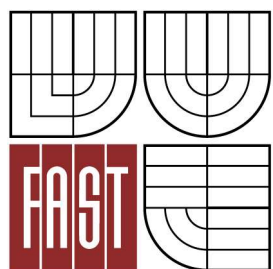




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

PROBLEMATIKA R - MATERIÁLU V ASFALTOVÝCH SMĚSÍCH TYPU SMA

RECYCLED MATERIAL IN STONE MASTIC ASPHALTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

VOJTĚCH MOTL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PETR HÝZL, Ph.D.

BRNO 2016



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor 3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště Ústav pozemních komunikací

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student Vojtěch Motl

Název Problematika R - materiálu v asfaltových směsích typu SMA

Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Hýzl, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce 30. 11. 2015

Datum odevzdání bakalářské práce 27. 5. 2016

V Brně dne 30. 11. 2015

.....
doc. Dr. Ing. Michal Varaus
Vedoucí ústavu

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

Podklady a literatura

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

ČSN EN 13108-5 Asfaltové směsi - Specifikace pro materiály -

Část 5: Asfaltový koberec mastixový

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

Firemní materiály

Internetové zdroje

Zásady pro vypracování

Cílem práce bude zpracovat problematiku využití R - materiálu v asfaltových směsích pro obrusné vrstvy vozovek. Bude sledován především vliv dávkování rejuvenátorů.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

3.

.....
Ing. Petr Hýzl, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

Abstrakt

Bakalářská práce řeší problematiku přidávání R – materiálu do obrusných vrstev asfaltových vozovek, konkrétně do vrstvy SMA 11S. Je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V teoretické části je definován pojem R-materiál, je vysvětleno jeho získávání a následné uplatnění při recyklaci za horka v obalovně. Praktická část se zabývá návrhem směsi s obsahem 30 % R-materiálu, přípravou zkušebních těles, popisem provedených zkoušek a výsledky těchto zkoušek. Výsledky jsou porovnány se směsí SMA 11S bez R-materiálu.

Klíčová slova

asfaltové pojivo, asfaltová směs, asfaltový koberec mastixový, funkční zkoušky asfaltových směsí, R-materiál, kamenivo, rejuvenátor, recyklace vozovek, recyklace v míchacím centru za horka

Abstract

The Bachelor's thesis deals with an issue of adding a Reclaimed asphalt pavement (RAP) into surface courses, especially SMA 11S. The thesis is divided into two parts – theoretical and practical. The theoretical part defines the term RAP and explains how to gain RAP and how to use it for a hot recycling at asphalt plants. The practical part deals with the design of asphalt mixture containing 30 % of RAP, the preparation of test specimens, the description of executed tests and the results of those tests. The results are compared with SMA 11S without RAP.

Keywords

bitumen binder, asphalt mixture, stone mastic asphalt, functional tests of asphalt mixtures, reclaimed asphalt pavement, aggregate, rejuvenator, roads recycling, hot recycling at asphalt plant

Bibliografická citace VŠKP

Vojtěch Motl *Problematika R - materiálu v asfaltových směsích typu SMA*. Brno, 2016. 60 s., 8 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Petr Hýzl, Ph.D.

Prohlášení:

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

V Brně dne 27.5.2016

.....
podpis autora
Vojtěch Motl

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Petru Hýzlovi Ph.D. za odborné vedení mé bakalářské práce, zajištění podkladů a materiálu, dále Ing. Ivě Krčmové za pomoc při práci v laboratoři a při zpracování výsledků a také zaměstnancům školní laboratoře za pomoc při práci ve školní laboratoři. V neposlední řadě děkuji své rodině za podporu při studiu.

OBSAH

1. ÚVOD.....	10
2. CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE.....	11
3. TEORETICKÁ ČÁST	12
3.1 R-materiál	12
3.1.1 Získávání R-materiálu	12
3.1.2 Recyklace v míchacím centru za horka.....	13
3.2 Asfaltový koberec mastixový	15
3.3 Použití R-materiálu ve směsích SMA	16
3.3.1 Výhody použití R-materiálu	16
3.3.2 Nevýhody použití R-materiálu.....	17
4. PRAKTICKÁ ČÁST.....	18
4.1 Použitý materiál	18
4.1.1 Kamenivo	18
4.1.2 Vápencová moučka	18
4.1.3 R-materiál	18
4.1.4 Asfaltové pojivo	20
4.1.5 Rejuvenátor	20
4.1.6 Celulósová vlákna	21
4.2 Příprava zkušebních těles	23
4.2.1 Homogenizace a kvartace	23
4.2.2 Laboratorní výroba směsi.....	24
4.2.3 Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem	26
4.2.4 Příprava těles zhutňovačem desek.....	28
4.3 Použité zkoušky.....	30
4.3.1 Stanovení maximální objemové hmotnosti směsi	30
4.3.2 Stanovení objemové hmotnosti a mezerovitosti	32
4.3.3 Stanovení odolnosti proti trvalým deformacím	34
4.3.4 Stanovení nízkoteplotních vlastností	36
4.3.5 Stanovení modulů tuhosti	38
4.4 Výsledky	42
4.4.1 Návrh směsi	42

4.4.2 Příprava zkušebních těles	43
4.4.3 Stanovení odolnosti proti trvalým deformacím	45
4.4.4 Stanovení nízkoteplotních vlastností	48
4.4.5 Stanovení modulů tuhosti	50
5. ZÁVĚR BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	53
Seznam použitých zdrojů	54
Seznam obrázků	56
Seznam tabulek	57
Seznam grafů.....	58
Seznam rovnic	58
Seznam použitých symbolů a zkratk	59
Seznam příloh.....	60

1. ÚVOD

Ve světě stavebnictví se rozšiřuje pojem trvale udržitelná výstavba, která si klade za cíl najít způsob, jak stavět efektivně, ekonomicky výhodně a především s co nejmenším negativním vlivem na životní prostředí. Jednou z možností, jak toho dosáhnout, je recyklace.

Silniční síť se neustále rozrůstá a vyžaduje pravidelnou údržbu, popřípadě výměnu asfaltových vrstev, čímž roste spotřeba ropy a kvalitního kameniva. Tyto suroviny jsou však omezené, rozšiřování těžby je finančně nákladné a vynucuje si těžké zásahy do životního prostředí. Naopak by bylo zbytečné starou vybouranou vozovku nechat ležet na skládkách. Recyklace je tedy přímo logickým krokem a pojem, se kterým se budeme setkávat stále častěji.

Materiál získaný ze starých asfaltových vozovek se nazývá R-materiál a tato bakalářská práce rozebírá jeho využití v asfaltových směsích.

V západní Evropě je užívání R-materiálu do asfaltových směsí běžná věc, Česká republika je však zatím dosti konzervativní. Je to částečně dáno tím, že výroba směsi s R-materiálem je technologicky náročnější. A vlivem špatného získávání, zpracování a skladování, má R-materiál velmi proměnlivou kvalitu. Moje práce ale chce ukázat, že při správném postupu může i směs SMA 11S s přidáním 30 % R-materiálu dosáhnout podobných vlastností jako směs SMA 11S bez R-materiálu (směs do obrusné vrstvy vozovek pro vysoké zatížení).

2. CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem práce je zpracovat problematiku využití R-materiálu v asfaltových směsích pro obrusné vrstvy.

V teoretické části budou vysvětleny základy problematiky získávání a používání R-materiálu do asfaltového koberce mastixového.

Úkolem praktické části je návrh asfaltového koberce mastixového SMA 11S s 30 % R-materiálu (běžného) a následně tuto směs posoudit na:

- Maximální objemovou hmotnost dle ČSN 1297-5+A1
- Mezerovitost dle ČSN EN 12697-8

V případě, že směs vyhoví, bude se postupovat výrobou zkušebních těles pro následující funkční zkoušky:

- Zkouška pojíždění kolem – stanovení odolnosti proti trvalým deformacím dle ČSN EN 12697-22+A1
- Stanovení modulů tuhosti dle ČSN 12697-26
- Stanovení nízkoteplotních vlastností dle ČSN EN 12697-46

Na závěr budou získané výsledky porovnány s výsledky směsi s 0 % R-materiálu, které naměřila v rámci své diplomové práce Ing. Markéta Malá.

3. TEORETICKÁ ČÁST

3.1 R-MATERIÁL

R-materiál lze definovat jako asfaltovou směs znovuzískanou odfrézováním asfaltových vrstev nebo drcením desek vybouraných z asfaltových vozovek nebo velkých kusů asfaltové směsi a asfaltové směsi z neshodné nebo nadbytečné výroby. Obsahuje více jak 95 % asfaltových materiálů (Ra), s max. obsahem 5 % hmotnosti ostatních recyklovaných materiálů (Rc + Rb + Ru + X + Y + FL). Řadíme ho mezi recyklovaný stavební materiál (RSM). [3]

Je určený především pro použití v technologiích recyklace za horka. Použitím R – materiálu se zabývá norma ČSN EN 13108-8 Asfaltové směsi – Specifikace pro materiály – Část 8: R-materiál.[1]

3.1.1 ZÍSKÁVÁNÍ R-MATERIÁLU

První způsob získání R-materiálu je frézování. Frézování má tu výhodu, že lze postupovat po jednotlivých konstrukčních vrstvách, takže se nepromíchá směs o různé kvalitě a různé zrnitosti. Dříve se jednotlivé vrstvy nerozlišovaly a R-materiál se dával na jednu skládku, v současné době již bývá požadavkem ŘSD různě kvalitní R-materiál rozlišovat.

Druhým způsobem získávání R-materiálu je bourání vozovky, kdy se bourají všechny asfaltové vrstvy najednou. Také se nabízí varianta nejvyšší vrstvu vozovky odfrézovat a zbytek vybourat.[1]



Obr. 1: Frézování vozovky [4]



Obr. 2: Bourání vozovky [5]

3.1.2 RECYKLACE V MÍCHACÍM CENTRU ZA HORKA

I když existuje více možností přidávání R-materiálu do asfaltových směsí, ve své práci se budu zabývat pouze nejefektivnější možností zpracování R-materiálu, a to recyklací v míchacím centru za horka.

Vyfrézovaný nebo vybouraný R-materiál se nejdříve musí podrtit na frakci 0/11 (resp. 0/8) při použití do obrusných vrstev, popřípadě 0/22 (resp. 0/16) při použití do ložných vrstev.

Dále rozlišujeme 3 způsoby přidávání R-materiálu do asfaltové směsi:

- Dávkování R-materiálu přímo do míchačky šaržové obalovny
- Předehřívání R-materiálu v paralelním bubnu šaržové obalovny
- Metoda drum-mix používaná v kontinuálních obalovnách

Tyto způsoby rozvedu v následujících podkapitolách.

DÁVKOVÁNÍ R-MATERIÁLU PŘÍMO DO MÍCHAČKY ŠARŽOVÉ OBALOVNY

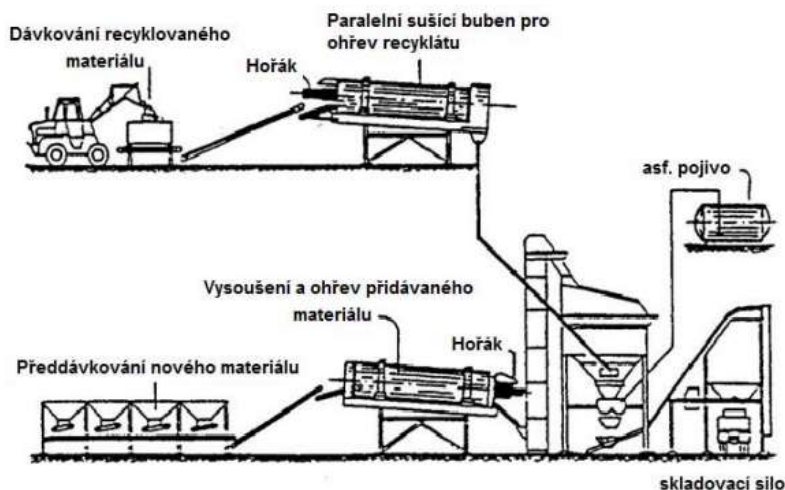
Tento způsob přidávání R-materiálu se uplatňuje v obalovnách bez paralelního bubnu. Studený R-materiál se přímo dávkuje do míchačky šaržové obalovny. Z toho důvodu je nutné předehřát kamenivo na vyšší teplotu, aby se výsledná teplota rovnala požadované teplotě míchání. Čím více R-materiálu přidáváme, tím více musíme kamenivo předehřát. Z toho důvodu je množství přidávaného R-materiálu značně omezené. Problémem je i vysoká vlhkost R-materiálu. V praxi je doporučeno přidávat max 20 % R-materiálu.[2] V současné době je tímto způsobem vybaveno 40 % obaloven.[6]

PŘEDEHŘÍVÁNÍ R-MATERIÁLU V PARALELNÍM BUBNU ŠARŽOVÉ OBALOVNY

Hlavní rozdíl proti přímému dávkování do míchačky šaržové obalovny je v tom, že R-materiál je nejprve předehříván v paralelním bubnu. Tento způsob zpracování R-materiálu umožňuje na rozdíl od přímého přidávání do bubnu šaržové obalovny použít při výrobě směsi až 80 % recyklátu.

R – materiál je tedy nejdříve umístěn do paralelního bubnu nacházejícího se v horní části obalovny, kde se materiál zahřívá na teplotu kolem 130 °C a jsou do něho

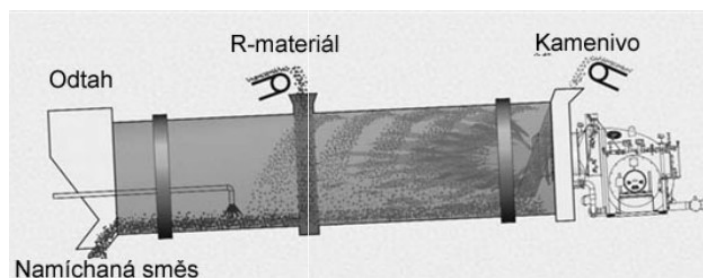
přimíchány tzv. rejuvenátory. Tyto látky slouží ke znovuoživení zestárlého pojiva, které se v R-materiálu nachází. Poté je skladován v silu, ze kterého je dávkován do míchačky. Schéma šaržové obalovny s paralelním bubnem je zobrazeno níže.



