



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

ASFALTOVÁ SMĚS TYPU VMT PRO LOŽNÍ VRSTVY VOZOVEK S VYUŽITÍM R-MATERIÁLU

USING RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT IN HIGH MODULUS ASPHALT MIXTURE FOR
BINDER ASPHALT COURSES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Matěj Klimek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PAVEL ŠPERKA

BRNO 2020



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	Matěj Klimek
Název	Asfaltová směs typu VMT pro ložní vrstvy vozovek s využitím R-materiálu
Vedoucí práce	Ing. Pavel Šperka
Datum zadání	30. 11. 2019
Datum odevzdání	22. 5. 2020

V Brně dne 30. 11. 2019

doc. Dr. Ing. Michal Varaus
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Předané vzorky asfaltu a kameniva

ČSN 73 6121

Normy řady ČSN EN 13108 Asfaltový beton

Zkušební normy řady ČSN EN 12697

ČSN 65 7222-2

TP MD 151 Asfaltové směsi s vysokým modulem tuhosti (VMT)

Sborníky z konferencí AV 2017 a AV 2019

Diplomové a bakalářské práce z předchozích let

Odborné publikace z internetu

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

V úvodní teoretické části práce student provede rešerši dostupné literatury zabývající se danou problematikou. Praktická část práce se bude zabývat návrhem a přípravou asfaltové směsi s vysokým modulem tuhosti pro ložní vrstvy vozovek s využitím R-materiálu. Cílem práce bude pomocí vhodných laboratorních zkoušek stanovit vlastnosti navržené asfaltové směsi a porovnat je se stávajícími platnými předpisy.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

Ing. Pavel Šperka
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá návrhem asfaltové směsi s vysokým modulem tuhosti a vyšším obsahem R-materiálu (obsah 30 %), za použití polymerem modifikovaného asfaltového pojiva (PmB). Cílem práce je pomocí vhodných funkčních zkoušek ověřit, zda směs dosahuje požadovaných vlastností určených technickým předpisem *TP 151 Asfaltové směsi s vysokým modulem tuhosti (VMT)*[1]. Vybrané zkoušky byly prováděny dle evropských norem řady *ČSN EN 12697 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka*. Důležitým cílem této práce je prozkoumání možností dávkování vyšších obsahů R-materiálů do asfaltových směsí.

KLÍČOVÁ SLOVA

Asfaltová směs, asfaltový směs s vysokým modulem tuhosti, ložní vrstva, R-materiál, polymerem modifikovaný asfalt, odolnost vůči únavě, odolnost vůči nízkým teplotám.

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with design of high modulus asphalt mixture with using 30 % reclaimed asphalt pavement in combination with polymer modified bitumen. The goal of this thesis is to verify if the mixture reaches the requirements of technical regulations *TP 151* [1]. Selected tests were performed in accordance with the European standards *ČSN EN 12697 Bituminous mixtures – Test methods for hot asphalt mixtures*. Theoretical part of my thesis is focused on possibilities of addition higher amounts of reclaimed asphalt pavement into asphalt mixtures.

KEYWORDS

Asphalt Mixture, High Modulus Asphalt Mixture, the Binder Course, Reclaimed Asphalt Pavement, Polymer modified Bitumen, Resistance to Fatigue, Resistance to Low Temperature

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Matěj Klimek *Asfaltová směs typu VMT pro ložní vrstvy vozovek s využitím R-materiálu*. Brno, 2020. 63 s., 7 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Pavel Šperka

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Asfaltová směs typu VMT pro ložní vrstvy vozovek s využitím R-materiálu* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 22. 5. 2020

Matěj Klimek
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Asfaltová směs typu VMT pro ložní vrstvy vozovek s využitím R-materiálu* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 22. 5. 2020

Matěj Klimek
autor práce

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Pavlu Šperkovi za odborné vedení, poskytnuté materiály a konzultace při vypracování této práce. Děkuji pracovníkům silniční laboratoře AdMaS za poskytnuté materiály a možnost využití jejich laboratorních zařízení. Dále bych rád poděkoval všem pracovníkům v laboratoři na Ústavu pozemních komunikací, kteří mi ochotně pomohli, nebo poradili při provádění některých zkoušek. Nakonec bych rád poděkoval své rodině, která mě podporovala a umožnila mi studovat.

Obsah

Poděkování	8
1. Úvod	12
2. Cíle práce	13
Teoretická část.....	14
3. Úvod do problematiky.....	14
3.1 Historické zkušenosti s používáním R-materiálu v asfaltových směsích vyráběných za horka	14
4. Současný stav využívání R-materiálu	15
4.1 V České republice	15
4.1.1 Směsi s vysokým modulem tuhosti	16
4.2 Současné zkušenosti s používáním R-materiálu v asfaltových směsích vyráběných za horka ve světě	17
4.2.1 Přístup Švýcarské legislativy	17
4.2.2 Poznatky Německého výzkumu	17
4.2.3 Poznatky ž Čínské studie	18
4.2.4 Přístup USA.....	18
5. Technologické postupy umožňující dávkování vyššího množství R- materiálu	21
5.1 Dávkování přímo do míchačky šaržové obalovny	22
5.2 Dávkování R-materiálu za tepla pomocí paralelního sušícího bubnu	23
5.3 Metody Drum-mix	24
6. Rekapitulace teoretické části	28
Praktická část.....	29
7. Použité materiály	29
7.1 Kamenivo	29
7.1.1 Lom Luleč.....	29
7.2 R-materiál	30
7.3 Asfalt.....	30
7.4 Asfalt z R-materiálu.....	30
7.5 Modifikovaný asfalt PmB (Polymerem modifikovaný asfalt).....	30
8. Příprava asfaltové směsi	31

8.1	Sítové rozbory	31
8.2	Návrh čáry zrnitosti	31
9.	První etapa míchaní směsi	32
9.1	Hutnění Marshallových těles	33
10.	Zkoušky základních vlastností asfaltové směsi	34
10.1	Objemová hmotnost směsi	34
10.2	Maximální objemová hmotnost směsi.....	36
10.3	Mezerovitost směsi	38
10.4	Míra zhutnění.....	38
11.	Druhá etapa míchaní	39
11.1	Hutnění deskových těles.....	40
11.2	Zkušební tělesa.....	40
12.	Funkční zkoušky asfaltové směsi.....	41
12.1	Stanovení odolnosti asfaltové směsi vůči nízkým teplotám	42
12.2	Stanovení modulů tuhosti asfaltové směsi.....	43
12.3	Odolnost vůči únavě asfaltové směsi.....	45
13.	Výsledky zkoušek vlastností asfaltové směsi.....	46
13.1	Objemová hmotnost	46
13.1.1	Objemové hmotnosti Marshallových těles	46
13.2	Maximální objemová hmotnost.....	46
13.3	Mezerovitost směsi	47
13.3.1	Objemové hmotnosti deskových těles	48
13.4	Míra zhutnění.....	49
14.	Výsledky funkčních zkoušek navržené asfaltové směsi	50
14.1	Nízkoteplotní vlastnosti směsi	50
14.2	Moduly tuhosti asfaltové směsi	52
14.3	Odolnost vůči únavě	53
15.	Shrnutí práce a závěr	54
	Seznam literatury	56
	Seznam obrázků.....	60
	Seznam grafů.....	61
	Seznam tabulek.....	62

Seznam příloh.....	63
Příloha 1: Objemová hmotnost, maximální objemová hmotnost a mezerovitost vyráběných asfaltových směsí.....	64
Příloha 2: Objemová hmotnost a míra zhutnění desek.....	65
Příloha 3: Odolnost směsi vůči nízkým teplotám.....	66
Příloha 4: Modul tuhosti směsi VMT 16	68
Příloha 5: Odolnost směsi vůči únavě	70

1. Úvod

Během studií na Fakultě stavební VUT jsem absolvoval exkurzi do vědecko-výzkumného centra AdMaS při Fakultě stavební VUT v Brně, kde jsem se dozvěděl o zkoušení asfaltových směsí s vysokým modulem tuhosti AC EME. Tyto směsi mě zaujaly zejména svými vlastnostmi, kdy lze prodloužit životnost vozovky a snížit její celkovou tloušťku. Protože se také zajímám se o stav životního prostředí, možnost znovupoužití R-materiálu ze starých asfaltových povrchů mi přišla velice zajímavá, zejména pro větší využití tohoto materiálu v asfaltových směsích.

Teoretická část práce obsahuje rešerši stávající literatury zaměřené na problematiku využití R-materiálu, jeho získávání, zpracování, využití a dávkování do asfaltových směsí ve vybraných zemích.

Praktická část této práce se zabývá návrhem asfaltové směsi s vysokým modulem tuhosti (VMT) s využitím vyššího množství R-materiálu zkoušením a posouzením výsledků nově navržené směsi VMT 16 s obsahem 30 % R-materiálu. Navržená směs je určena pro ložní vrstvu netuhých asfaltových vozovek. Jako pojivo je do směsi je navržen polymery modifikovaný asfalt PMB 25/55-65. Zkoušky provedené na směsi byly provedeny dle doporučení *ČSN EN 73 6160 Zkoušení asfaltových směsí a TP 151 [1]*.

2. Cíle práce

Cílem teoretické části mé bakalářské práce (dále BP) bylo rekapitulovat současné poznatky o možnostech dávkování R-materiálu do asfaltových směsí.

Položil jsem si otázku, kolik procent R-materiálu z hmotnosti směsi lze přidat do směsi VMT, aby dosahovala tato směs stále dobrých výsledných parametrů?

Cílem praktické části mé BP bylo navrhnout směs VMT 16 s vyšším množstvím R-materiálu, než umožňují současné technické předpisy *TP 151 [1]* a na takto navržené směsi stanovit vybrané funkční vlastnosti, a to: odolnost vůči únavě, tuhost a odolnost vůči nízkým teplotám. Tyto funkční vlastnosti následně porovnáám s požadavky v *TP 151* a s výsledky bakalářské práce Ing. Daniela Horáčka, který se podobné problematice věnoval také.

Teoretická část

3. Úvod do problematiky

Různé technologie recyklace asfaltových směsí jsou známé již desítky let. K rozvoji významně přispěla ropná krize odehrávající se v průběhu 70. let 20. století, během které skokově vzrostla cena barelu ropy, jakožto hlavní suroviny pro výrobu asfaltového pojiva. Dnešní doba je oprávněně zaměřená jak na udržitelný rozvoj silničního stavitelství, proto je velká snaha vylepšovat technologické postupy recyklace asfaltových směsí, díky kterým lze ušetřit značné množství přírodních surovin a energie na výrobu směsí. [2, 3]

Kromě zmíněných přínosů přináší nové technologie také větší nároky na zpracování, skladování a případné úpravě R-materiálu, také je nutno zajistit technické vybavení obalovny, obecně při dávkování vyšší než 25 % R-materiálu z hmotnosti směsi, je nutné mít obalovnu vybavenou speciální technologií například paralelním bubnem pro dávkování R-materiálu. [4]

Velice podstatné je věnovat zvýšenou pozornost nastavení okrajových podmínek výroby, a to především: skladování surovin, době míchání, způsobům dávkování jednotlivých složek asfaltové směsi dále také způsobu oživení zestárlého pojiva obsaženého v R-materiálu. Při dodržení technologických postupů, správně nastavených a kontrolovaných okrajových podmínkách při výrobě lze dosáhnout stejných vlastností jako u konvenční asfaltové směsi. [5, 6]

3.1 Historické zkušenosti s používáním R-materiálu v asfaltových směsích vyráběných za horka

Již od 70. let 20. století bylo uskutečněno několik vědeckých programů s cílem zkoumat chování asfaltových směsí s R-materiálem, např. projekt Federal Highway Administration (FHWA) Demonstration Project No. 39 [7].

V USA došlo v této době, k zhotovení několika zkušebních úseků s použitím vysokého obsahu R-materiálu, v množství okolo 50 % [8]. Bohužel při výrobě těchto směsí nebyla věnována dostatečná pozornost zpracování znovuzískaných asfaltových směsí a často ani obalovny nebyly na přidávání takto vysokého množství technologicky uzpůsobeny. Z těchto důvodů plynuly také problémy, které nastaly během výroby, tj. u směsí kolísala obsah asfaltového pojiva, zrnitost směsí byla proměnlivá a často i výsledná tuhost směsí byla příliš vysoká. Příčinou přechozích nedostatků a technologické nekázně docházelo k předčasnému výskytu poruch a dřívější degradaci směsi. Výsledkem bylo omezení použití vyššího podílu R-materiálu kdy maximální možné přidávané množství sníženo na 10 % až 25 % hmotnosti směsi v závislosti na státu, kde probíhala pokládka [9].

Oproti uvedenému byly uskutečněny i úspěšné projekty, například na Floridě v roce 1980 použilo Florida Department of Transportation (FDOT), kde bylo využito do směsi až 60 % R-materiálu jako standardní návrhový parametr. Pozdější studie (FDOT) ukázala snížení nákladů na výrobu směsi až o 25 % a celkovou energetickou spotřebu až o 40 % [10].

V některých státech často přetrvávají tyto striktní omezení dodnes, přestože technologie výroby a zpracování recyklovaných materiálů se za posledních 40 let výrazně posunuly ku předu.

4. Současný stav využívání R-materiálu

4.1 V České republice

Současná norma *ČSN EN 13108-1 ed. 2 (736140) Asfaltové směsi –Specifikace pro materiály –Část 1: Asfaltový beton [11]*, a technické podmínky *TP 151[1]*, dělí zpracování R-materiálu do čtyř skupin. Skupiny lze dělit dle místa zpracování, kdy rozlišujeme recyklaci na místě a recyklaci v míchacím centru (v obalovně). Dále lze dělit skupiny dle teploty zpracování,

a to za studena nebo za tepla. Norma dále rozlišuje množství přidaného R-materiálu dle druhu směsi a typu vrstvy v konstrukci. Norma umožňuje přidávat R-materiál pouze do směsí typu asfaltový beton (dále AC) a směsí s vysokým modulem tuhosti (dále VMT).

Tabulka 1 Současný stav v České normě

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	35	ACL 22 S	40	ACP 22 +	70
ACO 16 +	30	ACL 22 +	50	VMT 16	30 ²
ACO 16	35	ACL 22	50	VMT 22	30 ²
		VMT 16	25 (15)		
		VMT 22	25 (15)		

Poznámky k tabulce:

1) R-materiál za studena lze přidávat bez jeho další úpravy do směsi se silničním asfaltem v množství max. 15 %. Při vyšších množstvích dávkování R-materiálu jak 15 % (obrusné, ložní, podkladní vrstvy) je nutno vypočítat potřebné množství dávkování asfaltu měkčí gradace nebo rejuvenátoru tak, aby bylo dosaženo výsledné deklarované gradace pojiva podle tabulky 4.1 v normě [11]. Množství a druh dávkovaného rejuvenátoru se uvádí ve zkoušce typu (ITT). Objednatel má za povinnost se přesvědčit přímo na obalovně o druhu a dávkování rejuvenátorů do asfaltových směsí. Přidávání R-materiálu metodou po částech za studena (použití variátoru) lze za výše uvedených podmínek použít pouze pro výrobu asfaltových směsí do podkladní vrstvy.

