



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

ASFALTOVÁ SMĚS PRO OBRUSNÉ VRSTVY SE ZVÝŠENÝM OBSAHEM R-MATERIÁLU

BITUMINOUS MIXTURE FOR WEARING COURSE WITH INCREASED CONTENT OF RECLAIMED ASPHALT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Karel Spies

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. JAN KUDRNA, CSc.

BRNO 2019



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	Karel Spies
Název	Asfaltová směs pro obrusné vrstvy se zvýšeným obsahem R-materiálu
Vedoucí práce	prof. Ing. Jan Kudrna, CSc.
Datum zadání	30. 11. 2018
Datum odevzdání	24. 5. 2019

V Brně dne 30. 11. 2018

doc. Dr. Ing. Michal Varaus
Vedoucí ústavu

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

PODKLADY A LITERATURA

ČSN 73 6121, ČSN EN 13108-1

Zkušební normy řady ČSN EN 12697

TP MD 148 Hutněné asfaltové vrstvy a asfaltem modifikovanými pryžovým granulátem

Dostupná literastura

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Prostudování dostupných podkladů a výběr možného řešení návrhu asfaltové směsi do ohrusné směsi se zvýšeným obsahem recyklovatelné asfaltové směsi. Návrh asfaltové směsi, příprava asfaltových směsí a zkušebních těles. Výsledky funkčních zkoušek, jejich vyhodnocení a závěr práce.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ 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).

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

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá návrhem asfaltové směsi pro obrusnou vrstvu s vysokým obsahem R-materiálu (množství 50 %) a použitím asfaltového pojiva modifikovaného pryžovým granulátem (CRMB) bez užití rejuvenátorů či jiných změkčujících přísad. Cílem práce je ověřit předpokládané vlastnosti asfaltové směsi provedením funkčních zkoušek dle normy ČSN EN 12697 (736160) *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka, a* porovnat její vlastnosti s minimálními požadavky na asfaltový beton pro obrusnou vrstvu (ACO 11+) dle normy ČSN EN 13108-1 ed. 2 (736140) *Asfaltové směsi - Specifikace pro materiály - Část 1: Asfaltový beton*. Dalším cílem této práce je poukázat na možnost využití vyšších množství R-materiálu v asfaltových směsích.

KLÍČOVÁ SLOVA

R-materiál, asfalt modifikovaný pryžovým granulátem (CRMB), asfaltový beton, obrusná vrstva, asfaltová směs

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with design of asphalt mixture for wearing course, by performing functional tests according to ČSN EN 12697 (736160) *Bituminous mixtures - Test methods for hot asphalt mixtures* and comparison of its properties with asphalt concrete for wearing course (ACO 11+) according to ČSN EN 13108-1 ed. 2 (736140) *Bituminous mixtures - Specification for materials - Part 1: Bituminous concrete*. The proposed layer is characterized by a high (50%) reclaimed asphalt pavement content (RAP) and the use of a crumb rubber modified bitumen (CRMB) without the use of rejuvenators or other softening additives. The aim of the work is to verify the expected properties of the asphalt mixture and point out the possibility of using larger amounts of reclaimed asphalt pavement in asphalt mixtures.

KEYWORDS

Reclaimed asphalt pavement (RAP), Crumb Rubber Modified Bitumen, rubber asphalt, asphalt concrete, wearing coarse, asphalt mixture

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Karel Spies *Asfaltová směs pro obrusné vrstvy se zvýšeným obsahem R-materiálu*. Brno, 2019. 62 s., 14 s. příl. Bakalářská 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 bakalářské práce s názvem *Asfaltová směs pro obrusné vrstvy se zvýšeným obsahem R-materiálu* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 22. 5. 2019

Karel Spies

autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Asfaltová směs pro obrusné vrstvy se zvýšeným obsahem R-materiálu* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 22. 5. 2019

Karel Spies

autor práce

Obsah

1	Úvod.....	10
2	Cíle práce.....	10
	Teoretická část	11
3	Vývoj a problematika R-materiálu a CRMB.....	11
	3.1 Problematika R-materiálu	11
	3.2 Získávání R-materiálu.....	11
	3.3 Vývoj CRMB	12
	3.4 Asfalt modifikovaný pryžovým granulátem	12
	3.4.1 Výroba CRMB	12
	3.4.2 Výhody a nevýhody CRMB.....	12
4	Možnosti zpracování a dávkování R-materiálu	13
	4.1 Zpracování R-materiálu	13
	4.2 Maximální množství R-materiálu přidávaného do asfaltových směsí	14
	4.3 R-materiál dávkovaný za studena do míchačky šaržové obalovny.....	15
	4.4 R-materiál předehřátý v paralelním sušícím bubnu šaržové obalovny.....	17
	4.5 Metoda Drum-Mix	18
5	Shrnutí problematiky používání R-materiálu	21
	Použité materiály	23
6	Kamenivo	23
	6.1 Lom	23
	6.2 Sítové rozbory	23
	6.3 Čára zrnitosti.....	24
7	Asfalt.....	24
	7.1 Výroba CRMB.....	24
	7.2 Asfaltové pojivo v R-materiálu	25
	Použité zkušební metody.....	27
8	Prvotní příprava vzorků.....	27
	8.1 Homogenizace a kvartace.....	27
	8.1.1 Homogenizace	27
	8.1.2 Kvartace	28
	8.2 Zkoušky vlastností asfaltové směsi.....	28
	8.2.1 Objemová hmotnost.....	28
	8.2.2 Maximální objemová hmotnost.....	29
	8.2.3 Mezerovitost	30
	8.2.4 Stupeň vyplnění mezer	31

8.2.5	Míra zhutnění	31
8.3	Funkční zkoušky asfaltových směsí.....	31
8.3.1	Stanovení odolnosti zkušebního tělesa vůči vodě (ITSR)	32
8.3.2	Zkouška pojíždění kolem	33
8.3.3	Stanovení modulů tuhosti asfaltové směsi	34
8.3.4	Stanovení únavy asfaltové směsi	35
8.3.5	Zkouška odolnosti asfaltové směsi vůči nízkým teplotám	36
	Praktická část.....	37
9	Návrh asfaltové směsi	37
9.1	Návrh čáry zrnitosti	37
9.2	Návrh množství pojiva.....	37
9.2.1	Teoretické optimální množství pojiva	38
9.2.2	Navržené množství pojiva	38
9.3	Příprava asfaltové směsi	39
9.3.1	Hutnění Marshallových těles	39
9.3.2	Míchání směsi.....	40
9.3.3	Hutnění směsi.....	41
9.3.4	Výroba zkušebních těles	41
10	Výsledky zkoušek vlastností asfaltové směsi	42
10.1	Objemová hmotnost	43
10.1.1	Objemové hmotnosti Marshallových těles	43
10.1.2	Objemové hmotnosti zhutněných desek.....	43
10.2	Maximální objemová hmotnost	44
10.3	Mezerovitost a stupeň vyplnění mezer	44
10.3.1	Mezerovitost	44
10.3.2	Stupeň vyplnění mezer	44
10.4	Míra zhutnění.....	45
11	Výsledky funkčních zkoušek	46
11.1	Stanovení odolnosti zkušebního tělesa vůči vodě (ITSR)	46
11.2	Zkouška pojíždění kolem	46
11.3	Stanovení modulů tuhosti asfaltové směsi	47
11.4	Stanovení únavy asfaltové směsi.....	48
11.5	Zkouška odolnosti asfaltové směsi vůči nízkým teplotám	49
12	Zkušební úsek	49
13	Shrnutí cílů a závěr	51
	Poděkování	53
	Seznam obrázků	58

Seznam tabulek.....	60
Seznam grafů	61
Seznam příloh	62

1 Úvod

Během studií pracuji ve vědecko-výzkumném centru AdMaS při Fakultě stavební VUT v Brně, kde se spolupodílím na návrhu a testování nových asfaltových směsí pro netuhé vozovky. Při této práci mě zaujala problematika recyklovaného materiálu, už s ohledem na to, že odstraněných asfaltových povrchů přibývá a jejich skladování a případné další využití je zatím nedostatečné. S výhledem do budoucna se domnívám, že je třeba k této problematice přistoupit zodpovědněji, a proto jsem se zaměřil na vývoj a využití směsí s vyšším množstvím recyklovaného materiálu a jejich použití v silničním stavitelství.

Obsahem teoretické části této práce je vysvětlení a shrnutí problematiky použití a dávkování R-materiálu v České republice a ve světě. Zároveň je snahou této práce a jejích výsledků rozšířit využití recyklovaného materiálu do asfaltových směsí na obalovnách v České republice, a na to konto zvýšit počet pozemních komunikací, jejichž vrstvy budou tvořeny z těchto směsí.

Praktická část této práce obsahuje návrh, zkoušení a posouzení výsledků zkoušek nově navržené asfaltové směsi s minimálními normovými požadavky pro asfaltový beton pro obrusnou vrstvu ACO 11 +. Navržená asfaltová směs je určena především pro obrusnou vrstvu, obsahuje 50 % recyklovaného materiálu a asfalt 70/100 modifikovaný pryžovým granulátem (CRMB). Na navržené směsi byly provedeny požadované zkoušky pro návrh směsí podle normy ČSN EN 73 6160 – *Zkoušení asfaltových směsí* [1] a navíc byly provedeny další funkční zkoušky jako například měření modulů a únavy, zkouška poježdění kolem, měření nízkoteplotních vlastností.

Závěrem praktické části je pak položení navržené a odzkoušené směsi do reálného provozu.

2 Cíle práce

Před vytvořením této bakalářské práce jsem si zadal několik milníků, ke kterým bych se v této práci chtěl dopracovat a úspěšně dokončit. Tím hlavním a nejdůležitějším cílem pro mě je navrhnout a vytvořit novou, inovativní asfaltovou směs, kterou ještě nikdo v České republice nevyrobil. Samozřejmostí bylo taktéž tuto směs otestovat pomocí funkčních zkoušek, zjistit tak její vlastnosti a chování. Zároveň bylo mým cílem rozšířit či vylepšit pohled na danou problematiku R-materiálu a recyklace vozovek a pokusit se o větší uplatnění R-materiálu na českých pozemních komunikacích. Byť posledním, ale o to důležitějším cílem bylo položení zkušebního úseku z navržené asfaltové směsi, aby bylo možno pozorovat a zkoumat chování této směsi v reálném provozu, a to nejen v laboratorních podmínkách.

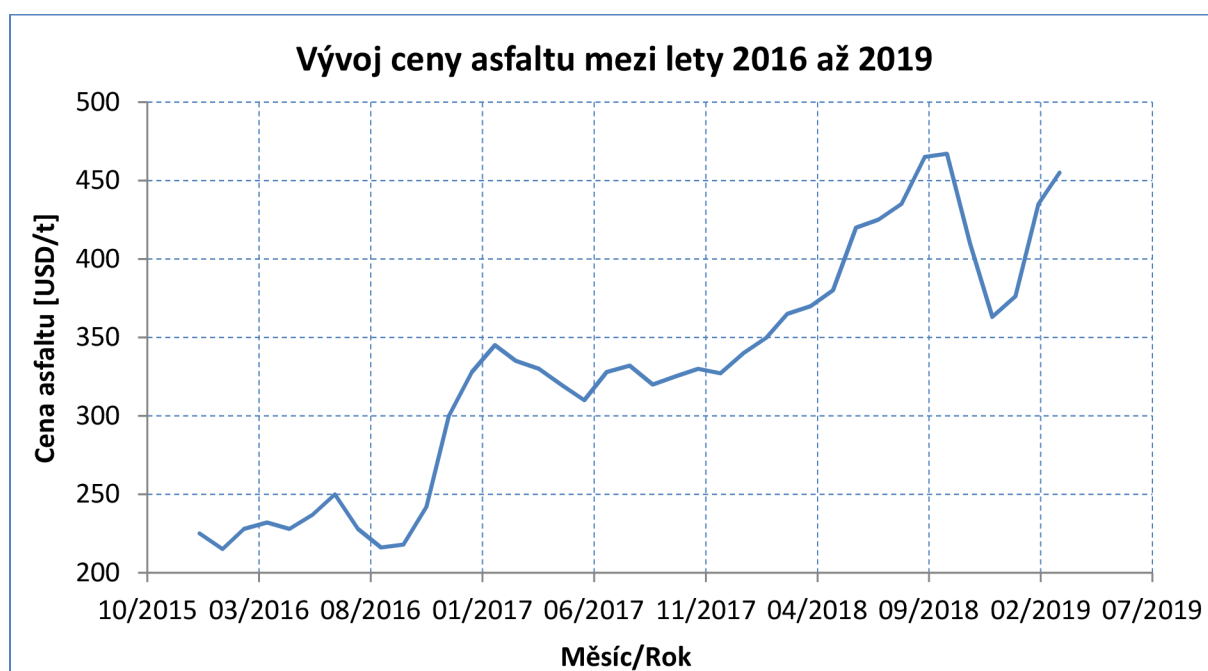
Teoretická část

3 Vývoj a problematika R-materiálu a CRMB

3.1 Problematika R-materiálu

Problematika R-materiálu je v dnešní době často opakované téma. V současnosti je kladen velký důraz na recyklaci a ochranu životního prostředí. Zásoby ropy, jakožto hlavního zdroje na výrobu asfaltů, se pomalu, ale jistě tenčí. Dalším problémem je také cena výsledného produktu (asfalt či asfaltová směs), která je závislá na současné světové ekonomické situaci. Na níže uvedeném grafu je pro názornost zobrazen vývoj ceny asfaltu v posledních letech. Je zcela zřejmé, že tendence vývoje ceny je stoupající. Důležité je tedy hledat náhrady, a to jak v podobě substitučních, obnovitelných materiálů, tak ve znovupoužití-recyklaci těch stávajících. V následujícím textu je proto shrnuta problematika R-materiálu a způsobu jeho použití a dávkování, jak na obalovnách v ČR, tak ve světě.

Na následujícím obrázku je zobrazen vývoj ceny asfaltu za poslední 4 roky.



Graf 1: Graf vývoje ceny asfaltu mezi roky 2015 a 2019 [2]

3.2 Získávání R-materiálu

Pojmem R-materiál, anglicky Reclaimed asphalt pavement (RAP), označujeme směsi obsahující asfalt a kamenivo, získané z asfaltových vrstev vozovek. Tento materiál se získává nejčastěji v situacích, kdy je potřeba odstranit současný povrch vozovky. K tomu dochází obvykle při

rekonstrukcích starých dosluhujících vozovek, při opravách porušených vozovek či při obnažení různých vedení inženýrských sítí, nacházejících se pod povrchem komunikace.

R-materiál se získává třemi základními způsoby. Jedná se o vyfrézování samostatné asfaltové vrstvy, o odstranění všech asfaltových vrstev zároveň nebo při neshodné výrobě asfaltové směsi na obalovně. Při frézování obvykle dochází k odstranění asfaltového krytu v tloušťce až 50 mm (průměrná tloušťka asfaltové vrstvy) při jednom průjezdu frézy. Frézování pomocí frézy lze provádět i přes celou tloušťku konstrukce při jejím jednom průjezdu, ale dochází při tom ke smíchání R-materiálu ze všech asfaltových vrstev. Pro celkové odstranění všech vrstev se obvykle používají upravené typy dozerů. Takto získaný materiál je poté ve většině případů převezen na skládku, často situovanou poblíž obalovny, kde čeká na své další zpracování. [3]

3.3 Vývoj CRMB

Vývoj asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem, nesprávně nazývaného gumoasfalt, se datuje do 60. let 20. století. Takto modifikovaný asfalt byl používán do asfaltových vrstev obrusných, ložních i podkladních a poprvé byl použit Charlesem H. McDonalodem na opravu výtluků v Spojených státech amerických. Postupem času se tato technologie ujala jak v USA, tak v Evropě, a využívá se i v České republice. [4]

3.4 Asfalt modifikovaný pryžovým granulátem

3.4.1 Výroba CRMB

Asfalt modifikovaný pryžovým granulátem se získává smícháním klasického silničního asfaltu (např. silniční asfalt 50/70, silniční asfalt 70/100) s pryžovým granulátem. Na výrobu jedné tuny CRMB je potřeba asi 50 až 60 pneumatik osobních automobilů. [4]

Pryžový granulát se vyrábí drcením ojetých pneumatik, a to třemi základními metodami. Jedná se o kryogenní metodu, metodu vícenásobného mletí a metodu ozónovým rozkladem. Obvyklá velikost částic granulátu se pohybuje mezi 0,5 mm až 2 mm, avšak jejich minimální velikost může být i menší než 0,2 mm. Objemová hmotnost pryžového granulátu je nízká a pohybuje se okolo 400 kg/m³. [5]

3.4.2 Výhody a nevýhody CRMB

Samotný materiál je velmi trvanlivý, inertní a netoxický. Díky pryžovému granulátu je asfalt více pružný a viskóznější a lépe odolává účinkům jak vysokých, tak nízkých teplot. Zvyšuje se taktéž jeho odolnost vůči únavě a stárnutí. Asfaltové směsi, v nichž je použito asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem umožňují zvýšit protismykové vlastnosti a s tím spojenou menší brzdou

dráhu, snížit hlukové emise a jsou odolnější vůči tvorbě trvalých deformací, tzv. kolejí. V neposlední řadě tyto směsi produkují nižší hluk vznikající odvalováním pneumatik po povrchu vozovky než klasické asfaltové směsi a jsou tedy vhodné i do oblastí hustým osídlením. [4]

Jako nespornou výhodou použití CRMB lze uvést ekologickou a ekonomickou stránku věci. Při recyklování pneumatik na výrobu granulátu dochází k téměř 100% zpracování celé pneumatiky. Ekologicky je tak zpracována celá pneumatika a vzniklý granulát lze použít znovu pro výrobu jak modifikovaného asfaltového pojiva, tak třeba jako materiál na dlažbu, hadice, rohože, dopravní značení a mnohé další. Ochrana životního prostředí spočívá především ve způsobu zpracování pneumatiky. Skládkování pneumatik či jejich spalování negativně zatěžuje životní prostředí – např. dochází k průsaku toxických látek do podzemních vod či k úniku toxických plynů při nedokonalém spalování. Na rozdíl od toho drcení a zmrazování (pouze nákladné na zmrazovací médium – kapalný dusík) není pro životní prostředí žádnou hrozbou. [6]

Z ekonomického hlediska dochází k úspoře ropy při výrobě gumových výrobků. Důležitým ekonomickým faktorem je také použití pryžového granulátu jako modifikátor asfaltu. Jednak je levnější než jiné, polymerem modifikované asfalty (PMB), a při užití v kombinaci s R-materiálem může sloužit jako náhrada za dražší rejuvenátory, které jsou jinak nutné k omlazení pojiva z R-materiálu.

Kromě velkého množství výhod, má i pár méně pozitivních charakteristik, které však zdaleka nepřevažují jeho klady. Jedná se zprvu o vyšší pracnost při jeho výrobě a hlavně nutnost speciálního zařízení pro míchání, které na obalovnách velmi často není. Mimo jiné je CRMB oproti jiným modifikovaným pojivům více přilnavý – lepivý, a od toho se odvíjí i jeho nesnadné zpracování a hutnění. V každém případě jde pouze o detaily, které lze snadno vyřešit – např.: pořízením zařízení pro míchání CRMB, zvýšením teploty pokládky či jiným složením křivky zrnitosti směsi. [6]

4 Možnosti zpracování a dávkování R-materiálu

4.1 Zpracování R-materiálu

Zpracování R-materiálu v České republice můžeme rozdělit do celkem čtyř skupin. Tyto skupiny můžeme dělit jak podle místa zpracování, kde rozlišujeme tzv. recyklaci na místě a recyklaci v míchacím centru (na obalovně), tak podle teploty zpracování, a to za horka a za studena. Všechny čtyři kategorie zpracování R-materiálu se řídí normou [7]. Tato norma rozlišuje množství přidávaného R-materiálu do asfaltové směsi, a to dle druhu směsi a typu vrstvy. Takto přidávaný R-materiál lze však použít pouze do směsí typu AC neboli asfaltový beton. Použití R-materiálu do ostatních směsí typu SMA, BBTM či PA norma neumožňuje. Jediným dalším typem směsi, do kterého

Ize částečně (25 % až 30 %) přidávat R-materiál, je směs typu VMT – směs s vysokým modulem tuhosti.

4.2 Maximální množství R-materiálu přidávaného do asfaltových směsí

Jednotlivá množství R-materiálu, která lze v současné době přidávat do asfaltových směsí jsou uvedena v tabulce č. 1. Tato tabulka (nejspíš) projde v blízké době významnou revizí, při které dojde k procentuální změně – zvýšení – dávkovaného množství R-materiálu, a také přibude možnost dávkovat R-materiál do směsí, které to dříve neumožňovaly. Jako příklad lze uvést směs ACO 11 +, asfaltový beton pro obrusnou vrstvu s kamenivem frakce 0/11. Tato směs dle dřívějších pravidel nesměla obsahovat žádný R-materiál, zatímco v dnešní době bude moci být za určitých podmínek přidáváno až 30 %. Pro srovnání budoucího a bývalého stavu jsou přiloženy obě tabulky.

