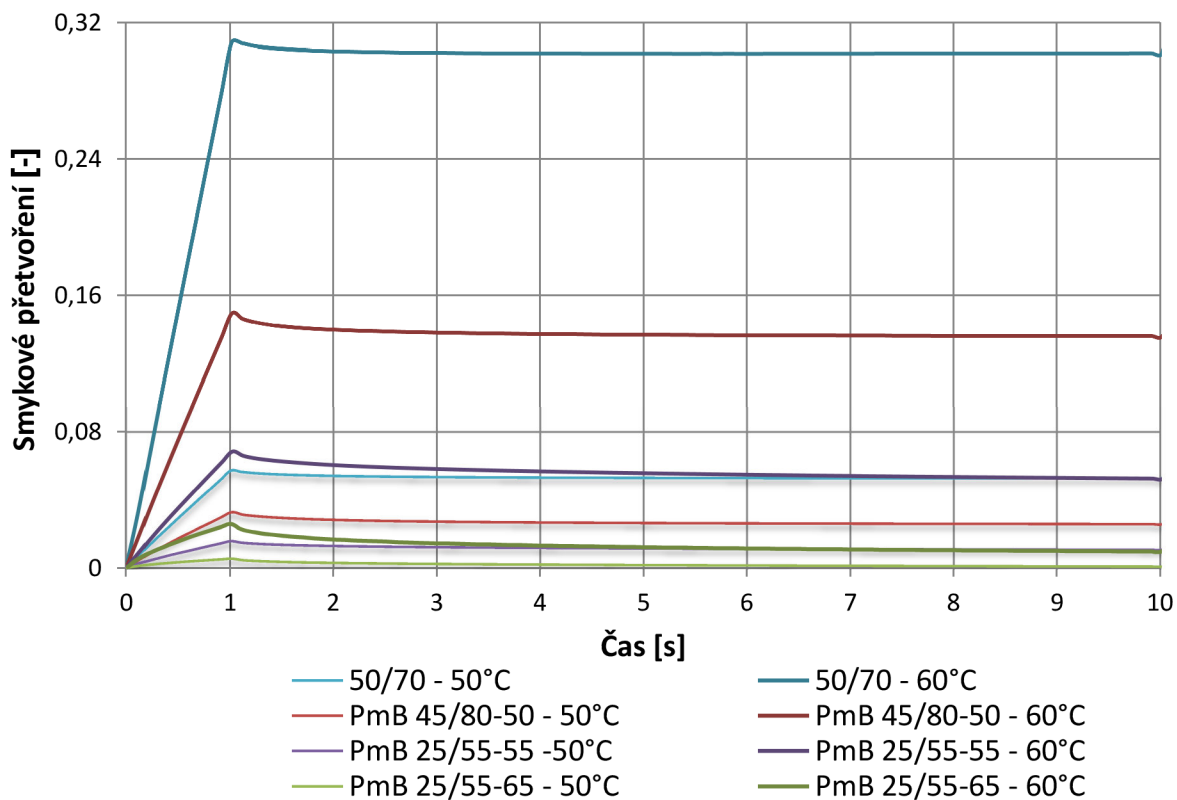
Graf 21: Průběh zkoušky MSCR při teplotě 50°C



Graf 22: Průběh zkoušky MSCR při teplotě 60°C



Graf 23: Průběh zkoušky MCSR při teplotě 50°C a 60°C



Graf 24: Výřez jednoho cyklu

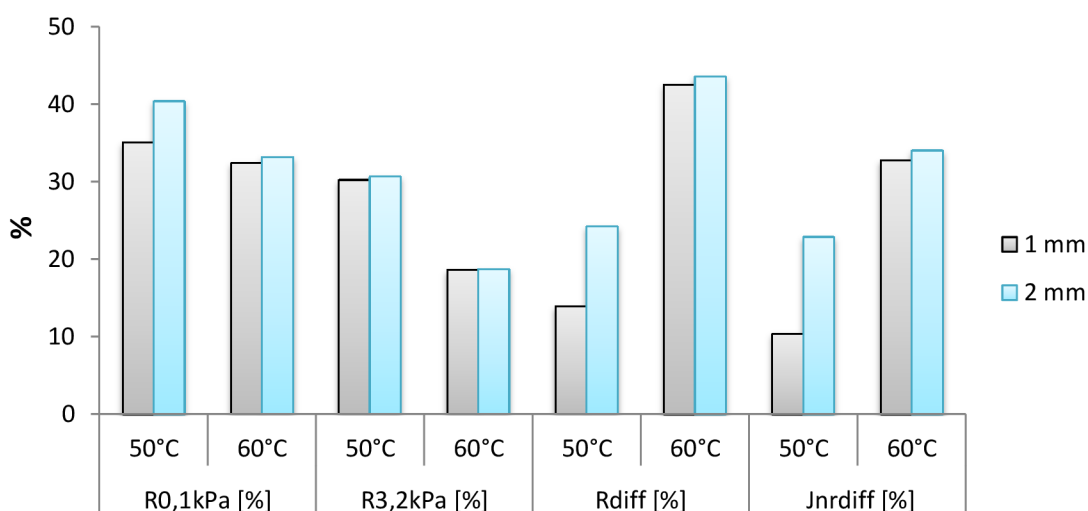
Z grafů je patrný odlišný průběh zkoušky modifikovaných pojiv a silničního asfaltu. Také je viditelná i rozdílná hodnota smykového přetvoření, která je jednoznačně u silničního asfaltu vyšší než u modifikovaných pojiv. Tento fakt je dán z toho důvodu, že pro požadované napětí 0,1 kPa nebo 3,2 kPa je nutnější vyvinout vyšší smykové přetvoření.