2) Do směsí pro ložní, podkladní a vyrovnávací vrstvy, do kterých se přidává modifikované asfaltové pojivo, lze přidávat max. 15 % R-materiálu. Pokud se vyrábí asfaltová směs pro obrusné vrstvy, do které se přidává modifikovaný asfalt, není možné do směsi přidávat R-materiál se silničním asfaltem (v případě modifikovaných pojiv v R-materiálu platí omezené dávkování na max. 15 %). [11] [12]

4.1.1 Směsi s vysokým modulem tuhosti

Směsi označované jako VMT jsou za horka zpracované asfaltové směsi s vysokým modulem tuhosti, s relativně vyšším obsahem tvrdších druhů asfaltů, tyto směsi mají obvykle nízkou mezerovitost. U těchto druhů směsí je nutné prokázat vlastnosti funkčním způsobem [1] [13]. Díky požadavkům na vysokou tuhost směsi, je vhodné přidávat R-materiál, který obsahuje zestárle pojivo obvykle tvrdších gradací. Při vysokých dávkách lze předpokládat

nutnost kompenzovat zestárnutí změkčovačem (rejuvenátorem). Podle zrnitosti použité směsi kameniva se rozdělují směsi VMT na 0/16 a 0/22.

4.2 Současné zkušenosti s používáním R-materiálu v asfaltových směsích vyráběných za horka ve světě

4.2.1 Přístup Švýcarské legislativy

Dle Švýcarských předpisů je umožněno použití funkčního principu při návrhu asfaltových směsí, který umožňuje zhotoviteli větší flexibilitu při návrhu směsi. Odběratel pouze kontroluje pouze únavové vlastnosti a moduly tuhosti směsi, což jsou rozhodující vlastnosti pro životnost vozovek. Tento přístup velmi rozšířený a také se zde pro směsi s vyšším modulem tuhosti běžně používá 30 % až 60 % R-materiálu. [14]

4.2.2 Poznatky Německého výzkumu

V Německém městě Braunschweig bylo provedeno několik výzkumů zabývajících se problematikou R-materiálu.

Hlavní myšlenkou jednoho z výzkumných projektů bylo prozkoumat rozdíly ve fungování R-materiálu ve směsi AC 16 (ABi 0/16 S) s použitím běžného silničního asfaltového pojiva a polymerem modifikovaného pojiva PmB 45A. Směsi AC 16 byly vyráběny se systematickou změnou pojiva (modifikovaný asfalt/silniční asfalt), s různým podílem přidaného R-materiálu (0 % / 15 % / 30 %), teplotou přidání R-materiálu (20 °C a 100 °C) a dobou míchání asfaltové směsi (30, či 180 sekund) [15] Poznámka 30 s je běžná doba míchání.

Zásadní zlepšení výsledků nízkoteplotních zkoušek bylo dosaženo použitím pojiva PmB 45A, i v případech směsí bez R-materiálu. Velké množství, až 30 % R-materiálu nemělo negativní vliv na funkční vlastnosti směsí, naopak bylo dosaženo lepších výsledků u těchto směsí. Dlouhé míchací procesy, až 180 sekund, ukázaly také zlepšení vlastností vůči směsí bez R-materiálu.

Nejhorší výsledky se prokázaly na kombinaci nízké teploty přidání R-materiálu (dávkování za studena) a krátké míchací doby. [15]

4.2.3 Poznatky z Čínské studie

V Číně byla provedena studie porovnávající funkční vlastnosti asfaltové směsi AC 20. Navržené směsi se lišily obsahem R-materiálu, Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), také i obsahem jemné frakce R-materiálu 0-5 mm, Fine Reclaimed Asphalt Pavement (FRAP). V navržených směsích byly nakombinovány obsahy RAP (0, 30 %, 40 %, a 50 %) a obsahy FRAP (10 %, 15 %, a 20 %) [16].

Z výzkumů vyplývá, že optimální celkový obsah asfaltového pojiva se mírně zvýšil přidáním většího množství RAP a FRAP. Množství nově přidávaného pojiva se pak snížilo, což vedlo k možné úspoře nákladů až o 63 % oproti směsí bez RAP. Směsi s největším procentem FRAP se projeví výrazným poklesem v životnosti, proto autoři doporučují maximálně 15 % FRAP [16].

4.2.4 Přístup USA

Na rozdíl od České republiky, kde jsou rozšířené šaržové obalovny, v USA se velmi hojně používají obalovny kontinuální.

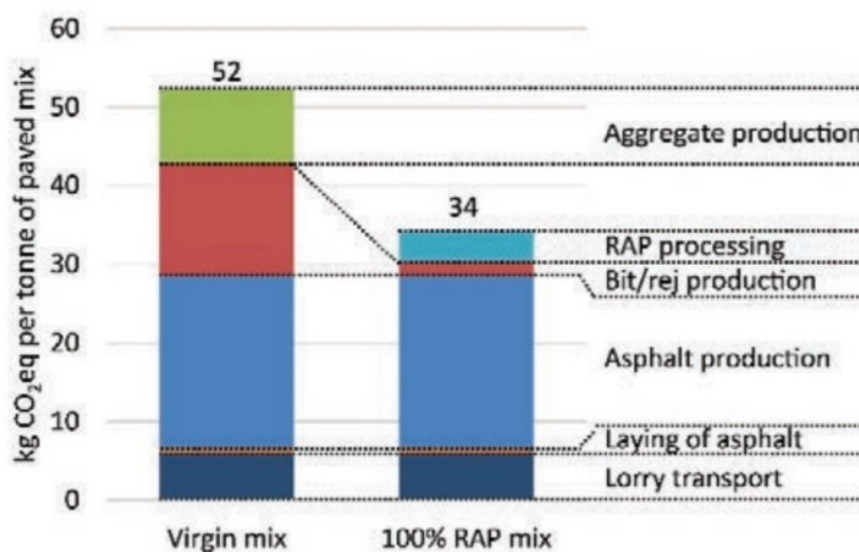
Je třeba poznamenat že použití 25 % R-materiálu z hmotnosti směsi do asfaltových směsí je vysoké. V USA existuje 35 státních agentur (department of transportations), které umožňují použít až 29 % R-materiálu do ložní vrstvy. Podobně 20 státních agentur umožňuje použít 29 % R-materiálu do obrusné vrstvy, avšak jen málo z nich využívá tyto maximální hodnoty. Pouze 10 agentur používá až 29 % R-materiálu do ložné vrstvy, pouze 5 agentur pak používá až 29 % R-materiálu do obrusné vrstvy [17].

Stát Texas dovoluje použít do obrusné vrstvy až 10 % R-materiálu, do ložní je to 20 % a do podkladní až 30 %, ložní a podkladní vrstvy při použití

R-materiálu bez určení frakce. Při použití R-materiálu se známou frakcí zvyšují se limity na 20 %, 30 % a 40 % do obrusné, ložní a podkladní vrstvy. [18]

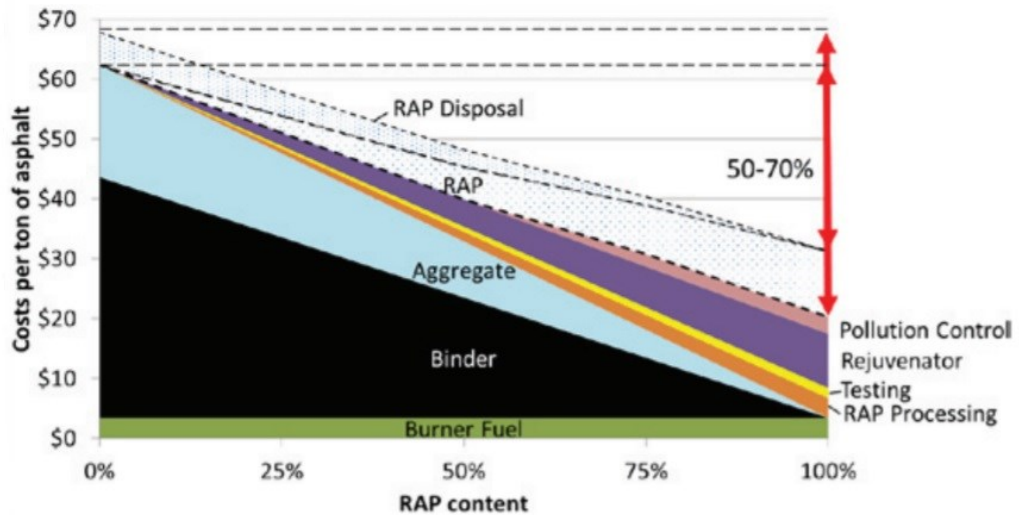
V USA byly provedeny zkušební úseky s obrusnou vrstvou ze 100 % R-materiálu, za použití oživovací přísady. Produkce směsi probíhala v upravené kontinuální obalovně. Zkušební úsek z této směsi byl zhotoven ve státě New York v roce 2002. Další zkušební úsek byl zhotoven ve státě Indiana roku 2013, za pomoci technologie HyRAP. [12]

Při dávkování nad 50 % je považováno za nutnost použít látky na oživení asfaltového pojiva v R-materiálu [22]. V rámci studie bylo porovnáváno celkem 8 oživovacích přísad. Vyhodnocením výsledků se dokázala stanovit účinnosti jednotlivých přísad a stanovit účinné dávky přísad. Studie rovněž porovnávala množství emisí ušetřených díky recyklaci.



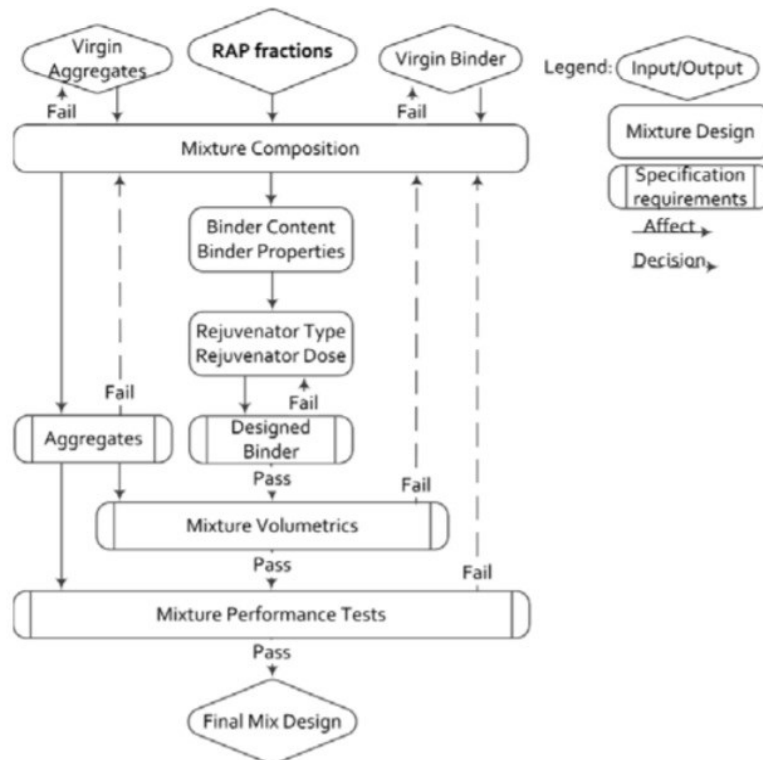
Obrázek 1: Emise při výrobě na tunu asfaltové směsi [19]

Další součástí studie byla finanční analýza (obrázek č. 2)., Uvedené ceny jednotlivých složek jsou tržními cenami z New Jersey, US, z léta roku 2014. V závislosti na aktuální situaci trhu se úspory mezi směsí se 100 % R-materiálu a směsí bez R-materiálu se pohybovaly mezi 50 % a 70 %. [19]



Obrázek 2: Úspora financí při různých procentech R-materiálu [19]

V rámci této studie byl také, sestaven postup návrhu směsi se 100% obsahem R-materiálu [19].



Obrázek 3: Postup pro výrobu směsi se 100 % R-materiálu [19]

5. Technologické postupy umožňující dávkování vyššího množství R-materiálu

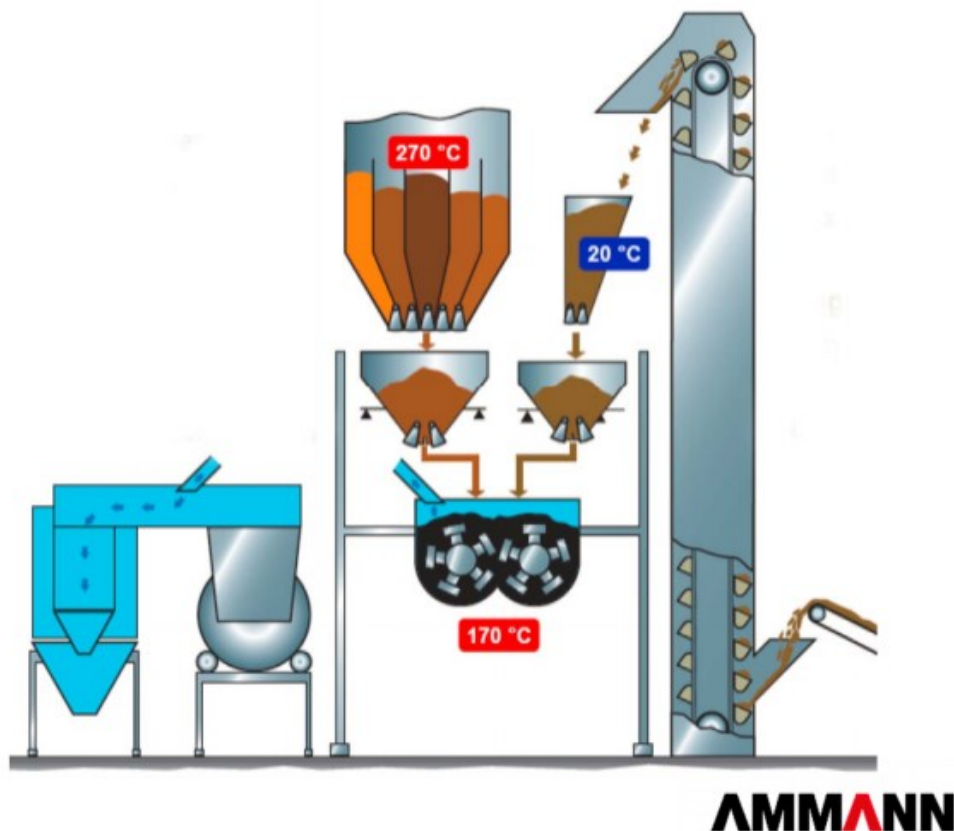
Všeobecně lze rozdělit technologii dávkování R-materiálu do základních skupin, dle teploty dávkovaného materiálu na:

- Systémy dávkující R-materiál za studena:
 - Dávkování přímo do míchačky šaržové obalovny,
- Systémy dávkující R-materiál za tepla:
 - Dávkování za tepla s předeřevem v paralelním sušícím bubnu,
 - Systémy Drum-mix:
 - Dávkování po proudu horkého vzduchu (Parallel flow drum),
 - Dávkování proti proudu horkého vzduchu (Counter-flow drum),
 - Separovaný ohřev R-materiálu a míchání v bubnu,
 - Separovaný ohřev R-materiálu a míchání mimo sušící buben,
 - Systém HERA (VolkerWessels),
 - Systém HyRAP (Brooks Construction Company).

