



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

# INOVATIVNÍ ASFALTOVÉ SMĚSI PRO NETUHÉ VOZOVKY S POUŽITÍM R-MATERIÁLU

INOVATIVE ASPHALT MIXTURES TO FLEXIBLE PAVEMENT STRUCTURE WITH USING  
RECLAIMED ASPHALT

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Daniel Horáček

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. JAN KUDRNA, CSc.

BRNO 2020



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	N3607 Stavební inženýrství
<b>Typ studijního programu</b>	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
<b>Studijní obor</b>	3607T009 Konstrukce a dopravní stavby
<b>Pracoviště</b>	Ústav pozemních komunikací

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>Student</b>	Bc. Daniel Horáček
<b>Název</b>	Inovativní asfaltové směsi pro netuhé vozovky s použitím R-materiálu
<b>Vedoucí práce</b>	prof. Ing. Jan Kudrna, CSc.
<b>Datum zadání</b>	31. 3. 2019
<b>Datum odevzdání</b>	10. 1. 2020

V Brně dne 31. 3. 2019

---

doc. Dr. Ing. Michal Varaus  
Vedoucí ústavu

---

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

## PODKLADY A LITERATURA

Dostupná literatura týkající se zvýšeného dávkování R-materiálu do asfaltových směsí.

Výsledky výzkumných projektů řešených VUT FAST.

Technické podmínky TP 148 a TP 151

Zkušební normy pro asfalty ČSN 65 7222-2, ČSN EN 13302, EN 1426, EN 13880-2, EN 13880-3, EN 12607-1 a EN 14771.

Zkušební normy pro asfaltové směsi řady ČSN EN 12697, ČSN 73 6160.

Výpočtový program LayEps.

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Popis dosavadního stavu problematiky použití R-materiálu do asfaltových směsí v množství vyšším než 20 %. Představení možnosti řešení asfaltových směsí s vyšším podílem R-materiálu. Návrh takových inovativních směsí s použitím modifikovaných asfaltů. Zkoušení vlastností použitých asfaltů. Posouzení asfaltových směsí vhodnými funkčními zkouškami (tuhost, únav a odolnost vůči nízkým teplotám).

Pomocí návrhové metody posoudit přínos použití navržených asfaltových směsí v konstrukci vozovky.

## STRUKTURA DIPLOMOVÉ 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).

---

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

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce je zaměřena na návrh a výrobu dvou inovativních asfaltových směsí typu VMT 22 do podkladních vrstev vozovky. Nově vyrobené směsi obsahují modifikovaná pojiva, jako jsou polymerem modifikované asfaltové pojivo PMB a asfaltové pojivo modifikované pryžovým granulátem CRMB. Teoretická část diplomové práce popisuje dosavadní stav používání R-materiálu do podkladních vrstev vozovky. Dále jsou zde popsány druhy asfaltových směsí do podkladních vrstev, používaných v ČR a v zahraničí. Závěr teoretické části se věnuje popisu R-materiálu, jeho skládkování a zpracování v míchacím centru za horka. Praktická část popisuje návrh a výrobu dvou nových asfaltových směsí typu VMT 22, do kterých je dávkováno 25 % R-materiálu za studena bez přidání jakýchkoliv oživovacích přísad. Tyto asfaltové směsi jsou poté podrobeny funkčním zkouškám (stanovení tuhosti, stanovení odolnosti vůči únavě, stanovení odolnosti vůči účinkům mrazu). Výsledky funkčních zkoušek jsou porovnány s funkčními požadavky v českém předpise TP 151. V závěru diplomové práce je pomocí programu LayEps ověřeno, že vhodným návrhem asfaltové směsi lze výrazně prodloužit životnost vozovky.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Asfalt, R-materiál, polymerem modifikované asfaltové pojivo (PMB), asfalt modifikovaný pryžovým granulátem (CRMB), asfaltová směs s vysokým modulem tuhosti, tuhost, odolnost vůči únavě, LayEps.

## **ABSTRACT**

The diploma thesis is focused on the design and production of two innovative asphalt mixtures of the VMT 22 type into the base asphalt course. The newly produced blends contain modified binders, such as polymer modified bitumen (PMB) and Crumb rubber modified bitumen (CRMB). The theoretical part of the thesis describes the current state of the use of Reclaimed asphalt pavement in the base asphalt course. Furthermore, there are described types of asphalt mixtures for the base asphalt course are used in the Czech Republic and other countries. The conclusion of the theoretical part is devoted to the description of Reclaimed asphalt pavement (RAP), its storage and processing in a hot mix

center. In the practical part of this thesis, there is described design and test of two High modulus asphalt mixture VMT 22, into which 25% RAP is dosed cold without rejuvenators. These asphalt mixtures are then subjected to functional tests (Stiffness of asphalt mixture test, Resistance to fatigue test, Low temperature properties of asphalt mixture test). The results of the functional tests are compared with the functional requirements in the Czech regulation TP 151. In the end of this thesis it is verified by means of the LayEps software that a suitable design of the asphalt mixture can significantly extend the road life.

## **KEYWORDS**

Bitumen, Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), Polymer Modified Bitumen (PMB), Crumb Rubber Modified Bitumen (CRMB), High Modulus Asphalt Mixture, Stiffness, Resistance to Fatigue, Software LayEps.

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

Bc. Daniel Horáček *Inovativní asfaltové směsi pro netuhé vozovky s použitím R-materiálu*. Brno, 2020. 107 s., 22 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce prof. Ing. Jan Kudrna, CSc.

## **PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE**

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Inovativní asfaltové směsi pro netuhé vozovky s použitím R-materiálu* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 2. 1. 2020

---

Bc. Daniel Horáček  
autor práce

## **PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Inovativní asfaltové směsi pro netuhé vozovky s použitím R-materiálu* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 2. 1. 2020

---

Bc. Daniel Horáček  
autor práce

## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce prof. Ing. Janu Kudrnovi, CSc. za odborné vedení a poskytnuté materiály při vypracování této práce. Poděkování také patří Pavlu Strakovi a všem pracovníkům laboratoře na Ústavu pozemních komunikací, kteří mi pomohli a poradili při přípravě a provádění zkoušek. Také chci poděkovat Ing. Jiřímu Fišerovi, Ph.D. z obalovny v Holubicích, za poskytnutí asfaltového pojiva použitého v této práci. Děkuji Ing. Pavlu Šperkovi, za poskytnuté materiály, cenné rady a také za čas, který mi věnoval při tvorbě této diplomové práce. V neposlední řadě chci moc poděkovat své rodině, která mě podporovala po celou dobu studia.



## Obsah

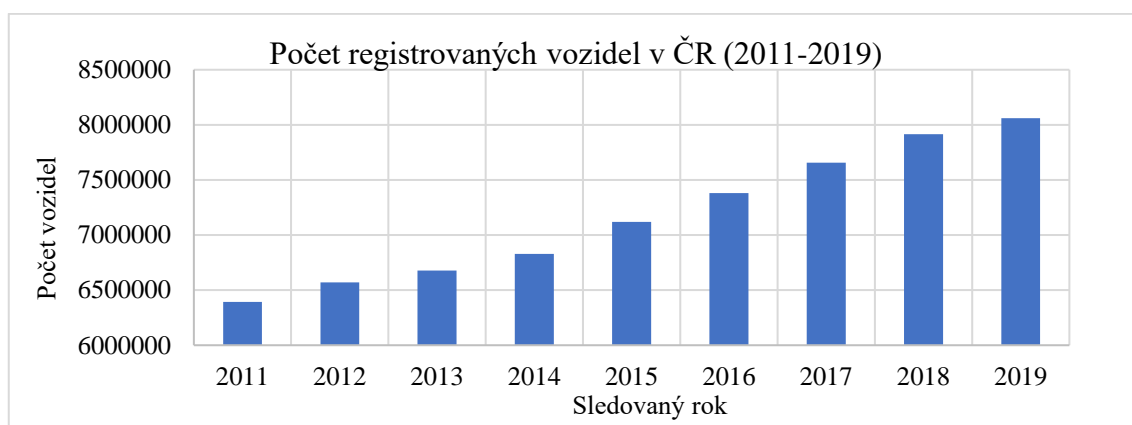
1. Úvod .....	12
2. Cíle práce .....	14
3. Teoretický rozbor problematiky.....	16
3.1 Asfaltové směsi pro podkladní vrstvy vozovek .....	16
3.1.1 Asfaltový beton pro podkladní vrstvy .....	18
3.1.2 Asfaltová směs pro podkladní vrstvy – typ RBL.....	20
3.1.3 Směsi typu VMT.....	21
3.1.4 Porovnání asfaltových směsí do podkladních vrstev .....	23
3.1.5 Porovnání přístupu v ČR a v zahraničí.....	24
3.2 R-materiál.....	25
3.2.1 Historie používání R-materiálu do směsí vyráběných za horka.....	25
3.2.2 Použití R-materiálu v nově vyráběných asfaltových směších .....	26
3.2.3 Získávání R-materiálu .....	27
3.2.4 Skladování R-materiálu .....	28
3.3 Recyklace v míchacím centru za horka.....	29
3.3.1 Dávkování přímo do míchačky šaržové obalovny.....	29
3.3.2 Předehřívání R-materiálu v paralelním bubnu .....	32
3.3.3 Metoda Drum-mix .....	33
3.4 Použité zkušební metody .....	36
3.4.1 Sítový rozbor.....	36
3.4.2 Stanovení penetrace jehlou.....	37
3.4.3 Stanovení bodu měknutí metodou kroužek kulička .....	38
3.4.4 Laboratorní výroba směsi.....	40
3.4.5 Hutnění zkušebních těles rázovým zhutňovačem.....	42
3.4.6 Stanovení maximální objemové hmotnosti.....	44
3.4.7 Hutnění zkušebních těles segmentovým zhutňovačem .....	46
3.4.8 Stanovení objemové hmotnosti zkušebních těles .....	48
3.4.9 Stanovení nízkoteplotních vlastností asfaltových směsí.....	49
3.4.10 Stanovení tuhosti – Zkouška dvoubodovým ohybem na jednostranně vetknutém komolém klínu (2PB-TR).....	51
3.4.11 Stanovení odolnosti vůči únavě.....	52
4. Praktická část.....	54
5. Praktická část: použité materiály .....	56
5.1 Kamenivo.....	56
5.2 R-materiál.....	58

5.2.1	Kamenivo z R-materiálu.....	58
5.2.2	Asfaltové pojivo z R-materiálu .....	59
6.	Praktická část: 1. etapa .....	60
6.1	Asfaltové pojivo ve směsi A.....	60
6.1.1	Vlastnosti asfaltového pojiva ve směsi A .....	61
6.2	Sítový rozbor a návrh čáry zrnitosti.....	61
6.3	Stanovení množství pojiva, stanovení objemové hmotnosti, maximální objemové hmotnosti, mezerovitosti.....	62
6.3.1	Stanovení optimálního množství pojiva u směsi A.....	63
6.3.2	Výpočet dávkovaného asfaltového pojiva do směsi A.....	64
6.4	Stanovení míry zhutnění zkušebních desek .....	64
6.5	Stanovení nízkoteplotních vlastností.....	65
6.6	Stanovení tuhosti – Zkouška dvoubodovým ohybem na jednostranně vetknutém komolém klínu (2PB-TR).....	66
6.7	Stanovení odolnosti vůči únavě.....	67
7.	Praktická část: 2. etapa .....	70
7.1	Asfaltové pojivo ve směsi B .....	70
7.1.1	Vlastnosti asfaltového pojiva ve směsi B.....	71
7.2	Sítový rozbor a návrh čáry zrnitosti.....	71
7.3	Stanovení množství pojiva, stanovení objemové hmotnosti, maximální objemové hmotnosti, mezerovitosti.....	73
7.3.1	Stanovení optimálního množství pojiva .....	73
7.3.2	Výpočet dávkovaného asfaltového pojiva do směsi B.....	74
7.4	Stanovení míry zhutnění zkušebních desek .....	74
7.5	Stanovení nízkoteplotních vlastností.....	75
7.6	Stanovení tuhosti – Zkouška dvoubodovým ohybem na jednostranně vetknutém komolém klínu (2PB-TR).....	76
7.7	Stanovení odolnosti vůči únavě.....	78
8.	Souhrnné výsledky asfaltových směsí a diskuze.....	80
8.1	Nízkoteplotní vlastnosti směsí A a B.....	80
8.2	Srovnání modulů tuhosti směsí A a B.....	81
8.3	Srovnání odolností směsí A a B vůči únavě.....	82
8.4	Ověření splnění funkčních požadavků.....	83
9.	Posouzení životnosti vozovky pomocí programu LayEps.....	85
9.1	Posouzení životnosti konstrukce vozovky dle TP 170: D0-N-2-S-PII.....	86
9.2	Posouzení životnosti konstrukce vozovky dle TP 170: D0-N-3-S-PII.....	88

9.3	Posouzení životnosti konstrukce vozovky s navýšením tloušťek podkladních vrstev .....	92
10.	Závěr .....	95
11.	Seznam použité literatury .....	97
12.	Seznam tabulek .....	101
13.	Seznam obrázků .....	103
14.	Seznam grafů .....	105
15.	Seznam použitých symbolů a zkratk .....	106
16.	Seznam příloh .....	107

## 1. Úvod

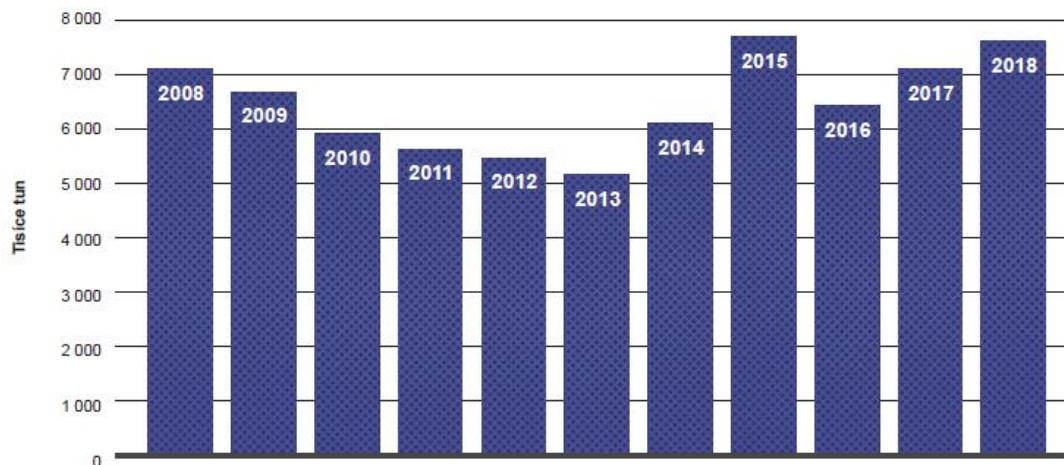
V roce 2019 překročil počet registrovaných vozidel v ČR 8 miliónovou hranici, z toho přes 1,5 milionu tvoří těžká nákladní vozidla [1]. Problém zvyšujícího se stupně automobilizace a tím pádem i vyššího dopravního zatížení není jen u nás, ale týká se celého světa. Vzhledem k tomu, že velká část vozovek je tvořena z netuhých asfaltových vrstev, je důležité se zabývat vývojem nových, inovativních asfaltových směsí, které budou vykazovat lepší vlastnosti a vyšší životnost. Zároveň je potřeba korigovat spotřebu asfaltu jakožto produktu z ropy. Množství ropy neustále ubývá, a proto je snaha přidávat do nových směsí v co nejvyšší míře recyklovaný materiál z vyfrézovaných vozovek a tím celkově snížit náklady na rekonstrukce a výstavbu nových komunikací.



Graf 1: Vývoj počtu registrovaných vozidel v ČR v letech 2011-2019 [1]

Zvyšující se dopravní zatížení má za následek přetížení stávajících komunikací a konstrukcí vozovek, které je tak potřeba rekonstruovat. S tím souvisí i zvyšující se výroba asfaltových směsí, kdy v roce 2018 překročilo množství vyrobené asfaltové směsi v ČR hodnotu 7 500 000 tun. Oproti roku 2017 se tak jedná o nárůst přes 500 000 tun asfaltové směsi (viz graf 1).

V grafu 2 je znázorněn vývoj výroby asfaltových směsí v ČR během let 2008-2018. Z pozvolného nárůstu za poslední léta vybočuje jen rok 2015, který byl posledním rokem, kdy bylo možné využít evropské dotace z OPD I a kdy byl také poskytnut nejvyšší příspěvek krajům na silnice II. a III. třídy z rozpočtu SFDI. [2]



Graf 2: Vývoj výroby asfaltových směsí v letech 2008-2018 [2]

Řešením problémů se zvyšujícím se dopravním zatížením mohou být konstrukce tzv. věčných vozovek, tj. vozovek z asfaltových směsí s vyšší životností, např. směsí typu VMT. Právě těmito směsmi se bude zabývat tato diplomová práce.

Směsi s vysokým modulem tuhosti (dále jen směsi VMT), jsou charakterizovány vysokou životností a dobrou odolností vůči únavě. Pro směsi typu VMT je typické použití tvrdých asfaltů. Do těchto směsí je tedy možné dávkovat vyšší množství R-materiálu a tím snížit celkové náklady na výrobu asfaltové směsi. Lze dokumentovat, že v zahraničí se do směsí VMT běžně přidává více než 50 % R-materiálu, směsi i tak vykazují výborné vlastnosti [3]. V rámci bakalářské práce jsem se zabýval směsmi VMT 16, které se používají pro ložní vrstvy vozovek. I když jsem do těchto směsí dávkoval 30 % R-materiálu, tak se tyto směsi prezentovaly výbornými výsledky, které ukázaly, že je použití R-materiálu ve směsích VMT velmi vhodným řešením. Z těchto důvodů považuji výzkum a použití směsí typu VMT za velmi důležitý a hodnotný.

Tyto za horka zpracovávané asfaltové směsi jsou určeny pro ložní nebo podkladní vrstvy vozovek s vysokým dopravním zatížením. Směsi tohoto typu jsou velmi oblíbené a používány např. ve Švýcarsku nebo Francii. V těchto zemích je označují jako směsi EME (z francouzštiny: enrobés bitumineux á module élevé = asfaltová směs s vysokým modulem).

## 2. Cíle práce

Cílem této diplomové práce je navrhnout a laboratorně odzkoušet dvě nové asfaltové směsi typu VMT pro podkladní vrstvy vozovek. Do těchto směsí bude přidáno 25 % R-materiálu. Odpovídá to maximálnímu množství R-materiálu, které jsme teoreticky schopni přidat do směsí na obalovnách v ČR bez paralelního bubnu, tj. za studena. Tyto nově navržené asfaltové směsi by měly vyhovovat minimálním požadavkům stanoveným v TP 151 [4]. Snahou je přiblížit se výsledkům výzkumu švýcarských směsí a vyhovět požadavkům švýcarské normy SN 640 431-1B-NA [5].

Země	Označení směsi	Moduly tuhosti při 15 °C a 10 Hz [MPa]	Odolnost vůči únavě $\epsilon_6$ při 10 °C a 25 Hz [ $10^{-6}$ ]
Švýcarsko	AC EME 22 C1	$\geq 11\ 000$	$\geq 100$
	AC EME 22 C2	$\geq 14\ 000$	$\geq 130$
Česko	VMT 22	$\geq 9\ 000$	$\geq 125$
	VMT 16	$\geq 9\ 000$	$\geq 125$

Tabulka 1: Požadavky na směsi typu VMT a AC EME dle českých a švýcarských norem [6]

Diplomová práce se skládá ze dvou částí: teoretické a praktické.

Teoretická část se bude zabývat popisem dosavadního stavu problematiky použití R-materiálu do asfaltových směsí v množství vyšším než 20 %. Dále se bude podrobně věnovat jednotlivým asfaltovým směšem, které se používají pro podkladní vrstvy vozovek, zejm. pak použitím směsí typu VMT v podkladních vrstvách vozovky. V teoretické části také budou porovnány jednotlivé přístupy v ČR a v zahraničí (Švýcarsko, Francie). Budou představeny všechny zkušební metody použité při návržení a výrobení směsí.

Praktická část se bude věnovat návrhu a výrobě dvou směsí typu VMT. Návrh první asfaltové směsi vychází ze směsi, která byla navržena a vyrobena při předchozím výzkumu v rámci diplomové práce Ing. Romana Stromeckého [6] v laboratoři vědeckého centra AdMaS v Brně. Tato směs mě zaujala svými dobrými vlastnostmi. Nově navržené směsi budou obsahovat 25 % R-materiálu dávkovaného za studena a modifikované asfalty (PMB, resp. CRMB) bez přidání rejuvenátorů. Tyto směsi poté budou podrobeny následujícím funkčním zkouškám:

- stanovení tuhosti;
- stanovení odolnosti vůči únavě;

- stanovení odolnosti vůči účinkům mrazu.

Výsledky těchto funkčních zkoušek porovnám s minimálními požadavky stanovenými v TP 151 [4] a ve švýcarské normě SN 640 431-1B-NA [5].

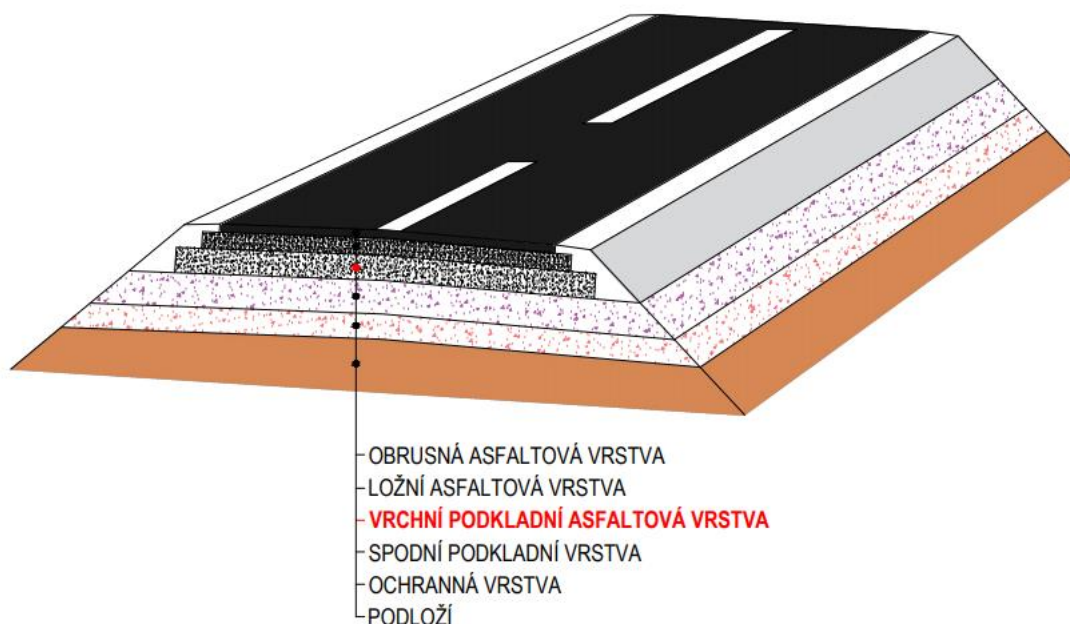
Na závěr posoudím přínos použití navržených asfaltových směsí v konstrukci vozovky pomocí výpočtového programu LayEps. Snahou je dokázat, že vhodným návrhem asfaltové směsi je možné dosáhnout vyšší životnosti vozovky, při zachování stejné tloušťky asfaltové vrstvy a tím snížit náklady na rekonstrukce.

### 3. Teoretický rozbor problematiky

V této části diplomové práce je popsán dosavadní stav použití R-materiálu do asfaltových směsí v množství vyšším než 20 %. Dále je v této části popis a porovnání asfaltových směsí do podkladních vrstev vozovek používaných v ČR. Je zde také porovnání asfaltových směsí s vysokou životností u nás a v zahraničí. Závěr teoretické části je zaměřen na popis R-materiálu, jeho skládkování a zpracování v míchacím centru za horka. V neposlední řadě jsou v této části diplomové práce popsány všechny laboratorní zkoušky a metody, které byly použity při výrobě a zkoušení nových asfaltových směsí.

#### 3.1 Asfaltové směsi pro podkladní vrstvy vozovek

Jedná se o nejspodnější asfaltovou vrstvu v konstrukci vozovky. Na tuto vrstvu působí největší tahová napětí, a proto musí být navržena tak, aby byla schopna odolávat napětí v tahu za ohybu bez projevů únavových poruch. Při přetížení vozovky může dojít k lomové poruše, která se prokopíruje až do obrusné vrstvy vozovky.



Obrázek 1: Umístění podkladní vrstvy v konstrukci vozovky

Koncepce vozovek s dlouhou životností je v jednotlivých zemích odlišná, ale hlavní cíl je, že má vydržet bez rekonstrukce v dlouhé perspektivě s výjimkou plánovaných výměn obrusné vrstvy. Vrstvy s dlouhou životností zajišťují dostatečnou tuhost a vysokou odolnost vůči únavovým trhlinám. Pro správnou funkci asfaltové

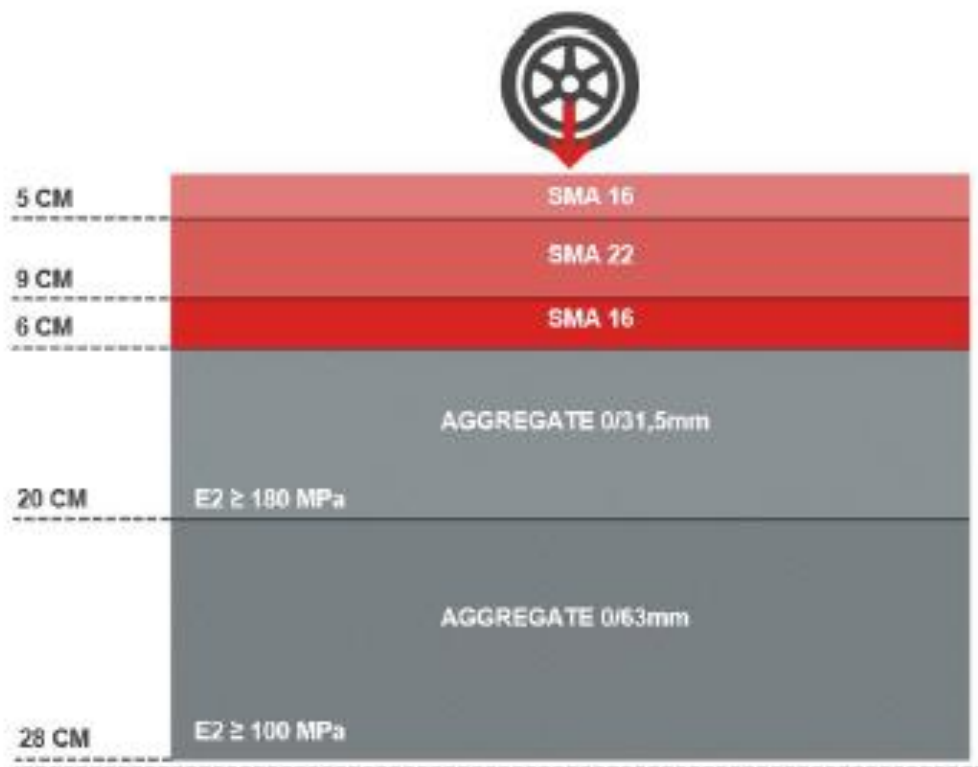


podkladní vrstvy musí být zajištěno dokonalé spojení jednotlivých konstrukčních vrstev vozovky. Použitím asfaltových směsí s vysokou životností můžeme předejít deformacím vozovky a tím ušetřit náklady na případné rekonstrukce.

Do podkladních vrstev lze použít tyto asfaltové vrstvy:

- asfaltový beton pro podkladní vrstvy – ACP;
- asfaltová směs pro podkladní vrstvy typu RBL (Rich Bottom Layer);
- asfaltová směs s vysokým modulem tuhosti – VMT.

Zajímavostí může být použití asfaltové směsi SMA (asfaltový koberec mastixový) do podkladních vrstev. Stalo se tak v rámci koncepce vozovky pro velká dopravní zatížení se 3 vrstvami SMA v polské rafinerii v Gdaňsku. Jedná se o unikátní a inovativní typ asfaltové vozovky s velkou odolností vůči pomalu jedoucí těžké dopravě. Byly navrženy tři vrstvy směsí SMA s použitím vysoce modifikovaného asfaltového pojiva (HiMA) ve všech vrstvách. Obrusná vrstva byla navržena jako SMA 16 s PMB 45/80-80 a ložní vrstva odolná proti deformacím jako SMA 22 s PMB 25/55-80. Podkladní vrstva odolná proti únavě byla SMA 16 s PMB 45/80-80. [7]



Obrázek 2: Skladba vozovky v gdaňské rafinerii [7]

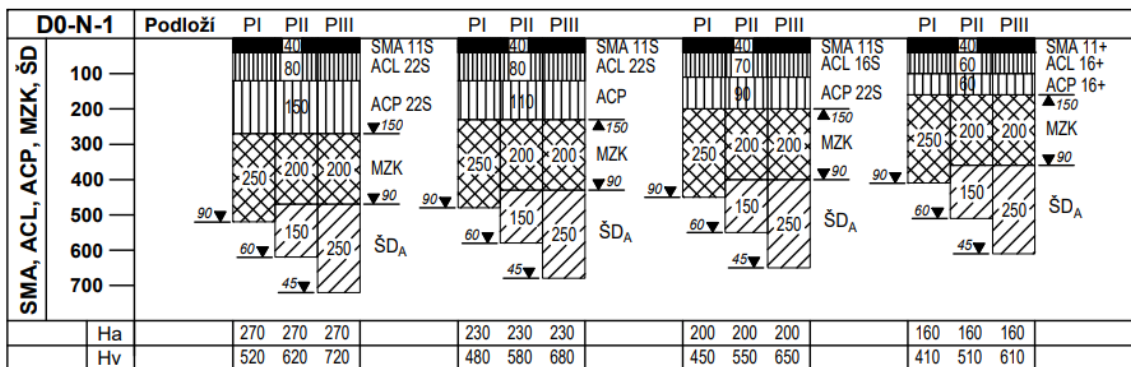
### 3.1.1 Asfaltový beton pro podkladní vrstvy

Asfaltový beton je asfaltová směs s plynulou čarou zrnitosti kameniva, která vytváří vzájemně zaklíněnou kostru. Tato směs se řídí normou ČSN EN 13108-1 [8] Asfaltové směsi – Specifikace pro materiály – Část 1: Asfaltový beton.

Asfaltový beton se značí zkratkou AC (z angl. Asphalt Concrete). Tato asfaltová směs se používá do obrusných, ložních i podkladních vrstev vozovky:

- ACO = asfaltový beton pro obrusné vrstvy;
- ACL = asfaltový beton pro ložní vrstvy;
- ACP = asfaltový beton pro podkladní vrstvy.

V ČR je to nejvíce rozšířená asfaltová směs. Do podkladních vrstev se nejčastěji používají směsi ACP 16S, ACP 16+, ACP 22S a ACP 22+. Na obrázku 3 jsou znázorněny příklady použití směsí typu ACP v konstrukcích vozovek dle katalogových listů TP 170.



Obrázek 3: Příklad použití ACP z katalogových listů TP 170 [9]

#### 3.1.1.1 Požadavky na ACP

##### a.) Požadavky na asfaltové pojivo:

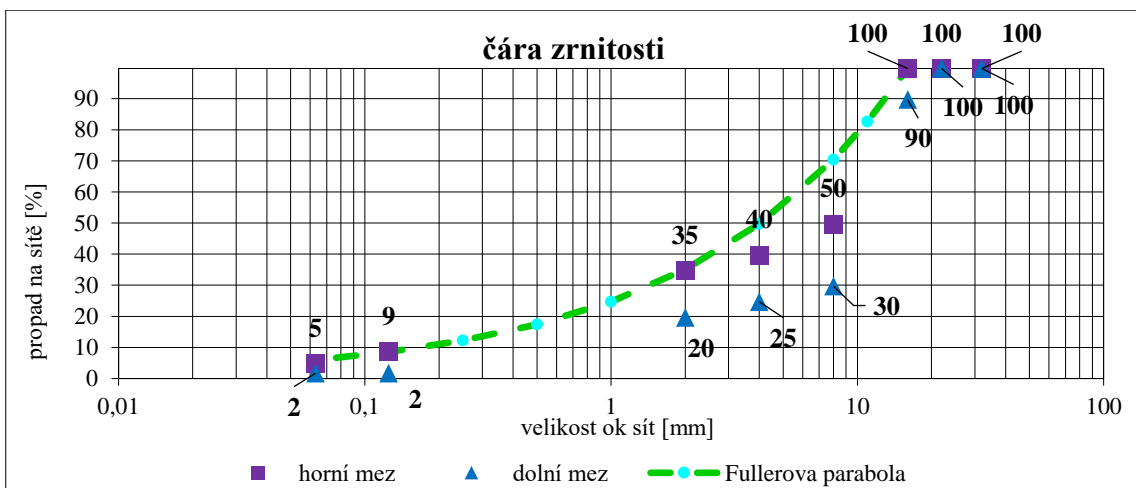
V tabulce 2 jsou vypsány doporučené druhy asfaltových pojiv podle druhu asfaltové směsi a třídy dopravního zatížení. Lze vidět, že pro vyšší třídy dopravního zatížení můžeme použít pouze tvrdší asfaltové pojivo nebo asfaltové pojivo modifikované. Dále jsou zde uvedeny doporučené tloušťky konstrukční vrstvy ACP 16S a ACP 22S.

Označení směsi	Tloušťka vrstev [mm]	Třída dopravního zatížení							
		S	I	II	III	IV	V	VI	CH
ACP 16S	50 - 80	40/60, 50/70, 30/45, 35/50; (PMB 10/40-65, 25/55-55,- 60,-65, 45/80-60)							
ACP 16+				40/60, 50/70, 30/45, 35/50, 70/100					
ACP 22S	60 - 100	40/60, 50/70, 30/45, 35/50; (PMB 10/40-65, 25/55-55,- 60,-65, 45/80-60)							
ACP 22+				40/60, 50/70, 30/45, 35/50, 70/100					

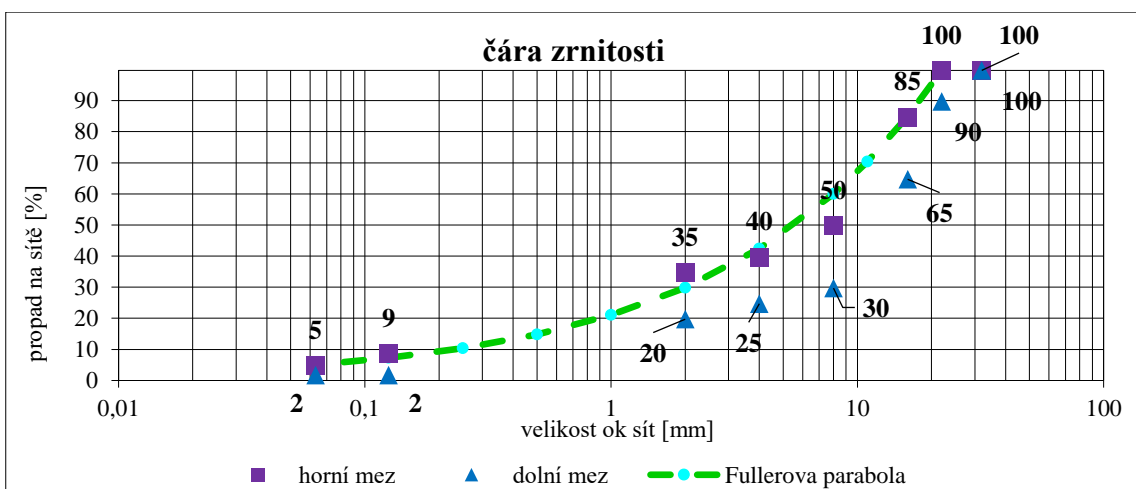
Tabulka 2: Doporučené druhy asfaltových pojiv podle třídy dopravního zatížení [8]

b.) Kritéria návrhu čáry zrnitosti směsi

V následujících grafech lze vidět požadavky na horní a dolní interval zrnitosti ACP. V grafu 3 jsou uvedeny meze pro asfaltovou směs ACP zrnitosti do 16 mm. V grafu 4 jsou uvedeny meze pro asfaltovou směs ACP zrnitosti do 22 mm.



Graf 3: Meze při návrhu čáry zrnitosti ACP 16



Graf 4: Meze při návrhu čáry zrnitosti ACP 22

### 3.1.2 Asfaltová směs pro podkladní vrstvy – typ RBL

Směs označovaná jako RBL (z angl. Rich Bottom Layer) je v zásadě typ asfaltového betonu pro podkladní vrstvy, který má cíleně vyšší obsah asfaltového pojiva, čímž je docílena lepší únavová životnost, a tudíž využitelnost takových vrstev pro vozovku s dlouhou životností. Asfaltové směsi RBL se s úspěchem využívají například v USA, Velké Británii, Francii či Německu. V České republice jsou tyto směsi zatím jen testovány. [10]

RBL označují směsi používané do pokladních vrstev vozovky, které obsahují o min. 0,5 % asfaltového pojiva více než běžné asfaltové betony. Hlavními výhodami těchto směsí jsou:

- vysoká odolnost vůči únavě;
- vysoká trvanlivost/životnost.

