



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

REJUVENAČNÍ PŘÍSAKY V RECYKLOVANÉM ASFALTOVÉM MATERIÁLU

REJUVENATORS IN RECYCLED ASPHALT MATERIAL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

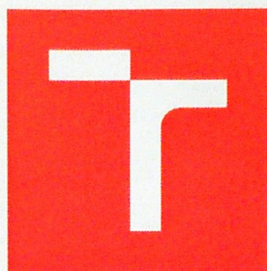
Marek Klein

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR HÝZL, Ph.D.

BRNO 2017



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 **Marek Klein**

NÁZEV **Rejuvenační přísady v recyklovaném
asfaltovém materiálu**

VEDOUcí BAKALÁŘSKÉ PRÁCE **Ing. Petr Hýzl, Ph.D.**

DATUM ZADÁNÍ **30. 11. 2016**

DATUM ODEVZDÁNÍ **26. 5. 2017**

V Brně dne 30. 11. 2016

doc. Dr. Ing. Michal Varaus
Vedoucí ústavu



N. a.

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

PODKLADY A LITERATURA

ČSN EN 13108-8 Asfaltové směsi - Specifikace pro materiály - Část 8:R-materiál

ČSN EN 13108-1 Asfaltové směsi - Specifikace pro materiály -

Část 1: Asfaltový beton

ČSN 73 6121 Stavba vozovek - Vrstvy z hutněných asfaltových směsí - Provádění a kontrola shody

Firemní materiály

Internetové zdroje

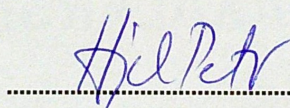
ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ (ZADÁNÍ, CÍLE PRÁCE, POŽADOVANÉ VÝSTUPY)

V bakalářské práci bude v teoretické i praktické rovině sledován vliv rejuvenačních přísad na vybrané vlastnosti asfaltových směsí. Pozornost bude věnována běžnému asfaltovému R - materiálu.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ/DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování 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

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá tématem používání rejuvenačních přísad v asfaltových směsích s R-materiálem. V teoretické části je popsán způsob přidávání R-materiálu do nových asfaltových směsí. Dále je vysvětlen postup a podstata zkoušek na asfaltovém pojivu: penetrace jehlou, stanovení bodu měknutí, dynamický smykový reometr (DSR), průhybový trámečkový reometr (BBR) a taky krátkodobé stárnutí asfaltového pojiva metodou RTFOT. V praktické části je vysvětlen postup přidávání rejuvenačních přísad do asfaltových směsí v laboratorních podmínkách. Následně jsou vyhodnoceny výsledky zkoušek na asfaltovém pojivu.

Klíčová slova

asfaltové pojivo, R-materiál, stárnutí asfaltového pojiva, rejuvenační přísady, penetrace jehlou, bod měknutí, dynamický smykový reometr (DSR), průhybový trámečkový reometr (BBR)

Abstract

The bachelor thesis deals with the use of rejuvenating additives in asphalt mixtures with reclaimed asphalt pavement. The theoretical part describes methods of adding reclaimed asphalt pavement to new asphalt mixtures. There are also explained principles of tests on asphalt binder: needle penetration, softening point, dynamic shear rheometer (DSR), bending beam rheometer (BBR) and short-term aging of asphalt binders by the RTFOT method. The practical part of the thesis explains procedures of adding rejuvenating additives to asphalt mixtures in laboratory conditions. In the practical part are also evaluated results of tests on asphalt binder.

Keywords

asphalt binder, RAP (reclaimed asphalt pavement), ageing of bitumen binder, rejuvenator, needle penetration, softening point, dynamic shear rheometer, bending beam rheometer

Bibliografická citace VŠKP

Marek Klein *Rejuvenační přísady v recyklovaném asfaltovém materiálu*. Brno, 2017. 65 s. 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 zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 25. 5. 2017

Marek Klein
autor práce

Poděkování:

Rád bych poděkoval vedoucímu své bakalářské práce Ing. Petru Hýzlovi, Ph.D. za jeho ochotu, odbornou pomoc a poskytnuté materiály potřebné pro napsání bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval všem pracovníkům laboratoře ústavu pozemních komunikací VUT v Brně. V neposlední řadě chci poděkovat všem, kteří mi pomáhali a podporovali mě po celou délku studia.

OBSAH

1	Úvod	11
2	Cíl práce	13
3	Teoretická část	14
3.1	Co je to R-materiál (RA)	14
3.2	Způsob přidávání R-materiálu	14
3.2.1	Recyklace za studena na místě.....	14
3.2.2	Recyklace za studena v míchacím centru	16
3.2.3	Recyklace za horka na místě.....	16
3.2.4	Recyklace za horka v míchacím centru	18
3.3	Asfaltové pojivo.....	20
3.3.1	Definice.....	20
3.3.2	Stárnutí.....	20
3.4	Použité zkušební metody	21
3.4.1	Homogenizace a kvartace	21
3.4.2	Extrakce	22
3.4.3	Destilace.....	24
3.4.4	Stanovení zrnitosti - Sítový rozbor	24
3.4.5	Stanovení penetrace jehlou	27
3.4.6	Stanovení bodu měknutí - Metoda kroužek & kulička	29
3.4.7	Dynamický smykový reometr (DSR)	31
3.4.8	Průhybový trámečkový reometr (BBR).....	34
3.4.9	Krátkodobé stárnutí metodou 1xRTFOT.....	38
4	Praktická část	39
4.1	Příprava vzorků.....	39
4.1.1	Oživovací přísady	39
4.1.2	Rejuvenátor 1	39
4.1.3	Rejuvenátor 2	41
4.1.4	Rejuvenátor 3	42

4.2	Výsledky zkoušek	43
4.2.1	Sítový rozbor.....	43
4.2.2	Stanovení penetrace jehlou	44
4.2.3	Stanovení bodu měknutí - Metoda kroužek & kulička.....	46
4.2.4	Dynamický smykový reometr (DSR)	48
4.2.5	Průhybový trámečkový reometr (BBR).....	55
5	Závěr	59
6	Seznam zdrojů a literatury	61
7	Seznam obrázků	63
8	Seznam tabulek	64
9	Seznam grafů	64

1 ÚVOD

Silniční odvětví, stejně jako všechna odvětví, podléhá různým trendům. V dnešní době je hodně kladen důraz na ekologii a hospodárné užívání materiálů. V případě silničního oboru to znamená recyklaci stávajících komunikací a znovupoužití získané směsi kameniva s pojivem. Vzhledem k omezeným zásobám ropy a kvalitního kameniva a velkému počtu pozemních komunikací, které bude potřeba opravovat a recyklovat, se očekává nárůst využívání R-materiálů.

Špatný stav silnic v České republice vyžaduje zamyšlení se nad tím, jak co nejhospodárněji tyto komunikace opravit. Jednou z možností je recyklace netuhých vozovek, které jsou hlavním zdrojem recyklovatelných materiálů. Proto v posledních letech nastal nárůst poptávky po recyklovaných materiálech. Bohužel využívání R-materiálu v České republice není v takové míře jako jinde ve světě (viz *Tabulka 1*).

Tabulka 1: Využívání R-materiálu v rocích 2006 a 2014 [1]

Stát	Rok			
	2006		2014	
	Množství R-materiálu k dispozici [tuny]	Recyklace za horka [%]	Množství R-materiálu k dispozici [tuny]	Recyklace za horka [%]
Česká republika	604 000	30%	1 600 000	16%
Německo	14 000 000	82%	10 900 000	90%
Slovensko	1 250	80%	30 000	98%
Nizozemsko	3 400 000	-	4 500 000	67%
Slovinsko	22 000	50%	40 000	25%

1) Hodnoty uvedené v tabulce jsou pouze orientační

2) Pomlčka v tabulce znamená, že údaj nebyl k dispozici

Z předchozí tabulky 1 je patrné, že i když se R-materiál v České republice používá v nových asfaltových směsích, pořád to není v takovém měřítku jako v některých evropských zemích. Může to být způsobeno obavami o kvalitu asfaltové směsi s R-materiálem nebo nedostatečným technologickým zázemím, které by umožňovalo efektivní použití recyklovaných materiálů. Při použití metody recyklace za horka v míchacím centru je možno dosáhnout výsledných vlastností asfaltové směsi obsahující R-materiál téměř shodných s asfaltovou směsí, která R-materiál neobsahuje.

2 CÍL PRÁCE

Hlavním cílem mé bakalářské práce bylo ověřit vliv oživovacích přísad (rejuvenátorů) na zestárlé pojivo obsažené v R-materiálu. Práce se skládá z teoretické části a praktické části.

V teoretické části je vysvětleno, co je to R-materiál, způsob jeho získávání a použití v nových asfaltových směsích. Hlavní důraz se klade na metodu recyklace za horka v míchacím centru, protože v praktické části byla tahle metoda simulována v laboratorních podmínkách. Jsou tady taky popsány různé druhy oživovacích přísad a způsob jejich aplikace do asfaltové směsi. Teoretická část se taky zabývá popisem zkoušek prováděných na asfaltovém pojivu získaném z R-materiálu.

V praktické části bylo hlavním cílem zjistit, jaké vlastnosti má asfaltové pojivo bez v R-materiálu a jak se jeho vlastnosti změni po přidání různých druhů rejuvenátorů. V praktické části byla také provedena metoda stárnutí asfaltového pojiva RTFOT , která slouží k simulaci stárnutí pojiva od doby smíchání asfaltové směsi na obalovně až po pokládku asfaltové vrstvy (krátkodobé stárnutí). Pro zjištění výsledných vlastností asfaltového pojiva s obsahem rejuvenátorů a následně po zestárnutí těchto pojiv metodou RTFOT byly použity následující zkoušky:

- Stanovení penetrace jehlou (dle ČSN EN 1426)
- Stanovení bodu měknutí metodou kroužek a kulička (dle ČSN EN 1427)
- Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu - DSR (dle ČSN EN 14770)
- Zjištění nízkoteplotních vlastností asfaltového pojiva metodou BBR (dle ČSN EN 14771)

3 TEORETICKÁ ČÁST

3.1 Co je to R-materiál (RA)

Dle normy *ČSN EN 13108-8–Asfaltové směsi – Specifikace pro materiály – Část 8: R-materiál* je tento materiál charakterizován jako asfaltová směs znovuzískaná odfrézováním asfaltových vrstev nebo drcením desek vybouraných z asfaltových vozovek nebo velkých kusů asfaltové směsi z neshodné nebo nadbytečné výroby. Obsahuje minimálně 95 % asfaltových materiálů (RA) a maximálně 5 % ostatních recyklovaných materiálů (recykláty z betonu, zdiva, anebo vozovek stmelených asfaltem nebo hydraulickým pojivem). Je zařazen mezi recyklovaný stavební materiál (RSM).[2][17]

Je určen především k recyklaci za horka. Kvalitu R-materiálu můžeme ovlivnit způsobem skladování a recyklace. Pro vyšší kvalitu R-materiálu je používáno oddělené frézování obrusné a ložní vrstvy. Skladovat by se měl v zastřešených skládkách s pevným podkladem, chráněn před účinkem slunečního záření postříkem nebo posypem vápnem případně pískem. Uskladnění R-materiálu by mělo být maximálně do výšky 4 m, aby se zabránilo samozhutňování. R-materiál by se měl před dalším zpracováním zhomogenizovat, aby byla zajištěna konstantní zrnitost.[2][17]

3.2 Způsob přidávání R-materiálu

Existuje několik metod přidávání R-materiálu do asfaltové směsi. Metody lze rozdělit z hlediska teploty při zpracování na recyklaci za studena a za horka. Další dělení je dle místa provádění na recyklaci na místě nebo recyklaci v míchacím centru.

3.2.1 Recyklace za studena na místě

Tato metoda se používá u vozovek, u kterých únosnost byla překročena a došlo k takovým deformacím vozovky (například vznik síťových trhlin, výtluků, a plošných deformací hlavně ve stopách vozidel), že je potřebné zrekonstruovat více vrstev.

Technologie recyklace za studena na místě umožňuje zvýšení kvality ložní nebo podkladní vrstvy v tloušťce 12 až 25 cm. Zvýšení kvality vrstev se provádí přidáním asfaltových (asfaltové pojivo nebo pěna), hydraulických (cement a jiné), anebo kombinovaných pojiv (směs asfaltové emulze/pěny a cementu), nebo taky doplněním kameniva dle návrhu směsi.

Pokud nastane případ, že je křivka zrnitosti původní vrstvy nevyhovující, provede se doplnění vhodné frakce kameniva na povrch vrstvy ještě před pojezdem recykléru.

Recyklace začíná rozfrézováním vrstvy (vrstev) na potřebnou tloušťku. Pokud je to nutné, provede se úprava příčného a podélného tvaru vozovky, výšková úprava vozovky nebo taky homogenizace vrstev. Do homogenizované vrstvy se pak vmíchá kamenivo předem rozprostřené na povrch vrstvy.

Další etapou je samotná recyklace, kdy dochází k rozrušení původní směsi a vmíchají se další komponenty (pojiva, kamenivo, voda). Dávkování pojiv se řídí návrhem provedeným v laboratoři. Hydraulická pojiva se dávkuje pomocí dávkovače přímo na povrch recyklované vrstvy. Asfaltová pojiva a voda jsou dávkovány automaticky pomocí elektronického čerpadla, které reguluje dávkování podle rychlosti pojezdu a šířky úpravy tak, aby bylo zabezpečeno požadované množství pojiva. Homogenizovaná směs se pak pomocí grejdrů rozprostře na požadovaný příčný sklon a výšku. Hutnění se provádí těžkým silničním válcem s vibrací (tahačový nebo tandemový válec).[3]



Obr. 1: Recyklační stroj CRMX 2 pro výrobu homogenní směsi[18]

3.2.2 Recyklace za studena v míchacím centru

Metoda spočívá v opětovném zpracování R-materiálu za studena, který se dopraví do obalovny, kde se mísí s dalšími přísadami (pojiva, voda, kamenivo). Existují různé druhy obaloven, a to buď stacionární (nepřemístitelná), mobilní (přemístitelná) a semimobilní. Jako pojivo se používají asfaltové emulze anebo pěny, hydraulické pojiva (cement), případně kombinace těchto pojiv. Směs namíchaná v obalovně je následně převezena na stavbu, kde je položena pomocí finišerů a ztuhne. Následuje zrání vrstvy, přičemž doba zrání je závislá na různých faktorech (vlhkost vzduchu, obsah vody ve směsi a mezerovitosti směsi). Po vyzrání vrstvy se na ní klade běžná asfaltová směs nebo nátěr.[4]

3.2.3 Recyklace za horka na místě

Metoda se řídí technickými podmínkami *TP 209 Recyklace asfaltových vrstev netuhých vozovek na místě za horka*. Je výhodná z ekonomického i ekologického hlediska. Recyklaci za horka na místě lze použít pro přetvoření a zlepšení stávajícího asfaltového krytu, případně položit novou obrusnou vrstvu v jednom pracovním cyklu.

