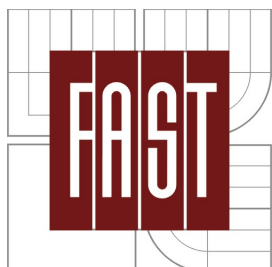


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ

ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

TVORBA TRVALÝCH DEFORMACÍ U ASFALTOVÝCH SMĚSÍ PERMANENT DEFORMATION ON ASPHALT MIXTURES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

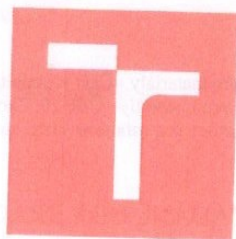
LUCIE BAMBULOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR HÝZL, Ph.D.

BRNO 2016



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

PRACOVISŤE

Ústav pozemních komunikací

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

STUDENT

Lucie Bambulová

NÁZEV

Tvorba trvalých deformací u asfaltových směsí

VEDOUCÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE Ing. Petr Hýzl, Ph.D.

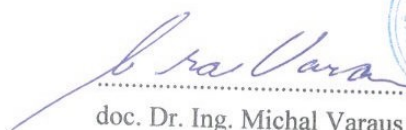
DATUM ZADÁNÍ

30. 11. 2015

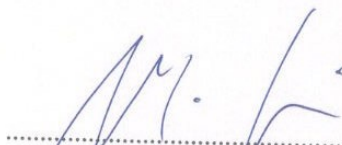
DATUM ODEVZDÁNÍ

27. 5. 2016

V Brně dne 30. 11. 2015



doc. Dr. Ing. Michal Varaus
Vedoucí ústavu



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

PODKLADY A LITERATURA

ČSN EN 13108-1 Asfaltové směsi - Specifikace pro materiály - Část 1: Asfaltový beton
ČSN EN 13108-20 Asfaltové směsi - Specifikace pro materiály - Část 20: Zkoušky typu
ČSN EN 12697-22 Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 22
Internetové zdroje
Diplomové práce k dané problematice

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ (ZADÁNÍ, CÍLE PRÁCE, POŽADOVANÉ VÝSTUPY)

Cílem bakalářské práce je posouzení odolnosti vybraných asfaltových pojiv proti tvorbě deformací pomocí konvenčních (stanovení penetrace a bodu měknutí metodou kroužek - kulička) a funkčních (MSCR test) zkušebních metod. Z hodnocených asfaltových pojiv budou vybrána pojiva pro výrobu směsi typu asfaltový beton, na které bude následně provedena zkouška poježdění kolem.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ/DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).



Ing. Petr Hýzl, Ph.D.

Vedoucí bakalářské práce

TVORBA TRVALÝCH DEFORMACÍ U ASFALTOVÝCH SMĚSÍ

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá popisem laboratorních vlastností zestárých asfaltových pojiv ve vztahu k trvalým deformacím. V teoretické části je popsán princip empirických zkoušek: penetrace jehlou a stanovení bodu měknutí. Dále je vysvětlen postup a podstata zkoušky MSCR. V praktické části jsou vyhodnoceny vlastnosti patnácti zkoušených asfaltových pojiv a na základě výsledků jsou vyhotoveny dvě desky, které jsou podrobeny zkoušce pojezd kolem.

KLÍČOVÁ SLOVA

Asfalt, stárnutí, RTFOT, penetrace jehlou, bod měknutí, MSCR, dynamický smykový reometr (DSR).

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with the laboratory properties of aged bituminous binders in relation to permanent deformation. The theoretical part deals with the empirical tests: needle penetration and softening point. There is also explained the procedure and the principle of the MSCR test. In the practical part are evaluated the properties of fifteen tested bituminous binders and based on the results are made two plates which are tested to permanent deformation.

KEYWORDS

Bitumen, ageing, RTFOT, needle penetration, softening point, MSCR, dynamic shear rheometer (DSR).

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

BAMBULOVÁ, Lucie. Tvorba trvalých deformací u asfaltových směsí . Brno, 2016. 73 s., 13 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Petr Hýzl Ph.D.

PROHLÁŠENÍ:

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

V Brně dne 27.05. 2016

.....

podpis autora

Lucie Bambulová

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala hlavně vedoucímu své bakalářské práce Ing. Petru Hýzlovi Ph.D. a Ing. Pavlu Coufalíkovi za jejich ochotu a odbornou pomoc, dále všem pracovníkům laboratoře ústavu pozemních komunikací VUT v Brně. V neposlední řadě bych ráda poděkovala všem, kteří mi studium umožnili, po celou dobu mě podporovali a byli mi nápomocní při zpracování této práce.

OBSAH

1 ÚVOD	10
1.1 CÍL PRÁCE	11
2 TEORETICKÁ ČÁST	12
2.1 ASFALTOVÁ POJIVA	12
2.1.1 TRVALÉ DEFORMACE - VYJETÉ KOLEJE	13
2.2 STÁRNUTÍ ASFALTOVÝCH POJIV	14
2.2.1 ZKUŠEBNÍ METODA RTFOT	16
2.3 POUŽITÉ ZKUŠEBNÍ METODY	18
2.3.1 STANOVENÍ PENETRACE JEHLOU	18
2.3.2 STANOVENÍ BODU MĚKNUTÍ METODOU KROUŽEK A KULIČKA	20
2.3.3 ÚBYTEK ASFALTOVÉHO POJIVA	22
2.3.4 MSCR	23
2.3.5 LABORATORNÍ VÝROBA SMĚSI	29
2.3.6 OBJEMOVÁ HMOTNOST A MEZEROVITOST	34
2.3.7 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES ZHUTŇOVAČEM DESEK	37
2.3.8 ZKOUŠKA POJÍŽDĚNÍ KOLEM	40
3 PRAKTICKÁ ČÁST	42
3.1 POUŽITÉ MATERIÁLY	42
3.1.1 DRUHY ASFALTOVÝCH POJIV	42
3.1.2 DRUHY KAMENIVA (LULEČ, FILLER)	42
3.2 VÝSLEDKY NA ASFALTOVÝCH POJIVECH	43
3.2.1 STANOVENÍ PENETRACE JEHLOU	43
3.2.2 STANOVENÍ BODU MĚKNUTÍ	44
3.2.3 ÚBYTEK ASFALTOVÉHO POJIVA PO RTFOT	46
3.2.4 MSCR PO RTFOT	48
3.2.4.1 Výsledné hodnoty MSCR všech pojiv.....	51
3.3 VÝSLEDKY ASFALTOVÝCH SMĚSÍ	57
3.3.1 MAXIMÁLNÍ OBJEMOVÁ HMOTNOST	57
3.3.2 OBJEMOVÁ HMOTNOST	57
3.3.3 MEZEROVITOST	58

3.3.4 TRVALÉ DEFORMACE	58
3.4 KORELACE MSCR A ZKOUŠKY BODU MĚKNUTÍ	61
3.5 KORELACE MSCR S TRVALÝMI DEFORMACEMI	64
4 ZÁVĚR	65
5 SEZNAMY	67
5.1 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A ZDROJŮ	67
5.2 SEZNAM TABULEK	70
5.3 SEZNAM OBRÁZKŮ	70
5.4 SEZNAM GRAFŮ	71
5.5 SEZNAM PŘÍLOH	73

1 ÚVOD

Pozemní komunikace jsou nedílnou součástí běžného života lidské populace. Člověk se s nimi skoro každý den setkává a očekává plynulou a ničím nerušenou jízdu. Proto je důležité vozovky udržovat v adekvátním stavu a předcházet tak tvorbě poruch.

Mezi nejčastější poruchy patří trvalé deformace. Jejich vznik ovlivňuje celá řada faktorů mimo jiné: špatně provedená skladba vozovky, nesprávný návrh asfaltové směsi, nevhodný výběr asfaltového pojiva a vliv klimatických podmínek. Zásadní vliv na tvorbu trvalých deformací má také vysoká teplota, která se zohledňuje při zkoušení asfaltových poživ a směsí v laboratoři.

Asfaltová pojiva se posuzují dle empirických zkoušek jako je stanovení penetrace jehlou a stanovení bodů měknutí metodou kroužek kulička. Vzhledem ke zvýšení těžké nákladní dopravy, a tím pádem zvýšení nároku na asfaltová pojiva se tyto metody jeví jako zastaralé, proto se v současné době pracuje na vývoji nových dokonalejších metod. Jednou z nich je metoda The Multiple Creep Recovery (ve zkratce MSCR). Tato nová metoda byla převzata do evropských norem v roce 2015. Zkouška by měla důvěrněji popsat náchylnost asfaltových poživ na vznik trvalých deformací než empirické zkoušky. Dále je to proces stárnutí poživ, který dokáže simulovat stárnutí asfaltové směsi. Teoretickým pojetím těchto metod se zabývá první kapitola této práce.

V praktické části se tato práce zabývá hodnocením patnácti silničních asfaltů od různých dodavatelů. Hodnocené silniční asfalty byly nejprve vystaveny procesu stárnutí metodou Rolling Thin Film Oven Test (ve zkratce RTFOT). Tato metoda nejlépe vystihuje reálné vlastnosti asfaltové směsi po uložení pokládky.

Dále jsou jednotlivá pojiva vystavena progresivní zkoušce MSCR. V USA se zkouška provádí postupně po předepsaných teplotách a to po 6 °C (např.: 46°C, 52°C a 58°C). Předepsané teploty jsou dány oblastí, v které se používají. Tyto oblasti byly řazeny do systému PG. V ČR ještě žádné požadavky nejsou zavedeny kvůli tomu, že zkouška byla přijata poměrně nedávno. Doporučená teplota v ČR se

jeví 50 °C, protože za této teploty se provádí zkouška pojezd kolem. Tato hodnota dle odborníků ovšem není s celá adekvátní k letním teplotám vozovek v ČR, které mnohdy tuto teplotu přesahují.

Po vyhodnocení všech zkoušek, byla vybrána dvě asfaltová pojiva na výrobu dvou desek. Tyto desky byly vystaveny zkoušce pojezd kolem. Při výběru pojiv by se jako ideální jevílo, vybrat nejlepší a nejhorší vzorek vyhodnoceným při zkoušce MSCR. Avšak s ohledem na omezení množství pojiv v laboratoři nebylo toto možné. A proto byly vybrány vzorky nejbližší nejlepšímu a nejhoršímu.

Závěrem bakalářské práce jsou výsledky zkoušky MSCR porovnány se zkouškou bodu měknutí pomocí metody kroužek kulička a zkouškou pojezd kolem.

1.1 CÍL PRÁCE

Cílem bakalářské práce je určení laboratorních vlastností vybraných silničních asfaltů zestárých metodou Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT). Tyto asfalty byly vystaveny empirickým zkouškám stanovení penetrace jehlou a stanovení bodu měknutí metodou kroužek kulička, dále progresivní zkoušce The Multiple Creep Recovery (MSCR), která byla prováděna v dynamickém smykovém reometru (DSR).

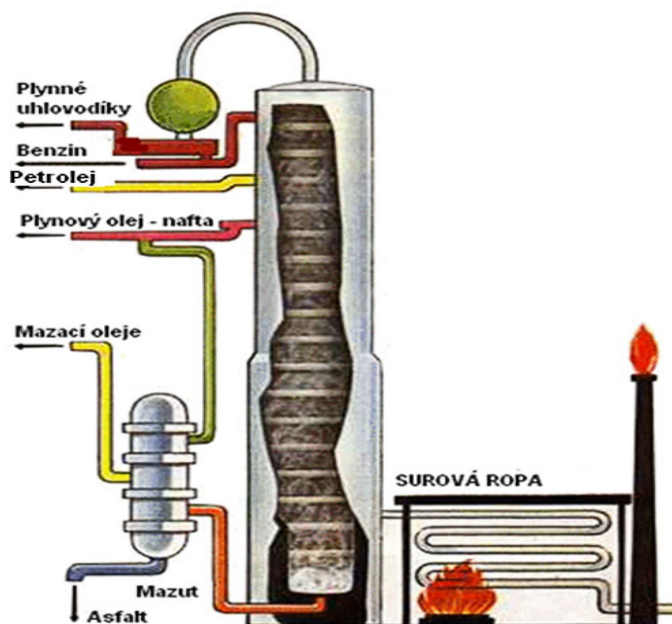
Z hodnocených asfaltových pojiv byla vybrána pojiva a z nich byly vyrobeny asfaltové směsi typu asfaltový beton a zhotoveny dvě desky, na kterých byla provedena zkouška pojezd kolem.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 ASFALTOVÁ POJIVA

Asfaltové pojivo může být přírodní (hornina) nebo ropné (umělé). Nejznámější asfaltová hornina v Evropě se těží v Albánii v lokalitě Selenica. Ropný asfalt je získáván při destilaci surové ropy v rafinérii. První zmínka o použití asfaltového pojiva na vozovku pochází z r. 1859 v Pensylvánii. [26]

Zpracování ropy začíná v atmosférické destilační koloně, kde jsou oddělovány lehké podíly, jako jsou benzíny, plynné uhlovodíky, petroleje, plynové oleje. Po odloučení těchto látek vznikne destilační zbytek mazut, který se dostává do vakuové destilační kolony, kde se oddělují olejové frakce. Poslední složkou destilačního zbytku z mazutu je asfalt. [25]



Obr. 1 Schéma destilace ropy

TEPLOTNÍ CITLIVOST ASFALTU

Jelikož asfaltové pojiva jsou viskoelastické a termoplastické látky, působí na ně tři důležité faktory, to je velikost zatížení, rychlost a teplota. Za podmínek nízkých teplot a vysokých frekvencí zatížení (například rychle pojíždějící nákladní

automobily) se tyto pojiva chovají jako pružný a pevný polymerní materiál, což znamená, že pokud asfaltové pojivo nepřekročí mez únosnosti, vrátí se zpět do původního stavu. Ale za opačných podmínek překročení meze vzniká porušení smršťovacími trhlinami. [28]

Další rozdílnou vlastnost můžeme sledovat při vysoké teplotě a trvalém zatížení (například stojící vozidlo), kdy se asfaltová směs jeví jako newtonovská viskózní kapalina. Ve vrstvách toto skupenství způsobuje triaxiální napětí, které může zapříčinit posunutí asfaltové směsi (viz obr. 2). [28]

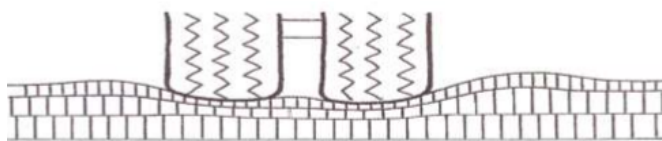


Obr. 2 Vymezení oboru použitelnosti asfaltu na teplotní ose¹

2.1.1 TRVALÉ DEFORMACE - VYJETÉ KOLEJE

Vyjeté koleje jsou deformace příčného řezu vozovky ve stopě kol vozidel, kdy se asfaltová směs krytu vozovky vytlačí mimo jízdní stopu pneumatik. Vznikají při nedostatečné odolnosti vrstev krytu proti trvalým deformacím. Tyto deformace mohou být způsobeny například vysokým obsahem asfaltu, druhem asfaltu o vyšší penetraci, vysokým dopravním zatížením, nevhodnou křivkou zrnitosti, použitím těžších kameniv. Vyskytují se tak koleje o šířce 60 i více, vznikající v místech pomalé a zastavující dopravy (zastávky, místo stoupání, atd.). A mohou se vyskytovat v souvislých délkách anebo lokálně v místě stání těžkých vozidel. Pokud trvalé deformace dosáhnou nerovnosti vyšší než 10 mm v prvních třech letech, bude tomu odpovídat hloubka vyjeté koleje přes 20 mm. Možnost vzniku aquaplaningu. [21]

¹ Obor použitelnosti je dán, pro jakou aplikaci v daných klimatických podmínkách je daný asfalt použitelný.



Obr. 3 Ukázka vyjeté koleje

Vyjeté koleje jsou ohrožující pro bezpečnost silničního provozu a je nutno minimalizovat vznik trvalých deformací. [21]

2.2 STÁRNUTÍ ASFALTOVÝCH POJIV

Všechny látky, které obsahují uspořádanou strukturu organických sloučenin a živé organismy podléhají procesu stárnutí. Ani asfalt, který má koloidní systém, však není výjimkou a podléhá během manipulace a skladování taktéž stárnutí. Důvod tohoto procesu bývá způsoben vlivem působení kyslíku, ultrafialového záření a zvýšené teploty. [2]

Na stárnutí asfaltových pojiv má vliv více druhů dějů. Avšak tyto metody mají mezi sebou malou spojitost, liší se hlavně ve zdroji způsobující stárnutí a následné projevující se vlastnosti na asfaltové směsi. Hlavními druhy jsou stárnutí odpařováním, stárnutí oxidací a strukturní. [27]

STÁRNUTÍ VLIVEM ODPAŘOVÁNÍ

Součástí asfaltových pojiv jsou olejové látky, které se za vysokých teplot odpařují. Tento děj už nelze vrátit. Proces odpařování je závislý na teplotě a povrchu. S vyšší teplotou dochází ke snížení viskozity asfaltu a naopak s větší plochou vzniká větší odpařování těkavých látek (olejů). Asfalty, které mají vyšší podíl asfalténu s obsahem malténů a s nižší penetrací mají větší hmotnostní ztrátu než asfalty s nižším obsahem asfalténů. [4]

OXIDAČNÍ STÁRNUTÍ

Tento děj má mnohem větší význam než stárnutí pojiva vlivem odpařování, proto se mu přikládá mnohem větší význam. Nastává k němu při kontaktu vzduchu s asfaltem. Tento děj probíhá za určené rychlosti v závislosti na teplotě. S každým zvýšením teploty o 10 °C dochází ke zdvojnásobení rychlosti reakce. Za působení vzduchu a tepla vznikají chemické reakce, jejichž výsledkem je vyšší viskozita, křehkost a tvrdost asfaltového pojiva. Další vliv má sluneční záření. Vlivem UV záření dochází k akceleraci absorpce kyslíku a následnému zrychlení procesu stárnutí asfaltu. [4]

STRUKTURNÍ STÁRNUTÍ

Posledním možným dějem stárnutí je strukturní, při kterém dochází ke změně koloidních částic na dispergované koloidní částice. Částice se shlukují do větších částic a vytvářejí tak menší měrný povrch. Následně dochází k uvolnění olejnatých složek, které se vsakují do kameniva. Asfalt se při tuhnutí stává pevnějším a křehčím. Dochází tak ke vzniku trhlin.

Stárnutí se rozděluje do dvou kategorií. Za první, termálně-oxidační stárnutí, které probíhá při skladování a zpracování asfaltového pojiva, ke kterému dochází vlivem vysokých teplot. Za druhé, strukturně-oxidační stárnutí, které probíhá za nízkých teplot a působení UV záření na povrchu hotové vozovky. Výsledkem působení stárnutí je zvýšení bodu měknutí a snížení penetrace. [4]

2.2.1 ZKUŠEBNÍ METODA RTFOT

Zkouška RTFOT, celým názvem Rolling Thin Film Oven Test, ve volném překladu znamená tepelnou stálost v tenké pohybující se vrstvě. Můžeme ji najít v normě ČSN EN 12607-1 a podstatou této metody je věrohodně simulovat stárnutí pojiva, kterou můžeme přirovnat jevu probíhající na obalovně při obalování kameniva, přepravě a pokládce asfaltové směsi. V laboratoři tato metoda probíhá v sušárně (viz obr. 4). [28]



Obr. 4 Laboratorní sušárna²

PŘÍPRAVA VZORKU

Zkušební vzorek asfaltového pojiva se zahřeje na cca 90 °C a nalije do skleněných nádob. Po nalití se skleněné nádoby vloží do sušárny v horizontálním směru.



Obr. 5 Sklenice naplněny pojivem

PRŮBĚH RTFOT

Po umístění skleněných nádob s pojivem se zapne proces stárnutí. Prstenec se začne otáčet podle hodinových ručiček a spustí se tryska, která je umístěna na spodní části sušárny (viz obr. 6). Takto upevněná tryska fouká ohřátý vzduch do každé skleničky při teplotě 163 °C.



Obr. 6 Pohled do otevřené sušárny

² Sušárna s dvojitou stěnou a elektrickým ohřevem, kde se malá pohybující asfaltová vrstva (přibližně do 50 mikrometrů) zahřívá a je vystavěna proudícímu vzdušnému kyslíku.

Za účinku tepla a vzduchu dochází k úbytku hmotnosti a také změna vlastností asfaltového pojiva. Vlastnosti jsou měřeny před a po metodě stárnutí. Pro měření změn vlastností se používají empirické zkoušky penetrace jehlou, bod měknutí, dynamická viskozita a MSCR. [25]



Obr. 7 Skleněné nádoby po metodě RTFOT

Tab. 1 Metoda urychleného stárnutí RTFOT [1]

Metoda urychleného stárnutí	Název metody	Označení normy	Pracovní teplota	Velikost vzorku	Čas expozice	Podmínky expozice	Rozměr geometrie	Nucená cirkulace	Přívod vzduchu/ kyslíku
	-	-	[°C]	[g]	[min]		[mm]	-	[ml/min]
RTFOT	Rotation Thin Film Oven Test	EN 12607 - 1	163	35,0±0,5	75 ± 1	rotující film	140 x ϕ 64	Ano prerušovaná	Atm. vzduch 4,5

2.3 POUŽITÉ ZKUŠEBNÍ METODY

Obsahem této kapitoly bude postup a podstata laboratorních zkoušek, které byli zkoušeny za příslušných norem a předpisů. Větší pozornost bude věnována metodě MSCR, která by měla věrohodněji napodobit reálné podmínky působící na pojivo.

2.3.1 STANOVENÍ PENETRACE JEHLLOU

Zkouška je dána normou ČSN EN 1426 - Stanovení penetrace jehlou. Stanovení penetrace je základní konvenční zkouška. Základem metody je měření hloubky proniknutí jehly, za předepsaných podmínek (aplikované zatížení, čas zatěžování a teplota). Hloubka proniknutí do vzorku je vyčíslena v penetračních jednotkách, který je roven desetině milimetru. Jehla vniká do vzorku při zatížení 100 g po dobu 5 s a je ponořena ve vodní lázni o předepsané teplotě 25 °C. [28]

Při měření penetrace slouží přístroj zvaný Penetrometr. Součástí přístroje je penetrační jehla, která je vyrobena z plně tvrzené, popuštěné a leštěné oceli. Jehla s průměrem 1 mm se může pohybovat jen ve svislém směru. Při širším popisu je konec zakončen skosením do kužele s $\varnothing$ 0,14 mm až $\varnothing$ 0,16 mm. Tato jehla proniká do nádoby se vzorkem asfaltového pojiva. Nádoba má tvar válce s kovového či skleněného materiálu s plochým dnem a vnitřním $\varnothing$ 55 mm až $\varnothing$ 70 mm. Další součástí je vodní lázeň, která je schopna udržet teplotu vzorku $\pm 0,15$ °C, což se rovná objemu minimálně 10 l. Teplotu monitoruje zabudovaný teploměr v přístroji.



Obr. 8 Penetrometr

PŘÍPRAVA VZORKU

Vzorek jako u RTFOT se nechá nahřát v peci, na teplotu okolo 90 °C, aby se mohl přelít to zkušební nádoby. Pak se následně temperuje na teplotu 25°C.

PRŮBĚH STANOVENÍ PENETRACE JEHLLOU

Po ustálení teploty nádoby se vzorek zcela potopí do vodní lázně. Do penetrometru jehož přesnost je na 0,1 mm, se upevní jehla a nastaví se nulová hodnota. K přesnému nastavení hrotu jehly poslouží baterka, která zobrazí stín jehly na povrchu vzorku (viz obr. 9). Až se opticky jehla a stín dotkne, spustí se na přístroji požadovaný čas 5 s. Hodnota vpichu se zobrazí na stupnici (viz obr. 9). Jehla se vyjme, a očistí se hrot. Tento proces se opakuje minimálně třikrát. Důležité je, aby vzdálenost vpichů byl od strany nádoby minimálně 10 mm.



Obr. 9 Vpich jehly do vzorku (vlevo), stupnice penetrometru (vpravo)

Výsledkem je aritmetický průměr ze všech tří měření zaokrouhlený na celé číslo. Norma ČSN EN 1426 - Stanovení penetrace jehlou, udává maximální rozdíl platných hodnot. Ty se nesmí lišit o více, než je zaznamenáno v Tab. 2. Vzhledem k jiným možným předpokladům, jako je stárnutí metodou RTFOT je brána tato tabulka jen jako vodítko. [8]

Tab. 2 Maximální rozdíl platných stanovení

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

2.3.2 STANOVENÍ BODU MĚKNUTÍ METODOU KROUŽEK A KULIČKA

Zkouška bodu měknutí se provádí dle normy ČSN EN 1427 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek kulička. [9]

Bod měknutí je teplota, při které asfaltové pojivo měkne natolik, že ocelová kulička položená na vrstvě pojiva 6,4 mm se tlakem protáhne na stanovenou délku (25 mm). [31]

Zkouška se provádí ve zkušebním zařízení s teploměrem. Součástí je skleněná kádinka (lázeň) min. $\varnothing$ 85 mm a výšky 120 mm, která musí odolávat vysokým teplotám. V lázni na dně je umístěn magnet, který slouží jako míchadlo při rovnoměrném zahřívání kádinky (100 ot/min). Do této lázně se umísťuje nerezový stojan, do kterého se uchyťí dva mosazné kroužky ($\varnothing$ 15,9 mm $\pm$ 0,1) a dvě kuličky z korozivzdorné oceli ($\varnothing$ 9,5 mm $\pm$ 0,05 a hmotnosti 3,5 g $\pm$ 0,05). Při centrování kuliček na střed asfaltového vzorku pomáhají středící prstence. Důležitou a poslední součástí přístroje je držák kroužků, který stabilizuje kroužky ve vodorovné rovině.

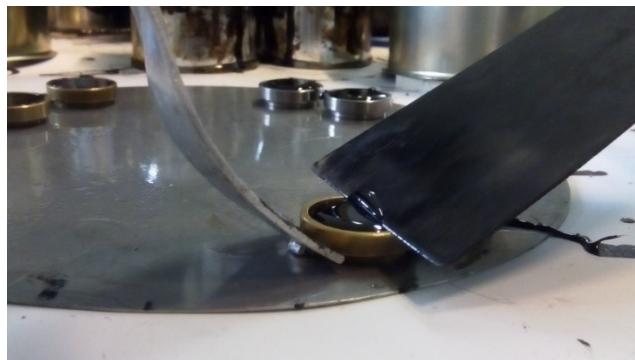


Obr. 10 Pomůcky při měření bodu měknutí

PŘÍPRAVA VZORKU

Tak jako u penetrace a stárnutí RTFOT se asfaltové pojivo musí nejprve rozežhát na teplotu okolo 90 °C, potom se nalije do zkušebních kroužků. Kroužky jsou před nalitím pojiva umístěny na odlévající destičku, která je natřena separační vrstvou. Vzorky se nechají temperovat na laboratorní teplotu. Po vychladnutí se

seřízne horní část vzorku nahřátou špachtlí, tak, aby lícovala s hranou (viz Obr.11). Připravený vzorek se umístí do zkušebního stojanu. Stojan je vložen do kádinky s destilovanou vodou do výšky 50 mm (± 3 mm). Kádinka se temperuje na zkušební teplotu 5 °C (± 1 °C). Po temperaci, které probíhá 15 minut, se vyjme stojan a vloží se do středu kroužku kulička, která je centrována pomocí středícího prstence. Do kádinky před uchycením do zkušebního zařízení se vloží magnet. Sestava je kompletní až po vložení stojanu zpět do kádinky.



Obr. 11 Seříznutí vzorku

PRŮBĚH STANOVENÍ BODU MĚKNUTÍ

Kádinka se umístí na topnou desku a spustí se zkušební zařízení (viz Obr. 12). Teplota ohřívání destilované vody stoupá rychlostí 5 °C/min. Vlivem vzrůstu teploty asfaltové pojivo měkne a kulička položená na středu se propadá a vzniká deformace (viz Obr. 13 a 14). Zkouška probíhá do chvíle, než kulička obalená asfaltovým pojivem nepropadne. Propad každé kuličky zaznamená světelný paprsek. Přístroj automaticky zapíše hodnoty deformace a teplotu propadů obou vzorku. Hodnoty se nesmí lišit o více než 1 °C pro bod měknutí do 80 °C. Pokud je výsledná hodnota pro bod měknutí vyšší než 80°C ve vodní lázni, zkouška se zamítne a znovu se provede v glycerinu.