Obr. 3: Šaržová obalovna s paralelním bubnem [7]

METODA DRUM-MIX

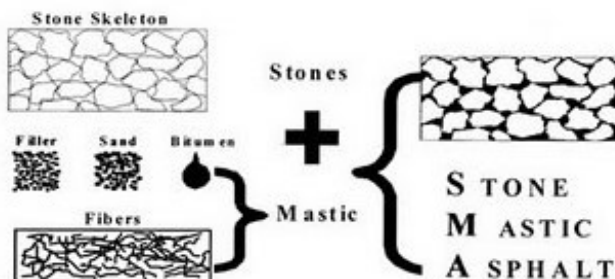
Kontinuální výroba asfaltových směsí není v České republice příliš rozšířena, u nás existuje pouze jedna obalovna využívající tuto technologii. Hodí se především pro velké stavby s konstantní recepturou směsi, výrobní proces probíhá bez přestávky, přičemž jednotlivé komponenty jsou do mísícího procesu přidávány kontinuálně. Tento typ obaloven je rozšířen zejména v USA, kde tvoří asi 80 % z celkového množství míchacích center a umožňuje přidávání přibližně 50 % R-materiálu. [8]



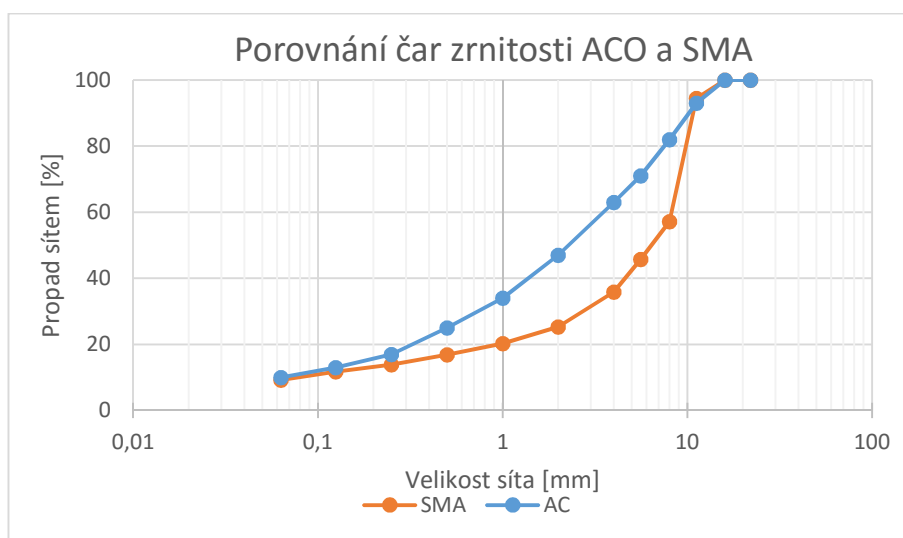
Obr. 4: Princip metody Drum-mix [6]

3.2 ASFALTOVÝ KOBEREC MASTIXOVÝ

Asfaltový koberec mastixový je směs určená pro obrusné vrstvy vysoce zatížených silničních a dálničních úseků a křižovatek. Čára zrnitosti je přerušená, nosnou kostru směsi tvoří nejhrubší a částečně též druhá nejhrubší frakce kameniva, zbývající kamenivo je výplňové, které společně s asfaltovým pojivem a kamennou moučkou vytváří asfaltovou maltu – mastix, která vzájemně tmelí zrna nosné kostry. [9]



Obr. 5: Složení směsi SMA [10]



Graf 1: Porovnání čar zrnitosti ACO a SMA

ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI:

- vysoká odolnost proti tvorbě trvalých deformací
- odolnost proti tvorbě mrazových trhlin
- příznivá makrotextura a s ní související útlum hluku z dopravy
- pomalý proces stárnutí
- dobrá přilnavost k podkladu

3.3 POUŽITÍ R-MATERIÁLU VE SMĚSÍCH SMA

Kombinace R-materiálu a asfaltového koberece mastixového s sebou přináší určitá úskalí. Tak především současná norma ČSN EN 13108-5 Asfaltové směsi - Specifikace pro materiály - Část 5: Asfaltový koberec mastixový přímo zakazuje použití R-materiálu do asfaltových směsí typu SMA.

Asfaltový koberec mastixový se vyznačuje lomenou čarou zrnitosti a zvýšeným obsahem pojiva. Proto je důležitý správný návrh čáry zrnitosti tak, aby se co nejvíce blížila čáře zrnitosti směsi SMA bez R-materiálu. Směs SMA má vyšší požadavky na kvalitu kameniva než směsi ACO, proto by se i kvalita kameniva v R-materiálu měla zohlednit. [12]

Dalším problémem je zestárlé pojivo v R-materiálu, které ztratilo svoji elasticitu a je tvrdší. Proto je nutné jej opět „oživit“ přidáním tzv. rejuvenátoru – více v kapitole 4.1.5 *Rejuvenátor*.

3.3.1 VÝHODY POUŽITÍ R-MATERIÁLU

Užití R-materiálu nejen do směsí SMA, ale i dalších typů směsí s sebou přináší následující výhody [11]:

- Využití asfaltového pojiva v R-materiálu
 - zachování neobnovitelných zdrojů ropy
 - snížení znečištění ovzduší při výrobě asfaltu
 - finanční úspora, obzvláště při rostoucí ceně ropy
- Využití kameniva v R-materiálu
 - zachování zdrojů kameniva, možnost jeho uplatnění v jiných odvětvích
 - finanční úspora
- Zhodnocení stávajícího materiálu
 - vyřazený materiál bude mít další využití
 - snížení objemu skládek

3.3.2 NEVÝHODY POUŽITÍ R-MATERIÁLU

Použití R-materiálu však s sebou nese následující nevýhody a rizika [11]:

- Nutno počítat s cenou rejuvenátorů
- Vyšší technologické požadavky na obalovnu
 - v případě vyššího dávkování R-materiálu je potřeba paralelní buben
 - při absenci paralelního bubnu je vyšší riziko nedodržení správných předepsaných teplot
 - zastřešení skládky R-materiálu, třídění R-materiálu
- Možný výskyt škodlivin v R-materiálu
 - obsah dehtového pojiva
 - částice vzniklé otěrem z pneumatik či otěrem brzdového obložení
 - částice z výfukových plynů

Po nutné počáteční investici do technologie obaloven však výhody převažují a využití R-materiálu v recyklaci za horka se ukazuje jako velmi výhodné.

4. PRAKTICKÁ ČÁST

Úkolem praktické části byl návrh směsi asfaltového koberce mastixového SMA 11S s 30 % R-materiálu a porovnání výsledků laboratorních zkoušek se směsí SMA 11S bez R-materiálu.

4.1 POUŽITÝ MATERIÁL

4.1.1 KAMENIVO

Kamenivo použité při laboratorní výrobě směsi bylo z kamenolomu Sýkořice ve Zbečně ve frakcích 0/2, 2/5, 4/8, 8/11 a vápencová moučka. Nejprve byla provedena homogenizace a kvartace, poté bylo kamenivo vysušeno při 110 °C.

Frakce	16	11,2	8	5,6	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
8/11	100	92	13	3	2	1	1	1	1	1	1
4/8	100	100	95	56	12	2	1	1	1	1	1
2/5	100	100	100	95	57	10	6	5	4	4	3
0/2	100	100	100	100	98	75	52	34	21	13	8

Tab. 1: Sítový rozbor frakcí kameniva v %. Zdroj [15]

4.1.2 VÁPENCOVÁ MOUČKA

Vápencová moučka (tzv. filler) je kamenivo, u kterého většina zrn propadne sítím o velikosti 0,063mm. Moučka byla vysušena při teplotě 110 °C.

Frakce	16	11,2	8	5,6	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
Moučka	100	100	100	100	100	100	100	99	97	88	69

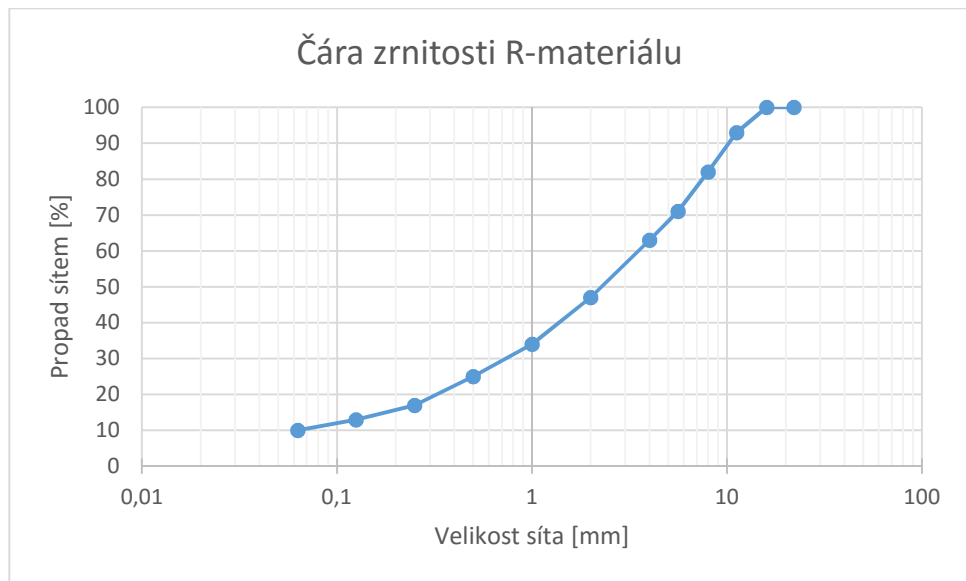
Tab. 2: Sítový rozbor vápencové moučky v %. Zdroj [15]

4.1.3 R-MATERIÁL

Při výrobě směsi s obsahem R-materiálu byl použit běžný R-materiál od firmy Froněk spol. s r.o., který byl získán odfrézováním asfaltových vrstev a předrcením na frakci 0/11 a dále vysušen při teplotě 50 °C. Obsah asfaltového pojiva v tomto R-materiálu je 5,2 % a dle čáry zrnitosti pochází z asfaltového betonu.

Frakce	16	11,2	8	5,6	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
R-mat	100	93	82	71	63	47	34	25	17	13	10

Tab. 3: Sítový rozbor R-materiálu v %. Zdroj [15]



Graf 2: Čára zrnitosti R-materiálu



Obr. 6: R-materiál frakce 0/11

4.1.4 ASFALTOVÉ POJIVO

Pro návrh krytu vozovek ze směsi asfaltového koberce mastixového, určeného pro vozovky s vyšší třídou dopravního zatížení, se standardně používá modifikovaný asfalt z důvodu zajištění vysokých požadavků na celkovou kvalitu směsi.

V praktické části této práce bylo pro návrh SMA 11S použito modifikované asfaltové pojivo Colflex 45/80 – 55 vyráběné firmou COLAS CZ a.s., označení 45/80 – 55 značí penetraci v rozmezí 45 – 80 penetračních jednotek a minimální bod měknutí 55 °C. Dle naměřených hodnot ze zkoušek provedených v laboratoři se zjistilo, že dané pojivo má penetraci 65 penetračních jednotek a bod měknutí 61,6 °C. [15]

Pro zlepšení přilnavosti asfaltového pojiva ke kamenivu bylo do pojiva přidáváno tekuté smáčedlo a adhezní přísada Addibit L300, která zlepšuje přilnavost díky své nízké viskozitě. Dávkování Addibitu L300 je 0,2 % hmotnosti asfaltového pojiva přidávaného do směsi.

Dávkování pojiva bylo nejdříve zvoleno 6,5 % hmotnosti směsi SMA 11S. Podrobnější údaje jsou uvedeny v kapitole 4.2.2 *Laboratorní výroba směsi*.

4.1.5 REJUVENÁTOR

Pro změkčení zestárlého (oxidovaného) asfaltového pojiva obsaženého v R-materiálu se používají tzv. rejuvenátory. V praktické části této práce byl použit rejuvenátor Storflux. Jedná se o derivát ropy získaný ze sekundární rafinace, který patří do fluxačních olejů jako je Storflash, Storbit a Storelastic. Množství použitého změkčovadla se dávkuje dle množství použitého asfaltového pojiva, které je potřeba změkčit, nebo podle technologického minima pro dobrou zpracovatelnost na obalovně a to tak, aby recyklovaný materiál nezůstával v paralelním bubnu obalovny, kde se rejuvenátor dávkuje.

Postup použití rejuvenátoru při přípravě směsi v laboratorních podmínkách byl následující:

- Zahřátí kameniva na teplotu míchání 165 °C
- Zahřátí R-materiálu na teplotu 135 °C
- Po dosažení teploty 135 °C se do R-materiálu přidá změkčovadlo Storflux a ručně se promíchá
- Po promíchání se R-materiál přikryje např. alobalem a vrátí se zpátky do pece
- Po 10 minutách se opět promíchá a přidá do míchačky ke kamenivu, které je již navážené a promíchané s celulózovými vlákny
- Další postup výroby asfaltové směsi je popsán v kapitole 4.2.2 *Laboratorní výroba směsi*

Dávkování rejuvenátoru se zjistilo porovnáním dvou kritérií. První kritérium je dáno bodem měknutí asfaltového pojiva v R-materiálu, kdy se množství rejuvenátoru stanoví na základě vzorce:

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

Rovnice 1: Výpočet dávkování rejuvenátoru

m_R	je množství rejuvenátoru v g
m_{R-mat}	je hmotnost přidávaného R-materiálu v g
t_1	je teplota bodu měknutí asfaltu v R-materiálu
t_2	je požadovaná teplota bodu měknutí

Druhé kritérium je dáno technologickým minimem, které je dle zkušeností 2 kg Storfluxu na 1 t R – materiálu.

4.1.6 CELULÓZOVÁ VLÁKNA

Použití těchto vláken v asfaltových směsích typu SMA umožňuje zvýšení obsahu asfaltu v obalovaných směsích, snižuje stékavost asfaltu z kameniva a také zvyšuje měrný povrch a tím udržení asfaltu ve směsi. Celulózové vlákno, které se používá jako přísada do asfaltové směsi, se vyrábí z výběrového tříděného papíru technologií zpětného

rozvláknění v turbíně na základní celulósová vlákna. Celulósová vlákna nejsou zdraví škodlivá, neobsahují žádné škodlivé látky a v případě likvidace či náhodného úniku do okolního prostředí, například při dávkování, jsou biologicky odbouratelná.



Obr. 7: Celulósový granulát

Postup výroby se řídí směrnicí ISO 9001 společnosti CIUR a.s. – „Řízení výroby – kroky výrobního procesu“. Po dokončení výroby se mají celulósová vlákna skladovat v suchém prostředí (relativní vlhkost do 50 %), chráněné před sluncem a při teplotě od -5 °C do 50 °C. Pokud se dodrží tyto požadavky na skladování, není doba použití omezená. Doporučuje se však výrobek spotřebovat do 2 let od jeho vyrobení.