Provádění recyklace za horka na místě je zabezpečeno soupravou strojů. Nejdříve je vozovka postupně zahřívána na požadovanou teplotu pomocí předehříváčů skládajících se z propanbutanových infrazářičů. Následně remixery rozpojí ohřátou vrstvu pomocí frézovacího bubnu a takto získaná směs se promíchá s dalšími komponenty (např. asfaltové pojivo, kamenivo nebo asfaltová směs). Pak se výsledná směs rozprostře a předhutní pomocí vyhřívacích lišt. Nakonec se směs ztuhne silničními válci.[5] [6]

Existují čtyři varianty, které lze provést touto metodou:

- a) REMIX - Na stávající vozovku se rozprostře kamenivo, asfaltová směs se nahřeje a rozpojí. Přidají se potřebné materiály (změkčovací přísady, silniční asfalt). Směs se promíchá, položí a zhutní.



Obr. 2: Provádění recyklace za horka na místě metodou REMIX[19]

- b) REMIX PLUS – Varianta stejná jako Remix, zde se ale recyklovaná směs nehutní. Hutní se až souvrství, což je recyklovaná asfaltová vrstva s novou obrusnou vrstvou.
- c) REPAVE - Ohřátí, rozpojení a nakypření směsi určené k recyklaci. Urovnání směsi, na kterou se následně položí asfaltová vrstva. Nakonec se vrstvy zhutní.
- d) RESHAPE - Ohřátí, rozpojení a nakypření recyklované směsi s následným urovnáním povrchu. Nakonec se směs zhutní. Lze použít, když asfaltové pojivo recyklované směsi splňuje požadované fyzikálně-mechanické vlastnosti.[6]

3.2.4 Recyklace za horka v míchacím centru

Jedna z nejlepších metod zpracování R-materiálu. Existují tři způsoby dávkování R-materiálu do asfaltových směsí na obalovně:

a) Dávkování R-materiálu přímo do míchačky šaržové obalovny

Nejčastěji používaný způsob recyklace za horka v České republice. R-materiál se předem nenahřívá, ale je sypán přímo do míchačky. Tato metoda nevyžaduje speciální vybavení šaržové obalovny. Aby se zabránilo poklesu teploty při vmíchání R-materiálu do směsi, přidávané kamenivo se ohřeje na vyšší teplotu než je teplota míchání (teplota je přímo úměrná procentuálnímu obsahu R-materiálu). Vlivem vlhkosti obsažené v R-materiálu dochází ke vzniku vodní páry, kterou je nutno z míchacího zařízení odvést. Spotřebuje se při tom značné množství tepla. Proto je v reálných podmínkách možné použít maximálně 20% R-materiálu z celkové hmotnosti asfaltové směsi.



Obr. 3: Šaržová obalovna Boskovice[20]

b) Přehřívání R-materiálu v paralelním bubnu šaržové obalovny

R-materiál se před přidáním do míchačky šaržové obalovny přehřeje v paralelním bubnu, což umožňuje přidávání většího množství do asfaltových směsí.

Nutností je pak použít R-materiál vyšší kvality (jeho množství může tvořit až 80 % z celkové hmotnosti asfaltové směsi). Tato metoda není v České republice moc

rozšířena. Nacházejí se tady pouze čtyři obalovny s paralelním bubnem.



Obr. 4: Šaržová obalovna s paralelním bubnem[21]

c) Metoda Drum-mix – kontinuální obalovna

Tento způsob recyklace je nejčastěji používán v USA. Na rozdíl od České republiky se v USA cca 80 % asfaltových směsí připravuje v kontinuálních obalovnách. Metoda Drum-mix umožňuje přidání až 50 % R-materiálu z celkové hmotnosti asfaltové směsi. Pro dosažení dostatečné kvality vstupních materiálů se musí použít R-materiál vyšší kvality. Přidávání R-materiálu do směsi je možné dvěma způsoby. Prvním způsobem je jeho průběžné dávkování přímo do vnějšího ohřívacího a sušícího bubnu, kde je následně míchán s asfaltovým pojivem a kamenivem. Druhou možností je oddělené vysoušení R-materiálu ve vnějším bubnu a kameniva v bubnu vnitřním. Následně se smíchá asfaltová směs v samostatné míchací jednotce.[4][7]



Obr. 5: Kontinuální obalovna GENCOR ULTRAPLANT®[22]

3.3 Asfaltové pojivo

3.3.1 Definice

Asfaltové pojivo je koloidní směs uhlovodíků. Obsahuje velké množství sloučenin, které se rozdělují na tekuté složky (oleje a pryskyřice, které označujeme maltény) a pevné složky (asfalteny). Má viskoelastické vlastnosti, které se mění vlivem teploty. Při nízkých teplotách se chová jako pružná látka, za vysokých teplot je kapalná. Za normálních teplot se chová jako visko-elastická látka s obojakými vlastnostmi.[8]

3.3.2 Stárnutí

Asfalt je organická látka, proto reaguje s okolním kyslíkem. Tato reakce způsobuje tvrdnutí a stárnutí asfaltu, čímž se pojivo stává křehčím a tvrdším. Ke stárnutí asfaltu dochází rychleji při vysokých teplotách (například tzv. krátkodobé stárnutí při míchání na obalovně). Asfalt se stárnutím stává méně odolným vůči nízkým teplotám (vznik mrazových trhlin), a naopak více odolný vůči vysokým teplotám (vznik trvalých deformací – vyjeté koleje). Pro obnovu původních vlastností pojiva používáme změkčovadla nebo oživovače. Změkčovadla slouží ke snížení viskozity zestárlého pojiva, oživovače slouží k obnovení fyzikálních a chemických vlastností pojiva. Rejuvenátory se skládají z regeneračních přísad (fluxačních olejů, mazacích olejů nebo olejových suspenzí s vysokým obsahem maltenu). Některé druhy rejuvenátorů a postup

jejich dávkování budou podrobněji popsány v kapitole 4.2 Oživovací přísady.

3.4 Použité zkušební metody

3.4.1 Homogenizace a kvartace

Tyto metody se řídí evropskou normou *ČSN EN 932-1 Zkoušení všeobecných vlastností kameniva – Část 1: Metody odběru vzorků*. Slouží k získání reprezentativních, laboratorních či zkušebních vzorků.

Homogenizace:

Aby byla zaručena stejná zrnitost R-materiálu (případně kameniva), je potřeba tento materiál homogenizovat. To je provedeno vysypáním vzorku R-materiálu na čistou a hladkou betonovou podlahu tak, aby vznikl kužel. Následně se odebírá materiál z různých míst a přemísťuje se vedle, kde vzniká nový kužel. Tenhle postup se několikrát opakuje, dokud není materiál dostatečně homogenizován. Pak se odebere reprezentativní vzorek R-materiálu, který se zmenší pomocí metody kvartace na požadovanou hmotnost navážky.[9]

Kvartace:

Tato metoda slouží ke zmenšení vzorku na požadovanou hmotnost navážky. Vzorek se umístí na pracovní plochu. Následně se vytvoří kužel, který se na vrchu zploští lopatou. Vznikne tak komolý kužel o stejné tloušťce a průměru. Komolý kužel se následně rozdělí dvěma vzájemně kolmými svislými rovinami na čtyři stejné díly. Dva vzájemně protilehlé díly se odstraní. Postup se opakuje, dokud nedostaneme dostatečné množství vzorku potřebného na zkušební navážku (viz *Obr. 6*).[9]



Obr. 6: Postup prováděné kvartace na vzorku R-materiálu

3.4.2 Extrakce

Pro znovuzískání asfaltového pojiva z R-materiálu byla provedena extrakce pomocí odstředivky s filtrem (viz Obr. 7). Tato metoda se řídí evropskou normou ČSN EN 12697-3 *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 3: Znovuzískání extrahovaného pojiva: Rotační vakuové destilační zařízení.*

Vzorek R- materiálu se zalije trichloretylenem a nechá se minimálně 10 minut stát. Pak se směs R-materiálu a rozpouštědla dávkuje přes síta (hrubší síto 2 mm a pod ním jemné síto 0,063 mm), aby se zabránilo vniknutí hrubších částic do odstředivky. Síta se průběžně proplachují rozpouštědlem, aby se na nich nezachytilo asfaltové pojivo. Pevné částice menší než



Obr. 7: Odstředivka s filtrem

0,063 mm (tzv. filer) se zachytávají na filtru, který tvoří kovová patrona zevnitř obalena papírem pro zachycení těchto částic (viz Obr. 8). Extrahované pojivo se zbytkem rozpouštědla bylo z odstředivky odváděno potrubím do nádoby. Extrakce je ukončena, až je veškeré kamenivo úplně očištěno od asfaltového pojiva. Následně byla nádoba se zachyceným kamenivem a patrona s filerem umístěna do laboratorní sušárny, kde bylo všechno vysušeno při teplotě (110 ± 5) °C. Kamenivo a filer se následně zváží pro potřeby dalších zkoušek.[10]



Obr. 8: Kovová patrona pro zachycení nejjemnějších částic kameniva



Obr. 9: Vysušené kamenivo získané z R-materiálu (vlevo) a původní R-materiál (vpravo)

3.4.3 Destilace

Roztok asfaltového pojiva a rozpouštědla je potřeba oddělit, abychom získali čisté pojivo. To je provedeno pomocí rotačního vakuového destilačního zařízení.

Přístroje a pomůcky:

- Rotační vakuové destilační zařízení
- Destilační a jímací baňky s kulatým dnem
- Vazelína na těsnění zábrusových spojů

Postup zkoušky:

Před samotnou destilací je nutné zkontrolovat funkčnost a neporušenost zařízení a příslušenství.

Destilace je rozdělena do 3 fází. První fáze destilace probíhá při teplotě T_1 (90 ± 5) °C otáčkách (75 ± 5) ot/min a tlaku P_1 (40 kPa). V této fázi je postupně nasáván roztok asfaltového pojiva a trichloretylenu. Po úplném nasátí vzorku následuje druhá fáze. Teplota se zvýší na teplotu T_2 (160 ± 5) °C a sníží se tlak na P_2 (2 kpa). Po deseti minutách se zkontroluje, zda se tvoří bubliny v baňce s asfaltovým pojivem. Pokud se bubliny pořád tvoří, přejde se na fázi 3. Teplota se zvýší na T_3 (185 ± 5) °C a je udržován maximální tlak, až do doby kdy se nepřestanou tvořit bubliny. V procesu se pokračuje ještě 10 minut po vymizení všech bublin z baňky obsahující asfaltové pojivo. Rotace se zastaví a tlak se nechá klesnout na hodnotu atmosférického tlaku. Baňka se znovuzískaným pojivem se odpojí od přístroje a pojivo se nalije do nádoby a uzavře víkem.[10]



Obr. 10: Vakuové destilační zařízení

3.4.4 Stanovení zrnitosti - Sítový rozbor

Stanovení zrnitosti se provádí dle evropské normy *EN 993-1 Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor*. Podstatou zkoušky je rozřídění a oddělení kameniva pomocí sady sít do několika

frakcí. Uspořádání sít je sestupné. Počet sít a velikost otvorů sít se volí dle potřebné přesnosti rozdělení kameniva.

Přístroje a pomůcky:

- Zkušební síta - velikost otvorů sít se řídí evropskou normou EN 933-2 Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 2: Stanovení zrnitosti – Zkušební síta, jmenovité velikosti otvorů
- Pevně líčující víko a dno sady sít
- Prosévací přístroj
- Váhy s přesností $\pm 0,1 \%$
- Sušárna sloužící k vysušení kameniva při teplotě $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$
- Prací zařízení
- Další pomůcky – štětce, kartáče a nádoby[11]

Postup zkoušky:

Před prováděním zkoušky je potřeba si připravit zkušební navážku. Kamenivo se musí řádně homogenizovat a následně se musí odebrat vzorek pomocí metody kvartace nebo dělení (viz kap. 3.4.1). Hmotnost zkušební navážky nesmí být menší než předepsaná nejmenší hmotnost (viz *Tabulka 2*).

Tabulka 2: Hmotnost zkušebních navážek pro hutné kamenivo[11]

Velikost největšího zrna kameniva D [mm]	63	32	16	8	≤ 4
Nejmenší hmotnost zkušební navážky m [kg]	40	10	2,6	0,6	0,2

V první fázi se zkušební navážka vloží do nádoby s vodou, kamenivo se promíchá, aby se oddělily jemné částice. Následně se vezmou dvě zkušební síta, jedno s velikostí otvorů 0,063 mm, na něj se položí druhé síto s většími oky, tzv. ochranné síto, např. s velikostí otvorů 1-2 mm. Obsah nádoby s kamenivem a vodou postupně naléváme do

horního síta. Vytékající vodu necháme volně odtéci. Kamenivo na sítích je potřeba neustále proplavovat vodou až do doby, kdy je voda, která vytéká spodním sítem, čirá.

Kamenivo zachycené na obou sítích se nechá vysušit v sušárně při teplotě $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$.

Pozn.: Pokud kamenivo neobsahuje částice ulpívající na zrnech, je možné vynechat metodu praní a použít pouze metodu prosévání.

Po vysušení kameniva následuje druhá fáze zkoušky, a tou je prosévání. Nejdříve se musí sestavit souprava sítí vzestupně v prosévacím přístroji (viz Obr. 11). Síta se ukládají zespodu, od nejmenší velikosti ok po největší. Pod spodním sítem musí být umístěno dno, na kterém se zachytí nejjemnější částice, tzv. filer. Následně se začne materiál sypat na horní síto, na které se pak nasadí víko. Na přístroji se nastaví čas a otáčky, a následně se přístroj zapne. Po uplynutí času se oddělá víko a síta se postupně oddělávají (před odděláním síta se provede ruční protřesení). Zváží se hmotnost materiálu zachyceného na jednotlivých sítích.

Výsledky měření se zapisují do zkušebního protokolu. Vypočtou se hmotnosti zbytků na jednotlivých sítích jako procento hmotnosti původní vysušené zkušební navážky M_1 . Musí se taky vypočítat součtová procenta hmotnosti původní navážky, které propadly jednotlivými sítími od horního síta po spodní, kromě síta 0,063 mm. U síta 0,063 mm se vypočítá procento jemných částic f , které tímto sítem propadly dle následujícího vztahu:

$$f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} * 100$$

M_1 – hmotnost vysušené zkušební navážky [kg];

M_2 – hmotnost vysušeného zůstatku na síti 0,063mm [kg];

P – hmotnost propadu jemných částic na dně [kg] [11]



Obr. 11: Prosévací přístroj se zkušebními sítí

3.4.5 Stanovení penetrace jehlou

Provádění penetrace jehlou se řídí evropskou normou *ČSN EN 1426 Asfalty a asfaltová pojiva- Stanovení penetrace jehlou*. Podstatou metody je měření průniku normalizované jehly do vzorku asfaltového pojiva ohřátého na požadovanou teplotu.

Zkušební podmínky pro penetraci do 330 x 0,1 mm:

- teplota temperovaného vzorku 25 °C
- doba temperování vzorku minimálně 1 hodinu
- závaží působící na jehlu o hmotnosti 100 g
- doba působení zatížení 5 s

Přístroje a pomůcky:

- Penetrometr - přístroj pro měření penetrace, jehož částí je držák jehly pohybující se ve svislém směru, umožňující stanovení penetrace s přesností 0,1 mm. Na držák jehly je připevněno závaží o hmotnosti 100 g. Doba trvání působení zatížení na jehlu byla kontrolována automatickým zařízením s nastavitelným časovačem.
- Penetrační jehla - vyrobená z oceli (plně tvrzená, popouštěná a leštěná, korozivzdorná). Její konec je zbroušen do tvaru kužele (úhel zkosení je $9^{\circ}10' \pm 30'$). Délka jehly pro penetraci do 330 x 0,1 mm je 50 mm. Před samotnou zkouškou je provedena kontrola nezávadnosti jehly (kontrola koroze a případných vad ve tvaru jehly).
- Nádoba na vzorek, do které se umístí samotný vzorek ve vodní lázni sloužící k udržení požadované teploty po dobu zkoušky.

