VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ
INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

VLIV TEPLOTY NA PŘÍPRAVU ASFALTOVÝCH SMĚSÍ S VYŠŠÍM OBSAHEM R-MATERIÁLU
INFLUENCE OF THE TEMPERATURE ON THE PREPARING OF ASPHALT MIXTURES WITH HIGHER AMOUNT OF RAP

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR
Petr Škrobáček

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR
doc. Dr. Ing. MICHAL VARAUS

BRNO 2018

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	Petr Škrobáček
Název	Vliv teploty na přípravu asfaltových směsí s vyšším obsahem R-materiálu
Vedoucí práce	doc. Dr. Ing. Michal Varaus
Datum zadání	30. 11. 2016
Datum odevzdání	26. 5. 2017

V Brně dne 30. 11. 2016

doc. Dr. Ing. Michal Varaus Vedoucí ústavu	prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc. Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

ČSN EN 13108-1 Asfaltový beton
ČSN EN 13108-8 R-materiál
ČSN EN 12697-35 Laboratorní výroba směsi
Kniha Technologie stavby vozovek - Jan Zajíček a kol.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Práce je zaměřena na přípravu R-materiálu pro výrobu asfaltových směsí. Sledována bude změna teploty temperace R-materiálu a vliv na optimální množství dávkování rejuvenátoru.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ 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).

doc. Dr. Ing. Michal Varaus
Vedoucí bakalářské práce

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Petr Škrobáček *Vliv teploty na přípravu asfaltových směsí s vyšším obsahem R-materiálu.* Brno, 2018. 42 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce doc. Dr. Ing. Michal Varaus

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je zaměřena na přípravu R-materiálu pro výrobu asfaltových směsí. V rámci práce je sledován vliv teploty přípravy R-materiálu na vlastnosti obsahovaného asfaltového pojiva. V teoretické části je představeno asfaltové pojivo jako takové a R-materiál. V praktické části je představena samotná příprava materiálu ke zkoušení v laboratorních podmínkách, dále jsou provedeny extrakce a destilace asfaltového pojiva. Na takto získaných pojivech jsou provedeny následující zkoušky: penetrace dle ČSN EN 1426, bod měknutí dle ČSN EN 1427 a zkouška na dynamickém reometru. V poslední části bakalářské práce je provedeno porovnání jednotlivých vlastností vydestilovaného asfaltového pojiva zkoumaných směsí R-materiálu s cílem vyhodnotit teploty předehřívání a degradaci asfaltového pojiva na konečné vlastnosti asfaltové směsi s vyšším obsahem R-materiálu. Z naměřených výsledků je patrné, že vliv teploty přípravy R-materiálu před samotnou výrobou asfaltové směsi má nezanedbatelný vliv na vlastnosti asfaltového pojiva, které je obsaženo v R-materiálu.
Dále je patrný rozdíl mezi vzorky směsi R-materiálu a R-materiálem pouze z ložní vrstvy.

KLÍČOVÁ SLOVA

R-materiál, extrakce, destilace, stárnutí, penetrace, bod měknutí

ABSTRACT

This bachelor thesis is focused on the preparation of the reclaimed asphalt pavement for production of asphalt mixtures. In the thesis there is investigated the effect of the temperature of preparation the reclaimed asphalt pavement on the characteristic of the bitumen content. In the theoretical part there is described bitumen as such and reclaimed asphalt pavement. In the practical part there is described the preparation of the material for laboratory tests. The next step is the extraction and distillation of bitumen.
These bitumens are tested according to depredescribed tests: 'Determination of needle penetration (ČSN EN 1426)', 'The softening point (ČSN EN 1427)' and 'Dynamic shear rheometer'. In the last section of this bachelor thesis there is a comparison of the individual properties of the rendered bitumen of the asphalt mixtures of reclaimed asphalt pavement, with the aim of evaluating temperatures of preheating and degradation of the bitumen on the final characteristic of the asphalt mixtures witch higher quantity reclaimed asphalt pavement. The measured values of the temperature for preparation of reclaimed asphalt pavement shows that the temperature of the asphalt mixture before production has a significant effect on the characteristics of the bitumen, which is included in the reclaimed asphalt pavement.
There is evident the difference between specimen of the asphalt mixture of reclaimed asphalt pavement and the reclaimed asphalt pavement. It is visible only from the bottom layer too.

KEYWORDS

Extraction, distillation, ageing, penetration, softening point

PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 23. 5. 2018

Petr Škrobáček
autor práce

Tímto bych chtěl poděkovat doc. Dr. Ing. Michalu Varausovi, Ing. Tomášovi Koudelkovi, Pavlu Strakovi a všem zaměstnancům laboratoře pozemních komunikací VUT FAST v Brně, za odborné vedení a cenné rady při vypravování bakalářské práce.

Obsah

1. ÚVOD 9
2. Cíl práce 10
2.1. Asfaltové pojivo 10
2.2. R-materiál 12
3. VÝROBA SMĚSI S R-MATERIÁLEM 12
3.1. Šaržová obalovna 14
3.2. Kontinuální obalovna 15
3.3. Obsah R-materiálu ve směsi 16
4. Dosavadní poznatky 17
4.1. Ohřev R-materiálu 18
5. PRAKTICKÁ ČÁST 19
5.1. Příprava R-materiálu 19
5.2. Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor 20
5.3. Extrakce asfaltového pojiva 22
5.4. Zpětná destilace asfaltového pojiva 23
5.5. Použité zkušební metody asfaltového pojiva 25
5.5.1. Penetrace jehlou 25
5.5.2. Bod měknutí stanovený metodou kroužek kulička 26
5.5.3. Penetrační index 27
5.5.4. Reologické vlastnosti sledovaných směsí 28
Dynamická viskozita 29
Komplexní smykový modul a fázový úhel 30
6. VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT 32
6.1. Naměřené hodnoty 32
6.1.1. Penetrace jehlou 32
6.1.2. Bod měknutí 34
6.2. Tabulka naměřených hodnot 36
7. ZÁVĚR 39
POUŽITÁ LITERATURA 40
SEZNAM OBRÁZKŮ 42
SEZNAM TABULEK 42
SEZNAM GRAFŮ 42

1. ÚVOD

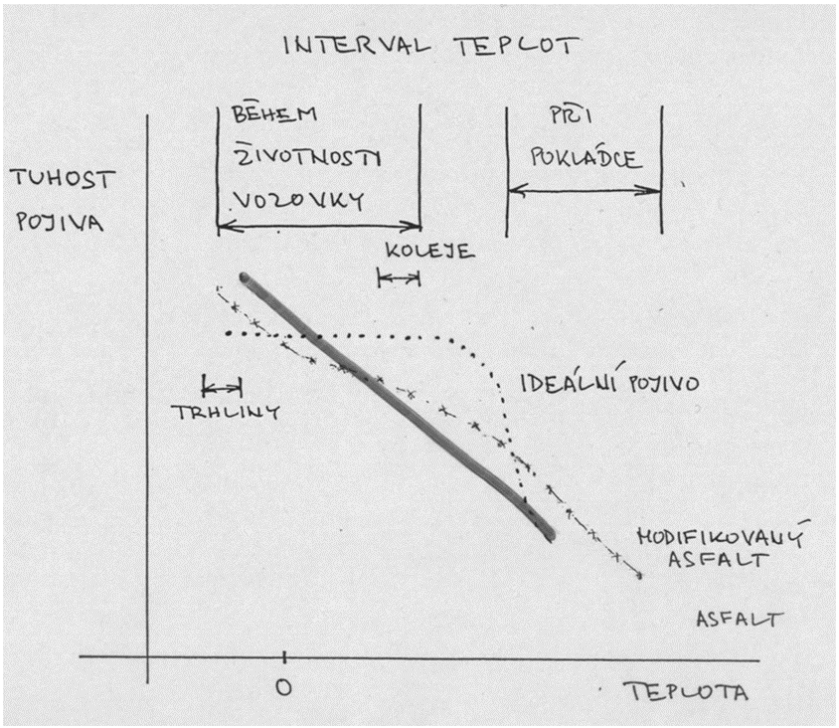
Recyklace stavebního materiálu po skončení jeho životnosti je velmi důležitá pro zachování udržitelnosti rozvoje a potlačování rozdílu mezi ekonomickým růstem a ochranou životního prostředí.
Recyklace je důležitá pro zachování neobnovitelných materiálových zdrojů jako jsou přírodní kamenivo a asfaltové pojivo. Používání R-materiálu do asfaltových směsí je přívětivé i k ochraně životního prostředí. Díky využití asfaltových recyklátů je snižován objem skladovaného materiálu a tím klesá i množství potřebných skládek. Proto je snaha zvyšovat množství R-materiálu v nově vyráběných asfaltových směsích.
Cílem recyklace je hlavně přeměna poškozené konstrukce vozovky, která vykazuje známky degradace, snížení únosnosti nebo konec životnosti na konstrukci splňující podmínky zatížení a jakosti.
Proti tomu jde, že využívání asfaltového R-materiálu není technicky jednoduchý proces. Navíc musí splňovat určitý ekonomický potenciál a výrobci přinést pozitivní ekonomický dopad. V dnešní době není zatím ze strany správců komunikací vhodné prostředí a požadavky na zpracování materiálu z původní konstrukce vozovky. Místo toho musí výrobci asfaltových směsí R-materiál kupovat (relativně nízké rozdíly nákupních cen s novými surovinami), což s požadavky na technologii zpracování recyklovatelného materiálu brání rozvoji využitelnosti asfaltového recyklátu. [25]

2. Cíl práce

Cílem bakalářské práce je především zjištění vlastností asfaltových pojiv získaných z různých vzorků R-materiálu a dále pak určení vlivu teploty temperace R-materiálu na změnu vlastností asfaltového pojiva.
Pozornost bude věnována porovnání vlastností asfaltového pojiva, které bylo předehřáto na různou teplotu. Vlastní R-materiál byl pouze vysušen při zvýšené laboratorní teplotě (50 °C), následně nahříván po dobu 2,5 hodiny při teplotě 110 °C respektive 150 °C. Na takto připravených R-materiálech došlo k extrakci a následné destilaci asfaltového pojiva s cílem porovnání vlivu teploty přípravy na vlastnosti asfaltového pojiva. Parametry jsou zjišťovány pomocí penetrace jehlou, bodem měknutí a reologickými vlastnostmi měřenými na reometru. Zjištěné změny vlastností ukazují míru degradace pojiva při předehřívání.

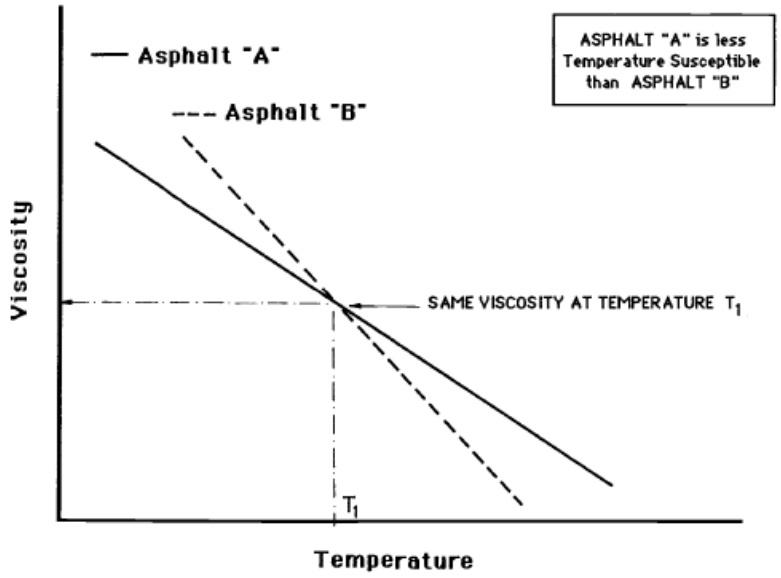
2.1. Asfaltové pojivo

Asfaltové pojivo je směs uhlovodíků (obsah uhlíku 80-85 % a vodíku 10-17%), jejíž viskoelastické chování se mění se změnou teploty. Jedná se o koloidní směs vysoce molekulárních uhlovodíků, v které je zastoupeno až kolem tisíc různých sloučenin. Ty se rozdělují na tekuté složky (oleje, pryskyřice a nasycené uhlovodíky) označovány jako maltény a pevné složky – označované jako asfaltény.
Asfalty lze rozdělit dle původu na přírodní a ropné. Přírodní asfalty se vyskytují v malém množství, největším zdrojem přírodního asfaltu je jezero Trinidad. Tento asfalt je příliš tvrdý nato aby mohl být použit jako pojivo do asfaltové směsi, z tohoto důvodu se provádí jeho míchání s měkkými ropnými asfalty, které pak běžně používáme k výrobě směsi. Ropné asfalty se získávají destilací surové ropy. Výroba probíhá v třístupňovém zařízení. Ropa se z nádrží přečerpá do odsolovací stanice, kde se odstraní obsah solí, poté se dostává do odpařovací kolony, kde se odstraní lehké podíly a po předehřátí v peci se vstřikuje do atmosférické destilační kolony, kde se oddestiluje benzin, petrolej a oleje. Zbytek se nazývá mazut. Mazut se dále destiluje ve vakuové koloně, kde se odstraní další oleje, a zůstává asfalt.
Jednou z nejdůležitějších vlastností asfaltového pojiva je jeho teplotní citlivost, tj. jak moc se mění jeho mechanicko-fyzikální vlastnosti (např. tuhost nebo viskozita) se změnou teploty.