V následujících kapitolách budou jednotlivé technologie podrobně vysvětleny.

5.1 Dávkování přímo do míchačky šaržové obalovny

R-materiál je skladován v samostatném silu za běžné teploty, kamenivo je skladováno dle frakcí v sílech. Kamenivo je ohřáto na vysokou teplotu, tak aby byla dosažena požadovaná teplota pro mísení výsledné směsi v bubnu. Dávkovat pomocí toho systému za studena lze 15 % – 40 % R-materiálu, reálně se běžně dávkuje max. 25 %, kvůli příliš vysoké teplotě kameniva. Systém je výhodný poměrně nízkou pořizovací cenou v poměru s jinými metodami, je vhodný pro šaržové obalovny., Snadno lze použít pro směsi vyžadující nízkou teplotu míchaní, lze použít pro stávající obalovny bez nutnosti stavebních úprav [20].



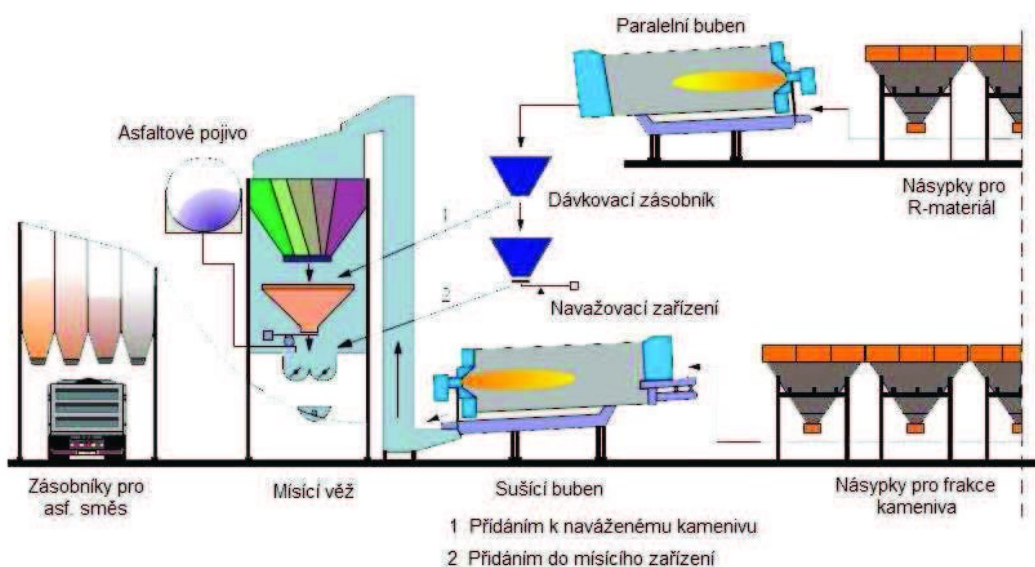
Obrázek 4: Technologický postup dávkování R-materiálu za studena [20]

Systém má pochopitelně i své nevýhody. Je nutný odvod páry vzniklé mísením velmi horkého kameniva s R-materiálem, který není předehříván

a často je odebírán z nezastřešené skládky. Další nevýhodou je přehřátí kameniva na vysokou teplotu.[20]

5.2 Dávkování R-materiálu za tepla pomocí paralelního sušícího bubnu

R-materiál je skladován v násypkách (silech) ze kterých je dopravován do paralelního sušícího bubnu, ve kterém se odstraní zbytková vlhkost materiálu a je ohřát na požadovanou teplotu (standardně 135 °C). Mísení směsí probíhá v míchačce obalovny, kde se přidávají zbylé frakce kameniva a dodává se potřebné pojivo.[21]



Obrázek 5: Dávkování za tepla pomocí paralelního sušícího bubnu [21]

Hlavní výhodou systému je výrazně vyšší množství, než při dávkování za studena až na 60 % R-materiálu ve směsi. S takovou dávkou R-materiálu souvisí také pravidelná kontrola shody vlastností s požadavkem výroby. Můžeme také kvalitativně rozlišovat R-materiál a používat dle potřeb dané vrstvy, hodnotný R-materiál do obrusných vrstev [21].

5.3 Metody Drum-mix

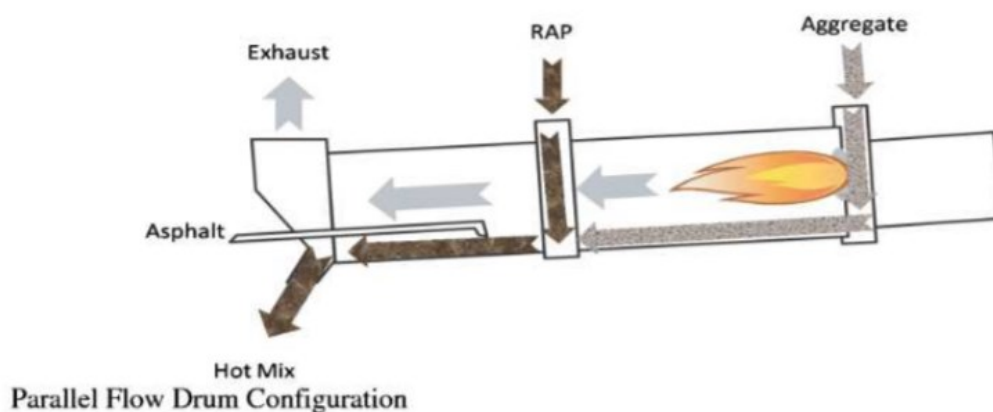
Jedná se o technologické postupy s centrálním středovým dávkováním R-materiálu (Center Entry Method) do bubnu kontinuální obalovny.

Metody se liší způsobem dávkování R-materiálu:

- Dávkování po proudu horkého vzduchu (Parallel flow drum),
- Dávkování proti proudu horkého vzduchu (Counter-flow drum),
- Separovaný ohřev R-materiálu a míchání v bubnu,
- Separovaný ohřev R-materiálu a míchání mimo sušící buben.

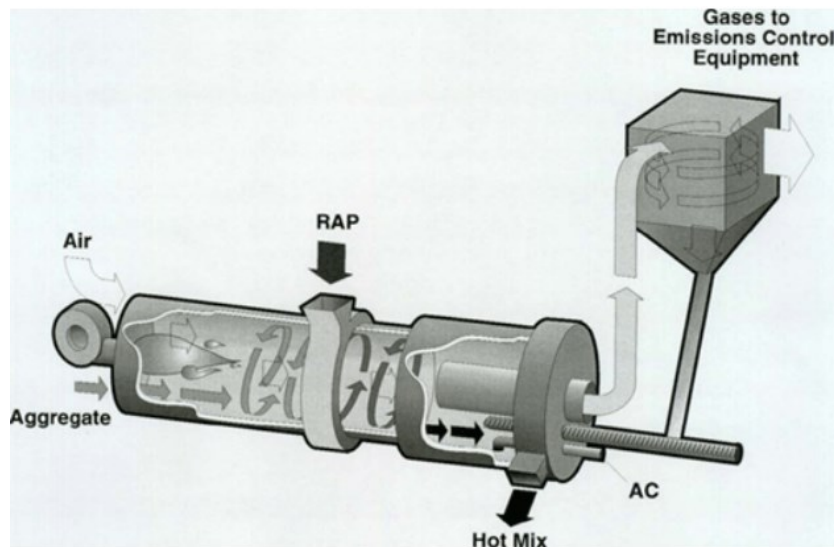
5.3.1 Dávkování R-materiálu po proudu horkého vzduchu

R-materiál se dostává do středu bubnu, kde se setkává s novým předehřátým kamenivem, které převede teplo do R-materiálu. Tímto způsobem je R-materiál chráněn před přímým plamenem hořáku. Dávkování přílišného množství R-materiálu a jeho styk s plamenem by mohly způsobit nežádoucí efekt modrého dýmu. Jedná se o nežádoucí jev, kdy dochází k přímému dotyku R-materiálu s plamenem hořáku [22]



Obrázek 6: Dávkování R-materiálu po proudu horkého vzduchu [22]

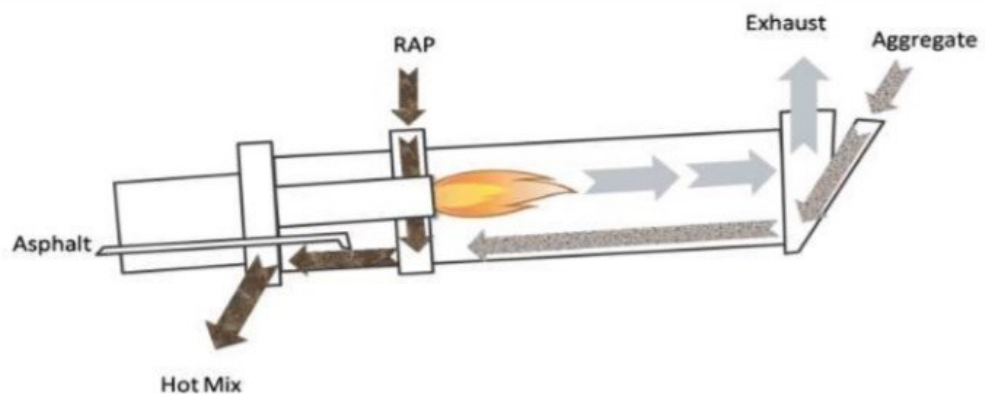
Je podstatné zmínit, že starší zařízení tohoto typu, které jsou převážně ze 70. a 80. let 20 století, měly problém dodržovat stále zpřísnující emisní limity. Řešením tohoto problému bylo připojení zařízení na odvod a kontrolu množství produkovaných emisí. [22]



Obrázek 7: Připojené zařízení na kontrolu emisí [22]

5.3.2 Dávkování R-materiálu proti proudu horkého vzduchu

Nepřímý ohřev a dávkování R-materiálu za hořákem pomáhá v ochraně R-materiálu a omezuje vliv nežádoucích efektů. Kamenivo se dávkuje proti proudu hořáku. [22]

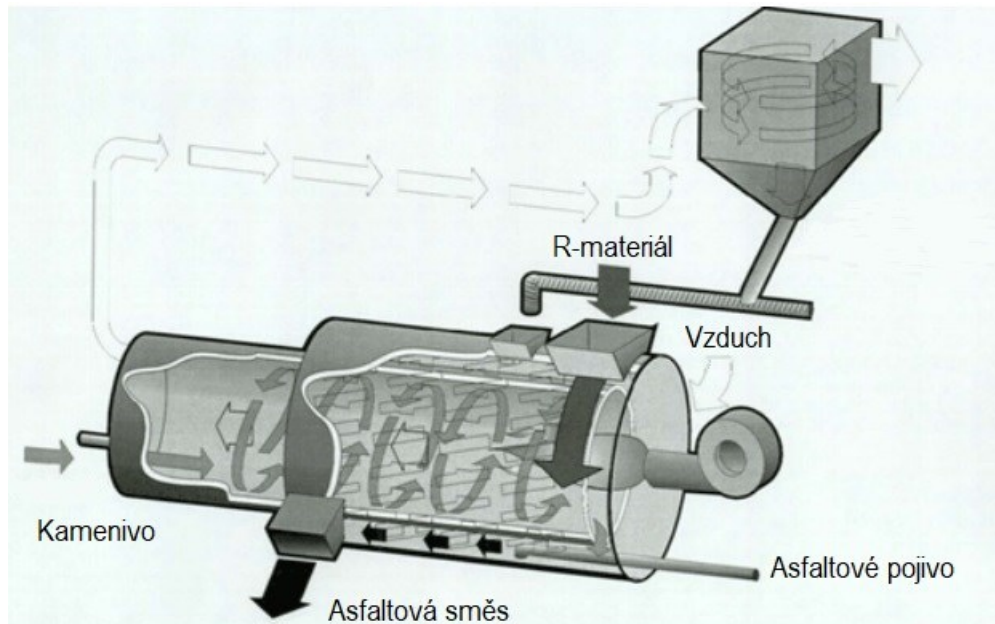


Counter Flow Drum Configuration

Obrázek 8: Dávkování R-materiálu proti proudu vzduchu [22]

5.3.3 Separovaný ohřev R-materiálu a míchání v bubnu

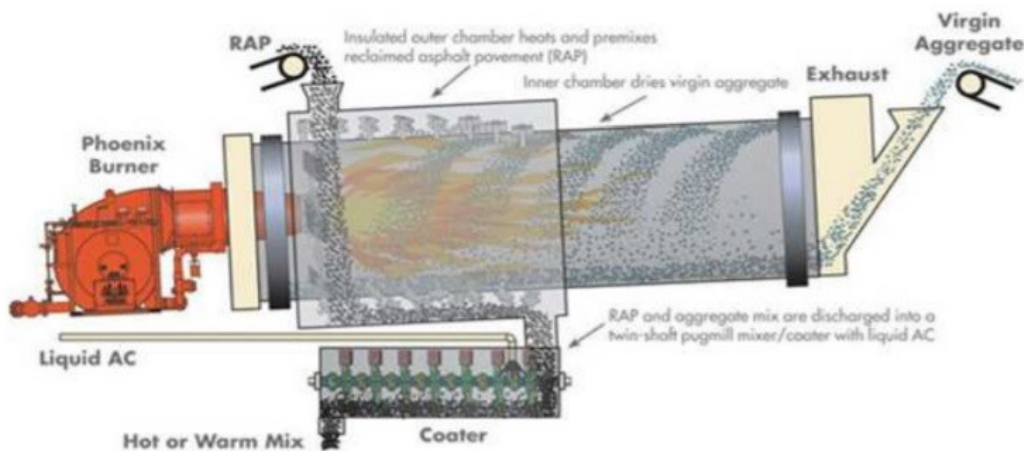
Při použití separovaného ohřevu dochází k zahřátí R-materiálu v separovaném plášti sušícího bubnu při nižší teplotě, než je použita na ohřev kameniva ve vnitřním bubnu. K míchání dochází uvnitř bubnu [22]



Obrázek 9: Separovaný ohřev R-materiálu a míchání v bubnu [22]