Vrstva slouží především k přenášení napětí z dopravního zatížení a k zamezení případů porušení na spodní hraně podkladní vrstvy (vznik únavové trhliny), kdy dochází v krátké době k destrukci zbytku konstrukce. Asfaltová vrstva, se zvýšením obsahu asfaltového pojiva zvyšuje odolnost vůči únavě (energii lépe disipuje), vrstva se stává flexibilnější a snáze přenáší opakovaná zatížení. Vyšší obsah asfaltového pojiva v asfaltové směsi pro podkladní vrstvy má za důsledek jejich vyšší pružnost, ale na druhou stranu může mít částečně zhoršený dopad na odolnost vůči vzniku trvalé deformace. Asfaltové směsi s vyšším obsahem asfaltového pojiva a s nižší mezerovitostí jsou do určité míry náchylnější na vznik trvalých deformací. Z toho důvodu je nezbytné, aby asfaltová vrstva z asfaltové směsi typu RBL byla vždy překryta vrstvami vysoce odolnými vůči trvalé deformaci. [10]

Tyto směsi vycházejí z konceptů ověřených v posledních více jak 20 letech v USA. Pro jejich návrh lze použít jak silniční, tak i modifikovaná asfaltová pojiva (zejm. typu HiMA). V ČR byla funkčnost těchto asfaltových směsí testována na některých zkušebních úsecích (např. silnice I/26, průtah obcí Líně). [10]

### 3.1.3 Směsi typu VMT

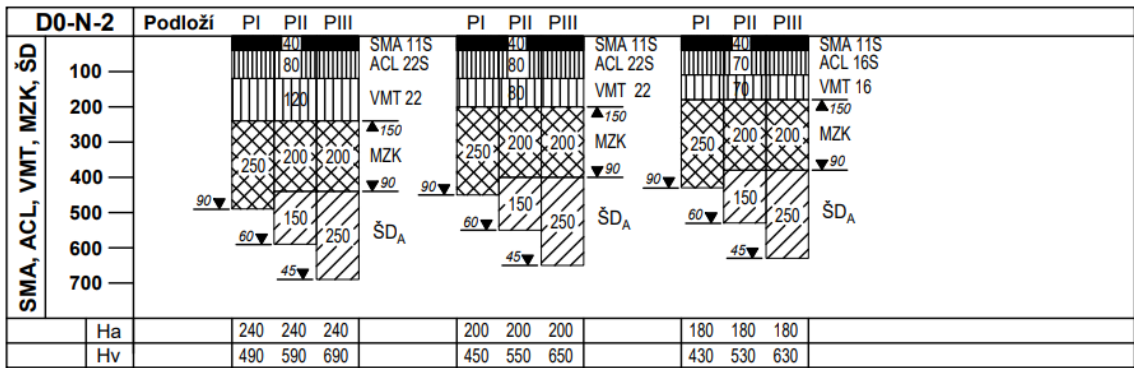
Směsi označované jako VMT (v dříve platném předpisu TP 151 z roku 2001 jako “VMT A“) jsou za horka zpracovávané asfaltové směsi s vysokým modulem tuhosti, s relativně vyšším obsahem asfaltů tvrdších druhů (popř. dalších ztužujících přísad), nízkou mezerovitostí pro podkladní vrstvy a upravenou mezerovitostí pro ložní vrstvy. U těchto druhů směsí je nutné prokázat vlastnosti funkčním způsobem (kombinace všeobecných požadavků a funkčních požadavků) podle koncepce evropských norem pro asfaltové směsi řady ČSN EN 13108. Podle zrnitosti použité směsi kameniva se rozdělují směsi VMT na druhy 0/16 a 0/22. [4]

Směsi s vysokým modulem tuhosti pochází z Francie, kde se hojně využívají do ložních i podkladních vrstev vozovek. Dalšími zeměmi, které se zabývají směsmi s vysokým modulem tuhosti jsou např. Švýcarsko, Velká Británie, Jižní Afrika nebo také Austrálie či Polsko. [12]

Směsi typu VMT lze obecně použít pro podkladní a ložní vrstvy vozovek všech tříd dopravního zatížení. Používají se především na vozovkách s velkým dopravním zatížením (třída dopravního zatížení S, I, II a v úsecích s pomalou a zastavující dopravou), zejména na nestmelených podkladních vrstvách. [4]

Směsi typu VMT jsou význačné použitím tvrdých asfaltů. Proto je na místě do těchto směsí přidávat v co nejvyšší míře R-materiál, který obsahuje zestárlé, tvrdé pojivo. Problémem je, že v ČR jsme limitováni počtem obaloven s paralelním bubnem sloužícím k předehřevu R-materiálu. V ČR se jich nachází pouze 5 (viz tabulka 6). Z toho důvodu jsme reálně schopni přidávat do směsí pouze maximální množství 25 % R-materiálu dávkovaného za studena. Dalším problémem v ČR je skutečnost, že současná legislativa umožňuje použití maximálně 30 % R-materiálu do podkladních vrstev. [4]

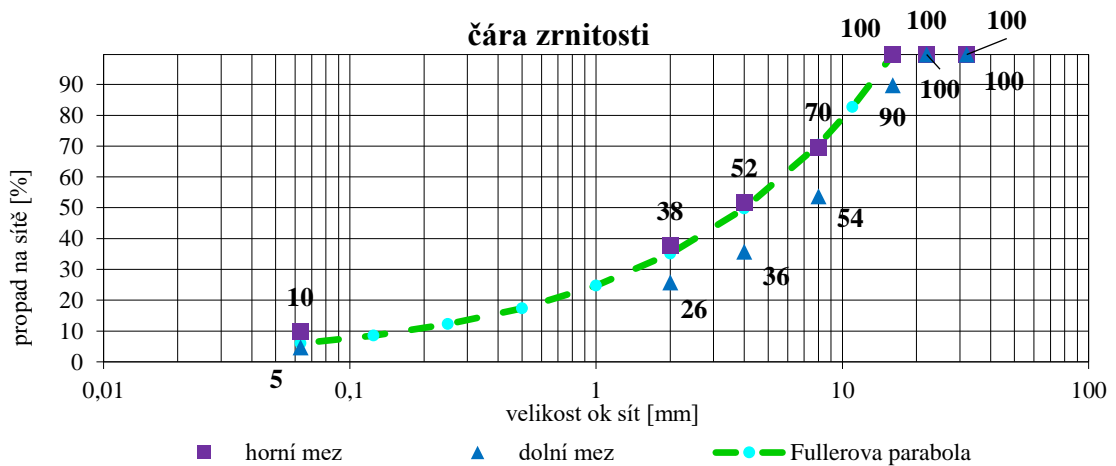
Na obrázku 4 jsou znázorněny příklady použití směsí typu VMT v konstrukcích vozovek dle katalogových listů TP 170.



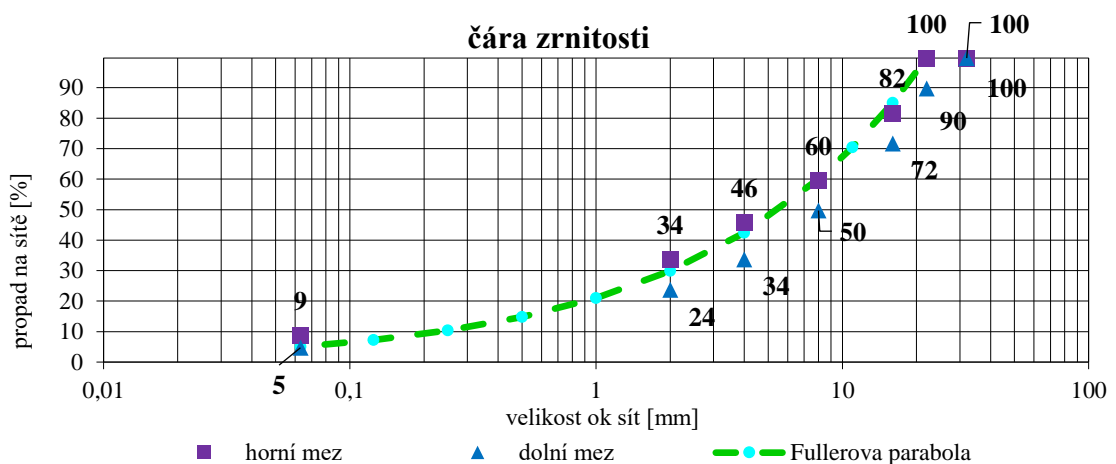
Obrázek 4: Příklad použití směsi VMT z katalogových listů TP170 [9]

Kritéria návrhu čáry zrnitosti směsi:

Směs typu VMT je asfaltová směs s plynulou čarou zrnitosti, která vytváří vzájemně zaklíněnou kostru. Při návrhu čáry zrnitosti musíme věnovat pozornost horní a dolní mezi zrnitosti. V grafu 5 jsou znázorněny požadavky na horní a dolní interval zrnitosti směsi VMT 16. V grafu 6 jsou vykresleny požadavky na zrnitost směsi VMT 22.



Graf 5: Meze při návrhu čáry zrnitosti VMT 16



Graf 6: Meze při návrhu čáry zrnitosti VMT 22

### 3.1.4 Porovnání asfaltových směsí do podkladních vrstev

Porovnání požadavků na asfaltové směsi do podkladních vrstev je znázorněno v tabulce 3. Co se týče všeobecných požadavků, můžeme si všimnout, že největší rozdíl je v mezerovitosti jednotlivých směsí. TP 151 u směsí typu VMT umožňuje minimální mezerovitost 3 %. Stejně je tomu u směsí RBL, které obsahují vyšší množství asfaltového pojiva a tím vznikne směs s nižší mezerovitostí. [10] Maximální mezerovitost u těchto dvou směsí se poté liší o 0,5 %. Naopak norma ČSN EN 13108-1 dovoluje u směsí typu ACP minimální mezerovitost 5 % a maximální 7 %. Dalším rozdílem je příprava zkušebních Marshallových těles sloužících ke stanovení objemové hmotnosti asfaltové směsi. Zatímco počet rázů Marshallova pěchu při hutnění zkušebního tělesa ze směsi VMT je 75 úderů z každé strany, u ostatních uvedených směsí je to 2 x 50 úderů. Tloušťky jednotlivých vrstev jsou prakticky totožné, jen u směsí typu VMT 22 můžeme klást jednu vrstvu v tloušťce až 120 mm.

Při srovnání funkčních požadavků si lze v tabulce 3 povšimnout, že nejpřísnější kritéria na minimální modul tuhosti musí splnit směsi typu VMT. Směs musí vykazovat modul tuhosti vyšší než 9 000 MPa, což je o 2 000 MPa více než požaduje norma ČSN EN 13108-1 pro směsi typu ACP. U směsí typu RBL je požadovaný minimální modul tuhosti 8 000 MPa [10], ale na tuto směs jsou nejvyšší požadavky na odolnost vůči únavě.

	Označení směsi					
	ACP 16	ACP 22	VMT 16	VMT 22	ACP 16 RBL	ACP 22 RBL
<b>Všeobecné požadavky</b>						
Tloušťka vrstvy [mm]	50-80	60-100	50-80	60-120	50-80	60-100
Počet úderů Marshallova pěchu	2x50		2x75		2x50	
Min. mezerovitost $V_{\min}$ [%]	5,0 (4,0)		3,0 (2,5)		3,0 (2,5)	
Max. mezerovitost $V_{\max}$ [%]	7,0 (9,0)		5,0 (6,0)		5,5 (6,5)	
<b>Funkční požadavky</b>						
Min. modul tuhosti $S_{\min}$ [MPa]	7000		9000		8000	
Odolnost vůči únavě $\epsilon_6$	115		125 (135)		130	

Tabulka 3: Srovnání požadavků na asfaltové směsi do podkladních vrstev

Směsi typu VMT jsou charakteristické obsahem tvrdých asfaltů. Proto je na místě do těchto směsí přidávat v co nejvyšší míře R-materiál, který obsahuje právě tvrdý, zestárlý asfalt. Výzkumy prokazují, že přidáním vyššího procenta R-materiálu do směsi typu VMT můžeme získat asfaltovou směs s velmi dobrými vlastnostmi a vysokou

životností. [11] Tento postup hojně využívají v zahraničí, kde např. ve Švýcarsku přidávají do směsí ACE EME 30-60 % R-materiálu bez použití rejuvenátorů [3]. Problémem v ČR je fakt, že legislativa pro směsi typu VMT umožňuje přidání maximálně 30 % R-materiálu do podkladních vrstev. Pokud se pro směsi využije více než 10 % R-materiálu, je ale také zapotřebí, aby zhotovitel doložil technologický předpis na získávání, skladování, úpravu či zkoušení R-materiálu dle požadavků ČSN EN 13108-8 a TP151. [3]

Norma ČSN EN 13108-1 oproti tomu umožňuje přidávat do asfaltových směsí typu ACP až 60 % R-materiálu. Hlavní odlišností oproti směsem typu VMT je nutnost použití rejuvenátorů, tj. látek sloužící k změkčení asfaltu v asfaltové směsi.

V tabulce 4 můžeme vidět maximální legislativou povolené množství přidávaného R-materiálu do asfaltových směsí typu ACP a VMT v ČR.

Typ směsi	Označení směsi	Množství R-materiálu [%]	dle předpisu
ACP	ACP 16S	50	ČSN EN 13108-1
	ACP 16+	60	
	ACP 22S	50	
	ACP 22+	60	
VMT	VMT 16	30	TP 151
	VMT 22		

Tabulka 4: Maximální povolené množství R-materiálu ve směsích

### 3.1.5 Porovnání přístupu v ČR a v zahraničí

Asfaltové směsi s vysokou životností jsou charakteristické vysokým modulem tuhosti a dobrou odolností vůči únavě. Takové směsi se v České republice označují jako směsi typu VMT. Ve Francii nebo Švýcarsku se tyto směsi značí jako EME (z francouzštiny: enrobés bitumineux á module élevé = asfaltová směs s vysokým modulem). Tyto směsi byly poprvé použity ve Francii v polovině 70. let 20. století. [12] Zatímco u nás se do směsí typu VMT přidává maximálně 30 % R-materiálu, ve státech jako jsou Francie nebo Švýcarsko je to až 60 %. Aby bylo možné přimíchat takové množství R-materiálu, je zapotřebí mít obalovnu vybavenou paralelním bubnem. Vysoká pořizovací cena paralelního bubnu v kombinaci s nemožností přimíchat vyšší procento R-materiálu do směsi, kvůli legislativě, jsou důvodem, proč v současnosti v ČR drtivá většina obaloven není vybavena tímto zařízením na předešev R-materiálu.

Ve Francii mohou být směsi EME o maximální zrnitosti 10, 14 a 22 mm Tyto směsi jsou charakteristické vyšším obsahem asfaltového pojiva, tudíž nižší mezerovitostí, než je tomu u českých směsí VMT. Dávkováním vyššího množství pojiva do směsi



dosahují směsi EME lepších funkčních vlastností. [12] Nejprísnejší funkční požadavky jsou ve Francii, a to na směs EME classe 2, kdy asfaltová směs musí vykazovat modul tuhosti přes 14 000 MPa a odolnost vůči únavě  $\epsilon_6$  větší než 130. TP 151 v ČR stanovuje odolnost vůči únavě  $\epsilon_6$  větší než 125 (130 při použití modifikovaných asfaltových pojiv) a modul tuhosti asfaltové směsi větší než 9 000 MPa.

Země	Označení směsi	Moduly tuhosti při 15 °C a 10 Hz [MPa]	Odolnost vůči únavě $\epsilon_6$ při 10 °C a 25 Hz [ $10^{-6}$ ]
Švýcarsko	AC EME 22 C1	$\geq 11\ 000$	$\geq 100$
	AC EME 22 C2	$\geq 14\ 000$	$\geq 130$
Česko	VMT 22	$\geq 9\ 000$	$\geq 125$
	VMT 16	$\geq 9\ 000$	$\geq 125$
Francie	EME classe 1	$\geq 14\ 000$	$\geq 100$
	EME classe 2	$\geq 14\ 000$	$\geq 130$

Tabulka 5: Porovnání funkčních požadavků u nás a v zahraničí [4][5][21]

## 3.2 R-materiál

R-materiál je asfaltová směs, která je dle ČSN EN 13108-8 znovuzískaná frézováním asfaltových vrstev nebo drcením desek vybouraných z asfaltových vozovek nebo velkých kusů asfaltové směsi a asfaltové směsi z neshodné nebo nadbytečné výroby, upravená následně tříděním (případně drcením) a homogenizací, která se přidává do asfaltové směsi. [4]

V případě použití R-materiálu v množství vyšším než 10 % hmotnosti ze směsi kameniva, je zapotřebí, aby zhotovitel předložil objednateli společně se zkouškami typu technologický předpis na získávání, skladování, úpravu a zkoušení R-materiálu dle požadavků ČSN EN 13108-8 a TP151. U použitého R-materiálu musí být zjištěna po extrakci čára zrnitosti kameniva, obsah asfaltu a základní vlastnosti asfaltu. [4]

### 3.2.1 Historie používání R-materiálu do směsí vyráběných za horka

Již v 70. a dále 80. letech 20. století bylo financováno několik výzkumných programů zaměřujících se na problematiku výroby směsí s R-materiálem. V USA došlo také k provedení několika zkušebních úseků s použitím vysokého obsahu R-materiálu, většinou okolo 50 % až 70 %. 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. Mnohdy nedošlo ani ke splnění volumetrických parametrů, které byly

kladeny na konvenční směsi. Následkem toho docházelo u takových směsí k předčasnému výskytu poruch a celkové degradaci. Tyto zkušební úseky musely být brzy sanovány použitím konvenčních asfaltových směsí. Souhra těchto okolností vedla k výraznému omezení použití vyššího podílu R-materiálu, kdy bylo maximální přidávané množství sníženo na 10 % až 25 % hmotnosti směsi v závislosti na státu, kde probíhala pokládka. V některých státech přetrvává takto striktní omezení dodnes, přestože technologie výroby a zpracování materiálů se v posledních letech významně posunuly. S rozvojem technologického vybavení obaloven byla umožněna výroba směsí s obsahem až 100 % R-materiálu, jejichž vlastnosti jsou srovnatelné se směsmi konvenčními. Například New York City Department of Transportation (NYCDOT) umožnil ve svých předpisech používat pro městské komunikace ve státě New York směsi obsahující 100 % R-materiálu již v roce 2015. V Evropě se zdá být nejdále v tomto směru spolková země Hamburk (SRN), kde byly konstruovány zkušební úseky s obsahem R-materiálu až 90 % [13].

### 3.2.2 Použití R-materiálu v nově vyráběných asfaltových směsích

V tabulce 6 jsou znázorněny možnosti přidání upraveného R-materiálu do nově vyráběných asfaltových směsí. Můžeme si všimnout, že do podkladních vrstev je možné dávkovat R-materiál získaný z jakékoliv asfaltové vrstvy kromě litého asfaltu.

R-materiál získaný z:	Použití do nově vyráběných směsí pro:			
	Litý asfalt	Asfaltová obrusná vrstva	Asfaltová ložní vrstva	Asfaltová podkladní vrstva
Litého asfaltu	ANO	NE	NE	NE
Asfaltové obrusné vrstvy <sup>a</sup>	ANO	ANO	ANO	ANO
Asfaltové obrusné a ložní vrstvy	ANO	NE <sup>b</sup>	ANO	ANO
Asfaltové obrusné a ložní vrstvy s modifikovaným pojivem	ANO	ANO	ANO	ANO
Asfaltové ložní vrstvy <sup>a</sup>	NE	NE <sup>b</sup>	ANO	ANO
Asfaltové podkladní vrstvy <sup>a</sup>	NE	NE	NE <sup>b</sup>	ANO
Asfaltové obrusné, ložní a podkladní vrstvy – neselektivní frézování	NE	NE	NE <sup>b</sup>	ANO

<sup>a</sup> Jedná se o materiál selektivně vyfrézovaný a po přetřídění a předrcení skladovaný vždy jako samostatný R-materiál

<sup>b</sup> Platí při použití směsi pro komunikace kategorie D, R a silnice I. třídy. V ostatních případech platí „ANO“.

Tabulka 6: Možnosti přidání upraveného R-materiálu do nově vyráběných směsí [14]

### 3.2.3 Získávání R-materiálu

R-materiál se nejčastěji získává frézováním nebo vybouráním asfaltových vrstev konstrukcí vozovek při rekonstrukcích a opravách. Dále je možno využít asfaltových směsí z neshodné nebo nadbytečné výroby. [14]

#### 3.2.3.1 Frézování

Jedná se o proces rozpojení konstrukčních vrstev ocelovými hroty silniční frézy. Frézování vrstev vozovek se provádí za studena pomocí silničních fréz. Obrusné vrstvy vozovek obsahující modifikovaný asfalt je vhodné frézovat samostatně a vyfrézovanou znovuzískanou asfaltovou směs odvážet a skladovat odděleně. Informace o tom, že bude frézována vrstva obsahující modifikovaný asfalt, musí být v předstihu zhotoviteli sdělena objednatelům před naceněním stavebních prací. V případě že není zvoleno selektivní frézování, dojde k znehodnocení nejkvalitnějšího materiálu použitého v obrusných vrstvách. Z tohoto důvodu se vyfrézovaný R-materiál používá do méně kvalitních ložních a podkladních vrstev, nikoliv do vrstev obrusných. [14][15]

Hloubku frézování ostatních vrstev vozovek je nutné volit na základě výsledků diagnostického průzkumu s ohledem na možnost získání kvalitního stavebního materiálu typu R-materiál z vrstev krytů s minimálním obsahem znečišťujících příměsí (beton) a vyloučením málo vhodných starých asfaltových podkladních vrstev.

Pro dálnice, silnice I. třídy a místní komunikace I. třídy je vhodné provádět frézování po vrstvách.

Silniční frézy se dělí především dle šířky frézovacího válce na frézy:

- malé - šířka válce do 500 mm, záběrová hloubka < 100 mm;
- střední – šířka válce 500-1000 mm, záběrová hloubka do 180 mm;
- velké – šířka válce nad 1000 mm, záběrová hloubka do 350 mm;
- speciální – šířka válce do 350 mm, záběrová hloubka je až 100 mm. [15]



Obrázek 5: Silniční fréza Wirtgen W200 [16]

### 3.2.3.2 Vybourání

Proces vybourání se provádí bouracími stroji. Aby bylo možné znovu použít R-materiál z vybouraných vozovek, musí se zvlášť bourat asfaltové vrstvy a zvlášť vrstvy nestmelené. Získaný R-materiál se musí následně podrtit a přetřídit.

### 3.2.4 Skladování R-materiálu

Skladování R-materiálu má velký vliv na jeho kvalitu a tím i na kvalitu výsledné asfaltové směsi. Znovuzískanou asfaltovou směs, která obsahuje polymerem modifikovaný asfalt, je vhodné skladovat odděleně. Dále je velmi důležité skladovat R-materiál v zastřešených prostorách, aby nedocházelo ke zvýšení vlhkosti materiálu vlivem deště. Zastřešením skládky R-materiálu si ušetříme náklady na jeho vysušení. Na obrázcích 6 a 7 můžeme vidět rozdílné přístupy ke skládkování R-materiálu v ČR a ve Švýcarsku. Jedná se o nezastřešenou skládku firmy COLAS CS, a.s. na obalovně Holubice a prostory zastřešené haly na R-materiál na obalovně Hinwil poblíž Curychu (Švýcarsko). Zastřešením můžeme docílit zvýšení kvality R-materiálu (především výrazného snížení vlhkosti), tedy i asfaltové směsi, do které je tento materiál přimíchán.



Obrázek 6: Špatné skládkování R-materiálu v ČR (vlevo)

Obrázek 7: Zastřešená skládka R-materiálu v Curychu – Švýcarsko (vpravo)

### 3.3 Recyklace v míchacím centru za horka

Recyklace se dají rozdělit podle místa provádění recyklace nebo podle teploty provádění.

a.) dle místa provádění

- **v míchacím centru (in plant) - obalovna;**
- na místě (in place)

b.) dle teploty provádění

- za studena
- **za horka**

V mojí diplomové práci se budu zabývat pouze recyklací v míchacím centru za horka. Je to nejefektivnější způsob zpracování R-materiálu. Podle způsobu dávkování R-materiálu se dá rozdělit na metody:

- dávkování přímo do míchačky šaržové obalovny;
- předehřívání R-materiálu v paralelním bubnu;
- metoda Drum-mix.

První dvě metody se týkají šaržové obalovny, zatímco metoda Drum-mix je zaměřena na obalovny kontinuální. V ČR se nacházejí výhradně obalovny šaržové, v kterých se dá průběžně měnit receptura připravované směsi, což kontinuální obalovna nenabízí. Obalovny kontinuální jsou záležitostí především USA.

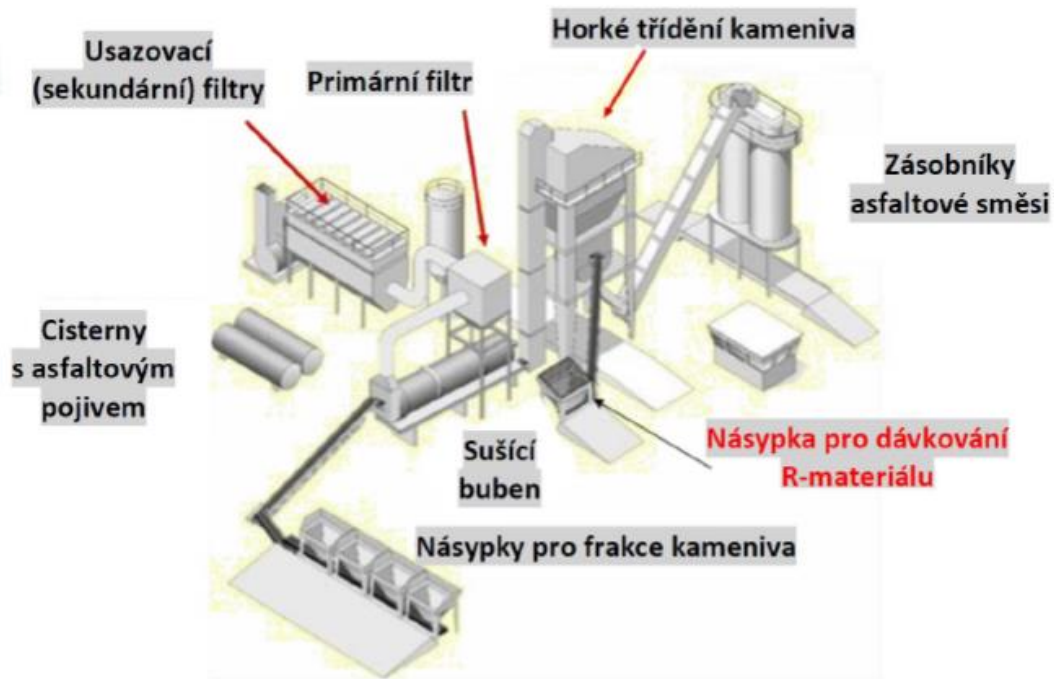
#### 3.3.1 Dávkování přímo do míchačky šaržové obalovny

V ČR je registrovaných 106 šaržových obaloven asfaltových směsí, z toho 95 % obaloven není vybaveno paralelním bubnem na předehřívání R-materiálu. Dávkování

přímo do míchačky je tak nejpoužívanější způsob přidávání R-materiálu při míchání. Při této metodě je možné přimíchat do směsi maximálně 25 % R-materiálu. Většinou se jedná o R-materiál frakce 0/11 nebo 0/16.

Problémy při dávkování za studena:

- nutnost předehřívat kamenivo na vyšší teplotu – vyšší náklady;
- problémy s vlhkostí – nutnost cyklu odvětrávání;
- složitá možnost použití rejuvenačních přísad.



Obrázek 8: Schéma šaržové obalovny bez paralelního bubnu [17]

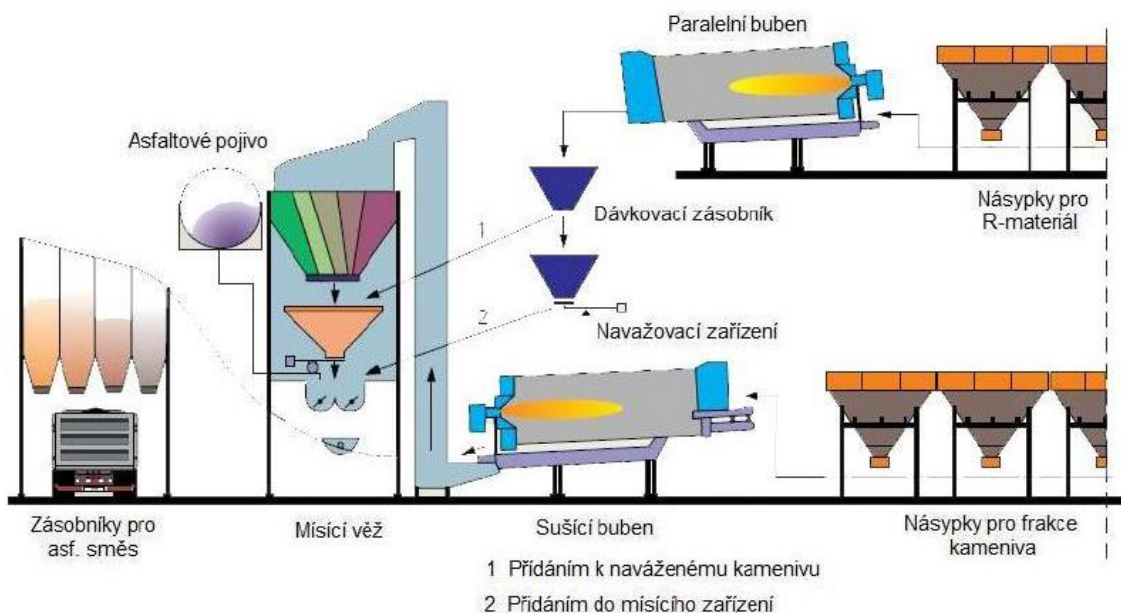


Číslo	Název	Číslo	Název
1	BERGER BOHEMIA a.s. -Nová Hospoda	52	SILASFALT s.r.o.- Česká u Brna
2	BES s.r.o.- obalovna Chotýšany	53	SILASFALT s.r.o.- Kunčice
3	BES s.r.o.- obalovna Lichovy	54	SILASFALT s.r.o.- Smolín u Pohořelic
4	Brněnská obalovna s.r.o.- Chrlice	55	SILASFALT s.r.o.- Šenov u Nového Jičína
5	Brněnská obalovna s.r.o.- Ivanovice	56	SILASFALT s.r.o.- Valašské Meziříčí
6	COLAS CZ, a.s. - Bašnice	57	SILASFALT s.r.o.- Zádveřice u Zlína
7	COLAS CZ, a.s. - Bradlec	58	SILNICE ČÁSLAV - HOLDING, a.s. - Chleby
8	COLAS CZ, a.s. - Bystřice nad Pernštejnem	59	SILNICE ČÁSLAV - HOLDING, a.s. - Markovice
9	COLAS CZ, a.s. - Čenkov	60	SILNICE GROUP a.s.
10	COLAS CZ, a.s. - Holubice	61	Silnice Horšovský Týn a.s. - Valdorf
11	COLAS CZ, a.s. - Chuchelna	62	SILNICE MORAVA s.r.o. - Štěplovec
12	COLAS CZ, a.s. - Rančířov	63	Silnice Žáček s.r.o.
13	COLAS CZ, a.s. - Sedlnice	64	Skanska Asfalt s.r.o. - České Budějovice
14	COLAS CZ, a.s. - Soutice	65	Skanska Asfalt s.r.o. - Huntířov
15	COLAS CZ, a.s. - Sudoměřice u Bechyně	66	Skanska Asfalt s.r.o. -Pardubice
16	COLAS CZ, a.s. - Tasovice	67	Skanska Asfalt s.r.o. - Paskov
17	EKOSTAVBY Louny s.r.o.	68	Skanska Asfalt s.r.o. -Polička
18	EUROVIA CS, a.s. - Dalovice	69	Skanska Asfalt s.r.o. -Poříčany
19	EUROVIA CS, a.s. - Černovice	70	Skanska Asfalt s.r.o. - Tlumačov
20	EUROVIA CS, a.s. - Klecany	71	Společné obalovny, s.r.o. - Běchovice
21	EUROVIA CS, a.s. - Úžín	72	Společné obalovny, s.r.o. - Hulín
22	HERKUL a.s.	73	STRABAG Asfalt s.r.o. - Soběslav
23	Hrušecká obalovna, s.r.o.	74	STRABAG Asfalt s.r.o.- Hájký
24	Chebská obalovna, spol. s r.o.	75	STRABAG Asfalt s.r.o.- Havlíčkův Brod
25	JIHOČESKÁ OBALOVNA, spol. s r.o.	76	STRABAG Asfalt s.r.o.- Jílové u Držkova
26	Jihomoravská obalovna s.r.o.	77	STRABAG Asfalt s.r.o.- Kasárna
27	LIBERECKÁ OBALOVNA, s.r.o.	78	STRABAG Asfalt s.r.o.- Kylešovice
28	LIBERECKÁ OBALOVNA, s.r.o.	79	STRABAG Asfalt s.r.o.- Moravský Písek
29	M-SILNICE a.s.	80	STRABAG Asfalt s.r.o.- Písečná
30	M-SILNICE a.s.	81	STRABAG Asfalt s.r.o.- Písek
31	M-SILNICE a.s.	82	STRABAG Asfalt s.r.o.- Polanka
32	Obalovna Boskovice, s.r.o.	83	STRABAG Asfalt s.r.o.- Proboštov
33	Obalovna Havlíčkův Brod s.r.o.	84	STRABAG Asfalt s.r.o.- Rájec
34	Obalovna Chvaletice a.s.	85	STRABAG Asfalt s.r.o.- Sokolov
35	OBALOVNA LETKOV, spol. s r.o.	86	STRABAG Asfalt s.r.o.- Stašov
36	Obalovna Lipník s.r.o.	87	STRABAG Asfalt s.r.o.- Šlovice u Plzně
37	Obalovna Louny s.r.o.	88	STRABAG Asfalt s.r.o.- Těšovice
38	Obalovna Ostrava s.r.o.	89	STRABAG Asfalt s.r.o.- Travčice
39	Obalovna Příbram, s.r.o. - Bytíz	90	STRABAG Asfalt s.r.o.- Velká Bystřice
40	Obalovna Středokluky s.r.o.	91	STRABAG Asfalt s.r.o.- Vysoké Mýto
41	Obalovna Tábor s.r.o. - Smyslov	92	Strakonická obalovna s.r.o. - Sousedovice
42	Obalovna Třebovice	93	Strojírny a stavby Trinec, a.s.
43	Obalovna Týniště s.r.o.	94	STŘEDOČESKÉ OBALOVNY, a.s. - Voznice
44	Olomoucká obalovna Hněvotín, s.r.o.-Hněvotín	95	SWIETELSKY stavební s.r.o. - Jindřichův Hradec
45	Olomoucká obalovna Hněvotín, s.r.o. - Jihlava	96	SWIETELSKY stavební s.r.o. - Kájov
46	OMT-Obalovna Moravská Třebová, s.r.o.	97	SWIETELSKY stavební s.r.o. - Vysočina
47	PORR a.s. - obalovna Běchovice	98	USK s.r.o.
48	PORR a.s. - obalovna Středokluky	99	VČO - Východočeská obalovna, s.r.o.-Hradec Králové
49	POZEMNÍ KOMUNIKACE BOHEMIA, a.s.		
50	SaM silnice a mosty a.s., Česká Lípa	100	VIALIT SOBĚSLAV spol. s r.o.
51	SČO s.r.o. - obalovna Libodřice	101	Západočeská obalovna s.r.o.

Tabulka 7: Šaržové obalovny v ČR bez paralelního bubnu [18]

### 3.3.2 Předehřívání R-materiálu v paralelním bubnu

Využití technologie předehřátí v paralelním bubnu výrazně zvyšuje množství R-materiálu, z něhož je z části tvořena výsledná asfaltová směs. Díky separátnímu ohřátí R-materiálu v paralelním bubnu není nutno zahřívát kamenivo na vysokou teplotu pro dosažení teploty míchání, a tudíž je možné dávkovat vyšší množství R-materiálu. Toto řešení dovoluje přidávat R-materiál až do množství 80 % z výsledné hmotnosti směsi. Maximální teplota zahřívání R-materiálu je cca. 135 °C. Takto ohřátý R-materiál poté putuje do samostatného zásobníku, odkud je navažován a dávkován přímo do míchačky obalovny. Kromě snížení teploty kameniva a zvýšení procentuálního podílu R-materiálu ve směsi odpadá také nutnost intenzivního odvětrávání. Jednou z další obrovských výhod použití R-materiálu je jeho 100 % zpracovatelnost. To znamená, že veškerý R-materiál získaný z asfaltového povrchu lze znovu, bezzbytku využít. [19]



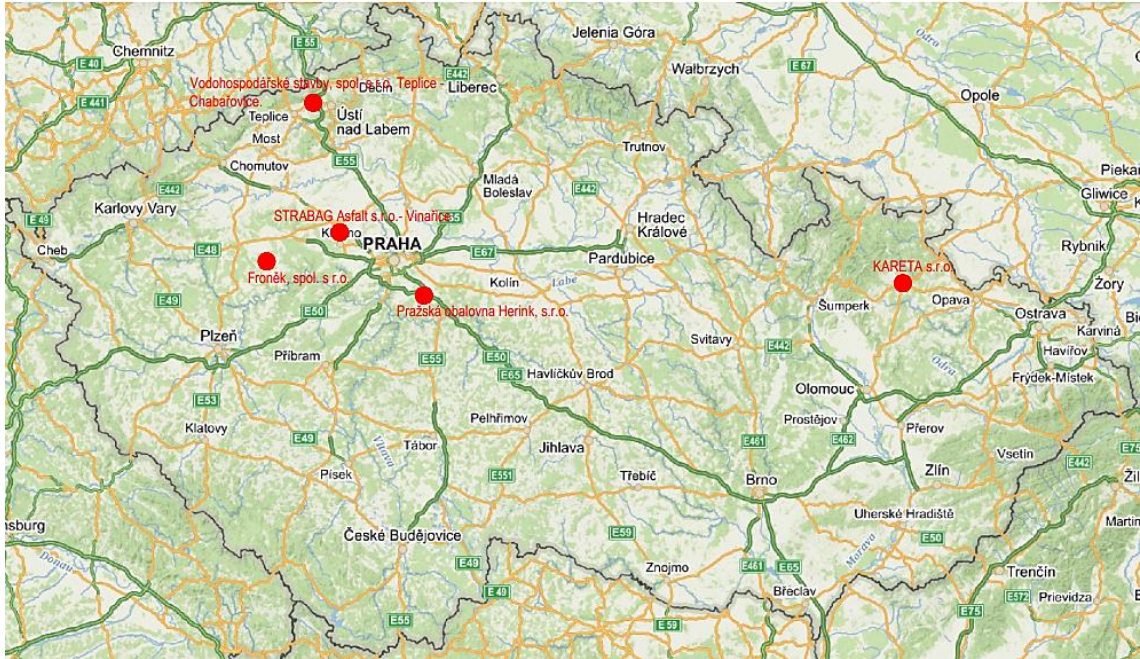
Obrázek 9: Schéma šaržové obalovny s paralelním bubnem [20]

V České republice se nachází 5 obaloven vybavených paralelním bubnem na předehřev R-materiálu, což tvoří necelých 5 % z celkového počtu 106 obaloven.