Graf 1: Vliv teploty na tuhost asf. pojiva [22]

Význam spočívá v tom, že dvě nebo více asfaltových pojiv může mít stejnou hodnotu viskozity při shodné teplotě, ale podstatně se hodnoty viskozity liší při jiných teplotách.
Asfaltové pojiva vykazující dobrou teplotní citlivost, jsou méně náchylná k praskání nebo trvalým deformacím i v podnebích s velkým rozdílem sezonních teplot.
Teplotní citlivost je velice závislá na teplotním rozmezí a přímo souvisí s typem použitého asfaltového pojiva. Viskozita asfaltového pojiva se při vyšších teplotách mění rychleji než při nízkých teplotách.



Graf 2: Rozdílnost teplotní citlivosti asf. pojiva [23]

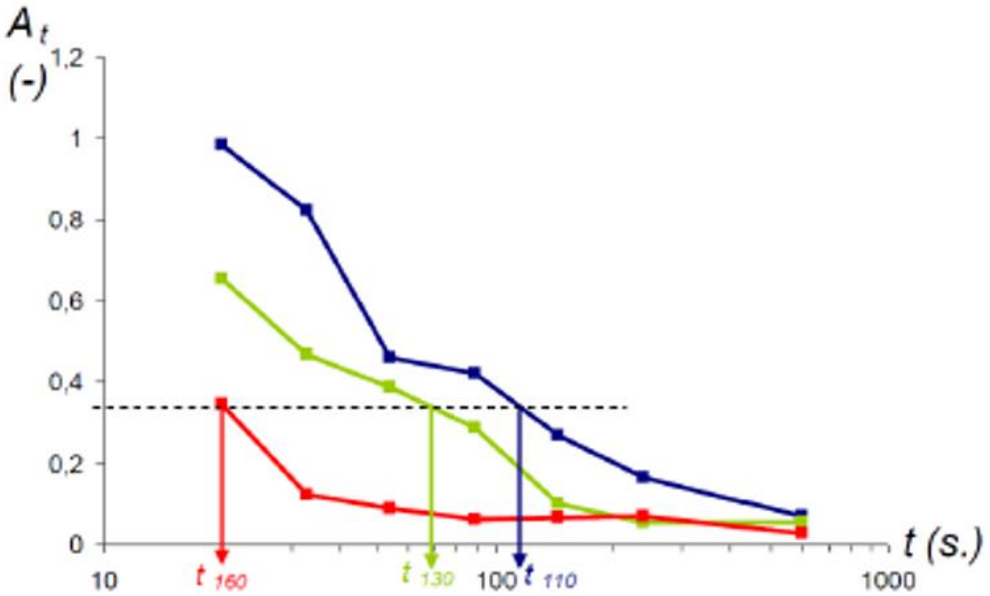
Proto se vždy veškeré výsledky reologických zkoušek asfaltového pojiva udávají s teplotním údajem. Asfaltové pojivo je označováno jako viskoelastický materiál.
Protože je asfalt organická látka, reaguje se vzdušným kyslíkem a oxiduje, tzv. stárne, stává se tvrdším a křehčím. K oxidačnímu procesu dochází rychleji při vysokých teplotách. [7]

2.2. R-materiál

Pro charakterizaci R-materiálu, lze vycházet z definice v normě ČSN EN 13108-8 [2], která zní: „R-materiál se z asfaltové směsi znovuzískané frézováním vrstev vozovek, drcením vybouraných asfaltových vozovek, velkých kusů z desek a asfaltové směsi z neshodné nebo nadbytečné výroby."
Využití R-materiálu do vozovek pozemních komunikací je stanoveno technickými podmínkami TP 210 [16], které říkají, že: „... jedná se o více jak 95 % asfaltových materiálů, s max. obsahem 5 % hm. ostatních recyklovaných materiálů." „Recyklované stavebně demoliční materiály jsou při správném použití stejně hodnotné jako standartní přírodní materiál. Využití recyklovaných materiálů správným způsobem tedy není na úkor kvality stavebního díla."
Obsah znečišťujících látek se musí stanovit podle EN 12697-45 [15]. Za znečištění je považován materiál jiný než přírodní kamenivo.

3. VÝROBA SMĚSI S R-MATERIÁLEM

Výroba asfaltových směsí se provádí na obalovnách. Podle druhu technologie lze rozdělit obalovny do dvou základních typů (šaržové obalovny a kontinuální obalovny).
Při použití vysokého procenta R-materiálu ve směsi, je nutné zaručit, aby pojivo v R-materiálu dostatečně změnilo viskozitu. Pří přidání nového pojiva musíme zaručit dokonalé smíšení starého a nového pojiva. Vlastnost nového pojiva musí vykompenzovat degradované vlastnosti starého pojiva. [8]
Například v Německu se mohou používat pouze o jeden stupeň měkčí pojiva, než které je obsaženo v R-materiálu, avšak lze použít maximálně pojivo 70/100. V ČR takový požadavek není stanoven. [8]
Ke správnému smíchání R-materiálu a nové směsi je zapotřebí teplota a čas. Jak je vidět na obr. 1, homogenita výsledné asfaltové směsi je závislá na teplotě a době míchání, tyto dvě veličiny lze považovat za nejdůležitější parametry. [18]

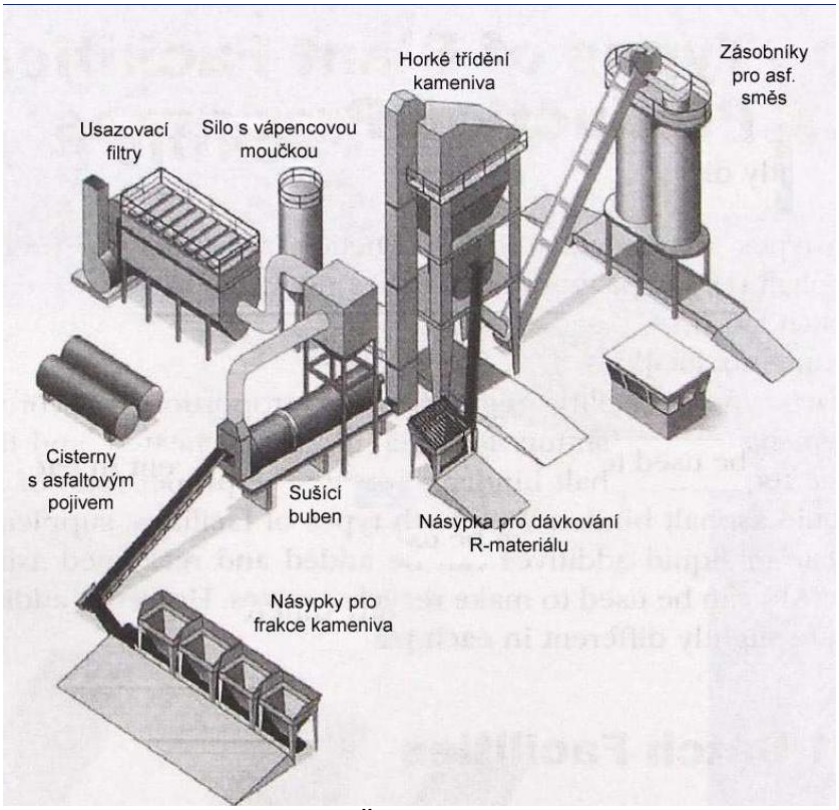


Graf 3: Rychlost zhomogenizovaní směsi v závislosti na teplotě a čase míchání [18]

Hodnota A_t vyjadřuje míru výskytu shluků R-materiálu v závislosti na čase míchání.
Výrobu asfaltové směsi s přídavkem R-materiálu nelze zajistit na každé obalovně. Problém nastává v tom, že obalovny nejsou běžně technologicky vybaveny na výrobu s vyšším obsahem R-materiálu. Proto v různých zemích národní předpisy dovolují použít maximálně 30 % R-materiálu. [8]
Rostoucí využívaní recyklovatelných materiálů v silničním stavitelství vede k tomu, že je potřebné zařadit R-materiál mezi stavební materiály podobně jako je např. kamenivo a asfaltová pojiva. Norma ČSN EN 13108-8 definuje požadavky na R-materiál z hlediska vlastností kameniva, pojiva a znečišťujících látek. Na základě těchto vlastností je následně rozhodnuto, pro jaké aplikace je vhodné daný R-materiál využít. [2]
Přibližně třetina obaloven v České republice je vybavena na dávkování R-materiálu za studena a jenom 4 obalovny mají paralelní buben, pomocí kterého jsou schopné dávkovat R-materiál za horka. Problémem v České republice je fakt, že vyfrézovaný nebo vybouraný materiál z vozovek není tříděn podle vrstev a musí se za něj platit, například v Německu investor poskytuje R-materiál výrobci bez úplatu, ale výrobce je povinen tento R-materiál přidat do nově namíchané směsi. [17]

3.1. Šaržová obalovna

V šaržových obalovnách se jednotlivé frakce kameniva ze zásobníků navažují na pásových vahách a pomocí dopravníku je kamenivo dopraveno do rotujícího sušícího bubnu. Při otáčení bubnu vzniká uvnitř bubnu rovnoměrná clona tvořená padajícím kamenivem a tím dochází k optimálnímu vysušení. Vysušené kamenivo, jehož jednotlivé frakce byly smíchány v sušícím bubnu, se korečkovým dopravníkem transportuje do věže obalovny na síta k tzv. horkému třídění. Po rozdělení kameniva na jednotlivé frakce, kamenivo padá do jednotlivých zásobníků, odkud jsou navažovány do míchačky. V míchačce je kamenivo promícháno nasucho, následně se nadávkuje požadované množství vlhkého R-materiálu a probíhá proces homogenizace. Během homogenizace dochází k přestupu tepla z kameniva do R-materiálu a tím je vysušováno. Kamenivo proto musí být předehřáto na teplotu minimálně 250 °C. Po homogenizaci je přidáno pojivo, doba míchání standartní směsi bez R-materiálu je 25 vteřin, pokud je do směsi použit R-materiál, doba míchání se prodlužuje. Po smíchání požadovaných složek putuje namíchaná asfaltová směs do zásobníku na asfaltovou směs odkud je transportována na stavbu dopravními prostředky.

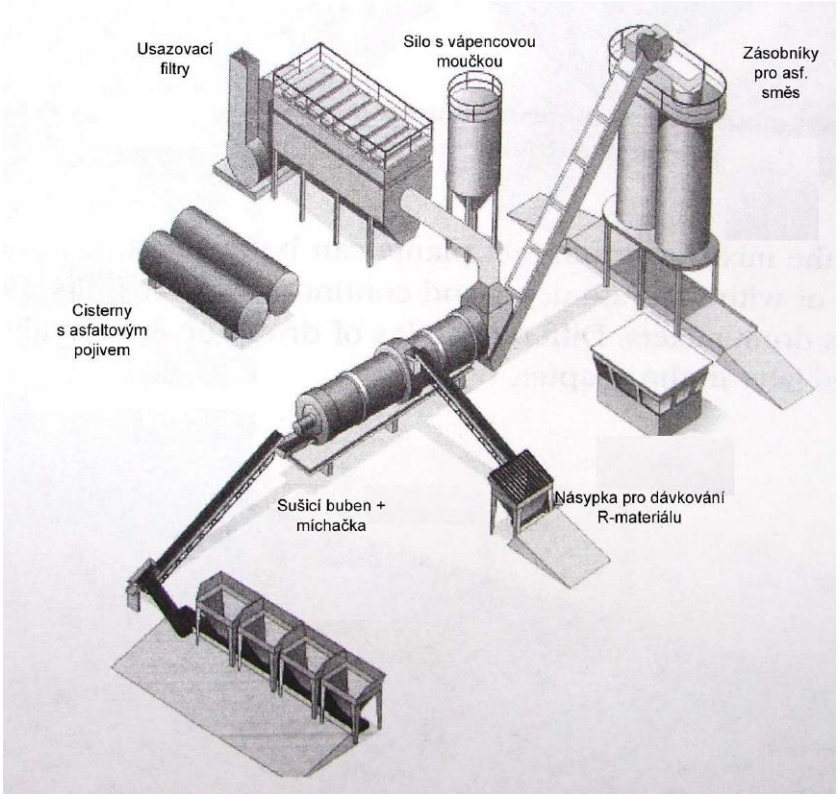


Obrázek 1: Šaržová obalovna [17]

3.2. Kontinuální obalovna

V kontinuálních obalovnách jsou jednotlivé frakce kameniva nepřetržitě míchány v paralelním bubnu. Přidávaný R-materiál je buď přidáván přímo do bubnu, ve kterém probíhá míchání kameniva a dojde k ohřátí R-materiálu nebo je použit paralelní buben s dvojitým pláštěm. Pokud je recyklovaný materiál ohříván v bubnu s dvojitým pláštěm, k smíchání R-materiálu, kameniva a nového asfaltového pojiva dochází až v samostatné kontinuální míchačce. Po smíchání je směs transportována do zásobníku na asfaltovou směs.

