

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ
KATEDRA SILNIČNÍCH STAVEB



MODIFIKOVANÉ ASFALTOVÉ SMĚSI S R-MATERIÁLEM
DO PODKLADNÍCH VRSTEV

ASPHALT MODIFIED MIXTURES WITH RECLAIMED
ASPHALT TO BASE LAYERS

Bakalářská práce

Petr Benda

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

Vedoucí práce: Ing. Petr Mondschein, Ph.D.



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta stavební
Thákurova 7, 166 29 Praha 6



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Benda	Jméno: Petr	Osobní číslo: 473464
Zadávatel: katedra silničních staveb		
Studijní program: Stavební inženýrství		
Studijní obor: Konstrukce a doprava		

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Modifikované asfaltové směsi s R-materiálem do podkladních vrstev

Název bakalářské práce anglicky: Asphalt Modified Mixtures with Reclaimed Asphalt to Base Layers

Pokyny pro vypracování:

Vypracujte rešerši problematiky recyklace asfaltových vrstev vozovky s důrazem na možnosti přidávání R-materiálu do modifikovaných směsí. Popište technologické postupy frézování, výroby R-materiálu a směsí s RA. V praktické části bude ověřena možnost dodatečné modifikace asfaltové směsi typu ACP v procesu míchání na obalovné s větším množstvím R-materiálu.

Seznam doporučené literatury:

Technické normy řady ČSN EN 12697, odborné články, Technologie stavby vozovek, Ing. Jan Zajíček a kol., Pokládka hutněných asfaltových směsí (Václav Hanzík a kolektiv)

Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Petr Mondschein, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 17.02.2022

Termín odevzdání BP v IS KOS: 15.5.2022

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

17-02-2022

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)



Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma „Modifikované asfaltové směsi s R-materiálem do podkladních vrstev“ vypracoval samostatně, bez pomoci, pouze za odborného vedení vedoucího bakalářské práci Ing. Petra Mondscheina Ph.D.

Dále prohlašuji, že jsem uvedl veškerý seznam použité literatury a zdrojů, které byly na práci použity.

V Praze dne

.....

Petr Benda



Poděkování:

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Petrovi Mondscheinovi, Ph.D. za odborné vedení práce, poskytnutí důležitých informací a podkladů, ochotu a čas strávený konzultacemi. Děkuji také pracovníkům silniční laboratoře FSV ČVUT. Dále bych chtěl poděkovat společnosti EKOSTAVBY Louny s.r.o. za poskytnutí kameniva a fileru a společnosti VIAKONTROL s.r.o. za poskytnutí technologie a asfaltového pojiva potřebné pro zhotovení práce. V neposlední řadě bych rád poděkoval i mé rodině, která mě podporovala po celou dobu studia.



Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou možnosti přidávání R-materiálu do modifikovaných asfaltových směsí v podkladních vrstvách s asfaltem polymerem modifikovaným (PMB). Rešerše popisuje technologické postupy frézování, výroby R-materiálu a směsí s RA.

V praktické části je provedena analýza vlastností tří variant asfaltových směsí s větším obsahem R-materiálu. Na závěr jsou výsledky vyhodnoceny a porovnány s vlastnostmi asfaltových směsí, které obsahují běžné procento obsahu R-materiálu, a s požadavky, které stanovují normy.

Klíčová slova

Recyklace asfaltových vrstev, R-materiál, RA, PMB, SBS, modifikované asfaltové směsi, frézování



Annotation

This bachelor thesis is focused on issues with adding R-material to modified asphalt mixtures used for base layers with polymer modified bitumen (PmB). The thesis also includes various technological processes for pavement milling, R-material and RA mixtures production.

Practical part is aimed at analysis of three asphalt mixture variants with higher amount of R-material. At the end of the thesis are conclusions of findings that are compared to mixtures with normal amount of R-material and technical standards.

key words

asphalt layers recycling, R-material, Ra, PmB, SBS, modified asphalt mixtures, pavement milling



Obsah

1 ÚVOD	- 9 -
2 CÍLE PRÁCE	- 10 -
TEORETICKÁ ČÁST	- 11 -
3 RECYKLACE	- 11 -
3.1 Frézování asfaltových vozovek	- 12 -
3.1.1 Frézování za studena	- 12 -
3.1.2 Jemné frézování	- 13 -
3.1.3 Frézovací stroje	- 13 -
3.2 R-materiál	- 14 -
3.2.2 Skladování R-materiálu	- 14 -
3.2.3 Rejuvenace zastaralého asfaltového pojiva	- 14 -
3.2.4 Vhodnost přidání R-materiálu do nově vyráběných směsí.....	- 15 -
3.2.5 R-materiál v modifikovaných asfaltových směsí.....	- 16 -
3.3 Recyklace za studena na místě	- 17 -
3.3.1 Rozdělení recyklace za studena na místě	- 17 -
3.3.2 Typy recyklace za studena na místě	- 18 -
3.3.3 Využití technologie a rizika	- 18 -
3.4 Recyklace za studena v míchacím centru	- 19 -
3.5 Recyklace za horka na místě	- 20 -
3.5.1 REGRIP.....	- 20 -
3.5.2 RESHAPE.....	- 20 -
3.5.3 REPAVE.....	- 20 -
3.5.4 REMIX.....	- 21 -
3.5.5 REMIX PLUS.....	- 21 -
3.5.6 Požadavky na recyklované směsi	- 22 -
3.6 Recyklace za horka na obalovně	- 23 -
3.6.1 Dávkování přímo do míchačky šaržové obalovny	- 24 -
3.6.2 Předehřívání R-materiálu v paralelním bubnu	- 25 -



3.6.3 Metoda Drum-mix	- 26 -
PRAKTICKÁ ČÁST	- 27 -
4 PŘÍPRAVA ASFALTOVÝCH SMĚSÍ	- 27 -
4.1. Modifikační přísada K 60.....	- 28 -
4.2 Výroba asfaltových směsí	- 29 -
4.3 Kompletní analýza asfaltové směsi	- 30 -
4.3.1 Oddělení pojiva od kameniva pomocí extraktoru	- 30 -
4.3.2 Stanovení skutečné křivky zrnitosti směsi	- 32 -
4.3.3 Stanovení mezerovitosti směsi	- 34 -
5 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES	- 38 -
5.1 Výroba zkušebních těles rázovým zhutňovačem.....	- 38 -
5.2 Výroba zkušebních těles zhutňovačem desek	- 40 -
6 ZKOUŠKY ASFALTOVÝCH SMĚSÍ	- 42 -
6.1 Zkouška poježdění kolem.....	- 42 -
6.2 Stanovení odolnosti tělesa vůči vodě	- 45 -
6.3 Tuhost	- 49 -
6.4 Zkouška odolnosti proti šíření trhlin	- 53 -
6.5 Marshallova zkouška.....	- 58 -
7 ZÁVĚR	- 61 -
9 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	- 63 -
10 SEZNAM OBRÁZKŮ	- 65 -
11 SEZNAM TABULEK	- 66 -
12 SEZNAM GRAFŮ	- 67 -
13 SEZNAM VZORCŮ	- 68 -
14 SEZNAM PŘÍLOH.....	- 68 -



1 ÚVOD

V dnešní době náleží oběhové hospodářství k velmi řešeným pojmům pro zlepšení kvality životního prostředí a zvýšení efektivity produkce, kde jedním z hlavních bodů oběhového hospodářství je recyklace.

Za posledních let se ve světě rychle zvyšuje stupeň automobilizace, který je spojen s vysokou intenzitou dopravy. Ta klade velké nároky na rozvoj infrastruktury silniční dopravy a zajištění oprav stávajících komunikací, které nespĺňují požadované vlastnosti. Těmito procesy vzniká nepřeborné množství odpadu. Jednou z možností, jak odpad redukovat je právě zmíněná recyklace. S rostoucím množstvím R-materiálu, je potřeba zvýšit jeho využití v asfaltových směsích bez výrazného snížení kvality důsledným dodržením předepsaných technologických postupů.

V silničním stavitelství se často asfaltové směsi modifikují a u takových směsích je maximální využití R-materiálu limitováno na 15 %.

V prvních kapitolách této práce jsou popsány technologické postupy frézování, proces výroby R-materiálu a směsích s RA. V praktické části se pak konkrétně prověřuje, jak se budou měnit vlastnosti modifikované asfaltové směsích do podkladních vrstev ACP 16 + PmB. Pro porovnání se použijí tři vzorky. První vzorek je složen z ACP 16+ PmB s 50 % R-materiálu, druhý vzorek je složen z ACP 16+ PmB + modifikační přísada K 60. Tyto dva vzorky byly porovnány s třetím vzorkem, který neobsahuje žádný R-materiál, a s normovanými hodnotami (v práci často označována jako „čistá směs“).

Na vzorcích byla provedena zkouška pojíždění kolem, Marshallova zkouška, zkouška stanovení modulu tuhosti, zkouška odolnosti proti šíření trhlin, zkouška odolnosti proti negativním účinkům vody.



2 CÍLE PRÁCE

Hlavním cílem této práce je stanovení a porovnání daných vlastností tří vzorků modifikovaných asfaltových směsí s velkým obsahem R-materiálu. Pro určení potřebných vlastností budou dodrženy požadavky, které předepisuje norma ČSN EN 13108-1. Vzorky byly vytvořeny z asfaltového betonu pro podkladní vrstvy s maximální velikostí zrna 16 mm, který splňuje kvalitativní požadavky +. Pro nejpřesnější porovnání výsledků bude dodržen limit mezerovitosti vzorků ± 1 %.

Provedené zkoušky

- Zkouška poježdění kolem
- ITSR (odolnost proti vodě)
- Modul tuhosti
- Odolnost proti vzniku trhlin
- Marshallova zkouška

Předpoklady

U prvního vzorku ze směsi ACP 16 + PMB 25/55-65 bez přidaného R-materiálu a SBS bude lze předpokládat, že bude mít větší odolnost proti negativním účinkům vody, větší odolnost proti vzniku trhlin, menší tuhost ze zkoušky modulu tuhosti, horší stabilitu z Marshallovy zkoušky a větší hodnotu deformace při zkoušce vyjetí kolem.

Druhý vzorek ze směsi ACP 16 + PMB 25/55-65, který obsahuje 50 % R-materiálu bude oproti prvnímu vzorku tužší. Předpokládají se opačné výsledky – menší odolnost proti negativním účinkům vody, menší odolnost proti vzniku trhlin, vyšší tuhost ze zkoušky modulu tuhosti, vyšší stabilitu z Marshallovy zkoušky než u čisté směsi a menší hodnotu trvalé deformace při zkoušce vyjetí kolem.

Do třetího směsi ACP 16 + PMB 25/55-65 s 50 % R-materiálu je zároveň přidané tzv. rychlé SBS. To hraje roli aktivní látky v modifikační přísadě Improcel K 60 (poskytnuté firmou CIUR a.s.), které by mělo upravit vlastnosti vzorku tak, aby se zlepšily kohezní a adhezní vlastnosti, aby se zvýšila tuhost a došlo ke zlepšení nízkoteplotních a vysokoteplotních vlastností. Můžeme tedy předpokládat, že výsledky ze zkoušek budou odpovídat efektu zvýšení tuhosti tzn. menší vznik trvalé deformace vyjetí kolem, vyšší moduly tuhosti, zlepšení hodnoty ITSR a lomové houževnatosti oproti vzorku s R-materiálem bez přísady. Zároveň při Marshallově zkoušce, by síla vynaložená na vzorek, měla být nejvyšší.

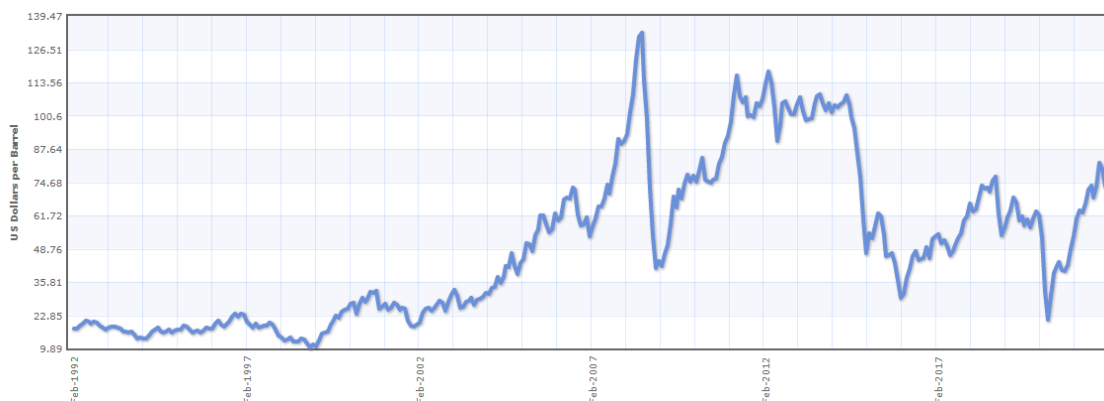


TEORETICKÁ ČÁST

3 RECYKLACE

Recyklace asfaltových vozovek je progresivní technologií, která je důležitým prvkem pro udržení oběhového hospodářství. Vzhledem k dnešní situaci je využití R-materiálu čím dál tím více žádoucí kvůli množství kladných vlastností, které recyklace přináší.[1][2]

Při použití správné technologie jsme schopni značně snížit náklady, prodloužit životnost a zároveň dosáhnout požadované kvality vozovky. Nátlak na využití R-materiálu je také značně ovlivněn cenou ropy, která ve 21. století během pár let několikanásobně vzrostla.[1][2]



Graf 1 Nárůst ceny ropy v rozmezí 30 let [18]

Dalším problémem, se kterým se stavební firmy setkávají je nedostatek kameniva, způsobený omezeným množstvím otevřených lomů, které jsou schopny dodávat kamenivo dostatečné kvality. Tímto způsobem bude kamenivo stále méně dostupné a využívání recyklovaného materiálu se zdá být jako nutnost, aby se celková spotřeba kameniva co nejvíce snížila.

Opětovným používáním R-materiálu jsme také schopni omezit obrovské kvantum odpadu na skládkách, které vznikají klasickou technologií kompletní rekonstrukce vozovky.



3.1 Frézování asfaltových vozovek

Pro získání R-materiálu se využívá proces frézování za pomoci stroje silniční frézy, bez kterého se v dnešní době při opravě silnic, dálnic a místních komunikací neobejdeme. Frézování se obecně používá pro odstranění starých nebo poškozených vrstev, anebo, pokud je třeba upravit niveletu silniční komunikace. Frézování může probíhat za tepla nebo za studena. Rozdíl mezi těmito dvěma způsoby je, že u frézování za tepla probíhá k předehřátí povrchu před samotným frézováním. Tím dochází k rozvláknění povrchu a vozovka tak vydává nižší odpor, to zásadně prodlužuje životnost nožů, které se k frézování používají, ale zvyšuje náklady z důvodu potřeby velkého množství energie pro předehřátí povrchu.

3.1.1 Frézování za studena

Frézování za studena je nejčastěji využívaná technologie pro rozpojování povrchu vozovek v dnešní době. Tyto frézy se skládají z hydraulicky poháněných pásů pro zlepšení pohyblivosti na nezpevněném povrchu. Mezi těmito pásy se nachází ocelový buben, ve kterém jsou uloženy samotné řezné nože. Řezné nože silniční frézy mají různé tvary a jsou vyměnitelné. Po dobu frézování je na nože stříkána voda, tím se nože chladí a prodlužuje se jejich životnost. Vyfrézovaný materiál se pak dostává na dopravníkový pás, který přepraví materiál z bubnu frézy do sklápěcí korby nákladního auta. [11]



Obrázek 1 - Frézování vozovky za studena [10]



3.1.2 Jemné frézování

Jemné frézování je levná a efektivní varianta, která vede ke zlepšení bezpečnosti silničního provozu. Tato technologie se liší od klasického frézování počtem nožů, který je dvojnásobný a tím se sníží rozestup drážek. To umožňuje provedení povrchů s homogenní makrotexturou a dobrými protismykovými vlastnostmi. S touto technologií lze jednoduše odstranit vyjeté koleje a upravit povrch na požadovanou niveletu v příčném směru. Na takto upravený povrch není třeba pokládat další vrstvy a lze takto frézovat jak asfaltové, tak betonové vozovky.[11]



Obrázek 2 - Jemný frézovací buben [12]

3.1.3 Frézovací stroje

Frézovací stroje dělíme zejména dle velikosti na:

- **Malé** – rozpětí 350 mm až 1200 mm, jsou levné, skladné a hodí se převážně na menší opravy nebo frézování v úzkých prostorech. Hloubka zásahu až 10–30 centimetrů. Průměrná hmotnost 15 t.
- **Střední** – rozpětí 1000 mm do 1500 mm, používá se pro frézování komunikací v obcích, kruhových křižovatek, parkovišť. Hloubka zásahu frézy 33 centimetrů. Průměrná hmotnost frézy 20 t.
- **Velké** – Rozpětí frézy 2000 mm až 2200 mm. Pro frézování meziměstských komunikací, dálnic. Hloubka zásahu frézy až 35 centimetrů. Průměrná hmotnost 30-40 t.



3.2 R-materiál

Pod pojmem R-materiál se rozumí upravený materiál, který byl znovuzískaný z asfaltové směsi pomocí technologie (převážně frézováním) a je vhodný a připravený pro použití jako stavební materiál pro novou asfaltovou směs dle normy ČSN EN 13108-8. Musí splňovat požadavky z hlediska vlastností zastaralého pojiva, kameniva a cizorodých látek. Úprava materiálu může obsahovat jeden nebo více kroků, např. frézování, drcení, prosévání, smíchání s jiným materiálem. Na zásobu R-materiálu vznikají požadavky na deklarování obsahu cizorodých látek dle ČSN EN 12697-42, obsahu a druhu pojiva podle ČSN EN 12697-1 a zrnitosti podle normy ČSN EN 933-1.

3.2.2 Skladování R-materiálu

Znovuzískaný R-materiál, který obsahuje polymerem modifikované pojivo je vhodné skladovat odděleně od nemodifikovaného R-materiálu. Velké kusy vybouraného materiálu je vhodné rozpojovat pomocí bouracích kladiv. Pokud je potřeba, RA se předrtí do požadované frakce. Pro skladování se R-materiál rozdělí dle frakcí a uloží se do boxů se zpevněným asfaltovým nebo betonovým podkladem.[3]

3.2.3 Rejuvenace zastaralého asfaltového pojiva

Kvůli procesům stárnutí již nemá asfaltové pojivo, které je obsaženo v R-materiálu, stejné parametry jako původní pojivo. Materiál se tedy stává tužším a tím také křehčím. Má zároveň obecně nižší hodnotu penetrace, vyšší teplotu bodu měknutí a vyšší teplotu bodu lámavosti. Abychom vylepšili tyto vlastnosti ovlivněné stárnutím, používáme různé možnosti rejuvenace (oživení).[3]

- **Přidání asfaltového pojiva s vyšší hodnotou penetrace** – Na obalovně je dávkováno nové pojivo s nižší viskozitou. Výhodou této varianty je změkčení zastaralého pojiva a obnova některých fyzikálních a chemických vlastností.[3]
- **Použití rejuvenační přísady** – Této metodě je v dnešní době věnována značná pozornost, kvůli jednoduchosti míchání, pokud je obalovna vybavena příslušnými dávkovači tekutých, či sypkých přísad.[3]
- **Použití modifikovaného asfaltového pojiva typu RC** – Metoda spočívá v oživení zastaralého pojiva pro asfaltové směsi se zvýšeným obsahem R-materiálu např. pojiva označována zkratkou „PMB RC“. U těchto směsí se předpokládá vyšší míra modifikace.[3]



3.2.4 Vhodnost přidání R-materiálu do nově vyráběných směsí

Vhodnost R-materiálu se řídí normovanými požadavky na R-materiál. Mezi ně patří environmentální požadavky, obsah cizorodých látek, požadavky na asfaltová pojiva, vlastnosti a zrnitost podle ČSN 73 6141. Jaký typ R-materiálu patří do jakého typu vrstvy vozovky se řídí podle tabulky 1:

R-materiál získaný z:	Použití do nově vyráběných směsí pro:			
	Litý asfalt	Asfaltová obrusná vrstva	Asfaltová ložní vrstva	Asfaltová horní podkladní vrstva
Litého asfaltu	ANO	ANO ²⁾	ANO ²⁾	ANO
Asfaltové obrusné vrstvy ¹⁾	NE	ANO	ANO	ANO
Asfaltové obrusné a ložní vrstvy	NE	ANO ²⁾	ANO	ANO
Asfaltové obrusné a ložní vrstvy s modifikovaným pojivem	NE	ANO	ANO	ANO
Asfaltové ložní vrstvy ¹⁾	NE	ANO ²⁾	ANO	ANO
Asfaltové horní podkladní vrstvy ¹⁾	NE	NE	NE	ANO
Asfaltové obrusné, ložní vrstvy a horní podkladní vrstvy – neselektivní frézování	NE	NE	ANO ²⁾	ANO

¹⁾Jedná se o materiál selektivně vyfrézovaný a skladovaný odděleně od ostatního R-materiálu
²⁾ Nutné další ověření/zkoušky pro prokázání vhodnosti použití R-materiálu do dané asfaltové směsi (vrstvy).

Tabulka 1 - Možnosti přidání upraveného R-materiálu do nově vyráběných směsí [3]



3.2.5 R-materiál v modifikovaných asfaltových směsích

Použití R-materiálu do asfaltových směsí typu AC se výrazně liší dle typu vrstvy vozovky a dané jakosti směsi. Pro nemodifikované asfaltové směsi je povoleno množství R-materiálu obecně větší než pro směsi modifikované. Hlavním důvodem je obtížné předpokládání vlastností modifikovaných směsí s větším obsahem R-materiálu, obzvláště při použití rejuvenátorů. Maximální normované množství R-materiálu v modifikovaných směsích je 15 % z tabulky 2. dle normy ČSN 73 6121. [3]

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

¹⁾ Při výrobě asfaltových směsí s nemodifikovaným asfaltem je možné použít R-materiál v množství do 30 %, v případě použití polymerem modifikovaného asfaltu v množství do 15 %. Původ použitého R-materiálu musí být výhradně ze znovuzískané asfaltové směsi krytů asfaltových vozovek.

Tabulka 2 - Nejvyšší přípustný obsah R-materiálu v % hmotnosti asfaltové směsi [3]

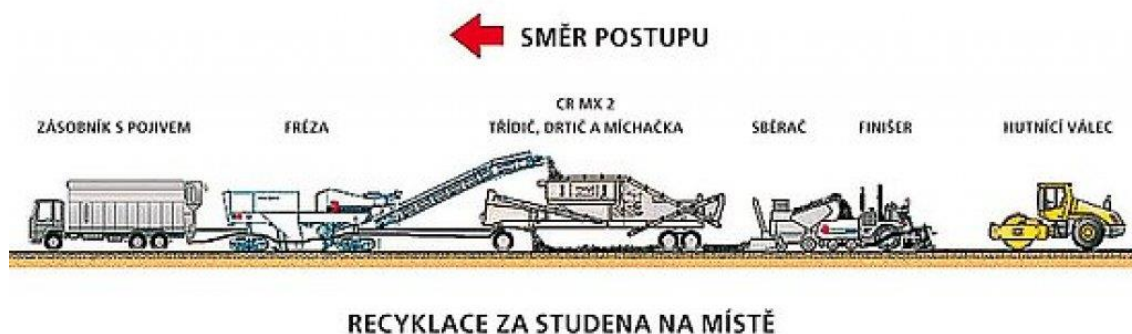
Kdybychom brali tabulku z normy ČSN 73 6121 doslovně, platila by podmínka o maximálním použití R-materiálu v modifikovaných směsích pouze pro asfaltové směsi ložní vrstvy s jakostí S. V praxi ale podmínka platí pro všechny typy směsí.

Při přidávání R-materiálů do těchto směsí je důležité pečlivě sledovat proměnlivé obsahy pojiva a zajistit použití kvalitního homogenního R-materiálu. Z důvodu problematického předpokladu chování výsledné směsi je nutno se touto problematikou více zabývat. [9]



3.3 Recyklace za studena na místě

Oproti finančně náročné klasické technologii rekonstrukce vozovek je recyklace asfaltových vozovek za studena na místě progresivní technologií, která umožní za stejnou cenu opravit více kilometrů vozovek a značně zkrátit dobu oprav. Při tomto procesu dochází k rozpojení původních vrstev konstrukce vozovky, úpravě pomocí přísad, dávkování pojiva k R-materiálu, míchání a následně pokládka a hutnění. Ke všem technologickým krokům dochází in situ. [4][5][1]



Obrázek 3 - Postup recyklace za studena na místě [5]

Výhody recyklace za studena na místě:

- Rychlost provádění oprav
- Menší náklady
- Omezení dopravy (ekologické hledisko, úspora pohonných hmot)
- Homogenizace vozovky
- Menší riziko poškození navazujících pozemních komunikací

3.3.1 Rozdělení recyklace za studena na místě

Recyklaci lze dále rozdělit do čtyř skupin podle druhu použitého pojiva

- **Recyklace bez pojiva** – Jedná se pouze o homogenizaci a reprofilaci nestmelených vrstev za přidání materiálů pro zlepšení zrnitosti.[5][1]
- **Stmelení cementem či jiným hydraulickým pojivem** – používá se pro recyklování vrstev které neobsahují asfaltové pojivo.[5][1]
- **Asfaltová emulze a cement nebo zpěněný asfalt a cement** – používá se pro společnou recyklaci vrstev, které obsahují asfaltové pojivo a vrstev bez asfaltového pojiva.[5][1]
- **Asfaltová emulze nebo zpěněný asfalt** – pro recyklaci asfaltového krytu.[5][1]



Při použití asfaltové emulze nebo asfaltové pěny (foamed bitumen mix) se směs vyrábí přidáním horkého asfaltu ve formě pěny do studeného recyklátu. Při použití pěny se spotřebuje menší množství asfaltu. Recyklovaný materiál se doplňuje kamenivem, kvůli úpravě čáry zrnitosti v závislosti na tloušťce nové vrstvy. [4][5]

3.3.2 Typy recyklace za studena na místě

- **Částečná recyklace (Partial Depth Reclamation)** - Je to recyklace asfaltových vrstev v krytu na místě do hloubky maximálně 120 mm. Jako hlavní složka pojiva se používá asfaltová emulze. Je vhodná v případě regenerace krycí vrstvy, pokud se jedná o hloubkovou korozi povrchu, výtluky, mozaikové trhliny, podélné a příčné trhliny. Strojní zařízení musí být vybaveno tak, aby bylo umožněno předrcení a doplnění dalšího kameniva k dosažení potřebné zrnitosti a zároveň musí být vybaveno míchačkou s dávkovačem pojiva a přísad pro dokonalé mísení.[1][4]
- **Celková recyklace (Full Depth Reclamation)** - Jedná se o recyklaci podkladních vrstev nebo společnou recyklaci krytu a podkladních vrstev. Většinou se recyklace pohybuje v hloubce 120 mm až 250 mm, kde se jako pojivo používá cement nebo kombinace cementu (možnost nahradit jiným hydraulickým pojivem na bázi cementu) a asfaltové emulze/zpěněného asfaltu. Jeho použití je výhradně v případě, kdy je vyčerpána únosnost vozovky a je narušena natolik, že je nezbytná rekonstrukce více vrstev. Příznakem je výskyt síťových trhlin s četnými výtluky a plošnými deformacemi ve stopách vozidel či na okrajích.[1][4]

3.3.3 Využití technologie a rizika

Celkově touto technologií lze opravovat v zásadě silnice všech tříd, ale je především vhodná pro silnice II. a III. třídy, městské komunikace a plochy, které vykazují deformace vozovky popsané v bodě 3.2.2. Technologii lze také využít, pokud je potřeba zajistit omezení silničního prostoru pouze částečně, v tomto případě jde zajistit průjezd sousedícím jízdním pruhem.[5]

Pro kvalitní opravu deformací vozovky se klade vysoký nárok na důslednou diagnostiku vozovky před zahájením prací, laboratorní návrh, homogenitu prováděných prací a technologickou kázeň.