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

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

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

Tab. 1: Nejvyšší přípustný obsah R-materiálu v % hmotnosti asfaltové směsi – navrhovaná úprava 1)

2) [8]

Obrusné vrstvy		Ložní vrstvy		Podkladní vrstvy	
Druh směsi	R-materiál %	Druh směsi	R-materiál %	Druh směsi	R-materiál %
ACO 8	25	ACL 16 S	30/15 ¹⁾²⁾	ACP 16 S	50 ¹⁾
ACO 8 CH	25	ACL 16 +	30 ¹⁾	ACP 16 +	60
ACO 11 S	-	ACL 16	40	ACP 22 S	50 ¹⁾
ACO 11 +	-	ACL 22 S	30/15 ¹⁾²⁾	ACP 22 +	60
ACO 11	25	ACL 22 +	30 ¹⁾		
ACO 16 S	-	ACL 22	40		
ACO 16 +	-				
ACO 16	25				

¹⁾ Množství přidávaného R-materiálu při výrobě asfaltových směsí z modifikovaných asfaltů upravuje poznámka uvedená v základní normě ČSN EN 13108-1:2008 *Asfaltový beton, článek 5.3.1.1*. Na základě národních zkušeností je však možné použít i jiných limitních hodnot uvedených v této tabulce.

²⁾ Při výrobě asfaltových směsí z nemodifikovaných asfaltů je možné použít R-materiál v množství do 30 %, v případě použití modifikovaných asfaltů v množství do 15 %. Použitý R-materiál musí být získán z krytů vozovek.

Tab. 2: Nejvyšší přípustný obsah R-materiálu v % hmotnosti asfaltové směsi – původní [7]

Vzhledem k tématu dané práce se v následujícím textu zabývám pouze problematikou zpracování R-materiálu v míchacím centru. Metoda zpracování R-materiálu na místě (in situ) není předmětem této práce, a proto zde nebude dále zmiňována. Jak již bylo napsáno výše, recyklaci v míchacím centru – obalovně, můžeme dále rozdělit na recyklaci, při níž je:

- R-materiál dávkovaný za studena do míchačky šaržové obalovny
- R-materiál předeřhátý v paralelním sušícím bubnu šaržové obalovny
- použito metody Drum-Mix na kontinuální obalovně

Jednotlivé způsoby dávkování R-materiálu v míchacím centru jsou podrobněji rozebrány v následujících odstavcích.

4.3 R-materiál dávkovaný za studena do míchačky šaržové obalovny

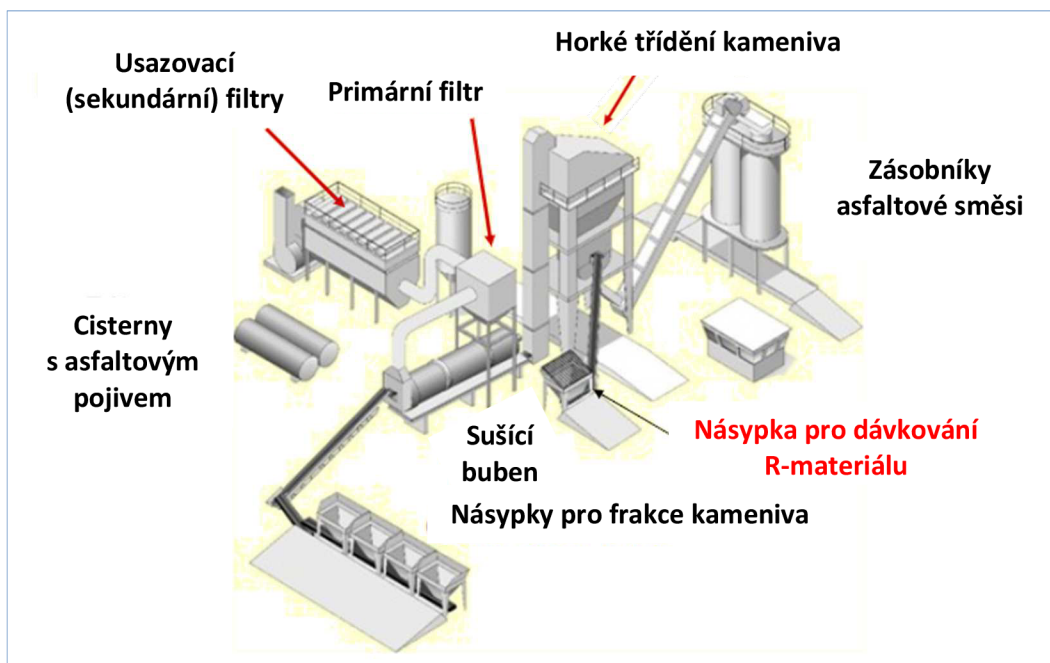
Rozdrcený a vytříděný R-materiál se přidává za studena buď ze zásobníku přes váhu spolu s dalšími frakcemi kameniva, nebo přes samostatnou váhu přímo do míchačky šaržové obalovny. Nevýhodou této metody je množství dávkovaného R-materiálu, které lze takto přidat. Maximálně se jedná o 20 až 25 % R-materiálu z výsledné hmotnosti asfaltové směsi. Důvodem nízkého množství přidávaného R-materiálu je jeho teplota a vlhkost. Aby bylo dosaženo požadované teploty míchání výsledné směsi, je nutné zahřát kamenivo na vyšší teplotu. Ta však u kameniva způsobuje objemové změny či pukání, které jsou pro směs nežádoucí. Zároveň je tato vysoká teplota (250 °C a více) nevhodná pro asfaltové pojivo, které je nanesené na kamenivo v tenké vrstvě. U takového pojiva

dochází při styku s přehřátým kamenivem k okamžitému přepalování a stárnutí. Dalším důvodem zvýšené teploty kameniva je vlhkost R-materiálu. Ten je v České republice většinou (cca 70 %) uchováván na nezastřešených skládkách, vystaven všem možným povětrnostním vlivům. V zahraničí jsou však tyto skládky R-materiálu většinou zastřešeny, či dochází k jejich zastřešování.



Obr. 1, Obr. 2: Skládkování R-materiálu v ČR a v zahraničí [9]

Dalším důležitým prvkem při použití technologie dávkování R-materiálu za studena je nutnost řádného odvětrávacího zařízení obalovny. Při styku horkého kameniva s R-materiálem dochází k prudkému uvolnění páry, kterou je nutné odvést. Na obrázku níže je uvedeno schéma šaržové obalovny se zásobníkem na R-materiál.



Obr. 3: Schéma šaržové obalovny se zásobníkem na R-materiál [10]

4.4 R-materiál přehřátý v paralelním sušícím bubnu šaržové obalovny

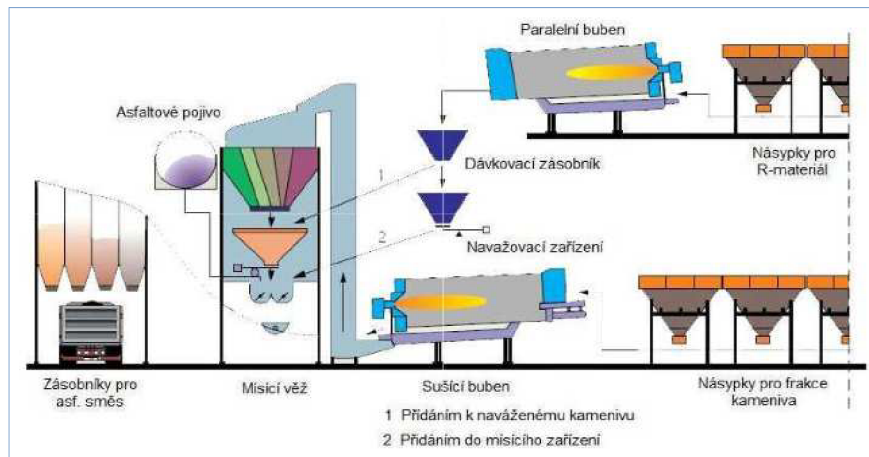
Využití technologie přehřátí v paralelním bubnu výrazně zvyšuje množství R-materiálu, z něhož je z části tvořena výsledná asfaltová směs. Díky separátnímu ohřátí R-materiálu v paralelním bubnu není nutno zahřívat kamenivo na vysokou teplotu pro dosažení teploty míchání, a tudíž je možné dávkovat vyšší množství R-materiálu. Toto řešení dovoluje přidávat R-materiál až do hodnoty 80 % z výsledné hmotnosti směsi. Maximální teplota zahřívání R-materiálu je 130 °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 dalších obrovských výhod použití R-materiálu je jeho 100 % zpracovatelnost. To znamená, že veškerý R-materiál získaný z asfaltového povrchu lze znovu, bezzbytku využít.

I když tato technologie skýtá mnohé výhody, má nyní také dvě velké nevýhody.

První a důležitější nevýhodou je, že Česká republika téměř nezáhodňuje použití R-materiálu do směsí oproti směsím s „čerstvým“ asfaltem a kamenivem. Přitom mnohé státy Evropské unie i ve světě regulují ceny tzv. sekundárních materiálů, aby podpořili jejich recyklování. Například ve Spojeném království zavedla vláda slevu na recyklované materiály. Ve Švédsku dávají bonus v případě, že je použito alespoň 10 % R-materiálu ve směsi. V Německu je R-materiál poskytován za symbolickou cenu popř. bezúplatně. V Nizozemí je cena R-materiálu výrazně nižší než cena stejně kvalitní nové směsi. Infrastruktura obaloven s možností použití recyklovaného materiálu funguje v Nizozemí již od 70. let 20. století a v dnešní době lze zpracovávat R-materiál za horka na více než 95 % všech obaloven. [10]

Druhá nevýhoda silně závisí na té první. Jde o množství obaloven v ČR vybavených paralelním sušícím bubnem. V současné době jsou paralelním sušícím bubnem v ČR vybaveny celkem 4 obalovny z cca 113 obaloven na našem území. To činí asi 3,5 % všech obaloven. Cena paralelního sušícího bubnu je v řádech desítek milionů korun, a proto nemají obalovny důvod si jej nyní pořizovat. Je tedy nutné, aby stát učinil kroky vedoucí k rozvoji recyklace a po vzoru ostatních států zavedl různé slevy či pobídky na používání recyklovaných materiálů.

Na obrázcích níže je vidět typické uspořádání obalovny s paralelním sušícím bubnem, který se nachází v její horní části.



Obr. 4: Schéma obalovny s paralelním bubnem [11]

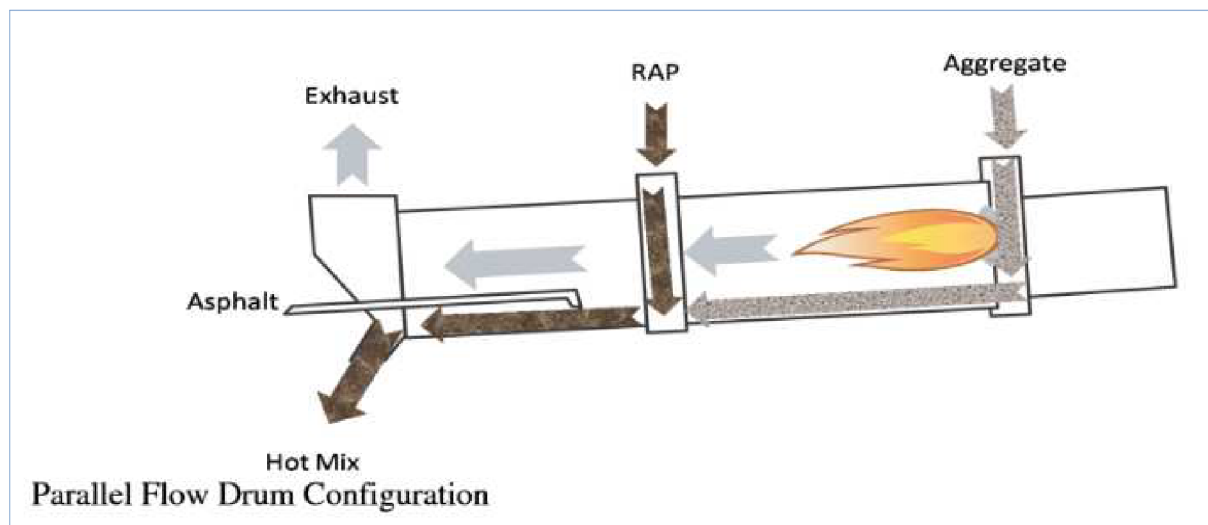


Obr. 5: Obalovna s paralelním bubnem [12]

4.5 Metoda Drum-Mix

Metoda Drum-Mix se na rozdíl od výše uvedených metod používá v kontinuálních obalovnách. Samotná metoda se dělí na tři dílčí metody, které jsou vysvětlené dále v textu. Základní princip této metody spočívá v průběžném dávkování R-materiálu do střední části sušícího a ohřívacího bubnu. Poté dochází k jeho promíchání s přidaným asfaltem a kamenivem buď v samotném bubnu, nebo ve speciálním míchacím zařízení.

a) Přidávání R-materiálu do sušícího bubnu souběžně s proudem vzduchu



Obr. 6: Paralelní sušící buben [13]

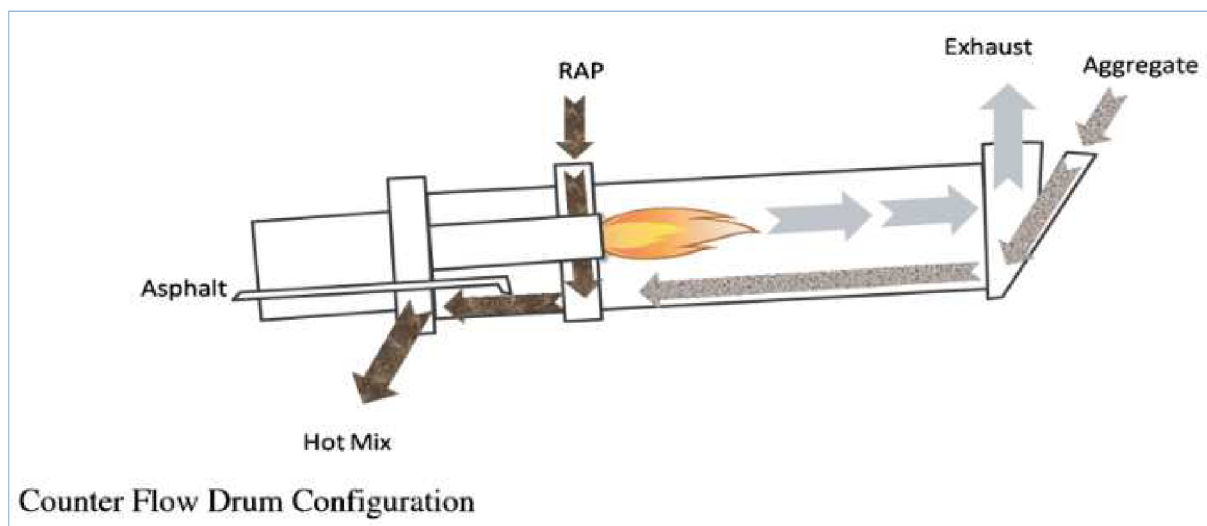
Obecně se první dva typy metody Drum-Mix v zahraniční literatuře nazývají Center Entry Method. Při metodě Parallel Flow Drum (PFD) a Counter-flow Drum (CFD) se R-materiál vsypává do sušícího bubnu v jeho středu po/proti proudu hořáku. Horké kamenivo vsypávané u ústí hořáku se v první části předehřívá na vysoké teploty a postupem v bubnu se mísí s přidávaným R-materiálem. Tím mu předává svou tepelnou energii a zároveň svým závojem chrání R-materiál před přímým stykem s plamenem hořáku. V případě styku plamene s R-materiálem může nastat efekt nazývaný jako modrý dým a není pak možné použít požadované množství R-materiálu. [14]

Převážně se tyto PFD používaly v 70. a 80. letech 20. století. Zařízení však měly problémy s dodržováním přibývajících emisních limitů. Často byly tyto problémy zapříčiněny vysokou vlhkostí R-materiálu, vypařováním lehkých olejů z asfaltových pojiv a dlouhým vystavením asfaltového pojiva páře v proudu horkého vzduchu. [14]

Postupně dochází k vylepšení metod, aby došlo k redukci tzv. modrého dýmu a nežádoucích vlivů, popř. k jejich celkovému odstranění. Vznikají tak nové typy jako např. paralelní buben s izolovaným prostorem míchání, protiproudý a poproudý sušící buben s R-materiálem přidávaným do průběžné míchačky, dvojitý buben, trojitý buben a mnohé další. [14]

b) Přidávání R-materiálu do sušícího bubnu proti proudu vzduchu

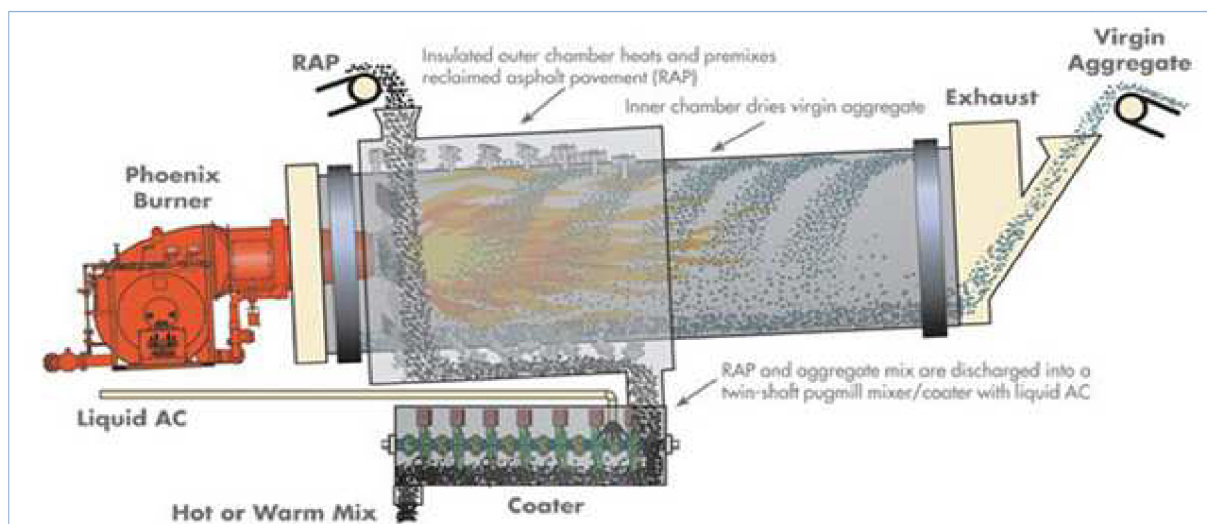
Jedná se o metodu podobnou dávkování R-materiálu podobnou předchozí metodě (Parallel Flow Drum) s tím rozdílem, že zde dochází k míchání kameniva s asfaltem a R-materiálem až za hořákem sušícího bubnu.



Obr. 7: Protiproudý sušící buben [13]

c) Separované vysoušení R-materiálu a míchání v oddělené míchačce

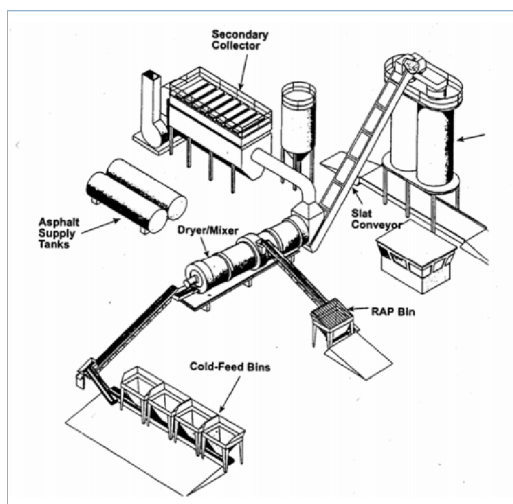
Při použití separovaného vysoušení dochází k ohřevu R-materiálu v externím plášti sušícího bubnu při nižší teplotě, než je teplota ohřevu kameniva. Poté dochází k míchání směsi v odděleném prostoru – míchačce – mimo sušící buben.



Obr. 8: Buben vysoušející R-materiál izolovaně [15]

„Při použití metody Drum-Mix lze dávkovat přibližně 50 % R-materiálu. Většina těchto systémů je však finančně velmi náročná nebo jsou uzpůsobeny pro použití spolu se zařízeními kontinuální obalovny, které nejsou v České republice (ČR) příliš rozšířené (pouze dvě obalovny z celkového počtu 103 (starý údaj, nově 113 – poznámka autora)).“ [8]

Na obrázcích níže je zobrazeno schéma kontinuální obalovny s dávkováním R-materiálu pomocí tzv. Center Entry Method a kontinuální obalovna samotná.



