



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

KATEDRA SILNIČNÍCH STAVEB

Asfaltové směsi s pojivý CRmB a vyšším podílem R-materiálu

Asphalt Mixes with Reclaimed Material and CRmB

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

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

Bc. Aneta Kovačová

Praha 2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Kovačová Jméno: Aneta Osobní číslo: 438081
 Zadávající katedra: Katedra silničních staveb
 Studijní program: Stavební inženýrství
 Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Asfaltové směsi s pojivý CRmB a vyšším podílem R-materiálu

Název diplomové práce anglicky: Asphalt Mixes with Reclaimed Material and CRmB

Pokyny pro vypracování:

Rešerše problematiky recyklace v silničním stavitelství s důrazem na problematiku recyklace za horka na obalovně. Problematika selektivního frézování. R materiál v modifikovaných směsích. Rešerše CRmB pojiv a CRmB modifikovaných směsí. Praktické ověření vlastností asfaltových směsí modifikovaných CRmB pojivý a vyšším obsahem R-materiálu. Provedení volumetrických, mechanicko-fyzikálních a funkčních zkoušek.

Seznam doporučené literatury:


Technické normy a předpisy TP a TKP, ČSN EN, ČSN. Zahraniční podklady např. <https://www.academia.edu/>

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Petr Mondšejn, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 25.9.2020

Termín odevzdání diplomové práce: 3.1.2021

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 diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové 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“.

5.10.2020

Datum převzetí zadání


Podpis studenta(ky)



Prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou prací na téma „Asfaltové směsi s pojivy CRmB a vyšším podílem R-materiálu“ vypracovala samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací vedoucího diplomové práce. Uvedla jsem veškerý seznam použité literatury a informačních zdrojů. Vše v souladu s metodickým pokynem č. 1/2009 O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací. Dále prohlašuji, že nemám žádné námítky pro užití této diplomové, či její části.

V Praze dne.....

Bc. Aneta Kovačová



Poděkování

Děkuji panu Ing. Petru Mondscheinovi, Ph.D., vedoucímu mé diplomové práce za rady, připomínky a pomoc při vypracování této práce. Děkuji i všem pracovníkům silniční laboratoře FSv ČVUT v Praze, zvláště panu Ing. Janu Valentinovi, Ph.D. a Ing. Pavle Vackové, Ph.D.. V neposlední řadě děkuji i mé rodině, která mi byla po celou dobu studia oporou.



Anotace

Tato diplomová práce se zabývá možností přidávání R-materiálu do asfaltových směsí s asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem (CRmB). Pro zhodnocení vlivu R-materiálu na mechanické vlastnosti těchto směsí byly vyrobeny čtyři varianty směsi (typu ACO 11 S). Vhodnost použití těchto směsí byla posouzena z funkčního i ekonomického hlediska.

Klíčová slova

pryžový granulát, CRmB, R-materiál, asfaltová směs, recyklace, multikriteriální hodnocení

Abstract

This diploma thesis deals with the possibility of adding reclaimed asphalt pavement to asphalt mixtures with crumb rubber modified bitumen (CRmB). To evaluate the influence of reclaimed asphalt pavement on the mechanical properties of these mixtures, four variants mixture were produced (type ACO 11 S). The suitability of these mixtures was evaluated after both, the functional as well as the economic point of view.

Key words

Crumb rubber, CRmB, reclaimed asphalt pavement (RAP), asphalt mixer, recycling, multi-criteria evaluation



Obsah

1	Úvod	8
2	Asfalty s pryžovým granulátem	9
2.1	Reakce pryže a asfaltu	9
2.2	Pryžový granulát.....	10
2.3	Asfalt modifikovaný pryžovým granulátem	11
2.4	CCRB	13
2.5	Vlastnosti.....	14
3	Asfaltové směsi modifikované pryžovým granulátem	15
3.1	Použití pryžového granulátu v asfaltových směsích.....	16
4	Recyklace vozovek a R-materiál.....	17
4.1	R-materiál.....	18
4.2	Recyklace asfaltových vrstev vozovek.....	20
4.3	Možnosti dávkování R-materiálu.....	28
5	Praktická část	31
5.1	Charakteristika použitých materiálů	31
5.2	Asfaltové směsi	34
5.3	Zkušební tělesa	36
5.4	Volumetrické vlastnosti	38
5.5	Zpětný rozbor	41
5.6	Tuhost	43
5.7	Odolnost vůči šíření trhliny.....	46
5.8	Pevnost v tahu za ohybu	51
5.9	Zkouška pojíždění kolem	54
5.10	Marshallova zkouška	57
5.11	Odolnost vůči vodě a mrazu	58
6	Zhodnocení jednotlivých variant směsí	62
6.1	Hodnocení dle pořadí	62
6.2	Hodnocení směsí pomocí funkce užítku.....	63
6.3	Ekonomické hledisko	72
7	Závěr	75
8	Bibliografie.....	77



9	Seznam obrázků.....	82
10	Seznam tabulek.....	83
11	Seznam grafů	85
12	Přílohová část.....	87



1 Úvod

Jedním z hlavních témat dnešního světa je trvale udržitelný rozvoj a tzv. oběhové hospodářství. Zároveň ale, s rostoucí populací a komfortním způsobem života, se stále zvyšuje stupeň automobilizace, staví se silnice a dálnice, modernizují staré silniční sítě a vzniká tak nepřehledné množství odpadu, které musí být skládkováno. Navíc se kladou čím dál vyšší nároky i na kvalitu, trvanlivost a funkční vlastnosti materiálů všeho druhu. Tyto trendy se dotýkají i silničního stavitelství.

Právě proto je recyklace stavebních a odpadních materiálů důležitým krokem k udržení trvalého rozvoje a ekonomického růstu bez dopadu na životní prostředí. Snaha zlepšit vlastnosti konkrétně asfaltových směsí je dlouho řešeným problémem. Z toho důvodu se využívají různé modifikační přísady, přičemž jednou z nich je pryžový granulát.

Tato práce se zabývá zpracováním dvou odpadních materiálů (znovuzískané asfaltové směsi a pryžového granulátu) do nové směsi, při snaze zachování kvalitativních vlastností odpovídajících modifikovaným asfaltovým směsím pryžovým granulátem.

Cílem teoretické části této práce bylo seznámení se s problematikou zpracování pryžového granulátu do asfaltových směsí, technologiemi recyklace a možnostmi zpracování R-materiálu.

V praktické části, bylo jedním z cílů zhodnocení vlivu dávkování vyššího množství R-materiálu do směsí modifikovaných pryžovým granulátem, a to na základě návrhu variant směsí s a bez R-materiálu, se stejnou čarou zrnitosti a následném provedení vybraných zkoušek pro vyhodnocení funkčních vlastností. Dalším cílem bylo porovnání vlastností směsí při použití pojiva CRmB V a při použití koncentráту asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem (CCRB).

Tato práce byla zpracována v období nouzového stavu zapříčiněného COVID-19. Z důvodu zavedených opatření proti šíření tohoto typu koronaviru byla omezená možnost docházet do školní silniční laboratoře, a proto z časových důvodů nebylo možné provést optimalizace zkoušených asfaltových směsí.



2 Asfalty s pryžovým granulátem

Asfaltové směsi obsahující pryžový granulát nejsou již žádnou novinkou. Přidávání pryže do asfaltu a asfaltových směsí má prvopočátek již v třetím desetiletí 20. století, kdy tzv. gumoasfalt (Asphalt Rubber), vznikl v USA. V České republice byly směsi s pryžovým granulátem, vyrobené suchým procesem (viz kap.3), poprvé použity ke konci 90. let 20. století. Tyto směsi nespĺňovaly kvalitativní požadavky z hlediska trvanlivosti, jelikož výrobní proces nebylo možné kontrolovat a směsi tak byly často nezhomogenizovány, a proto další vývoj a uplatnění těchto směsí u nás začal znovu až od roku 2006. [1] [2]

Vzhledem k současným trendům zlepšování vlastností a kvality materiálů a využívání druhotných materiálů se zpracovávání a zabudování pryže do asfaltových směsí více než nabízí. Pryžový granulát se v souvislosti s asfaltovými směsmi využívá k modifikaci, tedy ke zlepšení reologických vlastností asfaltového pojiva ve směsích. A to tak, že se při výrobě asfaltové směsi využije přímo asfalt modifikovaný pryžovým granulátem CRmB anebo koncentrát asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem CCRB. V takovém případě se jedná o modifikaci asfaltové směsi.

2.1 Reakce pryže a asfaltu

Reakce mezi pryží a asfaltem není chemická, pryžový granulát sice zvyšuje dynamickou viskozitu pojiva ale pouze tím, že ho fyzikálně „zahustí“ (obdobně jako filer).

Pryžové částice začnou, ihned po kontaktu s horkým asfaltem absorbovat jeho lehké aromatické olejovité složky (malteny), tím nabobtnávají, měknou a začne se kolem nich tvořit gelovitá vrstva (dochází k částečné digesci pryže). K absorpci maltenů do polymerních řetězců pryže dochází při vysokých teplotách 160 – 220 °C, díky tomuto procesu je v koloidním systému snížený objem olejové frakce a zvětšené částice pryže jsou blíže u sebe. Takto vzniklá gelovitá struktura zvyšuje viskozitu pojiva. [2]

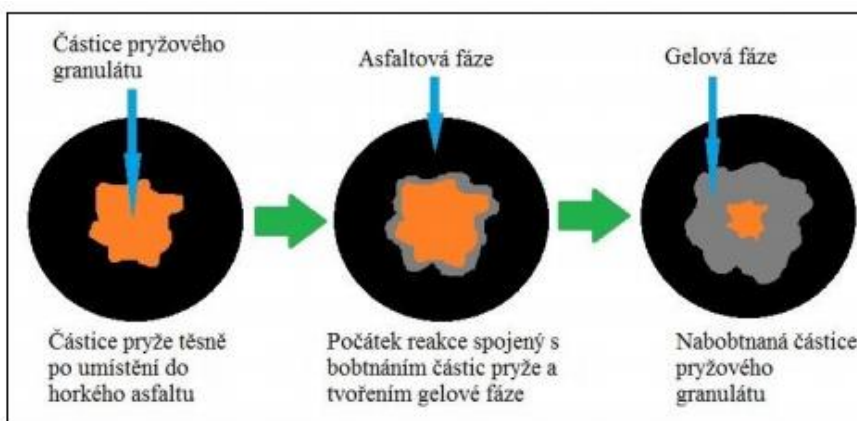
Pokud bude interakce pryže a pojiva delší a bude probíhat za vyšších teplot (220 – 260 °C), pryž přestane bobtnat a začne proces degradace – depolymerizace a devulkanizace. Dynamická viskozita se sníží a ustálí. [3]

Devulkanizace je proces, při kterém získá recyklovaná pryž zpět své původní vlastnosti (viskozitu, elasticitu...). Proces devulkanizace pryže je pro CRmB výhodný a měl by být žádaný, jelikož pryž potom v pojivu působí především jako pružná výplň. Vytvoří se tak více hladká, homogenní směs, která může být skladována, při vyšších teplotách, delší dobu. Devulkanizace pryže může být provedena průmyslově, ještě před mísením s pojivem, nebo až při výrobě samotného CRmB. [3]

Použitím devulkanizovaného kaučuku můžeme dosáhnout nižší potřeby pojiva i nižších výrobních teplot, což sníží ekonomické náklady. [3]

Reakce pryže a asfaltu je ovlivňována mnoha faktory. Hlavní vliv mají podmínky samotného zpracování - reakční teplota, doba a intenzita míchání, ale také chemické složení asfaltu i granulátu (vulkanizovaný vs. devulkanizovaný granulát) a způsob výroby pryžového granulátu (velikost a tvar zrn). Jemnozrnný granulát, zrna s hrubou

strukturou povrchu (viz obr. 3 (vlevo)) bude s pojivem reagovat nejrychleji. Jemnější granulát navíc přispívá k vyšší stabilitě výsledného pojiva. Na vlastnosti granulátu má vliv i jeho původ, zda je z pneumatik nákladních či osobních automobilů, protože jejich složení je značně odlišné. Pneumatiky nákladních automobilů jsou vyráběny převážně z přírodního kaučuku, kdežto ty pro osobní automobily jsou z kaučuku syntetického. [3] [4]



Obr. 1 – Chování pryže [2]

Reakční doba, doba zrání, v nádrži při výrobě CRmB je cca 2 h, aby se docílilo správných a konstantních vlastností.

2.2 Pryžový granulát

Pryžový granulát zpracováváný v asfaltových směsích se vyrábí z ojetých pneumatik osobních a nákladních automobilů. Staré pneumatiky, kterých jsou plné skládky, se téměř celé zpracují na druhotnou surovinu – pryžový granulát a to způsobem, který nijak nezatěžuje životní prostředí. Tyto pneumatiky jsou vyrobeny ze směsi vulkanizovaných přírodních a syntetických kaučuků, sazí a malého množství dalších přísad. [2]

Nejčastěji se vyrábí několikanásobným mechanickým mletím za normální teploty. Použité pneumatiky prochází recyklační linkou viz obr. 2, kde jsou postupně drceny a zbavovány ocelových a textilních částic. Na začátku této linky pneumatiky projdou sekacím strojem s pomalým chodem, který pneumatiky předběžně rozseká na kusy o velikosti 50 - 300 mm. Ty poté putují do drtiče se středně rychlým chodem (strouhač), ve kterém jsou opět zmenšeny až na 12 mm a dojde v něm k oddělení většiny oceli z kordů pneumatik. Na tento drtič navazuje pásový dopravník, nad kterým je umístěn magnet. Tím se z pryžové drtě odstraní nežádaná ocel. Na dopravníkový pás postupně navazují recyklační drtiče s rychlým chodem (granulátory), třídící a odsávací zařízení. Nejčastěji se za sebe umísťují dva granulátory, přičemž při průchodu již tím prvním dojde k uvolnění a odstranění až 50 % textilních vláken obsažených v pryži. Odsávací a třídící zařízení poté odstraní poslední zbytky oceli a textilních vláken z jemného pryžového granulátu a rozdělí jej na jednotlivé frakce. Na

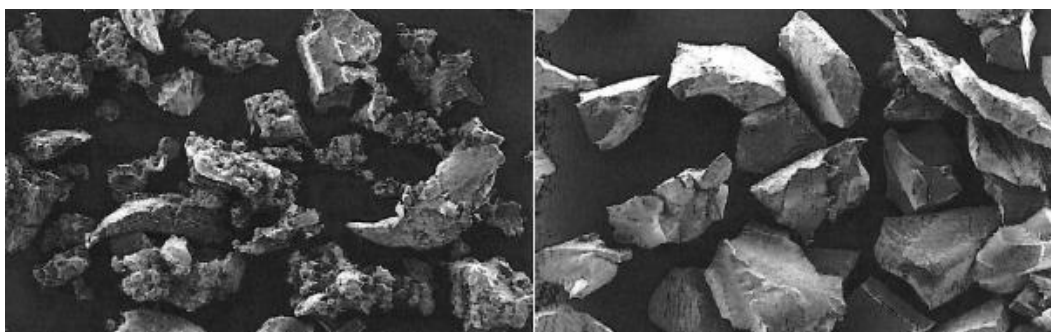


konec této linky je možné umístit ještě kalandr, který granulát povrchově upraví. [5]



Obr. 2 – Schéma recyklační linky [6]

Další metodou zpracování ojetých pneumatik je tzv. kryogenní drcení. Tento způsob spočívá ve využití tekutého dusíku, kterým je pneumatika ochlazena na teplotu -87 až -198 °C. Pneumatika tak zkrhne a poté je rozmělněna mlecím strojem. Takto vyrobené pryžové částice mají hladší povrch a tím i menší povrchovou plochu. [4]



Obr. 3 – Pryžový granulát vyrobený vícenásobným mletím (vlevo) a kryogenním drcením (vpravo) [4]

Pro modifikaci asfaltů je možné podle normy ČSN 65 7222-2 použít i EPDM granulát (Ethylene Propylene Diene Monomer). Tento granulát se vyrábí jako nový výrobek z pryžových plátů, jeho výrobní cena je vyšší než u SBR granulátů, a proto se pro modifikaci asfaltů nepoužívá. [7] [2]

Pryžový granulát využívaný pro modifikaci pojiv by měl mít maximální velikost zrna 2 mm, stálou objemovou hmotnost ($\pm 60 \text{ kg/m}^3$), nízkou vlhkost (max. 0,75 %) a vysokou čistotu. Všechny tyto vlastnosti (zrnitost, objemovou hmotnost, čistotu a složení např.: druh použitých pneumatik, deklaruje výrobce granulátu. [8]

Požadavky na vlastnosti a kontrolní zkoušky pryžového granulátu používaného pro modifikaci silničních asfaltů a asfaltových směsí jsou uvedeny v TP 148.

2.3 Asfalt modifikovaný pryžovým granulátem

Asfalt modifikovaný pryžovým granulátem CRmB (Crumb Rubber modified Bitumen) je pojivo složené ze silničního asfaltu, pryžového granulátu a případně dalších přísad. Tato heterogenní směs funguje jako fázový systém, kde na sebe vzájemně působí nabobtnalý pryžový granulát a asfaltová matrice. Rozlišují se dva základní typy pojiva CRmB:



- CRmB N – terminálový typ – obsah pryže 5-15% hmotnosti pojiva
- CRmB V – kontinuální typ – se zvýšenou viskozitou – obsah pryže 15-25 % hmotnosti pojiva

Vlastnosti obou typů pojiva CRmB jsou specifikovány v TP 148 – Hutněné asfaltové vrstvy s asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem viz tab.1.

Pojivo	CRmB	
	A – nízkoviskózní ³⁾	B – vysokoviskózní ⁴⁾
Obvyklé dávkování pryžového granulátu, % z hmotnosti pojiva	5 – 15	15 – 25
Dynamická viskozita, ČSN EN 13302, Pa·s	0,5 až 2,0 ¹⁾ při 160 °C	1,5 až 4,0 při 175 °C
Penetrace 25 °C, ČSN EN 1426, p.j. ²⁾	25 až 75	25 až 75
Bod měknutí, ČSN EN 1427, °C ²⁾	min. 55	min. 60
Resilience při 25 °C, ČSN EN 13880-3, %	min. 15	min. 20
Hustota pojiva, ČSN EN 15326, Mg·m ⁻³	Deklaruje se	

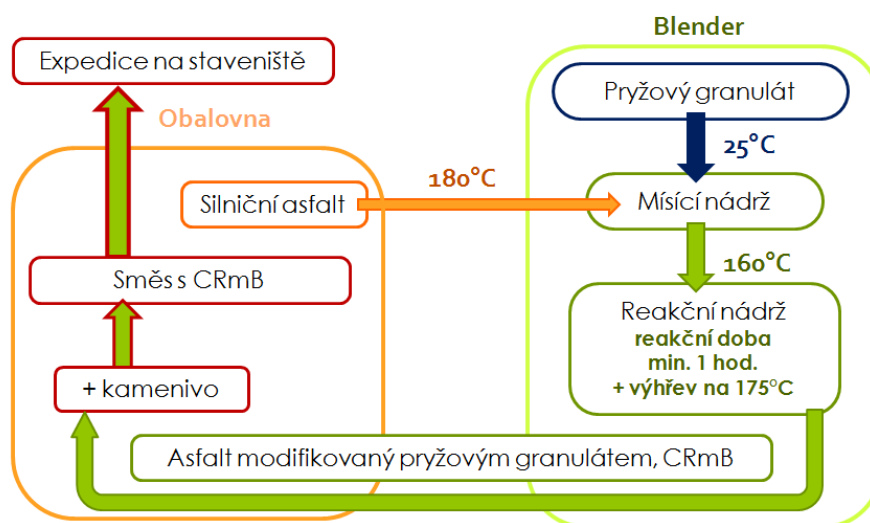
Tab. 1 – Požadované vlastnosti CRmB dle TP 148 [8]

Výrobce CRmB musí kromě vlastností uvedených v tab. 1 uvést také skladovací teploty, celkovou maximální přípustnou dobu, po kterou je možné vystavení CRmB teplotě vyšší 160 °C (od jeho výroby až po zabudování hotové směsi do vozovky), skladovací stabilitu (míru sedimentace pryžových částic), minimální a maximální teploty pro obalování kameniva. [8]

Pro jeho výrobu se používá klasický silniční asfalt 50/70 nebo 70/100 a pryžový granulát drcený, mletý či mechanicky aktivovaná pryž, případně EPDM kaučuku. Mohou se přidávat zlepšující přísady pro zlepšení kompatibility se silničním asfaltem, snížení viskozity a tím i teploty zpracování a pokládky apod. [7]

Pryžový granulát se do silničního asfaltu vmíchává a je možné rozlišit buď kontinuální výrobou CRmB přímo na obalovně (continuous blend) anebo terminálovou výrobou CRmB v rafinerii (terminal blend), při které je zapotřebí přidávat přísady omezující usazování pryžového granulátu. [2]

Kontinuální výroba probíhá ve speciální míchacím zařízení tzv. blendru přímo na obalovně. Do asfaltu je při teplotě 170 – 185 °C vmícháván pryžový granulát v objemu 15 – 25 %, poté se pojivo přivádí do reakční nádrže, kde za stálého promíchávání a dohřívání reaguje s pryží a dochází tak k jeho modifikaci. [2]



Obr. 4 – Schéma výroby CRmB v blendru [9]

V rafinerii, je dávkováno menší množství jemného pryžového granulátu 5 – 15 % hmotnosti pojiva a vyrábí se tak terminálový, nízkoviskózní CRmB (CRmB N). Vzhledem k delšímu skladování a převozu na obalovny, je nutné přidávat přísady pro zamezení usazování. Takto vyráběné CRmB je nutné dodávat s informací o skladovací stabilitě, teplotě a přípustné době od výroby po zabudování do asfaltové směsi. [8]

V rafinerii je ještě možné vyrábět CRmB dlouhým zahříváním při teplotách nad 220 °C, při tomto procesu dojde k devulkanizaci a depolymerizaci pryže, ta se v pojivu téměř „rozpustí“ (Wet-Process-High-Viscosity, americký přístup). [3]

2.4 CCRB

Koncentrát asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem CCRB (Concentrate of Crumb Rubber Modified Bitumen) je sypká směs, ve formě granulí či prášku (pro výrobu směsi v laboratoři), asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem. [10]



Obr. 5 – Granule CCRB (vlevo) [11] prášek CCRB (vpravo) [12]



Vyrábí se ve specializovaných výrobnách, složitým a kontrolovaným procesem, při kterém dojde k devulkanizaci pryže a k reakci pryže a granulátu (viz kap. 2.1). Princip je obdobný jako při kontinuální výrobě, jen za využití vyšších teplot a tlaků, přičemž je výroba vybavena dalšími speciálními zařízeními pro odvádění vzniklých zplodin. Po reakci je finální směsice vysušena a formována do granulí, které se nakonec skládají z asfaltového pojiva, pryže (část rozpuštěna v pojivu) a dalších přísad (např.: celulózová vlákna). CCRB je tedy stabilní přísada pro modifikaci asfaltové směsi a nevyžaduje delší proces míchání směsi. [11] [13]

Tato „zlepšující přísada“ může obsahovat až 50 % pryžového granulátu a umožňuje výrobu směsi s asfaltem o různých viskozitách, o různém stupni modifikace. Výrobce tedy musí specifikovat procentní obsah pryže a doporučené dávkování pro různé druhy asfaltových směsí. [8]

Koncentrát CRmB se před výrobou směsi nijak nesmíchává s asfaltovým pojivem, dává se suchou cestou z pytlů „Big Bag“ do násypky a poté, společně s kamenivem, přímo do míchacího centra obalovny. Ta proto nemusí být vybavena žádným přídatným zařízením a CCRB je tedy použitelný na všech stávajících obalovnách. Zároveň je dobře skladovatelný, protože nehrozí segregace pryže jako u CRmB, a tak může být na obalovně nepřetržitě k dispozici a použit pro výrobu i malého množství směsi. [11]

2.5 Vlastnosti

Jednou z hlavních charakteristik těchto pojiv s pryžovým granulátem je jejich vyšší dynamická viskozita, díky tomu je možné do směsi dávkovat vyšší množství pojiva bez problému stékavosti a směsi tak jsou odolnější vůči reflexním trhlinám a stárnutí. Pojiva s pryžovým granulátem vykazují vyšší bod měknutí, nižší hodnotu penetrace a vyšší pružnost, mají tedy větší obor plasticity a lépe tak odolávají účinkům vysokých i nízkých teplot. Dále vykazují vyšší odolnosti proti vytvrzení (stárnutí). [13] [14]

Jednou z nevýhod využívání pojiv s pryžovým granulátem je pracnost a organizační náročnost. Kvůli vyšší viskozitě i obtížnější zpracovatelnost a nutnost čištění a údržby čerpadel a dopravního systému obalovny. Tyto problémy by však mohlo vyřešit používání CCRB, který je dávkován přímo do míchačky obalovny. [15]

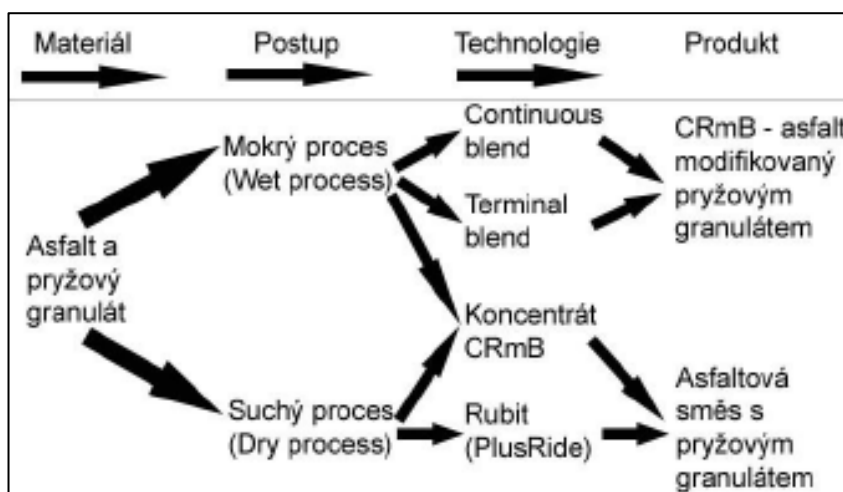
Při navrhování směsí s těmito pojivy je nutno uvažovat čáru zrnitosti „níže“, aby bylo v kostře směsi méně drobného kameniva a vznikl tak prostor pro větší množství pojiva. [16]



3 Asfaltové směsi modifikované pryžovým granulátem

Podle způsobu zabudování pryžového granulátu do směsi, můžeme výrobu modifikovaných asfaltových směsí pryžovým granulátem rozlišit na dva základní způsoby švédský (suchý proces) a americký (mokrá proces):

1. Suchý proces – Tento postup je označován jako PlusRide, v ČR jako RUBIT. Princip zabudování pryžového granulátu do asfaltové směsi technologií RUBIT spočívá v dávkování pryžového granulátu frakce 0/1 a 1/4 spolu s kamenivem přímo do míchačky na obalovně, poté se dávkuje klasický silniční asfalt a nakonec filer. Aby se směs dostatečně promíchala a silniční asfalt zmodifikoval je nutné prodloužit dobu míchání směsi a po výrobě musí horká asfaltová směs zůstat 1 h v zásobníku. Tato technologie se již v ČR nepoužívá. [2]
2. Mokrý proces – Pryžový granulát je vmíchán přímo do silničního asfaltového pojiva, které je tímto modifikováno a vzniká tzv. „gumoasfalt“, tedy asfalt modifikovaný pryžovým granulátem (Crumb Rubber modified Bitumen) viz kap. 2.3. Samotná výroba směsi je potom totožná jako výroba kterékoli jiné směsi. [2]
3. Technologie koncentráту asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem (CCRB) – Tato metoda je jakousi kombinací suchého a mokrého procesu. CCRB se dávkuje suchou cestou spolu s kamenivem ve formě granulí. Poté se klasicky přidává asfaltové pojivo 50/70 nebo 70/100. Tato metoda má největší výhodu právě v jednoduchém dávkování. Na obalovně je tak možné vyrobit určité množství směsi modifikované pryžovým granulátem a hned po té směs s klasickým pojivem, bez nutnosti pročišťování čerpadel a dopravních cest pojiva na obalovně. [2]



Obr. 6 – Schéma zpracování pryžového granulátu do asfaltu a asfaltových směsí [2]



3.1 Použití pryžového granulátu v asfaltových směsích

Asfaltové směsi s pryžovým granulátem je možné použít na všech typech pozemních komunikací obdobně jako směsi s polymerem modifikovanými asfalty. [8]

Obecné specifikace pro navrhování, použití, pokládku a kontrolu asfaltových směsí s CRmB jsou uvedeny v TP 148.