Číslo	Název	Paralelní bubne
1	Froněk, spol. s r.o.	ANO
2	KARETA s.r.o.	ANO
3	Pražská obalovna Herink, s.r.o.	ANO
4	STRABAG Asfalt s.r.o.- Vinařice	ANO
5	Vodohospodářské stavby, spol. s r.o. Teplice – Chabařovice	ANO

Tabulka 8: Šaržové obalovny v ČR vybaveny paralelním bubnem [18]

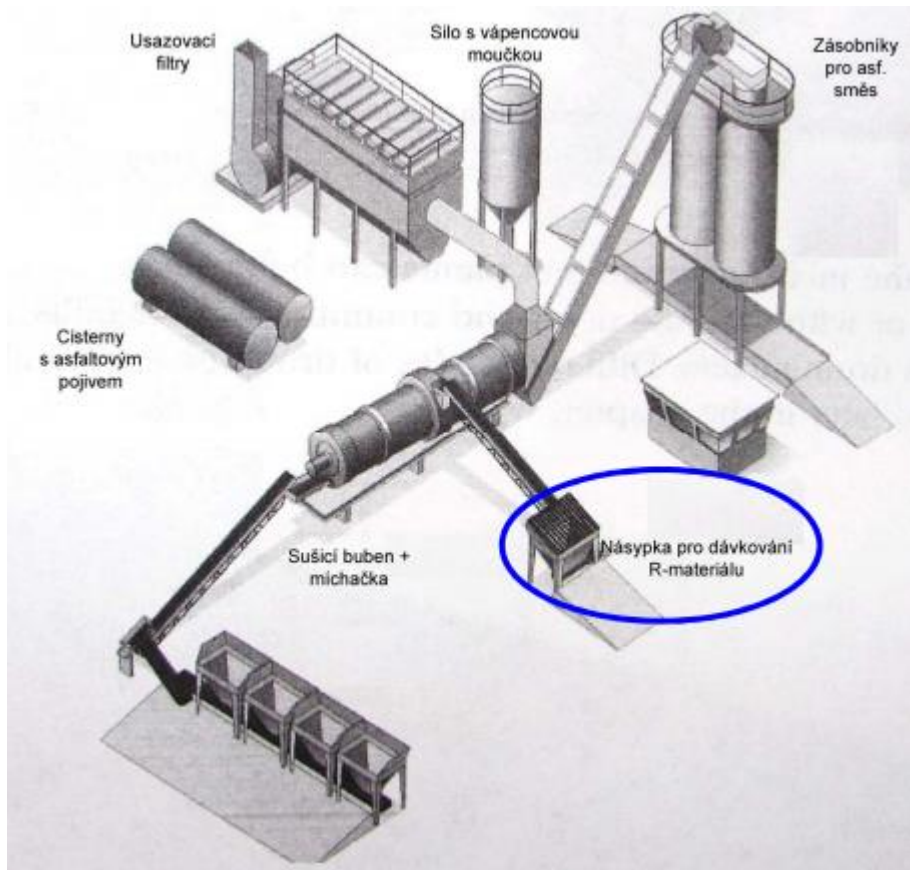




Obrázek 10: Mapa šaržových obaloven v ČR vybavených paralelním bubnem

### 3.3.3 Metoda Drum-mix

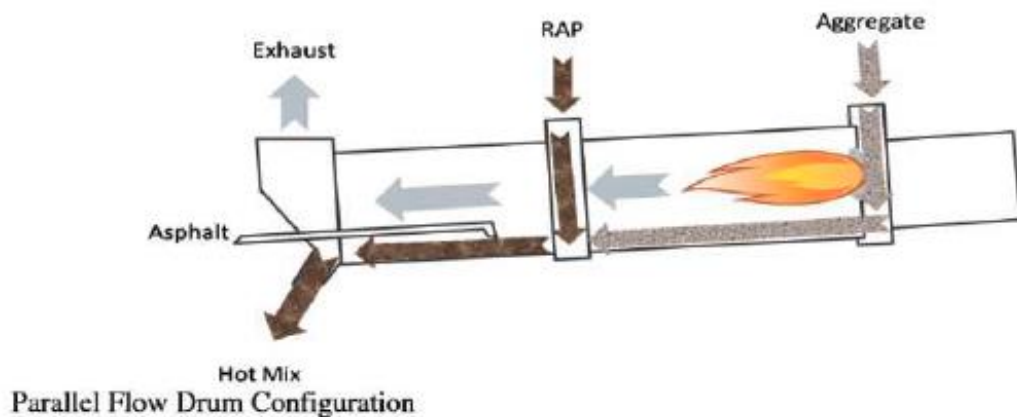
Pro doplnění uvádím i metody, které se týkají využití R-materiálu v kontinuálních obalovnách. Tato metoda přidávání R-materiálu se především používá v USA, kde převažují kontinuální obalovny nad šaržovými. Hlavním rozdílem od předchozích metod je způsob dávkování a ohřívání R-materiálu a samotné asfaltové směsi. Vše se odehrává v sušícím bubnu kontinuální obalovny, který slouží i jako ohřívací bubnen a míchací zařízení. Odtud již putuje připravená asfaltová směs do zásobníků.



Obrázek 11: Schéma kontinuální obalovny [20]

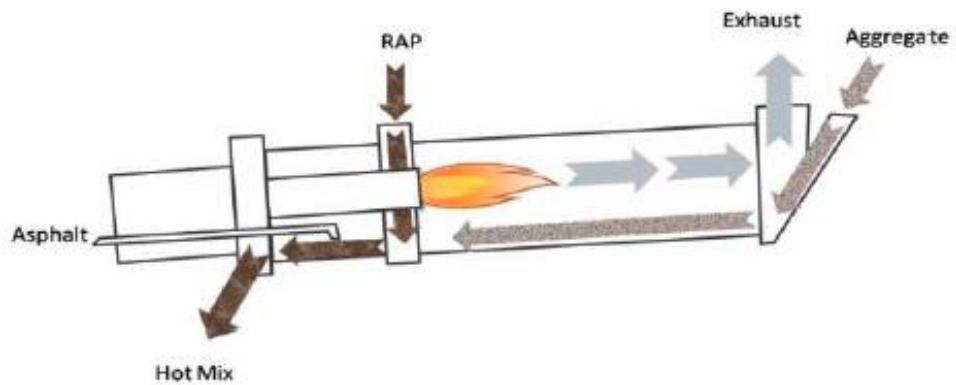
U metody Drum-mix je nutnost zajistit konstantní kvalitu vstupních materiálů. Tuto metodu můžeme rozdělit podle způsobu přidávání R-materiálu na:

- přidávání R-materiálu souběžně s proudem horkého vzduchu;



Obrázek 12: Přidávání R-materiálu s proudem horkého vzduchu [19]

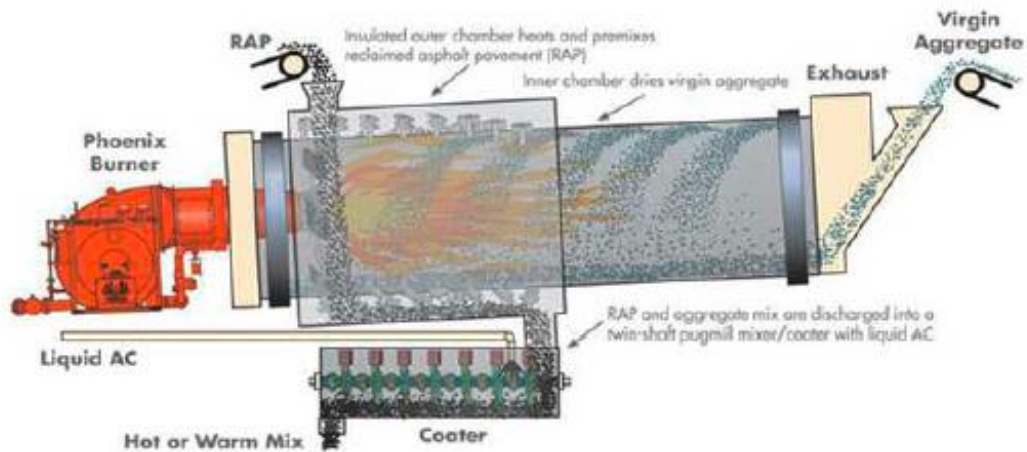
- přidávání R-materiálu proti proudu horkého vzduchu;



#### Counter Flow Drum Configuration

Obrázek 13: Přidávání R-materiálu proti proudu horkého vzduchu [19]

- separátní vysoušení R-materiálu, míchání v míchačce.



Obrázek 14: Separátní vysoušení R-materiálu [19]



### 3.4 Použité zkušební metody

V této části diplomové práce jsou popsány zkušební metody použité při návrhu, výrobě a zkoušení asfaltových směsí.

#### 3.4.1 Sítový rozbor

Tato zkouška se provádí podle normy ČSN EN 933-1+A1 [22] Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor. Tato norma uvádí postup pro stanovení zrnitosti kameniva pomocí zkušebních sít. Používá se pro kameniva do jmenovité velikosti zrn 63 mm. Po prosetí kameniva prosévacím přístrojem se jednotlivé zbytky na sítích zváží a stanoví se procentuální zůstatek na sítích.

Pomocí sítového rozboru byla stanovena zrnitost jednotlivých frakcí kameniva a zrnitost kameniva z R-materiálu po extrakci asfaltového pojiva. Použité kamenivo je frakce 0/4, 4/8, 8/11, 8/16, 11/22 a vápencová moučka. R-materiál pro moji diplomovou práci je do zrnitosti 22 mm. Zrnitosti materiálů pro diplomovou práci byly převzaty již z vyhotovených sítových rozborů kameniv, které byly provedeny v rámci předchozích výzkumů v centru AdMaS. Výsledkem sítového rozboru je čára zachycující propady na jednotlivých sítích, tj. čára zrnitosti kameniva.



Obrázek 15: Prosévací přístroj

### 3.4.2 Stanovení penetrace jehlou

Zkouška stanovení penetrace jehlou byla provedena podle normy ČSN EN 1426 [23] Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou. Tato evropská norma specifikuje metodu na stanovení konsistence asfaltů a asfaltových pojiv.

Zkoušku jsem provedl pomocí penetrometru a penetrační jehly. Na začátku jsem nahřál asfaltová pojiva v laboratorní sušárně na teplotu 80 °C. Po důkladném promíchání jsem asfaltová pojiva rozlil do zkušebních misek a nechal vychládnout. Vzorky asfaltového pojiva jsem nechal 2 hodiny temperovat ve vodní lázni o teplotě  $25 \pm 0,15$  °C. Poté jsem vzorek přesunul do penetrometru. Zde jsem umístil penetrační jehlu a její hrot přiblížil k povrchu asfaltového pojiva. Při spuštění zkoušky působí penetrační jehla na asfaltové pojivo hmotností 100 g po dobu 5 s. Měří se hloubka vniknutí penetrační jehly do asfaltového pojiva. Na každém vzorku jsem tuto zkoušku provedl třikrát, přičemž se jednotlivá měření nesmí od sebe lišit o více než 2 penetrační jednotky.

Celkem jsem stanovil penetraci jehlou na 3 asfaltových pojivech a to na:

- polymerem modifikovaném asfaltovém pojivu (PMB) 10/40-65;
- asfaltu gradace 20/30;
- asfaltu 20/30 modifikovaném pryžovým granulátem (CRMB).



Obrázek 16: Penetrometr a vodní lázeň

### 3.4.3 Stanovení bodu měknutí metodou kroužek kulička

Tato zkouška byla provedena podle normy ČSN EN 1427 [24] Asfalty a asfaltová pojiva – Metoda kroužek kulička. Tato evropská norma specifikuje metodu na stanovení bodu měknutí asfaltu a asfaltových pojiv v rozmezí od 28 °C do 150 °C.

Nejprve jsem si asfaltové pojivo zahřál a rozlil do mosazných kroužků předepsaných rozměrů. Po vychladnutí jsem horkou špachtlí seřízl přebytek asfaltového pojiva z hrany kroužku. Takto připravený vzorek jsem temperoval na teplotu 5 °C a poté jej umístil do přístroje na stanovení bodu měknutí. Jako lázeň v přístroji byla použita odvzdušněná voda. Po spuštění zkoušky se začnou vzorky v odvzdušněné vodě zahřívat rychlostí 5 °C/min.

Výsledkem této zkoušky je teplota, při které ocelová kulička obalená asfaltovým pojivem propadne na vzdálenost ( $25 \pm 0,4$ ) mm. Stanovuje se zvláště teplota pro pravou, a zvláště pro levou kuličku. Z těchto teplot se spočítá výsledná průměrná teplota bodu měknutí.

Celkem jsem stanovil bod měknutí na 3 asfaltových pojivech a to na:

- polymerem modifikovaném asfaltovém pojivu (PMB) 10/40-65;
- asfaltu gradace 20/30;
- asfaltu 20/30 modifikovaném pryžovým granulátem (CRMB).



Obrázek 17: Asfaltové pojivo PMB 10/40-65 před stanovením bodu měknutí





Obrázek 18: Silniční asfalt gradace 20/30 před stanovením bodu měknutí



Obrázek 19: Asfaltové pojivo CRMB před stanovením bodu měknutí



Obrázek 20: Přístroj na stanovení bodu měknutí a protažené pojivo po zkoušce

### 3.4.4 Laboratorní výroba směsi

Laboratorní výroba asfaltové směsi byla provedena podle normy ČSN EN 12697-35+A1 [25] Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 35: Laboratorní výroba směsi. V této evropské normě je popsáno laboratorní mechanické nebo ruční míchání asfaltových směsí pro výrobu zkušebních těles. V normě jsou také stanoveny jednotlivé teploty míchání, které jsou závislé na gradaci silničního asfaltového pojiva.

Potřebné frakce kameniva a R-materiál jsem si odsypal do pekáčů. Kamenivo v pekáčích jsem vložil do laboratorní sušárny vytemperované na 110 °C. R-materiál jsem nechal vysušit zvláště při teplotě 50 °C. Vysušené kamenivo jsem navázil na zkušební navážky potřebné pro vytvoření nové směsi.

Před mícháním asfaltových směsí bylo nutné spočítat teplotu, při které se bude ohřívat kamenivo. Vzhledem ke skutečnosti, že byl R-materiál dávkován za studena, muselo být kamenivo nahříváno na vysoké teploty.

SMĚS A: Teplota míchání asfaltové směsi A byla 175 °C. Této teplotě míchání odpovídala teplota použitého asfaltového pojiva PMB (10/40-65). Protože byl R-materiál přidáván zastudena, musel jsem kamenivo nahřát na teplotu 225 °C.

SMĚS B: Byl použit tvrdý silniční asfalt 20/30, do kterého bylo přimícháno 13 % pryžového granulátu. Teplota míchání asfaltové směsi B byla 180 °C. Z důvodu přimíchání R-materiálu zastudena, muselo být kamenivo nahřáto na 230 °C.

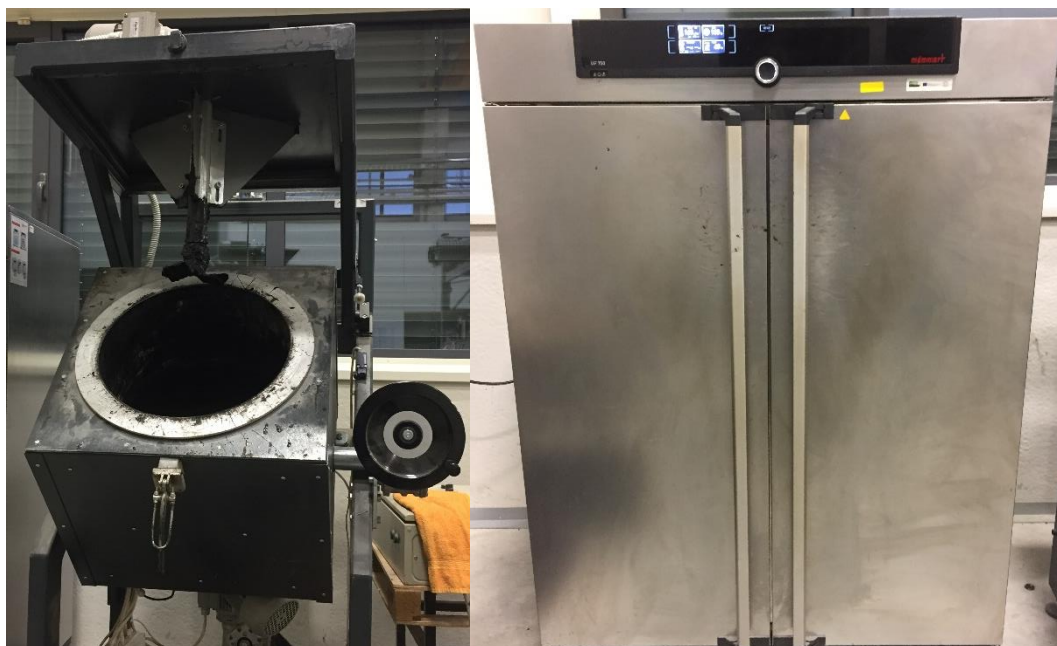
Ruční míchání jsem prováděl pomocí špachtle, dokud nebyla všechna zrna kameniva dokonale obalena asfaltovým pojivem. Ručně jsem míchal asfaltovou směs, ze které jsem si vytvořil zkušební Marshallova tělesa pro stanovení objemové hmotnosti směsi a navážky pro stanovení maximální objemové hmotnosti pomocí pyknometrů.

Laboratorní strojní míchačku jsem použil pro namíchání výsledných asfaltových směsí. Z takto namíchaných směsí jsem pomocí zhuťovače vyráběl zkušební desky. Každé míchání asfaltové směsi ručně i laboratorní míchačkou trvalo do max. 5 min.

Označení směsi	Použité asfaltové pojivo	Teplota míchání [°C]	Teplota kameniva [°C]	Teplota asfaltového pojiva [°C]	Teplota dávkovaného R-materiálu [°C]
A	PMB 10/40-65	175	225	175	25
B	CRMB	180	230	180	25

Tabulka 9: Teploty míchání a ohřevu pro vyráběné asfaltové směsi

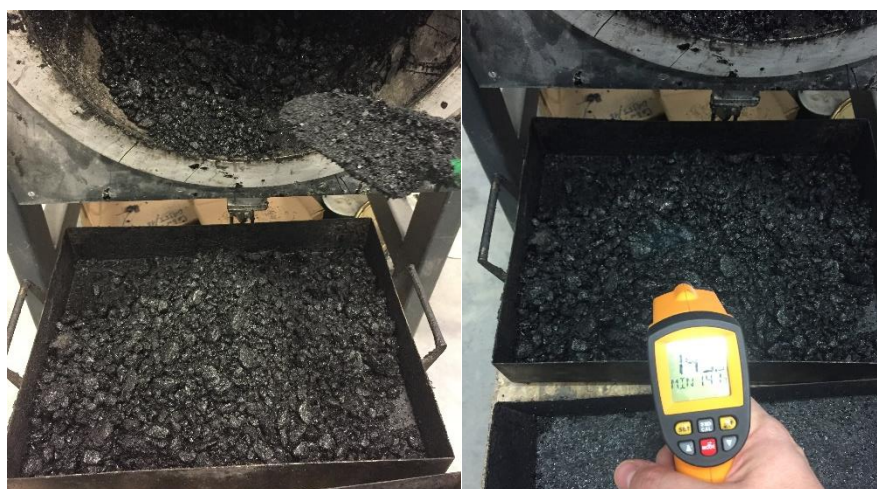




Obrázek 21: Laboratorní míchačka a pec



Obrázek 22: Ručně namíchaná asfaltová směs



Obrázek 23: Asfaltová směs namíchaná v laboratorní míchačce

### 3.4.5 Hutnění zkušebních těles rázovým zhutňovačem

Tato zkušební metoda byla provedena podle normy ČSN EN 12697-30+A1 [26] Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem. V této evropské normě najdeme popis metody výroby zkušebních těles asfaltových směsí pomocí rázového zhutňovače. Tělesa vytvořená rázovým zhutňovačem jsou nejčastěji používána pro stanovení objemové hmotnosti a jiných technologických charakteristik. Tato tělesa nazýváme Marshallova. Tato norma se vztahuje na asfaltové směsi s kamenivem o zrnitosti do 22,4 mm.

Zkušební (Marshallova) tělesa musí mít tvar válce o průměru  $(101,6 \pm 0,1)$  mm a výšku  $(63,5 \pm 2,5)$  mm.

Ručně namíchanou asfaltovou směs jsem zahřál na teplotu hutnění. Teplota hutnění byla stanovena pro směs A na 160 °C a pro směs B na 165 °C. Takto zahřátou asfaltovou směs jsem vsypával do ocelové formy, kterou jsem také nahřál v laboratorní peci. Plnění formy jsem prováděl po třetinách, kdy jsem po každém vsypání urovnal povrch směsi ve formě špachtlí. K hutnění jsem využil rázový zhutňovač, umístěný v silniční laboratoři výzkumného centra AdMaS v Brně. Hutnění jsem provedl 2 x 75 úderů, jak přikazují technické podmínky TP151. Pěch zhutňovače padá na povrch vzorku z výšky  $(457 \pm 5)$  mm. Po zhutnění jsem nechal zkušební vzorek vychladnout a následně jsem jej pomocí výtlačného zařízení vytlačil z formy. Na vytlačeném vzorku jsem ověřil, zda má požadované rozměry.

Celkem jsem v laboratoři vyrobil 4 Marshallova tělesa ze směsi A, a 13 Marshallových těles ze směsi B (viz tabulka 10).

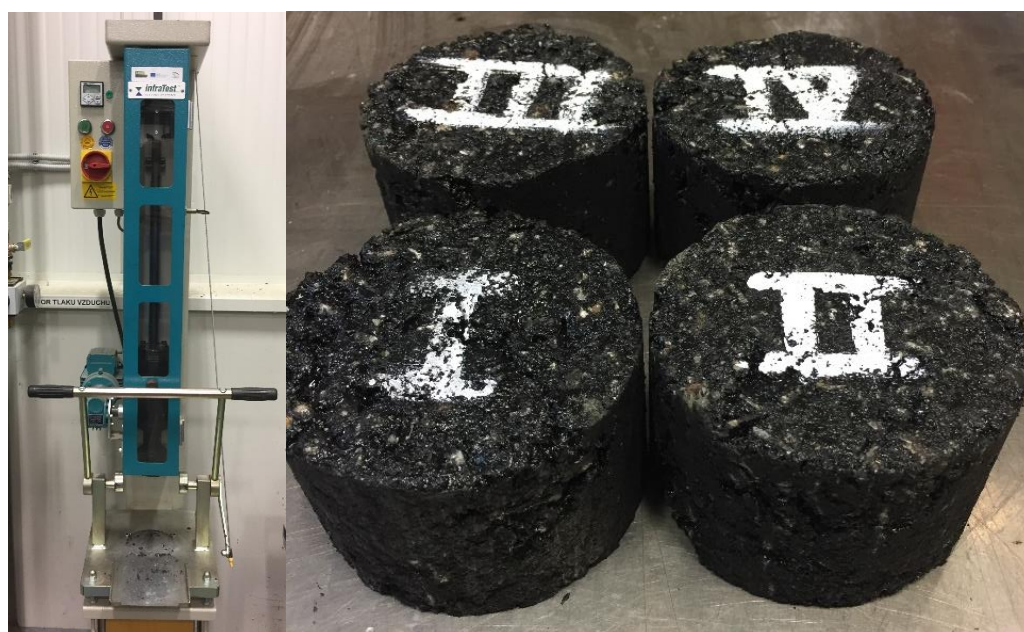
Označení směsi	Použité asfaltové pojivo	Množství pojiva ve směsi [%]	Počet Marshallových těles [ks]
A	PMB 10/40-65	4,8	2
		4,9	2
B	CRMB (asfalt 20/30 + 13 % pryž. granulátu)	5,4	3
		5,9	9
		6,4	1

Tabulka 10: Počet zhutněných Marshallových těles





Obrázek 24: Marshallova tělesa ze směsi A



Obrázek 25: Rázový zhutňovač a Marshallova tělesa



Obrázek 26: Marshallova tělesa ze směsi B

### 3.4.6 Stanovení maximální objemové hmotnosti

Tato zkušební metoda byla provedena dle normy ČSN EN 12697-5+A1 [27] Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti. V této evropské normě jsou popsány zkušební metody pro stanovení maximální objemové hmotnosti asfaltové směsi, která neobsahuje mezery. V normě je uveden volumetrický postup, hydrostatický postup a matematický postup.

Stanovení maximální objemové hmotnosti nám slouží k výpočtu mezerovitosti směsi. V mojí diplomové práci jsem pro stanovení maximální objemové hmotnosti zvolil volumetrický postup (tj. pomocí pyknometrů). Jako rozpouštědlo jsem použil perchlorethylen. Tuto zkušební metodu jsem prováděl ve školní laboratoři.

Po ručním namíchání asfaltové směsi jsem tuto směs rozprostřel ve velkém pekáči. Zatímco klesala teplota směsi, odděloval jsem od sebe jednotlivá zrna směsi. Takto vychladlou nezhotněnou směs jsem opatrně vsypal do pyknometru. Po nasypání jsem asfaltovou směs v pyknometru zalil rozpouštědlem. Pyknometr se směsí a rozpouštědlem jsem umístil do vodní lázně o teplotě  $(25 \pm 0,2) \text{ }^\circ\text{C}$ , kde se vzorek temperoval přibližně 120 min. Nakonec jsem do vytemperovaného vzorku přilil požadované množství rozpouštědla. V průběhu tohoto procesu jsem stanovoval požadované hmotnosti, jako jsou:

- hmotnost prázdného pyknometru ( $m_1$ );
- hmotnost pyknometru s asfaltovou směsí ( $m_2$ );
- hmotnost pyknometru s asfaltovou směsí a rozpouštědlem po temperaci ( $m_3$ ).

Po dosazení do rovnice 1 můžeme spočítat maximální objemovou hmotnost asfaltové směsi, kde:

- $\rho_{mw}$  = maximální objemová hmotnost [ $\text{kg/m}^3$ ];
- $\rho_w$  = objemová hmotnost rozpouštědla [ $\text{kg/m}^3$ ];
- $V_p$  = objem pyknometru [ $\text{m}^3$ ].

$$\rho_{mw} = \frac{m_2 - m_1}{V_p - \left(\frac{m_3 - m_2}{\rho_w}\right)}$$

*Rovnice 1: Maximální objemová hmotnost směsi*

Byla stanovena maximální objemová hmotnost na 8 vzorcích s různým obsahem asfaltového pojiva (viz tabulka 11).



Označení směsi	Použité asfaltové pojivo	Množství pojiva ve směsi [%]	Počet vzorků [ks]
A	PMB 10/40-65	4,8	2
		4,9	2
B	CRMB (asfalt 20/30 + 13 % pryž. granulátu)	5,4	1
		5,9	2
		6,4	1

Tabulka 11: Počet vzorků na stanovení maximální objemové hmotnosti



Obrázek 27: Pycnometry s asfaltovou směsí a rozpouštědlem



Obrázek 28: Nezhutněná asfaltová směs

### 3.4.7 Hutnění zkušebních těles segmentovým zhutňovačem

Hutnění zkušebních těles jsem provedl dle normy ČSN EN 12679-33+A1 [28] Asfaltové směsi-Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 33: Příprava zkušebních těles zhutňovačem desek. V této normě jsou uvedeny metody zhutňování plošných zkušebních vzorků z asfaltové směsi. Tyto plošné prvky (desky) jsou určeny pro vyřezání zkušebních těles nebo pro přímé zkoušení. Pomocí segmentového zhutňovače jsme schopni simulovat reálné hutnění na stavbě.

Nejprve jsem si ohřál asfaltovou směs v laboratorní peci na teplotu hutnění. Teplota hutnění pro směs A je 160 °C a pro směs B byla stanovena teplota hutnění na 165 °C. Po dosažení teploty hutnění jsem vsypal asfaltovou směs do připravené ocelové formy zhutňovače. Špachtlí jsem srovnal povrch směsi a přistoupil k hutnění. Požadovaná výška zkušební desky byla 60 mm.

Celkem jsem vyrobil 5 zkušebních desek ze směsi A a 6 zkušebních desek ze směsi B (viz. tabulka 12). Rozměry zkušebních desek byly 320 x 260 x 60 mm.

Na takto vyrobených zkušebních deskách jsem následně stanovil objemovou hmotnost a následně z nich vyřezal zkušební tělesa, která byla dále zabroušena na požadovanou tloušťku. Zkušební tělesa jsem podrobil funkčním zkouškám.

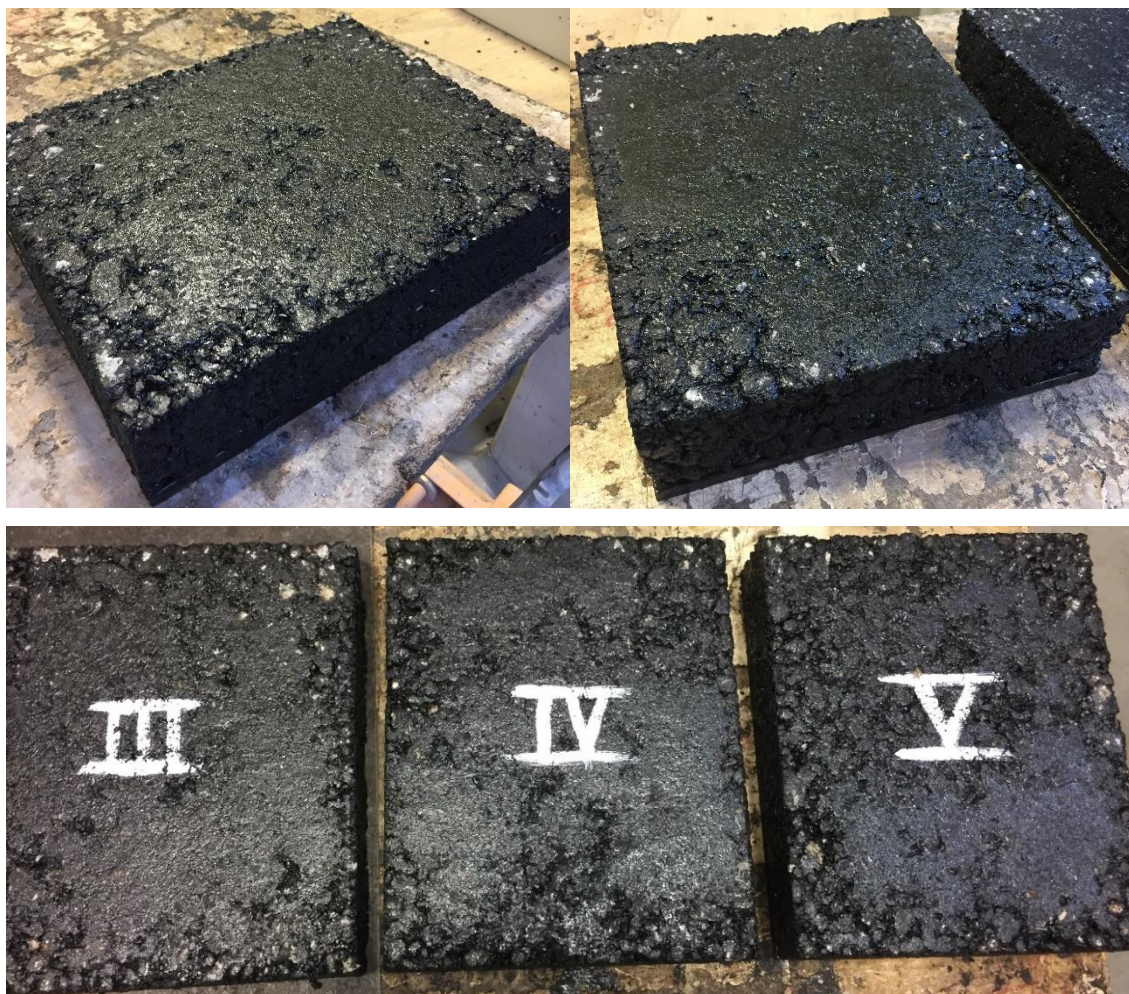
Označení směsi	Použité asfaltové pojivo	Množství pojiva ve směsi [%]	Teplota hutnění [°C]	Počet zkušebních desek [ks]
A	PMB 10/40-65	4,9	160	5
B	CRMB	5,9	165	6

Tabulka 12: Počet zhutněných zkušebních desek

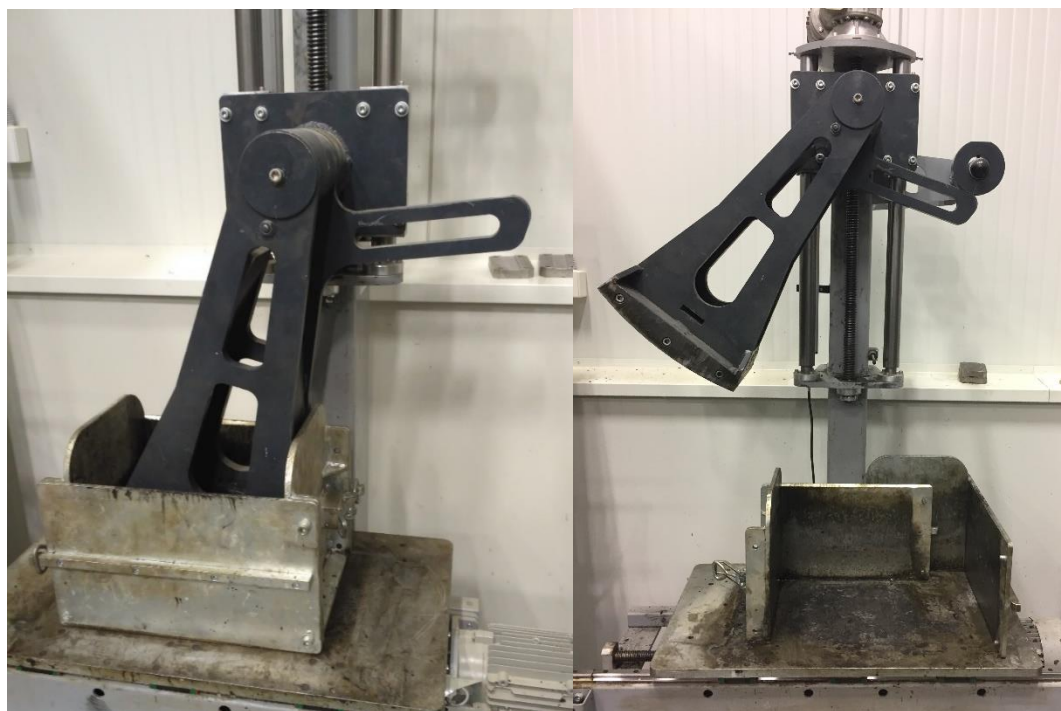


Obrázek 29: Zhutněné zkušební desky ze směsi A





Obrázek 30: Zhutněné zkušební desky ze směsi B



Obrázek 31: Segmentový zhutňovač

### 3.4.8 Stanovení objemové hmotnosti zkušebních těles

Tuto metodu jsem provedl dle normy ČSN EN 12697-6+A1 [29] Asfaltové směsi- Zkušební metody pro provádění asfaltové směsi za horka – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa. V této evropské normě je popsáno více zkušebních metod pro stanovení objemové hmotnosti zhutněného asfaltového zkušebního tělesa. Použitá zkušební metoda závisí na odhadovaném obsahu a přístupu dutin ve zkušebním vzorku.

V této diplomové práci jsem zvolil metodu stanovení objemové hmotnosti „nasyčený suchý povrch (SSD)“. Nejprve jsem pomocí laboratorní váhy stanovil hmotnost suchého zkušebního tělesa. Poté jsem toto těleso vložil do kovového koše a s tímto košem jej ponořil do vodní lázně. Po ustálení hmotnosti jsem tuto hmotnost zaznamenal. Těleso jsem vyjmul z vody, osušil jeho povrch ručníkem a stanovil hmotnost zkušebního tělesa nasyceného vodou. Dále jsem si změřil teplotu vodní lázně. Na základě této teploty jsem stanovil hustotu vody dle tabulky v normě ČSN EN 12697-6+A1. Hodnoty potřebné pro stanovení objemové hmotnosti tedy jsou:

- hmotnost suchého zkušebního tělesa ( $m_1$ ) [g];
- hmotnost zkušebního tělesa pod vodou ( $m_2$ ) [g];
- hmotnost nasyceného zkušebního tělesa vodou ( $m_3$ ) [g];
- teplota vodní lázně pro stanovení hustoty vody ( $\rho_w$ ) [ $\text{kg/m}^3$ ].

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

*Rovnice 2: Objemová hmotnost zkušebního tělesa [29]*

Dosažením do rovnice 2 jsem stanovil objemovou hmotnost všech vyrobených asfaltových desek i Marshallových těles. Z objemové hmotnosti zkušebních desek jsem mohl ověřit míru zhutnění desek a mezerovitost směsi (dle ČSN EN 12697-8 [30]).



### 3.4.9 Stanovení nízkoteplotních vlastností asfaltových směsí

Tuto funkční zkoušku jsem provedl dle normy ČSN EN 12697-46 [31] Asfaltové směsi-Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 46: Nízkoteplotní vlastnosti a tvorba trhlin pomocí jednoosé zkoušky tahem. V této evropské normě jsou upřesněny zkoušky tahem pro určení charakteristik odolnosti asfaltové směsi vůči tvorbě trhlin při nízkých teplotách.

Pro tuto diplomovou práci jsem zvolil zkoušku nízkoteplotních vlastností s rovnoměrným řízeným poklesem teploty (TSRST). Tato metoda spočívá v udržení konstantní délky zkušebního tělesa tvaru kvádrů při současném poklesu teploty vzorku konstantní rychlostí (5 °C/hod). V důsledku zamezení tepelného smršťování se ve zkušebním tělese vytváří tzv. kryogenní napětí. Toto kryogenní napětí neustále roste až do porušení vzorku.

Výsledkem této zkoušky získáme hodnoty:

- kryogenní napětí při porušení;
- sílu působící na vzorek při porušení;
- kritickou teplotu v komoře při porušení;
- kritickou teplotu vzorku při porušení.

Ze zkušební asfaltových desek jsem si pomocí pily vyřezal zkušební tělesa, které jsem zbrousil laboratorní bruskou na předepsané rozměry (200 x 50 x 50 mm). Zkušební tělesa jsem přilepil lepidlem (sestaveným ze směsi pryskyřice, fileru a tvrdidla) do vyčištěných ocelových forem.