Obr. 9: Schéma kontinuální obalovny [16]



Obr. 10: Schéma kontinuální obalovny s tzv. Counter-Flow technologií [17]

5 Shrnutí problematiky používání R-materiálu

R-materiál je v dnešní době velmi ožehavé téma a bylo by vhodné přiblížit možnosti využití, a taktéž jeho přednosti, širší veřejnosti. I přes vysokou snahu o recyklaci různých materiálů - plasty,

papír, sklo atd. - je česká společnost, a obzvláště ta silniční, stále dosti skeptická vůči tomuto materiálu.

Snahou této práce je proto mimo jiné zvýšit povědomí a odbourat nedůvěru k nové – nedostatečně prozkoumané technologii. Plnohodnotné využití R-materiálu, jakožto náhrady tradičních asfaltových směsí, by bylo prospěšné nejen z hlediska všeobecně žádané ochrany životního prostředí (dnes těžko vyčíslitelné hodnoty), ale i z hlediska ekonomického. Podpora zavedení různých bonusů či slev na použití recyklovaných směsí, obdobně, jako je tomu v zahraničí, by mohla přinést nemalé hospodářské úspory. V níže uvedené tabulce jsou proto zobrazeny klady a zápory použití směsí s R-materiálem.

Výhody využití R-materiálu do asfaltové směsi	Nevýhody využití R-materiálu do asfaltové směsi
<ul style="list-style-type: none"> dávkování méně pojiva - dle množství R-materiálu i o 50 % 	<ul style="list-style-type: none"> nutno změkčit pojivo (použit modifikované asfaltové pojivo nebo rejuvenátory)
<ul style="list-style-type: none"> dávkování méně kameniva 	<ul style="list-style-type: none"> v současné době v ČR - nedostatečná vybavenost obaloven
<ul style="list-style-type: none"> lepší vlastnosti – např. vyšší modul tuhosti 	<ul style="list-style-type: none"> nižší odolnost proti vlivu nízkých teplot – vysoký obsah R-materiálu
<ul style="list-style-type: none"> šetrné k přírodě – znovupoužití materiálu 	
<ul style="list-style-type: none"> nižší náklady na pořízení vstupních surovin 	

Tab. 3: Výhody a nevýhody použití R-materiálu do asfaltové směsi

Použití R-materiálu, a to obzvláště ve vyšších množstvích, se v České republice považuje za vcelku novou, a zatím ne zcela prozkoumanou problematiku. Bylo by dobré se tomuto tématu bedlivě věnovat a zkoumat různé varianty použití R-materiálu, a to jak po stránce kvalitativní, ekologické, tak i kvantitativní. V případě, že se technologie používání R-materiálu v praxi osvědčí, bude nutné diferencovat R-materiál pro první použití (získaný z tradiční směsi) a R-materiál, získaný ze směsi R-materiál obsahující. To je však zatím, alespoň v České Republice, velmi vzdálená budoucnost.

Použité materiály

6 Kamenivo

6.1 Lom

Kamenivo použité na výrobu asfaltové směsi pochází z kamenolomu Vícenice. Kamenolom se nachází poblíž města Náměšť nad Oslavou a patří společnosti COLAS CZ a.s. V tomto lomu se těží hornina amfibolit, vyznačující se středními až hrubými zrny a vysokou pevností. Díky tomu je ideální pro použití, jakožto drcené kamenivo do asfaltových směsí.

R-materiál a kamenivo přímo použité k výrobě směsi bylo poskytnuto obalovnou Holubice, patřící společnosti COLAS CZ a.s.



Obr. 11: Skladování jednotlivých frakcí kameniva na obalovně

6.2 Sítové rozborý

Na výroby asfaltové směsi je použito kamenivo frakcí 0/2, 2/4, 4/8, 8/11 a filler, a to v množství 50 % celkové hmotnosti směsi. Zbývajících 50 % kameniva je obsaženo v R-materiálu. V následující tabulce jsou uvedeny propady na sítích ze sítových rozborů jednotlivých frakcí včetně kameniva extrahovaného z R-materiálu.

Frakce\Síto	22	16	11	8	4	2	1	0.5	0.25	0.125	0.063
8-11	100.00	99.71	93.75	14.82	0.99	0.76	0.73	0.71	0.68	0.63	0.51
4-8	100.00	100.00	98.61	92.03	8.17	3.55	2.80	2.39	1.97	1.49	1.00
2-4	100.00	100.00	100.00	100.00	90.53	12.89	5.81	4.19	3.06	2.25	1.56
0-2	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	88.80	62.43	45.82	31.60	19.49	9.83
Filler	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.86	99.63	95.85	76.42
R-mat	100.00	100.00	100.00	97.74	77.15	60.63	45.15	31.87	21.07	14.25	9.56

Tab. 4: Propady jednotlivých frakcí kameniva na sítích

6.3 Čára zrnitosti

Při návrhu čáry zrnitosti byl kladen důraz na co největší podobnost navržené čáry s Fullerovou parabolou. Fullerova parabola je plynulá křivka nejtěsnějšího uspořádání zrn ve směsi. Tato křivka byla empiricky odvozena stavebním inženýrem W. B. Fullerem a dlouhodobě se používá při návrhu především asfaltových betonů (AC), i když její použití nevyžaduje žádná norma. Připodobněním křivky zrnitosti navržené směsi Fullerově parabole je dosaženo optimálního proložení zrn ve směsi. Takto navržená směs má tedy minimální mezerovitost, maximální objemovou hmotnost a pevnost.

Rovnice Fullerovy paraboly se nejčastěji uvádí ve tvaru $y = 100 * \left(\frac{d}{D}\right)^{0,5}$, kde

- d průměr oka síta v milimetrech,
- D maximální velikost oka v soustavě sít v milimetrech,
- y procentuální propad sítím o průměru oka d v procentech.

Hodnota mocninného členu rovnice je uváděna v různých literaturách odlišně. Některé zdroje uvádějí jeho hodnotu jako 0,5, jiné jako 0,45. Při návrhu směsi bylo použito hodnoty 0,5. [18]

7 Asfalt

7.1 Výroba CRMB

Pro navrhovanou směs je použito jako pojivo asfalt modifikovaný pryžovým granulátem – CRMB. Jako základ pro namíchání modifikovaného pojiva je použito silničního asfaltu 70/100. Do tohoto asfaltu je přidáno 16 % pryžového granulátu o velikosti zrna 1 mm. Míchání výsledného modifikovaného asfaltu probíhalo po dobu 1 hodiny při teplotě 185 °C pomocí míchacího zařízení.

Protože zkoušky samotného asfaltového pojiva dle ČSN EN 1427 *Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou* [19] a ČSN EN 1427 *Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička* [20] nejsou předmětem této práce, byly tyto zkoušky provedeny v rámci diplomové práce externí studentky VUT, a výsledky byly ověřeny a potvrzeny mnou provedenými kontrolními extrakcemi.



Obr. 12,13: Příprava modifikovaného asfaltového pojiva

7.2 Asfaltové pojivo v R-materiálu

V rámci práce bylo provedeno několik extrakcí asfaltového pojiva z R-materiálu pro zjištění jeho množství. Extrakce pojiva byla provedena podle normy ČSN EN 12697-1 *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 1: Obsah rozpustného pojiva*. [21] Výsledné množství pojiva v R-materiálu bylo stanoveno na 6,43 % celkové hmotnosti směsi. Takto vysoký obsah pojiva v R-materiálu je celkem neobvyklý. Pravděpodobným důvodem zvýšeného množství pojiva je vysoký obsah jemných částic a nedostatek větší frakce kameniva (např.: propad na síť o velikosti oka 8 mm je 97,74 %) v R-materiálu. Měrný povrch zrn R-materiálu je tak větší, než je typické. Přímo úměrně tak dochází k zvětšení povrchu zrn obalených asfaltem a tudíž i k zvýšení celkového obsahu asfaltu v R-materiálu.

Pro návrh asfaltové směsi byl uvažován obsah asfaltového pojiva v R-materiálu 6,40 %. Množství asfaltového pojiva celkem dávkovaného do směsi (pojivo obsažené v R-materiálu + CRMB) bylo stanoveno na 6,50 %. Postup stanovení této hodnoty je podrobně rozebrán v kapitole 9.2.2 *Návrhové množství pojiva*.

Pro přehlednost je níže uvedena tabulka procentuálních propadů kameniva na jednotlivých sítích.

Velikost oka síta [mm]	Zůstatek [%]	Propad [%]
11	0.00	100.00
8	2.26	97.74
4	20.59	77.15
2	16.52	60.63
1	15.48	45.15
0.500	13.28	31.87
0.250	10.80	21.07
0.125	6.82	14.25
0.063	4.69	9.56
< 0.063	2.09	

Tab. 5: Zůstatky a propady zrn kameniv z R-materiálu na sítích



Obr. 14: Destilace asfaltu z R-materiálu

Použité zkušební metody

8 Prvotní příprava vzorků

8.1 Homogenizace a kvartace

Po přivezení kameniva a R-materiálu z obalovny bylo nutné nejprve provést jejich homogenizaci a kvartaci pro získání reprezentativních vzorků jednotlivých surovin. Takto získané vzorky posloužily pro provedení síťových rozborů kameniva a jako vzorky použité při extrakci asfaltového pojiva z R-materiálu. Obě metody přípravy vzorků byly provedeny podle příslušných norem.

8.1.1 Homogenizace

Při homogenizaci dochází k vytvoření kužele nasypného kameniva či R-materiálu, z určitého, předem daného množství materiálu tak, že jsou odebírány jeho dávky z různých míst původního objemu materiálu. Tím je docíleno rovnoměrného rozdělení všech zrn ve směsi. Tento proces lze opakovat pro větší přesnost. Při manipulaci s materiálem obvykle dochází k propadávání jemných částic ke dnu a na povrchu zůstává pouze hrubší frakce. Odebrání materiálu pouze z povrchu by tudíž neodpovídalo reálnému složení směsi či frakce a mohlo by ovlivnit výsledky provedených zkoušek.



Obr. 15: Homogenizace kameniva frakce 4/8

8.1.2 Kvartace

Obdobně jako homogenizace slouží k získání reprezentativního vzorku materiálu. Při kvartaci dochází k rozdělení kužele materiálu na 4 rovnocenné části. Libovolné 2 protilehlé části se odeberou, ze zbylých 2 částí se opět vytvoří kužel a proces se opakuje až do získání požadovaného množství vzorku.



Obr. 16: Kvartace kameniva frakce 8/11

8.2 Zkoušky vlastností asfaltové směsi

Tyto zkoušky byly provedeny za účelem návrhu optimálního množství pojiva a získání vlastností navržené směsi, kterými jsou např.: mezerovitost, stupeň vyplnění mezer, objemová hmotnost, maximální objemová hmotnost či míra zhutnění. Veškeré zkoušky byly provedeny podle příslušných norem uvedených v seznamu použité a citované literatury.

8.2.1 Objemová hmotnost

Objemová hmotnost je hmotnost připadající na jednotku objemu tohoto vzorku včetně jeho mezer při dané zkušební teplotě. Pro stanovení objemové hmotnosti navržené směsi byl použit Postup B: Objemová hmotnost – nasycený suchý povrch (SSD) uvedený v normě ČSN EN 12697-6 *Asfaltové směsi – zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa*. [22] Objemová hmotnost byla zjišťována na třech sadách Marshallových tělesech o obsahu asfaltu 6,0 %, 6,5 % a 7,0 %. Každá sada obsahuje 3 tělesa.

Postup spočívá ve stanovení 3 hmotností zkušební tělesa. Nejprve se určí hmotnost suchého vzorku m_1 , poté dojde k jeho ponoření do vody o konstantní teplotě na minimálně 30 minut a zváží se hmotnost pod vodou m_2 . Nakonec je těleso vytaženo z vody, povrchově osušeno a zváží se jeho hmotnost – hmotnost osušeného tělesa m_3 . Výsledná objemová hmotnost ρ_{bssd} v kg/m^3 se spočítá ze vzorce $\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} * \rho_w$, kde

m_1, m_2, m_3 hmotnosti v g,

ρ_w hustota vody upravená faktorem K závislým na teplotě vody v kg/m^3 . [22]



Obr. 17: Zařízení pro měření objemové hmotnosti



Obr. 18: Sady Marshallových těles

8.2.2 Maximální objemová hmotnost

Maximální objemová hmotnost je hmotnost připadající na jednotku objemu asfaltové směsi bez mezer při dané zkušební teplotě. Pro stanovení maximální objemové hmotnosti navržené směsi byl použit Postup A: Volumetrický postup, uvedený v normě *ČSN EN 12697-5 Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti* [23]. Maximální objemová hmotnost byla zjišťována na 3 pyknometrech s obsahem asfaltu 6,0 %, 6,5% a 7,0 %. Jako výplňová tekutina pyknometru bylo zvoleno rozpouštědlo tetrachlorethen ($Cl_2C=CCl_2$) o hustotě $1,6148 Mg/m^3$.

Princip zkoušky spočívá v určení 3 hmotností, z nichž se určí maximální objemová hmotnost asfaltové směsi ρ_{mv} podle vzorce $\rho_{mv} = \frac{m_2 - m_1}{1000 * (V_p - \frac{m_3 - m_2}{\rho_w})}$, kde

- m_1 hmotnost pyknometru v g ,
- m_2 hmotnost pyknometru a navážky v g ,
- m_3 hmotnost pyknometru, navážky a rozpouštědla v g ,
- V_p objem pyknometru v m^3 ,
- ρ_w hustota rozpouštědla při zkušební teplotě v kg/m^3 .

Podrobný postup zkoušky je uveden ve výše zmíněné normě. [23]



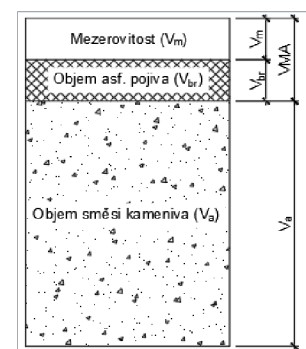
Obr. 19: Pyknometry v temperanční komoře

8.2.3 Mezerovitost

Pojmem mezerovitost se rozumí objem mezer zkušebního tělesa asfaltové směsi vyjádřený v procentech celkového objemu tohoto tělesa. Mezerovitost zkušebního tělesa (V_m) se vypočítá dle vzorce

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

- ρ_m maximální objemová hmotnosti směsi v kg/m^3 ,
- ρ_b objemová hmotnost zkušebního tělesa v kg/m^3 .



Obr. 20: Mezerovitost směsi kameniva (VMA) [24]

Pro brusné vrstvy vozovky je normou vyžadována mezerovitost (V_m) 2,5 % až 4,5 %. [7]

8.2.4 Stupeň vyplnění mezer

Stupeň vyplnění mezer (*VFB*) ve směsi kameniva obsaženého ve zkušebním tělese vychází z množství pojiva, mezerovitosti směsi kameniva a objemových hmotností pojiva a zkušebního tělesa. Stupeň vyplnění mezer se vypočítá ze vztahů $VFB = ((B * \rho_b / \rho_B) / VMA) * 100 \%$ a $VMA = V_m + B * \rho_b / \rho_B$, kde

<i>B</i>	obsah pojiva ve zkušebním tělese v %,
ρ_b	objemová hmotnost zkušebního tělesa v kg/m^3 ,
ρ_B	objemová hmotnost pojiva v kg/m^3 ,
<i>VMA</i>	mezerovitost směsi kameniva v %,
V_m	mezerovitost zkušebního tělesa.

Pro asfaltové směsi do obrusné vrstvy vozovky norma vyžaduje stupeň vyplnění mezer (*VFB*) mezi 75 % a 83 %. [7] Určení mezerovitosti a stupně vyplnění mezer se řídí normou ČSN EN 12697-8 *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 8: Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí*. [24]

8.2.5 Míra zhutnění

Mírou zhutnění asfaltové směsi se rozumí poměr objemové hmotnosti vzorku, pro nějž je míra zhutnění zjišťována a objemové hmotnosti referenčního vzorku stejné směsi vytvořeného v laboratoři. V této práci byla zjišťována míra zhutnění jednotlivých asfaltových desek pro výrobu zkušebních vzorků. Objemová hmotnost referenčního vzorku je průměrem objemových hmotností Marshallových těles s obsahem asfaltu 6,50 %, zhutněných Marshallovým zhutňovačem při 2 x 50 úderech dle normy ČSN EN 12697-30 *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem*. [25] Norma ČSN 73 6121 *Stavba vozovek - Hutněné asfaltové vrstvy - Provádění a kontrola shody* [26] vyžaduje míru zhutnění provedené směsi obrusné vrstvy vozovky na stavbě min. 98 %.

8.3 Funkční zkoušky asfaltových směsí

Na navržené směsi byly provedeny následující funkční zkoušky:

- stanovení odolnosti zkušebního tělesa vůči vodě (ITSR)
- zkouška pojíždění kolem
- stanovení modulů tuhosti asfaltové směsi
- stanovení únavy asfaltové směsi
- zkouška odolnosti asfaltové směsi vůči nízkým teplotám

Funkční zkoušky jsou takové zkoušky, které simulují reálné namáhání směsi ve vozovce v podmínkách laboratoře. Tyto zkoušky jsou často urychlené, oproti reálnému působení, a dosahují mezních stavů, které ve vozovce za dobu její působnosti obvykle ani nevyskytnou. Stručný popis použitých funkčních zkoušek je uveden v následujících odstavcích.

8.3.1 Stanovení odolnosti zkušební tělesa vůči vodě (ITSR)

Odolností zkušebních těles vůči vodě se rozumí poměr pevností v tlaku (příčném tahu) mezi skupinou mokrých a suchých těles vyjádřený v procentech. Zkouška byla provedena na dvou skupinách Marshallových těles s minimálně 3 tělesy ve skupině a s objemovou hmotností těles lišící se max. o 15 kg/m³. Marshallova tělesa byla hutněna pomocí Marshallova rázového zhutňovače, a to 25 údery z každé strany. Postup zkoušky byl proveden podle metody a uvedené v normě ČSN EN 12697-12 *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 12: Stanovení odolnosti zkušební tělesa vůči vodě* [27]. V následujících odstavcích je uveden pouze stručný popis zkoušky.

Skupina mokrých těles se nejprve ponořila do destilované vody a uzavřela se do vakuové komory po dobu 70 minut, přičemž prvních 10 minut se tlak v komoře snižoval na 6,7 kPa a posledních 30 minut se naopak do komory vpouštěl atmosférický tlak. Tento proces probíhá při konstantní teplotě 20±5 °C. Poté je skupina mokrých těles přesunuta do temperační komory, kde se nechávají temperovat při teplotě 40±1 °C po dobu následujících 68 h až 72 h.

Skupina suchých těles se nechává temperovat na vzduchu při laboratorní teplotě 20±5 °C po stejnou dobu jako skupina mokrých těles.

Po ukončení dlouhodobého temperování obou skupin zkušebních těles se tyto skupiny nechají temperovat další 2 h při teplotě 15 °C. Následně dochází k samotnému stlačení vzorku v lisu, ve kterém se provede zkouška pevnosti v příčném tahu v časovém intervalu do 1 minuty od vytažení tělesa z temperační komory. Výsledkem zkoušky je poměr pevností těles mokrých a suchých, o shodné či podobné objemové hmotnosti a výšce, uváděný v procentech vypočtený ze vzorce

$$ITSR = 100 * \frac{ITS_w}{ITS_d}, \text{ kde}$$

$ITSR$ poměr pevnosti v příčném tahu v %,

ITS_w průměrná pevnost v příčném tahu skupiny mokrých zkušebních těles v kPa ,

ITS_d průměrná pevnost v příčném tahu skupiny suchých zkušebních těles v kPa .