6.4.7 Vliv změny tloušťky vzorku

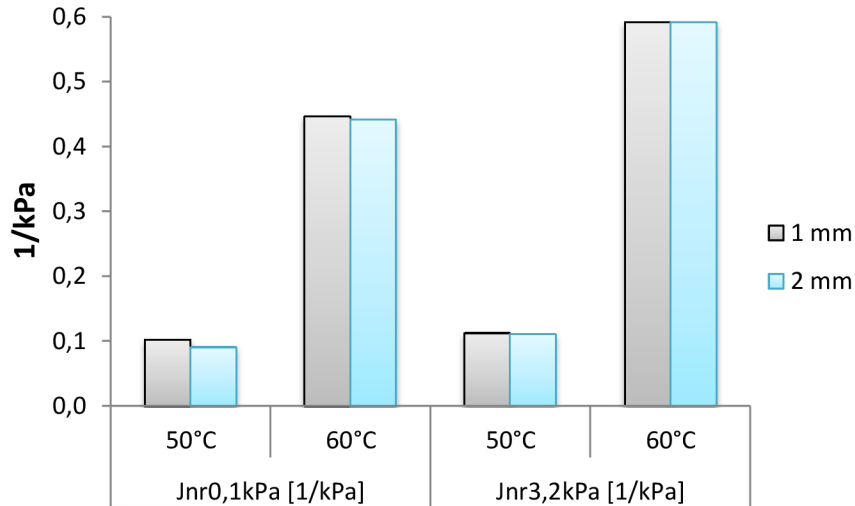
V této části bude zobrazen průběh zkoušky MSCR změřený pro asfaltové pojivo PmB 25/55-55 tloušťky 2 mm a srovnán s tloušťkou 1 mm.

Tabulka 7: Výsledné hodnoty asfaltového pojiva PmB 25/55-55

tloušťka vzorku [mm]		1	2
$R_{0,1kPa}$ [%]	50°C	35,1	40,4
	60°C	32,4	33,2
$R_{3,2kPa}$ [%]	50°C	30,2	30,6
	60°C	18,6	18,7
$J_{nr0,1kPa}$ [1/kPa]	50°C	0,10	0,09
	60°C	0,45	0,44
$J_{nr3,2kPa}$ [1/kPa]	50°C	0,11	0,11
	60°C	0,59	0,59
R_{diff} [%]	50°C	13,9	24,2
	60°C	42,5	43,6
$J_{nr diff}$ [%]	50°C	10,4	22,9
	60°C	32,8	34,0