Obr. 12 Zkušební zařízení



Obr. 13 Propad vzorku



Obr. 14 Propad vzorku

Výsledná hodnota se vyjádří jako průměr zaznamenaných teplot při bodu měknutí nižší nebo rovný $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ a zaokrouhlí se na $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pokud je výsledek nad $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ tak zaokrouhlení bude na $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. [9]

2.3.3 ÚBYTEK ASFALTOVÉHO POJIVA

Úbytek můžeme brát jako ztrátu asfaltového pojiva při stárnutí RTFOT.

PŘÍPRAVA VZORKU

Nezestárle asfaltové pojivo se rozežřeje na cca $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ a nalijeme do 8 válcových nádob.

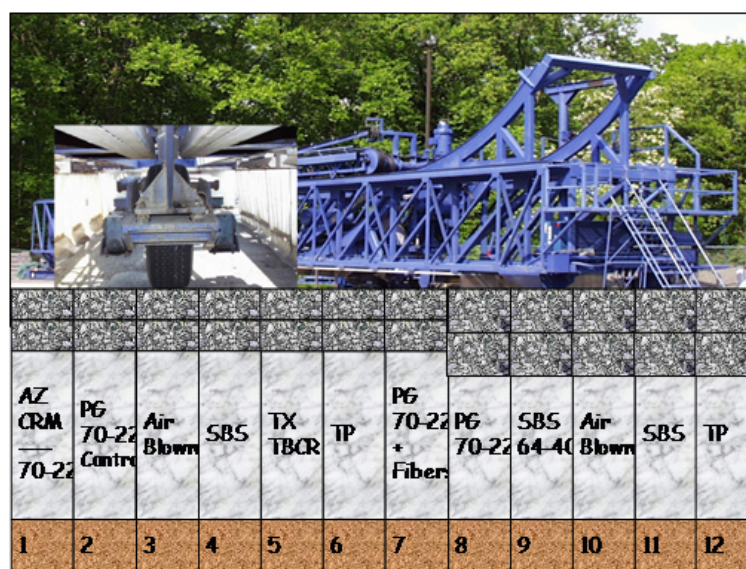
PRŮBĚH ZKOUŠKY

Tento proces probíhá v sušárně při stárnutí RTFOT. Kdy se nejprve zváží všech 8 skleniček bez pojiva a zapíše se jejich hmotnost s přesností na 0,001 g. Potom se do nich nalije rozehráté asfaltové pojivo a znovu se zváží a zapíše. Takto zvážené skleničky se vloží do sušárny a pustí se proces RTFOT. Po ukončení zkoušky se znovu skleničky zváží. Pomocí získaných hmotností se zjistí úbytek asfaltového pojiva tak, že se určí rozdíl hmotností zvážené před metodou RTFOT a po metodě RTFOT.

2.3.4 MSCR

Tato novodobá zkouška Multiple Strees Creep Recovery (ve zkratce MSCR), byla vyvinuta v USA (viz metoda AASHTO T 350-14) a nahrazuje tak starší zkoušku trvalé deformace pomocí komplexního smykového modulu $G^*/\sin \delta$ a fázového úhlu δ . [2] [23]

V roce 2002 ve Virginii byl proveden test, za kterého byla vystavena vozovka z dvanácti různými druhy asfaltů. Každý pruh vozovky byl vystaven zkoušce pojezdem kolem za stejných podmínek (rychlost, čas a zatížení). Následně byly měřeny hloubky vyjetých kolejí u každého druhu asfaltové směsi. [24]



Obr. 15 Vozovka rozdělená na 12 úseků [33]

Při reálném měření byla zjištěna vyšší hodnota korelace R^2 pro parametr MSCR než pro parametr $G^*/\sin \delta$. Proto se zavedl MSCR test.

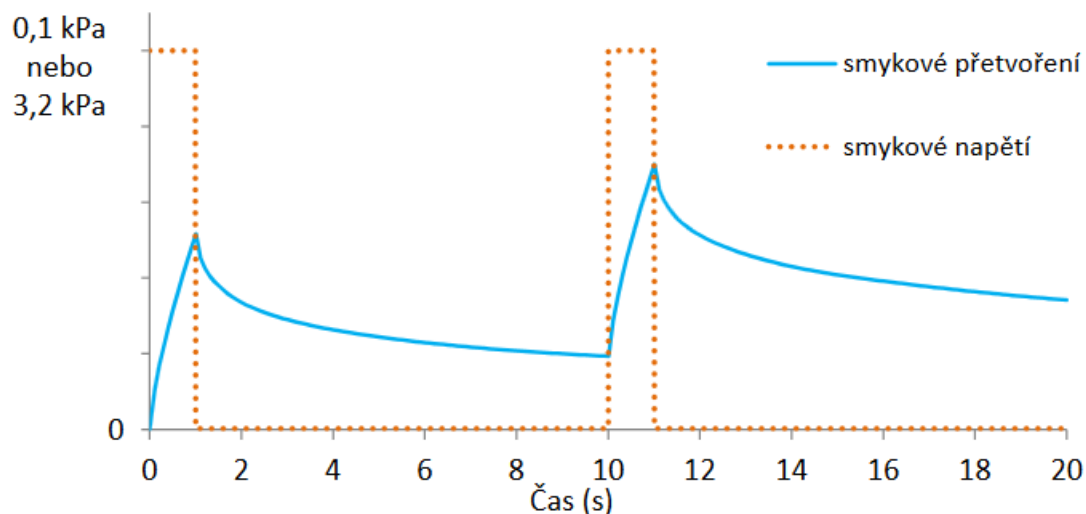
Ve Spojených státech amerických jsou předepsané teploty, za kterých by měla progresivní zkouška MSCR být prováděna. K určení teplot slouží takzvaný PG systém. Je to systém na určení teplot, které jsou analyzovány z velkého množství meteorologických stanic, podle kterých vznikly jednotlivé oblasti. Teploty jsou po 6 °C. Například 46 °C, 52 °C a 58 °C tyto teploty jsou zároveň teploty, při kterých se prováděla zkouška MSCR. [7]

Tab. 3 Ukázka PG systému v Americe při jedné teplotě [33]

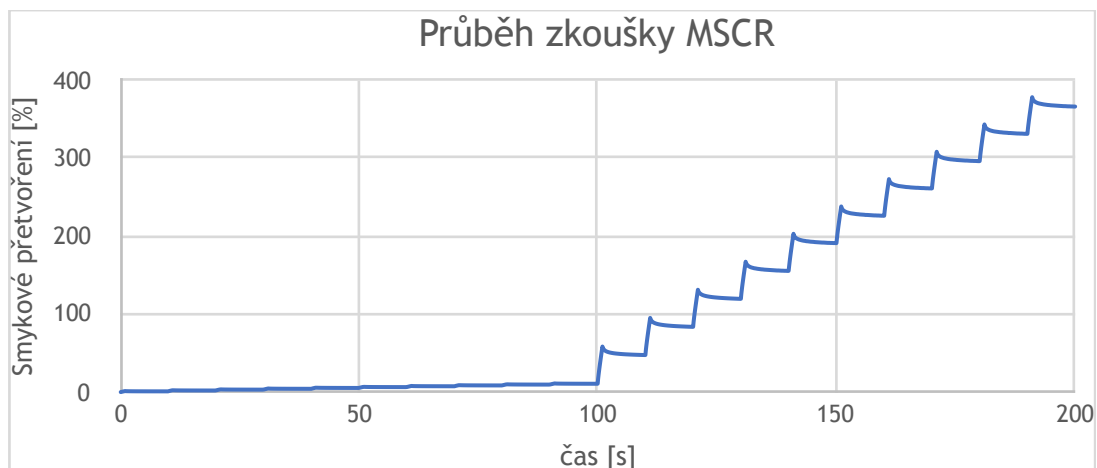
Performance Grade		PG 64					
10	16	22	28	34	40		
Average 7-day max pavement design temp, °Cb							
Min pavement design temp, °Cb		>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40
Original Binder	Flash point temp, T 48, min °C	230					
	Viscosity, T 316:cmax 3 Pa s, test temp, °C	135					
	Dynamic shear, T 315:dG°/sinδ, min 1.00 kPaetest temp @ 10 rad/s, °C	64					
		Rolling Thin-Film Oven Residue (T 240)					
Mass change, max, percent f	MSCR, TP 70: Standard Traffic "S" Grade/Jnr3.2, max 4.0 kPa-1Jnrdiff, max 75% test temp, °C	64					
	MSCR, TP 70: Heavy Traffic "H" Grade/Jnr3.2, max 2.0 kPa-1Jnrdiff, max 75% test temp, °C	64					
	MSCR, TP 70: Very Heavy Traffic "V" Grade/Jnr3.2, max 1.0 kPa-1Jnrdiff, max 75% test temp, °C	64					
	MSCR, TP 70: Extremely Heavy Traffic "E" Grade/Jnr3.2, max 0.5 kPa-1Jnrdiff, max 75% test temp, °C	64					
Pressurized Aging Vessel Residue (R 28)	PAV aging temp, °Cg	100					
	Dynamic shear, T 315: "S" Grade G° sinδ, max 5000 kPaetest temp @ 10 rad/s, °C	31	28	25	22	19	16
	Dynamic shear, T 315: "H, "V", "E" Grades G° sinδ, max 6000 kPaetest temp @ 10 rad/s, °C	31	28	25	22	19	16
	Creep stiffness, T 313:hS, max 300 MPam-value, min 0.300 test temp @ 60 s, °C	0	-6	-12	-18	-24	-30

Při spuštění testu MSCR probíhá první etapa zatížení při 0,1 kPa, která zahrnuje deset cyklů. Obsahem každého cyklu je smykové zatížení po dobu jedné sekundy a následné odlehčení po dobu 9 sekund (viz Graf 1). Po uplynutí první etapy, ihned následuje druhá za stejných podmínek jen s rozdílem, že zatížení probíhá při 3,2 kPa. Celý průběh zkoušky je zobrazen v Grafu 2.

Graf 1 Průběh cyklů při 0,1 kPa a 3,2 kPa [25]



Graf 2 Průběh zkoušky MSCR [25]



Měření probíhalo v dynamickém smykovém reometru (DSR) značky Kinexus (viz Obr. 16). Tento přístroj má rozsah frekvence 1 μ Hz až 150 Hz a je schopen přijímat data každých 0,1 sekundy. Reometr se dokáže nahřívat na 200 °C až - 40°C s přesností na $\pm 0,1$ °C kdykoliv v průběhu zkoušky. Každý test má svou vhodnou geometrii (viz Obr. 17). [3]



Obr. 16 Dynamický smykový reometr zn. Kinexus



Obr. 17 Geometrie

PŘÍPRAVA VZORKU

Asfaltové pojivo se nechá v laboratorní sušárně temperovat na 90 °C. Takto připravený vzorek se nalije do formy ze silikonu (viz Obr. 18). Poté se nechá zchladnout na laboratorní teplotu.

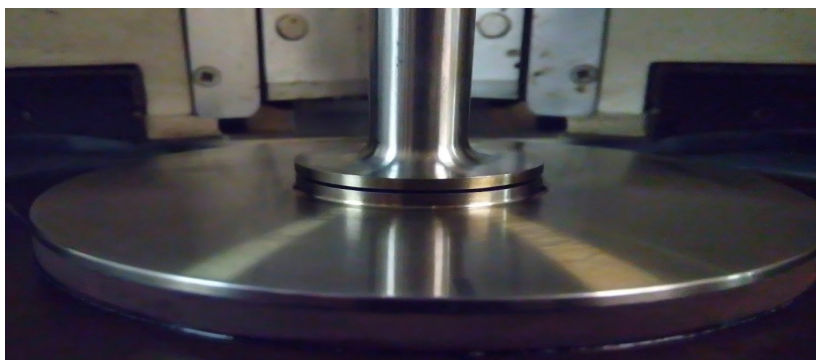


Obr. 18 Silikonové formy

PRŮBĚH ZKOUŠKY MSCR

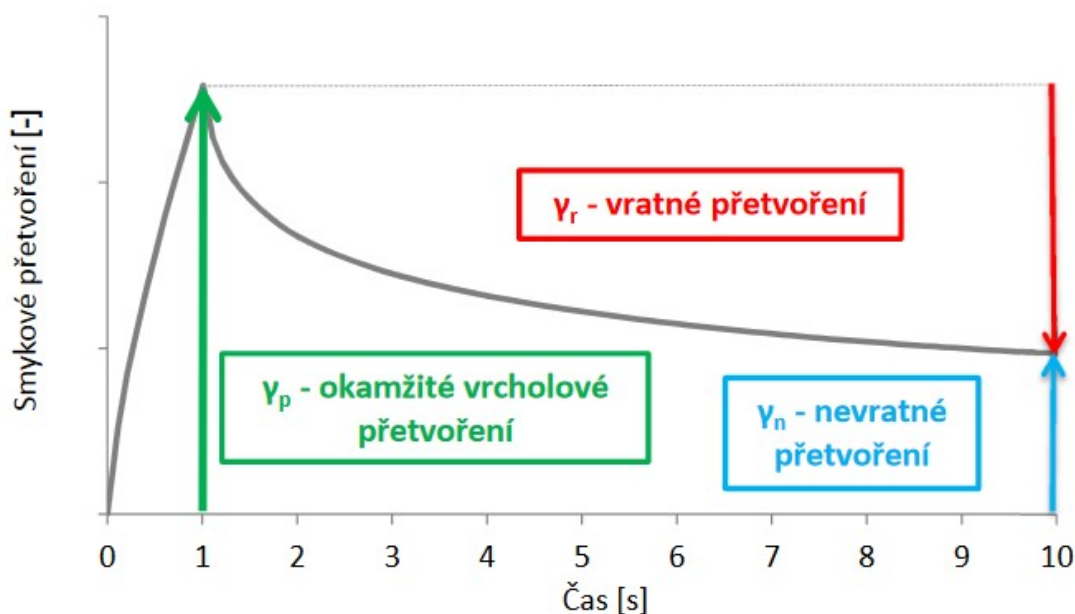
Po uchycení pohyblivé (horní) a pevné (dolní) geometrie se zkontroluje, zda jsou obě části čisté (pokud ne tak se opatrně očistí papírovým ubrouskem namočeném v rozpouštědle) a zapne se program smykového dynamického reometru. Nejprve horní geometrie sjede na úroveň dolní, tak aby mezi nimi byla mezera 1 mm (viz Obr. 19) a zavře se pec reometru. Po nahřátí a vyjetí horní geometrie se na spodní nepohyblivou část vloží kotouček asfaltového pojiva. Následně sjede horní nahřátá část a vytlačí přebytek asfaltového pojiva, který musí být v co nejkratším čase seříznutý nahřátou špachtlí. Po seříznutí sjede vrchní část o 5% (rezerva při vytvoření soudku), zavře se pec a nechá se znovu nahřívat na přesnou testovací teplotu. Při dosažení teploty se spustí proces zatěžování. Průběh

zkoušky je monitorován pomocí grafu, který je vykreslován na monitoru po 0,1 sekundy. Po skončení zkoušky se otevře pec a posuvná geometrie vyjede nahoru. Obě geometrie se očistí od rozežhátého asfaltového pojiva. Výsledkem je graf průběhu přetvoření (viz Graf 3). Po uložení výsledku s DSR se tento proces opakuje, ale s další potřebnou teplotou.



Obr. 19 Mezera 1 mm, mezi horní a dolní geometrii

Graf 3 Průběh přetvoření [29]



VÝSLEDKEM TESTU MSCR JSOU HODNOTY POMOCÍ, KTERÝCH LZE VYPOČÍTAT:

- **PRŮMĚRNÉ ELASTICKÉ ZOTAVENÍ R_N :** pro obě zatěžovací napětí (0,1 kPa a 3,2 kPa) po 10 cyklech. U tohoto platí, že čím větší je hodnota R_N , tím lépe se pojivo vrátí do původního stavu, protože pojivo je více elastické a mělo by příznivěji odolávat trvalým deformacím. Zaokrouhluje se na 0,1%. [25]

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

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

- **ROZDÍL V ELASTICKÉM ZOTAVENÍ R_{DIFF} :** Počítáme v procentech a je to rozdíl hodnot naměřené při napětí 0,1 kPa a 3,2 kPa.

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

- **NEVRATNÁ SMYKOVÁ PODDAJNOST J_{NR} :** klasifikuje pojiva dle odolnosti vůči trvalým deformacím a platí, že čím je hodnota nižší, tím je pojivo odolnější. Počítá se pro zatížení 0,1 kPa a 3,2 kPa po 10 cyklech. Jak je vidět z Grafu 3 smyková poddajnost je závislá na velikosti smykového napětí a teplotě. Zaokrouhluje se na tři platné číslice.

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

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

- **ROZDÍL V NEVRATNÉ SMYKOVÉ PODDAJNOSTI $J_{\text{NR,DIFF}}$:** pomocí procentuálního rozdílu ve smykové poddajnosti získané při napětí 0,1 kPa a 3,2 kPa se získá výsledný hodnotící parametr zkoušky MSCR.

$$J_{nr\text{diff}} = \left(\frac{J_{nr3,2 \text{ kPa}} - J_{nr0,1 \text{ kPa}}}{J_{nr0,1 \text{ kPa}}} \right) \cdot 100 [\%]$$

2.3.5 LABORATORNÍ VÝROBA SMĚSI

Asfaltová směs se vyrábí podle návrhu dle normy ČSN 73 6160 : 2008 – Zkoušení asfaltových směsí. [10]

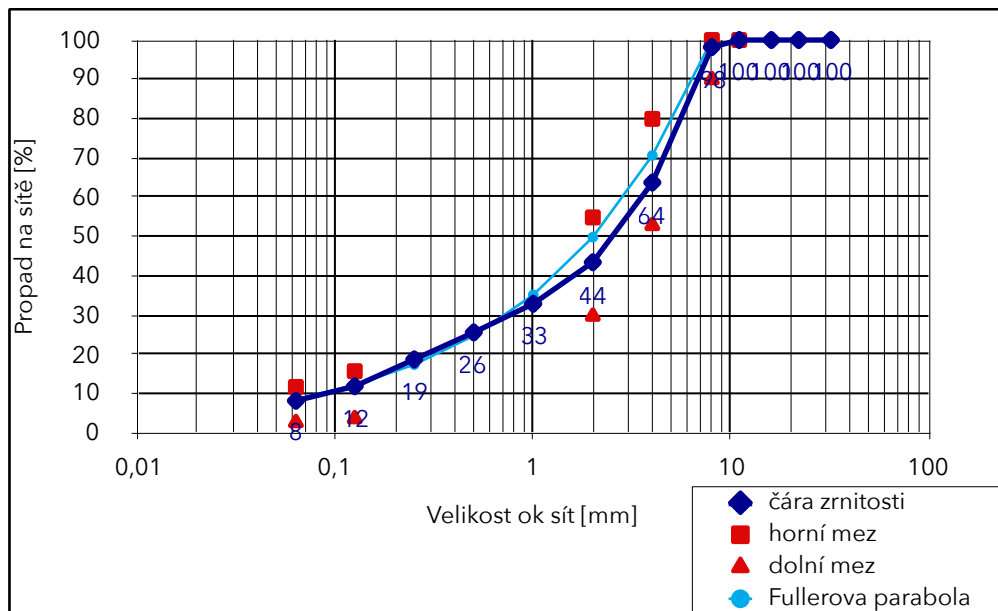
NÁVRH ČÁRY ZRNITOSTI

Výsledná čára zrnitosti musí být navržena tak, aby ležela uvnitř předepsaného oboru zrnitosti podle normy ČSN 13 108. Dle čáry se vypočítá obsah pojiva a to pomocí výpočtového programu anebo ručně. [19]

Tab. 4 Meze zrnitosti kameniva

ACO 8						
Meze	11	8	4	2	0,125	0,063
Horní	100	100	50	35	8	5
Dolní	100	90	28	17	3	3

Graf 4 Čára zrnitosti



VÝPOČET NÁVRHU MNOŽSTVÍ POJIVA

Množství pojiva je spočítáno dle následujících vztahů.

- STANOVENÍ TEORETICKÉHO OPTIMÁLNÍHO MNOŽSTVÍ POJIVA [6]

SOUČINITEL SYTOSTI:

$$\varepsilon = 0,01 \cdot (0,174G + 0,40g + 2,30S + 15,33s + 140f)$$

G - je podíl kameniva v % hmotnosti, které zadrží síto 8 mm

g - je podíl kameniva v % hmotnosti, které propadne sítem 8 mm a zadrží síto 4 mm

S - je podíl kameniva v %, které propadne sítem 4 mm a zadrží síto 0,25 mm

s - je podíl kameniva v % hmotnosti, které propadne sítem 0,25 a zadrží síto 0,063 mm

f - je podíl kameniva v % hmotnosti, které propadne sítem 0,063 mm

- STANOVENÍ NÁVRHOVÉHO MNOŽSTVÍ POJIVA A ODVOZENÍ OPTIMA [6]

TEORETICKÉ MNOŽSTVÍ POJIVA:

$$p = n \cdot \sqrt[5]{\varepsilon} \cdot \frac{2,650}{\rho_a}$$

n - je 3,4

p - je objemová hmotnost zrn kameniva v mg/m³

PŘÍPRAVA KAMENIVA PRO VÝROBU SMĚSI

Před samotnou výrobou se nejprve musí rozdělit frakce kameniva do čtyřech nádob z nehořlavého materiálu. V obsahu zkušebního kameniva je přítomna tzv. volná voda, která se musí odstranit. Volná voda ve zkušebním vzorku se odstraní pomocí temperování na cca 110 °C v laboratorní sušárně. Kvůli možné sraženině vlhkosti vně frakce, se v intervalech po 30 minutách kamenivo promísí pomocí laboratorní kovové lopatky. Při dosažení 160 °C se nádoby vyjmou s pece. [14]



Obr. 20 Vážení frakcí a filleru

VÝROBA ASFALTOVÉ SMĚSI

Naváží se přesné množství frakcí kameniva a filleru (viz Obr. 21) a Tab. 4. Misky s navážkou a plechovka s asfaltovým pojivem se vloží do pece, kde se nechají temperovat na teplotu 170 °C. Po dosažení teploty navážky a pojiva se přejde k míchání.

Tab. 5 Navážka pro asfaltovou směs

Frakce	Podíl [%]	Hmotnost [g]
filler	9	99
0 - 4	47	517
4 - 8	44	484
Suma	100	1100



Obr. 21 Přesné navážení frakce a fillerů

Po navážení frakcí se vlije přesné množství asfaltového pojiva a nádoba se přemístí z váhy na varnou desku. Směs se promíchává špachtlí. Až jsou všechny zrna obaleny (viz Obr. 22), může se směs přesypat do speciálně upravené misky se zkosenými čelnými hranami. A znovu se vloží do pece, kde je temperována na 155°C. Takto připravená směs je připravena na výrobu Marshallových těles.



Obr. 22 Obalování zrn asfaltovým pojivem

VÝROBA MARSHALLOVÝCH TĚLESECH

Jsou to tělesa potřebná k vyhodnocení objemové hmotnosti a mezerovitosti. Vychází s přesného návrhu asfaltové směsi.

Tělesa se vyrábí v rázovém zhutňovači dle normy ČSN EN 12697-30. Kde se na povrch směsi ve formě spustí hutnící pěch skládající se z vodící tyče, hutnící ho beranu a bicí hlavy. Zhutňovač funguje na principu pohonného řetězu, který zdvihá a pouští hutnící beran z výšky cca 460 mm. Hutnící beran klesá po vodící tyči na bicí hlavu, která tak zhutňuje asfaltovou směs. [20]

POSTUP VÝROBY MARSHALLOVÝCH TĚLES

Horká asfaltová směs se vloží do forem (viz Obr. 23). Před vložení asfaltové směsi, musí být do formy s obou stran vložena separační papír, aby se směs nepřichytila na dno podložky či úderníku zhutňovače.



Obr. 23 Formy Marshallových těles

Potom se forma scentruje pomocí výlisků do zhutňovače a uchytí odstředivou vačkou. Spustí se rázová zkouška po 50 úderech. Následně se vzorek otočí a znovu se vystaví rázové zkoušce také po 50 úderech. Po ukončení, které by nemělo přesáhnout 4 min, se vzorek vloží do chladícího zařízení. Na který po dobu cca 45 min působí studený vzduch z ventilátoru. Jakmile je možné na povrchu vzorku udržet ruku, vloží se do lisu (viz Obr. 24 - vlevo). Pomocí páky lisu se vytlačí zhutněné Marshallové těleso (viz Obr. 24 - vpravo). Vzniklé těleso je válec o rozměrech výška $63,5 \pm 2,5$ mm, průměr $101,6 \pm 0,1$ mm, které je nutné popsat bílou barvou. [17]

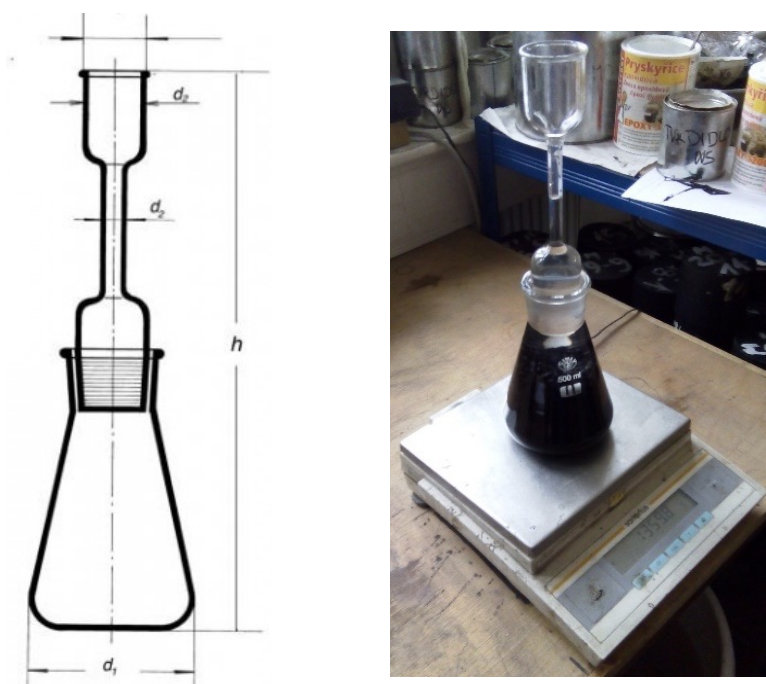


Obr. 24 Marshall tělesa (vlevo), lis s Marshallovým tělesem (vpravo)

2.3.6 OBJEMOVÁ HMOTNOST A MEZEROVITOST

STANOVENÍ MAXIMÁLNÍ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI ASFALTOVÝCH SMĚSÍ - hmotnost při dané zkušební teplotě, připadající na jednotku objemu asfaltové směsi bez mezer. [11]

Maximální objemová hmotnost se vypočítá pomocí volumetrického postupu. U tohoto postupu se objem vzorku měří jako objem vody či rozpouštědla vytěsněného v pyknometru (viz Obr. 25).



Obr. 25 Tvar a popis pyknometru

PRŮBĚH ZKOUŠKY POMOCÍ PYKNOMETRU

Zváží se hmotnost prázdného pyknometru s nástavcem (m_1) o známém objemu (V_p). Do pyknometru se vsype vysušený vzorek asfaltové směsi a nechá se temperovat na laboratorní teplotu. Poté se znovu zváží a stanoví se hmotnost (m_2). Pyknometr se naplní destilovanou vodou, která sahá maximálně 30 mm pod okraj nástavce. Aby se odstranily vzduchové bubliny, vloží se pyknometr do exsikátoru (po dobu cca 15 min, viz Obr. 26). V exsikátoru pod tlakem 4 kPa se vytěsní přebytečný vzduch. Vlivem toho klesne hladina vody, která se musí doplnit po rysku značenou na pyknometru. Důležité je, aby dolívaná voda měla stejnou teplotu jako voda v nádobě a vodní lázni.