Obr. 22: Zkušební těleso v lisu při zkoušce ITSR



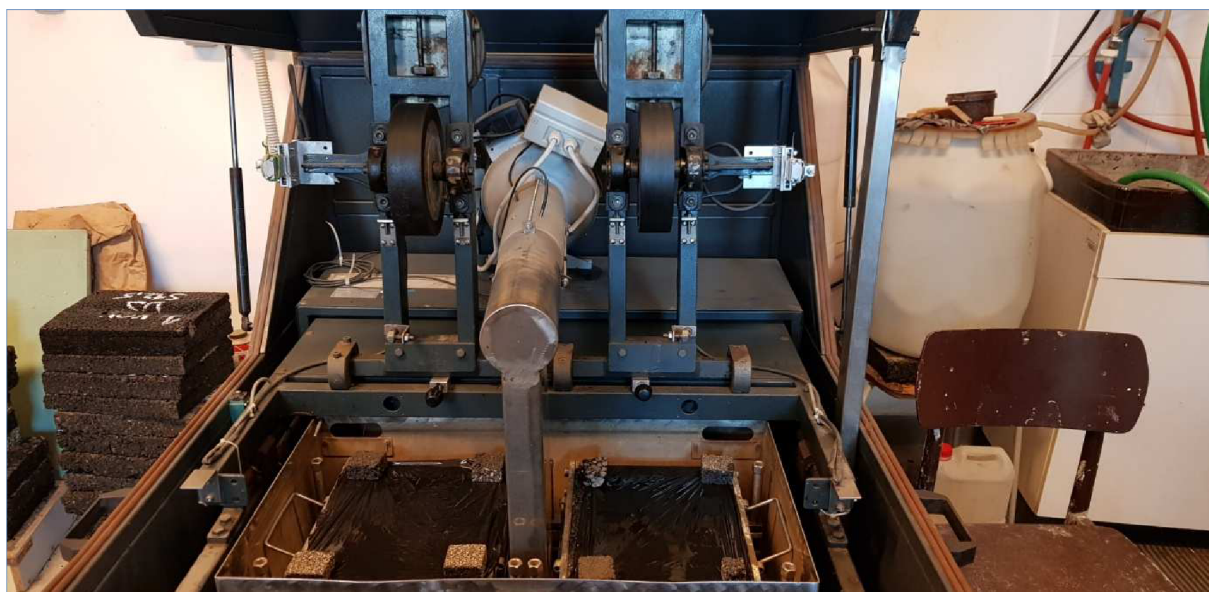
Obr. 21: Skupina mokrých zkušebních těles

8.3.2 Zkouška pojíždění kolem

Zkouška pojíždění kolem byla provedena dle normy ČSN EN 12697-22+A1 *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 22: Zkouška pojíždění kolem* [28]. Postup zkoušky spočívá ve vytemperování vytvořeného ztuhlého vzorku asfaltové směsi o rozměrech 260 mm x 320 mm a výšce 50 mm na teplotu 50 °C po dobu 24 h. Po 24 hodinách je zkušební vzorek umístěn do zařízení pro vyjíždění kolejí, taktéž vytemperovaného na 50 °C. Po přiložení zkušebního kola na povrch vzorku je spuštěn pojížděcí cyklus a zkušební vzorek je pojížděn celkem 10 000 cykly. Výsledkem zkoušky je hloubka vyjeté koleje v asfaltové směsi po 10 000 cyklech, ze které se určí charakteristiky směsi WTS_{AIR} a PRD_{AIR} .

Průměrný přírůstek vyjeté koleje na vzduchu, WTS_{AIR} v mm, se vypočte podle vzorce $WTS_{air} = \frac{d_{10\,000} - d_{5\,000}}{5}$, kde $d_{10\,000}$ a $d_{5\,000}$ označují hloubku vyjeté koleje po 10 000, resp. 5 000 cyklech v mm.

Označení PRD_{AIR} v mm charakterizuje maximální poměrnou hloubku koleje po 5 000 cyklech při pojezdu kolem na vzduchu a její maximální hodnota, stejně jako maximální hodnota WTS_{AIR} je uvedena v normě ČSN EN 13108-1 [7].



Obr. 23: Zařízení pro zkoušku poježdění kolem

8.3.3 Stanovení modulů tuhosti asfaltové směsi

Zkouška tuhosti se řídí normou ČSN EN 12697-26 *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 26: Tuhost* [29]. Pro zkoušku bylo potřeba připravit zkušební tělesa - trapezoidy. Postup výroby těchto těles je popsán v kapitole 9.3.4 *Výroba zkušebních vzorků*.

Jedná se o dvoubodovou zkoušku ohybem na vetknutém komolém klínu. Zkušební tělesa jsou přilepena vysokopevnostním lepidlem za spodní - širší plochu trapezoidu, čímž je docíleno statického působení typu vetknutí. Horní, volný konec trapezoidu je namáhán vynuceným ustáleným harmonickým sinusovým kmitáním (silou) po dobu 2 minut při průhybu odpovídajícímu přetvoření maximálně 50 mikrostrainů. Komplexní modul tuhosti byl zkoušen při teplotách -5 °C, 10 °C, 15 °C, 25 °C a 40 °C a frekvencích 1 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz, 27 Hz a 30 Hz. Každé zkoušené teplotě předcházela temperace vzorku na danou teplotu, po dobu min. 4 h. Výsledné hodnoty

modulů tuhosti se získají ze vzorců $E_1 = \gamma * \left(\frac{F}{z} * \cos(\varphi) + \frac{\mu}{10^3} * \omega^2 \right)$ a $E_2 = \gamma * \left(\frac{F}{z} * \sin(\varphi) \right)$, kde

- E_1 reálná složka modulu tuhosti v Pa,
- E_2 imaginární složku modulu tuhosti v Pa,
- γ faktor tvaru,
- μ faktor hmotnosti,
- F vyvozená síla v N,
- z posun v mm,
- φ fázový úhel ve stupních,
- ω úhlová frekvence v s⁻¹.



Obr. 24 a 25: Zkušební zařízení „Cooper“ pro zkoušku modulů tuhosti a únavy asfaltových směsí

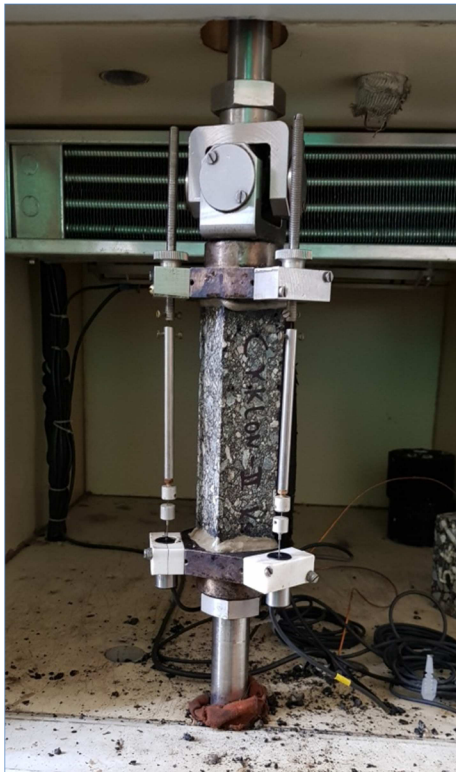
8.3.4 Stanovení únavy asfaltové směsi

Zkouška stanovení únavy asfaltové směsi byla provedena dle normy ČSN EN 12697-24 *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 24: Odolnost vůči únavě* [30]. Zkouška probíhá ve stejném zařízení a se stejným typem vzorku jako zkouška modulů tuhosti. Na rozdíl od zkoušky modulů tuhosti probíhá únavová zkouška při dané konstantní teplotě +25 °C a frekvenci kmitání 10 Hz. Na začátku zkoušky je na zařízení nastavena počáteční výchylka. Po spuštění zkoušky je vzorek namáhán silou, a to až do porušení vzorku, přičemž samotné měření probíhá pouze do doby, při níž je dosaženo poklesu komplexního modulu tuhosti na 1/2 jeho počáteční hodnoty.

Vyhodnocením zkoušky je závislost počtu cyklů při porušení vzorku na počáteční výchylce, a to v logaritmickém měřítku. Výsledky se vynášejí do tzv. Wöhlerova únavového diagramu a zjišťuje se výsledná hodnota počátečního přetvoření při 1 milionu cyklů z regresní přímky proložené zjištěnými hodnotami. Minimální počet těles pro provedení zkoušky je 18, a je třeba naměřit minimálně 1/3 výsledků při porušení pod 1 milionem cyklů a 1/3 výsledků při porušení nad 1 milionem cyklů. V rámci této práce bylo zkoušeno celkem 20 zkušebních těles.

8.3.5 Zkouška odolnosti asfaltové směsi vůči nízkým teplotám

Tato zkouška je popsána v normě ČSN EN 12697-46 *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 46: Nízkoteplotní vlastnosti a tvorba trhlin pomocí jednoosé zkoušky tahem* [31]. Zkouška se provádí v zařízení zvaném Cyklon, vyvinutého odborníky z fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně. Zkušební těleso asfaltové směsi má tvar kvádrů o rozměrech 50 x 50 x 200 mm. Toto těleso je poté oboustranně pevně upnuto ve zkušebním zařízení a postupně ochlazováno rovnoměrným snižováním teploty ve zkušební komoře. Teplota klesající rychlostí 10 °C/hod zapříčiňuje smršťování zkušebního tělesa, kterému je zabráněno zkracovat svoji délku ($\epsilon_t = 0$). Díky tomu je do tělesa vznášena tahová síla resp. tahové napětí, které způsobí jeho porušení. Výsledkem této zkoušky je hodnota maximální tahové síly, maximálního tahového napětí a kritická teplota vzorku při porušení – vzniku mrazové trhliny. [32]



Obr. 26: Chladičí komora zařízení Cyklon se zkušebním vzorkem



Obr. 27: Porušený vzorek ze zkoušky nízkoteplotních vlastností

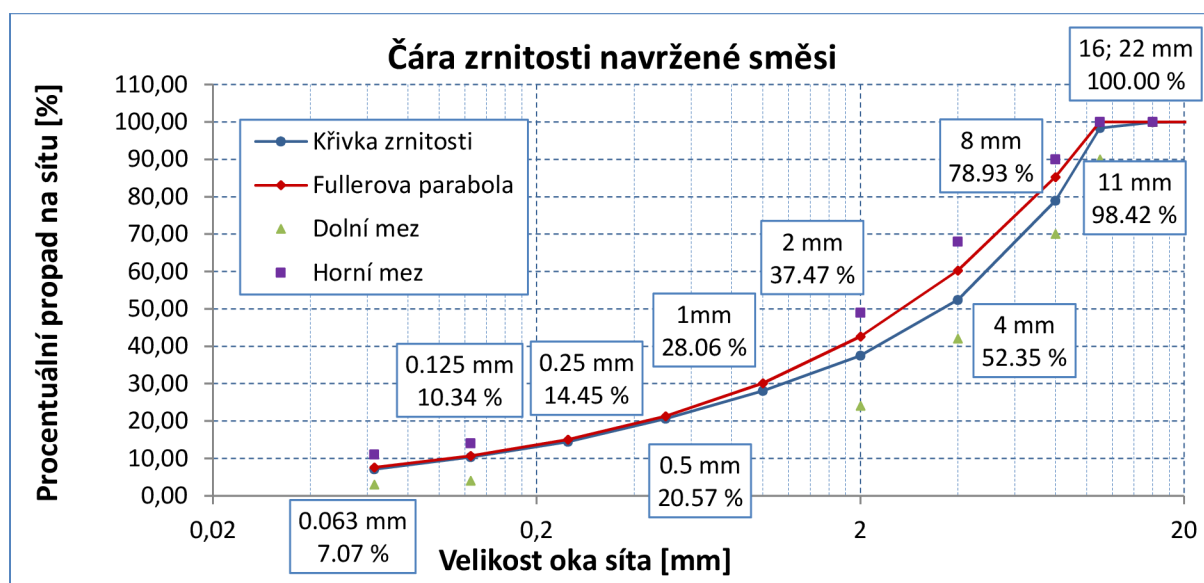
Praktická část

9 Návrh asfaltové směsi

Návrh složení asfaltové směsi se skládá ze tří základních kroků. Jednotlivé kroky návrhu a navržené hodnoty jsou popsány v následujících dvou podkapitolách 9.1 *Návrh čáry zrnitosti* a 9.2 *Návrh množství pojiva*.

9.1 Návrh čáry zrnitosti

Jak již bylo zmíněno v kapitole 6.3 *Čára zrnitosti*, návrh čáry zrnitosti vychází z tvaru Fullerovy paraboly. Pro asfaltový beton (AC) obecně platí, že by navržená křivka měla procházet pod Fullerovou parabolou. Díky tomu dojde k lepšímu zaklínění zrn hrubších frakcí, a tudíž k vytvoření pevnější kostry kameniva, která lépe odolává tvorbě trvalých deformací. Křivka zrnitosti je navržena v mezích pro ACO 11 +, požadovaných v normě ČSN EN 13108-1 [7]. V níže uvedeném grafu je zobrazena čára zrnitosti navržené asfaltové směsi. [33]



Graf 2: Čára zrnitosti navržené směsi

9.2 Návrh množství pojiva

Postup návrhu množství pojiva asfaltové směsi lze rozdělit na návrh teoretického a návrh optimálního množství pojiva. Nejprve je proveden návrh teoretického a poté optimálního množství pojiva. Návrhy množství pojiva v asfaltové směsi jsou popsány v následujících podkapitolách 9.2.1 *Teoretické optimální množství pojiva* a 9.2.2 *Navržené množství pojiva*. Při návrhu množství pojiva se postupovalo podle normy ČSN EN 73 6160 *Zkoušení asfaltových směsí*. [34]

9.2.1 Teoretické optimální množství pojiva

Návrh teoretického optimálního množství pojiva lze stanovit dle vzorce, pomocí součinitele sytosti n a měrného povrchu kameniva ε , nebo podle zkušeností.

Teoretické optimální množství pojiva p dle vzorce se stanoví jako $p = n * \sqrt[5]{\varepsilon}$, kde

n je součinitel sytosti (pro obrusné vrstvy se $n=3,4$),

ε měrný povrch kameniva v m^2/kg .

Měrný povrch kameniva ε se vypočte dle vzorce

$$\varepsilon = 0,01 * (0,174 * G + 0,4 * g + 2,3 * S + 15,33 * s + 140 * f), \text{ kde}$$

G odpovídá podílu kameniva v % hmotnosti, které zadrží síto 8,

g podílu kameniva v % hmotnosti, které propadne sítem 8 a je zadrženo sítem 4,

S podílu kameniva v % hmotnosti, které propadne sítem 4 a je zadrženo sítem 0,25,

s podílu kameniva v % hmotnosti, které propadne sítem 0,25 a je zadrženo sítem 0,063,

f podílu kameniva v % hmotnosti, které propadne sítem 0,063.

V této práci bylo použito návrhu teoretického optimálního množství pojiva podle zkušeností po konzultaci s vedoucím práce jako 6,5 % z hmotnosti směsi.

9.2.2 Navržené množství pojiva

Jedná se o interval množství pojiva, který se určí na základě zkoušek objemových charakteristik asfaltové směsi a porovnáním těchto charakteristik s normovými hodnotami. Za tímto účelem byly vytvořeny tři sady zkušebních těles po třech tělesech, s obsahem asfaltu odstupňovaným po 0,5 %. První sada obsahovala množství pojiva 6,0 %, prostřední sada obsahovala teoretické množství pojiva 6,5 % a poslední sada obsahovala 7,0 % množství pojiva z hmotnosti směsi. [33]



Obr. 28: Tři sady Marshallových těles s rozdílným množstvím asfaltového pojiva

Z výsledků objemových zkoušek uvedených v kapitole 10 *Výsledky zkoušek vlastností asfaltových směsí* bylo navrženo množství pojiva jako 6,5 % z celkové hmotnosti směsi – stejně, jako teoretické optimální množství pojiva.

9.3 Příprava asfaltové směsi

Přípravu asfaltové směsi lze rozdělit do čtyř základních kroků. Nejprve bylo nutné namíchat asfaltovou směs v menším množství pro přípravu Marshallových těles s různým množstvím asfaltového pojiva, z jejichž zkoušek bylo navrženo množství pojiva. Poté byla namíchána asfaltová směs s navrženým množstvím pojiva pro přípravu zkušebních těles. Tato směs byla následně zhutněna na tělesa - desky o rozměrech 260 mm x 320 mm a výšce okolo 50 mm. Na závěr byla z těchto desek nařezána a zabroušena zkušební tělesa potřebná na jednotlivé funkční zkoušky asfaltových směsí, popř. byly zkoušeny přímo zhutněné desky.

Výsledná procentuální skladba kameniva, ze které byla vytvořena navrhovaná směs, je uvedena v následující tabulce. Jedná se však pouze o 50 % celkové hmotnosti kameniva. Druhá polovina je obsažena v dávkovaném R-materiálu, jak je uvedeno v posledním řádku této tabulky.

Frakce	Procentuální množství [%]	Průběžný součet [%]
filler	2	2
0-2	4	6
2-4	7	13
4-8	15	28
8-11	22	50
R-mat	50	100

Tab. 6: Procentuální zastoupení frakcí kameniva ve směsi

9.3.1 Hutnění Marshallových těles

Marshallovo těleso má tvar válce o průměru 101,5±0,1 mm a výšku 63,5±2,5 mm. Hutnění Marshallových těles proběhlo na Marshallově rázovém zhutňovači dle normy ČSN EN 12697-30 [25]. Marshallova tělesa pro zkoušky objemových vlastností směsi byla hutněna pomocí 50 rázů z každé strany. Pro zvolení optimálního množství směsi na výrobu Marshallových těles bylo vytvořeno 1 zkušební těleso, podle kterého byla poté upravena navážka pro ostatní tělesa.

Výjimku tvořila Marshallova tělesa určená pro zkoušku odolnosti proti působení vody, která byla dle ČSN EN 12697-12 [27] hutněna pouze 25 rázy z každé strany.

Na obrázcích níže je zobrazen použitý Marshallův zhutňovač a hutní forma pro výrobu Marshallových těles.



Obr. 29: Marshallův zhutňovač



Obr. 30: Forma na výrobu Marshallových těles

9.3.2 Míchání směsi

Míchání směsi probíhalo v míchačce s ohřevem po dobu požadovanou normou (5 minut). Pro řádné promíchání směsi byla směs následně promíchána manuálně. V níže uvedené tabulce jsou vypsané jednotlivé teploty ohřevu všech použitých materiálů a teplota míchání a hutnění asfaltové směsi.

Materiál	Teplota [°C]
Kamenivo	215
Asfaltové pojivo	175
R-materiál	135
Asfaltová směs - míchání	175
Asfaltová směs - hutnění	165

Tab. 7: Teploty materiálů a asfaltové směsi



Obr. 31: Míchačka asfaltových směsí

9.3.3 Hutnění směsi

Směs byla hutněna pomocí hutnického zařízení s ocelovou válcovou hutnicí plochou. Tento tvar hutnicí plochy simuluje pojezd hutnického válce při pokládce asfaltové směsi. Pro účely práce bylo zhutněno 9 desek o rozměrech 260 mm x 320 mm. Výšky desek byly voleny v závislosti na požadovaném dalším zpracování desky – například na výrobu trapezoidů. Výšky desek se pohybovaly cca mezi 40 mm až 60 mm. Jednotlivé míry zhutnění desek jsou uvedeny v podkapitole 10.5 *Míra zhutnění*. Na následujících obrázcích je zobrazeno hutnické zařízení a namíchaná směs připravená k hutnění.



Obr. 32: Připravená směs na hutnění

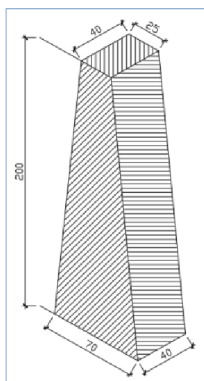


Obr. 33: Hutnické zařízení

9.3.4 Výroba zkušebních těles

V rámci této práce bylo vytvořeno několik druhů zkušebních těles pro jednotlivé zkoušky. Většina zkušebních těles připravených pro zkoušky asfaltové směsi byla vyřezána ze zhutněných asfaltových desek zmíněných v podkapitole 9.3.3 *Hutnění směsi* a zabroušena na přesné rozměry pomocí brusky. Zbývající tělesa byla vytvořena Marshallovým rázovým zhutňovačem.

Pro zkoušky tuhosti a odolnosti vůči únavě zapotřebí vyrobit tělesa ve tvaru komolých klínu – **trapezoidy**. Celkem bylo v rámci práce vytvořeno a odzkoušeno 20 zkušebních těles. Rozměry trapezoidu jsou uvedeny na přiloženém schématu.

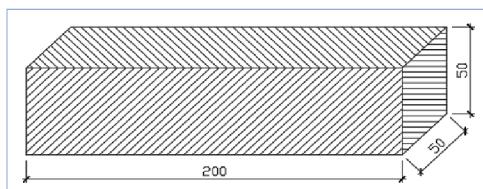


Obr. 36: Schéma trapezoidu



Obr. 35: Skupina vyrobených trapezoidů

Tělesa v podobě trámečků o rozměrech podstavy 50 mm x 50 mm a výšce 200 mm byly použity na zkoušku nízkoteplotních vlastností směsi. Celkem bylo v rámci práce vytvořeno a odzkoušeno 5 trámců.

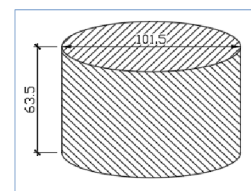


Obr. 37: Schéma trámce



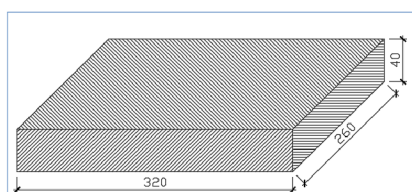
Obr. 38: Trámce na zkoušku nízkoteplotních vlastností

Na prvních třech sadách Marshallových těles se zjišťovala objemová hmotnost směsi a návrhové množství pojiva a na další sadě těles byla prováděna zkouška ITSr. Pro zkoušky uvedené v této práci bylo vypracováno přes 20 kusů Marshallových těles.