5.3.4 Separovaný ohřev R-materiálu a míchání mimo sušící buben

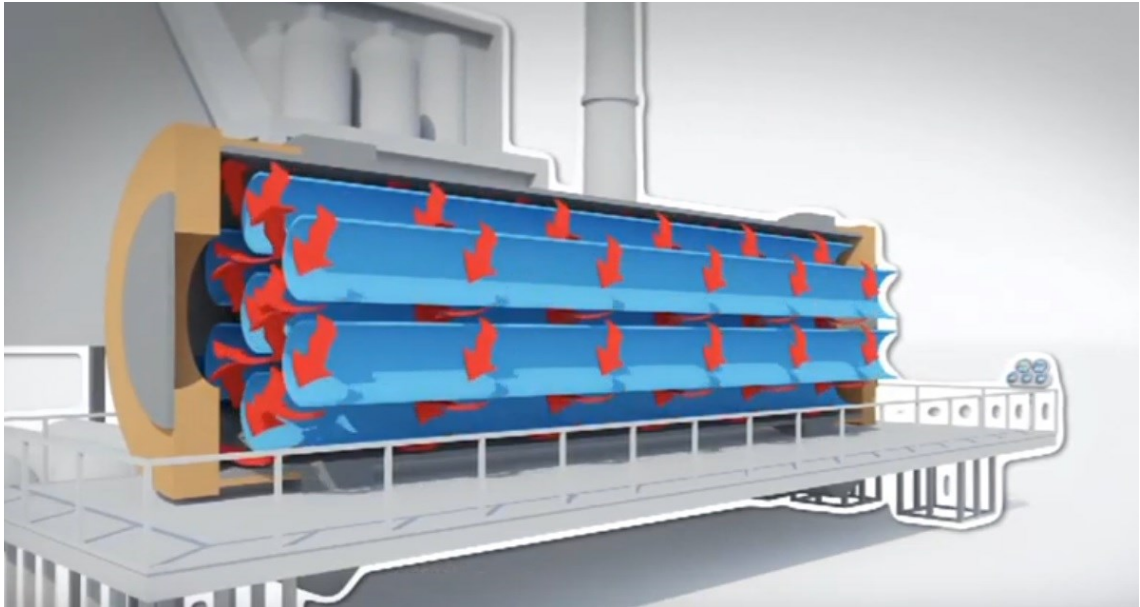
Při použití této metody má hlavní dvouplášťový buben pouze sušící funkci. K míchání a přidání asfaltového pojiva dochází v odděleném prostoru, v samostatné míchačce [22].



Obrázek 10: Separovaný ohřev R-materiálu a míchání mimo sušící buben [23]

5.4 Systém HERA

Jedná se systém, který umožňuje dávkovat do směsí až 100 % R-materiálu. Systém využívá nepřímý ohřev, horké plyny zahřívají vnější část tub, uvnitř kterých se R-materiál suší a zahřívá [24].



Obrázek 11: Nepřímý ohřev R-materiálu (systém HERA) [24]

5.5 Systém HyRAP

Systém používá přímý ohřev, kdy je použit buben s paralelním průtokem se čtyřmi místy pro dávkování jednotlivých frakcí R-materiálu [25].



Obrázek 12: Kontinuální obalovna s technologií HyRAP [25]

6. Rekapitulace teoretické části

Snahou teoretické části této práce bylo shrnout nové poznatky a technologie, zabývající se dávkováním R-materiálu do asfaltových směsí. Z provedené rešerše vyplývají následující poznatky

- Přidání až 30 % R-materiálu nemělo negativní vliv na funkční vlastnosti směsí, naopak bylo dosaženo lepších výsledků u těchto směsí.
- Prodloužení míchacích procesů, až na 180 sekund, ukázalo také zlepšení vlastností vůči směsím bez R-materiálu.
- Nejhorší výsledky se prokázaly na kombinaci nízké teploty přidání R-materiálu (dávkování za studena) a krátké míchací doby.
- Dávkováním R-materiálu jemné frakce (0–5 mm) a hrubé frakce v různém hmotnostním poměru vede k úspoře financí, díky většímu množství asfaltového pojiva v R-materiálu.
- Dávkování jemné frakce R-materiálu se doporučuje maximálně 15 % z hmotnosti směsi.

Jako velice pozitivní hodnotím teoretickou existenci řady technologických postupů umožňující vyrábět směsi až ze 100 % R-materiálu z hmotnosti směsi. Jedná se nejčastěji o modifikace kontinuální obalovny, R-materiál je často dávkován v různých frakcích. Velice podstatné pro životnost takové směsi je zvolit vhodný změkčovač (rejuveátor) a jeho optimální dávkování.

Myslím si, že prosazovat směsi ze 100 % R-materiálu, je cesta ku předu. Ovšem je nutno podotknout, že tyto směsi vyžadují vysokou pozornost a veliké nároky na dodržení technologických postupů, kdy všechny odchylky by mohly vést k výrazné omezení životnosti směsi v konstrukci vozovky.

Praktická část

7. Použité materiály

V rámci praktické části práce byly použity materiály uvedené v následujících podkapitolách

7.1 Kamenivo

7.1.1 Lom Luleč

Použité kamenivo pro výrobu asfaltové směsi VMT 16 bylo odebráno na obalovně v Rajhradcích. Kamenivo pochází z kamenolomu Luleč, nacházející se v blízkosti města Vyškov v Jihomoravském kraji. Ložisko těžených hornin je tvořeno droby a slepenci. Suroviny jsou těženy v jámovém lomu pomocí clonových odstřelů, z rozvalu je surovina dopravními prostředky dopravována do stacionární úpravárenské linky. Na lince surovina prochází řadou drtičů, prvně primárním čelistovým, následně sekundárním kuželovým drtičem a finálně kuželovými drtiči. Surovina se průběhu úpravy třídí, finální výrobky se skladují jak v ocelových, tak i na zemních skládkách. [26]



Obrázek 13: Kamenolom Luleč [26]

7.2 R-materiál

Použitý R-materiál pro výrobu směsi VMT16, byl odebrán ze zastřešené skládky z obalovny v Rajhradcích. Ačkoliv je směs VMT16 (maximální zrno kameniva 16 mm), byl použit R-materiál frakce 0/22. Tuto frakci jsem mohl použít díky znalosti síťového rozboru použitého R-materiálu. Propad na sítu 16 mm, byl 97,3 % (nadsítné jen 2,7 %), frakce je tedy téměř totožná s frakcí 0/16.

7.3 Asfalt

7.4 Asfalt z R-materiálu

Na mnou zvoleném R-materiálu bylo již v minulosti stanoveno množství pojiva pomocí zkoušky, kdy je extrahováno asfaltové pojivo., Zkouška byla provedena v souladu s normou *ČSN EN 12697-1 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro směsi za horka – Část 1: Obsah rozpustného pojiva* [27].

Výsledný obsah pojiva v R-materiálu byl stanoven 5,15 % z celkové hmotnosti vzorku materiálu. Tento výsledek byl převzat z materiálů poskytnutých vedoucím práce.

7.5 Modifikovaný asfalt PmB (Polymerem modifikovaný asfalt)

Přidáním vhodného aditiva (příspěvy) do běžného silničního asfaltu, docílíme zlepšení viskoelastických vlastností původního asfaltového pojiva. Nejdůležitějšími přínosy modifikace je zlepšení chování pojiva za vysokých teplot, tj. zvýšení bodu měknutí, a zlepšení chování pojiva za nízkých teplot, tj. snížení teploty bodu lámavosti. [28]

Nejrozšířenějšími modifikátory jsou polymery. Modifikací polymerem vznikne tzv. asfalto-polymerní kompozit. V anglicky psané literatuře jsou polymerem modifikované asfalty označovány PmB (Polymer modified Bitumen). V označení modifikovaných asfaltů je definována hodnota penetrace a teplota bodu měknutí. [29]

V mnou navržené směsi je použit asfalt PmB 25/55-65 (tj. polymerem modifikovaný asfalt, hodnota penetrace mezi 25 a 55, teplota bodu měknutí 65 °C).

8. Příprava asfaltové směsi

8.1 Sítové rozbory

Do směsi byly použité frakce kameniva: 0/4, 4/8, 8/11, 8/16 a vápencová moučka (filler). R-materiál tvořen frakcí 0/22 je ve směsi zastoupen podílem 30 %. U všech použitých frakcích pro návrh směsi VMT 16, byly v minulosti ve výzkumném centru AdMaS provedeny sítové rozbory, jejichž výsledky jsem použil

Tabulka 2 Sítové rozbory kameniva a R-materiálu

frakce	32	22	16	11	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
R-mat 0/22	100,0	100,0	97,3	84,1	71,8	52,2	41,0	31,1	22,5	15,1	9,3	7,2
8-16	100,0	100,0	97,2	17,3	1,3	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5	0,4	0,4
8-11	100,0	100,0	100,0	80,0	11,0	2,4	1,8	1,6	1,4	1,3	1,1	0,7
4-8	100,0	100,0	100,0	100,0	91,8	5,3	1,2	1,0	1,0	1,0	0,9	0,8
0-4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	96,6	77,0	54,5	38,6	23,1	9,9	3,4
moučka	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,9	99,6	95,8	76,4

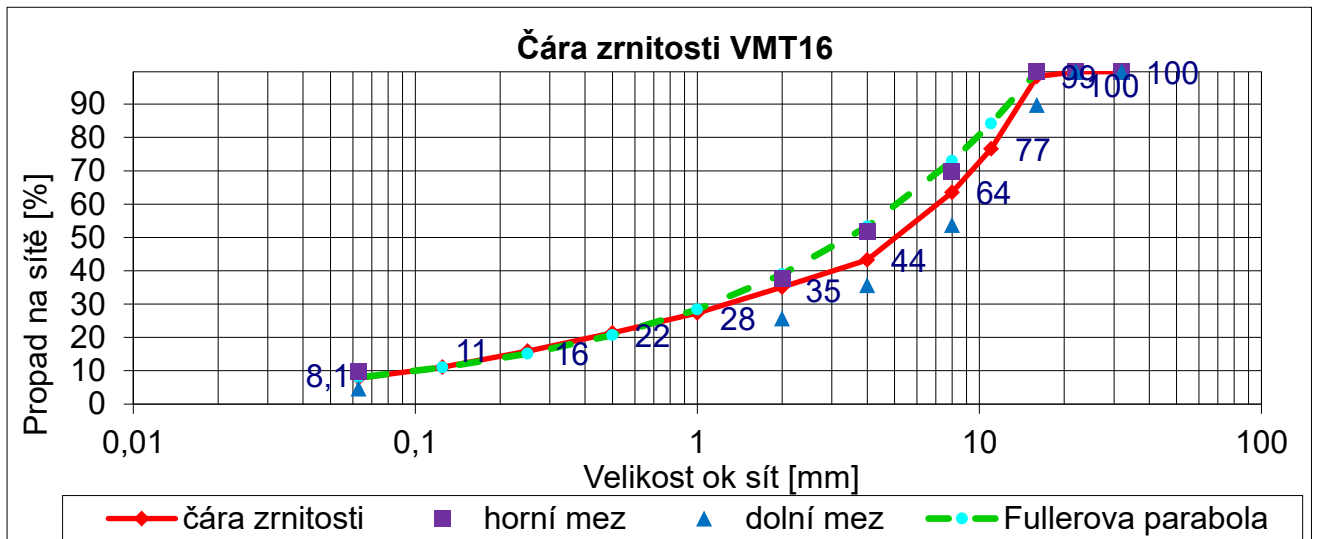
8.2 Návrh čáry zrnitosti

Návrh čáry zrnitosti byl proveden s ohledem na Fullerovu parabolu. Fullerova parabola je optimální čarou zrnitosti, která představuje plynulou křivku, díky níž jsou zrna ve směsi v optimálním poměru vedoucí na nejtěsnější uspořádání zrn ve směsi. Jedná se o empiricky stanovenou křivku stavebním inženýrem W. B. Fullerem, která se v praxi osvědčila a běžně se používá při návrhu asfaltových betonů. Rovnice fullerovy paraboly se uvádí ve tvaru: $y = 100 * \left(\frac{d}{D}\right)^w$ [30]

ve tvaru: $y = 100 * \left(\frac{d}{D}\right)^w$ [30]

- Kde,
- d průměr oka síta v milimetrech,
 - D maximální velikost oka v soustavě sít, v milimetrech,
 - w empiricky stanovený součinitel v rozmezí 0,45-0,50,
 - y procentuální propad sítem o průměru d.

Hodnotu empirického součinitele w byla vzhledem k návrhu směsi o zrnitosti 16 (VMT 16) po domluvě s vedoucím práce zvolena 0,45.



9. První etapa míchaní směsi

Nejdříve bylo nutno navázat a namíchat asfaltovou směs malého množství, s různým obsahem pojiva, pro výrobu sad zkušebních Marshallových těles. Toto míchání bylo prováděno ručně. Kamenivo bylo zahřáto na teplotu 192 °C, přidal jsem R-materiál o teplotě 135 °C, dodal jsem potřebné množství asfaltu o teplotě 175 °C, nakonec se přidal filler o stejné teplotě jako kamenivo. Směs se míchala 180 sekund za stále teploty 175°C.



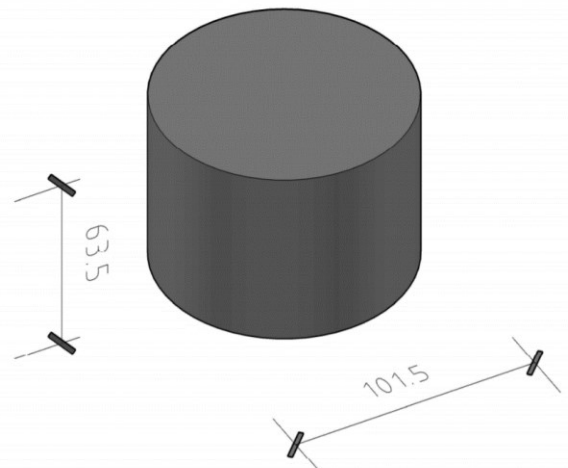
Obrázek 14: Navážka pro ruční míchání

9.1 Hutnění Marshallových těles

Marshallovo těleso je těleso tvaru válce o průměru $101,5 \pm 0,1$ mm a výšce $63,5 \pm 2,5$ mm. Hutnění bylo provedeno pomocí Marshallova rázového zhutňovače umístěného v centru AdMaS, podle normy ČSN EN 12967-30 [31]. Každé Marshallovo těleso bylo hutněno 75 rázy z každé strany. Teplota směsi se pohybovala v rozmezí 165 °C až 170 °C. Po dohutnění prvního vzorku byla změřena výška vzorku, dle zjištěné odchylky od požadované výšky byla optimalizovaná navážka dalších připravovaných těles.



Obrázek 16: Rázový zhutňovač



Obrázek 15: Marshallovo těleso

Pro zjištění objemové hmotnosti, maximální objemové hmotnosti a mezerovitosti směsi byly vyrobeny tři sady Marshallových těles po třech kusech (celkem tedy 9 kusů).