Při výrobě asfaltové směsi řešené v této práci bylo použito průmyslové vlákno S-CEL 7G od firmy CIUR a.s. Jedná se o vláknitý granulát pro silniční stavitelství s přísadou speciálního vosku a primárně se používá jako stabilizační přísada do asfaltového koberce mastixového. Použití celulósových vláken do asfaltových směsí přináší nejen umožnění zvýšení obsahu asfaltu v obalovaných směsích a snížení stékavostí z kameniva, ale také zvýšení zpracovatelnosti při pokládce, zlepšení tepelné odolnosti směsi, zlepšení fyzikálně – mechanických vlastností asfaltových směsí, zlepšení nízkoteplotních vlastností směsi a snížení teploty pokládky. V praxi dle výrobce zejména zvyšuje životnost vozovky, odolnost proti průniku vody, vylepšuje tvarovou stálost při vysokém dopravním zatížení a tím i snižuje riziko vyjždění kolejí. Snižuje hlučnost komunikace a zvyšuje její odolnost proti obrusu. [14]

Výrobce dále doporučuje suché míchání v rozmezí od 9 do 15 sekund (kamenivo + celulósový granulát) a následně zkušebně ověřit rozpuštění jednotlivých granulí.

Dávkování je doporučeno v poměru 0,3 % hmotnosti asfaltové směsi (v některých případech 0,4 %, například u jemné zrnitosti kameniva). Celulózové vlákna se doporučuje dávkovat současně s kamenivem a společně promíchat před vsypem dalších komponentů.

4.2 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

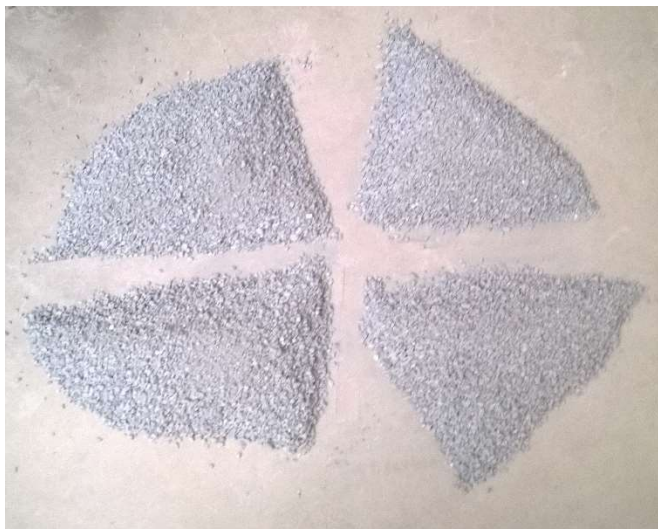
V této kapitole jsou popsány všechny metody, které vedly k návrhu směsi a následné výrobě zkušebních těles.

4.2.1 HOMOGENIZACE A KVARTACE

Pro získání reprezentativních vzorků tak, aby výsledky zkoušek na nich prováděné byly dostatečně průkazné, je potřeba provést homogenizaci a kvartaci, které se provádějí podle normy ČSN EN 12697-28 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 28: Příprava vzorků pro stanovení obsahu pojiva, obsahu vody a zrnitosti. [16]

Homogenizace kameniva nebo R – materiálu jsem provedl tak, že jsem na čistou podlahu vysypal větší množství tohoto materiálu, promíchal ho a vytvořil z něj komolý kužel. Materiál z komolého kužele jsem lopatou přemístil na druhou hromadu tak, aby se vytvořil druhý komolý kužel, a tento postup jsem ještě jednou zopakoval. Třetí kužel, který se tímto způsobem vytvoří, se pomocí svislého zasunování lopaty zploští a dále se upravuje pomocí kvartace.

Kvartace slouží ke zmenšení vzorků na požadovanou velikost navážky. Komolý kužel jsem rozdělil na čtyři stejné části pomocí dvou na sebe navzájem kolmých průměrů. Dvě diagonálně umístěné části se jsem smíchal a zbytek vyřadil. Takto jsem postupoval až do doby, než jsem získal vzorek potřebné velikosti.



Obr. 8: Provádění kvartace

4.2.2 LABORATORNÍ VÝROBA SMĚSI

Výroba směsi v laboratoři je popsána v normě ČSN EN 12697-35+A1 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 35: Laboratorní výroba směsi. V laboratoři se asfaltové směsi připravují z důvodu výroby zkušebních těles a mohou vznikat ručním nebo mechanickým mícháním. Referenční teplota míchání, která je uvedena v normě, závisí na gradaci silničního asfaltového pojiva.[17] V našem případě byla teplota míchání 165 °C.

POMŮCKY A ZAŘÍZENÍ

Výroba asfaltové směsi se prováděla pomocí mechanického míchání, bylo tedy potřeba mít laboratorní míchačku, která umožnila, aby za dobu maximálně 5 min (dle výše uvedené normy) byla obalena všechna zrna kameniva, sušárnu pro ohřev kameniva a asfaltu na referenční teplotu, váhy pro zvážení hmotnosti příslušných frakcí směsi a teploměr umožňující změřit předepsanou teplotu.

Při výrobě směsi byl použit recyklovaný materiál od firmy Froněk spol. s.r.o., který byl získán odfrézováním asfaltových vrstev a předrcením na frakci 0/11, viz kapitola 4.1.3 R-materiál.

POSTUP VÝROBY

Potřebné množství pojiva a kamenivo jsem nechal po dobu 3 až 5 hodin nahřívat na referenční teplotu míchání (165 °C). Do pojiva jsem přidal adhezní přísadu Addibit L300 pro zlepšení přilnavosti asfaltového pojiva ke kamenivu (viz kapitola 4.1.4 *Asfaltové pojivo*). Dávkování Addibitu L300 je 0,2 % hmotnosti asfaltového pojiva ve směsi. R-materiál se nahřál na teplotu 135°C a poté jsem na něho aplikoval rejuvenátor (viz kapitola 4.1.5 *Rejuvenátor*). Před samotným mícháním je potřeba, aby míchací nádoba byla nahřata na požadovanou referenční teplotu 165 ± 5 °C. Nahřáté navážky kameniva a R-materiál jsem nasypal do míchací nádoby a nechaly se promíchat. Poté jsem přidal asfaltové pojivo. Složky se se pak smísily v laboratorní míchačce, po obalení kameniva pojivem se přidala vápencová moučka (ve dvou dávkách) a míchání se znovu spustilo až do doby, kdy došlo k řádnému promíchání a směs byla po vizuálním posouzení homogenní.



Obr. 9: Laboratorní míchačka

4.2.3 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES RÁZOVÝM ZHUTŇOVAČEM

Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem je popsána v normě ČSN EN 12697-30+A1: Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem. Tato zkušební tělesa se používají především pro stanovení objemové hmotnosti a jiných technologických charakteristik, např. hodnota stability a přetvoření Marshallovou zkouškou podle EN 12697-34+A1 apod. [19]

Při přípravě těles se asfaltová směs vytemperuje na potřebnou teplotu a nasype do ocelové formy pro hutnění. Poté se zhutňuje v rázovém zhutňovači pomocí hutnícího beranu, který padá z předepsané výšky požadovaným počtem rázů na horní povrch zkušebního tělesa. Nakonec se zkušební těleso nechá zchladnout na laboratorní teplotu. [19]

POMŮCKY A ZAŘÍZENÍ

Na přípravu zkušebních těles byl použit rázový zhutňovač s ocelovým dolním podstavcem, forma pro hutnění, která se skládá z nástavce, válcové formy a podložky, sušárna na ohřev kameniva, asfaltu, forem pro hutnění apod. a výtlačné zařízení.

Zkušební tělesa musí mít tvar válce o průměru $D = (101,6 \pm 0,1)$ mm a výšku $h = (63,5 \pm 2,5)$ mm. Maximální dovolená velikost zrna kameniva je 22,4 mm.

POSTUP VÝROBY

Asfaltová směs se nejprve temperovala v sušárně na hutnící teplotu 155 °C a před výrobou prvního ze vzorků se nahřála také celá forma. Na nahřátou podložku formy pro hutnění jsem položil kolečko separačního papíru. Poté jsem do formy na třikrát nasypal rozehřátou asfaltovou směs, přičemž jsem musel dbát na to, aby nedocházelo k segregaci zrn. Na závěr jsem na srovnaný povrch položil druhé kolečko separačního papíru. Ihned poté se muselo začít se zhutňováním. Naplněnou formu jsem osadil do rázového zhutňovače a nechal zhutnit 50 úderů. Poté jsem formu obrátil a těleso se hutnilo z druhé strany dalšími 50 úderů. Zhutněné těleso jsem potom vyjmul ze zhutňovače, odstranily se separační papíry a nechal vychladnout na teplotu zhruba 40 °C. Následně jsem těleso pomocí vytlačovacího zařízení vytlačil z formy a nechal dále chladnout.



Obr. 10 Rázový zhutňovač



Obr. 12 Marshallova tělesa



Obr. 11 Chlazení těles a výtlačné zařízení

4.2.4 PŘÍPRAVA TĚLES ZHUTŇOVAČEM DESEK

Problematikou přípravy zkušebních těles zhutňovačem desek se zabývá norma ČSN EN 12697-33+A1 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 33: Příprava zkušebních těles zhutňovačem desek. V normě jsou popsány tři metody hutnění vzorku – hutnění jedním nebo dvěma koly opatřenými pneumatikou, hutnění hladkým ocelovým válcem a hutnění ocelovými lamelami, v našem případě se vzorky hutnily ocelovými lamelami. [20]

POMŮCKY A ZAŘÍZENÍ

Při přípravě zkušebních těles hutněním pomocí lamel zatlačovaných válcem je potřeba forma se stanovenými vnitřními rozměry $L = 320 \text{ mm}$, $l = 260 \text{ mm}$ s tolerancí a zařízení ke zhutnění asfaltových směsí, které se skládá ze stolu, na kterém je přišroubovaná forma, nastavitelných distančních rámečků pro výrobu těles různých tloušťek, ocelových lamel, ocelového válce o dostatečných rozměrech, tak aby se mohl pohybovat po lamelách, které jsou vertikálně uloženy na formě a takovým způsobem, aby vyvinul konstantní svislé zatížení.



Obr. 13: Lamelový zhutňovač

POSTUP VÝROBY

Nejprve jsem zjistil hmotnost navážky potřebné k výrobě jedné desky. Ta se vypočítala z rozměrů formy, z tloušťky separačního plechu, potřebné tloušťky zkušební vzorku a objemové hmotnosti zjištěné vážením Marshallových těles, které jsem ze směsi vyrobil pomocí rázového zhutňovače podle normy ČSN EN 12697-30+A1: Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem (viz kap. 4.2.3 *Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem*). Poté jsem připravil asfaltovou směs dle normy ČSN EN 12697-35+A1 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 35: Laboratorní výroba směsi (viz kap. 4.2.2 *Laboratorní výroba směsi*).

Formu, podkladní desku a plech, který se položí na asfaltovou směs po naplnění formy, jsem namazal separačním prostředkem a poté jsem formu naplnil asfaltovou směsí o teplotě hutnění desky, tedy 155 °C. Pomocí lopatky jsem směs rovnoměrně rozprostřel po celé formě a upěchoval takovým způsobem, aby byly vyplněny rohy formy a povrch byl co nejrovnější. Na povrch směsi jsem umístil separační plech, na který jsem ve svislé poloze naskládal hutnicí lamely. Po spuštění pohyblivého válce se na lamely začalo vyvíjet konstantní zatížení a ty se začaly zatačovat, až válec dosednul na formu. Po ukončení procesu hutnění se celé těleso ještě před rozebráním formy nechalo vychladnout na laboratorní teplotu.

4.3 POUŽITÉ ZKOUŠKY

V této kapitole jsou popsány všechny prováděné zkoušky.

4.3.1 STANOVENÍ MAXIMÁLNÍ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI SMĚSI

Maximální objemová hmotnost směsi je hmotnost při dané zkušební teplotě připadající na jednotku objemu asfaltové směsi bez mezer. Společně s objemovou hmotností se používá především k výpočtu obsahu mezer ve zhuštěném vzorku a dalších vlastností vztahujících se k jejímu objemu. V normě ČSN 1297-5+A1 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti jsou stanoveny tři postupy zjištění maximální objemové hmotnosti – volumetrický, hydrostatický a matematický. V této bakalářské práci je použit volumetrický postup. [18]

Podstatou tohoto postupu je stanovení maximální objemové hmotnosti směsi z objemu vzorku bez mezer a jeho suché hmotnosti. Objem vzorku se měří jako objem vody či rozpouštědla vytěsněného vzorkem v pyknometru.[18]

POMŮCKY A ZAŘÍZENÍ

Ke stanovení maximální objemové hmotnosti směsi byla použita odvzdušněná destilovaná voda nebo rozpouštědlo (trichloretylen), sušárna vhodná k sušení vzorků udržující teplotu v rozmezí $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$, špachtle k uvolňování vzorků, váhy s přesností 0,1 g, teploměr s přesností 0,1 °C, vodní lázeň vhodných rozměrů udržující teplotu v rozmezí $\pm 0,2^\circ\text{C}$, pyknometr s těsně přiléhajícím nástavcem a zařízení pro vakuování.

POSTUP ZKOUŠKY

Po vysušení vzorku asfaltové směsi v sušárně při max. teplotě $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ jsem vzorek rozdělil pomocí špachtle a poté ručně na částice a shluky, jejichž velikost byla maximálně 6 mm. Pokud nebyl materiál dostatečně měkký tak, aby šel rozdělít ručně, zahříval se při teplotě 110 °C, až do doby, kdy rozdělení bylo možné. Stanovila se hmotnost (m_1) prázdného pyknometru s nástavcem o známém objemu (V_p) a zkušební vzorek jsem opatrně pomocí papírového trychtýře umístil do pyknometru a nechal

temperovat na okolní teplotu. Poté jsem stanovil hmotnost (m_2) pyknometru s nástavcem a vysušeným vzorkem.

Pyknometr jsem naplnil buď rozpouštědlem, anebo destilovanou vodou do výšky maximálně 30 mm pod okraj. V případě destilované vody bylo ještě potřeba odstranit zachycený vzduch pomocí vakuové komory, kdy vzduch byl vytěsněn při zbytkovém tlaku 4 kPa. Při odstraňování vzduchu v pyknometru je dobré s pyknometrem míchat nebo použít vibrační stůl, případně přidat malé množství dispergačního činidla.



Obr. 14: Pyknometry

Po naplnění pyknometru rozpouštědlem či destilovanou vodou jsem nasadil nástavec (styčné plochy nástavce a pyknometru byly namazány vazelínou) a pyknometr nechal temperovat po dobu 120 minut (dle normy ČSN 12697-5+A1 se v případě vody má temperovat po dobu minimálně 30, ale maximálně 180 minut, při použití trichloretylenu po dobu minimálně 60, ale maximálně 180 min) na teplotu $(25 \pm 0,2) ^\circ\text{C}$ v případě rozpouštědla a $(25 \pm 1) ^\circ\text{C}$ v případě vody, přičemž voda ve vodní lázni musí dosahovat přibližně do výšky 20 mm pod okraj pyknometru. Poté se pyknometr doplnil vodou či rozpouštědlem o stejné zkušební teplotě jako vodní lázeň až po značku na nástavci. Pyknometr se po uplynutí stanovené doby vyjmul z vodní lázně a stanovila se jeho hmotnost (m_3).