Postup zkoušky:

Před prováděním zkoušky je potřeba si připravit zkušební vzorek. Dostatečné množství zkoušeného asfaltového pojiva se nahřeje na teplotu max. 80 - 90 °C nad předpokládaným bodem měknutí. Čistá nádoba na zkušební vzorek se naplní pojivem do výšky minimálně o 10 mm vyšší, než je předpokládaná hloubka průniku jehly. Okamžitě po nalití se nádoba přikryje víkem a nechá se vychladnout. Po vychladnutí se vzorek vloží do vodní lázně po dobu 60 - 90 minut. Teplota lázně musí být $(25 \pm 0,15)$ °C. Následně si zkontrolujeme pomůcky potřebné k provádění zkoušky. Penetrační jehla musí být očištěna vhodným rozpouštědlem a následně se připevní do držáku jehly penetrometru a zkontroluje se nulová hodnota na stupnici. Po vytemperování vzorku se vzorek umístí do temperované nádobky s vodou o teplotě $(25 \pm 0,15)$ °C. Penetrační jehla se postupně posouvá k povrchu vzorku, až se jej dotýká. Na penetrometru se nastaví doba zatěžování jehly 5 s a spustí se zkouška.

Po uplynutí času se odečte na stupnici přístroje hodnota penetrace v penetračních jednotkách (v desetinách milimetru). Jehla se opatrně vytáhne ze vzorku a následně očistí. Postup opakujeme alespoň dvakrát, abychom získali alespoň tři hodnoty

penetrace. Norma uvádí, že je vhodné pro každou zkoušku použít novou jehlu. Vzdálenost vpichů má být alespoň 10 mm od sebe a 10 mm od stěny nádoby.[12]



Obr. 12: Provádění zkoušky penetrace penetrometrem

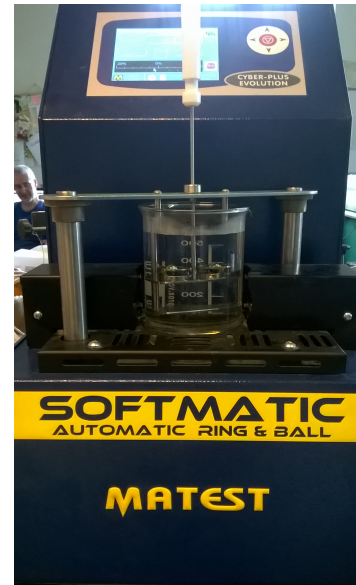
3.4.6 Stanovení bodu měknutí - Metoda kroužek & kulička

Tato zkouška se provádí dle evropské normy ČSN EN 1427- *Asfalty a asfaltová pojiva-Stanovení bodu měknutí-Metoda kroužek a kulička*. Zkouška spočívá v zjištění teploty, při které dojde k změknutí asfaltového pojiva nalitého do dvou mosazných kroužků (na každém z nich je umístěna ocelová kulička) umístěných do vodní lázně. Za řízeného ohřívání lázně asfaltové pojivo měkne. Zkouška se ukončí, až kuličky obalené pojivem propadnou přes kroužky na vzdálenost $(25 \pm 0,4)$ mm, což znamená, že byl dosažen bod měknutí.[13]

Přístroje a pomůcky:

- přístroj pro provedení zkoušky metodou kroužek a kulička
- dva mosazné kroužky
- odlévací destička

- dvě ocelové kuličky o průměru $(9,5 \pm 0,05)$ mm a hmotnosti jedné kuličky $(3,5 \pm 0,05)$ g
- střední prstence pro osazení kuliček
- držák kuliček se stojanem pro přesnou polohu kroužků
- skleněná kádinka s destilovanou odvzdušněnou vodou
- magnetické míchadlo



Postup zkoušky:

Nejprve se vzorek asfaltového pojiva předejde na teplotu potřebnou k rozlití. Tato teplota je maximálně 80 až 90 °C nad předpokládaným bodem měknutí. Pojivo se nalije do mosazných kroužků umístěných na odlévací destičce. Přebytek pojiva se po zchladnutí seřízne. Mosazné kroužky s pojivem se umístí do držáku kroužků se stojanem, který se ponoří do kádinky s destilovanou vodou. Celá tahle sestava a ocelové kuličky se schladí na teplotu (5 ± 1) °C. Po ochlazení se ocelové kuličky umístí na vzorky asfaltu. Přesná poloha umístění kuliček je zabezpečena pomocí středních prstenců (viz Obr. 14). Do kádinky je vloženo magnetické míchadlo. Kádinka, včetně

Obr. 13: Přístroj pro měření bodu měknutí

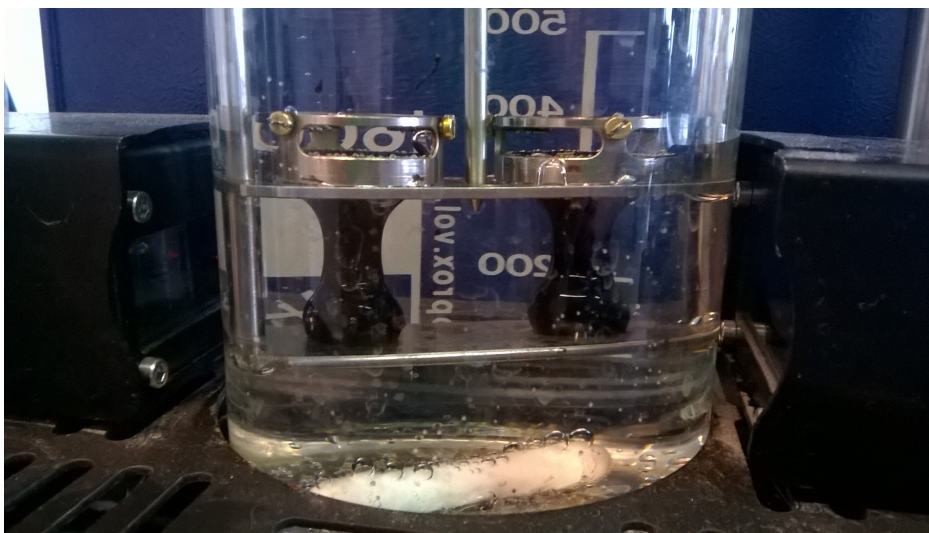
stojanu s kroužky, se umístí do zkušebního přístroje a spustí se zkouška. Přístroj začne ohřívat kádinku řízeným ohříváním s nárůstem teploty 5 °C/min. Když se asfaltové pojivo protáhne na vzdálenost $(25 \pm 0,4)$ mm, dojde k přerušení světelného paprsku zkušebního přístroje a zařízení zaznamená okamžitou teplotu při



Obr. 14: Prstence pro centrování kuliček během zkoušky

tomto protažení pro každý kroužek zvlášť (viz Obr. 15). Výsledkem jsou dvě teploty

pro bod měknutí. Pokud se od sebe liší o maximálně 1 °C je z těchto teplot spočítán aritmetický průměr (zaokrouhlení na nejbližší 0,2 °C). Výsledná hodnota je bod měknutí zkoumaného vzorku asfaltového pojiva.[13]



Obr. 15: Protážení pojiva během zkoušky bodu měknutí

3.4.7 Dynamický smykový reometr (DSR)

Podstatou zkoušky je měření odezvy deformace temperovaného asfaltového pojiva, na které působí oscilující smykové napětí určité velikosti. Případně na vzorek působí určité smykové napětí a zjišťuje se hodnota vzniklé smykové deformace. Metoda se řídí evropskou normou *ČSN EN 14770-Asfalty a asfaltová pojiva- Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu – Dynamický smykový reometr (DSR)*.

Přístroje a pomůcky:

- Dynamický smykový reometr (DSR), s připojeným nebo integrovaným systémem pro regulaci teploty, schopným řídit teplotu v rozmezí 5 až 85 °C s přesností $\pm 0,1$ °C během zkoušky. Přístroj musí být vybaven paralelními destičkami se stálou mezerou po celé ploše destiček. Obě destičky musí mít stejnou teplotu, proto musí být obě umístěny do systému regulace teploty.

- Formy, podložky nebo nádobky, pro přípravu vzorků. Formy a podložky musí být ze silikonu, aby nepřilnul ke zkušebnímu vzorku.[14]



Obr. 16: Dynamický smykový reometr

Postup zkoušky:

Reometr se nastaví dle postupu uvedeného v příručce výrobce. Výběr a nastavení geometrie soupravy a mezery se taky řídí podle příručky výrobce. V softwaru se zvolí odpovídající oscilace. Je nutno dodržet provozní limity zvolené geometrie soupravy. Mezeru mezi destičkami nastavíme ještě před zkoušením vzorku, v době kdy mají destičky stejnou teplotu. Mezera se volí v rozmezí 0,5 až 2 mm pro asfaltová pojiva v rozmezí teplot od 5 do 85 °C při použití rovnoběžných destiček. Pro umístění vzorku se destičky reometru pečlivě očistí vhodným rozpouštědlem.

Teplota dolní destičky se upraví na teplotu bodu měknutí pojiva větší o (20 ± 5) °C anebo na (90 ± 5) °C (podle toho, která teplota je nižší, aby se docílilo dostatečné spojení vzorku asfaltového pojiva s destičkou reometru).

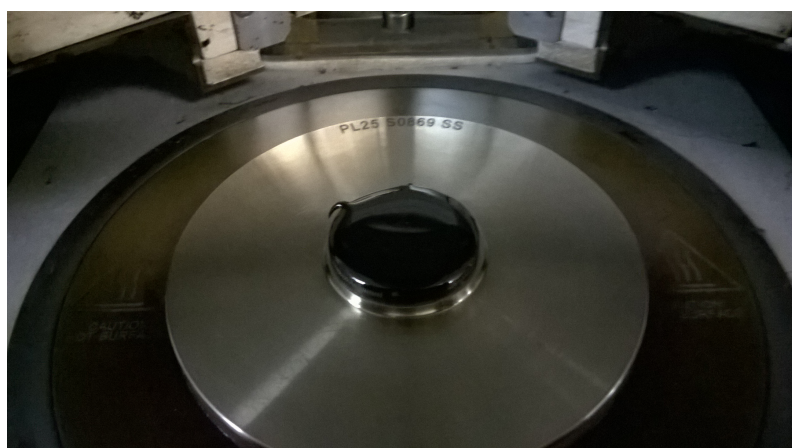
Příprava vzorku se liší pro pojiva připravena při teplotách větších než 100 °C a pro pojiva připravena při teplotách nižších než 100 °C. Pro pojiva připravena při teplotě nad 100 °C se vzorek zahřeje na teplotu (85 ± 5) °C nad bod měknutí nebo na teplotu 180 °C, podle toho, která teplota je nižší. Pojivo se po zahřátí promíchá a vylije se

dostatečný počet vzorků do silikonové formy. Po vychladnutí pojiva se vzorky uloží do chladničky (teplota přibližně 5 °C) po dobu maximálně 30 minut před zkoušením v reometru.

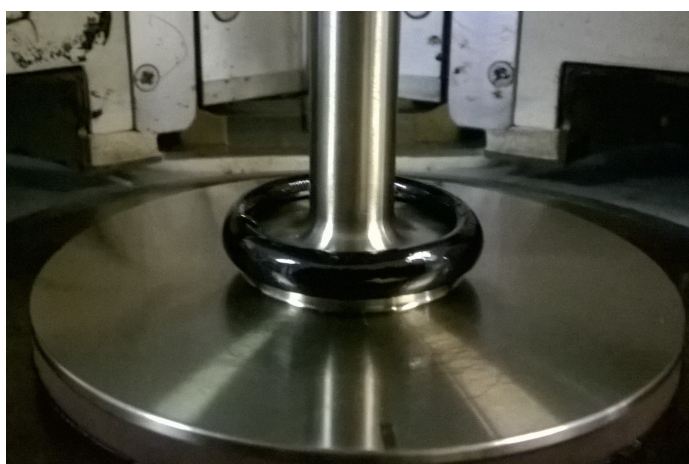
Pro pojiva připravovaná při teplotě do 100 °C (to jsou pojiva získaná z ředěných asfaltů a stabilizovaná pojiva z emulzí) se pojivo dostatečně nahřeje, aby bylo možné odlít vzorek přímo na destičku reometru nebo na silikonovou formu. Teplota nesmí přesáhnout 100 °C. Vzorky, které se okamžitě nepoužijí je nutno zakrýt a uložit do chladničky při teplotě kolem 5 °C (aby se zabránilo úniku těkavých látek). Následně se vyberou vzorky z chladničky a vyklopí se z formy. Vzorek se vloží na destičku reometru (viz *Obr. 17*). Aby se dosáhla stejná teplota vzorku, musí se nechat stabilizovat po dobu 15 až 30 minut. Následně se vzorek upraví na zvolenou velikost mezery zvětšenou o 0,025 mm z 0,050 mm (viz *Obr. 18*). Přebytečné pojivo se seřízne nožem nebo ořezávací čepelí. Pak se nastaví zkušební mezera ($\pm 0,1$ mm), pojivo se už neodebírání. Vzorek se zahřeje na teplotu potřebnou k provedení zkoušky nebo na teplotu bodu měknutí po dobu alespoň 10 minut. Nastaví se teplota zkoušky v rozmezí 25 až 85°C.

Volí se vícero teplot pro přesnější charakterizaci vzorku (přírůstek teploty nesmí být větší než $10 \pm 0,1$ °C). Teplota se nechá ustálit. Doba potřebná na ustálení teploty se poznačí do protokolu. Zvolí se rozsah frekvencí, při kterých se bude zkouška provádět. Volí se jednotlivé frekvence nebo se volí obor frekvencí. Zkouška je zahájena při první zvolené teplotě. Frekvence se zvolí od nejnižší a postupně stoupá, nebo se začne s nejvyšší frekvencí. Po dokončení zkoušky při první teplotě se přejde na další teplotu (přírůstek teploty nesmí být větší než 5 °C za minutu). Zkouška se zastaví, až je změřen komplexní modul ve smyku mimo rozsah zvolené geometrie soupravy.

Pro další teplotu se vloží nový vzorek. Postup vkládání vzorku a ustálení teploty je stejné jako při první fázi zkoušky.[14]



Obr. 17: Vzorek pojiva uložen na destičku reometru



Obr. 18: Vytlačení pojiva při nastavení mezery

3.4.8 Průhybový trámečkový reometr (BBR)

Zkouška je definována v evropské normě ČSN EN 14771 – *Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru (BBR)*. Podstatou zkoušky je měření velikosti průhybu uprostřed trámečku asfaltového pojiva za působení třibodového ohybu. Konstantní zatížení působící uprostřed vzorku způsobí prohnutí tělesa, které se následně měří po celou dobu zatěžování. Teplota je regulována pomocí chladicí lázně. Výsledný modul tuhosti tělesa v daném čase je určen z ohybového napětí a ohybové deformace zkušebního tělesa.[15]

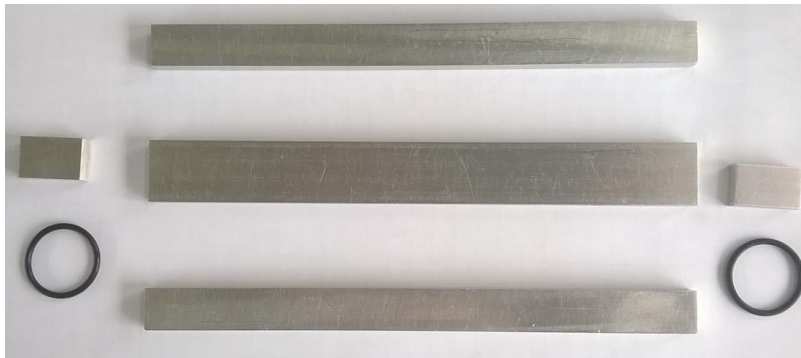
Přístroje a pomůcky:

- Průhybový trámečkový reometr (BBR) (viz Obr. 19), tvoří zatěžovací rám s podpěrami zkušebního tělesa, chladicí lázně a přístrojů na snímání údajů.
- Zatěžovací rám se skládá ze dvou podpěr vzorku a dřívku s tupou špičkou pro vnášení zatížení uprostřed vzorku.