Obr. 39: Schéma Marshallova tělesa

Při zkoušce pojíždění kolem byly použity 2 zhutněné desky s výškou 40 mm přímo jako zkušební vzorky.



Obr. 40: Schéma zhutněné desky



Obr. 41: Zhutněné desky

10 Výsledky zkoušek vlastností asfaltové směsi

V následujících podkapitolách jsou uvedeny naměřené výsledky navržené směsi. U zkoušek s větším množstvím naměřených dat, jedná se například o objemové hmotnosti, jsou uvedeny pouze reprezentativní či průměrné hodnoty. Veškeré naměřené výsledky zkoušek jsou uvedeny v jednotlivých přílohách této práce.

10.1 Objemová hmotnost

10.1.1 Objemové hmotnosti Marshallových těles

Objemové hmotnosti byly určovány na vždy na třech Marshallových tělesech se stejným množstvím asfaltového pojiva. Průměrná objemová hmotnost je určena na dvou tělesech s podobnou objemovou hmotností, přičemž objemová hmotnost třetího tělesa nebyla uvažována do průměru.

Množství celkového asfaltu [%]	Průměrná objemová hmotnost [kg/m ³]
6,0	2461
6,5	2468
7,0	2477

Tab. 8: Průměrné objemové hmotnosti Marshallových těles

Naměřené hodnoty, sloužící pro výpočet objemových hmotností Marshallových těles z tabulky č. 8 a těles určených na zkoušku odolnosti vůči vodě, jsou uvedeny v příloze č. 4 této práce.

10.1.2 Objemové hmotnosti zhutněných desek

Objemové hmotnosti zhutněných desek s návrhovým množstvím pojiva (6,50 %) jsou uvedeny v tabulce č. 9. Jedná se o objemové hmotnosti desek použitých na výrobu zkušebních těles a desek určených na zkoušku pojíždění kolem. Průměrná objemová hmotnost zhutněných desek navržené směsi je 2480 kg/m³ a byla získána z pěti zhutněných desek určených k výrobě zkušebních těles (D-I až D-V) a dvou desek určených na zkoušku pojíždění kolem (D-kolo-I a D-kolo-II).

Název desky	Objemová hmotnost [kg/m ³]
D-kolo-I	2485
D-kolo-II	2484
D-I	2480
D-II	2476
D-III	2476
D-IV	2487
D-V	2475

Tab. 9: Objemové hmotnosti zhutněných desek

Jednotlivé dílčí mezivýsledky, kterými jsou například hmotnosti desek, jsou uvedeny v příloze č. 5 této práce.

10.2 Maximální objemová hmotnost

Vypočtená maximální objemová hmotnost byla zjišťována pomocí pyknometrů a je uvedena v tabulce č. 10. Naměřené hodnoty sloužící k výpočtu maximální objemové hmotnosti jsou uvedeny v příloze č. 6 této práce.

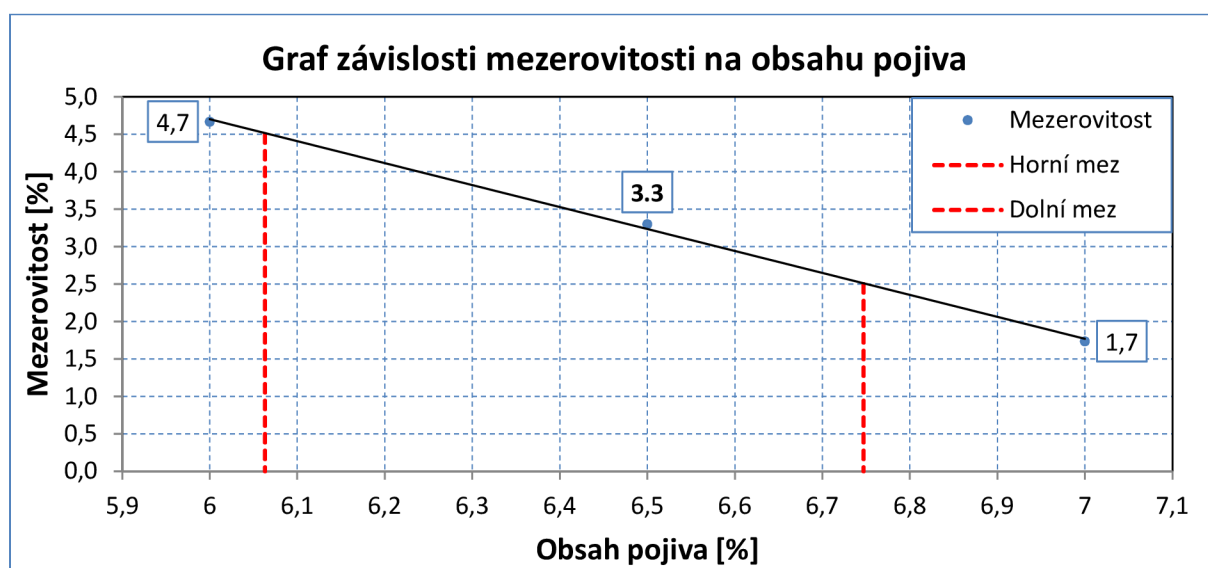
Název desky	Objemová hmotnost [kg/m ³]
Pyknometr 6,0 %	2575
Pyknometr 6,5 %	2552
Pyknometr 7,0 %	2521

Tab. 10: Maximální objemové hmotnosti

10.3 Mezerovitost a stupeň vyplnění mezer

10.3.1 Mezerovitost

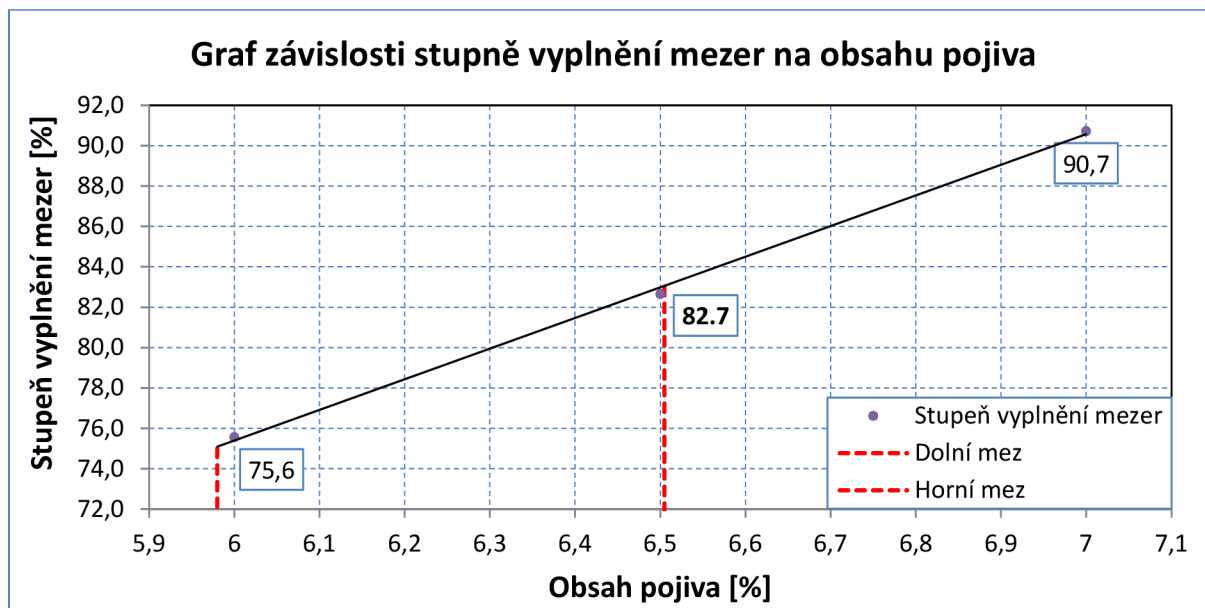
Mezerovitosti asfaltové směsi s obsahem pojiva 6,0 %, 6,5 % a 7,0 % jsou uvedeny níže v grafu č. 3. Zároveň je v grafu vyznačena maximální a minimální mez mezerovitosti asfaltové směsi pro směs ACO 11 + udávaná normou ČSN EN 13108-1. [7]



Graf 3: Graf závislosti mezerovitosti na obsahu pojiva

10.3.2 Stupeň vyplnění mezer

Stupně vyplnění mezer asfaltové směsi s obsahem pojiva 6,0 %, 6,5 % a 7,0 % jsou uvedeny níže v grafu č. 4. Zároveň je v grafu vyznačena maximální a minimální mez stupně vyplnění mezer asfaltové směsi pro směs ACO 11 + udávaná normou ČSN EN 13108-1. [7]



Graf 4: Graf závislosti stupně vyplnění mezer na obsahu pojiva

Z grafů č. 3 a č. 4 vyplývá, že teoretické optimální množství pojiva se pohybuje mezi 6,3 % až 6,5 %. Po konzultaci s vedoucím práce a ze zkušeností se směsmi obsahujícími asfaltové pojivo modifikované pryžovým granulátem bylo zvoleno návrhové množství pojiva u horní meze, a to 6,5 %.

Hodnoty mezerovitosti, stupně vyplnění mezer pojivem a mezerovitosti směsi kameniva jednotlivých sad s odlišným množstvím pojiva jsou uvedeny v tabulkách v příloze č. 7 této práce.

10.4 Míra zhutnění

Míra zhutnění jednotlivých desek je uvedena v tabulce č. 11. Jedná se poměr objemové hmotnosti zhutněné desky vůči průměrné objemové hmotnosti Marshallových těles. Průměrná objemová hmotnost Marshallových těles navržené směsi je 2468 kg/m³ a je uvedena v tabulce č. 8.

Název desky	Míra zhutnění [%]
D-kolo-I	100,7
D-kolo-II	100,7
D-I	100,5
D-II	100,3
D-III	100,3
D-IV	100,8
D-V	100,3

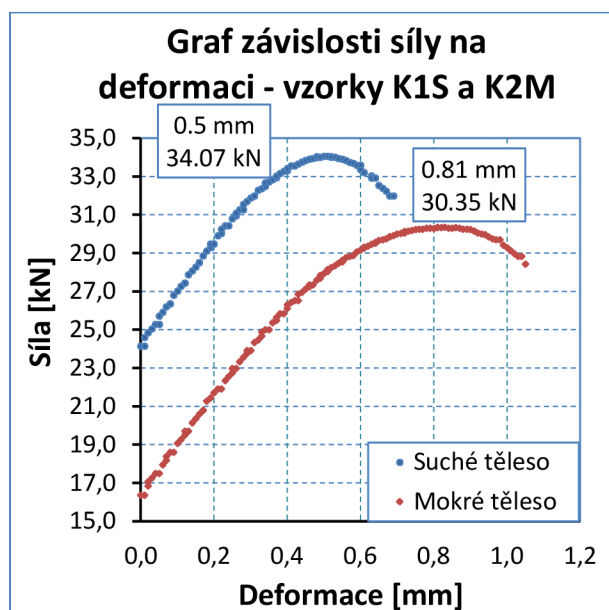
Tab. 11: Míry zhutnění asfaltových desek

11 Výsledky funkčních zkoušek

V podkapitolách 11.1 až 11.5 jsou uvedeny hlavní výsledky funkčních zkoušek navržené asfaltové směsi. Veškeré naměřené hodnoty z těchto zkoušek jsou uvedeny v přílohách č. 8 až č. 10 této práce.

11.1 Stanovení odolnosti zkušebního tělesa vůči vodě (ITSR)

V grafu č. 5 uvedeného níže je zobrazen průběh závislosti síly na deformaci vzorků K1S a K2M při jejich deformování v lisu. Při zkoušce byly porovnávány vždy dvojice vzorků (suchý a mokrý) shodné, či velmi podobné objemové hmotnosti. Výsledný poměr pevností M/S v procentech je uveden v následující tabulce č. 12. Jedna dvojice vzorků byla z výsledků vyloučena z důvodu špatného umístění v lisu, což vedlo ke špatnému výsledku. Norma ČSN EN 13108-1 [7] vyžaduje pro ACO 11 + minimální poměr pevnosti v příčném tahu ITSR 70 % a pro ACO 11 S 80 %. Všechny sady těles tak vyhověly. Kompletní naměřené výsledky jsou uvedeny v příloze č. 8 této práce.



Graf 5: Graf závislosti síly na deformaci –
vzorky K1S a K2M

ITSR			
Označení vzorků	Pevnost suchá [kN]	Pevnost mokrá [kN]	Poměr pevností M/S [%]
K1S + K2M	34.07	30.35	89.08
K3S + K4M	30.55	26.05	85.27
K5S+K7M	31.59	31.11	98.48
K6S+K8M	28.75	28.05	97.57
Průměr	-	-	92.60

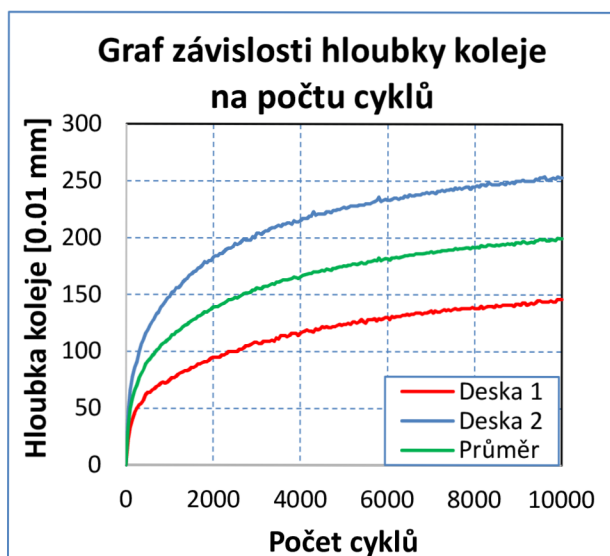
Tab. 12: Pevnostní poměr M/S – ITSR

11.2 Zkouška pojíždění kolem

Výsledkem této zkoušky jsou charakteristiky asfaltové směsi po zkoušce pojíždění kolem WTS_{air} a PRD_{air} , jejichž požadované hodnoty jsou dány normou ČSN EN 13108-1 [7]. Maximální přípustné hodnoty pro ACO 11 + určuje norma jako 0,07 pro WTS_{air} a 5 pro PRD_{air} . Naměřené hodnoty

hloubky koleje v závislosti na počtu cyklů jsou uvedeny v grafu č. 6 a vypočtené hodnoty WTS_{air} a PRD_{air} jsou uvedeny v tabulce č. 13.

V grafu lze vidět, že naměřené hloubky kolejí se u jednotlivých vzorků podstatně liší, i když se jedná o shodně vyrobené a ztuhnuté vzorky. Tento rozdíl byl nejspíš zapříčiněn nepřesností v zařízení na vyjždění kolejí (např.: rozdílné tření v ložiscích jednotlivých kol). Z tohoto důvodu je za výslednou hodnotu brán průměr z obou vzorků, a ne každá hodnota samostatně.



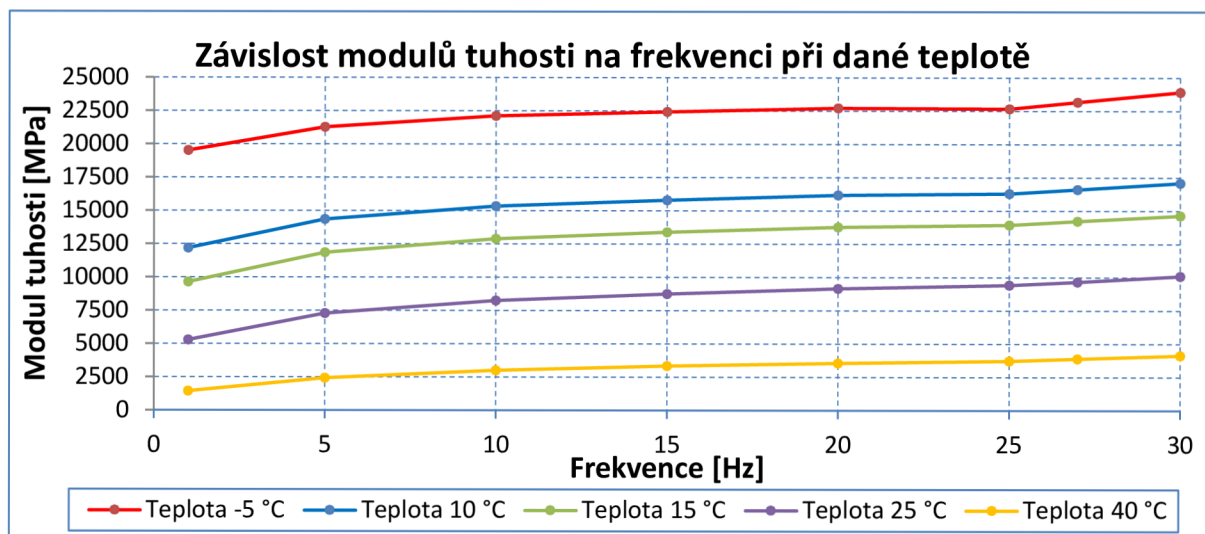
Graf 6: Graf závislosti hloubky koleje na počtu

	WTS_{air}	PRD_{air}
D-kolo-I	0,052	5,675
D-kolo-II	0,044	3,100
Průměr	0,048	4,390

Tab. 13: Hodnoty WTS_{air} a PRD_{air}

11.3 Stanovení modulů tuhosti asfaltové směsi

V grafu č. 7 jsou uvedeny hodnoty modulů tuhosti při dané teplotě v závislosti na frekvenci. V tabulce č. 15 jsou uvedeny hodnoty modulů tuhosti všech zkoušených vzorků při srovnávacích hodnotách – teplotě 15 °C a frekvenci 10 Hz. Podrobné naměřené hodnoty modulů tuhosti jsou uvedeny v příloze č. 9 této práce.