Obrázek 32: Přilepené zkušební těleso v ocelové formě (vlevo)

Obrázek 33: Pryskyřice a tvrdidlo na výrobu lepidla (vpravo)

Takto připravená tělesa jsem umístil do přístroje CYKLON-40, který slouží k určení nízkoteplotních vlastností asfaltových směsí a je umístěn ve školní laboratoři.

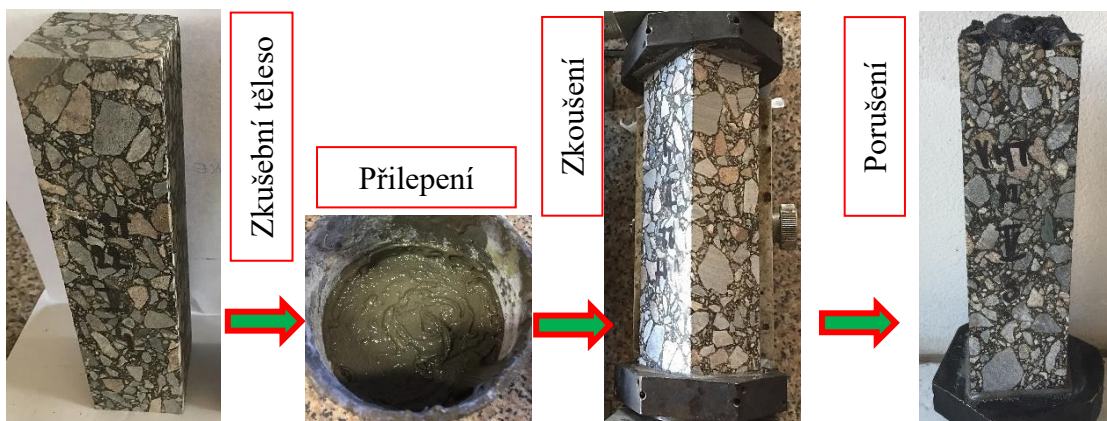
Celkem jsem této zkoušce podrobil 3 zkušební tělesa ze směsi A a 4 zkušební tělesa ze směsi B.



Obrázek 34: Zkušební přístroj CYKLON 40 s řídicím počítačem



Obrázek 35: Zkušební tělesa porušené mrazovou trhlinou



Obrázek 36: Schéma postupu při zkoušce

### 3.4.10 Stanovení tuhosti – Zkouška dvoubodovým ohybem na jednostranně vetknutém komolém klínu (2PB-TR)

Tuto funkční zkoušku jsem provedl dle normy ČSN EN 12697-26 [32] Asfaltové směsi-Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 26: Tuhost. Při této zkoušce je zkušební vzorek definovaného tvaru deformován v rozsahu lineárního přetvoření. Měří se amplituda napětí a poměrného přetvoření spolu s fázovým úhlem mezi napětím a poměrným přetvořením.

Ze zkušebním asfaltových desek (připravených dle kapitoly 4.4 a 4.7) jsem si vyřezal zkušební tělesa tvaru komolého jehlanu (trapezoidu), které jsem zabrousil na požadovanou tloušťku 50 mm. U všech zkušebních těles jsem změřil jejich rozměry a stanovil hmotnost. Poté jsem trapezoidy přilepil do vyčištěné ocelové formy. Pro stanovení tuhosti jsem použil zkušební přístroj výrobce COOPER, který je umístěn v silniční laboratoři výzkumného centra AdMaS v Brně.

Stanovoval jsem tuhost zkušebních vzorků při teplotě -5 °C, 10 °C, 15 °C, 25 °C, 40 °C a frekvenci zatěžování 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz, 30 Hz. Výsledkem je modul tuhosti stanovený při teplotě 15 °C a frekvenci 10 Hz.

Stanovení modulu tuhosti jsem provedl na 16 trapezoidech ze směsi A a na 20 zkušebních tělesech vyrobených ze směsi B.



Obrázek 37: Zkušební přístroj COOPER





Obrázek 38: Trapezoidy ze směsi A (vlevo) a směsi B (vpravo)

### 3.4.11 Stanovení odolnosti vůči únavě

Tuto funkční zkoušku jsem provedl dle normy ČSN EN 12697-24 [33] Asfaltové směsi-Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 24. Odolnost vůči únavě. V této evropské normě jsou specifikovány metody pro určení únavy asfaltových směsí.

Pro tuto zkoušku jsem stejně jako pro stanovení modulu tuhosti použil zkušební přístroj od výrobce COOPER, který se nachází v silniční laboratoři centra AdMaS v Brně. Umístil jsem trapezoidy do přístroje a stanovil různé počáteční poměrné přetvoření. Toto zařízení umožňuje stanovit odolnost vůči únavě metodou Strain control, tj. zkouška probíhá za konstantního průhybu a je ukončena při poklesu počátečního modulu tuhosti na polovinu. Stanovuje se počet cyklů, kdy dojde k tomuto poklesu tuhosti na polovinu, což představuje porušení únavovou trhlinou. Dle uvedené normy se musí počáteční výchylka nastavit tak, aby u min. 6 vzorků došlo k porušení při počtu cyklů nad 1 000 000 a u min. 6 zkušebních vzorků došlo k porušení při méně než 1 000 000 zatěžovacích cyklů. Zkouška by se měla provést na min. 18 zkušebních vzorcích. Výsledkem zkoušky je grafické vyjádření ve Wöhlerově diagramu, kde je v logaritmickém měřítku zobrazena závislost počtu cyklů na poměrném přetvoření. Po proložení tohoto grafu přímkou, získáváme počáteční poměrné přetvoření  $\epsilon_6$  pro porušení zkušebních těles únavovou trhlinou při 1 000 000 zatěžovacích cyklů. Toto počáteční poměrné přetvoření  $\epsilon_6$  vyjadřuje výslednou odolnost asfaltové směsi vůči únavě.

Stanovení odolnosti vůči únavě jsem provedl na 18 trapezoidech ze směsi A a na 18 zkušebních tělesech vyrobených ze směsi B.



Obrázek 39: Tělesa ze směsi A po zkoušce odolnosti vůči únavě



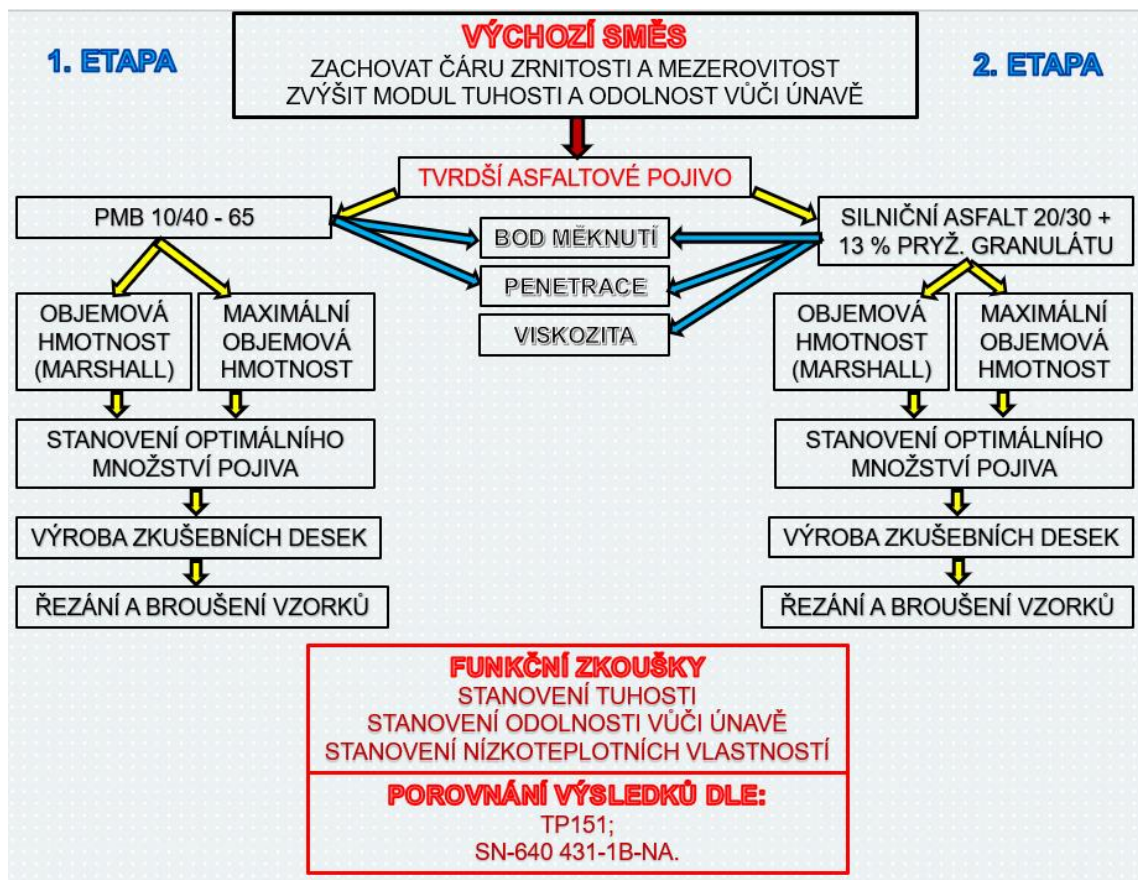
Obrázek 40: Tělesa ze směsi B po zkoušce odolnosti vůči únavě



## 4. Praktická část

V praktické části diplomové práce se zabývám návrhem a výrobou dvou nových asfaltových směsí s vysokou životností (vysokým modulem tuhosti) a jejich následným posouzením funkčními zkouškami. Jedná se o směsi VMT 22 s modifikovaným asfaltovým pojivem, do kterých je přimícháno 25 % R-materiálu za studena. Tento typ asfaltových směsí se používá pro podkladní vrstvy vozovek s vyšším dopravním zatížením.

Praktickou část můžeme rozdělit na dvě etapy, které jsou popsány na obrázku 41:



Obrázek 41: Schéma postupu praktické části

### 1. ETAPA (směs A)

V 1. etapě navazuji na předchozí výzkumy [34] na směsi VMT 22, pracovně nazvaná „výchozí směs“, která mě zaujala svými výbornými vlastnostmi. Pro novou asfaltovou směs (směs A) zachovávám čáru zrnitosti a mezerovitost směsi shodnou jako je tomu u výchozí směsi, přičemž se snažím zvýšit výsledný modul tuhosti směsi a odolnost směsi vůči únavě. Toho chci dosáhnout použitím tvrdších asfaltových pojiv.

V 1. etapě jsem do nové asfaltové směsi použil polymerem modifikované asfaltové pojivo PMB 10/40-65 a dále jsem postupoval, viz schéma (obrázek 41) výše.

## **2. ETAPA (směs B)**

V 2. etapě jsem lehce upravil čáru zrnitosti asfaltové směsi. Mezerovitost směsi jsem zachoval a bylo použito asfaltové pojivo modifikované pryžovým granulátem. Dále jsem postupoval, viz schéma (obrázek 41) výše.

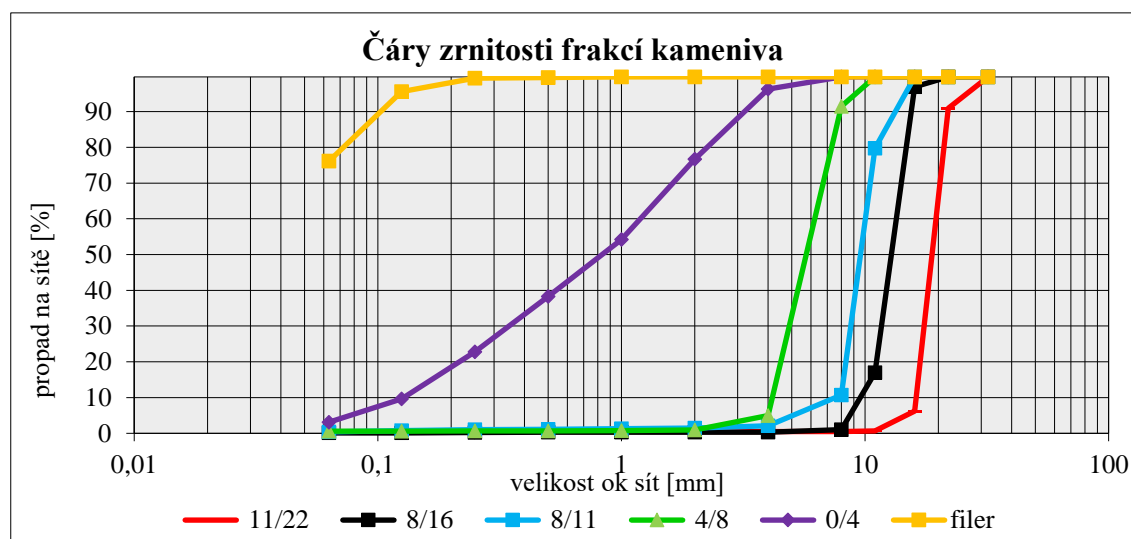
Výsledky funkčních zkoušek poté porovnávám s technickými podmínkami TP 151 a také se švýcarským předpisem SN-640 431-1B-NA.

## 5. Praktická část: použité materiály

V této části diplomové práce jsou popsány materiály použité při výrobě nových asfaltových směsí. Jedná se o kamenivo a R-materiál. Vlastnosti asfaltových pojiv použitých při výrobě nových asfaltových směsí jsou popsány v dalších kapitolách diplomové práce.

### 5.1 Kamenivo

Pro účely této diplomové práce, bylo na výrobu asfaltových směsí použito kamenivo odebrané z obalovny v Rajhradcích. Výsledné asfaltové směsi obsahují frakce kameniva 0/4, 4/8, 8/11, 8/16, 11/22 a vápencovou moučku. Na těchto frakcích kameniva byly provedeny síťové rozborů (dle kapitoly 3.4.1) a stanoveny čáry zrnitosti. V grafu 7 jsou vykresleny čáry zrnitosti pro jednotlivé frakce kameniva a v tabulce 13 jsou uvedeny zrnitosti frakcí kameniva. Výsledky síťových rozborů byly převzaty ze silniční laboratoře centra AdMaS [6].

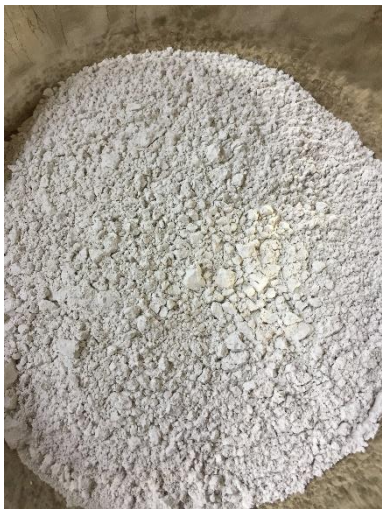


Graf 7: Čáry zrnitosti frakcí kameniva z Rajhradic [6]

Frakce kameniva	Propad na sítích [%]											
	32	22	16	11	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
11/22	100,0	91,2	6,5	1,0	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,6
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	1,1	1,0	1,0	0,9	0,9
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

Tabulka 13: Síťový rozbor frakcí kameniva z Rajhradic [6]





*Obrázek 42: Kamenivo: vápenková moučka*



*Obrázek 45: Kamenivo: frakce 8/11 mm*



*Obrázek 43: Kamenivo: frakce 0/4 mm*



*Obrázek 46: Kamenivo: frakce 8/16 mm*



*Obrázek 44: Kamenivo: frakce 4/8 mm*



*Obrázek 47: Kamenivo: frakce 11/22 mm*

## 5.2 R-materiál

R-materiál, který jsem použil v této diplomové práci, byl odebrán ze zastřešených skládek obalovny v Rajhradících. Jedná se o R-materiál s maximální velikostí zrna do 22 mm. R-materiál použitý v této diplomové práci se shoduje s R-materiálem použitým ve výchozí směsi Ing. Romana Stromeckého. [6] Proto jsem převzal výsledky již hotových síťových rozborů kameniva z R-materiálu a také výsledky provedených funkčních zkoušek na asfaltovém pojivu vyextrahovaném z tohoto R-materiálu.



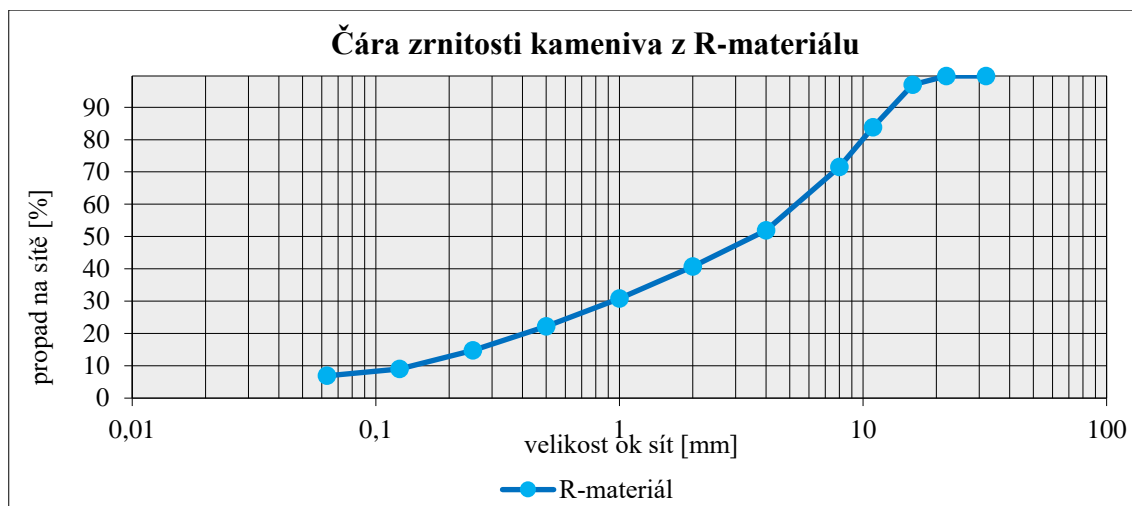
Obrázek 48: R-materiál z obalovny v Rajhradících

### 5.2.1 Kamenivo z R-materiálu

V tabulce 14 je uvedena zrnitost získaného kameniva z R-materiálu použitého v této diplomové práci a v grafu 8 je zobrazena čára zrnitosti kameniva z R-materiálu.

R-mat frakce	Propad na sítích [%]											
	32	22	16	11	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
0/22	100	100	97,3	84,1	71,8	52,2	41	31,1	22,5	15,1	9,3	7,2

Tabulka 14: Síťový rozbor kameniva z R-materiálu



Graf 8: Čára zrnitosti kameniva z R-materiálu

### 5.2.2 Asfaltové pojivo z R-materiálu

Extrakcí asfaltového pojiva z R-materiálu bylo zjištěno, že odebraný R-materiál obsahuje 5,15 % množství asfaltového pojiva. V tabulce 15 jsou uvedeny základní vlastnosti vyextrahovaného asfaltového pojiva z R-materiálu, které jsem převzal z podkladů poskytnutých silniční laboratoří centra AdMaS v Brně [34].

<b>Vlastnosti asfaltového pojiva z R-materiálu</b>	
hloubka vniknutí penetrační jehly [PJ]	teplota bodu měknutí [°C]
16	60,8

Tabulka 15: Vlastnosti získaného asfaltového pojiva z R-materiálu



## 6. Praktická část: 1. etapa

V první etapě jsem navrhnul a laboratorně vyrobil asfaltovou směs VMT 22 s polymerem modifikovaným asfaltovým pojivem PMB 10/40-65, do které bylo zastudena přimícháno 25 % R-materiálu. Pomocí objemové hmotnosti (dle kapitoly 3.4.2) a maximální objemové hmotnosti (dle kapitoly 3.4.3) jsem zjistil mezerovitost směsi A. Následně jsem navrhnul optimální množství asfaltového pojiva ve směsi. Laboratorní míchačkou a segmentovým zhutňovačem jsem vyrobil 5 zkušebních desek, na kterých jsem stanovil objemovou hmotnost, maximální objemovou hmotnost, mezerovitost a míru zhutnění. Tyto desky jsem následně rozřezal na zkušební tělesa. Tato tělesa jsem podrobil následujícím funkčním zkouškám:

- stanovení tuhosti (dle kapitoly 3.4.10);
- stanovení odolnosti vůči únavě (dle kapitoly 3.4.11);
- stanovení nízkoteplotních vlastností směsi (dle kapitoly 3.4.9).

### 6.1 Asfaltové pojivo ve směsi A

Ve směsi A bylo použito polymerem modifikované asfaltové pojivo gradace 10/40-65, které pro účely této diplomové práce poskytla obalovna v Holubicích.



Obrázek 49: Asfaltové pojivo PMB 10/40-65

### 6.1.1 Vlastnosti asfaltového pojiva ve směsi A

Na tomto asfaltovém pojivu byla provedena zkouška stanovení penetrace jehlou (dle kapitoly 3.4.2) a zkouška stanovení bodu měknutí metodou kroužek kulička (dle kapitoly 3.4.3). Výsledky těchto zkoušek jsou uvedeny v tabulce 16.

Vlastnosti asfaltového pojiva PMB 10/40-65	
hloubka vniknutí penetrační jehly [PJ]	teplota bodu měknutí [°C]
20	66,9

Tabulka 16: Vlastnosti asfaltového pojiva ve směsi A

### 6.2 Síťový rozbor a návrh čáry zrnitosti

Čára zrnitosti směsi A je totožná jako čára zrnitosti výchozí směsi. Síťové rozborů jednotlivých frakcí kameniva jsou uvedeny v tabulce 13 a 14. Navržená zrnitost směsi kameniva pro směs A je uvedena v tabulce 17. Dále jsou zde uvedeny požadavky na zrnitost dle českých a švýcarských předpisů pro asfaltové směsi s vysokou životností. Jak můžeme vidět v tabulce 17, tak všechny tyto požadavky jsme splnili.

Stanovené propady a srovnání s českými a švýcarskými předpisy					
velikost ok sít [mm]	meze pro VMT 22 dle českého předpisu TP 151 [%]	meze pro AC EME C2 dle švýcarského předpisu SN 640 431-1B-NA [%]	navržená čára zrnitosti: propad sítem [%]	splnění požadavků propadem na sítu dle TP 151	splnění požadavků propadem na sítu dle SN 640 431-1B-NA
32	100	100	<b>100,0</b>	Ano	Ano
22	90-100	90-100	<b>98,4</b>	Ano	Ano
16	72-82	-	<b>81,9</b>	Ano	-
11	-	58-81	<b>65,7</b>	-	Ano
8	50-60	-	<b>51,4</b>	Ano	-
4	34-46	31-54	<b>34,0</b>	Ano	Ano
2	24-36	20-41	<b>27,8</b>	Ano	Ano
1	-	14-31	<b>21,9</b>	-	Ano
0,5	-	9-23	<b>17,4</b>	-	Ano
0,25	-	-	<b>13,3</b>	-	-
0,125	-	-	<b>9,6</b>	-	-
0,063	5-9	6-12	<b>7,0</b>	Ano	Ano

Tabulka 17: Výsledná zrnitost směsi A

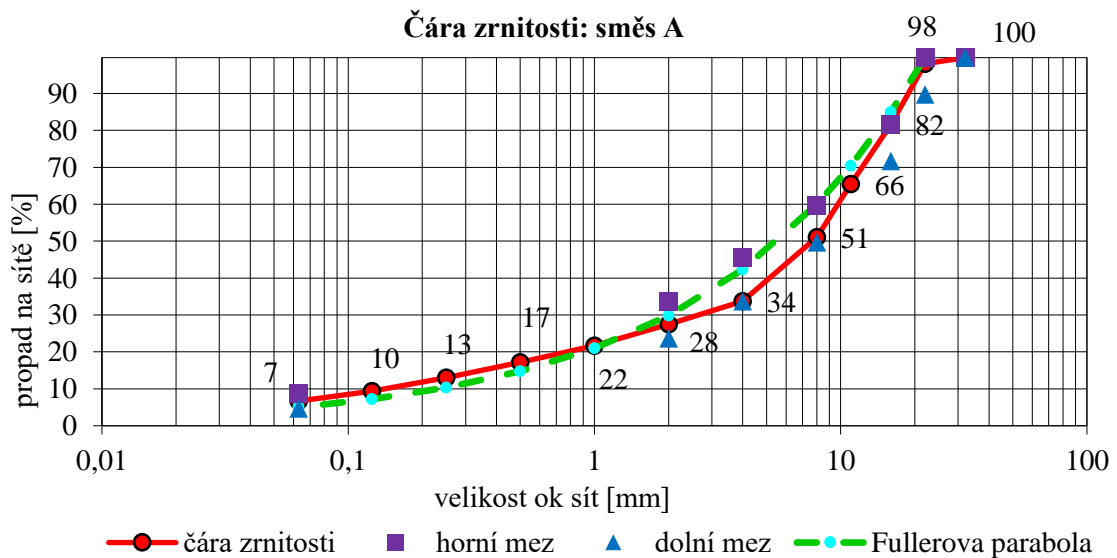
V tabulce 18 je vypsáno procentuální zastoupení jednotlivých frakcí kameniva ve směsi. Nejvíce je zde zastoupena frakce 11/22 v množství 18,3 %. Naopak vápencové

moučky je ve směsi pouze 5,7 %. Do nové asfaltové směsi je dávkováno 25 % R-materiálu.

Skladba kameniva	
Kamenivo	Množství [%]
vápencová moučka	5,7
frakce 0/4	14,6
frakce 4/8	12,5
frakce 8/11	12,1
frakce 8/16	11,8
frakce 11/22	18,3
R-materiál	25,0
suma $\Sigma$ =	100,0

Tabulka 18: Skladba kameniva ve směsi A

Výsledná čára zrnitosti směsi A je zobrazena v grafu 9. Můžeme vidět, že vyhovuje hornímu i dolnímu intervalu zrnitosti pro směsi VMT 22 stanovené v českém předpise TP 151. Čára zrnitosti je plynulá (v grafu 9 zobrazena červenou barvou) a respektuje Fullerovu parabolu.



Graf 9: Čára zrnitosti směsi A

### 6.3 Stanovení množství pojiva, stanovení objemové hmotnosti, maximální objemové hmotnosti, mezerovitosti

Směs, která sloužila jako výchozí, obsahovala 4,8 % asfaltového pojiva a měla mezerovitost 3 %. Pro porovnatelnost směsí bylo cílem dosažení pokud možno stejné

mezerovitosti. Z toho důvodu jsem vyrobil Marshallova tělesa (dle kapitoly 3.4.4 a kapitoly 3.4.5) s počátečním množstvím asfaltového pojiva 4,8 %. Mezerovitost směsi s obsahem asfaltového pojiva vyšla 3,13 %. Protože mezerovitost byla vyšší než požadovaná mezerovitost 3,0 %, vyrobil jsem další sadu Marshallových těles s obsahem asfaltového pojiva 4,9 %. Na těchto zkušebních tělesech jsem stanovil objemové hmotnosti (dle kapitoly 3.4.8) a maximální objemové hmotnosti (dle kapitoly 3.4.6). Z těchto hodnot jsem dopočítal mezerovitost směsi [30] a stanovil optimální množství asfaltového pojiva ve směsi A, viz tabulka 19.

Mezerovitost směsi 3,0 % odpovídá minimální mezerovitosti směsi typu VMT podle českých předpisů TP 151.

### 6.3.1 Stanovení optimálního množství pojiva u směsi A

V tabulce 18 jsou výsledky zkoušek stanovené pro asfaltovou směs A s obsahem 4,8 % a 4,9 % asfaltového pojiva PMB 10/40-65. Po vyhodnocení jsem se rozhodl použít množství pojiva 4,9 % jako optimální. Výsledná mezerovitost směsi A je tedy 2,86 %, což je podobné výchozí směsi [6]. Výsledná mezerovitost směsi A je nižší než minimální mezerovitost stanovená v TP 151, ale vyhovuje švýcarskému předpisu SN-640 431-1B-NA, který uvádí minimální mezerovitost pro asfaltové směsi EME 2,0 %. Dále jsem na zkušebních tělesech stanovil stupeň vyplnění mezer pojivem (VFB), spočítaný ze vztahu:

$$VFB = \frac{\frac{B \times \rho_b}{\rho_B}}{VMA} \times 100$$

*Rovnice 3: Stupeň vyplnění mezer ve směsi kameniva pojivem*

kde:	VFB	stupeň vyplnění mezer ve směsi kameniva pojivem [%];
	B	obsah pojiva ve zkušebním tělese ve 100% směsi [%];
	$\rho_b$	objemová hmotnost zkušebního tělesa [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ];
	$\rho_B$	objemová hmotnost pojiva [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ];
	VMA	mezerovitost směsi kameniva [%], spočítána ze vztahu:

$$VMA = Vm + B \times \frac{\rho_b}{\rho_B}$$

*Rovnice 4: Mezerovitost směsi kameniva*

kde:	Vm	mezerovitost zkušebního tělesa [%];
	B	obsah pojiva ve zkušebním tělese ve 100% směsi [%];
	$\rho_b$	objemová hmotnost zkušebního tělesa [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ];
	$\rho_B$	objemová hmotnost pojiva [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ].



Optimální množství pojiva 4,9 % odpovídá stupni vyplnění mezer ve směsi kameniva pojivem (VFB) 81,85 %.

Stanovení optimálního množství pojiva ve směsi A				
množství asfaltového pojiva [%]	objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	maximální objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	mezerovitost [%]	stupeň vyplnění mezer pojivem (VFB) [%]
4,8	2417	2495	3,13	79,99
<b>4,9</b>	<b>2417</b>	<b>2488</b>	<b>2,86</b>	<b>81,85</b>

Tabulka 19: Stanovení optimálního množství pojiva směsi A

### 6.3.2 Výpočet dávkovaného asfaltového pojiva do směsi A

Při celkovém množství asfaltového pojiva ve směsi 4,9 % musíme brát v úvahu, že určitou část pojiva tvoří zestárlý asfalt z R-materiálu, který dávkujeme do směsi v množství 25 %. R-materiál použitý v diplomové práci obsahuje 5,15 % asfaltového pojiva.

- celkové množství pojiva 4,9 %
- množství asfaltu v R-materiálu 5,15 %
- množství asfaltu z R-materiálu ve směsi B  $5,15 \% \times 0,25 = 1,29 \%$
- celkové množství PMB 10/40-65 ve směsi  $4,9 \% - 1,29 \% = 3,61 \%$

Z celkového množství asfaltového pojiva ve směsi A, tvoří 3,61 % polymerem modifikované asfaltové pojivo PMB 10/40-65. Zbytek asfaltového pojiva ve směsi A, tedy 1,29 % je zastoupeno zestárlym asfaltem z R-materiálu. Do směsi A je tedy dávkováno jen 3,61 % nového asfaltu.

### 6.4 Stanovení míry zhutnění zkušebních desek

Na vyrobených zkušebních deskách (dle kapitoly 3.4.4 a kapitoly 3.4.7) jsem stanovoval míru zhutnění dle rovnice 5:

$$c = \frac{\rho_{bssd,1}}{\rho_{bssd,2}} \times 100$$

Rovnice 5: Stanovení míry zhutnění zkušebních desek

kde:  $c$  = míra zhutnění zkušební desky [%];

$\rho_{bssd,1}$  = objemová hmotnost zkušební desky [kg/m<sup>3</sup>];

$\rho_{bssd,2}$  = objemová hmotnost stanovená na Marshallových tělesech [kg/m<sup>3</sup>].

Celkem bylo ze směsi A vyrobeno 5 zkušebních desek, na kterých byly stanoveny objemové hmotnosti (dle kapitoly 3.4.8), mezerovitost [30] a míra zhutnění (dle rovnice 3). V tabulce 20 jsou uvedeny míry zhutnění jednotlivých desek. Můžeme vidět, že nejméně byla zhutněna deska označena jako VMT A-I. Zkušební desky VMT A-I. až VMT A-IV. byly použity pro stanovení tuhosti (dle kapitoly 3.4.10) a stanovení odolnosti vůči únavě (dle kapitoly 3.4.11). Zkušební deska označená jako VMT A-V. byla použita na zkoušku stanovení odolnosti vůči nízkým teplotám (dle kapitoly 3.4.9).

<b>Stanovení míry zhutnění – směs A</b>			
označení desky	objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	mezerovitost [%]	míra zhutnění [%]
VMT A-I.	2411	3,08	<b>99,77</b>
VMT A-II.	2425	2,54	<b>100,33</b>
VMT A-III.	2425	2,53	<b>100,34</b>
VMT A-IV.	2431	2,27	<b>100,60</b>
VMT A-V.	2418	2,79	<b>100,07</b>

Tabulka 20: Stanovení míry zhutnění zkušebních desek směsi A

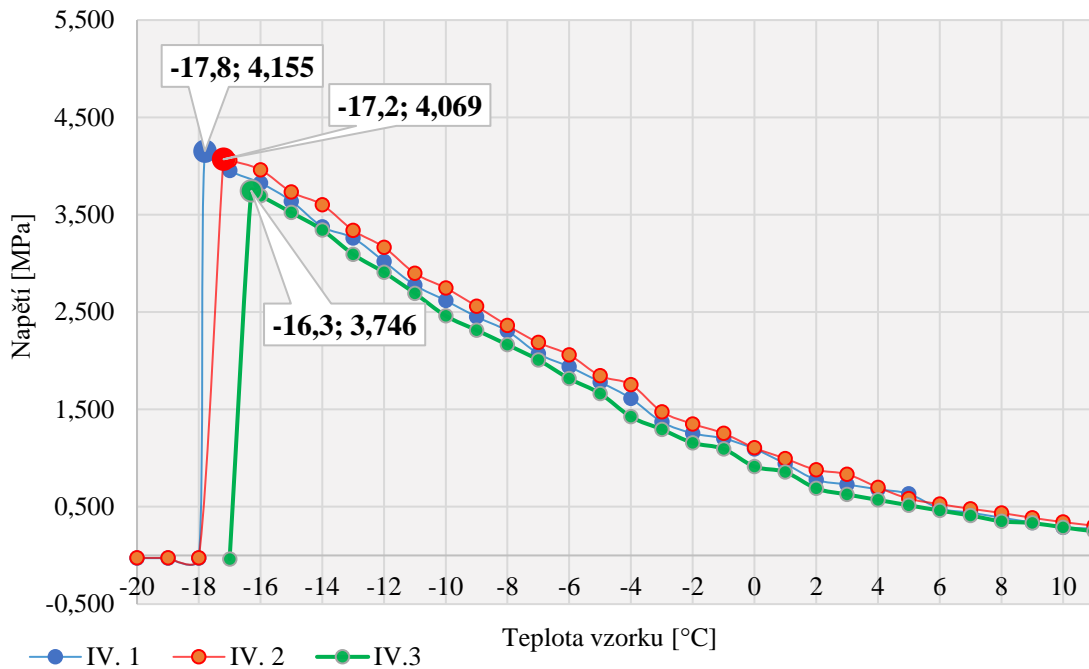
## 6.5 Stanovení nízkoteplotních vlastností

Zkouška stanovení nízkoteplotních vlastností byla stanovena na 3 zkušebních tělesech předepsaných rozměrů (dle kapitoly 3.4.9), vyrobených ze zkušební desky označené VMT A-V. Kritická teplota směsi A, při které se těleso poruší mrazovou trhlinou, byla stanovena na -17,1 °C. Výsledky nízkoteplotních vlastností směsi A jsou podrobně vypsány v tabulce 21 a zobrazeny v grafu 10. Maximální kritická teplota porušení byla naměřena u vzorku V.1, a to -17,8 °C.

<b>Stanovení nízkoteplotních vlastností-směs A</b>				
	označení vzorku			průměrné hodnoty
	V. 1	V. 2	V. 3	
teplota vzorku při porušení [°C]	-17,8	-17,2	-16,3	<b>-17,1</b>
teplota v komoře při porušení vzorku [°C]	-20,9	-20,6	-18,9	<b>-20,1</b>
max síla při porušení vzorku [kN]	10,41	10,19	9,37	<b>9,99</b>
max napětí při porušení vzorku [MPa]	4,16	4,07	3,75	<b>3,99</b>

Tabulka 21: Nízkoteplotní vlastnosti směsi A

## Nízkoteplotní vlastnosti-směs A



Graf 10: Nízkoteplotní vlastnosti-směs A

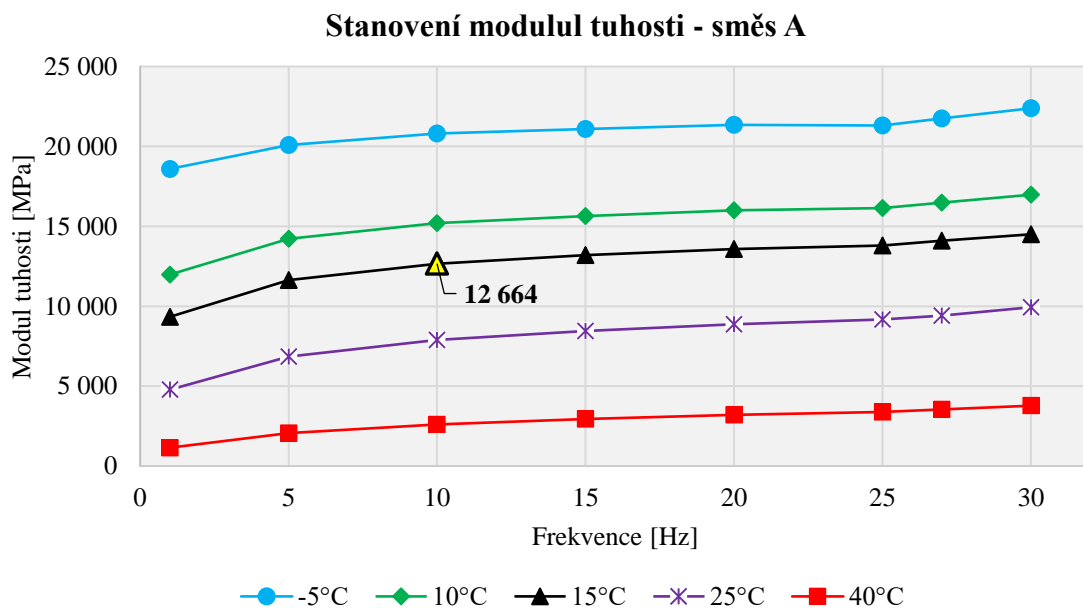
## 6.6 Stanovení tuhosti – Zkouška dvoubodovým ohybem na jednostranně vetknutém komolém klínu (2PB-TR)

Zkouška stanovení tuhosti byla provedena celkem na 16 zkušebních tělesech tvaru komolého klínu (dle kapitoly 3.4.10). Jako rozhodující hodnota pro tuto zkoušku je modul tuhosti stanovený při teplotě 15 °C a frekvenci 10 Hz. Výsledky zkoušky stanovení tuhosti jsou zobrazeny v tabulce 22 a grafu 11. Po vyřazení 6 těles, které se výrazněji lišily od ostatních modulů tuhosti, byl stanoven průměrný modul tuhosti 10 zkušebních těles na 12664 MPa. Směrodatná odchylka činila 797 MPa.