Obr. 19: Průhybový trámečkový reometr (BBR)

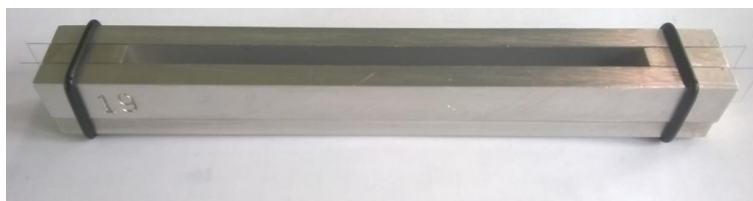
- Přístroj k měření teploty, kalibrovaný snímač teploty, který je schopný určovat teplotu od -36 do 0°C s přesností $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$. Měřící hlava musí být umístěna do vzdálenosti nejvíc 50 mm od středu zkušebního tělesa.
- Kapalinová lázeň, s kapalinou (lích apod.) schopnou zachovávat konstantní teplotu v okolí testovaného vzorku s přesností $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$. V lázni musí být umístěno míchadlo pro zabezpečení konstantní teploty v celém objemu kapaliny.
- Snímač dat a řídicí systém rozlišující zatížení minimálně 2,5 mN, pohnutí zkušebního tělesa minimálně 2,5 μm a teplotu kapaliny s přesností $0,1^{\circ}\text{C}$. Všechny údaje měření jsou zaznamenávány pomocí softwaru.
- Formy pro zkušební tělesa (viz Obr. 19), kterých vnitřní šířka je $(6,4 \text{ mm} \pm 0,1)$ mm, hloubka $(12,7 \pm 0,1)$ mm a délka (127 ± 5) mm, jsou zhotovené z vhodného kovu [15]



Obr. 20: Součásti formy na trámečky

Postup zkoušky:

Před nalitím asfaltového pojiva do forem je potřeba si tyto formy připravit. Suché a očištěné části formy se natrou jemnou vrstvou vazelíny, následně se přitlačí folie ke kovovým plochám a vytlačí se veškeré vzduchové mezery (viz *Obr. 20*).



Obr. 21: Složená forma na trámečky

Části formy se složí dohromady a zajistí gumičkou na obou koncích tak, aby forma držela pevně pohromadě (viz *Obr. 21*). Rozehřáté asfaltové se pečlivě nalije do forem. Pojivo se dává do formy ve větším množství tak, aby zůstal navrchu přesah, který se po minimálně 1 hodině chladnutí seřízne (viz *Obr. 22*).



Obr. 22: Seříznutí přebytečného pojiva

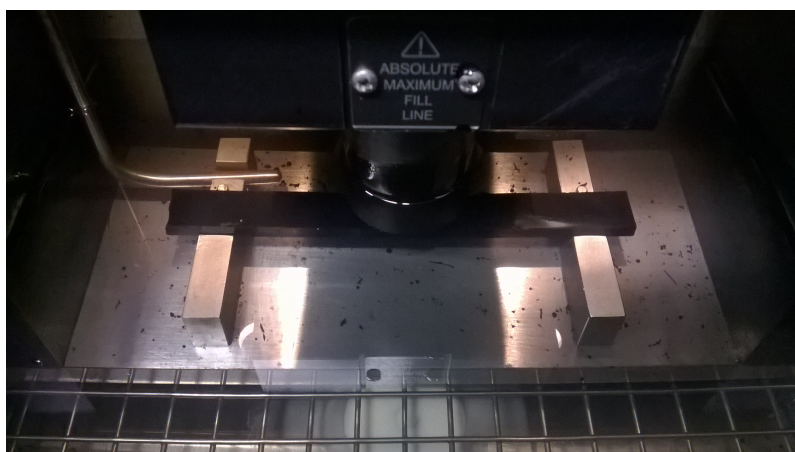
Takto připravené vzorky se dají chladit do mrazničky s teplotou maximálně rovnající se teplotě zkoušení po dobu maximálně 5 minut.

Přístroj BBR se před zkouškou musí kalibrovat podle návodu výrobce. Pokud je přístroj připraven na měření, vzorek se vytáhne z mrazáku a odformuje se tak, aby se nepoškodil. Neprodleně se přesune do chladicí lázně reometru, ve které musí být po dobu 60 ± 2 minuty před začátkem zkoušky.

Zkušební těleso se umístí na podpěry takovým způsobem, že z šířky vzorku se stane jeho tloušťka.

Pozn.: V případě použití kontaktního zatížení tělesa se použije automatický zkušební systém, který se řídí předem naprogramovaným postupem:

Nejdříve se vloží usazovací zatížení (980 ± 50) mN po dobu ($1 \pm 0,1$) s. Pak se sníží zatížení na 25 až 45 mN a zkušební tělísko se nechá odlehčit po dobu ($20 \pm 0,1$) s. Operátor ověří, že se zatížení zkušebního tělíska vrátí na 25 až 45 mN. Pokud se tak nestane, zkouška bude označena jako neúspěšná. Na tělísko se vloží zkušební zatížení 930 až 1030 mN. V průběhu 240 s se zaznamenává hodnota zkušebního zatížení a průhyb. V době mezi 0,5 s a 5,0 s musí být zatížení v rozmezí ± 50 mN od průměrného zkušebního zatížení a po zbývajících dobu ± 10 mN od průměrného zkušebního zatížení. Následně se zkušební zatížení uvolní a vrátí se kontaktní zatížení od 25 do 45 mN. Nakonec se tělísko vyjme z podpěr. Zkouška se opakuje na dalším vzorku.[15]



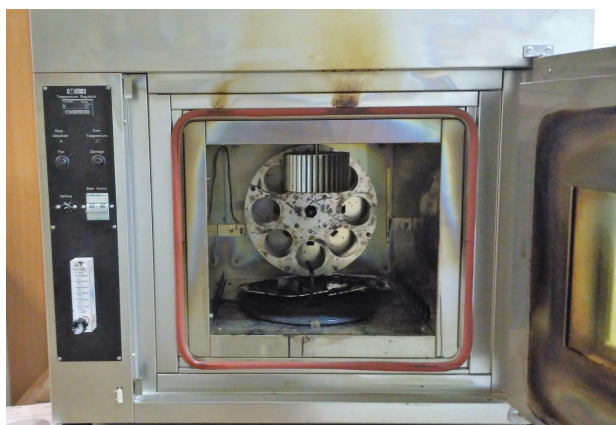
Obr. 23: Způsob uložení trámečku před začátkem měření

3.4.9 Krátkodobé stárnutí metodou 1xRTFOT

Metoda slouží k simulaci stárnutí asfaltového pojiva během obalování kameniva na obalovně. Řídí se evropskou normou *ČSN EN 12607-1 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu – Část 1: Metoda RTFOT*. Podstatou metody je stanovení kombinovaného účinku tepla a vzduchu (vyjádřenou v %), případně změnu vlastností asfaltového pojiva (například penetrace, bodu měknutí nebo dynamické viskozity, které jsou měřeny před a po metodě RTFOT). Zkušebním vzorkem je tenká vrstva asfaltového pojiva, která se ohřívá v sušárně při stanovené teplotě po určitou dobu za stálého přívodu vzduchu.

Přístroje a pomůcky:

- Sušárna s elektrickým ohřevem a dvojitou stěnou.
- Průtokoměr
- Teploměry
- Skleněná nádobka
- Váhy s přesností ± 10 mg



Obr. 24: Přístroj pro provádění zkoušky RTFOT

Postup zkoušky:

Nejméně dvě označené skleněné nádobky se zváží s přesností na 1 mg. Počet všech nádobek musí být dostatečný pro provedení všech zkoušek na zestárlém pojivu. Nalije se $(35,0 \pm 0,5)$ g vzorku do každé nádobky. Sušárna se vyhřeje na teplotu (163 ± 1) °C, která je potřebná pro provádění zkoušky. Následně se nádobky vloží do držáku sušárny, tak, aby byl sušák vyvážen, a nepoužité otvory se zaplní prázdnými nádobami. Po skončení zkoušky se pojivo ze všech nádobek slije do jedné nádoby. Pojivo se musí zhomogenizovat pomalým mícháním, aby nevznikly vzduchové bubliny. Zkoušky na zestárlém pojivu se musí provést do 72 hodin. Vzorek se po tuto dobu nesmí ohřívat více než jeden krát.[16]

4 PRAKTICKÁ ČÁST

4.1 Příprava vzorků

R-materiál používaný pro potřeby méj bakalářské práce byl dodán firmou Froněk spol. s.r.o.. Jedná se o recyklát získaný frézováním obrusné a podkladní vrstvy dohromady. Pro zjištění množství a vlastností asfaltového pojiva obsaženého v R-materiálu bylo potřeba si připravit vzorky. V první fázi byla provedena homogenizace R-materiálu a rozdělení na menší díly pomocí kvartace. Pak bylo odebrané dostatečné množství kameniva pro navážení 4 vzorků (hmotnost jednoho vzorku byla 3 kg). Tyto vzorky se nechaly vysušit. Následně se zahřály na požadovanou teplotu pro aplikaci rejuvenátorů (viz *Kapitola 4.2 Oživovací přísady*). Výsledné směsi se zalily Trichloretylenem, který slouží k rozpuštění asfaltového pojiva. V druhé fázi byla provedena extrakce a destilace pro získání asfaltového pojiva, na kterém se pak prováděly zkoušky. Kamenivo získané po extrakci a destilaci bylo vysušeno a připraveno na stanovení zrnitosti pomocí síťového rozboru.

4.1.1 Oživovací přísady

V méj bakalářské práci jsem pro změkčení zestárlého pojiva použil tři druhy rejuvenátorů od různých výrobců. Postup aplikace těchto přísad jsem prováděl podle pokynů výrobce.

4.1.2 Rejuvenátor 1

Jedná se o derivát ropy získaný sekundární rafinací. Patří do fluxačních olejů. Dávkování rejuvenátoru závisí od množství použitého zestárlého pojiva, které je potřeba změkčit. Potřebné množství se určí dle teploty bodu měknutí asfaltového pojiva, a to tak, že pokud chceme snížit bod měknutí o 1 °C, musíme přidat 1 % rejuvenátoru z obsahu asfaltového pojiva.

Vstupní údaje pro výpočet množství rejuvenátoru:

- Vzorek R-materiálu má hmotnost 3,0 kg
- Obsah pojiva v R-materiálu byl 5,10 %
- Teplota bodu měknutí zjištěna metodou kroužek a kulička byla 66,9 °C
- Požadovaná teplota bodu měknutí 61,5 °C

Vzorec pro výpočet potřebného množství rejuvenátoru:

$$m_r = \frac{m_{R-mat}(t_1 - t_2)}{100}$$

m_r – požadovaná hmotnost rejuvenátoru [g]

m_{R-mat} – hmotnost pojiva obsaženého v R-materiálu [g]

t_1 – teplota bodu měknutí pojiva obsaženého v R-materiálu [°C]

t_2 – požadovaná teplota bodu měknutí změkčeného pojiva [°C]

Po dosazení do vzorce mi vyšlo, že potřebuji přidat 8,26 g Rejuvenátoru 1, který jsem dle následujícího postupu vmíchal do R-materiálu.

Postup mojí aplikace Rejuvenátoru 1 v laboratorních podmínkách:

- Zahřátí R-materiálu na teplotu 130 °C
- Po dosažení teploty 130 °C se do R-materiálu přidá změkčovadlo a ručně se promíchá
- Následně se R-materiál přikryje (např. alobalem), vloží se do pece a nechá se působit po dobu alespoň 10 minut.

4.1.3 Rejuvenátor 2

Je založený 100% na přírodních pryskyřicích. Účelem vytvoření tohoto změkčovadla bylo zlepšení vlastností zestárlého pojiva a snížení nákladů. Bylo zjištěno, že asfalteny a matleny stabilizují vlastnosti pojiva, tedy tento rejuvenátor zpomaluje tvrdnutí pojiva a tím zpomaluje proces stárnutí.

Potřebujeme 1 % Rejuvenátoru 2 pro snížení teploty bodu měknutí o 1,5 °C.

Vzorec pro výpočet potřebného množství rejuvenátoru:

$$m_r = \frac{m_{R-mat} (t_1 - t_2)}{1,5 * 100}$$

m_r – požadovaná hmotnost rejuvenátoru [g]

m_{R-mat} – hmotnost pojiva obsaženého v R-materiálu [g]

t_1 – teplota bodu měknutí pojiva obsaženého v R-materiálu [°C]

t_2 – požadovaná teplota bodu měknutí změkčeného pojiva [°C]

Po dosazení do vzorce mi vyšlo, že potřebuji přidat 5,51 g Rejuvenátoru 2, které dle následujícího postupu vmícháme do R-materiálu.

Postup mojí aplikace Rejuvenátoru 2 v laboratorních podmínkách:

- Zahřátí R-materiálu na teplotu 130°C
- Po dosažení teploty 130°C se do R-materiálu přidá rejuvenátor a ručně se promíchá
- Následně se R-materiál přikryje (např. alobalem), vloží se do pece a nechá se působit po dobu alespoň 10 minut.

4.1.4 Rejuvenátor 3

Je vysoce kvalitní pryžový granulát získaný z recyklovaných pneumatik, který je nasátý výrobcem patentovaným olejem, oživovací a další přísadou.

Dávkování rejuvenátoru je 13 % z celkového množství asfaltového pojiva obsaženého v asfaltové směsi. Spolu s tímto Rejuvenátorem se do směsi musí přidávat nové asfaltové pojivo.

Moje vstupní údaje pro zjištění množství rejuvenátoru:

- Potřebujeme 170 g asfaltového pojiva
- Vzorek R-materiálu má hmotnost 1,308 kg
- Obsah pojiva v R-materiálu byl 5,20 % = 68 g zestárlého asfaltového pojiva.

Do R-materiálu jsem dle následujícího postupu přidal 22,1 g Rejuvenátoru 3 a 108g silničního asfaltu gradace 50/70.

Postup mojí aplikace rejuvenátoru Rejuvenátoru 3 v laboratorních podmínkách:

- Asfaltové pojivo 50/70 zahřejeme na teplotu 165 °C
- Zahřáté pojivo smícháme s rejuvenátorem
- Směs dohřejeme na teplotu 160 až 165 °C
- Následně směs pečlivě smícháme s R-materiálem ohřátým na teplotu 130 °C.