Nově by mělo platit, že směsi s nízkoviskózním CRmB (CRmB N) se budou navrhovat, provádět a kontrolovat v souladu s ČSN 73 6121 kde je CRmB N uvažováno za speciální modifikované pojivo a příslušných technických podmínek. Specifikace pro použití směsí s vysokoviskózním CRmB (CRmB V) a s koncentrátem CRmB (CCRB) budou součástí nové národní normy ČSN 73 6120 Stavba vozovek – Ostatní asfaltové vrstvy – Provádění a kontrola shody, konkrétně příloh HA a HB. [10]

Asfaltové směsi modifikované pryžovým granulátem obecně disponují vyšší trvanlivostí, odolností vůči trvalým deformacím, odolností vůči vzniku únavových, mrazových i reflexních trhlin. V obrusných vrstvách vykazují lepší protismykové vlastnosti (pryž zvyšuje hysterezní tření mezi pneumatikou a vozovkou) i protihlukové vlastnosti (otevřené směsi). Tyto směsi umožňují pokládat menší tloušťky vrstev při zachování trvanlivosti v porovnání s vrstvami ze směsí s běžným silničním asfaltem.

[14]

Modifikace pryžovým granulátem je často využívána u směsí s otevřenou makrotexturou (PA) pro snížení valivého hluku, s přerušenou zrnitostí (SMA), ale i pro směsi s klasickou, nepřerušovanou, čárou zrnitostí, které díky vyššímu obsahu pojiva lépe odolávají vzniku trhlin a trvalých deformací. Velmi vhodné je využití CRmB pojiva ve vrstvách typu SAL (Stress Absorbing Layer), tedy na vrstvách pohlcujících tahová napětí, které se využívají například při opravách CB krytů, přičemž se využije jeho zbytkové únosnosti a zpomalení šíření a eliminaci vzniku reflexních trhlin se zabrání právě vrstvou SAL. [17]



4 Recyklace vozovek a R-materiál

Asfaltové vozovky jsou 100% recyklovatelné stavební konstrukce, materiály všech vozovkových vrstev lze vytěžit, zpracovat a znovu použít. Vzhledem k tomu, že dostupnost stavebních materiálů není neomezená a jejich cena roste, nahrazení alespoň části z nich „odpadem“ se tedy samo nabízí.

Využívání znovuzískané asfaltové směsi (ZAS) má pro naši společnost mnoho výhod – ekonomický i ekologický přínos, a pozitivní vliv pro obyvatelstvo jako takové. Využívání ZAS je ekonomicky přínosné vzhledem k ceně nových materiálů, především asfaltu. Díky spotřebě menšího množství nového materiálu (kameniva), dochází k úspoře neobnovitelných zdrojů a potřeby nových kamenolomů, což bude mít pozitivní vliv i na krajinný ráz. Ruku v ruce s tím jde i snížení stavebního odpadu a nutnost jeho skládkování. Potřeba menšího množství nových materiálů by měla vést i ke snížení dopravy, a tedy k redukci skleníkových plynů, snížení znečištění ovzduší – prach, hluk a menšímu zatížení přilehlé silniční sítě. [18]

Recyklace asfaltových vozovek je bezpochyby výhodná, ale není využívaná v takovém rozsahu, v jakém by mohla. V rozmachu využívání směsí obsahující R-materiál brání neinformovanost a nedostatečné vzdělávání a s tím spojené obavy, aby byla kvalita směsi dostatečná, ale také i technologická nevybavenost obaloven.

V poslední době bylo vydáno několik dokumentů, které definují demoliční a stavební odpad, upravují možnosti jeho využití nebo definují jeho vlastnosti. Jedním z těchto významných dokumentů, přinášejících změnu k lepšímu hospodaření s odpady byla vyhláška č. 130/2019 Sb., o kritériích, při jejichž splnění je asfaltová směs vedlejším produktem nebo přestává být odpadem, upravující zákon o odpadech č. 185/2001 Sb. Také došlo k revizi ČSN 73 6121, která nyní umožňuje vyšší dávkování R-materiálu do vyráběných směsí. A nově byla v prosinci 2020 schválena norma ČSN 73 6141, která specifikuje požadavky a postupy pro získávání, úpravu, homogenizaci, skladování, zkoušení a kontrolu R-materiálu. Tato norma vyšla v reakci právě na novou vyhlášku č. 130/2019, kterou doplňuje a upřesňuje. Všechny tyto dokumenty mají za cíl zlepšit a zjednodušit využívání znovuzískané asfaltové směsi. [19] [20] [21]

Vyhláška č.130/2019 Sb.

Touto vyhláškou jsou definována kritéria, při jejichž splnění přestává být znovuzískaná asfaltová směs (ZAS) z vozovkové konstrukce odpadem. ZAS, která splní kritéria vyhlášky, není vůbec považována za odpad a nedostane se tak do odpadového režimu, tím se ekonomicky i administrativně zjednodušuje její opětovné využívání. [22]

Vybourané či vyfrézované směsi mohou mít různé kvality a různý obsah škodlivých látek. Tato vyhláška definuje 4 kvalitativní třídy podle obsahu celkového množství polyaromatických uhlovodíků (PAU) viz tab. 2. Dle těchto tříd jsou pak uvedeny možnosti opětovného využití, při kterých se ZAS nestává odpadem. Vyzískaný materiál musí být klasifikován před zahájením stavby, v rámci diagnostiky pozemní komunikace. [22]



Celkové obsahy parametru	Jednotka	Kvalitativní třída			
		ZAS-T1	ZAS-T2	ZAS-T3	ZAS-T4
Celkové množství polyaromatických uhlovodíků (PAU)	mg/kg suš.	≤12	12<x≤25	25<x≤300	>300

Tab. 2 – Kvalitativní třídy ZAS dle obsahu PAU [22]

Norma ČSN 73 6141

Nová norma, ČSN 73 6141 Požadavky na použití R-materiálu do asfaltových směsí, specifikuje požadavky (enviromentální, na cizorodé látky, na deklaraci pojiva) a postupy pro jeho získávání, úpravu, homogenizaci, skladování, zkoušení a kontrolu R-materiálu. V normě je například uvedena tabulka použití R-materiálu do nově vyráběných směsí na dle toho z jaké vozovkové vrstvy byl vyzískaný nebo nomogramy pro určení maximálně možného přidávaného množství R-materiálu v asfaltové směsi. [23]

Na úvod bych ještě upřesnila dva základní v praxi používané pojmy – R-materiál a asfaltový recyklát. Jsou to pojmy definující materiál znovuzískaný z vozovkových vrstev, který se od sebe navzájem liší obsahem asfaltových materiálů. R-materiál je znovuzískaná asfaltová směs, která obsahuje minimálně 95 % asfaltových materiálů, kdežto asfaltový recyklát může mít podíl asfaltových materiálů menší, a to v rozmezí 30–95 % (zbytek tvoří ostatní recyklované materiály). [24]

R-materiál je možné použít jako náhradu části kameniva a pojiva při výrobě nové asfaltové směsi na obalovně nebo ho použít do podkladních nestmelených vrstev, kde nahradí šterkodř či mechanicky zpevněné kamenivo. Při použití do nestmelených vrstev je velmi důležité jeho dostatečné zhutnění, proto by měl být vlhký. Dnes se ale jeho použití do těchto konstrukčních vrstev omezuje. Jednak proto, že je problematické ho zhutnit tak, aby nedocházelo k postupnému dohutnění od zatížení pomalou jízdou těžkých nákladních vozidel a tím ke vzniku deformací celého vozovkového souvrství, a jednak proto, že je to velmi kvalitní a cenný materiál, jehož vlastnosti se nejlépe zužitkují právě v nové asfaltové směsi. [25]

Asfaltový recyklát je materiál vhodný např.: do nestmelených podkladních vrstev, jako kryt polních či lesních cest nebo do nezpevněné krajnice. [24]

4.1 R-materiál

R-materiál (Reclaimed Asphalt – RA) je upravený znovuzískaný materiál z asfaltové směsi nebo materiál z neshodné či nadbytečné výroby. Materiál se z vozovkových vrstev získává vybouráním či vyfrézováním, následně se předrtí, roztřídí a provedou se na něm zkoušky pro posouzení o jeho vhodnosti do asfaltové směsi a klasifikování. Na obalovnách se potom R-materiál vhodný pro výrobu asfaltových směsí skladuje v haldách, které mají deklarované vlastnosti podle normy ČSN EN 13108-8. Trendem je zastřešování skladovacích prostor pro snížení jeho vlhkosti. Mezi zkoumané vlastnosti R-materiálu patří obsah a druh cizorodých látek, druh, vlastnosti a obsah asfaltového pojiva a zrnitost kameniva i samotného RA. [26]



Značení R-materiálu

Podle ČSN 13108-8 ed. 2 Asfaltové směsi – Specifikace pro materiály – Část 8: R-materiál se označuje U RA d/D, kde U je maximální zrnitost R-materiálu (velikost nejmenšího síta v mm, kterým propadne 100 % zrn navážky) a d/D je označení zrnitosti „čistého“ kameniva v R-materiálu (d je velikost spodního síta a vždy je rovno 0 mm, D velikost horního síta v mm). [26]

4.1.1 Získávání R-materiálu

Materiál je z vozovkové konstrukce, která již není provozuschopná, možné získávat dvěma způsoby, a to buď vybouráváním nebo frézováním. Pro co nejefektivnější a nejehospodárnější využití R-materiálu je klíčový právě způsob jeho vyzískávání. Pokud jsou všechny vrstvy vozovkového souvrství vybourané najednou, je kvalita výsledného R-materiálu určena složkou nejnižší kvality. Proto především obrusné vrstvy obsahující modifikovaná pojiva by měly být vždy frézovány, odváženy a skladovány samostatně. [19] [27]

Vybourávání

Vybouráváním, pomocí mechanizovaných strojů, získáme velké kry složené z různých vozovkových vrstev. Tímto způsobem se získá materiál smíšených vlastností, což je nevýhodné, jelikož kvalitní směs z obrusné vrstvy tak skončí v některé z podkladních vrstev. Je důležité, aby se zajistilo alespoň oddělené vybourávání asfaltem stmelovaných vrstev a vrstev nestmelovaných.

Frézování

Frézování asfaltobetonových vozovek je citlivější metoda než vybourávání. přičemž se buď frézují stmelené vrstvy hromadně nebo je možné využít frézy pro frézování selektivní. Moderními frézami je možné frézovat různé tloušťky konstrukčních vrstev. Nejběžnější je frézování za studena, tedy za běžné teploty. Pro získávání materiálu z vozovek se využívá sousledné frézování – frézování proti směru posunu frézovacího stroje. Využívají se buď silniční frézy (samohybná zařízení) anebo přídatná frézovací zařízení. Frézování je možné za tepla nebo za studena (za běžné teploty) což je v současnosti obvyklejší. [28]

Selektivní frézování

Selektivním frézováním, tedy frézováním po jednotlivých vrstvách konstrukce vozovky, získáme materiály různé kvality a vlastností, které pak můžeme efektivně využít při výrobě nové asfaltové směsi, což má velký ekonomický i ekologický přínos. [29]

Frézování za studena

Frézy za studena jsou během práce chlazeny vodou pro zvýšení jejich životnosti, snížení prašnosti a snížení slepování se vytěženého materiálu. Vyzískaný materiál je skladovatelný (nelepí se) a snadno znovupoužitelný. Zároveň, oproti frézování za tepla, je tento způsob energeticky méně náročný a tím i ekologičtější. [28]



4.2 Recyklace asfaltových vrstev vozovek

Recyklaci vozovek můžeme rozdělit na recyklaci za studena a recyklaci za horka, přičemž recyklace za horka se omezuje pouze na recyklaci asfaltových vrstev. Dále je možné rozlišovat recyklaci podle místa provádění na recyklaci in-situ (na místě) nebo na recyklaci v míchacím centru (na obalovně). Z toho vychází čtyři základní využívané kombinace:

- recyklace za studena na místě
- recyklace za studena na obalovně
- recyklace za horka na místě
- recyklace za horka na obalovně

Pro opravy a údržby stávajících vozovek je možné využít technologie in-situ. Jejich hlavní výhodou je využití materiálu přímo z opravované vozovky, čímž se snižují náklady na dopravu stavebních materiálů a zároveň je celý proces recyklace in-situ šetrnější k životnímu prostředí než odfrézování původní vrstvy, výroba, navedení a pokládka vozovkové vrstvy z nového materiálu. [25]

V současnosti se rozvíjí především technologie recyklace za studena, pěnoasfaltové technologie či teplé asfaltové technologie, které se využijí zejména pro údržbu méně zatížených komunikací. [18]

4.2.1 Recyklace za studena

Metody recyklace vrstev obsahujících asfaltové pojivo za studena spočívají v míchání R-materiálu s asfaltovou emulzí či zpěněným asfaltem, případně s kombinací cementu a asfaltové emulze nebo cementu a zpěněného asfaltu. Technologie za studena je závislá na podrobné diagnostice stávající vozovky, kvůli správnému návrhu směsi a je vhodná především pro podkladní a ložné vrstvy, jelikož kvalitativně se směsi obalované asfaltovou emulzí nevyrovnají směsím obalovaným asfaltem za horka, tak ani recyklace za studena nemůže dosahovat srovnatelných parametrů. Pro obrusné vrstvy je tedy použití těchto metod omezené a provádí se jen u komunikací s velmi nízkou intenzitou dopravy (třídy dopravního zatížení V a VI), které je potom ještě vhodně opatřit tenkou povrchovou úpravou. [25]

Z pohledu ochrany životního prostředí je tento přístup nejpříznivější, neboť není nutné předeřívání vozovkového souvrství, nevzniká žádný odpad a není potřeba velkého množství nových materiálů. [30]

Recyklace za studena na obalovně se využívá pro stavby menšího rozsahu, u kterých by bylo ekonomicky nevýhodné instalovat zařízení pro recyklaci na místě. Mísení může probíhat na obalovně nebo v blízkosti stavby v mobilním mísícím zařízení. [30]

Požadavky na výrobu, pokládku, kontrolu recyklace za studena jsou řešeny technickými podmínkami TP 208 Recyklace konstrukčních vrstev netuhých vozovek za studena.



4.2.2 Recyklace za horka in-situ

Recyklace za horka in-situ, tedy na místě, využívá technologie pro opravy asfaltových vozovek, které fungují na principu – ohřátí recyklované vrstvy vozovky (infrazářiče) → rozpojení a nakypření → případné promíchání s přidávanými materiály (kamenivo, asfaltové pojivo, asfaltová směs, změkčující přísady) → zpětné položení a hutnění. Výhodou těchto metod opravy vozovky je především využití místního materiálu, díky tomu se nezatíží silniční síť dopravou, rychlost a brzké zpřístupnění komunikace jejím uživatelům. Vozovka je provozuschopná 24 h po opravě. [31]

Požadavky a specifikace pro provádění a kontrolu recyklace za horka jsou řešeny technickými podmínkami TP 209 Recyklace asfaltových vrstev netuhých vozovek na místě za horka, ve kterých jsou i definovány jednotlivé možné technologie, jejichž princip je schematicky znázorněn na obr. 8.

Reshape

Tato metoda pouze upravuje příčný profil vozovky, vlastnosti asfaltové směsi se nemění, protože se nepřidává žádný nový materiál ani zlepšující přísada. Používá se k opravám vozovek s malými deformacemi. [25]

Repave

Touto metodou se upraví příčný profil vozovky, položí se nová vrstva asfaltové směsi (bez vzájemného promísení) a poté se obě vrstvy současně zhutní. [25]

Remix a Remix plus

Remix je metoda recyklace asfaltové vrstvy, při které jsou upravovány vlastnosti asfaltové směsi. Tato technologie může být realizována dvěma postupy. Buď se nejdříve na vozovkovou vrstvu určenou k recyklaci, rozprostře vrstva nového kameniva. Poté následuje její nahřátí společně s kamenivem a rozpojení, přidání dalších materiálů jako je silniční asfalt nebo změkčující přísady, promíchání a zpětné položení upravené směsi, anebo se vrstva vozovky nejdříve nahřeje a rozpojí, poté se přidá speciální asfaltová směs, vše se promíchá, znovu položí a zhutní. [25]

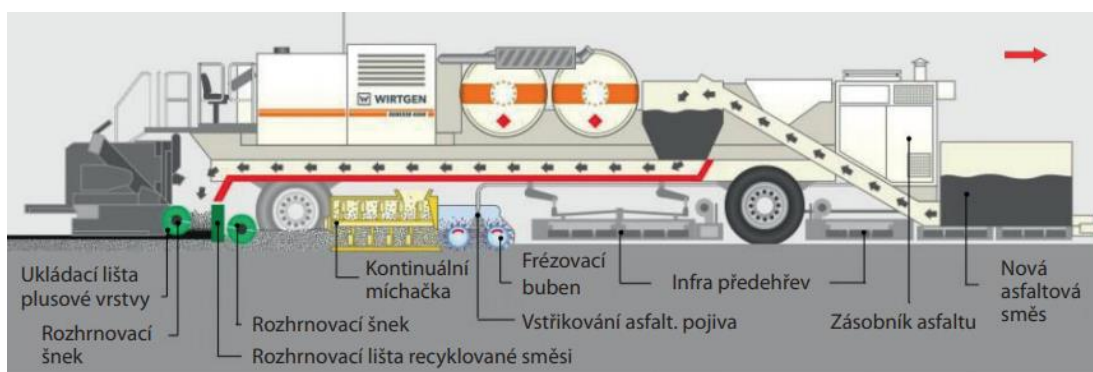
Remix plus je metoda recyklace asfaltové obrusné vrstvy s pokládkou nové obrusné vrstvy. Princip vychází z technologie Remix, pouze s tím rozdílem, že po zpětném položení upravené směsi následuje položení nové směsi a teprve poté následuje zhutnění asfaltového souvrství, tedy obou vrstev zároveň, horní nově položená vrstva se vtlačí do spodní zrecyklované a tím se zajistí dokonalé spojení. [25]

Tyto postupy jsou vhodné pro opravy vrstev tloušťky až 50 mm (při přidání nové vrstvy až 70 mm), jejichž složení a fyzikálně mechanické vlastnosti neodpovídají současným požadavkům (např.: špatná zrnitost, nedostačující vlastnosti pojiva).



Při recyklaci těmito technologiemi se využívá strojní sestava zahrnující:

1. Předehříváče – propanbutanové infrazářiče, které pozvolna nahřívají vrstvu určenou k recyklaci na požadovanou teplotu po celou dobu prováděné recyklace. Po přejezdu infrazářičů by teplota na povrchu vrstvy neměla překročit 160°C. [25]
2. Recyklační zařízení – Remixer, který se skládá z frézovacího bubnu, který vrstvu rozpojí, míchačky pro promíchání s přidávanými materiály a z dvou nahřívavých lišt, které zhomogenizovanou směs rozprostírají, profilují a předhutňují. [32]
3. Hutnicí válce – dohutnění položené vrstvy je stejné jako u běžných asfaltových vrstev



Obr. 7 - Schéma remixeru při technologii remix plus [32]

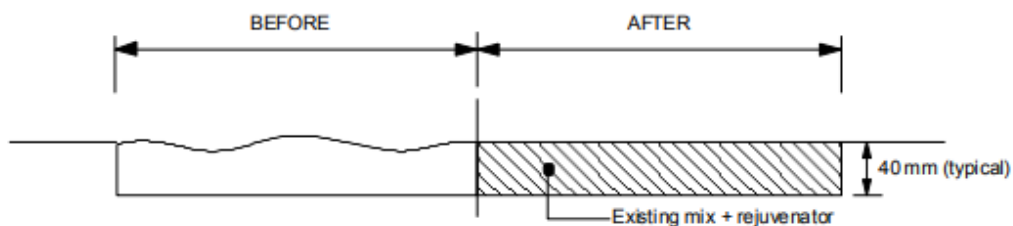


Figure 1 Reshape procedure

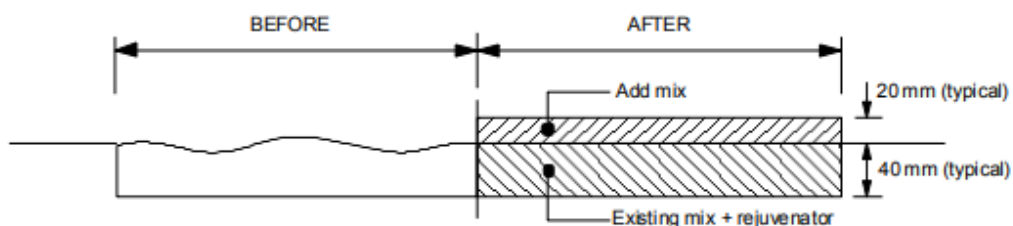


Figure 2 Repave procedure

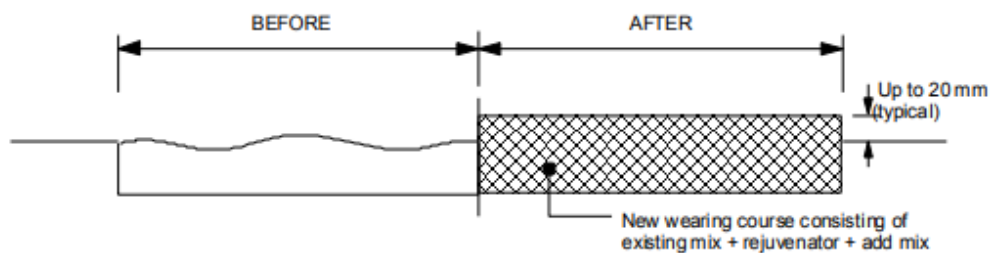


Figure 3 Remix procedure

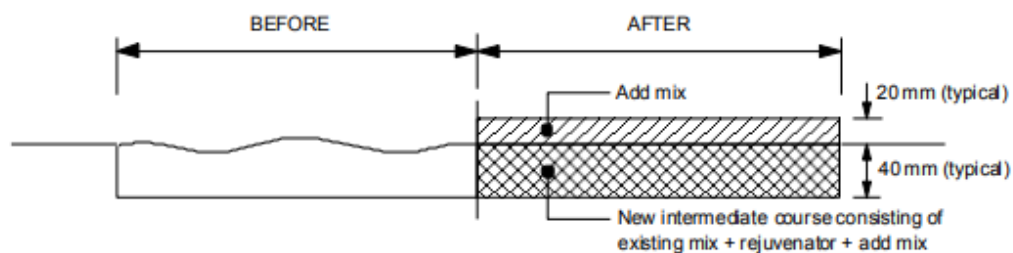


Figure 4 Remix Plus procedure

Obr. 8 – Schéma před a po recyklaci za horka in-situ [33]

V TP 209 je definována ještě technologie Recyklace v mobilním nízko kapacitním zařízení, která je vhodná pouze pro provizorní vysprávký či údržbu účelových, místních obslužných či nemotoristických komunikací a chodníků. [31]

4.2.3 Recyklace za horka na obalovně

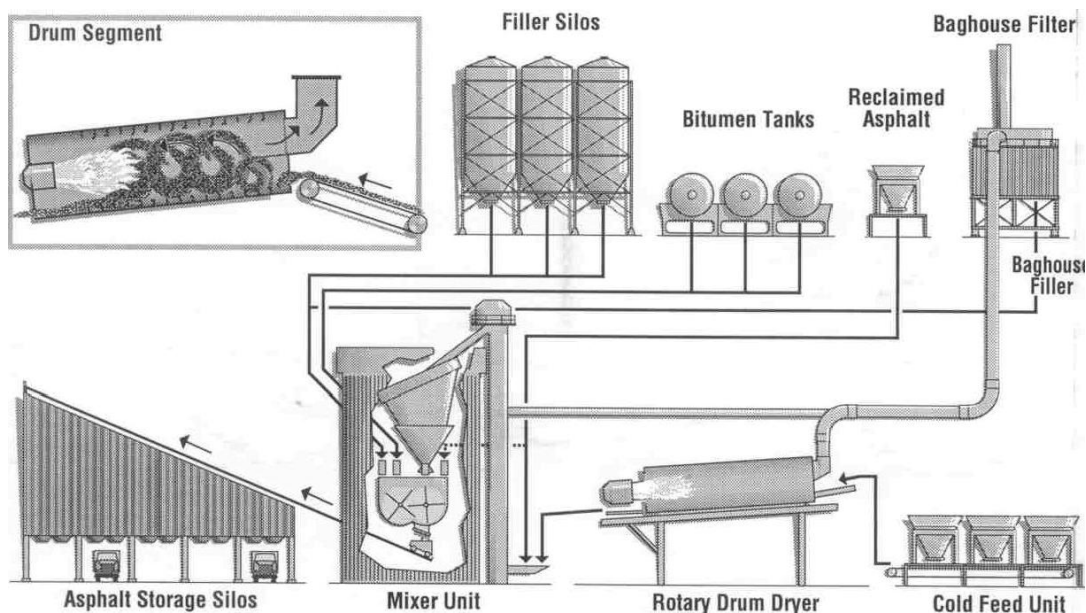
Tento typ recyklace spočívá ve zpracování R-materiálu do nově vyráběné směsi, která může být použita při pokládce nové asfaltové vrstvy na rekonstruované silnici i na novostavbě. Technologie pokládky je stejná jako u směsí bez R-materiálu.

Tento typ recyklace asfaltových směsí se konkrétně týká tématu této diplomové práce. V ČR je stále nejpoužívanější dávkování R-materiálu studenou cestou. Pouze několik málo obaloven je vybavena paralelním bubnem pro předeřhání R-materiálu.