Obr. 26 Exsikátor

Takto připravený pyknometr se vyjme z vodní lázně a po osušení se zváží hmotnost (m_3). Po zjištění všech hmotností přichází na řadu výpočet maximální objemové hmotnosti. [5]

POSTUP VÝPOČTU PŘI VOLUMETRICKÉ METODĚ

Maximální objemová hmotnost asfaltové směsi ρ_{mv} se vypočítá pomocí rovnice s přesností 1 kg/m^3 .

VZTAH PRO VÝPOČET OBJEMOVÉ HMOTNOSTI:

$$\rho_{mv} = \frac{m_2 - m_1}{1000 \cdot \left(V_p - \frac{m_3 - m_2}{\rho_{mv}} \right)}$$

ρ_{mv} - je maximální objemová hmotnost asfaltové směsi v $[\text{kg/m}^3]$ s přesností $0,1 [\text{kg/m}^3]$

m_1 - hmotnost pyknometru a nástavce $[\text{g}]$

m_2 - hmotnost pyknometru, nástavce a zkušební vzorku $[\text{g}]$

m_3 - hmotnost pyknometru, nástavce, zkušební vzorku a vody $[\text{g}]$

V_p - objem pyknometru při naplnění po referenční značce nástavce $[\text{m}^3]$

ρ_{mv} - hustota vody při zkušební teplotě v $[\text{kg/m}^3]$ s přesností $0,1 [\text{kg/m}^3]$

STANOVENÍ OBJEMOVÉ HMOTNOST ASFALTOVÉHO ZKUŠEBNÍHO TĚLESA

Na stavbě se měří pomocí radiosondy troxler a v laboratoři pomocí Marshallových tělesech měřené ve vodě a na suchu. Objemová hmotnost zhutněné asfaltové směsi se vypočítá pomocí zkušebního tělesa a jeho objemu.

PRŮBĚH ZKOUŠKY POMOCÍ MARSHALLOVÝCH TĚLESECH

Stanoví se hmotnost suchého vzorku Marshallova tělesa (m_1). Vzorek se pověsí na rameno váhy do vodní lázně tak, aby bylo plně ponořeno a nedotýkalo se stran nádoby (viz Obr 27). Po ustálení hmotnosti se запиše hmotnost ponořeného tělesa (m_2). Těleso se vyndá, povrchově osuší a znovu se zváží hmotnost (m_3). [12]



Obr. 27 Marshallové těleso ponořeného ve vodní lázni

POSTUP VÝPOČTU OBJEMOVÉ HMOTNOSTI

Objemová hmotnost se stanoví na 1 [kg/m³].

VZTAH PRO VÝPOČET OBJEMOVÉ HMOTNOSTI POMOCÍ MARSHALLOVÝCH TĚLES:

$$Q_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \cdot Q_w$$

ρ_{bssd} - je objemová hmotnost SSD [kg/m³]

m_1 - hmotnost suchého tělesa [g]

m_2 - hmotnost tělesa ve vodě [g]

m_3 - hmotnost tělesa nasyceného vodou a povrchově osušeného [g]

ρ_w - je hustota vody [kg/m³]

MEZEROVITOST

STANOVENÍ MEZEROVITOSTI ASFALTOVÉ SMĚSI

Objem mezer, který je mezi zrny kameniva zhutněné směsi včetně vzduchu vyplňující mezery. Mezerovitosti směsi kameniva je vyjádřen v [%]. [18]

VZTAH PRO VÝPOČET MEZEROVITOSTI:

$$M = \left(1 - \frac{Q_{bssd}}{Q_{mv}} \right) \cdot 100 [\%]$$

ρ_{bssd} - je objemová hmotnost SSD [kg/m³]

ρ_{mv} - je maximální objemová hmotnost asfaltové směsi v [kg/m³] s přesností 0,1 [kg/m³]

2.3.7 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES ZHUTŇOVAČEM DESEK

Pro vyhodnocení zkoušky pojezd kolem byli vyrobeny dvě zkušební tělesa ve tvaru desky. Tento zkušební postup stanovuje náchylnost asfaltové směsi k trvalé deformaci pod účinkem zatížení. [15]

NÁVRH DESKY

Při výrobě desek se vycházelo z vypočítané objemové hmotnosti a mezerovitosti hutněné směsi, ale také se musel brát zřetel na tloušťku desky a rozměry formy. Pro každou desku byl použit jiný druh výrobce pojiva.

PRŮBĚH VÝROBY DESKY

Dle návrhu se určila hmotnost asfaltové směsi a navážek frakcí kameniva. Po navážení všech frakcí se kamenivo vložilo do sušárny a nechalo se temperovat na hutnící teplotu 150 °C. Teplota se sledovala pomocí čidla digitálního teploměru, který byl umístěn ve vzorku.

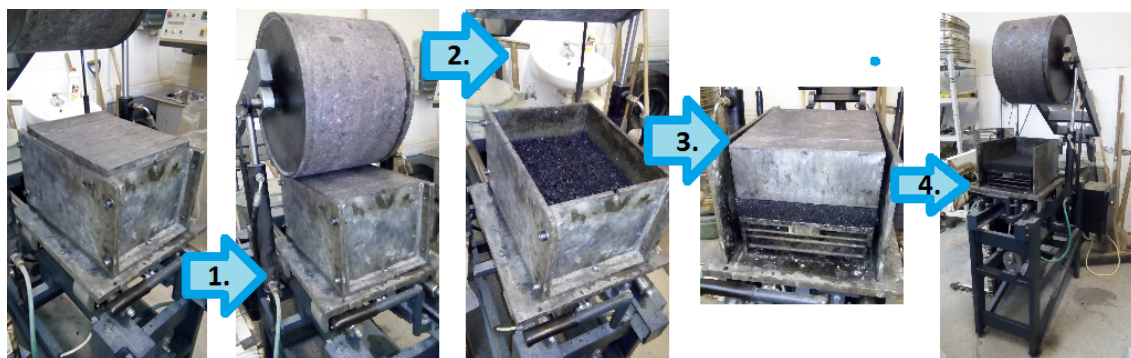
Po nahřátí na požadovanou teplotu se vzorek vsypal do laboratorní míchačky a rovnoměrně se promíchal. Potom do směsi byla nalita přesná hmotnost asfaltového pojiva.

Takto připravena asfaltová směs se rovnoměrně rozprostře do formy zhutňovače (viz Obr. 28). Důležité je, aby stěny formy byly opatřeny separačním prostředkem, kvůli možnému zachycení horké asfaltové směsi. Pod pokladní desku se vloží distanční rámečky o různé síle vymezující tloušťku desky. Pro zkoušku pojezdu kolem je tloušťka desky 40 mm. Na asfaltovou směs se položí ocelový plech o síle 2 mm, který je též opatřen separační vrstvou. Na plech se naskládají jednotlivé ocelové lamely 260x100x15 mm. V této fázi se spustí na lamely válec, který pojíždí po lamelách a hutní tak asfaltovou směs. [16]



Obr. 28 Vsypání asfaltové směsi do zhutňovače

Hutnění probíhá tak, že válec konstantní silou zatlačuje lamely do formy. Po dosednutí válce na okraj formy se vypne zhuťňovač po dobu jedné minuty, aby se uvolnilo vzniklé napětí ve směsi. Poté se znovu spustí a nechá se do hutnit několika pojezdy válce (viz Obr. 29). Po vyndání zkušebního tělesa s formy, vznikne deska s rozměry 320 x 260 x 40 mm (viz Obr. 30). [30]



Obr. 29 Zhuťňovače a lamely



Obr. 30 Zkušební desky

Po vychladnutí desky se zjišťuje zmíněná objemová hmotnost, mezerovitost a míra zhutnění vzhledem k objemové hmotnosti směsí dle Marshallových zkušebních těles. Míra zhutnění se pohybuje v rozmezí 98 % až 102 % objemové hmotnosti určené Marshallovou zkouškou. Po stanovení všech vlastností zkušební desky se dále desky vystavily zkoušce na odolnost proti trvalým deformacím pomocí zkoušky vyjetí kolejí.

2.3.8 ZKOUŠKA POJÍŽDĚNÍ KOLEM

Evropská normalizace zavádí funkční zkoušky na performance „related tests“ a „performance based tests“. Jsou to zkoušky, které by se měli nejvěrohodněji podobat skutečnému chování asfaltových směsí na reálné vozovce. Co se týče zkoušení asfaltových pojiv na tvorbu trvalých deformací se, jako funkční metoda osvědčila zkouška vyjetí koleje pojezdem kolem dle ČSN EN 12697-22. [32]

Vyjetí kolejí probíhá v laboratoři pomocí pojezdem kolem. Zkouška stanovuje náchylnost asfaltové směsi k trvalým deformacím za působení zatížení. Zkušební tělesa se buď odebírají přímo z vozovky či se vyrábějí v laboratoři. Těleso uchycené ve formě na zkoušku pojezdem kolem musí mít zrnitost maximálně 32 mm a musí být uchyceno tak, aby horní část lícovala s horním okrajem formy (viz Obr. 31). [13]



Obr. 31 Přístroj na vyjetí kolejí

PŘÍPRAVA VZORKU

Buď se odebere vzorek z vozovky anebo se v laboratoři vyrobí deska. Výroba desky je popsána v kapitole 2.3.7., která se uchyťí do formy. Forma se vloží do přístroje (viz Obr. 32).



Obr. 32 Uchycení desky ve formě

PRŮBĚH ZKOUŠKY POJEZD KOLEM

Po uchycení zkušebního tělesa k rámu vyjížděče, se nastaví potřebné zatížení, rychlost a čas, při kterém bude deska vystavena metodě pojíždění kolem. A spustí se samotný proces zkoušky. Kdy koleso o průměru 20 cm a šířky 5 cm umístěné v přístroji opakovaně přejíždí zkušební desku při dané teplotě. A vytváří tak trvalou deformaci - vyjetou kolej. Zkouška trvá přibližně 6 hodin.



Obr. 33 Deska před zkouškou pojezd kolem



Obr. 34 Deska po zkoušce pojezd kolem

3 PRAKTICKÁ ČÁST

3.1 POUŽITÉ MATERIÁLY

V této kapitole budou určeny druhy materiálů od různých dodavatelů, které byly použity v bakalářské práci.

3.1.1 DRUHY ASFALTOVÝCH POJIV

Ke zkouškám bylo vybráno 15 druhů asfaltových pojiv od českých i zahraničních výrobců, kdy dva z nich byli o gradaci 70/100 a ostatní 50/70. V následující tabulce jsou označeny všechny výrobci a značení každého pojiva pro laboratorní účely.

Tab. 6 Laboratorní označení použitých pojiv

Číslo	Dodavatel a gradace pojiva	Označení vzorků
1	Litvínov 70/100	A
2	OMV 70/100	B
3	Litvínov 50/70	C
4	Eurobit Holasovice 50/70	D
5	OMV 50/70 Chrlice	E
6	TOTAL 50/70	F
7	Orlen 50/70	G
8	Lotos 50/70	H
9	Shell 50/70	I
10	Paramo 50/70	J
11	Orlen 50/70	K
12	Orlen 50/70	L
13	Litvínov 50/70	M
14	Litvínov 50/70	N
15	Litvínov 50/70	O

3.1.2 DRUHY KAMENIVA (LULEČ, FILLER)

Při výrobě směsi typu asfaltový beton bylo použito kamenivo Luleč a jeho frakce 0/4, 4/8. Dále byla použita vápenná moučka filler.

3.2 VÝSLEDKY NA ASFALTOVÝCH POJIVECH

Obsahem kapitoly je vyhodnocení jednotlivých zkoušek, které nejlépe vystihují náchylnost k trvalým deformacím. To jsou empirické zkoušky (penetrace jehlou a bod měknutí) a progresivní zkouška MSCR. Tyto metody budou vyhodnoceny do grafů a tabulek. Zkoušky probíhali dle platných příslušných norem a předpisů v laboratoři.

3.2.1 STANOVENÍ PENETRACE JEHLOU

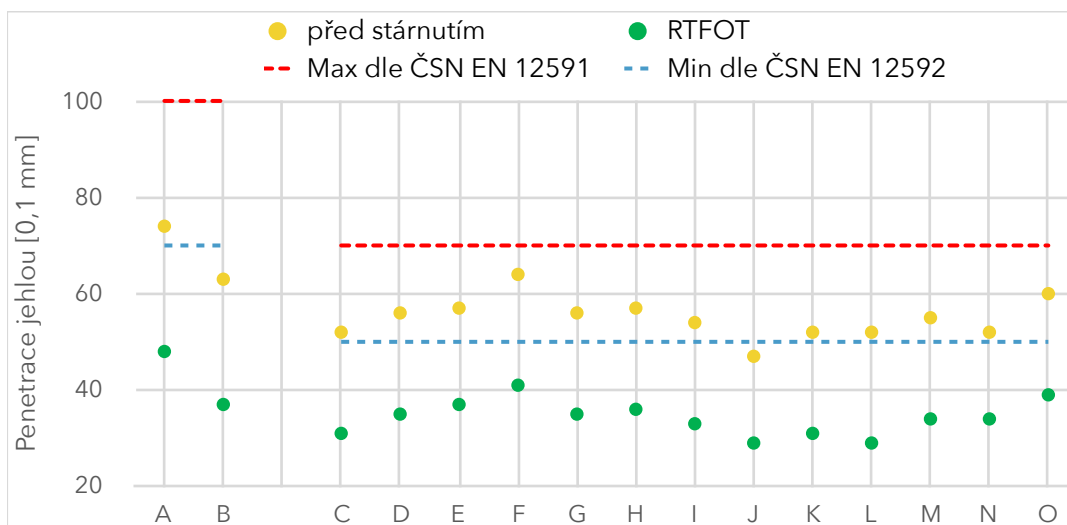
Tato zkouška byla provedená dle normy ČSN EN 1426 - Stanovení penetrace jehlou a podrobněji je popsána v kapitole 2.3.1.

U každého vzorku byla zkouška provedena čtyřikrát a tyto naměřené hodnoty se zprůměrovali a zaznamenali do následující tabulky. Po té byli výsledky vyneseny do grafu, kde je možno vidět rozdíl penetrace u jednotlivých pojiv.

Tab. 7 Penetrace jehlou

Označení vzorků	Pojivo	Penetrace				
		Před RTFOT	RTFOT	Rozdíl	Max dle ČSN EN 12 591	Min dle ČSN EN 12 592
		[0,1 mm]	[0,1 mm]	[0,1 mm]	[0,1 mm]	[0,1 mm]
A	Litvínov 70/100	74	48	26	100	70
B	OMV 70/100	63	37	26	100	70
C	Litvínov 50/70	52	31	21	70	50
D	Eurobit Holasovice 50/70	56	35	21	70	50
E	OMV 50/70 Chrlice	57	37	20	70	50
F	TOTAL 50/70	64	41	23	70	50
G	Orlen 50/70	56	35	21	70	50
H	Lotos 50/70	57	36	21	70	50
I	Shell 50/70	54	33	21	70	50
J	Paramo 50/70	47	29	18	70	50
K	Orlen 50/70	52	31	21	70	50
L	Orlen 50/70	52	29	23	70	50
M	Litvínov 50/70	55	34	21	70	50
N	Litvínov 50/70	52	34	18	70	50
O	Litvínov 50/70	60	39	21	70	50

Graf 5 Penetrace jehlou



VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY

Dle hodnot v tabulce se určilo, že všechny hodnoty vyhovují mezím penetrace, dle normy ČSN EN 14 023. Největší změna asfaltového pojiva je u vzorku A a B, tyto pojiva jsou gradace 70/100. Naopak nejmenší změna je u vzorků J a N gradace 50/100.

Závěrem tedy je, že výsledky penetrace všech pojiv měřené při 25 °C klesly zhruba o polovinu než před jejím působením. To znamená, že penetrace pojiv po metodě RTFOT klesá a je závislá na gradaci pojiv.

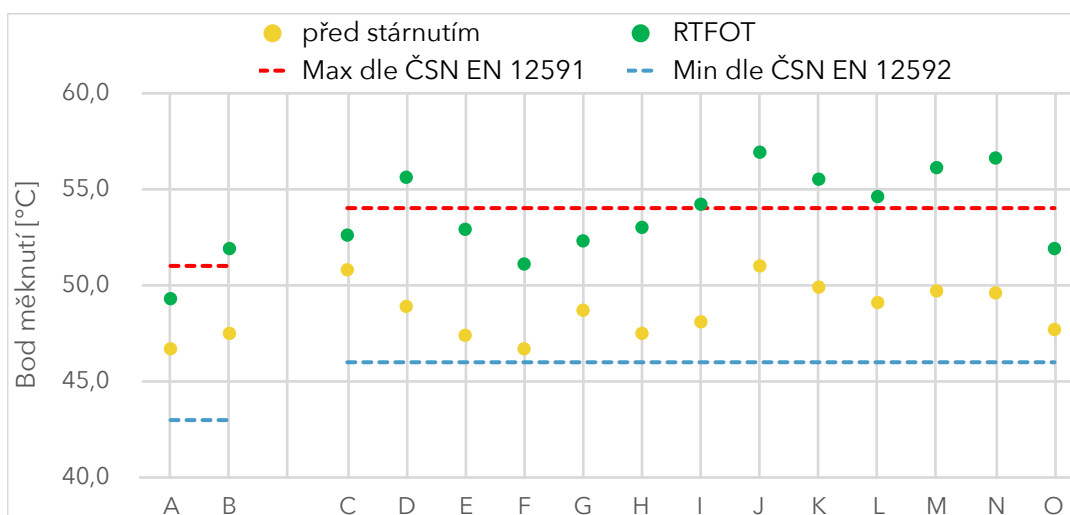
3.2.2 STANOVENÍ BODU MĚKNUTÍ

Bod měknutí se zjišťuje pomocí metody kroužek kulička, který je popsán v kapitole 2.3.2. Výsledné hodnoty bodu měknutí nižší nebo rovné 80 °C se vyjádřily jako průměr zaznamenaných teplot a zaokrouhlily se na 0,2 °C, viz tabulka níže.

Tab. 8 Bod měknutí

Vzorek	Pojivo	Kroužek - kulička				
		Před RTFOT	RTFOT	Rozdíl	Max dle ČSN EN 12 591	Min dle ČSN EN 12 592
		[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
A	Litvínov 70/100	46,7	49,3	-2,6	51	43
B	OMV 70/100	47,5	51,9	-4,4	51	43
C	Litvínov 50/70	50,8	52,6	-1,8	54	46
D	Eurobit Holasovice 50/70	48,9	55,6	-6,7	54	46
E	OMV 50/70 Chrlice	47,4	52,9	-5,5	54	46
F	TOTAL 50/70	46,7	51,1	-4,4	54	46
G	Orlen 50/70	48,7	52,3	-3,6	54	46
H	Lotos 50/70	47,5	53,0	-5,5	54	46
I	Shell 50/70	48,1	54,2	-6,1	54	46
J	Paramo 50/70	51,0	56,9	-5,9	54	46
K	Orlen 50/70	49,9	55,5	-5,6	54	46
L	Orlen 50/70	49,1	54,6	-5,5	54	46
M	Litvínov 50/70	49,7	56,1	-6,4	54	46
N	Litvínov 50/70	49,6	56,6	-7,0	54	46
O	Litvínov 50/70	47,7	51,9	-4,2	54	46
Doba působení RTFOT		0	75			

Graf 6 Bod měknutí



VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY

Hodnoty bodu měknutí po metodě RTFOT se zvýšily. Tím pádem se snížila horní hranice oboru plasticity a pojiva jsou náchylnější na trvalé deformace. Největší nárůst změny po a před RTFOT bodu měknutí byl zaznamenán u vzorku N gradace 50/70, tento vzorek překročil maximální hodnotu dle ČSN EN 12 591 o 2,6 °C. Nejmenší rozdíl bodu měknutí byl u vzorku C, kdy rozdíl před a po RTFOT byl jen 1,8 °C.

Dle výsledku je patrné, že jednotlivá pojiva vyhověla požadavkům na minimální teploty při propadu kuliček, ale některé pojiva překročila hodnotu maximálních teplot.

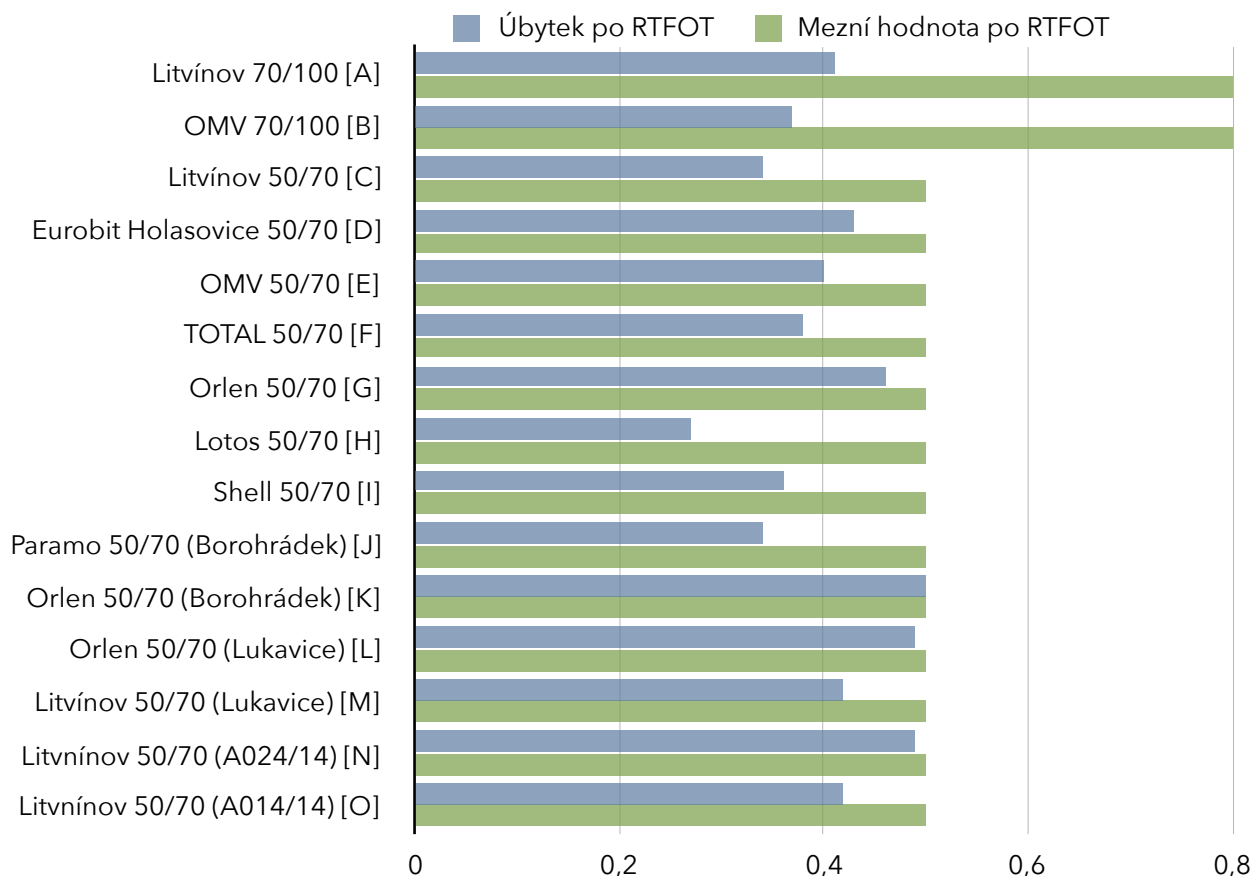
3.2.3 ÚBYTEK ASFALTOVÉHO POJIVA PO RTFOT

Úbytek asfaltového pojiva vzniká při zkušební metodě RTFOT v sušárně. Tato metoda je popsána v kapitole 2.2.1. Výsledné hodnoty jsou zaznamenány do následující tabulky. Z tabulky je potom vyneseno sloupkový graf úbytku všech pojiv.

Tab. 9 Úbytek asfaltového pojiva

Pojivo	Vzorek	Úbytek po RTFOT	Mezní hodnota po RTFOT
		[%]	[%]
Litvínov 70/100	A	0,41	0,80
OMV 70/100	B	0,37	0,80
Litvínov 50/70	C	0,34	0,50
Eurobit Holasovice 50/70	D	0,43	0,50
OMV 50/70	E	0,40	0,50
TOTAL 50/70	F	0,38	0,50
Orlen 50/70	G	0,46	0,50
Lotos 50/70	H	0,27	0,50
Shell 50/70	I	0,36	0,50
Paramo 50/70 (Borohrádek)	J	0,34	0,50
Orlen 50/70 (Borohrádek)	K	0,50	0,50
Orlen 50/70 (Lukavice)	L	0,49	0,50
Litvínov 50/70 (Lukavice)	M	0,42	0,50
Litvínov 50/70 (A024/14)	N	0,49	0,50
Litvínov 50/70 (A014/14)	O	0,42	0,50

Graf 7 Úbytek asfaltového pojiva



VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY

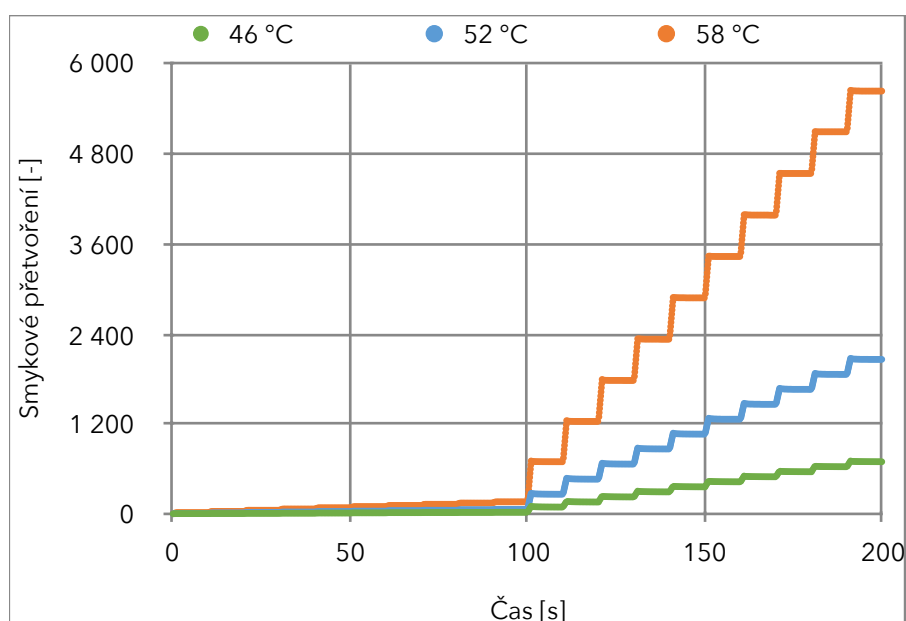
Všechny úbytky jsou zaokrouhleny na 0,01 a jsou uvedeny v procentech. Jak je vidět z grafu největší úbytek asfaltového pojiva má vzorek K (0,5%) a nejmenší úbytek má vzorek H (0,27%).

3.2.4 MSCR po RTFOT

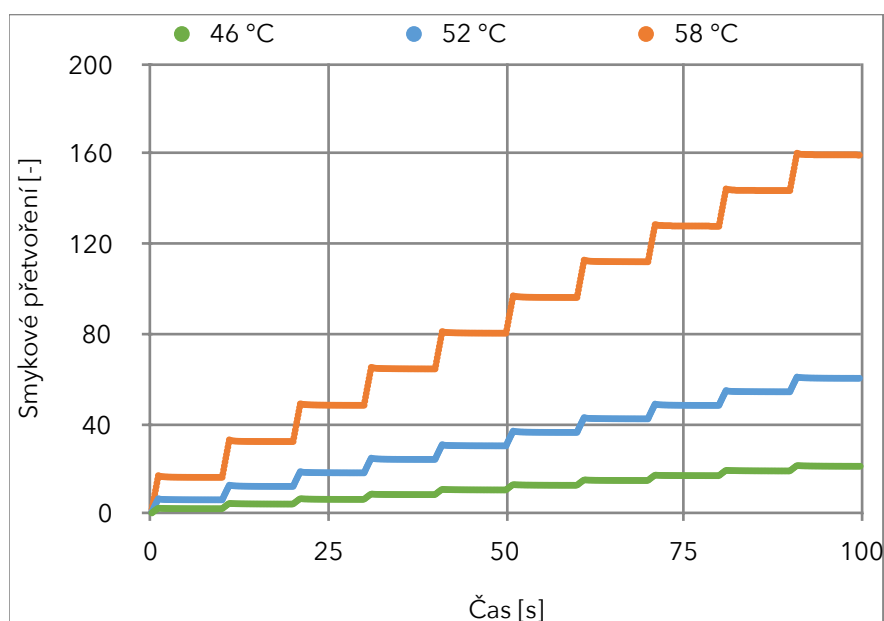
Metoda MSCR je popsána v kapitole 2.3.4. Výsledky jsou vyhodnocené po zkoušce RTFOT, která je popsána v kapitole 2.2.1.