V následující tabulce jsou uvedeny množství jednotlivých rejuvenačních přísad dávkovaných do vzorků R-materiálu pro potřeby mojí bakalářské práce.

Tabulka 3: Hmotnosti použitých rejuvenátorů

Rejuvenátor	Množství [g]
1	8.26
2	5.51
3	22.1

V dalších částech bakalářské práce budou vzorky směsí asfaltového pojiva získaného z R-materiálu s rejuvenátory značeny dle následující tabulky:

Tabulka 4: Značení vzorků asfaltového pojiva

R-materiál 0/11 čistý	<u>A</u>
R-materiál + Rejuvenátor 1	<u>B</u>
R-materiál + Rejuvenátor 2	<u>C</u>
R-materiál + 50/70 + Rejuvenátor 3	<u>D</u>
50/70 + Rejuvenátor 3	<u>E</u>

4.2 Výsledky zkoušek

Obsahem této kapitoly je vyhodnocení jednotlivých zkoušek prováděných na asfaltovém pojivu získaném z R-materiálu. Zkoušky byly zvoleny tak, aby nejlépe vystihovaly změny vlastností asfaltového pojiva po přidání rejuvenátorů. To jsou empirické zkoušky (penetrace jehlou a bod měknutí) a funkční zkoušky jako DSR a BBR. Byl taky proveden síťový rozbor pro stanovení zrnitosti kameniva získaného z R-materiálu. Výsledky zkoušek budou zapsány do tabulek a grafů. Zkoušky probíhaly dle platných příslušných norem a předpisů v laboratoři.

4.2.1 Síťový rozbor

Po extrakci pojiva z R-materiálu a následném vysušení získaného kameniva jsem provedl síťový rozbor kameniva a stanovení křivky zrnitosti kameniva. Zkouška probíhala podle normy *EN 993-1 Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Síťový rozbor* a podrobněji je popsána v kapitole 3.4.4.

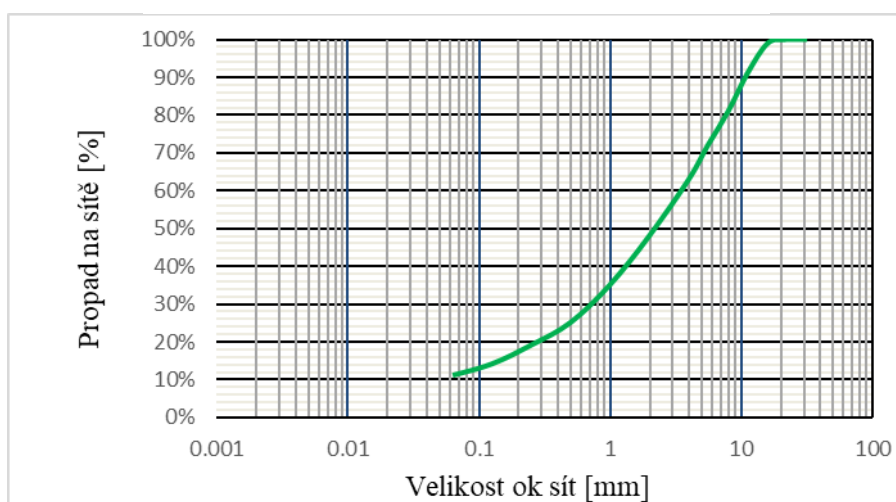
Síťový rozbor jsem provedl na dvou vzorcích kameniva získaného z R-materiálu. Hodnoty propadů kameniva na jednotlivých sítích jsem v závěru zprůměroval a následně zapsal do tabulky. Pak jsem vytvořil graf zrnitosti kameniva.

Tabulka 5: Frakce kameniva

kamenivo - frakce [mm]	32	22	16	11.2	8	5.6	4
Zůstatek na síti vzorek I [g]	0	0	39.3	241.2	289.4	292	253.3
Zůstatek na síti vzorek II [g]	0	0	24.8	230.3	291.5	261.6	242.7
Průměr [g]	0	0	32.05	235.8	290.5	276.8	248
Zbytek na síti [%]	0%	0%	1%	8%	10%	10%	9%
Propad [%]	100%	100%	99%	91%	81%	72%	63%

kamenivo - frakce [mm]	2	1	0.5	0.25	0.125	0.063
Zůstatek na síti Vzorek I [g]	442.6	347.8	261.7	191.3	126.5	89.1
Zůstatek na síti Vzorek II [g]	439.2	372.2	275.1	198.2	133.9	96.1
Průměr [g]	440.9	360	268.4	194.8	130.2	92.6
Zbytek na síti [%]	16%	13%	9%	7%	5%	3%
Propad [%]	48%	35%	25%	19%	14%	11%

Graf 1: Čára zrnitosti kameniva, R-materiál Froněk



4.2.2 Stanovení penetrace jehlou

Zkoušku jsem prováděl dle normy ČSN EN 1426 *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení penetrace jehlou*. Metoda je popsána v kapitole 3.4.5.

Každý vzorek pojiva jsem zkoušel třikrát a změřené hodnoty jsem zapsal do následujících tabulek. Poté jsem vytvořil graf penetrací pro porovnání penetrace před krátkodobým stárnutím a po něm.

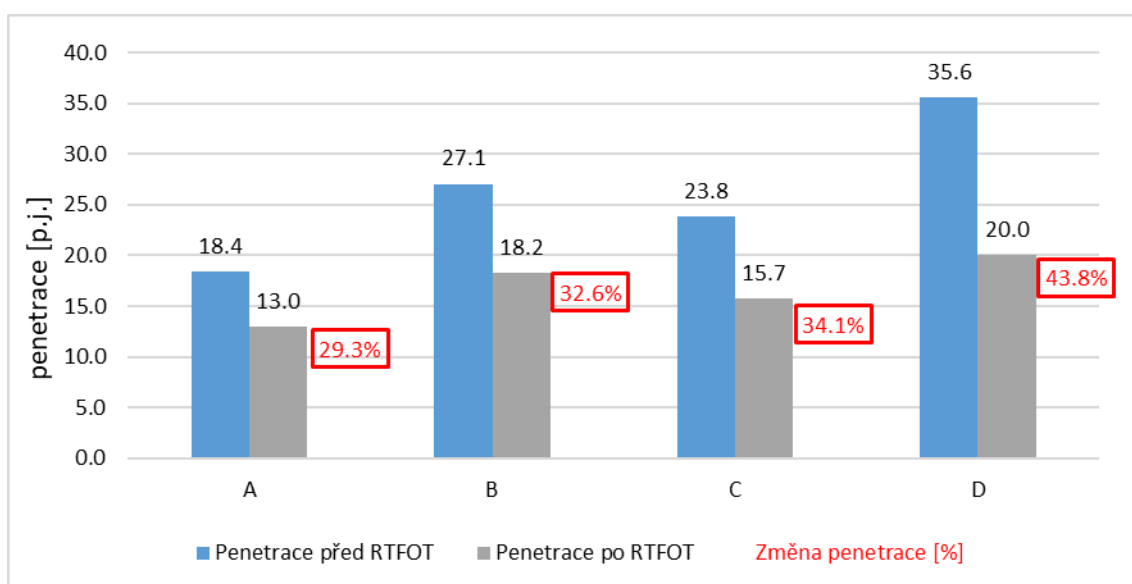
Tabulka 6: Hodnoty penetrace před RTFOT

Vzorek	penetrace [p.j.]			
	1.	2.	3.	∅
A	18.5	18.6	18.1	18.4
B	26.5	27.2	27.5	27.1
C	23.8	23.8	23.9	23.8
D	35.4	34.9	36.5	35.6

Tabulka 7: Hodnoty penetrace po RTFOT

Vzorek	penetrace [p.j.]			
	1.	2.	3.	∅
A	13.1	13.1	12.8	13.0
B	18.1	18.1	18.5	18.2
C	15.5	15.8	15.8	15.7
D	20.3	19.9	19.8	20.0

Graf 2: Penetrace



Vyhodnocení zkoušky:

Dle výsledků zkoušky zobrazených v Grafu 2 je vidět, že původní hodnota asfaltového pojiva získaného z R-materiálu se po přidání rejuvenátorů zvedla u všech

testovaných vzorků. Nejvíce se zvýšila penetrace vzorku D. Tato změna mohla být ovlivněna hlavně tím, že do směsi jsme přidávali nové silniční pojivo 50/70. Změna penetrace po provedení krátkodobého stárnutí asfaltového pojiva metodou RTFOT byla u všech vzorků přibližně stejná. Hodnota penetrace se nejvíce snížila u vzorku pojiva s Rejuvenátorem 3.

4.2.3 Stanovení bodu měknutí - Metoda kroužek & kulička

Stanovení bodu měknutí se stanovuje pomocí metody kroužek kulička. Tato metoda je popsána v kapitole 3.4.6. Během zkoušky jsem zjišťoval teplotu bodu měknutí pro dva vzorky stejného druhu pojiva současně. Výsledné hodnoty jsem zapsal do tabulky a spočítal jsem průměrnou hodnotu bodu měknutí jednotlivých vzorků. Hodnoty bodu měknutí nižší než 80 °C jsem zaokrouhlil na nejbližších 0,2 °C. Následně jsem vytvořil graf pro porovnání bodu měknutí pro vzorky před krátkodobým stárnutím a po krátkodobém stárnutí.

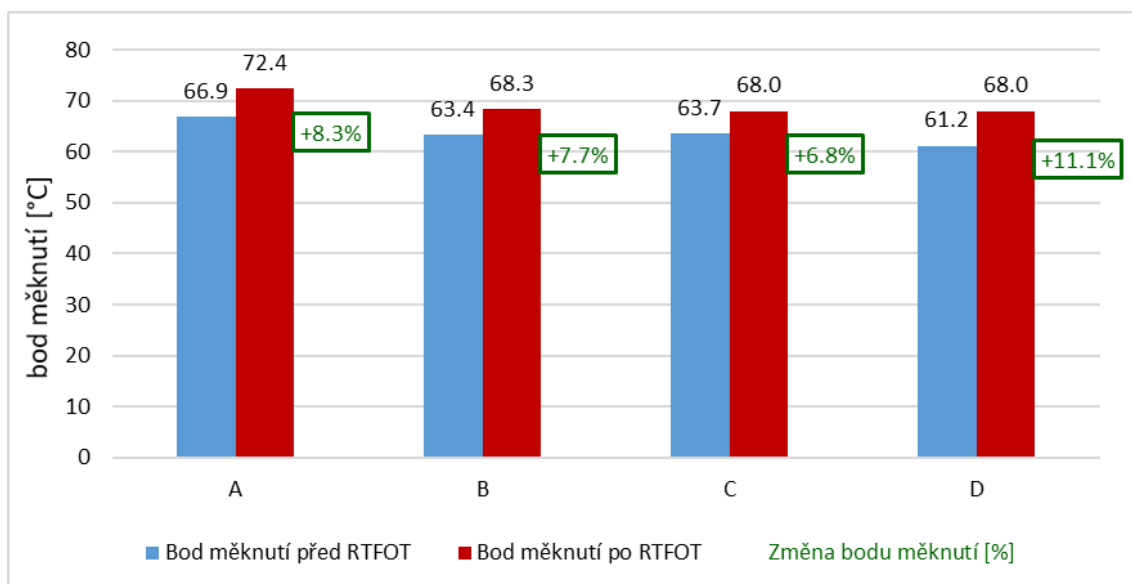
Tabulka 8: Bod měknutí před RTFOT

Vzorek	bod měknutí vzorku [°C]		
	levý	pravý	Ø
A	66.8	66.9	67.0
B	63.6	63.2	63.4
C	63.9	63.4	63.8
D	61.7	60.7	61.2

Tabulka 9: Bod měknutí po RTFOT

Vzorek	bod měknutí vzorku [°C]		
	levý	pravý	Ø
A	72.3	72.5	72.4
B	68.5	68.1	68.4
C	67.7	68.3	68.0
D	68.2	67.8	68.0

Graf 3: Bod měknutí



Vyhodnocení zkoušky:

Při návrhu dávkování rejuvenátorů jsem postupoval dle pokynů výrobce a vypočítal jsem množství rejuvenátoru dle bodu měknutí tak, abych dosáhl snížení na 61,5 °C. Podle výsledků měření bodu měknutí se nám to povedlo pouze u vzorku D. U ostatních vzorků nebyla změna bodu měknutí dostatečná. Celkově se ale hodnoty bodu měknutí po provedení krátkodobého stárnutí zvýšily, což znamená, že se zvýšila horní hranice oboru plasticity. Tím pádem je asfaltové pojivo odolnější vůči vysokým teplotám (odolnost vůči tvorbě trvalých deformací – vyjeté koleje od vozidel). Tedy bylo důležité zjistit, jak je asfaltové pojivo náchylné na nízké teploty. To jsem provedl pomocí zkoušky BBR, viz níže.

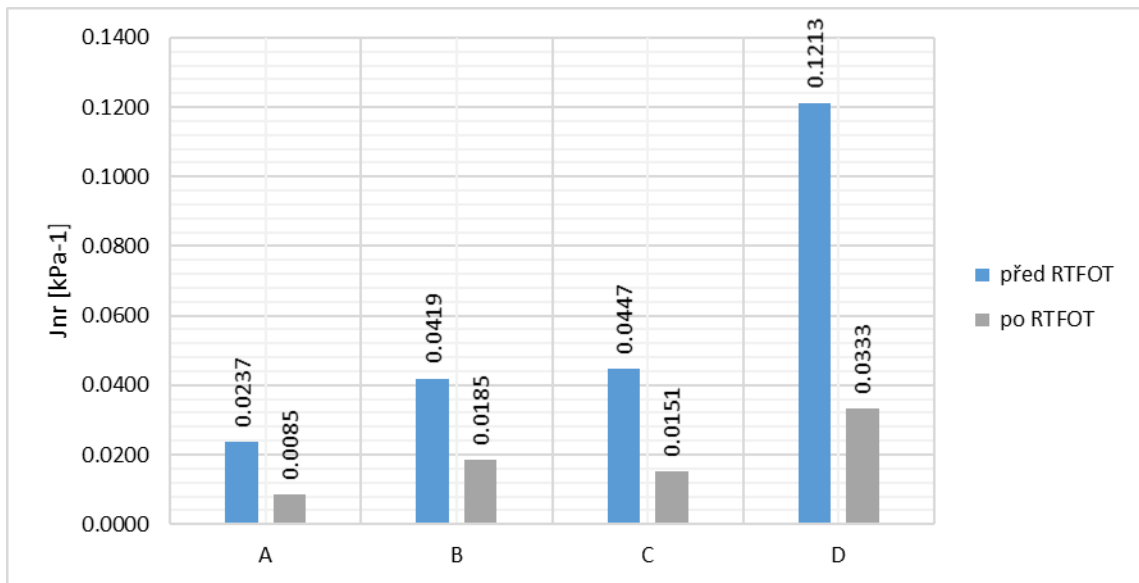
4.2.4 Dynamický smykový reometr (DSR)

Pomocí přístroje DSR jsem prováděl dvě zkoušky pro zjištění vysokoteplotních vlastností asfaltového pojiva. Jedna ze zkoušek byla zkouška MSCR (Multiple stress-creep recovery test). Zkouška byla rozdělena do dvou fází a prováděl jsem ji při dvou teplotách 50 °C a 60 °C. První fáze zkoušky probíhala při zatížení napětím 0,1 kPa a druhá při napětí 3,2 kPa. Každá fáze obsahovala 10 cyklů (každý cyklus se skládal ze zatížení po dobu 1 sekundy a následného odlehčení po dobu 9 sekund). Měření probíhalo pomocí geometrie 25 mm s mezerou 1 mm. Zjišťovalo se průměrné elastické přetvoření R a nevratná smyková poddajnost J_{nr} .