Dávkování studeného R-materiálu přímo do míchačky – šaržová obalovna

Studený R-materiál se přidává přímo do míchačky obalovny spolu s kamenivem. To se musí předeřhát na vyšší teplotu, než je předepsaná teplota míchání, aby se zajistilo dostatečné ohřátí R-materiálu. Tím se zajistí změkčení, v něm obsaženého, zestárlého pojiva a důkladné promíchání s novými materiály. Rychlost přenosu tepla mezi kamenivem a R-materiálem musí být pečlivě navržena a sledována, aby nedocházelo k odpařování lehkých olejových frakcí pojiva a k další oxidaci již zestárlého asfaltu. Pro zajištění dostatečné homogenity směsi se celková doba míchání obvykle prodlužuje o 5 – 20 s oproti standardnímu míchání směsí. [34]

R-materiál často obsahuje velké množství vlhkosti, při jeho ohřátí tak dochází ke vzniku velkého množství páry, která musí být odváděna odvětrávacím zařízením. Touto metodou se obvykle dávkuje menší množství a to 15 % – 20 %, protože při větším množství je problematické dosáhnout dostatečného ohřátí a vysušení R-materiálu od kameniva. Pokud by se řádně nevysušil, nemuselo by dojít k dostatečnému obalení pojivem. Přesto se v zahraničí touto metodou dávkuje až 30 % R-materiálu hmotnosti z celkové směsi. [35]

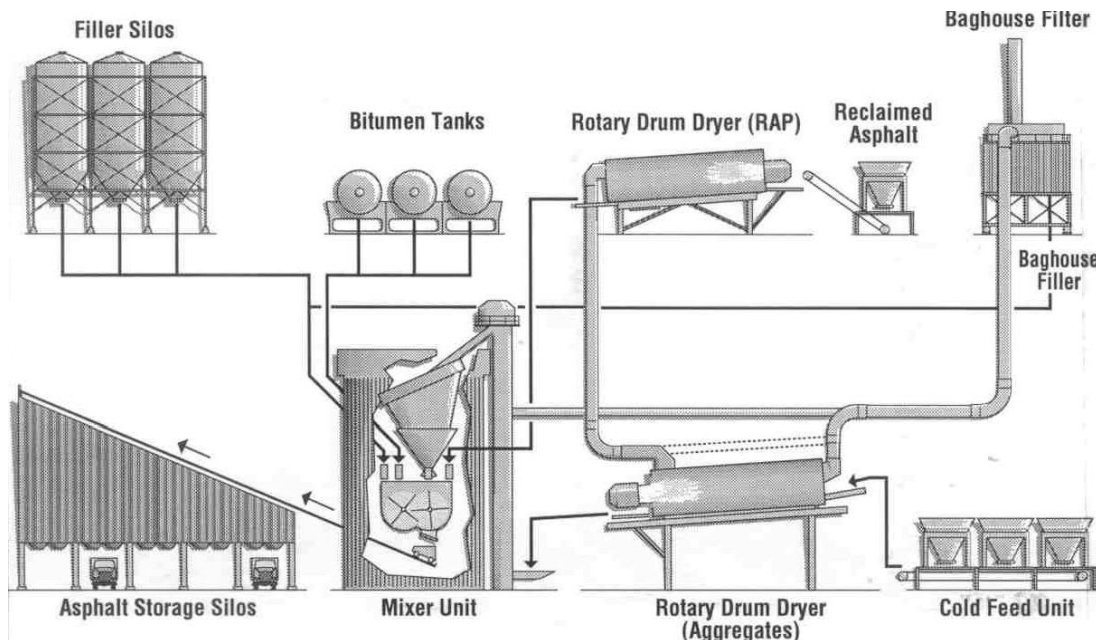


Obr. 9 – Šaržová obalovna – studené dávkování R-materiálu [36]



Dávkování přehřátého R-materiálu v paralelním bubnu – šaržová obalovna

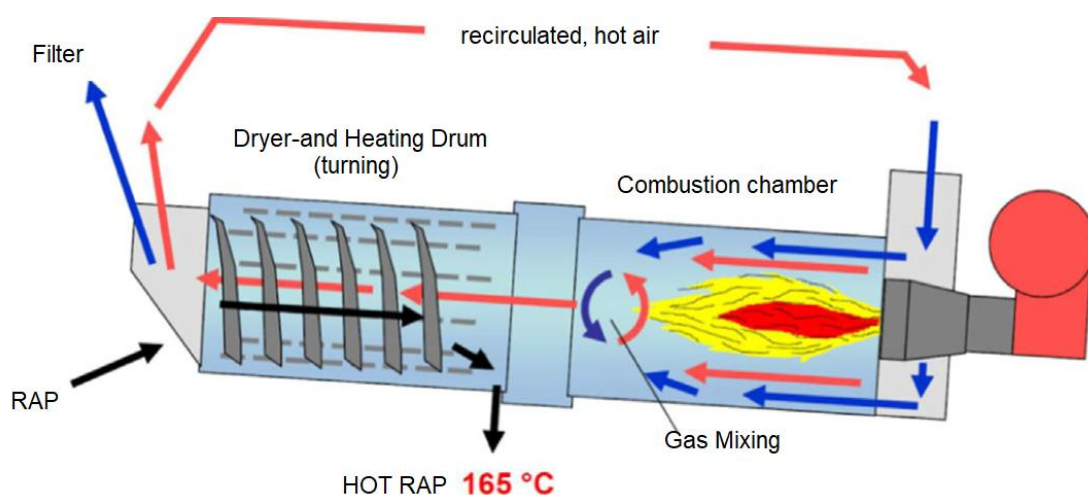
Pro tento způsob dávkování musí obalovna disponovat přídatným zařízením – paralelním bubnem (viz obr. 10), ve kterém se R-materiál nejprve přehřeje, obvykle na max. 130 °C kvůli vznikajícím emisím, a až poté se přidává do míchačky.



Obr. 10 – Šaržová obalovna – dávkování přehřátého R-materiálu [36]

Vhodnějším způsobem jsou tzv. recyklační bubny s protiproudým ohřevem, kde se R-materiál ohřívá nepřímo jelikož je dávkován na protilehlé straně hořáku. Tím se dosáhne vyšší teploty R-materiálu při nižší teplotě spalin, který na výstup dosahuje 160 °C což již odpovídá teplotě míchání směsí. Díky tomu je pak celá výroba asfaltové směsi energeticky méně náročná. Tímto způsobem je možné vyšší dávkování (např.: v Německu je takto dávkováno až 80 % RA), jelikož je snadnější dosáhnout požadované míchací teploty. [29]

V ČR byla nově vybudována obalovna Ammann ABP240 HRT s RAH100. RAH100 je právě výše zmíněný protiproudý recyklační buben s rekuperací odpadních plynů, složený ze dvou částí. První částí je komora s hořákem, kde dochází k výrobě tepla, horký plyn odtud proudí do druhé části, která je samotnou protiproudou sušičkou. R-materiál je tedy dávkován na protilehlém konci bubnu od hořáku a je postupně ohříván horkým vzduchem až na 165 °C, aniž by došlo k degradaci pojiva. [37] [38]



Obr. 11 – Schéma recyklačního bubnu [38]

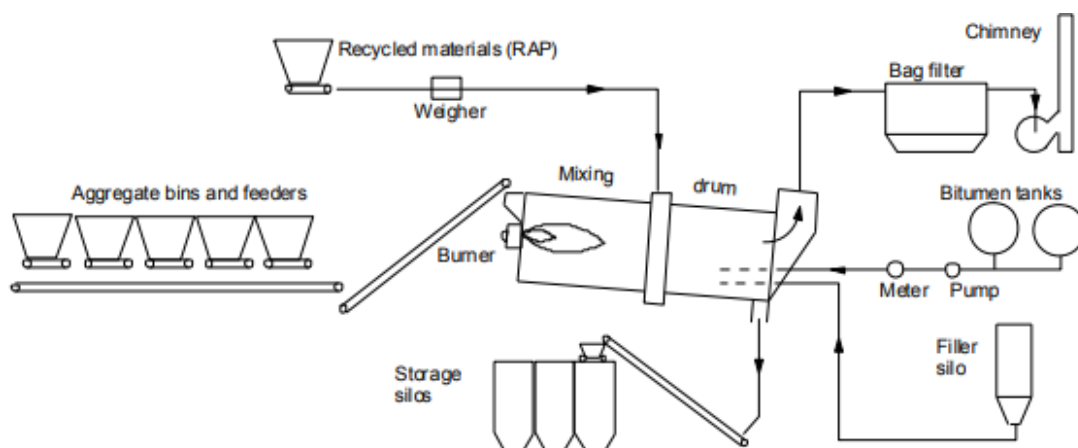


Obr. 12 – Pražská obalovna Herink [37]

Metoda Drum-mix – kontinuální obalovna

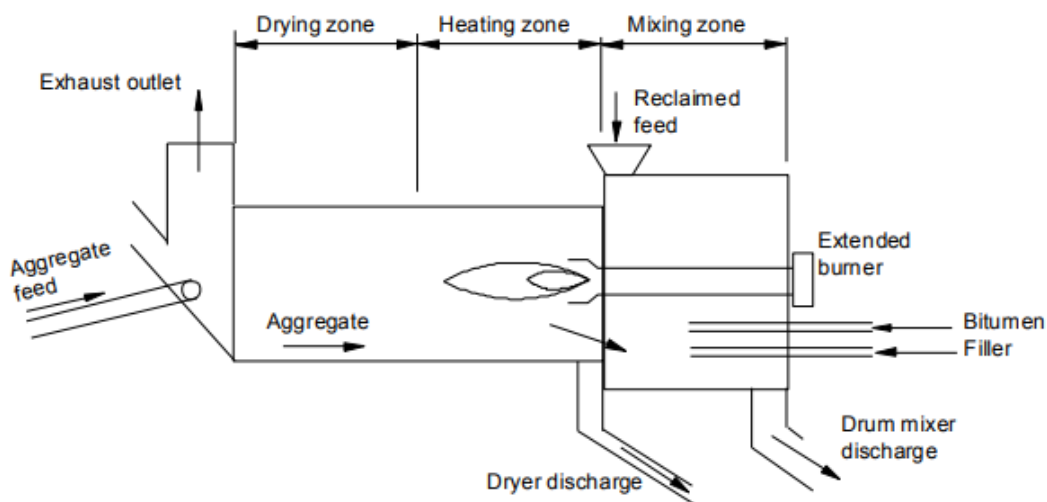
Tato metoda je rozšířenější např.: v USA či Austrálii. Důležité je, aby vstupní materiály měli konstantní vlastnosti, protože výroba směsi je téměř nepřetržitá.

Nejběžnějším typem kontinuální obalovny je systém Drum mix a dávkování komponentů po proudu horkého vzduchu. Zvlášť se dávkuje nové kamenivo a zvlášť R-materiál viz obr. 13. R-materiál je dávkován ve středu sušícího a ohřívacího bubnu pomocí speciálního límce. Důležité je, aby byl buben navržen tak, že ohřívání kamenivo vytvoří jakousi clonu mezi R-materiálem a hořákem a zabránilo se tak přehřátí R-materiálu. [34]



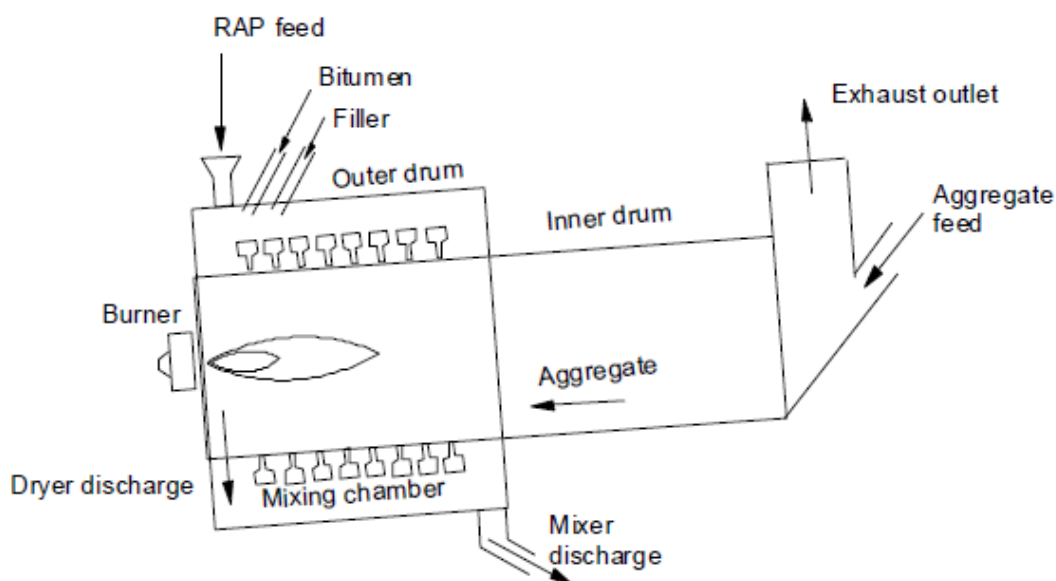
Obr. 13 – Schéma typické kontinuální obalovny – dávkování po proudu horkého vzduchu [34]

Druhým využívaným systémem na kontinuální obalovnách je Drum mix a dávkování proti proudu horkého vzduchu viz obr. 14. R-materiál je přidáván až za rozšířeným hořákem, který „izoluje“ ohřívací část bubnu od té míchací, v této části je vstřikován i asfalt, který tak vůbec nepříjde do kontaktu s hořákem. Tato metoda je oproti standardnímu drum mixeru rychlejší a vhodnější i z hlediska produkovaných emisí a tzv. modrého kouře. Tímto způsobem je možné přidávat až 50 % R-materiálu. [34]



Obr. 14 – Schéma bubnu kontinuální obalovny – dávkování proti proudu horkého vzduchu [34]

Třetím způsobem přidávání R-materiálu u kontinuálních obaloven je Double drum mixer (viz obr. 15). R-materiál je dávkován a nepřímo ohříván ve vnějším bubnu. Nové kamenivo se ohřívá na vyšší teplotu v menším vnitřním bubnu a propadá do prstencového prostoru, ve kterém dochází k míchání s R-materiálem (po dobu cca 90 s). Tento proces je vhodný pro dávkování 50 – 60 % R-materiálu. Škodlivé látky uvolněné ohřevem jsou spalovány přímo v bubnu, tím je tato metoda opět o trochu efektivnější, co se týče produkce emisí a modrého kouře. [34]



Obr. 15 – Schéma Double Drum-mix [34]

4.3 Možnosti dávkování R-materiálu

V ČR je omezení pro výrobu směsí s vyšším obsahem R-materiálu spojeno s obavami technologické nekázně při výrobě takových směsí. Přitom směsi s vyšším obsahem RA jsou podle nespočtu studií stejně kvalitní jako směsi vyrobené pouze z nových materiálů.

Směsi s R-materiálem se u nás dnes mohou požívat pro pozemní komunikace všech dopravních zatížení, aktuálním problémem je ale stále zajištění požadovaných vlastností u směsí s modifikovanými asfalty.

Z tabulky níže (tab. 3) je zřejmé, že obavy, zda je směs ještě modifikovaná a bude vykazovat vlastnosti modifikovaných směsí, jsou řešeny nižším dávkování, a to konkrétně pouze 15 % R-materiálu, toto striktní omezení platí pouze pro ty nejkvalitnější varianty jednotlivých směsí.

Možnosti dávkování dle současně platné ČSN 73 6121 a technických podmínek

Dle aktuálně platné legislativy je přípustné dávkování R-materiálu do asfaltových směsí uvedeno v přílohách normy ČSN 73 6121 Stavba vozovek – Hutněné asfaltové vrstvy – Provádění a kontrola shody (viz tab.3, tab.4). Směsi typu VMT tato norma neřeší a všechny specifikace, požadavky a podmínky použití jsou stanoveny technickými podmínkami TP 151 Asfaltové směsi s vysokým modulem tuhosti (VMT).

Podmínky pro použití směsí s asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem jsou definovány TP 148 a použití R-materiálu do těchto směsí, dle současně platné verze z roku 2009, není doporučeno. TP 148 procházelo revizí a v konečné verzi (verze 2011) je přidávání R-materiálu povoleno, ale nedoporučuje se do směsí BBTM B a PA, tato verze ale nenabyla účinnost. [8] [39]



Maximální možné dávkování R-materiálu do asfaltových betonů (AC):

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.

Tab. 3 – Nejvyšší přípustný obsah R-materiálu v % hmotnosti asfaltové směsi [40]

Maximální možné dávkování R-materiálu do asfaltových koberců otevřených (AKO):

Vrstva		
Obrusná	Ložní	Podkladní
10	20	20

Tab. 4 – Přípustné množství R-materiálu v % hmotnosti asfaltové směsi [40]

Přípustný podíl R-materiálu ve směsích typu VMT je definován v TP 151 Asfalty s vysokým modulem tuhosti (VMT). Pro ložní vrstvy je možné dávkování až 25 % (15 % v případě použití modifikovaných asfaltů) a pro podkladní vrstvy 30 %. Při dávkování nepředehřátého R-materiálu v obalovnách s přerušovaným cyklem výroby je maximální přípustné množství omezeno na 20% hmotnosti směsi. [41]

Do asfaltových směsí typu BBTM (asfaltový beton pro velmi tenké vrstvy), SMA (asfaltový koberec mastixový) a PA (asfaltový koberec drenážní) se R-materiál nesmí používat. [40]

Rozpracovaná ČSN 73 6120

Pro další typy směsí je aktuálně rozpracovaná norma ČSN 73 6120 Stavba vozovek – Ostatní asfaltové vrstvy – Provádění a kontrola shody. Konkrétně se tato norma bude týkat směsí typu: asfaltový beton s vysoký modulem tuhosti (VMT), asfaltový koberec mastixový pro ložní vrstvy (SMA L), asfaltový beton se zvýšeným obsahem pojiva pro podkladní vrstvy (ACP RBL), asfaltový beton pro železniční spodek (AC Z). Dále pak stanovuje požadavky i pro asfaltové směsi pro obrusnou vrstvu se sníženou hlučností (BBTM NH, SMA NH), asfaltové směsi s CRmB V či CCRB a asfaltové směsi pro vrstvy se zvýšenou odolností pro šíření trhlin (SAL). [10]



Možnosti přípustného dávkování R-materiálu je shrnuto v následující tabulce:

typ směsi	% hm. R-materiálu dle způsobu dávkování		poznámka
	předehřátý	nepředehřátý	
VMT – ložní vrstva	25 %	20 %	Při dávkování R-materiálu, které je vyšší než 15 % hm. (včetně) musí být zvoleno: – buď pojivo vyšší třídy – měkčí asfaltové pojivo (přípustné je zvýšení o jednu gradační třídu, tedy při použití silničního asfaltu je přípustné použít do asfaltové směsi VMT s R-materiálem silniční asfalt 50/70); – nebo použití vhodné oživovací látky (rejuvenátor); – nebo PMB RC podle ČSN 65 7222-1.
VMT – podkladní vrstva	40 %		
SMA L	30 %	15 %	Při dávkování R-materiálu, které je vyšší než 15 % hm. (včetně) musí být použita vhodná oživovací přísada (rejuvenátor) nebo PMB s doplňujícím označením RC v souladu s ČSN 65 7222-1.
ACP RBL	40 %	20 %	Při dávkování R-materiálu, které je vyšší než 15 % hm. musí být zvoleno buď pojivo vyšší gradace, nebo musí být použita vhodná oživovací přísada (rejuvenátor) nebo PMB s doplňujícím označením RC v souladu s ČSN 65 7222-1
AC Z	40 %	20 %	Při dávkování R-materiálu, které je vyšší než 15 % hm. musí být zvoleno buď pojivo vyšší gradace, nebo musí být použita vhodná oživovací přísada (rejuvenátor) nebo PMB pojivo s doplňujícím označením RC v souladu s ČSN 65 7222-1.
AC Z+	70 %	20 %	

Tab. 5 – Možnosti dávkování R-materiálu dle ČSN 73 6120

R-materiál je dle výše zmíněné normy nepřipustné přidávat do směsí pro obrusné vrstvy se sníženou hlučností (např. směsi BBTM NH, SMA NH), směsí s asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem se zvýšenou viskozitou (CRmB V) a do směsí modifikovaných CCRB. Výjimku tvoří VMT směsi, do kterých je možné přidávat R-materiál i v kombinaci s CRmB V nebo CCRB. [10]

Obecně, pokud je do směsi přidáváno R-materiálu více jak 15% hmotnosti směsi, musí být zvoleno pojivo vyšší gradace nebo musí být použit vhodný rejuvenátor či PMB pojivo s označením RC dle ČSN 65 7222-1. [10]

Pro možné vyšší dávkování R-materiálu je nezbytné selektivní frézování a jeho oddělené skladování, zastřešení skládek kameniva a R-materiálu, jeho homogenizace a průběžné kontroly vlastností (parametry pojiva, zrnitost). Aby nová směs mohla obsahovat 80 % a více R-materiálu je podstatné, aby se jeho čára zrnitosti co nejvíce podobala čáře zrnitosti požadované směsi. [29]



5 Praktická část

V praktické části bylo cílem posoudit možnost dávkování R-materiálu do směsí modifikovaných pryžovým granulátem s vyšší viskozitou. Proto byly vyrobeny 4 varianty směsi se stejnou čarou zrnitosti, které byly následně podrobeny volumetrickým a mechanicko-fyzikálním zkouškám.

Obecným předpokladem bylo, že přidáním R-materiálu, který obsahuje tvrdé pojivo dojde ke zvýšení tuhosti a pevnosti směsí. S tím ale pravděpodobně bude spojen i nežádoucí účinek, a to větší křehkost (menší tvárnost) těchto směsí. Možnost přidávání R-materiálu byla posuzovaná porovnáním výsledků zkoušek směsí bez R-materiálu s jejich protějškem s R-materiálem, tedy V1 vs. V3, V2 vs. V4 (specifikace variant směsí viz kap. 5.2).

5.1 Charakteristika použitých materiálů

5.1.1 Kamenivo

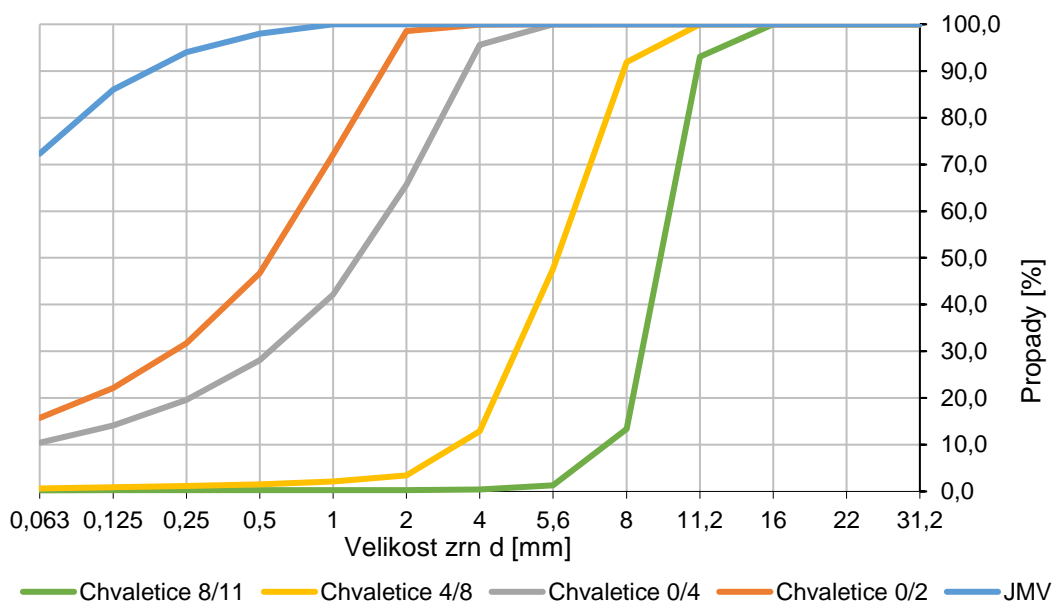
Pro návrh a výrobu asfaltových směsí bylo použito kamenivo frakcí 8/11, 4/8, 0/4 a 0/2 z kamenolomu Chvaletice. Tento kamenolom produkuje středně zrnitou biotitickou žulu. Vápencová moučka - filer byla použita z lokality Velké Hydčice.

Stanovení zrnitosti

Pro každou frakce byla stanovena čára zrnitosti na základě síťového rozboru podle ČSN EN 933-1 Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Síťový rozbor. [42]

Síto	Chvaletice 8/11	Chvaletice 4/8	Chvaletice 0/4	Chvaletice 0/2	JMV
	Propady [%]	Propady [%]	Propady [%]	Propady [%]	Propady [%]
16	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
11,2	93,1	100,0	100,0	100,0	100,0
8	13,4	91,9	100,0	100,0	100,0
5,6	1,3	47,6	100,0	100,0	100,0
4	0,4	12,9	95,6	100,0	100,0
2	0,3	3,4	65,7	98,6	100,0
1	0,3	2,2	42,2	72,1	100,0
0,5	0,3	1,5	28,1	46,7	98,0
0,25	0,3	1,2	19,6	31,8	94,0
0,125	0,3	0,9	14,1	22,1	86,0
0,063	0,2	0,6	10,4	15,7	72,3

Tab. 6 – Zrnitost jednotlivých frakcí kameniva a fileru



Graf 1 – Čáry zrnitosti jednotlivých frakcí kameniva

5.1.2 Asfaltové pojivo a koncentrát asfaltového pojiva modifikovaného pryžovým granulátem

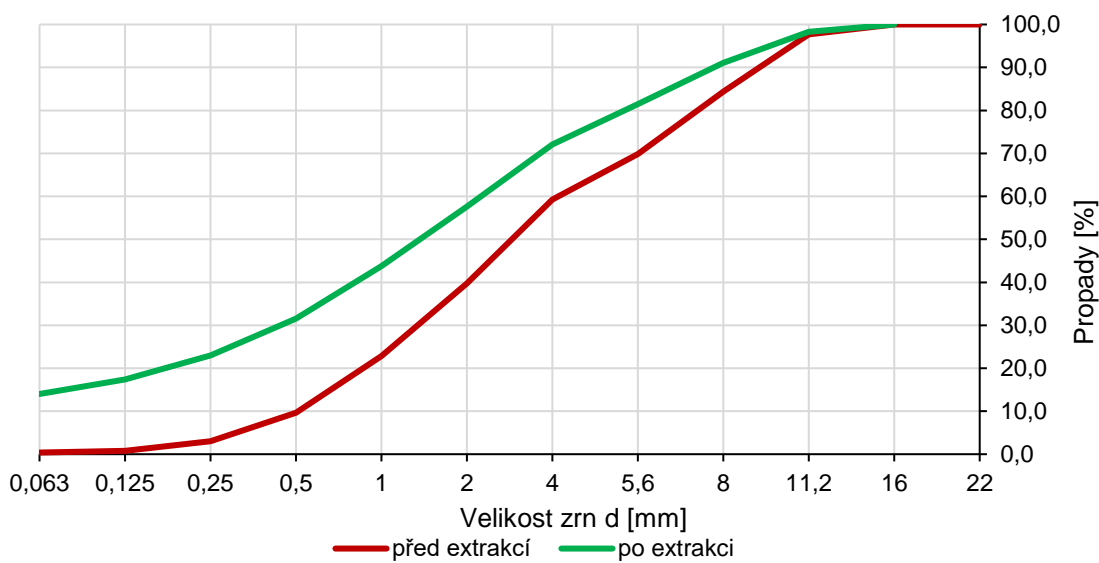
Pro potřeby této práce byl použit silniční asfalt 50/70, asfalt modifikovaný pryžovým granulátem CRmB V z obalovny Chvaletice a CCRB v práškové podobě (Premix GA) od firmy CIUR. Premix GA obsahuje 40 % hm. devulkanizovanou pryž, 50 % hm. pojivo, které je z 15 % modifikováno rozpuštěnou pryží a 10 % hm. fileru (přísada proti slepování se práškem). [11]

5.1.3 R-materiál

R-materiál použitý v této diplomové práci je z obalovny Chabařovice. Pro návrh směsi s RA bylo nutné určit jeho základní vlastnosti.

Stanovení zrnitosti

Zrnitost R-materiálu U a zrnitost kameniva d/D (po extrakci pojiva) byla stanovena síťovým rozbořem dle ČSN EN 933-1.



Graf 2 – Čáry zrnitosti R-materiálu

Na základě těchto zrnitostních rozborů lze použitý R-materiál označit 16 RA 0/11. [42] [26]

Obsah pojiva

Pro zjištění obsahu pojiva v R-materiálu byla provedena extrakce asfaltového pojiva dle ČSN EN 12697-1 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 1: Obsah asfaltového pojiva. Obsah byl stanoven rozdílovou metodou, dle následujícího vzorce:

$$S = \frac{100 \times [M - (M_1 + M_2)]}{M}$$

kde S ...obsah rozpustného pojiva [%]
 M ...hmotnost navážky R-materiálu [g]
 M_1 ...hmotnost kameniva po extrakci [g]
 M_2 ...hmotnost zachycených jemných částic na filtračním papíru [g]

[43]

Po provedení extrakce asfaltového pojiva a následném výpočtu byl stanoveno množství pojiva. V použitém R-materiálu je $S = 5,63$ %.



5.2 Asfaltové směsi

Pro tuto práci byly navrženy a vyrobeny 4 varianty (viz tab.7) asfaltové směsi typu ACO 11 S, jejichž návrh vycházel ze známé receptury, v souladu s požadavky uvedenými v TP 148.

označení	specifikace varianty
V1	ACO 11 S CCRB
V2	ACO 11 S CRmB V
V3	ACO 11 S 30 % RA CCRB
V4	ACO 11 S 30 % RA CRmB V

Tab. 7 – Varianty vyráběných směsí

Na základě znalosti čáry zrnitosti směsi a obsahu asfaltového pojiva, zjištěné zrnitosti jednotlivých frakcí kameniva a R-materiálu je návrh jednotlivých směsí následovný:

V1 - ACO 11 S CCRB	
frakce	% hm.
8/11	29,6
4/8	29,6
0/4	20,35
0/2	11,1
filer	1,85
CCRB	2,1
50/70	5,4

V2 - ACO 11 S CRmB V	
frakce	% hm.
8/11	29,6
4/8	29,6
0/4	20,35
0/2	11,1
filer	1,85
CRmB V	7,5

Tab. 8 – Procentuální složení směsí V1 a V2

V3 - ACO 11 S 30% RA CCRB	
frakce	% hm.
8/11	25,9
4/8	25,2
0/4	8,0
filer	5,1
R-mat	30,0
CCRB	1,6
50/70	4,2

V4 - ACO 11 S 30% RA CRmB V	
frakce	% hm.
8/11	25,9
4/8	25,2
0/4	8,0
filer	5,1
R-mat	30,0
CRmB V	5,8

Tab. 9 – Procentuální složení směsí V3 a V4

Varianty s R-materiálem byly navrženy bez obsahu frakce 0/2. Ve všech variantách je uvažován stejný celkový obsah asfaltového pojiva 7,5 %. Ve variantě s R-materiálem je množství nového asfaltu uvažováno 5,8 %, jelikož samotný R-mat již pojivo obsahuje. Zrnitostní návrh a čáry zrnitosti variant směsí jsou součástí přílohové části (tab. 47, tab. 48).