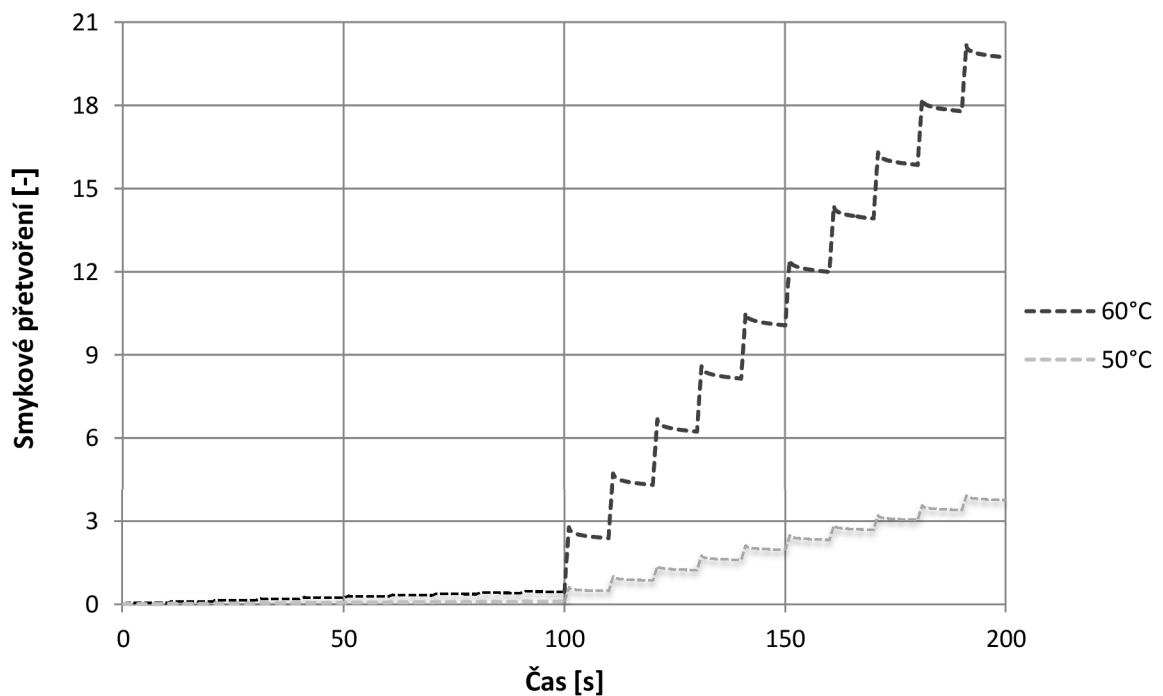


Graf 25: Výsledné hodnoty asfaltového pojiva PmB 25/55-55

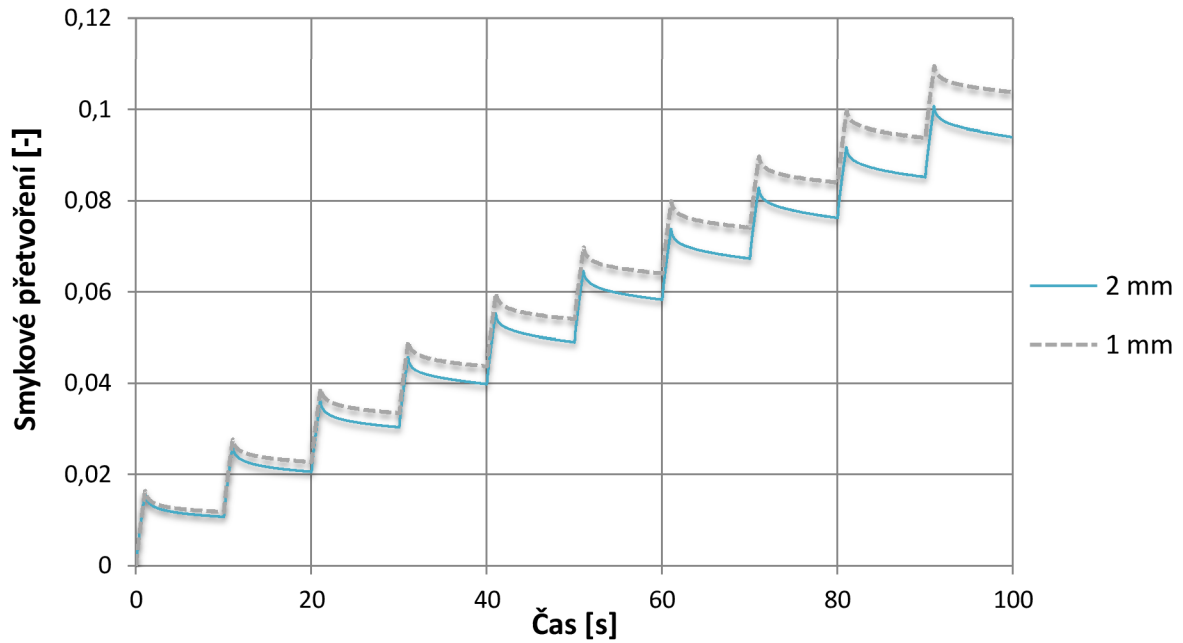


Graf 26: Výsledné hodnoty asfaltového pojiva PmB 25/55-55

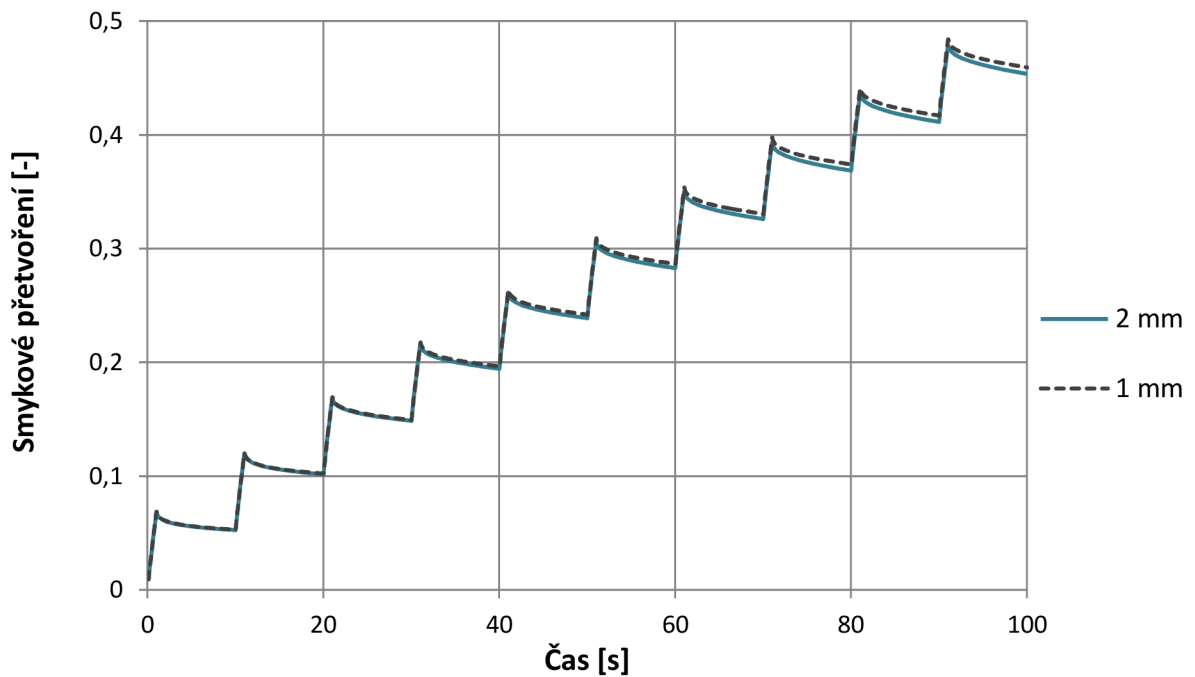
Z grafu 25 a 26 je vidět, že mezi výslednými hodnotami pro tloušťku vzorku 1 a 2 mm jsou velmi malé rozdíly. Z toho vyplývá, že tloušťka vzorku nemá velký vliv na výsledky. Následující graf zobrazuje průběh celé zkoušky pojiva PmB 25/55-55 změřené pro tloušťku 1 mm.



Graf 27: Průběh zkoušky MSCR - PmB 25/55-55 (1mm)