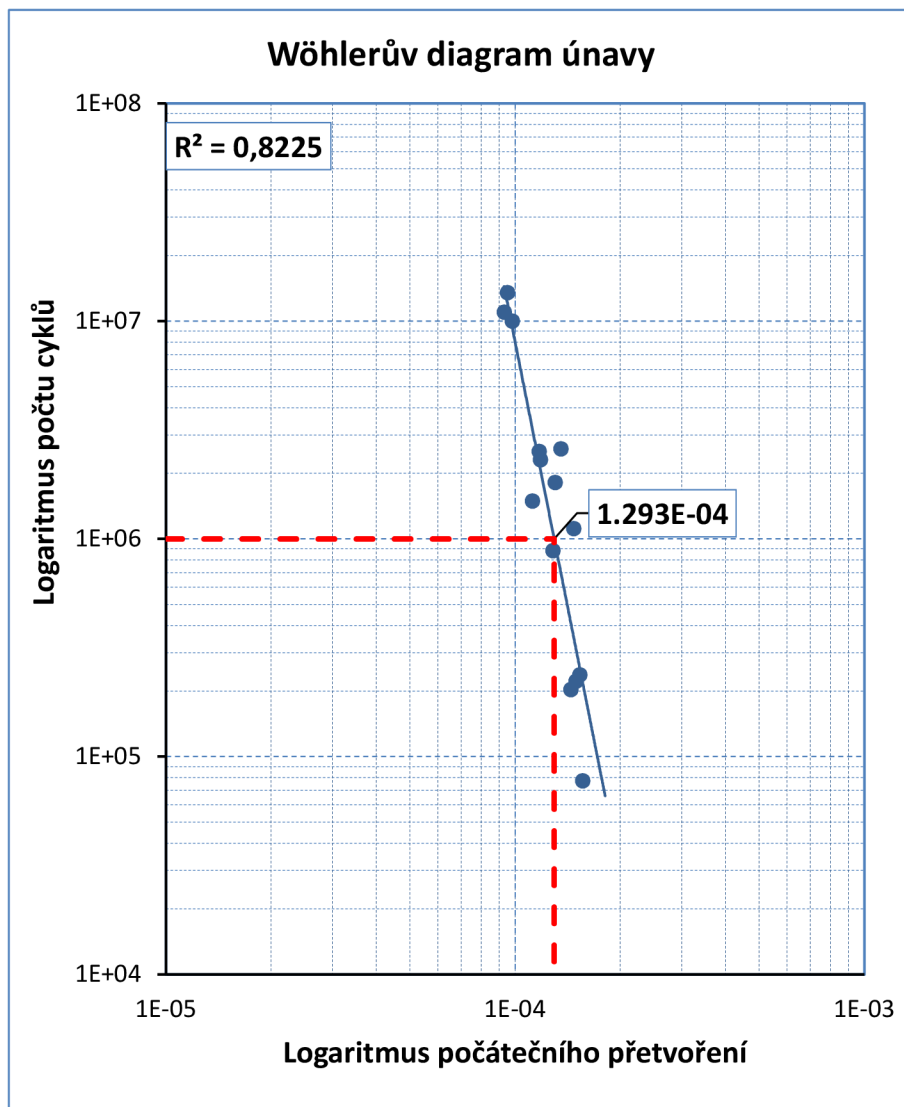
Graf 7: Závislost modulů tuhosti na frekvenci při dané teplotě

	Moduly tuhosti při teplotě 15 °C a frekvenci 10 Hz [MPa]											
Vzorek	D1-I	D1-II	D1-III	D1-IV	D2-I	D2-II	D2-III	D2-IV	D4-I	D4-II	D4-III	D4-IV
Modul tuhosti	12514	13223	12905	13294	11645	12564	12373	13155	12574	13835	13339	13013

Tab. 14: Moduly tuhosti při teplotě 15 °C a frekvenci 10 Hz

11.4 Stanovení únavy asfaltové směsi

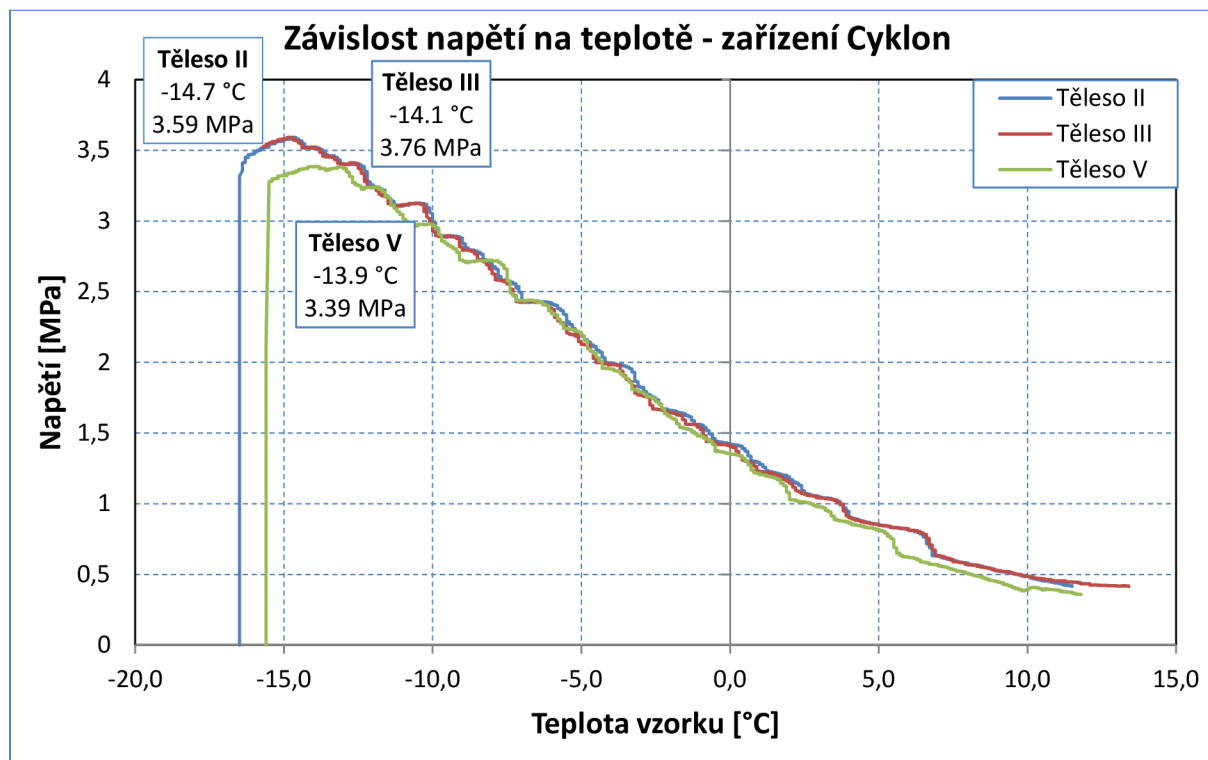
Měření únavy asfaltové směsi bylo provedeno celkem na 16 kusech trapezoidů s tím, že 4 vzorky byly vyřazeny z důvodu porušení jiným způsobem než únavou. V grafu č. 7 jsou uvedeny výsledky závislosti logaritmu počtu cyklů na logaritmu deformace celkem 14 vyhovujících vzorků. Výsledné poměrné přetvoření navržené směsi při milionu zatěžovacích cyklů byla vyhodnocena jako $\epsilon_6 = 129 \cdot 10^{-6}$.



Graf 8: Wöhlerův diagram únavy

11.5 Zkouška odolnosti asfaltové směsi vůči nízkým teplotám

Zkouška byla provedena celkem na 5 zkušebních trámcích. Z důvodu porušení 2 těles kroucením, byla tato tělesa vyřazena jako neplatná. Celkem tak byly použity výsledky 3 vyhovujících těles. V grafu č. 8 jsou uvedeny závislosti deformací a síly na teplotě působící na vzorek č. 2. Výsledky ostatních těles jsou uvedeny v příloze č. 10 této práce.



Graf 9: Závislost napětí na teplotě – zařízení Cyklon

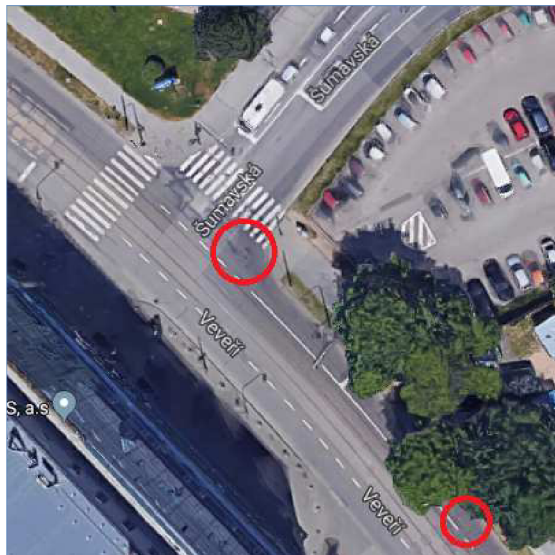
12 Zkušební úsek

Po provedení veškerých zkoušek na navržené asfaltové směsi byla snaha o zhotovení zkušebního úseku. Z důvodu časové, materiálové i organizační náročnosti bylo nakonec realizováno místo velkého zkušebního úseku několik menších vysrávek výtlučů. Celkem byly zhotoveny 3 rozlišné vysrávky, aby bylo možné nově navrženou směs porovnávat.

První vysrávka obsahuje pouze navrženou směs, působící jako obrusná vrstva. U druhé vysrávky byla použita navržená směs do vrstvy ložní a jako obrusná vrstva byla zvolena směs ACO 11+. Ve třetí vysrávce se pak nachází pouze asfaltová směs ACO 11+. Všechny tři vysrávky byly provedeny zároveň za stejných podmínek a zatížení na ně působící je velmi podobné, protože jsou všechny umístěny ve stejném úseku v rozpětí pár metrů. Na vysrávku pouze s navrženou směsí působí navíc brzdné a smykové síly od pneumatik automobilů, protože se nachází v místě křižovatky.

Toto místo bylo vybráno z důvodu maximalizace namáhání působícího na danou směs a vytvoření tak co nejneprůzračnějších podmínek.

Zkušební vysprávkování se nachází na ulici Veveří a její křižovatce s ulicí Šumavská v Brně. Vysprávkování bylo realizováno 11. dubna 2019, za slunečného počasí a okolní teplotě 14 °C. Na obrázcích 42 a 43 je zobrazeno umístění vysprávkování v mapě.



Obr. 42, Obr. 43.: Umístění zkušebních vysprávkování [35]

Na obrázcích 44 až 49 jsou zobrazeny fotografie z provádění vysprávkování s navrženou směsí.



Obr. 44 až Obr. 49: Příprava a pokládka zkušební vysprávkování

13 Shrnutí cílů a závěr

Tato práce měla několik cílů, a to: navrhnout, vyrobit, vyzkoušet a položit unikátní asfaltovou směs. S hrdostí musím konstatovat, že veškeré tyto cíle se mi podařilo úspěšně splnit.

Navržená směs z hlediska použití R-materiálu odporuje současným zkušenostem a technickým předpisům. Obsahuje vysoký podíl R-materiálu (50 %) a neobsahuje žádné, doporučované, změkčující přísady asfaltu (rejuvenátory). Asfalt 70/100 použitý do směsi byl v tomto případě pouze modifikován pryžovým granulátem.

Pro přehlednost zde uvádím tabulku č. 15, která obsahuje všechny důležité charakteristiky navržené směsi.

Vlastnost asfaltové směsi	Hodnota vlastnosti asfaltové směsi	
Mezerovitost	$V_m = 3,3 \%$	
Stupeň vyplnění mezer	VFB = 82,7 %	
Obsah pojiva	B = 6,5 %	
Poměr pevností v příčném tahu	ITSR = 92 %	
Modul tuhosti	$E \approx 12\,870 \text{ MPa}$	
Odolnost vůči únavě	$\varepsilon_6 = 129 \cdot 10^{-6}$	
Odolnost vůči nízkým teplotám	$T \approx -14.2 \text{ °C}$	$R^+ \approx 3,58 \text{ MPa}$
Pojíždění kolem	$WTS_{\text{air}} \approx 0,05$	$PRD_{\text{air}} \approx 4,40$

Tab. 15: Charakteristiky směsi

Z této práce je zřejmé, že navržená směs splňuje požadavky pro posouzení směsi empirickými i funkčními parametry. Musím konstatovat, že počáteční pesimistické obavy vyplývající z dosavadních zkušeností a předpisů nebyly naplněny.

Oproti směsi ACO 11 + má tato směs vyšší odolnost vůči únavě, téměř dvojnásobný modul tuhosti a i ostatní zkoušky vycházejí poměrně dobře. Na druhou stranu, takto vysoký modul tuhosti je pro obrusnou vrstvu až příliš nepříznivý, vrstva se stává křehčí a zároveň dosahuje nižší odolnosti vůči nízkým teplotám oproti směsi ACO 11 +. Tyto vlastnosti jsou zapříčiněny vysokým obsahem R-materiálu (50 %) tvořeného tvrdším asfaltem a použitím asfaltu bez změkčovadel (rejuvenátorů).

V této práci jsem se však snažil použít extrémní hodnotu obsahu R-materiálu ve směsi s cílem dokázat, že i větší množství R-materiálu není v asfaltové směsi pro obrusnou či ložní vrstvu nevhodné. Věřím, že při použití maximálního dovoleného množství R-materiálu pro obrusnou vrstvu uváděného

v plánované revizi normy (35 %), klesne modul tuhosti a zároveň dojde i ke zlepšení nízkoteplotních vlastností. Bohužel, k takovéto optimalizaci směsi jsem se již z převážně časových důvodů nedostal, ale rád bych se touto problematikou zabýval i nadále. Do budoucna bych rád pokračoval ve výzkumu směsí s vysokým obsahem R-materiálu a možnostmi změkčení (rejuvenátory, různé oleje,...) a modifikací asfaltového pojiva (pryžovým granulátem, polymery,...).

Cíle týkající se zvýšení povědomí jsem naplnil a snažím se je stále plnit, například úspěšným umístěním ve fakulním kole Studentské vědecké a odborné činnosti (1. místo v sekci dopravní stavby) a účastí v celostátním kole ve slovenské Žilině. Budu se snažit prosadit používání recyklace a R-materiálu při opravách či výstavbě českých silnic i nadále.

Poděkování

Úplným závěrem bych chtěl poděkovat svým rodičům a prarodičům za podporu a odborné rady, svému vedoucímu práce panu prof. Ing. Janu Kudrnovi, CSc., že mně umožnil zpracovat dané téma a podporoval mě v dané problematice, centru AdMaS a všem členům laboratoře Ústavu pozemních komunikací za věcné připomínky a možnost využít veškeré prostory a vybavení k realizaci této práce. V neposlední řadě děkuji také společnosti Brněnské komunikace a.s., že mi umožnila a pomohla vytvořit zkušební vysprávky s navrženou směsí.

Seznam citované a použité literatury

[1] ČSN EN 73 6160 – Zkoušení asfaltových směsí. Praha : ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2008. 8590963807942.

[2] Bitumen Price Chart. *TRADING ECONOMICS*. [Online] TRADING ECONOMICS, 2019. [Citace: 12. 03 2019.] <https://tradingeconomics.com/commodity/bitumen>.

[3] User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction. *Federal Highway Administration Research and Technology*. [Online] U.S. Department of Transportation, 2016. [Citace: 12. 03 2019.]

<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/rap131.cfm>. FHWA-RD-97-148.

[4] Asfalt modifikovaný pryžovým granulátem – tichý a ekologický kryt vozovek nové generace. *SILNICE ŽELEZNICE*. [Online] KONSTRUKCE Media, s.r.o., 2016. [Citace: 12. 03 2019.]

<http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/asfalt-modifikovany-pryzovym-granulatem-tichy-a-ekologicky-kryt-vozovek-nove-generace/>. ISSN 1803-8441.

[5] Gumový granulát z pneumatik. *Odpady online*. [Online] Profi Press s.r.o., 2007. [Citace: 12. 03 2019.] <https://odpady-online.cz/gumovy-granulat-z-pneumatik/>.

[6] HOTAŘ, PETR. Návrh a posouzení asfaltové směsi s asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem. *Vysoké učení technické v Brně. Fakulta Stavební. Ústav pozemních komunikací*. [Online] 2012. [Citace: 12. 03 2019.] <http://hdl.handle.net/11012/9559>.

[7] ČSN EN 13108-1 ed. 2 (736140) Asfaltové směsi – Specifikace pro materiály – Část 1: Asfaltový beton. Praha : ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2008. 8596135021291.

[8] Asfaltové směsi s vysokým obsahem R-materiálu – dosavadní zkušenosti. *SILNICE MOSTY*. [Online] PRAGOPROJEKT, a.s., 2016. [Citace: 12. 03 2019.] <https://www.silnice-mosty.cz/615-asfaltove-smesi-s-vysokym-obsahem-r-materialu-dosavadni-zkusenosti/>.

[9] Covered stockpile. *For Construction Pros* . [Online] AC Business Media, Delaware, 2013. [Citace: 12. 03 2019.]

https://cdn.forconstructionpros.com/files/base/acbm/fcp/image/2013/05/960w/covered-stockpile_10941678.jpg.

[10] Recycling of road materials becoming more viable: Route One Publishing [cit. 2019-02-21].

Dostupné z: . *AGG Business*. [Online] Route One Publishing, DARTFORD, 2008. [Citace: 12. 03 2019.]

<http://www.aggbusiness.com/categories/asphalt-plants-equipment-applications/features/recycling-of-road-materials-becoming-more-viable/>.

[11] VARAUS, MICHAL. Školení o evropských a českých normách pro stavbu vozovek Brno: [cit. 2019-02-21]. *Sdružení pro výstavbu silnic*. [Online] Sdružení pro výstavbu silnic, BRNO, 2015.

[http://www.sdruzeni-](http://www.sdruzeni-silnice.cz/Download.aspx?param=jx3godhnp7M1LWTdfUhReMaO1ImXeAzRHrBhMFAG%2F%2BNJ2D9EP6fcyxLCHzM2Y0X3hN2bYcg6zTd9ebdiEYm4Um665IIPvJKLGdOao09kkl2dWYuNopTo9TpC7jh8hO8pt4K%2B8y7YbmumSxDu8MjcSrDIF4uiQhW80jO7P%2BRtxdROoPZkGMxUzH1nRGQZLkU%2Fb)

[silnice.cz/Download.aspx?param=jx3godhnp7M1LWTdfUhReMaO1ImXeAzRHrBhMFAG%2F%2BNJ2D9EP6fcyxLCHzM2Y0X3hN2bYcg6zTd9ebdiEYm4Um665IIPvJKLGdOao09kkl2dWYuNopTo9TpC7jh8hO8pt4K%2B8y7YbmumSxDu8MjcSrDIF4uiQhW80jO7P%2BRtxdROoPZkGMxUzH1nRGQZLkU%2Fb](http://www.sdruzeni-silnice.cz/Download.aspx?param=jx3godhnp7M1LWTdfUhReMaO1ImXeAzRHrBhMFAG%2F%2BNJ2D9EP6fcyxLCHzM2Y0X3hN2bYcg6zTd9ebdiEYm4Um665IIPvJKLGdOao09kkl2dWYuNopTo9TpC7jh8hO8pt4K%2B8y7YbmumSxDu8MjcSrDIF4uiQhW80jO7P%2BRtxdROoPZkGMxUzH1nRGQZLkU%2Fb).

[12] Obalovna Brant - Froněk. *Froněk dopravní stavby*. [Online] Froněk, spol. s r.o, RAKOVNÍK, 2018.

[Citace: 12. 03 2019.]

https://www.fronek.cz/fileadmin/_processed_/e/d/csm_vyroba_smesi_23df5a7399.jpg.

[13] Recycled Materials and Byproducts in Highway Applications—Reclaimed Asphalt Pavement, Recycled Concrete Aggregate, and Construction Demolition Waste, Volume 6. *National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine*. [Online] The National Academic Press, WASHINGTON, DC, 2013.

[Citace: 12. 03 2019.] <https://www.nap.edu/books/22547/gif/3.gif>.

[14] Chapter 6. Hot-mix asphalt recycling - drum plant: Construction methods and equipment.

Federal Highway Administration Research and Technology. [Online] U.S. Department of Transportation. http://www.fhwa.dot.gov/pavement/recycling/98042/chpt_06.pdf.

[15] Three Drum Dryer. *HJM China Professional Crusher Manufacture Leader*. [Online] Hongji Mine Machinery, ZHENGZHOU CITY, 2011. [Citace: 12. 03 2019.]

<http://www.chinahongji.com/uploadfile/20160126085235553.jpg>.

[16] Hot Mix Asphalt Production. *CIVL 3137*. [Online] [Citace: 12. 03 2019.]

<http://www.ce.memphis.edu/3137/Powerpoint%20Handouts/15%20-%20Asphalt%20Production%20and%20Paving.pdf>.

[17] CMI Magnum Series Drum Mixers. *For Construction Pros*. [Online] CMI Roadbuilding, OKLAHOMA CITY, 2017. [Citace: 12. 03 2019.]

<https://www.forconstructionpros.com/asphalt/plants/product/12320485/cmi-roadbuilding-inc-cmi-magnum-series-drum-mixers>.

[18] KOZÁČEK, VOJTĚCH. Alternativní návrh čáry zrnitosti. *Vysoké učení technické v Brně. Fakulta Stavební. Ústav pozemních komunikací*. [Online] 2018. [Citace: 18. 03 2019.]

https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=179289.

- [19] ČSN EN 1426 *Asfalty a asfaltová pojiva- Stanovení penetrace jehlou*. Praha : ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2016. 8590963987262.
- [20] ČSN EN 1427 *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení bodu měknutí - Metoda kroužek a kulička*. Praha : ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2016. 8590963987248.
- [21] ČSN EN 12697-1 *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 1: Obsah rozpustného pojiva*. Praha : ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2018. 8596135056910.
- [22] ČSN EN 12697-6 *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa*. Praha : ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2012. 8590963916651.
- [23] ČSN EN 12697-5 *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti* . Praha : ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2012. 8590963862187.
- [24] ČSN EN 12697-8 *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 8: Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí*. Praha : ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2004. 8590963695471.
- [25] ČSN EN 12697-30 *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem*. Praha : ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2012. 8590963914268.
- [26] ČSN 73 6121 *Stavba vozovek - Hutněné asfaltové vrstvy - Provádění a kontrola shody* . Praha : ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2019. 8596135069347.
- [27] ČSN EN 12697-12 *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 12: Stanovení odolnosti zkušebního tělesa vůči vodě*. Praha : ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2019. 8596135059775.
- [28] ČSN EN 12697-22+A1 *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 22: Zkouška pojiždění kolem*. Praha : ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2008. 8590963801636.
- [29] ČSN EN 12697-26 *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 26: Tuhost*. Praha : ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2019. 8596135059713.
- [30] ČSN EN 12697-24 *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 24: Odolnost vůči únavě*. Praha : ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2019. 8596135059720.

[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 : ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2012. 91636.

[32] HÝZL, PETR. Funkční zkoušky asfaltových směsí. *Časopis Stavebnictví*. [Online] Creative Commons, 2007. [Citace: 29. 03 2019.] https://www.casopisstavebnictvi.cz/funkcni-zkousky-asfaltovych-smesi_N278.

[33] *Návrh složení asfaltové směsi typu ACO11 +*. [Studijní podklad] Brno : Ústav pozemních komunikací, Fakulta stavební, Vyoké učení technické v Brně, 2019.

[34] ČSN EN 73 6160 *Zkoušení asfaltových směsí*. Praha : ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2008. 8590963807942.