10. Zkoušky základních vlastností asfaltové směsi

Na navržené směsi bylo provedeno několik základních zkoušek, za účelem zjištění optimálního množství pojiva a stanovení požadovaných vlastností výsledné směsi. Jednalo se o tyto zkoušky:

- Objemová hmotnost směsi,
- Maximální objemová hmotnost směsi,
- Mezerovitost směsi,
- Míra zhutnění směsi.

10.1 Objemová hmotnost směsi

Asfaltová směs je směsí kameniva a asfaltového pojiva, případně dalších přísad. Kamenivo obalené asfaltovým pojivem tvoří kostru směsi zaklíněním a dotekem jednotlivých zrn o sebe, asfaltové pojivo tato zrna pouze stmeluje (tj. spojuje dohromady). Do objemové hmotnosti se započítá také objem vzduchových mezer vzniklých mezi zrny kameniva.

Pro zjištění objemové směsi byl použit *Postup B: Objemová hmotnost – nasycený suchý povrch (SSD)* uvedený v normě ČSN EN 12697-6 *Asfaltové směsi za horka – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa* [32]. Zkouška se provádí na třech sadách, obsahující 3 kusy Marshallových těles, s různým obsahem asfaltového pojiva. Pro navrženou směs jsem použil sady s 4,7 %, 5,2 % a 5,7 % asfaltu.

Princip zkoušky spočívá ve stanovení 3 různých hmotností zkušebních těles. Začneme zvážením suchého vzorku (hmotnost m_1), poté vzorek ponoříme do vodní lázně s konstantní teplotou a necháme nasáknout po dobu 30 minut. Po stanoveném čase těleso zvážíme pod vodou, získáme hmotnost m_2 . Nakonec těleso vytáhneme z vodní lázně a povrchově osušíme, osušené těleso zvážíme pro určení poslední hmotnosti m_3 .



Obrázek 17: Hydrostatické vážení

Výslednou objemovou hmotnost ρ_{bssd} získáme dosazením do vzorce

$$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} * \rho_w$$

Kde,

- m_1 hmotnost suchého vzorku [g],
- m_2 hmotnost vzorku pod vodou [g],
- m_3 hmotnost osušeného vzorku [g],
- ρ_w objemová hmotnost vody závislá na teplotě [kg/m³]

10.2 Maximální objemová hmotnost směsi

Maximální objemová hmotnost reprezentuje hmotnost směsi bez vzduchových mezer vzniklých mezi zaklíněnými zrny směsi. Pro stanovení maximální objemové hmotnosti byl použit *Postup A: Volumetrický postup*, uvedený v normě *ČSN EN 12967-5 Asfaltové směsi za horka – Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti směsi [33]*. Maximální objemová hmotnost byla zjišťovaná na 3 směsích v pyknomech pro směs s obsahem 4,7 %, 5,2 % a 5,7 % asfaltu.



Obrázek 18: Pyknometr naplněný asfaltovou směsí

Princip zkoušky spočívá v určení 3 různých hmotností pro daný pyknometr a vzorek směsi. Nejdříve zvážením prázdného pyknometru získáme první hmotnost m_1 . Pyknometr naplníme vzorkem směsi a zvážíme pro získání druhé hmotnosti m_2 . Nakonec pyknometr naplníme vhodnou kapalinou, v případě mé BP jsem použil tetrachlorethylen. Vložíme vzorky do vodní lázně a necháme temperovat 60 minut na požadovanou teplotu. Po uplynutí času pyknometr vyjeme z lázně povrchově osušíme a zvážíme pro získání poslední hmotnosti m_3 .



Obrázek 19: Temperační lázeň

Maximální objemovou hmotnost získáme dosazením do vzorce:

$$\rho_{mv} = \frac{m_2 - m_1}{1000 * (V_p - \frac{m_3 - m_2}{\rho_w})}$$

Kde: m_1 hmotnost pyknometru a nástavce [g],
 m_2 hmotnost pyknometru, nástavce a vzorku [g],
 m_3 hmotnost pyknometru, nástavce, vzorku, a rozpouštědla [g]

- V_p objem pyknometru při naplnění po referenční značce
nástavce [m^3]
- ρ_w hustota rozpouštědla při zkušební teplotě v kg/m^3
s přesností $0,1 kg/m^3$.

10.3 Mezerovitost směsi

Mezerovitost směsi udává procentuální obsah vzduchových mezer ve zhutněné směsi. Vypočítá se pomocí stanovených hodnot objemové hmotnosti a maximální objemové hmotnosti z předchozích zkoušek Mezerovitost směsi jsem vypočetl pomocí vztahu z normy *ČSN EN 12697-8 Asfaltové směsi za horka – Část 8: Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí* [34].

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} * 100\%$$

- Kde,
- ρ_m maximální objemová hmotnost směsi [kg/m^3],
- ρ_b objemová hmotnost zhutněného tělesa [kg/m^3],
- V_m mezerovitost směsi [%].

10.4 Míra zhutnění

Míra zhutnění asfaltové směsi udává poměr mezi objemovou hmotností daného vzorku, pro kterou je zjišťována a referenčního vzorku stejné směsi z Marshallových těles. Jako referenční objemová hmotnost byla použita průměrná objemová hmotnost sady Marshallových těles s celkovým obsahem asfaltu 5,2 %, zhutněných Marshallovým rázovým zhutňovačem při 2 x 75 údery dle normy *ČSN EN 12697-30 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem* [31]. Norma *ČSN 73 6121 Stavba vozovek-Hutněné asfaltové vrstvy- Provádění a kontrola shody* [35] vyžaduje míru zhutnění provedené směsi ložné vrstvy vozovky na stavbě min. 96 %.

Pro výpočet míry zhutnění použijeme tento vzorec:

$$M_z = \frac{\rho_d}{\rho_r} * 100$$

Kde, ρ_d objemová hmotnost vzorku v kg/m^3 ,

ρ_r objemová hmotnost referenčního vzorku v kg/m^3 ,

M_z míra zhutnění vzorku v procentech.

11. Druhá etapa míchaní

V druhé etapě, po vyhodnocení zkoušek na Marshallových tělesech, díky kterým bylo stanoveno optimální množství pojiva na 5,2 %. Při tomto procentu asfaltu byla dosažena optimální mezerovitost směsi viz kapitola 13.3. Naváženo a namícháno bylo větší množství směsi (cca 60 kg) pro výrobu zkušebních desek o rozměrech 260 mm x 320 mm a výšce 50 mm.



Obrázek 21: Laboratorní míchačka BITUMIX



Obrázek 20: Detail hřídele míchačky

Pro výrobu větší množství směsi, byla poprvé použita nová laboratorní míchačka BITUMIX v silniční laboratoři ÚPKO.

11.1 Hutnění deskových těles

Pro hutnění deskových těles byl použit tzv. segmentový zhutňovač, který je umístěn v centru AdMaS. Toto hutnící zařízení disponuje ocelovou válcovou plochou, která dokáže dokonale simulovat pojezd hutnícího válce. Pro funkční zkoušky asfaltové směsi bylo hutněno celkem 6 desek o rozměrech 260 mm x 320 mm. Tloušťka jedné desky pro stanovení nízkoteplotních vlastností směsi byla 55 mm, zbylé desky měly tloušťku 50 mm. Hutnění probíhalo v rozmezí teplot 165 °C až 170 °C Na jednotlivých deskách byla stanovena míra zhutnění



Obrázek 22: Zhutňovač s válcovou plochou



Obrázek 23: Zhutněná deska

11.2 Zkušební tělesa

Pro potřeby zkoušky tuhosti a odolnosti vůči únavě byly vyřezány a zabroušeny z původních deskových těles popsanych v kapitole 11.1. Požadovaný rozměr tělesa je tvar komolého čtyřbokého klínu – **trapezoidu**. Stejný postup výroby byl použit také na tělesa hranolu o rozměrech 200 mm x 50 mm x 50 mm. Tyto tělesa byly použity na zkoušku nízkoteplotních vlastností směsi.



Obrázek 24: Těleso trapezoid



Obrázek 25: Těleso hranol

12. Funkční zkoušky asfaltové směsi

Funkční zkoušky se snaží simulovat reálné vlivy, kterým je směs po dobu své životnosti vystavena po zabudování v komunikaci. Tyto zkoušky jsou výrazně urychlené oproti reálné situaci na komunikaci, a dosahují se při nich takové mezní stavy, jaké na vozovce běžně nenastávají. Jedná se o nejdůležitější vlastnosti určující životnost asfaltových vrstev a tím pádem i komunikace.

12.1 Stanovení odolnosti asfaltové směsi vůči nízkým teplotám

Zkouška je definovaná v normě ČSN EN 12697-46 *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 46: Nízkoteplotní vlastnosti a tvorba trhlin pomocí jednoosé zkoušky tahem* [36]. Zkouška probíhá v nízkoteplotní komoře Cyklon -40. Zkušební těleso ze zhutněné asfaltové je oboustranně upevněno ve zkušební komoře. Během zkoušky, dochází k rovnoměrnému ochlazování tělesa, za současného zabránění jejich zkrácení ($\epsilon_t = 0$). Teplota uvnitř komory klesá rovnoměrně rychlostí 10 °C / hod.

Výsledkem této zkoušky získáme hodnoty:

- Kryogenní napětí při porušení,
- Kritickou sílu při porušení,
- Kritickou teplotu v komoře při porušení vzorku,
- Kritickou teplotu vzorku při porušení,

Zkušební tělesa dle předepsaných rozměrů 200 mm x 50 mm x 50 mm, byly přilepeny lepidlem tvořeným směsí pryskyřice, filleru a tvrdidla, do ocelových forem.



Obrázek 26: Vzorek připevněný v ocelové formě

Takto připravený vzorek byl uchycen do zařízení Cyklon -40, ve kterém probíhá zkouška. Zkouška skončila porušením vzorku, přičemž se sleduje kritická teplota a napětí při porušení vzorku.



Obrázek 27: Vzorek připevněný v zařízení
Cyklon -40



Obrázek28: Porušený vzorek

12.2 Stanovení modulů tuhosti asfaltové směsi

Stanovení modulů tuhosti směsi bylo provedeno dle normy ČSN EN 12697-26 *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 26: Tuhost* [37]. Nutno konstatovat, že kvůli vyhlášení nouzového stavu v ČR a na FAST VUT byla tato zkouška provedena ve zjednodušené variantě na 8 zkušebních tělesech pouze pro teplotu 15 °C a dále na 4 zkušebních tělesech při teplotách 10 °C a 20 °C.

Zkušební tělesa komolého klínu – trapezoidu jsou svojí širší plochou přilepeny vysokopevnostním lepidlem do ocelové formy. Horní volný konec namáhán ustáleným harmonickým sinusovým kmitáním – vždy silou, po dobu ,2 minut, při průhybu odpovídající poměrnému přetvoření

maximálně 50 mikrostrainů. Jedná se tedy o zkoušku dvoubodového ohybu vetknutého komolého klínu.



Obrázek 29: Upevněné vzorky v zařízení COOPER

Komplexní moduly tuhosti byly stanovena při teplotách 10 °C, 15 °C a 20 °C. na frekvencích 1 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 25 Hz, 27 Hz a 30 Hz. Výsledné hodnoty modulu tuhosti lze získat ze vzorců:

$$E_1 = \gamma * \left(\frac{F}{z} * \cos(\varphi) + \frac{\mu}{10^3} * \omega^2 \right); E_2 = \gamma * \left(\frac{F}{z} * \sin(\varphi) \right), kde$$

E_1 reálná složka modulu tuhosti [Pa],

E_2 imaginární složka modulu tuhosti [Pa],

γ faktor tvaru [-],

μ faktor hmotnosti [-],

F vyvozená síla [N],

z posun [mm],

φ fázový úhel [°],

ω úhlové frekvence [s^{-1}].

12.3 Odolnost vůči únavě asfaltové směsi

Odolnost vůči únavě asfaltové směsi byla stanovena dle normy *ČSN EN 12697-24 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 24: Odolnost vůči únavě* [38]. Pro zkoušky stanovení tuhosti a odolnosti vůči únavě bylo použito zkušební zařízení COOPER, které se nachází v silniční laboratoři centra AdMaS. Kvůli vyhlášení nouzového stavu a omezení přístupu do centra AdMaS, byla tato zkouška provedena ve omezeném rozsahu na 15 zkušebních tělesech, oproti zmíněné normě, kde je požadován min. počet 18 těles.

Zkouška se provádí se na stejných vzorcích ve stejném zařízení, jako stanovení tuhosti. Tělesa jsou při dané konstantní teplotě 25 °C vystavena kmitání o konstantní frekvenci 10 Hz. Na začátku zkoušky je nastavena počáteční výchylka, která je taková, aby docházelo k postupnému „unavování“ zkušebního tělesa. Vzorek je namáhán silou až do porušení. Měření je zaznamenáno po celou dobu zkoušky, jako výsledný počet cyklů je pak určen okamžik, kdy poklesnul původní modul tuhosti směsi na polovinu své počáteční hodnoty.

Vyhodnocením zkoušky je nalezení závislosti mezi počty cyklů při poklesu tuhosti na polovinu počáteční hodnoty a počátečními výchylkami nastavenými na zařízení. Výsledky se vynášejí do Wöhlerova únavového diagramu, výsledné hodnoty jsou vyneseny v logaritmickém měřítku provedeme lineární regresi, na výsledné přímce hledáme bod pro 1 milion cyklů a jemu odpovídající počáteční výchylku. Tato výchylka je určujícím parametrem odolnosti vůči únavě a nazývá se parametr epsilon 6. Dle uvedené normy je požadováno naměřit minimálně třetinu výsledků při porušení pod 1 milionem cyklů, další třetina výsledků musí být při porušení nad 1 milionem cyklů.

13. Výsledky zkoušek vlastností asfaltové směsi

Následující podkapitoly obsahují vyhodnocené výsledky navržené směsi. Z důvodů přehlednosti jsou ze zkoušek s velkým množstvím naměřených dat vyobrazeny reprezentativní či průměrné hodnoty výsledků. Kompletní naměřená data jsou uvedena v přílohách této práce.

13.1 Objemová hmotnost

13.1.1 Objemové hmotnosti Marshallových těles

Objemové hmotnosti byly měřeny na třech tělesech se stejným obsahem asfaltového pojiva. Průměrná objemová hmotnost se vypočetla pouze ze dvou podobných hodnot objemové hmotnosti, odchylná objemová hmotnost nebyla do průměrné započítána, viz příloha č. 1.

Tabulka 3: Objemová hmotnost Marshallových těles

Celkový obsah asfaltu [%]	Průměrná objemová hmotnost [kg/m ³]
4,7	2374
5,2	2398
5,7	2405

13.2 Maximální objemová hmotnost

Vypočtena maximální objemová hmotnost směsi byla stanovena volumetrickou metodou pomocí pyknometrů. Důležité hodnoty ze zkoušky jsou uvedeny v tabulce 4. Naměřená data sloužící pro výpočet maximální objemové hmotnosti jsou v příloze č.1 této práce.