VÝPOČET

Maximální objemová hmotnost ρ_{mv} asfaltové směsi stanovená volumetrickým postupem se vypočítala dle rovnice:

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

Rovnice2: Stanovení maximální objemové hmotnosti

ρ_{mv} je maximální objemová hmotnost asfaltové směsi v kg/m^3 , stanovená volumetrickým způsobem

m_1 je hmotnost pyknometru a nástavcem, v g

m_2 je hmotnost pyknometru, nástavce a zkušební vzorku, v g

m_3 je hmotnost pyknometru, nástavce, zkušební vzorku a vody či rozpouštědla, v g

V_p je objem pyknometru po naplnění po referenční značce nástavce, v m^3

ρ_w je hustota vody nebo případně rozpouštědla při zkušební teplotě, v kg/m^3

Veškeré hmotnosti musely být stanoveny v g přesností na 0,1 g. Objem pyknometru musel být stanoven v m^3 s přesností $0,5 \times 10^{-6} \text{ m}^3$. Veškerá procenta musela být vyjádřena s přesností 0,1 %. Hustota vody při 25°C je $997,1 \text{ kg/m}^3$, při jiných teplotách je nutné použít korekční faktor. Hustota použitého trichloretylenu při 25 °C je 1453 kg/m^3 .

4.3.2 STANOVENÍ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI A MEZEROVITOSTI

Postup těchto zkoušek je popsán v normě ČSN EN 12697-8 Asfaltové směsi za horka – Část 8: Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí. Mezerovitostí se zde rozumí procentuální objem mezer v daném zkušebním tělese k celkovému objemu tělesa. Objemová hmotnost byla stanovena na Marshallových tělesech vyrobených pomocí rázového zhutňovače, popis jejich výroby je popsán v kapitole 4.2.3 *Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem* a dále na deskách, jejichž výroba je popsána v kapitole 4.2.4 *Příprava zkušebních těles zhutňovačem desek*. V případě Marshallových těles bylo nutné

zjistit jejich objemovou hmotnost z důvodu výpočtu mezerovitosti asfaltové směsi a ověření, zda je její návrh správný. Požadovaná mezerovitost je 3,0 – 4,5 % [13]. U zkušebních těles typu deska se objemová hmotnost a mezerovitost zjišťovala z důvodu ověření správného zhutnění tělesa.

POSTUP ZKOUŠKY

Po vychladnutí vyrobeného tělesa jsem zjistil jeho suchou hmotnost m_1 a připravil jsem vodní lázeň, která měla známou teplotu. Poté jsem celé těleso ponořil do vodní lázně po dobu 30 minut. Po uplynutí této doby jsem těleso pod vodu zvážil (hmotnost m_2), přičemž bylo nutné dbát na to, aby se nedotýkalo stěn nádoby nebo aby na něm neulpívaly vzduchové bubliny. Těleso jsem vyjmul z vodní lázně a povrchově osušil. Po jeho opětovném zvážení se zjistila hmotnost m_3 .

VÝPOČET

Objemová hmotnost se stanoví pomocí následujícího výpočtu:

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

Rovnice 3: Stanovení objemové hmotnosti zkušebního tělesa

ρ_{bssd}	je objemová hmotnost zkušebního tělesa, v kg/m^3
m_1	je hmotnost suchého tělesa, v g
m_2	je hmotnost tělesa ve vodě, v g
m_3	je hmotnost tělesa nasyceného vodou a povrchově osušeného, v g
ρ_w	hustota vody při laboratorní teplotě, v kg/m^3

Jak již bylo řečeno, Marshallova tělesa i vyrobené zkušební desky musely splňovat i kritérium mezerovitosti, které se stanovovalo pomocí výpočtu:

$$M = \left(1 - \frac{\rho_{bssd}}{\rho_{mw}}\right) \times 100$$

Rovnice 4: Stanovení mezerovitosti tělesa

M	je mezerovitost směsi, v %
ρ_{bssd}	je objemová hmotnost zkušební tělesa, v kg/m ³
ρ_{mw}	je maximální objemová hmotnost směsi, v kg/m ³

Pro zjištění mezerovitosti je tedy třeba znát maximální objemovou hmotnost, postup jejího stanovení je popsán v kapitole 4.3.1 *Stanovení maximální objemové hmotnosti směsi*.

4.3.3 STANOVENÍ ODOLNOSTI PROTI TRVALÝM DEFORMACÍM

První prováděnou funkční zkouškou na asfaltových směsích byla zkouška poježdění kolem, která je popsána v normě ČSN EN 12697-22+A1 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 22: Zkouška poježdění kolem. V normě jsou popsány zkušební postupy pro stanovení náchylnosti asfaltových směsí k trvalým deformacím a lze je aplikovat pro směsi s maximální velikostí zrna do 32 mm včetně.[23]

Výroba zkušebních těles pro tuto desku je popsána v kapitole 4.2.4 *Příprava zkušební těles zhutňovačem desek*. Rozměry zkušebních těles tedy byly přibližně 260 x 320 x 40 mm. Před každým měřením je nutné zjistit přesné rozměry desek, především jejich tloušťku, hmotnost a objemovou hmotnost, a následně míru zhutnění a mezerovitost. Tloušťku zkušebních těles jsem stanovil výpočtem průměru z deseti měření na každé desce, přičemž žádný z naměřených rozměrů se nesměl lišit od jmenovité hodnoty o více než 2,5 mm. Protokoly všech zkušebních desek jsou uvedeny v Příloze B.

POMŮCKY A ZAŘÍZENÍ

Tato zkouška probíhala na tzv. malém zkušebním zařízení simulující pojíždění kolem, které se skládá ze zatíženého kola působícího na zkušební těleso a stolu pod kolem a dvou zkušebních forem s rozměry 260 x 320 mm. Dále bylo potřeba mít laboratorní sušárnu a podkladní desku. Zkouška se prováděla na dvou zkušebních tělesech a jejich výsledky se následně zprůměrovaly.

POSTUP ZKOUŠKY

Dvě zkušební tělesa jsem umístil do forem předepsaných rozměrů, a to tak, aby vrchní strana lícovala s okrajem formy, a poté byla temperována v laboratorní sušárně na teplotu $(50 \pm 1)^\circ\text{C}$ po dobu několika hodin, nejméně však 4 hodiny, nejvíce 24 hodin. Následně jsem tělesa umístil do zkušebního zařízení, které bylo také vytemperováno na teplotu $(50 \pm 1)^\circ\text{C}$ a zahájila se zkouška. Ta probíhala tak, že deska byla pojížděna zatíženým kolem v celkem 10 000 cyklech, tedy 20 000 pojezdy. Zařízení v každém cyklu zaznamenávalo hloubku vyjeté koleje v obou tělesech a aktuální teplotu v zařízení.

VÝPOČET

Ze zařízení se tedy získaly hodnoty jednotlivých deformací po každém cyklu zatěžování na obou zkušebních vzorcích. Z výsledků jsem výpočtem dále zjišťoval hodnotu WTS_{AIR} , což je přírůstek hloubky vyjeté koleje vypočítaný jako průměrná hodnota, o kterou narůstá hloubka koleje opakovanými pojezdy zatěžovacího kola na vzduchu a PRD_{AIR} , což je poměrná hloubka vyjeté koleje zkoušené asfaltové směsi po N zátěžových cyklech na vzduchu. Tyto hodnoty se zjistily následujícími výpočty:

$$PRD_{AIR} = \frac{Y_{S,10000}}{t} \times 100$$

Rovnice 5: Stanovení poměrné hloubky vyjeté koleje

PRD_{AIR}	je poměrná hloubka vyjeté koleje asfaltové směsi na vzduchu po 10 000 cyklech, v %
$Y_{s, 10000}$	je průměrná hloubka koleje z obou desek po 10 000 cyklech, v mm
t	je průměrná tloušťka zkušebních těles

$$WTS_{AIR} = \frac{d_{10000} - d_{5000}}{5}$$

Rovnice 6: Stanovení přírůstku hloubky vyjeté koleje

WTS_{AIR}	je přírůstek hloubky vyjeté koleje, v $\text{mm}/10^3$
d_{10000}	je průměrná hloubka vyjeté koleje po 10 000 cyklech, v mm
d_{5000}	je průměrná hloubka vyjeté koleje po 5 000 cyklech, v mm

4.3.4 STANOVENÍ NÍZKOTEPLTNÍCH VLASTNOSTÍ

Stanovení nízkoteplotních vlastností se řídí normou ČSN EN 12697-46 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 46: Nízkoteplotní vlastnosti a tvorba trhlin pomocí jednoosé zkoušky tahem. V normě je popsáno několik možných vyhodnocení zkoušek. V rámci bakalářské práce bylo prováděno vyhodnocení zkoušky TSRST, neboli stanovení minimální teploty, kterou je asfaltová směs schopna snést před porušením pomocí zkoušky nízkoteplotních vlastností s rovnoměrně řízeným poklesem teploty. Podstatou této zkoušky je vystavení vzorku s udržovanou konstantní délkou poklesu teploty s konstantní rychlostí. Tím, že se zamezí tepelnému smršťování, dochází k vývinu tzv. kryogenního napětí ve vzorku a výsledkem jeho šíření dojde k porušení vzorku. [22]

POMŮCKY A ZAŘÍZENÍ

K měření bylo potřeba především zkušební zařízení vhodné pro provádění zkoušky TSRST, měření bylo provedeno na zkušebním zařízení pro stanovení nízkoteplotních vlastností CYKLON – 40. Součástí zařízení byla i temperovací komora, která dovolovala postupné snižování teploty. Dále byly použity čelisti pro nalepení vzorku, lepidlo a centrovací rám.

POSTUP ZKOUŠKY

Před samotnou zkouškou bylo potřeba si připravit zkušební tělesa. Ty jsem nařezal pomocí diamantové pily z již vyrobených desek, které byly připraveny dle kapitoly 4.2.4 *Příprava zkušební těles zhutňovačem desek*. Z jedné desky vzniklo 5 zkušebních těles, přičemž na třech tělesech byla zkouška prováděna a dvě byla náhradní. Rozměry zkušebních těles byly 50 x 50 x 200 mm.

Připravené vzorky jsem nalepil na čelisti pomocí lepidla z epoxidové pryskyřice. Při této zkoušce je důležité přesné vycentrování vzorků, čehož bylo dosaženo pomocí centrovacího rámu. Takto nalepený vzorek jsem nechal 24 hodin v rámu, aby došlo k vytvrzení lepidla.



Obr. 15: Zkušební těleso pro stanovení nízkoteplotních vlastností

Zkušební těleso jsem poté upevnil do zkušebního zařízení pomocí čelistí, které se připojily k zatěžovacímu zařízení. Do programu jsem zadal rozměry tělesa a nastavil nulovou polohu upevněných snímačů. Před samotným zahájením zkoušky se těleso nechalo tzv. kondicionovat při počáteční teplotě T_0 a to po dobu 15 minut, aby se vyrovnala tepelná deformace. Poté se začala konstantně snižovat teplota rychlostí 10 °C/hod. Kvůli pevnému upevnění tělesa docházelo k omezování smršťování a k nárůstu kryogenního napětí až do porušení tělesa.

Výstupem zkoušky je protokol, kde je uvedena především teplota vzorku při porušení $T_{failure}$ v °C, napětí při porušení $\sigma_{cry, failure}$ v MPa, síla při porušení $F_{cry, failure}$ v kN, počáteční teplota T_0 (°C) a rychlost řízení teploty dT . Součástí protokolu je také graf vyjadřující závislost mezi kryogenním napětím či silou a teplotou T . Za výsledek se považuje průměr ze tří měření na jedné asfaltové směsi.



Obr. 16: Vpravo: Upevnění zkušebního tělesa, vlevo: Porušené těleso po zkoušce

4.3.5 STANOVENÍ MODULŮ TUHOSTI

Poslední zkouškou, kterou jsem prováděl, byla zkouška pro zjištění modulů tuhosti asfaltové směsi. Její postup je popsán v normě ČSN 12697-26 Asfaltové směsi – zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 26:Tuhost. Zkoušky se provádí na zhutněném asfaltovém materiálu při vynuceném ustáleném harmonickém zatížení. Norma popisuje různé zkušební postupy alternativních zkoušek při použití různých typů zkušebních těles a podpor, ale nepředepisuje použití konkrétního zkušebního zařízení. Měření modulů tuhosti bylo provedeno pomocí zkoušky ohybem na vetknutém komolém klínku (2PB-TR), podle Přílohy A normy ČSN 12697-26. [21]

POMŮCKY A ZAŘÍZENÍ

Ke zkoušce bylo potřeba zkušební zařízení, které umožňuje vyvinout sinusový dynamický průhyb na vrcholu zkušebního tělesa (použité frekvence 5 Hz – 25 Hz) a dále termostatická odvětrávací komora, ve které bylo možné ustálit okolní teplotu na předepsanou hodnotu po celou dobu zkoušky. Měřicí zařízení muselo obsahovat

snímače pro měření dynamické síly, průhybu a fázového úhlu. Dále byly potřeba kovové podkladní destičky, háček, lepidlo, váhy s přesností 0,1 g a posuvné měřítko.



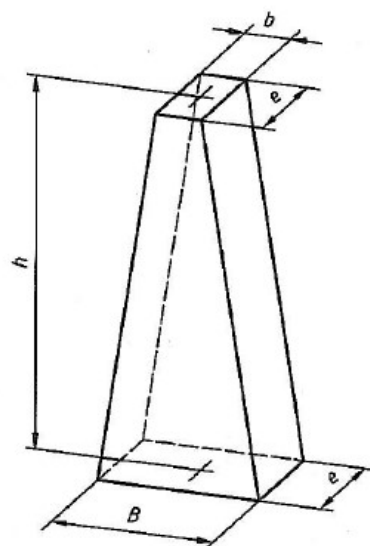
Obr. 17: Vlevo: zařízení vyvolující dynamický pohyb, vpravo: vzorek upevněný v termostatické komoře

POSTUP ZKOUŠKY

Nejdříve jsem připravil zkušební tělesa. Ta mají předepsané rozměry a nařezal jsem je ze zkušebních desek, jejichž výroba je popsána v kapitole 4.3.5 Příprava zkušební těles zhutňovačem desek, pomocí diamantového kotouče. Z každé desky jsem tímto způsobem vyrobil 5 zkušebních těles, ze tří desek celkem 15 těles.

Rozměr	[mm]
h	250
b	25
B	70
e	50

Tab. 4: Rozměry těles pro stanovení modulů tuhosti



Obr. 18: Rozměry tělesa pro stanovení modulu tuhosti

Přesné rozměry zkušebních těles jsem změřil pomocí posuvného měřítka a včetně jejich hmotností zapsal. Rozměry a hmotnosti zkušebních těles jsou uvedeny v Příloze D. Na tělesa jsem poté nalepil na kovovou podložku pomocí lepidla z epoxidové pryskyřice. Na horní část zkušebního tělesa jsem stejným způsobem nalepil háček, jehož pomocí bude těleso upevněno ve zkušebním zařízení. Takto se těleso muselo nechat po dobu 24 hodin, aby došlo k dokonalému vytvrdnutí lepidla.