Stanovení tuhosti – směs A								
teplota [°C]	frekvence [Hz]							
	1	5	10	15	20	25	27	30
-5 °C	18592	20091	20808	21089	21338	21310	21757	22385
10 °C	11982	14225	15193	15645	16007	16146	16481	16977
15 °C	9335	11631	<b>12664</b>	13191	13587	13795	14089	14500
25 °C	4778	6858	7886	8448	8869	9172	9415	9936
40 °C	1150	2055	2611	2950	3197	3380	3538	3776

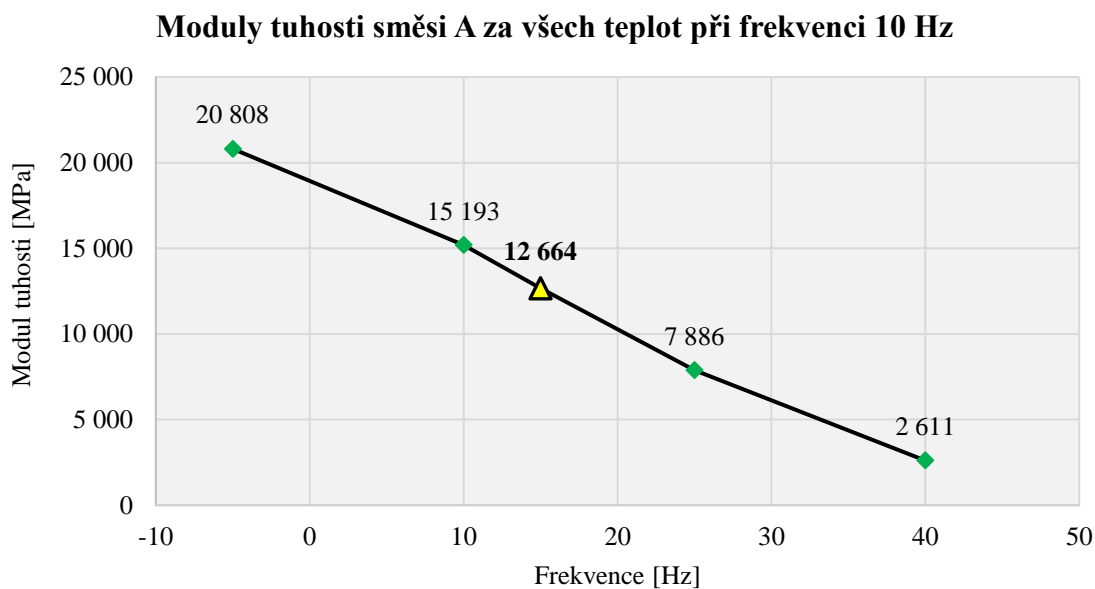
Tabulka 22: Zkouška stanovení tuhosti směsi A

V grafu 11 jsou zobrazeny průměrné moduly tuhosti stanovené pro všechny frekvence a teploty.



Graf 11: Stanovení tuhosti – směs A

V grafu 12 je graficky zobrazen průběh zatěžování zkušebních těles při konstantní frekvenci 10 Hz a měnící se teplotě.



Graf 12: Moduly tuhosti směsi A při frekvenci 10 Hz a všech teplotách

## 6.7 Stanovení odolnosti vůči únavě

Zkouška stanovení odolnosti vůči únavě u směsi A byla prováděna (dle kapitoly 3.4.11) na 18 zkušebních tělesech tvaru komolého klínu při teplotě 10 °C a frekvenci

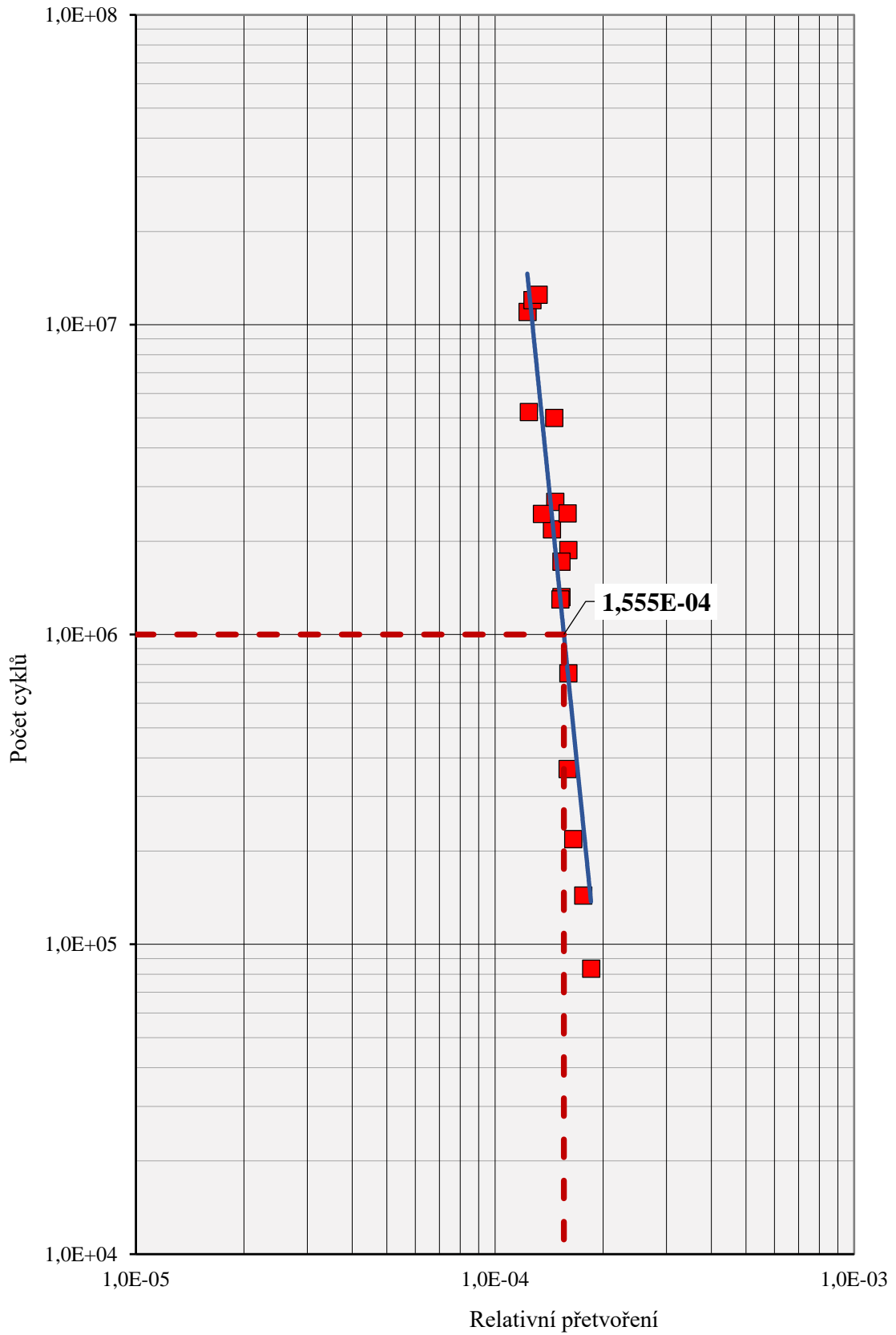
zatěžování 25 Hz. Výsledná odolnost vůči únavě stanovená parametrem  $\varepsilon_6$  u směsi A je  $155,5 \times 10^{-6}$ . Výsledky této zkoušky jsou vypsány v tabulce 23 a graficky znázorněny v grafu 13 pomocí Wöhlerova diagramu.

<b>Stanovení odolnosti vůči únavě směsi A</b>	
Odolnost vůči únavě $\varepsilon_6$ [-]	$155,5 \times 10^{-6}$
Zkušební teplota zatěžování [°C]	10
Frekvence zatěžování [Hz]	25
Spolehlivost $R^2$	0,809
B	11,44

*Tabulka 23: Stanovení odolnosti vůči únavě-směs A*



Stanovení odolnosti vůči únavě - směs A



Graf 13: Stanovení odolnosti vůči únavě-směs A

## 7. Praktická část: 2. etapa

V druhé etapě praktické části jsem opět navrhnul a laboratorně vyrobil asfaltovou směs VMT 22, ale tentokrát jsem použil asfaltové pojivo modifikované pryžovým granulátem. Do této směsi jsem, stejně jako do směsi A, dávkoval 25 % R-materiálu za studena. Tuto asfaltovou směs s CRMB budu dále v textu nazývat směs B. Nejprve jsem pomocí laboratorní míchačky přimíchal pryžový granulát do asfaltu gradace 20/30 a na tomto modifikovaném asfaltovém pojivu ověřil viskozitu. Pomocí objemové hmotnosti (dle kapitoly 3.4.2) a maximální objemové hmotnosti (dle kapitoly 3.4.3) jsem zjistil mezerovitost směsi B. Následně jsem navrhnul optimální množství asfaltového pojiva ve směsi. Laboratorní míchačkou a segmentovým zhutňovačem jsem vyrobil 5 zkušebních desek, které jsem rozřezal na zkušební tělesa. Tato tělesa jsem podrobil následujícím funkčním zkouškám:

- stanovení tuhosti (dle kapitoly 3.4.10);
- stanovení odolnosti vůči únavě (dle kapitoly 3.4.11);
- stanovení nízkoteplotních vlastností směsi (dle kapitoly 3.4.9).

### 7.1 Asfaltové pojivo ve směsi B

Ve směsi B bylo použito asfaltové pojivo modifikovaném pryžovým granulátem (CRMB). Toto asfaltové pojivo jsem si namíchal ve školní laboratorní míchačce. Použil jsem asfalt gradace 20/30, který pro účely této diplomové práce poskytla obalovna v Holubicích. Do takto tvrdého asfaltu jsem přimíchal 13 % pryžového granulátu zrnitosti do 1 mm. Přístup přimíchání pryžového granulátu do takto tvrdého asfaltu je v ČR ojedinělý, zejména kvůli zpracovatelnosti asfaltového pojiva. Z toho důvodu bylo dávkováno pouze 13 % pryžového granulátu namísto obvyklého množství 15-16 %, které se dávkuje do obvyklejších asfaltů gradace 50/70, či 70/100. Právě z důvodu zpracovatelnosti bylo velmi důležité sledovat viskozitu modifikovaného pojiva. Výsledná viskozita byla stanovena při teplotě 165 °C na hodnotu 3,0 kPa/s<sup>-1</sup>.



Obrázek 50: Pryžový granulát a ověření viskozity asfaltového pojiva

### 7.1.1 Vlastnosti asfaltového pojiva ve směsi B

Na asfaltu gradace 20/30 i na namíchaném modifikovaném asfaltovém pojivu CRMB byla provedena zkouška stanovení penetrace jehlou (dle kapitoly 3.4.2) a zkouška stanovení bodu měknutí metodou kroužek kulička (dle kapitoly 3.4.3). Výsledky těchto zkoušek jsou uvedeny v tabulce 24.

Vlastnosti asfaltových pojiv-směs B		
asfaltové pojivo	hloubka vniknutí penetrační jehly [PJ]	teplota bodu měknutí [°C]
asfalt 20/30	21	58,5
CRMB	15	73,2

Tabulka 24: Vlastnosti asfaltových pojiv ve směsi B

### 7.2 Sítový rozbor a návrh čáry zrnitosti

Výsledná navržená čára zrnitosti směsi B je zobrazena v grafu 14. Zrnitost směsi B se od směsi A trochu liší. Ve směsi B je méně jemných částic než ve směsi A. Je to z důvodu obsahu pryžového granulátu v asfaltovém pojivu ve směsi. V tabulce 25 jsou vypsány jednotlivé propady na sítích. Jsou zde také vypsány horní i dolní intervaly zrnitosti stanovené českým předpisem TP 151 a švýcarským předpisem SN 640-431-1B-NA. Můžeme vidět, že zrnitost směsi B vyhovuje švýcarskému předpisu a dle TP 151 vyhovuje téměř s výjimkou propadu na síť velikosti 4 mm. Ten se však liší jen nepatrně.

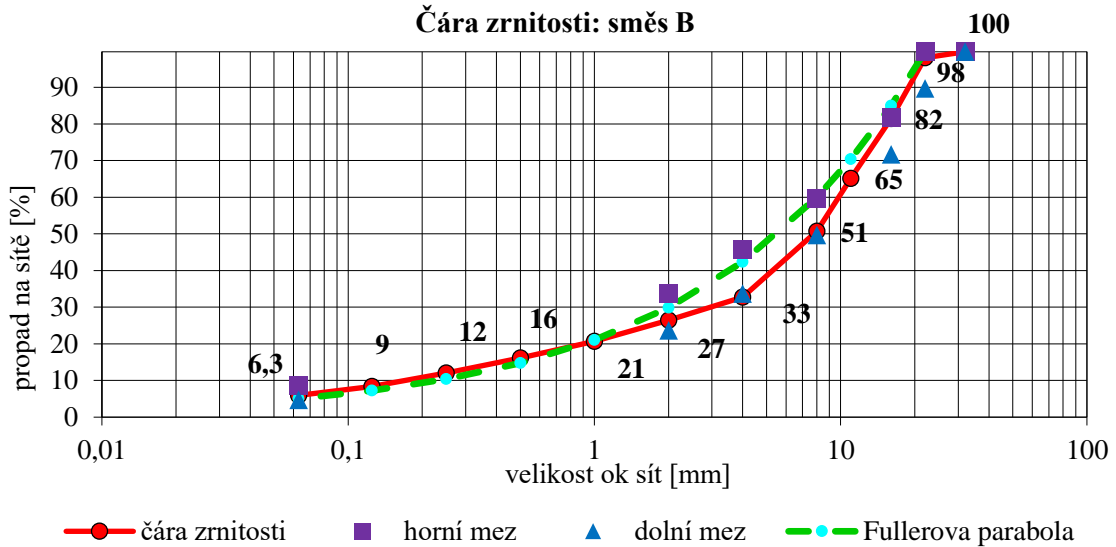
Stanovené propady a srovnání s českými a švýcarskými předpisy					
velikost ok sít [mm]	meze pro VMT 22 dle českého předpisu TP 151 [%]	meze pro AC EME C2 dle švýcarského předpisu SN 640 431-1B-NA [%]	navržená čára zrnitosti: propad sítím [%]	splnění požadavků propadem na sítu dle TP 151	splnění požadavků propadem na sítu dle SN 640 431-1B-NA
32	100	100	<b>100,0</b>	Ano	Ano
22	90-100	90-100	<b>98,4</b>	Ano	Ano
16	72-82	-	<b>81,8</b>	Ano	-
11	-	58-81	<b>65,5</b>	-	Ano
8	50-60	-	<b>51,0</b>	Ano	-
4	34-46	31-54	<b>33,1</b>	Ne	Ano
2	24-36	20-41	<b>26,8</b>	Ano	Ano
1	-	14-31	<b>21,0</b>	-	Ano
0,5	-	9-23	<b>16,5</b>	-	Ano
0,25	-	-	<b>12,3</b>	-	-
0,125	-	-	<b>8,7</b>	-	-
0,063	5-9	6-12	<b>6,3</b>	Ano	Ano

Tabulka 25: Výsledná zrnitost směsi B

V tabulce 26 jsou vypsána procentuální zastoupení jednotlivých frakcí kameniva. Nejméně je zde vápencové moučky v množství 4,7 %, které bylo oproti směsi A sníženo o 1,0 %. Nejvíce je zde zastoupena frakce kameniva 11/22 v množství 18,4 %. Ve směsi B je obsaženo 25 % R-materiálu. V grafu 14 je zobrazena navržená čára zrnitosti směsi B. Dále jsou zde vykresleny horní a dolní meze zrnitosti směsi dle TP 151.

Skladba kameniva	
Kamenivo	Množství [%]
vápencová moučka	4,7
frakce 0/4	14,6
frakce 4/8	13,2
frakce 8/11	12,1
frakce 8/16	12,0
frakce 11/22	18,4
R-materiál	25,0
suma $\Sigma$ =	100,0

Tabulka 26: Skladba kameniva směsi B



Graf 14: Výsledná čára zrnitosti směsi B

### 7.3 Stanovení množství pojiva, stanovení objemové hmotnosti, maximální objemové hmotnosti, mezerovitosti

Požadavkem pro směs B je zachování shodné mezerovitosti, jako je tomu u směsi A, tedy 2,86 %. Vyrobil jsem si (dle kapitoly 3.4.4 a kapitoly 3.4.5) 3 sady Marshallových těles s počátečním množstvím asfaltu 5,4 %, 5,9 % a 6,4 %. Na těchto zkušebních tělesech jsem poté stanovil objemové hmotnosti (dle kapitoly 3.4.8) a maximální objemové hmotnosti (dle kapitoly 3.4.6). Z těchto hodnot jsem dopočítal mezerovitost směsi [30] a stanovil optimální množství asfaltového pojiva ve směsi B viz tabulka 27. Dále jsem na takto namíchaných asfaltových směsích stanovil stupeň vyplnění mezer ve směsi kameniva pojivem VFB (dle kapitoly 6.3.1) a výsledky této metody jsem uvedl v tabulce 27.

#### 7.3.1 Stanovení optimálního množství pojiva

Po vyhodnocení zkoušek jsem stanovil množství pojiva 5,9 % jako optimální. Toto množství asfaltového pojiva odpovídá mezerovitosti směsi 2,85 %, což je totožná mezerovitost jako u směsi A. Výsledná mezerovitost směsi B je nižší než minimální mezerovitost 3 % stanovená v českých TP 151, ale vyhovuje švýcarskému předpisu SN-640 431-1B-NA, který uvádí minimální mezerovitost pro asfaltové směsi EME 2,0 %. Výsledky stanovení optimálního množství pojiva u směsi B jsou uvedeny v tabulce 27.



Optimálnímu množství asfaltového pojiva ve směsi B 5,9 % odpovídá stupeň vyplnění mezer ve směsi kameniva (VFB) 84,50 %.

Stanovení optimálního množství pojiva ve směsi B				
množství asfaltového pojiva [%]	objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	maximální objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	mezerovitost [%]	stupeň vyplnění mezer pojivem (VFB) [%]
5,4	2356	2462	4,32	75,76
<b>5,9</b>	<b>2383</b>	<b>2453</b>	<b>2,85</b>	<b>84,50</b>
6,4	2379	2442	2,57	87,03

Tabulka 27: Stanovení optimálního množství pojiva ve směsi B

### 7.3.2 Výpočet dávkovaného asfaltového pojiva do směsi B

Při celkovém množství asfaltového pojiva ve směsi 5,9 % musíme brát v úvahu, že určitou část pojiva tvoří zestárlý asfalt z R-materiálu. Dalším výplňovým materiálem v asfaltovém pojivu CRMB jsou částčky pryžového granulátu.

- celkové množství pojiva 5,9 %
- množství asfaltu v R-materiálu 5,15 %
- množství asfaltu z R-materiálu ve směsi B 5,15 % x 0,25 = 1,29 %
- celkové množství CRMB ve směsi B 5,9 % - 1,29 % = 4,61 %
- celkové množství asfaltu 20/30 v CRMB 4,61 % x 0,87 = 4,01 %

Z celkového množství asfaltového pojiva ve směsi B, tvoří 4,01 % silniční asfalt gradace 20/30. Další 0,61 % zastávají částčky pryžového granulátu a zbytek, tedy 1,29 % je zastoupeno zestárlym asfaltem z R-materiálu.

### 7.4 Stanovení míry zhutnění zkušebních desek

Na vyrobených zkušebních deskách (dle kapitoly 3.4.4 a kapitoly 3.4.7) jsem stanovoval míru zhutnění dle rovnice 6:

$$c = \frac{\rho_{bssd,1}}{\rho_{bssd,2}} \times 100$$

Rovnice 6: Stanovení míry zhutnění zkušebních desek

kde:  $c$  = míra zhutnění zkušební desky [%];

$\rho_{bssd,1}$  = objemová hmotnost zkušební desky [kg/m<sup>3</sup>];

$\rho_{bssd,2}$  = objemová hmotnost stanovená na Marshallových tělesech [kg/m<sup>3</sup>].

Celkem bylo ze směsi B vyrobeno 6 zkušebních desek, na kterých byla stanovena objemová hmotnost (dle kapitoly 3.4.8), mezerovitost [30] a míra zhutnění (dle rovnice 6). V tabulce 28 jsou uvedeny výsledky těchto metod pro jednotlivé desky. Všechny zkušební desky ze směsi B byly mírně přehutněny. Nejnižší míra zhutnění byla naměřena na desce označené jako VMT B-I. a to 100,22 %. Výsledky všech zkušebních desek odpovídají míře zhutnění  $(100,00 \pm 1,00)$  %. Zkušební deska označená jako VMT A-III. byla použita na zkoušku stanovení odolnosti vůči nízkým teplotám (dle kapitoly 3.4.9). Ostatních 5 zkušebních desek byly použity pro stanovení tuhosti (dle kapitoly 3.4.10) a stanovení odolnosti vůči únavě (dle kapitoly 3.4.11). Z tabulky 28 lze vidět, že všechny zkušební desky byly zhutněny na téměř stejnou míru zhutnění.

<b>Stanovení míry zhutnění – směs B</b>			
označení desky	objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	mezerovitost [%]	míra zhutnění [%]
VMT B-I.	2388	2,64	<b>100,22</b>
VMT B-II.	2394	2,41	<b>100,46</b>
VMT B-III.	2398	2,23	<b>100,64</b>
VMT B-IV.	2394	2,40	<b>100,47</b>
VMT B-V.	2395	2,38	<b>100,49</b>
VMT B-VI.	2394	2,40	<b>100,47</b>

Tabulka 28: Míra zhutnění zkušebních desek ze směsi B

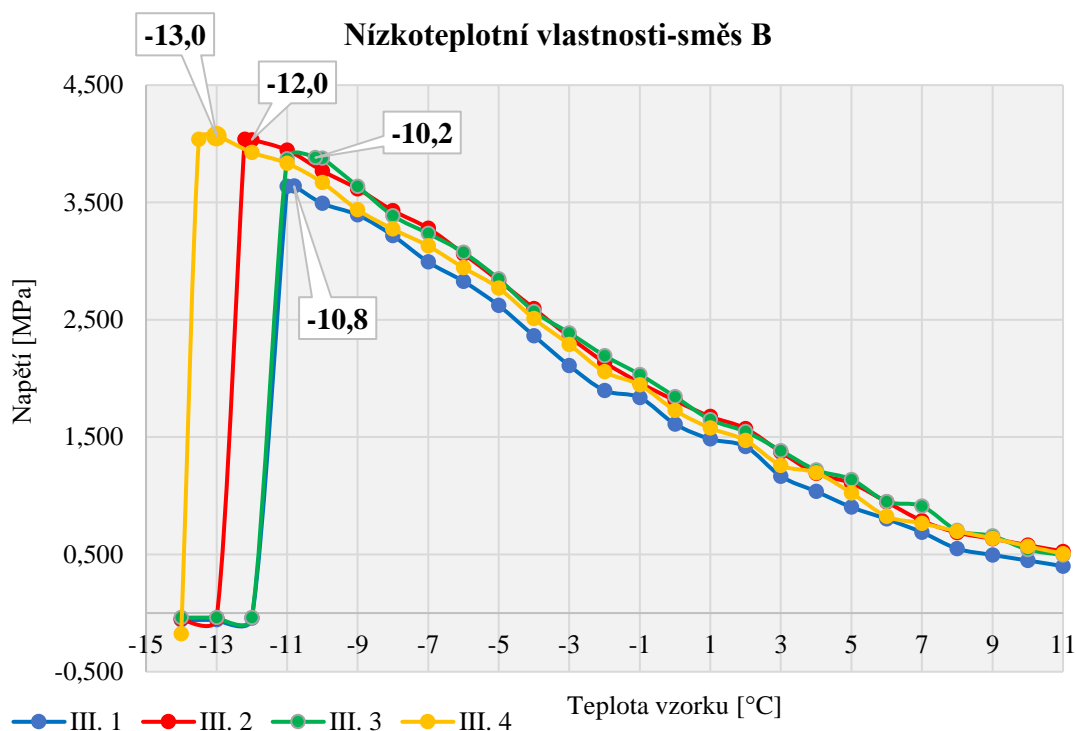
## 7.5 Stanovení nízkoteplotních vlastností

Zkoušku stanovení nízkoteplotních vlastností jsem u směsi B provedl na 4 zkušebních tělesech vyrobených ze zkušební desky označené VMT B-III. Výsledky nízkoteplotních vlastností směsi B jsou zobrazeny v tabulce 29. Průměrná kritická teplota směsi B, při které se těleso poruší mrazovou trhlinou, byla stanovena na  $-11,6$  °C. Maximální síla, která působila na těleso při porušení, je 9,83 kN. Tato síla způsobila maximální průměrné napětí při porušení vzorku 3,91 MPa. Jako nejodolnější proti působení nízkých teplot se ukázalo zkušební těleso označené III. 4, které se porušilo mrazovou trhlinou při teplotě  $-13,0$  °C.

Průběhy zkoušek stanovení nízkoteplotních vlastností směsi B jsou vykresleny v grafu 15.

Stanovení nízkoteplotních vlastností-směs B					
	označení vzorku				průměrné hodnoty
	III. 1	III. 2	III. 3	III. 4	
teplota vzorku při porušení [°C]	-10,8	-12,2	-10,2	-13,0	<b>-11,6</b>
teplota v komoře při porušení vzorku [°C]	-14,1	-15,9	-13,6	-16,7	<b>-15,1</b>
max síla při porušení vzorku [kN]	9,19	10,10	9,86	10,16	<b>9,83</b>
max napětí při porušení vzorku [MPa]	3,64	4,04	3,88	4,07	<b>3,91</b>

Tabulka 29: Stanovení nízkoteplotních vlastností směsi B



Graf 15: Stanovení nízkoteplotních vlastností-směs B

## 7.6 Stanovení tuhosti – Zkouška dvoubodovým ohybem na jednostranně vetknutém komolém klínu (2PB-TR)

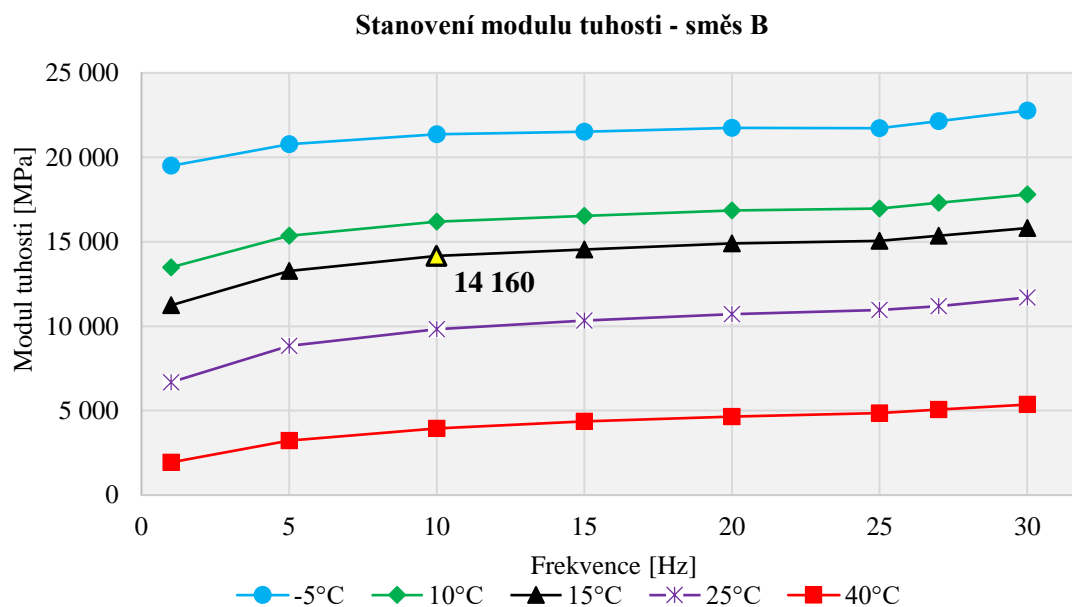
Zkouška stanovení tuhosti u směsi B byla provedena na 20 zkušebních tělesech tvaru komolého klínu (dle kapitoly 3.4.10). Jako rozhodující hodnota pro tuto zkoušku je modul tuhosti stanovený při teplotě 15 °C a frekvenci 10 Hz. Výsledky zkoušky stanovení tuhosti na směsi B jsou zobrazeny v tabulce 30. Po vyřazení 10 těles, jejichž výsledky se

výrazněji lišily od ostatních, byl stanoven průměrný modul tuhosti 10 zkušebních těles na 14160 MPa. Směrodatná odchylka činila 349 MPa.

Stanovení tuhosti-směs B								
teplota [°C]	frekvence [Hz]							
	1	5	10	15	20	25	27	30
-5 °C	19497	20770	21358	21520	21749	21719	22148	22772
10 °C	13488	15356	16186	16532	16849	16969	17312	17802
15 °C	11239	13273	<b>14160</b>	14543	14895	15055	15358	15809
25 °C	6684	8845	9820	10331	10722	10966	11191	11700
40 °C	1938	3227	3947	4362	4657	4858	5060	5359

Tabulka 30: Stanovení tuhosti-směs B

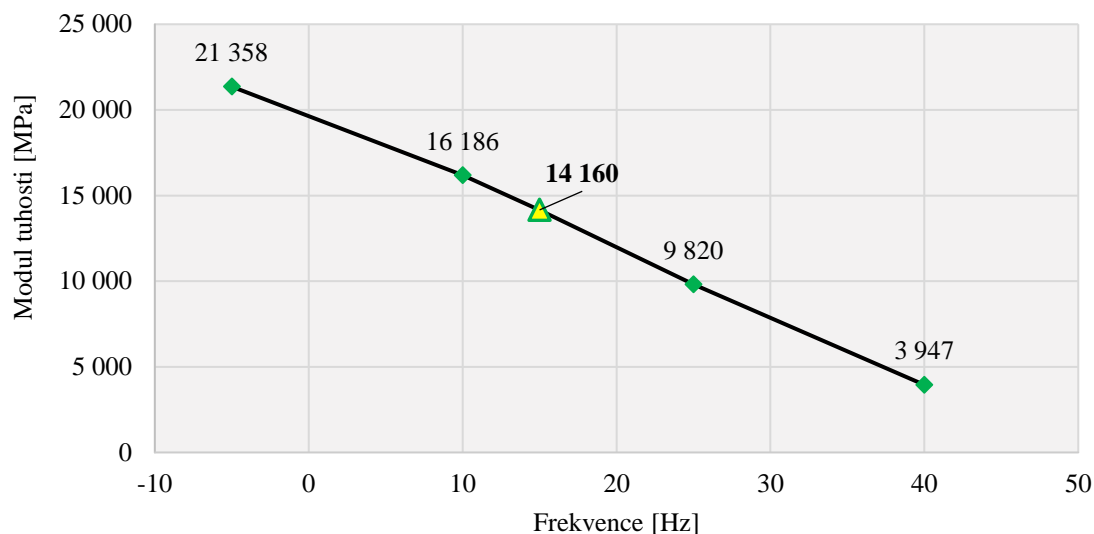
Průběh zkoušky stanovení tuhosti je pro všechny teploty a frekvence zatěžování zobrazen v grafu 16.



Graf 16: Průběh zkoušky stanovení tuhosti směsi B

V grafu 17 je graficky zobrazen průběh zatěžování zkušebních těles ze směsi B při konstantní frekvenci 10 Hz a měnící se teplotě.

### Moduly tuhosti směsi B za všech teplot při frekvenci 10 Hz



Graf 17: Moduly tuhosti směsi B při frekvenci 10 Hz a všech teplotách

## 7.7 Stanovení odolnosti vůči únavě

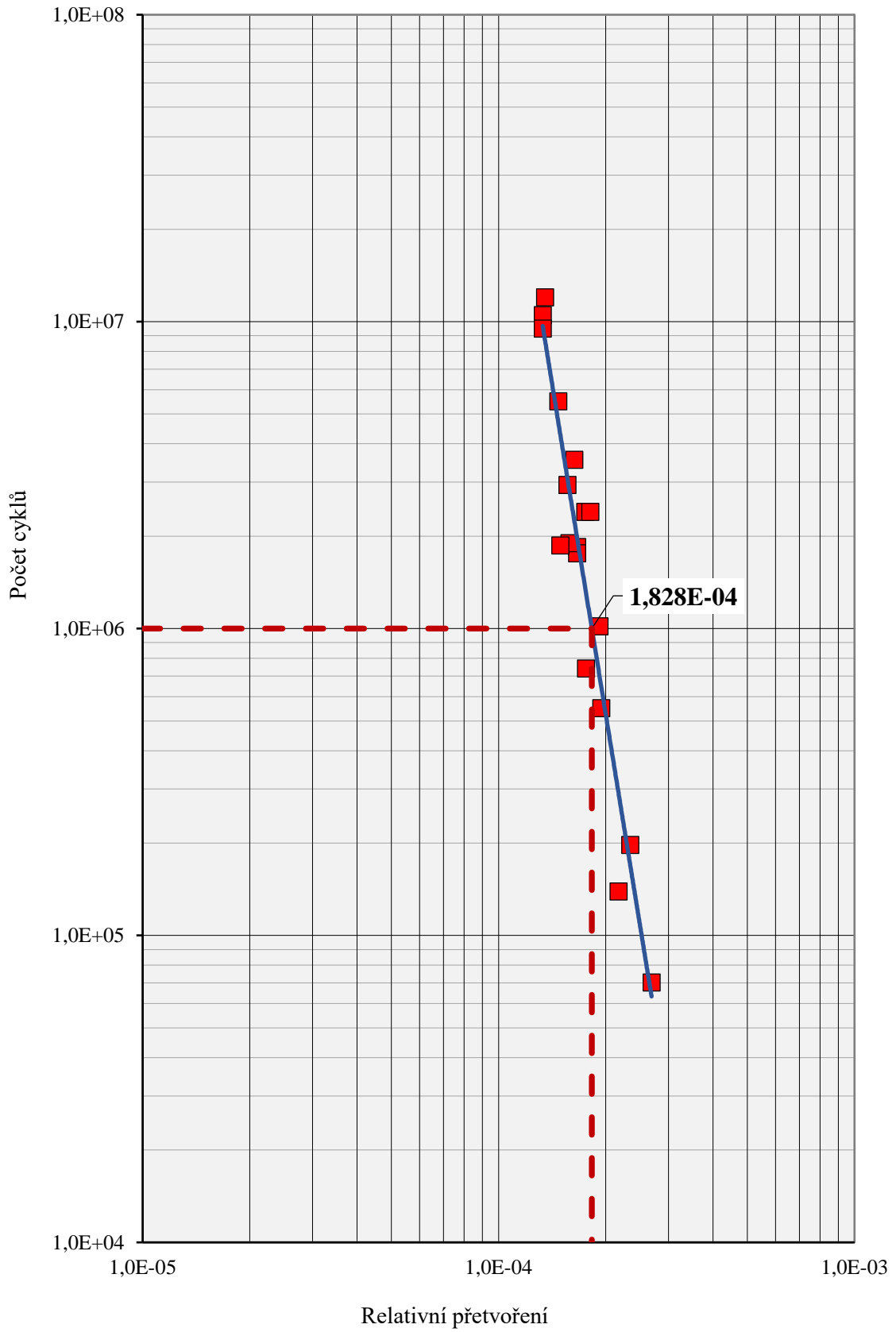
Zkouška stanovení odolnosti vůči únavě u směsi B byla prováděna (dle kapitoly 3.4.11) na 18 zkušebních tělesech tvaru komolého klínu při teplotě 10 °C a frekvenci 25 Hz. Výsledná odolnost vůči únavě dána parametrem  $\epsilon_6$  u směsi B byla stanovena na  $182,8 \times 10^{-6}$ . Výsledky této zkoušky jsou vypsány v tabulce 31, kde B reflektuje sklon křivky Wöhlerova diagramu a  $R^2$  značí korelační koeficient, který popisuje rozptýlení bodů kolem přímky.

Stanovení odolnosti vůči únavě směsi B	
Odolnost vůči únavě $\epsilon_6$ [-]	182,8 x 10 <sup>-6</sup>
Zkušební teplota zatěžování [°C]	10
Frekvence zatěžování [Hz]	25
Spolehlivost $R^2$	0,896
B	7,14

Tabulka 31: Stanovení odolnosti vůči únavě-směs B



### Stanovení odolnosti vůči únavě-směs B



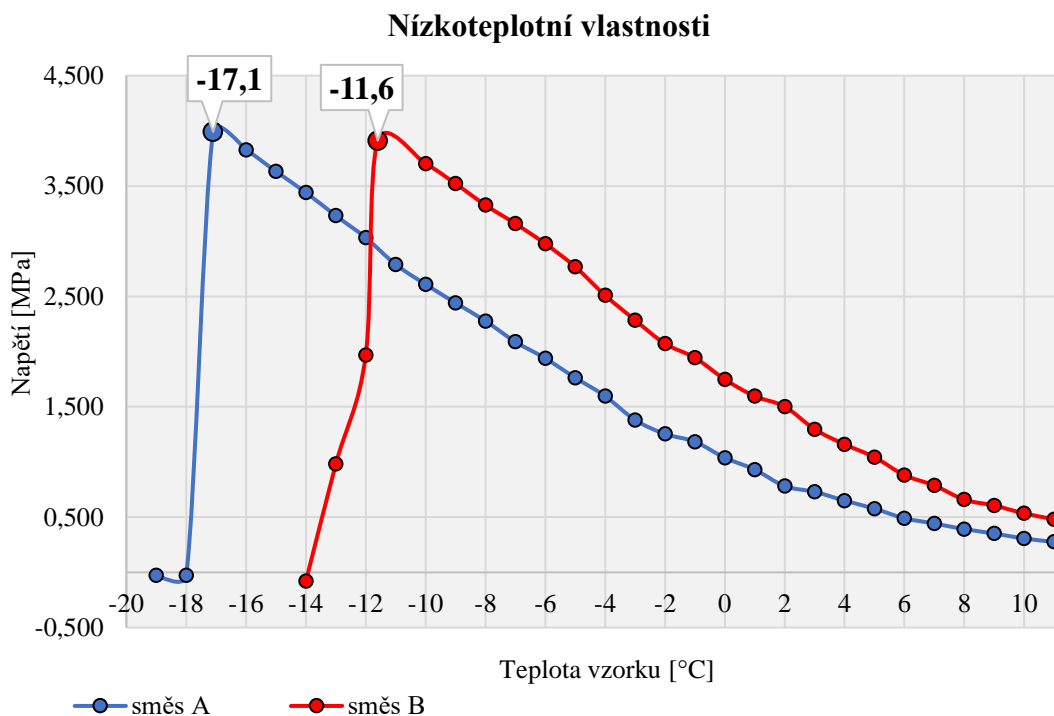
Graf 18: Stanovení odolnosti vůči únavě-směs B

## 8. Souhrnné výsledky asfaltových směsí a diskuze

V této kapitole jsou srovnány výsledky funkčních zkoušek nově vyrobených asfaltových směsí. Tyto výsledky jsou dále ověřeny, zda vyhovují funkčním požadavkům českého předpisu TP 151 a švýcarského předpisu SN 640 431-1B-NA. Ve všech grafech v rámci této kapitoly jsem pro přehlednost značil směs A červenou barvou a směs B barvou modrou.