Průběh zkoušky je znázorněn pro každé pojivo zvlášť (viz příloha č. 1) společně pro teplotu 46 °C, 52 °C a 58 °C. Pro lepší viditelnost smykového přetvoření byli vytvořeny výřezy pro zatížení 0,1 kPa v čase od 0 do 100 s. V následujících grafech jsou vykresleny průběhy vzorků F a K, které byly vybrány k výrobě asfaltových směsí.

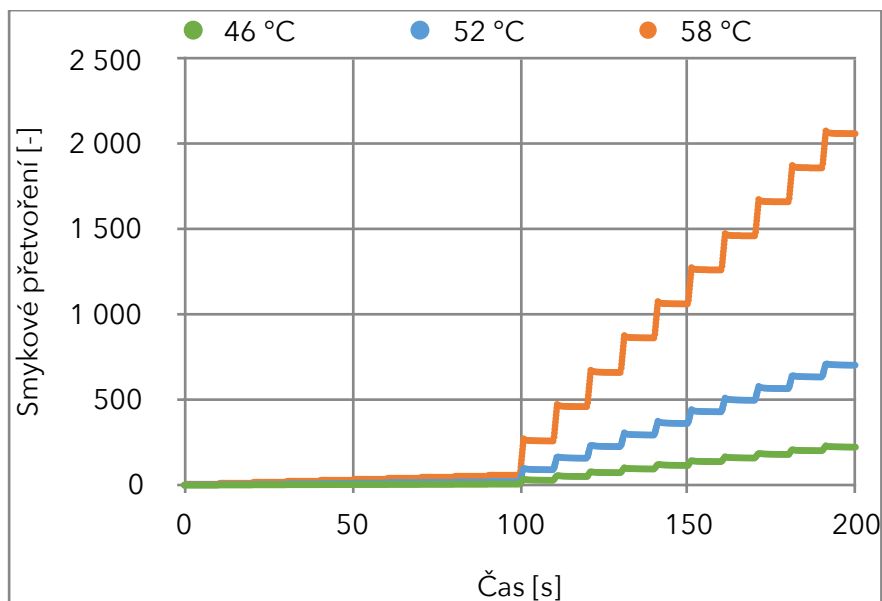
Graf 8 Průběh zkoušky u vzorku F



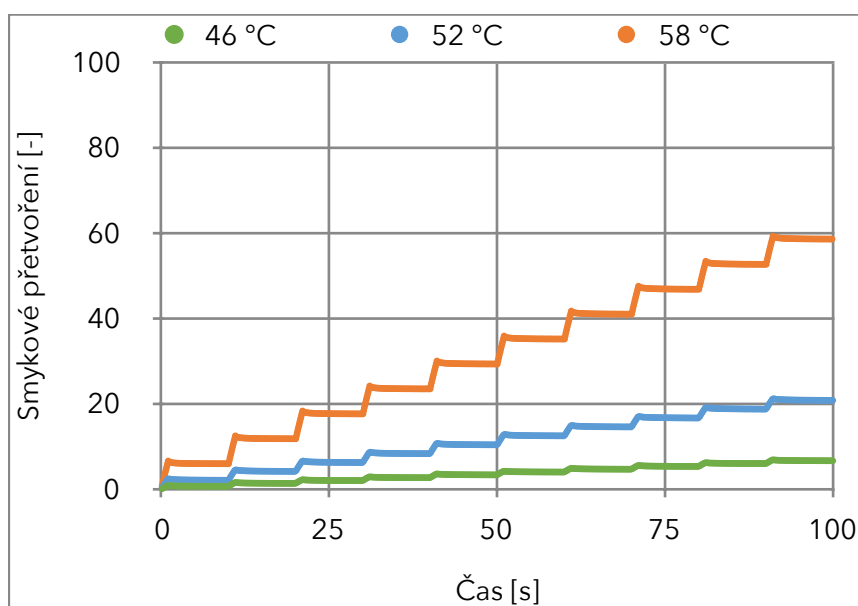
Graf 9 Výřez vzorku F při 0,1 kPa



Graf 10 Průběh zkoušky u vzorku K



Graf 11 Výřez vzorku K při 0,1 kPa



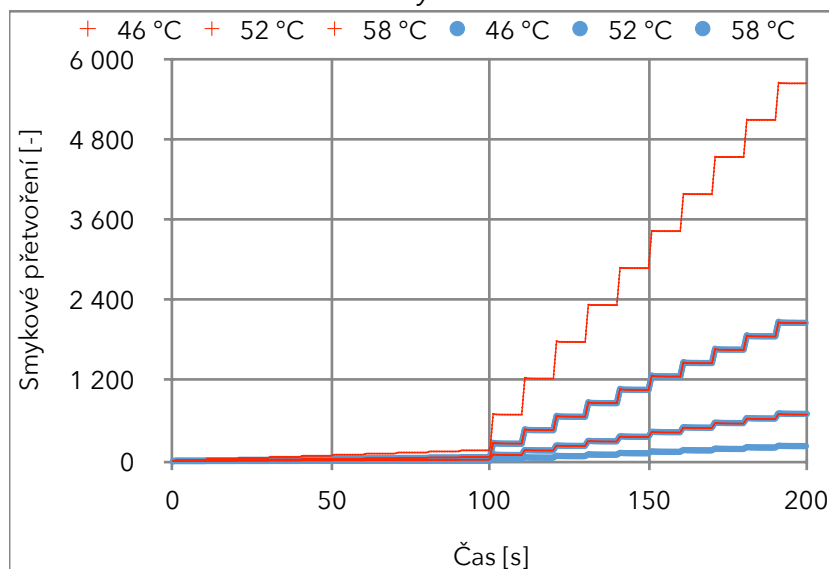
VYHODNOCENÍ PRŮBĚHU ZKOUŠKY MSCR

Z grafů lze pozorovat změnu chování asfaltových pojiv při teplotě 46 °C, 52 °C a 58 °C. Nejhuře v testu obstál vzorek F, kdy jeho smykové přetvoření bylo nejvíce patrné. Nejlépe v testu obstál vzorek M, u kterého smykové přetvoření bylo nejméně patrné.

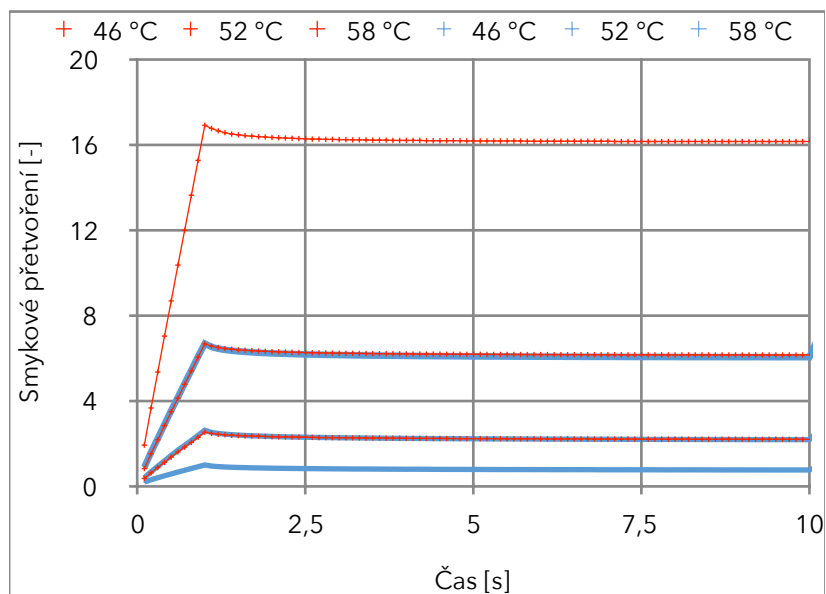
V následujícím grafu jsou demonstrovány dva vzorky, které byli použity při výrobě desky a to zástupce nejlepšího a nejhoršího vyhodnoceném v MSCR. Bohužel vzorek M, jako to nejodolnější pojivo vyhodnocené v MSCR proti trvalým

deformacím, nebyl použit při výrobě asfaltové směsi z toho důvodu, že v laboratoři nebylo k dispozici dostatečné množství asfaltového pojiva. Proto se použil vzorek, kterého výsledky byli nejbližší vzorku M a zároveň ho bylo dostatek pro výrobu asfaltové směsi. Tyto kritéria splňoval nejlépe vzorek K. V grafu je značen vzorek **F červeně** a vzorek **K modře**.

Graf 12 Průběh zkoušky MSCR vzorků F a K



Graf 13 Výřez jednoho cyklu



Z grafu je viditelný průběh, který má "schodovitý" tvar. U vzorku F při teplotě 58 °C je tento jev nejvýraznější. To znamená, že při působení slykového napětí vzniká velmi malé vratné přetvoření a naopak vzniká vyšší okamžité přetvoření. Dále je možno vidět, že průběhy při teplotách u vzorku F-46 °C a vzorku K-52 °C, vzorku F-52 °C a vzorku K-58 °C se překrývají. Z toho vyplývá, že pojivo K je o 6 °C lepší.

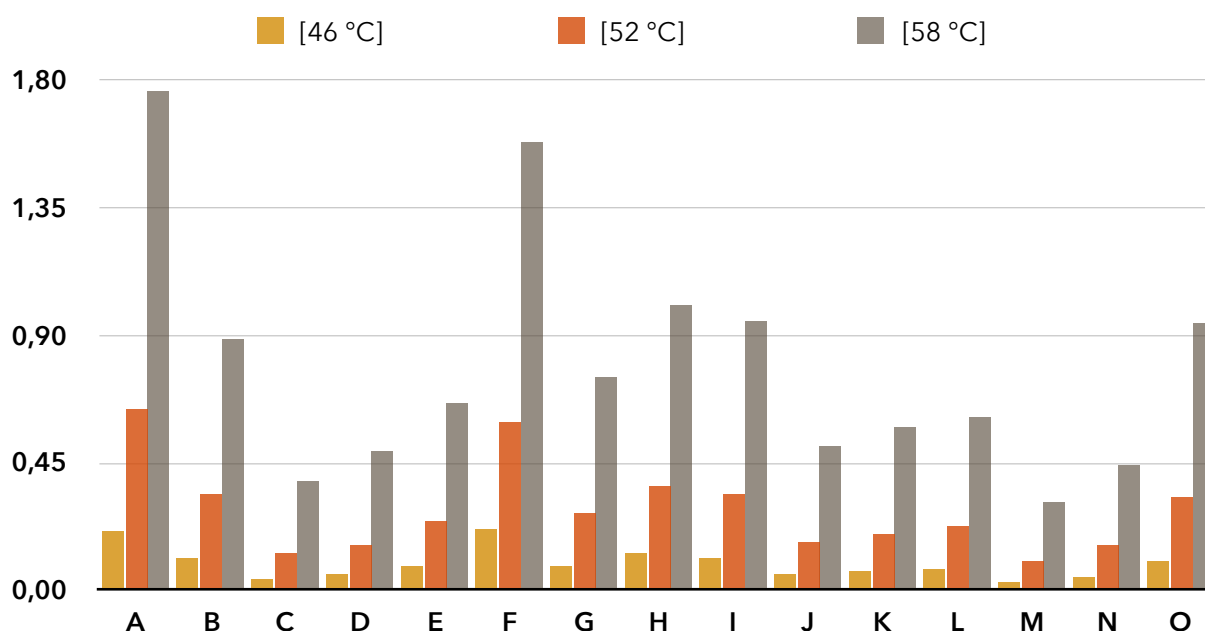
3.2.4.1 VÝSLEDNÉ HODNOTY MSCR VŠECH POJIV

Výsledky z DSR se použijí při výpočtu J_{nr} a R_n . Počítá se pomocí vzorců obsažené v kapitole 2.3.4. Všechny výsledné hodnoty jsou uvedené v následujících tabulkách a vyneseny do grafů smykové poddajnosti (J_{nr}) a elastického zotavení (R_n).

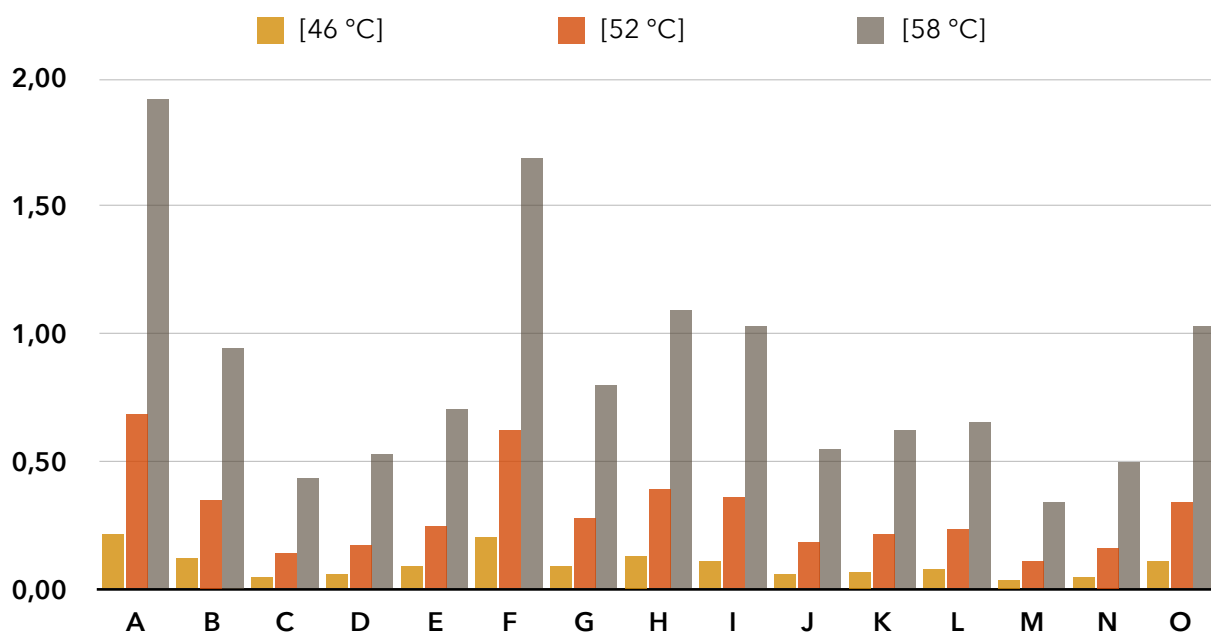
Tab. 10 Vyhodnocení J_{nr} všech patnácti vzorků

Označení vzorků	Hodnoty z DSR								
	46 °C			52 °C			58 °C		
	$J_{nr0,1}$	$J_{nr3,2}$	$J_{nr diff}$	$J_{nr0,1}$	$J_{nr3,2}$	$J_{nr diff}$	$J_{nr0,1}$	$J_{nr3,2}$	$J_{nr diff}$
	[kPa ⁻¹]	[kPa ⁻¹]	[%]	[kPa ⁻¹]	[kPa ⁻¹]	[%]	[kPa ⁻¹]	[kPa ⁻¹]	[%]
A	0,20	0,21	1,70	0,64	0,68	6,45	1,76	1,92	9,20
B	0,11	0,11	2,25	0,34	0,35	3,83	0,88	0,94	7,71
C	0,04	0,04	6,14	0,13	0,14	6,81	0,39	0,43	10,94
D	0,05	0,05	3,12	0,16	0,17	5,72	0,49	0,53	7,41
E	0,08	0,08	1,80	0,24	0,25	2,95	0,66	0,70	5,50
F	0,21	0,21	0,32	0,59	0,62	4,87	1,58	1,69	6,95
G	0,08	0,08	3,80	0,27	0,28	2,52	0,75	0,80	7,09
H	0,13	0,13	1,41	0,37	0,39	4,28	1,01	1,09	8,49
I	0,11	0,11	2,60	0,34	0,36	4,72	0,95	1,03	7,54
J	0,06	0,06	2,22	0,17	0,18	4,29	0,51	0,55	8,33
K	0,06	0,07	1,60	0,20	0,21	2,62	0,58	0,62	7,42
L	0,07	0,07	1,31	0,22	0,23	3,30	0,61	0,65	7,58
M	0,03	0,03	1,50	0,10	0,10	4,20	0,31	0,33	6,89
N	0,04	0,04	2,47	0,16	0,16	2,09	0,44	0,49	10,61
O	0,10	0,11	3,93	0,32	0,34	5,26	0,94	1,03	9,41

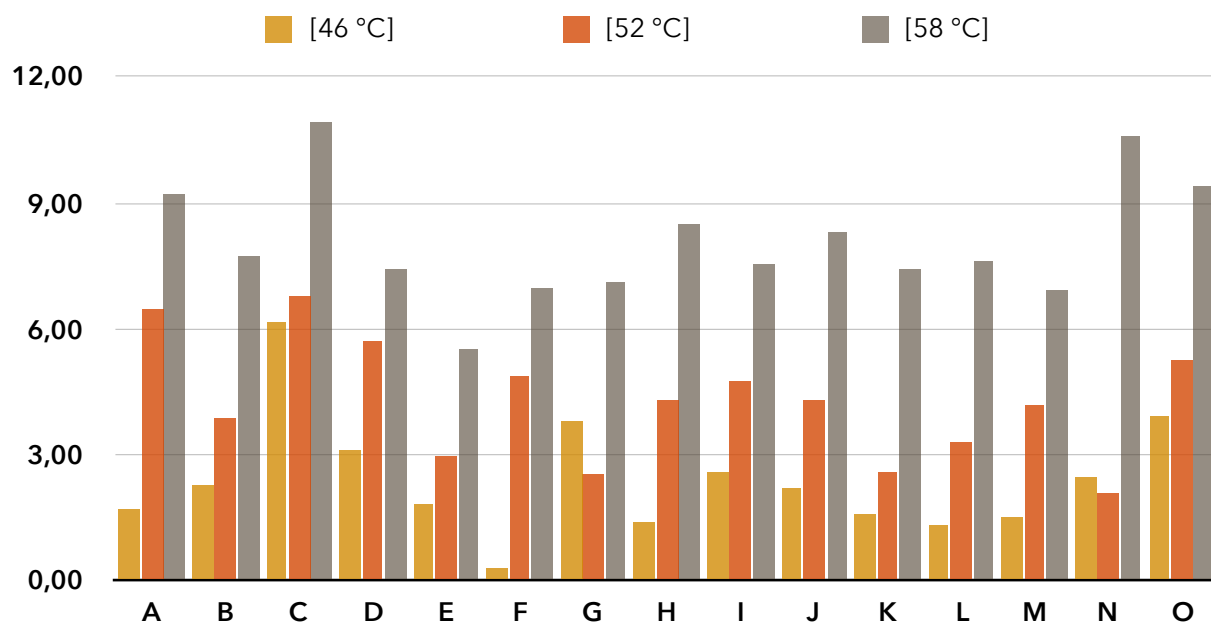
Graf 14 Vyhodnocení $J_{nr0,1}$ všech patnácti vzorků



Graf 15 Vyhodnocení $J_{nr3,2}$ všech patnácti vzorků



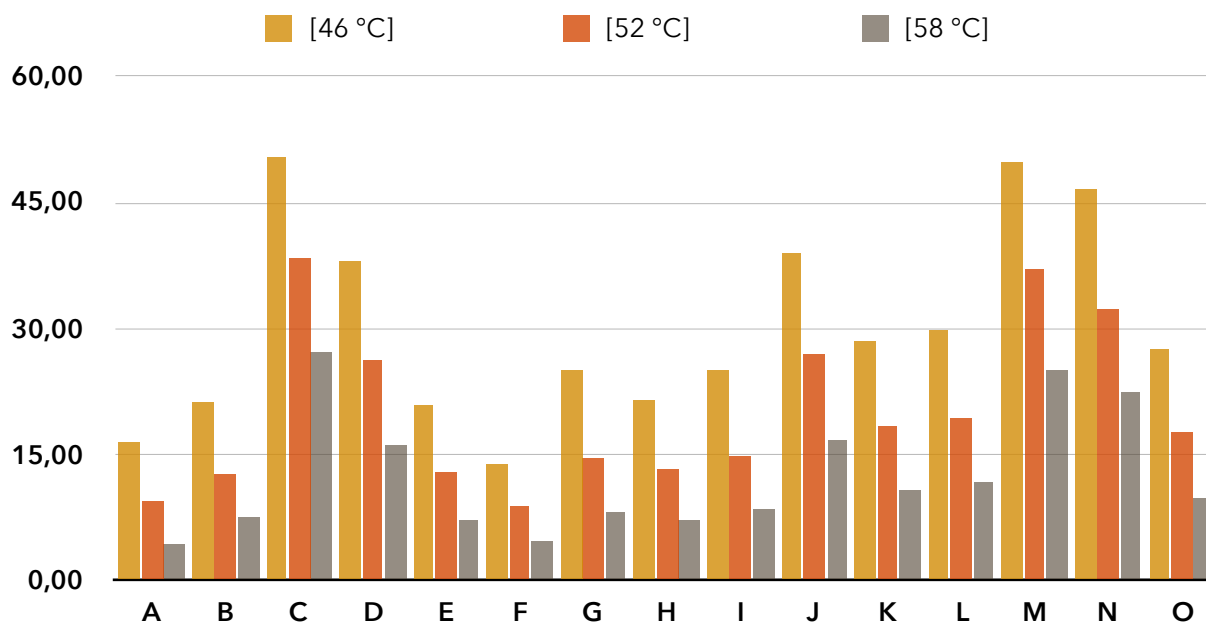
Graf 16 Vyhodnocení $J_{nr diff}$ všech patnácti vzorků



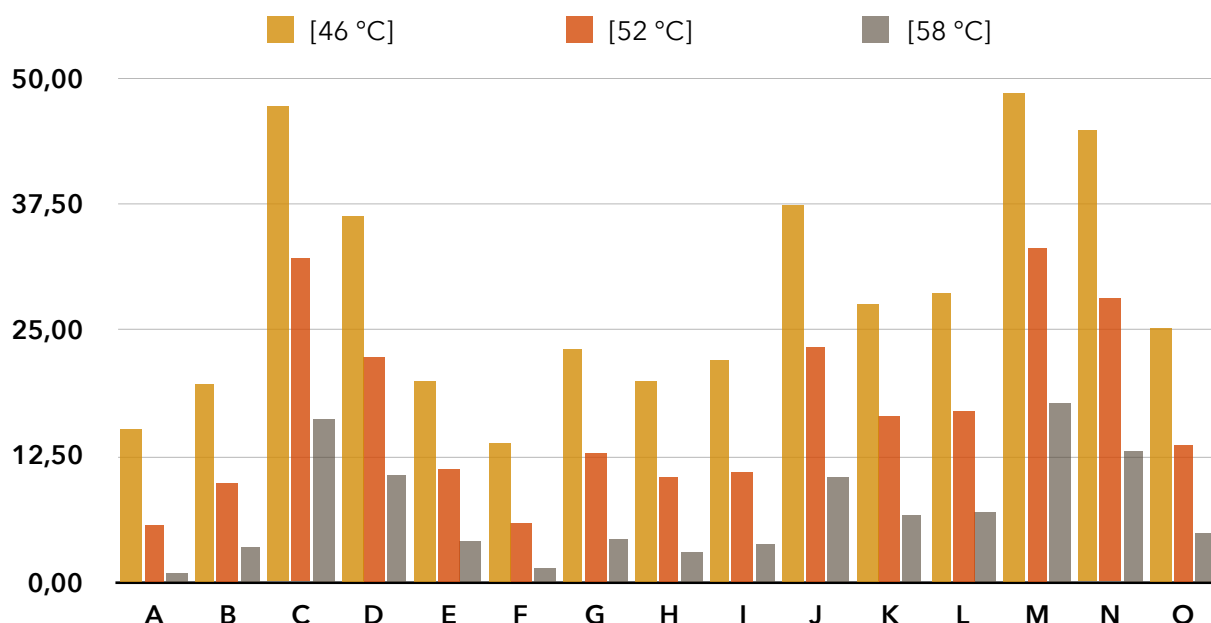
Tab. 11 Vyhodnocení R_n všech patnácti vzorků

Označení vzorků	Hodnoty z DSR								
	46 °C			52 °C			58 °C		
	$R_{n0,1}$	$R_{n3,2}$	R_{ndiff}	$R_{n0,1}$	$R_{n3,2}$	R_{ndiff}	$R_{n0,1}$	$R_{n3,2}$	R_{ndiff}
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
A	16,48	15,03	8,78	9,32	5,61	39,81	4,30	0,92	78,62
B	21,06	19,69	6,52	12,48	9,78	21,62	7,46	3,39	54,58
C	50,34	47,26	6,12	38,27	32,17	15,95	27,33	16,26	40,50
D	38,04	36,32	4,52	26,29	22,31	15,17	16,10	10,73	33,33
E	20,91	20,00	4,34	13,02	11,18	14,07	7,16	4,15	42,06
F	13,96	13,73	1,63	8,66	5,92	31,61	4,53	1,38	69,42
G	24,89	23,10	7,21	14,44	12,71	11,98	8,11	4,33	46,68
H	21,42	19,88	7,16	13,24	10,34	21,89	7,35	2,99	59,29
I	24,86	22,05	11,30	14,97	10,83	27,66	8,42	3,64	56,77
J	38,98	37,42	4,01	27,02	23,30	13,76	16,76	10,38	38,07
K	28,65	27,49	4,05	18,18	16,51	9,19	10,72	6,69	37,61
L	29,68	28,78	3,04	19,41	17,00	12,39	11,80	6,95	41,12
M	49,72	48,59	2,26	36,94	33,24	10,01	24,93	17,87	28,34
N	46,66	44,90	3,79	32,20	28,18	12,51	22,52	13,09	41,87
O	27,44	25,28	7,88	17,81	13,67	23,26	9,83	4,87	50,41

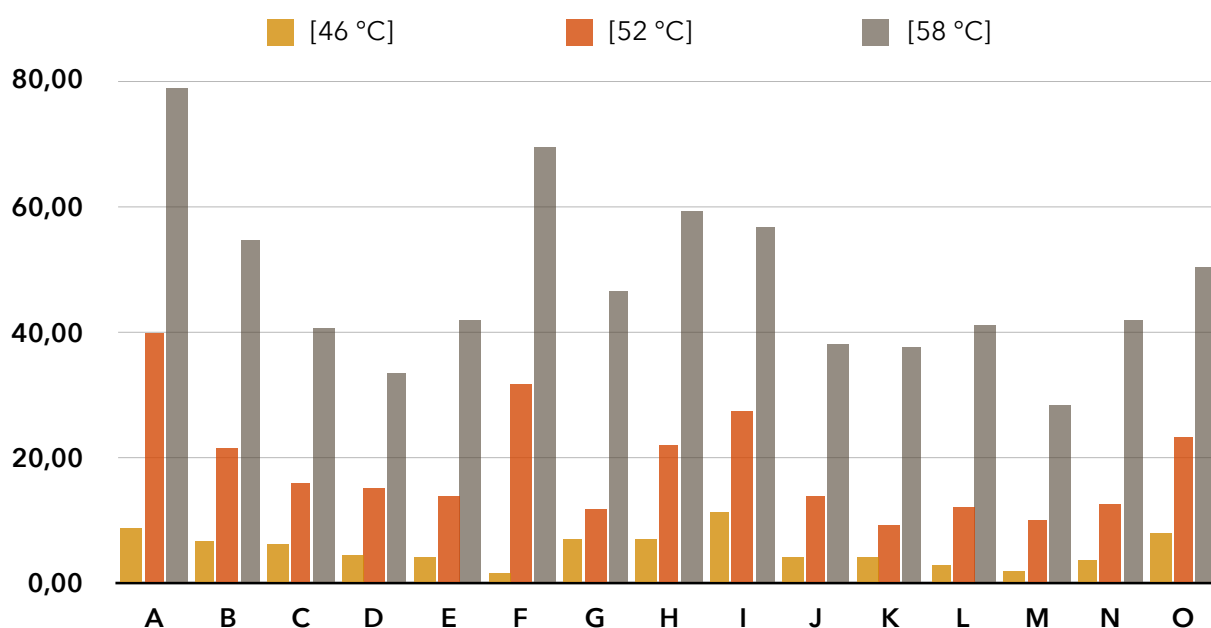
Graf 17 Vyhodnocení $R_{n0,1}$ všech patnácti vzorků



Graf 18 Vyhodnocení $R_{n3,2}$ všech patnácti vzorků



Graf 19 Vyhodnocení R_{ndiff} všech patnácti vzorků



VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY

Z grafů je opět patrný rozdíl jednotlivých hodnot mezi teplotami (46°C, 52°C a 58°C - tyto teploty byli vybrány dle požadavků PG systému používaném v USA). Se zvyšující se teplotou nevratná smyková poddajnost stoupá, avšak u elastického zotavení je tento jev opačný. Hodnoty průměrného elastického zotavení určují,

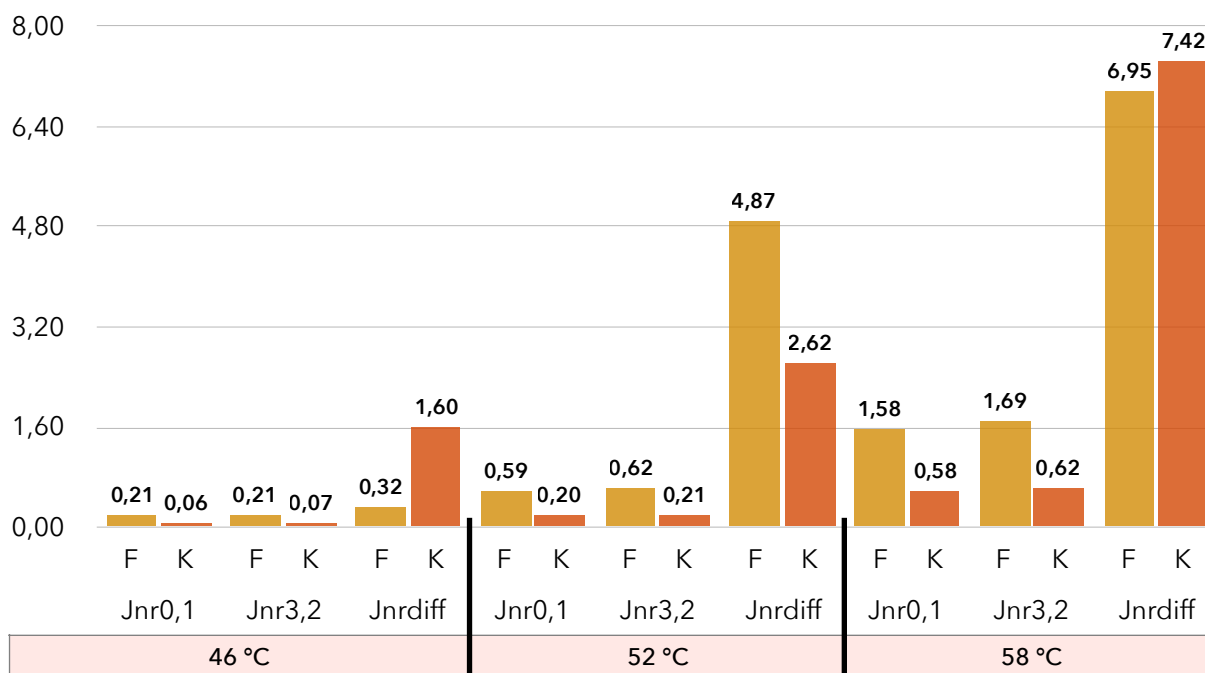
nakolik se pojivo poměrově vrátí do původního stavu. Pokud jsou hodnoty elastického zotavení vyšší, tak je asfaltové pojivo odolnější vůči trvalým deformacím.