[35] *Mapy Google*. [Online] Google, Inc., 2005. [Citace: 10. 05 2019.] <https://www.google.com/maps/>.

[36] *Asfaltové směsi s vysokým obsahem R-materiálu – dosavadní zkušenosti. Silnice+mosty*. [Online] Sdružení pro výstavbu silnic, PRAHA, 2016. [Citace: 12. 03 2019.] <https://www.silnice-mosty.cz/615-asfaltove-smesi-s-vysokym-obs>.

Seznam obrázků

Obr. 1, Obr. 2: Skládování R-materiálu v ČR a v zahraničí [9]	16
Obr. 3: Schéma šaržové obalovny se zásobníkem na R-materiál [10]	16
Obr. 4: Schéma obalovny s paralelním bubnem [11]	18
Obr. 5: Obalovna s paralelním bubnem [12]	18
Obr. 6: Paralelní sušící buben [13]	19
Obr. 7: Protiproudý sušící buben [13]	20
Obr. 8: Buben vysoušející R-materiál izolovaně [15]	20
Obr. 9: Schéma kontinuální obalovny [16]	21
Obr. 10: Schéma kontinuální obalovny s tzv. Counter-Flow technologií [17]	21
Obr. 11: Skladování jednotlivých frakcí kameniva na obalovně	23
Obr. 12,13: Příprava modifikovaného asfaltového pojiva	25
Obr. 14: Destilace asfaltu z R-materiálu	26
Obr. 15: Homogenizace kameniva frakce 4/8	27
Obr. 16: Kvartace kameniva frakce 8/11	28
Obr. 17: Zařízení pro měření objemové hmotnosti	29
Obr. 19: Pyknometry v temperanční komoře	30
Obr. 20: Mezerovitost směsi kameniva (VMA) [24]	30
Obr. 21: Skupina mokrých zkušebních těles	33
Obr. 22: Zkušební těleso v lisu při zkoušce ITSr	33
Obr. 23: Zařízení pro zkoušku pojíždění kolem	34
Obr. 24 a 25: Zkušební zařízení „Cooper“ pro zkoušku modulů tuhosti a únavy asfaltových směsí. 35	
Obr. 26: Chladicí komora zařízení Cyklon se zkušebním vzorkem	36
Obr. 27: Porušený vzorek ze zkoušky nízkoteplotních vlastností	36
Obr. 28: Tři sady Marshallových těles s rozdílným množstvím asfaltového pojiva	38
Obr. 29: Marshallův zhutňovač	40
Obr. 30: Forma na výrobu Marshallových těles	40
Obr. 31: Míchačka asfaltových směsí	40
Obr. 32: Připravená směs na hutnění	41
Obr. 33: Hutnicí zařízení	41
Obr. 36: Schéma trapezoidu	41
Obr. 35: Skupina vyrobených trapezoidů	41
Obr. 37: Schéma trámce	42

Obr. 39: Schéma Marshallova tělesa	42
Obr. 40: Schéma zhutněné desky	42
Obr. 41: Zhutněné desky.....	42
Obr. 42, Obr. 43.: Umístění zkušebních vysprávek [35]	50
Obr. 44 až Obr. 49: Příprava a pokládka zkušební vysprávký	50

Seznam tabulek

Tab. 1: Nejvyšší přípustný obsah R-materiálu v % hmotnosti asfaltové směsi – navrhovaná úprava 1) 2) [8]	14
Tab. 2: Nejvyšší přípustný obsah R-materiálu v % hmotnosti asfaltové směsi – původní [7]	15
Tab. 3: Výhody a nevýhody použití R-materiálu do asfaltové směsi	22
Tab. 4: Propady jednotlivých frakcí kameniva na sítích	24
Tab. 5: Zůstatky a propady zrn kameniv z R-materiálu na sítích	26
Tab. 6: Procentuální zastoupení frakcí kameniva ve směsi	39
Tab. 7: Teploty materiálů a asfaltové směsi	40
Tab. 8: Průměrné objemové hmotnosti Marshallových těles	43
Tab. 9: Objemové hmotnosti zhutněných desek	43
Tab. 10: Maximální objemové hmotnosti	44
Tab. 11: Míry zhutnění asfaltových desek	45
Tab. 12: Pevnostní poměr M/S – ITSr	46
Tab. 13: Hodnoty WTS_{air} a PRD_{air}	47
Tab. 14: Moduly tuhosti při teplotě 15 °C a frekvenci 10 Hz	48
Tab. 15: Charakteristiky směsi	51

Seznam grafů

Graf 1: Graf vývoje ceny asfaltu mezi roky 2015 a 2019 [2]	11
Graf 2: Čára zrnitosti navržené směsi	37
Graf 3: Graf závislosti mezerovitosti na obsahu pojiva	44
Graf 4: Graf závislosti stupně vyplnění mezer na obsahu pojiva	45
Graf 5: Graf závislosti síly na deformaci – vzorky K1S a K2M	46
Graf 6: Graf závislosti hloubky koleje na počtu	47
Graf 7: Závislost modulů tuhosti na frekvenci při dané teplotě	47
Graf 8: Wöhlerův diagram únavy	48
Graf 9: Závislost napětí na teplotě – zařízení Cyklon	49

Seznam příloh

1	Sítové rozbory.....	63
1.1	Frakce 0/2	63
1.2	Frakce 2/4	63
1.3	Frakce 4/8	64
1.4	Frakce 8/11	64
1.5	Frakce Filler.....	65
1.6	Frakce R-mat 0/11.....	65
2	Návrh čáry zrnitosti.....	65
3	Extrakce pojiva z R-materiálu	66
4	Objemové hmotnosti Marshallových těles.....	67
4.1	Objemové hmotnosti v závislosti na obsahu asfaltového pojiva	67
4.2	Objemové hmotnosti těles na zkoušku odolnosti vůči vodě.....	67
5	Objemové hmotnosti zhutněných desek	68
6	Maximální objemové hmotnosti.....	68
7	Mezerovitost (V_m), mezerovitost směsi kameniva (VMA) a stupeň vyplnění mezer (VFB)	69
7.1	Mezerovitost.....	69
7.2	Mezerovitost směsi kameniva.....	69
7.3	Stupeň vyplnění mezer pojivem	69
8	ITSR.....	69
9	Moduly tuhosti	71
10	Stanovení nízkoteplotních vlastností	72

Přílohy

1 Síťové rozbor

1.1 Frakce 0/2

Vysušená hmotnost zkoušené navážky			
868.4 g			
Vysušená hmotnost po odplavení částic menších než 0.063 mm			
815.8 g			
Množství částic menších než 0.063			
85.34 g			
9.83 %			
Údaje získané ze síťového rozboru			
Síto [mm]	Zbytek [g]	Zůstatek [%]	Propad [%]
18	0.00	0.00	100.00
16	0.00	0.00	100.00
11	0.00	0.00	100.00
8	0.00	0.00	100.00
4	0.00	0.00	100.00
2	97.26	11.20	88.80
1	228.98	26.37	62.43
0.500	144.24	16.61	45.82
0.250	123.48	14.22	31.60
0.125	105.17	12.11	19.49
0.063	83.93	9.66	9.83
< 0.063	32.76	3.77	
Suma	815.8 g		

1.2 Frakce 2/4

Vysušená hmotnost zkoušené navážky			
567.0 g			
Vysušená hmotnost po odplavení částic menších než 0.063 mm			
559.0 g			
Množství částic menších než 0.063			
8.86 g			
1.56 %			
Údaje získané ze síťového rozboru			
Síto [mm]	Zbytek [g]	Zůstatek [%]	Propad [%]
18	0.00	0.00	100.00
16	0.00	0.00	100.00
11	0.00	0.00	100.00
8	0.00	0.00	100.00
4	53.72	9.47	90.53
2	440.20	77.64	12.89
1	40.11	7.07	5.81
0.500	9.21	1.62	4.19
0.250	6.42	1.13	3.06
0.125	4.61	0.81	2.25
0.063	3.87	0.68	1.56
< 0.063	0.86	0.15	
Suma	559.0 g		

1.3 Frakce 4/8

Vysušená hmotnost zkoušené navážky			
1111.8 g			
Vysušená hmotnost po odplavení částic menších než 0.063 mm			
1101.2 g			
Množství částic menších než 0.063			
11.09 g			
1.00 %			
Údaje získané ze síťového rozboru			
Síto [mm]	Zbytek [g]	Zůstatek [%]	Propad [%]
18	0.00	0.00	100.00
16	0.00	0.00	100.00
11	15.44	1.39	98.61
8	73.20	6.58	92.03
4	932.28	83.85	8.17
2	51.40	4.62	3.55
1	8.40	0.76	2.80
0.500	4.48	0.40	2.39
0.250	4.67	0.42	1.97
0.125	5.40	0.49	1.49
0.063	5.44	0.49	1.00
< 0.063	0.49	0.04	
Suma	1101.2 g		

1.4 Frakce 8/11

Vysušená hmotnost zkoušené navážky			
3212.0 g			
Vysušená hmotnost po odplavení částic menších než 0.063 mm			
3197.0 g			
Množství částic menších než 0.063			
16.33 g			
0.51 %			
Údaje získané ze síťového rozboru			
Síto [mm]	Zbytek [g]	Zůstatek [%]	Propad [%]
18	0.00	0.00	100.00
16	9.20	0.29	99.71
11	191.60	5.97	93.75
8	2535.15	78.93	14.82
4	444.10	13.83	0.99
2	7.60	0.24	0.76
1	1.00	0.03	0.73
0.500	0.53	0.02	0.71
0.250	0.91	0.03	0.68
0.125	1.80	0.06	0.63
0.063	3.78	0.12	0.51
< 0.063	1.33	0.04	
Suma	3197.0 g		

1.5 Frakce Filler

Vysušená hmotnost zkoušené navážky			
-			
Vysušená hmotnost po odplavení částic menších než 0.063 mm			
-			
Množství částic menších než 0.063			
-			
-			
Údaje získané ze síťového rozboru			
Síto [mm]	Zbytek [g]	Zůstatek [%]	Propad [%]
18	-	0.00	100.00
16	-	0.00	100.00
11	-	0.00	100.00
8	-	0.00	100.00
4	-	0.00	100.00
2	-	0.00	100.00
1	-	0.00	100.00
0.500	-	0.14	99.86
0.250	-	0.23	99.63
0.125	-	3.78	95.85
0.063	-	19.43	76.42
< 0.063	-	76.42	
Suma	-		

1.6 Frakce R-mat 0/11

Vysušená hmotnost zkoušené navážky			
2562.8 g			
Vysušená hmotnost bez patron	Hmotnost v patroně 1	Hmotnost v patroně 2	
2371.4 g	97.8 g	93.6 g	
Množství částic menších než 0.063			
245.04 g			
9.56 %			
Údaje získané ze síťového rozboru			
Síto [mm]	Zbytek [g]	Zůstatek [%]	Propad [%]
18	0.00	0.00	100.00
16	0.00	0.00	100.00
11	0.00	0.00	100.00
8	57.97	2.26	97.74
4	527.71	20.59	77.15
2	423.35	16.52	60.63
1	396.73	15.48	45.15
0.500	340.22	13.28	31.87
0.250	276.82	10.80	21.07
0.125	174.79	6.82	14.25
0.063	120.12	4.69	9.56
< 0.063	53.64	2.09	
Suma	2371.4 g		

2 Návrh čáry zrnitosti

Frakce	22	16	11	8	4	2	1	0.5	0.25	0.125	0.063
8-11	100.00	99.71	93.75	14.82	0.99	0.76	0.73	0.71	0.68	0.63	0.51
4-8	100.00	100.00	98.61	92.03	8.17	3.55	2.80	2.39	1.97	1.49	1.00
2-4	100.00	100.00	100.00	100.00	90.53	12.89	5.81	4.19	3.06	2.25	1.56
0-2	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	88.80	62.43	45.82	31.60	19.49	9.83
Filler	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.86	99.63	95.85	76.42
R-mat	100.00	100.00	100.00	97.74	77.15	60.63	45.15	31.87	21.07	14.25	9.56

Skladba kameniva navržené směsi		
	Množství frakce [%]	Průběžný součet
Filler	2	2
0-2	4	6
2-4	7	13
4-8	15	28
8-11	22	50
R-mat	50	100
Suma	100	

Velikost zrn kameniva	Dolní mez pro ACO 11 +	Navržená asfaltová směs	Horní mez pro ACO 11 +	Fullerova parabola
22	100	100.00	100	100.0
16	100	99.94	100	100.0
11	90	98.42	100	100.0
8	70	78.93	90	85.3
4	42	52.35	68	60.3
2	24	37.47	49	42.6
1	-	28.06	-	30.2
0.5	-	20.57	-	21.3
0.25	-	14.45	-	15.1
0.125	4	10.34	14	10.7
0.063	3	7.07	11	7.6

3 Extrakce pojiva z R-materiálu

Množství pojiva v R-materiálu			
Hmotnost před extrakcí a před sušením	Hmotnosti patron s/bez navážky		
3085.80 g		Patrona 1	Patrona 2
Hmotnost před extrakcí a po sušení na 55 °C	Prázdná	606.5 g	598.1 g
3054.50 g	Plná	780.1 g	687.8 g
Rozdíl vody	Zbytek	173.6 g	89.7 g
31.30 g			
Hmotnost vysušeného kameniva po extrakci	Hmotnost asfaltu v R-materiálu		
2594.70 g	196.50 g	6.43 %	

4 Objemové hmotnosti Marshallových těles

4.1 Objemové hmotnosti v závislosti na obsahu asfaltového pojiva

Hustota vody (21°C) [kg/m ³]				
998.0649				
Označení tělesa - obsah asfaltu	m _d (suchá) [g]	m _w (ve vodě) [g]	m _n (osušená) [g]	Objemová hmotnost [kg/m ³]
I-6,0	1243.7	745.0	1248.8	2464
II-6,0	1253.6	747.0	1256.2	2457
III-6,0	1255.3	748.4	1259.2	2453
I-6,5	1267.8	756.0	1269.6	2464
II-6,5	1251.3	743.3	1255.8	2437
III-6,5	1268.0	757.0	1269.0	2472
I-7,0	1266.2	757.0	1267.3	2477
II-7,0	1265.9	754.0	1268.3	2457
III-7,0	1266.0	757.3	1267.4	2477

4.2 Objemové hmotnosti těles na zkoušku odolnosti vůči vodě

Hustota vody (18°C) [kg/m ³]				
998.665				
Označení tělesa	m _d (suchá) [g]	m _w (ve vodě) [g]	m _n (osušená) [g]	Objemová hmotnost [kg/m ³]
K1S	1280.2	761.6	1281.8	2458
K2M	1262.0	750.0	1264.0	2452
K3S	1261.4	747.5	1263.4	2442
K4M	1261.0	748.8	1264.6	2441
K5S	1254.2	744.5	1256.4	2447
K6S	1262.0	747.0	1264.6	2435
K7M	1280.8	761.4	1284.6	2445
K8M	1260.6	745.8	1263.0	2434
K9S	1260.2	745.4	1262.8	2432
K10M	1259.0	745.2	1262.4	2431

5 Objemové hmotnosti zhutněných desek

Hustota vody (16°C) [kg/m ³]				
999.011				
Označení tělesa	m _d (suchá) [kg]	m _w (ve vodě) [kg]	m _n (osušená) [kg]	Objemová hmotnost [kg/m ³]
D-kolo-I-původní	10.280	6.170	10.286	2487
D-kolo-II-původní	10.272	6.167	10.286	2491
D-kolo-I	8.249	4.952	8.267	2485
D-kolo-II	8.246	4.952	8.267	2484
D-I	9.857	5.910	9.880	2480
D-II	9.849	5.899	9.873	2476
D-III	9.857	5.905	9.882	2476
D-IV	9.467	5.691	9.493	2487
D-V	11.292	6.767	11.325	2475

6 Maximální objemové hmotnosti

Hustota rozpouštědla [Mg/m ³]			Objemová hmotnost asfaltu [kg/m ³]		
1.6148			1020		
Označení tělesa - obsah asfaltu	Objem pyknometru [cm ³]	m _p [g]	m _{p+n} [g]	m _{p+n+t} [g]	Maximální objemová hmotnost [kg/m ³]
P2-6.0	1320.600	703.3	1806.1	3247.1	2575
P3-6.5	1308.164	685.5	1775.6	3198.3	2552
P6-7.0	1298.616	688.2	1772.2	3174.8	2521

m_p hmotnost pyknometru [g]

m_{p+n} hmotnost pyknometru a navážky [g]

m_{p+n+t} hmotnost pyknometru, navážky a rozpouštědla [g]

7 Mezerovitost (V_m), mezerovitost směsi kameniva (VMA) a stupeň vyplnění mezer (VFB)

7.1 Mezerovitost

Mezerovitost - množství asfaltu [%]	Hodnota mezerovitosti [%]
$V_m-6,0$	4.670
$V_m-6,5$	3.298
$V_m-7,0$	1.737

7.2 Mezerovitost směsi kameniva

Mezerovitost směsi kameniva - množství asfaltu [%]	Hodnota VFB [%]
VMA-6,0	19.11
VMA-6,5	19.03
VMA-7,0	18.74

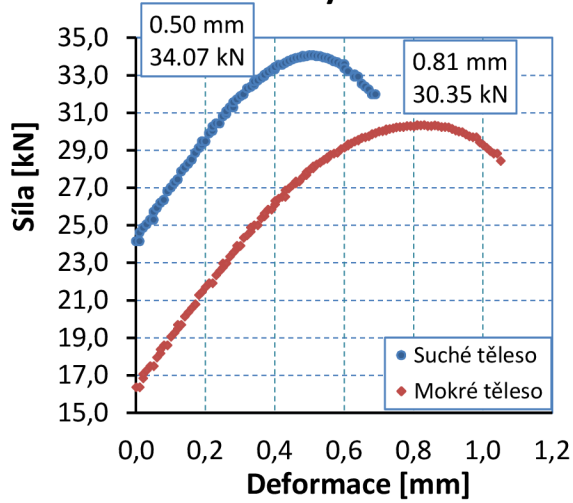
7.3 Stupeň vyplnění mezer pojivem

Stupeň vyplnění mezer pojivem - množství asfaltu [%]	Hodnota mezerovitosti [%]
VFB-6,0	75.57
VFB-6,5	82.66
VFB-7,0	90.73

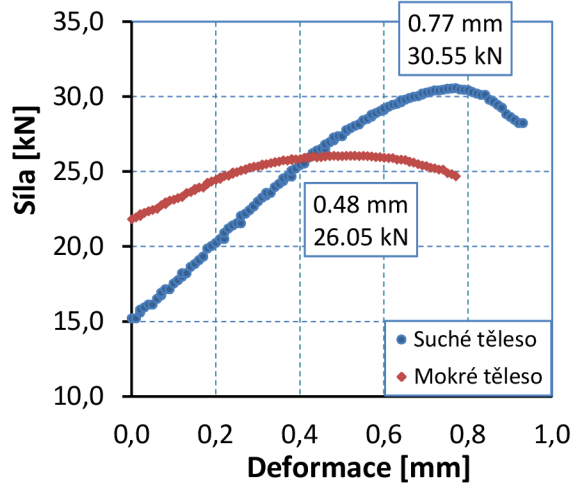
8 ITSR

ITSR					
Označení vzorků	Pevnost suchá [kN]	Deformace [mm]	Pevnost mokrá [kN]	Deformace [mm]	Poměr pevností M/S [%]
K1S + K2M	34.07	0.50	30.35	0.81	89.08
K3S + K4M	30.55	0.77	26.05	0.48	85.27
K5S+K7M	31.59	0.83	31.11	0.76	98.48
K6S+K8M	28.75	1.11	28.05	0.70	97.57
K9S+K10M	32.68	0.70	24.37	0.93	74.57

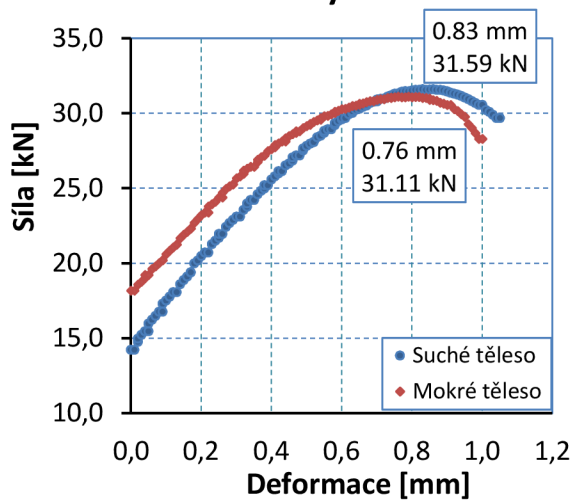
Graf závislosti síly na deformaci - vzorky K1S a K2M