Obr. 19: Sada zkušebních těles pro stanovení modulů tuhosti

Zkoušku jsem postupně prováděl při teplotách +15 °C a +40 °C, tělesa i zkušební komoru bylo tedy vždy nutné na tuto teplotu vytemperovat a to po dobu nejméně 4 hodin. Do programu měření se jsem zadal rozměry tělesa a jeho hmotnost a poté jsem zkušební těleso upevnil ve zkušebním zařízení. Upevnění tělesa probíhalo pomocí kovových destiček, podkladní desky a šroubů tak, aby jeho spodní část byla vetknuta do podkladu. Háček na horní straně zkušebního tělesa jsem upevnil ke zkušebnímu zařízení. Poté mohlo být zahájeno vyvíjení harmonické sinusové síly na horní část tělesa.

Jedná se o zkoušku nedestruktivní, nesmí tedy dojít k poškození tělesa či jeho vytržení z lepidla. Těleso se postupně zatěžovalo harmonickou silou o frekvencích 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz a znovu 5 Hz kvůli kontrole správnosti měření.

Modul tuhosti se skládá ze dvou složek, reálné a imaginární, které lze spočítat z rovnic:

$$E_1 = \gamma \times \left(\frac{F}{z} \cos(\Phi) + \frac{\mu}{10^3} \times \omega^2 \right)$$

Rovnice 7: Výpočet reálné složky modulu tuhosti

$$E_2 = \gamma \times \left(\frac{F}{z} \sin(\Phi) \right)$$

Rovnice 8: Výpočet imaginární složky modulu tuhosti

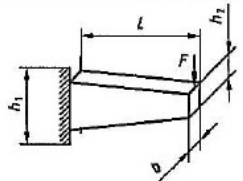
- F je vyvozená síla
- z je posun
- Φ je fázový úhel
- γ je faktor tvaru jako funkce velikosti a tvaru zkušební tělesa
- μ je faktor hmotnosti, který je funkcí hmotnosti zkušební tělesa

Modul tuhosti je potom jejich součtem.

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}$$

Rovnice 9: Výpočet modulu tuhosti

Hodnoty γ a μ závisí na tvaru zkušební tělesa a způsobu upevnění. Pro měřicí metodu, která byla použita v rámci bakalářské práce, je můžeme spočítat podle tabulky:

Druh zatěžování	Faktor tvaru, γ L^{-1}	Faktor hmotnosti, μ
2PB-TR 	$\frac{12L^3}{b(h_1 - h_2)^3} \left[\left(2 - \frac{h_2}{2h_1} \right) \frac{h_2}{h_1} - \frac{3}{2} - \ln \frac{h_2}{h_1} \right]$	$0,135 M + m^a)$

Tab. 5: Výpočet tvaru a hmotnosti [21]

4.4 VÝSLEDKY

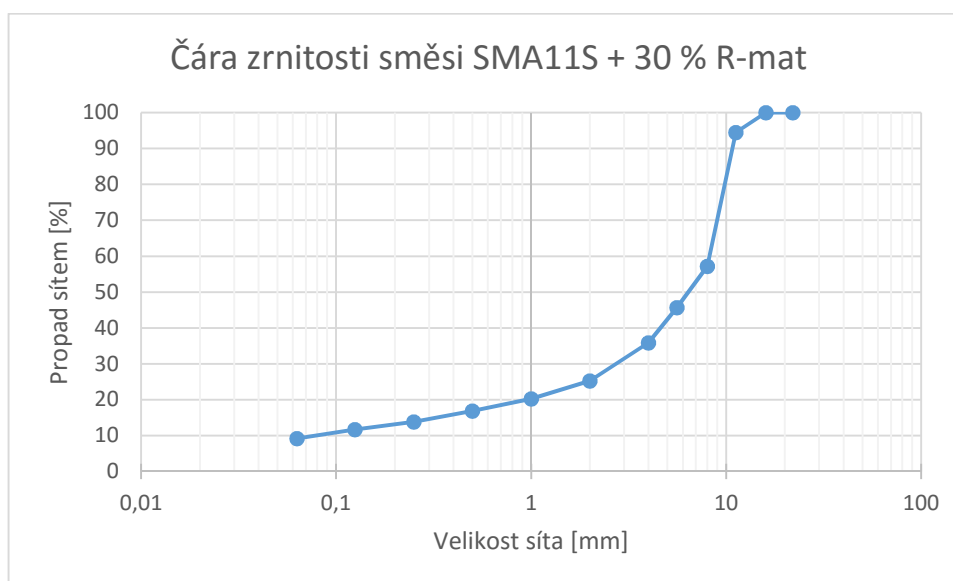
4.4.1 NÁVRH SMĚSI

Před samotnou laboratorní výrobou směsi jsem ověřil stanovený návrh. Směs měla následující složení:

Suché složky		Tekuté složky	
frakce	podíly v %		podíly v %
moučka	7,5	Asfaltové pojivo celkem	6,5
0-2	3,0	Colflex 45/80 – 55	4,9
2-5	8,0	Pojivo obsažené v R-mat (5,2%)	1,6
4-8	9	Addibit L300	0,2 % hm. pojiva
8-11	42,5	Storfux	0,27 % hm. R-mat
R-mat	30		
S-CEL 7G	0,3		

Tab. 6: Procentuální zastoupení jednotlivých složek směsi

Čára zrnitosti směsi je zobrazena v grafu níže:



Graf 3: Čára zrnitosti navržené směsi

Z uvedeného procentuálního množství jednotlivých složek asfaltové směsi jsem vytvořil navážku na tři Marshallova tělesa, které jsem vyrobil pomocí rázového zhutňovače dle kapitoly 4.2.3 *Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem*.

Dále bylo nutné stanovit maximální objemovou hmotnost a mezerovitost směsi, abych ověřil správnost návrhu. Způsob stanovení maximální objemové hmotnosti je

popsán v kapitole 4.3.1 *Stanovení maximální objemové hmotnosti směsi*, mezerovitost jsem poté zjistil z Marshallových těles, postup stanovení mezerovitosti je popsán v kapitole 4.3.2 *Stanovení objemové hmotnosti a mezerovitosti*.

V následujících tabulkách jsou uvedeny hodnoty maximální objemové hmotnosti směsi, mezerovitosti a objemové hmotnosti stanovené měřením na Marshallových tělesech a pomocí pyknometrů.

Maximální objem. hmotnost ρ_{mv}	kg/m ³	2544,0			
Zkušební těleso označení		0.	I.	II.	Průměr
Hmotnost, suchá	g	1251,7	1273,3	1271,7	1271,7
Hmotnost, pod vodou	g	743,0	755,7	757,0	757,0
Hmotnost, vlhká	g	1253,1	1274,6	1273,1	1273,1
Objemová hmotnost $\rho_{(bssd)}$	kg/m ³	2448,6	2448,7	2458,8	2452,0
Mezerovitost	%	3,7	3,7	3,3	3,6

Tab. 7: Maximální objemová hmotnost, objemová hmotnost a mezerovitost směsi

Předepsaná mezerovitost, které má asfaltová směs SMA 11S dosahovat je dle ČSN EN 13108-5 v rozmezí 3,0 % – 4,5 %. Navržená směs tuto podmínku splňuje a lze s ní dále pracovat.

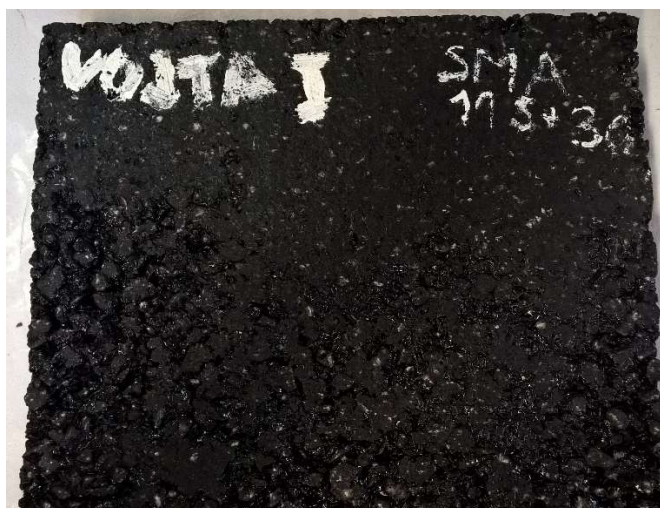
4.4.2 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

Po ověření návrhu směsi jsem přešel k výrobě zkušebních těles. Celkem jsem provedl tři funkční zkoušky, ke kterým bylo nutné vyrobit zkušební desky podle kapitoly 4.2.4 *Příprava těles zhutňovačem desek*. Vyrobil jsem dvě desky pro zkoušku pojíždění kolem v tloušťce 40 mm, tři desky v tloušťce 50 mm pro zhotovení zkušebních těles pro stanovení modulů tuhosti a jednu desku v tloušťce 50 mm pro zhotovení zkušebních těles pro stanovení nízkoteplotních vlastností. Celkem tedy 6 desek, u nichž jsem kontroloval především míru zhutnění a mezerovitost. Míra zhutnění se musí pohybovat od 99,0 do 101,0 % a mezerovitost od 3,0 % do 4,5 %.

V následující tabulce jsou uvedeny parametry míry zhutnění, mezerovitosti a objemové hmotnosti desek, které byly při zkouškách použity, podrobnější popis a kompletní seznam zhotovených desek je uveden v Příloze B.

SMA 11S + 30 % R-materiálu					
Deska	Tloušťka	Míra zhutnění	Mezerovitost	Obj. hmot.	Účel
#	[mm]	[%]	[%]	[mm]	[mm]
1.0	40	100,6	3,0	2466,6	Pojezd kolem
2.0	40	100,5	3,2	2463,6	Pojezd kolem
3.0	50	100,5	3,2	2463,2	Cyklon
4.0	50	100,5	3,1	2465,0	Moduly tuhosti
5.0	50	100,7	3,0	2468,9	Moduly tuhosti
6.0	50	100,7	3,0	2468,7	Moduly tuhosti
7.0	40	100,7	2,9	2469,3	(Pojezd kolem)

Tab. 8: Parametry vyrobených desek



Obr. 20: Vyrobená deska

4.4.3 STANOVENÍ ODOLNOSTI PROTI TRVALÝM DEFORMACÍM

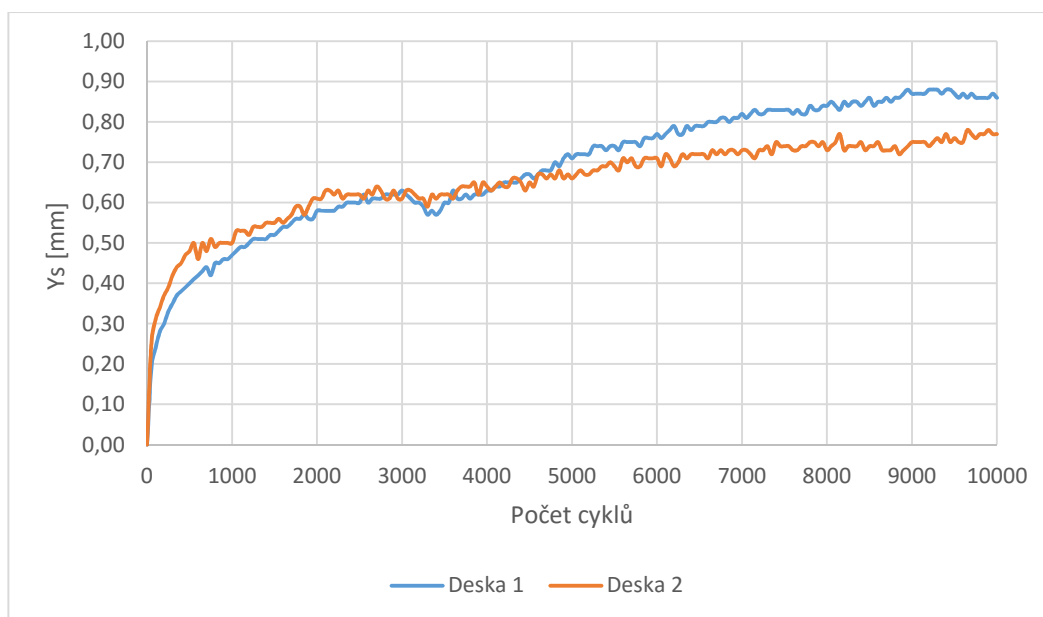
První funkční zkouškou na zkušebních tělesech, kterou jsem provedl, byla zkouška odolnosti proti trvalým deformacím neboli zkouška poježdění kolem. Její postup je popsán v kapitole 4.3.3 *Stanovení odolnosti proti trvalým deformacím*. Zkoušku jsem provedl na 1.0 a 2.0 tloušťky 40 mm. Celá zkouška probíhala při 50 °C a desky byly na tuto teplotu také temperovány. Z naměřených hodnot jsem zjistil hloubku vyjeté koleje po 10 000 cyklech $Y_{S,10}$ a vypočítal průměrnou poměrnou hloubku vyjeté koleje $PRDAIR$ a poměrný přírůstek hloubky vyjeté koleje WTS_{AIR} . Pro SMA 11S je maximální hodnota $PRDAIR$ dle normy 5,0 % a maximální hodnota WTS_{AIR} je 0,07 mm/1000 cyklů.