Závěrem tedy je, že nižší hodnoty nevratného smykového přetvoření jsou u odolnějších asfaltových pojiv. Tedy u vzorku M a naopak u vzorku F bylo nevratné smykové přetvoření vyšší, proto bylo určeno jako to méně odolné asfaltové pojivo na trvalé deformace. V následujících grafech jsou navzájem porovnány vzorky, které byly použity při výrobě asfaltové směsi F a K.

Tab. 12 Vyhodnocení J_{nr} vzorků F a K

Vzorek	46 °C			52 °C			58 °C		
	$J_{nr0,1}$ [kPa ⁻¹]	$J_{nr3,2}$ [kPa ⁻¹]	$J_{nr diff}$ [kPa ⁻¹]	$J_{nr0,1}$ [kPa ⁻¹]	$J_{nr3,2}$ [kPa ⁻¹]	$J_{nr diff}$ [kPa ⁻¹]	$J_{nr0,1}$ [kPa ⁻¹]	$J_{nr3,2}$ [kPa ⁻¹]	$J_{nr diff}$ [kPa ⁻¹]
F	0,21	0,21	0,32	0,59	0,62	4,87	1,58	1,69	6,95
K	0,06	0,07	1,60	0,20	0,21	2,62	0,58	0,62	7,42

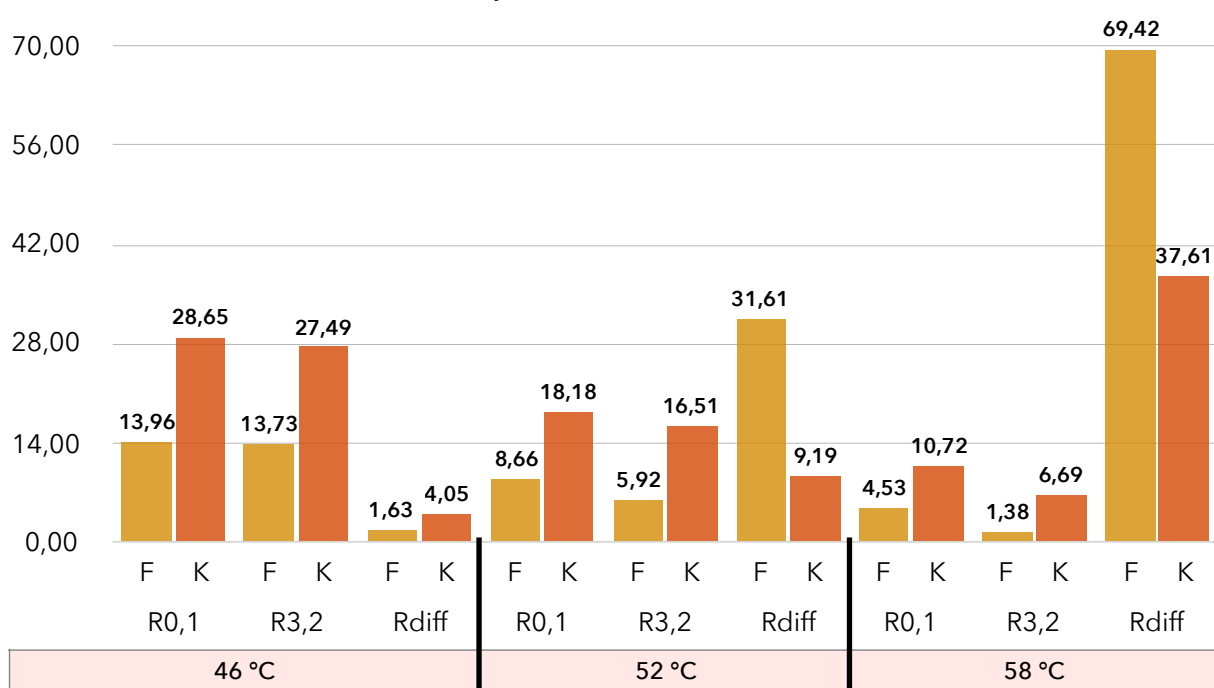
Graf 20 Vyhodnocení J_{nr} vzorků F a K



Tab. 13 Vyhodnocení R_n vzorků F a K

Vzorek	46 °C			52 °C			58 °C		
	$R_{n0,1}$ [%]	$R_{n3,2}$ [%]	R_{ndiff} [%]	$R_{n0,1}$ [%]	$R_{n3,2}$ [%]	R_{ndiff} [%]	$R_{n0,1}$ [%]	$R_{n3,2}$ [%]	R_{ndiff} [%]
F	13,96	13,73	1,63	8,66	5,92	31,61	4,53	1,38	69,42
K	28,65	27,49	4,05	18,18	16,51	9,19	10,72	6,69	37,61

Graf 21 Vyhodnocení R_n vzorků F a K



3.3 VÝSLEDKY ASFALTOVÝCH SMĚSÍ

Hlavní náplní kapitoly je výpočet maximální objemové hmotnosti, objemové hmotnosti a mezerovitosti směsi. Dále bude pozornost věnovaná hodnotám ze zkoušky pojezd kolem.

3.3.1 MAXIMÁLNÍ OBJEMOVÁ HMOTNOST

Dle postupu uvedeného v kapitole 2.3.6 byla vypočítaná maximální objemová hmotnost.

Tab. 14 Vypočítané maximální objemové hmotnosti

Značení pyktometru	Hmotnost pyktometru m_1 [g]	Hmotnost pyktometru + vzorek m_2 [g]	Hmotnost pyktometru + voda + vzorek m_3 [g]	Maximální objemová hmotnost ρ_{mv} [g/mm ³]
1	381,7	955,5	1 372,2	2 420,0
2	362,6	952,8	1 359,8	2 420,0

3.3.2 OBJEMOVÁ HMOTNOST

Pro zjištění objemové hmotnosti byli vyrobeny tři stejné Marshallova tělesa. Tato tělesa byla označena LB1, LB2, LB3. Ovšem po srovnání výsledků s hodnotami dle normy ČSN 12 697 nebyli splněny požadavky na maximální mezerovitost (2,5 % – 4,5 %). Výsledná vypočítaná hodnota mezerovitosti byla 5,7 %. Vzhledem k tomu byla znovu navržena asfaltová směs, kde se změnila gradace a došlo k upravení čáry zrnitosti. Z této nové směsi byli znovu zhotoveny tři Marshallova tělesa LB4, LB5, LB6. Hodnoty navážky těchto těles jsou obsahem kapitoly 2.3.5.

Hmotnosti zkušebních těles byli zjištěné:

1. v suchém stavu m_1
2. ponořené ve vodě m_2 (teplota vody 19 °C)
3. povrchově osušené a nasycené vodou m_3

Tab. 15 Naměřené hodnoty Marshallových těles

Označení	Výška* [mm]	Šířka* [mm]	m ₁ [g]	m ₂ [g]	m ₃ [g]
LB4	61,8	102,0	1 167,9	667,2	1 165,9
LB5	62,8	102,0	1 167,1	666,4	1 168,0
LB6	61,6	102,0	1 164,4	668,1	1 165,3

*Poznámka: Uvedené hodnoty u výšky a šířky jsou průměrem ze třech naměřených hodnot.

Tab. 16 Vypočítané hodnoty objemové hmotnosti

Označení	Objemová hmotnost ρ_{bssd} [g/mm ³]
LB4	2341,9
LB5	2326,8
LB6	2341,9
Průměr	2336,9

3.3.3 MEZEROVITOST

Dle vztahu uvedeného v kapitole 2.3.6 byla vypočítaná mezerovitost.

Tab. 17 Vypočítané hodnoty mezerovitosti

Maximální objemová hmotnost [g/mm ³]	Objemová hmotnost [g/mm ³]	Mezerovitost [%]
2 420,0	2336,9	3,4

Zjištěná mezerovitost nově navržené asfaltové směsi u vzorků LB4, LB5, LB6 činí 3,4 % což odpovídá kritériím dle normy ČSN 12 697 na maximální mezerovitost (2,5 % – 4,5 %). Tato směs byla následně použita pro výrobu desek, které sloužily pro další zkoušku, viz dále.

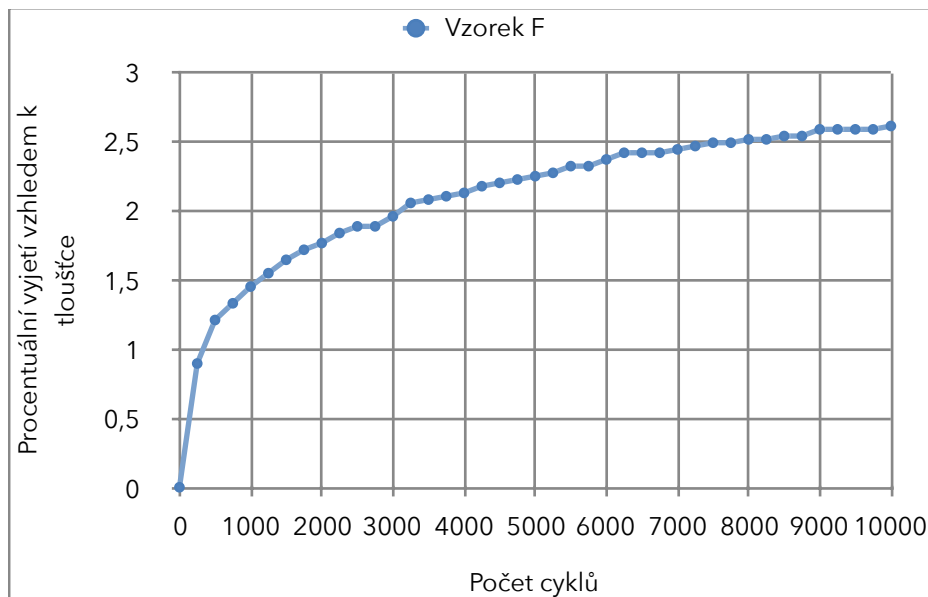
3.3.4 TRVALÉ DEFORMACE

Do zkušebního zařízení byli upevněny dvě desky a vystaveny zkoušce pojezdem kolem, viz kapitola 2.3.8. Popis výroby zkušebních desek je popsán v kapitole 2.3.7. Pro výrobu desek byly použity dvě asfaltové pojiva. První pojivo TOTAL 50/70 (vzorek F) bylo v testu MSCR vyhodnocené jako méně odolné vůči trvalým deformacím a druhé Orlen 50/70 (vzorek K) jako to odolnější na tvorbu deformací.

Tab. 18 Naměřené hloubky vyjeté koleje s obsahem pojiva vzorku F

Deska	Tloušťka [mm]	$Y_{s,10}$ [mm]	PRD_{AIR} [%]	WTS_{AIR} [mm/10 ³ cyklů]
vzorek F	41,23	1,08	3,10	0,03

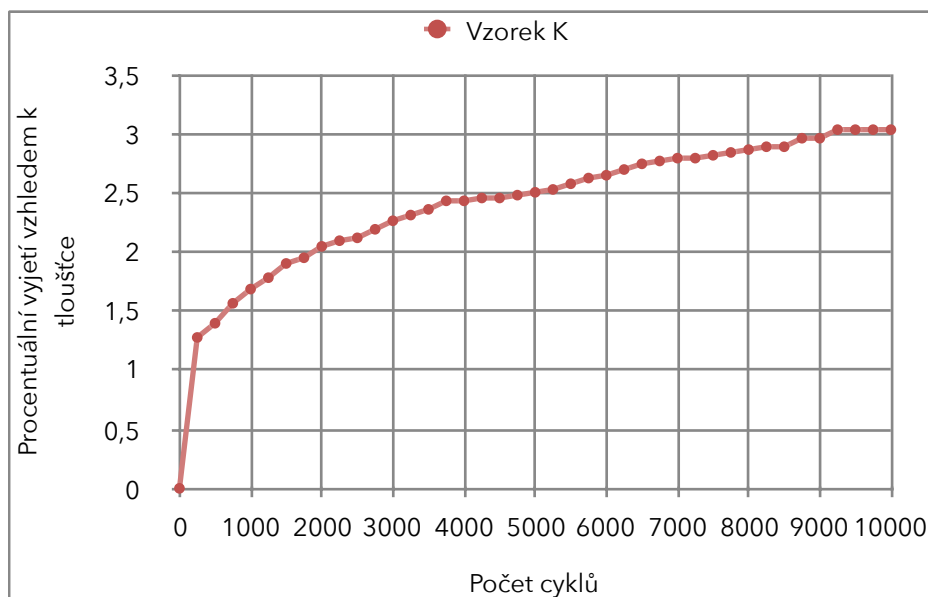
Graf 22 Naměřené hloubky vyjeté koleje s obsahem pojiva vzorku F



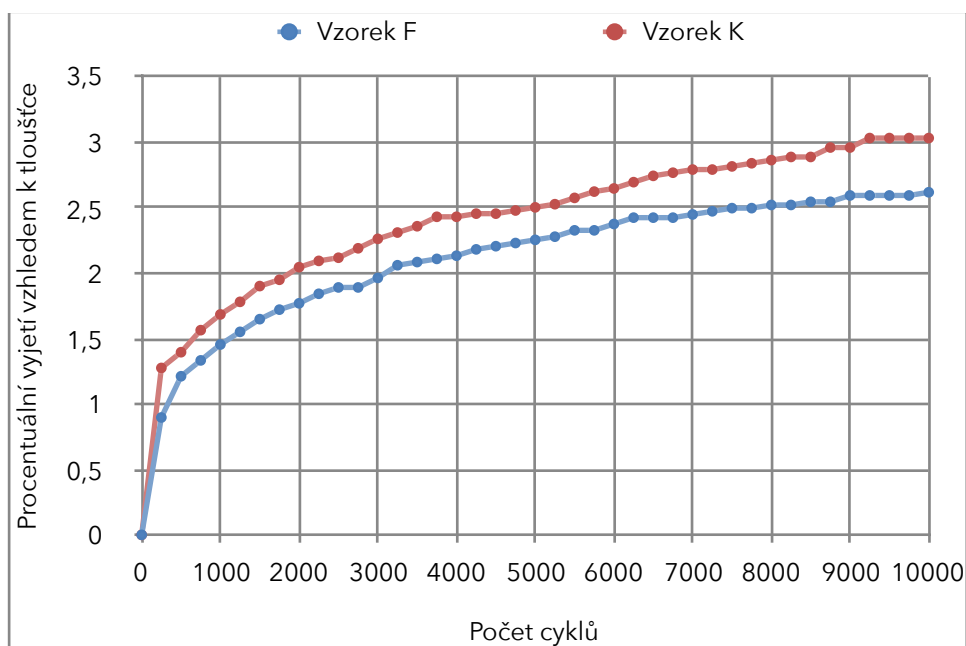
Tab. 19 Naměřené hloubky vyjeté koleje s obsahem pojiva vzorku K

Deska	Tloušťka [mm]	$Y_{s,10}$ [mm]	PRD_{AIR} [%]	WTS_{AIR} [mm/10 ³ cyklů]
vzorek K	41,53	1,26	3,48	0,044

Graf 23 Naměřené hloubky vyjeté koleje s obsahem pojiva vzorku K



Graf 24 Průběh hloubky vyjeté koleje obou desek

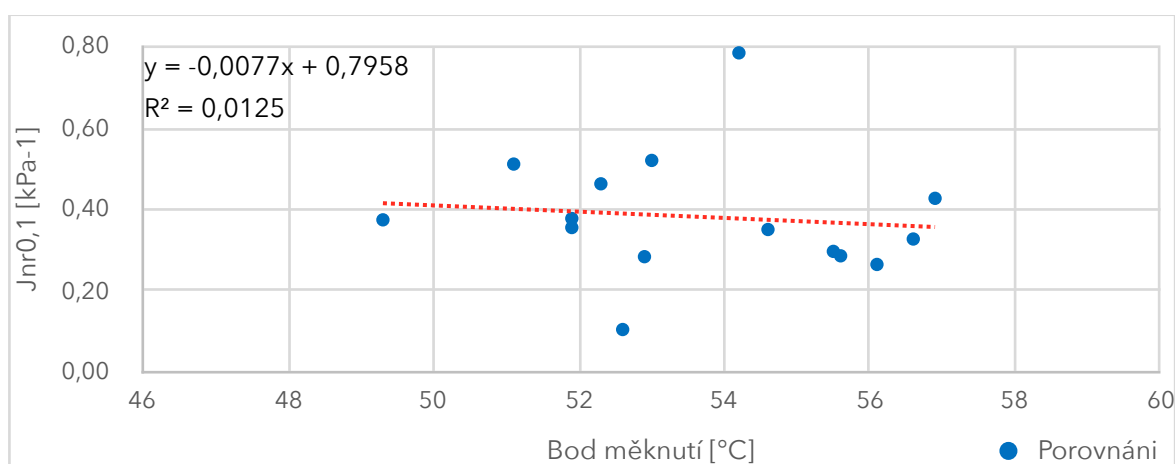


Po vyhodnocení zkoušky pojezd kolem byli zjištěny hloubky kolejí obou vzorků. Kde jak lze vidět z grafů u vzorku K (1,26 mm) byla hloubka vyjeté koleje větší než u vzorku F (1,08 mm).

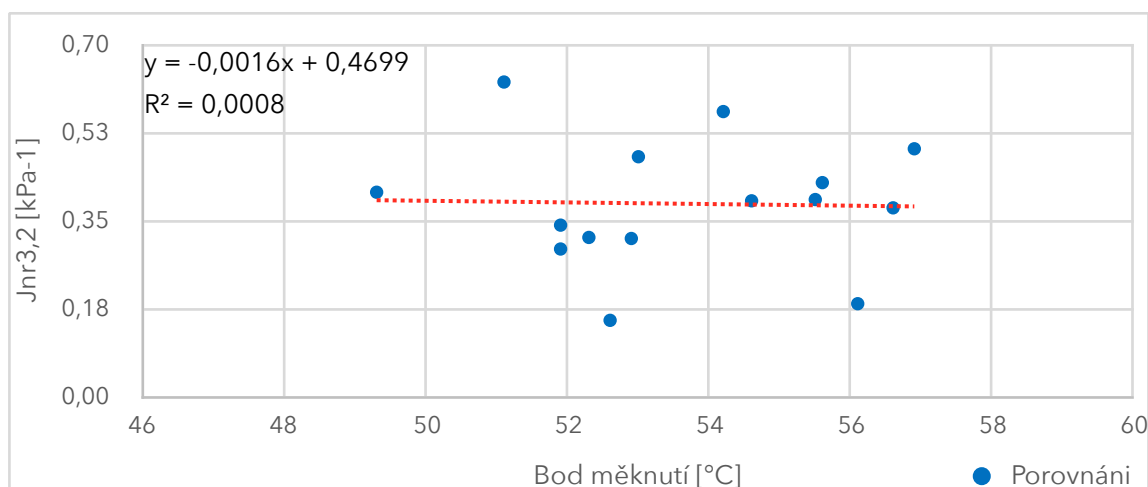
3.4 KORELACE MSCR A ZKOUŠKY BODU MĚKNUTÍ

V kapitole je zobrazena závislost výsledných hodnot ze zkoušky MSCR po metodě RTFOT a hodnoty po zkoušce bodu měknutí také po metodě RTFOT. Závislost zkoušek je zobrazena v následujících grafech. V grafu jsou jednotlivé korelační funkce a rovnice regresní funkce y s korelačním součinitelem R^2 . Pokud se korelační součinitel blíží k hodnotě 1, tak jde o silnou závislost. Pokud ovšem nastane opak a rovna se nule, pak neexistuje žádná závislost.

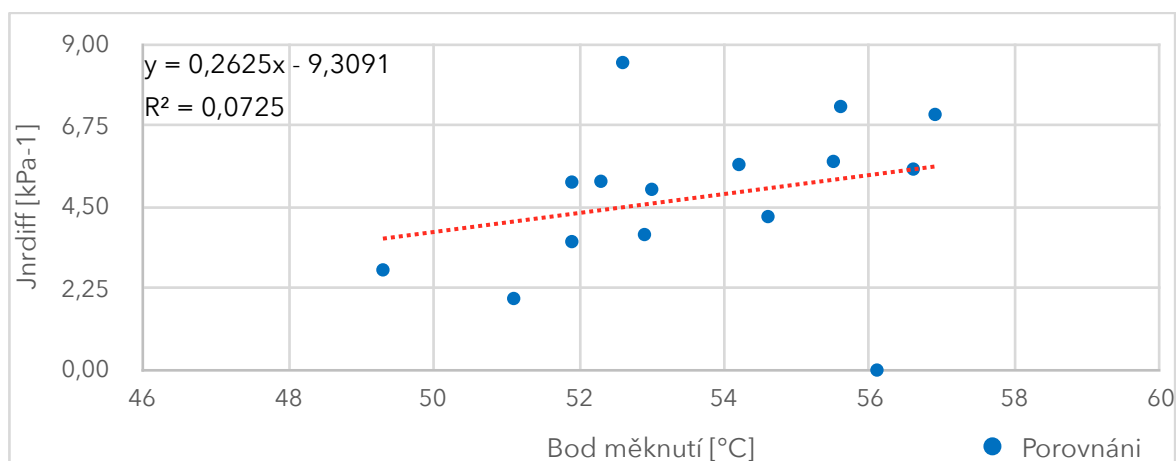
Graf 25 Korelace bodu měknutí s $J_{nr0,1}$ [kPa^{-1}]



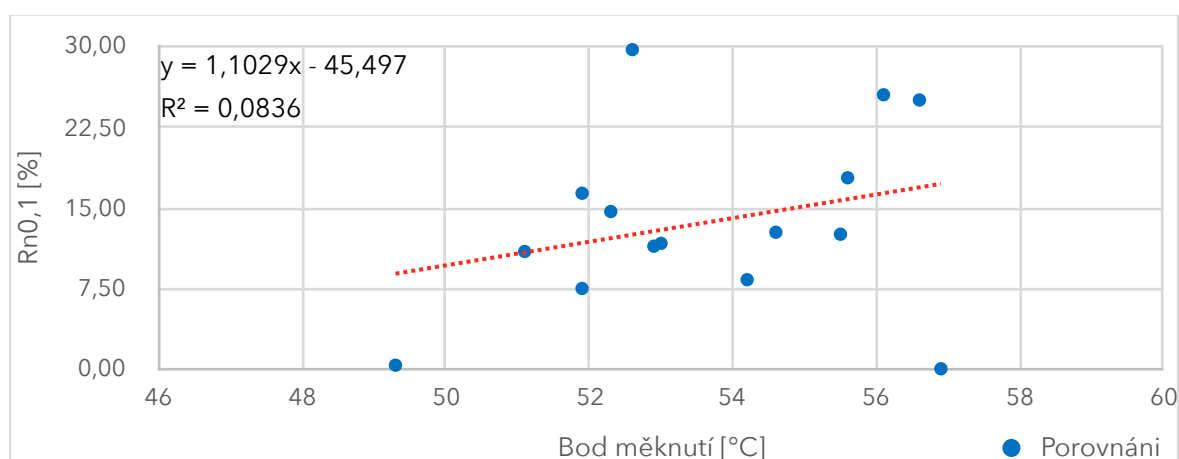
Graf 26 Korelace bodu měknutí s $J_{nr3,2}$ [kPa^{-1}]



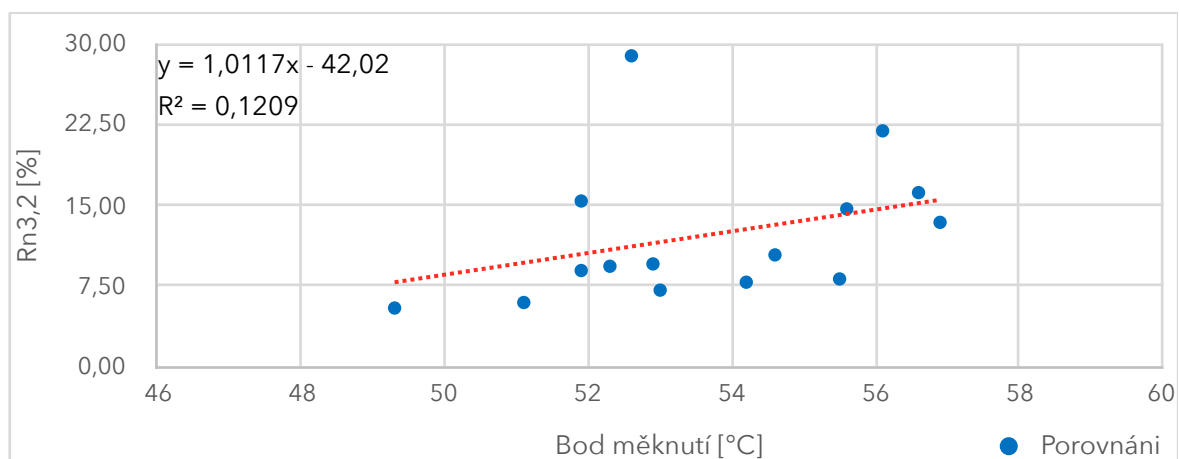
Graf 27 Korelace bodu měknutí s J_{nrdiff} [kPa^{-1}]



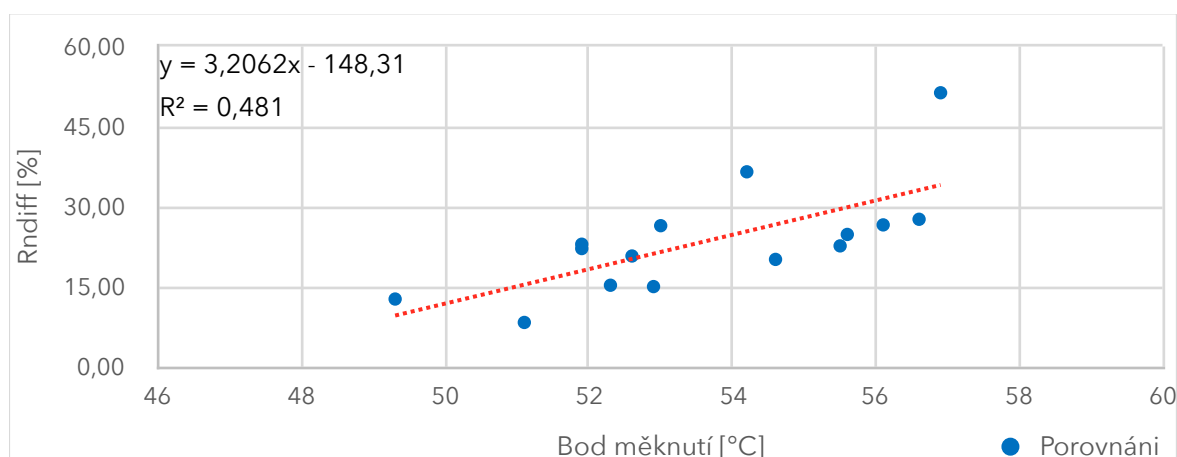
Graf 28 Korelace bodu měknutí s $R_{n0,1}$ [%]



Graf 29 Korelace bodu měknutí s $R_{n3,2}$ [%]



Graf 30 Korelace bodu měknutí s R_{ndiff} [%]



VYHODNOCENÍ

V grafu na ose x jsou vyneseny hodnoty bodu měknutí. Na ose y jsou výsledné hodnoty ze zkoušky MSCR získané pro teploty 46 °C, 52 °C a 58 °C. Tyto hodnoty jsou: průměrné elastické zotavení při zatížení 0,1 kPa ($R_{n0,1}$) a 3,2 kPa ($R_{n3,2}$) a jejich rozdíl (R_{ndiff}), dále je to smyková nevratná poddajnost opět při zatížení 0,1 kPa ($J_{nr0,1}$) a 3,2 kPa ($J_{nr3,2}$) a jejich rozdíl (J_{nrdiff}).