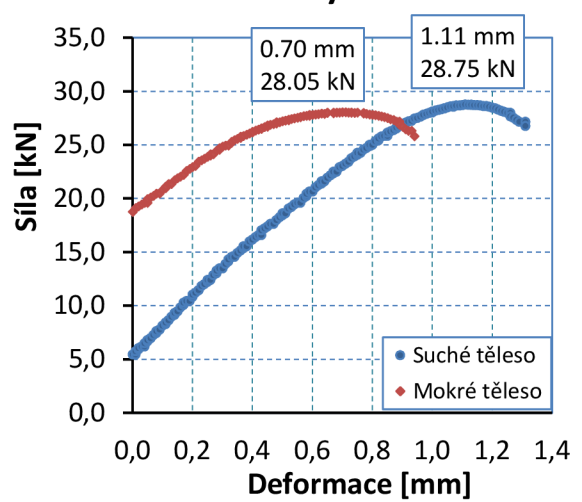
Graf závislosti síly na deformaci - vzorky K3S a K4M



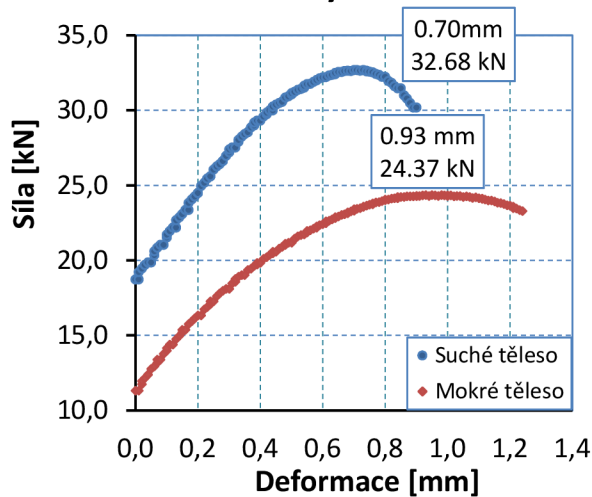
Graf závislosti síly na deformaci - vzorky K5S a K7M



Graf závislosti síly na deformaci - vzorky K6S a K8M



Graf závislosti síly na deformaci - vzorky K9S a K10M

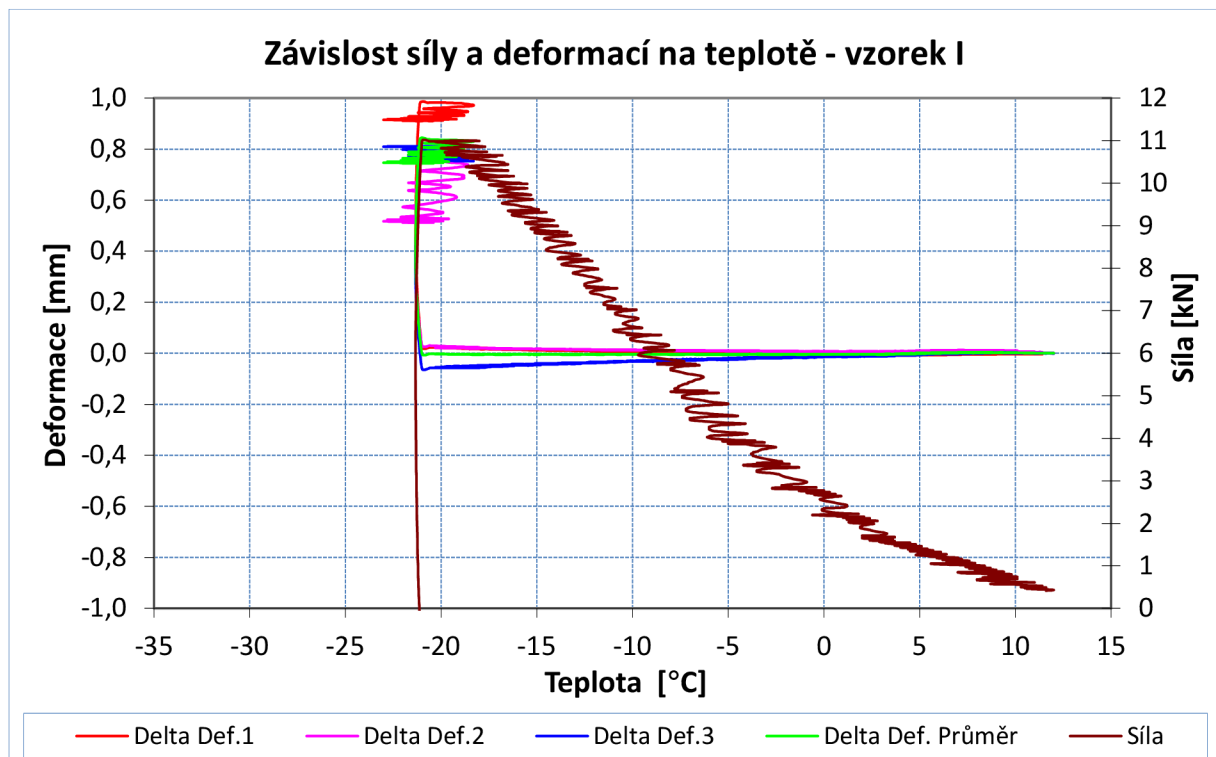


9 Moduly tuhosti

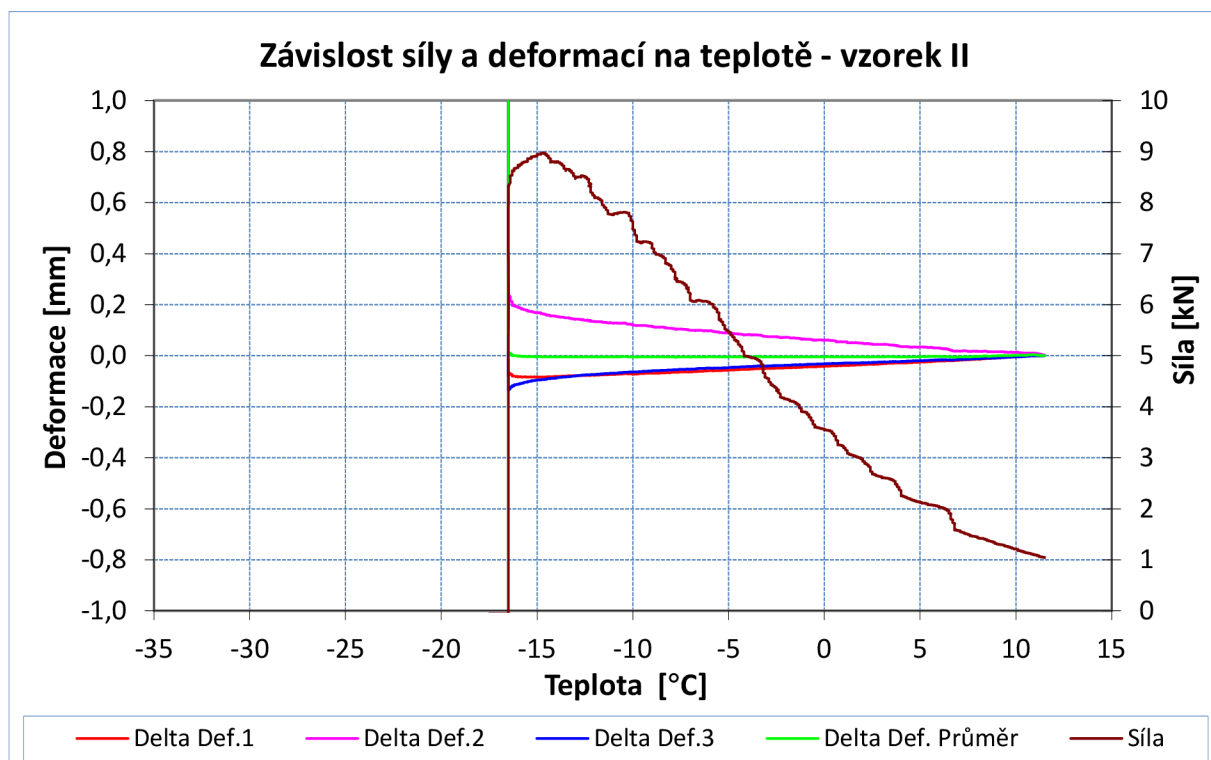
f	T	Moduly tuhost [MPa]												Průměr
		D1-I	D1-II	D1-III	D1-IV	D2-I	D2-II	D2-III	D2-IV	D4-I	D4-II	D4-III	D4-IV	
[Hz]	[°C]													
1	-5	18992	19880	19758	20425	17879	18806	18683	20365	19149	20519	20496	19145	19508
5	-5	20620	21616	21655	22352	19539	20457	20384	22323	20778	22230	22444	20876	21273
10	-5	21274	22531	22448	23239	20294	21341	21059	23206	21525	23532	23216	21603	22106
15	-5	21603	22956	22722	23606	20467	21782	21285	23569	21710	24041	23504	21971	22435
20	-5	21982	23040	23057	23867	20848	21944	21541	23849	22063	24208	23852	22206	22705
25	-5	21833	23108	23019	23789	20709	22022	21497	23823	21935	24260	23827	22323	22679
27	-5	22319	23849	23109	24540	21122	22688	21588	24557	22328	24994	23907	22947	23162
30	-5	23023	25029	23329	25540	21768	23656	21745	25586	23120	26226	24096	23807	23910
1	15	9412	9890	9665	9925	8664	9404	9275	9796	9470	10400	9970	9893	9647
5	15	11482	12122	11874	12243	10709	11530	11432	12126	11547	12736	12282	12073	11846
10	15	12514	13223	12905	13294	11645	12564	12373	13155	12574	13835	13339	13013	12870
15	15	12924	13811	13402	13823	12075	13137	12843	13695	13018	14438	13854	13510	13378
20	15	13359	14151	13807	14240	12485	13449	13221	14147	13442	14762	14262	13924	13771
25	15	13499	14374	14003	14392	12618	13667	13402	14303	13573	14987	14481	14103	13950
27	15	13775	14782	14092	14783	12856	14005	13502	14653	13833	15368	14584	14444	14223
30	15	14165	15372	14288	15282	13221	14473	13684	15181	14249	15931	14944	14857	14637
1	25	5178	5367	5217	5217	4721	5251	5213	5345	5360	5531	5477	5571	5287
5	25	7104	7410	7217	7285	6478	7157	7126	7376	7245	7687	7561	7597	7270
10	25	8032	8439	8181	8277	7346	8122	8036	8352	8185	8748	8546	8552	8235
15	25	8478	9011	8700	8809	7790	8683	8534	8878	8660	9351	9111	9071	8756
20	25	8892	9383	9111	9260	8177	9010	8912	9321	9160	9716	9488	9496	9161
25	25	9145	9653	9366	9477	8540	9254	9151	9514	9481	9957	9711	9686	9411
27	25	9672	9896	9488	9697	8887	9463	9295	9751	9846	10207	9847	10002	9671
30	25	10237	10232	9703	9933	9382	9784	9516	10021	10395	10523	10057	11464	10104
1	40	1522	1481	1418	1371	1327	1485	1427	1452	1506	1438	1498	1354	1440
5	40	2497	2500	2374	2340	2211	2485	2384	2449	2509	2460	2540	2325	2423
10	40	3057	3100	2927	2922	2714	3082	2922	3034	3075	3055	3122	2883	2991
15	40	3396	3451	3259	3255	3017	3437	3243	3375	3408	3405	3465	3211	3327
20	40	3589	3690	3490	3499	3219	3652	3470	3608	3656	3645	3717	3454	3557
25	40	3765	3841	3662	3664	3372	3811	3638	3778	3820	3800	3902	3627	3723
27	40	3915	4040	3722	3931	3496	3993	3699	4055	3957	3994	3969	3860	3886
30	40	4125	4346	3835	4361	3660	4249	3810	4506	4146	4274	4085	4238	4136
1	10	11874	12599	12315	12658	11052	12182	11702	12621	12101	12470	12840	11909	12194
5	10	13874	14791	14544	14985	13086	14232	13819	14920	14092	14608	15165	13943	14338
10	10	14802	15884	15529	16036	14003	15228	14724	15964	15014	15658	16141	14877	15322
15	10	15191	16482	15986	16550	14369	15782	15148	16467	15385	16226	16597	15366	15796
20	10	15599	16782	16380	16935	14727	16069	15511	16878	15791	16539	16993	15776	16165
25	10	15749	16946	16515	16993	14809	16267	15646	17004	15871	16732	17140	15777	16287
27	10	16087	17451	16606	17452	15127	16700	15730	17476	16137	17171	17246	16085	16606
30	10	16521	18230	16783	18069	15554	17372	15925	18103	16559	17874	17460	16486	17078

10 Stanovení nízkoteplotních vlastností

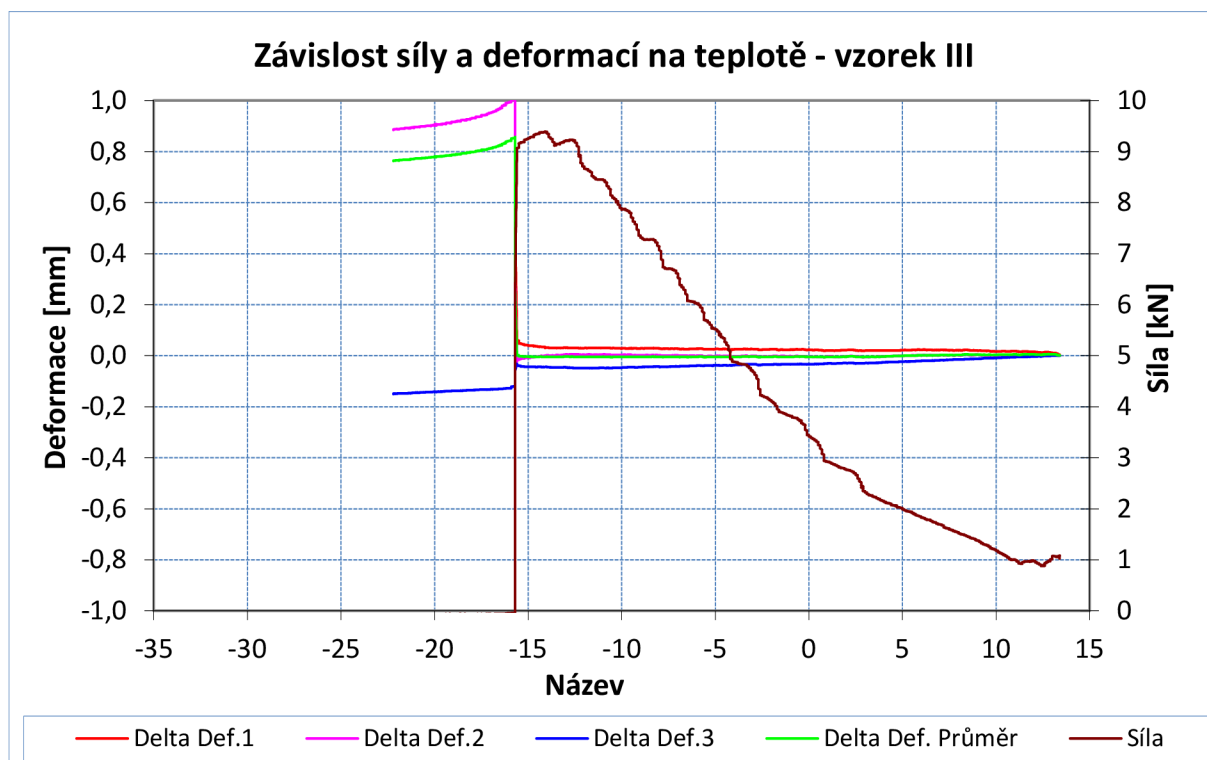
Akce	BP Karel Spies
Asfaltová směs	I
Rozměry zkušebního tělesa [mm]	50 x 50 x 200
Datum zkoušky	06. 02. 2019
Zkoušku provedl	Karel
Teplota temperování [°C]	10
Doba temperování [min]	15
Rychlost ochlazování [°C/hod]	10
Max. síla při porušení [kN]	11.00
Max. napětí při porušení [MPa]	4.40
Teplota v komoře při porušení [°C]	-20.4
Teplota vzorku při porušení [°C]	-18.8



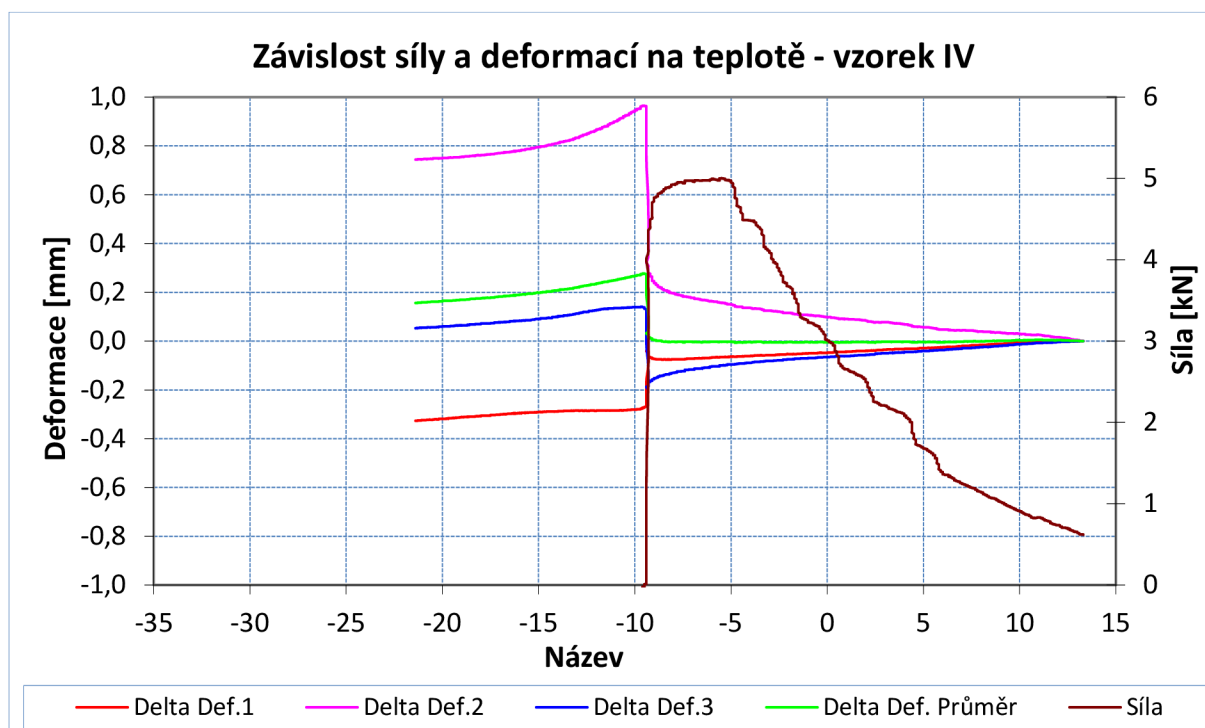
Akce	BP Karel Spies
Asfaltová směs	II
Rozměry zkušebního tělesa [mm]	50 x 50 x 200
Datum zkoušky	07. 02. 2019
Zkoušku provedl	Karel
Teplota temperování [°C]	10
Doba temperování [min]	15
Rychlost ochlazování [°C/hod]	10
Max. síla při porušení [kN]	8.98
Max. napětí při porušení [MPa]	3.59
Teplota v komoře při porušení [°C]	-18.6
Teplota vzorku při porušení [°C]	-14.7



Akce	BP Karel Spies
Asfaltová směs	III
Rozměry zkušebního tělesa [mm]	50 x 50 x 200
Datum zkoušky	08. 02. 2019
Zkoušku provedl	Karel
Teplota temperování [°C]	10
Doba temperování [min]	15
Rychlost ochlazování [°C/hod]	10
Max. síla při porušení [kN]	9.39
Max. napětí při porušení [MPa]	3.76
Teplota v komoře při porušení [°C]	-17.4
Teplota vzorku při porušení [°C]	-14.1



Akce	BP Karel Spies
Asfaltová směs	IV
Rozměry zkušebního tělesa [mm]	50 x 50 x 200
Datum zkoušky	11. 02. 2019
Zkoušku provedl	Karel
Teplota temperování [°C]	10
Doba temperování [min]	15
Rychlost ochlazování [°C/hod]	10
Max. síla při porušení [kN]	5.00
Max. napětí při porušení [MPa]	2.00
Teplota v komoře při porušení [°C]	-9.6
Teplota vzorku při porušení [°C]	-5.5



Akce	BP Karel Spies
Asfaltová směs	V
Rozměry zkušebního tělesa [mm]	50 x 50 x 200
Datum zkoušky	14. 02. 2019
Zkoušku provedl	Karel
Teplota temperování [°C]	10
Doba temperování [min]	15
Rychlost ochlazování [°C/hod]	10
Max. síla při porušení [kN]	8.46
Max. napětí při porušení [MPa]	3.39
Teplota v komoře při porušení [°C]	-17.7
Teplota vzorku při porušení [°C]	-13.9