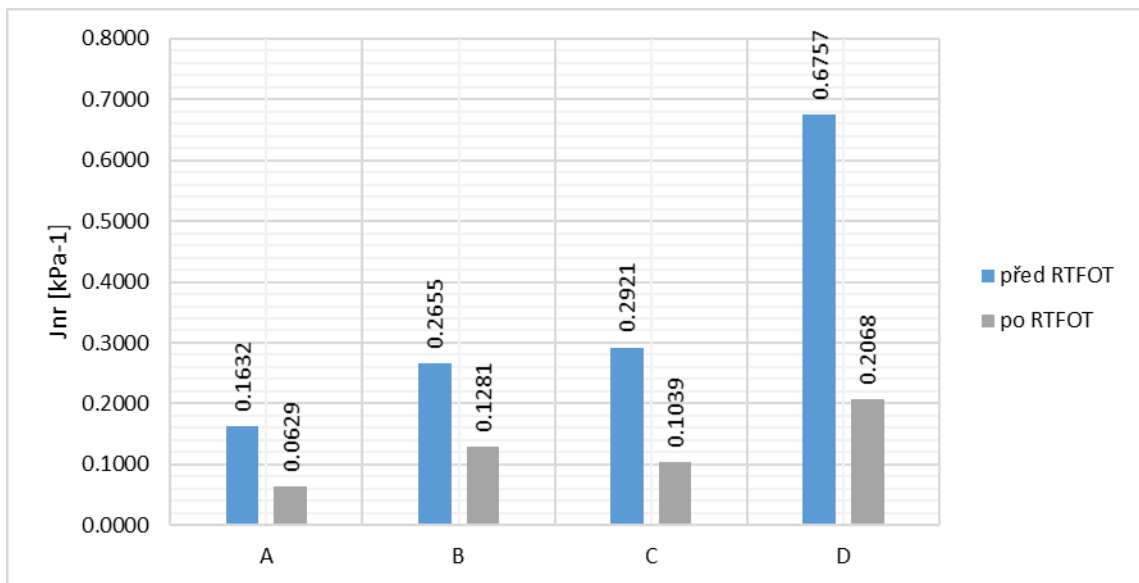
Druhou ze zkoušek byla Oscilace. Tuto zkoušku jsem prováděl při teplotě 60 °C a frekvenci 1,585 Hz. Zjišťoval jsem komplexní smykový modul G^* a fázový úhel δ . Smykový modul G^* má dvě složky. Nevratná složka (viskózní) se značí G'' a pružná složka (elastická) s označením G' .

Obě zkoušky jsem provedl na vzorcích pojiva nezestárých metodou RTFOT a taky zestárých metodou RTFOT. Výsledky obou zkoušek jsem zaznamenal a následně jsem vytvořil grafy pro porovnání výsledků.

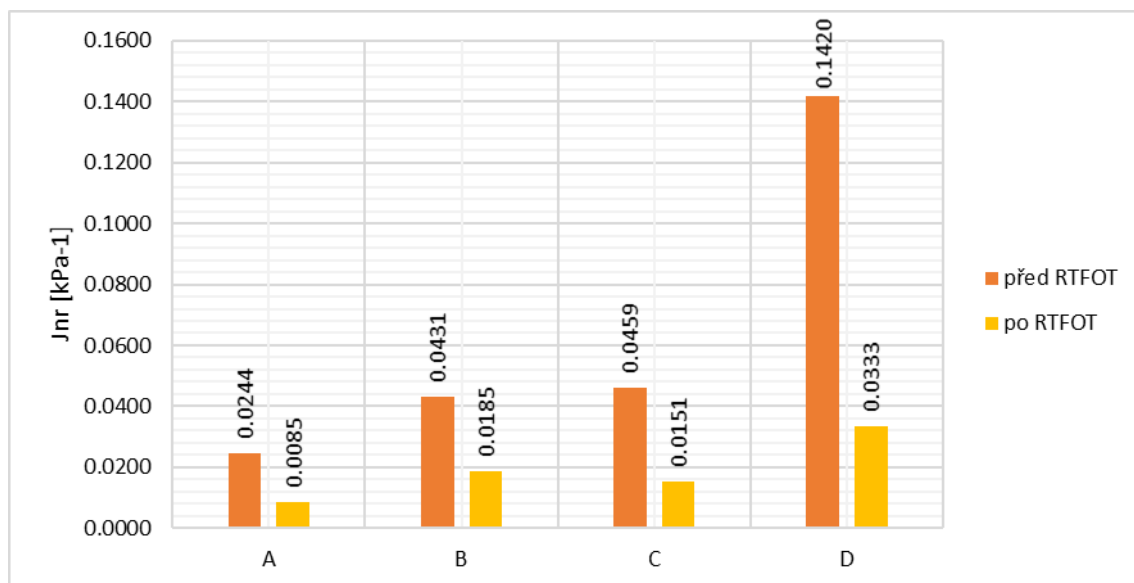
Graf 4: Hodnoty nevratné smykové poddajnosti ($t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\sigma = 0,1\text{ kPa}$)



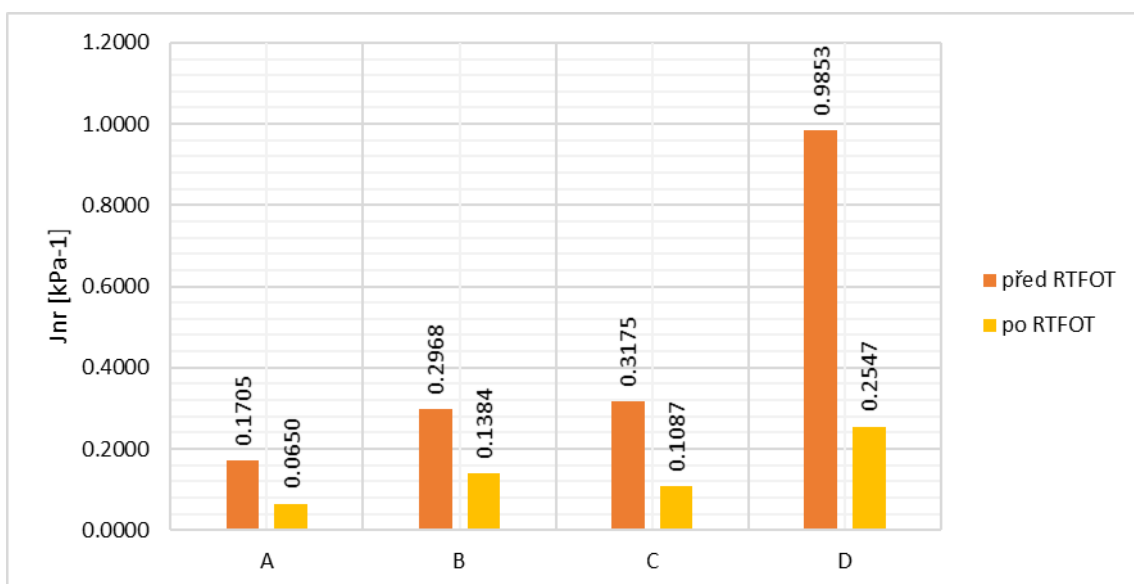
Graf 5: Hodnoty nevratné smykové poddajnosti ($t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\sigma = 0,1\text{ kPa}$)



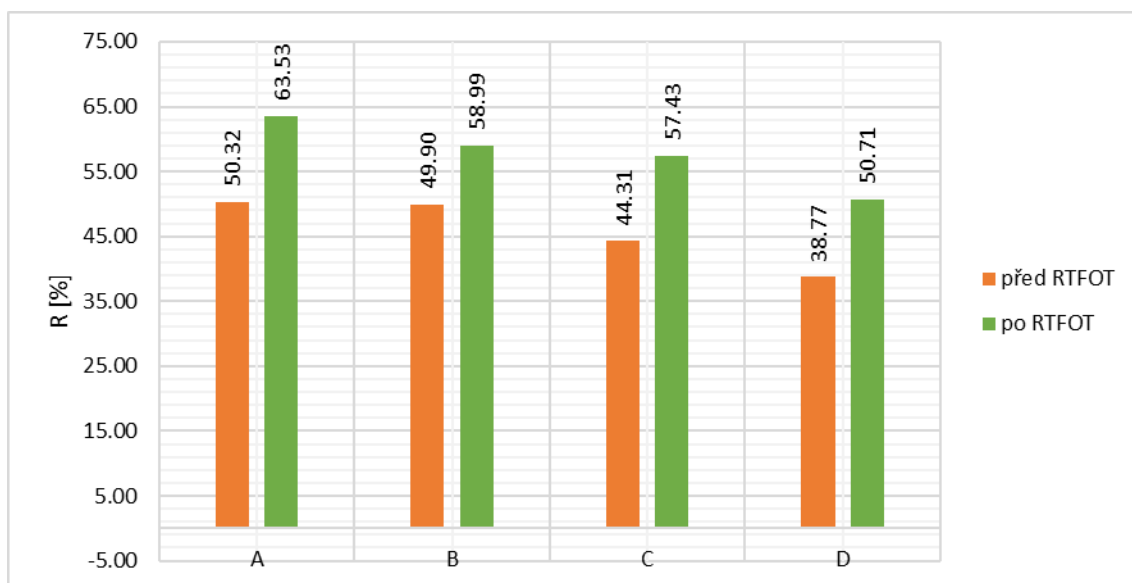
Graf 6: Hodnoty nevratné smykové poddajnosti ($t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\sigma = 3,2\text{ kPa}$)



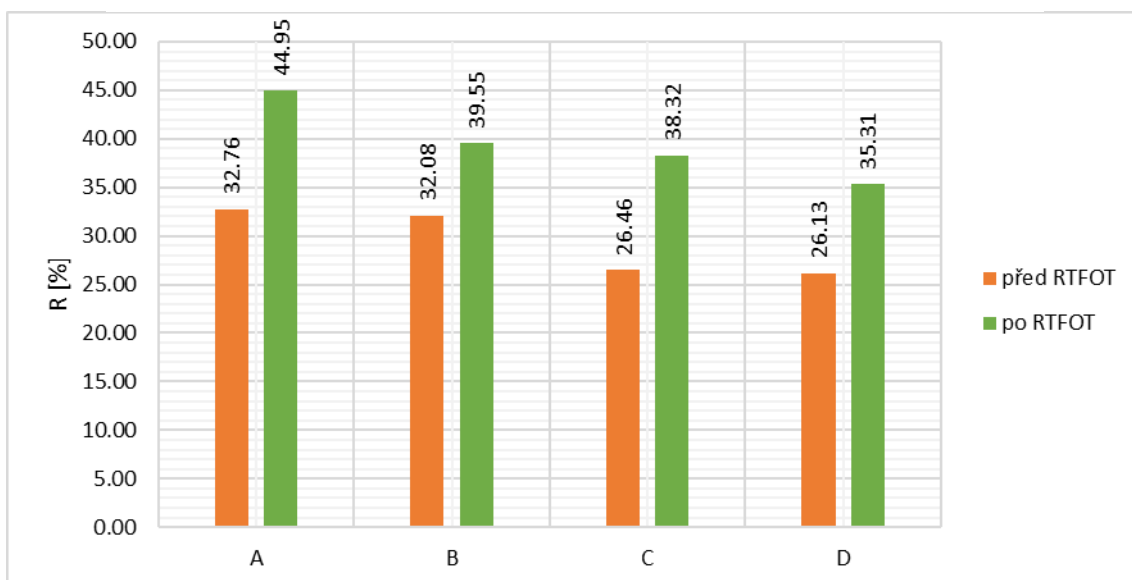
Graf 7: Hodnoty nevratné smykové poddajnosti ($t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\sigma = 3,2\text{ kPa}$)



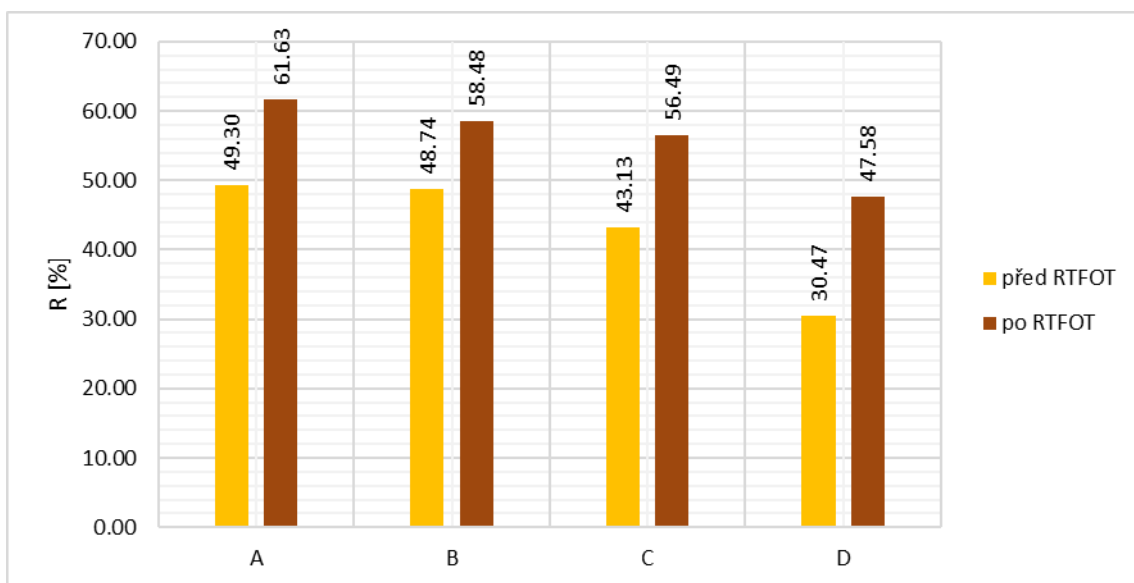
Graf 9: Hodnoty průměrného procentuálního zotavení ($t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\sigma = 0,1\text{ kPa}$)