Za pomoci lineární křivky se určil korelační součinitel, kde ve všech grafech byla zjištěna korelace, která nabývala hodnoty blízké nule. Tudíž se prokázalo, že zkoušky mezi sebou nekorelují.

3.5 KORELACE MSCR S TRVALÝMI DEFORMACEMI

U zkoušky MSCR byl vzorek K vyhodnocen jako odolnější vůči trvalým deformacím a vzorek F jako náchylnější na tvorbu trvalých deformací. Tudíž tyto hodnoty vyšly obráceně a zkouška MSCR tak nepotvrzuje výsledné hodnoty zkoušky pojezd kolem. Tato anomálie byla pravděpodobně zapříčiněna chybou měření u asfaltové směsi. Aby se prokázalo tvrzení, že zkouška MSCR potvrzuje výsledky asfaltové směsi ze zkoušky pojezd kolem, muselo by se vykonat více měření.

4 ZÁVĚR

V bakalářské práci bylo vyhodnoceno 15 asfaltových pojiv, která byla podrobena zkoušce stanovení odolnosti proti tvorbě trvalých deformací a zestárlá metodou RTFOT. Každé pojivo bylo od jiného výrobce, z nichž 13 pojiv byla gradace 50/70 a dvě nabývala vyšší gradace o hodnotě 70/100. Tato pojiva byla podrobena zkouškám penetrace jehlou, bodu měknutí a MSCR.

První prováděnou empirickou zkouškou bylo stanovení penetrace jehlou. Tato zkouška byla provedena před a po stárnutí metodou RTFOT. Po vyhodnocení se zjistilo, že největší rozdíl hodnot před a po stárnutí RTFOT nabývali hodnoty s vyšší gradací a dále, že při působení stárnutí metodou RTFOT klesá penetrace asfaltového pojiva. Nutno zdůraznit, že při měření penetrace všechny pojiva vyhověla normovým požadavkům.

Další zkouškou prováděnou na pojivech byla zkouška bodu měknutí metodou kroužek kulička. Po stárnutí RTFOT došlo ke zvýšení bodu měknutí u všech pojiv, tudíž se snížila hranice oboru plasticity a pojiva se tím pádem stala náchylnějšími na tvorbu trvalých deformací.

Dále pojiva byla vystavena progresivní zkoušce MSCR. Tato zkouška byla v ČR přijata poměrně nedávno, a to v roce 2015. Vzhledem k této skutečnosti je zatím pro Evropu zpracován jen návrh normy a nejsou tak stanoveny limitní přijatelné hodnoty. Za pomoci této zkoušky, prováděné v dynamickém smykovém reometru za teplot 46 °C, 56 °C a 58 °C (teploty určené dle PG systému v USA) a při zatížení 0,1 kPa a 3,2 kPa, se diagnostikovala smyková poddajnost (J_{nr}) a elastické zotavení (R_n). Po vyhodnocení všech pojiv, obstálo v testu na elastickou plasticitu a smykové přetvoření nejlépe pojivo Litvínov 50/70 (vzorek M) naopak nejhorší výsledky vykazovalo pojivo TOTAL 50/70 (vzorek F). To znamená, že vzorek M by měl lépe odolat trvalým deformacím než vzorek F.

Aby se toto tvrzení potvrdilo, byly vyrobeny dvě desky z těchto pojiv. Bohužel v laboratoři nebylo k dispozici dostatečné množství pojiva vzorku M a muselo se při výrobě desky zvolit následující pojivo s podobnými výslednými

hodnotami z MSCR, a to pojivo Orlen 50/70 (vzorek K). Tyto desky byly podrobeny zkoušce pojíždění kolem, kdy výsledkem testu byly vyjeté koleje u vzorku K o hloubce 1,26 mm a u vzorku F o hloubce v hodnotě 1,08 mm.

Po korelaci MSCR a zkoušce pojezd kolem vyšly protichůdné výsledky. To znamená, že vzorek K by měl být odolnější vůči trvalým deformacím, ale po zkoušce vyjetí kolem hloubka kolejí byla větší než u vzorku F. Tato anomálie byla pravděpodobně způsobena chybou při výrobě asfaltové směsi. Tudíž se neprokázalo, že MSCR koreluje se zkouškou pojezd kolem. Aby se toto tvrzení ukázalo jako pravdivé, muselo by se provést více měření.

Dále se korelovala zkouška MSCR se zkouškou bod měknutí, ale vzhledem k nízkému korelačnímu součiniteli R^2 , který téměř nabýval hodnotu nula, se zjistilo, že metoda bod měknutí a MSCR spolu nekorelují.

5 SEZNAMY

5.1 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A ZDROJŮ

ODBORNÁ LITERATURA

- [1] STOKLÁSEK, Svatopluk. *Kapitola 1 - Stárnutí asfaltových poživ*, 2014
- [2] ZAJÍČEK, Jan a kolektiv, *Technologie vozovek*. Praha, 2014. ISBN 978-80-87438-59-6
- [3] STOKLÁSEK, Svatopluk. *MSCR: Multiple Stress Creep - Recovery Test*, 2013
- [4] PLITZ, Jiří. *Stárnutí silničních poživ*. Paramo a.s., Pardubice, 1997.

SKRIPTA A PŘEDNÁŠKY

- [5] VARAUS, Michal. *Pozemní komunikace II: Asfaltová pojiva*. Brno, 2005
- [6] HÝZL, Petr. *Návrh asfaltové směsi. (přednáška)* Brno, 2008: VUT FAST, Ústav stavebních komunikací
- [7] KABIR, S. Louisiana's Experience with Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test. (přednáška) Louisiana : Louisiana Transportation Conference, 2013

TECHNICKÉ NORMY

- [8] ČSN EN 1426, *Asfalty a asfaltová pojiva: Stanovení penetrace jehlou*. Praha: Český normalizační institut, 2007
- [9] ČSN EN 1427, *Asfalty a asfaltová pojiva: Stanovení bodu měknutí*. Praha: Český normalizační institut, 2007
- [10] ČSN 73 6160:2008 - *Zkoušení asfaltových poživ*, Praha: Český normalizační institut, 2008
- [11] ČSN EN 12 697 - 22 *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka Část 5: stanovení maximální objemové hmotnosti*
- [12] ČSN EN 12 697 - 22 *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa*

- [13] ČSN EN 12 697 – 22 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 22: Zkouška pojíždění kolem
- [14] ČSN 1097-5 Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva- stanovení vlhkosti sušení v sušárně
- [15] ČSN EN 12 697 – 33 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 33: Příprava zkušebních těles zhutňovačem desek. Praha: ČNI, 2007, 73s
- [16] ČSN EN 12 697 – 30 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka.- Část 33: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem. Praha: ČNI, 2007
- [17] ČSN EN 12697-30+A1. Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka-Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [18] ČSN EN 12697-8. Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka -Část 8: Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí. Praha: Český normalizační institut,2004.
- [19] ČSN EN 933-1+A1. Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1:Stanovení zrnitosti – síťový rozbor. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [20] ČSN EN 12697 - 34. Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka- Část 34: Marshallova zkouška. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [21] TP 82- Katalog poruch netuhých vozovek Brno: Ministerstvo dopravy ČR, 2010
- [22] EN 16659. Bituminen and Bituminous Binders: Multiple Stress Creep and Recovery Test (MSCRT). Brusel: CEN-CENELEC Management Centre, 2013
- [23] AASHTO T 350-14 AASHTO. Restitance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage. USA : T 283 - 03
- [24] Standard Method of Test for Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)

BAKALÁŘSKÉ A DIPLOMOVÉ PRÁCE

- [25] Střasáková, Monika. *Zkouška MSCR v dynamickém smykovém reometru*. Brno, 2014. 50 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce prof. Ing. Jan Kudrna, CSc.
- [26] PĚCH, Pavel. *Vliv přípravy vzorků na modul tuhosti asfaltových směsí*. Brno, 2012. 46 s., 50 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce doc. Dr. Ing. Michal Varaus.
- [27] ROUS, V. *Odolnost asfaltových pojiv proti stárnutí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací, 2012. 60 stran. Diplomová práce. Vedoucí práce: prof. Ing. Jan KUDRNA CSc.
- [28] Bc. Petr Hotař *Reologické vlastnosti asfaltových pojiv*. Brno, 2014. 73 str., 19 str. příloh. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce prof. Ing. Jan Kudrna, CSc.
- [29] COUFALÍK, Pavel. *Návrh a posouzení směsi pro asfaltové vrstvy se zvýšenou odolností proti šíření trhlin (SAL)*. Brno, 2012. 155 s., 67 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce prof. Ing. Jan Kudrna, CSc.
- [30] Bc. Bohumír Mucha *Asfaltové směsi s použitím vyššího množství R-materiálu*. Brno, 2014. 87 s., 21 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Dr. Ing. Michal Varaus

INTERNETOVÉ ZDROJE

- [31] http://homel.vsb.cz/~khe0007/opory/opory.php?stranka=asfalty_hodnoceni
- [32] VARAUS, Michal. Zkoušení odolnosti asfaltových směsí proti tvorbě trvalých deformací. 2009, č. 7 (cit. 2016-04-15). ISSN 1803-8441. Dostupné online z: <http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/zkouseni-odolnosti-asfaltovych-smesi-proti-tvorbe-trvalych-deformaci-v-triaxialni-komore/>
- [33] <http://www.fhwa.dot.gov/pavement/materials/pubs/hif11038/tb00.cfm>

5.2 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Metoda urychleného stárnutí RTFOT [1]	17
Tab. 2 Maximální rozdíl platných stanovení	19
Tab. 3 Ukázka PG systému v Americe při jedné teplotě [33]	24
Tab. 4 Meze zrnitosti kameniva	29
Tab. 5 Navážka pro asfaltovou směs	31
Tab. 6 Laboratorní označení použitých pojiv	42
Tab. 7 Penetrace jehlou	43
Tab. 8 Bod měknutí	45
Tab. 9 Úbytek asfaltového pojiva	46
Tab. 10 Vyhodnocení Jnr všech patnácti vzorků	51
Tab. 11 Vyhodnocení Rn všech patnácti vzorků	53
Tab. 12 Vyhodnocení Jnr vzorků F a K	55
Tab. 13 Vyhodnocení Rn vzorků F a K	56
Tab. 14 Vypočítané maximální objemové hmotnosti	57
Tab. 15 Naměřené hodnoty Marshallových těles	58
Tab. 16 Vypočítané hodnoty objemové hmotnosti	58
Tab. 17 Vypočítané hodnoty mezerovitosti	58
Tab. 18 Naměřené hloubky vyjeté koleje s obsahem pojiva vzorku F	59
Tab. 19 Naměřené hloubky vyjeté koleje s obsahem pojiva vzorku K	59

5.3 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Schéma destilace ropy	12
Obr. 2 Vymezení oboru použitelnosti asfaltu na teplotní ose	13
Obr. 3 Ukázka vyjeté koleje	14
Obr. 4 Laboratorní sušárna	16
Obr. 5 Sklenice naplněny pojivem	16
Obr. 6 Pohled do otevřené sušárny	16
Obr. 7 Skleněné nádoby po metodě RTFOT	17
Obr. 8 Penetrometr	18
Obr. 9 Vpich jehly do vzorku (vlevo), stupnice penetrometru (vpravo)	19

Obr. 10 Pomůcky při měření bodu měknutí	20
Obr. 11 Seříznutí vzorku	21
Obr. 12 Zkušební zařízení	21
Obr. 13 Propad vzorku	22
Obr. 14 Propad vzorku	22
Obr. 15 Vozovka rozdělená na 12 úseků [33]	23
Obr. 16 Dynamický smykový reometr zn. Kinexus	25
Obr. 17 Geometrie	26
Obr. 18 Silikonové formy	26
Obr. 19 Mezera 1 mm, mezi horní a dolní geometrii	27
Obr. 20 Vážení frakcí a filleru	31
Obr. 21 Přesné navážení frakce a filerů	31
Obr. 22 Obalování zrn asfaltovým pojivem	32
Obr. 23 Formy Marshallových těles	33
Obr. 24 Marshall tělesa (vlevo), lis s Marshallovým tělesem (vpravo)	33
Obr. 25 Tvar a popis pyknometru	34
Obr. 26 Exsikátor	35
Obr. 27 Marshallové těleso ponořené ve vodní lázni	36
Obr. 28 Vsypaní asfaltové směsi do zhutňovače	38
Obr. 29 Zhuňovače a lamely	39
Obr. 30 Zkušební desky	39
Obr. 31 Přístroj na vyjetí kolejí	40
Obr. 32 Uchycení desky ve formě	40
Obr. 33 Deska před zkouškou pojezd kolem	41
Obr. 34 Deska po zkoušce pojezd kolem	41

5.4 SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Průběh cyklů při 0,1 kPa a 3,2 kPa [25]	25
Graf 2 Průběh zkoušky MSCR [25]	25
Graf 3 Průběh přetvoření [29]	27
Graf 4 Čára zrnitosti	29
Graf 5 Penetrace jehlou	44

Graf 6 Bod měknutí	45
Graf 7 Úbytek asfaltového pojiva	47
Graf 8 Průběh zkoušky u vzorku F	48
Graf 9 Výřez vzorku F při 0,1 kPa	48
Graf 10 Průběh zkoušky u vzorku K	49
Graf 11 Výřez vzorku K při 0,1 kPa	49
Graf 12 Průběh zkoušky MSCR vzorků F a K	50
Graf 13 Výřez jednoho cyklu	50
Graf 14 Vyhodnocení $J_{nr0,1}$ všech patnácti vzorků	51
Graf 15 Vyhodnocení $J_{nr3,2}$ všech patnácti vzorků	52
Graf 16 Vyhodnocení $J_{nr diff}$ všech patnácti vzorků	52
Graf 17 Vyhodnocení $R_{n0,1}$ všech patnácti vzorků	53
Graf 18 Vyhodnocení $R_{n3,2}$ všech patnácti vzorků	54
Graf 19 Vyhodnocení $R_{n diff}$ všech patnácti vzorků	54
Graf 20 Vyhodnocení J_{nr} vzorků F a K	55
Graf 21 Vyhodnocení R_n vzorků F a K	56
Graf 22 Naměřené hloubky vyjeté koleje s obsahem pojiva vzorku F	59
Graf 23 Naměřené hloubky vyjeté koleje s obsahem pojiva vzorku K	59
Graf 24 Průběh hloubky vyjeté koleje obou desek	60
Graf 25 Korelace bodu měknutí s $J_{nr0,1}$ [kPa-1]	61
Graf 26 Korelace bodu měknutí s $J_{nr3,2}$ [kPa-1]	61
Graf 27 Korelace bodu měknutí s $J_{nr diff}$ [kPa-1]	62
Graf 28 Korelace bodu měknutí s $R_{n0,1}$ [%]	62
Graf 29 Korelace bodu měknutí s $R_{n3,2}$ [%]	62
Graf 30 Korelace bodu měknutí s $R_{n diff}$ [%]	63
Graf 31 Průběh zkoušky u vzorku A	74
Graf 32 Výřez vzorku A při 0,1 kPa	74
Graf 33 Průběh zkoušky u vzorku B	75
Graf 34 Výřez vzorku B při 0,1 kPa	75
Graf 35 Průběh zkoušky u vzorku C	76
Graf 36 Výřez vzorku C při 0,1 kPa	76
Graf 37 Průběh zkoušky u vzorku D	77
Graf 38 Výřez vzorku D při 0,1 kPa	77

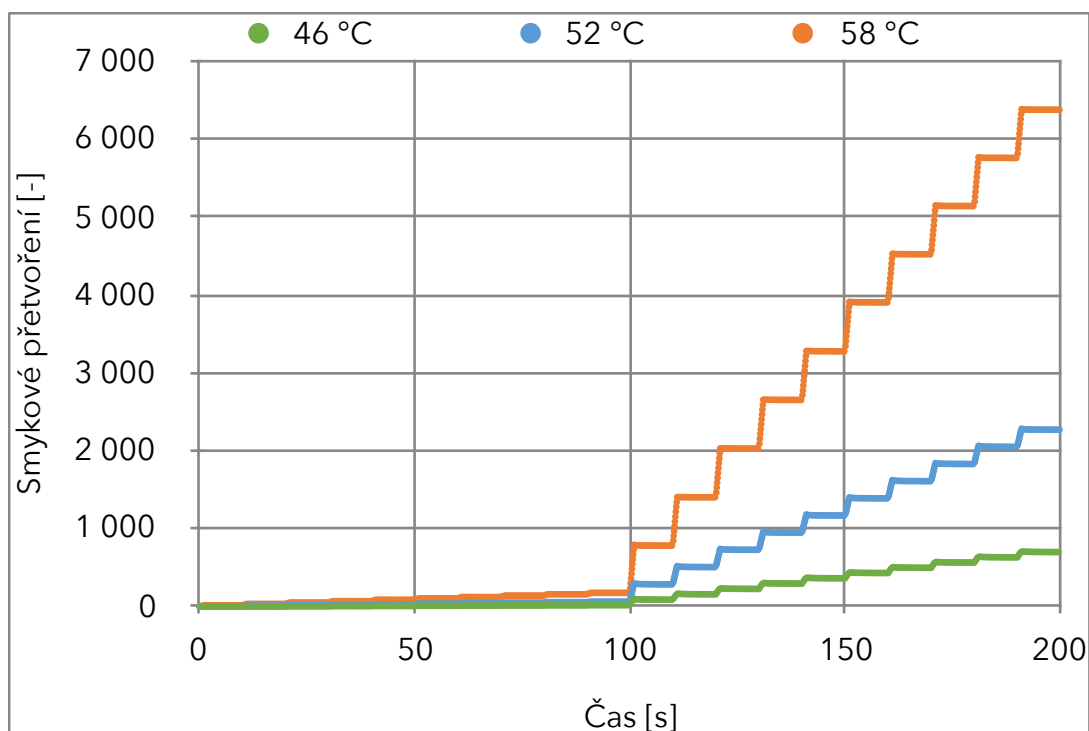
Graf 39 Průběh zkoušky u vzorku E	78
Graf 40 Výřez vzorku E při 0,1 kPa	78
Graf 41 Průběh zkoušky u vzorku G	79
Graf 42 Výřez vzorku G při 0,1 kPa	79
Graf 43 Průběh zkoušky u vzorku H	80
Graf 44 Výřez vzorku H při 0,1 kPa	80
Graf 45 Průběh zkoušky u vzorku I	81
Graf 46 Výřez vzorku I při 0,1 kPa	81
Graf 47 Průběh zkoušky u vzorku J	82
Graf 48 Výřez vzorku J při 0,1 kPa	82
Graf 49 Průběh zkoušky u vzorku L	83
Graf 50 Výřez vzorku L při 0,1 kPa	83
Graf 51 Průběh zkoušky u vzorku M	84
Graf 52 Výřez vzorku M při 0,1 kPa	84
Graf 53 Průběh zkoušky u vzorku N	85
Graf 54 Výřez vzorku N při 0,1 kPa	85
Graf 55 Průběh zkoušky u vzorku O	86
Graf 56 Výřez vzorku O při 0,1 kPa	86

5.5 SEZNAM PŘÍLOH

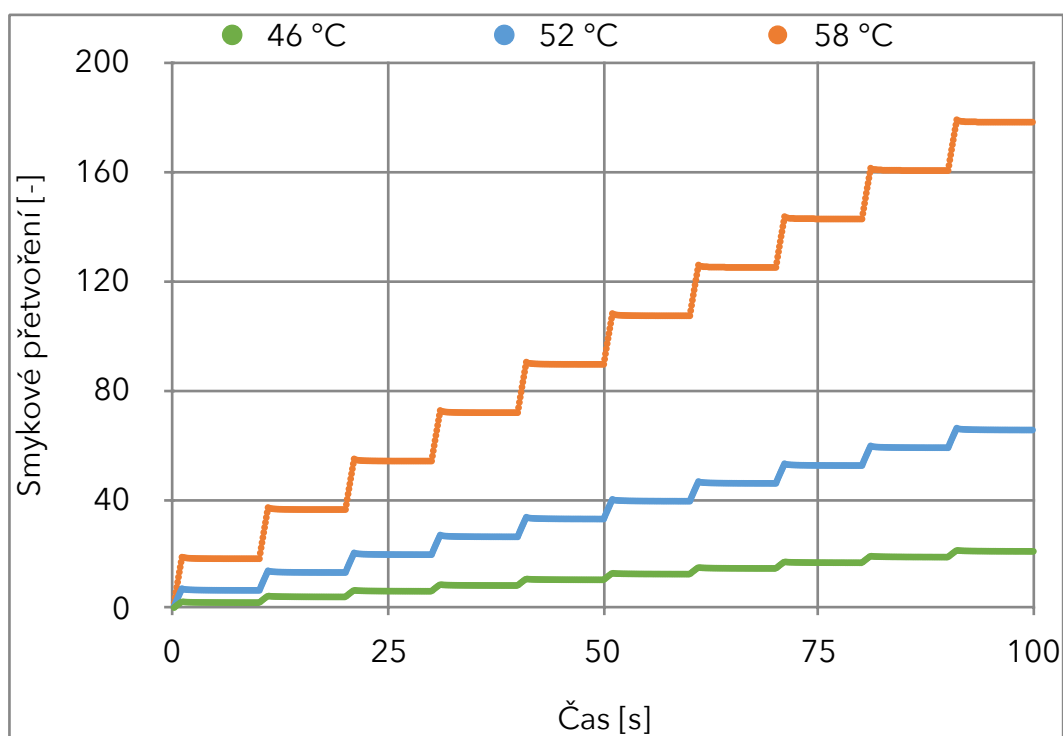
Příloha č. 1 - Průběhy zkoušek MSCR u ostatních vzorků	74
--	----