Graf 28: Výřez 0,1 kPa – PmB 25/55-55 (50°C)



Graf 29: Výřez 0,1kPa - PmB 25/55-55 (60°C)

V závěrečných dvou grafech je proveden výřez pro napětí 0,1 kPa pro teplotu 50 °C nebo 60 °C, kde je vidět rozdíl průběhu přetvoření vznikající v pojivu. Nepatrný rozdíl průběhu zkoušky prováděný při teplotě 50 °C je vidět v grafu 28. Kdežto v grafu 29 téměř splývá průběh zkoušek provedený při různé tloušťce pojiva.

7 Tabulka souhrnných výsledků

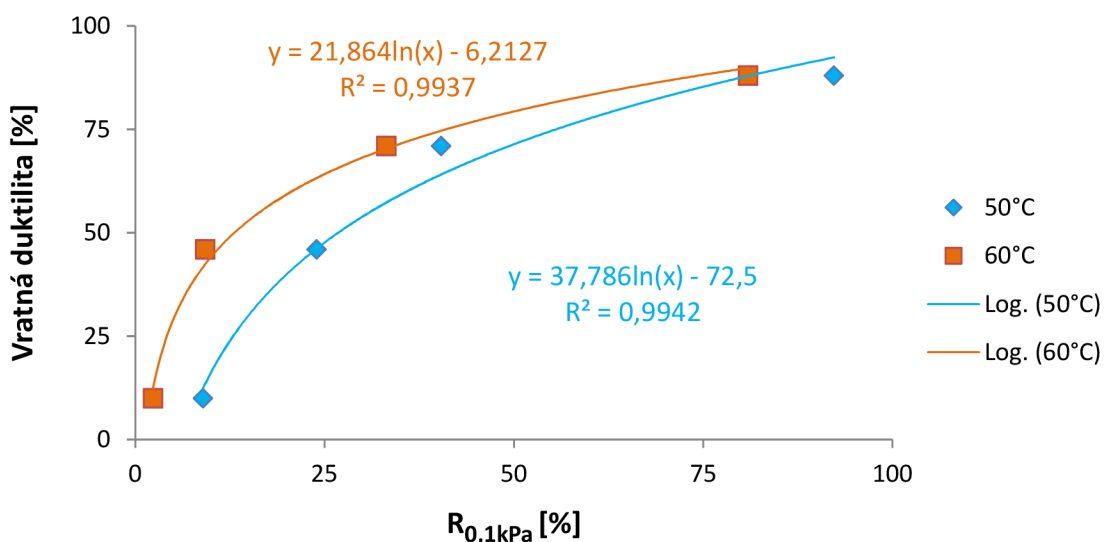
V tabulce 8 jsou souhrnně uvedeny výsledky provedených laboratorních zkoušek všech srovnávaných asfaltových pojiv.