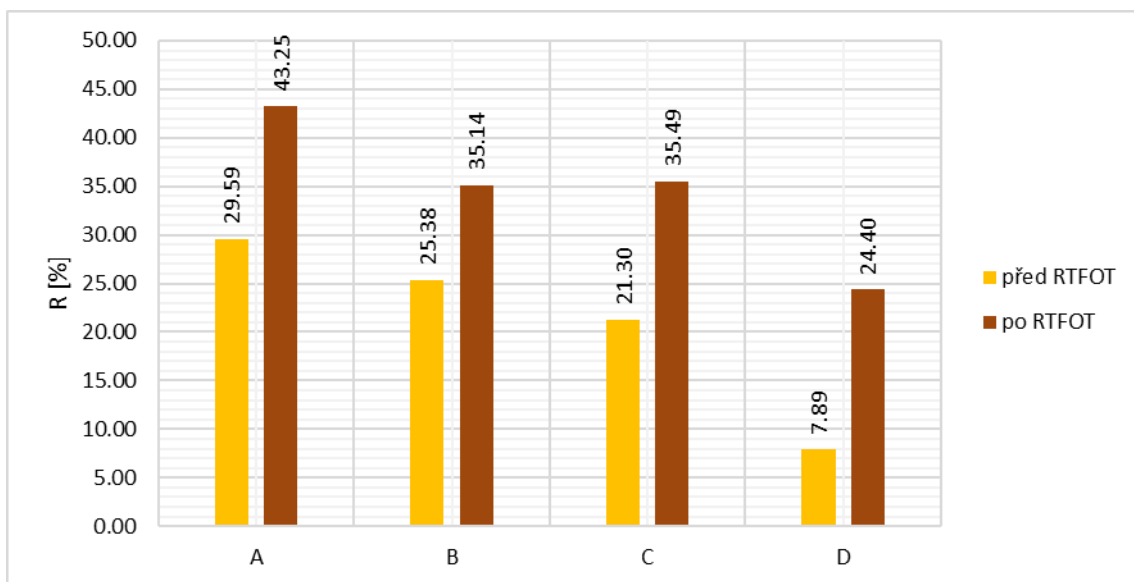
Graf 8: Hodnoty průměrného procentuálního zotavení ($t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\sigma = 0,1\text{ kPa}$)



Graf 10: Hodnoty průměrného procentuálního zotavení ($t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\sigma = 3,2\text{ kPa}$)



Graf 11: Hodnoty průměrného procentuálního zotavení ($t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\sigma = 3,2\text{ kPa}$)



Vyhodnocení zkoušky MSCR:

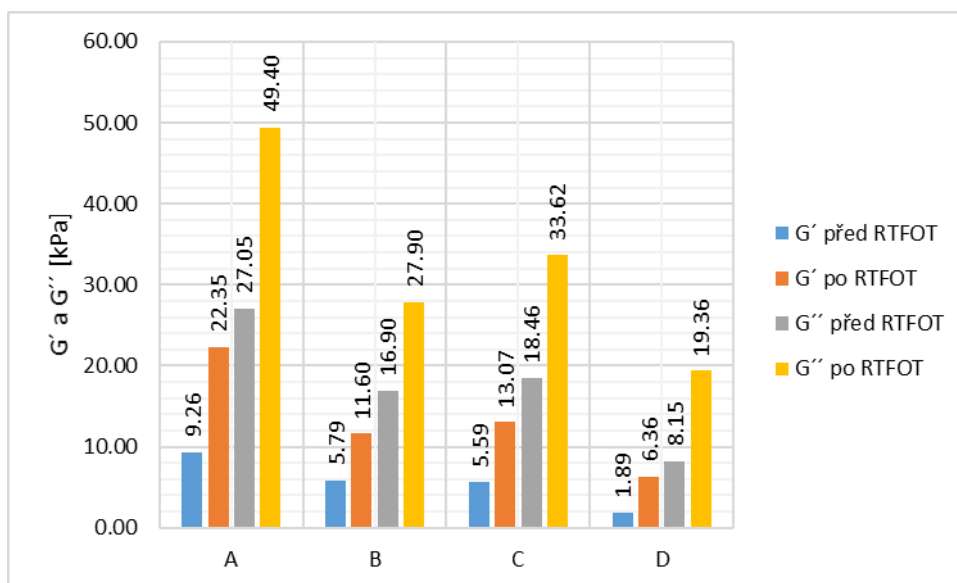
Dle hodnot nevratné smykové poddajnosti J_{nr} zobrazených v grafech 4 až 7 je vidět, že tyto hodnoty jsou silně závislé na teplotě, kdy s rostoucí teplotou roste hodnota nevratné smykové poddajnosti a tím klesá odolnost pojiva vůči trvalým deformacím. Největší nárůst hodnot J_{nr} nastal u vzorku D při napětí 3,2 kPa. Je to vzorek, do kterého se přidávalo nové asfaltové pojivo, takže je taky logické, že bude nejnáchylnější na trvalé deformace. U ostatních vzorků byla změna hodnot J_{nr} vlivem teploty navzájem přibližně stejná a mnohem menší než u vzorku D. Vlivem krátkodobého stárnutí se hodnota J_{nr} zmenšila u všech vzorků o přibližně 50 %. Celkově nejmenších z hlediska odolnosti vůči trvalým deformacím dosáhl vzorek A, který neobsahoval žádný rejuvenátor.

Další zjišťovanou veličinou bylo průměrné procentuální zotavení R, jehož hodnoty jsou vyneseny v grafech 8 až 11. S rostoucí hodnotou R roste návratnost pojiva do původního stavu, je tedy více elastické a lépe odolává trvalým deformacím. Stejně jako u nevratné smykové poddajnosti, tak i tady měla největší vliv zvyšující se teplota při provádění zkoušky. Dle grafů je vzorek D nejvíce náchylný na tvorbu trvalých deformací, protože má nejmenší hodnoty R ze všech testovaných vzorků. Vlivem zvýšené teploty nastal u všech vzorků přibližně 20% pokles hodnoty průměrného procentuálního zotavení. U vzorku A se znovu potvrdily nejlepší hodnoty vzhledem k odolnosti vůči trvalým deformacím.

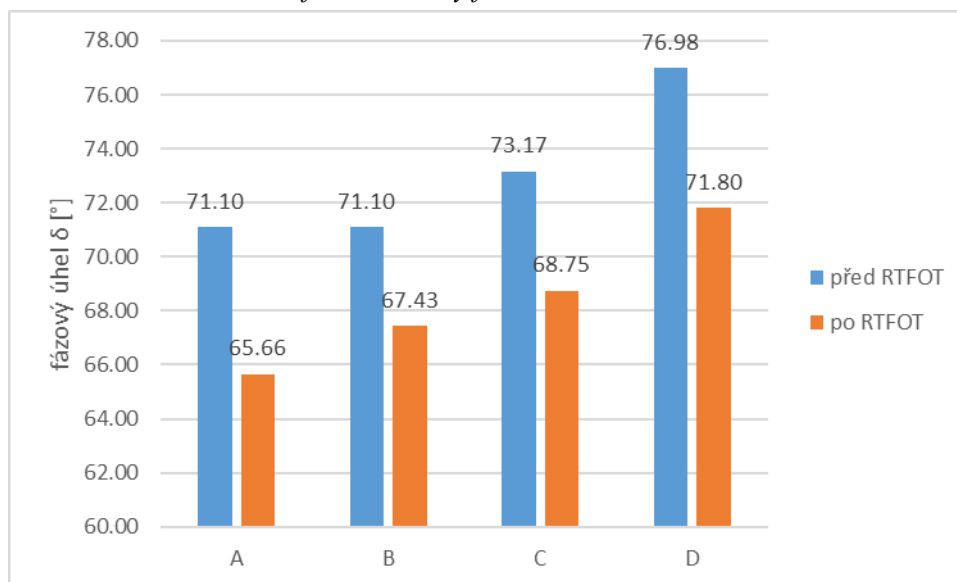
Tabulka 10: Hodnoty G^*, G', G'' a δ

	Vzorek	G^* [kPa]	G' [kPa]	G'' [kPa]	δ [°]	$G^*/\sin \delta$ [kPa]
Před RTFOT	A	28.60	9.26	27.05	71.10	30.23
	B	17.87	5.79	16.90	71.10	18.89
	C	19.29	5.59	18.46	73.17	20.15
	D	8.37	1.89	8.15	76.98	8.59
Po RTFOT	A	54.22	22.35	49.40	65.66	59.51
	B	30.22	11.60	27.90	67.43	32.73
	C	36.07	13.07	33.62	68.75	38.70
	D	20.38	6.36	19.36	71.80	21.45

Graf 12: Poměr složek G' a G'' ($f = 1,585 \text{ Hz}$, $t = 60 \text{ }^\circ\text{C}$)



Graf 13: Hodnoty fázového úhlu



Vyhodnocení komplexního smykového modulu a fázového úhlu z oscilačního měření zařízení DSR:

Hodnoty zkoušky jsou zobrazeny v předchozí Tabulce 10 a taky v grafech 12 a 13. Výsledkem této zkoušky je komplexní smykový modul G^* a jeho dílčí složky G' (pružná složka) a G'' (nevratná složka) a taky fázový úhel δ měřené při frekvenci 1,585 Hz. Změřené hodnoty byly zapsány do tabulky a poté byl vytvořen graf porovnávající dílčí složky smykového napětí.

Z výsledků vyplývá, že pojivo bez rejuvenátoru vykazuje nejvyšší hodnotu komplexního smykového modulu. U pojiv s rejuvenátorem hodnota G^* klesá, což potvrzuje omlazovací efekt zestárlého pojiva. Nejnižší hodnoty bylo dosaženo u pojiva D s obsahem pryže. Při hodnocení vlivu rejuvenátoru je důležité hodnotit i velikost fázového úhlu, který při oxidativním stárnutí stoupá. Z výsledků vyplývá, že například rejuvenátor B snížil výrazně hodnotu komplexního smykového modulu, ale hodnota fázového úhlu zůstala stejná, což dokazuje, že se neobnovila chemická struktura pojiva. Lepších výsledků bylo dosaženo u pojiva C a D.

Pomocí výsledků z oscilačního měření je možné alternativně hodnotit odolnost pojiva vůči tvorbě trvalých deformací, kdy se nejčastěji používá parametr $G^*/\sin \delta$. Dle americké návrhové metody SHRP je po aplikaci krátkodobého stárnutí metodou RTFOT minimální hodnota parametru 2,2 kPa. U všech vzorků byla tato hodnota parametru $G^*/\sin \delta$ vyšší.

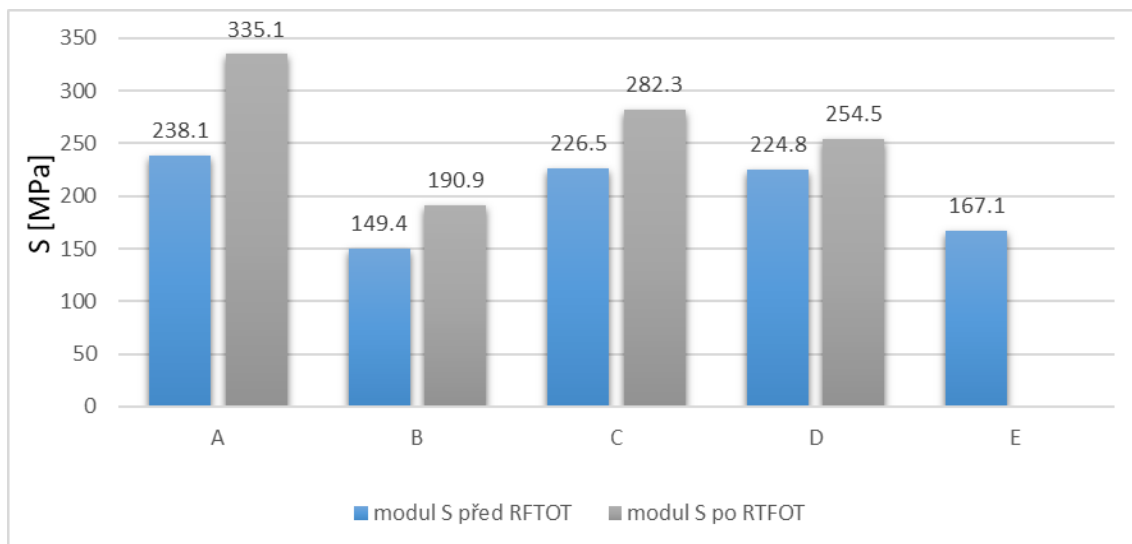
Se snižující se hodnotou komplexního smykového modulu G^* a rostoucí hodnotou fázového úhlu δ roste náchylnost asfaltového pojiva vůči tvorbě trvalých deformací.

4.2.5 Průhybový trámečkový reometr (BBR)

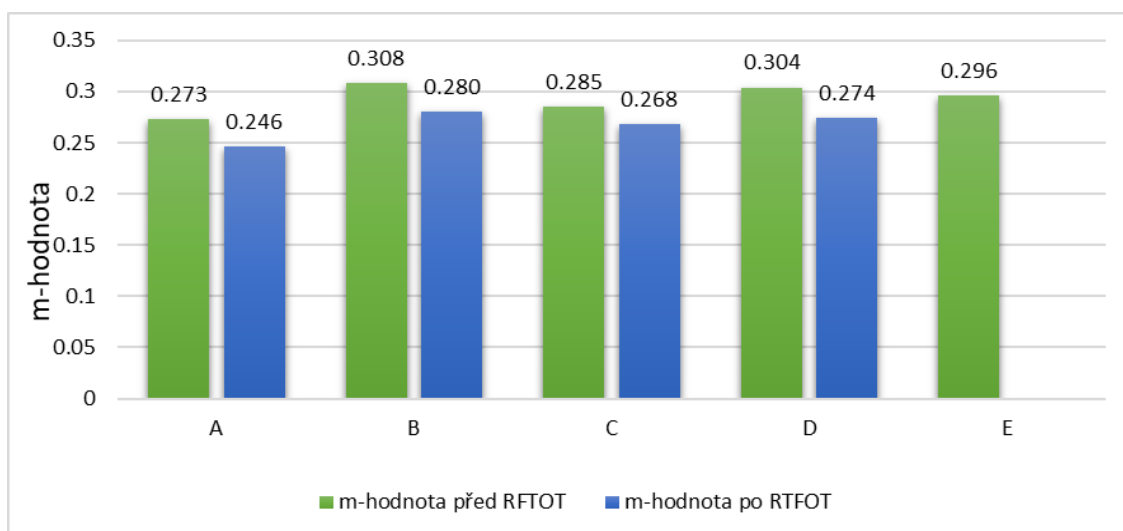
Metoda BBR se řídí normou ČSN EN 14771 – *Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru (BBR)*. Postup zkoušky je popsán v kapitole 3.4.8. Tato metoda slouží k zjišťování nízkoteplotních vlastností asfaltového pojiva. Zkoušení vzorků probíhalo při teplotě -16

°C. Z výsledků měření jsem získal hodnoty S_m – ohybovou tuhost, m -hodnotu a průhyby trámečku δ , které jsem následně zapsal do tabulek a vytvořil z nich grafy porovnávající hodnoty jednotlivých veličin před RTFOT a po RTFOT.