Stejnorodost navrhované asfaltové směsi závisí zejména na homogenitě promíchání kameniva a R-materiálu. Obsah jednotlivých složek nelze změnit poté, co jsou vypuštěny ze zásobníků na pásové dopravníky, kde jsou váženy.



Obrázek 2: Kontinuální obalovna [17]

3.3. Obsah R-materiálu ve směsi

Dle ČSN EN 13108-1 z roku 2008 je dávkování R-materiálu do směsi dáno následující tabulkou.

Tabulka 1: Maximální současné množství R-materiálu v asfaltové směsi [1]

Obrusné vrstvy		Ložní vrstvy		Podkladní vrstvy	
Druh směsi	R-materiál [%]	Druh směsi	R-materiál [%]	Druh směsi	R-materiál [%]
ACO 8	25	ACL 16 S	30/15 [1)]	ACP 16 S	50
ACO 8 CH	25	ACL 16 +	30	ACP 16 +	60
ACO 11 +	-	ACL 16	40	ACP 22 S	50
ACO 11	25	ACL 22 S	30/15 [1)]	ACP 22 +	60
ACO 16 +	-	ACL 22 +	30		
ACO 16	25	ACL 22	40		
[1)] při výrobě asf. Směsí z nemodifikovaných asfaltů je možné použít R-materiál v množství do 30 %, v případě použití modifikovaných asf. v množství 15 %.					

Tabulka 2: Maximální navrhované množství R-materiálu v asfaltové směsi, návrh ČSN EN 13108-1, říjen 2017

Obrusné vrstvy		Ložní vrstvy		Podkladní vrstvy	
Druh směsi	R-materiál [%]	Druh směsi	R-materiál [%]	Druh směsi	R-materiál [%]
ACO 8	35	ACL 16 S	40	ACP 16 S	60
ACO 8 CH	35	ACL 16 +	50	ACP 16 +	70
ACO 11 +	30	ACL 16	50	ACP 22 S	60
ACO 11	40	ACL 22 S	40	ACP 22 +	70
ACO 16 +	30	ACL 22 +	50		
ACO 16	40	ACL 22	50		

Maximální dávkování studeného R-materiálu je 20 %. Při vyšším dávkováním je zapotřebí předehřátí R-materiálu. Současně je uvažováno postupným navyšováním množství R-materiálu ve výsledné směsi tzn. měl by být větší potenciál pro využití nových technologií.

4. Dosavadní poznatky

Je všeobecně známo, že znovupoužití R-materiálu do nové asfaltové směsi je nejen ekologicky šetrné, ale většinou také ekonomicky výhodnější než výroba směsi konvenční, tedy bez R-materiálu.
V dnešní době lidstvo používá recyklaci u všech druhů materiálů, především proto, že je omezené množství přírodních zdrojů surovin. Energetická krize v roce 1970 byla první motivací pro sběr a opětovné využití surovin. Zvyšující se znečištěné prostředí bylo dalším důvodem k znovu používání recyklovatelných surovin. Dnes roste v podvědomí myšlenka o zachování přírodních zdrojů surovin. [8]
Odvoz asfaltových směsí na skládky už dnes naštěstí není jedinou možností, jak s vybouraným materiálem naložit. Ve skutečnosti se asfalt stal jedním z mála materiálů ve stavebnictví, který lze recyklovat až ze 100 %. [8]
Obecně lze říci, že je materiál získaný z konstrukce vozovky je vhodný pro opětovné zabudování do konstrukce vozovky. Je ovšem nutné zjistit a posoudit vlastnosti asfaltového pojiva v recyklovaném materiálu, aby byl přidán ve správném poměru a aby byly zvoleny vhodné vlastnosti nového asfaltového pojiva. [24]
Existují výjimky, ale v současné době použití recyklovaného asfaltu je většinou zaměřeno na kamenivo. Primární motivací je využití objemu a nižší vstupní náklady. V mnoha zemích současné technické předpisy a praxe zabraňují zabudovat veškerou vybouranou surovinu zpět do nové skladby vozovky. Při analýze finanční náročnosti výroby asfaltové směsi zjistíme, že největší nákladovou položkou je asfaltové pojivo. Druhý nejdražší materiál je hrubé kamenivo. Současné postupy mohou být vylepšeny, aby docílily lepšího využití těchto materiálů. [8]
Je třeba zdůraznit, že s R-materiálem by mělo být zacházeno jako s cenným zdrojem surovin přímo v místě stavby, a ne jako s odpadem. Silniční vozovky skládající se z jednotlivých vrstev by měly být frézovány po jednotlivých vrstvách která mohou obsahovat různé druhy asfaltového pojiva. Tyto vrstvy obsahují kamenivo různých frakcí a často také různé asfaltové pojivo. Pokud se vozovka frézuje v jednom cyklu, dochází k promíchání jednotlivých vrstev a tím ke znehodnocení R-materiálu. Stejnou péči bychom měli věnovat také zpracování a skladování R-materiálu. Správně zpracovaný a uskladněný recyklát je předpokladem ke znovupoužití ve vysokém procentu objemu nebo dokonce pro výrobu směsi výhradně z R-materiálu. Při použití vysokého procenta R-materiálu ve směsi je nezbytné zajistit, aby pojivo obsažené v recyklátu dostatečně změnilo viskozitu. U směsí, kde jsou přidávány „nové“ suroviny, se musí dokonale smísit s nově přidaným asfaltovým pojivem. Pojiva jsou vhodná pro homogenizaci při teplotě cca o 70-80 °C vyšší, než je jejich teplota bodu měknutí. Nové asfaltové pojivo je vybráno podle požadovaných vlastností tak, aby kompenzovaly degradaci recyklovaného pojiva v R-materiálu. [8]
Míra promíchání je závislá na teplotě a době míchání. Je třeba upozornit na dodatečné dodání tepelné energie R-materiálu, kterou lze kompenzovat delší dobou míchání. [8]
Při uvažování procesu přenosu tepelné energie z nového kameniva na R-materiál se limitní množství R-materiálu, který je dávkován za studena, pohybuje kolem 20 %. Důležitým jevem, který nelze zanedbat, je expanze vody obsažené v R-materiálu. [8]

Konvenční míchací bubny mají problém, že plamen a velmi horké plyny přicházejí do přímého kontaktu s pojivem v R-materiálu. Tento kontakt škodí pojivu, dokonce hrozí jeho spálení. Avšak speciálním dvojitým bubnem obalovny lze dosáhnout přidání až 100 % R-materiálu do nové směsi. [8]
Buben s dvojitým pláštěm má větší míchací prostor než tradiční míchací bubny. Přírodní kamenivo se ohřívá ve vnitřním bubnu na teplotu přes 300 °C, které se následně smíchává se s R-materiálem v prstencovém prostoru, teplota ve vnější části pláště se pohybuje okolo 50°C. Tímto způsobem není přírodní kamenivo ani R-materiál vystaven horkým plynům nebo párám druhé složky při procesu sušení. [19]
V roce 2001 v Německu vznikly regulační dokumenty, které kontrolují homogenitu R-materiálu a pojiva v něm obsahující. Nezabývají se kvalitou kameniva v R-materiálu, protože kvalita kameniva byla deklarována už při prvotní výrobě směsi. [8]
Při frézování více vrstev najednou nebo rozbití vozovky do bloků nelze R-materiál považovat za homogenní. A tudíž je možné jej použít pouze v podkladních vrstvách. Pokud by byla takto získaná surovina roztříděna, případně předrcena, lze ji následně použít i do vrstev krytu vozovky. [8]
Od začátku roku 2008 specifikace R-materiálu korespondují s evropskými normami (ČSN EN 13108). Maximální použitelné množství R-materiálu do asfaltové směsi je specifikováno v jednotlivých národních přílohách. Evropská norma reguluje složení směsi a požadavky na kvalitu při míchání různých druhů R-materiálů. Veškeré požadavky jsou univerzální – platí pro všechny druhy směsí obsahující R-materiál. Současná specifika evropské normy umožňují „změkčovat“ degradované asfaltové pojivo přidáním nového měkčího pojiva. [8]
Hlavní parametrem pro hodnocení vlastností asfaltového pojiva je hodnota bodu měknutí stanovená metodou kroužek kulička dle normy ČSN EN 1427 a hodnota penetrace vpichu jehly dle normy ČSN EN 1426.

4.1. Ohřev R-materiálu

Pro vyšší obsah R-materiálu je důležitý jeho ohřev. Proto se do technologie obalovny zařazuje paralelní sušící buben, ve kterém je z R-materiálu odstraněna vlhkost a je ohřátý na požadovanou teplou. Maximální technologické teploty ohřevu R-materiálu, kterých jde dosáhnout, se pohybují v rozmezí 110 °C až 135 °C v případě paralelního bubnu s přímým ohřevem. Pokud by technologie sušení R-materiálu byla vypuštěna z výrobního procesu, bylo by nutné nové kamenivo předehřívat na mnohem vyšší teploty, aby se zaručila výstupní teplota z míchačky. Tímto přehřátím kameniva by mohlo docházet při přidání nového pojiva k jeho „spálení“ a tím by značně utrpěla kvalita výroby.

5. PRAKTICKÁ ČÁST

V rámci bakalářské práce je zkoumáno pět vzorků R-materiálu. Získaný R-materiál byl směsný, v jednom případě se jedná o vzorek ložní vrstvy. R-materiály byly získány na různých obalovnách v České republice.

U jednotlivých vzorků bylo provedeno ohřátí navážek na námi zvolené teploty. Bez ohřevu, pouze s laboratorním vysušením při teplotě 50 °C a následně s ohřevem na teplotu 110 °C a 150 °C.

Ze vzorků R-materiálů bylo vyextrahováno a vydestilováno asfaltové pojivo, na kterém byly provedeny empirické zkoušky (penetrace jehlou, stanovení bodu měknutí metodou kroužek a kulička) a funkční zkoušky na dynamickém smykovém reometru.

5.1. Příprava R-materiálu

Příprava spočívala v promíchání segregovaného vzorku R-materiálu a následné kvartace dle ČSN EN 932-1. Zkušební navážky jednotlivých vzorků činily cca 6 kg, které byly vysušeny v laboratorní sušičce do dosažení konstantní hmotnosti při teplotě 50 °C.

Při extrakci vzorků s ohřevem se vzorky směsí ohřívaly na 110 °C a na 150 °C. Ohřívaný materiál byl uložen do nádoby a zakryt fólií s malým otvorem pro možný únik páry, aby nedocházelo k jeho přílišné degradaci proudícím vzduchem v sušící peci.

Obrázek 3: Příprava vzorku na sušení

Navážky vzorků po vysušení byly další kvartací zmenšeny na navážku o hmotnosti cca 2 kg, na které se prováděly extrakce.

5.2. Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor

Stanovení zrnitosti je prováděno podle ČSN EN 933-1. Podstatou zkoušky sítového rozboru je roztřídění materiálu směsi kameniva podle velikosti zrn do jednotlivých frakcí. Roztřídění se provádí pomocí normovaných sít, které mají jasně definovanou velikost otvorů. Jsou dvě metody pro stanovení zrnitosti materiálu, a to prosévání za sucha nebo praní a prosévání. Nejčastěji se používá metoda prosévání za sucha. [26]

Obrázek 4: Sestava zkušebních sít na vibračním zařízení

Příprava a postup zkoušky:

Vzorky kameniva získané při extrakci asfaltového pojiva se vysuší v odsávané peci od trichlorethylenu a nechají se vychladnout.