Varianty s koncentrátem CRmB byly, na základě konzultace s výrobcem, modifikovány z 28 % to znamená, že 28 % hm. z celkového množství pojiva ve směsi je nahrazeno CCRB jak u V1, tak u V3. Tyto směsi tak dosáhnou shodného stupně modifikace.

Následující tabulky shrnují obsah pryže a skladbu asfaltového pojiva v jednotlivých navržených variantách:

V1	Požadovaný obsah pojiva ve směsi	7,5 %
	Podíl pojiva 50/70	5,4 %
	Podíl CCRB (modifikace 28 %)	2,1 %
	Podíl pryže v CCRB	55,0 %
	Obsah pryže ve směsi	1,16 %

Tab. 10 – Obsah pryže ve variantě 1

V2	Požadovaný obsah pojiva ve směsi	7,5 %
	Podíl pojiva CRmB V	7,5 %
	Podíl pryže v pojivu CRmB V	15,0 %
	Obsah pryže ve směsi	1,13 %

Tab. 11 - Obsah pryže ve variantě 2

V3	Požadovaný obsah pojiva ve směsi	7,5 %
	Podíl pojiva z R-materiálu (přídavek 30 % s obsahem pojiva 5,63 %)	1,7 %
	Podíl přidaného pojiva 50/70	3,7 %
	Podíl CCRB (modifikace 28 %)	2,1 %
	Podíl pryže v CCRB	55,0 %
	Obsah pryže ve směsi	1,16 %

Tab. 12 - Obsah pryže ve variantě 3

V4	Požadovaný obsah pojiva ve směsi	7,5 %
	Podíl pojiva z R-materiálu (přídavek 30 % s obsahem pojiva 5,63 %)	1,7 %
	Podíl přidaného pojiva CRmB V	5,8 %
	Podíl pryže v pojivu CRmB V	15,0 %
	Obsah pryže ve směsi	0,87 %

Tab. 13 - Obsah pryže ve variantě 4



Výroba

Směsi byly vyráběny v laboratorních podmínkách v souladu s ČSN EN 12697-35 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 35: Laboratorní výroba směsi. [44]

Frakce kameniva, pojivo a případně R-materiál byly ohřáty v odvětrávaných sušárnách na požadovanou teplotu. Poté bylo do přehřáté laboratorní míchačky možno postupně dávkovat jednotlivé komponenty směsi.

- Postup míchání V1 a V3
 - směs kameniva, míchání
 - přidání CCRB, míchání
 - případné přidání R-mat přehřátého na 130 °C, míchání
 - přidání pojiva 50/70, míchání
 - přidání fileru, míchání
- Postup míchání V2 a V4
 - směs kameniva, míchání
 - případné přidání R-mat přehřátého na 130 °C, míchání
 - přidání pojiva CRmB V, míchání
 - přidání fileru, míchání

Po každém míchání byla směs vizuálně posouzena, zda jsou jednotlivé komponenty dostatečně promíchány či zda je kamenivo obaleno, aby byla zajištěna dostatečná homogenita směsi.

5.3 Zkušební tělesa

Zkušební tělesa pro praktickou část této práce byla vyráběna dle ČSN EN 12697-30 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem a dle ČSN EN 12697-33 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 33: Příprava zkušebních těles zhutňovačem desek.

Válcová tělesa

Vyrobená směs byla rozvážena do fanek a nahřata na hutníci teplotu 170 °C. Pro tělesa hutněna 2x75 údery byla navážka cca 1200 g, pro tělesa hutněna 2x25 údery byla navážka cca 1100 g. Po dosažení hutníci teploty byla navážka směsi přemístěna do hutníci formy a ihned hutněna rázovým zhutňovačem.

Pro tuto práci bylo vyrobeno 6 těles hutněných 2x75 údery a 9 těles hutněných 2x25 údery od každé varianty směsi.



Obr. 16 – Válcová tělesa hutněna 2x25 úderů (vlevo) a 2x75 úderů (vpravo) [12]

Desky

Pro každou variantu směsi byly vyrobeny 2 desky o rozměrech 320 x 260 x 40 mm, pomocí lamelového zhutňovače. Hutnící teplota byla 170 °C.

Na základě znalosti průměrné objemové hmotnosti směsi a požadovaných rozměrů vyráběné desky, bylo vypočteno množství navážky pro výrobu jedné desky. Vytemperovaná navážka se po dosažení hutnící teploty rozprostřela do formy, překryla plechem a zatížila lamelami, poté byla zhutňována pojezdy ocelového válce po lamelách.



Obr. 17 – Lamelový zhutňovač – výroba desek

[45] [46]



5.4 Volumetrické vlastnosti

Pro vyhodnocení výsledků zkoušek mechanických vlastností směsi, je potřeba nejdříve určit základní volumetrické vlastnosti jednotlivých zkušebních těles, směsí.

Stanovení rozměrů

Rozměry válcových zkušebních těles i desek byly změřeny dle ČSN EN 12697-29 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 29: Stanovení rozměrů asfaltových zkušebních těles. [47]

Stanovení objemové hmotnosti

Objemová hmotnost zkušebních těles byla stanovena podle ČSN EN 12697-6 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa. Norma nabízí čtyři možné postupy: postup A: objemová hmotnost – suchá, postup B: objemová hmotnost – nasycený suchý povrch (SSD), postup C: objemová hmotnost – utěsněné zkušební těleso, postup D: objemová hmotnost podle rozměrů.

U těles hutněných 2x75 údery a u desek byl zvolen postup B a objemová hmotnost byla určena dle následujícího vzorce:

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

kde ρ_{bssd} ...objemová hmotnost SSD [g/cm³]
 m_1 ...hmotnost suchého zkušebního tělesa [g]
 m_2 ...hmotnost zkušebního tělesa ve vodě [g]
 m_3 ...hmotnost zkušebního tělesa nasyceného vodou a povrchově osušeného [g]
 ρ_w ... hustota vody při zkušební teplotě [g/cm³]

Objemová hmotnost vody, s přesností na 0,0001 g/cm³, byla určena dle:

$$\rho_w = 1,00025205 + \left(\frac{7,59 \times t - 5,32 \times t^2}{10^6} \right)$$

U těles hutněných 2x25 údery byl pro určení objemové hmotnosti zvolen postup D, jelikož tělesa mají otevřený povrch a výpočet byl proveden dle následujícího vzorce:

$$\rho_{b,dim} = \frac{m_1}{\frac{\pi}{4} \times h \times d^2} \times 10^3$$

kde $\rho_{b,dim}$...objemová hmotnost podle rozměrů [g/cm³]
 m_1 ...hmotnost suchého zkušebního tělesa [g]
 h ...výška zkušebního tělesa [mm]
 d ...průměr zkušebního tělesa [mm]

[48]



Stanovení maximální objemové hmotnosti

Maximální objemová hmotnost ρ_{mv} , objemová hmotnost bez vzduchových mezer mezi kamenivem, byla pro jednotlivé směsi stanovena v souladu s ČSN EN 12697-5 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti, dle postupu A: volumetrický postup.

Maximální objemová hmotnost byla vypočtena podle následujícího vzorce:

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

kde	ρ_w	... hustota vody při zkušební teplotě [g/cm ³]
	t	... zkušební teplota destilované [°C]
	ρ_{mv}	... maximální objemová hmotnost [g/cm ³]
	V_p	... objem pyknometru při naplnění po referenční značce [cm ³]
	m_1	... hmotnost pyknometru a nástavce [g]
	m_2	... hmotnost pyknometru a zkušební vzorku [g]
	m_3	... hmotnost pyknometru, zkušební vzorku a vody [g]

Objemová hmotnost destilované vody byla určena podle následujícího vzorce:

$$\rho_w = 1,00025205 + \left(\frac{7,59 \times t - 5,32 \times t^2}{10^6}\right)$$

[49]

Stanovení mezerovitosti

Mezerovitost byla stanovena výpočtem podle ČSN EN 12697-8 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 8: Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí.

$$V_a = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \times 100\%$$

kde	ρ_m	... maximální objemová hmotnost směsi [g/cm ³]
	ρ_b	... průměrná objemová hmotnost zkušebních těles [g/cm ³]
	V_a	... mezerovitost směsi [%]

[50]



Shrnutí volumetrických vlastností směsí

U všech variant směsí byla nejdříve vyrobena válcová tělesa hutněna 2x75 údery a z nich stanovena průměrná objemová hmotnost $\bar{\rho}_{b,SSSD}$, dále byla stanovena i maximální objemová hmotnost směsi. Na základě těchto parametrů byla vypočtena mezerovitost jednotlivých variant směsí.

Varianta a její specifikace		$\bar{\rho}_{b,SSSD}$	ρ_m	Va
		[g/cm ³]	[g/cm ³]	[%]
V1	ACO 11 S CCRB	2,364	2,448	3,4
V2	ACO 11 S CRmB V	2,340	2,436	3,9
V3	ACO 11 S 30 % RA CCRB	2,421	2,471	2,0
V4	ACO 11 S 30 % RA CRmB V	2,420	2,483	2,5

Tab. 14 – Výsledky volumetrických vlastností

Požadovaná hodnota mezerovitosti, dle TP 148, pro směsi typu ACO s asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem je u zkoušky typu 4,0 – 6,0 %. U kontrolních zkoušek směsi je požadovaná mezerovitost 3,0 - 7,0 %, což směsi bez R-materiálu splňují. [8]

Mezerovitost mezi jednotlivými varianty uskakuje logicky, rozdíl mezi V1 a V2 je 0,50 %, stejně tak i mezi V3 a V4. Zároveň u obou směsí s R-materiálem je mezerovitost nižší o 1,40 %. Je zřejmé, že u směsí s R-materiálem došlo k výraznému snížení mezerovitosti, což může být způsobeno např.: nehomogenním množstvím pojiva v R-materiálu nebo tvarovým indexem kameniva R-materiálu.

Optimalizace varianty V1 by spočívala v úpravě dávkování koncentráту asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem, dle toho by následně bylo upraveno dávkování CCRB i u směsi V3. U varianty V3 a V4 by bylo zapotřebí optimalizovat zrnitostní návrh směsi, a to co největším přiblížením se horním mezním hodnotám propadů na sítích, tím by se snížilo množství drobného kameniva ve směsi. Vzhledem k časové náročnosti optimalizace všech variant a aktuální situaci spojené s omezeními nebyl návrh receptur směsí upravován.

Naměřené rozměry všech jednotlivých zkušebních těles a jejich vypočtené objemové hmotnosti jsou součástí přílohové části (tab. 49 - tab. 54.)

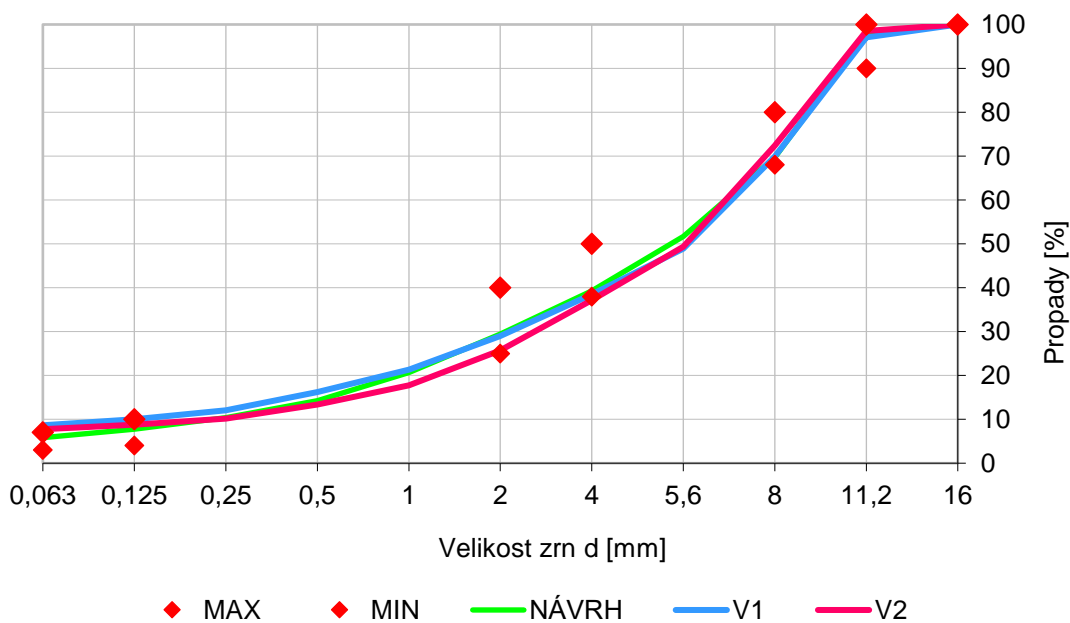
5.5 Zpětný rozbor

Pro ověření předpokladu, že nižší mezerovitost směsí V3 a V4 je zapříčiněna obsahem R-materiálu, nikoli vyšším obsahem pojiva byl proveden zpětný rozbor zhotovených směsí. Na obr. 18 je směs kameniva a pryžových částic po extrakci, před síťovým rozbořem.

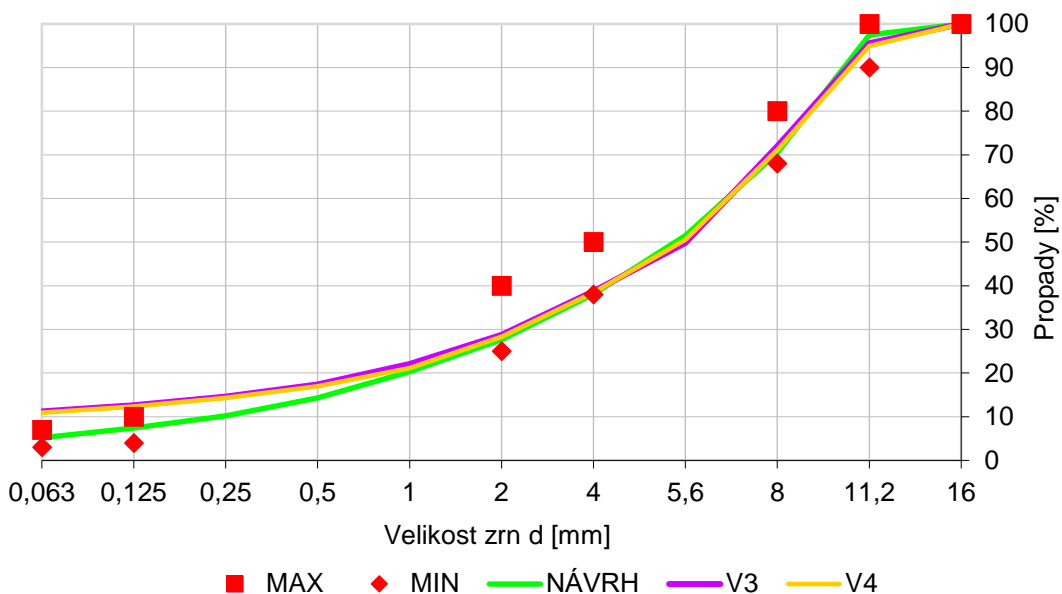


Obr. 18 – Směs kameniva a částice pryže po extrakci pojiva [12]

Po extrakci pojiva byl proveden síťový rozbor dle ČSN EN 933-1 a stanovena skutečná čára zrnitosti jednotlivých směsí. Porovnání čar zrnitosti s původním návrhem je zobrazeno v grafech níže (graf 3, graf 4). Je viditelné, že všechny směsi obsahují více jemného kameniva, než bylo uvažováno, což zapříčinilo nižší mezerovitost směsí.



Graf 3 – Křivky zrnitosti směsí V1 a V2 a původní návrh



Graf 4 – Křivky zrnitosti směsí V3 a V4 a původní návrh

V původním návrhu bylo uvažováno 7,5 % (včetně pryžových částic). Po extrakci je množství pojiva uvedeno v tabulce níže (tab. 15).

Varianta a její specifikace		M	M1	M2	S	Obsah pryže
		[g]	[g]	[g]	[%]	[%]
V1	ACO 11 S CCRB	1104,7	944	88,4	6,5 %	1,0 %
V2	ACO 11 S CRmB V	1090,1	935,2	79,7	6,9 %	0,6 %
V3	ACO 11 S 30 % RA CCRB	1184,8	984,2	124,2	6,4 %	1,1 %
V4	ACO 11 S 30 % RA CRmB V	1175,5	982,3	119,2	6,3 %	1,2 %

Tab. 15 – Obsah rozpustného pojiva a pryžových částic v jednotlivých variantách



5.6 Tuhost

Zkušební postupy pro určení modulu tuhosti jsou definovány v normě ČSN EN 12697-26 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 26: Tuhost. V této práci byly moduly tuhosti určeny zkouškou pulsním namáháním v příčném tahu na válcových zkušebních tělesech (IT–CY) dle přílohy C výše zmíněné normy.

Tato zkouška je nedestruktivní, zkušební tělesa byla namáhána v rozsahu lineárního přetvoření opakovaným namáháním v příčném tahu, během zkoušky byly měřeny maximální svislé síly a k nim příslušné horizontální deformace.

Každé těleso bylo odzkoušeno 2x, ve dvou rovinách potočených o $90^\circ \pm 10^\circ$, a výsledný modul tuhosti je aritmetickým průměrem těchto dvou měření.

Těleso vytemperované na zkušební teplotu bylo upevněno do zatěžovacího rámečku a byly nastaveny LVDT snímače. Nejprve bylo zatěžováno 10 kalibračními pulzy a hned poté 5 zatěžovacími pulzy, ze kterých byla vyhodnocena průměrná hodnota svislé zatěžovací síly a příčné deformace.



Obr. 19 – Těleso upevněné v rámečku – zkouška IT-CY [12]

Modul tuhosti, pro každý zatěžovací puls, je softwarem určen na základě naměřených hodnot svislé zatěžovací síly a příčné deformace, poissonově čísla a rozměrech zkušebního tělesa dle vzorce níže, a poté přepočten pomocí součinitele zatěžovací plochy.



$$E = \frac{F \times (v + 0,27)}{z \times h}$$

kde E ...modul tuhosti [MPa]
 F ...maximální hodnota použitého svislého zatížení [N]
 z ...amplituda horizontální deformace [mm]
 h ...tloušťka zkušební tělesa [mm]
 v ...Poissonovo číslo

[51]

Vyhodnocení zkoušky

Modul tuhosti je jedna z nejzákladnějších charakteristik asfaltových směsí a využívá se při dimenzování vozovkových konstrukcí. Moduly tuhosti byly stanoveny pro teploty 0 °C, 15 °C, 27 °C a 40 °C na zkušebních tělesech hutněných 2x75 údery. Na základě znalosti E_0 (modulu tuhosti při 0 °C) a E_{40} (modulu tuhosti při 40 °C), byla pro každou směs spočtena i teplotní citlivost, která vyjadřuje náchylnost směsi na teplotní změny, čím menší tedy hodnota je, tím lépe bude směs snášet výkyvy teplot, a i lépe těmto extrémním teplotám odolávat.

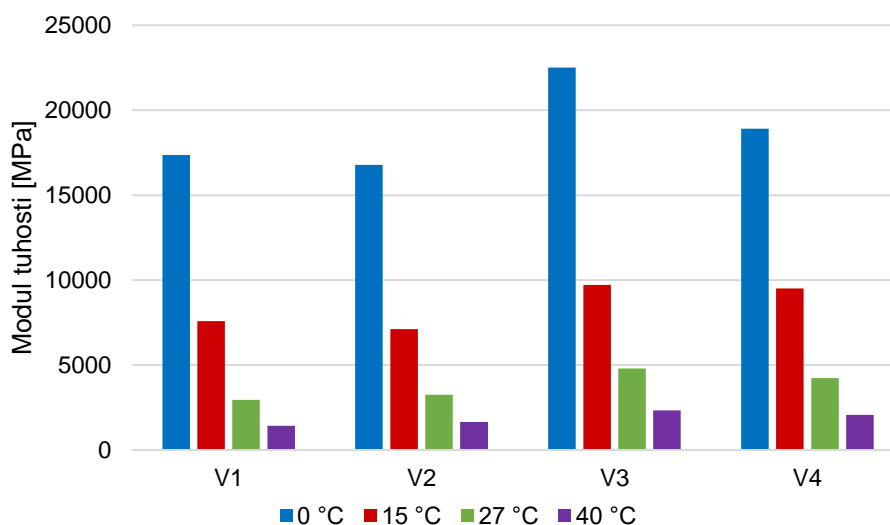
Obecným předpokladem je, že přidáním R-materiálu, který obsahuje tvrdé, zestárlé, pojivo se zvýší tuhost směsi. Výsledky zkoušky jsou shrnuty v tab. 16 a vyjádřeny jako průměrná hodnota z 3 nebo 6 měření (hodnoty dílčích měření viz přílohová část tab. 55 – tab. 58).

Varianta a její specifikace		Moduly tuhosti [MPa]				teplotní citlivost
		0 °C	15 °C	27 °C	40 °C	E_0/E_{40}
V1	ACO 11 S CCRB	17 368	7 577	2 959	1 426	12,18
V2	ACO 11 S CRmB V	16 779	7 113	3 244	1 652	10,16
V3	ACO 11 S 30 % RA CCRB	22 519	9 724	4 805	2 323	9,69
V4	ACO 11 S 30 % RA CRmB V	18 913	9 506	4 236	2 072	9,13

Tab. 16 – Moduly tuhosti a teplotní citlivost jednotlivých variant směsí

Naměřené moduly tuhosti odpovídají očekávaným hodnotám. Při nižších teplotách (0 °C a 15 °C) dosahují průměrných hodnot pro směsi typu ACO 11 S, ale pro vyšší teploty (27 °C a 40 °C) nabývají spíše vyšších hodnot, než je obvyklé.

Je zřejmé, že tuhost i teplotní citlivost jsou přítomností R-materiálu pozitivně ovlivňovány. Varianty obsahující R-materiál jsou dle předpokladu tužší, než jejich protějšky bez R-materiálu (tedy např.: $E_{0, V3} > E_{0, V1}$) a jejich teplotní citlivost je nižší.



Graf 5 – Moduly tuhosti jednotlivých variant

Varianty s CCRB vykazují vyšší tuhosti především pro nižší teploty. U varianty 1 potom modul tuhosti E_{40} nižší než u V2, nedá se tedy jednoznačně říct, jestli je výhodnější použití CCRB či CRmB V, ale je možné říci, že z pohledu tuhosti jsou varianty s R-materiálem jednoznačně výhodnější.

V TP 148 jsou uvedeny požadované minimální kategorie funkčních vlastností směsi s CRmB, minimální třída tuhosti při teplotě 15 °C, pro vysokoviskózní směsi typu AC je $S_{\min 5500}$ ($E_{\min} = 5500$ MPa), což všechny navržené varianty splňují.



5.7 Odolnost vůči šíření trhliny

Zkouška odolnosti proti šíření trhliny (SCB test) byla, s částečnými úpravami a s více měřenými parametry, provedena podle ČSN EN 12697-44 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 44: Šíření trhliny zkouškou ohybem na půlválcovém zkušebním tělese.

Touto zkouškou se stanoví odolnost proti křehkému lomu – houževnatost. Půlválcové těleso je zatěžováno třibodovým ohybem tak, že na jeho spodní rovné hraně vzniká tahové napětí.



Obr. 20 – Zatěžování půlválcového zkušebního tělesa [12]

Zkouška byla tedy provedena na zkušebních tělesech hutněných na Marshallově pěchu seříznutých na požadovanou tloušťku 50 mm a rozříznutých kotoučovou pilou napůl. Na každém půlválcovém tělese byla na spodní hraně definována trhlina šířky 0,9 mm a hloubky 10 mm. U všech takto připravených těles byly měřeny rozměry (viz přílohová část tab. 54) a poté byly v klimatické komoře vytemperovány na 0°C. Vytemperovaná tělesa byla zatěžována svislou silou, a oproti normě, nižší konstantní rychlostí 2,5 mm/min, pro lepší korelace s výsledky zkoušky pevnosti v tahu za ohybu a zároveň nižší rychlost zatížení alespoň částečně simuluje skutečný stav, kdy v ve vozovkové konstrukci dochází k relaxaci mezi jednotlivými zatěžovacími cykly. Na základě naměřené maximální hodnoty svislé zatěžovací síly a k ní příslušné deformace, byly dle platné ČSN EN 12697-44 vyhodnoceny parametry přetvoření ϵ_{\max} při maximální síle, maximální napětí při porušení $\sigma_{\max,i}$ a odolnost vůči lomu $K_{IC,i}$ (kritická hodnota lomové houževnatosti).



$$\varepsilon_{max,i} = \frac{\Delta W_i}{W_i} \times 100\%$$

kde W_i ...výška zkušební tělesa [mm]

ΔW_i ...svislý posun zkušební tělesa „i“ při maximální síle [mm]

$$\sigma_{max,i} = \frac{F_{max,i}}{D_i \times t_i}$$

kde D_i ...průměr zkušební tělesa [mm]

t_i ...tloušťka zkušební tělesa [mm]

$F_{max,i}$...maximální síla zkušební tělesa [N]

$$K_{IC,i} = \sigma_{max,i} Y_1 \sqrt{\pi a_i}$$

kde $K_{IC,i}$...

Y_1 ...faktor intenzity napětí při standardním režimu I [-]

a_i ...hloubka drážky zkušební tělesa [mm]

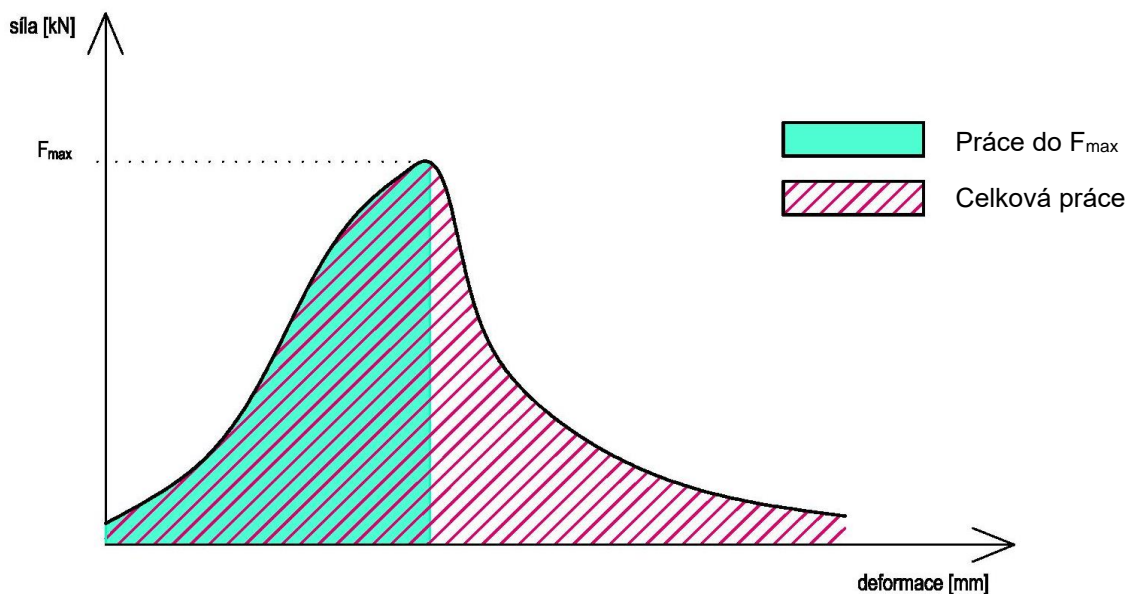
$$Y_1 = 4,782 - 1,219 \times \left(\frac{a_i}{r_i}\right) + 0,063 \times \exp\left(7,045 \times \left(\frac{a_i}{r_i}\right)\right)$$

kde r_i ...poloměr zkušební tělesa v milimetrech [mm]

a_i ...hloubka drážky zkušební tělesa [mm]

[52]

Během zkoušky byl navíc zaznamenáván její průběh, pomocí datalogeru Almemo, a pomocí získaných dat byl vykreslen pracovní diagram na jehož základě byla vypočtena lomová práce W jako integrál zatěžovací křivky a lomová energie G_f . Grafem 6 je schematicky znázorněn průběh zkoušky (závislost přetvoření na působící síle) a šrafkami jsou znázorněny vykonané práce nunté k inicianci trhliny (práce do F_{max}) a k její propagaci až do úplného porušení zkušební vzorku (celková práce).