3.4 Recyklace za studena v míchacím centru

Tato technologie využívá použití mobilních nebo semimobilních jednotek. Při opravě se vyfrézovaná asfaltová směs z původní vozovky dopravuje ze stavby a následně se upravuje drcením a tříděním pro získání požadované zrnitosti. Po úpravě se R-materiál naváží do míchací jednotky, kde dochází k přidávání pojiva (asfaltová emulze, zpěněný asfalt, cement 1-2 % popř. vápenný hydrát). Směs se převáží zpět na stavbu, kde se pomocí finišerů pokládá za studena a dále se hutní zejména těžkými nebo pneumatikovými válci. Během dopravy nesmí dojít k znečištění, segregaci či velké změně vlhkosti, při které by nebylo možno ztuhnout směs na požadovanou míru ztuhnutí.
[1][2][4]



Obrázek 4 - Mobilní míchací jednotka [2]



3.5 Recyklace za horka na místě

Trhliny a otevřené pracovní spáry jsou častým problémem silničních komunikací, které při nedostatečném ošetření způsobují degradaci vrstev vozovky, vznik výtluků a celkovému snížení její životnosti. Pro zamezení těchto defektů, můžeme použít způsob recyklace za horka na místě, která je nízko odpadovou technologií využívající místního materiálu.

Metoda spočívá v použití soustavy strojů, které na potřebnou teplotu ohřívají asfaltovou směs vrstvy, která je určená pro recyklaci, rozpojí směs remixerem a následně směs promíchají s přidávanými materiály. Poté dochází k zpětnému položení a zhutnění.[6][1]

Výhody recyklace za horka na místě:

- Využití místního materiálu
- Nízká ekonomická náročnost
- Rychlost opravy
- Možnost opravy za částečného provozu
- Nezatížení silniční sítě dopravou materiálů

Do oblasti této technologie patří pět variant recyklace za horka na místě, nejčastěji používanými jsou metody REMIX a REMIX PLUS. Méně časté metody jsou REGRIP, RESHAPE A REPAVE

3.5.1 REGRIP

Hlavním cílem této metody je zlepšení protismykových vlastností vozovky. Dochází k nahřátí stávajícího povrchu, následné podrcení kamenivem úzké frakce. Nakonec se upravený povrch zhutní válcem.[1]

3.5.2 RESHAPE

Tato technologie spočívá ve vhodné úpravě příčného profilu vozovky. Postup začíná ohřátím asfaltové vrstvy určené k recyklaci, rozpojení a nakypření směsi vrstvy, urovnání rozpojené a nakypřené asfaltové směsi v příčném a podélném směru, zhutnění již urovnané asfaltové směsi.[1]

3.5.3 REPAVE

Technologie úpravy příčného profilu vozovky s položením nové asfaltové vrstvy, kde dochází k ohřátí asfaltové směsi vrstvy určené pro recyklaci, rozpojení a nakypření směsi, urovnání upravené směsi v příčném a podélném směru, položení nové asfaltové vrstvy na urovnanou směsi bez promísení, a nakonec zhutnění obou vrstev současně.

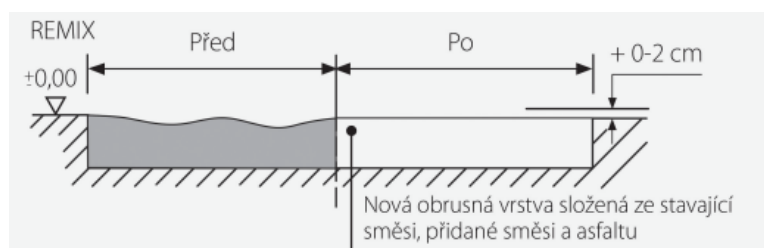


3.5.4 REMIX

Jedná se o přetvarování stávající vrstvy vozovky a zlepšení jakosti asfaltové směsi. Při této metodě se ve vrstvě upravují fyzikálně-chemické vlastnosti za přidání potřebných materiálů. Varianta se skládá z následujících kroků:

- rozprostření přidávaného kameniva na povrch vozovky
- ohřátí asfaltové směsi vrstvy určené k recyklaci
- rozpojení ohřáté asfaltové směsi
- přidání potřebných materiálů (změkčující přísady, asfalt, předobalená směs kameniva)
- promíchání ohřáté asfaltové směsi s přidanými materiály
- zpětné položení upravené asfaltové směsi
- zhutnění upravené asfaltové směsi

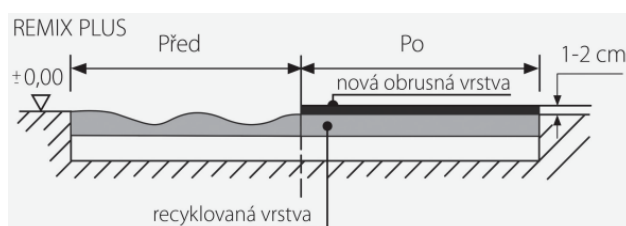
Varianta je tedy výhodná, pokud má vozovka nedostatečné fyzikálně-chemické vlastnosti, např. nevyhovující čáru zrnitosti nebo nedostatečnou kvalitu pojiva. REMIX umožňuje povrchovou úpravu vozovky do hloubky až 55 mm.[1][6]



Obrázek 5 - Pokládka metodou REMIX [7]

3.5.5 REMIX PLUS

Remix plus je varianta postupově podobná jako u varianty REMIX, ale je rozšířená o pokládku nové obrusné vrstvy, tzn. původní vrstva se upraví klasicky technologií REMIX pomocí přídatných komponentů a na ní se systémem horké na horké položí nové asfaltové směsi obrusné vrstvy v jednom pracovním cyklu. Závěrečné hutnění se provádí současně pro recyklovanou vrstvu a novou obrusnou vrstvu. REMIX PLUS umožňuje povrchovou úpravu do hloubky 55 mm původní vozovky a navýšení celkové tloušťky o max. 50 mm.[6][7]



Obrázek 6 - Pokládka metodou REMIX PLUS [7]



3.5.6 Požadavky na recyklované směsi

Recyklovaná směs						
Typ	R					
Druh vrstvy	obrusná	ložní	Podkladní			
Označení recyklované směsi	ACO 11 R, 16 R	ACL 16 R, 22 R	ACP 16 R, 22 R			
Počet úderů Marshallova pěchu	2 x 50					
Všeobecné požadavky						
Zrnitost / síto (mm)	ACO 11 R	ACO 16 R	ACL 16 R	ACL 22 R	ACP 16 R	ACP 22 R
31,5	-	-	-	100	-	100
22,4	-	100	100	85-100	100	85-100
16	100	85-100	85-100	70-95	85-100	60-88
11,2	85-100	-	-	-	-	-
8	60-90	50-85	50-85	45-78	50-85	35-70
4	38-72	27-65	27-65	-	-	-
2	20-50	18-48	18-48	15-50	24-53	18-45
0,125	4-16	4-15	4-18	4-17	5-18	4-18
0,063	3-13	3-12	3-13	3-12	4-12	3-12
Minimální mezerovitost V_{\min} (%) ¹⁾	2,0 (1,5)		3,5 (2,5)		4,0 (3,0)	
Maximální mezerovitost V_{\max} (%) ¹⁾	5,0 (6,0)		6,0 (8,0)		7,0 (9,0)	
Max. poměrná hloubka koleje PRD_{AIR} (%) ^{2), 3)}	7,0		5,0		-	
Max. přírůstek hloubky koleje WTS_{AIR} (mm/10 ³ cyklů) ^{2), 3)}	0,15		0,10		-	

Tabulka 3 - Požadavky na recyklované směsi [6]

Výsledná penetrace asfaltového pojiva recyklované směsi [0,1 mm]	Nejnižší teplota asfaltové směsi před zahájením zhutňování [°C]
101 – 150	120
71 – 100	130
51 – 70	135
≤ 50	145

Tabulka 4 - Minimální teploty recyklované asfaltové směsi před zahájením zhutňování [6]

Při procesu recyklace musí být recyklovaná vrstva prohřátá do hloubky tak, aby původní směs měla po dokončení procesu a před zahájením zhutňování teplotu, která je určena tabulkou 3.[6]

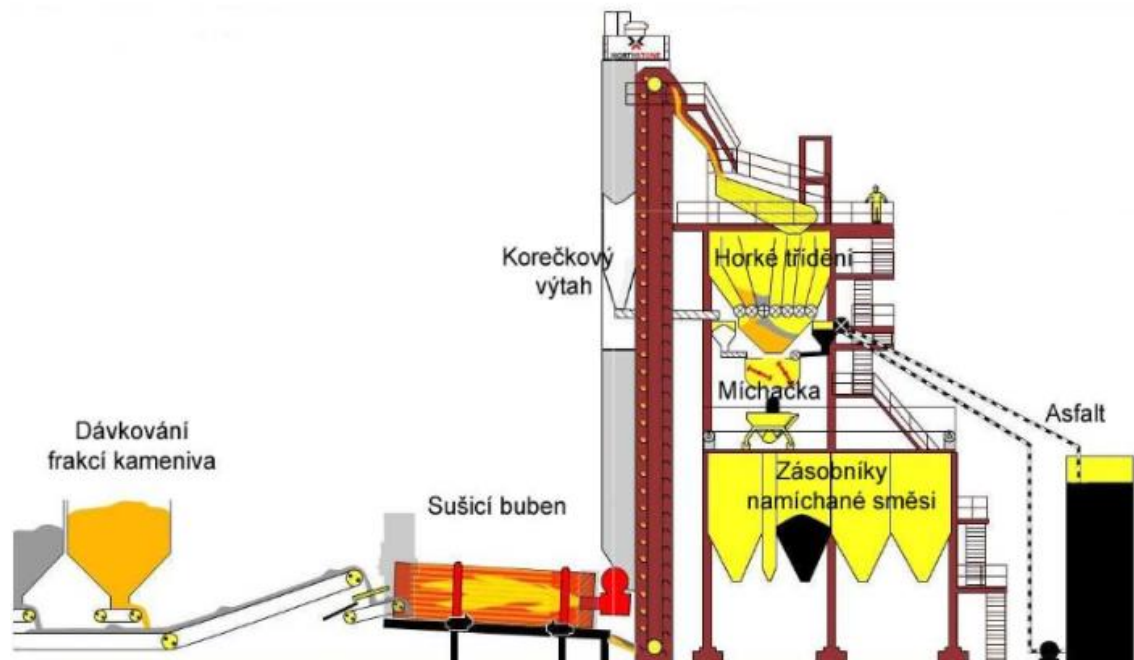


3.6 Recyklace za horka na obalovně

Obalovny jsou výrobny, ve kterých dochází k výrobě asfaltových směsí dle řady norem ČSN EN 13108, ČSN 736121, ČSN 736120 a dalších TP. V dnešní době se u moderních obaloven přechází na digitální řízení, kde výrobce musí pečlivě zadávat recepturu dané směsi, kterou se snaží vyrobit. Receptura obsahuje rozpis zastoupených látek jako je množství různých frakcí kameniva, asfaltového pojiva, R-materiálu a vratného nebo vápencového fileru.

Obalovny dělíme na kontinuální, stacionární a mobilní. V České republice se kontinuální obalovny často nepoužívají, jelikož jsou schopny vyrábět jednu recepturu asfaltové směsi a jsou výhodné pouze pro velké liniové stavby. V USA tvoří kontinuální obalovny až 80 % všech obaloven. Největší zastoupení u nás mají obalovny šaržové. Šaržové obalovny vyrábí směsi diskontinuálně a lze vyrábět v průběhu dne více receptur. Obalovny se liší velikostí a výkonem, který se udává v tunách vyrobené směsi za hodinu. [8]

Vyfrézovaný R-materiál se ze stavby odváží na obalovnu nebo recyklační centrum, kde se následně upravuje na požadované vlastnosti. Upravený materiál se do obalovny přidává různými způsoby: přidáváním R-materiálu přímo do míchačky, využití paralelního sušícího bubnu, metodou Drum-mix pro kontinuální obalovnu.

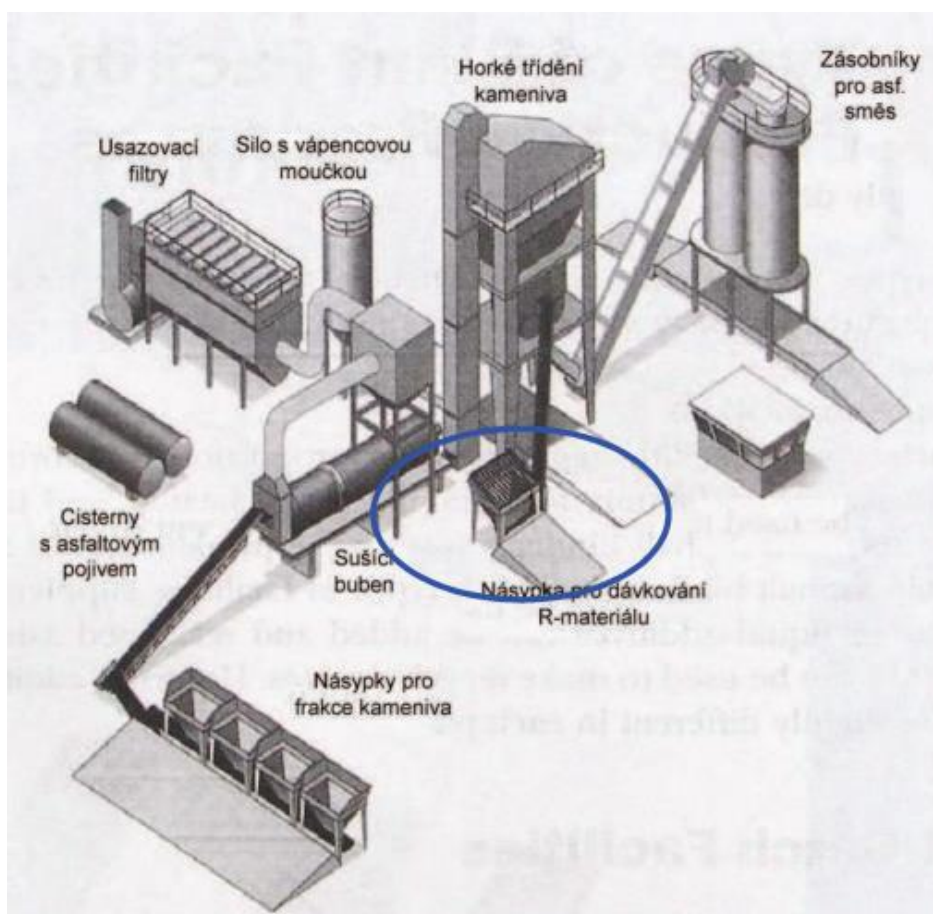


Obrázek 7 - Šaržová obalovna [2]



3.6.1 Dávkování přímo do míchačky šaržové obalovny

Při dávkování R-materiálu přímo do míchačky se nejprve přehřívá nerecyklované kamenivo v sušícím bubnu a až poté se přidává R-materiál. Jelikož dochází při tomto procesu k přenosu tepla mezi kamenivem a R-materiálem, musí se kamenivo v bubnu ponechat delší dobu a přehřívát na vyšší teplotu. Z energetického hlediska se nedoporučuje touto metodou přidávat velké množství recyklovaného materiálu a doporučuje se přidávat maximální množství přibližně 25 %. Další problém, který vzniká při použití této metody je problém s vlhkostí, protože skládky z většiny nejsou zastřešené. Do výrobního cyklu je nutno zařadit odvětrávání. [2][8]

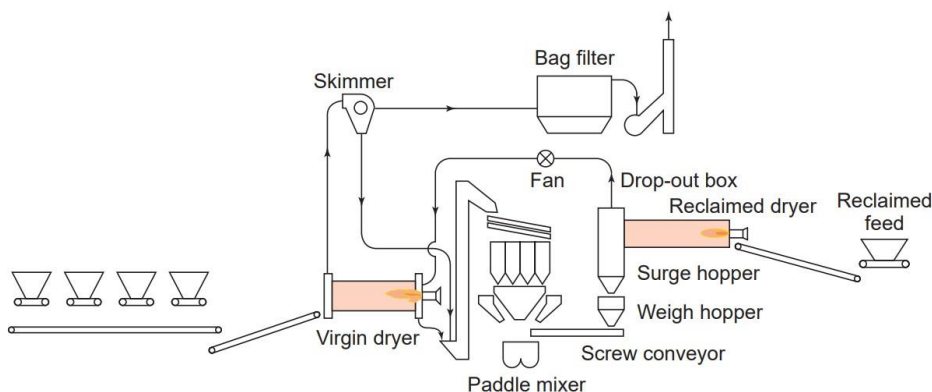


Obrázek 8 - Dávkování R-materiálu přímo do míchačky šaržové obalovny [2]



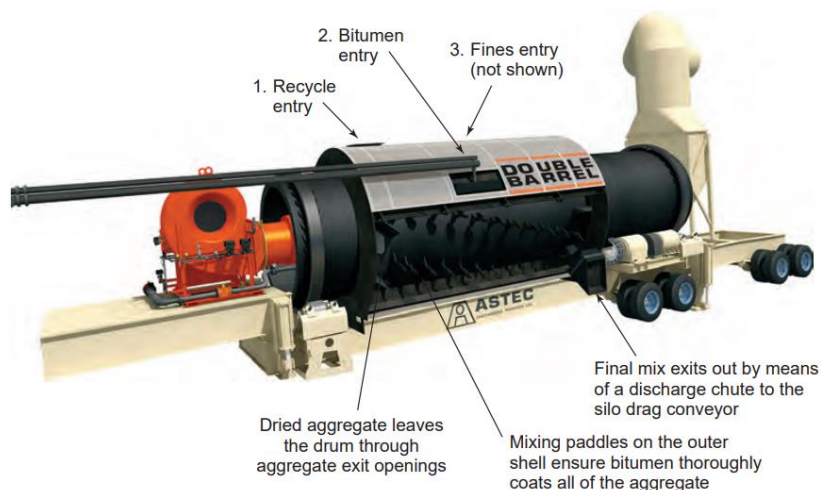
3.6.2 Předehřívání R-materiálu v paralelním bubnu

Tato metoda oproti přímému dávkování R-materiálu do míchačky řeší problém s energetickou náročností přenosu tepla. Tímto jsme schopni dávkovat mnohem větší množství R-materiálu. Použití druhého paralelního bubnu umožňuje využití až 80 % R-materiálu, který je v paralelním bubnu předehříván na teploty v rozmezí 80–130 °C. Pokud do směsi přidáváme velké množství R-materiálu, tak je výhodné jej skladovat v zastřešených halách pro snížení vlhkosti.



Obrázek 9 - schéma šaržové obalovny s paralelním sušícím bubnem [8]

Při použití pouze jednoho bubnu je další variantou technologie dvouplášťového bubnu. Tento buben se rozděluje na vnitřní a vnější část. Ve vnitřní části dochází k sušení nového kameniva plynovým hořákem. Ve vnější části se nachází R-materiál, touto soustavou zamezíme kontaktu těchto materiálů před samotným sušením. R-materiál se dále dávkuje z vnějšího bubnu do míchačky a mísí se s kamenivem za přidání pojiva. Výhodou této technologie je využití jednoho plynového hořáku pro R-materiál i kamenivo a tím snížení nákladů na výrobu.

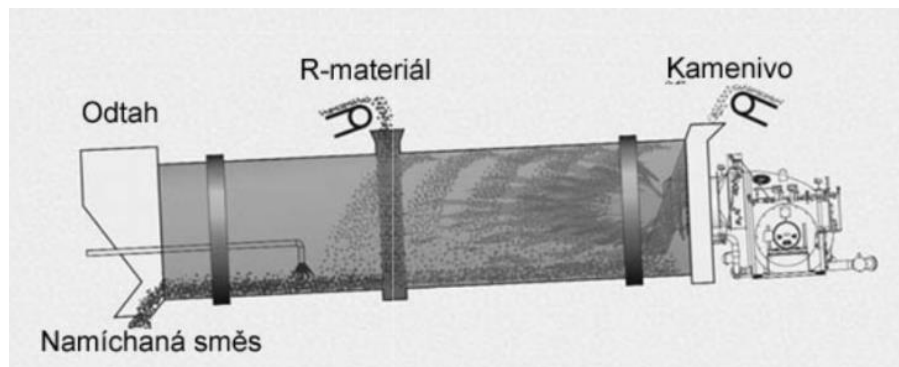


Obrázek 10 - dvouplášťový buben [8]



3.6.3 Metoda Drum-mix

Metoda Drum-mix se převážně používá v USA, je ideální pro velkokapacitní produkci asfaltových směsí až 800 tun za hodinu. Oproti šaržové obalovně potřebuje mnohem méně zařízení a tím jsou i údržby méně nákladné. Proces vyžaduje konstantní kvalitu vstupních materiálů a R-materiál se přidává souběžně s proudem horkého vzduchu. Varianta Drum-mix čelí spoustě rizik, které omezují její výrobu. Použití vysokých teplot na R-materiál může způsobit degradaci pojiva. Zároveň vzniká riziko vzniku modrého dýmu, který je škodlivý životnímu prostředí a je tedy nepřípustný. R-materiál můžeme přidávat třemi způsoby: s proudem horkého vzduchu, proti proudu horkého vzduchu, separátní vysoušení R-materiálu a míchání v míchačce. Kvůli moderní technologii jsme schopni efektivně zamezit vzniku modrého dýmu a do lze přidávat až 60 % R-materiálu.[8][2]



Obrázek 11 - Metoda Drum-mix [2]



PRAKTICKÁ ČÁST

Výroba směsí a všech vzorků proběhla v laboratoři Viakontrol s.r.o. v Lounech. Konkrétně se jedná o 3 typy směsí, ze kterých bylo zhotoveno 48 Marshallových těles a 6 desek. Typy směsí jsou: referenční směs ACP 16+ PMB 25/55–65 (často označována jako „čistá směs“), ACP 16+ PMB 25/55–65 s obsahem 50 % R-materiálu, ACP 16+ PMB 25/55–65 s obsahem 50 % R-materiálu a přidanou modifikační přísadou K60 s aktivní látkou „rychlé SBS“.

4 PŘÍPRAVA ASFALTOVÝCH SMĚSÍ

Nejprve se pro každou asfaltovou směs připravila navážka s odhadem křivky zrnitosti. Navážka se připravila pro dvě hlavní směsi, a to čistou směs bez přidání R-materiálu a směs s přidáním R-materiálu bez K60. Navážka pro směs s modifikační přísadou K60 je stejná jako pro směs, která obsahuje 50 % R-materiálu, kvůli přesnosti porovnání a malá gramáž přidané přísady nijak zásadně nemění strukturu směsi. Navážka se připravovala na celkovou hmotnost 8000 g. Cílem návrhu bylo odhadnutí křivky zrnitosti, množství asfaltového pojiva tak, aby rozdíl mezerovitostí těchto směsí byl maximálně ± 1 %, kvůli zajištění optimálních podmínek pro porovnávání změřených vlastností.