Jednotlivá síta se poskládají na sebe do sloupce, a to podle velikosti otvorů v sítě. Pod dolním sítem je umístěno dno, aby nedošlo k ztrátě částic zkušební navážky. Sloupcem sít je třeseno buď ručně nebo mechanicky. Po roztřídění zrn se jednotlivé frakce kameniv se zůstatky na jednotlivých sítech zváží. Vážení se provádí ručně a po jednotlivých sítech. Hmotnost se po zvážení zapíše do tabulky.

Tabulka 3: Sítový rozbor vzorku č. 1

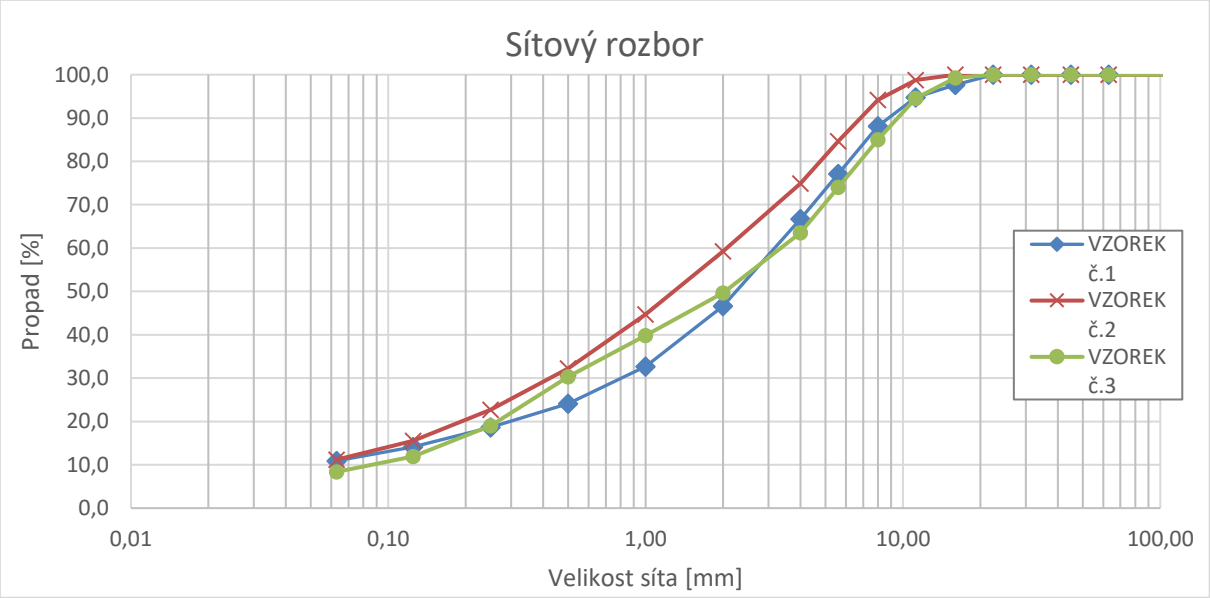
Velikost síta [mm]	16,0	11,3	8,0	5,6	4,0	2,0	1,0	0,5	0,25	0,125	0,063	dno + filer
Hmotností zůstatek [g]	70,4	85,1	199,1	328,4	311,1	601,5	417,3	256,0	163,7	133,1	97,2	326,1
Celkový propad [%]	98	95	88	77	66	46	32	24	19	14	10,9	0,0

Tabulka 4: Sítový rozbor vzorku č. 2

Velikost síta [mm]	16,0	11,3	8,0	5,6	4,0	2,0	1,0	0,5	0,25	0,125	0,063	dno + filer
Hmotností zůstatek [g]	0,0	36,7	134,4	280,0	286,7	459,2	425,5	366,7	280,0	210,2	128,3	328,4
Celkový propad [%]	100	99	94	85	75	59	48	32	23	16	11,2	0,0

Tabulka 5: Sítový rozbor vzorku č. 3

Velikost síta [mm]	16,0	11,3	8,0	5,6	4,0	2,0	1,0	0,5	0,25	0,125	0,063	dno + filer
Hmotností zůstatek [g]	20,6	132,0	268,5	307,7	295,1	388,2	276,8	268,1	315,3	199,9	99,7	234,9
Celkový propad [%]	99,27	94,65	85,00	74,03	63,52	49,69	39,83	30,28	19,04	11,92	8,37	0,00



Graf 4: výsledky sítových rozborů

Během práce byly zkoušeny tři R-materiály (vzorek č. 1, vzorek č. 2, vzorek č. 3), na kterých byl po extrakci pojiva proveden sítový rozbor dle ČSN EN 933-1.
Z výsledků sítových rozborů je zřejmé, že křivky zrnitosti mají plynulý průběh, tzn. zastoupení jednotlivých složek kameniva v asfaltové směsi je přibližně stejný.

5.3. Extrakce asfaltového pojiva

Extrakce asfaltového pojiva z asfaltové směsi je prováděno podle ČSN EN 12697-1 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 1: Obsah rozpustného pojiva.

Před extrakcí asfaltového pojiva ze vzorů je nutné, aby vzorky bez ohřevu zalít rozpouštědlem na dobu 12 hodin, při kterých dojde k uvolnění zestárlého asfaltového pojiva. U vzorků ohřátých na zvolenou teplotu je vzorek asfaltové ohřáté asfaltové směsi zalit rozpouštědlem a za občasného míchání se rozpouštědlo nechá působit asi 2 hodiny. Jako rozpouštědlo je používán trichlorethylen.

Po uplynutí této doby je asfaltové pojivo dostatečně odděleno od kameniva, asfaltová směs nesmí být v rozpouštědle déle než 24 hodin, po této době by mohlo docházet k ovlivnění vlastností asfaltového pojiva.

Vzniklý asfaltový roztok je postupně proléván přes síta do odstředivky. Asfaltový roztok s jemnými částicemi, které prošli i jemným sítem vtečou do odstředivky. V odstředivce se nachází patrona s přihnutým okrajem, díky němuž v patroně zůstanou částice menší než 0,063 mm a do sběrné nádoby vytéká pouze roztok asfaltového pojiva s rozpouštědlem. Kamenivo se proplachuje tak dlouho, dokud není zbaveno asfaltového pojiva.

Další postup je shodný s postupem extrakce vzorků bez ohřevu.

Obrázek 5: Extrakční zařízení

5.4.Zpětná destilace asfaltového pojiva

Po provedení extrakce je zapotřebí z roztoku asfaltového pojiva oddělit rozpouštědlo (trichorethylen) a vlastní asfaltové pojivo. Oddělení těchto dvou složek se provede v destilačním přístroji zpětnou destilací dle ČSN EN 12697-3 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – část 3: Znovuzískání extrahovaného pojiva: Rotační vakuové destilační zařízení.

Na destilačním přístroji se nastaví počet otáček baňky v lázni na 75 otáček/minutu, teplota olejové (glycerolové) lázně na 110 °C. Zapnutím vývěvy a pomocí regulačního ventilu na přívod vzduchu se nasaje do ponořené destilační baňky v olejové lázni asfaltový roztok. Po nasátí roztoku se ventilem nastaví tlak vzduchu v destilační soustavě na 40 kPa. Díky vysoké teplotě a sníženému tlaku se rozpouštědlo vypařuje a je nasáváno do vodou chlazeného chladiče, kde kondenzuje a odkapává do jímací baňky umístěné ve spodní části chladiče. Během procesu destilace postupně přisáváme asfaltový roztok a současně vyprazdňujeme jímací baňku. Po nasátí veškerého asfaltového roztoku do destilační baňky se teplota olejové lázně zvýší na 160 °C. Tlak v soustavě se sníží z 40 kPa na 2 kPa během doby 5 minut a pokračujeme v destilaci. Destilaci provádíme do té doby, než se na hladině asfaltu přestanou vytvářet bublinky vzniklé odpařováním trichlorethylenu.

Obrázek 6: Destilační zařízení

Poté je horké asfaltové pojivo nalito do kroužků pro stanovení bodu měknutí, do formy na vzorky určené pro zkoušení v dynamickém smykovém reometru, zbylé pojivo nalijeme do penetrační misky.

Obrázek 7: Nalité kroužky pro měření bodu měknutí

Obrázek 8: Nalité kapky pro měření reologických vlastností

Obrázek 9: Pojivo pro měření penetrace

5.5. Použité zkušební metody asfaltového pojiva

Konvenční zkoušky asfaltových pojiv
- Stanovení penetrace jehlou dle ČSN EN 1426
- Stanovení bodu měknutí kroužkem a kuličkou dle ČSN EN 1427

Reologické zkoušky
- Dynamická viskozita v DSR
- Komplexní modul tuhosti a fázový úhel v DSR dle ČSN EN 14770

5.5.1. Penetrace jehlou
Penetrace asfaltového pojiva se provádí dle ČSN EN 1426 – Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou.
Dle výsledků této zkoušky je asfaltové pojivo označeno, určuje viskozitu asfaltu při dané teplotě. Výsledkem zkoušky je hloubka průniku penetrační jehly do asfaltového pojiva. Hodnotu penetrace mohou ovlivnit adhezní vlastnosti asfaltového pojiva. Výstupem zkoušky je hodnota penetrace v penetračních jednotkách (desetinách milimetru). Penetrace se provádí na natemperovaném vzorku na 25 °C, zatížení 100 g po dobu 5 s. Temperace probíhá ve vodní lázni (25±0,1 °C) minimálně 2,5 hod. Očištěná penetrační jehla se zasune do úchytu a upevní se. Penetrometr se vynuluje a penetrační nádobu s asfaltovým pojivem nastavíme do takové výšky, aby se hrot jehly a povrch pojiva dotýkaly. Po tomto nastavení se uvolní jehla se závažím a po uplynutí 5 s odečteme hodnotu penetrace na stupnici. Výsledná hodnota je průměrem tří měření.

Přípravy a postup zkoušky
Před samotným provedením zkoušky je nutné natemperovat vzorek. Vzorek je odlitý do zkušební nádobky. Temperace se provádí ve vodní lázni o teplotě 25±0,1 °C po dobu 90 minut. Během temperace vzorku se připraví měřící zařízení (penetrometr). Napřed se zkontroluje, zda jsou držák jehly a penetrační jehla řádně očištěny od nečistot, nacházejí-li se na držáku či jehle nečistoty, je třeba je očistit toluenem. Po samotné přípravě a natemperování vzorku můžeme přejít k vlastní zkoušce.
Při zkoušce je nádobka s natemterovaným vzorkem umístěna na stojan penetromtru. Stojan se výškově upraví do takové polohy, aby se jehla dotkne povrchu vzorku. Poté lze provést zkoušku. Doba zatěžování jehlou je 5 s a penetrometr se uvede do činnosti. Po uplynutí časového intervalu 5 s se přístroj automaticky zaaretuje a odečte se hodnota vpichu ze stupnice. Měření penetrace je provede celkem čtyřikrát, do výsledků se nezapočítá nejmenší hodnota. Odečet ze stupnice není v milimetrech, ale v penetračních jednotkách (10 penetračních jednotek = 1 mm).

Obrázek 10: Penetrometr

5.5.2. Bod měknutí stanovený metodou kroužek kulička

Ke zjišťování bodu měknutí asfaltového pojiva se provádí podle normy ČSN EN 1427 – Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek kulička.

Přípravy a postup zkoušky

Před zkouškou se zkoušené pojivo zahřeje na teplotu, aby jej bylo možné nalít do zkušebních mosazných kroužků. Tyto kroužky se umístí na odlévací destičku potřenou separačním prostředkem z důvodu lepší manipulace se vzorky. Nalité vzorky se nechají vychladnout při laboratorní teplotě. Dalším krokem je oříznutí přebytečného asfaltového pojiva přečnívajícího nad horní okraj mosazného kroužku. Takto nachystané kroužky se vloží do sestavy opatřené základní deskou, na kroužky se nasadí středící prstenec a ocelové kuličky. Celá sestava se vloží do kádinky s lázní (pro bod měknutí nacházející se v mezích 28 °C–80 °C se používá destilovaná voda.

Počáteční teplota zahájení zkoušky musí být (5±1) °C. Kádinka s lázní a sestavou se umístí do zkušebního zařízení. Zkouška probíhá řízeným ohříváním, rychlost ohřevu je 5 °C/min a za stálého míchání magnetickým míchadlem.

Zkouška končí v okamžiku, kdy se kulička obalená pojivem propadne na základovou desku. Automaticky se zaznamenají hodnoty teploty lázně při doteku kuličky se základovou deskou, které stanovují bod měknutí.