Tabulka 8: Souhrnné výsledky

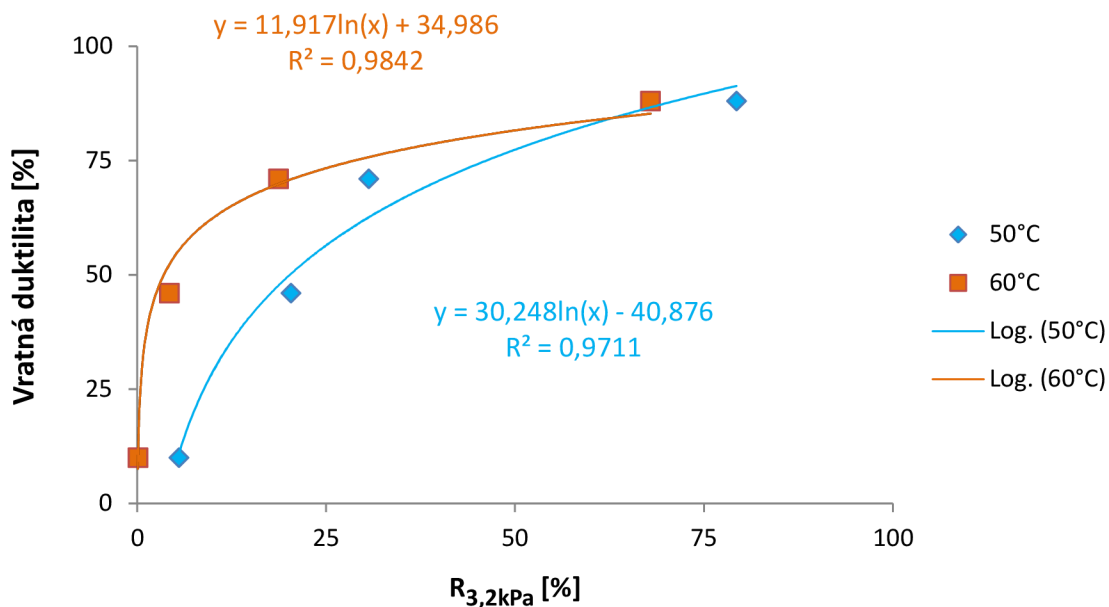
		PmB 25/55-65	PmB 25/55-55	PmB 45/80-50	50/70		
Penetrace jehlou [p.j]		29	31	46	54		
Bod měknutí [°C]		77,8	60,8	52,8	48,2		
Vratná duktilita [%]		88	71	46	10		
Zkouška MSCR	tloušťka vzorku [mm]	2,0	1,0	2,0	2,0	2,0	
	R_{0,1kPa} [%]	50°C	92,3	35,1	40,4	24,0	8,9
		60°C	81,0	32,4	33,2	9,3	2,3
	R_{3,2kPa} [%]	50°C	79,3	30,2	30,6	20,4	5,5
		60°C	67,9	18,6	18,7	4,3	-0,2
	Jnr_{0,1kPa} [1/kPa]	50°C	0,00	0,10	0,09	0,24	0,51
		60°C	0,05	0,45	0,44	1,33	2,97
	Jnr_{3,2kPa} [1/kPa]	50°C	0,01	0,11	0,11	0,26	0,55
		60°C	0,09	0,59	0,59	1,53	3,26
	R_{diff} [%]	50°C	14,1	13,9	24,2	15,0	38,2
		60°C	16,1	42,5	43,6	53,9	108,2
	Jnr_{diff} [%]	50°C	183,77	10,4	22,9	7,6	6,6
		60°C	91,0	32,8	34,0	15,1	9,7