Tabulka 4: Maximální objemová hmotnost směsi

Označení	Maximální objemová hmotnost [kg/m ³]
Pyknometr se směsí s 4,7 % asfaltu	2491
Pyknometr se směsí s 5,2 % asfaltu	2474
Pyknometr se směsí s 5,7 % asfaltu	2462

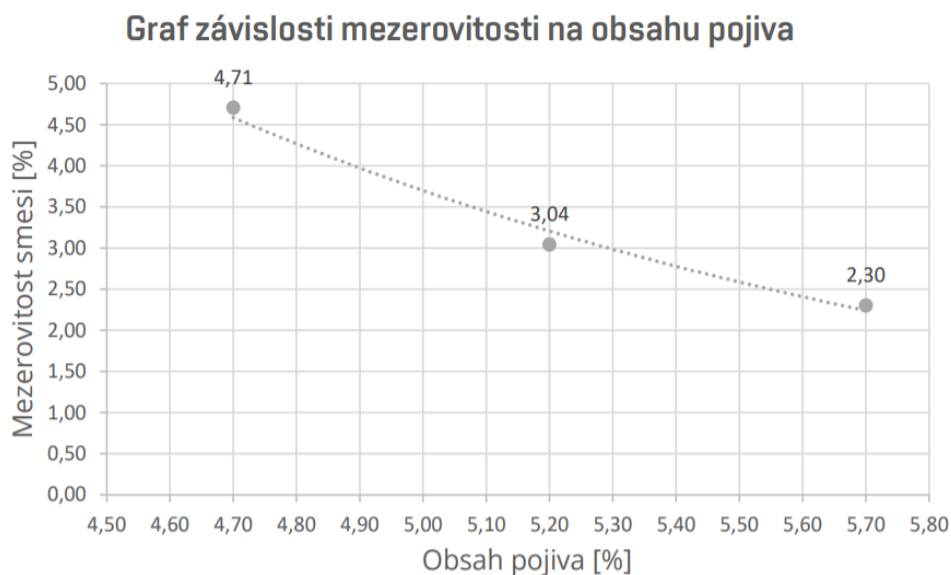
13.3 Mezerovitost směsi

Mezerovitost asfaltové směsi pro tři různé obsahy asfaltového pojiva je uvedena níže v tabulce 5. Data pro výpočet mezerovitosti jsou uvedeny v příloze č.1 této práce.

Tabulka 5: Mezerovitost směsi

Celkový obsah asfaltu [%]	Mezerovitost směsi [%]
4,7	4,71
5,2	3,04
5,7	2,30

Pro přehlednost lze zobrazit závislost mezi obsahem asfaltu a mezerovitostí směsi. Závislost je zobrazena v grafu



Graf 2: Závislost mezerovitosti na obsahu pojiva

Z výše uvedeného grafu lze zjistit že závislost mezi mezerovitostí a obsahem pojiva je spíše exponenciální než lineární, jak by se dalo očekávat.

13.3.1 Objemové hmotnosti deskových těles

Objemové hmotnosti deskových těles s navrženým množstvím pojiva 5,2 % jsou uvedeny v tabulce 6. Jedná se o objemové hmotnosti zhutněných deskových těles, které byly dále použity na výrobu zkušebních těles.

Tabulka 6: Objemová hmotnost deskových těles

Označení desky	Objemová hmotnost [km/m ³]
I	2396
II	2394
III	2415
IV	2399
V	2389
VI	2405

13.4 Míra zhutnění

Míra zhutnění slouží pro kontrolu shody objemových hmotností zkušebních těles s referenční objemovou hmotností Marshallových těles. Referenční objemová hmotnost Marshallového tělesa je 2398 kg/m^3 (dle tabulky č. 3).

Tabulka 7: Míra zhutnění zkušebních desek

Označení desky	Míra zhutnění [%]
I	99,8
II	99,9
III	100,7
IV	100,0
V	99,6
VI	100,3

14. Výsledky funkčních zkoušek navržené asfaltové směsi

V následnicích kapitolách jsou vyhodnoceny výsledky funkčních zkoušek provedené na navržené asfaltové směsi VMT 16. Jedná se o důležité vlastnosti, které simulují vliv reálných podmínek, jež nastávají na vozovce a na kterých závisí životnost vozovky.

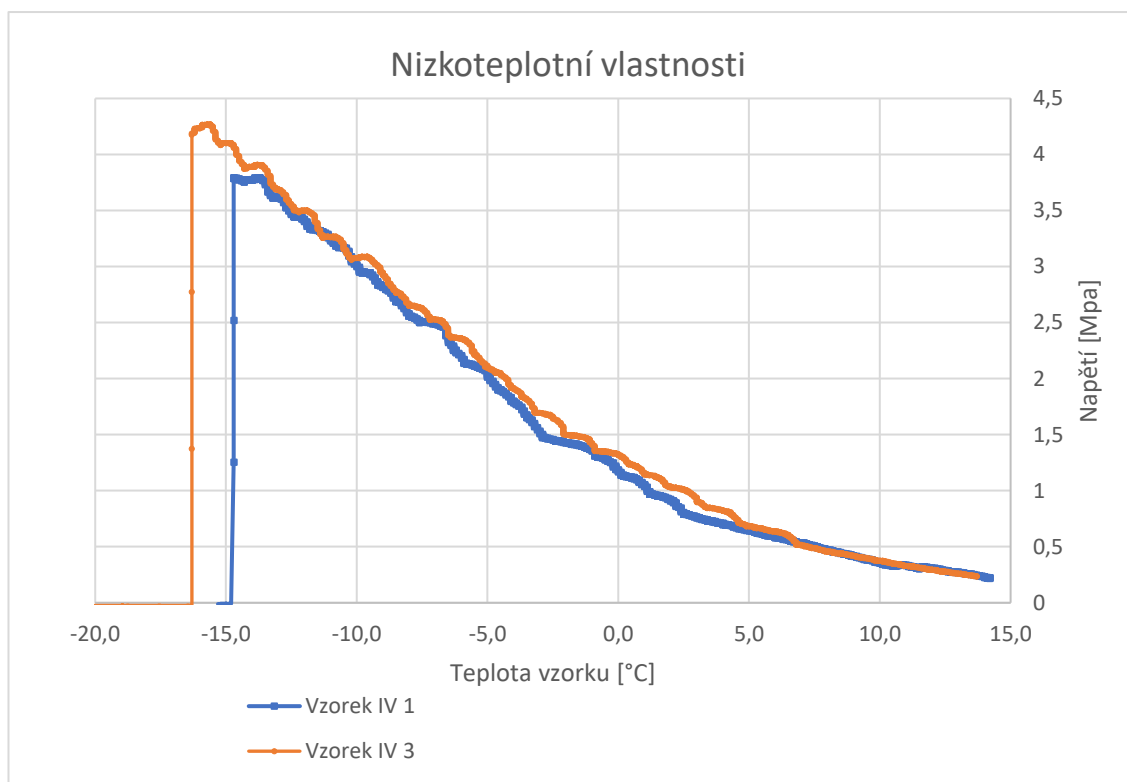
14.1 Nízkoteplotní vlastnosti směsi

Z důvodu nouzového režimu byla zkouška stanovení nízkoteplotních vlastností provedena zjednodušeně jen na 2 zkušebních tělesech (dle kapitoly 6.1). Tato zkušební tělesa byla vyříznuta ze zkušební desky označené IV. Pro testování byly použity vzorky s označením 1 a 3.

Průměrná výsledná kritická teplota porušení vzorku byla stanovena na -15,15 °C. Důležité výsledky zkoušky jsou podrobně vypsány v tabulce 8 a zobrazeny v grafu 3.

Tabulka 8: Nízkoteplotní vlastnosti směsi

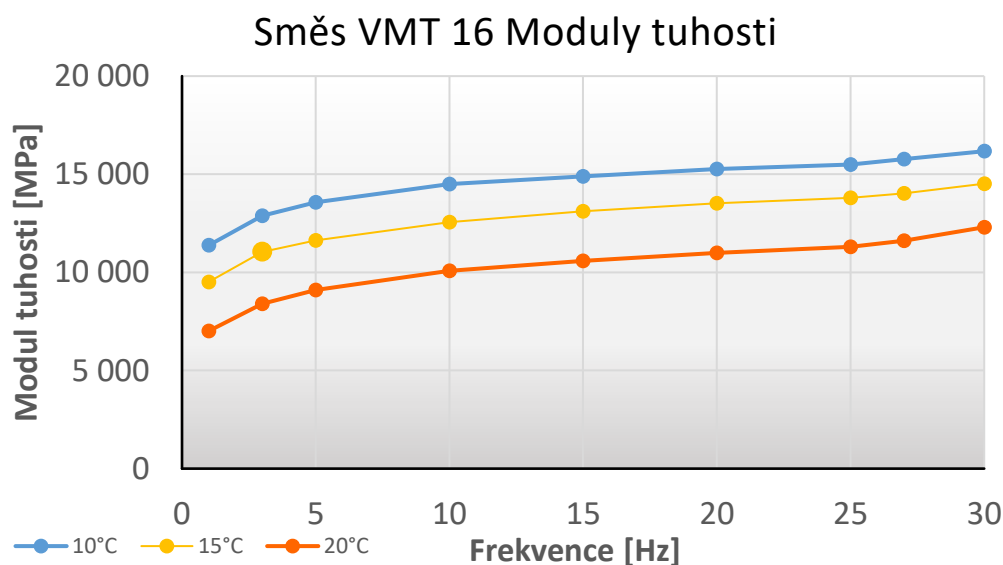
Nízkoteplotní vlastnosti	Označení vzorku		Ø
	1	3	
Teplota v komoře [°C]	-17,2	-17,7	-17,45
Teplota vzorku [°C]	-14,7	-15,6	-15,15
Kritická síla [kN]	9,47	10,67	10,07
Kritické napětí [MPa]	3,79	4,27	4,03



Graf 3: Nízkoteplotní vlastnosti směsi

14.2 Moduly tuhosti asfaltové směsi

V grafu číslo 4 jsou zobrazeny průměrné moduly tuhosti zkoušených těles při teplotách 10 °C, 15 °C a 20 °C a vybraných frekvencích, v tabulce 6 jsou průměrné hodnoty modulů tuhosti všech zkušebních těles při teplotách 10 °C, 15 °C a 20 °C a vybraných frekvencích. V příloze číslo 3 této BP jsou zaznamenány veškeré naměřené hodnoty modulů tuhosti.



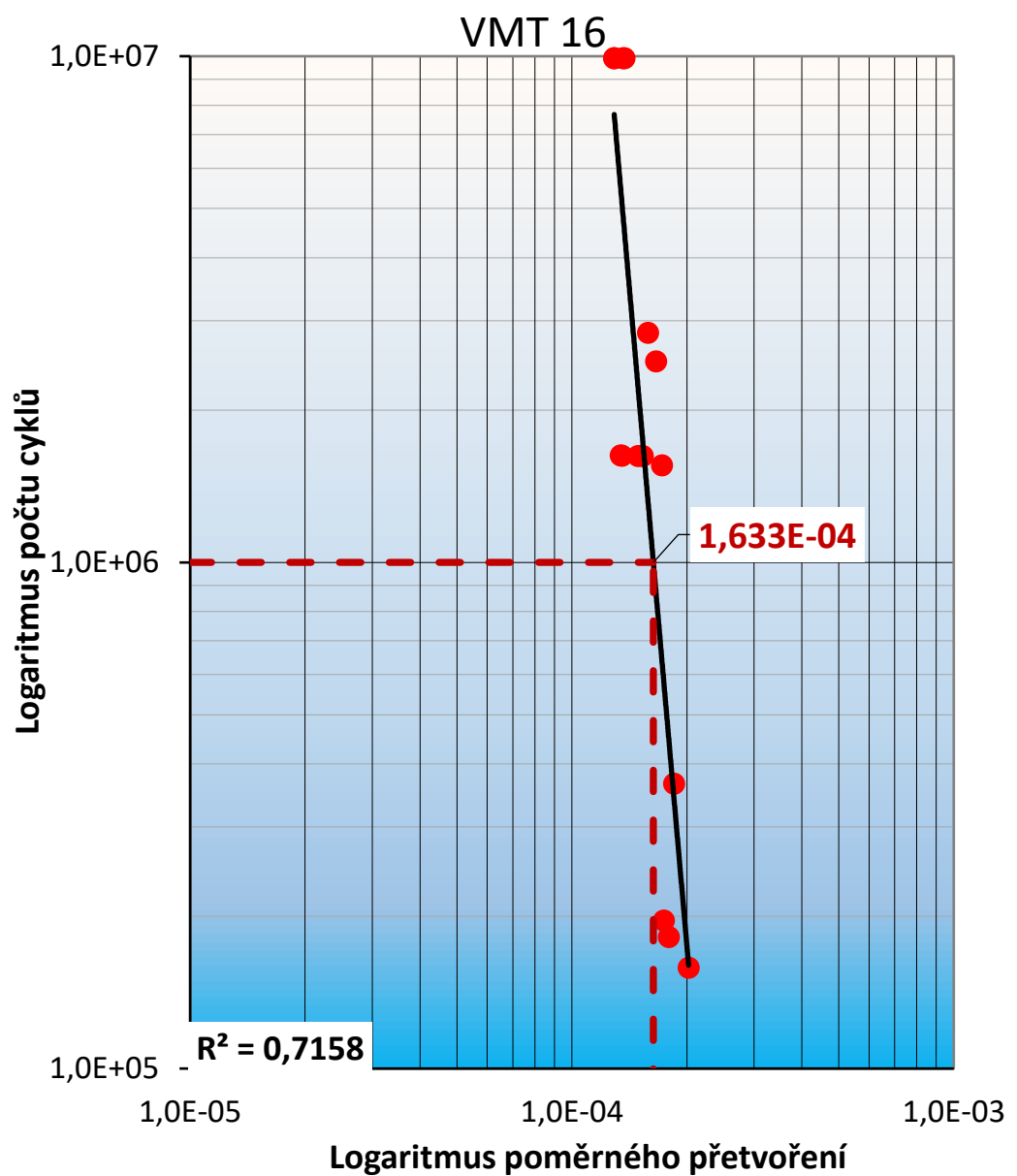
Graf 4: Moduly tuhosti směsi VMT 16

Tabulka 9: Průměrné moduly tuhosti směsi MVT 16

Moduly tuhosti [MPa]			
Frekvence [Hz] / Teplota [°C]	10	15	20
1	11 379	9 514	7 012
3	12 886	11 029	8 405
5	13 573	11 644	9 101
10	14 492	12 596	10 081
15	14 896	13 122	10 590
20	15 272	13 519	10 998
25	15 493	13 787	11 300
27	15 779	14 040	11 610
30	16 174	14 621	12 300

14.3 Odolnost vůči únavě

Měření odolnosti vůči únavě proběhlo zjednodušeně, z důvodu nouzového stavu na VUT, na 15 zkušebních tělesech. V grafu číslo 5 je vynesena závislost logaritmu počtu cyklů na logaritmu deformace všech zkušebních těles. Výsledné poměrné přetvoření směsi VMT 16 při milionu zatěžovacích cyklů bylo vyhodnoceno jako $\varepsilon_6 = 163,3 \cdot 10^{-6}$, koeficient B = 8,632, a koeficient korelace $R^2 = 0,7158$.