### 8.1 Nízkoteplotní vlastnosti směsí A a B

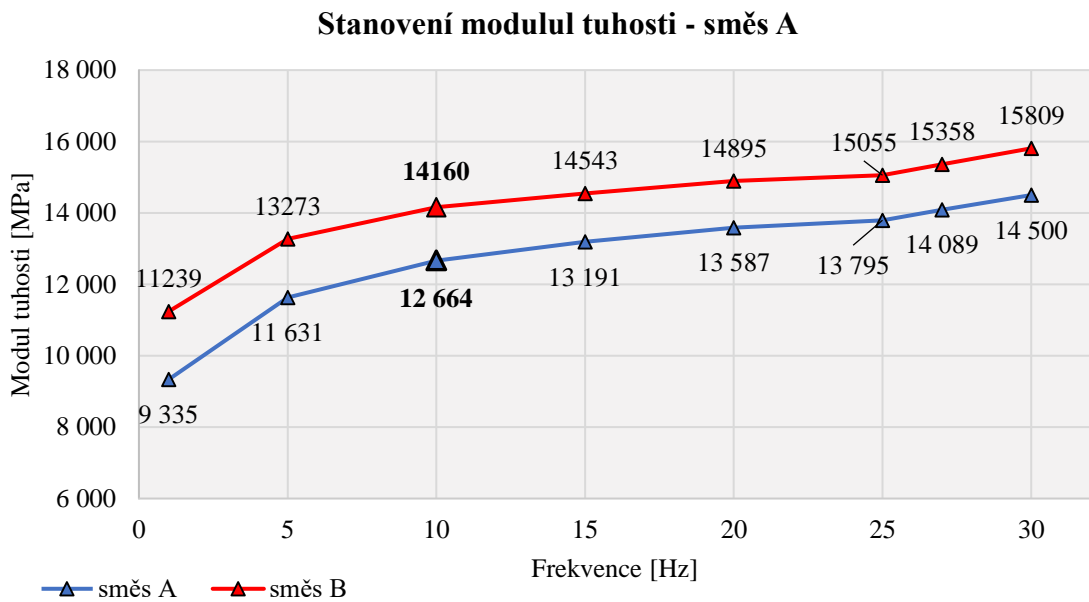
V grafu 19 jsou zobrazeny průběhy zatěžování zkušebních těles v rámci funkční zkoušky stanovení nízkoteplotních vlastností. Můžeme vidět, že směs A se jeví jako více odolná proti působení nízkých teplot, když došlo k porušení vzorků při kritické průměrné teplotě  $-17,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . U směsi B vyšla průměrná kritická teplota porušení  $-11,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , což je o  $5,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  horší výsledek, než je tomu u směsi A. Může to být z důvodu vyšší penetrace pojiva ve směsi A. Je nutno podotknout, že se jedná o asfaltové směsi do podkladních vrstev, které nebudou v reálných podmínkách čelit až takovému účinku mrazu a poklesu teplot, jako je tomu např. u obrusných vrstev. Proto můžeme konstatovat, že nově navržené asfaltové směsi do podkladních vrstev disponují velmi dobrými výsledky odolnosti vůči nízkým teplotám.



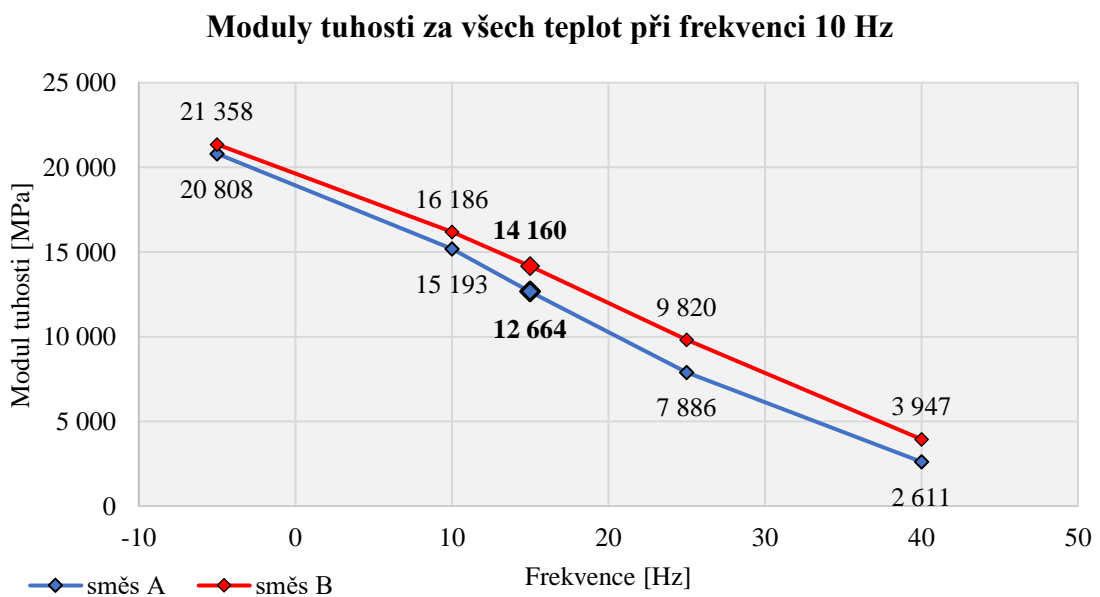
Graf 19: Srovnání nízkoteplotních vlastností směsí A a B

## 8.2 Srovnání modulů tuhosti směsi A a B

V grafu 20 jsou zobrazeny stanovené moduly tuhosti směsi A i B při teplotě 15 °C a frekvencích zatěžování (1 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz, 27 Hz a 30 Hz). V grafu 21 jsou naopak vykresleny moduly tuhosti při konstantní frekvenci zatěžování 10 Hz, ale při různých teplotách. Z obou grafů lze vyčíst, že směs B dosahuje vyšších modulů tuhosti, než směs A. Průměrný modul tuhosti směsi A (při teplotě 15 °C a frekvenci zatěžování 10 Hz) vyšel 12664 MPa, což je o cca 10,5 % nižší modul tuhosti než u směsi B, který je 14160 MPa.



Graf 20: Srovnání modulů tuhosti směsi A a B při teplotě 15 °C

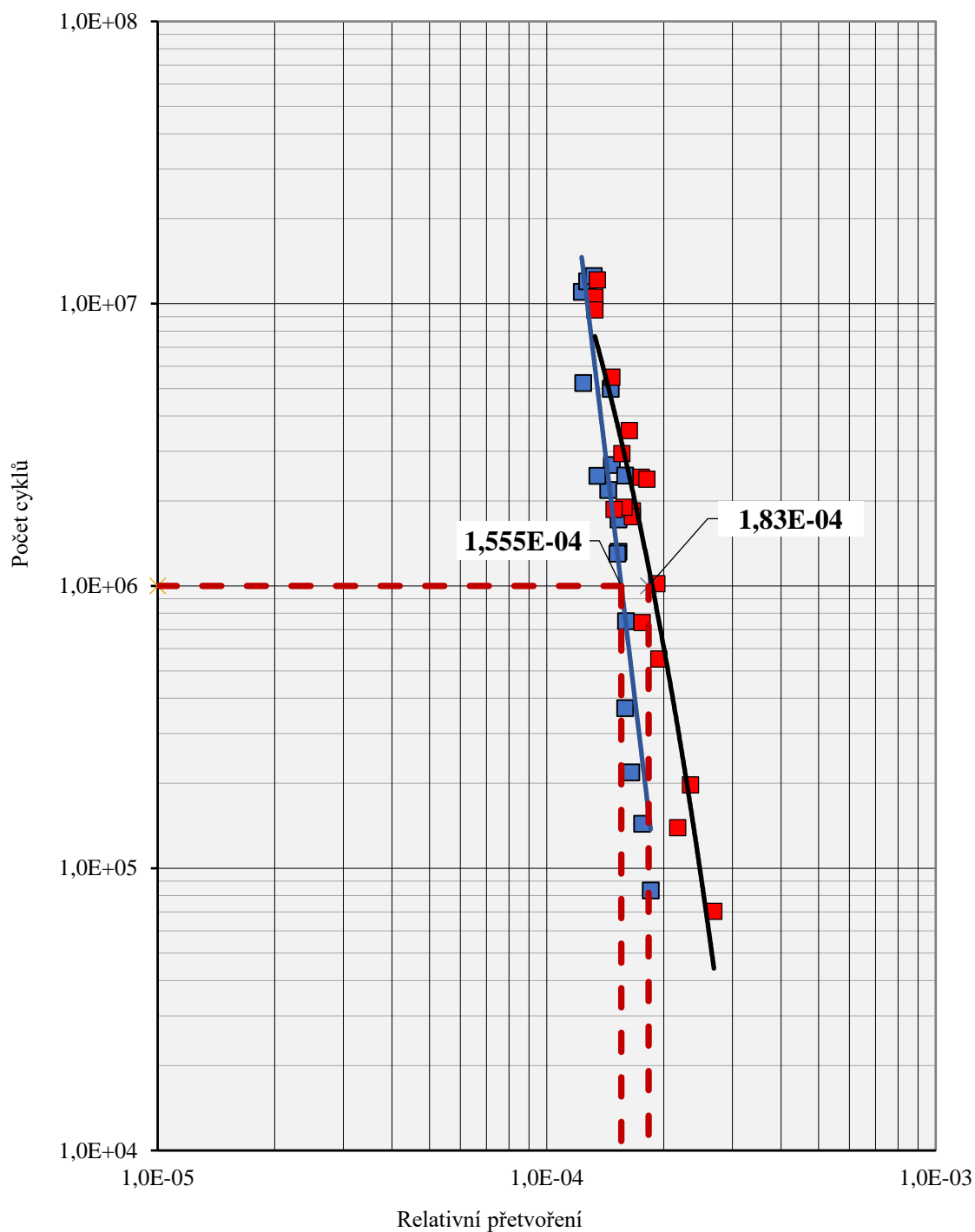


Graf 21: Srovnání modulů tuhosti směsi A a B při frekvenci 10 Hz

### 8.3 Srovnání odolností směsí A a B vůči únavě

V grafu 22 vidíme porovnání výsledků ze zkoušky stanovení odolnosti vůči únavě, která byla provedena na směsi A (modře v grafu) a směsi B (červeně v grafu). Obě tyto směsi se prezentují výbornou odolností vůči únavě. U směsi A byla stanovena tato odolnost na  $155,5 \times 10^{-6}$  a u směsi B to je dokonce  $182,8 \times 10^{-6}$ .

Stanovení odolnosti vůči únavě



Graf 22: Srovnání odolností směsí A a B vůči únavě

## 8.4 Ověření splnění funkčních požadavků

V této kapitole se věnuji ověření, zda byly splněny funkční požadavky dané českým a švýcarským předpisem. Všechny hlavní výsledky funkčních zkoušek stanovených na nově navržených asfaltových směsích jsou uvedeny v tabulce 32. Dále jsou v této tabulce uvedeny funkční požadavky stanovené v českém předpise TP 151 a švýcarském předpise SN 640 431-1B-NA.

Pro zkoušku stanovení nízkoteplotních vlastností asfaltových směsí nejsou požadovány žádné minimální hodnoty. Lze však konstatovat, že vzhledem k tomu, že se jedná o asfaltové směsi do podkladních vrstev vozovek, tyto směsi vykazují velmi dobrou odolnost vůči působení nízkých teplot.

Modul tuhosti stanovený na nově navržené směsi A je roven 12664 MPa a u směsi B je to dokonce 14160 MPa. Obě tyto směsi s přehledem vyhovují požadavkům českého předpisu TP 151, který stanovuje minimální požadovaný modul tuhosti pro směsi typu VMT 9000 MPa. Směs A také vyhovuje požadavkům směsi AC EME 22 C1, které předepisuje norma SN 640 431-1B-NA minimální hodnotu modulu tuhosti 11000 MPa. Modul tuhosti směsi B vyhovuje všem požadavkům stanoveným ve švýcarském předpise, jak pro směsi AC EME 22 C1, tak i pro směsi AC EME 22 C2, kterým norma SN 640 431-1B-NA stanovuje minimální hodnotu modulu tuhosti 14000 MPa.

Odolnost vůči únavě stanovená parametrem poměrného přetvoření  $\varepsilon_6$  odpovídá u směsi A hodnotě  $155,5 \times 10^{-6}$ . U směsi B vychází tato hodnota ještě vyšší, a to  $182,8 \times 10^{-6}$ . Obě nově navržené asfaltové směsi výrazně převyšují funkční požadavky na odolnost vůči únavě dané českým předpisem TP 151 i švýcarským předpisem SN 640 431-1B-NA. V TP 151 je minimální hodnota odolnosti vůči únavě pro směsi typu VMT  $125 \times 10^{-6}$  a v SN 640 431-1B-NA je tímto minimálním požadavkem pro směsi AC EME 22 C2 hodnota  $130 \times 10^{-6}$ .

Obě vyrobené asfaltové směsi výrazně převyšují funkční požadavky dané českým předpisem TP 151. Dá se tedy prohlásit, že se v rámci této diplomové práce podařilo navrhnout a vyrobit dvě kvalitní asfaltové směsi do podkladních vrstev vozovek, které dokážou konkurovat i švýcarským směsem AC EME, jež jsou charakteristické svým vysokým modulem tuhosti. Navržené asfaltové směsi navíc, díky obsahu modifikovaných asfaltových pojiv, dosahují dobré odolnosti vůči působení nízkých teplot. Asfaltové směsi s takovými vlastnostmi jsou ideální pro použití do konstrukce vozovek s vysokou životností.



Souhrnné výsledky funkčních zkoušek						
označení směsi	nizkoteplotní vlastnosti		modul tuhosti (teplota 15 °C, frekvence 10 Hz) [MPa]	stanovení odolnosti vůči únavě		
	teplota vzorku při porušení [°C]	max napětí při porušení vzorku [MPa]		odolnost vůči únavě $\varepsilon_6$ [ $10^{-6}$ ]	korelační koeficient spolehlivosti $R^2$	B
směs A	-17,1	3,99	12664	155,5	0,809	11,44
směs B	-11,6	3,91	14160	182,8	0,896	7,14
Funkční požadavky dle TP 151 a SN 640 431-1B-NA						
VMT 22	-	-	$\geq 9\ 000$	$\geq 125$	-	-
VMT 16	-	-	$\geq 9\ 000$	$\geq 125$	-	-
AC EME 22 C1	-	-	$\geq 11\ 000$	$\geq 100$	-	-
AC EME 22 C2	-	-	$\geq 14\ 000$	$\geq 130$	-	-

Tabulka 32: Souhrnné výsledky funkčních zkoušek

## 9. Posouzení životnosti vozovky pomocí programu

### LayEps

Životnost vozovek s použitím asfaltových vrstev z nově navržených směsí byla ověřena pomocí programu LayEps. Výsledky funkčních zkoušek směsí tak byly použity v tomto výpočtovém programu. Výpočtový program LayEps vychází ze superpozice relativních poškození. To znamená, že velikost každého namáhání poškodí materiál úměrně meznímu počtu těchto namáhání. Program je navržen v souladu s TP 170. Každá vrstva konstrukce vozovky je charakterizována modulem pružnosti, Poissonovým číslem a tloušťkou. Pro posouzení vozovky s vrstvami VMT platí, že pro zvýšení bezpečnosti návrhu vozovky z důvodu nižších zkušeností, je hodnota součinitele spolehlivosti  $\gamma_U = 1,3$  dle TP 170 (u běžných asfaltových vrstev je tato hodnota  $\gamma_U = 1,6$ ). Hodnoty poměrného porušení jsou stanovené s touto zvýšenou bezpečností. [35] Zvolené vstupní parametry pro posouzení skladby vozovky jsou vypsány v tabulce 33. Byla zvolena nejvyšší třída dopravního zatížení S a návrhová úroveň porušení D0. Pro posouzení životnosti vozovky je volen meziroční růst dopravy 3 % a 5 %.

Vstupní parametry	
úroveň porušení	D0
TNVC	85000000
C1	0,45
C2	1
C3	0,7
C4	1
podloží	modul střední 80 MPa
	modul jarní 80 MPa
	režim pendulární
	mírně namrzavé

Tabulka 33: Vstupní parametry pro výpočtový program LayEps

## 9.1 Posouzení životnosti konstrukce vozovky dle TP 170: D0-N-2-S-II

Tato kapitola se zabývá posouzením životnosti konstrukce vozovky se skladbou D0-N-2-S-II dle katalogu TP 170. Při posuzování jsem podkladní vrstvu nahradil směsí A a poté směsí B, které byly navrženy v rámci této diplomové práce. Cílem bylo sledovat prodloužení životnosti vozovky. V tabulce 34 je vypsána a posouzena skladba vozovky D0-N-2-S-II.

V tabulce 34 můžeme vidět, že koeficienty poměrného porušení po zaokrouhlení v zásadě splňují podmínku  $\leq 1$ , tudíž tato skladba je dimenzována na počet  $TNV_c = 85000000$  při návrhovém období 25 let.

Skladba vozovky dle TP 170: D0-N-2-S-II			
označení vrstvy vozovky	tloušťka vrstvy [mm]	modul tuhosti vrstvy [MPa]	odolnost vůči únavě $\epsilon_6$ [ $10^{-6}$ ]
SMA 11S	40	5500	160
ACL 22S	80	7500	115
VMT 22	120	9000	125
MZK	200	600	0
ŠD <sub>A</sub>	150	400	0
poměrné porušení asfaltových vrstev = 0,648			
poměrné porušení podloží = 1,084			
počet $TNV_c = 85\ 000\ 000$			
návrhové období [rok]			
25			

Tabulka 34: Katalogová skladba vozovky D0-N-2-S-II dle TP 170

V tabulce 35 můžeme vidět posouzení skladby vozovky po zaměnění podkladní vrstvy VMT z katalogu za směs A navrženou v rámci této diplomové práce. Tloušťky jednotlivých vrstev byly zachovány. Při takto upravené skladbě vozovky se dosáhne koeficientu poměrného porušení 1,0 při průjezdu zhruba 95 mil těžkých nákladních vozidel, což je cca o 12 % více vozidel než u katalogové skladby. Za těchto předpokladů můžeme teoreticky navýšit návrhové období pro tuto skladbu vozovky. Při uvažování meziročního nárůstu dopravy 3 %, se prodlouží návrhové období o cca 2 roky. Když zvolíme meziroční nárůst dopravy 5 %, můžeme teoreticky uvažovat o prodloužení návrhového období o 1,5 roku.

Směs A místo podkladní vrstvy			
označení vrstvy vozovky	tloušťka vrstvy [mm]	modul tuhosti vrstvy [MPa]	odolnost vůči únavě $\epsilon_6$ [ $10^{-6}$ ]
SMA 11S	40	5500	160
ACL 22S	80	7500	115
<b>směs A</b>	<b>120</b>	<b>12664</b>	<b>155</b>
MZK	200	600	0
ŠD <sub>A</sub>	150	400	0
poměrné porušení asfaltových vrstev = 0,127			
poměrné porušení podloží = 0,997			
počet TNVc = 95 000 000			
návrhové období [rok]			
meziroční nárůst 3 %		meziroční nárůst 5 %	
<b>27</b>		<b>26,5</b>	

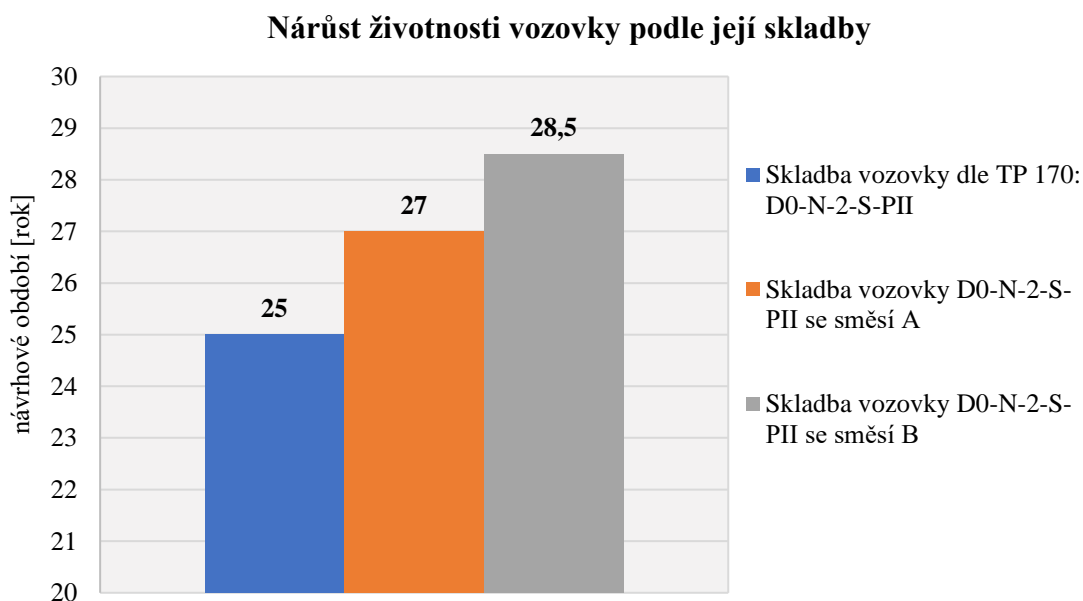
Tabulka 35: Skladba vozovky D0-N-2-S-PII se směsí A

Když bychom použili do podkladní vrstvy vozovky směs B, zvýší se počet průjezdů těžkých nákladních vozidel před teoretickým porušením podloží o 20 milionů. Tento fakt znamená, že návrhové období vozovky s touto skladbou se může teoreticky zvýšit až o 3,5 let, za předpokladu meziročního nárůstu dopravy 3 % (viz tabulka 36).

Směs B místo podkladní vrstvy			
označení vrstvy vozovky	tloušťka vrstvy [mm]	modul tuhosti vrstvy [MPa]	odolnost vůči únavě $\epsilon_6$ [ $10^{-6}$ ]
SMA 11S	40	5500	160
ACL 22S	80	7500	115
<b>směs B</b>	<b>120</b>	<b>14160</b>	<b>172</b>
MZK	200	600	0
ŠD <sub>A</sub>	150	400	0
poměrné porušení asfaltových vrstev = 0,048			
poměrné porušení podloží = 1,010			
počet TNVc = 105 000 000			
návrhové období [rok]			
meziroční nárůst 3 %		meziroční nárůst 5 %	
<b>28,5</b>		<b>27,5</b>	

Tabulka 36: Skladba vozovky D0-N-2-S-PII se směsí B

V grafu 23 je vykresleno porovnání teoretických návrhových období pro různé skladby konstrukce vozovky. Můžeme tedy konstatovat, že navržené asfaltové směsi typu VMT umožňují, při zachování jednotlivých tloušťek vrstev, prodloužit životnost vozovky o více než 3 roky. Nutno však konstatovat, že poměrné porušení asfaltových vrstev bylo několikanásobně nižší, než poměrné porušení podloží, tudíž není zcela využít potenciál směsi VMT.



Graf 23: Porovnání teoretického návrhového období vozovek s podkladní vrstvou z MZK

## 9.2 Posouzení životnosti konstrukce vozovky dle TP 170: D0-N-3-S-II

Abych mohl více využít potenciál směsí typu VMT, zvolil jsem pro další posouzení skladbu vozovky se stmelenými podkladními vrstvami. Tyto podkladní vrstvy vykazují vyšší modul přetvoření a tím lepší odolnost vůči opakovanému namáhání. Z TP 170 jsem vybral katalogovou skladbu vozovky D0-N-3-S-II.

V tabulce 37 jsou uvedeny výsledky posouzení této katalogové skladby. Můžeme vidět, že koeficient poměrného porušení podloží splňuje podmínku  $\leq 1$  i po průjezdu 108 milionů těžkých nákladních vozidel, což znamená, že tato skladba je v katalogu nepatrně předdimenzována (je navržena na 85 mil. TNV<sub>c</sub>). Z toho důvodu budeme, pro účely porovnání s vrstvami z navržených směsí VMT, teoreticky uvažovat návrhové období této katalogové skladby 28,5 let.



<b>Skladba vozovky dle TP 170: D0-N-3-S-PII</b>			
označení vrstvy vozovky	tloušťka vrstvy [mm]	modul tuhosti vrstvy [MPa]	odolnost vůči únavě $\epsilon_6$ [ $10^{-6}$ ]
SMA 11S	40	5500	160
ACL 22S	80	7500	115
ACP 22S	120	5500	100
SC C8/10	170	2500	0
ŠD <sub>A</sub>	150	400	0
poměrné porušení asfaltových vrstev = 0,209			
poměrné porušení podloží = 0,991			
počet TNV <sub>c</sub> = 108 000 000			
<b>návrhové období [rok]</b>			
<b>28,5</b>			

Tabulka 37: Katalogová skladba vozovky D0-N-3-S-PII dle TP 170

Dále jsem v katalogové skladbě z TP 170 zaměnil podkladní vrstvu ACP 22S za směs VMT 22. Takto pozměněnou skladbu vozovky jsem opět posoudil a výsledky zaznamenal do tabulky 38. Můžeme si všimnout, že došlo k navýšení počtu průjezdů TNV<sub>c</sub> na zhruba 128 mil.

<b>Směs VMT 22 místo podkladní vrstvy</b>			
označení vrstvy vozovky	tloušťka vrstvy [mm]	modul tuhosti vrstvy [MPa]	odolnost vůči únavě $\epsilon_6$ [ $10^{-6}$ ]
SMA 11S	40	5500	160
ACL 22S	80	7500	115
<b>VMT 22</b>	<b>120</b>	<b>9000</b>	<b>125</b>
SC C8/10	170	2500	0
ŠD <sub>A</sub>	150	400	0
poměrné porušení asfaltových vrstev = 0,148			
poměrné porušení podloží = 0,993			
počet TNV <sub>c</sub> = 128 000 000			

Tabulka 38: Skladba vozovky D0-N-3-S-PII se směsí VMT 22

V dalším kroku jsem zaměnil směs VMT 22 v podkladní vrstvě za směs A vyrobenou v rámci diplomové práce. Pomocí softwaru LayEps jsem stanovil, že poměrné porušení podloží stále vyhoví podmínce  $\leq 1$  po projetí přibližně 162 mil. těžkých nákladních vozidel, což by při meziročním nárůstu dopravy 3 % znamenalo teoretické

prodloužení návrhového období na 36 let. Výsledky posouzení této skladby jsou vypsány v tabulce 39.

Směs A místo podkladní vrstvy			
označení vrstvy vozovky	tloušťka vrstvy [mm]	modul tuhosti vrstvy [MPa]	odolnost vůči únavě $\epsilon_6$ [ $10^{-6}$ ]
SMA 11S	40	5500	160
ACL 22S	80	7500	115
<b>směs A</b>	<b>120</b>	<b>12664</b>	<b>155</b>
SC C8/10	170	2500	0
ŠD <sub>A</sub>	150	400	0
poměrné porušení asfaltových vrstev = 0,032			
poměrné porušení podloží = 0,994			
počet TNV <sub>c</sub> = 162 000 000			
návrhové období [rok]			
meziroční nárůst 3 %		meziroční nárůst 5 %	
<b>36</b>		<b>33,5</b>	

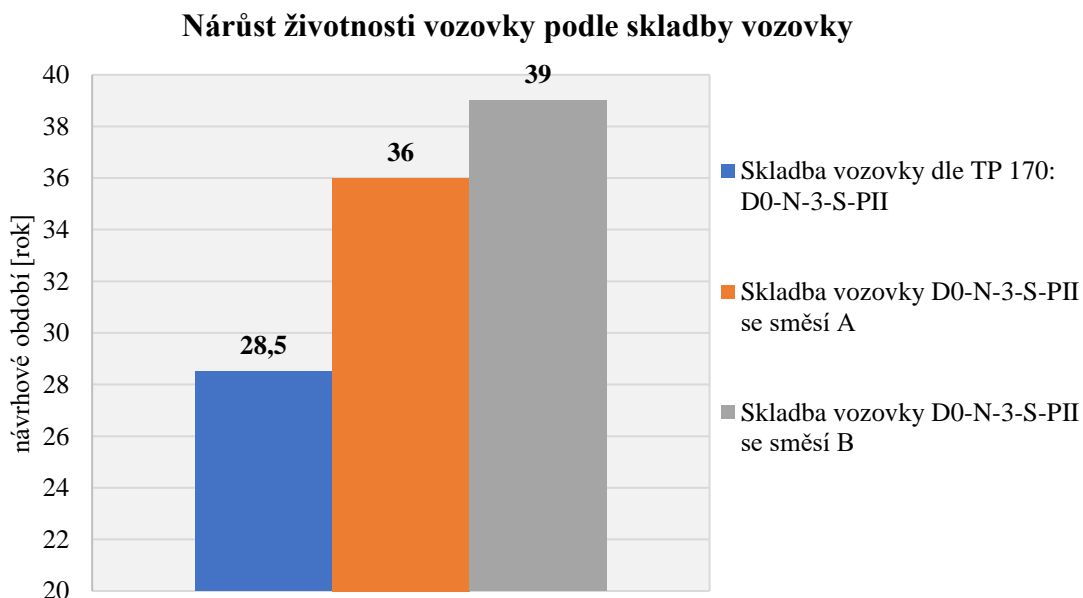
Tabulka 39: Skladba vozovky D0-N-3-S-PII se směsí A

V posledním kroku, při posuzování skladeb konstrukce vozovky, jsem použil do podkladních vrstev směs B. Tato směs prokazuje nejlepší vlastnosti a po vyhodnocení v programu LayEps jsem zjistil, že k porušení podloží by teoreticky mohlo dojít až po průjezdu 175 milionů TNV<sub>c</sub>. Jedná se o více než dvojnásobný počet TNV<sub>c</sub> než u katalogové skladby z TP 170. Můžeme tedy uvažovat, že za těchto podmínek vzroste návrhové období této skladby až na cca 39 let. Tyto výsledky skladby vozovky se směsí B najdeme v tabulce 40.

Směs B místo podkladní vrstvy			
označení vrstvy vozovky	tloušťka vrstvy [mm]	modul tuhosti vrstvy [MPa]	odolnost vůči únavě $\epsilon_6$ [ $10^{-6}$ ]
SMA 11S	40	5500	160
ACL 22S	80	7500	115
<b>směs B</b>	<b>120</b>	<b>14160</b>	<b>172</b>
SC C8/10	170	2500	0
ŠD <sub>A</sub>	150	400	0
poměrné porušení asfaltových vrstev = 0,017			
poměrné porušení podloží = 0,998			
počet TNVc = 175 000 000			
návrhové období [rok]			
meziroční nárůst 3 %		meziroční nárůst 5 %	
<b>39</b>		<b>35</b>	

Tabulka 40: Skladba vozovky D0-N-3-S-II se směsí B

V grafu 24 jsou zobrazeny jednotlivé teoretické návrhové období pro katalogovou skladbu z TP 170 a skladby vozovek s použitím nově navržených směsí. Z naměřených údajů můžeme říct, že nově navržené asfaltové směsi typu VMT mohou, za předpokladu kvalitních podkladních vrstev, prodloužit životnost vozovky o více než 10 let.



Graf 24: Porovnání teoretického návrhového období vozovek se stmelenou podkladní vrstvou

Z výsledků se opět ukazuje, že relativní porušení asfaltových vrstev je několikanásobně nižší než relativní porušení podloží. Potenciál vrstev VMT tak není opět

zcela využít. Z toho důvodu bylo ve třetím kroku (viz kapitola 9.3) přistoupeno k navýšení tloušťek podkladních vrstev.

### 9.3 Posouzení životnosti konstrukce vozovky s navýšením tloušťek podkladních vrstev

Aby byl více využit potenciál směsí typu VMT v konstrukci vozovky, bylo přistoupeno k navýšení podkladních vrstev (SC C8/10 a ŠDA) na 200 mm. Pro podkladní asfaltovou vrstvu byla použita směs B, která dosahuje nejlepších výsledků. Tuto skladbu jsem opět posoudil pomocí programu LayEps a výsledky zaznamenal do tabulky 41. Můžeme si všimnout, že poměrné porušení podloží vyhovuje podmínce  $\leq 1$  i po průjezdu cca 375 milionu TNV<sub>c</sub>. Z výsledků vyplývá, že u této skladby vozovky můžeme teoreticky, při meziročním nárůstu dopravy 3 %, uvažovat návrhové období o více než 34 let delší, než je tomu u katalogové skladby.

Směs B místo podkladní vrstvy			
označení vrstvy vozovky	tloušťka vrstvy [mm]	modul tuhosti vrstvy [MPa]	odolnost vůči únavě $\epsilon_6$ [ $10^{-6}$ ]
SMA 11S	40	5500	160
ACL 22S	80	7500	115
<b>směs B</b>	<b>120</b>	<b>14160</b>	<b>172</b>
SC C8/10	<b>200</b>	2500	0
ŠDA	<b>200</b>	400	0
poměrné porušení asfaltových vrstev = 0,023			
poměrné porušení podloží = 0,989			
počet TNV <sub>c</sub> = 375 000 000			
návrhové období [rok]			
meziroční nárůst 3 %		meziroční nárůst 5 %	
<b>63</b>		<b>46</b>	

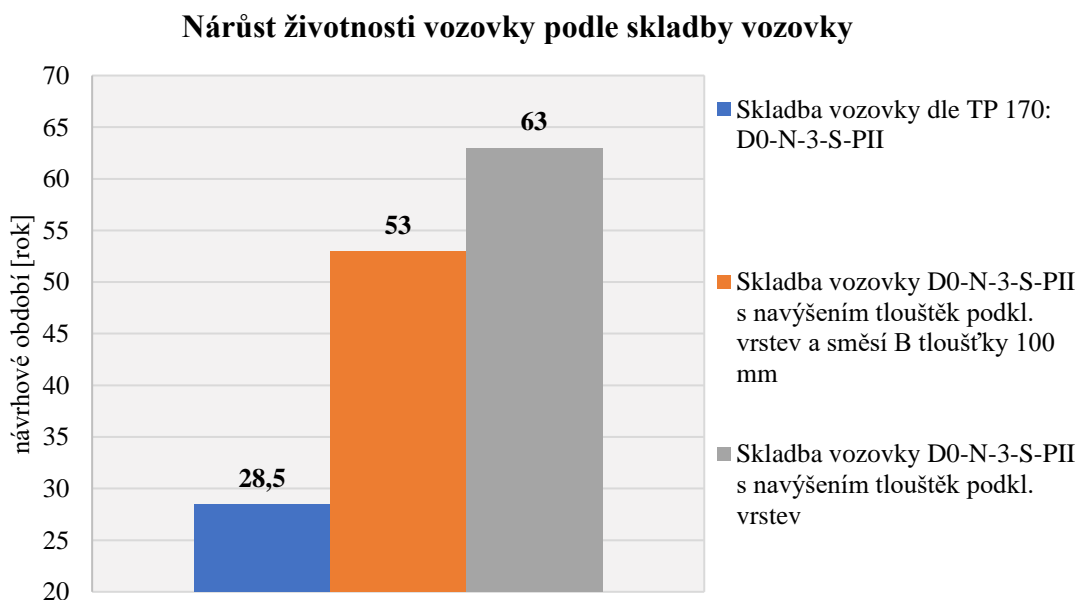
Tabulka 41: Skladba vozovky s navýšením tloušťek podkladních vrstev a použitím směsi B

V dalším kroku jsem zjišťoval, zda mohu snížit tloušťku podkladní asfaltové vrstvy, při zachování vysoké životnosti vozovky. Výsledky v tabulce 42 ukazují, že když snížím tloušťku konstrukční vrstvy ze směsi B o 20 mm (o 17 %), dojde k teoretickému porušení podloží po projetí 240 milionu TNV<sub>c</sub>. Odpovídá to teoretickému návrhovému období vozovky 53 let, při meziročním nárůstu dopravy 3 %.

Směs B místo podkladní vrstvy			
označení vrstvy vozovky	tloušťka vrstvy [mm]	modul tuhosti vrstvy [MPa]	odolnost vůči únavě $\epsilon_6$ [ $10^{-6}$ ]
SMA 11S	40	5500	160
ACL 22S	80	7500	115
<b>směs B</b>	<b>100</b>	<b>14160</b>	<b>172</b>
SC C8/10	200	2500	0
ŠDA	200	400	0
poměrné porušení asfaltových vrstev = 0,020			
poměrné porušení podloží = 1,006			
počet TNVc = 240 000 000			
návrhové období [rok]			
meziroční nárůst 3 %		meziroční nárůst 5 %	
<b>53</b>		<b>42</b>	

Tabulka 42: Skladba vozovky se sníženou tloušťkou podkladní vrstvy ze směsi A

V grafu 25 jsou graficky srovnány teoretické hodnoty návrhového období posuzovaných skladeb vozovky. Můžeme vidět, že vhodným zesílením podkladních vrstev a podloží, můžeme teoreticky prodloužit životnost vozovky až o 34,5 roku.