8 Korelace mezi vratnou duktilitou a zkouškou MSCR

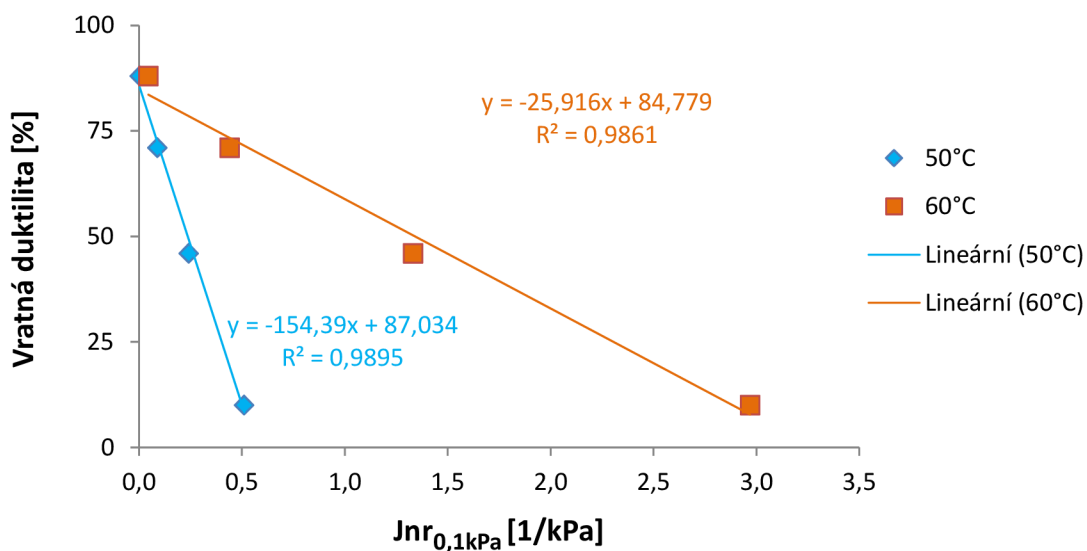
V této kapitole je zobrazena vzájemná závislost vratné duktility a výsledných hodnot získaných ze zkoušky MSCR. Závislost zkoušek je zobrazena v grafech včetně jednotlivých korelačních funkcí s rovnicí křivky regresní funkce y a korelačním součinitelem R^2 . Jestliže korelační součinitel nabývá hodnot blíží se 1, tak jde o silnou závislost. Naopak pokud se hodnota rovna nule, neexistuje mezi proměnnými žádná závislost.



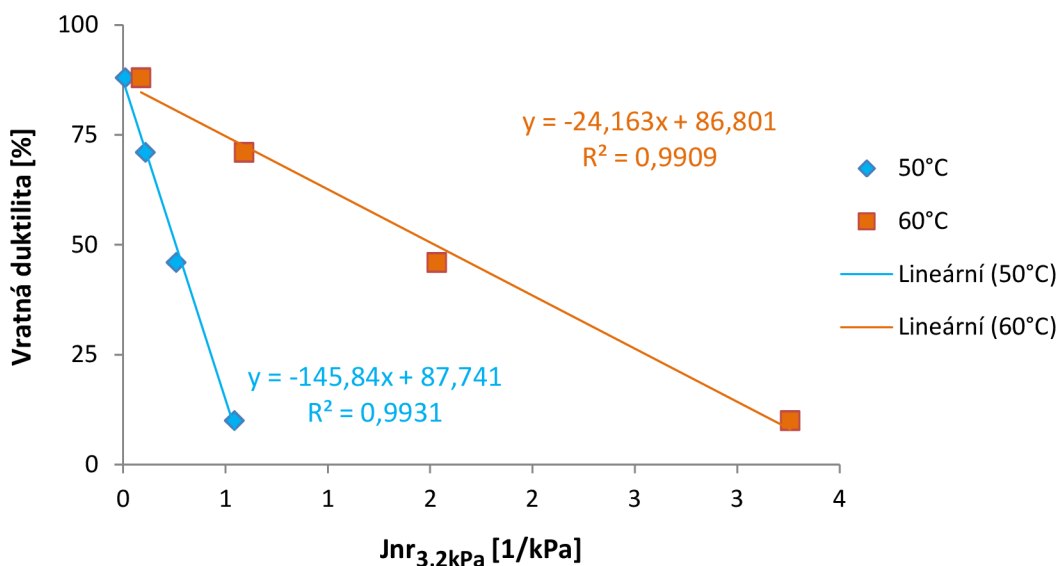
Graf 30: Korelace mezi vratnou duktilitou a $R_{0,1kPa}$