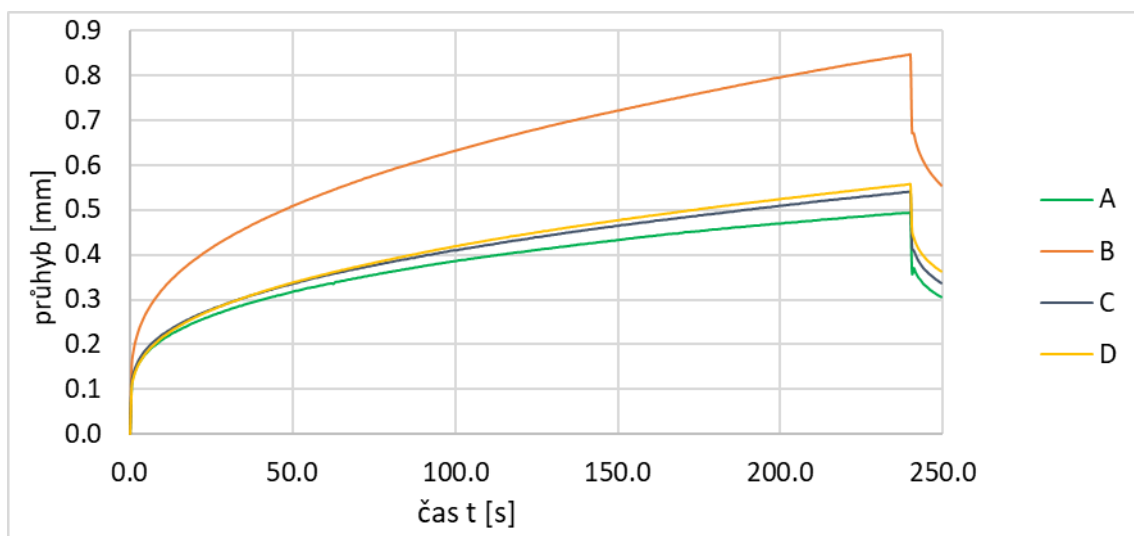
Graf 14: Hodnoty ohybové tuhosti S



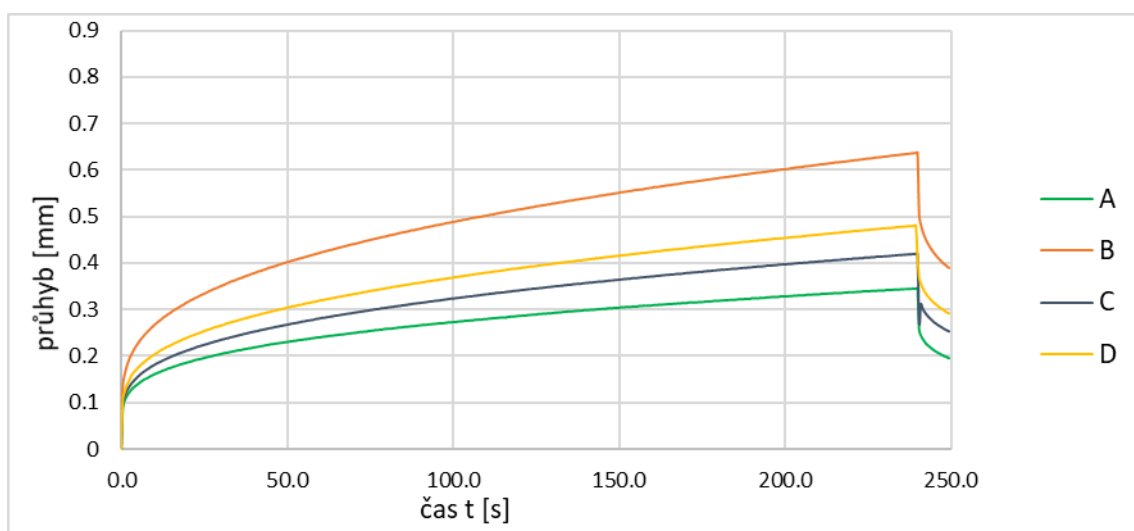
Graf 15: m -hodnota



Graf 16: Průběh průhybu před RTFOT



Graf 17: Průběh průhybu po RTFOT



Vyhodnocení zkoušky:

Z ohybové tuhosti S , m -hodnoty a průhybu δ zobrazených v grafech vyplývá, že s rostoucí hodnotou S a klesající velikosti m -hodnoty klesá hodnota průhybu,

a tím taky odolnost asfaltového pojiva vůči nízkým teplotám (vznik mrazových trhlin). Při hodnocení ohybové tuhosti vyplývá, že vzorek A je nejvíce náchylný na vznik mrazových trhlin a vzorek B naopak nejméně náchylný. Zároveň je nutné poznamenat, že vzorek B při teplotě $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ přes nízkou hodnotu ohybové tuhosti vykazuje zároveň poměrně nízkou m -hodnotu, což dokazuje nižší relaxační schopnost pojiva, která je zásadní při hodnocení s ohledem na vznik mrazových trhlin. Přesto lze vidět, že použité rejuvenátory mají pozitivní vliv na nízkoteplotní odolnost asfaltového pojiva. Vlivem krátkodobého stárnutí došlo u všech vzorků ke snížení odolnosti materiálů vůči nízkým teplotám.

5 ZÁVĚR

Účelem bakalářské práce bylo ověřit vliv různých rejuvenačních přísad na vlastnosti zestárlého asfaltového pojiva.

V teoretické části byl vysvětlen pojem R-materiál a taky byl popsán způsob jeho získávání, skladování a taky současné metody jeho zpracování a následného použití v nových směsích. Pozornost byla věnována metodě recyklace za horka na obalovně, protože hlavním účelem bakalářské práce bylo simulování postupu přidávání rejuvenačních přísad do R-materiálu v laboratorních podmínkách podle podmínek na obalovně a následném zjišťování vlivu jednotlivých rejuvenátorů na vlastnosti asfaltového pojiva.

Teoretická část taky obsahuje porovnání využívání R-materiálu do nových asfaltových směsí v České republice a v jiných státech Evropy. Lze říct, že v ostatních státech Evropy je využívání tohoto materiálu v mnohem větším měřítku než v České republice, což může být způsobeno příliš velkými obavami použití vyššího množství R-materiálu do nových směsí. V ostatních státech (hlavně na západ od nás) je to v dnešní době již běžně používaný postup. Stačilo by využít poznatků ze zahraničí (hlavně dobrou znalost vlastností R-materiálu) a začít využívat R-materiál ve větším množství než doteď.

V rámci praktické části bylo provedeno smíchání R-materiálu s rejuvenačními přísadami. Byly vytvořeny 4 vzorky, přičemž jeden vzorek obsahoval čistý R-materiál a ostatní 3 vzorky byly smíchány s rejuvenátory. Následně bylo provedeno znovuzískání asfaltového pojiva z R-materiálu pomocí extrakce a destilace. Tyto vzorky pak byly podrobeny zkouškám penetrace jehlou, bodu měknutí, MSCR, Oscilace a BBR.

Všechny vzorky byly testovány po aplikaci rejuvenátoru a také po krátkodobém stárnutí pomocí metody RTFOT. První prováděnou zkouškou bylo stanovení penetrace jehlou. Podle vyhodnocení se zjistilo, že největší změkčení nabyl vzorek D, který obsahoval kromě rejuvenátoru taky nové silniční pojivo 50/70. Dále se zjistilo, že vlivem stárnutí se u všech vzorků snížila hodnota penetrace asfaltového pojiva.

Další prováděnou zkouškou bylo stanovení bodu měknutí metodou kroužek kulička. Hodnoty bodu měknutí u všech vzorků se vlivem stárnutí RTFOT zvýšily. Z toho vyplývá, že sice jsou pojiva více odolná vůči vysokým teplotám, na druhou stranu jsou zas náchylnější na vznik mrazových trhlin.

Dále byla pojiva vystavena zkoušce MSCR a taky byl zjišťován komplexní smykový modul a fázový úhel oscilačním měřením. Obě zkoušky byly prováděny na dynamickém smykovém reometru. Zkouška MSCR byla prováděna při teplotách 50 °C a 60 °C a při zatížení 0,1 kPa a 3,2 kPa. Zjišťovala se hodnota nevratné smykové poddajnosti (J_{nr}) a průměrného procentuálního zotavení (R). Po vyhodnocení výsledku měl nejlepší hodnoty vzorek neobsahující žádný rejuvenátor (vzorek A), který tím pádem nejlépe odolává vysokým teplotám. Další zkouškou pro zjištění vysokoteplotních vlastností pojiva bylo oscilační měření prováděné při teplotě 60 °C a frekvenci 1,585 Hz. Diagnostikovala se nevratná složka komplexního smykového modulu G'' a taky jeho vratná složka G' . Dále se zjišťoval fázový úhel δ a parameter $G^*/\sin \delta$. Dle výsledků zkoušky dosáhl nejlepších hodnot vzorek A.

Poslední zkouškou prováděnou na vzorcích pojiva bylo zjišťování nízkoteplotních vlastností pojiva pomocí průhybového trámečkového reometru. Zkouška probíhala při teplotě -16 °C. Z dat získaných ze softwaru, který obsluhuje BBR se zjistila ohybová tuhost S a m-hodnota. Z výsledných hodnot se zjistilo, že nejlepší vlastnosti (nejmenší hodnotu S a největší m-hodnotu) měl vzorek obsahující Rejuvenátor 2 (vzorek B). Nejhorší vlastnosti měl vzorek čistého asfaltového pojiva (vzorek A).

Shrnutím výsledků praktické části práce lze konstatovat, že rejuvenační přísady ovlivňují vlastnosti asfaltového pojiva, které je díky nim více odolné vůči nízkým teplotám, ale zároveň méně odolné vůči vysokým teplotám.

6 SEZNAM ZDROJŮ A LITERATURY

- [1] <http://www.eapa.org/promo.php?c=174>
- [2] ČSN EN 13108-8–Asfaltové směsi – Specifikace pro materiály – Část 8: R-materiál
- [3] http://www.frekomos.cz/media/files/studena_recyklace_frekomos_web.pdf
- [4] Bc. Pavel Šperka Vliv použití R - materiálu na funkční vlastnosti asfaltových směsí. Brno, 2015. 117 s., 35 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Petr Hýzl, Ph.D.
- [5] http://www.frekomos.cz/media/files/horka_recyklace_frekomos_web.pdf
- [6] TP 209, Recyklace asfaltových vrstev netuhých vozovek na místě za horka. MINISTERSTVO DOPRAVY ČR, 2009
- [7] VARAUS, M. Recyklace asfaltových směsí na obalovně, Konference nvrhování pozemních komunikací. Brno: Pragoprojekt, 2013. Prezentace
- [8] VARAUS, M. Pozemní komunikace II - Modul 3: Asfaltová pojiva. Brno, 2005, 17 s.
- [9] ČSN EN 932-1 Zkoušení všeobecných vlastností kameniva – Část 1: Metody odběru vzorků. Slouží k získání reprezentativních, laboratorních či zkušebních vzorků
- [10] ČSN EN12697-3. Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 3: Znovuzískání extrahovaného pojiva: Rotační vakuové destilační zařízení.
- [11] EN 993-1 Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Síťový rozbor.
- [12] ČSN EN 1426 Asfalty a asfaltová pojiva- Stanovení penetrace jehlou
- [13] ČSN EN 1427- Asfalty a asfaltová pojiva- Stanovení bodu měknutí- Metoda kroužek a kulička
- [14] ČSN EN 14770-Asfalty a asfaltová pojiva- Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu – Dynamický smykový reometr (DSR).
- [15] ČSN EN 14771 – Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení modulu tuhosti

za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru (BBR).

- [16] ČSN EN 12607-1 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu – Část 1: Metoda RTFOT
- [17] TP 210 – Užití recyklovaných stavebních demoličních materiálů do pozemních komunikací
- [18] <https://www.stavebni-technika.cz/clanky/recyklace-a-asfaltovych-vozovek-za-studena>
- [19] <http://www.forconstructionpros.com/asphalt/pavers/article/12036796/remixing-during-asphalt-paving-delivers-uniform-temperatures>
- [20] <http://www.obalovna-boskovice.cz/upload/obrazky/1.jpg>
- [21] <https://www.ammann-group.com/cz-cz/plants/asphalt-plants/batch-asphalt-mixing>
- [22] <http://www.gencor.com/index.php?page=drum-mix-plants>

7 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Recyklační stroj CRMX 2 pro výrobu homogenní směsi[18].....	15
Obr. 2: Provádění recyklace za horka na místě metodou REMIX[19].....	17
Obr. 3: Šaržová obalovna Boskovice[20]	18
Obr. 4: Šaržová obalovna s paralelním bubnem[21]	19
Obr. 5: Kontinuální obalovna GENCOR ULTRAPLANT®[22].....	20
Obr. 6: Postup provádění kvartace na vzorku R-materiálu	22
Obr. 7: Odstředivka s filtrem	22
Obr. 8: Kovová patrona pro zachycení nejjemnějších částic kameniva	23
Obr. 9: Vysušené kamenivo získané z R-materiálu (vlevo) a původní R-materiál (vpravo).....	23
Obr. 10: Vakuové destilační zařízení.....	24
Obr. 11: Prosévací přístroj se zkušebními sítí	27
Obr. 12: Provádění zkoušky penetrace penetrometrem	29
Obr. 13: Přístroj pro měření bodu měknutí.....	30
Obr. 14: Prstence pro centrování kuliček během zkoušky.....	30
Obr. 15: Protážení pojiva během zkoušky bodu měknutí.....	31
Obr. 16: Dynamický smykový reometr	32
Obr. 17: Vzorek pojiva uložen na destičku reometru	34
Obr. 18: Vytlačení pojiva při nastavení mezery	34
Obr. 19: Průhybový trámečkový reometr (BBR).....	35
Obr. 20: Součásti formy na trámečky	36
Obr. 21: Složená forma na trámečky	36
Obr. 22: Seříznutí přebytečného pojiva	36
Obr. 23: Způsob uložení trámečku před začátkem měření	37
Obr. 24: Přístroj pro provádění zkoušky RTFOT	38

8 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Využívání R-materiálu v rocích 2006 a 2014 [1].....	11
Tabulka 2: Hmotnost zkušebních navážek pro hutné kamenivo[11].....	25
Tabulka 3: Hmotnosti použitých rejuvenátorů	42
Tabulka 4: Značení vzorků asfaltového pojiva.....	43
Tabulka 5: Frakce kameniva.....	44
Tabulka 6: Hodnoty penetrace před RTFOT	45
Tabulka 7: Hodnoty penetrace po RTFOT	45
Tabulka 8: Bod měknutí před RTFOT.....	46
Tabulka 9: Bod měknutí po RTFOT.....	46
Tabulka 10: Hodnoty G^* , G' , G'' a δ	53

9 SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Čára zrnitosti kameniva, R-materiál Froněk	44
Graf 2: Penetrace	45
Graf 3: Bod měknutí	47
Graf 4: Hodnoty nevratné smykové poddajnosti ($t = 50\text{ °C}$, $\sigma = 0,1\text{ kPa}$)	49
Graf 5: Hodnoty nevratné smykové poddajnosti ($t = 60\text{ °C}$, $\sigma = 0,1\text{ kPa}$)	49
Graf 6: Hodnoty nevratné smykové poddajnosti ($t = 50\text{ °C}$, $\sigma = 3,2\text{ kPa}$)	50
Graf 7: Hodnoty nevratné smykové poddajnosti ($t = 60\text{ °C}$, $\sigma = 3,2\text{ kPa}$)	50
Graf 9: Hodnoty průměrného procentuálního zotavení ($t = 60\text{ °C}$, $\sigma = 0,1\text{ kPa}$)	51
Graf 8: Hodnoty průměrného procentuálního zotavení ($t = 50\text{ °C}$, $\sigma = 0,1\text{ kPa}$)	51
Graf 10: Hodnoty průměrného procentuálního zotavení ($t = 50\text{ °C}$, $\sigma = 3,2\text{ kPa}$)	52
Graf 11: Hodnoty průměrného procentuálního zotavení ($t = 60\text{ °C}$, $\sigma = 3,2\text{ kPa}$)	52
Graf 12: Poměr složek G' a G'' ($f = 1,585\text{ Hz}$, $t = 60\text{ °C}$)	54
Graf 13: Hodnoty fázového úhlu	54
Graf 14: Hodnoty ohybové tuhosti S	56
Graf 15: m-hodnota.....	56

Graf 16: Průběh průhybu před RTFOT.....	57
Graf 17: Průběh průhybu po RTFOT.....	57