Obrázek 11: Přístroj pro stanovení bodu měknutí

5.5.3. Penetrační index

Penetrační index definuje norma ČSN EN 12 591 jako indikátor teplotní citlivosti asfaltového pojiva. Podstatou je, že se penetrační index vypočítá z hodnoty penetrace při 25 °C, 100 g, 5 s, stanovené dle EN 1426 a hodnoty bodu měknutí, stanovené dle EN 1427. [19]

Ze získaných výsledků penetračních zkoušek lze odvodit přetvárné vlastnosti asfaltového pojiva. Penetraci lze provádět při rozdílné teplotě, síle vnikání jehly do pojiva a času působení zatížení. Při různých podmínkách se do určité části mění koloidní struktura asfaltového pojiva.

Při reálných měření penetrace je omezující podmínkou teplota. Běžný penetrometr umožňuje měřit maximálně 400 penetračních jednotek, které odpovídají teplotě okolo 40 °C, při vyšší teplotě je penetrace tak vysoká, že její hodnota je mimo rozsah stupnice penetrometru. Naopak, při nízkých teplotách je penetrace tak malá, že hodnotu penetrace nelze přesně stanovit. Z toho vyplývá, že máme velice malý rozsah hodnot, který vede k nepřesnosti při určování teplotní citlivosti. Řešení objevili inženýři Pfeifer a van Doormael. Jejich předpoklad je, že penetrace při teplotě bodu měknutí je právě 800 penetračních jednotek. Teplotní citlivost lze spočítat z následující rovnice:

$$A = \frac{log\,800 - logP_{25}}{t_{RaB} - 25}$$

kde P_{25} je penetrace při teplotě 25 °C v penetračních jednotkách a t_{RaB} je teplota bodu měknutí pojiva.
Ke stanovení teplotní citlivosti je potřeba provádět velké množství časově náročných pokusů. Proto je zaveden pojem – tzv. penetrační index I_p. Pokud určíme teplotní citlivost pomocí penetračního indexu, odpadá díky jednoduchosti vztahu provádění velkého počtu zkoušek. Vztah mezi teplotní citlivostí a penetračním indexem:

$$A = \frac{20 - I_p}{10 + I_p} . \frac{1}{50}$$

vztah pro I_p udává ČSN EN 12591:

$$I_P = \frac{20.t_{RaB} + 500.log\,P - 1952}{t_{RaB} - 50.log\,P + 120}$$

Smluveným způsobem penetrační index udává, jak se mění reologické vlastnosti asfaltového pojiva s teplotou.
Asfalty mající hodnotu I_p menší než -2 jsou ve formě solu. Tyto pojiva mají koloidní-solovou strukturu, reologicky jsou podobné viskózním kapalinám, rychle mění viskozitu v závislosti na teplotě a jsou zpravidla velmi křehké.
Pro silniční asfalty se hodnota I_p pohybuje v rozmezí od -2 do +2. Jsou elasticko-solového typu, může se v nich nacházet pevnost vnitřní struktury. Pojiva vykazují počáteční elasticitu a thixotropii.
Pojiva s hodnotou I_p vyšší než +2, jsou typická pro oxidované asfalty, zpravidla jsou ve formě gelu s pevnou micelární vazbou. Mají malou teplotní citlivost a jsou elastická.
V tomto intervalu se většinou pohybují modifikovaná asfaltová pojiva. [20] [21]

5.5.4. Reologické vlastnosti sledovaných směsí

Reologie je relativně mladá vědní disciplína, která se zabývá chováním látek, které jsou vystaveny vlivům vnějších sil. Oproti klasickým zkouškám tedy dovolují reologické zkoušky popisovat vlastnosti látek v závislosti na teplotních intervalech, dobách či frekvencích zatížení a při různě velkých zatížení v čase, tzn. je umožněno sledovat dynamický vývoj zkoušených vlastností v čase.
V oblasti asfaltových pojiv, která řadíme do skupiny viskoelastických látek, to znamená možnost definovat a popsat celou škálu v praxi se vyskytujících zatížení a vlivů. Díky reologickým zkouškám lze zjišťovat viskózní a elastický podíl veličin u asfaltu, či možnost simulovat vliv dynamického zatížení vyvolaného pojíždějící dopravou. [10]
Pro reologická měření byl použit rotační reometr Kinexus od firmy Malvern. Reometr slouží k určování reologických vlastností materiálů (oscilací a rotací), zejména asfaltů s asfaltových pojiv. Reometr umožňuje také měření komplexního smykového modulu a úhlu fázového posunu v širokém rozsahu zkušebních frekvencí a teplot. Dynamický smykový reometr se skládá z pevného rámu a vzduchem poháněného motoru, ovládacího panelu, výměnné horní a dolní geometrie. Teplotní regulace je prováděna o obou stran vzorku, aby se maximálně zamezilo teplotnímu spádu ve vzorku. [9]

U vzorků byl určen komplexní smykový modul pojiva |G*| a hodnota fázového úhlu δ při teplotě 60 °C a při frekvenci zatěžování 1,59Hz.

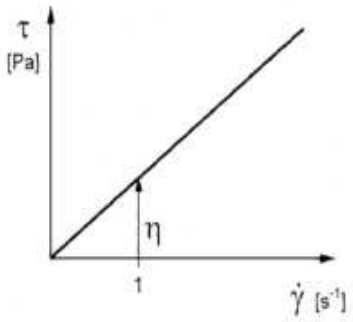
Obrázek 12: Dynamický smykový reometr

Dynamická viskozita

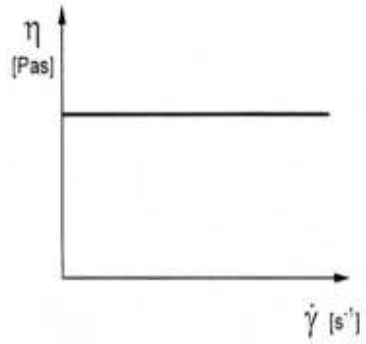
V reologii je jednou ze základních veličin viskozita, která charakterizuje tokové chování a určuje míru vnitřního odporu látky vůči vnějším zatížením. Jinak řečeno charakterizuje odpor látky proti tečení. U nejjednodušších viskózních kapalin (Newtonská kapalina) se předpokládá přímá úměrnost mezi napětím a rychlostí deformace. Dynamická viskozita tedy je konstantou, která není závislá na velikosti tečného napění ani na smykové rychlosti. Viskozitu kapaliny namáhané na smyk lze napsat Newtonovou rovnicí:

$$\tau = \eta \,.\, \dot{\gamma}$$

τ ... smykové napětí [Pa]
η ... dynamická viskozita [Pa.s]
$\dot{\gamma}$ ... smyková rychlost, rychlost smykové deformace [s-1] [9]

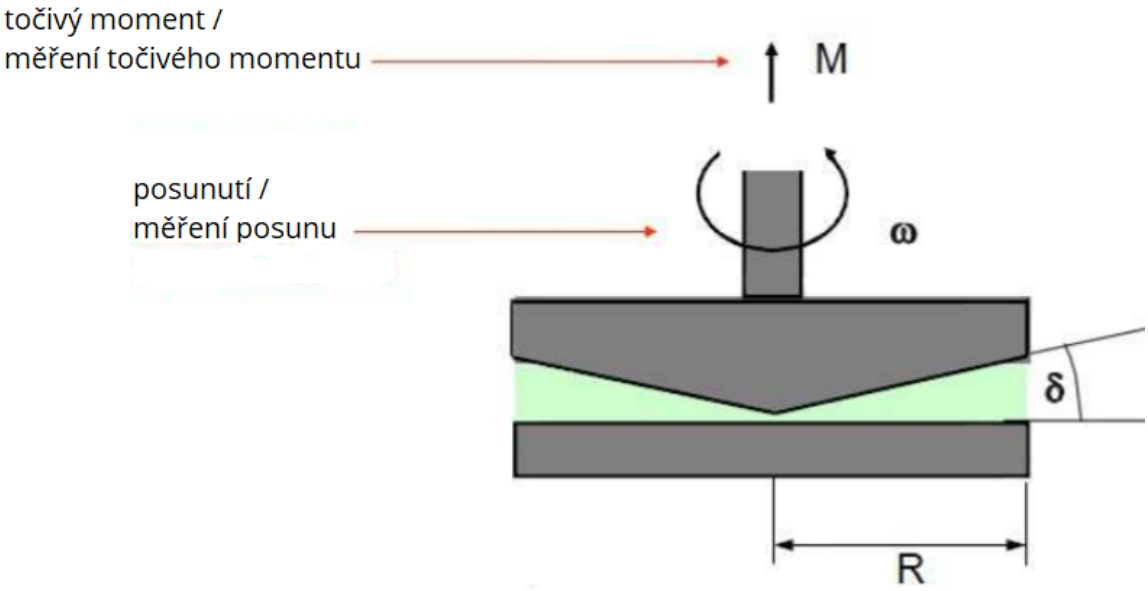


Obrázek 13: Toková křivka Newtonovské kapaliny. [11]



Obrázek 14: Křivka viskozity Newtonovské kapaliny. [11]

Dynamická viskozita se u silničních asfaltů pohybuje při teplotě 20 °C okolo 10^8 mPa.s.
Dynamická viskozita asfaltových pojiv se nejčastěji určuje na geometrii válec-válec vřetenovými viskozimetry, protože toto zařízení je finančně dostupnější než rotační reometr. Dynamická viskozita byla měřena v DSR při teplotě 135 °C.
Dynamická viskozita byla měřena pomocí geometrie kužel – deska o průměru 40 mm a s kuželem s úhlem stoupání 4 °. Za značnou výhodu této geometrie lze považovat, že smykové napětí a rychlost smykového přetvoření jsou nezávislé na pozici mezi kuželem a deskou. [12]

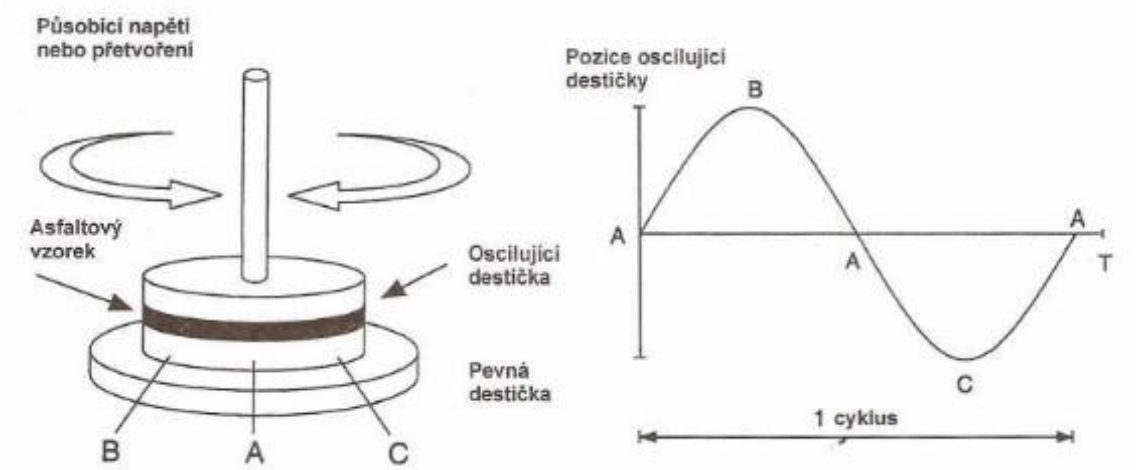


Obrázek 15: Geometrie pro měření viskozity [12]

Komplexní smykový modul a fázový úhel

DSR se nejčastěji používá pro charakterizování asfaltových pojiv při oscilaci měřením komplexního smykového modulu |G*| popisuje celkový odpor asfaltového pojiva proti deformaci při vystavení opakovaným pulzům smykového napětí. Komplexní smykový modul je složen ze dvou složek: elastické (vratné) G‘ označovaného jako reálná část komplexního modulu a viskózní (nevratné) G“ označovaného jako ztrátový modul.