Graf 6 – Zatěžovací diagram

$$G_f = \frac{W}{t \times (w - a)}$$

- kde G_f ...lomová energie [J/m^2]
 W ...lomová práce [J]
 t ...tloušťka zkušebního tělesa [m]
 w ...výška zkušebního tělesa [m]
 a ...hloubka uměle vyříznuté trhliny/drážky [m]

Vyhodnocení zkoušky

Odolnost vůči vzniku trhlin je velmi důležitá vlastnost, pokud se ve vozovkovém souvrství vytvoří trhlina a dojde k její propagaci až na povrch, je to začátek dalších nepříjemností. Do konstrukce začne zatékat voda a ovlivňovat podkladní nestmelené vrstvy, což může vést ke vzniku trvalých deformací. Tělesa byla pro tuto zkoušku vytemperovaná na $0\text{ }^\circ\text{C}$ a výsledky tak tedy simulují šíření mrazové trhliny.

Výsledky zkoušky jsou dle normy platné, pokud se trhlina šíří v normou vymezené oblasti viz obr. 21.



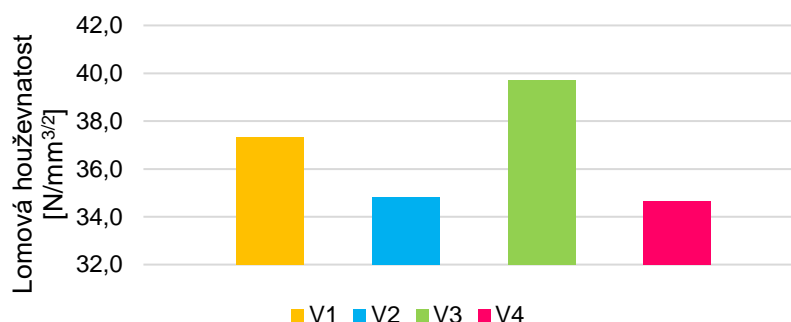
Obr. 21 – Ověřování platnosti výsledků [12]



	$\varepsilon_{\max,i}$	$\sigma_{\max,i}$	$K_{Ic,i}$	W_{\max} (do max.)	W (celková)	$G_{f,\max}$ (do max.)	G_f (celková)
	(%)	(MPa)	(N/mm ^{3/2})	(J)	(J)	(J/m ²)	(J/m ²)
V1	2,24 %	1,39	37,3	3,6	4,7	1736	2311
V2	1,70 %	1,30	34,8	2,4	3,9	1175	1932
V3	2,01 %	1,48	39,7	2,4	3,1	1191	1531
V4	1,73 %	1,29	34,6	2,0	3,1	995	1617

Tab. 17 – Shrnutí výsledků SCB testu

Část zkušebních těles byla z vyhodnocování vyřazena, jelikož průběh jejich pracovního diagramu byl nestandardní (viditelné poklesy napětí, vysoké odchylky od průměru skupiny těles).



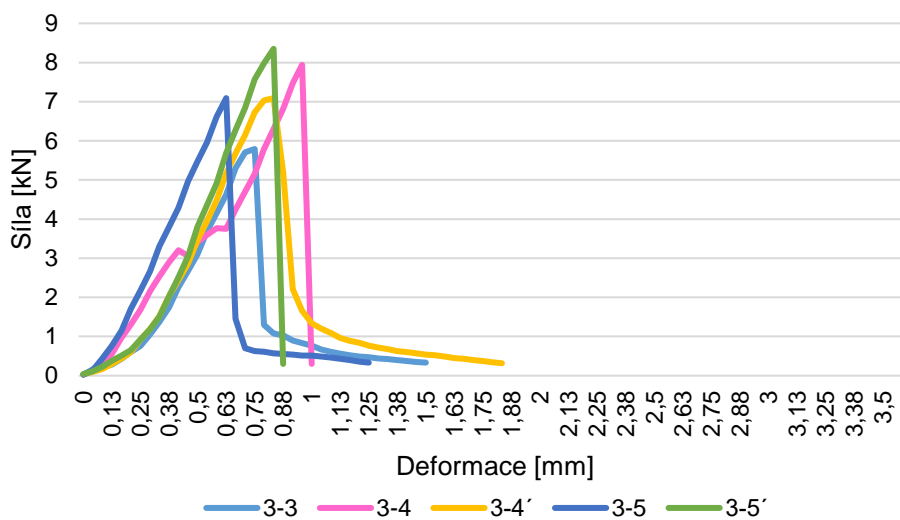
Graf 7 – Lomová houževnatost jednotlivých variant

Výsledky ukazují že varianty V1 a V3 s CCRB mají vyšší lomovou houževnatost, což odpovídá i vyšším modulům tuhosti. V1, na rozdíl od V3 (s R-materiálem), vykazuje i vysokou hodnotu celkové práce. Směs V3 je tedy sice tuhá, ale křehká – po dosažení maximální síly a iniciace trhliny dochází k rychlé propagaci trhliny viz graf 8, to znamená, že v praxi se u takové směsi, při cyklickém zatěžování dopravou, dříve projeví porušení ve formě trhlin.

Při posuzování pouze lomové houževnatosti jako to vyžaduje ČSN EN 12697-44, by se mohlo zdát, že se u varianty V4 s CRmB V neprojevuje vliv zestárlého pojiva obsaženého v R-materiálu. Po přihlídnutí k celkové energii, spotřebované k propagaci trhliny je ale jasné, že směs s V4 je křehčí a náchylnější k tvorbě trhlin.



Obr. 22 – Zkušební těleso po SCB testu [12]



Graf 8 – Průběh SCB testu – V3

5.8 Pevnost v tahu za ohybu

Pevnost za ohybu je stanovována na trámkách dle metodiky uvedené v TP 151 - Asfaltové směsi s vysokým modulem tuhosti (VMT).

Zkušební tělesa jsou zatěžována třibodovým ohybem až do dosažení maximální síly P , při které dojde k plastickému přetvoření trámku Y_s . Na základě těchto naměřených hodnot je vypočtena pevnost za ohybu R_i , modul tuhosti v tahu za ohybu E_s a maximální relativní přetvoření ε_s dle následujících vztahů:

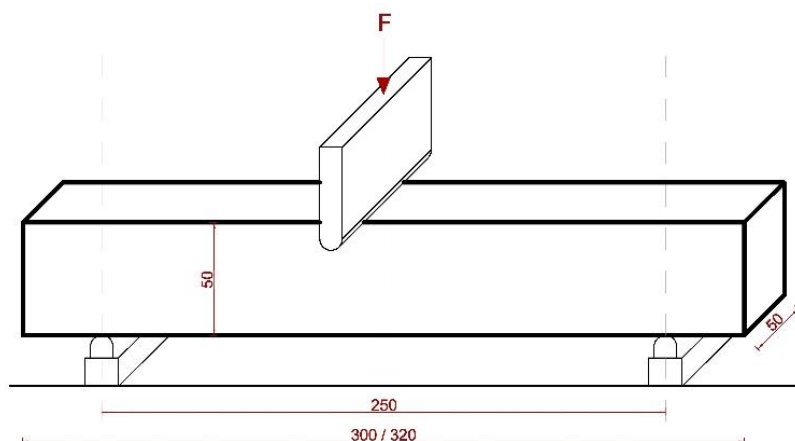
$$R_i = \frac{3}{2} \times \frac{P \times l}{b \times h^2}$$

- kde R_i ...pevnost v tahu za ohybu [MPa]
 P ...největší dosažená síla [N]
 l ...vzdálenost podpor zkušebního tělesa [mm]
 b ...šířka zkušebního tělesa [mm]
 h ...výška zkušebního tělesa [mm]

$$E_s = \frac{1}{4 \times Y_s} \times \frac{P \times l^3}{b \times h^3}$$

- kde E_s ... modul tuhosti v tahu za ohybu [MPa]
 Y_s ...(korigovaný) průhyb zjištěný uprostřed rozpětí při okamžiku porušení vzorku [mm]

[41]



Obr. 23 – Schéma zkoušky – třibodový ohyb [53]



Stejně jako u SCB testu byl po celou dobu zkoušky zaznamenáván její průběh s tím rozdílem, že tentokrát byla zkouška ukončena po dosažení maximální síly P. Odtěžovací část není pro tuto zkoušku uvažována. Jelikož zkušební těleso nemá definovanou drážku pro šíření trhliny, byl by pokles napětí příliš pomalý a výsledek by byl zkresleným tím, jak by se během odtěžování těleso ohřívalo. Na základě zaznamenaných dat byly vykresleny zatěžovací diagramy a mohla být stanovena i lomová práce W jako plocha pod zatěžovací křivkou.

Zkouška byla provedena na trámčích nařezaných z desek pro zkoušku pojíždění kolem. Přičemž polovina trámčů byla podrobena laboratornímu stárnutí - po dobu 5 dní byla uložena v sušárně s cirkulací vzduchu při teplotě 85 °C. Samotná zkouška byla provedena pro teplotu 0 °C, zatěžovací rychlostí 1,25 mm/min pro porovnání s výsledky dalších provedených zkoušek v rámci této práce.

Vliv stárnutí lze vyjádřit tzv. indexem stárnutí IA, který se pro libovolný parametr vypočte následovně:

$$IA = \frac{X_{aged}}{X_{virgin}}$$

kde IA ... index stárnutí

X_{aged} ...zkušební parametr zestárlého tělesa

X_{virgin} ...zkušební parametr nezestárlého tělesa

Stárnutím, tedy vlivem termooxidačních účinků, dochází k degradaci asfaltového pojiva, to se tak stává sice tužším, ale křehčím. Na základě indexu stárnutí je možné vyhodnotit, jak velký vliv má stárnutí na vlastnosti směsi. Čím více se index stárnutí blíží 1, tím bude směs vůči tomuto faktoru odolnější.

[54]

Vyhodnocení zkoušky

Polovina zkušebních těles byla vstavena laboratornímu stárnutí pro simulaci chování směsi ve vozovkové konstrukci. Výsledky zkoušky jsou uvedeny v tabulkách níže (tab.18, tab.19).

	Y_s		IA_{Y_s}	P		IA_P
	[mm]			[kN]		
	virgin	aged		virgin	aged	
V1	1,3	1,2	0,9	1,7	2,1	1,2
V2	1,1	1,0	0,8	1,6	1,9	1,2
V3	1,3	1,1	0,9	2,2	2,2	1,0
V4	1,2	1,0	0,8	2,0	2,3	1,2

Tab. 18 – Naměřené hodnoty zkoušky pevnosti v tahu za ohybu

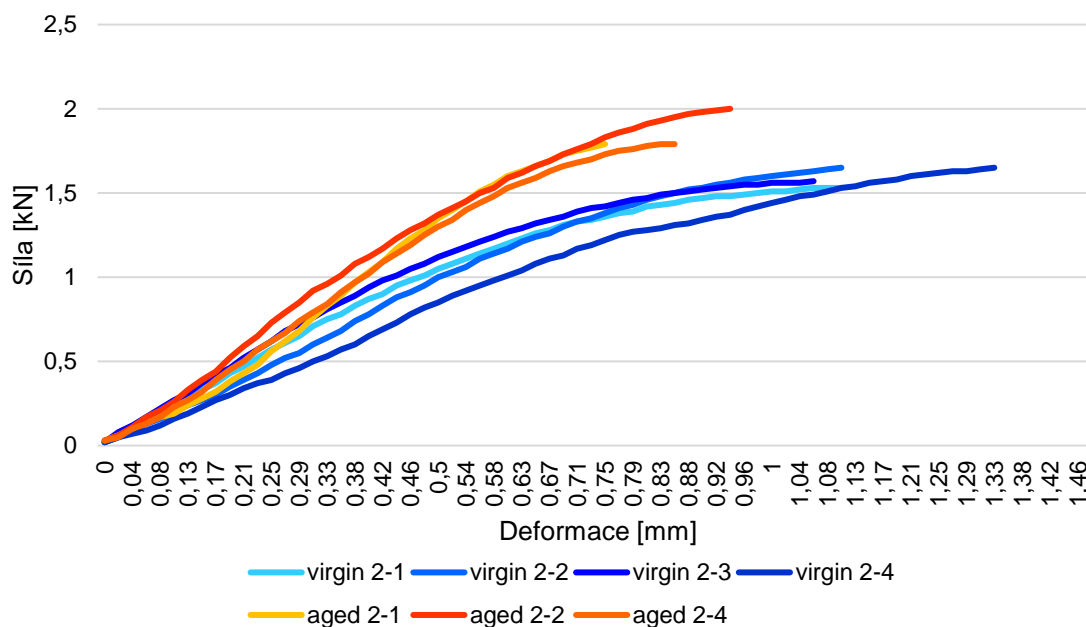


	R		I _{AR}	E _s		I _{AEs}	W		I _{Aw}
	[MPa]			[MPa]			[J]		
	virgin	aged	virgin	aged	virgin	aged			
V1	8,0	9,1	1,1	1546	1872	1,2	1,5	1,4	1,1
V2	7,6	8,3	1,1	1744	2256	1,3	1,2	0,9	1,3
V3	9,6	9,6	1,0	1944	2251	1,2	1,6	1,3	1,2
V4	9,1	10,2	1,1	2006	2650	1,3	1,4	1,3	1,1

Tab. 19 – Výsledky zkoušky pevnosti v tahu za ohybu

Vliv stárnutí u těchto směsí není nijak markantní. Hodnoty pevností i modulů tuhostí v tahu za ohybu splňují předpoklad stárnutí pojiva a došlo k jejich zvýšení u zestárlé směsi, lomová práce také odpovídá předpokladu a je u zestárlých vzorků nižší. Směs V3 (CCRB, 30 % R-mat) se zdá být nejodolnější vůči stárnutí hodnoty pevnosti pro zestárlá i nezestárlá tělesa je totožná.

V následujícím grafu (graf 9) je viditelný vliv stárnutí, konkrétně u směsi V2. Nezestárlé (virgin) zkušební trávky se začali porušovat při nižší síle, ale dosahovali větší deformace než trávky zestárlé (aged).



Graf 9 – Pracovní diagram do vzniku porušení – varianta 2

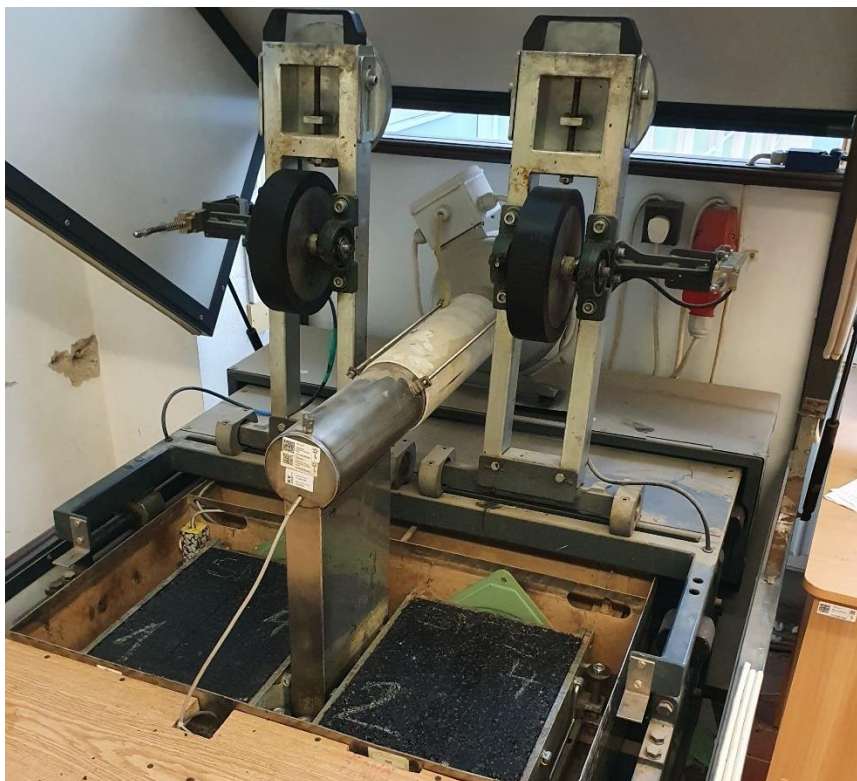
Tato zkouška je v současnosti vyžadována pouze pro směsi typu VMT, proto pro orientační posouzení naměřených hodnot využijí požadavek dle TP 151, kde je uvedena minimální pevnost v tahu za ohybu 6 MPa pro směsi VMT 16 a VMT 22. Všechny varianty dosáhly vyšší pevnosti v tahu za ohybu, takže lze konstatovat, že směsi s R-materiálem i bez v tomto ohledu nabývají dobrých hodnot.



5.9 Zkouška poježdění kolem

Tato zkouška byla provedena dle ČSN EN 12697-22 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 22: Zkouška poježdění kolem.

Zkouška opakovaného poježdění kolem je simulací zatížení vozovkových vrstev těžkými nákladními vozidly. Určuje tak náchylnost asfaltových směsí k tvorbě trvalých deformací na základě naměřené hloubky vyjeté koleje a jejího přírůstku po opakovaném poježdění kolem.



Obr. 24 – Mále zkušební zařízení pro zkoušku poježdění kolem [12]

Deska je vložena do zkušebního zařízení, vytemperována na zkušební teplotu 50 °C a poté, plně automaticky, odzkoušena 10 000 zatěžovacími cykly (20 000 pojezdy). Na základě naměřených hodnot je poté vyhodnocen přírůstek hloubky vyjeté koleje WTS_{AIR} v mm na 1000 zatěžovacích cyklů a průměrná hloubka vyjeté koleje PRD_{AIR} v % dle následujících vztahů:

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

kde WTS_{AIR} ...přírůstek hloubky vyjeté koleje [mm/10³]

d_{5000} , d_{10000} ...hloubka vyjeté koleje po 5000 a 10000 cyklech [mm]



$$PRD_{AIR} = 100 \times \frac{d_{5000}}{h}$$

kde PRD_{AIR} ...průměrná hloubka vyjeté koleje [%]
 h ...průměrná výška desek
 d_{5000} ...průměr hloubky vyjeté koleje po 5000 zatěžovacích cyklech

[55]

Vyhodnocení zkoušky

Zkouška byla pro každou z variant provedena na dvou deskách tloušťky 40 mm. Na základě objemové hmotnosti desek a průměrné objemové hmotnosti směsi byla spočtena míra zhutnění, všechny zkušební desky byly mírně přehutněny (viz tab. 20).

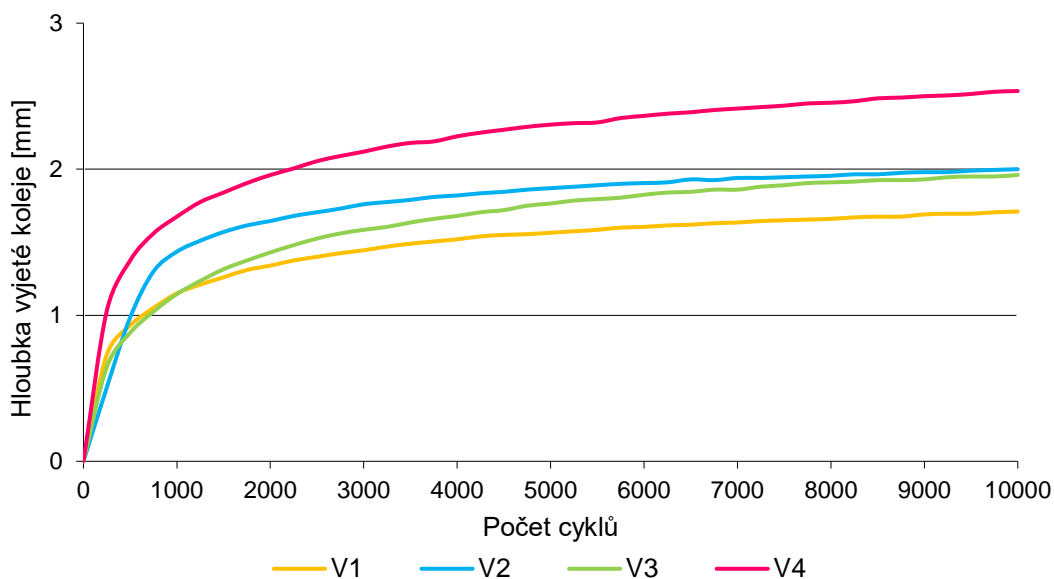
Varianta a její specifikace		č. desky	h	$\rho_{b,SSSD}$	$\varnothing\rho_{b,SSSD}$	Míra zhutnění
			[mm]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[%]
V1	ACO 11 S CCRB	1	39,98	2,38	2,36	100,7 %
		2	39,94	2,38		100,9 %
V2	ACO 11 S CRmB V	1	40,16	2,37	2,34	101,3 %
		2	40,11	2,37		101,2 %
V3	ACO 11 S 30 % RA CCRB	1	40,38	2,45	2,42	101,0 %
		2	40,16	2,44		100,9 %
V4	ACO 11 S 30 % RA CRmB V	1	39,87	2,44	2,42	101,0 %
		2	39,83	2,44		100,8 %

Tab. 20 – Objemová hmotnost a míra zhutnění desek

V následující tabulce jsou shrnuty průměrné hloubky vyjeté koleje po n zatěžovacích cyklech ($\varnothing d_{5000}$, $\varnothing d_{10000}$) a posuzované výsledky zkoušky. V grafu 10 je znázorněna závislost hloubky vyjeté koleje na počtu zatěžovacích cyklů.

Varianta a její specifikace		$\varnothing h$	$\varnothing d_{5000}$	$\varnothing d_{10000}$	WTS _{AIR}	PRD _{AIR}
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm/10 ³ cyklů]	[%]
V1	ACO 11 S CCRB	39,95	1,57	1,71	0,029	3,9 %
V2	ACO 11 S CRmB V	40,15	1,87	2,00	0,026	4,7 %
V3	ACO 11 S 30 % RA CCRB	40,30	1,77	1,96	0,039	4,4 %
V4	ACO 11 S 30 % RA CRmB V	39,85	2,31	2,54	0,046	5,8 %

Tab. 21 – Výsledky zkoušky poježdění kolem



Graf 10 – Průběh zkoušky odolnosti proti trvalým deformacím

Je zřejmé že směsi s CCRB vykazují vyšší odolnost proti trvalým deformacím, což koresponduje s výsledky tuhosti. Ale zároveň při porovnání směsí bez R-materiálu s R-materiálem je zřejmé, že R-mat odolnost proti trvalým deformacím snižuje, což může být zapříčiněno i tím, že tyto varianty mají nižší mezerovitost. Z hlediska přírůstku hloubky vyjeté koleje nejlepšího výsledku dosáhla směs V2 s hodnotou $0,026 \text{ mm}/10^3 \text{ cyklů}$ a z dlouhodobého hlediska by si ve vozovce vedla nejlépe.

Minimální požadované hodnoty, dle TP 148, jsou pro směsi typu AC: $WTS_{AIR} = 0,07 \text{ mm}/10^3 \text{ cyklů}$ a $PRD_{AIR} = 5 \%$. Tento požadavek nesplňuje pouze varianta V4, jejíž průměrná hloubka vyjeté koleje je o 0,8 % nad požadovaným limitem.



Obr. 25 – Deska po zkoušce poježdění kolem – viditelná vyjetá kolej



5.10 Marshallova zkouška

Marshallova zkouška byla provedena v souladu s ČSN EN 12697-34 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 34: Marshallova zkouška.

Zkušební tělesa byla temperována ve vodní lázni na 60 °C, poté byla vkládána do zkušebního zařízení a zatěžována. Na základě zatížení zkušebního tělesa byly vyhodnoceny následující parametry: stabilita S, přetvoření F a míra tuhosti S/F. [56]

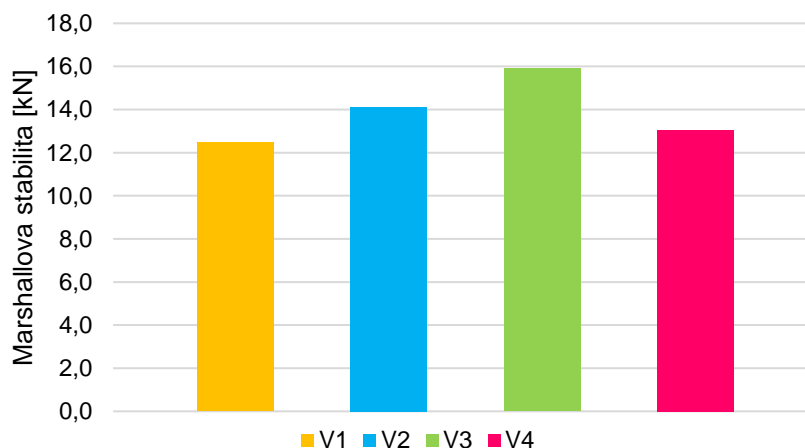
Vyhodnocení zkoušky

Díličí výsledky zkoušky jsou uvedeny v přílohové části tab. 61.

Varianta a její specifikace		F	S	S/F
		[mm]	[kN]	[kN/mm]
V1	ACO 11 S CCRB	5,0	12,5	2,5
V2	ACO 11 S CRmB V	4,9	14,1	2,9
V3	ACO 11 S 30 % RA CCRB	4,6	15,9	3,5
V4	ACO 11 S 30 % RA CRmB V	3,6	13,1	3,7

Tab. 22 – Výsledky Marshallovy zkoušky

Nejvyšší stability dosáhly zkušební tělesa varianty 3. Zajímavý je pokles stability u V4 oproti V2. Míra tuhosti je vyšší pro varianty s R-materiálem.



Tab. 23 – Marshallova stabilita

Pro tuto zkoušku nejsou definovány minimální požadované hodnoty. Ve verzi ČSN 73 6121 z roku 1994, byla uvedena minimální požadovaná Marshallova stabilita $S = 9 \text{ kN}$ pro směsi odpovídající dnešní ACO 11 S. Na základě toho se dá říct, že všechny varianty dosahují vysoké stability a ve vozovkové konstrukci se budou chovat spolehlivě. [57]



5.11 Odolnost vůči vodě a mrazu

Odolnost vůči působení vody a mrazu se vyhodnocuje na základě porovnání pevností v příčném tahu. Odolnost vůči vodě byla vypočtena dle ČSN EN 12697-12 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 12: Stanovení odolnosti zkušebního tělesa vůči vodě dle následujícího vzorce:

$$ITSR_w = 100 \times \frac{ITS_w}{ITS_d}$$

kde $ITSR$...poměr pevností v příčném tahu [%]
 ITS_w ...průměrná pevnost v příčném tahu sady mokrých těles [MPa]
 ITS_d ...průměrná pevnost v příčném tahu sady suchých těles [MPa]

[58]

Odolnost směsi vůči účinkům mrazu byla provedena a vyhodnocena podle americké normy AASHTO T 283.

$$ITSR_f = 100 \times \frac{ITS_f}{ITS_d}$$

kde $ITSR$...poměr pevností v příčném tahu [%]
 ITS_f ...průměrná pevnost v příčném tahu sady „zmrazených“ těles [MPa]
 ITS_d ...průměrná pevnost v příčném tahu sady suchých těles [MPa]

Tělesa jednotlivých variant směsí byla rozdělena do 3 zkušebních sad tak, aby jejich objemové hmotnosti byly vyrovnané a poté byla tělesa připraveny dle následujícího postupu.