NÁVRH SLOŽENÍ ASFALTOVÉ SMĚSI			
DRUH KOMPONENTU		Zastoupení	Navážka [g]
HDK 11/16	Měrunice	28,6 %	2296,8
HDK 8/11	Měrunice	14,4 %	1148,4
HDK 4/8	Měrunice	14,4 %	1148,4
SDK 0/4	Měrunice	33,5 %	2679,6
Filer	Velké Hydčice	4,8 %	382,8
Asfalt	PMB 25/55 - 65	4,3 %	344,0
NAVÁŽKA CELKEM		100,0 %	8000

Tabulka 5 - Návrh složení asfaltové směsi ACP 16+ PMB 25/55–65



NÁVRH SLOŽENÍ ASFALTOVÉ SMĚSI			
DRUH KOMPONENTU		Zastoupení	Navážka [g]
R-materiál (2,1 % asf. pojiva)	Ekostavby s.r.o.	50,0 %	4000
HDK 11/16	Měrunice	10,5 %	840,2
HDK 8/11	Měrunice	8,6 %	687,8
HDK 4/8	Měrunice	7,7 %	616,4
SDK 0/4	Měrunice	19,0 %	1519,6
Filer	Velké Hydčice	1,9 %	152,1
Asfalt	PMB 25/55–65	2,3 %	183,9
NAVÁŽKA CELKEM		100,0 %	8000

Tabulka 6 - Návrh složení asfaltové směsi ACP 16+ PMB 25/55–65, 50 % R-materiál

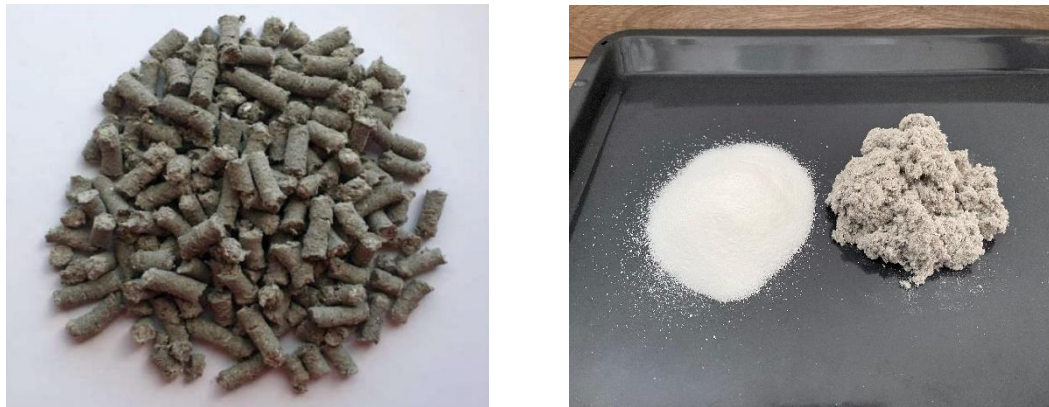
Použitý R-materiál byl získán z depa obalovny Ekostavby Louny s.r.o. s frakcí 0/16, který obsahoval 2,1 % asfaltového pojiva PMB 25/55–60. Pro výrobu směsi ACP 16+ PMB 25/55–65 s 50 % R-materiálu a K 60 se do navážky (viz. Tabulka 6) přidalo 14,4 gramů aktivní látky SBS. Dávkování přísady bylo určeno na základě konzultace s dodavatelem modifikace, kde se v případě této směsi dává 4 % aktivní látky hm. celkového asfaltu, což je přibližně 8,5 % ze zastaralého pojiva R-materiálu.

4.1. Modifikační přísada K 60

Modifikační přísada Improcel K 60 je přísada pro asfaltové směsi za normálních okolností ve formě granulátu, která obsahuje speciálně upravené rychle reagující SBS (styrén – butadien – styrén) polymery. S touto přísadou není třeba polymerem modifikovat pojivo předem, ale lze modifikovat přímo za sucha při míchání směsi. Celý proces výroby tedy probíhá na místě za použití dávkovacího zařízení obaloven. Nejsou tak potřeba speciální dávkovací zařízení. [13]

Modifikační přísada zlepšuje ve směsi její mechanické vlastnosti a vlastnosti z hlediska teplotní citlivosti. Přidáním přísady docílíme zlepšení nízkoteplotních a vysokoteplotních vlastností. Zlepšuje pevnost v ohybu, moduly tuhosti společně se zlepšením adhezních a kohezních vlastností směsi, odolnost proti deformacím, proti smykové vlastnosti. Aktivní látka zvyšuje bod měknutí a snižuje penetraci. [13]

Granulát Improcel K 60 je v poměru 60% aktivní látky a 40% množství celulózy. Za normálních okolností se doporučuje dávkovat 3 % aktivní látky z hmotnosti pojiva. Pro tuto bakalářskou práci jsme zvolili dávkování 4 % z hmotnosti pojiva z důvodu lepšího projevení vlastností přísad. Jelikož jsme směs míchali v laboratorní míchačce, dodala firma CIUR přísadu rozděleně (oddělená aktivní látka a celulózová vlákna), pro lepší promíchání a spojení se směsí.[13]



Obrázek 12 - Granulát Improcel K [14] (vlevo); Improcel K oddělená aktivní látka a cel. vlákna [vlastní foto] (vpravo)

4.2 Výroba asfaltových směsí

Pro míchání asfaltové směsi se prvně připravilo kamenivo. Protože se míchání asfaltových směsí provádí za horka, je nutno kamenivo předežhřát na požadovanou teplotu. Kamenivo a filer byly umístěny do sušárny, kde byly temperovány na teplotu 160°C. Asfaltové pojivo se do sušárny vložilo později, aby vlivem vysokých teplot nedocházelo k degradaci pojiva, při které by ztrácelo své mechanické vlastnosti. Před samotným mícháním se laboratorní míchačka nahřála na požadovanou teplotu a vyčistila se vložením čistého kameniva. Míchačka se nechala pustit na dva cykly, kde jeden cyklus trvá 5 minut, a tím se ze stěn míchačky a vrtule odstranily nečistoty, které se mohly usadit z předešlé výroby směsí.



Obrázek 13 - Laboratorní míchačka [vlastní foto] (vlevo); Sušárna kameniva [vlastní foto] (vpravo)



Při dosažení požadované teploty kameniva se kamenivo naváželo do připravené mísy za použití digitální váhy dle navržených navážek (viz. tabulka 5 a 6). Následovně se kamenivo nasypalo do přehřáté míchačky a bylo promícháno po dobu 5 minut. Poté se mezi kamenivo přidalo přesné množství asfaltového pojiva (viz. tabulka 5 a 6) a míchačka se opět pustila na pěti minutový cyklus. Poslední fáze míchání bylo přidání fileru do směsi a opětovnému míchání po dobu 5 minut. Po domíchání směsi se zkontrolovalo, zda nedošlo k přilepení fileru k hraně míchačky, to by znamenalo nedostatečné promíchání směsi. Pokud se filer dostatečně nepromíchal, seškrábal se pomocí špachtle a míchačka se opět spustila, tentokrát na 3 minuty.



Obrázek 14 - Digitální váha s mísou [vlastní foto] (vlevo); kamenivo pro míchání směsí [vlastní foto] (vpravo)

Při míchání směsi, která obsahuje 50 % R-materiálu, se R-materiál přehřál na požadovanou teplotu a vložil se společně s pojivem odděleně od ostatního kameniva. Stejně jako u asfaltového pojiva se R-materiál přehřál těsně před mícháním, aby nedošlo k degradaci pojiva.

4.3 Kompletní analýza asfaltové směsi

Abychom se ujistili, že směs, kterou jsme vyrobili podle postupu z kapitoly 4.1.2 měla požadovanou křivku zrnitosti, mezerovitost a správné množství asfaltového pojiva, provedla se kompletní analýza asfaltové směsi.

4.3.1 Oddělení pojiva od kameniva pomocí extraktoru

Od každé směsi se odebrala navážka, ze které se oddělovalo pojivo v analyzátoru dle normy ČSN EN 12697-1 *Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 1: Obsah rozpustného pojiva*. Zvážené množství se umístí do drátěného koše a následovně do analyzátoru, kde je směs prolévána pomocí perchlorethylenu. Asphalt se tím oddělí od kameniva, jemné částice se uchyťí na filtr. Po dokončení extrakce bylo pojivo společně s perchlorethylenem odstředěno do připravené nádoby. Kamenivo a jemné částice byly zváženy pro zjištění množství pojiva ve vzorku.[15]



Obrázek 15 - Analyzátor [vlastní foto] (vlevo); drátěný koš [vlastní foto] (vpravo)

Ze zváženého kameniva a jemných částic se obsah asfaltového pojiva zjistí pomocí výpočtu následujícího vzorce. Výsledky jsou zpracovány v tabulce 7.

$$S = \frac{M_1 - M_2 - M_3}{M_1} * 100 \quad [15]$$

Vzorec 1 - Výpočet obsahu asfaltového pojiva [15]

Kde je:

S Obsah asfaltového pojiva [%]

M_1 Hmotnost vzorku směsi [g]

M_2 Hmotnost kameniva po extrakci [g]

M_3 Hmotnost jemných částic [g]

KA PRO SMĚS BEZ R-MATERIÁLU		KA PRO SMĚS S R-MATERIÁLEM	
PŘED EXTRAKCÍ POJIVA	Hmotnost [g]	PŘED EXTRAKCÍ POJIVA	Hmotnost [g]
Hmotnost nádoby + vzorku	4 373,00	Hmotnost nádoby + vzorku	4 441,60
Hmotnost nádoby	3 425,90	Hmotnost nádoby	3 425,80
Celková hmotnost	947,10	Celková hmotnost	1 015,80
PO EXTRAKCI POJIVA		PO EXTRAKCI POJIVA	
Vzorek + nádoba	4 263,10	Vzorek + nádoba	4 338,60
Hmotnost nádoby	3 425,90	Hmotnost nádoby	3 425,80
Hmot. patrony + fileru	602,60	Hmot. patrony + fileru	592,60
Hmotnost patrony	531,90	Hmotnost patrony	532,10
Hmotnost fileru	0,10	Hmotnost fileru	0,40
Kamenivo + filer	907,90	Kamenivo + filer	973,30
Obsah asfaltového pojiva	4,14%	Obsah asfaltového pojiva	4,18%

Tabulka 7 - Výsledky zastoupení asfaltového pojiva ve směsích



4.3.2 Stanovení skutečné křivky zrnitosti směsi

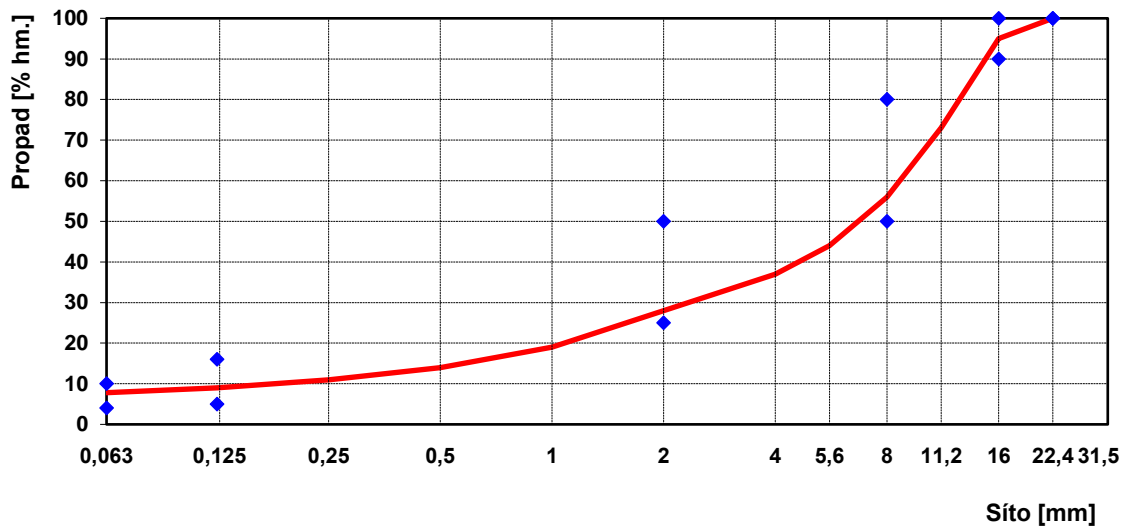
Kamenivo, které se separovalo od asfaltového pojiva extraktorem za pomoci perchlorethylenu se nasypalo do nádoby. Pro zjištění křivky zrnitosti se provedl síťový rozbor, kde se pomocí sady sít s rozdílnou velikostí otvorů sít rozdělí kamenivo dle velikosti zrna. Sestaví se sada zkušebních sít dle normy ČSN EN 933-1 *Stanovení zrnitosti – Síťový rozbor*. S pomocí vibračního zařízení se kamenivo prosévá do ustálené hmotnosti. Poté dochází k vážení zachyceného kameniva jednotlivých sít. Nesmí dojít ke ztrátě vzorků a začíná se sestupně od síta s největším otvorem. Jednotlivé vzorky se zpracují a procentuálně vyjádří do křivky zrnitosti.[16]

Zrnitost směsi bez R-MATERIÁLU	Srovnání čáry zrnitosti s ČSN 73 6121, příloha E			
	Síto [mm]	Naměřené hodnoty [% hm.]	Meze zrnitosti	
			min.	max.
	22,4	100	100	100
	16	95	90	100
	8	56	50	80
	2	28	25	50
	0,125	9	5	16
	0,063	7,8	4	10

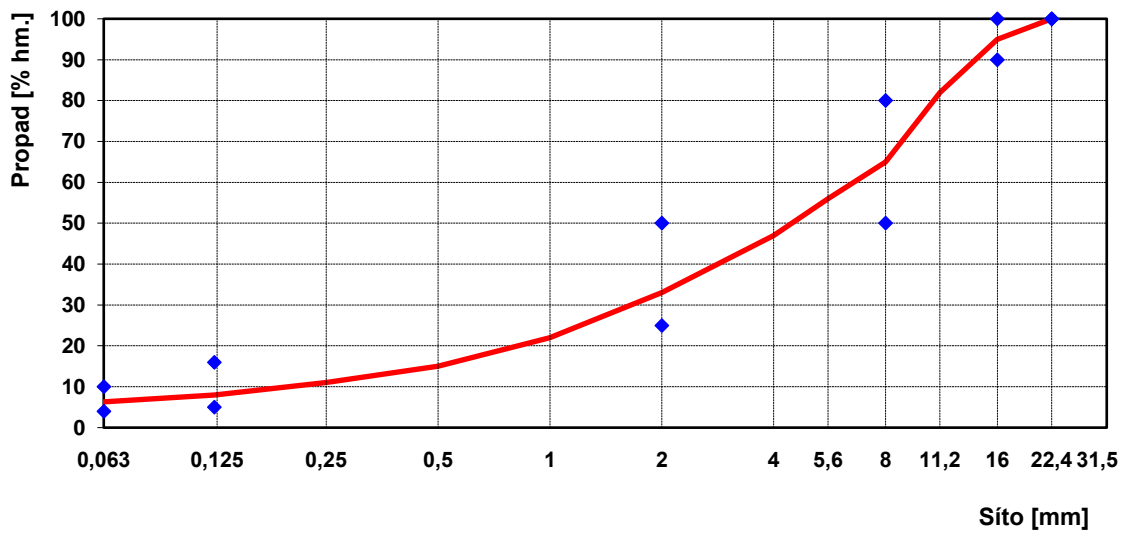
Tabulka 8 - Zrnitost směsi bez R-MATERIÁLU [17]

Zrnitost směsi s R-MATERIÁLEM	Srovnání čáry zrnitosti s ČSN 73 6121, příloha E			
	Síto [mm]	Naměřené hodnoty [% hm.]	Meze zrnitosti	
			min.	max.
	22,4	100	100	100
	16	95	90	100
	8	65	50	80
	2	33	25	50
	0,125	8	5	16
	0,063	6,3	4	10

Tabulka 9 - Zrnitost směsi s R-MATERIÁLEM [17]



Graf 2 - Křivka zrnitosti směsi bez R-MATERIÁLU



Graf 3 - Křivka zrnitosti směsi s R-MATERIÁLEM



4.3.3 Stanovení mezerovitosti směsi

Při porovnávání různých směsí laboratorními zkouškami je důležité, aby směsi měly podobnou mezerovitost. Kdyby vzorky měly znatelně odlišnou mezerovitost, výsledky zkoušek by potom nebyly přesné a porovnávání mezi nimi by ztrácelo integritu. Pro stanovení mezerovitosti je potřeba provést zkoušky: Maximální objemová hmotnost směsi a objemová hmotnost Marshallových těles ztuhnutých Marshallovým ztuhovačem s četností 2x50 úderů.

4.3.3.1 Maximální objemová hmotnost

Pro stanovení maximální objemové hmotnosti byla zvolena volumetrická metoda pomocí pykometru. Princip stanovení maximální objemové hmotnosti pyknoetrem udává hmotnost připadající na jednotku objemu asfaltové směsi bez mezer.[19]

Potřebné pomůcky pro stanovení maximální objemové hmotnosti jsou:

- Destilovaná voda
- Teploměr s přesností $\pm 0,1$ °C
- Váha s přesností $\pm 0,1$ g
- Pyknometr s nástavcem
- Vývěva s manometrem

Zkoumaná asfaltová směs byla nasypána na plech a špachtlí se zrna od sebe rozdělovala několikrát s klesající teplotou, aby nedošlo ke shlukování směsi.

Nejprve se stanoví hmotnost pykometru s nástavcem bez vzorku. Objem pykometru známe dopředu. Dále se do pykometru nasype daná směs a stanoví se hmotnost pykometru včetně nástavce a suchého vzorku. Pyknometr se vzorkem se následně naplní vodou, tak aby vzorek byl kompletně potopen a pomocí vývěvy s manometrem se z celé nádoby odstraní vzduch. Pyknometr se následně vložil do vodní lázně a nechal se temperovat na 25 °C společně s destilovanou vodou v odlišné nádobě. Teploměrem se následně odečetla teplota destilované vody v pyknometru, které se použije k určení hustoty vody. Na pyknometr se nasadil nástavec a temperovanou destilovanou vodou se dolilo množství vody tak, aby dosáhla na referenční značku na nástavci. Nakonec se stanoví hmotnost pykometru včetně nástavce, směsi a destilované vody.[19]



Obrázek 16 - Temperování pyknometru [vlastní foto] (vlevo); Vývěva s manometrem [vlastní foto] (vpravo)

Volumetrickou metodou stanovíme maximální objemovou hmotnost pomocí následujícího vzorce:

$$\rho_m = \frac{m_2 - m_1}{10^{-3} * V_p - \frac{m_3 - m_2}{\rho_w}} \quad [19]$$

Vzorec 2 - Výpočet maximální objemové hmotnosti směsi [19]

Kde je:

- ρ_m maximální objemová hmotnost směsi [Mg/m^3]
- V_p objem pyknometru s nástavcem [cm^3]
- m_1 hmotnost pyknometru a nástavce [g]
- m_2 hmotnost pyknometru s nástavcem a vzorkem [g]
- m_3 hmotnost pyknometru s nástavcem, vzorkem a vodou [g]
- ρ_w hustota vody při zkušební teplotě [Mg/m^3]

$$\rho_w = 10^{-3} * \left(1,00025205 + \frac{7,59 * t - 5,32 * t^2}{10^6} \right) \quad [19]$$

Vzorec 3 - Výpočet hustoty vody při zkušební teplotě [19]

Kde je:

- ρ_w hustota vody při zkušební teplotě [Mg/m^3]
- t teplota vody [$^{\circ}\text{C}$]



Maximální objemová hmotnost	bez R-materiálu	s R-materiálem
Hmotnost pyknometru + vzorku [g]	1802,20	1719,90
Hmotnost pyknometru [g]	702,30	707,20
Celková hmotnost [g]	2712,80	2652,90
Objem pyknometru [kg/m ³]	1312,60	1308,00
Teplota vody [°C]	25	25
maximální objemová hmotnost [Mg/m ³]	2,7541	2,72021
Hustota vody [Mg/m ³]	0,9971	0,9971

Tabulka 10 - Maximální objemová hmotnost směsí [19]

4.3.3.2 Objemová hmotnost SSD

Pro analýzu asfaltové směsi se objemová hmotnost zkoušela na dvou Marshallových tělesech pro každou směs, které byly zhutněny 2 x 50 údery. Celkový postup výroby Marshallových těles je popsán v kapitole 5.1.1 Objemová hmotnost je hmotnost, která připadá na jednotku objemu zkušební tělesa s mezerami.[20]

Zkouška začíná stanovením hmotnosti suchého tělesa na digitální váze. Poté se tělesa ponoří do vodní lázně na dobu 30 minut a stanoví se hmotnost tělesa ponořeného ve vodě. Těleso se dále vyndá z vodné lázně a osuší se povrchová voda jelenicí. Těleso se okamžitě po usušení zváží na digitální váze. Hustota vody se stanoví podle stejného vzorce a postupu jako pro maximální objemovou hmotnost.[20]

Objemová hmotnost SSD se stanoví pro zkušební tělesa dle vzorce:

$$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} * \rho_w \quad [20]$$

Vzorec 4 - Výpočet objemové hmotnosti SSD [20]

Kde je:

ρ_{bssd} objemová hmotnost SSD [Mg/m³]

ρ_w hustota vody při zkušební teplotě [Mg/m³]

m_1 hmotnost suchého tělesa [g]

m_2 hmotnost ponořeného tělesa ve vodě [g]

m_3 hmotnost nasyceného tělesa vodou povrchově osušeným jelenicí [g]

TYP SMĚSI	m_1 [g]	m_2 [g]	m_3 [g]	ρ_w [Mg/m ³]	ρ_{bssd} [Mg/m ³]	$\phi\rho_{bssd}$ [Mg/m ³]
bez R-materiálu	1289,0	808,3	1291,8	0,9971	2,6582	2,6258
	1289,8	805,9	1301,8		2,5934	
s R-materiálem	1271,2	787,4	1274,0		2,6052	2,6003
	1265,9	782,0	1268,4		2,5954	

Tabulka 11 - Objemová hmotnost SSD směsí [20]



4.3.3.3 Mezerovitost směsí

Pojem mezerovitost značí objem meter v asfaltovém zkušebním tělese, který se vyjadřuje v procentech celkového objemu daného zkušebního tělesa. Pro určení této veličiny je třeba znát maximální objemovou hmotnost směsi a objemovou hmotnost zkušebního tělesa. Obě veličiny jsou určeny v kapitolách 4.2.3.1 a 4.2.3.2. Pro stanovení mezerovitosti se použije následující vzorec:[21]

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_{bssd}}{\rho_m} * 100 \quad [21]$$

Vzorec 5 - Výpočet mezerovitosti tělesa [21]

Kde je:

V_m mezerovitost tělesa [%]

ρ_m maximální objemová hmotnost směsi [Mg/m^3]

ρ_{bssd} objemová hmotnost SSD [Mg/m^3]

Tato norma se také zabývá stupněm vyplnění mezer asfaltovým pojivem. Tato veličina udává, jakou část z mezerovitosti směsi kameniva vyplňuje asfaltové pojivo v procentech. Stanoví se následujícím vzorcem:

$$VFB = \frac{B * \rho_{bssd}}{\rho_B * VMA} * 100 \quad [21]$$

Vzorec 6 - Výpočet stupně vyplnění mezer asfaltovým pojivem [21]

Kde je:

VFB stupeň vyplnění mezer asfaltovým pojivem [%]

VMA mezerovitost směsi kameniva [%]

ρ_{bssd} objemová hmotnost těles [Mg/m^3]

ρ_B objemová hmotnost asfaltového pojiva [Mg/m^3]

B hmotnostní obsah pojiva ve směsi [%]

$$VMA = V_m + \frac{B * \rho_{bssd}}{\rho_B} \quad [21]$$

Vzorec 7 - Výpočet mezerovitosti směsi kameniva [21]

TYP SMĚSI	ρ_{bssd} [Mg/m^3]	ρ_m [Mg/m^3]	V_m [%]	VMA [%]	VFB [%]
bez R-materiálu	2,6258	2,7541	4,66%	15,2	69,7
s R-materiálem	2,6003	2,72021	4,41%	15,1	70,9

Tabulka 12 - Stanovení V_m , VMA a VFB směsí [21]



Požadovaný rozdíl mezerovitostí byl ± 1 %. Výsledný rozdíl zkoumaných asfaltových směsí je 0,25 %. Směsi jsem tedy uznal za vhodné a výrobu Marshallových těles použitých pro zkoušky jsem vyráběl podle navážek viz. tabulka 5 a 6. Při výrobě směsi ACP 16+ PMB 25/55 s R-materiálem a modifikační přísady K 60 se navážka nijak neměnila, jelikož obsah přísady K 60 nebude mít velký vliv na maximální objemovou hmotnost, objemovou hmotnost SSD a tím i mezerovitost.

5 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

Pro zkoušení asfaltových směsí bylo potřeba vyrobit dostatečné množství těles. Výroba proběhla v laboratoři Viakontrol s.r.o. v Lounech.

Pro každou směs bylo potřeba vyrobit:

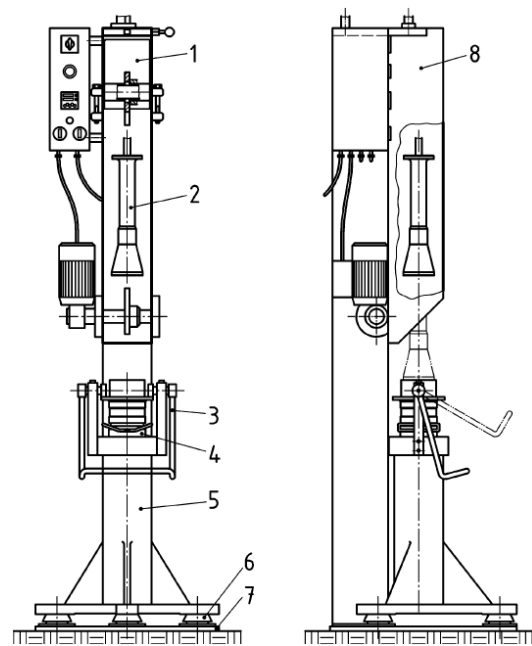
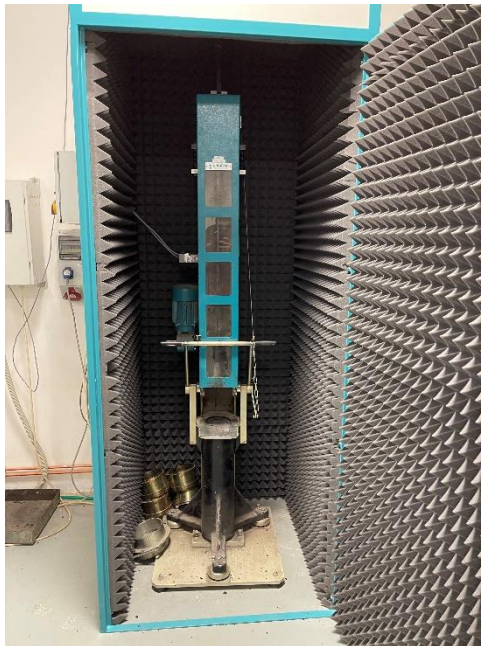
- 8 Marshallových těles hutněných 2 x 25 údery rázovým zhutňovačem pro zkoušku stanovení odolnosti asfaltové směsi vůči vodě (ITSR).
- 8 Marshallových těles hutněných 2 x 50 údery rázovým zhutňovačem pro zkoušku stanovení modulu tuhosti, stanovení odolnosti proti šíření trhlin a Marshallovu zkoušku. Všechna 8 těles se použilo na stanovení modulu tuhosti, protože tato zkouška je nedestruktivní, použila se tato tělesa dále a byla rozdělena, kde se 4 tělesa využila na stanovení odolnosti proti šíření trhlin a 4 tělesa na Marshallovu zkoušku.
- 2 desky, které byly vyrobeny lamelovým zhutňovačem za účelem zkoušky odolnosti proti vzniku trvalých deformací.