Graf 25: Porovnání teoretického návrhového období vozovek po úpravě podkladních vrstev

Dle dosavadních výsledků můžu konstatovat, že zesílením podkladních vrstev a podloží, tak aby hodnoty poměrného porušení podloží a asfaltových vrstev byly podobné,



můžeme dosáhnout výrazného prodloužení životnosti vozovky nebo výrazného snížení tloušťky asfaltových vrstev.

## 10. Závěr

V rámci diplomové práce jsem navrhl a laboratorně odzkoušel dvě nové asfaltové směsi typu VMT, určené do podkladních vrstev vozovek. Tyto směsi jsou zrnitosti do 22 mm, zároveň do nich bylo dávkováno 25 % R-materiálu za studena a nebylo použito žádných rejuvenačních přísad. První asfaltová směs (označována „směs A“), kterou jsem vyrobil, obsahovala polymerem modifikované asfaltové pojivo PMB 10/40-65. Druhá asfaltová směs (označována „směs B“) obsahovala asfaltové pojivo modifikované pryžovým granulátem.

Tyto asfaltové směsi jsem podrobil následujícím funkčním zkouškám:

- stanovení tuhosti;
- stanovení odolnosti vůči únavě;
- stanovení odolnosti vůči účinkům mrazu.

Následně jsem ověřil, zda tyto asfaltové směsi splňují funkční požadavky stanovené v TP 151. Tyto směsi jsem také porovnal s minimálními hodnotami stanovenými ve švýcarském předpisu SN 640 431-1B-NA.

Modul tuhosti (při teplotě 15 °C a frekvenci zatěžování 10 Hz) stanovený u směsi A je roven 12664 MPa, přičemž u směsi B je to dokonce 14160 MPa. Obě navržené asfaltové směsi tak disponují vysokými moduly tuhosti a výrazně převyšují minimální hodnotu 9000 MPa stanovenou v českém předpise TP 151. Směs A vyhovuje i švýcarským požadavkům na směs AC EME C1, kde je požadován minimální modul tuhosti 11000 MPa. Nevyhovuje jen požadavkům pro směsi AC EME C2, pro které je mezní hodnota 14000 MPa. Směs B vykazuje tak vysoký modul tuhosti, že splňuje funkční požadavky i dle švýcarského předpisu SN 640 431-1B-NA.

Odolnost vůči únavě stanovená parametrem  $\varepsilon_6$  odpovídá u směsi A hodnotě  $155,5 \times 10^{-6}$ . U směsi B vychází tato hodnota ještě vyšší, a to  $182,8 \times 10^{-6}$ . Obě nově navržené asfaltové směsi výrazně převyšují funkční požadavky na odolnost vůči únavě dané českým předpisem TP 151 ( $\varepsilon_6 = 125 \times 10^{-6}$ ) i švýcarským předpisem SN 640 431-1B-NA ( $\varepsilon_6 = 130 \times 10^{-6}$ ).

Z pohledu nízkoteplotních vlastností se jeví směs A jako více odolná než směs B. Kritická teplota porušení vzorku, vyrobeného ze směsi A, mrazovou trhlinou je -17,1 °C. U směsi B byla tato kritická teplota stanovena na -11,6 °C. Jedním z důvodů je vyšší hodnota penetrace pojiva ve směsi A. Požadavky na odolnost vůči nízkým teplotám

nejdou v předpisech stanoveny, a proto nemáme možnost výsledky srovnat s minimálními hodnotami. Vzhledem k použití asfaltových směsí do podkladních vrstev lze však říci, že tyto směsi vykazují velmi dobrou odolnost vůči působení nízkých teplot.

V poslední fázi diplomové práce bylo pomocí výpočetního programu LayEps ověřeno, že:

- použití navržených asfaltových směsí do konstrukce vozovky s nestmelenými podkladními vrstvami umožní prodloužit životnost vozovky až o 3,5 roku;
- použití navržených asfaltových směsí do konstrukce vozovky se stmelenými podkladními vrstvami umožní prodloužit životnost vozovky až o 10,5 roku;
- zvýšení tloušťky podkladních vrstev umožní vyšší využití potenciálu směsí VMT a životnost vozovky se prodlouží na více než dvojnásobek (o 34,5 roků).

Nutno však dodat, že i když se prodlouží životnost vozovky, je stále potřeba v časových intervalech výměna obrusných vrstev.

Závěrem lze konstatovat, že diplomová práce splnila hlavní cíle, kterými byly:

- Návrh nových asfaltových směsí s vysokým modulem tuhosti, které vyhoví minimálním funkčním požadavkům stanoveným v TP 151 a zároveň vyhoví i náročným funkčním požadavkům dle SN 640 431-1B-NA.
- Ověření použití maximálního množství R-materiálu do směsí typu VMT, které jsme schopni dávkovat bez použití paralelního bubnu, tj. za studena.
- Navrhnout takové asfaltové směsi, které umožní prodloužit životnost vozovky a jsou vhodné do tzv. „věčných vozovek“.

## 11. Seznam použité literatury

- [1] SDA. SDA [online]. Copyright © SDA [cit. 16.12.2019]. Dostupné z: <http://portal.sda-cia.cz/stat.php?v#str=vpp>
- [2] Petr SVOBODA, Úvodní slovo. In: *Sborník ASFALTOVÉ VOZOVKY 2019*. České Budějovice: PRAGOPROJEKT, 2019. ISBN 978-80-906809-3-7.
- [3] Jan KUDRNA, Pavel ŠPERKA, Adam PUDA, Květoslav URBANEC a Manfred KRÖNIG. *Nové technologie výstavby ložních a podkladních vrstev*. In: ASFALTOVÉ VOZOVKY 2017. Praha: PRAGOPROJEKT, 2017, s. 7. ISBN 978-80-906809-0-6.
- [4] TP 151. *Asfaltové směsi s vysokým modulem tuhosti (VMT)*. Ministerstvo dopravy, odbor silniční infrastruktury, 2010.
- [5] SN 640 431-1B-NA. Asphaltmischgut: Mischgutanforderungen – Teil 1: Asphaltbeton. Zürich: Schweizerischer Verband der Strassen-und Verkehrsfachleute VSS, c2008.
- [6] Bc. Roman Stromecký. *Asfaltové směsi s vyšší životností za použití R-materiálu*. Brno, 2019. 17s., 46s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce prof. Ing. Jan Kudrna, CSc.
- [7] Igor RUTTMAR, Marcin HERING, Agata GRAJEWSKA. *Vozovka pro velká dopravní zatížení ze tří vrstev SMA v rafinerii Gdaňsk*. In: ASFALTOVÉ VOZOVKY 2017. Praha: PRAGOPROJEKT, 2017, s. 8. ISBN 978-80-906809-0-6.
- [8] ČSN EN 13108-1. *Asfaltové směsi – Specifikace pro materiály – Část 1: Asfaltový beton*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [9] TP 170. *Navrhování vozovek pozemních komunikací*. Ministerstvo dopravy, odbor silniční infrastruktury, 2010.
- [10] Jan VALENTIN, Nová technická norma ČSN 73 6120 pro asfaltové směsi neupravené harmonizovanými evropskými normami. In: *Sborník ASFALTOVÉ VOZOVKY 2019*. České Budějovice: PRAGOPROJEKT, 2019. ISBN 978-80-906809-3-7.
- [11] Daniel Horáček: *Návrh asfaltové směsi s použitím 30 % R-materiálu a její posouzení funkčními zkouškami*. Brno, 2017. Bakalářská práce. Vysoké učení

- technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce prof. Ing. Jan Kudrna, CSc.
- [12] *EME Technology Transfer to Australia: An Explorative Study*. Sydney: Austroads Ltd 2013, 2013. ISBN 978-1-925037-23-4.
- [13] Asfaltové směsi s vysokým obsahem R-materiálu – dosavadní zkušenosti | Silnice mosty. *Silnice mosty* [online]. Copyright © [cit. 13.12.2019]. Dostupné z: <https://www.silnice-mosty.cz/615-asfaltove-smesi-s-vysokym-obsahem-r-materialu-dosavadni-zkusenosti/>
- [14] ČSN 73 6141. *Požadavky na použití R-materiálu do asfaltových směsí*. Listopad 2019
- [15] Slavíček M., *Využití R-materiálu v asfaltových kobercích mastixových*. Brno 2017, 15s, Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Hýzl, Ph.D.
- [16] Wirtgen w200 for sale, Used Wirtgen w200 Road Planer for sale, Wirtgen w200 for Road Construction, Sigma PlantFinder. *Used Road and Piling Equipment for Sale, Sigma Plantfinder* [online].  
<https://www.sigmaplantfinder.com/equipment/road-construction/road-planer/wirtgen-w200-2/>
- [17] Hýzl, Petr. *Výroba, pokládka a hutnění asfaltových směsí*. Brno: VUT Brno, FAST, Ústav pozemních komunikací, 2019. Přednáška
- [18] Obalovny - BETON SERVER – BETON, VŠE Z BETONU A VŠE PRO BETON V ČR. BetonServer - BETON SERVER - BETON, VŠE Z BETONU A VŠE PRO BETON V ČR [online]. Copyright © 2018 betonsserver.cz, Všechna práva vyhrazena [cit. 16.12.2019].
- [19] Karel Spies: *Asfaltová směs pro obrusné vrstvy se zvýšeným obsahem R-materiálu*. Brno, 2018. 17s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce prof. Ing. Jan Kudrna, CSc.  
Dostupné z: <https://www.betonsserver.cz/obalovny-asfalt/obalovny>
- [20] VARAUS, M. Recyklace netuhých vozovek, Pozemní komunikace II. Brno: VUT Brno, FAST, Ústav pozemních komunikací, 2012. Přednáška.
- [21] France. Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements. *Note d'information. LES ENROBES A MODULE ELEVE*. ISSN: 1250-8683, OCLC: 474335355, SETRA, 1997

- [22] ČSN EN 933-1+A1. *Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [23] ČSN EN 1426. *Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [24] ČSN EN 1427. *Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [25] ČSN EN 12697-35+A1. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 35: Laboratorní výroba směsi*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [26] ČSN EN 12697-30+A1. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [27] ČSN EN 12697-5+A1. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [28] ČSN EN 12697-33+A1. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 33: Příprava zkušebních těles zhutňovačem desek*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [29] ČSN EN 12697-6+A1. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [30] ČSN EN 12697-8. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 8: Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí*. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [31] 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: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [32] ČSN EN 12697-26. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 26: Tuhost*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [33] ČSN EN 12697-24. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 24: Odolnost vůči únavě*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [34] Materiály poskytnuté silniční laboratoří výzkumného centra AdMaS v Brně.



- [35] COUFALÍK, Bc. Pavel. *Návrh a posouzení směsi pro asfaltové vrstvy se zvýšenou odolností proti šíření trhlin (SAL)*. Brno, 2012. Diplomová. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. JAN KUDRNA, CSc.

## 12. Seznam tabulek

Tabulka 1: Požadavky na směsi typu VMT a AC EME dle českých a švýcarských norem [6].....	14
Tabulka 2: Doporučené druhy asfaltových pojiv podle třídy dopravního zatížení [8] ...	19
Tabulka 3: Srovnání požadavků na asfaltové směsi do podkladních vrstev.....	23
Tabulka 4: Maximální povolené množství R-materiálu ve směsích .....	24
Tabulka 5: Porovnání funkčních požadavků u nás a v zahraničí [4][5][21].....	25
Tabulka 6: Možnosti přidání upraveného R-materiálu do nově vyráběných směsí [14]	26
Tabulka 7: Šaržové obalovny v ČR bez paralelního bubnu [18].....	31
Tabulka 8: Šaržové obalovny v ČR vybaveny paralelním bubnem [18].....	32
Tabulka 9: Teploty míchání a ohřevu pro vyráběné asfaltové směsi .....	40
Tabulka 10: Počet zhutněných Marshallových těles.....	42
Tabulka 11: Počet vzorků na stanovení maximální objemové hmotnosti .....	45
Tabulka 12: Počet zhutněných zkušebních desek.....	46
Tabulka 13: Síťový rozbor frakcí kameniva z Rajhradic [6] .....	56
Tabulka 14: Síťový rozbor kameniva z R-materiálu .....	58
Tabulka 15: Vlastnosti získaného asfaltového pojiva z R-materiálu.....	59
Tabulka 16: Vlastnosti asfaltového pojiva ve směsi A.....	61
Tabulka 17: Výsledná zrnitost směsi A .....	61
Tabulka 18: Skladba kameniva ve směsi A .....	62
Tabulka 19: Stanovení optimálního množství pojiva směsi A .....	64
Tabulka 20: Stanovení míry zhutnění zkušebních desek směsi A.....	65
Tabulka 21: Nízkoteplotní vlastnosti směsi A.....	65
Tabulka 22: Zkouška stanovení tuhosti směsi A .....	66
Tabulka 23: Stanovení odolnosti vůči únavě-směs A.....	68
Tabulka 24: Vlastnosti asfaltových pojiv ve směsi B.....	71
Tabulka 25: Výsledná zrnitost směsi B .....	72
Tabulka 26: Skladba kameniva směsi B .....	72
Tabulka 27: Stanovení optimálního množství pojiva ve směsi B.....	74
Tabulka 28: Míra zhutnění zkušebních desek ze směsi B .....	75
Tabulka 29: Stanovení nízkoteplotních vlastností směsi B .....	76
Tabulka 30: Stanovení tuhosti-směs B .....	77

Tabulka 31: Stanovení odolnosti vůči únavě-směs B.....	78
Tabulka 32: Souhrnné výsledky funkčních zkoušek .....	84
Tabulka 33: Vstupní parametry pro výpočtový program LayEps .....	85
Tabulka 34: Katalogová skladba vozovky D0-N-2-S-II dle TP 170 .....	86
Tabulka 35: Skladba vozovky D0-N-2-S-II se směsí A .....	87
Tabulka 36: Skladba vozovky D0-N-2-S-II se směsí B .....	87
Tabulka 37: Katalogová skladba vozovky D0-N-3-S-II dle TP 170 .....	89
Tabulka 38: Skladba vozovky D0-N-3-S-II se směsí VMT 22 .....	89
Tabulka 39: Skladba vozovky D0-N-3-S-II se směsí A .....	90
Tabulka 40: Skladba vozovky D0-N-3-S-II se směsí B .....	91
Tabulka 41: Skladba vozovky s navýšením tloušťek podkladních vrstev a použitím směsi B.....	92
Tabulka 42: Skladba vozovky se sníženou tloušťkou podkladní vrstvy ze směsi A .....	93

## 13. Seznam obrázků

Obrázek 1: Umístění podkladní vrstvy v konstrukci vozovky .....	16
Obrázek 2: Skladba vozovky v gdaňské rafinerii [7] .....	17
Obrázek 3: Příklad použití ACP z katalogových listů TP 170 [9].....	18
Obrázek 4: Příklad použití směsi VMT z katalogových listů TP170 [9].....	22
Obrázek 5: Silniční fréza Wirtgen W200 [16].....	28
Obrázek 6: Špatné skládkování R-materiálu v ČR (vlevo).....	29
Obrázek 7: Zastřešená skládka R-materiálu v Curychu – Švýcarsko (vpravo) .....	29
Obrázek 8: Schéma šaržové obalovny bez paralelního bubnu [17].....	30
Obrázek 9: Schéma šaržové obalovny s paralelním bubnem [20].....	32
Obrázek 10: Mapa šaržových obaloven v ČR vybavených paralelním bubnem .....	33
Obrázek 11: Schéma kontinuální obalovny [20] .....	34
Obrázek 12: Přidávání R-materiálu s proudem horkého vzduchu [19] .....	34
Obrázek 13: Přidávání R-materiálu proti proudu horkého vzduchu [19] .....	35
Obrázek 14: Separátní vysoušení R-materiálu [19].....	35
Obrázek 15: Prosévací přístroj.....	36
Obrázek 16: Penetrometr a vodní lázeň .....	37
Obrázek 17: Asfaltové pojivo PMB 10/40-65 před stanovením bodu měknutí .....	38
Obrázek 18: Silniční asfalt gradace 20/30 před stanovením bodu měknutí .....	39
Obrázek 19: Asfaltové pojivo CRMB před stanovením bodu měknutí.....	39
Obrázek 20: Přístroj na stanovení bodu měknutí a protažené pojivo po zkoušce .....	39
Obrázek 21: Laboratorní míchačka a pec .....	41
Obrázek 22: Ručně namíchaná asfaltová směs.....	41
Obrázek 23: Asfaltová směs namíchaná v laboratorní míchačce .....	41
Obrázek 24: Marshallova tělesa ze směsi A .....	43
Obrázek 25: Rázový zhutňovač a Marshallova tělesa .....	43
Obrázek 26: Marshallova tělesa ze směsi B .....	43
Obrázek 27: Pyknometry s asfaltovou směsí a rozpouštědlem.....	45
Obrázek 28: Nezhutněná asfaltová směs .....	45
Obrázek 29: Zhutněné zkušební desky ze směsi A.....	46
Obrázek 30: Zhutněné zkušební desky ze směsi B.....	47
Obrázek 31: Segmentový zhutňovač .....	47

Obrázek 32: Přilepené zkušební těleso v ocelové formě (vlevo).....	49
Obrázek 33: Pryskyřice a tvrdidlo na výrobu lepidla (vpravo) .....	49
Obrázek 34: Zkušební přístroj CYKLON 40 s řídicím počítačem .....	50
Obrázek 35: Zkušební tělesa porušené mrazovou trhlinou.....	50
Obrázek 36: Schéma postupu při zkoušce .....	50
Obrázek 37: Zkušební přístroj COOPER.....	51
Obrázek 38: Trapezoidy ze směsi A (vlevo) a směsi B (vpravo).....	52
Obrázek 39: Tělesa ze směsi A po zkoušce odolnosti vůči únavě.....	53
Obrázek 40: Tělesa ze směsi B po zkoušce odolnosti vůči únavě.....	53
Obrázek 41: Schéma postupu praktické části .....	54
Obrázek 42: Kamenivo: vápencová moučka .....	57
Obrázek 43: Kamenivo: frakce 0/4 mm.....	57
Obrázek 44: Kamenivo: frakce 4/8 mm.....	57
Obrázek 45: Kamenivo: frakce 8/11 mm.....	57
Obrázek 46: Kamenivo: frakce 8/16 mm.....	57
Obrázek 47: Kamenivo: frakce 11/22 mm.....	57
Obrázek 48: R-materiál z obalovny v Rajhradcích.....	58
Obrázek 49: Asfaltové pojivo PMB 10/40-65 .....	60
Obrázek 50: Pryžový granulát a ověření viskozity asfaltového pojiva .....	71

## 14. Seznam grafů

Graf 1: Vývoj počtu registrovaných vozidel v ČR v letech 2011-2019 [1].....	12
Graf 2: Vývoj výroby asfaltových směsí v letech 2008-2018 [2].....	13
Graf 3: Meze při návrhu čáry zrnitosti ACP 16.....	19
Graf 4: Meze při návrhu čáry zrnitosti ACP 22.....	19
Graf 5: Meze při návrhu čáry zrnitosti VMT 16.....	22
Graf 6: Meze při návrhu čáry zrnitosti VMT 22.....	22
Graf 7: Čáry zrnitosti frakcí kameniva z Rajhradic [6] .....	56
Graf 8: Čára zrnitosti kameniva z R-materiálu .....	59
Graf 9: Čára zrnitosti směsi A .....	62
Graf 10: Nízkoteplotní vlastnosti-směs A .....	66
Graf 11: Stanovení tuhosti – směs A .....	67
Graf 12: Moduly tuhosti směsi A při frekvenci 10 Hz a všech teplotách.....	67
Graf 13: Stanovení odolnosti vůči únavě-směs A .....	69
Graf 14: Výsledná čára zrnitosti směsi B .....	73
Graf 15: Stanovení nízkoteplotních vlastností-směs B.....	76
Graf 16: Průběh zkoušky stanovení tuhosti směsi B .....	77
Graf 17: Moduly tuhosti směsi B při frekvenci 10 Hz a všech teplotách.....	78
Graf 18: Stanovení odolnosti vůči únavě-směs B.....	79
Graf 19: Srovnání nízkoteplotních vlastností směsí A a B.....	80
Graf 20: Srovnání modulů tuhosti směsí A a B při teplotě 15 °C .....	81
Graf 21: Srovnání modulů tuhosti směsí A a B při frekvenci 10 Hz.....	81
Graf 22: Srovnání odolností směsí A a B vůči únavě.....	82
Graf 23: Porovnání teoretického návrhového období vozovek s podkladní vrstvou z MZK.....	88
Graf 24: Porovnání teoretického návrhového období vozovek se stmelenu podkladní vrstvou .....	91
Graf 25: Porovnání teoretického návrhového období vozovek po úpravě podkladních vrstev.....	93



## 15. Seznam použitých symbolů a zkratek

mm	milimetr
TP	technické podmínky
ČR	Česká republika
t	tuna
h	hodina
min	minuta
tis.	tisíc
CRMB	crumb rubber modified bitumen
PMB	polymer modified bitumen
kg	kilogram
Hz	Hertz
PJ	penetrační jednotka
MPa	megapascal
s	sekunda
kN	kilonewton
min.	minimálně
max.	maximálně
g	gram
kg/m <sup>3</sup>	kilogram na metr krychlový
resp.	Respektive
OPD I	Operační program Doprava
SFDI	Státní fond dopravní infrastruktury
SMA	asfaltový koberec mastixový
TNVc	návrhová hodnota celkového počtu přejezdů TNV za návrhové období

## **16. Seznam příloh**

1. **PŘÍLOHA:** ZKOUŠKY NA ASFALTOVÉM POJIVU
2. **PŘÍLOHA:** OBJEMOVÉ HMOTNOST, MAXIMÁLNÍ OBJEMOVÁ HMOTNOST A MEZEROVITOST MARSHALLOVÝCH TĚLES
3. **PŘÍLOHA:** OBJEMOVÁ HMOTNOST, MEZEROVITOST A MÍRA ZHUTNĚNÍ ZKUŠEBNÍCH DESEK
4. **PŘÍLOHA:** STANOVENÍ ODOLNOSTI VŮČI ÚČINKŮM MRAZU
5. **PŘÍLOHA:** STANOVENÍ TUHOSTI – SMĚS A
6. **PŘÍLOHA:** STANOVENÍ TUHOSTI – SMĚS B
7. **PŘÍLOHA:** STANOVENÍ ODOLNOSTI VŮČI ÚNAVĚ

## 1. PŘÍLOHA: ZKOUŠKY NA ASFALTOVÉM POJIVU

## Stanovení penetrace jehlou na asfaltovém pojivu

Stanovení penetrace jehlou				
asfaltové pojivo	číslo vpichu	hloubka vpichu [mm]	hloubka vpichu [PJ]	průměr [PJ]
asfalt 20/30	1	2,08	20,8	<b>21</b>
	2	2,12	21,2	
	3	2,11	21,1	
20/30 + 13 % CRMB	1	1,45	14,5	<b>15</b>
	2	1,52	15,2	
	3	1,53	15,3	
PMB 10/40-65	1	2,02	20,2	<b>20</b>
	2	2,02	20,2	
	3	2,08	20,8	

## Stanovení bodu měknutí asfaltového pojiva metodou kroužek kulička

Stanovení bodu měknutí-metoda kroužek kulička				
asfaltové pojivo	kulička	kritická teplota [°C]	průměr [°C]	rozdíl [°C]
asfalt 20/30	pravá	58,4	<b>58,5</b>	0,2
	levá	58,6		
20/30 + 13 % CRMB	pravá	73,3	<b>73,2</b>	0,2
	levá	73,1		
PMB 10/40-65	pravá	66,4	<b>66,9</b>	0,9
	levá	67,3		

## 2. PŘÍLOHA: OBJEMOVÉ HMOTNOST, MAXIMÁLNÍ OBJEMOVÁ HMOTNOST A MEZEROVITOST MARSHALLOVÝCH TĚLES

### Stanovení objemové hmotnosti pro Marshallova tělesa ze směsi A

Stanovení objemové hmotnosti pro Marshallova tělesa ze směsi A						
množství asfaltu [%]	výška vzorku [mm]	hmotnost suchého vzorku [g]	hmotnost vzorku pod vodou [g]	hmotnost osušeného vzorku [g]	objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	průměrná objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]
4,8	62,15	1191,80	701,20	1192,20	2421	2422
	62,60	1199,40	706,20	1200,00	2422	
4,9	63,62	1222,60	717,40	1222,80	2414	2417
	62,76	1210,60	711,80	1211,00	2420	

### Stanovení maximální objemové hmotnosti pro směs A

Stanovení maximální objemové hmotnosti-směs A						
množství asfaltu [%]	hmotnost prázdného pyknometru [g]	hmotnost pyknometru + směs [g]	hmotnost pyknometru + směs + rozpouštědlo [g]	objem pyknometru při 25 °C [mm <sup>3</sup> ]	maximální objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	průměrná maximální objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]
4,8	703,10	1899,90	3255,70	1306,29	2565	2522
	690,60	1889,60	3244,80	1322,74	2480	
4,9	690,60	1888,50	3246,90	1322,74	2488	2488

### Stanovení mezerovitosti směsi A

Stanovení mezerovitosti směsi A			
množství asfaltu [%]	objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	maximální objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	mezerovitost směsi [%]
4,8	2422	2522	3,99
4,9	2417	2488	2,86

## Stanovení objemové hmotnosti pro Marshallova tělesa ze směsi B

Stanovení objemové hmotnosti pro Marshallova tělesa ze směsi B					
množství asfaltu [%]	hmotnost suchého vzorku [g]	hmotnost vzorku pod vodou [g]	hmotnost osušeného vzorku [g]	objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	průměrná objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]
5,4	1189,40	687,60	1194,20	2345	2356
	1223,40	707,60	1225,80	2358	
	1203,40	697,40	1205,80	2364	
5,9	1207,80	699,60	1209,40	2366	2383
	1207,80	699,60	1210,00	2363	
	1162,20	676,80	1163,80	2383	
	1164,20	679,20	1164,80	2394	
	1162,00	679,00	1162,80	2399	
	1196,80	698,40	1198,00	2393	
	1201,20	700,00	1202,40	2388	
	1193,20	694,80	1195,80	2379	
1190,80	692,60	1192,00	2382		
6,4	1208,20	701,40	1208,60	2379	2379

## Stanovení maximální objemové hmotnosti pro směs B

Stanovení maximální objemové hmotnosti-směs B						
množství asfaltu [%]	hmotnost prázdného pyknometru [g]	hmotnost pyknometru + směs [g]	hmotnost pyknometru + směs + rozpouštědlo [g]	objem pyknometru při 25 °C [mm <sup>3</sup> ]	maximální objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	průměrná maximální objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]
5,4	703,10	1915,00	3253,60	1320,60	2462	2462
5,9	693,10	1908,50	3245,40	1323,41	2450	2453
	687,90	1897,90	3200,40	1298,62	2456	
6,4	690,70	1832,60	3215,00	1323,10	2442	2442

### Stanovení mezerovitosti směsi B

Stanovení mezerovitosti směsi B			
množství asfaltu [%]	objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	maximální objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	mezerovitost směsi [%]
5,4	2356	2462	4,32
5,9	2383	2453	2,85
6,4	2379	2442	2,57



### 3. PŘÍLOHA: OBJEMOVÁ HMOTNOST, MEZEROVITOST A MÍRA ZHUTNĚNÍ ZKUŠEBNÍCH DESEK

#### Vlastnosti stanovené na zkušebních deskách ze směsi A

Vlastnosti zkušebních desek ze směsi A							
množství asfaltu [%]	výška vzorku [mm]	hmotnost suchého vzorku [g]	hmotnost desky pod vodou [g]	hmotnost osušené desky [g]	objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	míra zhutnění [%]	mezerovitost směsi [%]
4,9	62,10	12027,40	7080,80	12058,00	2411	99,77	3,08
	61,50	12053,80	7109,40	12069,60	2425	100,33	2,54
	61,20	12074,00	7128,40	12096,40	2425	100,34	2,53
	61,60	12070,00	7130,60	12084,00	2431	100,60	2,27
	61,30	12073,60	7110,40	12091,60	2418	100,07	2,79

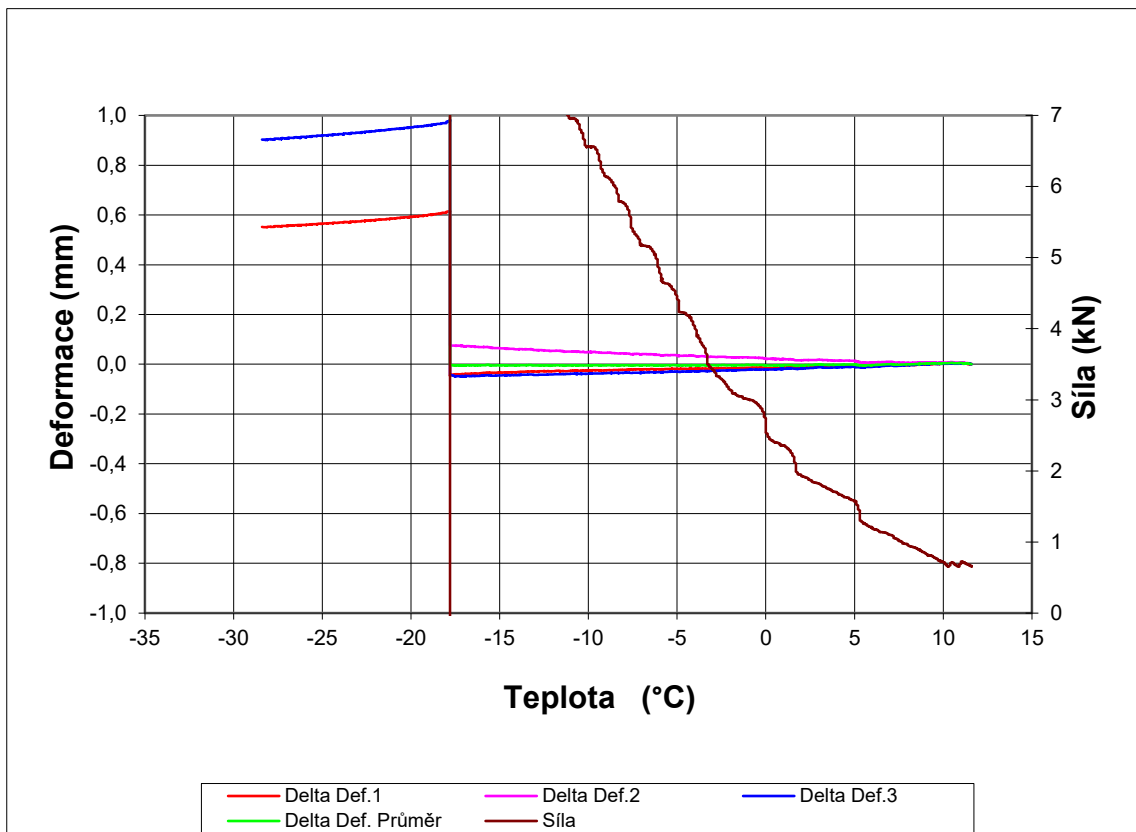
#### Vlastnosti stanovené na zkušebních deskách ze směsi B

Vlastnosti zkušebních desek ze směsi B							
množství asfaltu [%]	výška vzorku [mm]	hmotnost suchého vzorku [g]	hmotnost desky pod vodou [g]	hmotnost osušené desky [g]	objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	míra zhutnění [%]	mezerovitost směsi [%]
5,9	60,80	11890,80	6939,40	11912,20	2388	100,22	2,64
	60,50	11869,80	6942,00	11894,20	2394	100,46	2,41
	60,70	11877,80	6950,80	11897,20	2398	100,64	2,23
	60,50	11872,00	6932,40	11885,00	2394	100,47	2,40
	60,35	11890,40	6946,20	11905,40	2395	100,49	2,38
	60,30	11881,80	6944,40	11901,00	2394	100,47	2,40

## 4. PŘÍLOHA: STANOVENÍ ODOLNOSTI VŮČI ÚČINKŮM MRAZU

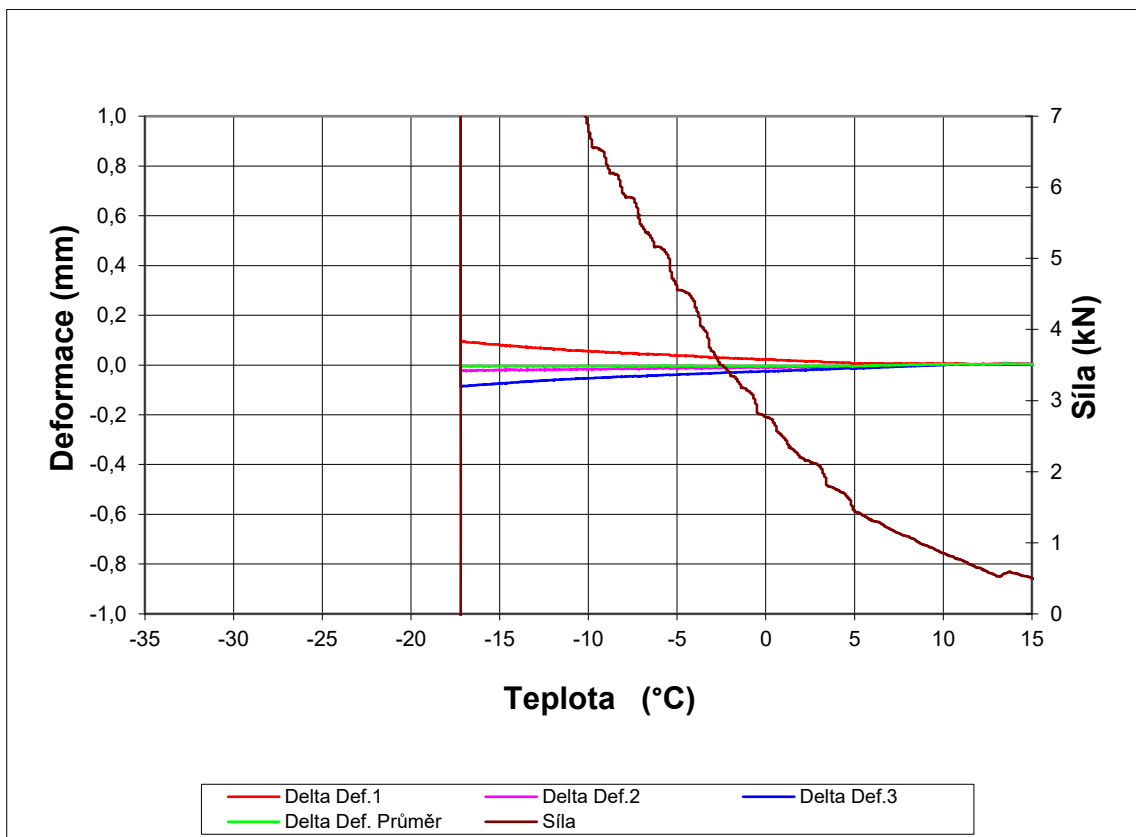
### Nízkoteplotní vlastnosti směsi A-vzorek V. 1

<b>Akce :</b>	DP_Horacek
<b>Asfaltová směs :</b>	VMT22-A-V-1
<b>Rozměry zkušebního tělesa - mm :</b>	50.2 x 49.9 x 200
<b>Datum zkoušky :</b>	11.09.2019
<b>Zkoušku provedl :</b>	Horáček
<b>Teplota temperování - °C :</b>	10
<b>Doba temperování - min. :</b>	15
<b>Rychlost ochlazování - °C/hod :</b>	10
<b>Max. síla při porušení - kN :</b>	10,41
<b>Max. napětí při porušení - MPa :</b>	4,15
<b>Teplota v komoře při porušení - °C :</b>	-20,9
<b>Teplota vzorku při porušení - °C :</b>	-17,8



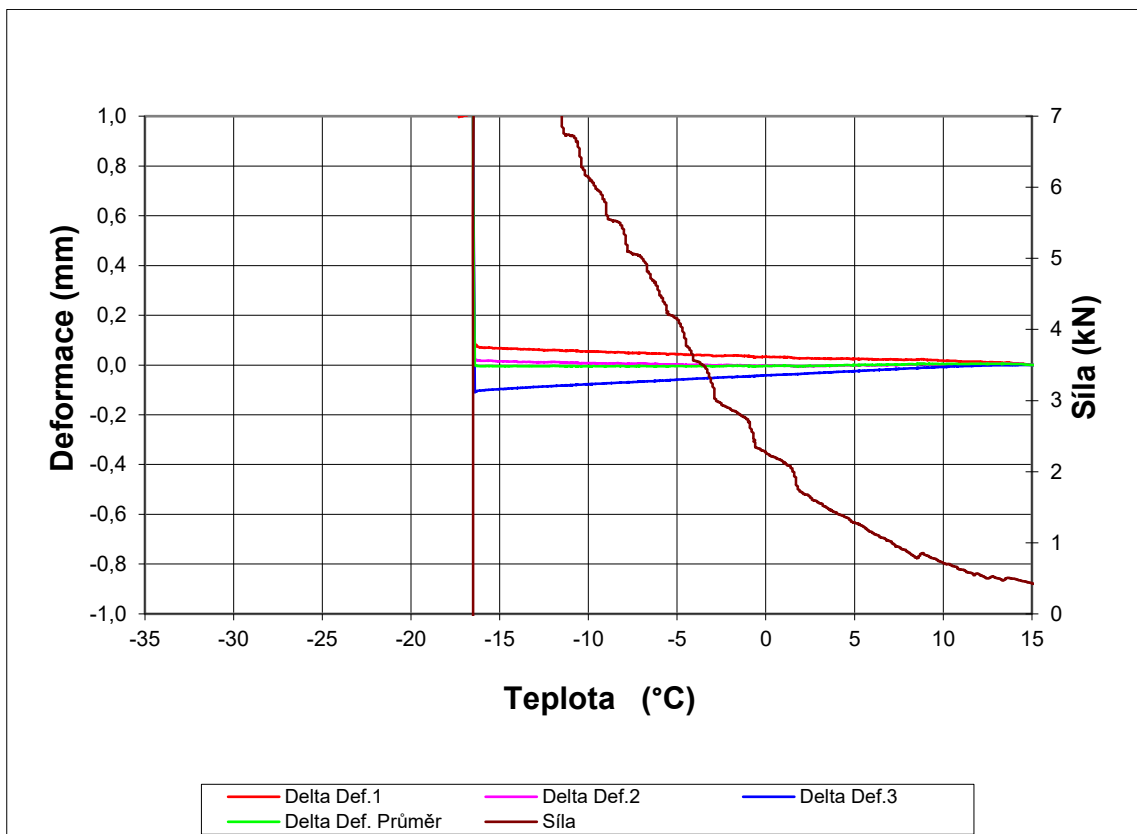
## Nízkoteplotní vlastnosti směsi A-vzorek V. 2