Příloha č. 1 - Průběhy zkoušek MSCR u ostatních vzorků

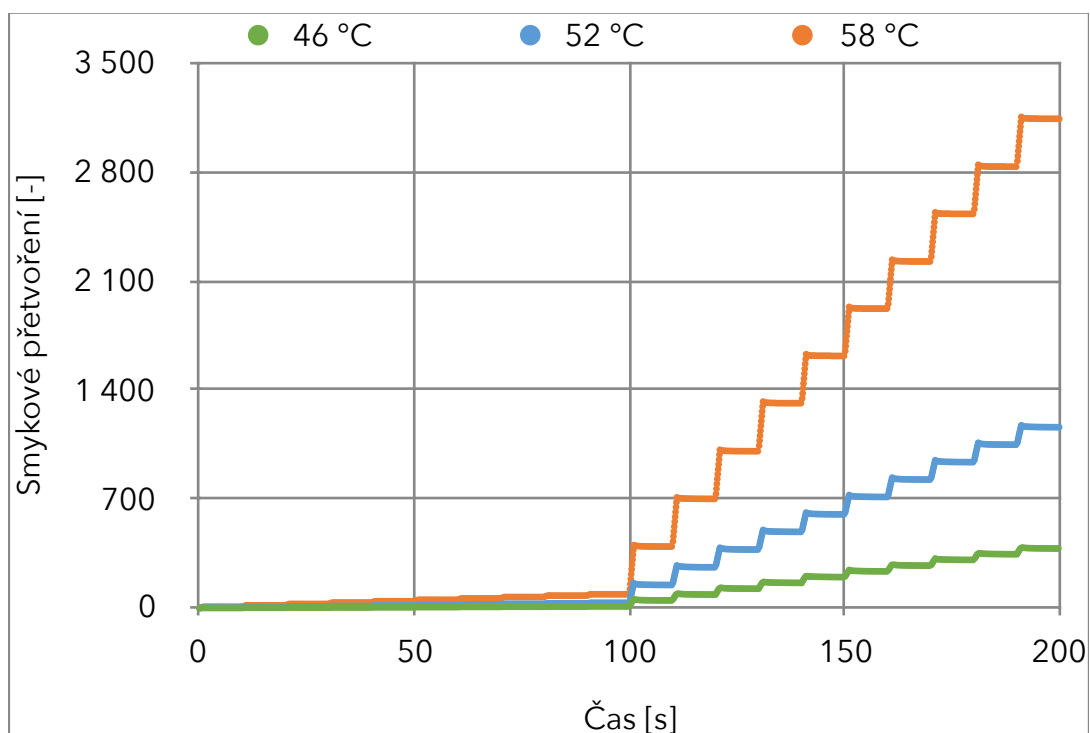
Graf 31 Průběh zkoušky u vzorku A



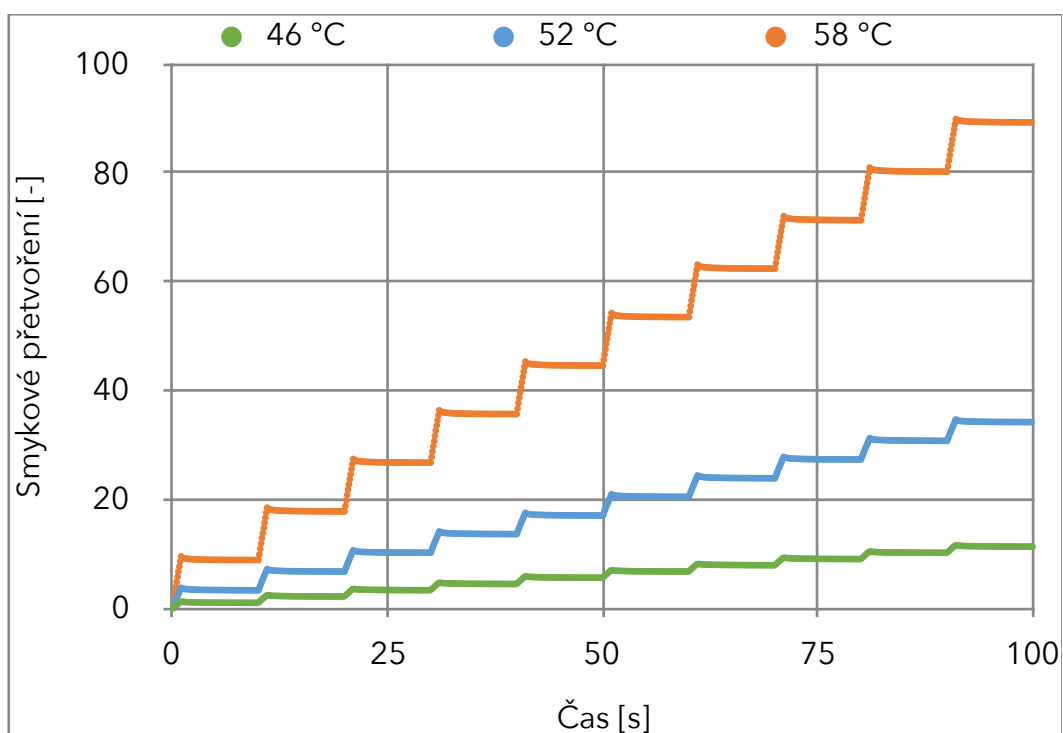
Graf 32 Výřez vzorku A při 0,1 kPa



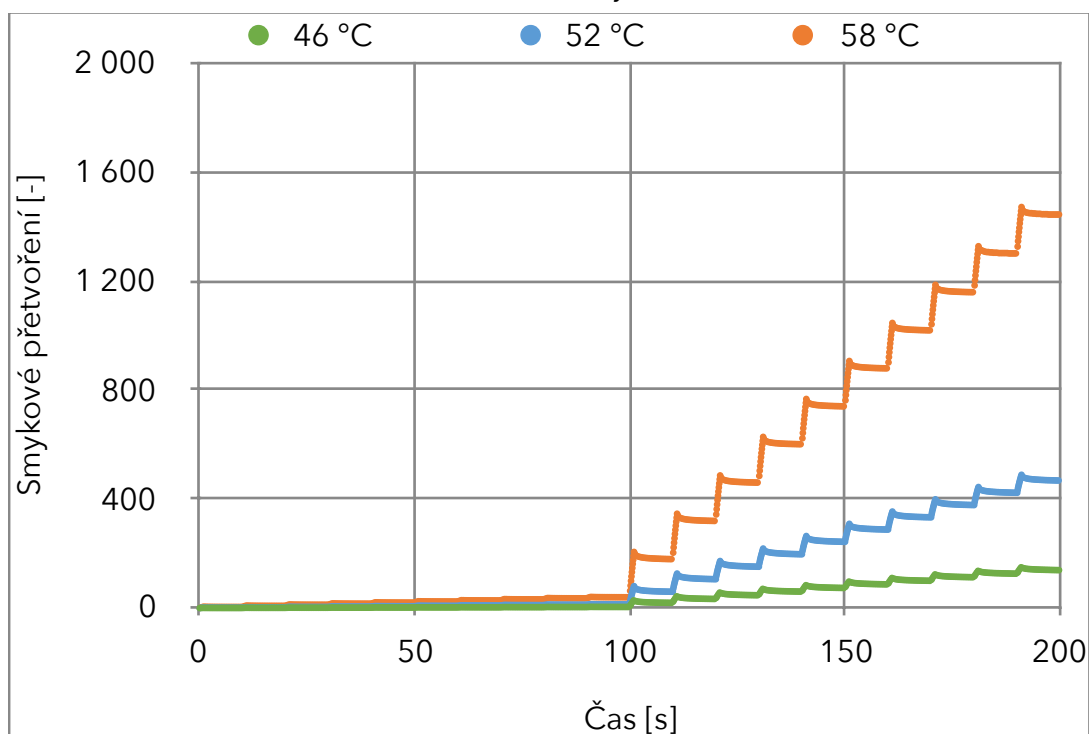
Graf 33 Průběh zkoušky u vzorku B



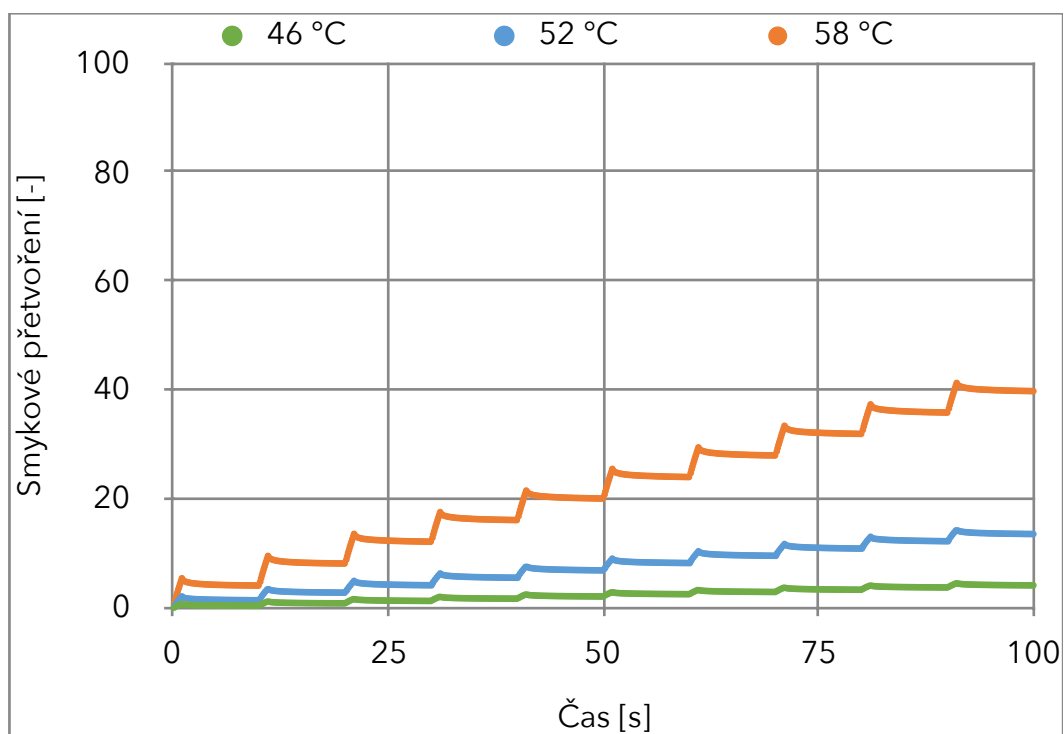
Graf 34 Výřez vzorku B při 0,1 kPa



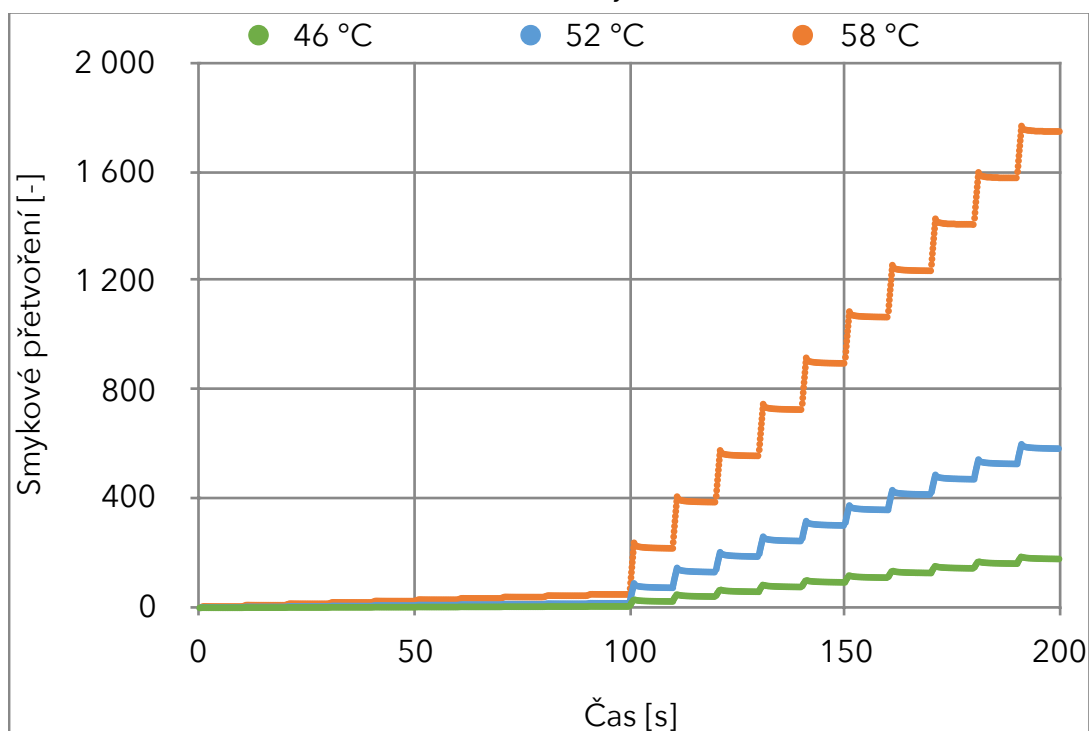
Graf 35 Průběh zkoušky u vzorku C



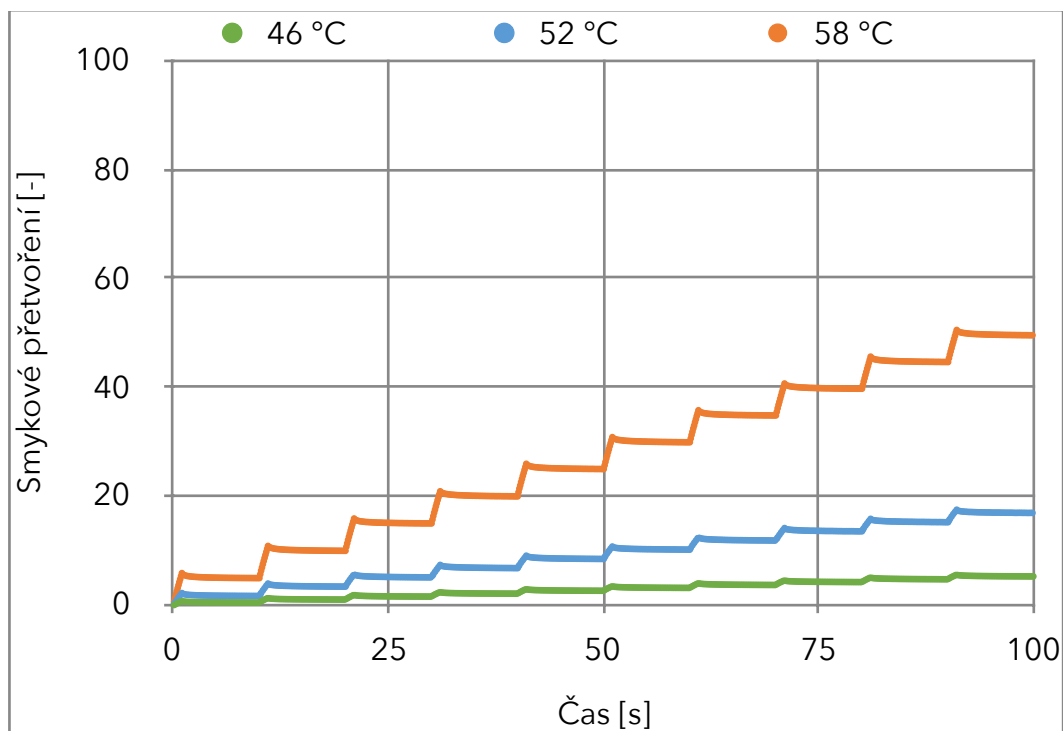
Graf 36 Výřez vzorku C při 0,1 kPa



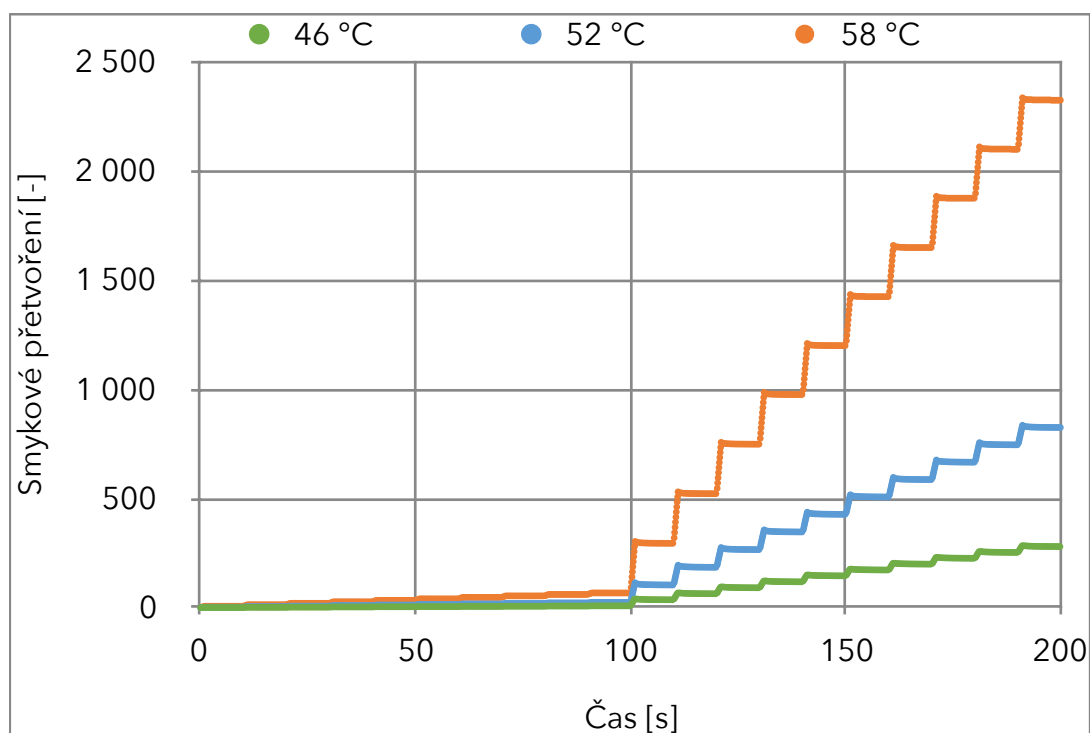
Graf 37 Průběh zkoušky u vzorku D



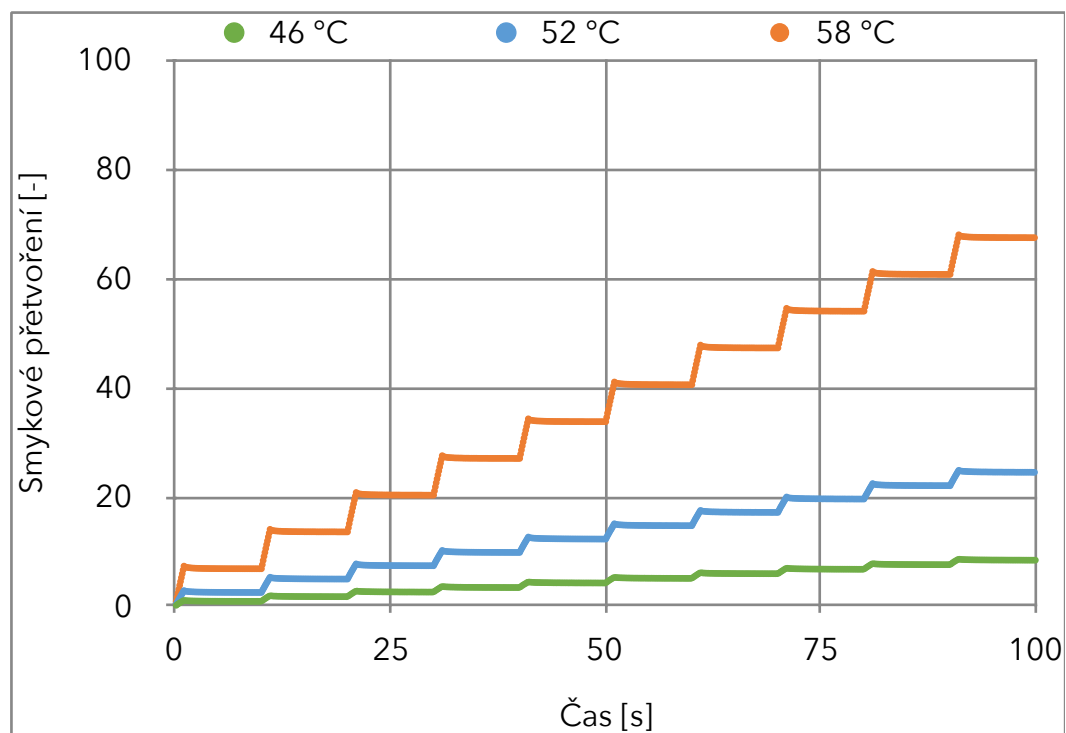
Graf 38 Výřez vzorku D při 0,1 kPa



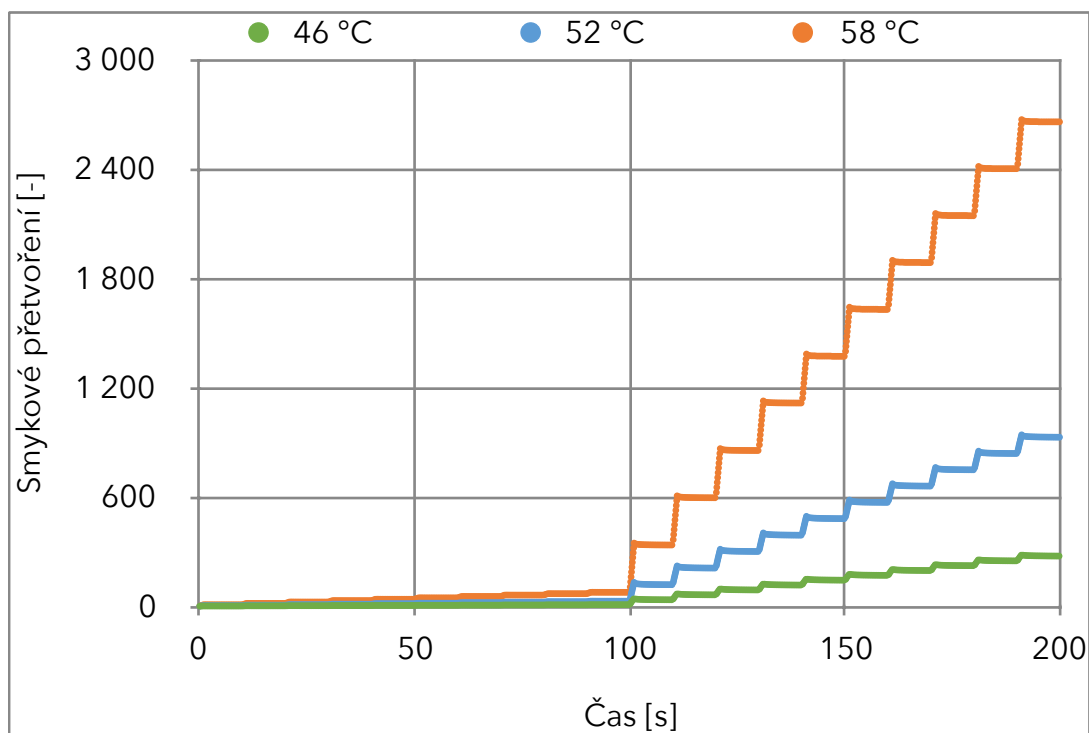
Graf 39 Průběh zkoušky u vzorku E



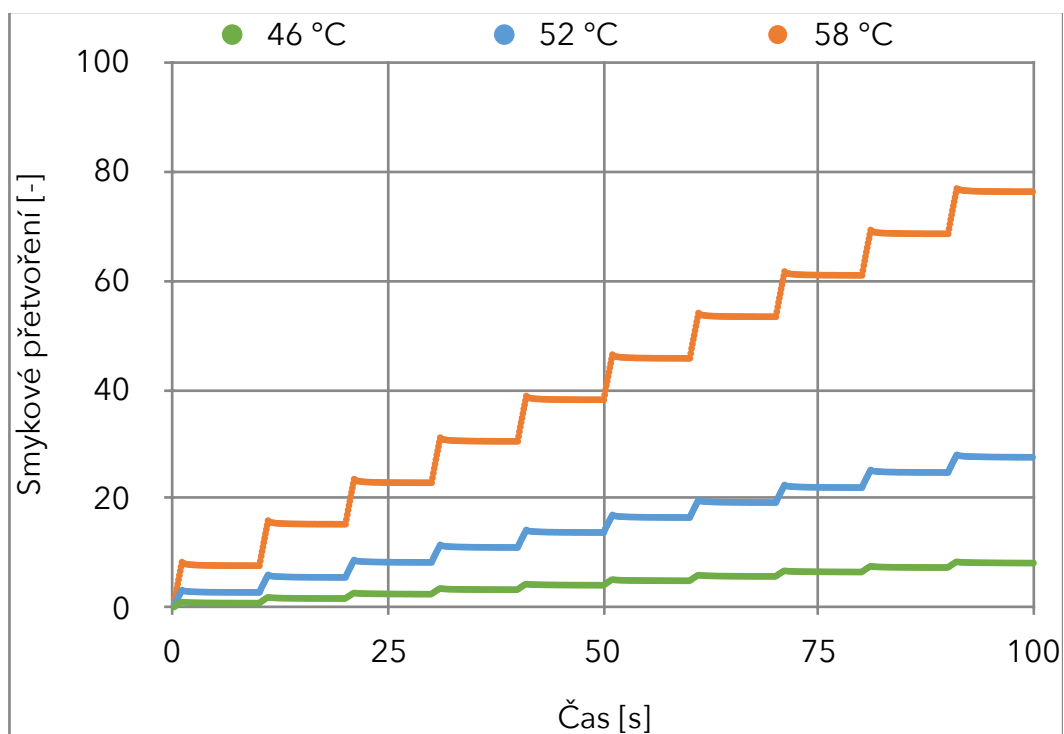
Graf 40 Výřez vzorku E při 0,1 kPa



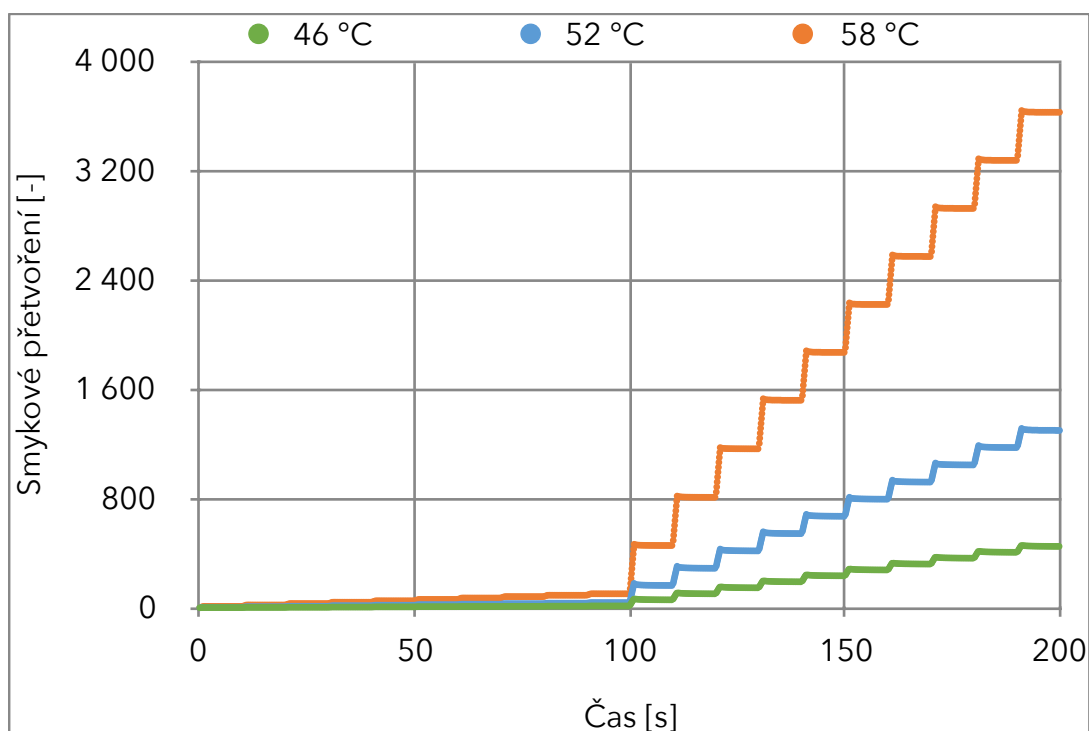
Graf 41 Průběh zkoušky u vzorku G



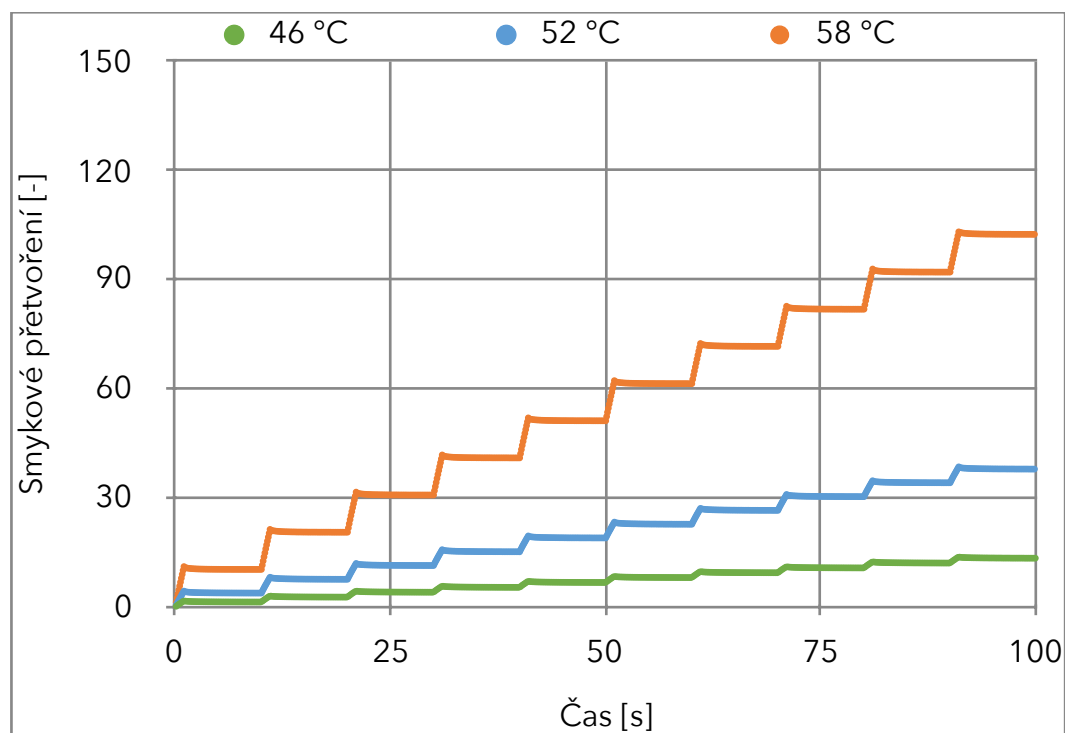
Graf 42 Výřez vzorku G při 0,1 kPa