Fázový úhel δ je ukazatelem relativní velikosti vratné a nevratné deformace. Veličiny G* a δ pro asfaltové pojivo jsou vysoce závislé na teplotě a frekvenci zatěžování. Při vysokých teplotách se pojiva chovají jako viskózní kapalina bez schopnosti návratu do svého původního tvaru. V tomto případě zcela převládá viskózní složka, z toho plyne, že δ = 90°. Při velice nízkých teplotách se asfaltové pojivo chová jako elastický materiál, který se zcela navrací do svého původního po odstranění zatížení vyvolávajícího deformaci. Toto chování je reprezentováno zcela elastickou složkou, δ = 90°.
Při oscilační zkoušce v DSR se amplituda napětí měří na základě stanovení točivého momentu přenášeného vzorkem pojiva v reakci na aplikované napětí. Dynamický smykový reometr měří točivý moment a úhlové pootočení a z těchto hodnot dopočítává smykové napětí a přetvoření. [9]
Na pojivech bylo provedeno reologické měření v oscilaci s řízeným smykovým přetvořením.
Fázový úhel je veličinou vycházející z komplexního modulu tuhosti, který je silně závislý na teplotě a frekvenci zatížení. Při vyšších teplotách a nízkých frekvencích se asfaltové pojivo chová jako kapalina, tzn., že komplexní modul se snižuje a fázový úhel se zvyšuje. Pojiva ohřátá na vysoké teploty vykazují vyšší hodnoty modulu tuhosti než pojiva bez ohřevu.



Obrázek 16: Princip dynamického smykového reometru. [10]

6. VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT

V rámci bakalářské práce byla zkoumána asfaltová pojiva, která byla získána z pěti vzorků různých R-materiálů. Byly označeny čísly 1–5, vzorky č. 1 – č. 4 jsou R-materiály směsné (bylo frézováno více vrstev najednou), vzorek č. 5 pochází z vrstvy ložního asfaltového betonu, která byla získána pomocí frézování po vrstvách

6.1. Naměřené hodnoty

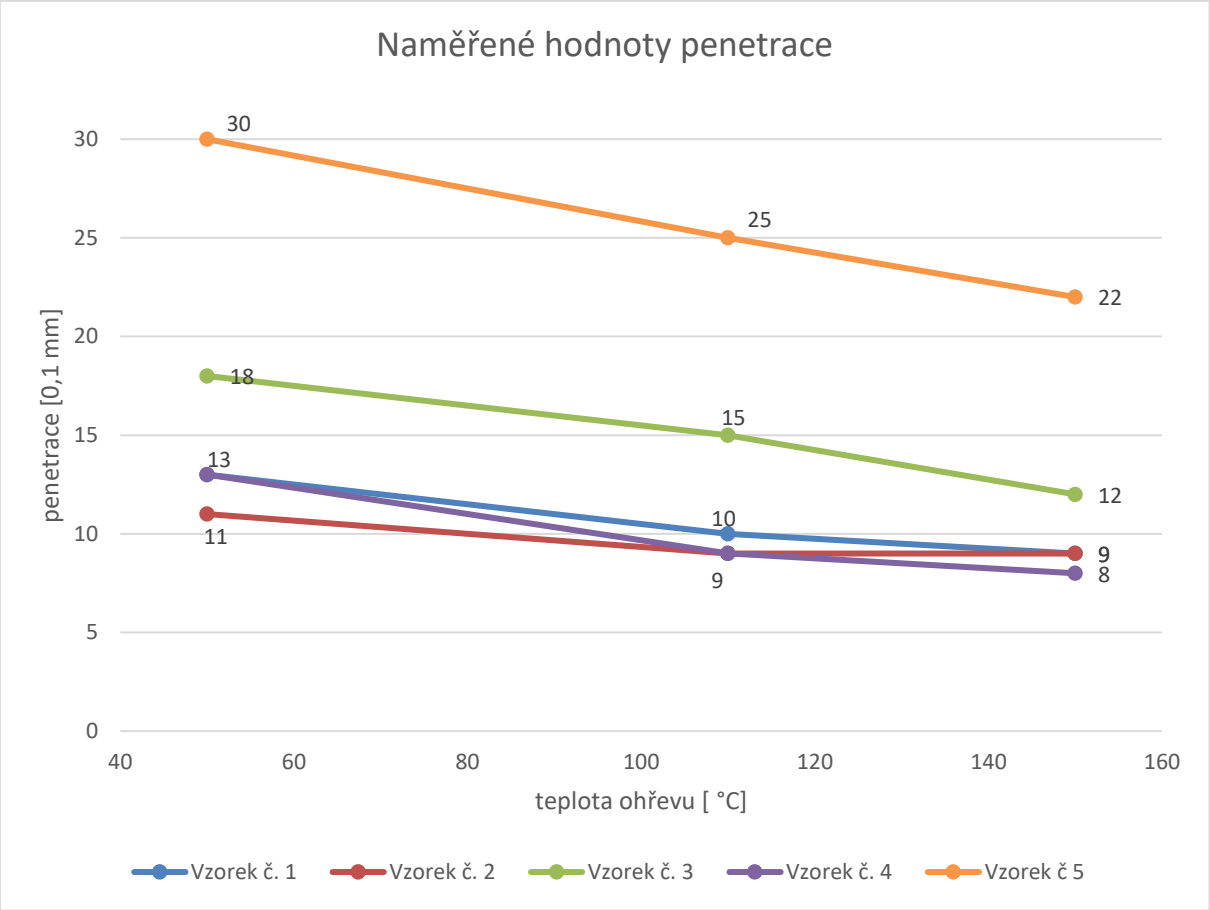
6.1.1. Penetrace jehlou

Penetrace jehlou byla měřena podle ČSN EN 1426 – Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou.

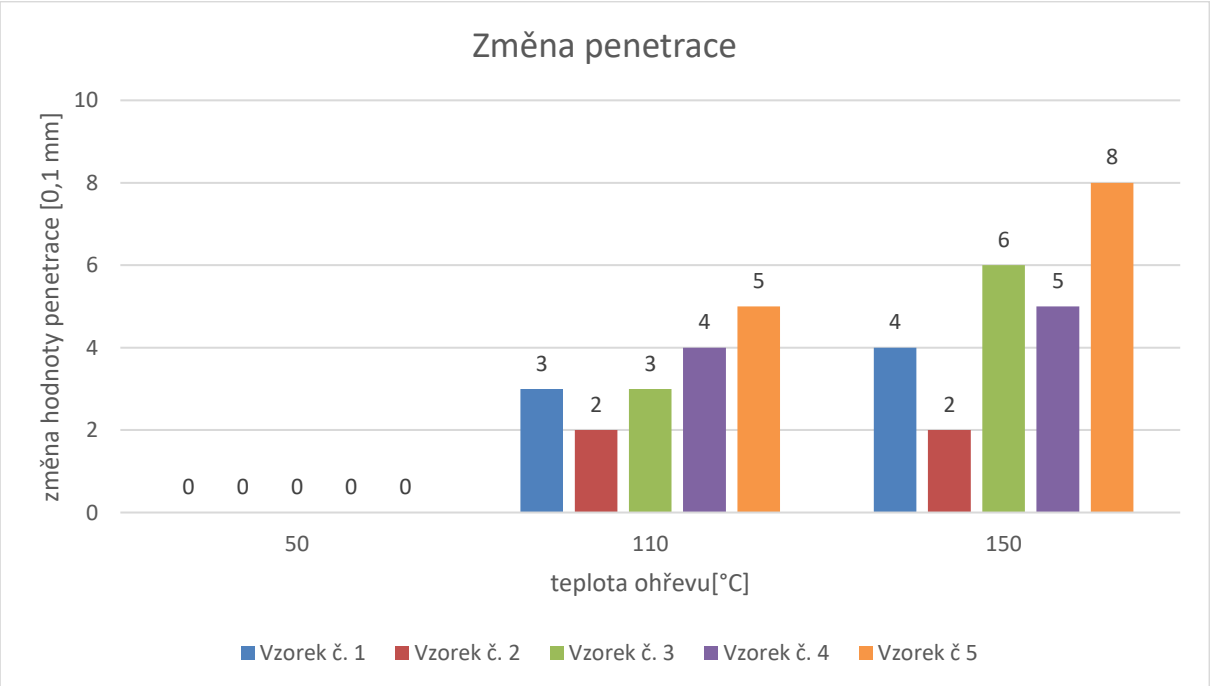
Tabulka 6: Naměřené hodnoty penetrace

Označení	Teplota [°C]	Penetrace [0,1mm]
Vzorek č. 1	50	13
	110	10
	150	9
Vzorek č. 2	50	11
	110	9
	150	9
Vzorek č. 3	50	18
	110	15
	150	12
Vzorek č 4	50	13
	110	9
	150	8
Vzorek č 5	50	30
	110	25
	150	22

Pozn.: Vzorky ohřáté na teplotu 50 °C byly pouze sušeny při této teplotě



Graf 5: Naměřené hodnoty penetrace



Graf 6: Změna hodnot penetrace

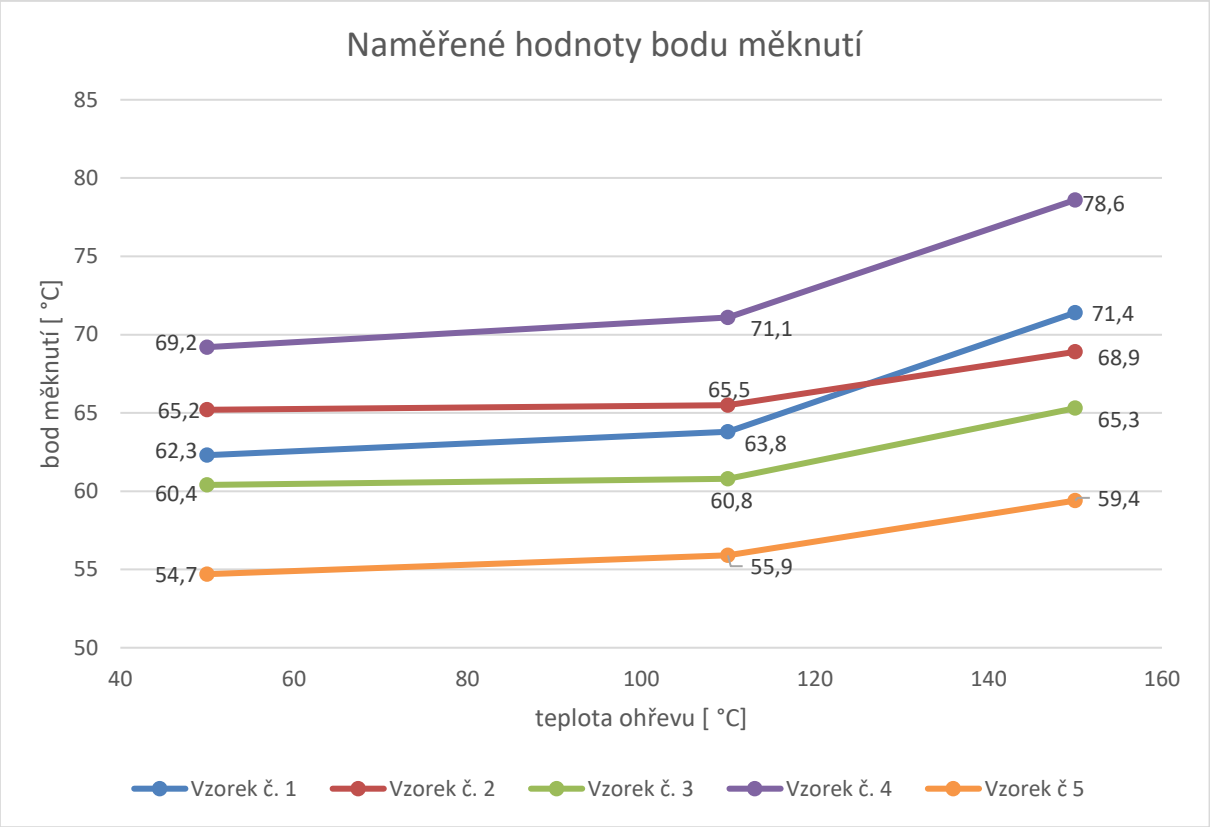
Penetrace jednotlivých asfaltových pojiv se, pouze po vysušení, pohybovala v rozmezí 11 až 24 penetračních jednotek, přičemž je vidět, že pojivo získané z ložní vrstvy je nejměkčí. Pojivo není pravděpodobně tak zestárlé, protože ložní vrstva a tím i asfaltové pojivo je chráněno před působením nepříznivých degradačních vlivů, jako je např. UV záření, vzdušný kyslík a teplota.
U vzorků č. 1 – č. 4 hodnoty penetrace při ohřevu na 110 °C klesly o 9,1 % - 23,1 %. Při ohřevu na 150 °C se penetrace zmenšila o hodnotu 18,2 % - 33,3 %.
U vzorku č. 5 byly poklesy hodnoty penetrace podstatně větší než u zbylých vzorků, při ohřevu na 110 °C činil pokles 33,3 %, při 150 °C 54,2 %. Procentuální hodnoty poklesu jsou vztaženy ke kontrolnímu vzorku vysušeného při teplotě 50 °C.
Z tabulky naměřených hodnot zle dojít k závěru, ve kterém lze konstatovat, že pojivo vzorku č. 5 je podstatně „měkčí" než zbývající vzorky.