Akce :	DP_Horacek
Asfaltová směs :	VMT22-V-2
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	50.2 x 49.9 x 200
Datum zkoušky :	12.09.2019
Zkoušku provedl :	Horáček
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	10,19
Max. napětí při porušení - MPa :	4,07
Teplota v komoře při porušení - °C :	-20,6
Teplota vzorku při porušení - °C :	-17,2



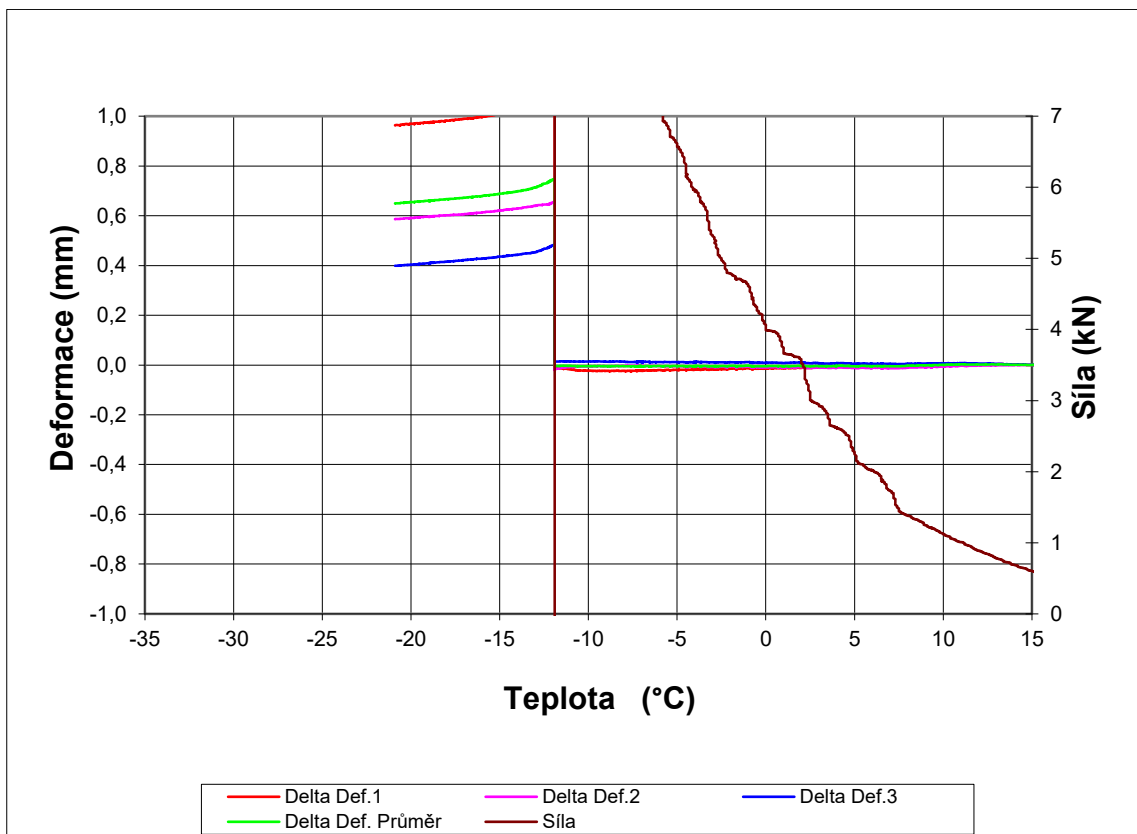
## Nízkoteplotní vlastnosti směsi A-vzorek V. 3

Akce :	DP_Horacek
Asfaltová směs :	VMT22-V-3
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	50.1 x 49.9 x 200
Datum zkoušky :	18.09.2019
Zkoušku provedl :	Horáček
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	9,37
Max. napětí při porušení - MPa :	3,75
Teplota v komoře při porušení - °C :	-18,9
Teplota vzorku při porušení - °C :	<b>-16,3</b>



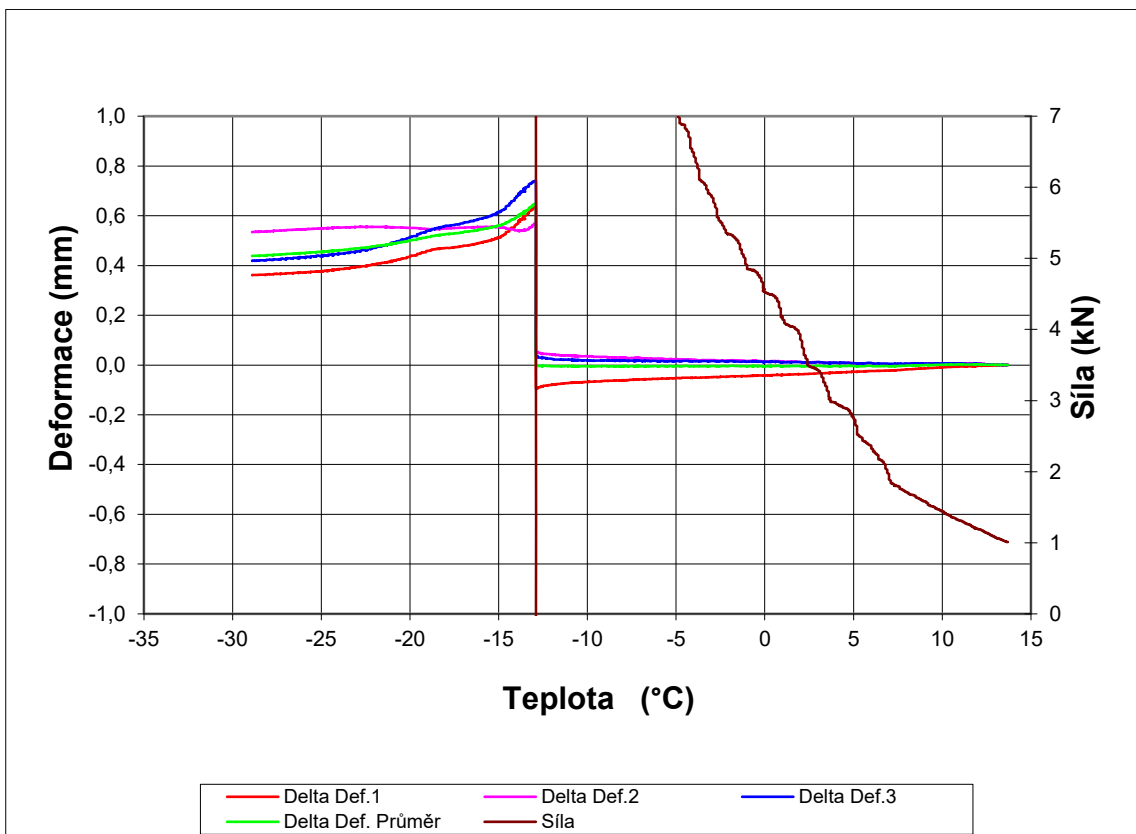
## Nízkoteplotní vlastnosti směsi B-vzorek III. 1

Akce :	DP_Horacek
Asfaltová směs :	VMT22-III-1
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	50.5 x 50 x 200
Datum zkoušky :	05.12.2019
Zkoušku provedl :	Horáček
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	9,19
Max. napětí při porušení - MPa :	3,64
Teplota v komoře při porušení - °C :	-14,1
Teplota vzorku při porušení - °C :	-10,8



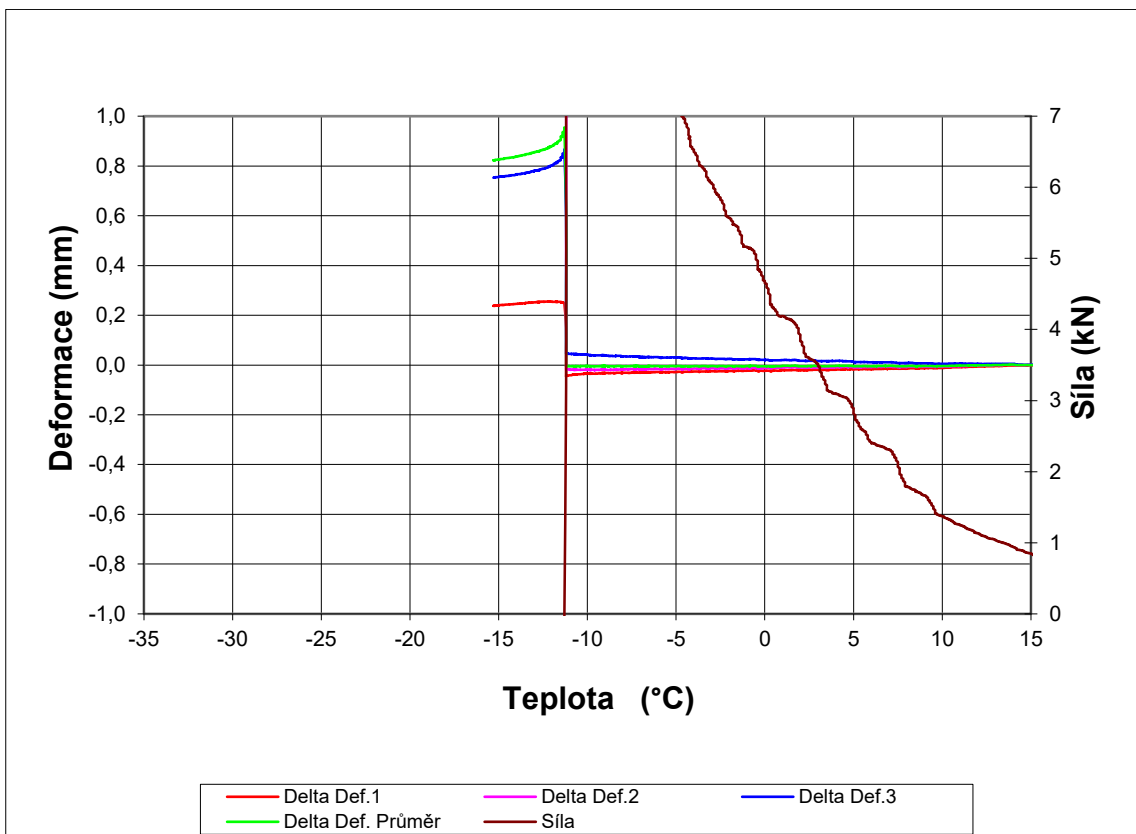
## Nízkoteplotní vlastnosti směsi B-vzorek III. 2

Akce :	DP_Horacek
Asfaltová směs :	VMT22-III-2
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	50 x 50 x 200
Datum zkoušky :	06.12.2019
Zkoušku provedl :	Horáček
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	10,10
Max. napětí při porušení - MPa :	4,04
Teplota v komoře při porušení - °C :	-15,9
Teplota vzorku při porušení - °C :	-12,2



## Nízkoteplotní vlastnosti směsi B-vzorek III. 3

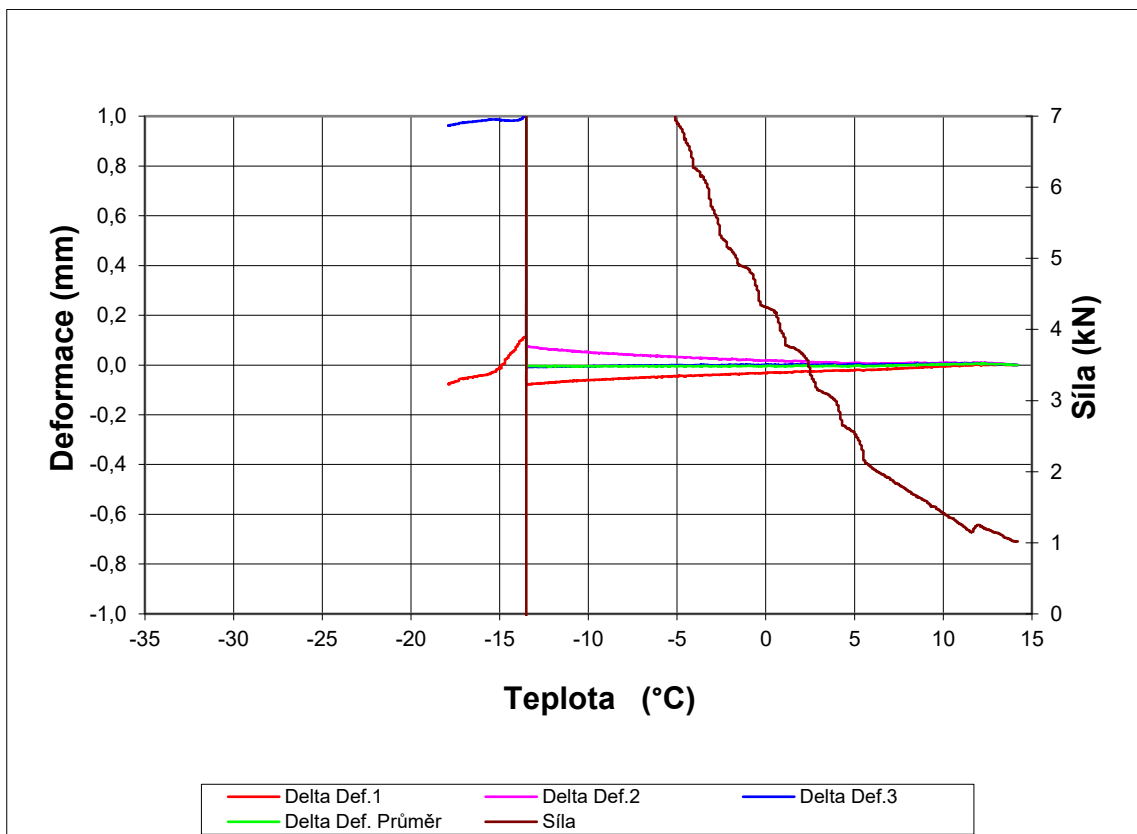
<b>Akce :</b>	DP_Horacek
<b>Asfaltová směs :</b>	VMT22-III-3
<b>Rozměry zkušebního tělesa - mm :</b>	50.4 x 50.4 x 200
<b>Datum zkoušky :</b>	04.12.2019
<b>Zkoušku provedl :</b>	Horáček
<b>Teplota temperování - °C :</b>	10
<b>Doba temperování - min. :</b>	15
<b>Rychlost ochlazování - °C/hod :</b>	10
<b>Max. síla při porušení - kN :</b>	9,86
<b>Max. napětí při porušení - MPa :</b>	3,88
<b>Teplota v komoře při porušení - °C :</b>	-13,6
<b>Teplota vzorku při porušení - °C :</b>	-10,2





## Nízkoteplotní vlastnosti směsi B-vzorek III. 4

Akce :	DP_Horacek
Asfaltová směs :	VMT22-III-4
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	50 x 50 x 200
Datum zkoušky :	13.12.2019
Zkoušku provedl :	Horáček
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	10,16
Max. napětí při porušení - MPa :	4,07
Teplota v komoře při porušení - °C :	-16,7
Teplota vzorku při porušení - °C :	-13,0



## 5. PŘÍLOHA: STANOVENÍ TUHOSTI – SMĚS A

## Stanovení modulu tuhosti u směsi A při teplotě -5 °C

označení vzorku	frekvence [Hz]							
	1	5	10	15	20	25	27	30
VMT22-I-1	15 996	17 203	17 709	17 757	17 970	17 808	18 117	18 640
VMT22-I-2	15 771	16 861	17 445	17 709	17 855	17 925	18 488	19 218
VMT22-I-3	6 324	6 718	6 883	7 012	7 077	7 076	7 335	7 496
VMT22-I-4	18 242	19 752	20 306	20 471	20 650	20 585	20 646	20 835
VMT22-II-1	16 503	17 717	18 262	18 363	18 645	18 555	18 865	19 365
VMT22-II-2	18 704	20 087	20 835	21 194	21 392	21 413	22 046	22 967
VMT22-II-3	14 883	16 077	16 498	16 731	16 870	16 928	17 363	17 758
VMT22-II-4	17 121	18 579	19 158	19 334	19 533	19 537	19 639	19 903
VMT22-III-1	20 473	22 033	22 756	22 869	23 242	23 073	23 579	24 342
VMT22-III-2	19 382	20 911	21 742	22 186	22 436	22 522	23 241	24 240
VMT22-III-3	14 456	15 418	15 840	16 039	16 159	16 117	16 599	17 011
VMT22 III-4	20 770	22 612	23 370	23 571	23 856	23 844	23 951	24 184
VMT22-IV-1	18 914	20 479	21 180	21 467	21 874	21 635	21 939	22 606
VMT22-IV-2	18 925	20 512	21 356	21 919	22 048	22 175	22 866	23 761
VMT22-IV-3	19 120	20 733	21 774	22 122	22 371	22 370	23 077	23 790
VMT22-IV-4	16 907	18 175	18 675	18 800	18 982	18 904	18 955	19 104
<b>průměr Ø</b>	<b>17 031</b>	<b>18 367</b>	<b>18 987</b>	<b>19 222</b>	<b>19 435</b>	<b>19 404</b>	<b>19 794</b>	<b>20 326</b>

## Stanovení modulu tuhosti u směsi A při teplotě 10 °C

označení vzorku	frekvence [Hz]							
	1	5	10	15	20	25	27	30
VMT22-I-1	10 506	12 288	13 037	13 306	13 613	13 647	13 920	14 327
VMT22-I-2	10 475	12 192	13 010	13 429	13 684	13 835	14 281	14 878
VMT22-I-3	7 333	8 002	8 225	8 311	8 345	8 321	8 479	8 575
VMT22-I-4	11 643	13 839	14 725	15 105	15 431	15 504	15 588	15 782
VMT22-II-1	10 957	12 890	13 702	14 001	14 390	14 441	14 641	15 068
VMT22-II-2	12 128	14 274	15 268	15 793	16 104	16 369	16 844	17 540
VMT22-II-3	11 278	13 265	14 059	14 444	14 702	14 785	15 146	15 500
VMT22-II-4	10 701	12 773	13 624	14 027	14 348	14 524	14 632	14 967
VMT22-III-1	13 325	15 629	16 606	16 974	17 390	17 488	17 843	18 384
VMT22-III-2	12 479	14 735	15 803	16 365	16 708	16 900	17 418	18 178
VMT22-III-3	9 990	11 554	12 182	12 485	12 731	12 796	13 139	13 475
VMT22 III-4	12 842	15 352	16 399	16 881	17 272	17 411	17 534	17 761
VMT22-IV-1	11 490	13 872	14 846	15 263	15 724	15 858	16 171	16 675
VMT22-IV-2	12 032	14 380	15 464	16 046	16 370	16 620	17 111	17 794
VMT22-IV-3	11 646	14 013	15 058	15 578	15 976	16 086	16 509	17 085
VMT22-IV-4	10 683	12 583	13 344	13 685	13 980	14 082	14 154	14 329
<b>průměr Ø</b>	<b>11 219</b>	<b>13 228</b>	<b>14 085</b>	<b>14 481</b>	<b>14 798</b>	<b>14 917</b>	<b>15 213</b>	<b>15 645</b>

## Stanovení modulu tuhosti u směsi A při teplotě 15 °C

označení vzorku	frekvence [Hz]							
	1	5	10	15	20	25	27	30
VMT22-I-1	8 145	9 993	10 806	11 166	11 510	11 598	11 825	12 163
VMT22-I-2	8 200	10 039	10 889	11 361	11 656	11 868	12 245	12 744
VMT22-I-3	6 501	7 573	7 971	8 140	8 264	8 239	8 465	8 612
VMT22-I-4	9 029	11 310	12 233	12 697	13 070	13 255	13 374	13 574
VMT22-II-1	8 578	10 586	11 482	11 869	12 245	12 386	12 598	12 957
VMT22-II-2	9 282	11 472	12 528	13 134	13 519	13 760	14 177	14 742
VMT22-II-3	8 896	10 990	11 829	12 388	12 726	12 872	13 198	13 553
VMT22-II-4	8 320	10 388	11 263	11 715	12 074	12 252	12 352	12 565
VMT22-III-1	10 416	12 775	13 836	14 293	14 769	14 924	15 236	15 736
VMT22-III-2	9 637	12 023	13 165	13 773	14 163	14 444	14 856	15 509
VMT22-III-3	7 988	9 627	10 311	10 681	11 010	11 121	11 401	11 686
VMT22 III-4	10 273	12 829	13 978	14 499	14 914	15 164	15 289	15 534
VMT22-IV-1	9 065	11 396	12 474	12 944	13 408	13 568	13 844	14 275
VMT22-IV-2	9 493	11 970	13 127	13 776	14 092	14 415	14 788	15 262
VMT22-IV-3	8 679	10 958	11 992	12 539	12 965	13 166	13 525	13 858
VMT22-IV-4	8 409	10 364	11 183	11 578	11 901	12 056	12 147	12 306
<b>průměr Ø</b>	<b>8 807</b>	<b>10 893</b>	<b>11 817</b>	<b>12 285</b>	<b>12 643</b>	<b>12 818</b>	<b>13 083</b>	<b>13 442</b>

## Stanovení modulu tuhosti u směsi A při teplotě 25 °C

označení vzorku	frekvence [Hz]							
	1	5	10	15	20	25	27	30
VMT22-I-1	4 392	6 208	7 055	7 489	7 857	8 054	8 210	8 694
VMT22-I-2	4 545	6 412	7 297	7 794	8 134	8 368	8 606	8 954
VMT22-I-3	4 036	5 399	5 939	6 204	6 407	6 480	6 636	6 734
VMT22-I-4	4 750	6 860	7 821	8 354	8 746	8 982	9 074	9 292
VMT22-II-1	4 546	6 431	7 382	7 853	8 248	8 679	8 987	9 529
VMT22-II-2	4 680	6 771	7 818	8 437	8 840	9 137	9 386	9 706
VMT22-II-3	4 528	6 537	7 492	8 031	8 443	8 680	8 862	9 050
VMT22-II-4	4 178	6 082	6 995	7 505	7 887	8 174	8 304	8 529
VMT22-III-1	5 639	7 878	8 981	9 518	9 988	10 229	10 449	11 633
VMT22-III-2	4 993	7 155	8 282	8 938	9 345	9 663	9 933	10 369
VMT22-III-3	4 462	6 165	6 920	7 337	7 681	7 903	8 094	8 242
VMT22 III-4	5 101	7 285	8 373	8 953	9 410	9 705	9 841	10 087
VMT22-IV-1	4 504	6 524	7 522	8 051	8 497	8 951	9 311	9 867
VMT22-IV-2	4 759	6 933	8 024	8 658	9 065	9 394	9 623	9 910
VMT22-IV-3	4 279	6 206	7 163	7 686	8 108	8 296	8 682	9 915
VMT22-IV-4	4 516	6 309	7 167	7 635	7 988	8 238	8 339	8 532
<b>průměr Ø</b>	<b>4 619</b>	<b>6 572</b>	<b>7 514</b>	<b>8 028</b>	<b>8 415</b>	<b>8 683</b>	<b>8 896</b>	<b>9 315</b>

## Stanovení modulu tuhosti u směsi A při teplotě 40 °C

označení vzorku	frekvence [Hz]							
	1	5	10	15	20	25	27	30
VMT22-I-1	1 179	2 038	2 565	2 917	3 164	3 339	3 477	3 674
VMT22-I-2	1 168	2 058	2 600	2 927	3 181	3 351	3 561	3 902
VMT22-I-3	1 057	1 868	2 339	2 612	2 840	2 985	3 227	3 599
VMT22-I-4	1 173	2 068	2 617	2 946	3 186	3 358	3 420	3 527
VMT22-II-1	1 106	1 995	2 531	2 845	3 072	3 245	3 366	3 534
VMT22-II-2	1 115	2 045	2 635	2 990	3 253	3 436	3 642	3 941
VMT22-II-3	985	1 855	2 405	2 737	2 981	3 178	3 419	3 788
VMT22-II-4	944	1 764	2 268	2 562	2 779	2 954	3 022	3 123
VMT22-III-1	1 479	2 536	3 159	3 532	3 801	3 995	4 142	4 382
VMT22-III-2	1 226	2 148	2 715	3 068	3 327	3 509	3 710	4 022
VMT22-III-3	1 150	2 006	2 512	2 818	3 036	3 205	3 447	3 817
VMT22 III-4	1 249	2 201	2 762	3 104	3 360	3 551	3 609	3 725
VMT22-IV-1	1 087	1 933	2 457	2 781	3 012	3 184	3 314	3 469
VMT22-IV-2	1 085	1 965	2 512	2 856	3 100	3 289	3 467	3 714
VMT22-IV-3	990	1 806	2 321	2 645	2 876	3 057	3 288	3 660
VMT22-IV-4	1 180	2 051	2 562	2 876	3 098	3 265	3 328	3 417
<b>průměr Ø</b>	<b>1 136</b>	<b>2 021</b>	<b>2 560</b>	<b>2 889</b>	<b>3 129</b>	<b>3 306</b>	<b>3 465</b>	<b>3 706</b>

## 6. PŘÍLOHA: STANOVENÍ TUHOSTI – SMĚS B

## Stanovení modulu tuhosti u směsi B při teplotě -5 °C

Označení vzorku	frekvence [Hz]							
	1	5	10	15	20	25	27	30
VMT22-I-1	19 309	20 591	21 168	21 203	21 505	21 463	21 840	22 546
VMT22-I-2	14 827	15 605	16 096	16 282	16 424	16 614	17 997	18 412
VMT22-I-3	17 562	18 754	19 249	19 294	19 428	19 406	19 983	20 621
VMT22-I-4	18 395	19 751	20 290	20 430	20 659	20 648	20 714	20 918
VMT22-II-1	20 150	21 357	21 917	21 985	22 278	22 098	22 515	23 204
VMT22-II-2	18 171	19 231	19 742	19 981	20 037	20 055	20 627	21 428
VMT22-II-3	19 221	20 541	21 075	21 345	21 506	21 492	22 211	22 882
VMT22-II-4	19 159	20 462	20 989	21 129	21 381	21 389	21 547	21 933
VMT22-IV-1	18 161	19 366	19 899	19 973	20 251	20 087	20 451	21 072
VMT22-IV-2	18 059	19 191	19 799	20 064	20 189	20 232	20 842	21 718
VMT22-IV-3	17 596	18 724	19 278	19 394	19 571	19 550	20 078	20 603
VMT22-IV-4	19 114	20 520	21 039	21 166	21 467	21 372	21 463	21 655
VMT22-V-1	17 114	18 118	18 603	18 614	18 899	18 842	19 196	19 781
VMT22-V-2	19 289	20 511	21 156	21 344	21 531	21 704	22 427	23 516
VMT22-V-3	20 294	21 747	22 494	22 780	23 097	23 200	23 965	24 715
VMT22-V-4	20 599	22 098	22 688	22 802	23 044	23 005	23 080	23 264
VMT22-VI-1	18 863	19 934	20 444	20 523	20 781	20 613	21 018	21 627
VMT22-IV-2	19 518	20 780	21 401	21 712	21 802	21 704	22 366	23 157
VMT22-IV-3	17 787	18 896	19 399	19 608	19 701	19 638	20 174	20 767
VMT22-IV-4	19 732	21 033	21 519	21 659	21 882	21 785	21 875	22 044
<b>průměr Ø</b>	<b>18 646</b>	<b>19 861</b>	<b>20 412</b>	<b>20 564</b>	<b>20 772</b>	<b>20 745</b>	<b>21 218</b>	<b>21 793</b>

## Stanovení modulu tuhosti u směsi B při teplotě 10 °C

označení vzorku	frekvence [Hz]							
	1	5	10	15	20	25	27	30
VMT22-I-1	13 379	15 237	16 045	16 302	16 649	16 741	17 076	17 603
VMT22-I-2	11 600	12 991	13 644	13 927	14 136	14 345	14 726	15 293
VMT22-I-3	11 332	12 913	13 557	13 811	14 096	14 207	14 557	14 936
VMT22-I-4	12 720	14 622	15 393	15 717	16 021	16 164	16 271	16 466
VMT22-II-1	13 980	15 899	16 712	17 000	17 361	17 366	17 721	18 272
VMT22-II-2	12 889	14 559	15 253	15 686	15 873	15 938	16 346	16 944
VMT22-II-3	12 685	14 606	15 367	15 760	16 072	16 145	16 637	17 105
VMT22-II-4	12 950	14 905	15 689	16 031	16 360	16 429	16 535	16 749
VMT22-IV-1	12 184	14 036	14 819	15 091	15 455	15 476	15 770	16 266
VMT22-IV-2	12 960	14 730	15 553	15 991	16 264	16 469	16 982	17 696
VMT22-IV-3	12 151	13 884	14 682	15 015	15 300	15 306	15 706	16 136
VMT22-IV-4	13 075	15 087	15 912	16 246	16 603	16 684	16 818	17 043
VMT22-V-1	12 305	13 919	14 641	14 859	15 192	15 267	15 576	16 055
VMT22-V-2	13 547	15 334	16 176	16 525	16 747	16 984	17 511	18 142
VMT22-V-3	13 170	15 193	16 144	16 533	16 916	17 148	17 682	18 285
VMT22-V-4	13 742	15 808	16 676	17 018	17 377	17 521	17 625	17 839
VMT22-VI-1	13 482	15 110	15 856	16 093	16 431	16 426	16 746	17 232
VMT22-IV-2	13 962	15 771	16 656	17 136	17 394	17 542	18 074	18 832
VMT22-IV-3	12 460	14 075	14 814	15 176	15 415	15 486	15 915	16 375
VMT22-IV-4	13 704	15 571	16 350	16 686	16 993	17 065	17 172	17 366
<b>průměr Ø</b>	<b>12 914</b>	<b>14 713</b>	<b>15 497</b>	<b>15 830</b>	<b>16 133</b>	<b>16 235</b>	<b>16 572</b>	<b>17 032</b>

## Stanovení modulu tuhosti u směsi B při teplotě 15 °C

označení vzorku	frekvence [Hz]							
	1	5	10	15	20	25	27	30
VMT22-I-1	11 084	13 095	13 985	14 333	14 716	14 862	15 166	15 629
VMT22-I-2	9 503	11 183	11 929	12 422	12 658	12 881	13 243	13 726
VMT22-I-3	9 454	11 248	11 984	12 272	12 594	12 701	13 079	13 409
VMT22-I-4	10 323	12 299	13 127	13 524	13 865	14 023	14 132	14 295
VMT22-II-1	11 832	13 957	14 861	15 183	15 677	15 725	16 051	16 591
VMT22-II-2	10 666	12 462	13 375	13 923	14 014	14 122	14 557	15 016
VMT22-II-3	10 477	12 454	13 278	13 674	13 974	14 119	14 444	14 816
VMT22-II-4	11 070	13 142	13 992	14 372	14 708	14 867	15 057	15 310
VMT22-IV-1	10 048	12 050	12 898	13 247	13 628	13 699	13 981	14 394
VMT22-IV-2	10 879	12 816	13 690	14 141	14 391	14 591	14 994	15 549
VMT22-IV-3	10 003	11 968	12 777	13 157	13 507	13 592	13 904	14 273
VMT22-IV-4	10 541	12 754	13 657	14 089	14 429	14 583	14 691	14 882
VMT22-V-1	10 467	12 234	13 020	13 315	13 669	13 785	14 033	14 461
VMT22-V-2	11 192	13 041	13 937	14 321	14 644	14 917	15 357	16 127
VMT22-V-3	10 703	13 023	13 897	14 202	14 631	14 868	15 283	15 745
VMT22-V-4	11 536	13 721	14 636	15 046	15 410	15 602	15 701	15 902
VMT22-VI-1	11 293	13 130	13 956	14 282	14 632	14 690	14 986	15 430
VMT22-IV-2	11 344	13 304	14 268	14 781	15 031	15 194	15 648	16 295
VMT22-IV-3	10 534	12 281	13 056	13 428	13 700	13 783	14 149	14 537
VMT22-IV-4	11 456	13 505	14 373	14 773	15 107	15 232	15 341	15 514
<b>průměr Ø</b>	<b>10 720</b>	<b>12 683</b>	<b>13 535</b>	<b>13 924</b>	<b>14 249</b>	<b>14 392</b>	<b>14 690</b>	<b>15 095</b>



## Stanovení modulu tuhosti u směsi B při teplotě 25 °C

označení vzorku	frekvence [Hz]							
	1	5	10	15	20	25	27	30
VMT22-I-1	6 555	8 661	9 630	10 092	10 519	10 713	10 935	12 112
VMT22-I-2	6 102	8 003	8 822	9 263	9 562	9 822	10 042	10 395
VMT22-I-3	5 764	7 579	8 386	8 795	9 181	9 348	9 586	9 779
VMT22-I-4	6 048	8 062	8 980	9 443	9 830	10 106	10 234	10 450
VMT22-II-1	7 020	9 290	10 309	10 798	11 233	11 406	11 655	12 133
VMT22-II-2	6 602	8 655	9 646	10 194	10 504	10 727	10 950	11 394
VMT22-II-3	6 082	8 126	9 032	9 559	9 944	10 105	10 357	10 619
VMT22-II-4	6 525	8 764	9 667	10 166	10 499	10 882	10 949	11 212
VMT22-IV-1	5 757	7 772	8 695	9 156	9 559	9 740	10 173	10 995
VMT22-IV-2	6 555	8 675	9 666	10 215	10 554	10 806	11 117	11 511
VMT22-IV-3	5 944	7 994	8 898	9 374	9 768	9 955	10 187	10 398
VMT22-IV-4	6 038	8 212	9 158	9 684	10 071	10 309	10 470	10 728
VMT22-V-1	6 381	8 407	9 298	9 726	10 114	10 285	10 491	11 496
VMT22-V-2	6 794	8 948	9 956	10 485	10 833	11 127	11 463	11 847
VMT22-V-3	6 186	8 388	9 351	9 868	10 334	10 611	10 884	11 160
VMT22-V-4	6 643	8 924	9 938	10 460	10 870	11 114	11 224	11 542
VMT22-VI-1	6 948	8 952	9 883	10 322	10 729	10 884	11 101	12 263
VMT22-IV-2	6 899	9 026	10 046	10 641	10 999	11 264	11 546	11 970
VMT22-IV-3	6 331	8 244	9 098	9 547	9 904	10 070	10 298	10 510
VMT22-IV-4	6 716	8 821	9 756	10 265	10 648	10 851	11 034	11 246
<b>průměr Ø</b>	<b>6 395</b>	<b>8 475</b>	<b>9 411</b>	<b>9 903</b>	<b>10 283</b>	<b>10 506</b>	<b>10 735</b>	<b>11 188</b>

## Stanovení modulu tuhosti u směsi B při teplotě 40 °C

označení vzorku	frekvence [Hz]							
	1	5	10	15	20	25	27	30
VMT22-I-1	1 920	3 185	3 894	4 291	4 587	4 802	5 006	5 290
VMT22-I-2	1 872	3 046	3 697	4 068	4 324	4 480	4 700	5 014
VMT22-I-3	1 576	2 633	3 234	3 567	3 806	3 976	4 258	4 675
VMT22-I-4	1 741	2 917	3 557	3 940	4 213	4 415	4 503	4 642
VMT22-II-1	1 983	3 372	4 138	4 582	4 892	5 111	5 315	5 589
VMT22-II-2	1 930	3 239	3 971	4 390	4 685	4 890	5 162	5 560
VMT22-II-3	1 654	2 865	3 553	3 949	4 218	4 414	4 743	5 219
VMT22-II-4	1 600	2 800	3 466	3 870	4 149	4 348	4 427	4 557
VMT22-IV-1	1 693	2 853	3 520	3 895	4 177	4 361	4 531	4 785
VMT22-IV-2	1 935	3 243	3 990	4 393	4 695	4 880	5 153	5 589
VMT22-IV-3	1 667	2 826	3 496	3 884	4 153	4 344	4 650	5 114
VMT22-IV-4	1 745	2 947	3 634	4 035	4 321	4 517	4 600	4 728
VMT22-V-1	1 936	3 179	3 858	4 247	4 541	4 755	4 937	5 208
VMT22-V-2	2 034	3 343	4 101	4 511	4 797	4 963	5 224	5 575
VMT22-V-3	1 669	2 819	3 490	3 875	4 155	4 360	4 687	5 161
VMT22-V-4	1 866	3 131	3 822	4 232	4 529	4 734	4 826	4 962
VMT22-VI-1	2 212	3 566	4 291	4 721	5 017	5 218	5 424	5 728
VMT22-IV-2	2 115	3 448	4 201	4 652	4 960	5 162	5 454	5 908
VMT22-IV-3	1 831	3 037	3 701	4 094	4 353	4 527	4 863	5 348
VMT22-IV-4	2 046	3 363	4 074	4 493	4 793	4 998	5 088	5 235
<b>průměr Ø</b>	<b>1 851</b>	<b>3 091</b>	<b>3 784</b>	<b>4 184</b>	<b>4 468</b>	<b>4 663</b>	<b>4 878</b>	<b>5 194</b>

## 7. PŘÍLOHA: STANOVENÍ ODOLNOSTI VŮČI ÚNAVĚ

### Stanovení odolnosti vůči únavě směsi A při 10 °C a frekvenci 25 Hz

směs A	
microstrain	počet cyklů
0,000123	10995642
0,000124	5228480
0,000127	11985684
0,000132	12511258
0,000135	2453627
0,000144	2185004
0,000146	4984232
0,000147	2679473
0,000152	1301259
0,000153	1321366
0,000153	1718712
0,000159	368453
0,000159	2461366
0,000160	750162
0,000160	1872658
0,000165	218643
0,000176	143719
0,000185	83435

**Stanovení odolnosti vůči únavě směsi A při 10 °C a frekvenci 25 Hz**

směs B	
microstrain	počet cyklů
0,000133	10541523
0,000133	9495632
0,000135	12122895
0,000147	5488235
0,000149	1866310
0,000156	2940395
0,000158	1899063
0,000163	3549808
0,000166	1843384
0,000166	1757672
0,000175	2426773
0,000176	741030
0,000181	2389946
0,000192	1017705
0,000194	550964
0,000217	139165
0,000234	197325
0,000269	70335