Graf 5: Wöhlerův diagram

15. Shrnutí práce a závěr

Cílem mé práce bylo navrhnout směs s vyšším obsahem R-materiálu, než umožňují současné technické podmínky TP 151 [1], které dovolují pro směs VMT 16 určenou do ložné vrstvy vozovky s modifikovaným asfaltem, přidávat pouze 15 % R-materiálu z hmotnosti směsi. V mé směsi bylo použito 30 % R-materiálu z hmotnosti směsi, a s radostí mohu konstatovat, že toto navýšení nemělo žádný negativní dopad na funkční vlastnosti směsi. Pro přehlednost zde uvádím shrnutí vybraných vlastností navržené směsi do tabulky 10.

Tabulka 10: Vlastnosti navržené směsi

Vlastnost asfaltové směsi	Hodnota vlastnosti asfaltové směsi VMT16		Požadavky TP151
Obsah R-materiálu	30 %		max. 15 %
Celkový obsah pojiva	5,20 %		-
Pojivo z R-materiálu	1,55 %		-
Obsah přidaného pojiva PMB 25/55-65	3,66 %		-
Mezerovitost směsi	3,04 %		3 % - 5 %
Modul tuhosti	12 596 MPa		min. 9 000 MPa
Odolnost vůči únavě	163*10 ⁻⁶		min. 125*10 ⁻⁶
Odolnost vůči nízkým teplotám	-15,5 °C	4,03 MPa	Není stanoveno

Navržená směs bez problému splňuje požadavky na funkční vlastnosti dané předpisem TP 151 [1], z toho tedy usuzuji že je v těchto předpisech jistý prostor na navýšení maximálního množství R-materiálu, který lze teoreticky přidat do navrhované směsi VMT 16.

Výsledky směsi jsem také porovnal s bakalářskou prací z roku 2018 [39]. Jedná se o směs VMT 16, s 30 % R-materiálu z hmotnosti směsi, s asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem (CRmB).

V následující tabulce 11 je porovnána mnou navržená směs VMT 16 s PmB, se směsí VMT 16 s CRmB, z bakalářské práce Ing. Dana Horáčka.

Tabulka 11: Porovnání navržené směsi

Vlastnost asfaltové směsi	VMT 16 s PmB		VMT 16 s CRmB	
Obsah R-materiálu	30 %		30 %	
Celkový obsah pojiva	5,20 %		6,50 %	
Mezerovitost směsi	3,04 %		4,90 %	
Modul tuhosti	12 566 MPa		9 067 MPa	
Odolnost vůči únavě	163*10 ⁻⁶		168*10 ⁻⁶	
Odolnost vůči nízkým teplotám	-15,5 °C	4,03 MPa	-13,6 °C	1,88 MPa

Mnou navržená směs prokazuje výrazně vyšší modul tuhosti oproti směsi s CRmB Soudím, že toto je důsledek nižší mezerovitosti mé směsi. Odolnost vůči únavě směsi vyšla podobná (nepatrně horší). U navržené směsi v rámci této BP došlo k průměrnému porušení mrazovou trhlinou při teplotě, o 2 °C nižší. Myslím si, že tohoto bylo docíleno nižší mezerovitostí směsi a použitím pojiva PmB.

Jsem přesvědčen, že lze vyrábět 100 % recyklované vozovky za použití změkčovadel a vhodných technologických postupů, zároveň si myslím, že mnou navržená směs prokazuje přesvědčivé výsledky ve funkčních zkouškách, dovoluji si tedy říct, že jsem našel jakýsi kompromis mezi maximální dávkou R-materiálu a absencí rejuvenátorů, pro směsi typu VMT. Chtěl bych, aby tato práce zvýšila povědomí o R-materiálu a pomohla k navýšení limitů pro jeho dávkování. Vzhledem k aktuálnímu stavu životního prostředí je využívání recyklovaných materiálů ve stále větší míře je dle mého názoru cestou správným směrem.

Seznam literatury

- [1] TP 151 Asfaltové směsi s vysokým modulem tuhosti (VMT). Doc. Dr. Ing. Michal Varaus Ing. Petr Hýzl, Ph.D. Ing. Dušan Stehlík, Ph.D. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací, Veveří 95, 662 37 Brno: Ministerstvo dopravy, odbor silniční infrastruktury.
- [2] Nielsen E., State of the Art – Recycling Polymer Modified Asphalt, RECYPMA, Deliverable No 2.1 and 2.2, 43 s. 2012
- [3] Newcomb E. D., Brown E. R., Epps A. J., Designing HMA Mixtures with High RAP Content. A Practical Guide. Quality Improvement Series 124. National Asphalt Pavement Association, 41 s. 2007
- [4] Zaumanis M., Mallick B. R., Frank R., 100% Hot Mix Asphalt Recycling: Challenges and Benefits, Transportation Research Arena, 10 s. 2016
- [5] Copeland A., Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice, Federal Highway Administration, FHWA-HRT-11-021 report, 60 s. 2011
- [6] Presti L. D., Carrión A. J. B., Airey G., Hajj E., Towards 100% Recycling of Reclaimed Asphalt in Road Surface Courses: Binder Design Methodology and Case Studies, Journal of Cleaner Production 131, 9 s. 2016
- [7] Zywiak S. J. Demonstration Project No. 39. Recycling Asphalt Pavements. Federal Highway Administration, New Hampshire, 1982
- [8] Hellriegel J. E., Bituminous Concrete Pavement Recycling, New Jersey Department of Transportation, DOT-FH-15-267, 68 s. 1980
- [9] Howard L. I., Coolez L. A., Doyle D. J., Laboratorz Testing and Economic Analysis of High RAP Warm Mixed asphalt, Mississippi Department of Transportation, FHWA/MS-DOT-RD-09-200, 113 s. 2009
- [10] Hunsucker, David Q, Whayne, Laura, ed. Recycled Materials In Kentucky Highway Construction. Kentucky, 1992. Research report. Kentucky Transportation Cabinet.
- [11] ČSN EN 13108-1 ed. 2 (736140) Asfaltové směsi – Specifikace pro materiály – Část 1: Asfaltový beton. Praha : ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2008. 8596135021291.
- [12] Asfaltové směsi s vysokým obsahem R-materiálu – dosavadní zkušenosti. SILNICE MOSTY. [Online], PRAGOPROJEKT, a.s., 2016. [Citace: 19. 04 2020.] <https://www.silnice-mosty.cz/615-asfaltove-smesis-vysokym-obsahem-r-materialu-dosavadni-zkusenosti/>
- [13] *TECHNICKÉ KVALITATIVNÍ PODMÍNKY STAVEB POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ: Kapitola 7 HUTNĚNÉ ASFALTOVÉ VRSTVY.* Ministerstvo dopravy Odbor infrastruktury. K Ryšánce 1668/16 147 54 Praha 4: PRAGOPROJEKT, 2008.

- [14] Kudrna, Jan, Pavel Šperka, Adam Puda, Květoslav Urbanec a Manfred Kronig. Nové technologie výstavby ložních a podkladních vrstev. In: Asfaltové Vozovky 2017. Praha: Pragoprojekt, 2017, s. 7. ISBN 978-80-906809-0-6.
- [15] Maupin G. W., Diefenderfer S. D., Gillespie J. S., Evaluation of Using Higher Percentages of Recycled Asphalt Pavement in Asphalt Mixes in Virginia, Virginia Transportation Research Council, Final Report VTRC 08-R22, 31 s, 2008
- [16] Han, Sen & Cheng, Xianpeng & Liu, Yamin & Zhang, Yacai. (2019). Laboratory Performance of Hot Mix Asphalt with High Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) and Fine Reclaimed Asphalt Pavement (FRAP) Content. Materials. 12. 2536. 10.3390/ma12162536.]
- [17] Lee J., Denneman E., Chol Y., Maximizing the Re-use of Reclaimed Asphalt Pavement – Outcomes of YearTwo: RAP Mix design, Austroads Technical report AP-T286-16, 67 s, 2015
- [18] Copeland, A. Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice; Turner-Fairbank Highway, Research Center: McLean, VA, USA, 2011.
- [19] Zaumanis, Martins, Rajib B. Mallick a Robert Frank. 100 % hot mix asphalt recycling: challenges and benefits: a Worcester Polytechnic Institute (WPI), 100 Institute Road, Kaven Hall, Worcester, MA 01609. b Worcester Polytechnic Institute (WPI), 100 Institute Road, Kaven Hall, Worcester, MA 01609, 2016. Dissertation. Transportation Research Procedia 14 (2016) 3493 – 3502.
- [20] Ammann group <http://q-roads.com.qa/4W3-4March18/Session%203%20-%20Technical%20&%20Economic%20Aspects%20of%20Asphalt%20Recycling/02%20-%20ANMANN%20Group%20-%20Asphalt%20Plant%20Configuration%20for%20RAP%20Addition.pdf>
- [21] Doc. Dr. Ing. Michal Varaus Asfaltové směsi s vysokým obsahem R-materiálu. Presentace Školení o evropských a českých normách pro stavbu vozovek 2015.
- [22] Chapter 6. Hot-mix asphalt recycling - drum plant: Construction methods and equipment. Federal Highway Administration Research and Technology. [Online] U.S. Department of Transportation. <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/recycling/98042/06.cfm>
- [23] Three Drum Dryer. HJM China Professional Crusher Manufacture Leader. [Online] Hongji Mine Machinery, ZHENGZHOU CITY, 2011. [Citace: 19. 04 2020.] <http://www.chinahongji.com/uploadfile/20160126085235553.jpg>.

- [24] 10553 HERA Systém introduction English
<https://www.youtube.com/watch?v=bd5HshzYSeU>
- [25] HyRAP [online]. USA: Forconstructionpros, 2011 [cit. 2020-05-20].
Dostupné z:
<https://www.forconstructionpros.com/asphalt/article/10344542/brooks-construction-unveils-industry-first-hyrap-and-a-new-production-facility>
- [26] Kamenolom Luleč. Heidelbergcement [online]. ČR: Českomoravský štěrk [cit. 2020-05-20]. Dostupné z:
<https://www.heidelbergcement.cz/cs/kontakty/cms/provozovny/lulec>
- [27] ČSN EN 12697-1 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 1: Obsah rozpustného pojiva. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2018. 8596135056910.
- [28] PLITZ, Jiří a František SVOVODA. Modifikace silničních asfaltů RET polymerem. Silnice a mosty. 2008, roč. 2008, č. 2.
- [29] ČSN EN 15322. Asfalty a asfaltová pojiva – Systém specifikace ředěných a fluxovaných asfaltů Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [30] KOZÁČEK, VOJTĚCH. Alternativní návrh čáry zrnitosti. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta Stavební. Ústav pozemních komunikací. [Online] 2018. [Citace: 20. 05 2020.]
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=179289.
- [31] ČSN EN 12697-30 Asfaltové směsi-Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka-Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2012. 8590963914268
- [32] ČSN EN 12697-6 Asfaltové směsi-Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka-Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2012. 8590963916651.
- [33] ČSN EN 12697-5 Asfaltové směsi-Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka-Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2012. 8590963862187.
- [34] ČSN EN 12697-8 Asfaltové směsi-Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka-Část 8: Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2004. 8590963695471.
- [35] ČSN 73 6121 Stavba vozovek - Hutněné asfaltové vrstvy - Provádění a kontrola shody. Praha : ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2019. 8596135069347.
- [36] ČSN EN 12697-46 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 46: Nízkoteplotní vlastnosti a tvorba trhlin pomocí

jednoosé zkoušky tahem. Praha : ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTSTITUT, 2012. 91636.

[37] ČSN EN 12697-26 Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 26: Tuhost. Praha : ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2019. 8596135059713.

[38] ČSN EN 12697-24 Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 24: Odolnost vůči únavě. Praha : ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2019. 8596135059720.

[39] HORÁČEK, Daniel. *Návrh asfaltové směsi s použitím 30 % asfaltového recyklátu a její posouzení funkčními zkouškami*. 662 37 Brno, 2018. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Prof. Ing. Jan Kudrna, CSc.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Emise při výrobě na tunu asfaltové směsi [19].....	19
Obrázek 2: Úspora financí při různých procentech R-materiálu [19]	20
Obrázek 3: Postup pro výrobu směsi se 100 % R-materiálu [19]	20
Obrázek 4: Technologický postup dávkování R-materiálu za studena [20]..	22
Obrázek 5: Dávkování za tepla pomocí paralelního sušícího bubnu [21]	23
Obrázek 6: Dávkování R-materiálu po proudu horkého vzduchu [22]	24
Obrázek 7: Připojené zařízení na kontrolu emisí [22]	25
Obrázek 8: Dávkování R-materiálu proti proudu vzduchu [22]	25
Obrázek 9: Separovaný ohřev R-materiálu a míchání v bubnu [22]	26
Obrázek 10: Separovaný ohřev R-materiálu a míchání mimo sušící buben [23]	26
Obrázek 11: Nepřímý ohřev R-materiálu (systém HERA) [24].....	27
Obrázek 12: Kontinuální obalovna s technologií HyRAP [25]	27
Obrázek 13: Kamenolom Luleč [26]	29
Obrázek 14: Navážka pro ruční míchání	32
Obrázek 16: Marshallovo těleso	33
Obrázek 15: Rázový zhutňovač	33
Obrázek 17: Hydrostatické vážení	35
Obrázek 18: Pyknometr naplněný asfaltovou směsí	36
Obrázek 19: Temperační lázeň	37
Obrázek 20: Detail hřídele míchačky	39
Obrázek 21: Laboratorní míchačka BITUMIX.....	39
Obrázek 22: Zhutňovač s válcovou plochou	40
Obrázek 23: Zhutněná deska	40
Obrázek 24: Těleso trapezoid	41
Obrázek 25: Těleso hranol	41
Obrázek 26: Vzorek připevněný v ocelové formě	42
Obrázek 27: Porušený vzorek	43
Obrázek 28: Vzorek připevněný v zařízení Cyklon -40.....	43
Obrázek 29: Upevněné vzorky v zařízení COOPER	44

Seznam grafů

Graf 1: Čára zrnitosti směsi MVT16	32
Graf 2: Závislost mezerovitosti na obsahu pojiva	48
Graf 3: Nízkoteplotní vlastnosti směsi.....	51
Graf 4: Moduly tuhosti směsi VMT 16	52
Graf 5: Wöhlerův diagram	53