Postup přípravy zkušebních sad:

- Sada č. 1 – „suchá“
 - teplota 15 °C, suchá tělesa
- Sada č. 2 – „voda“
 - sycení ve vakuové nádobě (absolutní tlak 6,7 kPa) po dobu 30 min
 - teplota ve vodní lázni 40 °C po dobu 72 h
 - teplota ve vodní lázni 15 °C po dobu alespoň 2 h
- Sada č. 3 – „mráz“
 - sycení ve vakuové nádobě po dobu 30 min
 - zmrazení v igelitovém sáčku s 10 ml přidané vody po dobu 16 h
 - teplota ve vodní lázni 60 °C po dobu 24 h
 - teplota ve vodní lázni 15 °C po dobu alespoň 2 h

[58] [59]

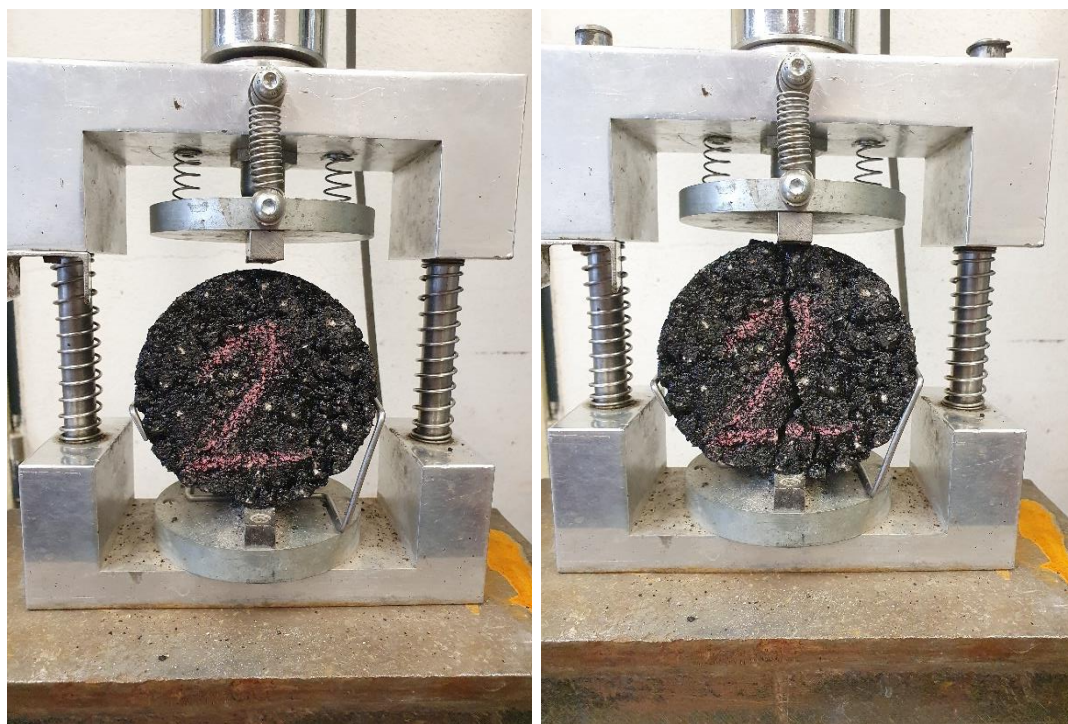


Samotná pevnost v příčném tahu byla stanovena v souladu s ČSN EN 12697-23 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 23: Stanovení pevnosti v příčném tahu. Zkušební těleso je vloženo do tlačných čelistí a zatěžováno konstantní rychlostí 50 mm/min až do jeho porušení. Pevnost v příčném tahu, vyjadřující maximální tahové napětí, je poté stanovena výpočtem na základě naměřených hodnot maximálního zatížení, při kterém došlo k porušení zkušebního tělesa a jeho rozměrů dle následujícího vzorce:

$$ITS = \frac{2 \times P}{\pi \times D \times H}$$

kde ITS ...pevnost v příčném tahu [MPa]
 P ...maximální zatížení [N]
 D ...průměr zkušebního tělesa [mm]
 H ...výška zkušebního tělesa [mm]

[60]



Obr. 26 – Stanovení ITS – před a po zatížení (viditelná tahová prasklina) [12]

Vyhodnocení zkoušky

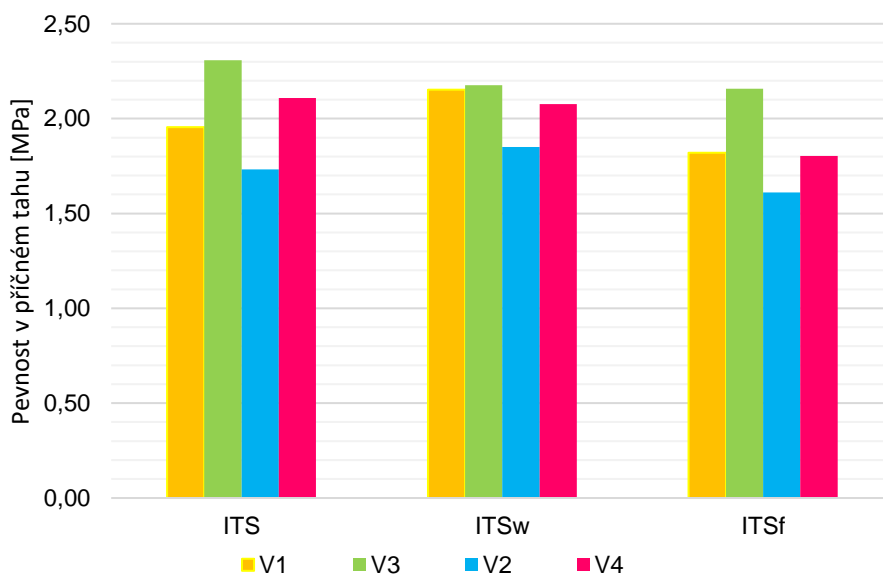
Odolnost vůči účinkům vody a mrazu byla stanovena na tělesech hutněných 2x25 úderů. Teoretickým předpokladem bylo, že přidáním R-materiálu se zvýší pevnost v příčném tahu a pravděpodobně se sníží odolnost vůči vodě a mrazu.

V následující tabulce (tab. 24) a grafu (graf 11) jsou shrnuty výsledky zkoušky, podrobnější výsledky jsou součástí přílohové části viz tab. 62.



Varianta a její specifikace		ITS	ITS _w	ITS _f	ITSR _w	ITSR _f
		[MPa]	[MPa]	[MPa]		
V1	ACO 11 S CCRB	1,96	2,15	1,82	110,1 %	93,1 %
V2	ACO 11 S CRmB V	1,73	1,85	1,61	106,9 %	93,0 %
V3	ACO 11 S 30 % RA CCRB	2,31	2,18	2,16	94,3 %	93,5 %
V4	ACO 11 S 30 % RA CRmB V	2,11	2,08	1,80	98,5 %	85,5 %

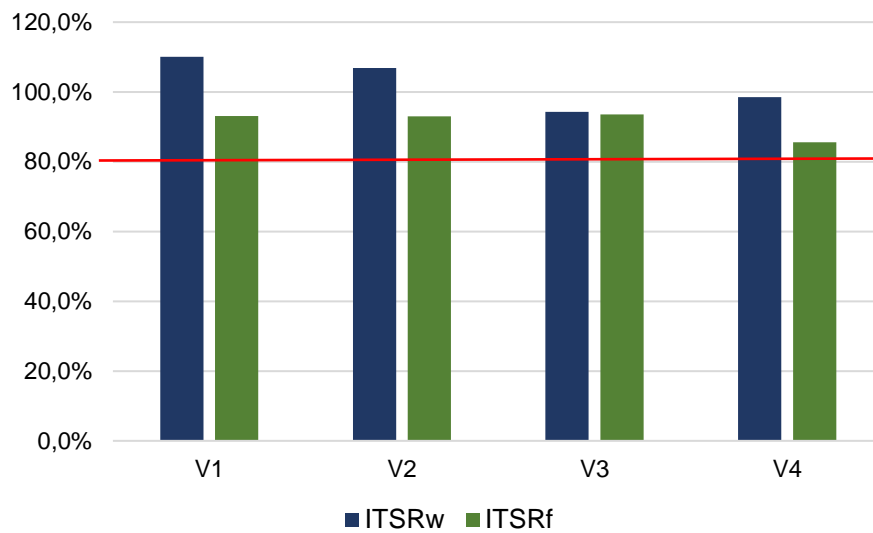
Tab. 24 – Odolnost vůči vlivu vody a mrazu



Graf 11 – Pevnost v příčném tahu

Pevnost v příčném tahu je dle předpokladu vyšší u variant s R-materiálem než u variant bez jeho přídavku, tedy $ITS_{V3} > ITS_{V1}$, stejně tak i $ITS_{V4} > ITS_{V2}$, a to nejvýrazněji u suchých tělese, přibližně o 20%, ale i u mokrých a zmrazených těles. Vyšších pevností dosahují směsi s CCRB, stejně jako tomu bylo u hodnot modulů tuhosti.

U variant 1 a 2 je vyšší pevnost u mokrých těles. To bude dáno skladbou zkušebních těles a zprůměrováním výsledků, voda nemá pozitivní vliv na pevnost v příčném tahu.



Graf 12 – Odolnost vůči vodě a mrazu vyjádřená v %

V grafu 12 jsou shrnuty odolnosti vůči vodě a mrazu jednotlivých směsí, vyjádřeny poměrem pevností v příčném tahu (ITSR). Požadavek minimální hodnoty ITSR alespoň 80 % všechny varianty splňují. Směsi obsahující R-materiál vykazují nižší odolnost vůči vodě (ITSR_w), ale stále jsou to hodnoty nad 93 %, což je dostačující. Pouze varianta 4 má odolnost vůči mrazu blízko limitní hranice, konkrétně 85,5 %.



6 Zhodnocení jednotlivých variant směsí

Zhodnocení směsí bude provedeno na základě jejich funkčních vlastností, ale i na základě ekonomické výhodnosti. Pro posouzení jednotlivých směsí z hlediska funkčních vlastností budou výsledky zkoušek vyhodnoceny dvěma způsoby – dle pořadí a pomocí funkce užitku.

6.1 Hodnocení dle pořadí

K naměřeným hodnotám jednotlivých zkoušek byly každé směsi přiřazeny body, 1 až 4, podle toho jak si, při které zkoušce vedla:

- první = 4 body
- druhý = 3 body
- třetí = 2 body
- čtvrtý = 1 bod

Například u zkoušky modulu tuhosti byly přiřazeny 4 body variantě směsi s nejvyšším modulem tuhosti a 1 bod variantě s nejnižším modulem tuhosti. [61]

	V1	V2	V3	V4
	ACO 11 S CCRB	ACO 11 S CRmB V	ACO 11 S 30 % RA CCRB	ACO 11 S 30 % RA CRmB V
Modul tuhosti				
E_0	2	1	4	3
E_{15}	2	1	4	3
E_{27}	1	2	4	3
E_{40}	1	2	4	3
E_0 / E_{40}	1	2	3	4
Odolnost vůči šíření trhlin				
K_{Ic}	3	2	4	1
G_f	4	3	1	2
Pevnost v tahu za ohybu				
R_{virgin}	2	1	4	3
R_{aged}	2	1	3	4
$E_{s,virgin}$	1	2	3	4
$E_{s,aged}$	1	3	2	4
Zkouška pojíždění kolem				
PRD_{AIR}	4	2	3	1
WTS_{AIR}	3	4	2	1
Pevnost v příčném tahu				
ITS	2	1	4	3
ITS_w	3	1	4	2
ITS_f	3	1	4	2

Tab. 25 – Hodnocení směsí dle pořadí - 1.část



Marshallova zkouška				
S/F	1	3	4	2
Odolnost vůči vodě a mrazu				
ITSR _w	4	3	1	2
ITSR _f	3	2	4	1
Výsledný počet bodů	43 b.	37 b.	62 b.	48 b.

Tab. 26 – Hodnocení směsi dle pořadí – 2.část

Na základě tohoto jednoduchého hodnocení vychází jako nejlepší možnost při výběru směsi varianta 3 s 61 body, jako nejhorší možná vychází varianta 2, tedy varianta s CRmB V a bez R-materiálu.

6.2 Hodnocení směsí pomocí funkce užitku

Hodnotou funkce užitku (U_{Vi}) bude každé variantě směsi přiřazen výsledný užitek neboli ohodnocení, který bude vyjádřen reálným číslem. Čím vyšší je hodnota užitku, tím vyšší preference varianta má, tedy vychází podle tohoto hodnocení jako nejlepší.

Hodnota užitkové funkce jednotlivých variant bude určena na základě součtu hodnot dílčích funkcí všech posuzovaných kritérií přenásobených váhou důležitosti dle následujícího vztahu:

$$U_{Vi} = \sum_{j=1}^n u_{ij} \times v_j$$

kde U_{Vi} ...celkový užitek i-té varianty

u_{ij} ...hodnota dílčí funkce užitku i-té varianty j-tého kritéria

v_j ...váha j-tého kritéria

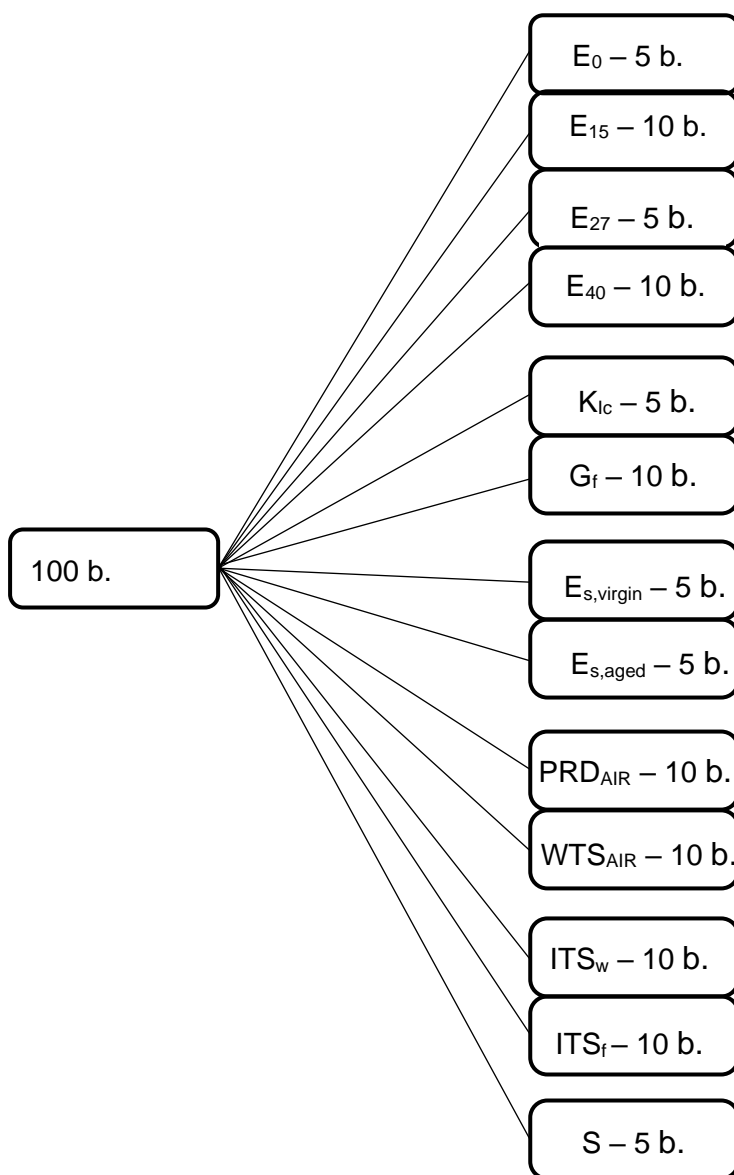
n ...počet kritérií

[62]

Průběh dílčí funkce užitku je uvažován lineární a je omezen na oborem hodnot $\langle 0;1 \rangle$ a definičním oborem $\langle x_{max}; x_{min} \rangle$. K extrémním užitkovým hodnotám jsou přiřazeny extrémní kritériální hodnoty, tedy $u_{x_{max}} = 1$ je pro nejlepší reálnou kritériální hodnotu a $u_{x_{min}} = 0$ je přiřazena nejhorší možné kritériální hodnotě, přičemž $u_{x_{max}}$ je vždy zvoleno jako 120 % maximální hodnoty a $u_{x_{min}}$ jako 80 % minimální hodnoty daného kritéria.

$$u_{ij} = u(x_{ij})$$

Váha jednotlivým kritériím byla přiřazena metodou alokace 100 bodů. Každému kritériu byly přiřazeny body dle jeho významnosti tak, aby celkový součet bodů byl rovný 100. Váha důležitosti jednotlivých kritérií byla uvažována následovně: [63]



Obr. 27 – Schéma rozdělení bodů jednotlivým kritériím

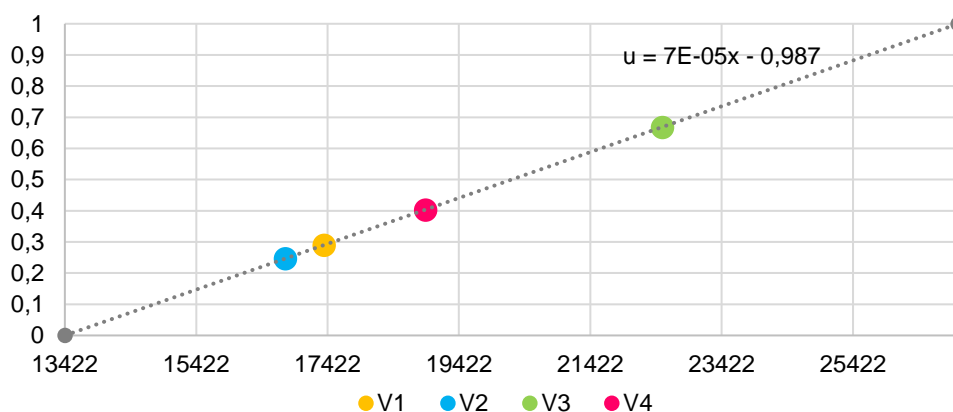
V následujících tabulkách (tab. 27 – tab. 39) jsou shrnuty dílčí užítky jednotlivých kritérií a na základě přiřazené váhy důležitosti jsou přepočteny celkové užítky U jednotlivých variant z hlediska daného kritéria.



Dílčí funkce užítku modulu tuhosti 0 °C:

		x	u		
80 % MIN		13422,9	0		
120 % MAX		27022,2	1		
modul tuhosti 0 °C		x [MPa]	u [-]	v [-]	U [-]
V1	ACO 11 S CCRB	17367,7	0,289	5	1,45
V2	ACO 11 S CRmB V	16778,7	0,246	5	1,23
V3	ACO 11 S 30 % RA CCRB	22518,5	0,668	5	3,34
V4	ACO 11 S 30 % RA CRmB V	18912,7	0,403	5	2,02

Tab. 27 – Dílčí funkce užítku modulu tuhosti 0 °C

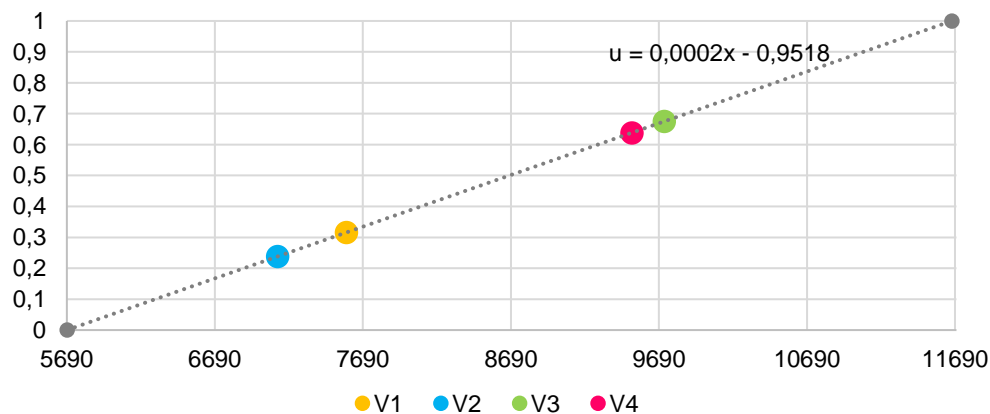


Graf 13 - Dílčí funkce užítku modulu tuhosti 0 °C

Dílčí funkce užítku modulu tuhosti 15 °C:

		x	u		
80 % MIN		5690,1	0		
120 % MAX		11668,6	1		
modul tuhosti 15 °C		x [MPa]	u [-]	v [-]	U [-]
V1	ACO 11 S CCRB	7577,1	0,316	10	3,16
V2	ACO 11 S CRmB V	7112,7	0,238	10	2,39
V3	ACO 11 S 30 % RA CCRB	9723,8	0,675	10	6,76
V4	ACO 11 S 30 % RA CRmB V	9505,8	0,639	10	6,39

Tab. 28 - Dílčí funkce užítku modulu tuhosti 15 °C



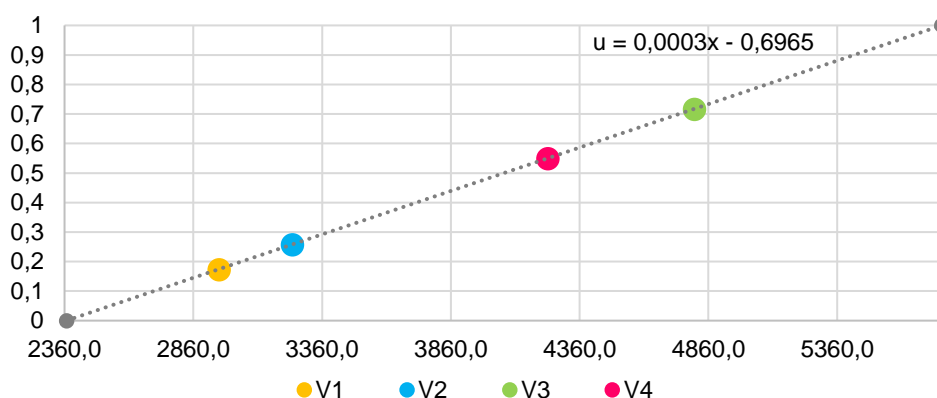


Graf 14 - Dílčí funkce užítku modulu tuhosti 15 °C

Dílčí funkce užítku modulu tuhosti 27 °C:

		x	u		
80 % MIN		2367,1	0		
120 % MAX		5765,8	1		
modul tuhosti 27 °C		x [MPa]	u [-]	v [-]	U [-]
V1	ACO 11 S CCRB	2958,8	0,173	5	0,87
V2	ACO 11 S CRmB V	3244,0	0,257	5	1,29
V3	ACO 11 S 30 % RA CCRB	4804,8	0,716	5	3,58
V4	ACO 11 S 30 % RA CRmB V	4236,2	0,549	5	2,74

Tab. 29 - Dílčí funkce užítku modulu tuhosti 27 °C

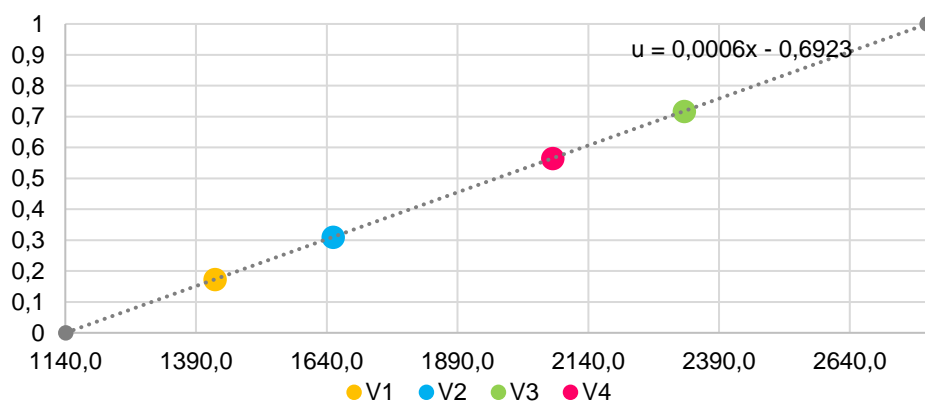


Graf 15 - Dílčí funkce užítku modulu tuhosti 27 °C

Dílčí funkce užítku modulu tuhosti 40 °C:

		x	u		
80 % MIN		2367,1	0		
120 % MAX		5765,8	1		
modul tuhosti 40 °C		x [MPa]	u [-]	v [-]	U [-]
V1	ACO 11 S CCRB	1425,7	0,173	10	1,73
V2	ACO 11 S CRmB V	1651,7	0,310	10	3,10
V3	ACO 11 S 30 % RA CCRB	2323,3	0,718	10	7,18
V4	ACO 11 S 30 % RA CRmB V	2071,5	0,565	10	5,65

Tab. 30 - Dílčí funkce užítku modulu tuhosti 40 °C



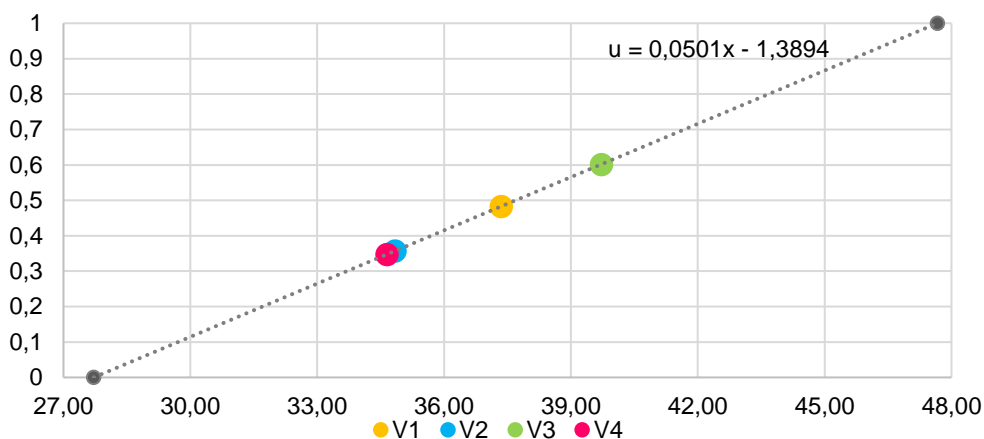
Graf 16 - Dílčí funkce užítku modulu tuhosti 40 °C



Dílčí funkce užítku lomové houževnatosti:

		x	u		
80 % MIN		27,72	0		
120 % MAX		47,66	1		
Lomová houževnatost K_{Ic}		x [N/mm ^{2/3}]	u [-]	v [-]	U [-]
V1	ACO 11 S CCRB	37,3	0,483	5	2,41
V2	ACO 11 S CRmB V	34,8	0,357	5	1,78
V3	ACO 11 S 30 % RA CCRB	39,7	0,602	5	3,01
V4	ACO 11 S 30 % RA CRmB V	34,6	0,347	5	1,74

Tab. 31 - Dílčí funkce užítku lomové houževnatosti

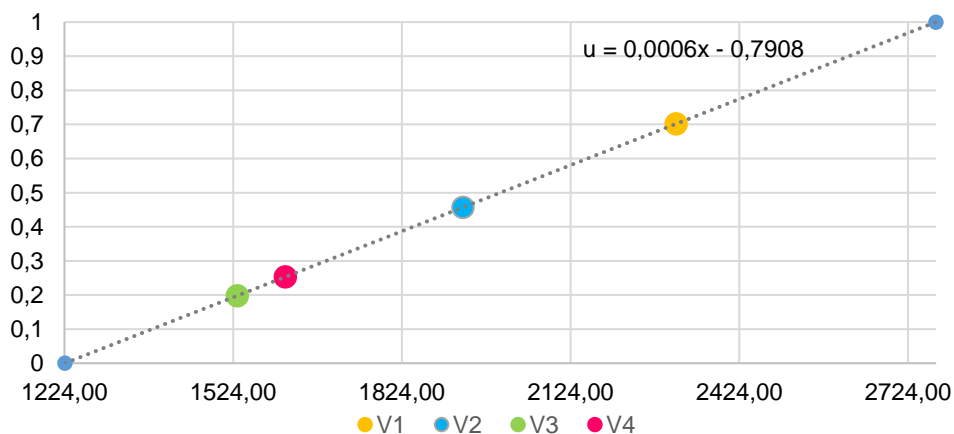


Graf 17 - Dílčí funkce užítku lomové houževnatosti

Dílčí funkce užítku celkové lomové energie:

		x	u		
80 % MIN		1224,81	0		
120 % MAX		2773,62	1		
Celková lomová energie G_f		x [J/m ²]	u [-]	v [-]	U [-]
V1	ACO 11 S CCRB	2311,4	0,702	10	7,02
V2	ACO 11 S CRmB V	1932,1	0,457	10	4,57
V3	ACO 11 S 30 % RA CCRB	1531,0	0,198	10	1,98
V4	ACO 11 S 30 % RA CRmB V	1616,5	0,253	10	2,53