6.1.2. Bod měknutí

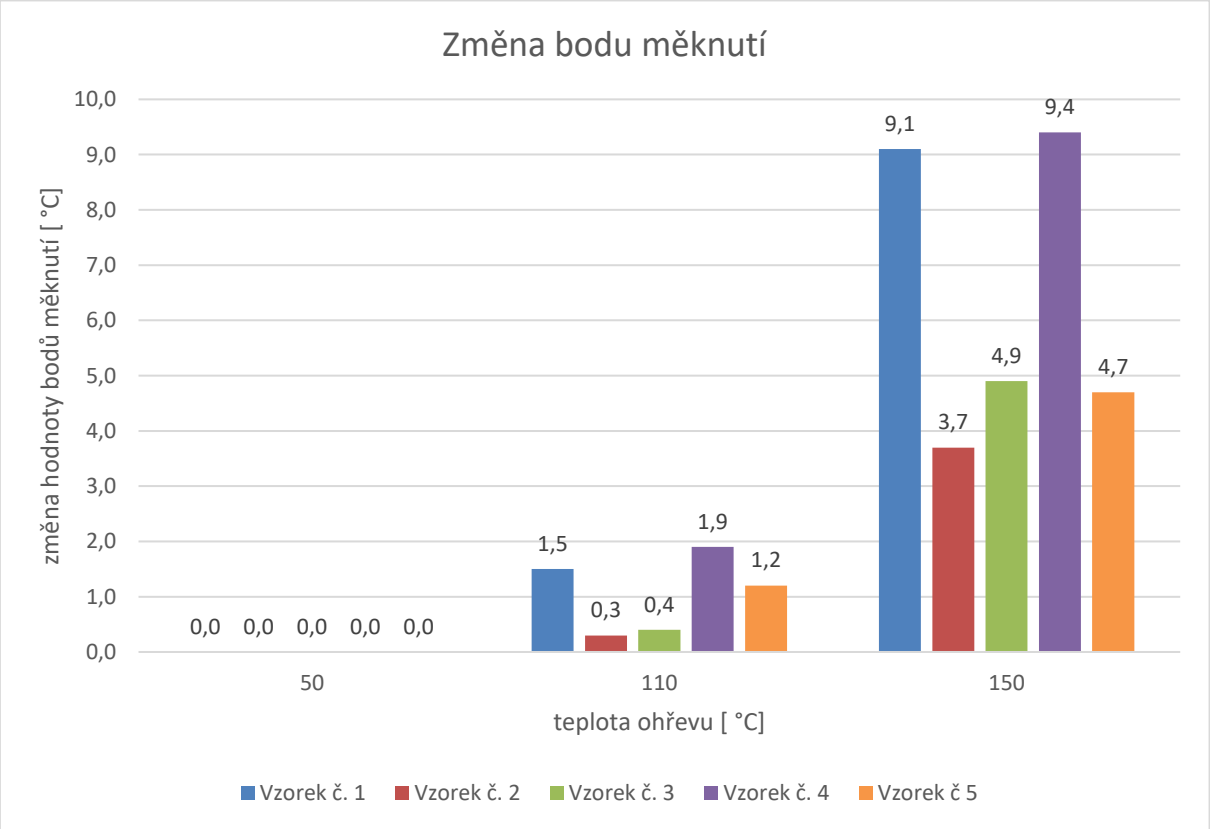
Stanovení bodu měknutí metodou kroužek-kulička se provádí podle ČSN EN 1427 – Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička.

Tabulka 7: Hodnoty bodu měknutí

Označení	Teplota [°C]	Bod měknutí [°C]
Vzorek č. 1	50	62,3
	110	63,8
	150	71,4
Vzorek č. 2	50	65,2
	110	65,5
	150	68,9
Vzorek č. 3	50	60,4
	110	60,8
	150	65,3
Vzorek č 4	50	69,2
	110	71,1
	150	78,6
Vzorek č 5	50	54,7
	110	55,9
	150	59,4



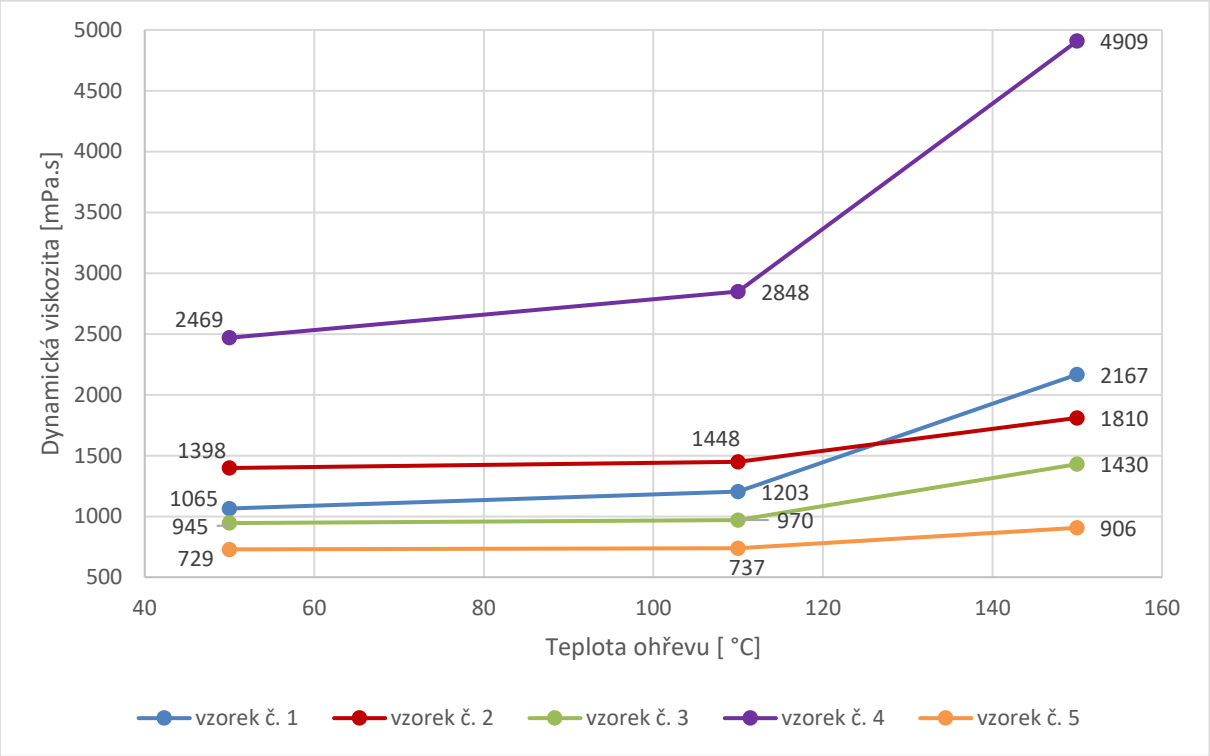
Graf 7: Hodnoty bodů měknutí



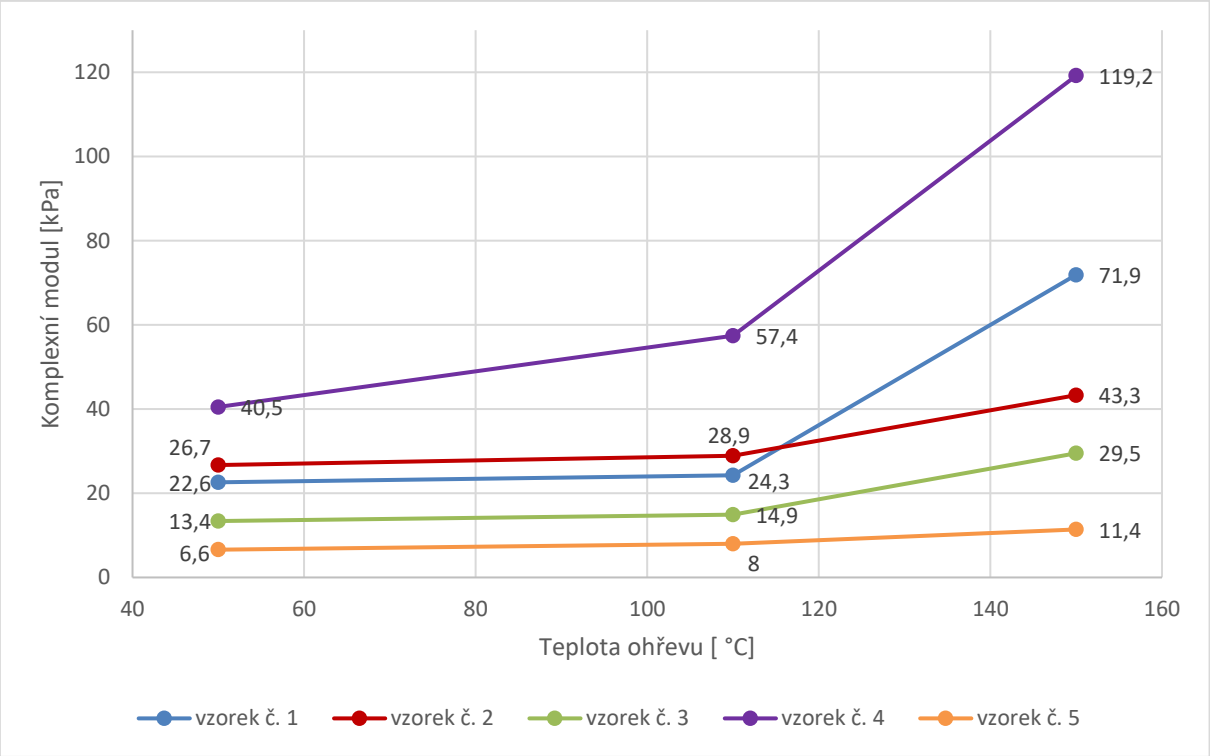
Graf 8: Změna (zvýšení) bodu měknutí

Bod měknutí u asfaltového pojiva, které bylo pouze vysušeno, se naměřené hodnoty pohybovaly v rozmezí 54,7 °C až 69,2 °C. Asfaltové pojivo získané ze vzorku ložní vrstvy má podle měření nejnižší bod měknutí. Pojivo má tak nízký bod měknutí pravděpodobně proto, že je chráněné před degradačními vlivy.
Ohřevem R-materiálu dochází ke zvýšení bodu měknutí, při ohřevu na 110 °C je navýšení bodu měknutí sice malé, ale nelze jej zanedbat. Zvýšení hodnoty bodu měknutí je u všech pěti vzorů v rozmezích 0,5 % - 2,7 % tzn. od 0,3 °C do 1,9 °C.
Při ohřevu na 150 °C, nastává výrazný skok, kdy se hodnoty vzorků č. 1–4 pohybují v intervalu 5,7 % - 14,6 % tzn. od 3,7 °C do 9,4 °C, u vzorku č. 5 je nárůst 41,0 % (22,4 °C). Nárůst je vztažen ke kontrolnímu vzorku vysušeného při teplotě 50 °C.