Seznam tabulek

Tabulka 1 Současný stav v České normě	16
Tabulka 2 Sítové rozbory kameniva a R-materiálu	31
Tabulka 3: Objemová hmotnost Marshallových těles	46
Tabulka 4: Maximální objemová hmotnost směsi	47
Tabulka 5: Mezerovitost směsi.....	47
Tabulka 6: Objemová hmotnost deskových těles	48
Tabulka 7: Míra zhutnění zkušebních desek.....	49
Tabulka 8: Nízkoteplotní vlastnosti směsi.....	51
Tabulka 9: Průměrné moduly tuhosti směsi MVT 16.....	52
Tabulka 10: Vlastnosti navržené směsi	54
Tabulka 11: Porovnání navržené směsi	55

Seznam příloh

Příloha 1: Objemová hmotnost, maximální objemová hmotnost a mezerovitost vyráběných asfaltových směsí

Příloha 2: Objemová hmotnost a míra zhutnění desek

Příloha 3: Odolnost směsi vůči nízkým teplotám

Příloha 4: Modul tuhosti směsi VMT 16

Příloha 5: Odolnost směsi vůči únavě

Příloha 1: Objemová hmotnost, maximální objemová hmotnost a mezerovitost vyráběných asfaltových směsí

Celkový obsah asfaltu	Označení vzorku	Průměrná výška vzorků [mm]	Hmotnost suchého vzorku [g]	Hmotnost vzorku pod vodou [g]	Hmotnost osušeného vzorku [g]	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Průměrná objemová hmotnost [kg/m ³]
4,70 %	1	61,40	1142,60	666,60	1148,00	2371	2374
	2	66,10	1228,60	713,80	1236,60	2348	
	3	64,35	1206,20	703,40	1210,60	2376	
5,20 %	1	60,49	1155,00	677,60	1156,40	2410	2398
	2	63,76	1210,60	706,60	1213,20	2388	
	3	63,69	1214,60	709,60	1215,80	2397	
5,70 %	1	60,81	1172,80	686,80	1173,80	2406	2405
	2	63,54	1222,20	715,60	1223,60	2404	
	3	62,82	1213,20	709,80	1213,80	2405	

Hustota vody při teplotě 15,6 °C	999,10kg/m ³
----------------------------------	-------------------------

Celkový obsah asfaltu [%]	4,70	5,20	5,70
Objem pyknometru [m ³]	0,001321	0,0013231	0,001323408
Hmotnost prázdného pyknometru [g]	703,2	690,6	693
Hmotnost plného pyknometru [g]	1756,3	1739,5	1752,2
Hmotnost plného pyknometru a rozpouštědla [g]	3206,1	3191,3	3194,4
Maximální objemová hmotnost [kg/m ³]	2491	2474	2462

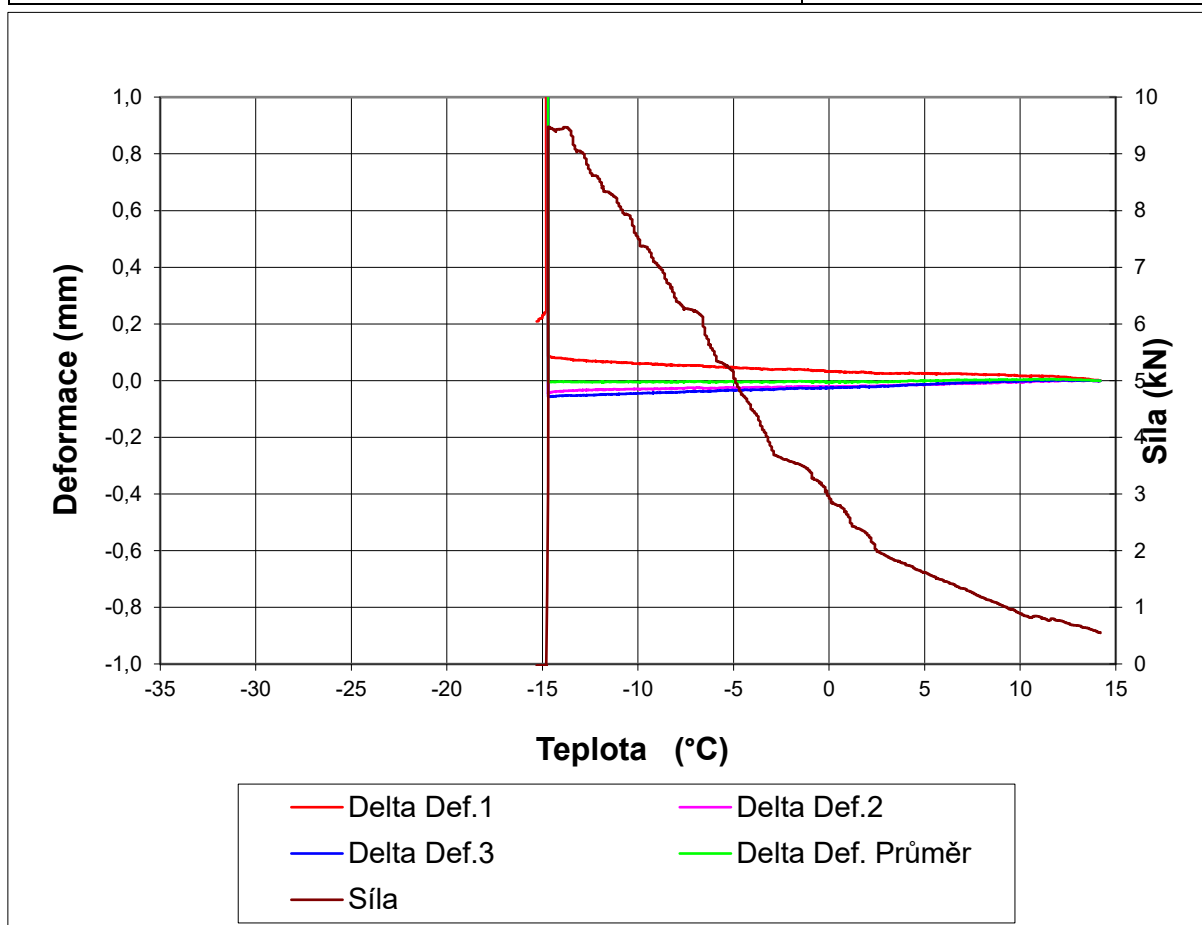
Celkové množství asfaltu [%]	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Maximální objemová hmotnost [kg/m ³]	Mezerovitost směsi [%]
4,70	2374	2491	4,71
5,20	2398	2474	3,04
5,70	2405	2462	2,30

Příloha 2: Objemová hmotnost a míra zhutnění desek

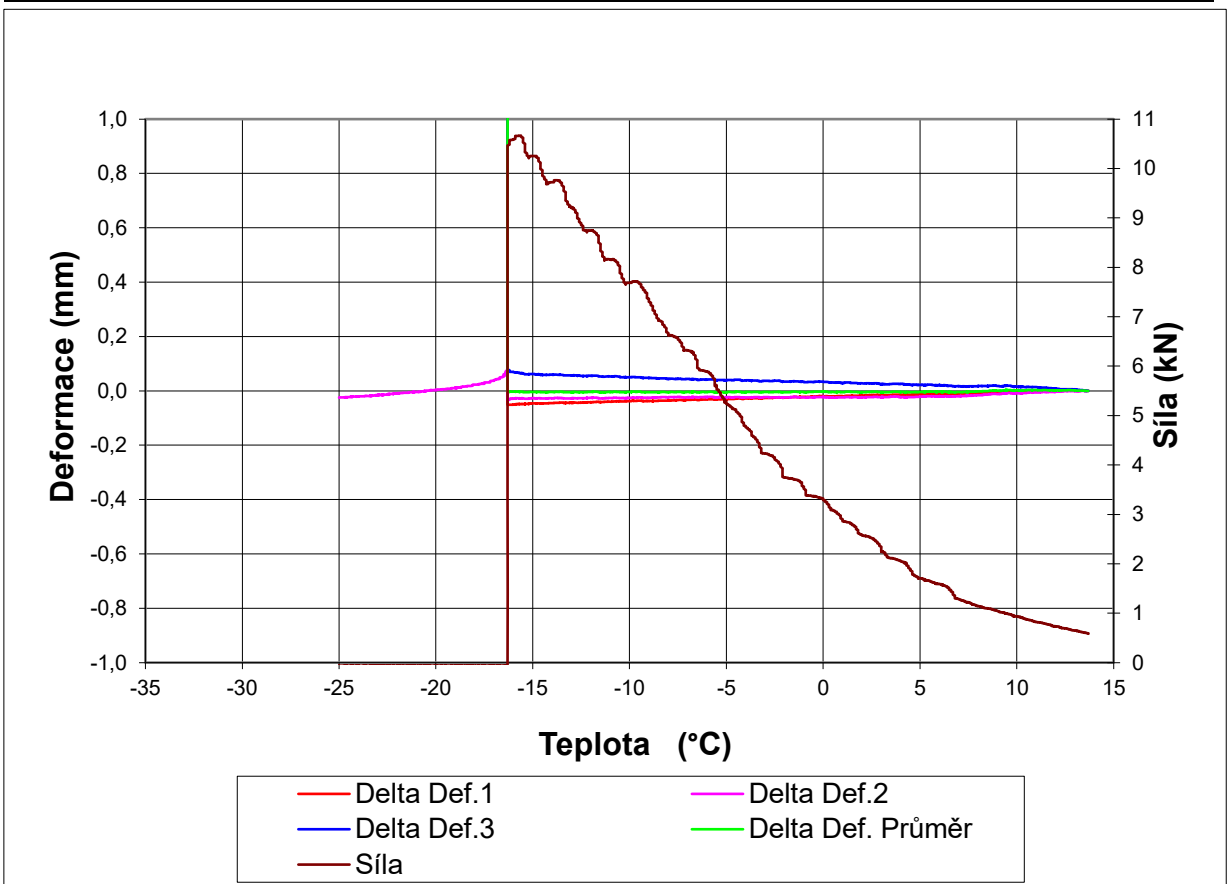
Označení desek	I	II	III	IV	V	VI
Hmotnost suchého vzorku [g]	996 8,4	9953, 6	10500, 6	9954, 4	9931,2	10982
Hmotnost vzorku pod vodou [g]	583 3,6	5829, 8	6167,2	5824, 2	5798,8	6429, 2
Hmotnost osušeného vzorku [g]	998 9,8	9983, 6	10511	9970, 8	9953	10991 ,2
Objemová hmotnost [kg/m ³]	239 6	2394	2415	2399	2389	2405
Maximální objemová hmotnost [kg/m ³]	2474					
Objemová hmotnost mashalova tělesa [kg/m ³]	2398					
Mezerovitost desek [%]	3,15	3,22	2,37	3,04	3,45	2,77
Míra zhutnění desek [%]	99,9 1	99,84	100,72	100,0 2	99,61	100,3 0

Příloha 3: Odolnost směsi vůči nízkým teplotám

Akce :	Vzorek č 1
Asfaltová směs :	VMT 16
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	50 x 50 x 200
Datum zkoušky :	09.03.2020
Zkoušku provedl :	Matěj Klimek
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	9,47
Max. napětí při porušení - MPa :	3,79
Teplota v komoře při porušení - °C :	-17,2
Teplota vzorku při porušení - °C :	-14,7



Akce :	Vzorek č 3
Asfaltová směs :	VMT 16
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	50 x 50 x 200
Datum zkoušky :	10.03.2020
Zkoušku provedl :	Matěj Klimek
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	10,67
Max. napětí při porušení - MPa :	4,27
Teplota v komoře při porušení - °C :	-17,7
Teplota vzorku při porušení - °C :	-15,6



Příloha 4: Modul tuhosti směsi VMT 16

Teplota 10 °C									
Frekvence (Hz)	1	3	5	10	15	20	25	27	30
VMT16 - V- 4	11338	12860	13604	14510	14850	15280	15476	15847	16270
VMT16 - V- 2	11807	13304	13951	14936	15401	15696	16011	16405	16935
VMT16 - IV- 3	11552	13168	13926	14846	15315	15691	15911	16026	16232
VMT16 - II- 1	10817	1210	12810	13676	14018	14420	14575	14837	15259
Průměrné hodnoty	11379	12886	13573	14492	14896	15272	15493	15779	16174

Teplota 15 °C									
Frekvence (Hz)	1	3	5	10	15	20	25	27	30
VMT16 - V- 4	9 079	10593	11308	12245	12664	13109	13331	13609	13890
VMT16 - V- 2	9 489	10979	11666	12671	13178	13501	13841	14136	14556
VMT16 - IV- 3	9 058	10694	11447	12445	12973	13360	13607	13699	14072
VMT16 - II- 1	8 609	9 974	10605	11519	11915	12316	12518	12728	14035
VMT16 - III - 2	9 865	11352	12017	12976	13386	13813	13970	14238	15453
VMT16 - III - 3	9 865	11352	11352	12017	12976	13386	13813	13970	14238
VMT16 - III - 1	10411	12006	12737	13852	14375	14697	15018	15396	15817
VMT16 - III - 4	9 734	11284	12018	13040	13509	13967	14196	14540	14910
Průměrné hodnoty	9 514	11029	11644	12596	13122	13519	13787	14040	14621

Teplota 20 °C									
Frekvence (Hz)	1	3	5	10	15	20	25	27	30
VMT16 - V- 4	7042	8436	9147	10108	10609	11078	11303	11566	13162
VMT16 - V- 2	7352	8790	9492	10515	11061	11417	11738	12010	12340
VMT16 - IV- 3	6990	8424	9148	10192	10732	11136	11452	11617	11837
VMT16 - II- 1	6665	7971	8618	9509	9957	10360	10708	11247	11862
Průměrné hodnoty	7012	8405	9101	10081	10590	10998	11300	11610	12300

Příloha 5: Odolnost směsi vůči únavě

Označení vzorků	Poč. přetvoření	Počet cyklů	log (N)	log e
VMT16 - II- 1	0,000174	196 323	5,292971	-3,75945
VMT16 - IV- 3	0,000179	182 139	5,260403	-3,74715
VMT16 - V- 2	0,000185	365 765	5,563202	-3,73283
VMT16 - V- 4	0,000202	158 357	5,199637	-3,69465
VMT - III - 2	0,000129	9 920 620	6,996539	-3,88941
VMT - III - 3	0,000137	9 920 620	6,996539	-3,86328
VMT - III - 1	0,000129	9 920 620	6,996539	-3,88941
VMT - III - 4	0,000136	9 920 620	6,996539	-3,86646
VMT - IV - 1	0,000134	1 628 254	6,211722	-3,8729
VMT - IV - 4	0,000135	1 625 495	6,210986	-3,86967
VMT - IV - 2	0,000153	1 624 981	6,210848	-3,81531
VMT - V - 1	0,000149	1 624 912	6,21083	-3,82681
VMT - I - 2	0,000166	2 497 275	6,397466	-3,77989
VMT - I - 3	0,000158	2 844 319	6,453978	-3,80134
VMT - I - 4	0,000172	1 556 474	6,192142	-3,76447