Graf 31: Korelace mezi vratnou duktilitou a $R_{3,2kPa}$



Graf 32: Korelace mezi vratnou duktilitou a $Jnr_{0,1kPa}$



Graf 33: Korelace mezi vratnou duktilitou a $Jnr_{3,2kPa}$

Každý graf má na svislé ose vynesené výsledky vratné duktility všech zkoušených poživ. Na vodorovné ose jsou pak hodnoty získané ze zkoušky MSCR změřené pro teplotu 50 °C a 60 °C. Jde o hodnoty: průměrné elastické zotavení při napětí 0,1 kPa nebo 3,2 kPa a nevratná smyková poddajnost opět při napětí 0,1 kPa nebo 3,2 kPa. Pro grafy 30 a 31 byla využita logaritmická křivka zobrazující závislost. V grafu 32 a 33 je lineární křivka. Ve všech grafech vyšel korelační součinitel vyšší pro teplotu 50 °C než pro teplotu 60 °C. V grafu 30 vyšla největší hodnota korelačního součinitel $R^2=0,9942$. Ve všech případech nabývají korelační součinitele hodnot blízké 1. To znamená, že se jedná o velmi silnou závislost.

9 Závěr

V této kapitole jsou shrnuty poznatky a vyhodnoceny výsledky všech provedených laboratorních zkoušek na zadaných asfaltových pojivech. Ráda bych upozornila na zkoušku MSCR, se kterou nejsou příliš velké zkušenosti. Jelikož tato zkouška byla zavedena relativně nedávno a pro Evropu je teprve zpracován draft normy, nejsou stanovené limitní vyhovující hodnoty.

První prováděnou empirickou zkouškou bylo stanovení penetrace jehlou. Zkouška vyhověla podle stanovených podmínek v normě pro všechna zkoušená asfaltová pojiva. Výsledné hodnoty penetrace jsou ovlivněny modifikací. U silničního asfaltu bylo dosaženo vyšší hodnoty penetrace než u modifikovaných asfaltových poživ.

Dále byla provedena zkouška bodu měknutí metodou kroužek kulička. Opět všechny výsledné hodnoty vyhověly normovým požadavkům. Výsledná hodnota bodu měknutí byla vyšší u modifikovaných poživ než u silničního asfaltu.

Poslední prováděnou empirickou zkouškou bylo stanovení vratné duktility. Zkouška vyjadřuje, jak velkou mají snahu se asfaltová pojiva vrátit do původního stavu. Bylo ověřeno, že silniční asfalty mají velmi malou tendenci navracení do původního stavu na rozdíl od modifikovaných asfaltů a s rostoucím stupněm modifikace je tato tendence silnější.

Na závěr byla prováděná již zmiňovaná zkouška MSCR, která by měla lépe vystihnout vlastnosti asfaltových poživ než předešlé empirické zkoušky. Zkouška se prováděla při teplotách 50 °C a 60 °C, kde výsledné hodnoty i průběh celé zkoušky byl zřetelně odlišný. Při vyšší teplotě dochází ke zvýšení smykového přetvoření. Logicky při vyšších teplotách vznikají i větší trvalé deformace. Zkouška se měřila na asfaltových pojivech tloušťky 2 mm a pro srovnání se provedlo i jedno měření při tloušťce 1 mm. Bylo zjištěno, že tloušťka vzorku má zanedbatelný vliv na průběh zkoušky i na výsledné hodnoty. Na závěr bakalářské práce byla vypracována závislost zkoušky vratné duktility a hodnot získaných ze zkoušky MSCR. Mezi těmito zkouškami byla zjištěna pomocí korelačního součinitele velmi silná závislost.

10 Seznam použité literatury

- [1] *Reologie*. 2008. Dostupné z:
http://www.icpf.cas.cz/cs/system/files/users/public/bendova_8/letak_reologie.pdf
- [2] *Reologie*. 2011, 17 s. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_03.pdf
- [3] *Viskoelastické modely*. 2010, 8 s. Dostupné z:
http://ufmi.ft.utb.cz/texty/fyzika_pol/FP_09.pdf
- [4] *Viskoelastická polymeru I - relaxace napětí*. 2013, 4 s. Dostupné z:
http://ufmi.ft.utb.cz/texty/fyzika_pol/FP2_lab_03.pdf
- [5] *Viskoelastická - Reologické modely*. 2005. Dostupné z:
<http://www.vscht.cz/pol/Fyzika%20polymeru/09%20KAPITOLA%207.pdf>
- [6] COUFALÍK, Pavel. *Návrh a posouzení směsí pro asfaltové vrstvy se zvýšenou odolností proti šíření trhlin (SAL)*. Brno, 2012. Diplomová práce. VUT Brno
- [7] ČSN EN 1426. *Asfalty a asfaltová pojiva: Stanovení penetrace jehlou*. Praha: Český normalizační institut, 2007
- [8] ČSN EN 1427. *Asfalty a asfaltová pojiva: Stanovení bodu měknutí*. Praha: Český normalizační institut, 2007
- [9] ČSN EN 13398. *Asfalty a asfaltová pojiva: Stanovení vratné duktility modifikovaných asfaltů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010
- [10] *Kinexus* [online]. [cit. 2014-05-10]. Dostupné z:
<http://www.apinstruments.pl/oferta/kinexus,18.html>
- [11] rSpace for Kinexus software, Malvern
- [12] prEN 16659. *Bituminen and Bituminous Binders: Multiple Stress Creep and Recovery Test (MSCRT)*. Brusel: CEN-CENELEC Management Centre, 2013
- [13] STOKLÁSEK, Svatopluk. *MSCR: Multiple Stress Creep - Recovery Test*. 2013
- [14] VARAUS, Michal. *Pozemní komunikace II: Asfaltová pojiva*. Brno, 2005, 17 s