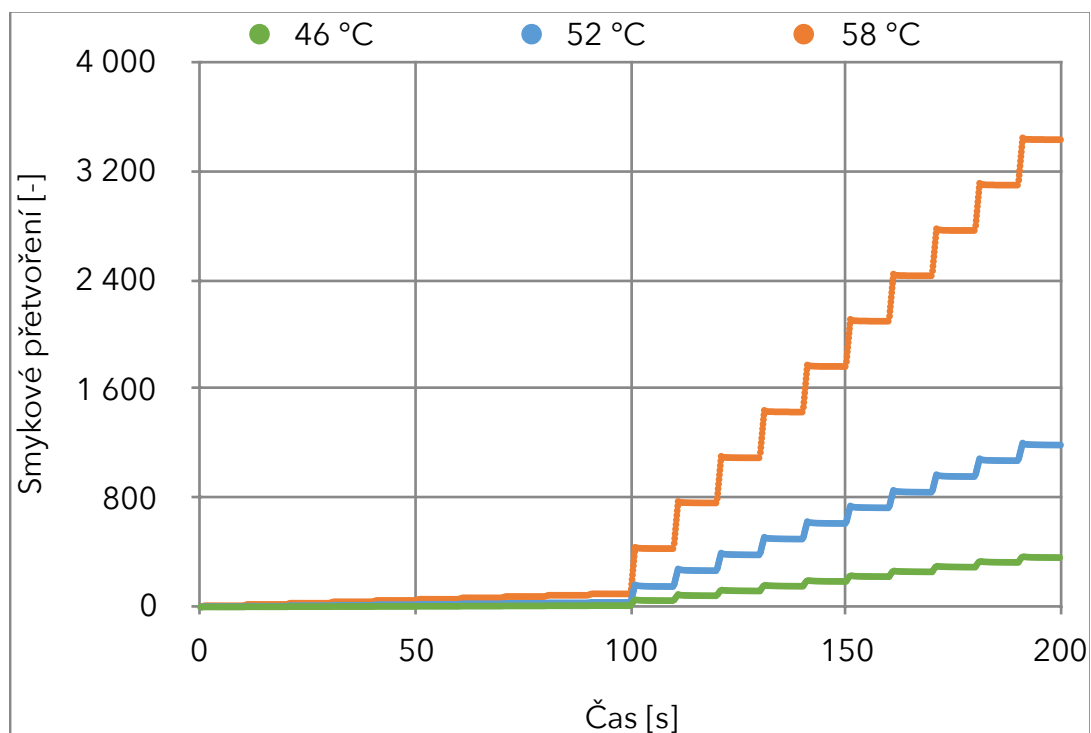
Graf 43 Průběh zkoušky u vzorku H



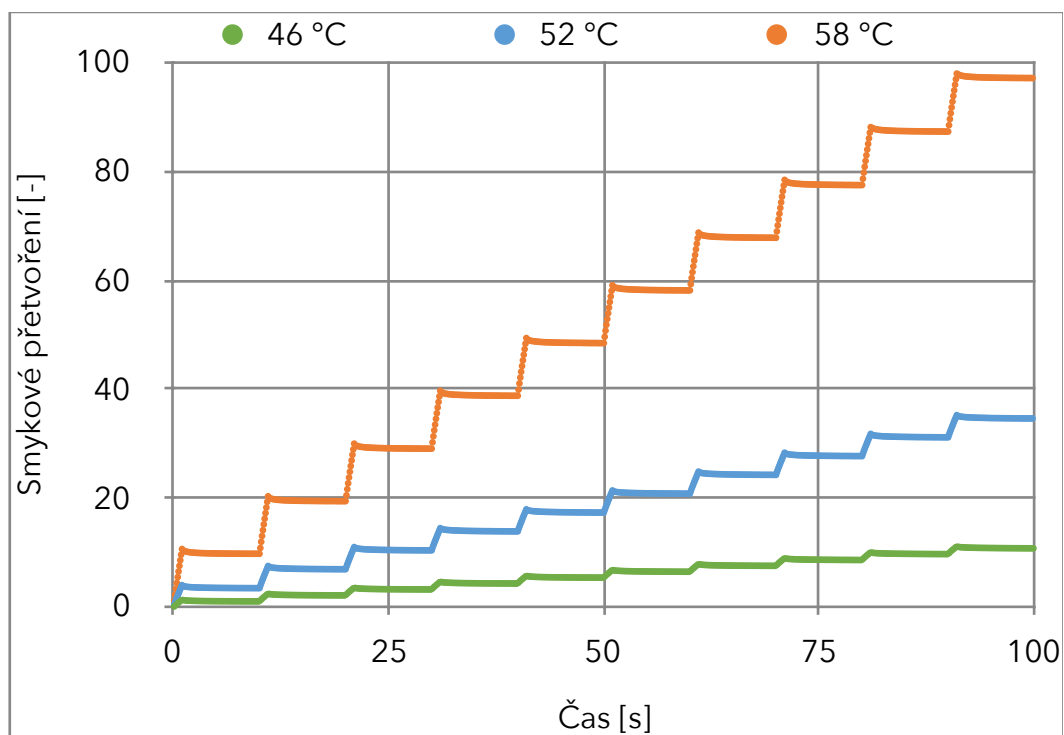
Graf 44 Výřez vzorku H při 0,1 kPa



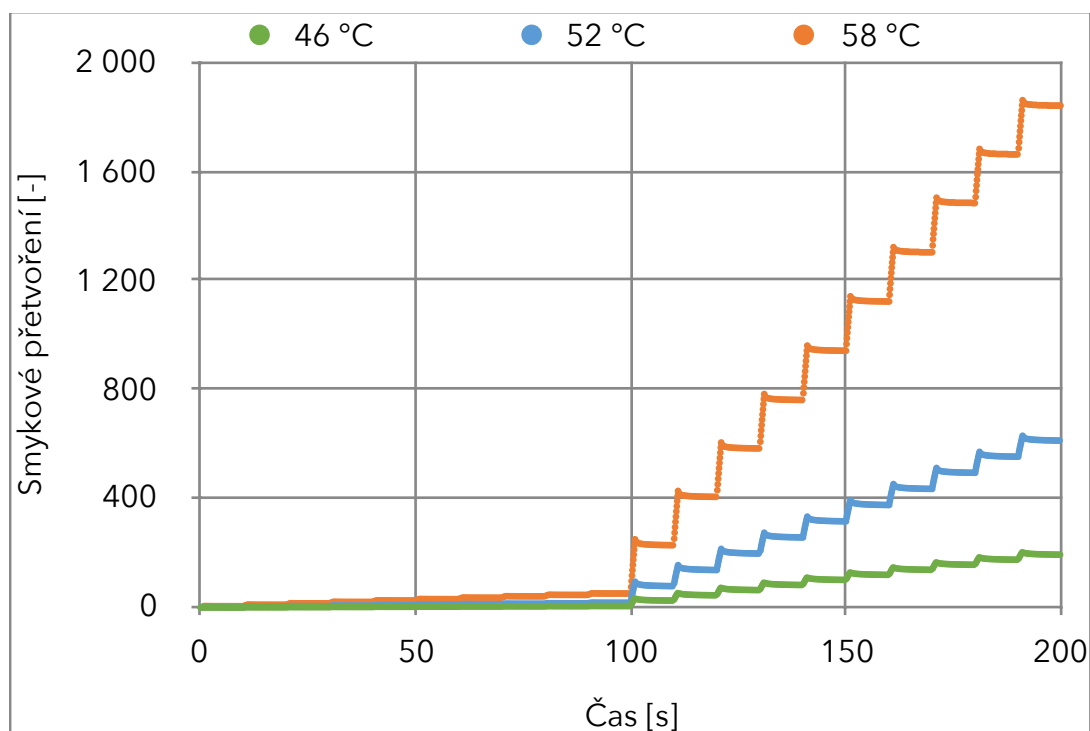
Graf 45 Průběh zkoušky u vzorku I



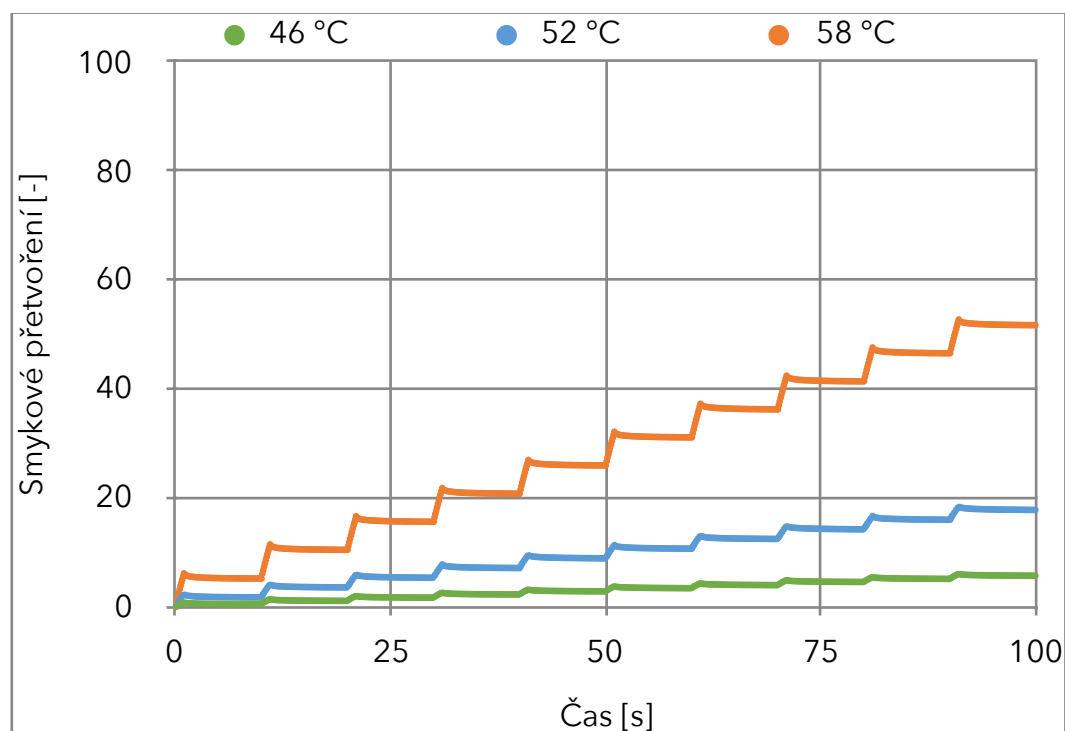
Graf 46 Výřez vzorku I při 0,1 kPa



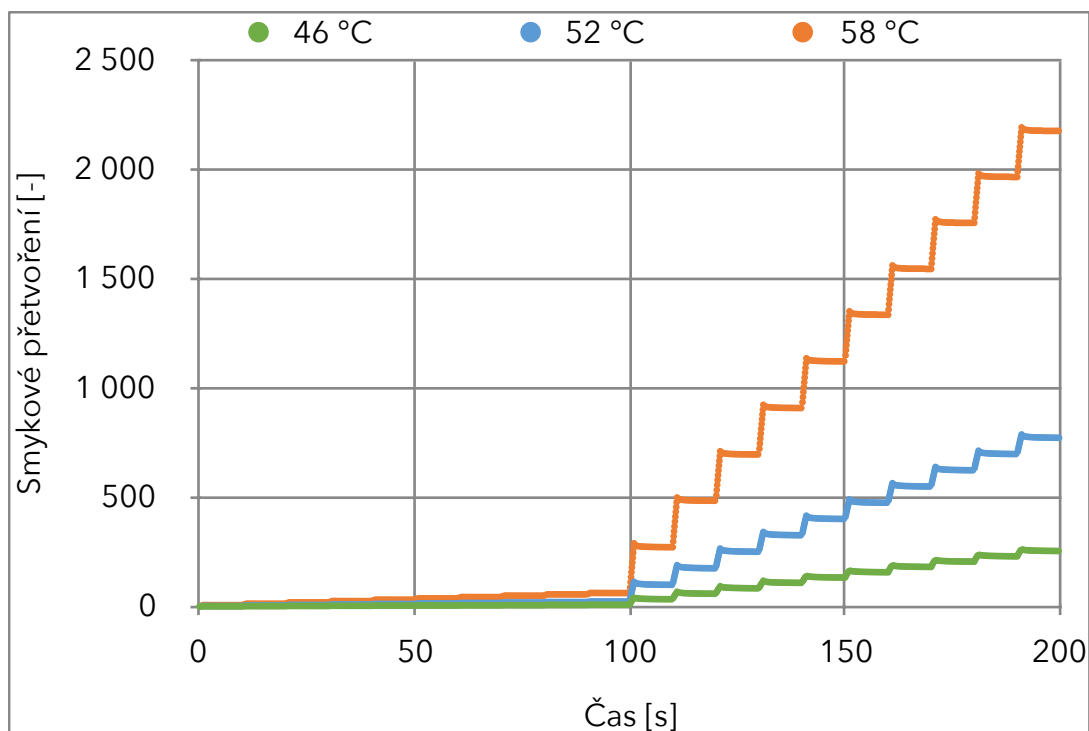
Graf 47 Průběh zkoušky u vzorku J



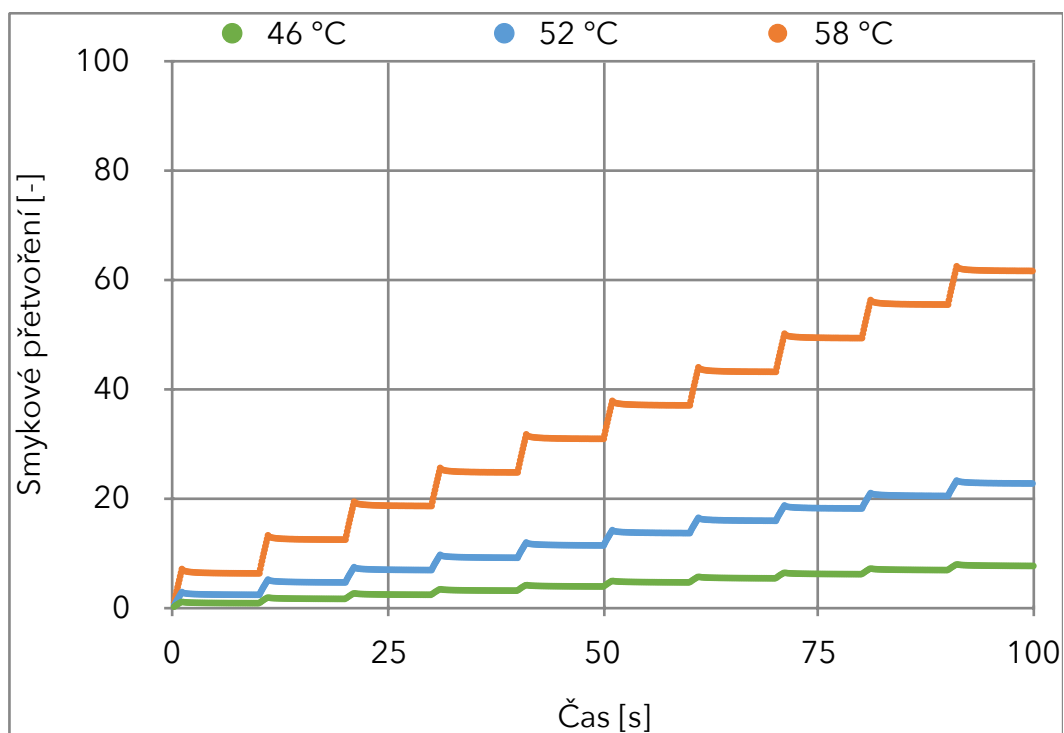
Graf 48 Výřez vzorku J při 0,1 kPa



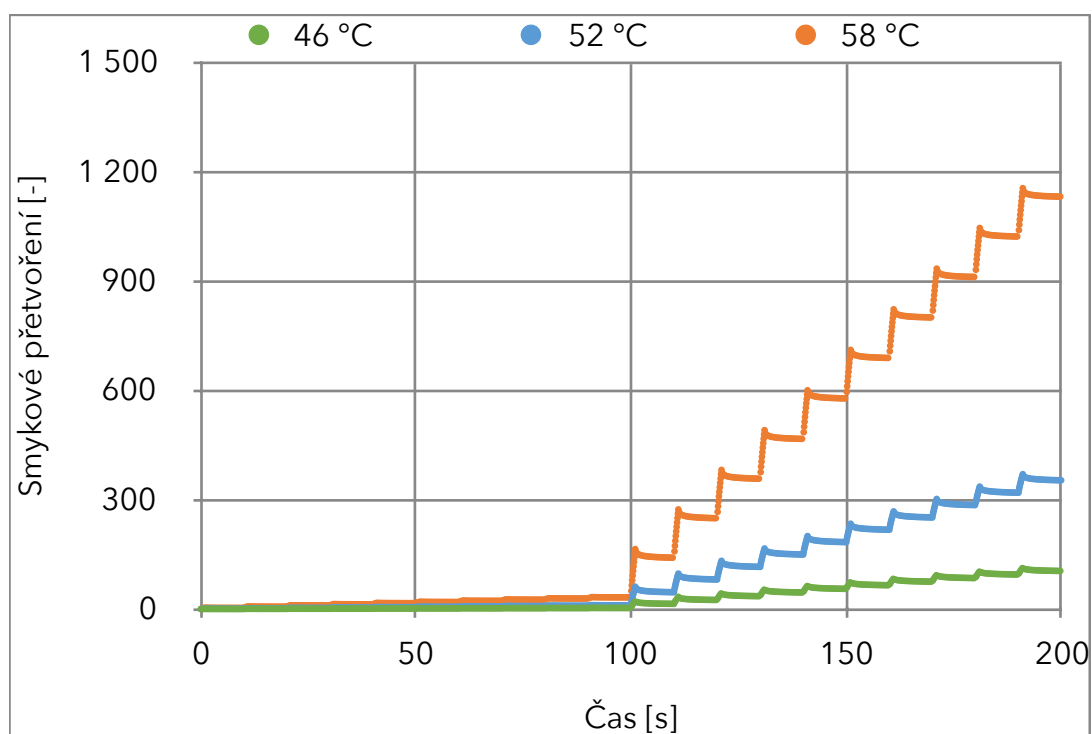
Graf 49 Průběh zkoušky u vzorku L



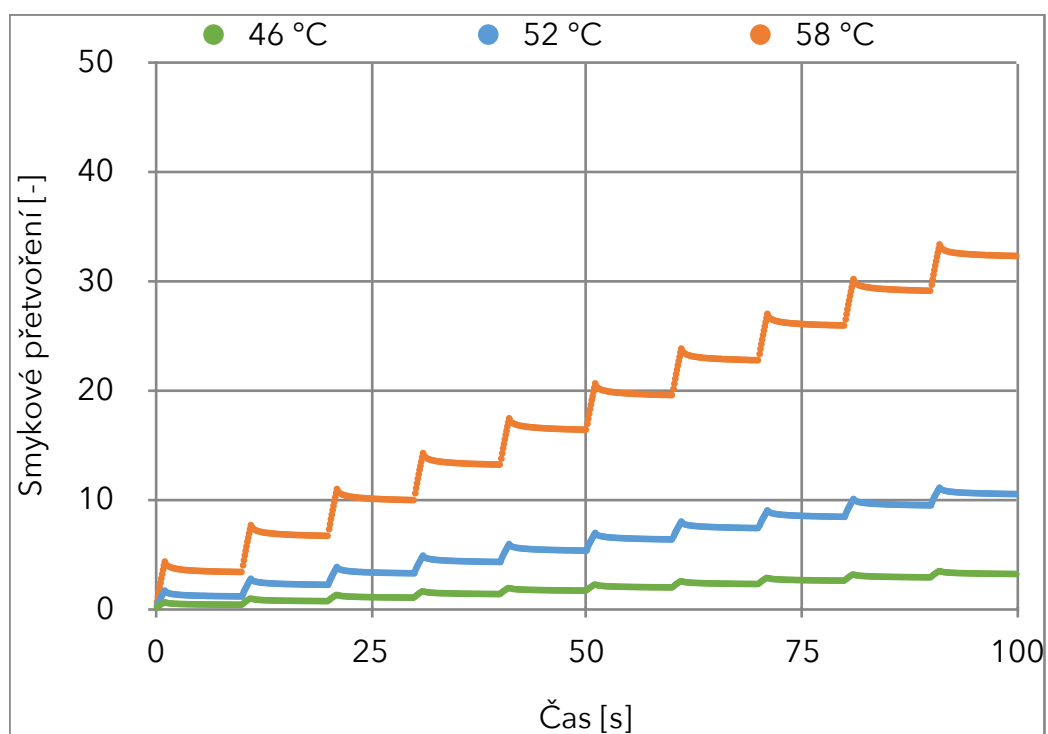
Graf 50 Výřez vzorku L při 0,1 kPa



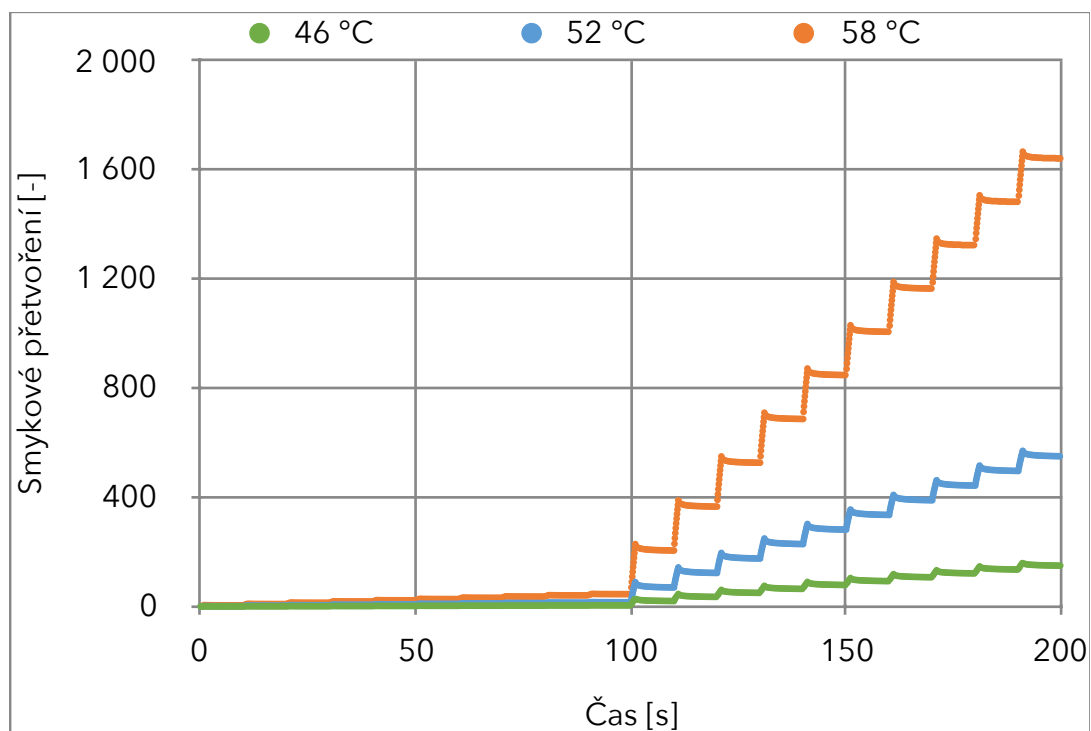
Graf 51 Průběh zkoušky u vzorku M



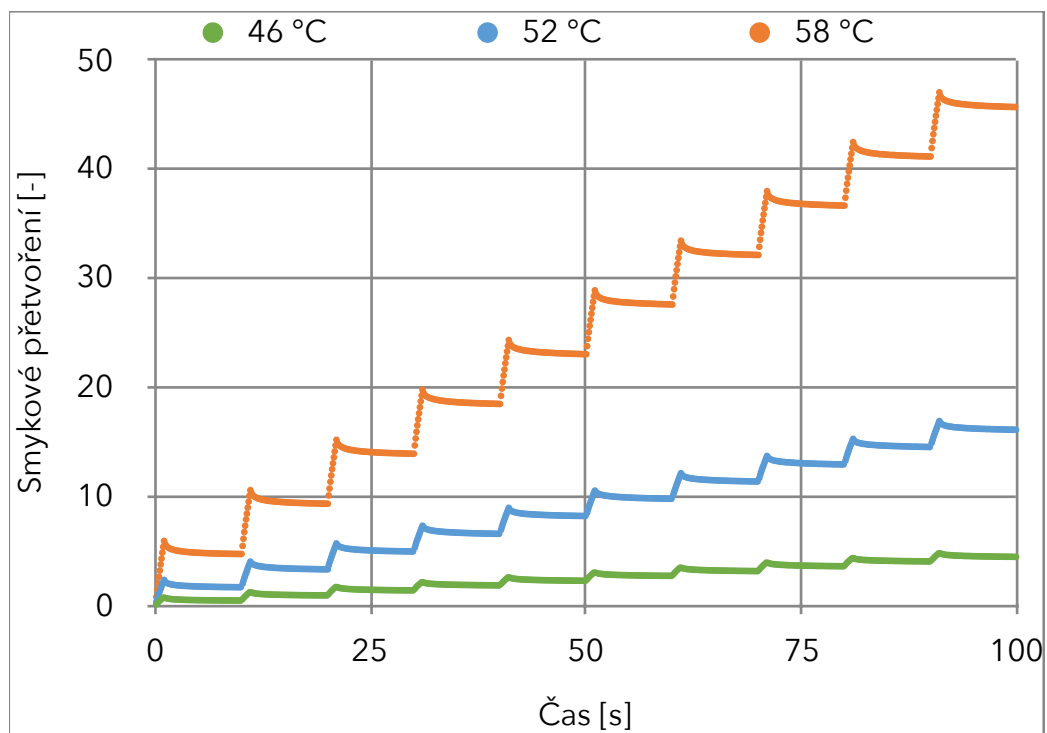
Graf 52 Výřez vzorku M při 0,1 kPa



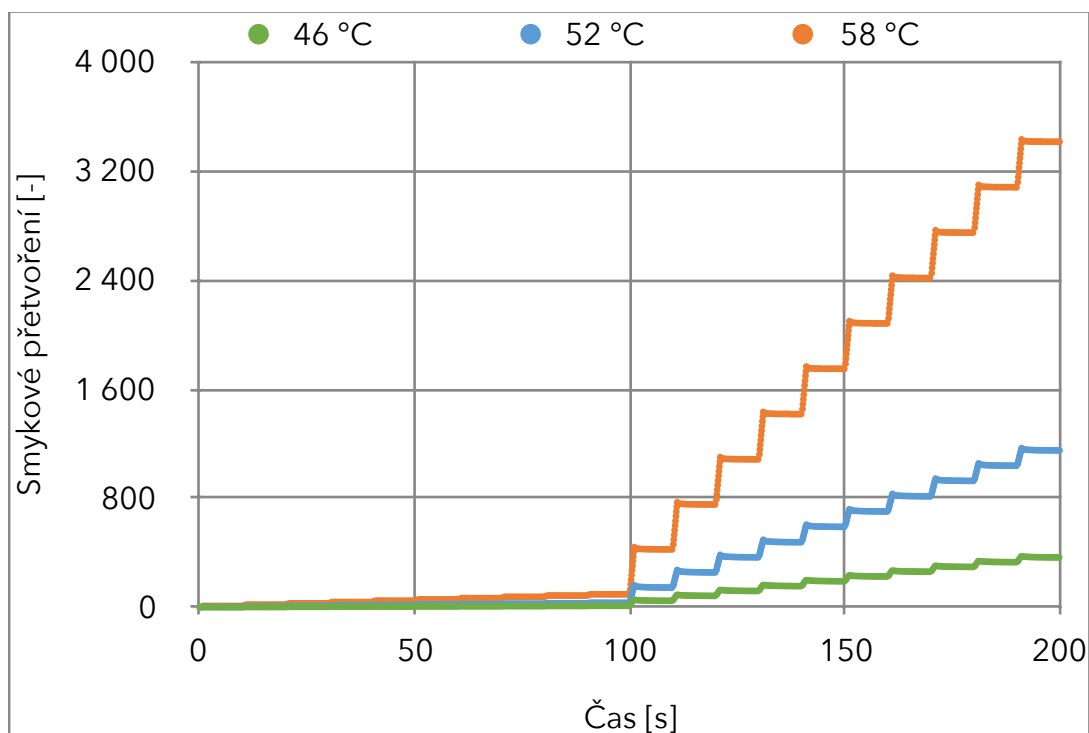
Graf 53 Průběh zkoušky u vzorku N



Graf 54 Výřez vzorku N při 0,1 kPa



Graf 55 Průběh zkoušky u vzorku O



Graf 56 Výřez vzorku O při 0,1 kPa