Tab. 32 - Dílčí funkce užítku celkové lomové energie



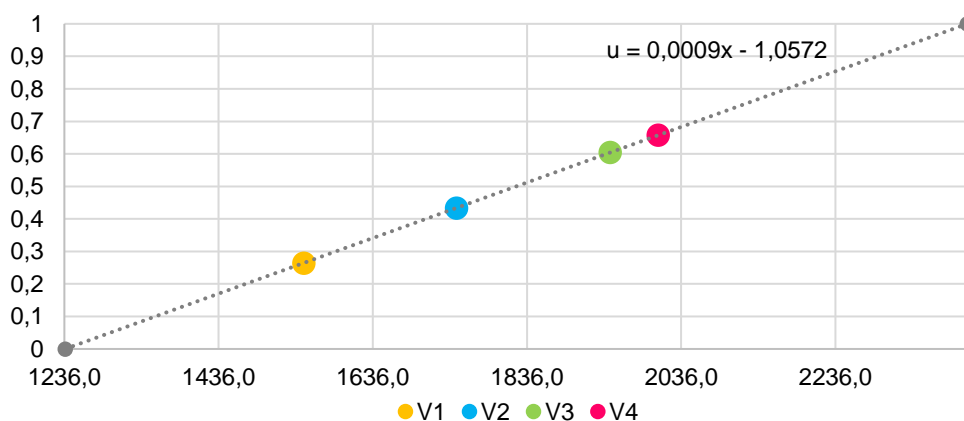
Graf 18 - Dílčí funkce užítku celkové lomové energie



Dílčí funkce užítka modulu tuhosti v tahu za ohybu - nezestárlý:

		x	u		
80 % MIN		1237,0	0		
120 % MAX		2407,0	1		
$E_{s,virgin}$		x [MPa]	u [-]	v [-]	U [-]
V1	ACO 11 S CCRB	1546,21	0,265	5	1,32
V2	ACO 11 S CRmB V	1744,26	0,434	5	2,17
V3	ACO 11 S 30 % RA CCRB	1943,73	0,605	5	3,02
V4	ACO 11 S 30 % RA CRmB V	2005,83	0,658	5	3,29

Tab. 33 - Dílčí funkce užítka modulu tuhosti v tahu za ohybu - nezestárlý

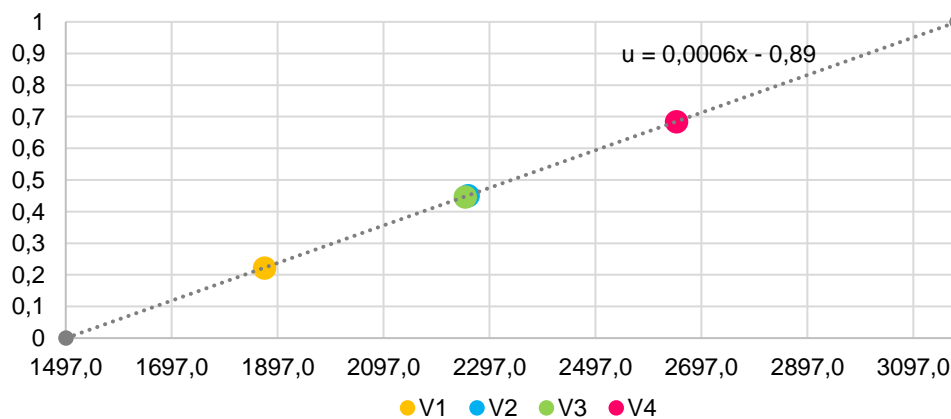


Graf 19 - Dílčí funkce užítka modulu tuhosti v tahu za ohybu - nezestárlý

Dílčí funkce užítka modulu tuhosti v tahu za ohybu - zestárlý:

		x	u		
80 % MIN		1497,5	0		
120 % MAX		3180,0	1		
$E_{s,aged}$		x [MPa]	u [-]	v [-]	U [-]
V1	ACO 11 S CCRB	1871,87	0,222	5	1,11
V2	ACO 11 S CRmB V	2256,47	0,450	5	2,25
V3	ACO 11 S 30 % RA CCRB	2250,75	0,447	5	2,23
V4	ACO 11 S 30 % RA CRmB V	2649,98	0,684	5	3,42

Tab. 34 - Dílčí funkce užítka modulu tuhosti v tahu za ohybu - zestárlý



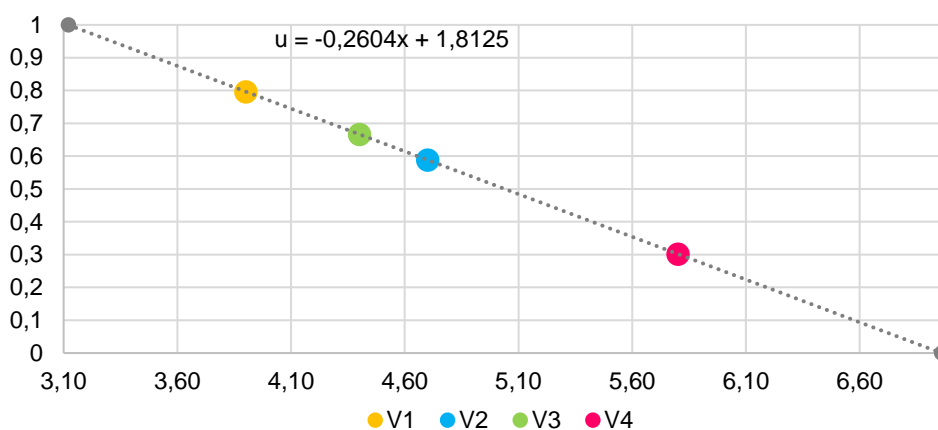
Graf 20 - Dílčí funkce užítka modulu tuhosti v tahu za ohybu - zestárlý



Dílčí funkce užítu průměrné hloubky vyjeté koleje:

		x	u		
80 % MIN		3,12	0		
120 % MAX		6,96	1		
PRD _{AIR}		x [%]	u [-]	v [-]	U [-]
V1	ACO 11 S CCRB	3,90	0,797	10	7,97
V2	ACO 11 S CRmB V	4,70	0,589	10	5,89
V3	ACO 11 S 30 % RA CCRB	4,40	0,667	10	6,67
V4	ACO 11 S 30 % RA CRmB V	5,80	0,302	10	3,02

Tab. 35 - Dílčí funkce užítu průměrné hloubky vyjeté koleje

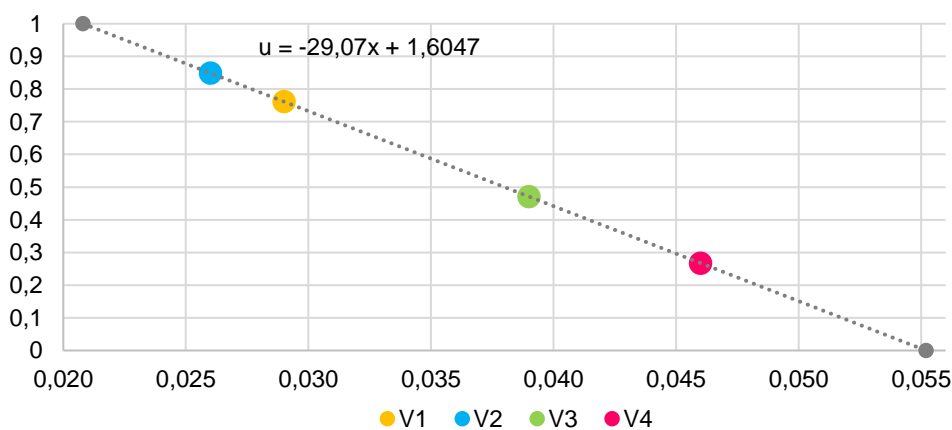


Graf 21 - Dílčí funkce užítu průměrné hloubky vyjeté koleje

Dílčí funkce užítu přírůstku hloubky vyjeté koleje:

		x	u		
80 % MIN		0,021	0		
120 % MAX		0,055	1		
WTS _{AIR}		x [mm/10 ³]	u [-]	v [-]	U [-]
V1	ACO 11 S CCRB	3,90	0,797	10	7,62
V2	ACO 11 S CRmB V	4,70	0,589	10	8,49
V3	ACO 11 S 30 % RA CCRB	4,40	0,667	10	4,71
V4	ACO 11 S 30 % RA CRmB V	5,80	0,302	10	2,67

Tab. 36 - Dílčí funkce užítu přírůstku hloubky vyjeté koleje



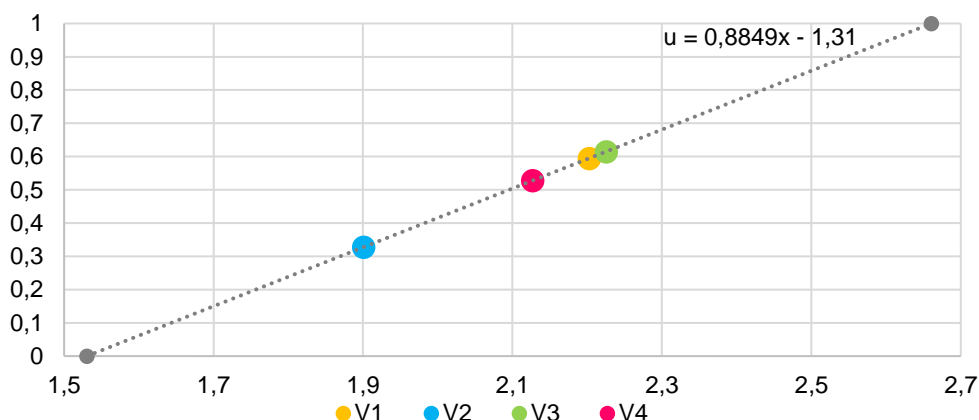
Graf 22 - Dílčí funkce užítu přírůstku hloubky vyjeté koleje



Dílčí funkce užítka pevnosti v příčném tahu mokré sady těles ITS_w :

		x	u		
80 % MIN		1,5	0		
120 % MAX		2,6	1		
ITS_w		x [MPa]	u [-]	v [-]	U [-]
V1	ACO 11 S CCRB	2,15	0,595	10	5,95
V2	ACO 11 S CRmB V	1,85	0,328	10	3,28
V3	ACO 11 S 30 % RA CCRB	2,18	0,615	10	6,15
V4	ACO 11 S 30 % RA CRmB V	2,08	0,528	10	5,28

Tab. 37 - Dílčí funkce užítka pevnosti v příčném tahu mokré sady těles

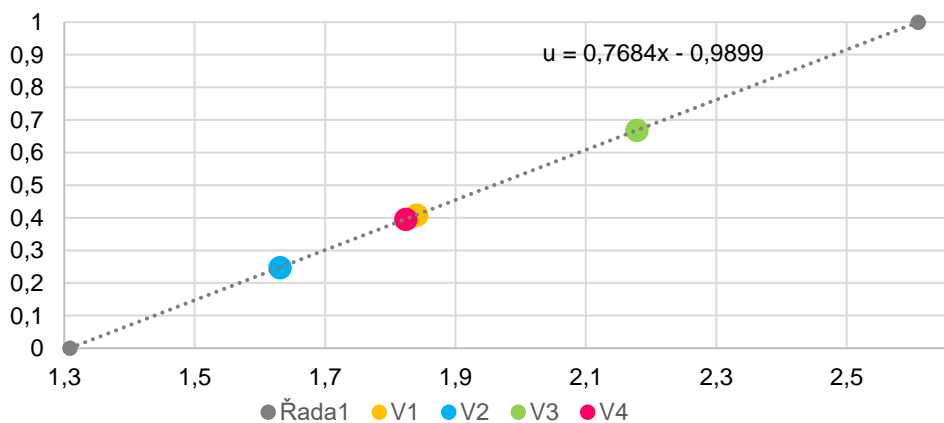


Graf 23 - Dílčí funkce užítka pevnosti v příčném tahu mokré sady těles

Dílčí funkce užítka pevnosti v příčném tahu zmrazené sady těles ITS_f :

		x	u		
80 % MIN		1,3	0		
120 % MAX		2,6	1		
ITS_f		x [MPa]	u [-]	v [-]	U [-]
V1	ACO 11 S CCRB	1,82	0,409	10	4,09
V2	ACO 11 S CRmB V	1,61	0,247	10	2,47
V3	ACO 11 S 30 % RA CCRB	2,16	0,668	10	6,68
V4	ACO 11 S 30 % RA CRmB V	1,80	0,396	10	3,96

Tab. 38 - Dílčí funkce užítka pevnosti v příčném tahu zmrazené sady těles



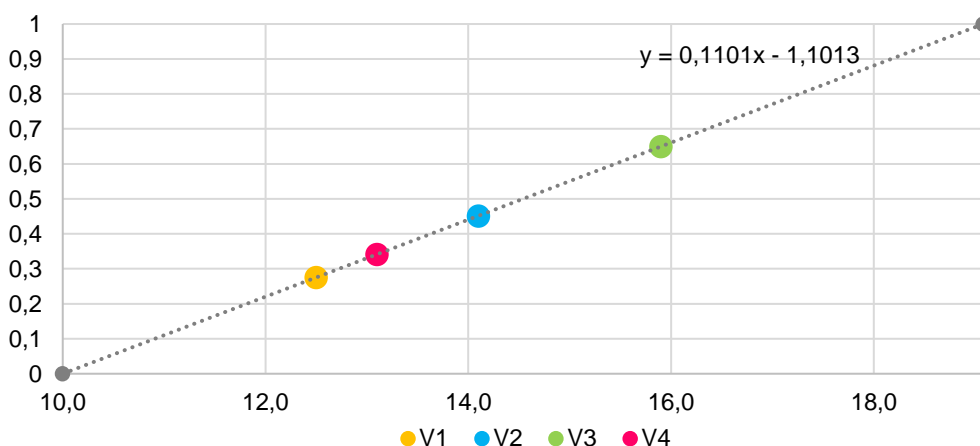
Graf 24 - Dílčí funkce užítka pevnosti v příčném tahu zmrazené sady těles



Díličí funkce užitku Marshallovy stability:

		x	u		
80 % MIN		10,00	0		
120 % MAX		19,08	1		
S		x [kN]	u [-]	v [-]	U [-]
V1	ACO 11 S CCRB	12,5	0,275	5	1,38
V2	ACO 11 S CRmB V	14,1	0,452	5	2,26
V3	ACO 11 S 30 % RA CCRB	15,9	0,650	5	3,25
V4	ACO 11 S 30 % RA CRmB V	13,1	0,341	5	1,71

Tab. 39 - Díličí funkce Marshallovy stability



Graf 25 - Díličí funkce Marshallovy stability

Výsledné hodnoty celkového užitku jednotlivých variant směsí jsou shrnuty v následující tabulce a dány součtem hodnot užitků U všech uvažovaných kritérií:

	V1	V2	V3	V4
	ACO 11 S CCRB	ACO 11 S CRmB V	ACO 11 S 30 % RA CCRB	ACO 11 S 30 % RA CRmB V
E_0	1,45	1,23	3,34	2,02
E_{15}	3,16	2,38	6,75	6,39
E_{27}	0,87	1,29	3,58	2,74
E_{40}	1,73	3,10	7,18	5,65
K_{Ic}	2,41	1,78	3,01	1,74
G_f	7,02	4,57	1,98	2,53
$E_{s,virgin}$	1,32	2,17	3,02	3,29
$E_{s,aged}$	1,11	2,25	2,23	3,42
PRD_{AIR}	7,97	5,89	6,67	3,02
WTS_{AIR}	7,62	8,49	4,71	2,67
ITS_w	5,95	3,28	6,15	5,28
ITS_f	4,09	2,47	6,68	3,96
S	1,38	2,26	3,25	1,71
$U_{Vi} = \sum U$	46,07	41,16	58,56	44,41

Tab. 40 – Vyhodnocení celkového užitku jednotlivých variant směsí



Na základě hodnocení pomocí funkce užítka jsou vychází jako nejlepší opět varianta 3 s hodnotou $U_{V3} = 58,41$. Při tomto hodnocení už mezi variantami nejsou tak velké rozdíly jako při hodnocení dle pořadí.

6.3 Ekonomické hledisko

Pro posouzení vhodnosti použití jednotlivých variant bylo zpracováno i ekonomické posouzení navržených směsí a dvou variant referenčních směsí. Referenční směsi jsou navrženy s celkovým obsahem pojiva 6,5 % hm. směsi. Jednotlivé ceny byly získány od výrobce asfaltové směsi a dodavatelů CRmB.

V1	ACO 11 S CCRB
V2	ACO 11 S CRmB V
V3	ACO 11 S 30 % RA CCRB
V4	ACO 11 S 30 % RA CRmB V
REF. 1	ACO 11 S 50/70
REF. 2	ACO 11 S 30 % RA 50/70 (rejuv.)

Tab. 41 – Uvažované směsi pro ekonomické posouzení

Cena CRmB V 12 700 Kč/t zahrnuje cenu za technologický proces samotné modifikace 5 500 Kč/t a cenu asfaltu 7 200 Kč/t. Cena CCRB 32 000 Kč/t je za hotovou přísadu. Cena R-materiálu je poměrně vysoká vzhledem k cenám nového kameniva, odvíjí se od jeho výkupní ceny. Pokud je R-materiál vykupován od ŘSD cena se pohybuje kolem 110 Kč/t, pokud od SÚS je výkupní cena cca 30 Kč/t. Tyto ceny jsou za surový materiál, který je nutné zpracovat, přetřídít, skladovat, proto se výsledná cena zvýší a pohybuje se kolem 300 Kč/t. Cena R-materiálu je v současnosti v ČR poměrně vysoká, a proto nejsou směsi s recyklovaným materiálem pro investory atraktivní a raději vsadí na jistotu nové směsi. Například v Německu je znovuzískaný materiál poskytován za symbolickou cenu nebo dokonce bezúplatně, ve Švédsku poskytují bonus na směsi obsahující alespoň 10 % R-materiálu. V následujících tabulkách (tab. 42, tab. 43) je rozepsáno složení potřebné pro výrobu 1 t směsi, ceny jednotlivých vstupních materiálů a výsledná cena směsí za 1 t. [64]

vstupní materiály		V1		V2		V3		V4	
		kg	Kč	kg	Kč	kg	Kč	kg	Kč
8/11	435 Kč/t	296,0	128,8	296,0	128,8	259,0	112,7	259,0	112,7
4/8	435 Kč/t	296,0	128,8	296,0	128,8	251,6	109,4	251,6	109,4
0/4	205 Kč/t	203,5	41,7	203,5	41,7	80,5	16,5	80,5	16,5
0/2	150 Kč/t	111,0	16,7	111,0	16,7	-	-	-	-
filer	725 Kč/t	18,5	13,4	18,5	13,4	50,9	36,9	50,9	36,9
R-mat	300 Kč/t	-	-	-	-	300,0	90,0	300,0	90,0
50/70	7200 Kč/t	51,4	388,8	-	-	34,4	267,2	-	-
CRmB V	12700 Kč/t	-	-	75,0	952,5	-	-	58,1	738,1
CCRB	32000 Kč/t	23,6	672,0	-	-	23,6	672,0	-	-
rejuv.	35 Kč/l	-	-	-	-	-	-	-	-
Cena za 1 t směsi		1 455 Kč		1 282 Kč		1 368 Kč		1 104 Kč	

Tab. 42 – Ceny směsí 1.část



vstupní materiály		REF. 1		REF. 2	
		kg	Kč	kg	Kč
8/11	435Kč/t	196,4	85,4	174,8	76,1
4/8	435 Kč/t	299,2	130,2	177,8	77,3
0/4	205 Kč/t	374,0	76,7	252,6	51,8
0/2	150 Kč/t	-	-	-	-
filer	725 Kč/t	65,5	47,5	46,8	33,9
R-mat	300 Kč/t	-	-	300,0	90,0
50/70	7200 Kč/t	65,0	468,0	48,1	346,5
CRmB V	15700 Kč/t	-	-	-	-
CCRB	32000 Kč/t	-	-	-	-
rejuv.	35 Kč/l	-	-	1,18	41,3
Cena za 1 t směsi		808 Kč		717 Kč	

Tab. 43 – Ceny směsí 2.část

Cenový rozdíl ve směsích s CCRB není velký (V1 vs. V3), jelikož množství nejdražšího vstupního materiálu CCRB je stejné, a tedy i stupeň modifikace obou směsí je stejný. Směsi s CRmB V jsou cenově přívětivější než směsi s CCRB, především varianta s R-materiálem, jejíž cena je 1 104 Kč/t. Směsi s asfaltem gradace 50/70 jsou na 1 tunu směsi znatelně levnější.

Nynějším trendem je především snížení potřeby oprav, nákladů na údržbu. Vozovky se u nás navrhují s životností 25 let. U obrusné vrstvy se uvažuje trvanlivost 8 let a poté je obvykle nutná její výměna, tedy během životnosti vozovky je vyměněna 3x a poté ještě znovu, po čtvrté položena v rámci celkové rekonstrukce. Vrstvy ze směsí modifikovaných pryžovým granulátem jsou veřejně známé vyšší trvanlivostí, budeme-li uvažovat jejich trvanlivost jen o rok vyšší, už se dostáváme na nutnost údržby v podobě výměny této vrstvy pouze 2x během 25letého cyklu (viz tab. 45). Pro představu je potřebné množství a celková cena demonstrována na teoretickém příkladu, ve kterém je uvažován 1 km dlouhý úsek silnice S 11,5/90, tedy zpevněná plocha je šířky 10 m a tloušťka obrusné vrstvy 4 cm (viz tab. 44).

zpevněná šířka komunikace	10 m
délka úseku 1 km	1000 m
tloušťka vrstvy 4 cm	0,04 m
objem potřebného materiálu	400 m ³
uvažovaná objemová hmotnost směsi	2 400 kg/m ³
množství potřebného materiálu	960 000 kg

Tab. 44 – Množství směsi na 1 km silnice S 11,5/90



směs	cena za 1 km S 11,5/90	množství využitého R-materiálu	množství využité pryže	počet oprav během	množství směsi pro údržbu	cena za údržbu	celkové náklady na obrusnou vrstvu
	[tis. Kč]	[t]	[t]	[-]	[t]	[tis. Kč]	[tis. Kč]
V1	1 396,4	0	11,136	2,0	1920	2 792,7	4189,2
V2	1 230,5	0	10,848	2,0	1920	2 461,1	3691,6
V3	1 313,6	288	11,136	2,0	1920	2 627,3	3940,9
V4	1 059,5	288	8,352	2,0	1920	2 118,9	3178,4
REF. 1	775,4	0	0	3,0	2880	2 326,1	3101,5
REF. 2	688,1	288	0	3,0	2880	2 064,4	2752,5

Tab. 45 – Spotřeba materiálu a cena během 25letého cyklu pro obrusnou vrstvu na teoretickém úseku

Je zřejmé, že s přihlédnutím k nutné údržbě, se díky vyšší trvanlivosti modifikované směsi pryžovým granulátem stávají konkurenceschopnými. Navíc se samotnou pokládku těchto směsí zpracuje cca 11 t pryžového granulátu. Jedna pneumatika osobního automobilu průměrně váží 7 kg a obsahuje z 80 % své hmotnosti pryž, tj. 5,6 kg pryže ke zpracování, tudíž se využitím směsi s pryžovým granulátem zpracuje přibližně 1965 odpadních pneumatik. A navíc při použití směsi s R-materiálem se ještě uspoří 288 t surovinových zdrojů. [2]

Pokud by byla uvažována trvanlivost směsí s pryžovým granulátem o 2 roky vyšší, tedy 10 let, bylo by vhodné uvažovat 30letý životní cyklus vozovky. Výměna obrusné vrstvy v rámci údržby by proběhla za toto období 2x a přesně po 30 letech by se provedla rekonstrukce celé vozovky. Obrusná vrstva z klasické směsi by musela být vyměněna za toto období 4x viz tab. 46.

směs	cena za 1 km S 11,5/90	množství využitého R-materiálu	množství využité pryže	počet oprav během	množství směsi pro údržbu	cena za údržbu	celkové náklady na obrusnou vrstvu
	[tis. Kč]	[t]	[t]	[-]	[t]	[tis. Kč]	[tis. Kč]
V1	1 396,4	0	11,136	2,0	1920	2792,8	4189,2
V2	1 230,5	0	10,848	2,0	1920	2461,1	3691,6
V3	1 313,6	288	11,136	2,0	1920	2627,3	3940,9
V4	1 059,5	288	8,352	2,0	1920	2118,9	3178,4
REF. 1	775,4	0	0	4,0	3840	3101,5	3876,9
REF. 2	688,1	288	0	4,0	3840	2752,5	3440,7

Tab. 46 – Spotřeba materiálu a cena během 30letého cyklu pro obrusnou vrstvu na teoretickém úseku

V tabulkách 45 a 46 jsou uvedeny celkové náklady na obrusnou vrstvu za návrhové období. Je vidět, že díky vyšší trvanlivosti se celková cena modifikovaných směsí vyrovná ceně směsí s klasickým asfaltem, zároveň se ušetří i na samotné realizaci údržby.



7 Závěr

Cílem této práce bylo zhodnotit vliv R-materiálu na směsi modifikované pryžovým granulátem, proto byly vyrobeny 4 varianty směsí za využití dvou různých metod modifikace, a to použitím CRmB V (modifikovaného pojiva tzv. „mokrou cestou“) a použitím modifikační přísady CCRB (modifikování asfaltové směsi suchou cestou). Specifikace jednotlivých variant viz kap. 5.2 tab. 8 a tab. 9. Předpokladem bylo, že směsi s R-materiálem budou dosahovat vyšších tuhostí i pevností, v důsledku obsahu zestárlého pojiva. Otázkou bylo, zda budou dobře fungovat i při vyšších teplotách, neprojeví-li se u nich vyšší teplotní citlivost a jak si povedou ve zkoušce pojíždění kolem a ve zkoušce odolnosti vůči vodě a mrazu.

Všechny navržené varianty směsí vykazují vyšší moduly tuhosti při vyšší teplotách, což potvrzuje pozitivní vliv pryžového granulátu ve směsi a jejich hlavní výhodu oproti směsím s polymerem modifikovanými pojivy. Směsi s R-materiálem (V3, V4) dosahovaly vyšších tuhostí než směsi bez R-materiálu (V1, V2).

Výsledky SCB testu (odolnost vůči šíření mrazové trhliny) korespondují s hodnotami modulů tuhosti – tužší směsi mají i větší lomovou houževnatost. Pouze varianta 4 obsahující R-materiál a CRmB V, toto tvrzení nepotvrzuje, její lomová houževnatost je srovnatelná s lomovou houževnatostí varianty 2. Obě varianty s R-materiálem jsou výrazně křehčí i přesto, že V3 obsahuje stejné množství pryžového granulátu jako V1, tudíž stupeň modifikace je u těchto variant stejný.

Pevnost i modul tuhosti v tahu za ohybu se také přidáním R-materiálu zvýšily, vliv stárnutí je mírný, lehce výraznější u varianty 2 (viz kap. 5.8 graf 9). Vliv stárnutí u těchto směsí by bylo dobré prověřit dalšími měřeními.

K tvorbě trvalých deformací byly náchylnější směsi s R-materiálem (varianta V4 dokonce nevyhověla požadavkům TP 148). Odolnost vůči tvorbě trvalých deformací je s největší pravděpodobností ovlivněna sníženou mezerovitostí těchto směsí (V3 – 2 %, V4 – 2,5 %). Požadavek na odolnost vůči vodě i mrazu všechny směsi splnily.