5.1 Výroba zkušebních těles rázovým zhutňovačem

Celkem touto metodou bylo potřeba vyrobit 48 Marshallových válcových těles rázovým zhutňovačem. Rozměry válcových těles jsou omezeny normou ČSN EN 12697-30 *Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem*. Zhutněná tělesa musí mít tvar válce o průměru $(101,6 \pm 0,1)$ mm a výšku $(63,5 \pm 2,5)$ mm.[22]

Pro výrobu těles a splnění parametrů tvaru válcového tělesa se nejprve určila správná navážka směsi pomocí pokusného hutnění. Po pokusném hutnění se zjistila navážka na hutnění 2 x 50 údery 1285 gramů. Pro tělesa zhutněná 2 x 25 údery se navážka snížila o 25 gramů na celkem 1260 gramů.

Směs se navážila dle zjištěné navážky do plechovek a umístila se do sušárny, kde se temperovala na 160 °C. Pro samotné hutnění se použil již zmíněný rázový zhutňovač s ocelovým dolním podstavcem. Zhutňovač je zařízení s motorovým pohonem, ocelovou podkladní deskou o tloušťce 15 mm, která je osazená vodorovně na pevném podkladu. K zhutňovači je připojený ovládací panel, ve kterém volíme počet úderů, kterými chceme těleso zhutnit.



Obrázek 17 - Rázový zhutňovač s ocelovým dolním podstavcem [22]

Legenda [22]

- 1 základní zdvihací zařízení s motorovým pohonem pro hutnicí beran a s počítadlem úderů
- 2 hutnicí pěch s válcovou vodicí tyčí hutnicího beranu
- 3 excentrická vačka upínacího zařízení
- 4 podkladní deska formy pro hutnění, na kterou se forma připevní
- 5 zhutňovací podstavec
- 6 patky
- 7 ocelová podkladní deska
- 8 ochranný kryt

Před samotnou výrobou těles byly do sušárny vloženy pracovní pomůcky, aby se zamezilo teplotním ztrátám při manipulaci se směsí. Když bylo vše vytemperováno, vyndala se směs společně s hutnicí formou, která se skládá z podložky formy, samotné válcové formy a nástavce. Abychom zamezili přilepení směsi k podložce a zhutňovači, připravily se na každé těleso 2 separační papírky, kde jeden z nich se označil značkou pro jednoduché rozpoznání, zda byla forma při hutnění otočena nebo nikoli. Označený papírek se vložil na podložku formy, na kterou byla nasazena válcová forma a nástavec. Do připravené formy se nasypala směs, která se promíchala, aby se zamezilo jakékoli segregaci zrn. Nakonec se na směs vložil druhý separační papírek.[22]

Směs s hutnicí formou se neprodleně vložila do rázového zhutňovače. Na ovládacím panelu se zvolil požadovaný počet úderů a spustil se hutnicí cyklus, kde hutnicí beran padá z výšky 460 ± 3 mm na směs.[22]



Po dokončení prvního cyklu byla forma otočena a vložena zpět do rázového zhutňovače. Druhá strana tělesa byla zhutněna stejným počtem úderů. Následně byla kompletně zhutněná směs vyndána ze stroje a odstranili se oba separační papírky. Forma se zhutněným tělesem se nechala zchladnout na teplotu přibližně 40 °C a samotné těleso bylo vyjmutu z válcové formy pomocí výtlačného zařízení. Po vysunutí se zkušební těleso uloží na rovný podklad a následně se ochladí na pokojovou teplotu.[22]



Obrázek 18 - Hutnicí těleso [vlastní foto] (vlevo); výtlačné zařízení [vlastní foto] (vpravo)

5.2 Výroba zkušebních těles zhutňovačem desek

Pro každou směs asfaltovou směs byly vyrobeny 2 desky o délce 320 mm, šířce 260 mm a výšce 60 mm. Abychom dosáhli požadované tloušťky desky, je důležité znát mezerovitost, maximální objemovou hmotnost asfaltové směsi (parametry jsou již známé z kompletní analýzy asfaltové směsi z kapitoly 4.3) pro zjištění potřebné navážky.[23]

Navážka se určí z následujícího vzorce:

$$M = 10^{-6} * L * l * e * \rho_m * \left(\frac{100 - V}{100} \right) \quad [23]$$

Vzorec 8 - Výpočet hmotnosti zkušební desky [23]

Kde je:

- M hmotnost desky [kg]
- L vnitřní délka formy [mm]
- l vnitřní šířka formy [mm]
- e výška formy [mm]
- ρ_m maximální objemová hmotnost [Mg/m³]
- V mezerovitost [%]



Navážka desek	L [mm]	I [mm]	e [mm]	ρ_m [Mg/m ³]	M [kg]
bez R-materiálu	320	260	60	2,6003	12,851
s R-materiálem	320	260	60	2,6258	12,977
s R-materiálem + K 60	320	260	60	2,6258	12,977

Tabulka 13 - Výpočet navážky desek [23]

Při výrobě desek bylo zacházeno se směsí stejným způsobem jako v kapitole 5.1.1. Před výrobou je potřeba předeřtát formu, aby se zamezilo teplotním ztrátám při manipulaci se směsí. Po dokončení temperace směsi na teplotu 160 °C byla směs vyndána společně s formou ze sušárny. Ošetřením formy silikonovým olejem jsme zamezili možnému přilepení asfaltové směsi na strany. Směs byla nasypána do formy a následně se rozprostřena rovnoměrně po celé ploše. Na urovnanou směs byl vložen plech, na který se ukládají lamely. Lamely se zatížily hutnicím válcem a spustil se hutnicí cyklus. Když byly lamely zatlačeny 2 mm nad horní hranou formy, odtížily se na dobu 10 minut. Následně se spustil druhý cyklus, který směs ztuhlil na potřebnou výšku 60 mm. Po dokončení výroby se těleso nechalo ochladit a po vychladnutí bylo vyndáno z formy.



Obrázek 19 - Lamelový zhutňovač [vlastní foto] (vlevo); Lamely [vlastní foto] (vpravo)



6 ZKOUŠKY ASFALTOVÝCH SMĚSÍ

Zkouška odolnosti proti tvorbě trvalých deformací byla provedena v laboratoři Viakontrol s.r.o. v Lounech, ostatní zkoušky byly provedeny v silniční laboratoři na fakultě stavební, ČVUT v Praze.

Seznam zkoušek provedených na asfaltových směsích:

- Maximální objemová hmotnost – zkouška popsána v kapitole 4.3.3.1 – výsledky pro všechny vzorky jsou popsány v příloze 1
- Objemová hmotnost zkušebních těles – zkouška popsána v kapitole 4.3.3.2 - výsledky pro všechny vzorky jsou popsány v příloze 1
- Zkouška poježdění kolem
- Stanovení odolnosti tělesa vůči vodě
- Stanovení modulu tuhosti
- Odolnost vůči šíření trhlin
- Marshallova zkouška

6.1 Zkouška poježdění kolem

Zkouška poježdění kolem se stanovuje na plošných deskových tělesech, kde pro každou směs se zkouška provedla na dvou deskách. Principem této zkoušky je stanovení náchylnosti asfaltové směsi k deformaci, která se posuzuje měřením hloubky vyjeté koleje vzniklé opakovaným pojezdem zatíženého kole při dané konstantní teplotě dle ČSN EN 12697-22 *Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 22: Zkouška poježdění kolem.*[24]



Obrázek 20 - Zkušební stroj pro zkoušku poježdění kolem [24]



Předem změřená desková tělesa se vloží do zkušební formy se stanovenými rozměry. Na povrch desek, přibližně na místo, kde budou zkušební kola pojíždět, se položí pruh alobalu, aby se zamezilo přilepení asfaltové směsi na pojížděcí kola a desky společně se zkušební formou se vloží do temperovací komory.[24]

Následně se tělesa musí nechat temperovat na zvolenou teplotu 40 °C. Temperace probíhá po dobu 4 hodin. Poté se tělesa zatíží kolem a na ovládacím panelu se spustí samotná zkouška, kde zkušební kolo pojíždí po tělese s dráhou (410 ± 5) mm s frekvencí pojezdu tam a zpět (1,0 ± 0,1) Hz. Valivé zatížení působící na těleso musí být silou (5000 ± 50) N ve středu zkušebního tělesa. Zkouška probíhá, dokud těleso není vystaveno 10 000 zatěžovacím cyklům.[24]



Obrázek 21 - Zkušební forma těles [24]

Po dokončení zkoušky se tělesa vyjmou z komory a ze zkušebních forem a výstupní data s naměřenými hodnotami se elektronicky stáhnou z panelu.[24]

Pro vyhodnocení zkoušky se stanovuje přírůstek hloubky vyjeté koleje a průměrná hloubka vyjeté koleje. Tyto veličiny se vypočítají dle vzorců níže.[24]

$$WTS_{AIR} = \frac{d_{10\,000} - d_{5\,000}}{5} \quad [24]$$

Vzorec 9 - Přírůstek hloubky vyjeté koleje

Kde je:

WTS_{AIR} přírůstek hloubky vyjeté koleje [mm]
 $d_{10\,000}$ hloubka vyjeté koleje po 10 000 cyklech [mm]
 $d_{5\,000}$ hloubka vyjeté koleje po 5 000 cyklech [mm]



$$PRD_{AIR} = \frac{d_{5\,000}}{h} * 100 \quad [24]$$

Vzorec 10 - Průměrná hloubky vyjeté koleje

Kde je:

PRD_{AIR} poměrná hloubka vyjeté koleje [%]

$d_{5\,000}$ průměr hloubky vyjeté koleje po 5 000 cyklech z obou desek [mm]

h průměrná výška desek [mm]

Výsledky zkoušky jsou shrnuty v níže uvedené tabulce:

Směs	Hloubka koleje po		Přírůstek WTS_{AIR} [mm]	Poměrná hl. PRD_{AIR} [%]
	5 000 cyklech	10 000 cyklech		
Čistá směs	1,26	1,39	0,03	2,3
R – materiál	0,78	0,87	0,02	1,5
R – materiál + K 60	0,46	0,56	0,02	0,9

Tabulka 14 - Shrnutí výsledků zkoušky poježdění kolem [24]

Výsledky všech směsí bezpečně splňují požadavky dané normou ČSN 73 6121 – Tabulka E.8, která specifikuje maximální hodnotu PRD_{AIR} jako 4 % a WTS_{AIR} 0,06 pro ložní vrstvy. Podmínka pro ACP 16+ norma nedefinuje, proto porovnáváme se směsí do ložných vrstev.[17]



Obrázek 22 - ACP 16+ PMB 25/55–65 (čistá směs) po zkoušce poježdění kolem [vlastní foto]



6.2 Stanovení odolnosti tělesa vůči vodě

Odolnost tělesa vůči vodě jsme stanovili za určení pevnosti v příčném tahu válcových těles ze všech asfaltových směsí. Válcová tělesa zhutněná rázovým zhutňovačem 2 x 25 úderů byla rozdělena do dvou skupin.

Jedna skupina jsou tělesa, která byla udržována na vzduchu a temperována na teplotu 15 °C, druhá skupina těles byla nasycena vodou a uložena do vodní lázně s teplotou 40 °C. (Označení těles: nepodtržená čísla = čistá směs, zespoda podtržená čísla = směs s R-materiálem. Ze shora podtržená čísla = směs s R-materiálem a přísadou K 60).[25]



Obrázek 23 - Tělesa pro zkoušku ITSR [vlastní foto] (vlevo mokrá skupina), (vpravo suchá skupina)

Tělesa rozdělíme do skupin, tak abychom vyrovnali hodnoty průměrné objemové hmotnosti suché a mokré skupiny.[25]

První skupina těles se vloží do sušárny, kde se temperují na 15 °C po dobu 4 hodin. Zkouška těchto těles může proběhnout kdykoli nezávisle na skupině mokrých vzorků.[25]

U druhé skupiny těles, která byla temperována ve vodní lázni se nejprve nasýtila pomocí vakuové komory a vývěvy, aby došlo ke kompletnímu vyplnění mezer uvnitř zkoušeného tělesa. Tělesa byla následně uložena do vodní lázně, kde byla temperována na již zmíněných 40 °C. Temperace probíhala po dobu 72 ± 2 hodin.[25]



Obrázek 24 - Vakuová komora s vývěvou [vlastní foto] (vlevo); Vodní lázeň pro temperaci [vlastní foto] (vpravo)

Samotné stanovení pevnosti v příčném tahu proběhlo pomocí hydraulického lisu a tlačných čelistí. Těleso se do čelistí umístí symetricky na všech stranách, aby došlo k nejčistšímu porušení a pro dosažení porovnatelných výsledků. Těleso bylo následně zatěžováno konstantní silou do doby porušení tělesa. Výstupem měření byly hodnoty maximálního naměřeného zatížení a příčné deformace. Výsledkem zkoušky byly poměry pevností v příčném tahu u skupiny, která byla temperována ve vodní lázni a skupiny, která byla temperována na vzduchu.[25][26]



Obrázek 25 - Těleso upevněné v čelistích pro zkoušku ITSR



Stanovení výsledků provádíme pomocí následujících vzorců:

$$ITS = \frac{2 * P}{\pi * D * H} * 1000 \quad [26]$$

Vzorec 11 - Stanovení pevnosti v příčném tahu

Kde je:

- ITS pevnost v příčném tahu (kPa)
P maximální zatížení (N)
D průměr zkušebního tělesa (mm)
H výška zkušebního tělesa (mm)

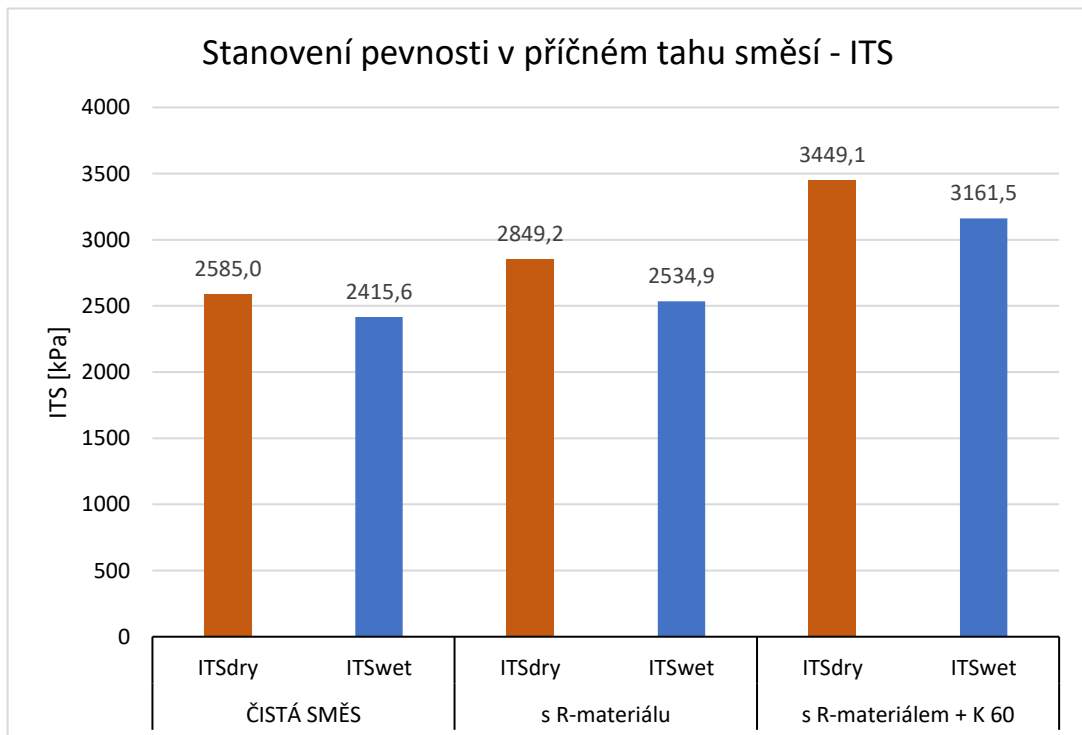
$$ITSR = \frac{ITS_{wet}}{ITS_{dry}} \quad [26]$$

Vzorec 12 - Poměr pevností v příčném tahu

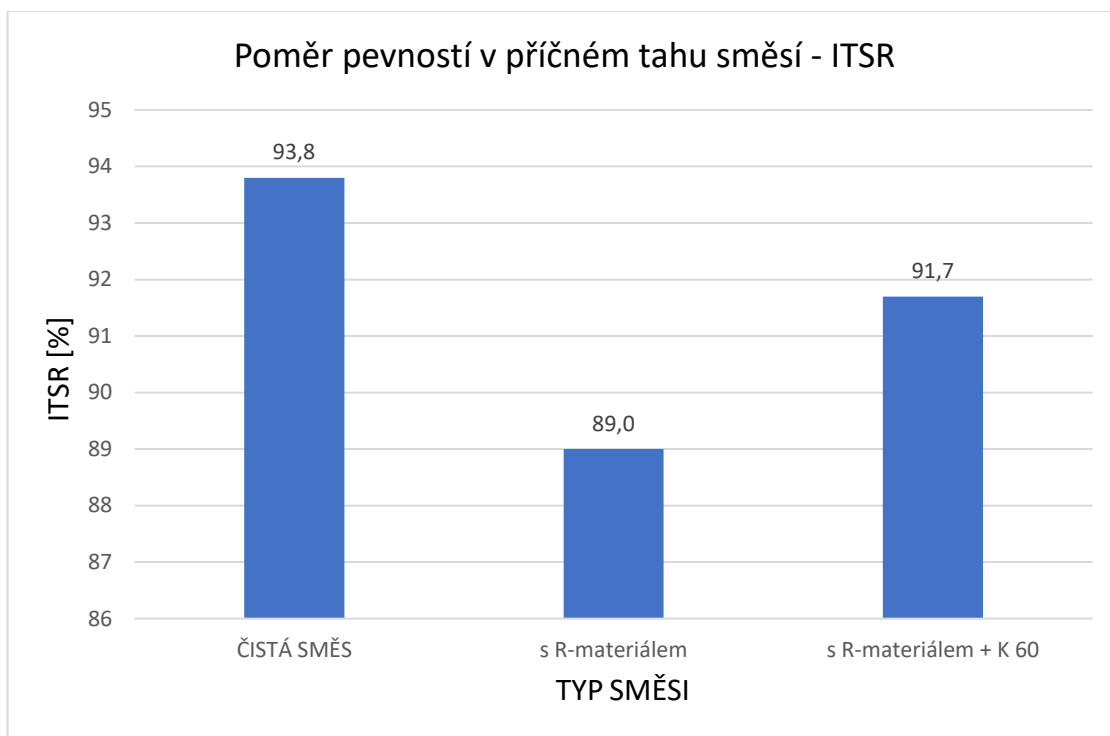
Kde je:

- ITSR pevnost v příčném tahu (%)
 ITS_{wet} průměrná pevnost v příčném tahu mokré skupiny (kPa)
 ITS_{dry} průměrná pevnost v příčném tahu suché skupiny (kPa)

Shrnutí výsledků z provedené zkoušky jsou uvedeny v grafech níže:



Graf 4 - Stanovení pevnosti v příčném tahu [26]



Graf 5 - Poměr pevností v příčném tahu směsí [26]

Graf 4 poukazuje na nárůst pevnosti jak u suchých, tak u mokrých těles, která je přímo úměrná s očekávaným nárůstem tuhosti daných směsí.[26]

Z výsledků v grafu 5 lze vyčíst, že s přibývajícím R-materiálem klesla znatelně hodnota ITSR. Lze předpokládat, že toto snížení hodnoty ITSR je v důsledku zhoršení homogenity směsi kvůli přidání velkého množství R-materiálu. [26]

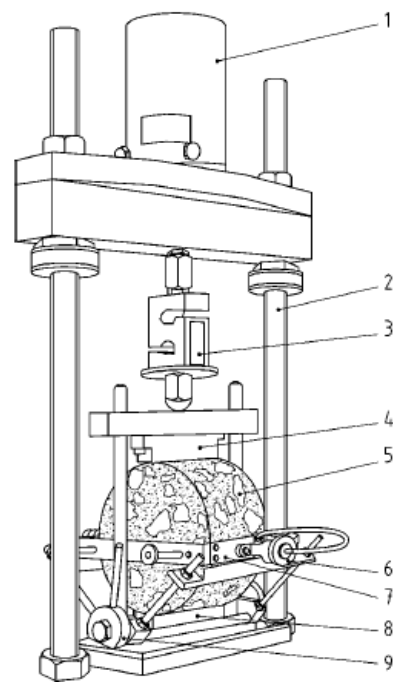
V grafu 5 se zároveň projevuje zlepšení hodnoty ITSR směsi s modifikační přísadou K 60 a její schopnost zlepšit kohezní a adhezní vlastnosti dané směsi. [26]

Všechny směsi bezpečně splňují normové požadavky pro ložní vrstvy dle ČSN 73 6121 - Stavba vozovek – Hutněné asfaltové vrstvy – Provádění a kontrola shody, kde minimální hodnota ITSR je dána jako 70 %.[17]



6.3 Tuhost

Tuhost je jedna z důležitých veličin, kterou jsme schopni popsat chování asfaltové směsi v různých situacích stanovením modulu tuhosti. Modul tuhosti vyjadřuje závislost mezi maximálním napětím, kterým na těleso působíme, a maximální deformací v tomto bodě. Tato zkouška byla provedena na šesti válcových tělesech, která byla zhutněna 2 x 50 údery rázovým zhutňovačem. Vzorky byly vystaveny zatížení v rozsahu lineárního přetvoření metodou IT-CY. Tělesa byla temperována po dobu 4 hodin a zkoušena za teplot 15 °C, 27 °C a 40 °C. [27]



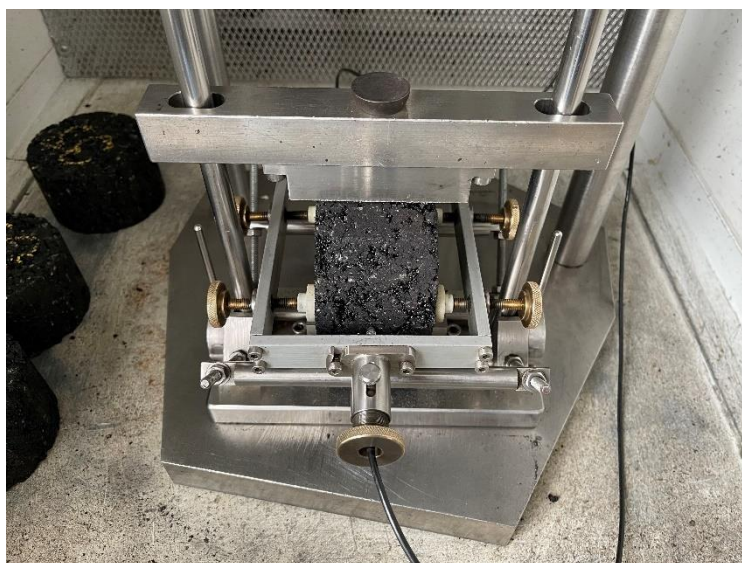
Obrázek 26 - Zkoušení vzorku metodou IT-CY [vlastní foto] (vlevo); popis zkušebního přístroje [27] (vpravo)

LEGENDA:

- 1 pneumatický zdroj zatížení
- 2 ocelový zatěžovací rám
- 3 snímač síly
- 4 horní zatěžovací pás
- 5 zkušební těleso
- 6 LVDT nastavovací šroub
- 7 rámeček s LVDT
- 8 spodní zatěžovací pás
- 9 nastavovací podpěra rámečku



Těleso se vloží do rámečku LVDT symetricky po všech stranách tak, aby se zamezilo ovlivnění výsledků vznikem dalších nežádoucích sil. V počítačovém programu, který je spojený se samotným strojem určíme rozměry zkoumaného tělesa, požadovanou horizontální deformaci, určíme zatěžovací rychlost, teplotu, při které měříme, Poissonovo číslo a počet zatěžovacích pulsů. Před spuštěním stroje, se upravily sondy tak, aby se dotýkaly daného tělesa v určitém rozmezí stanovené strojem. Dále se spustil kalibrační cyklus, kde přístroj zatížil těleso 10 zkušebními pulsy. Po kalibraci se znovu ujistíme, jestli jsou sondy ve správné poloze a zahájí se zkouška. Zkouška se skládá ze dvou měření, kde po prvním měření otočíme těleso o 90°, aby se dosáhlo přesnějších výsledků.