11 Seznam obrázků

Obrázek 1: Reologické modely	12
Obrázek 2: Měřicí sestava pro stanovení penetrace jehlou [6].....	13
Obrázek 3: Vpich jehly do vzorku.....	14
Obrázek 4: Zkouška bodu měknutí.....	16
Obrázek 5: Propad kuliček	17
Obrázek 6: Průběh zkoušky vratné duktility	18
Obrázek 7: Přestřižení asfaltového vlákna	19
Obrázek 8: návratnost polovláken	20
Obrázek 9: Dynamický smykový reometr [10]	22
Obrázek 10: Seřezávání vzorku pojiva [11]	23
Obrázek 11: Čistění destiček [11]	23

12 Seznam grafů

Graf 1: Průběh prvních dvou cyklů	21
Graf 2: Průběh zkoušky MSCR.....	21
Graf 3: Průběh přetvoření	24
Graf 4: Penetrace jehlou	27
Graf 5: Bod měknutí	28
Graf 6: Vratná duktilita.....	29
Graf 7: Průběh zkoušky MSCR - PmB 25/55-65	30
Graf 8: Výřez 0,1 kPa - PmB 25/55-65	31
Graf 9: Průběh zkoušky MSCR - PmB 25/55-55	31
Graf 10: Výřez 0,1 kPa - PmB 25/55-55	32
Graf 11: Průběh zkoušky MSCR - PmB 45/80-50	32
Graf 12: Výřez 0,1 kPa - PmB 45/80-50	33
Graf 13: Průběh zkoušky MSCR - 50/70	33
Graf 14: Výřez 0,1 kPa - 50/70	34
Graf 15: Průměrné elastické zotavení $R_{0,1kPa}$	35
Graf 16: Průměrné elastické zotavení $R_{3,2kPa}$	36
Graf 17: Nevratná smyková poddajnost $J_{nr0,1kPa}$	36
Graf 18: Nevratná smyková poddajnost $J_{nr3,2kPa}$	36
Graf 19: Rozdíl v elastickém zotavení R_{diff}	37
Graf 20: Rozdíl v nevrtné smykové poddajnosti J_{nrdiff}	37
Graf 21: Průběh zkoušky MSCR při teplotě 50°C	38
Graf 22: Průběh zkoušky MSCR při teplotě 60°C	38
Graf 23: Průběh zkoušky MCSR při teplotě 50°C a 60°C	39
Graf 24: Výřez jednoho cyklu	39
Graf 25: Výsledné hodnoty asfaltového pojiva PmB 25/55-55.....	40
Graf 26: Výsledné hodnoty asfaltového pojiva PmB 25/55-55.....	41
Graf 27: Průběh zkoušky MSCR - PmB 25/55-55 (1mm)	41
Graf 28: Výřez 0,1 kPa – PmB 25/55-55 (50°C).....	42
Graf 29: Výřez 0,1 kPa – PmB 25/55-55 (60°C).....	42
Graf 30: Korelace mezi vratnou duktilitou a $R_{0,1kPa}$	44
Graf 31: Korelace mezi vratnou duktilitou a $R_{3,2kPa}$	44
Graf 32: Korelace mezi vratnou duktilitou a $J_{nr0,1kPa}$	45
Graf 33: Korelace mezi vratnou duktilitou a $J_{nr3,2kPa}$	45

13 Seznam tabulek

Tabulka 1: Maximální rozdíl platných stanovení	15
Tabulka 2: Označení vzorků.....	26
Tabulka 3: Výsledky penetrace jehlou	27
Tabulka 4: Výsledky bodu měknutí	28
Tabulka 5: Výsledky vratné duktility	29
Tabulka 6: Výsledné hodnoty MSCR všech pojiv	35
Tabulka 7: Výsledné hodnoty asfaltového pojiva PmB 25/55-55	40
Tabulka 8: Souhrnné výsledky	43