NAMĚŘENÉ HODNOTY

Naměřené a vypočítané hodnoty jsou zobrazeny v tabulce a grafu níže:

SMA 11S, teplota zkoušení +50°C							
Deska	Tloušťka	$Y_{S,10000}$	$Y_{S,5000}$	$PRDAIR,i$	$PRDAIR$	$WTS_{AIR,i}$	$WTS_{AIR,i}$
#	[mm]	[mm]	[mm]	[%]	[%]	[mm/10 ³]	[mm/10 ³]
1.0	39,87	0,86	0,71	2,2	2,0	0,03	0,03
2.0	40,48	0,77	0,66	1,9		0,02	

Tab. 9: Naměřené hodnoty ze zkoušky poježdění kolem



Graf 4: Naměřené hodnoty ze zkoušky poježdění kolem



Obr. 21: Zařízení pro zkoušku pojíždění kolem



Obr. 22: Obě desky v zařízení pro pojezd kolem



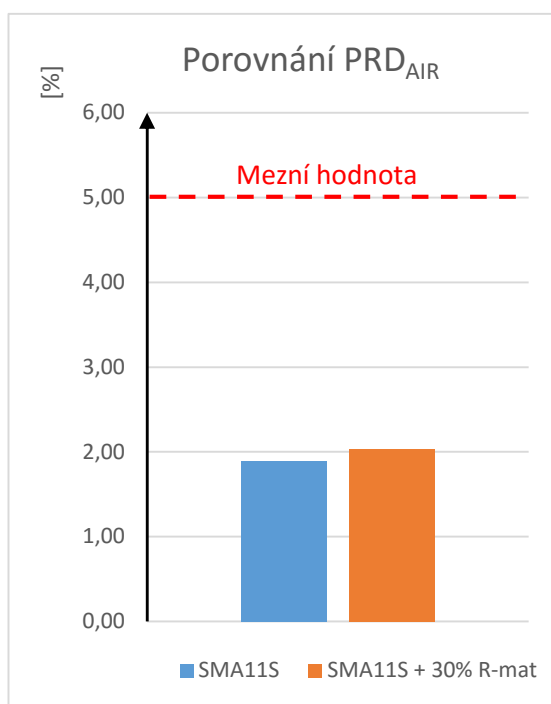
Obr. 23: Deska po zkoušce pojíždění kolem

VYHODNOCENÍ A POROVNÁNÍ

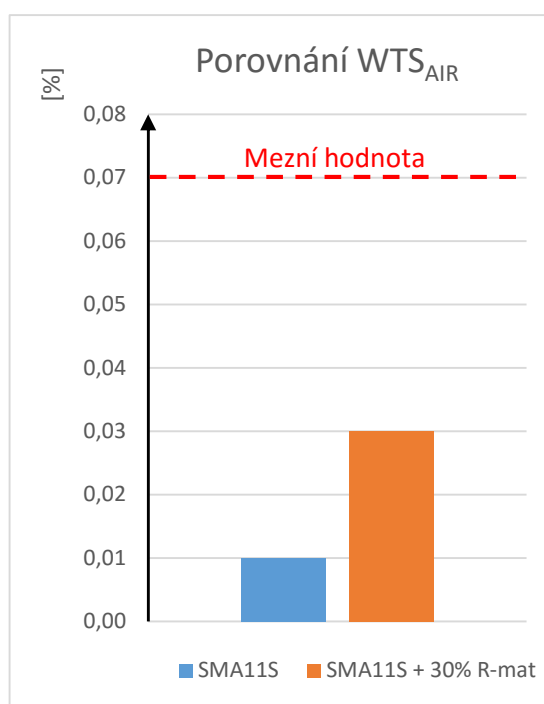
V tabulce a grafu níže jsou porovnány hodnoty ze zkoušky pojezdů kolem pro směs bez R-materiálu a pro směs s obsahem 30 % R-materiálu:

SMA 11S, teplota zkoušení +50°C				
R-materiál	PRD _{AIR}	Max PRD _{AIR}	WTS _{AIR}	Max WTS _{AIR}
[%]	[%]	[%]	[mm/10 ³]	[mm/10 ³]
0	1,89	5,0	0,01	0,07
30	2,04		0,03	

Tab. 10: Porovnání výsledků ze zkoušky pojezdění kolem [15]



Graf 6: Porovnání výsledků PRD_{AIR} [15]



Graf 5: Porovnání výsledků WTS_{AIR} [15]

Z tabulky a grafů výše je zřejmé, že posuzovaná směs splňuje normou dané požadavky. Co se týče PRD_{AIR} (Poměrná hloubka vyjeté koleje), tak se tato hodnota v porovnání se směsí s 0 % R-materiálu liší pouze o 0,15 %. V případě veličiny WTS_{AIR} (Přírůstek hloubky vyjeté koleje) se hodnota liší více, nicméně stále je s přehledem splněn normou daný požadavek 0,07 %.

Nepatrně vyšší hodnotu vyjetí koleje u směsi si lze vysvětlit použitím rejuvenátoru, který směs změkčil. Avšak jak již bylo zmíněno, vliv přidaného R-materiálu je malý.

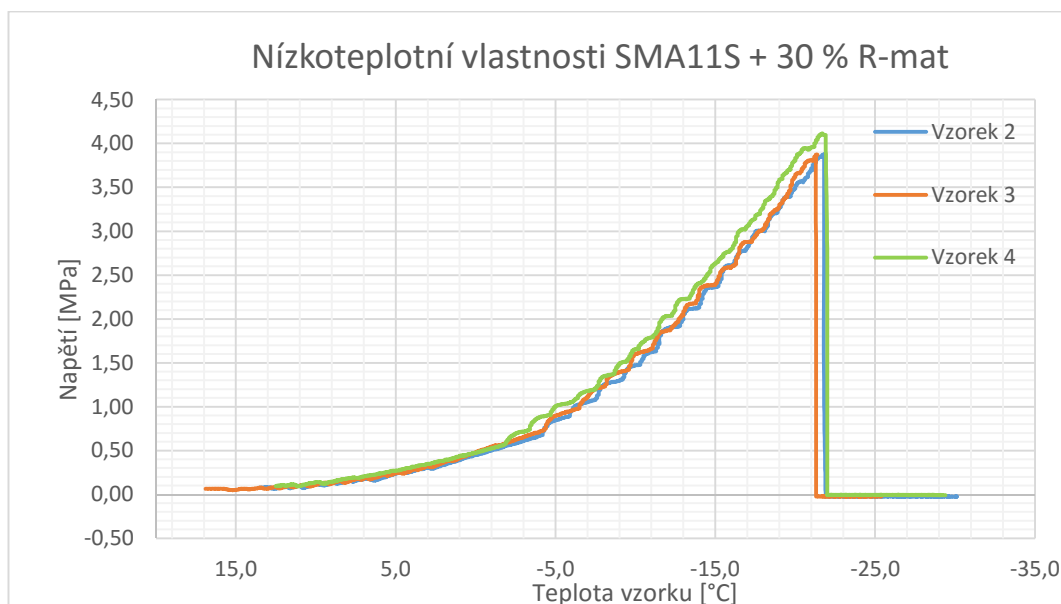
4.4.4 STANOVENÍ NÍZKOTEPLTNÍCH VLASTNOSTÍ

Stanovení nízkoteplotních vlastností asfaltových směsí jsem prováděl podle postupu popsaném v kapitole 4.3.4 *Stanovení nízkoteplotních vlastností*, kde je popsána i podstata zkoušky. Zkoušku jsem provedl na třech vzorcích o rozměrech 50 x 50 x 200 mm zhotovených nařezáním vyrobené zkušební desky 3.0 o tloušťce 50 mm. Každé těleso bylo temperováno po dobu 15 min při teplotě 10 °C a následný pokles teploty byl 10 °C/ hod. až do porušení vzorku vlivem tahového napětí. Důležitými parametry, které se zjišťují při stanovování nízkoteplotních vlastností, jsou maximální síla při porušení vzorku, ze které získáme maximální napětí při porušení, dále teplota v komoře při porušení a především teplota vzorku při porušení.

NAMĚŘENÉ HODNOTY

SMA 11S + 30 % R-mat				
Zkušební vzorek	2	3	4	Průměr
Max. síla při porušení [kN]	9,85	9,85	10,53	10,08
Max. napětí při porušení [MPa]	3,88	3,87	4,11	3,95
Teplota v komoře při porušení [°C]	-25,9	-25,1	-26,0	26,67
Teplota vzorku při porušení [°C]	-21,8	-21,3	-21,7	21,6

Tab. 11: Stanovení nízkoteplotních vlastností směsi



Graf 7: Nízkoteplotní vlastnosti směsi

VYHODNOCENÍ A POROVNÁNÍ

Druh asfaltové směsi	Obsah R-materiálu	
	0 %	30 %
Max. síla při porušení [kN]	9,04	10,08
Max. napětí při porušení [MPa]	3,62	3,95
Teplota v komoře při porušení [°C]	-27,30	-26,67
Teplota vzorku při porušení [°C]	-22,93	-21,6

Tab. 12: Porovnání nízkoteplotních vlastností směsí [15]

Z tabulky výše vyplývá, že maximální napětí při porušení se s množstvím přidaného R-materiálu výrazně nemění a zkoumaná směs se zastoupením 30 % R-materiálu dokonce snesla vyšší napětí než SMA 11S.

O něco větší rozdíl se objevuje u teploty vzorku při porušení, kdy rozdíl teplot porušení pro směs s R-materiálem a čistou SMA 11S byl 1,3°C ve prospěch směsi bez R-materiálu. Avšak i tento rozdíl lze brát jako velmi malý.



Obr. 24: Porušený vzorek po zkoušce nízkoteplotních vlastností

4.4.5 STANOVENÍ MODULŮ TUHOSTI

Způsob měření modulů tuhosti je popsán v kapitole 4.3.5 *Stanovení modulu tuhosti*. Pro tuto zkoušku jsem vyrobil celkem 15 vzorků ve tvaru trapezoidu. Vzorky byly nařezány z desek 5.0 a 6.0. Všechny desky jsem nařezal pomocí diamantového kotouče dle požadovaných rozměrů a následně opatřil kovovými háčky a podkladními destičkami. Výsledné rozměry jsou uvedeny v příloze D.

Zkoušku jsem prováděl při referenční teplotě +15 °C a v extrémní teplotě +40 °C a frekvencích 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz a 25 Hz. Podrobně jsou naměřené hodnoty uvedeny v Příloze E.



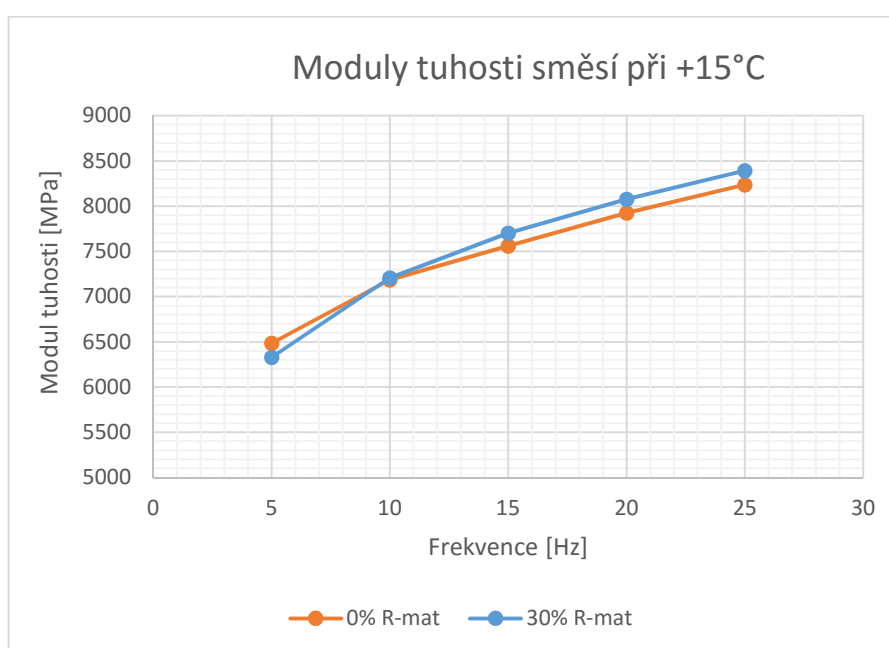
Obr. 25: Zkušební těleso pro stanovení modulu tuhosti

MĚŘENÍ PŘI TEPLOTĚ +15°C

V následujících tabulkách a grafech je zobrazeno porovnání modulů tuhosti směsi SMA 11S s 30 % R-materiálu se směsí SMA 11S při referenční teplotě +15 °C.

SMA 11S, teplota zkoušení +15°C					
Obsah R-materiálu	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz
0 %	6328	7207	7703	8075	8393
30 %	6485	7187	7561	7924	8237

Tab. 13: Souhrnné porovnání modulů tuhosti při +15°C [15]



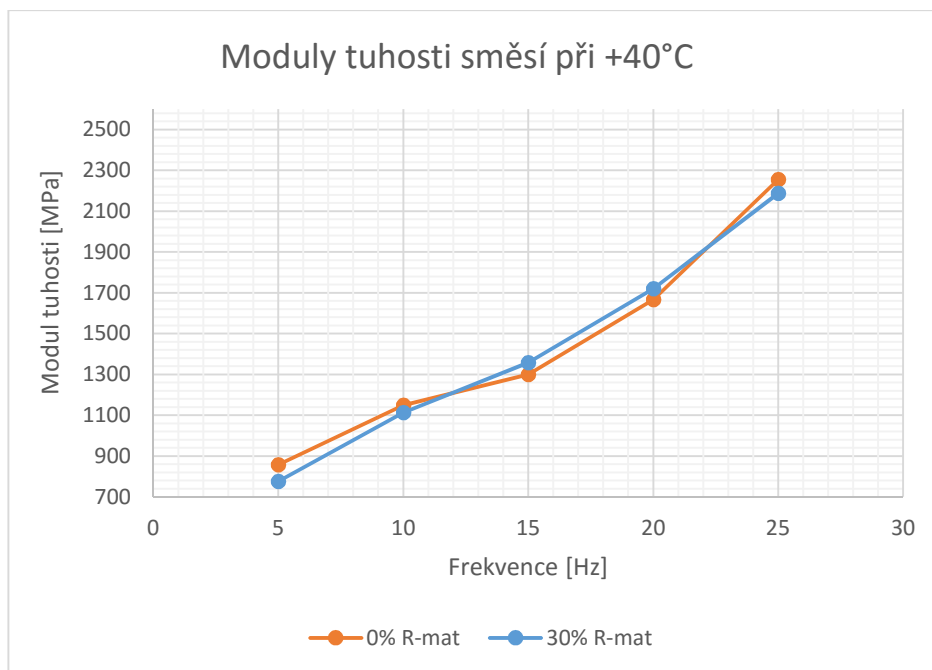
Graf 8: Souhrnné porovnání modulů tuhosti při +15 °C [15]

MĚŘENÍ PŘI TEPLOTĚ +40°C

V následujících tabulkách a grafech je zobrazeno porovnání modulů tuhosti směsi SMA 11S s 30 % R-materiálu se směsí SMA11S při extrémní teplotě +40 °C

SMA 11S, teplota zkoušení +40°C					
Obsah R-materiálu	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz
0 %	776	1113	1358	1720	2187
30 %	858	1149	1300	1667	2255

Tab. 14: Souhrnné porovnání modulů tuhosti při +40 °C [15]



Graf 9: Souhrnné porovnání modulů tuhosti při +40 °C [15]

VYHODNOCENÍ

Z naměřených hodnot vyplývá, že modul tuhosti asfaltové směsi velmi závisí na teplotě, kdy s rostoucí teplotou modul tuhosti prudce klesá. Dále je zřejmé, že modul tuhosti závisí na frekvenci zatížení, kdy naopak s rostoucí frekvencí zatížení modul tuhosti stoupá.