Obrázek 27 - Upevnění tělesa do přístroje [vlastní foto]

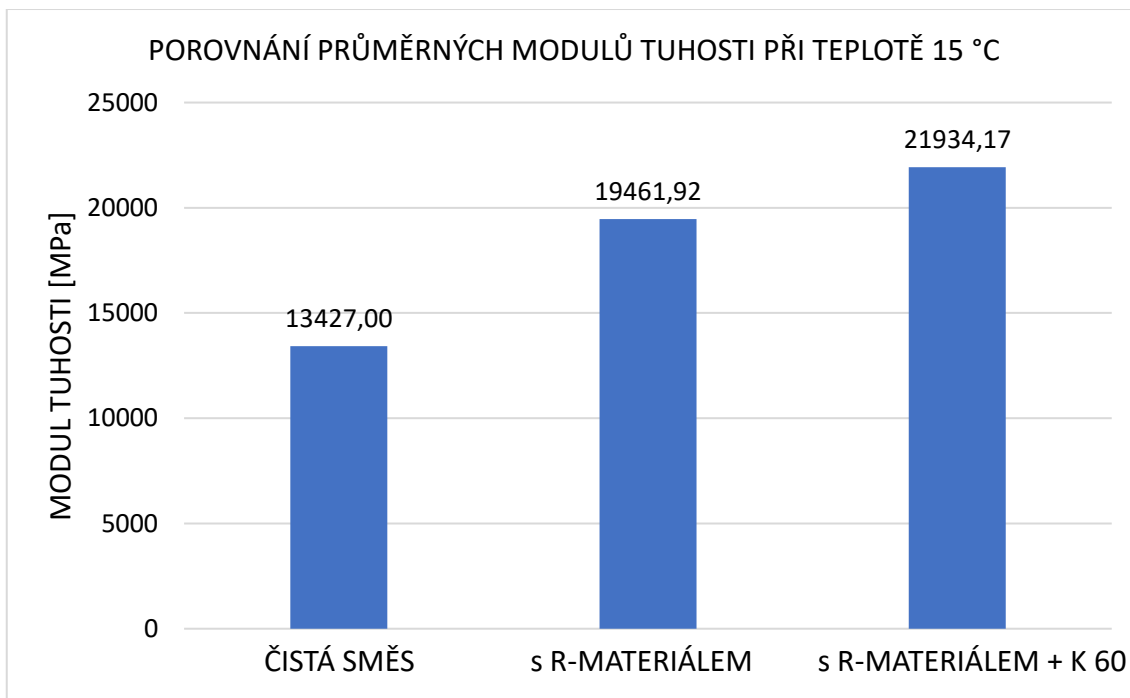
Po dokončení zkoušky se výsledky (viz graf 6,7,8.) získaly přímo z programu, který dopředu vypočítá modul tuhosti dle normového vzorce:

$$E = \frac{F * (v + 0,27)}{(z * h)} \quad [27]$$

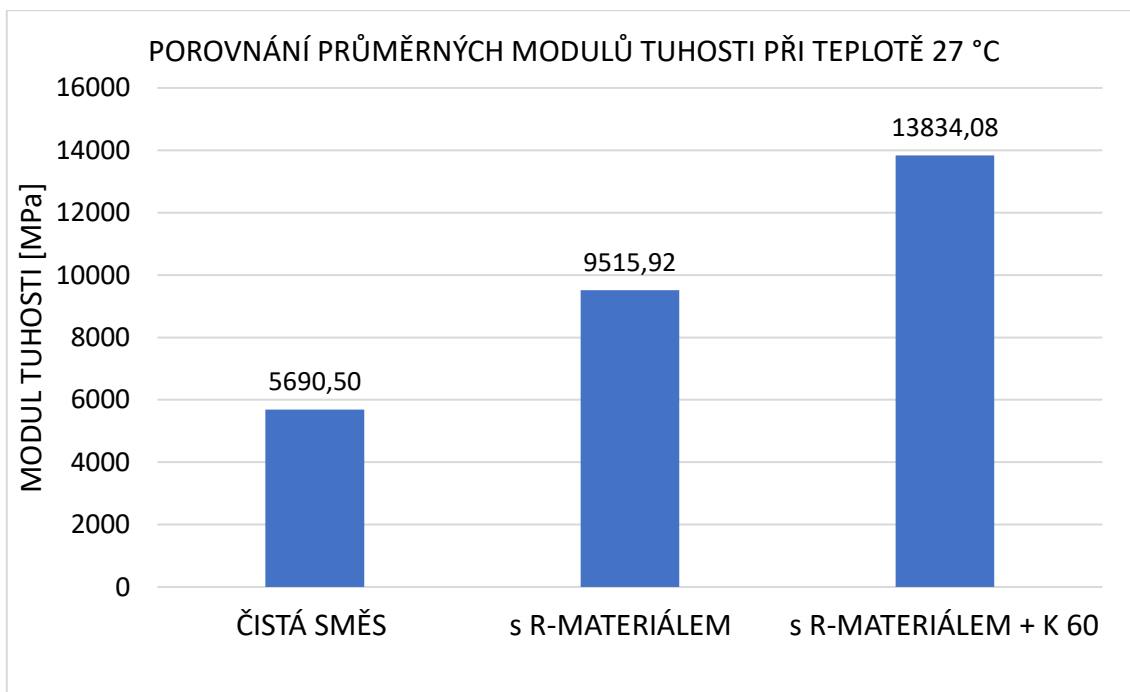
Vzorec 13 - Výpočet modulu tuhosti

Kde je:

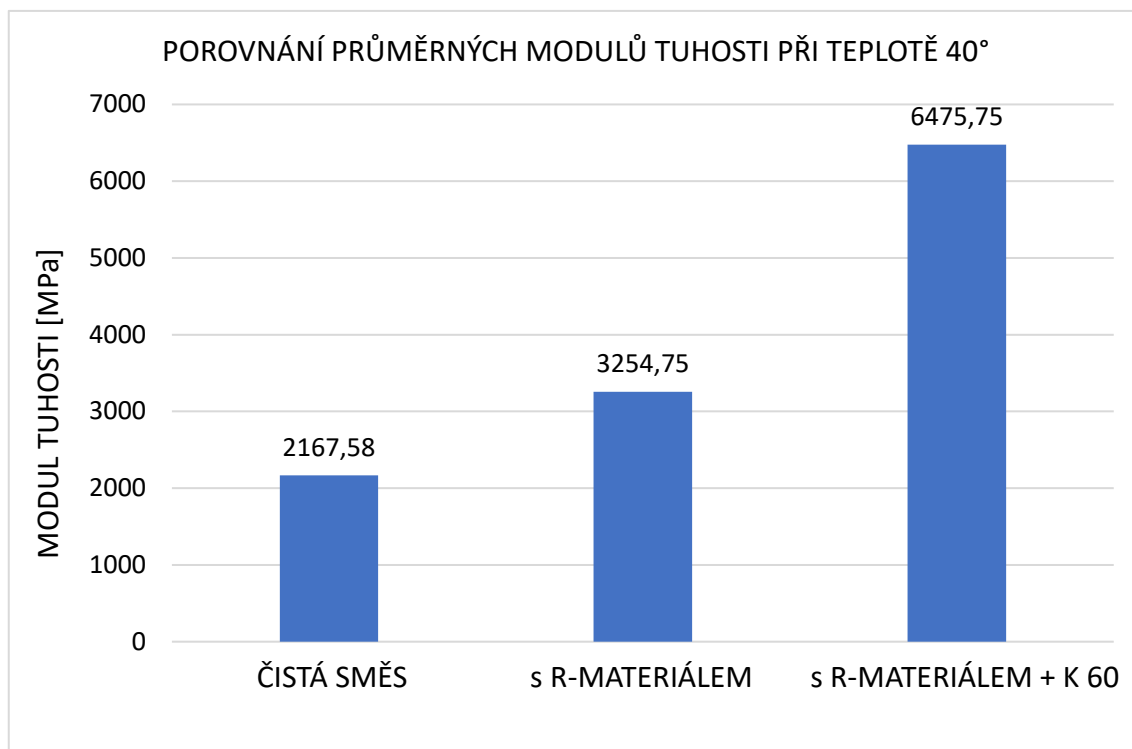
- F maximální hodnota zatížení [kN]
- E modul tuhosti [MPa]
- z amplituda pružné horizontální deformace [mm]
- h průměrná tloušťka zkušebního tělesa [mm]
- v Poissonovo číslo [/]



Graf 6 - Porovnání průměrných modulů tuhosti při teplotě 15 °C [27]



Graf 7 - Porovnání průměrných modulů tuhosti při teplotě 27 °C [27]



Graf 8 - Porovnání průměrných modulů tuhosti při teplotě 40 °C [27]

Modul tuhosti je obecně velmi ovlivněný teplotou, což lze vypočítat z grafů výše. Dle očekávání je tuhost nejvyšší u směsi s 50 % R-materiálu a přidáním modifikační přísady K 60. Z průběhu grafů směsi s K 60, lze dobře vidět zlepšení teplotní citlivosti modifikační přísady.

Obvykle by se prováděla zkouška modulu tuhosti i za teploty 0 °C. Z důvodu velkých sil, které by se musely vynaložit na dosažení deformace, kterou stroj v laboratoři nemohl vygenerovat, byla tato teplota vyřazena ze zkoušky těles.



6.4 Zkouška odolnosti proti šíření trhlin

Zkušební metoda se provádí na půl válcovém tělese, které je vystaveno zatížení pro zjištění pevnosti v tahu a odolnosti proti šíření trhlin. V normě ČSN EN 12697-44 *Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 44: Šíření trhliny zkouškou ohybem na půlválcovém zkušebním tělese* jsou rozměry zkušebního tělesa stanoveny na tělesa o průměru (150 ± 1) mm a tloušťce (50 ± 3) mm. Z důvodu využití těles z již provedené zkoušky tuhosti, byl místo průměru (150 ± 1) mm použit průměr daných těles (přibližně 100 ± 1 mm). Výška těles byla upravena seříznutím jedné strany tak, aby splňovala normou požadovanou výšku. Z upraveného válcového tělesa byla dále vytvořena dvě půlválcová tělesa. Na spodní hraně každého půlválcového tělesa byla vytvořena drážka o hloubce $(10,0 \pm 1,0)$ mm a šířce $(0,40 \pm 0,20)$ mm, za účelem kontrolovaného vzniku trhliny při zkoušce uprostřed tělesa. [28]

Tělesa byla označena a rozdělena tak, aby jedna polovina daného tělesa byla zkoušena za teploty 0°C a druhá polovina stejného tělesa byla odzkoušena za teploty 25°C . Temperace těles probíhala po dobu 4 hodin. Zatěžovací rychlost přístroje byla nastavena na $2,5$ mm/min. [28]



Obrázek 28 - Zkouška odolnosti vůči šíření trhlin na tělese [vlastní foto]



Výslednými normovými parametry této zkoušky jsou deformace při maximální síle, maximální napětí a kritická hodnota lomové houževnatosti (tzv. odolnost vůči lomu). Tyto hodnoty vychází z hodnot dané zkouškou, které jsou hodnota maximální síly a hodnota deformace v okamžiku porušení zkušebního tělesa. Hodnoty byly vypočítány z následujících rovnic:[28]

$$S_{max,i} = \frac{\Delta W_i}{W_i} * 100 \quad [28]$$

Vzorec 14 - Přetvoření za působení maximální síly

Kde je:

$S_{max,i}$ přetvoření za působení maximální síly [%]
 ΔW_i svislý posun tělesa při maximální síle [mm]
 W_i výška tělesa při maximální síle [mm]

$$\sigma_{max,i} = \frac{F_{max,i}}{D_i * t_i} \quad [28]$$

Vzorec 15 - Výpočet napětí při porušení zkušebního tělesa

Kde je:

$\sigma_{max,i}$ napětí při porušení zkušebního tělesa [N/mm²]
 D_i průměr zkušebního tělesa [mm]
 t_i tloušťka zkušebního tělesa [mm]
 $F_{max,i}$ maximální síla zkušebního tělesa [N]

$$K_{Ic,i} = \sigma_{max,i} Y_1 \sqrt{\pi a_i} \quad [28]$$

Vzorec 16 - Výpočet odolnosti vůči lomu

Kde je:

Y_1 faktor intenzity napětí při standardním režimu I [-]
 a_i hloubka drážky zkušebního tělesa [mm]

$$Y_1 = 4,782 - 1,219 * \left(\frac{a_i}{r_i}\right) + 0,063 * \exp\left(7,045 * \left(\frac{a_i}{r_i}\right)\right) \quad [28]$$

Vzorec 17 - Výpočet faktoru intenzity napětí při standardním režimu

Kde je:

r_i poloměr zkušebního tělesa [mm]
 a_i hloubka drážky zkušebního tělesa [mm]



Kvůli připojení dalšího záznamového zařízení, byl průběh zkoušky vykreslen i do pracovního diagramu, ze kterého byly určeny další parametry, které popisují další důležité vlastnosti. Zatěžovací diagram byl použit k výpočtu lomové práce, který byl následně přepočítán pro zjištění lomové energie. [29]

Lomová práce je spočítána jako integrál zatěžovací křivky, tzn. jako plocha pod křivkou diagramu od zahájení zkoušky po úplnou propagaci trhliny. Pod pojmem úplné propagace trhliny se rozumí dosažení poklesu na nulovou nebo kvazi-nulovou hodnotu napětí ve zkušebním tělese. Tato „nulová“ hranice byla stanovena na hodnotu napětí 0,3 kN. Ve spoustě vzorků došlo ale ke křehkému lomu a v těchto případech nebyla tato pomocná hranice nutná.[29]

Již zmíněná lomová energie se z lomové práce vypočítá následujícím vzorcem:

$$G_f = \frac{W}{t * (w - a)} \quad [29]$$

Vzorec 18 - Výpočet lomové energie

Kde je:

- W lomová práce [J]
- t tloušťka zkušebního tělesa [m]
- w výška zkušebního tělesa [m]
- a hloubka uměle vyříznuté drážky [m]

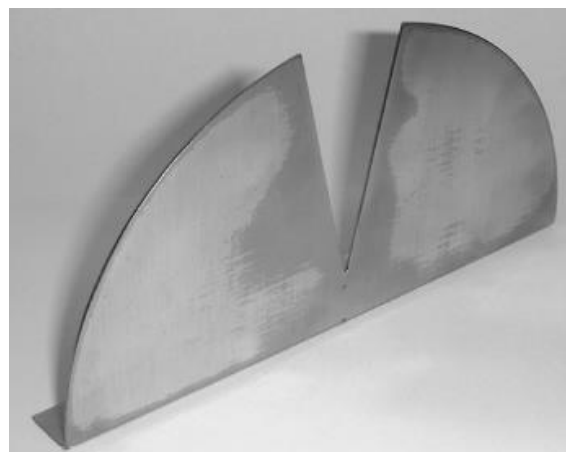
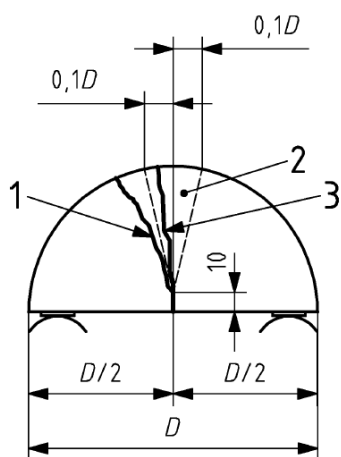
Normový postup snímání průběhu zkoušky záznamovým zařízením a stanovení lomové energie nevyžaduje, ale hodnocení dat pouze z hlediska maximální síly a tím stanovení lomové houževnatosti se opakovaně prokázalo jako nedostačující a částečně zavádějící. Kvůli tomuto faktu se pro tuto práci lomová energie stanovila.[29]



Obrázek 29 - Záznamové zařízení pro stanovení pracovního diagramu zkoušky [vlastní foto]



Na konci provedené zkoušky bylo každé těleso vizuálně zkontrolováno pro určení platnosti zkoušky. Kontrola probíhá přiložením doplňkového zařízení k usnadnění stanovení platné zkoušky (viz. obrázek 29) ke zkoumanému tělesu, sleduje se, zda trhlina vznikla z předem vytvořené drážky a zda leží v oblasti, které stanovuje platnost zkoušky. Platná oblast je zobrazena na obrázku 29.[28][29]



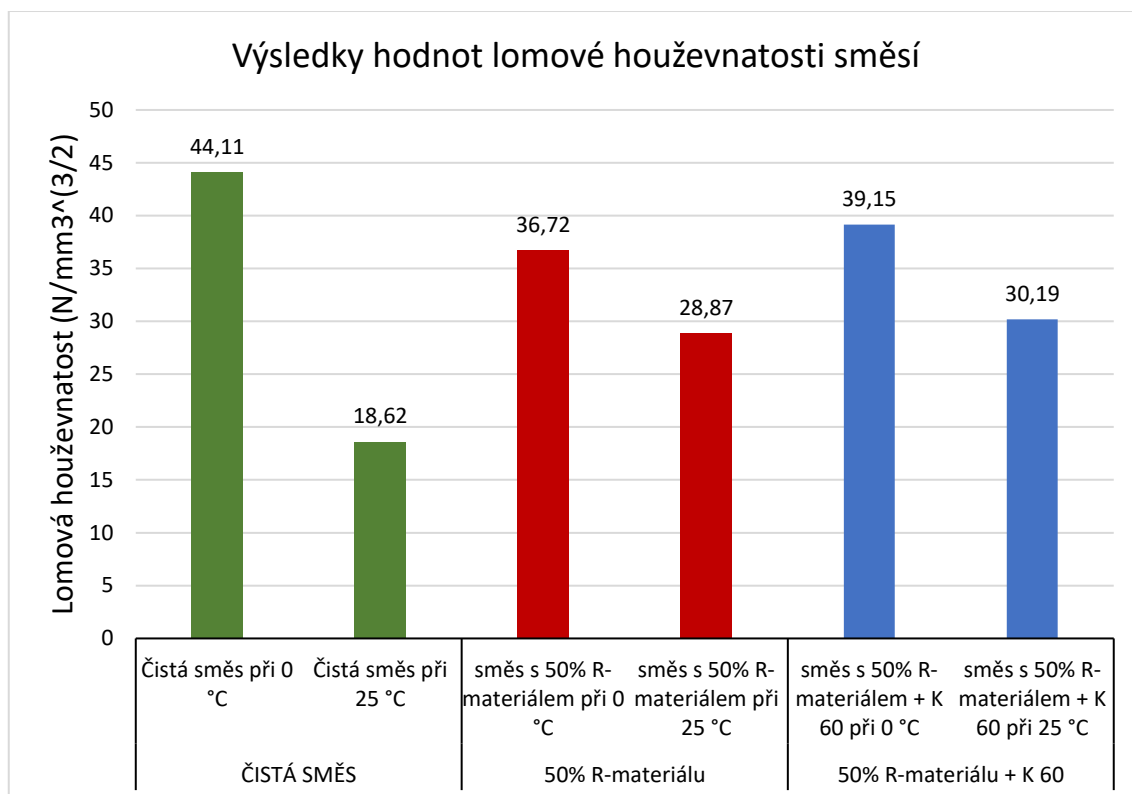
Obrázek 30 - Zjištění platnosti zkoušky zkoumáním polohy trhliny [28] (vlevo); doplňkové zařízení [28] (vpravo)

Legenda:

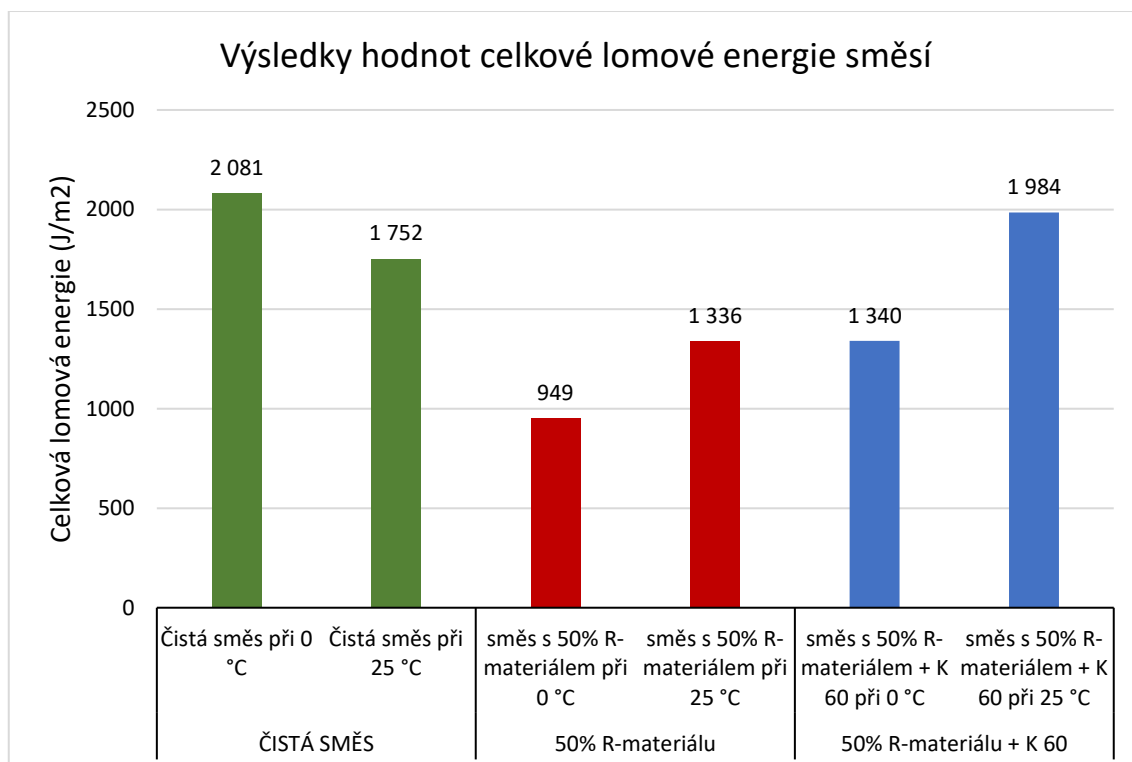
- 1 neplatná zkouška
- 2 oblast pro platný výsledek zkoušky
- 3 platná zkouška

SMĚS	DEFORMACE (mm)	SÍLA [kN]	LOMOVÁ HOUŽEVNATOST (N/mm ^{3/2})	Celková lomová energie (J/m ²)
Čistá směs při 0 °C	1,01	8,2	44,1	2081,2
Čistá směs při 25 °C	1,03	3,5	18,6	1752,2
směs s 50 % R-materiálem při 0 °C	0,65	6,9	36,7	949,2
směs s 50 % R-materiálem při 25 °C	0,80	5,5	28,9	1336,5
směs s 50 % R-materiálem + K 60 při 0 °C	0,68	7,2	39,2	1340,0
směs s 50 % R-materiálem + K 60 při 25 °C	0,90	5,7	30,2	1984,4

Tabulka 15 - Shrnutí výsledků zkoušky odolnosti vůči šíření trhlin [28][29]



Graf 9 - Výsledky hodnot lomové houževnatosti směsí [28]



Graf 10 - Výsledky hodnot celkové lomové energie směsí [29]



6.5 Marshallova zkouška

Princip Marshallovy zkoušky spočívá ve stanovení hodnoty stability, přetvoření a míry tuhosti. Hodnotou stability se rozumí odolnost zkušebního tělesa vůči deformaci. Míra tuhosti se stanoví jako podíl stability k přetvoření. Zkouška byla provedena na tělesech zhutněny 2 x 50 údery rázovým zhutňovačem dle ČSN EN 12 697-30 *Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem*, která byla umístěna do vodní lázně po dobu 40 minut a byla temperována na teplotu $(60 \pm 1) ^\circ\text{C}$. [30]

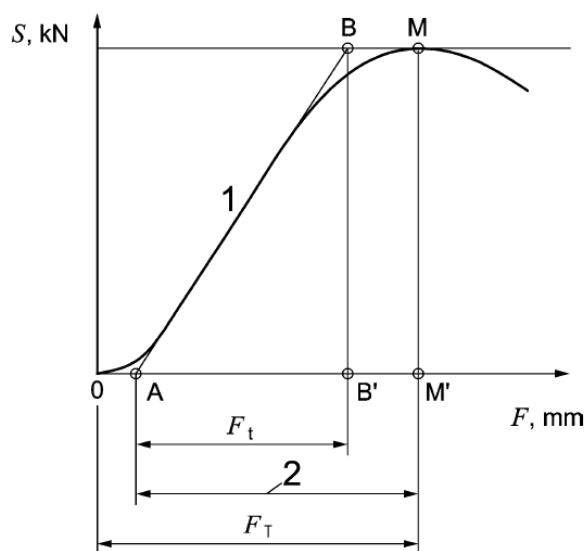
Zkouška začíná vyjmutím tělesa z vodní lázně a vloží se neprodleně do zkušebního lisu tak, aby těleso bylo uloženo do zkušebních čelistí bokem a do středu celku, z důvodu dobrého kontaktu mezi povrchem zkušebního tělesa a tlačnou čelistí. Následně se na zkušební těleso aplikuje zatížení o konstantní rychlosti posunu (50 ± 2) mm.[30]



Obrázek 31 - Uložení tělesa do zkušebního lisu [vlastní foto]



Program, který je spojený se zkušebním lisem, měří hodnoty stability a přetvoření, ze kterého vykresluje pracovní diagram. Výsledný pracovní diagram by měl mít podobný průběh jako diagram uvedený v normě ČSN EN 12697-34 *Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 34: Marshallova zkouška*. [30]



Obrázek 32 - Marshallova stabilita a přetvoření [30]

Legenda:

- F_t tečné přetvoření
- F_T celkové přetvoření
- S stabilita
- 1 tečna
- 2 přetvoření F