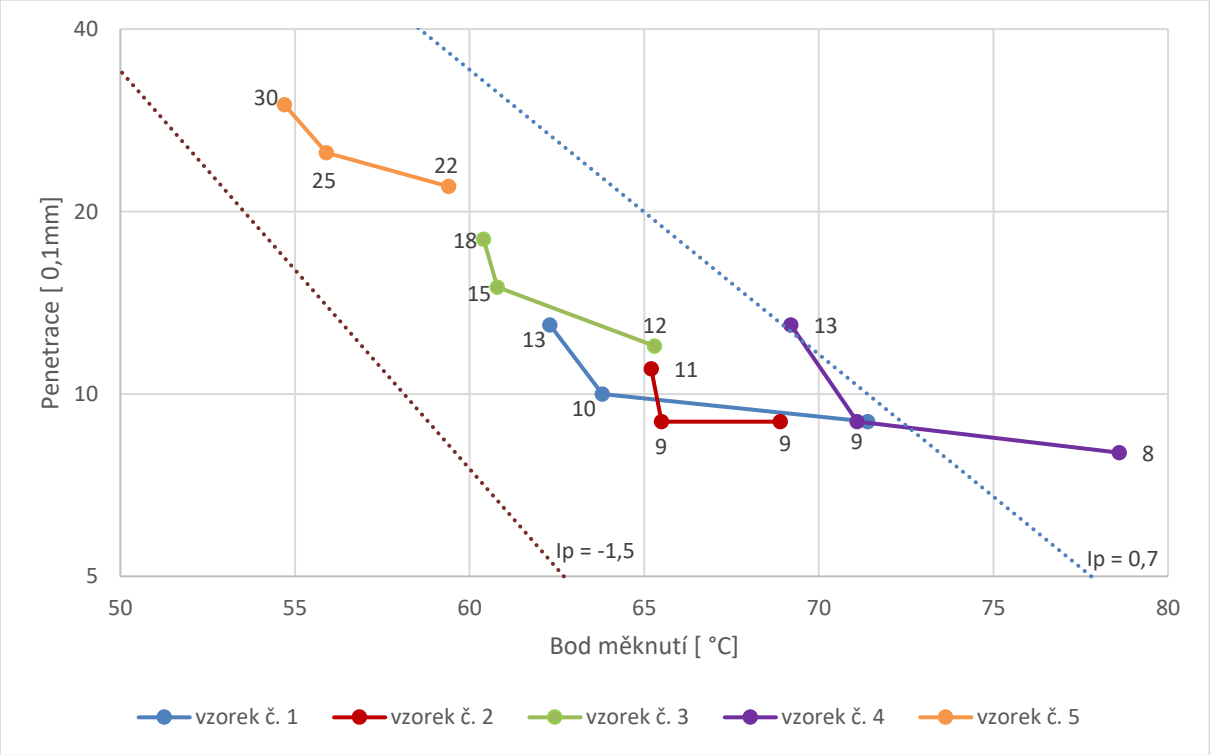
6.2. Naměřené hodnoty



Graf 9: Vliv teploty ohřevu na hodnotu dynamické viskozity



Graf 10: Vliv teploty ohřevu na hodnotu komplexního modulu



Graf 11: Bod měknutí – Penetrace

Tabulka 8: Tabulka naměřených hodnot

			Empirické vlastnosti			Funkční vlastnosti		
Označení	Doba temperace	Teplota	Penetrace	Bod měknutí	Penetrační index	G*	δ	Dymanická viskozita
	[min]	[°C]	[0,1 mm]	[°C]		[60°C, 1,59Hz, kPa]	[60°C, 1,59Hz, °]	[135°C, mPa.s]
Vzorek č. 1	0	50	13	62,3	-1,18	22,6	79,2	1065
	150	110	10	63,8	-1,32	24,3	78,86	1203
	150	150	9	71,4	-0,33	71,9	71,68	2167
Vzorek č. 2	0	50	11	65,2	-0,96	26,7	76,04	1398
	150	110	9	65,5	-1,20	28,9	75,41	1448
	150	150	9	68,9	-0,69	43,3	71,18	1810
Vzorek č. 3	0	50	18	60,4	-0,99	13,4	80,6	945
	150	110	15	60,8	-1,21	14,9	79,99	970
	150	150	12	65,3	-0,81	29,5	74,79	1430
Vzorek č. 4	0	50	13	69,2	-0,08	40,5	70,8	2469
	150	110	9	71,1	-0,37	57,4	69,8	2848
	150	150	8	78,6	0,47	119,2	63,4	4909
Vzorek č. 5	0	50	30	54,7	-1,18	6,6	83,4	729
	150	110	25	55,9	-1,27	8,0	82,6	737
	150	150	22	59,4	-0,83	11,4	79,9	906

V rámci provedených měření na reometru byly měřeny hodnoty smykové viskozity, komplexního smykový modul a fázový úhel.
Ze získaných hodnot je patrné, že hodnota dynamické viskozity roste se zvyšující se teplotou ohřevu vzorku R-materiálu. V grafu 10 je znázorněna změna hodnoty dynamické viskozity u jednotlivých vzorků R-materiálu. Dynamická viskozita byla zjišťována při teplotě 135 °C a smykové rychlosti 1,0 s^{-1}.
Hodnoty komplexního smykového modulu vykazují vyšší hodnoty modulu tuhosti při ohřevu na teplotu 150 °C než na teplotu 110 °C, což je patrné v grafu 11.

7. ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývá vlivem teploty na vlastnosti znovuzískaného asfaltového pojiva z R-materiálu. Lze ji rozdělit do teoretické a praktické části.
V teoretické části jsou na úvod popsány obecně asfaltová pojiva, R-materiál, výroba asfaltové směsi a dosavadní poznatky z problematiky využívání R-materiálu.
V praktické části je popsána příprava R-materiálu ke zkoušení, samotné zkoušky asfaltových pojiv a v neposlední řadě naměřené hodnoty pojiv při zkouškách.

Výsledky zkoušek prokázaly, že znovuzískané asfaltové pojivo z R-materiálu mění své vlastnosti v závislosti na teplotě ohřevu R-materiálu.
Dle získaných výsledků a informací o vzorku, můžeme tuto skupinu pěti vzorků rozdělit. Vzorky č. 1-4 jsou vzorky R-materiálu směsného (materiál pochází z celého souvrství asfaltového krytu komunikace), vzorek č. 5 pochází výhradně z ložní vrstvy asfaltové vozovky.
Při ohřevu R-materiálu vzorků č. 1-4 na teplotu 110 °C, došlo ke snížení hodnoty penetrace v intervalu 9,1 % až 23,1 %. Vzorek č. 5 vykazuje snížení hodnoty penetrace o 33,3 %.
Vzorky č. 1-4 R-materiálu ohřátého na teplotu 150 °C se hodnota penetrace snížila o hodnoty v intervalu 18,2 % až 33,3 %. Vzorek č. 5 změnil hodnotu penetrace o 54,2 %.
Při zkouškách bodu měknutí na vzorcích ohřátých na 110 °C, vzorky č. 1-4 vykazovali nepatrný nárůst teploty bodu měknutí, a to o hodnotu 0,5 % až 2,7 % %. Teplota bodu měknutí u vzorku č. 5 vzrostla o 2,2 %.
Při ohřevu R-materiálu na teplotu na 150 °C, u vzorků č. 1-4 došlo k navýšení teploty o 8,1 % až 14,6 %. U vzorku č. 5 tento nárůst činil 41,0 %.
Dynamická viskozita všech zkoumaných asfaltových pojiv je závislá na teplotě ohřevu R-materiálu. Hodnoty dynamické viskozity rostou v závislosti na teplotě ohřevu, čím vyšší zvolené teplota ohřevu R-materiálu tím dynamická viskozita má vyšší hodnotu.
Z měření komplexního smykového modulu je patrné, že s rostoucí teplotou ohřevu R-materiálu roste i modul tuhosti asfaltového pojiva.

Ze získaných výsledků lze konstatovat, že směsné R-materiály nedegradují vlivem teploty tak drasticky jako R-materiál z ložních vrstev. Směsný R-materiál degraduje už od chvíle zabudování do konstrukce vozovky, jelikož je v kontaktu se vzduchem. Směrem do hloubky nedochází k tak výrazné degradaci jako na povrchu. U R-materiálu z ložních vrstev je zabráněno přístupu vzduchu, a tudíž nedochází k tak rozsáhlé degradaci vlastností pojiva v něm obsažené. Proto by mělo být bráno na zřetel, jaký R-materiál vstupuje do recyklačního procesu a upravit teplotu ohřevu podle vlastností příslušného R-materiálu.

POUŽITÁ LITERATURA

[1] ČSN EN 13108-1 Asfaltové směsi – Specifikace pro materiál – Část 1: Asfaltový beton

[2] ČSN EN 13108-8 Asfaltové směsi – Specifikace pro materiál – Část 8: R-materiál

[3] ČSN EN 12697-35 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 35: Laboratorní výroba směsi

[4] ČSN EN 12697-3 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 3: Znovuzískání extrahovaného pojiva: Rotační vakuové destilační zařízení

[5] ČSN EN 1426 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou

[6] ČSN EN 1427 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička

[7] Varaus, M.: Pozemní komunikace II – Modul 3, Brno, 2005

[8] Arnold, J. Ch., Nölting, M., Riebesehl, G., Denck, Ch.: UNLOCKING THE FULL POTENTIAL OF RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT (RAP) – HIGH QUALITY ASPHALT COURSES INCORPORATING MORE THAN 90 % RAP; A CASE STUDY – 5th Eurasphalt & Eurobitumen Congress, Istanbul, 2012

[9] Dašek, O., Coufalík, P., Hýzl, P., Varaus, M.: Nové zkušební metody umožňující predikovat prodloužení životnosti asfaltových vozovek, VUT v Brně, FAST, 2014

[10] Valentin, J.: Užitné vlastnosti a reologie asfaltových pojiv a směsí-charakteristiky, nové zkušební metody, vývojové trendy, Praha, 2003

[11] http://d2051.fsv.cvut.cz/predmety/stpk/reologieuvod.pdf

[12] School of reology , Brno, 2012

[13] Štěpanovský, V., Problematika stárnutí asfaltových pojiv a směsí, Diplomová práce, VUT v Brně, FAST, Ústav pozemních komunikací, 2015

[14] Carbonneau, X., Legal, Y., Quigniot, S., Desroches, M.: Effect of RAP temperature on asphalt mix performance (hot and warm) – 6th Eurasphalt & Eurobitumen Congress, Prague, 2016

[15] ČSN EN 12697-42 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 42: Obsah cizorodých látek v asfaltovém recyklátu

[16] TP 210 – Užití recyklovaných stavebních demoličních materiálů do pozemních komunikací

[17] Varaus M.: Asfaltové směsi zpracované za horka, prezentace

[18] Navaro J, Drouandaine I, Bruneau D, Pouteau B, Colin J, Dony A.: RAP biner in reclaimed asphalt concrete through mixing conditions: Observation, measurement and mechanical consideration of the blendind [online], 2012 Dostupné z: http://www.eecongress2012.org/

[19] Chapter 6. Hot-mix asphalt recycling – drum plant: Construction methods and equipment. Dostupné z: http://www.fhwa.dot.gov/pavement/recycling/98042/chpt_06.pdf

[20] Vojíř J., Modifikace asfaltových pojiv, diplomová práce, ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra silničních staveb, 2009

[21] Klobouček B., Silniční laboratoř, 1979

[22] Fiedler J.: Vlastnosti asfaltů modifikovaných polymery (PMB)

[23] Asphalt physical tests & history of asphalt grading systems

[24] European Asphalt Pavement Association, Asphalt the 100 % recyclable construction product, 2014
[25] Zítka P.: Problematika použití R-materiálu do asfaltových směsí, Diplomová práce, VUT v Brně, FAST, Ústav pozemních komunikací, 2015
[26] ČSN EN 933-1 Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Šaržová obalovna [17] 14
Obrázek 2: Kontinuální obalovna [17] 15
Obrázek 3: Příprava vzorku na sušení 19
Obrázek 4: Sestava zkušebních sít na vibračním zařízení 20
Obrázek 5: Extrakční zařízení 22
Obrázek 6: Destilační zařízení 23
Obrázek 7: Nalité kroužky pro měření bodu měknutí 24
Obrázek 8: Nalité kapky pro měření reologických vlastností 24
Obrázek 9: Pojivo pro měření penetrace 24
Obrázek 10: Penetrometr 26
Obrázek 11: Přístroj pro stanovení bodu měknutí 27
Obrázek 12: Dynamický smykový reometr 29
Obrázek 13: Toková křivka Newtonovské kapaliny. [11] 29
Obrázek 14: Křivka viskozity Newtonovské kapaliny. [11] 30
Obrázek 15: Geometrie pro měření viskozity [12] 30
Obrázek 16: Princip dynamického smykového reometru. [10] 31

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Maximální současné množství R-materiálu v asfaltové směsi [1] 16
Tabulka 2: Maximální navrhované množství R-materiálu v asfaltové směsi, návrh ČSN EN 13108-1, říjen 2017 16
Tabulka 3: Sítový rozbor vzorku č. 1 20
Tabulka 4: Sítový rozbor vzorku č. 2 21
Tabulka 5: Sítový rozbor vzorku č. 3 21
Tabulka 6: Naměřené hodnoty penetrace 32
Tabulka 7: Hodnoty bodu měknutí 34
Tabulka 8: Tabulka naměřených hodnot 38

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Vliv teploty na tuhost asf. pojiva [22] 11
Graf 2: Rozdílnost teplotní citlivosti asf. pojiva [23] 11
Graf 3: Rychlost zhomogenizovaní směsi v závislosti na teplotě a čase míchání [18] 13
Graf 4: výsledky sítových rozborů 21
Graf 5: Naměřené hodnoty penetrace 33
Graf 6: Změna hodnot penetrace 33
Graf 7: Hodnoty bodů měknutí 35
Graf 8: Změna (zvýšení) bodu měknutí 35
Graf 9: Vliv teploty ohřevu na hodnotu dynamické viskozity 36
Graf 10: Vliv teploty ohřevu na hodnotu komplexního modulu 37
Graf 11: Bod měknutí – Penetrace 37