Z průběhu modulu tuhosti pro směs s 0 % R-materiálu a směs s 30% přídavkem R-materiálu nejsou patrné velké odchylky a tuhosti jsou podobné. To znamená, že rejuvenátor, který měl oživit zestárlé a tuhé pojivo v R-materiálu, zapůsobil dobře. Mírně vyšší tuhost směsi s R-materiálem také mohla být způsobena vyšší mírou zhutnění. Lze tedy říci, že přítomnost R-materiálu nijak výrazně neovlivnila modul tuhosti směsi.

5. ZÁVĚR BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem bakalářské práce bylo zpracovat problematiku využití R-materiálu v asfaltových směsích pro obrusné vrstvy vozovek, konkrétně SMA 11S. V teoretické části jsem vysvětlil, co je R-materiál, popsal jsem způsoby jeho získávání a následné uplatnění při recyklaci za horka v obalovně. V praktické části jsem se zabýval návrhem směsi s obsahem 30 % R-materiálu, přípravou zkušebních těles a popisem provedených zkoušek. Dále jsem zkoušky vyhodnotil a porovnal s SMA 11S bez R-materiálu. Zdrojem výsledků směsi bez R-materiálu byla diplomová práce Ing. Markéty Malé [15].

V rámci bakalářské práce jsem vyrobil směs SMA 11S s 30 % R-materiálu, kterou jsem následně ověřil na mezerovitost, a poté vyrobil zkušební tělesa pro celkem tři funkční zkoušky asfaltové směsi – odolnost proti trvalým deformacím, stanovení nízkoteplotních vlastností a stanovení modulů tuhosti.

Zkoušku odolnosti proti trvalým deformacím (pojíždění kolem) jsem provedl na dvou deskách. Směs s 30 % R-materiálu dopadla nepatrně hůře než směs bez R-materiálu, avšak normou dané požadavky byly s přehledem splněny.

Zkoušku stanovení nízkoteplotních vlastností jsem provedl na třech tělesech. Směs s 30 % R-materiálu snesla o něco vyšší kryogenní napětí než směs bez R-materiálu, na druhou stranu nesnesla tak vysokou minusovou teplotu. Nicméně i v tomto případě byl rozdíl mezi výsledky velmi malý.

Třetí zkoušku, stanovení modulů tuhosti, jsem provedl na 15 zkušebních tělesech. Zkoušku jsem prováděl při dvou teplotách, 15 °C a 40 °C, a pěti různých frekvencích – 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz a 25 Hz. I v této poslední zkoušce byly výsledky podobné a lze předpokládat, že rejuvenátor v R-materiálu zafungoval dobře.

Závěrem lze říci, že směs s R-materiálem dosahovala ve funkčních zkouškách velmi podobných výsledků jako směs SMA bez R-materiálu. Směs také splnila všechny požadavky příslušných norem.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] VALENTIN, Jan, Recyklace asfaltových vozovek, Prezentace Katedry silničních staveb, ČVUT, FSv Praha 2012
- [2] KRČMOVÁ, Iva, HÝZL, Petr, VARAUS, Michal, NEKULOVÁ Pavla Přidávání R – materiálu do asfaltových směsí, Vysoké učení technické, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací, 2015
- [3] TP 210, Užití recyklovaných stavebních demoličních materiálů do pozemních komunikací, MINISTERSTVO DOPRAVY ČR – OSI, 2010
- [4] Oficiální web obce Dolní Březany, [online] [cit. 2016-05-26]
Dostupné na: <http://dolnibrezany.cz/zahajeni-praci-prelozka-ulice-5-kvetna/d-6383>
- [5] Web asphalt.cz, Řezání a bourání asfaltových povrchů [online] [cit. 2016-05-26]
Dostupné na: <http://www.asphalt.cz/rezani-a-bourani-asfaltovych-povrchu>
- [6] VARAUS, Michal. Recyklace netuhých vozovek [prezentace]. 2012, 61 s.
[cit. 2016-05-25]
- [7] Učební texty předmětu BM02
- [8] Wirtgen ČR, Výroba asfaltu, [online] ©2016 [cit. 2016-05-26]
Dostupné na: <http://www.wirtgen.cz/cs/technologies/asphalt-production/>
- [9] HÝZL, Petr: Praktické aplikace v pozemních komunikacích, Modul 6 – Asfaltové směsi, studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia, VUT Brno 2006
- [10] Stone mastic asphalt, [online] [cit. 2016-05-26] Dostupné na:
http://www.seminaronly.com/Civil_Engineering/Stone_Mastic_Aphalt.php
- [11] Bc. Pavel Šperka *Vliv použití R - materiálu na funkční vlastnosti asfaltových směsí*. Brno, 2015. 117 s., 35 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Petr Hýzl, Ph.D.
- [12] MONDSCHHEIN, P., Recyklace za horka v asfaltových směsích – aplikace ve směsích typu SMA, [online] [cit. 2016-05-25] Dostupné na:
http://www.udrzitelnavystavba.cz/WP3_papers/19_Mondschein.pdf

- [13] ČSN EN 13108 – 5: Asfaltové směsi – Specifikace pro materiály - Část 5: Asfaltový koberec mastixový
- [14] CIUR a.s., Průmyslová vlákna – S-CEL 7 G [online] ©2015 [cit. 2015-8-12]. Dostupné na <http://www.ciur.cz/clanek/zobrazit/prumyslova-vlakna-s-cel-7-g>
- [15] Bc. Markéta Malá Využití R-materiálu v krytových vrstvách vozovek. Brno, 2015. 122 s., 38 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Petr Hýzl, Ph.D.
- [16] ČSN EN 12697-28 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 28: Příprava vzorků pro stanovení obsahu pojiva, obsahu vody a zrnitosti
- [17] ČSN EN 12697-35+A1 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 35: Laboratorní výroba směsi
- [18] ČSN 1297-5+A1 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti
- [19] ČSN EN 12697-30+A1: Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem
- [20] ČSN EN 12697-33+A1 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 33: Příprava zkušebních těles zhutňovačem desek
- [21] ČSN 12697-26 Asfaltové směsi – zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 26: Tuhost
- [22] ČSN EN 12697-46 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 46: Nízkoteplotní vlastnosti a tvorba trhlin pomocí jednoosé zkoušky tahem
- [23] ČSN EN 12697-22+A1 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 22: Zkouška poježdění kolem

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1: Frézování vozovky [4]</i>	12
<i>Obr. 2: Bourání vozovky [5]</i>	12
<i>Obr. 3: Šaržová obalovna s paralelním bubnem [7]</i>	14
<i>Obr. 4: Princip metody Drum-mix [6]</i>	14
<i>Obr. 5: Složení směsi SMA [10]</i>	15
<i>Obr. 6: R-materiál frakce 0/11</i>	19
<i>Obr. 7: Celulózný granulát</i>	22
<i>Obr. 8: Provádění kvartace</i>	24
<i>Obr. 9: Laboratorní míchačka</i>	25
<i>Obr. 10 Rázový zhutňovač</i>	27
<i>Obr. 11 Chlazení těles a výtlačné zařízení</i>	27
<i>Obr. 12 Marshallova tělesa</i>	27
<i>Obr. 13: Lamelový zhutňovač</i>	28
<i>Obr. 14: Pyknometry</i>	31
<i>Obr. 15: Zkušební těleso pro stanovení nízkoteplotních vlastností</i>	37
<i>Obr. 16: Vpravo: Upevnění zkušebního tělesa, vlevo: Porušené těleso po zkoušce</i>	38
<i>Obr. 17: Vlevo: zařízení vyvolující dynamický pohyb, vpravo: vzorek upevněný v termostatické komoře</i>	39
<i>Obr. 18: Rozměry tělesa pro stanovení modulu tuhosti</i>	39
<i>Obr. 19: Sada zkušebních těles pro stanovení modulů tuhosti</i>	40
<i>Obr. 20: Vyrobena deska</i>	44
<i>Obr. 21: Zařízení pro zkoušku pojíždění kolem</i>	46
<i>Obr. 22: Obě desky v zařízení pro pojezd kolem</i>	46
<i>Obr. 23: Deska po zkoušce pojíždění kolem</i>	46
<i>Obr. 24: Porušený vzorek po zkoušce nízkoteplotních vlastností</i>	49
<i>Obr. 25: Zkušební těleso pro stanovení modulu tuhosti</i>	50

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1: Sítový rozbor frakcí kameniva v %. Zdroj [15]</i>	18
<i>Tab. 2: Sítový rozbor vápencové moučky v %. Zdroj [15]</i>	18
<i>Tab. 3: Sítový rozbor R-materiálu v %. Zdroj [15]</i>	18
<i>Tab. 4: Rozměry těles pro stanovení modulů tuhosti</i>	39
<i>Tab. 5: Výpočet tvaru a hmotnosti [21]</i>	41
<i>Tab. 6: Procentuální zastoupení jednotlivých složek směsi</i>	42
<i>Tab. 7: Maximální objemová hmotnost, objemová hmotnost a mezerovitost směsi</i>	43
<i>Tab. 8: Parametry vyrobených desek</i>	44
<i>Tab. 9: Naměřené hodnoty ze zkoušky pojíždění kolem</i>	45
<i>Tab. 10: Porovnání výsledků ze zkoušky pojíždění kolem [15]</i>	47
<i>Tab. 11: Stanovení nízkoteplotních vlastností směsi</i>	48
<i>Tab. 12: Porovnání nízkoteplotních vlastností směsí [15]</i>	49
<i>Tab. 13: Souhrnné porovnání modulů tuhosti při +15°C [15]</i>	51
<i>Tab. 14: Souhrnné porovnání modulů tuhosti při +40 °C [15]</i>	51

SEZNAM GRAFŮ

<i>Graf 1: Porovnání čar zrnitosti ACO a SMA</i>	15
<i>Graf 2: Čára zrnitosti R-materiálu</i>	19
<i>Graf 3: Čára zrnitosti navržené směsi</i>	42
<i>Graf 4: Naměřené hodnoty ze zkoušky pojíždění kolem</i>	45
<i>Graf 5: Porovnání výsledků WTS_{AIR} [15]</i>	47
<i>Graf 6: Porovnání výsledků PRD_{AIR} [15]</i>	47
<i>Graf 7: Nízkoteplotní vlastnosti směsi</i>	48
<i>Graf 8: Souhrnné porovnání modulů tuhosti při +15 °C [15]</i>	51
<i>Graf 9: Souhrnné porovnání modulů tuhosti při +40 °C [15]</i>	52

SEZNAM ROVNIC

<i>Rovnice 1: Výpočet dávkování rejuvenátoru</i>	21
<i>Rovnice 2: Stanovení maximální objemové hmotnosti</i>	32
<i>Rovnice 3: Stanovení objemové hmotnosti zkušebního tělesa</i>	33
<i>Rovnice 4: Stanovení mezerovitosti tělesa</i>	34
<i>Rovnice 5: Stanovení poměrné hloubky vyjeté koleje</i>	35
<i>Rovnice 6: Stanovení přírůstku hloubky vyjeté koleje</i>	36
<i>Rovnice 7: Výpočet reálné složky modulu tuhosti</i>	41
<i>Rovnice 8: Výpočet imaginární složky modulu tuhosti</i>	41
<i>Rovnice 9: Výpočet modulu tuhosti</i>	41

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Φ	průměr
°C	stupně Celsia
AC	asfaltový beton
g	gram
Hz	Hertz
kg/m ³	kilogram na metr krychlový
kPa	kilopascal
MPa	megapascal
max.	maximálně
min.	minimálně
mm	milimetr
Obr.	obrázek
PRD _{AIR}	poměrná hloubka vyjeté koleje
R-mat	R-materiál
Tab.	tabulka
SMA 11S	asfaltový koberec mastixový s maximální velikostí kameniva 11 mm a se zvýšenou odolností proti tvorbě trvalých deformací
WTS _{AIR}	přírůstek hloubky poměrné koleje

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A

- Stanovení maximální objemové hmotnosti asfaltové směsi
- Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa
- Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí

Příloha B

- Rozměry, objemová hmotnost a mezerovitost zkušebních desek

Příloha C

- Odolnost proti trvalým deformacím – zkouška poježdění kolem

Příloha D

- Rozměry zkušebních těles pro stanovení modulů tuhosti

Příloha E

- Stanovení modulů tuhosti

Příloha F

- Nízkoteplotní vlastnosti

PŘÍLOHA A:

- Stanovení maximální objemové hmotnosti asfaltové směsi
- Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušební tělesa
- Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí

 Druh asfaltové směsi: **SMA 11S + 30 % R-materiálu**

Zkoušeno: 20.3.2016

Označení vzorku		II.
Množství pojiva	%	6,5
Označení pyknometru		VI.
Pyknometr prázdný m_1	g	700,4
Pyknometr+vzorek m_2	g	1763,2
Pyknometr+vzorek+voda (rozp.) m_3	g	3062,5
Objem pyknometru V_p	m^3	1312,005
Hustota rozpouštědla ρ_w	kg/m^3	1453
Teplota temperace	$^{\circ}C$	25
Navážka asf.směsi	g	1062,8
Maximální objemová hmotnost ρ_{mv}	kg/m^3	2 544

Teplota hutnění	$^{\circ}C$	165
Počet úderů		2 x 50

Zkušební těleso označení		0.	I.	II.	Průměr
Hmotnost, suchá	g	1251,7	1273,3	1271,7	1271,7
Hmotnost, pod vodou	g	743,0	755,7	757,0	757,0
Hmotnost, vlhká	g	1253,1	1274,6	1273,1	1273,1
Objemová hmotnost $\rho_{(bssd)}$	kg/m^3	2448,6	2448,7	2458,8	2452,0
Mezerovitost	%	3,7	3,7	3,3	3,6

Zkušební těleso		0.	I.	II.	Průměr
Výška	mm	65,40	66,4	65,10	
		65,34	66,42	65,00	
		35,20	66,8	64,86	
Průměrná výška	mm	55,31	66,54	64,99	62,28
Průměr	mm	101,60	101,60	102,06	
		102,30	101,64	102,06	
		101,94	101,74	102,20	
Průměrný průměr tělesa	mm	101,95	101,66	102,11	101,90

PŘÍLOHA B:

- Rozměry, objemová hmotnost a mezerovitost zkušebních desek

SMA 11S + 30 % R-materiálu								
	[%]	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0
Hmotnost suchá	[g]	7978	7994	10048	10021	10010	9999	7999
Hmotnost pod vodou	[g]	4766	4774	5992	5984	5975	5977	4785
Hmotnost po vytažení	[g]	7994	8012	10062	10041	10020	10018	8018
Rozměry (tloušťka)	[mm]	39,66	39,50	50,07	50,20	49,67	50,47	39,84
		39,77	39,83	49,96	49,90	49,50	50,32	39,90
		40,19	40,05	49,98	49,67	50,01	50,06	39,97
		40,03	40,26	50,55	49,36	50,33	50,00	40,00
		40,16	40,62	51,17	50,00	50,10	49,63	40,29
		39,82	41,19	50,11	49,56	49,86	49,30	39,97
		39,57	41,69	50,10	49,20	50,33	50,22	39,90
		39,57	41,08	50,68	49,73	50,71	49,92	39,89
		39,59	40,40	50,32	49,78	49,67	49,68	40,17
		40,30	40,20	49,99	49,90	50,05	50,19	41,07
Rozměry (šířka)	[mm]	261,20	261,10	261,32	261,10	261,00	261,16	261,10
		261,00	261,14	261,58	261,20	261,04	261,00	261,08
		261,20	261,02	261,60	261,00	261,20	261,00	261,10
Rozměry (délka)	[mm]	322,40	322,46	322,42	322,50	322,50	322,00	322,54
		322,20	323,00	322,80	322,60	322,80	322,56	322,80
		322,70	322,50	322,30	321,96	321,90	321,78	322,30
Tloušťka průměr	[mm]	39,87	40,48	50,29	49,73	50,02	49,98	40,10
Šířka průměr	[mm]	261,13	261,09	261,50	261,10	261,08	261,05	261,09
Délka průměr	[mm]	322,43	322,65	322,51	322,35	322,40	322,11	322,55
Objemová hmotnost (z vážení)	[kg/m ³]	2 466,6	2 463,6	2 463,2	2 465,0	2 468,9	2 468,7	2 469,3
Objemová hmotnost (rozměry)	[kg/m ³]	2 376,8	2 344,1	2 369,0	2 394,2	2 377,4	2 379,2	2 368,7
Maximální objem. hm. (z pyknometrů)	[kg/m ³]	2544,0	2544,0	2544,0	2544,0	2544,0	2544,0	2544,0
Mezerovitost (z vážení)	[%]	3,0	3,2	3,2	3,1	3,0	3,0	2,9
Mezerovitost (rozměry)	[%]	6,6	7,9	6,9	5,9	6,6	6,5	6,9
Míra zhutnění	[%]	100,6	100,5	100,5	100,5	100,7	100,7	100,7
Zkouška		pojezd kolem	pojezd kolem	cyklon	modul tuhosti	modul tuhosti	modul tuhosti	pojezd kolem

PŘÍLOHA C:

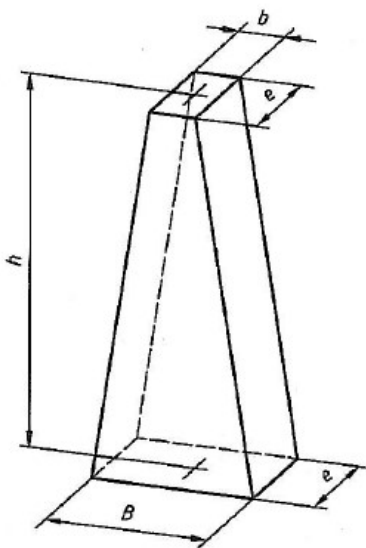
- Odolnost proti trvalým deformacím – zkouška poježdění kolem

SMA 11S, teplota zkoušení +50°C							
Deska 1.0	SMA 11S + 30 % R-materiálu						
Deska 2.0	SMA 11S + 30 % R-materiálu						
Teplota hutnění	155 °C						
Datum zkoušky	27.04.2016						
Deska	Tloušťka	Y _{s,10000}	Y _{s,5000}	PRD _{AIR,i}	PRD _{AIR}	WTS _{AIR,i}	WTS _{AIR,i}
#	[mm]	[mm]	[mm]	[%]	[%]	[mm/10 ³]	[mm/10 ³]
1.0	39,87	0,86	0,71	2,2	2	0,03	0,03
2.0	40,48	0,77	0,66	1,9		0,02	

Počet cyklů	Počet pojezdů	Teplota	L 1.0	L 2.0	YS 1.0	YS 2.0	Průměr
		[°C]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
0	0	50,0	8,11	9,14	0,00	0,00	0,00
500	1000	50,0	8,51	9,62	0,40	0,48	0,44
1000	2000	50,0	8,58	9,64	0,47	0,50	0,49
1500	3000	50,0	8,63	9,69	0,52	0,55	0,54
2000	4000	50,1	8,69	9,75	0,58	0,61	0,60
2500	5000	50,0	8,71	9,76	0,60	0,62	0,61
3000	6000	50,1	8,74	9,75	0,63	0,61	0,62
3500	7000	50,1	8,71	9,76	0,60	0,62	0,61
4000	8000	50,1	8,74	9,78	0,63	0,64	0,64
4500	9000	50,2	8,78	9,79	0,67	0,65	0,66
5000	10000	50,2	8,82	9,80	0,71	0,66	0,69
5500	11000	50,2	8,85	9,83	0,74	0,69	0,72
6000	12000	50,1	8,88	9,85	0,77	0,71	0,74
6500	13000	50,2	8,90	9,86	0,79	0,72	0,76
7000	14000	50,2	8,93	9,87	0,82	0,73	0,77
7500	15000	50,1	8,94	9,88	0,83	0,74	0,79
8000	16000	50,2	8,95	9,87	0,84	0,73	0,78
8500	17000	50,2	8,97	9,88	0,86	0,74	0,80
9000	18000	50,1	8,98	9,89	0,87	0,75	0,81
9500	19000	50,2	8,98	9,90	0,87	0,76	0,82
10000	20000	50,1	8,97	9,91	0,86	0,77	0,82

PŘÍLOHA D:

- Rozměry zkušebních těles pro stanovení modulů tuhosti



SMA 11S + 30 % R-mat					
vzorek	H	B	b	T	m
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]
4.1	253,2	71,23	25,30	49,78	1466
4.2	252,7	70,99	24,75	49,69	1473
4.3	253,0	71,47	24,55	49,71	1442
4.4	252,0	70,63	26,94	50,10	1516
4.5	253,0	71,18	27,29	49,49	1504
5.1	250,5	70,52	25,37	49,50	1466
5.2	250,9	69,63	27,19	49,59	1480
5.3	250,6	71,13	24,40	50,13	1462
5.4	250,5	71,08	25,08	49,99	1465
5.5	250,8	71,7	25,03	49,51	1458
6.1	252,8	71,4	24,61	50,20	1480
6.2	252,7	71,46	25,00	49,99	1496
6.3	252,6	71,15	25,30	49,97	1507
6.4	252,1	71,5	24,99	49,69	1472
6.5	251,6	70,51	26,67	49,69	1435

PŘÍLOHA E:

- Stanovení modulů tuhosti

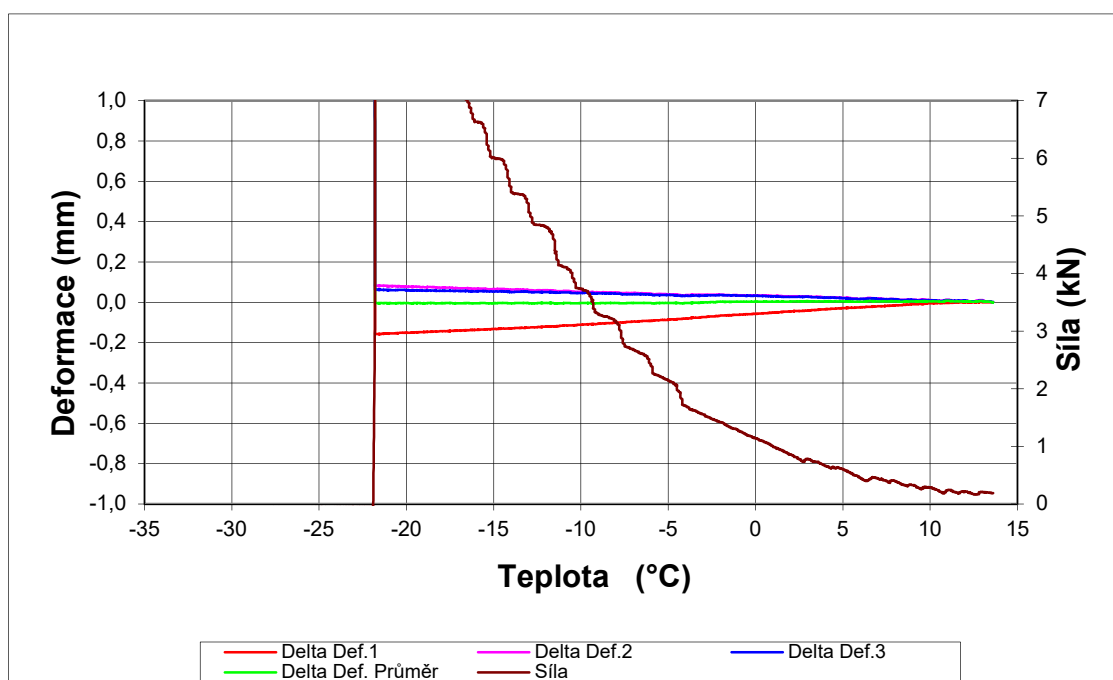
SMA 11S + 30 % R-mat, +15°C								
vzorek	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz	5 Hz1	5 Hz2	Odchylka
4.1	6261	7182	7712	8049	8381	6321	6200	0,3
4.2	6422	7382	7979	8386	8703	6529	6314	3,8
4.3	5895	6798	7270	7621	7844	5927	5862	6,5
4.4	6512	7353	7790	8157	8606	6527	6496	2,5
4.5	5910	6771	7251	7675	7989	5920	5899	5,9
5.1	6101	6986	7453	7800	8081	6199	6002	3,7
5.2	6408	7328	7816	8169	8551	6433	6383	1,9
5.3	6323	7127	7649	8028	8384	6352	6294	0,7
5.4	6526	7379	7852	8185	8444	6555	6496	1,9
5.5	6043	6801	7262	7645	7799	6064	6022	7,1
6.1	6447	7330	7808	8194	8550	6461	6433	1,9
6.2	6833	7802	8308	8814	9091	6830	6836	9,1
6.3	6694	7613	8062	8457	8836	6740	6647	5,3
6.4	6615	7538	8078	8377	8741	6696	6534	4,9
6.5	5940	6718	7258	7575	7902	5943	5937	6,2
Průměr	6328	7207	7703	8075	8393			

SMA 11S + 30 % R-mat, +40°C								
vzorek	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz	5 Hz1	5 Hz2	odchylka
4.1	754	1072	1285	1582	2261	767	740	8,0
4.2	733	1052	1274	1682	2028	769	697	7,3
4.3	646	904	1154	1513	2824	633	659	29,1
4.4	754	1073	1313	1721	2133	779	729	3,3
4.5	710	969	1320	1776	2141	723	697	3,2
5.1	802	1135	1439	1701	2214	820	783	6,0
5.2	807	1173	1402	1802	2450	842	772	12,0
5.3	792	1146	1370	1767	2193	822	761	2,7
5.4	944	1294	1540	1952	2579	969	919	17,9
5.5	785	1040	1334	1629	2185	823	746	5,3
6.1	898	1366	1473	1843	2338	943	853	8,5
6.2	873	1267	1521	1936	2346	924	821	12,5
6.3	-	-	-	-	-	-	-	0,0
6.4	816	1194	1379	1734	2119	853	778	3,1
6.5	713	1124	1302	1593	1991	743	683	9,0
Průměr	776	1113	1358	1720	2187			

PŘÍLOHA F:

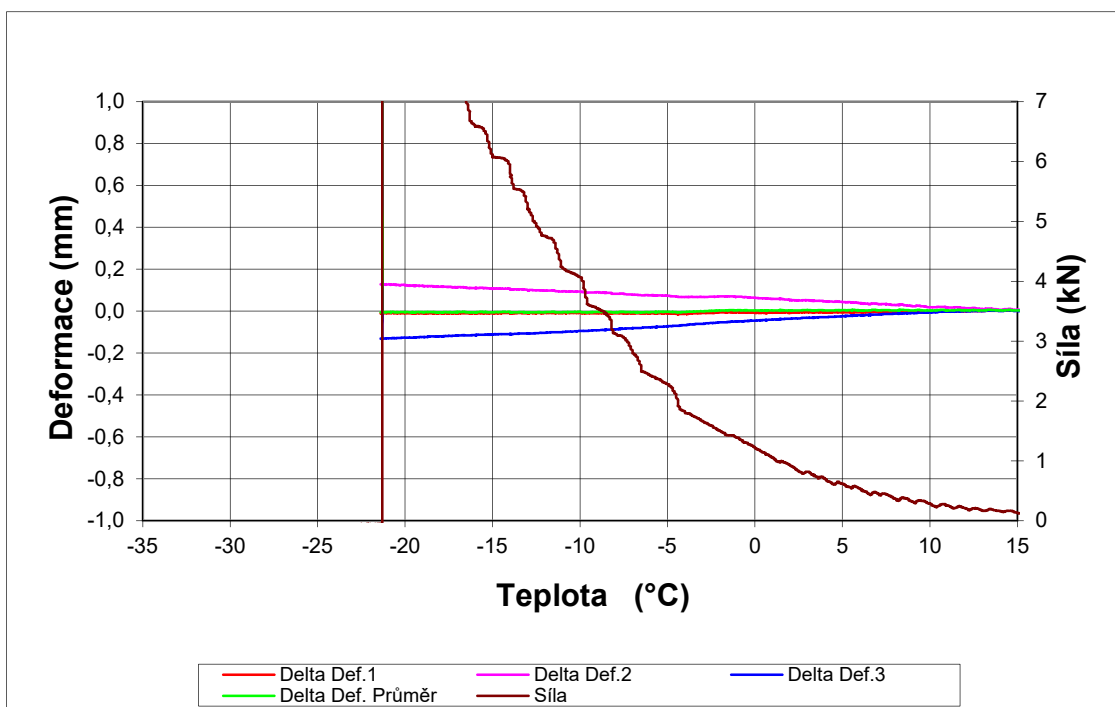
Vzorek 2

Akce :	Bakalářská práce Motl
Asfaltová směs :	SMA 11S + 30 % R-mat, vzorek 2
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	50,6 x 50,2 x 201,0
Datum zkoušky :	28.04.2016
Zkoušku provedl :	Motl
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	9,85
Max. napětí při porušení - MPa :	3,88
Teplota v komoře při porušení - °C :	-25,9
Teplota vzorku při porušení - °C :	-21,8



Vzorek 3

Akce :	Bakalářská práce Motl
Asfaltová směs :	SMA 11S + 30 % R-mat, vzorek 3
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	50,4 x 50,5 x 199,9
Datum zkoušky :	02.05.2016
Zkoušku provedl :	Motl
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	9,85
Max. napětí při porušení - MPa :	3,87
Teplota v komoře při porušení - °C :	-25,1
Teplota vzorku při porušení - °C :	-21,3



Vzorek 4

Akce :	Bakalářská práce Motl
Asfaltová směs :	SMA 11S + 30 % R-mat, vzorek 4
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	50,8 x 50,4 x 200,4
Datum zkoušky :	03.05.2016
Zkoušku provedl :	Motl
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	10,53
Max. napětí při porušení - MPa :	4,11
Teplota v komoře při porušení - °C :	-26,0
Teplota vzorku při porušení - °C :	-21,7