Výsledná korigovaná stabilita byla určena vynásobením změřené stability korekčním faktorem, který bere v potaz rozměry zkušebních těles. Korekční faktor je vyjádřen vzorcem: [30]

$$c = 5,2 * e^{-0,0259 * h} \quad [30]$$

Vzorec 19 - Výpočet korekčního faktoru stability

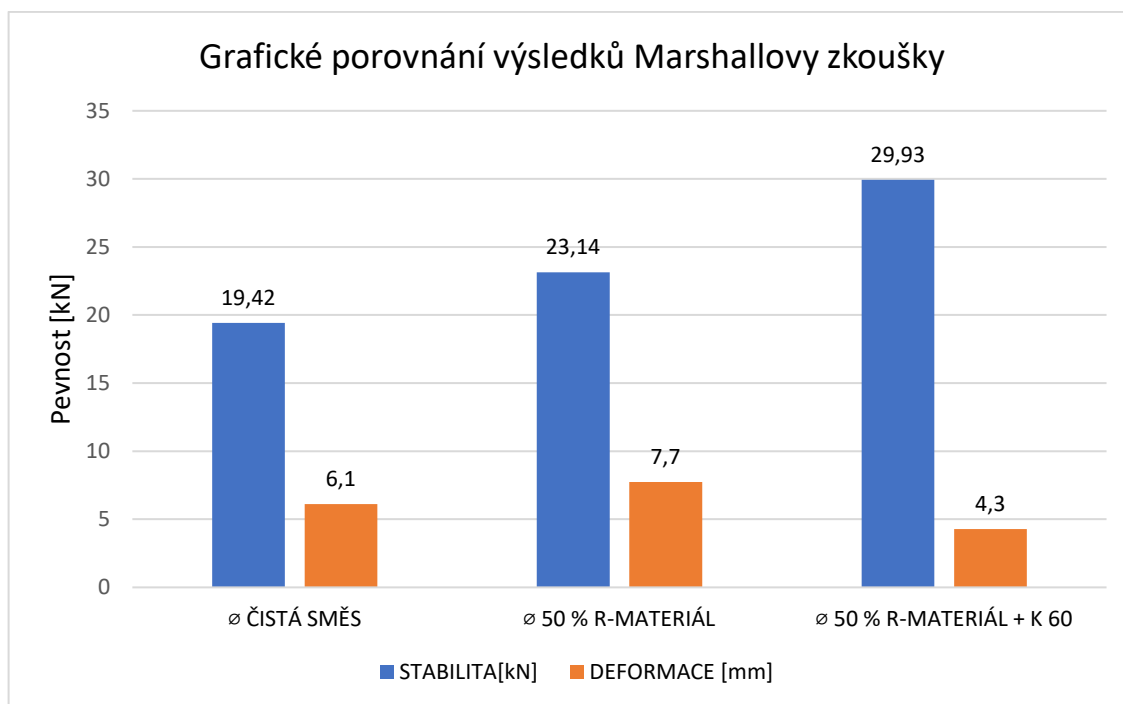
Kde je:

- c korekční faktor [-]
- h výška zkušebního tělesa



SMĚŠ	VZOREK	STABILITA [kN]	DEFORMACE [mm]
ČISTÁ SMĚŠ	1C	20,49	5,3
	6C	18,29	6,9
	7C	19,95	7,5
	8C	18,93	4,8
	∅C	19,42	6,1
směs s 50 % R- materiálu	1R	20,06	11,0
	6R	26,67	10,5
	7R	22,67	5,0
	8R	23,16	4,5
	∅R	23,14	7,7
směs s 50 % R- materiálu + K 60	1S	29,76	3,6
	6S	30,88	5,5
	7S	30,26	3,8
	8S	28,81	4,4
	∅S	29,93	4,3

Tabulka 16 - Výsledky Marshallovy zkoušky [30]



Graf 11 - Porovnání výsledků Marshallovy zkoušky [30]



7 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce byla založena na porovnání tří asfaltových směsí, které byly autorem namíchány v akreditované laboratoři Viakontrol s.r.o. Abychom mohli vlastnosti směsí porovnat s určitou integritou, byly směsi podrobeny několika laboratorním zkouškám, které byly cíleny na hlavní parametry, popisující předpokládané změny v chování rozdílných směsí. Hlavním cílem bylo zkoumání vlastností vzorků s velkým obsahem 50 % R-materiálu, které byly porovnány s referenční směsí bez přidaného R-materiálu. V modifikovaných směsích je normou předepsán maximální obsah R-materiálu 15 %, protože s dalším nárůstem vznikají nežádoucí vlastnosti. Kvůli tomuto faktu, se do další směsi představila modifikační přísada Improcel K 60. Tato modifikační přísada by měla omezit vznik těchto nežádoucích vlastností a jedním z předmětů této práce bylo zjištění do jaké míry k tomuto jevu dojde.

Z počátku praktické části, se u vyrobené směsi provedla kompletní analýza asfaltové směsi za účelem zjištění, zda směs odpovídá normovaným mezím a jestli si jsou hodnoty mezerovitostí navržených směsí podobné (v rozmezí ± 1 %). Z této analýzy se zjistilo, že mezerovitost směsí se liší o 0,25 %, obsah pojiva byl u čisté směsi 4,14 % a směsi s R-materiálem 4,18 %. Zároveň byly splněny meze křivky zrnitosti a tím se návrh označil jako vyhovující a zkušební tělesa se vyráběla dle těchto směsí.

Při stanovení mezerovitostí všechny vzorky splnily požadavky z norem. Zároveň tyto výsledky odpovídaly předchozí kompletní analýze a tím se ověřilo, že míchání směsí bylo v průběhu konzistentní. Výsledky odolností proti tvorbě trvalých deformací také vyhovují bezpečně v mezích určených normou a zároveň reflektují chování tuhosti daných směsí, dle předpokladů v kapitole 2. Požadavky byly splněny i u zkoušky odolnosti vůči účinkům vody, kde se dobře projevily kohezní a adhezní vlastnosti modifikační přísady K 60, zlepšující hodnotu ITSR oproti směsi s 50 % R-materiálu bez přísady. Moduly tuhosti dle předpokladů dosahovaly vysokých hodnot i za vyšších teplot, což je způsobeno tím, že do směsí bylo přidáno modifikované pojivo, modifikované pojivo bylo obsaženo i v R-materiálu a u třetí směsi byla přidána i modifikační přísada. Z výsledků modulů tuhosti lze opět pozorovat účinek přísady K 60, která znatelně snížila teplotní citlivost směsi a tím si udržela vysoké moduly tuhosti i při teplotě 40 °C lépe než ostatní směsi. Obecně se předpokládá, že s rostoucí tuhostí klesá duktilita dle teorie pružnosti. Tento jev nastal u zkoušky odolnosti proti šíření trhlin, kde lomová houževnatost mírně klesla u směsí s přidaným R-materiálem při teplotě 0 °C. Při teplotě 25 °C lomová houževnatost u směsí s R-materiálem vzrostla a u obou teplot směs s přísadou K 60 dosáhla lepších výsledků než směs s pouze 50 % R-materiálu. Avšak znatelné zhoršení vlastností s přidaným R-materiálem nastalo u veličiny celkové lomové energie, kde lomová energie u směsí s 50 % R-materiálu byla přibližně poloviční oproti referenční „čisté směsí“. Opět se projevilo zlepšení této veličiny s přidanou přísadou



K 60, která při teplotě 25 °C dosáhla příznivějších hodnot než samotná referenční směs. Na závěr byla provedena Marshallova zkouška, u které výsledky vyšly dle očekávání a hodnoty stability odpovídají přímo úměrně k modulům tuhosti daných směsí, tzn. nejnižší hodnota stability měla směs bez R-materiálu a nejvyšších hodnot stability dosáhla směs s 50 % R-materiálu a přísady K 60.

Celkově výsledky zkoušek odpovídají předpokladům z kapitoly 2. Nejpříznivější hodnoty náleží směsi s modifikační přísadou K 60, ale je nutno brát na vědomí, že do směsi s přísadou bylo vloženo více množství aktivní látky (4 % navážky asfaltového pojiva oproti předepsaným 3 %), aby rozdíl mezi vzorky byly prokazatelnější. Z této práce bych určil, že modifikační přísada vykompenzovala nežádoucí účinky přidaného R-materiálu.

Z této bakalářské práce vyplývá, že modifikované směsi s větším obsahem R-materiálu než 15 %, lze bezpečně využívat v podkladních vrstvách bez výrazných nežádoucích vlastností a využití R-materiálu by mělo být dle mého názoru důležitým tématem v dnešním silničním stavitelství, pro omezení hromadění odpadu na skládkách a celkovému zlepšení oběhového hospodářství.



9 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Přednášky SS02 - Ing. Petr Mondschein Ph.D.; ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra silničních staveb
- [2] Recyklace asfaltových směsí na obalovně, doc. Dr. Ing. Michal Varaus
- [3] ČSN 73 6141 - Požadavky na použití R-materiálu do asfaltových směsí
- [4] TP 208 - recyklace konstrukčních vrstev netuhých vozovek za studena
- [5] Odborný článek – Recyklace asfaltových vozovek za studena, Ing. Hana Solařová <https://www.stavebni-technika.cz/clanky/recyklace-a-asfaltovych-vozovek-za-studena>
- [6] TP 209 - Recyklace konstrukčních vrstev netuhých vozovek na místě za horka
- [7] FREKOMOS – recyklace za horka na místě, http://www.frekomos.cz/domains/1/users/produkty/horka_recyklace_frekomos_web.pdf
- [8] The Shell Bitumen Handbook, Sixth Edition 2015; Dr. Robert N. Hunter, Andy Self and Professor John Read
http://www.ariantrg.com/files/learning_article/01-SHELL-Bitumen-Handbook-6th-Edition2015.pdf
- [9] Asfaltové směsi s vysokým obsahem R-materiálu – dosavadní zkušenosti; Doc. Dr. Ing. Michal Varaus, Ing. Tomáš Koudelka; <https://www.silnice-mosty.cz/615-asfaltove-smesi-s-vysokym-obsahem-r-materialu-dosavadni-zkusenosti/>
- [10] Obrázek frézování za studena; <https://www.ekostavbylouny.cz/stavebni-vyroba/dopravni-stavby.html>
- [11] FREKOMOST s.r.o frézování vozovek
<http://www.frekomos.cz/frezovani-vozovek/>
- [12] Inereco asphalt s.r.o – frézování za studena; vytvořil WANET s.r.o
<https://www.inereco-asfalt.cz/silnicni-frezovani/>
- [13] Improcel K – Technický specifikační list firmy CIUR a.s.
<https://www.ciur.cz/produkty/obsah/granulat-improcel-k>
- [14] ASFALTOVÁ ZMES TYPU PMAZ – Rozborová úloha; Ing. Ľubomír Polakovič, CSc.,
Mgr. Magdaléna Kondrcová
- [15] ČSN EN 12697-1 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 1: Obsah rozpustného pojiva
- [16] ČSN EN 933-1 Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor
- [17] ČSN 73 6121 - Stavba vozovek – Hutněné asfaltové vrstvy – Provádění a kontrola shody



- [18] graf popisující vzrůst ceny ropy
<https://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=crude-oil&months=360>
- [19] ČSN EN 12697-5 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti
- [20] ČSN EN 12697-6 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa
- [21] ČSN EN 12697-8 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 8: Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí
- [22] ČSN EN 12697-30 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem
- [23] ČSN EN 12697-33 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 33: Příprava zkušebních těles zhutňovačem desek
- [24] ČSN EN 12697-22 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 22: Zkouška poježdění kolem
- [25] ČSN EN 12697-12 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 12: Stanovení odolnosti zkušebního tělesa vůči vodě
- [26] ČSN EN 12697-23 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 23: Stanovení pevnosti v příčném tahu
- [27] ČSN EN 12697-26 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 26: Tuhost
- [28] ČSN EN 12697-44 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 44: Šíření trhliny zkouškou ohybem na půlválcovém zkušebním tělese
- [29] Ing. VACKOVÁ Pavla, SCB – použité metody a jejich modifikace, Fakulta stavební ČVUT v Praze, katedra silničních staveb, silniční laboratoř
- [30] ČSN EN 12697-34 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 34: Marshallova zkouška



10 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Frézování vozovky za studena [10].....	- 12 -
Obrázek 2 - Jemný frézovací buben [12]	- 13 -
Obrázek 3 - Postup recyklace za studena na místě [5]	- 17 -
Obrázek 4 - Mobilní míchací jednotka [2].....	- 19 -
Obrázek 5 - Pokládka metodou REMIX [7].....	- 21 -
Obrázek 6 - Pokládka metodou REMIX PLUS [7].....	- 21 -
Obrázek 7 - Šaržová obalovna [2]	- 23 -
Obrázek 8 - Dávkování R-materiálu přímo do míchačky šaržové obalovny [2]	- 24 -
Obrázek 9 - schéma šaržové obalovny s paralelním sušícím bubnem [8]	- 25 -
Obrázek 10 - dvouplášťový buben [8].....	- 25 -
Obrázek 11 - Metoda Drum-mix [2].....	- 26 -
Obrázek 12 - Granulát Improcel K [14] (vlevo); Improcel K oddělená aktivní látka a cel. vlákna [vlastní foto] (vpravo)	- 29 -
Obrázek 13 - Laboratorní míchačka [vlastní foto] (vlevo); Sušárna kameniva [vlastní foto] (vpravo).....	- 29 -
Obrázek 14 - Digitální váha s mísou [vlastní foto] (vlevo); kamenivo pro míchání směsí [vlastní foto] (vpravo)	- 30 -
Obrázek 15 - Analyzátor [vlastní foto] (vlevo); drátěný koš [vlastní foto] (vpravo) ...	- 31 -
Obrázek 16 - Temperování pyknometru [vlastní foto] (vlevo); Vývěva s manometrem [vlastní foto] (vpravo)	- 35 -
Obrázek 17 - Rázový zhutňovač s ocelovým dolním podstavcem [22].....	- 39 -
Obrázek 18 - Hutnicí těleso [vlastní foto] (vlevo); výtlačné zařízení [vlastní foto] (vpravo).....	- 40 -
Obrázek 19 - Lamelový zhutňovač [vlastní foto] (vlevo); Lamely [vlastní foto] (vpravo)..	- 41 -
Obrázek 20 - Zkušební stroj pro zkoušku pojíždění kolem [24].....	- 42 -
Obrázek 21 - Zkušební forma těles [24].....	- 43 -



Obrázek 22 - ACP 16+ PMB 25/55–65 (čistá směs) po zkoušce pojíždění kolem [vlastní foto]	- 44 -
Obrázek 23 - Tělesa pro zkoušku ITSR [vlastní foto] (vlevo mokrá skupina), (vpravo suchá skupina)	- 45 -
Obrázek 24 - Vakuová komora s vývěvou [vlastní foto] (vlevo); Vodní lázeň pro temperaci [vlastní foto] (vpravo)	- 46 -
Obrázek 25 - Těleso upevněné v čelistích pro zkoušku ITSR	- 46 -
Obrázek 26 - Zkoušení vzorku metodou IT-CY [vlastní foto] (vlevo); popis zkušebního přístroje [27] (vpravo)	- 49 -
Obrázek 27 - Upevnění tělesa do přístroje [vlastní foto]	- 50 -
Obrázek 28 - Zkouška odolnosti vůči šíření trhlin na tělese [vlastní foto]	- 53 -
Obrázek 29 - Záznamové zařízení pro stanovení pracovního diagramu zkoušky [vlastní foto]	- 55 -
Obrázek 30 - Zjištění platnosti zkoušky zkoumáním polohy trhliny [28] (vlevo); doplňkové zařízení [28] (vpravo)	- 56 -
Obrázek 31 - Uložení tělesa do zkušebního lisu [vlastní foto]	- 58 -
Obrázek 32 - Marshallova stabilita a přetvoření [30]	- 59 -

11 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Možnosti přidání upraveného R-materiálu do nově vyráběných směsí [3]	- 15 -
Tabulka 2 - Nejvyšší přípustný obsah R-materiálu v % hmotnosti asfaltové směsi [3]	- 16 -
Tabulka 3 - Požadavky na recyklované směsi [6]	- 22 -
Tabulka 4 - Minimální teploty recyklované asfaltové směsi před zahájením zhutňování [6]	- 22 -
Tabulka 5 - Návrh složení asfaltové směsi ACP 16+ PMB 25/55–65	- 27 -



Tabulka 6 - Návrh složení asfaltové směsi ACP 16+ PMB 25/55–65, 50 % R-materiál	- 28 -
Tabulka 7 - Výsledky zastoupení asfaltového pojiva ve směsích	- 31 -
Tabulka 8 - Zrnitost směsi bez R-MATERIÁLU [17]	- 32 -
Tabulka 9 - Zrnitost směsi s R-MATERIÁLEM [17]	- 32 -
Tabulka 10 - Maximální objemová hmotnost směsí	- 36 -
Tabulka 11 - Objemová hmotnost SSD směsí [20]	- 36 -
Tabulka 12 - Stanovení Vm, VMA a VFB směsí [21]	- 37 -
Tabulka 13 - Výpočet navážky desek [23]	- 41 -
Tabulka 14 - Shrnutí výsledků zkoušky pojíždění kolem [24]	- 44 -
Tabulka 15 - Shrnutí výsledků zkoušky odolnosti vůči šíření trhlin [28][29]	- 56 -
Tabulka 16 - Výsledky Marshallovy zkoušky [30]	- 60 -

12 SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Nárůst ceny ropy v rozmezí 30 let [18]	- 11 -
Graf 2 - Křivka zrnitosti směsi bez R-MATERIÁLU	- 33 -
Graf 3 - Křivka zrnitosti směsi s R-MATERIÁLEM	- 33 -
Graf 4 - Stanovení pevnosti v příčném tahu [26]	- 47 -
Graf 5 - Poměr pevností v příčném tahu směsí [26]	- 48 -
Graf 6 - Porovnání průměrných modulů tuhosti při teplotě 15 °C [27]	- 51 -
Graf 7 - Porovnání průměrných modulů tuhosti při teplotě 27 °C [27]	- 51 -
Graf 8 - Porovnání průměrných modulů tuhosti při teplotě 40 °C [27]	- 52 -
Graf 9 - Výsledky hodnot lomové houževnatosti směsí [28]	- 57 -
Graf 10 - Výsledky hodnot celkové lomové energie směsí [29]	- 57 -
Graf 11 - Porovnání výsledků Marshallovy zkoušky [30]	- 60 -



13 SEZNAM VZORCŮ

Vzorec 1 - Výpočet obsahu asfaltového pojiva [15]	- 31 -
Vzorec 2 - Výpočet maximální objemové hmotnosti směsi [19]	- 35 -
Vzorec 3 - Výpočet hustoty vody při zkušební teplotě [19].....	- 35 -
Vzorec 4 - Výpočet objemové hmotnosti SSD [20]	- 36 -
Vzorec 5 - Výpočet mezerovitosti tělesa [21]	- 37 -
Vzorec 6 - Výpočet stupně vyplnění mezer asfaltovým pojivem [21]	- 37 -
Vzorec 7 - Výpočet mezerovitosti směsi kameniva [21]	- 37 -
Vzorec 8 - Výpočet hmotnosti zkušební desky [23]	- 40 -
Vzorec 9 - Přírůstek hloubky vyjeté koleje.....	- 43 -
Vzorec 10 - Průměrná hloubky vyjeté koleje	- 44 -
Vzorec 11 - Stanovení pevnosti v příčném tahu	- 47 -
Vzorec 12 - Poměr pevností v příčném tahu	- 47 -
Vzorec 13 - Výpočet modulu tuhosti	- 50 -
Vzorec 14 - Přetvoření za působení maximální síly	- 54 -
Vzorec 15 - Výpočet napětí při porušení zkušební tělesa	- 54 -
Vzorec 16 - Výpočet odolnosti vůči lomu	- 54 -
Vzorec 17 - Výpočet faktoru intenzity napětí při standardním režimu	- 54 -
Vzorec 18 - Výpočet lomové energie	- 55 -
Vzorec 19 - Výpočet korekčního faktoru stability.....	- 59 -

14 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 - Číslování vzorků, stanovení mezerovitosti	- 70 -
Příloha 2 - Průběh zkoušky vyjetí kolem	- 71 -
Příloha 3 - Grafy průběhu zkoušky vyjetí kolem referenční směsi a směsi s přísadou K 60	- 72 -



Příloha 4 - Grafy průběhu zkoušky vyjeté kolem směsi s 50 % R-materiálu a celkové porovnání všech směsí.....	- 73 -
Příloha 5 - Výsledky zkoušky ITSR pro referenční (čistou) směs.....	- 74 -
Příloha 6 - Výsledky zkoušky ITSR pro směs s 50% R-materiálu a přísadou K 60	- 75 -
Příloha 7 - Výsledky zkoušky ITSR směsi s 50 % R-materiálu	- 76 -
Příloha 8 - Výsledky modulů tuhosti pro směs s přísadou K 60 a referenční směs při 15 °C.....	- 77 -
Příloha 9 - Výsledky modulů tuhosti směsi s 50 % R-materiálu a graf porovnání všech směsí při 15 °C.....	- 78 -
Příloha 10 - Výsledky modulů tuhosti pro směs s přísadou K 60 a referenční směs při 27 °C.....	- 79 -
Příloha 11 - Výsledky modulů tuhosti směsi s 50 % R-materiálu a graf porovnání všech směsí při teplotě 27 °C.....	- 80 -
Příloha 12 - Výsledky modulů tuhosti pro směs s přísadou K 60 a referenční směs při 40 °C.....	- 81 -
Příloha 13 - Výsledky modulů tuhosti směsi s 50 % R-materiálu a graf porovnání všech směsí při teplotě 40 °C.....	- 82 -
Příloha 14 - Rozměry vzorků a výsledné síly zkoušky odolnosti vůči šíření trhlin	- 83 -
Příloha 15 - Výsledky zkoušky odolnosti vůči šíření trhlin	- 84 -
Příloha 16 - Shrnutí výsledků zkoušky odolnosti vůči šíření trhlin a grafy zatěžovacích diagramů čisté směsi	- 85 -
Příloha 17 - Grafy zatěžovacích diagramů směsi s 50 % R-materiálu	- 86 -
Příloha 18 - Grafy zatěžovacích diagramů směsi s 50 % R-materiálu a přísady K 60 ..	- 87 -
Příloha 19 - Zatěžovací diagram čisté směsi při Marshallově zkoušce	- 88 -
Příloha 20 - Zatěžovací diagram směsi s 50 % R-materiálu a přísady K 60 při Marshallově zkoušce.....	- 88 -
Příloha 21 - Zatěžovací diagram směsi s 50 % R-materiálu při Marshallově zkoušce ..	- 89 -

Příloha 1 - Číslování vzorků, stanovení mezerovitosti

ČISTÁ	h [mm]	d [mm]	m [g]	m_m [g]	m_{os} [g]	ρ_{bssd} [Mg/m ³]	ρ_{bssd} [Mg/m ³]	V_m [%]
1C	61,59	101,70	1280,00	808,70	1292,70	2,638	2,754	4,2
2C	62,28	101,68	1285,40	810,00	1297,50	2,630	2,754	4,5
3C	62,52	101,70	1284,20	806,80	1296,20	2,618	2,754	4,9
4C	63,00	101,71	1288,50	810,70	1301,30	2,620	2,754	4,8
5C	62,29	101,67	1285,30	810,40	1297,40	2,633	2,754	4,4
6C	62,32	101,60	1284,40	809,00	1298,50	2,618	2,754	4,9
7C	62,47	101,65	1284,40	811,40	1298,10	2,633	2,754	4,4
8C	62,41	101,68	1287,00	811,20	1298,40	2,635	2,754	4,3
∅	62,36	101,67	1284,90	809,78	1297,51	2,628	2,754	4,6

50 % R	h [mm]	d [mm]	m [g]	m_m [g]	m_{os} [g]	ρ_{bssd} [Mg/m ³]	ρ_{bssd} [Mg/m ³]	V_m [%]
1R	61,51	101,59	1279,40	801,60	1290,60	2,610	2,720	4,0
2R	62,98	101,70	1300,30	812,00	1312,30	2,593	2,720	4,7
3R	61,61	101,69	1281,40	802,70	1293,00	2,607	2,720	4,1
4R	62,85	101,72	1304,60	815,40	1316,36	2,598	2,720	4,5
5R	61,86	101,71	1282,10	802,60	1294,00	2,603	2,720	4,3
6R	61,81	101,64	1282,60	805,10	1294,50	2,614	2,720	3,9
7R	63,26	101,69	1307,80	817,50	1319,40	2,599	2,720	4,4
8R	61,71	101,68	1285,60	805,50	1297,10	2,609	2,720	4,1
∅	62,20	101,68	1290,48	807,80	1302,16	2,604	2,720	4,2

50 % R + K 60	h [mm]	d [mm]	m [g]	m_m [g]	m_{os} [g]	ρ_{bssd} [Mg/m ³]	ρ_{bssd} [Mg/m ³]	V_m [%]
1S	62,17	101,80	1280,70	793,60	1285,00	2,600	2,720	4,4
2S	62,16	101,59	1290,30	803,10	1294,00	2,622	2,720	3,6
3S	62,58	101,58	1288,60	798,50	1293,40	2,598	2,720	4,5
4S	62,25	101,64	1296,60	805,00	1299,80	2,614	2,720	3,9
5S	63,10	101,64	1290,30	795,50	1294,50	2,580	2,720	5,2
6S	62,43	101,69	1291,20	800,90	1294,90	2,608	2,720	4,1
7S	61,70	101,69	1294,30	806,70	1295,90	2,639	2,720	3,0
8S	63,14	101,58	1292,80	799,60	1296,60	2,595	2,720	4,6
∅	62,44	101,65	1290,60	800,36	1294,26	2,607	2,720	4,1

Značení vzorků:

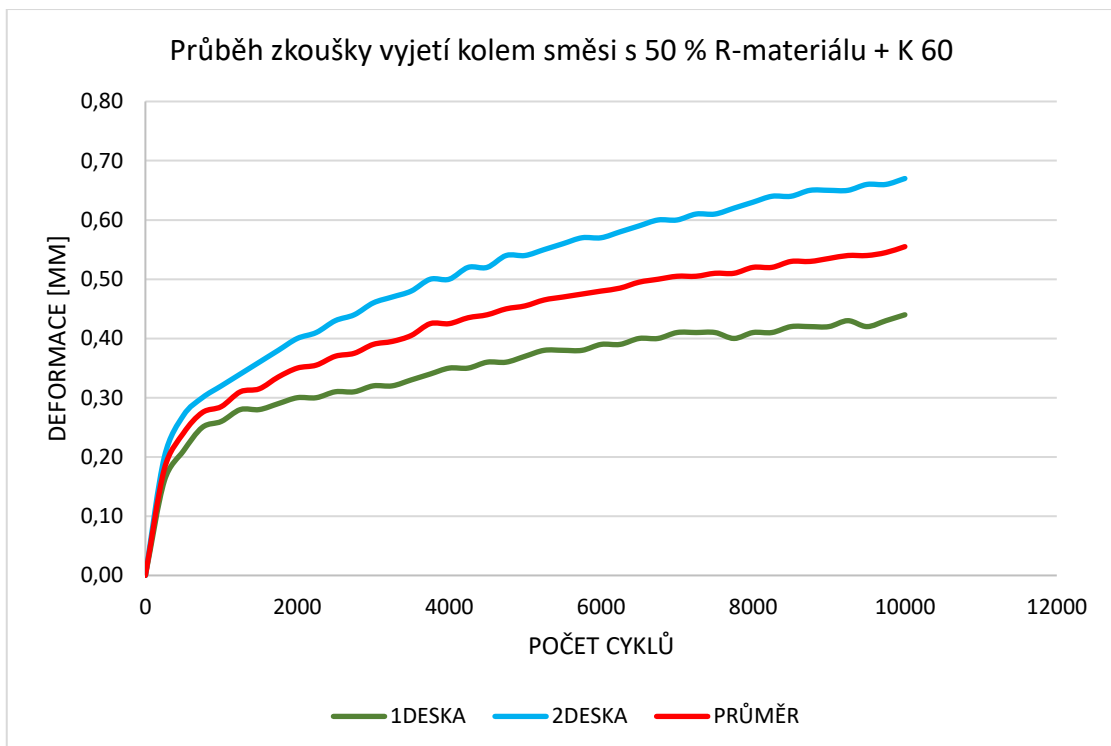
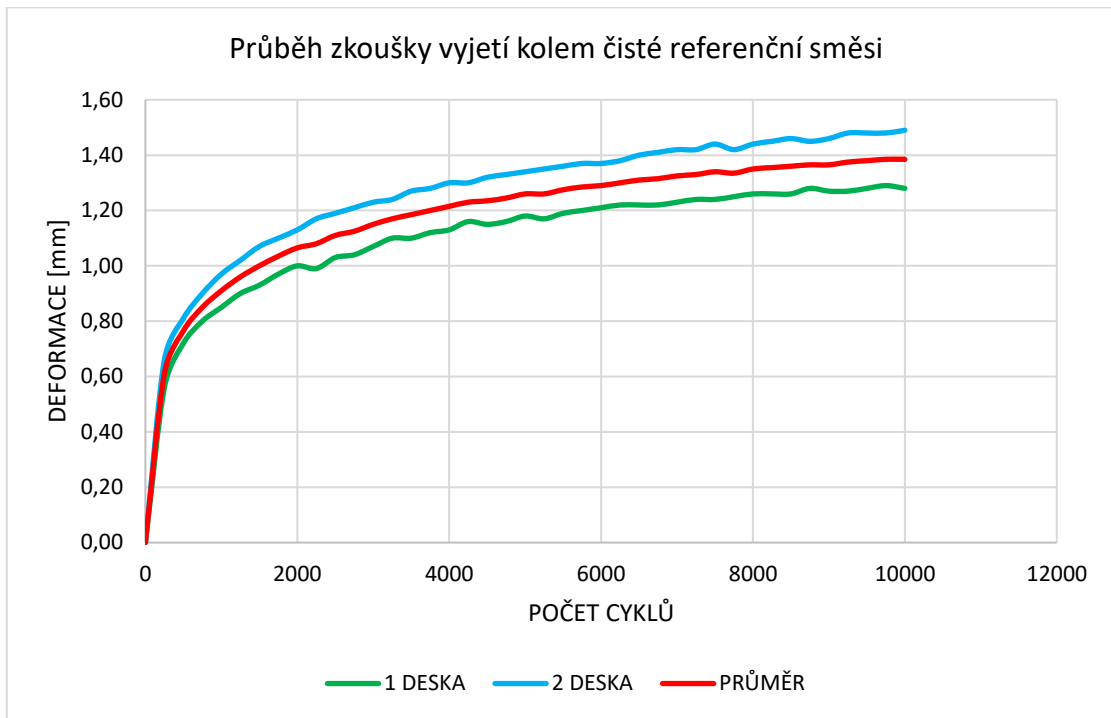
S – Směs s 50 % R-materiálu a modifikační přísadou K 60

R – Směs s 50 % R-materiálu

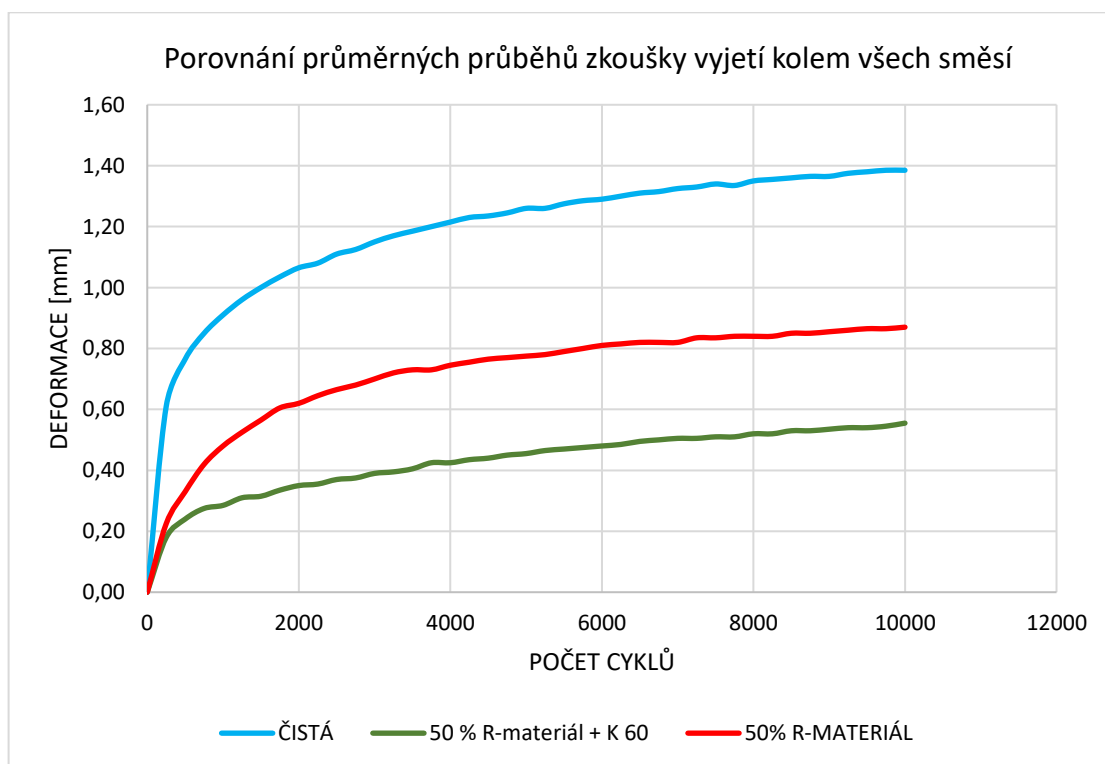
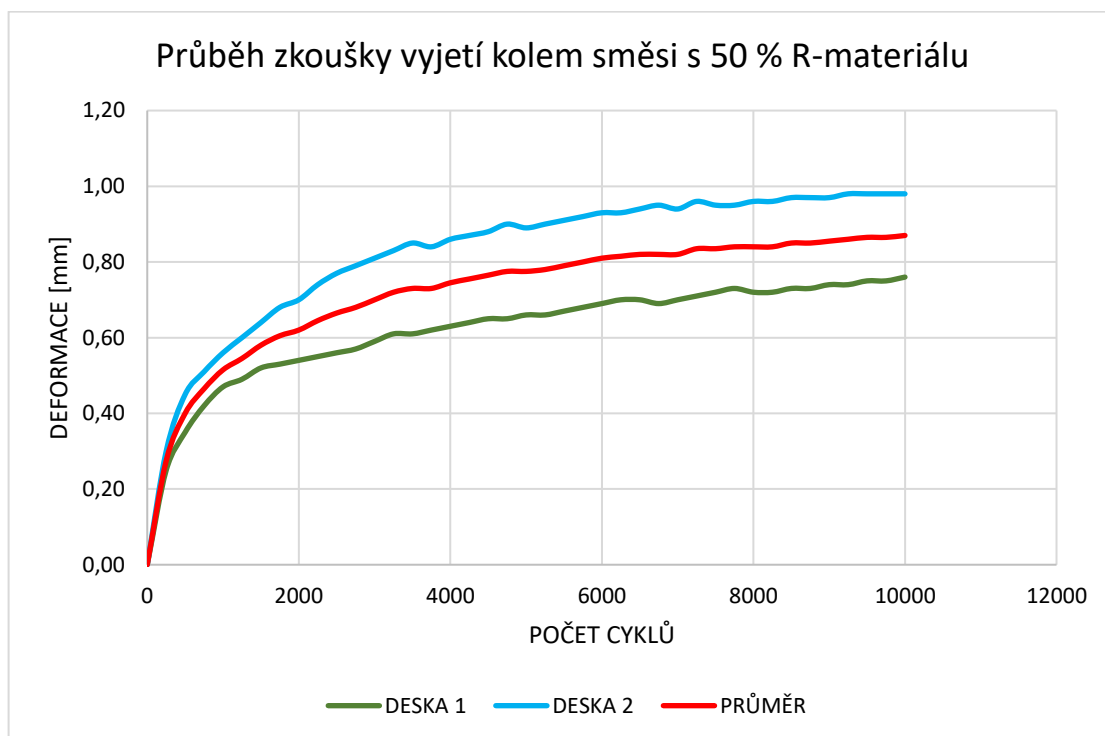
C – Směs referenční (čistá)

Příloha 2 - Průběh zkoušky vyjetí kolem

CYKLY	ČISTÁ	50 % R-materiál + K 60	50 % R-MATERIÁL
0	0,00	0,00	0,00
250	0,61	0,18	0,23
500	0,77	0,24	0,33
750	0,85	0,28	0,42
1000	0,91	0,29	0,48
1250	0,96	0,31	0,53
1500	1,00	0,32	0,57
1750	1,04	0,34	0,61
2000	1,07	0,35	0,62
2250	1,08	0,36	0,65
2500	1,11	0,37	0,67
2750	1,13	0,38	0,68
3000	1,15	0,39	0,70
3250	1,17	0,40	0,72
3500	1,19	0,41	0,73
3750	1,20	0,43	0,73
4000	1,22	0,43	0,75
4250	1,23	0,44	0,76
4500	1,24	0,44	0,77
4750	1,25	0,45	0,77
5000	1,26	0,46	0,78
5250	1,26	0,47	0,78
5500	1,28	0,47	0,79
5750	1,29	0,48	0,80
6000	1,29	0,48	0,81
6250	1,30	0,49	0,82
6500	1,31	0,50	0,82
6750	1,32	0,50	0,82
7000	1,33	0,51	0,82
7250	1,33	0,51	0,84
7500	1,34	0,51	0,84
7750	1,34	0,51	0,84
8000	1,35	0,52	0,84
8250	1,36	0,52	0,84
8500	1,36	0,53	0,85
8750	1,37	0,53	0,85
9000	1,37	0,54	0,86
9250	1,38	0,54	0,86
9500	1,38	0,54	0,87
9750	1,39	0,55	0,87
10000	1,39	0,56	0,87



Příloha 4 - Grafy průběhu zkoušky vyjetí kolem směsi s 50 % R-materiálu a celkové porovnání všech směsí



Příloha 5 - Výsledky zkoušky ITS pro referenční (čistou) směs

ČISTÁ SMĚS	Teplota hutnění	Průměr d (mm)	Výška h (mm)	Hmotnost m ₁ (g)	Objem V (cm ³)	ρ _{b,dim} (kg/m ³)	ø _{p_{b,dim}} (kg/m ³)	M (% obj.)	Max. síla (kN)	ITS (kPa)			Průměr ITS (kPa)	ITSR (%)
										Odchylika od ø		Průměr ITS (kPa)		
										1. výpočet	red.			
suchá série	1	101,52	63,18	1255,00	511,41	2453,98	2454,62	10,90	26,50	2628,90	2628,90	2585	93,8	
	175							1,70						
	6	101,59	63,14	1264,90	511,80	2471,50		10,26	24,70	2450,40	2450,40			
	175							5,21						
	3	101,70	62,47	1243,50	507,46	2450,43		11,03	25,80	2587,30	2587,30			
	175							0,09						
	4	101,77	63,35	1258,70	515,32	2442,57		11,31	27,10	2673,50	2673,50			
	175							3,42						
mokrá série	5	101,54	63,00	1263,10	510,16	2475,90	2454,91	10,10	25,70	2552,90	2552,90	2415,6	93,8	
	175							5,69						
	2	101,66	62,10	1259,90	504,06	2499,51		9,24	25,00	2520,30	2520,30			
	175							4,34						
	7	101,67	63,40	1262,60	514,71	2453,02		10,93	24,60	2429,60	2429,60			
	175							0,58						
	8	101,65	65,10	1263,30	528,31	2391,23		13,18	22,40	2159,40	2193,10			
	175							10,61						

Příloha 6 - Výsledky zkoušky ITSR pro směs s 50% R-materiálu a přísadou K 60

50 % R K 60	Teplota hutnění	Průměr d (mm)	Výška h (mm)	Hmotnost m ₁ (g)	Objem V (cm ³)	ρ _{b,dlm} (kg/m ³)	ρ _{b,dlm} (kg/m ³)	ø _{p,b,dlm} (kg/m ³)	M (% obj.)	Max. síla (kN)	ITS (kPa)		Průměr ITS (kPa)	ITSR (%)	
											Odchylka od ø 1. výpočet	red.			
suchá série	1	101,76	62,70	1261,60	509,93	2474,06	2471,63		9,05	34,67	3459,00	3459,00			
	175										0,29				
	6	101,61	63,12	1261,30	511,83	2464,27			9,41	34,66	3440,00	3440,00	3449,1		
	175										0,26				
	3	101,90	62,96	1262,90	513,46	2459,61			9,58	34,06	3380,00	3380,00	3449,1		
	175										2,00				
	4	101,69	62,43	1261,80	507,04	2488,58			8,52	35,08	3517,50	3517,50			
	175										1,98				
	mokrā série	5	101,69	62,81	1262,70	510,12	2475,28	2476,43		9,00	31,22	3111,60	3111,60		
		175										1,58			
		2	101,90	62,43	1259,40	509,13	2473,61			9,07	32,49	3251,50	3251,50	3161,5	
		175										2,85			
7		101,99	61,72	1256,00	504,23	2490,91			8,43	31,14	3149,40	3149,40	3161,5		
175											0,38				
8		101,85	63,03	1266,30	513,52	2465,91			9,35	31,60	3133,40	3133,40			
175											0,89				
														91,7	

Příloha 7 - Výsledky zkoušky ITSr směsi s 50 % R-materiálu

50 % R	Teplota hutnění	Průměr d (mm)	Výška h (mm)	Hmotnost m ₁ (g)	Objem V (cm ³)	ρ _{b,dim} (kg/m ³)	øρ _{b,dim} (kg/m ³)	M (% obj.)	Max. síla (kN)	ITS (kPa)		Průměr ITS (kPa)	ITSR (%)	
										1. výpočet	Odchylka od ø red.			
suchá série	1	101,72	64,62	1259,20	525,13	2397,87	2409,69	11,85	29,19	2826,90	2826,90	2849,2	89,0	
	175									0,78				
	6	101,66	64,38	1262,10	522,57	2415,20	2409,69	11,21	29,21	2841,40	2841,40	2849,2		
	175									0,27				
	3	101,58	63,96	1261,10	518,34	2432,96	2409,69	10,56	30,16	2955,40	2955,40	2849,2		
	175									3,73				
	4	101,77	64,70	1259,30	526,30	2392,74	2409,69	12,04	28,68	2772,90	2772,90	2849,2		
	175									2,68				
	mokrā série	5	101,48	64,63	1260,20	522,74	2410,76	2407,25	11,38	26,23	2545,80	2545,80		2534,9
		175									0,43			
		2	101,57	64,90	1256,60	525,85	2389,64	2407,25	12,15	26,10	2520,80	2520,80		2534,9
		175									0,56			
7		101,66	64,11	1257,80	520,37	2417,11	2407,25	11,14	26,90	2627,30	2627,30	2534,9		
175										3,64				
8		101,43	64,71	1260,90	522,87	2411,50	2407,25	11,35	25,22	2445,80	2445,80	2534,9		
175										3,52				

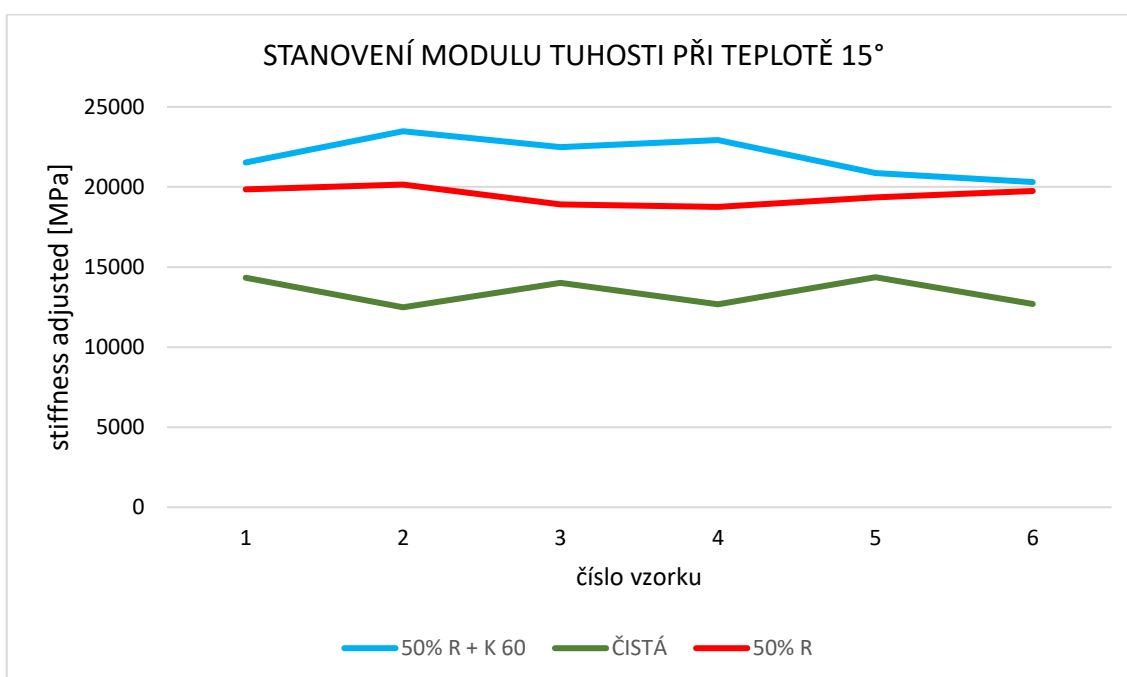
Příloha 8 - Výsledky modulů tuhosti pro směs s přísadou K 60 a referenční směs při 15 °C

15°	h [mm]	d [mm]	v	vertical force [kN]	stiffness measured [Mpa]	stiffness adjusted [Mpa]	∅ stiffness adjusted [Mpa]
1S	62,17	101,80	0,31	9,0	21623	23084	21530
			0,31	8,4	19708	19976	
2S	62,16	101,59	0,31	9,4	23201	24680	23479
			0,31	8,9	21579	22277	
3S	62,58	101,58	0,31	8,9	21640	22320	22490
			0,31	8,8	21164	22660	
4S	62,25	101,64	0,31	9,1	22878	24509	22925
			0,31	8,8	20904	21341	
5S	63,10	101,64	0,31	8,8	21338	21718	20872
			0,31	8,7	19667	20026	
6S	62,43	101,69	0,31	8,6	19994	20865	20310
			0,31	8,4	19709	19754	

15°	h [mm]	d [mm]	v	vertical force [kN]	stiffness measured [Mpa]	stiffness adjusted [Mpa]	∅ stiffness adjusted [Mpa]
1C	61,59	101,70	0,31	6,0	14385	14554	14335
			0,31	6,0	14021	14115	
2C	62,28	101,68	0,31	6,7	12254	12315	12487
			0,31	6,7	12596	12658	
3C	62,52	101,70	0,31	7,1	13336	13415	14009
			0,31	7,8	14481	14603	
4C	63,00	101,71	0,31	6,9	12685	12653	12666
			0,31	6,9	12709	12679	
5C	62,29	101,67	0,31	7,4	13763	13753	14364
			0,31	8,1	14932	14975	
6C	62,32	101,60	0,31	6,6	12448	12356	12702
			0,31	7,0	13103	13048	

Příloha 9 - Výsledky modulů tuhosti směsi s 50 % R-materiálu a graf porovnání všech směsí při 15 °C

15°	h [mm]	d [mm]	v	vertical force [kN]	stiffness measured [Mpa]	stiffness adjusted [Mpa]	∅ stiffness adjusted [Mpa]
1R	61,51	101,59	0,31	8,5	19661	19879	19855
			0,31	8,5	19624	19831	
2R	62,98	101,70	0,31	8,4	19332	19645	20150,5
			0,31	8,6	20078	20656	
3R	61,61	101,69	0,31	8,2	19328	19301	18913,5
			0,31	7,9	18738	18526	
4R	62,85	101,72	0,31	7,9	18294	18151	18754,5
			0,31	8,3	19300	19358	
5R	61,86	101,71	0,31	8,1	18913	18867	19357,5
			0,31	8,3	19798	19848	
6R	61,81	101,64	0,31	8,4	19807	19963	19740,5
			0,31	8,2	19459	19518	





Příloha 10 - Výsledky modulů tuhosti pro směs s přísadou K 60 a referenční směs při 27 °C

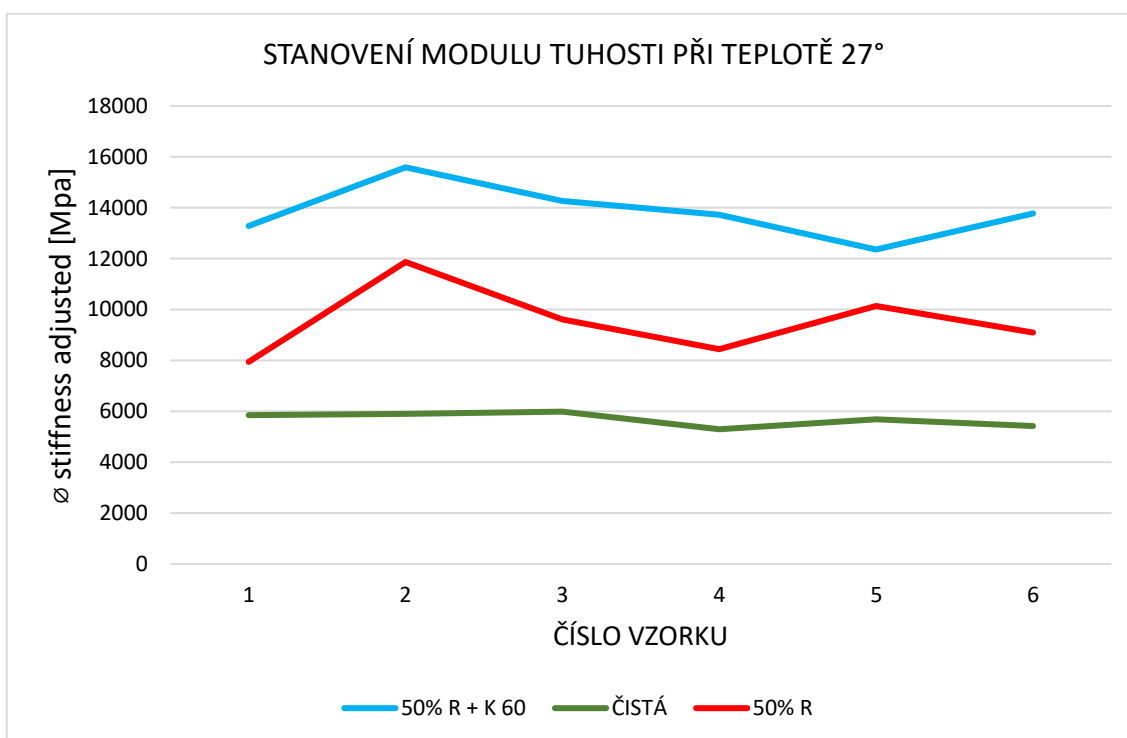
27°	h [mm]	d [mm]	v	vertical force [kN]	stiffness measured [Mpa]	stiffness adjusted [Mpa]	∅ stiffness adjusted [Mpa]
1S	62,17	101,80	0,38	6,3	13141	13217	13290
			0,38	6,4	13295	13363	
2S	62,16	101,59	0,38	7,3	15154	15250	15591
			0,38	7,6	15842	15931	
3S	62,58	101,58	0,38	7,2	15242	15263	14262,5
			0,38	6,5	13314	13262	
4S	62,25	101,64	0,38	6,8	14214	14198	13728,5
			0,38	6,4	13304	13259	
5S	63,10	101,64	0,38	6,2	12700	12650	12360
			0,38	5,9	12118	12070	
6S	62,43	101,69	0,38	6,8	14223	14236	13773
			0,38	6,4	13346	13310	

27°	h [mm]	d [mm]	v	vertical force [kN]	stiffness measured [Mpa]	stiffness adjusted [Mpa]	∅ stiffness adjusted [Mpa]
1C	61,59	101,70	0,38	2,9	6111	6155	5852
			0,38	2,6	5515	5548	
2C	62,28	101,68	0,38	2,8	5827	5854	5895
			0,38	2,8	5906	5936	
3C	62,52	101,70	0,38	2,9	5908	5927	5987,5
			0,38	2,8	6030	6048	
4C	63,00	101,71	0,38	2,6	5416	5435	5294,5
			0,38	2,5	5137	5154	
5C	62,29	101,67	0,38	2,8	5887	5912	5686,5
			0,38	2,6	5436	5461	
6C	62,32	101,60	0,38	2,8	5777	5803	5422
			0,38	2,4	5022	5041	



Příloha 11 - Výsledky modulů tuhosti směsi s 50 % R-materiálu a graf porovnání všech směsí při teplotě 27 °C

27°	h [mm]	d [mm]	v	vertical force [kN]	stiffness measured [Mpa]	stiffness adjusted [Mpa]	∅ stiffness adjusted [Mpa]
1R	61,51	101,59	0,38	3,8	7965	8006	7943
			0,38	3,7	7843	7880	
2R	62,98	101,70	0,38	5,1	12338	12410	11869
			0,38	4,6	11262	11328	
3R	61,61	101,69	0,38	4,2	8789	8829	9605,5
			0,38	4,9	10330	10382	
4R	62,85	101,72	0,38	3,9	8122	8149	8441
			0,38	4,2	8701	8733	
5R	61,86	101,71	0,38	5,0	10471	10525	10135,5
			0,38	4,6	9697	9746	
6R	61,81	101,64	0,38	4,3	8960	9006	9101,5
			0,38	4,4	9156	9197	





Příloha 12 - Výsledky modulů tuhosti pro směs s přísadou K 60 a referenční směs při 40 °C

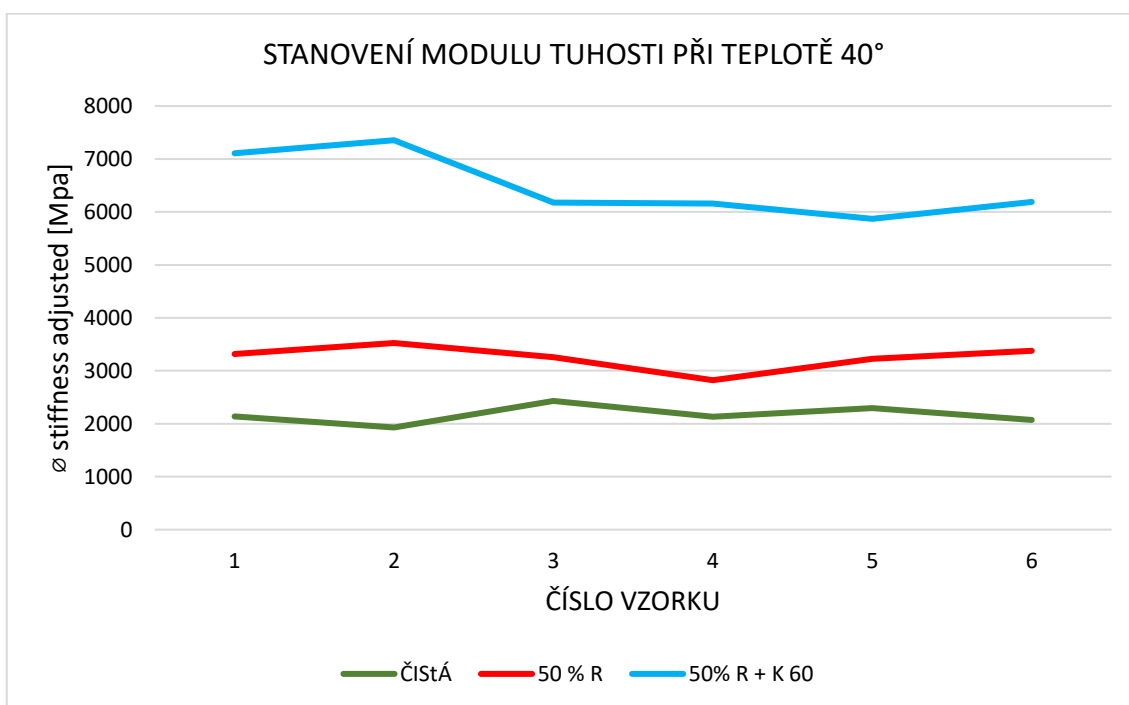
40°	h [mm]	d [mm]	v	vertical force [kN]	stiffness measured [Mpa]	stiffness adjusted [Mpa]	∅ stiffness adjusted [Mpa]
1S	62,17	101,80	0,45	2,7	6311	6286	7107
			0,45	3,2	7960	7928	
2S	62,16	101,59	0,45	3,3	8062	8049	7354
			0,45	3,0	6681	6659	
3S	62,58	101,58	0,45	2,9	6538	6514	6175,5
			0,45	2,5	5851	5837	
4S	62,25	101,64	0,45	2,7	6164	6146	6158
			0,45	2,7	6191	6170	
5S	63,10	101,64	0,45	2,5	5732	5714	5870
			0,45	2,6	6019	6026	
6S	62,43	101,69	0,45	2,7	6056	6046	6190
			0,45	2,8	6344	6334	

40°	h [mm]	d [mm]	v	vertical force [kN]	stiffness measured [Mpa]	stiffness adjusted [Mpa]	∅ stiffness adjusted [Mpa]
1C	61,59	101,70	0,45	1,0	2258	2271	2140
			0,45	0,8	2006	2009	
2C	62,28	101,68	0,45	0,8	1910	1914	1930
			0,45	0,8	1930	1946	
3C	62,52	101,70	0,45	0,8	1873	1888	2430,5
			0,45	1,2	2962	2973	
4C	63,00	101,71	0,45	0,9	2090	2093	2135
			0,45	1,0	2162	2177	
5C	62,29	101,67	0,45	1,1	2574	2575	2297,5
			0,45	0,9	2015	2020	
6C	62,32	101,60	0,45	1,0	2186	2188	2072,5
			0,45	0,8	1934	1957	



Příloha 13 - Výsledky modulů tuhosti směsi s 50 % R-materiálu a graf porovnání všech směsí při teplotě 40 °C

40°	h [mm]	d [mm]	v	vertical force [kN]	stiffness measured [Mpa]	stiffness adjusted [Mpa]	∅ stiffness adjusted [Mpa]
1R	61,51	101,59	0,45	1,5	3352	3354	3318,5
			0,45	1,4	3285	3283	
2R	62,98	101,70	0,45	1,6	3532	3528	3524,5
			0,45	1,5	3522	3521	
3R	61,61	101,69	0,45	1,5	3364	3360	3257
			0,45	1,3	3155	3154	
4R	62,85	101,72	0,45	1,3	2910	2912	2822,5
			0,45	1,2	2729	2733	
5R	61,86	101,71	0,45	1,5	3349	3339	3227,5
			0,45	1,4	3120	3116	
6R	61,81	101,64	0,45	1,4	3339	3335	3378,5
			0,45	1,5	3427	3422	





Příloha 14 - Rozměry vzorků a výsledné síly zkoušky odolnosti vůči šíření trhlin

	ød	øh	øš
2S	101,26	51,33	48,37
2S'	101,58	50,91	50,12
3S	101,66	52,35	50,01
3S'	101,55	51,65	47,90
4S	101,55	50,73	48,65
4S'	101,46	51,20	49,55
5S	101,19	49,81	47,96
5S'	101,65	50,45	50,79
2C	101,62	50,53	50,90
2C'	101,55	50,20	48,62
3C	101,66	51,13	50,85
3C'	101,42	51,99	48,29
4C	101,63	50,49	50,88
4C'	101,04	51,09	48,02
5C	101,42	51,19	50,88
5C'	101,25	51,71	48,01
2R	101,55	52,09	48,24
2R'	101,53	51,41	50,72
3R	100,86	51,71	47,20
3R'	101,27	51,15	51,27
4R	101,46	51,33	51,31
4R'	101,11	51,42	47,74
5R	101,19	51,32	49,02
5R'	101,64	51,05	50,93

	VZOREK	SÍLA [kN]
PRO 0°C	3C	7534
	2C'	8371
	5C	7967
	4C'	9067
	2R	6671
	3R'	8047
	4R'	5571
	5R'	7247
	3S	6616
	2S	7561
PRO 25°C	5S	5815
	4S	8817
	2R'	6749
	3R	5318
	4R	6860
	5R	4120
	3S'	4704
	2S'	5904
	4S'	5741
	5S'	6326
2C	3568	
3C'	3108	
5C'	3430	
4C	3838	



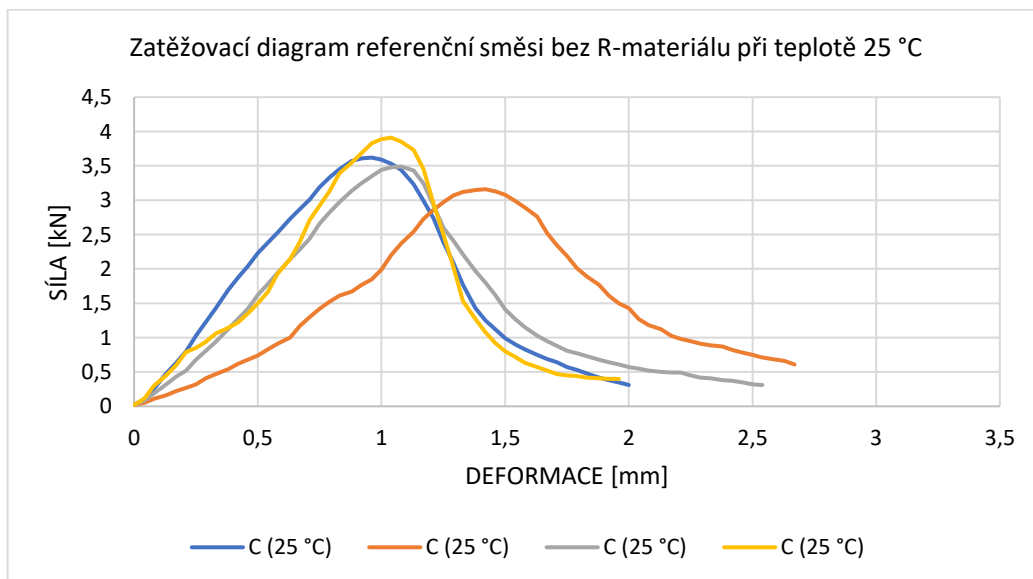
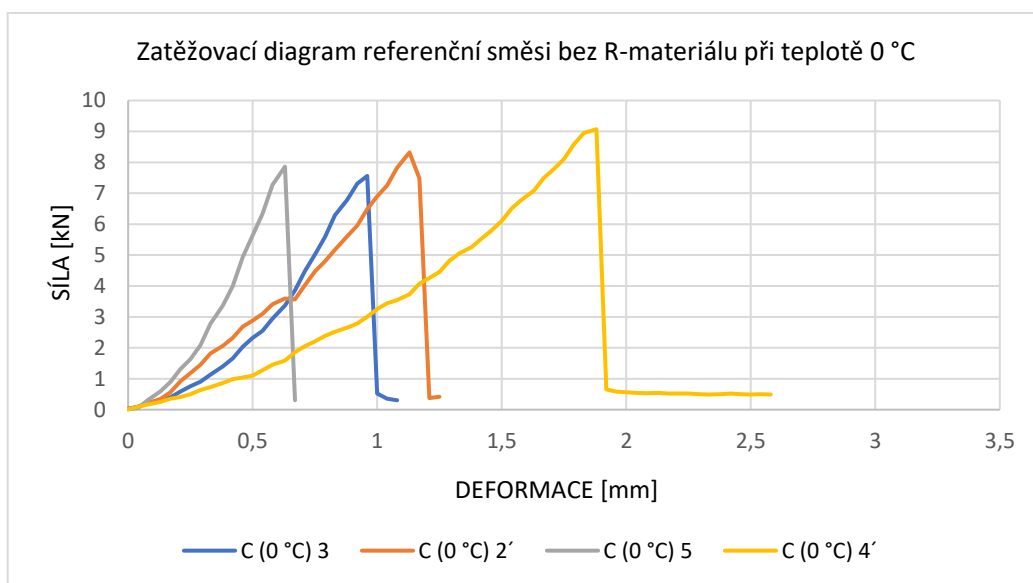
Příloha 15 - Výsledky zkoušky odolnosti vůči šíření trhlin

Těleso	Deformation	Force	Lomová houževnatost (EN 2019)		Celková lomová energie - G _f	
	(mm)	(kN)	(N/mm ^{3/2})		(J/m ²)	
C (0 °C) 3	0,78	7,53	39,2	44,1	1387	2081
C (0 °C) 2'	1,09	8,37	45,6			
C (0 °C) 5	0,47	7,97	41,5			
C (0 °C) 4'	1,68	9,07	50,2			
C (25 °C) 2	0,84	3,57	18,5	18,6	1715	1752
C (25 °C) 3'	1,31	3,11	17,1			
C (25 °C) 5'	0,94	3,43	19,0			
C (25 °C) 4	1,01	3,84	19,9			
R (0 °C) 2	0,87	6,67	36,6	36,7	970	949
R (0 °C) 3'	0,61	8,05	41,6			
R (0 °C) 4'	0,69	5,57	31,0			
R (0 °C) 5'	0,43	7,25	37,6			
R (25 °C) 2'	-	-	-	28,9	-	1336
R (25 °C) 3	-	-	-			
R (25 °C) 4	0,71	6,86	35,4			
R (25 °C) 5	0,89	4,12	22,3			
S (0 °C) 3	0,33	6,62	35,0	39,2	1056	1340
S (0 °C) 2	0,65	7,56	41,5			
S (0 °C) 5	0,47	5,82	32,2			
S (0 °C) 4	1,28	8,82	48,0			
S (25 °C) 3'	0,65	4,70	26,0	30,2	1257	1984
S (25 °C) 2'	1,10	5,90	31,2			
S (25 °C) 4'	0,90	5,74	30,7			
S (25 °C) 5'	0,95	6,33	32,9			



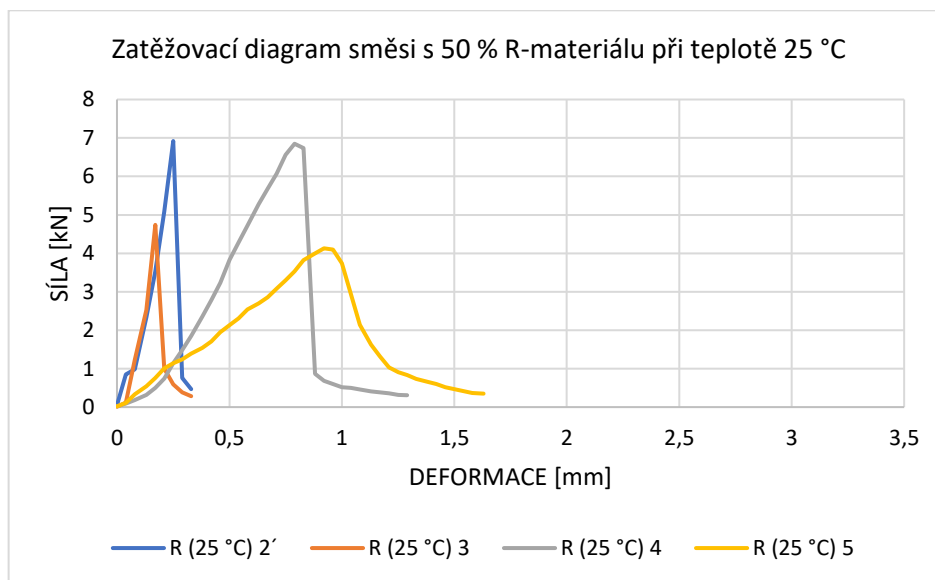
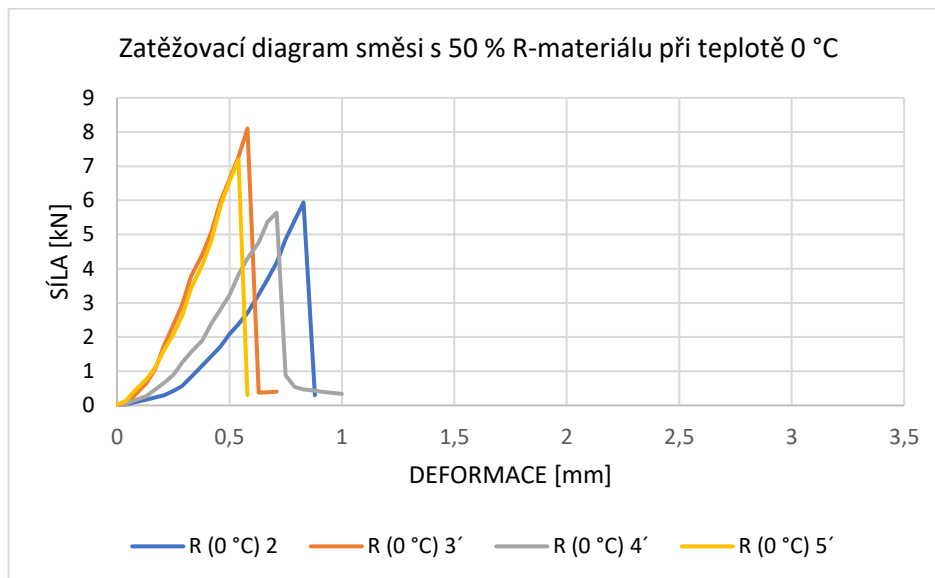
Příloha 16 - Shrnutí výsledků zkoušky odolnosti vůči šíření trhlin a grafy zatěžovacích diagramů čisté směsi

	Lomová houževnatost (EN 2019)		Celková práce zkoušky (W_{max})		Celková lomová energie – Gf	
	(N/mm ^{3/2})		(J)		(J/m ²)	
	0 °C	25 °C	0 °C	25 °C	0 °C	25 °C
C	44,1	18,6	4,2	3,6	2081	1752
R	36,7	28,9	1,9	2,8	949	1336
S	39,2	30,2	2,7	4,0	1340	1984



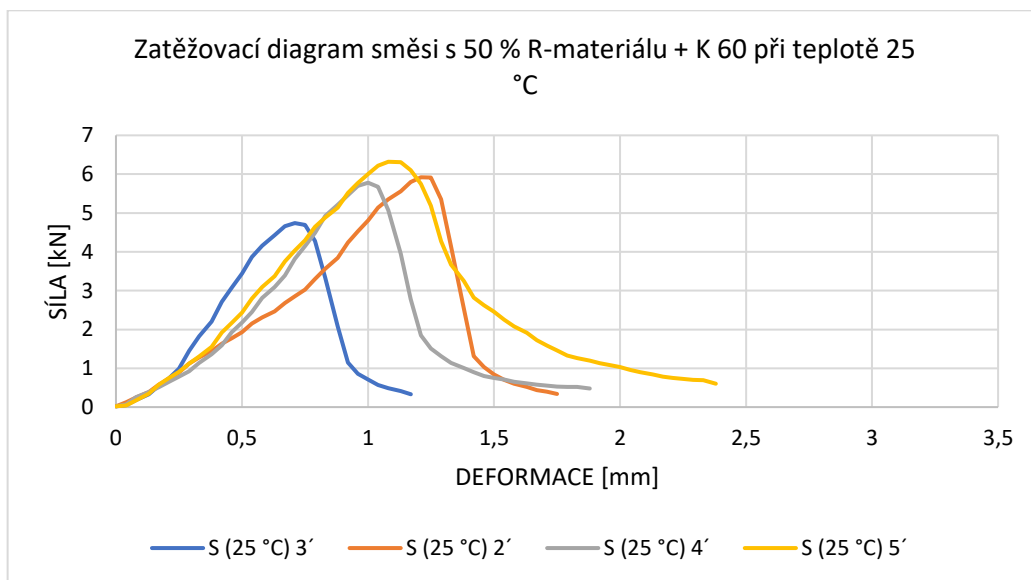
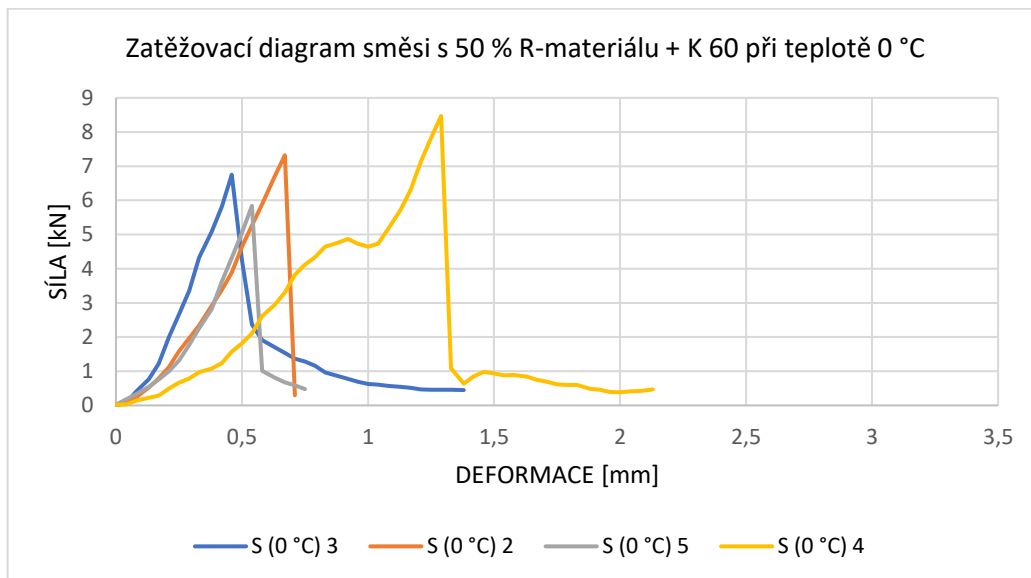


Příloha 17 - Grafy zatěžovacích diagramů směsi s 50 % R-materiálu



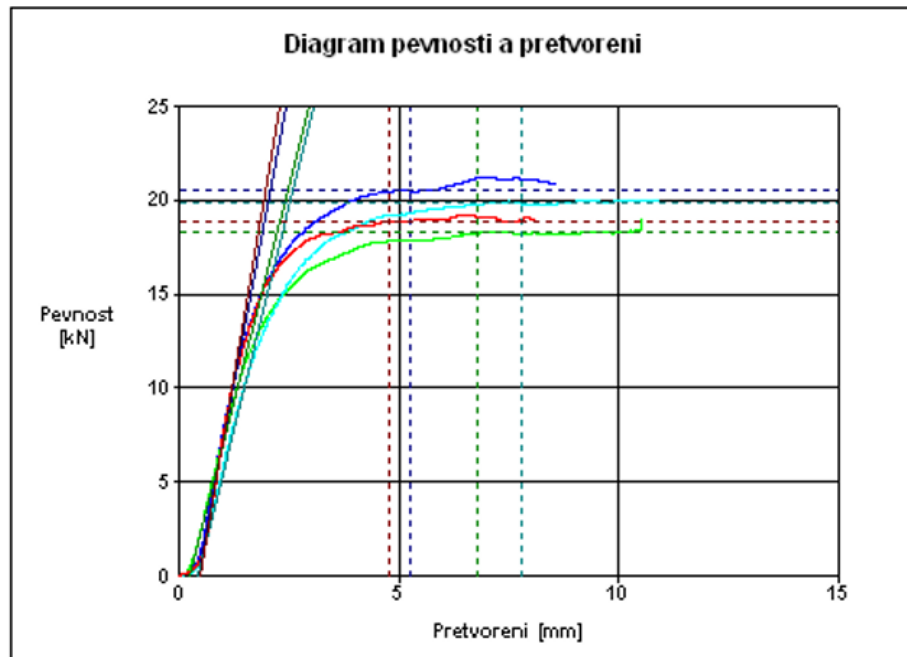


Příloha 18 - Grafy zatěžovacích diagramů směsi s 50 % R-materiálu a přísady K 60

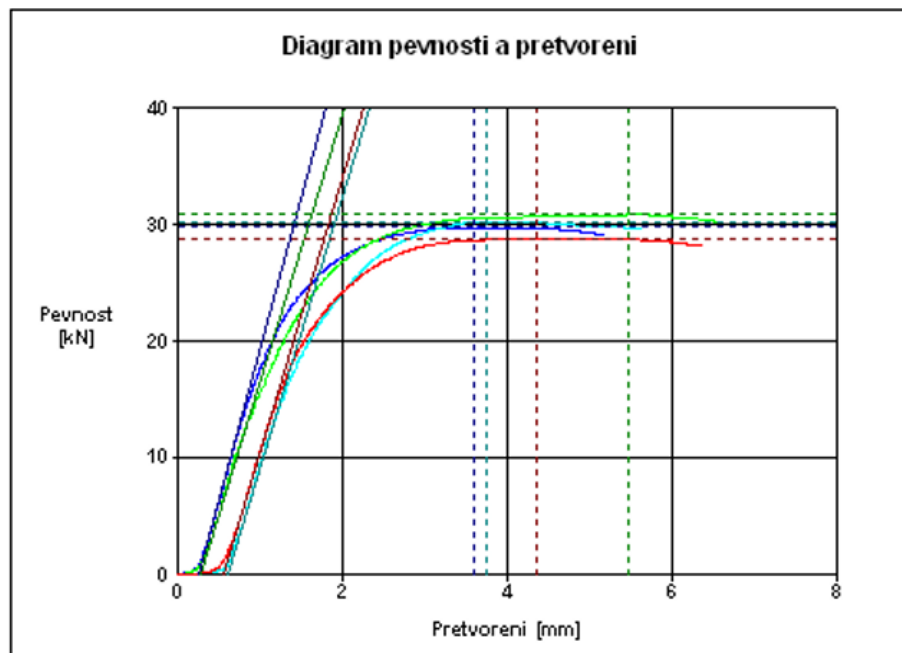




Příloha 19 - Zatěžovací diagram čisté směsi při Marshallově zkoušce



Příloha 20 - Zatěžovací diagram směsi s 50 % R-materiálu a přísady K 60 při Marshallově zkoušce





Příloha 21 - Zatěžovací diagram směsi s 50 % R-materiálu při Marshallově zkoušce