Na základě jednotlivých výsledků zkoušek je možné tvrdit, že směsi s R-materiálem nejsou kvalitativně horší než směsi bez něj. Často vykazují dokonce lepší hodnoty některých parametrů. Z provedených zkoušek je zřejmé, že použití CCRB vedlo k lepším mechanicko-fyzikálním vlastnostem. CCRB obsahuje kvalitní pryžový granulát, v jehož složení převažuje přírodní devulkanizovaný kaučuk.

Podle celkového hodnocení směsí, ať už jednoduchého dle pořadí nebo složitějšího pomocí funkce užítku je zřejmé, že využívání R-materiálu při výrobě nových směsí neznamena snížení kvality. Určitě je důležité se při návrhu takovýchto směsí zaměřit na ověření funkčních vlastností jako je křehkost nebo odolnost vůči trvalým deformacím. U směsí modifikovaných pryžovým granulátem je důležité dbát na dodržení požadovaného stupně modifikace, to jde nejlépe použitím koncentrátu asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem (CCRB) viz kap. 5.2 (tab. 10 – tab. 13), kde je zřejmé, že směs bez R-materiálu i směs s R-materiálem obsahuje totožné množství pryžového granulátu, čehož použitím CRmB nelze docílit.



Z ekonomického hlediska je zřejmé, že počáteční náklady na směsi s CRmB V či CCRB jsou vyšší než na směsi se silničním asfaltem. Je ale důležité uvědomit si, že vrstva z modifikované směsi má predispozici vyšší trvanlivosti, tedy i menších nákladů na údržbu (viz tab.45 a tab.46). Zároveň konkrétně u směsi s pryžovým granulátem dojde ke zpracování velkého množství druhotných surovin (odpadních pneumatik). Navíc se cena silničního asfaltu stále zvyšuje a do budoucna se bude s největší pravděpodobností dále zvyšovat, cena pryžového granulátu nejspíše strmě neporoste (není to surovina, jejíž zásoby by měli začít docházet), a proto se jednotkové vstupní ceny CRmB, příp. CCRB budou v budoucnu přibližovat cenám klasického silničního asfaltu 50/70.

Obecně si myslím, že výroba směsí obsahující kombinaci R-materiálu a pryžového granulátu je do budoucna nejvstřícnějším krokem k životnímu prostředí a k udržitelnému vývoji silničního stavitelství. Zpracují se tak dvě druhotné suroviny, kterých i do budoucna bude stále obrovské množství, k výrobě nové asfaltové směsi, bez negativního vlivu na její funkční vlastnosti. Vzhledem k současnému postoji investorů a ceně R-materiálu je nasnadě, tento produkt ekonomicky zvýhodnit (po vzoru západních zemí – Německa, Švédska).



8 Bibliografie

- [1] SKLENÁŘ, Jan. *Vliv přípravy zkušebních těles a zabudování geomříže na nízkoteplotní charakteristiky asfaltové směsi*. Brno, 2014. Bakalářská práce. VUT v Brně, Fakulta stavební, ústav pozemních komunikací.
- [2] DAŠEK, Ondřej. *Uplatnění pryžového granulátu v asfaltových pojivech a hutněných asfaltových směsích*. Brno, 2013. Disertační práce. VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací.
- [3] Bressi, Sara & Fiorentini, Nicholas & Huang, Jiandong & Losa, Massimo. (2019). *Crumb Rubber Modifier in Road Asphalt Pavements: State of the Art and Statistics*. *Coatings*. 9. 384. 10.3390/coatings9060384. [online] [cit. 13.11.2020], Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/333763733_Crumb_Rubber_Modifier_in_Road_Asphalt_Pavements_State_of_the_Art_and_Statistics.
- [4] Lo Presti, Davide. (2013). *Recycled Tyre Rubber Modified Bitumens for road asphalt mixtures: A literature review*. *Construction and Building Materials*. 49. 10.1016/j.conbuildmat.2013.09.007. [online] [cit. 13.11.2020], Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/257196093_Recycled_Tyre_Rubber_Modified_Bitumens_for_road_asphalt_mixtures_A_literature_review.
- [5] *Recyklace pneumatik*. [online]. [cit. 29.11.2020] Dostupné z: <https://www.arcon-environmental.cz/getattachment/16761ee9-0ed0-49f5-9fde-968aa0c9acaf/Tyre-recycling-brochure.pdf>.
- [6] *Tyre recycling system solutions* [online] [cit. 29.11.2020] Dostupné z: <https://eldan-recycling.com/en/tyre-recycling-system-solutions>.
- [7] ČSN 65 7222-2 *Asfalty a asfaltová pojiva - Silniční modifikované asfalty - Část 2: Asfalty modifikované pryžovým granulátem*. 2018.
- [8] TP 148. *Hutněné asfaltové vrstvy s asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem*. Konečné znění 2011 - neschváleno.
- [9] VALENTIN, Jan. *Nízkoteplotní asfaltové směsi, nízkohlučné asfaltové směsi, využití CRMB*. [online] *Konference - Asfaltové vozovky 2013*. [cit. 10.1.2021] dostupné z: <https://www.asfaltove-vozovky.cz/av2013/data/tema3-valentin.pdf>.
- [10] ČSN 73 6120 *Stavba vozovek - Ostatní asfaltové vrstvy - Provádění a kontrola shody*. Předběžné znění 25.4.2020.
- [11] BURÁŇ, František. *Upřesnění základních pojmů k technologii gumo-asfaltových koncentrátů: emailová konverzace*. 2020.
- [12] Kovačová, Aneta: *Vlastní fotodokumentace*, Praha. 2020.



- [13] CTS GRM - Modifizierung von Straßenbaubitumen und Asphalt. [online] [cit. 27.11.2020] Dostupné z: <https://www.cts-bitumen.de/produkte/cts-grm>.
- [14] Zkušenosti s použitím technologie modifikace asfaltu pryžovým granulátem (CRmB) v praxi na silnicích v Pardubickém kraji [online]] [cit. 6.12.2020] Dostupné z: <http://old.silnice-zeleznice.cz/clanek/zkusenosti-s-pouzitim-technologie-modifikace-asfaltu-pryzovym-granulatem-crmb-v-praxi-na-silnicich-v-pardubickem-kraji/>.
- [15] BURÁŇ, František. Zlepšování vlastností asfaltových směsí s pomocí nových suchých granulátů. [online]. RDIT 2017, 18.10.2017, Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební. [cit. 13.11.2020], Dostupné z: <http://files.rdit.cz/200000443-1169a125bf/RDIT%202017%20-%20Sborn%C3%ADk.pdf>.
- [16] JEVÍNOVÁ, Alexandra. Nové světové poznatky s využitím asfaltů modifikovaných pryžovým granulátem. Brno,, 2016. Bakalářská práce. VUT v Brně, Fakulta stavební, ústav pozemních komunikací.
- [17] Revitalizace cementobetonových krytů vozovek technologií překryvných asfaltových vrstev [online] [cit. 31.12.2020] Dostupné z: https://www.asfaltove-vozovky.cz/av2015/data/prezentace/t1-1_bures.pdf.
- [18] VALENTIN, Jan. Silniční stavby 4, přednáška. Recyklace asfaltových vozovek. 2020.
- [19] HÝZL, Petr. ČSN 73 6141 Požadavky na použití R-materiálu do asfaltových směsí. 2019. [online] [cit. 3.12.2020] Dostupné z: <https://www.sdruzeni-silnice.cz/Odborne-akce-cln294.aspx>.
- [20] ŠEVČÍK, Pavel. Revize ČSN 73 6121 - změny v použití asfaltových pojiv a zvýšení limitů pro používání R-materiálu. 2019. [online] [cit. 3.12.2020] Dostupné z: <https://www.sdruzeni-silnice.cz/Odborne-akce-cln294.aspx>.
- [21] VALENTIN, Jan. Vyhláška k opětovnému použití znovuzískané asfaltové směsi. 2019. [online] [cit. 3.12.2020] Dostupné z: <https://www.sdruzeni-silnice.cz/Odborne-akce-cln294.aspx>.
- [22] Vyhláška č.1330/2019 Sb., o kritériích, při jejichž splnění je asfaltová směs vedlejším produktem nebo přestává být odpadem. [online] [cit. 4.12.2020] Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2019-130>.
- [23] ČSN 73 6141 Požadavky na použití R-materiálu do nově vyráběných asfaltových směsí. 2020.
- [24] TP 210. Užití recyklovaných stavebních demoličních materiálů do pozemních komunikací. 2011.
- [25] ZAJÍČEK, Jan a kolektiv: Technologie stavby vozovek, Praha: Informační centrum ČKAIT 2014, ISBN 978-80-87438-59-6.



- [26] ČSN EN 13108-8 ed. 2 - *Asfaltové směsi - Specifikace pro materiály - Část 8: R-materiál*. 2017.
- [27] ZAJÍČEK, Jan & STEHLÍK, Dušan. *Recyklace na místě*. 2019. [online] [cit. 16.12.2020] Dostupné z: <https://www.sdruzeni-silnice.cz/Odborne-akce-cln294.aspx>.
- [28] ŽIŽKA, Tomáš. *Frézování vozovek pozemních komunikací*. Brno, 2018. *Bakalářská práce*. VUT v Brně, Fakulta stavební, ústav pozemních komunikací.
- [29] *Při recyklaci asfaltových směsí musí být v souladu celý řetězec jednotlivých procesů* [online]. [cit. 18.12.2020] Dostupné z: <https://www.silnice-mosty.cz/1198-pri-recyklaci-asfaltovych-smesi-musi-byt-v-souladu-cely-retezec-jednotlivych-procesu/>.
- [30] CHMELÍKOVÁ, Monika. *Nízkoteplotní asfaltové směsi s vyšším obsahem R-materiálu*. Praha, 2018. *Diplomová práce*. ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra silničních staveb.
- [31] TP 209. *Recyklace asfaltových vrstev netuhých vozovek na místě za horka*. 2009.
- [32] *Recyklace za horka na místě*. [frekomos.cz](http://www.frekomos.cz) [online] [cit. 14.12.2020] Dostupné z: http://www.frekomos.cz/domains/1/users/produkty/horka_recyklace_frekomos_web.pdf.
- [33] *Asphalt Recycling*. [online] [cit. 13.12.2020] Dostupné z: <http://www.aapaq.org/q/qbspp2014p/notes-PDF/BSPP-2014Q-sec07b-Recycling-v2012-docx.pdf>.
- [34] *Asphalt mixing plants*. [online] [cit. 13.12.2020]. Dostupné z: <http://www.aapaq.org/q/qbspp2014p/notes-PDF/BSPP-2014Q-sec07a-Asphalt-mixing-plants-v2010-docx.pdf>.
- [35] VARAUS, Michal. *Recyklace netuhých vozovek - úvod do problematiky*. 2019. [online] [cit. 11.12.2020] Dostupné z: <https://www.sdruzeni-silnice.cz/Odborne-akce-cln294.aspx>.
- [36] *Environmental Guidelines on Best Available Techniques (BAT) for the Production of Asphalt Paving Mixes*. 2007. [online] [cit. 16.12.2020], Dostupné z: [https://www.semanticscholar.org/paper/Environmental-Guidelines-on-Best-Available-\(-BAT-\)/7701ef8c7f55da75e9a73774b303747b876d4c20](https://www.semanticscholar.org/paper/Environmental-Guidelines-on-Best-Available-(-BAT-)/7701ef8c7f55da75e9a73774b303747b876d4c20).
- [37] *Nová obalovna Herink - první svého druhu v ČR*. [online] [cit. 6.1.2020] Dostupné z: <https://silnice-zeleznice.cz/stavebni-materialy/nova-obalovna-herink-prvni-sveho-druhu-v-cr-359>.



- [38] *Zaumanis, Martins & Mallick, Rajib B. & Frank, Robert. (2014). 100% recycled hot mix asphalt: A review and analysis. [online] [cit. 6.1.2020] Dostupné z: <http://raptech.us/library/Zaumanis-100-recycled-hot-mix-asphalt.pdf>.*
- [39] *TP 148. Hutněné asfaltové vrstvy s asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem z pneumatik. 2009.*
- [40] *ČSN 73 6121 Stavba vozovek - Hutněné asfaltové vrstvy - Provádění a kontrola shody. 2019.*
- [41] *TP 151 - Asfaltové směsi s vysokým modulem tuhosti (VMT). 2010.*
- [42] *ČSN EN 933-1 Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 1: Stanovení zrnitosti - Síťový rozbor. 2012.*
- [43] *ČSN EN 12697-1 Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 1: Obsah rozpustného pojiva. 2020.*
- [44] *ČSN EN 12697-35 Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 35: Laboratorní výroba směsi. 2018.*
- [45] *ČSN EN 12697-30 Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem. 2020.*
- [46] *ČSN EN 12697-33 - Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 33: Příprava zkušebních těles zhutňovačem desek. 2020.*
- [47] *ČSN EN 12697-29 Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 29: Stanovení rozměrů asfaltových zkušebních těles. 2020.*
- [48] *ČSN EN 12697-6 Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa. 2020.*
- [49] *ČSN EN 12697-5 Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti. 2020.*
- [50] *ČSN EN 12697-8 Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 8: Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí. 2020.*
- [51] *ČSN EN 12697-26 Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 26: Tuhost. 2019.*
- [52] *ČSN EN 12697-44 Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 44: Šíření trhliny zkouškou ohybem na půlválcovém zkušebním tělese. 2019.*
- [53] *VALENTIN, Jan & MONDSCHHEIN, Petr. Norma ČN 73 6120. 2020. [online] [cit. 8.12.2020] Dostupné z: <https://www.sdruzeni-silnice.cz/Odborne-akce-cln294.aspx>.*
- [54] *VACKOVÁ, Pavla. Výzkum a zhodnocení vybraných vlastností ovlivňujících životnost asfaltových vozovek. Praha, 2020. Disertační práce. ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra silničních staveb.*



- [55] ČSN EN 12697-22 *Asfaltové směsi - Zkušební metody Část 22: Zkouška pojíždění kolem. 2020.*
- [56] ČSN EN 12697-34 *Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 34: Marshallova zkouška. 2020.*
- [57] ČSN 73 6121 *Stavba vozovek, Hutněné asfaltové směsi. 1994.*
- [58] ČSN EN 12697-12 *Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 12: Stanovení odolnosti zkušebního tělesa vůči vodě. 2020.*
- [59] *AASHTO T-283. Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage. 2014.*
- [60] ČSN EN 12697-23 *Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 23: Stanovení pevnosti v příčném tahu. 2018.*
- [61] ŠAMS, Ondřej. *Hodnocení výkonosti vláken v asfaltových směsích. Praha, 2020. Bakalářská práce. ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra silničních staveb.*
- [62] DOUBRAVOVÁ, Hana. *Vícekritériální analýza variant a její aplikace v praxi. České Budějovice, 2009. Diplomová práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Ekonomická fakulta, Katedra aplikované matematiky a informatiky.*
- [63] OLIVKOVÁ, Ivana. *Aplikace metod vícekritériálního rozhodování při hodnocení kvality veřejné dopravy. [online] [cit. 6.1.2020] Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/328170596.pdf>.*
- [64] SPIES, Karel. *Asfaltová směs pro obrusné vrstvy se zvýšeným obsahem R-materiálu. Brno, 2019. VUT v Brně, Fakulta stavební, ústav pozemních komunikací.*



9 Seznam obrázků

Obr. 1 – Chování pryže [2].....	10
Obr. 2 – Schéma recyklační linky [6].....	11
Obr. 3 – Pryžový granulát vyrobený vícenásobným mletím (vlevo) a kryogenním drcením (vpravo) [4].....	11
Obr. 4 – Schéma výroby CRmB v blendru [9]	13
Obr. 5 – Granule CCRB (vlevo) [11] prášek CCRB (vpravo) [12]	13
Obr. 6 – Schéma zpracování pryžového granulátu do asfaltu a asfaltových směsí [2]	15
Obr. 7 - Schéma remixeru při technologii remix plus [32].....	22
Obr. 8 – Schéma před a po recyklaci za horka in-situ [33]	23
Obr. 9 – Šaržová obalovna – studené dávkování R-materiálu [36].....	24
Obr. 10 – Šaržová obalovna – dávkování předeřátého R-materiálu [36]	25
Obr. 11 – Schéma recyklačního bubnu [38]	26
Obr. 12 – Pražská obalovna Herink [37]	26
Obr. 13 – Schéma typické kontinuální obalovny – dávkování po proudu horkého vzduchu [34]	27
Obr. 14 – Schéma bubnu kontinuální obalovny – dávkování proti proudu horkého vzduchu [34]	27
Obr. 15 – Schéma Double Drum-mix [34]	28
Obr. 16 – Válcová tělesa hutněna 2x25 údery (vlevo) a 2x75 údery (vpravo) [12]...37	37
Obr. 17 – Lamelový zhutňovač – výroba desek	37
Obr. 18 – Směs kameniva a částice pryže po extrakci pojiva [12].....	41
Obr. 19 – Těleso upevněné v rámečku – zkouška IT-CY [12]	43
Obr. 20 – Zatěžování půlválcového zkušební tělesa [12]	46
Obr. 21 – Ověřování platnosti výsledků [12].....	48
Obr. 22 – Zkušební těleso po SCB testu [12]	49
Obr. 23 – Schéma zkoušky – tříbodový ohyb [53].....	51
Obr. 24 – Mále zkušební zařízení pro zkoušku pojiždění kolem [12].....	54
Obr. 25 – Deska po zkoušce pojiždění kolem – viditelná vyjetá kolej.....	56
Obr. 26 – Stanovení ITS – před a po zatížení (viditelná tahová prasklina) [12]	59
Obr. 27 – Schéma rozdělení bodů jednotlivým kritériím	64
Obr. 28 – Protokol zkoušky pojiždění kolem – varianta 1	101



Obr. 29 - Protokol zkoušky pojíždění kolem – varianta 2.....	102
Obr. 30 - Protokol zkoušky pojíždění kolem – varianta 3.....	103
Obr. 31 - Protokol zkoušky pojíždění kolem – varianta 4.....	104

10 Seznam tabulek

Tab. 1 – Požadované vlastnosti CRmB dle TP 148 [8].....	12
Tab. 2 – Kvalitativní třídy ZAS dle obsahu PAU [22]	18
Tab. 3 – Nejvyšší přípustný obsah R-materiálu v % hmotnosti asfaltové směsi [40]29	
Tab. 4 – Přípustné množství R-materiálu v % hmotnosti asfaltové směsi [40].....	29
Tab. 5 – Možnosti dávkování R-materiálu dle ČSN 73 6120	30
Tab. 6 – Zrnitost jednotlivých frakcí kameniva a fileru	31
Tab. 7 – Varianty vyráběných směsí	34
Tab. 8 – Procentuální složení směsí V1 a V2	34
Tab. 9 – Procentuální složení směsí V3 a V4	34
Tab. 10 – Obsah pryže ve variantě 1	35
Tab. 11 - Obsah pryže ve variantě 2.....	35
Tab. 12 - Obsah pryže ve variantě 3.....	35
Tab. 13 - Obsah pryže ve variantě 4.....	35
Tab. 14 – Výsledky volumetrických vlastností	40
Tab. 15 – Obsah rozpustného pojiva a pryžových částic v jednotlivých variantách .42	
Tab. 16 – Moduly tuhosti a teplotní citlivost jednotlivých variant směsí	44
Tab. 17 – Shrnutí výsledků SCB testu	49
Tab. 18 – Naměřené hodnoty zkoušky pevnosti v tahu za ohybu.....	52
Tab. 19 – Výsledky zkoušky pevnosti v tahu za ohybu	53
Tab. 20 – Objemová hmotnost a míra zhutnění desek.....	55
Tab. 21 – Výsledky zkoušky pojíždění kolem.....	55
Tab. 22 – Výsledky Marshallovy zkoušky.....	57
Tab. 23 – Marshallova stabilita	57
Tab. 24 – Odolnost vůči vlivu vody a mrazu.....	60
Tab. 25 – Hodnocení směsi dle pořadí - 1.část.....	62
Tab. 26 – Hodnocení směsi dle pořadí – 2.část.....	63
Tab. 27 – Dílčí funkce užítka modulu tuhosti 0 °C.....	65



Tab. 28 - Dílčí funkce užitku modulu tuhosti 15 °C.....	65
Tab. 29 - Dílčí funkce užitku modulu tuhosti 27 °C.....	66
Tab. 30 - Dílčí funkce užitku modulu tuhosti 40 °C.....	66
Tab. 31 - Dílčí funkce užitku lomové houževnatosti	67
Tab. 32 - Dílčí funkce užitku celkové lomové energie	67
Tab. 33 - Dílčí funkce užitku modulu tuhosti v tahu za ohybu - nezestárly	68
Tab. 34 - Dílčí funkce užitku modulu tuhosti v tahu za ohybu - zestárly	68
Tab. 35 - Dílčí funkce užitku průměrné hloubky vyjeté koleje.....	69
Tab. 36 - Dílčí funkce užitku přírůstku hloubky vyjeté koleje	69
Tab. 37 - Dílčí funkce užitku pevnosti v příčném tahu mokré sady těles	70
Tab. 38 - Dílčí funkce užitku pevnosti v příčném tahu zmrazené sady těles.....	70
Tab. 39 - Dílčí funkce Marshallovy stability	71
Tab. 40 – Vyhodnocení celkového užitku jednotlivých variant směsí	71
Tab. 41 – Uvažované směsi pro ekonomické posouzení	72
Tab. 42 – Ceny směsí 1.část	72
Tab. 43 – Ceny směsí 2.část	73
Tab. 44 – Množství směsi na 1 km silnice S 11,5/90.....	73
Tab. 45 – Spotřeba materiálu a cena během 25letého cyklu pro obrusnou vrstvu na teoretickém úseku.....	74
Tab. 46 – Spotřeba materiálu a cena během 30letého cyklu pro obrusnou vrstvu na teoretickém úseku.....	74
Tab. 47 – Zrnitostní návrh pro variantu 1 a variantu 2.....	87
Tab. 48 – Zrnitostní návrh pro variantu 3 a variantu 4.....	88
Tab. 49 – Rozměry a obj. hmotnosti zkušebních těles varianty 1	89
Tab. 50 - Rozměry a obj. hmotnosti zkušebních těles varianty 2.....	90
Tab. 51 - Rozměry a obj. hmotnosti zkušebních těles varianty 3.....	91
Tab. 52 - Rozměry a obj. hmotnosti zkušebních těles varianty 4.....	92
Tab. 53 – Rozměry a objemové hmotnosti desek V1, V2, V3, V4	93
Tab. 54 – Rozměry půlválcových těles.....	94
Tab. 55 – Výsledky zkoušky IT-CY – varianta 1	95
Tab. 56 – Výsledky zkoušky IT-CY – varianta 2.....	96
Tab. 57 – Výsledky zkoušky IT-CY – varianta 3.....	97
Tab. 58 – Výsledky zkoušky IT-CY – varianta 4.....	98



Tab. 59 – Hodnoty jednotlivých měření SCB testu	99
Tab. 60 – Hodnoty jednotlivých měření zkoušky pevnosti v tahu za ohybu	100
Tab. 61 – Výsledky Marshallovy zkoušky.....	105
Tab. 62 – Podrobné výsledky zkoušky pevnost v příčném tahu (ITS) a hodnoty ITS R	106

11 Seznam grafů

Graf 1 – Čáry zrnitosti jednotlivých frakcí kameniva	32
Graf 2 – Čáry zrnitosti R-materiálu.....	33
Graf 3 – Křivky zrnitosti směsí V1 a V2 a původní návrh.....	41
Graf 4 – Křivky zrnitosti směsí V3 a V4 a původní návrh.....	42
Graf 5 – Moduly tuhosti jednotlivých variant.....	45
Graf 6 – Zatěžovací diagram	48
Graf 7 – Lomová houževnatost jednotlivých variant	49
Graf 8 – Průběh SCB testu – V3	50
Graf 9 – Pracovní diagram do vzniku porušení – varianta 2.....	53
Graf 10 – Průběh zkoušky odolnosti proti trvalým deformacím.....	56
Graf 11 – Pevnost v příčném tahu	60
Graf 12 – Odolnost vůči vodě a mrazu vyjádřená v %.....	61
Graf 13 - Dílčí funkce užitku modulu tuhosti 0 °C	65
Graf 14 - Dílčí funkce užitku modulu tuhosti 15 °C	66
Graf 15 - Dílčí funkce užitku modulu tuhosti 27 °C	66
Graf 16 - Dílčí funkce užitku modulu tuhosti 40 °C	66
Graf 17 - Dílčí funkce užitku lomové houževnatosti.....	67
Graf 18 - Dílčí funkce užitku celkové lomové energie.....	67
Graf 19 - Dílčí funkce užitku modulu tuhosti v tahu za ohybu - nezestárlý.....	68
Graf 20 - Dílčí funkce užitku modulu tuhosti v tahu za ohybu – zestárlý.....	68
Graf 21 - Dílčí funkce užitku průměrné hloubky vyjeté koleje	69
Graf 22 - Dílčí funkce užitku přírůstku hloubky vyjeté koleje	69
Graf 23 - Dílčí funkce užitku pevnosti v příčném tahu mokré sady těles.....	70
Graf 24 - Dílčí funkce užitku pevnosti v příčném tahu zmrazené sady těles	70
Graf 25 - Dílčí funkce Marshallovy stability	71



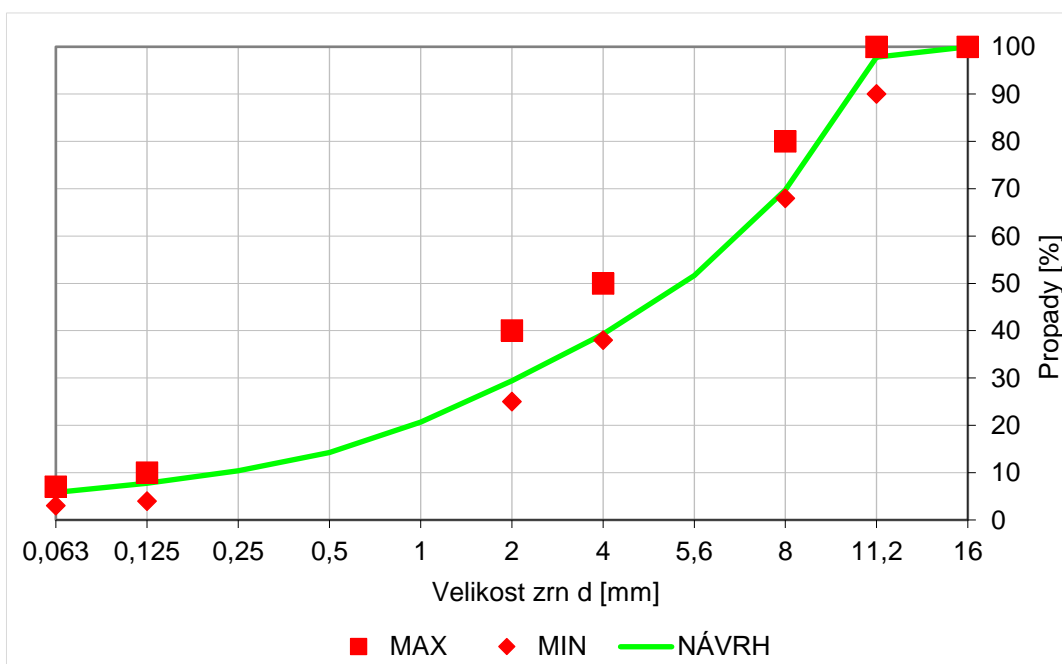
Graf 26 -Čára zrnitosti varianty 1 a varianty 2	87
Graf 27 – Čára zrnitosti varianty 3 a varianty 4	88



12 Přílohová část

Síta	MAX	NÁVRH	MIN
[mm]	[%]	[%]	[%]
16	100	100,0	100
11,2	100	97,8	90
8	80	69,7	68
5,6		51,6	
4	50	39,3	38
2	40	29,4	25
1		20,7	
0,5		14,3	
0,25		10,4	
0,125	10	7,8	4
0,063	7	5,8	3

Tab. 47 – Zrnitostní návrh pro variantu 1 a variantu 2

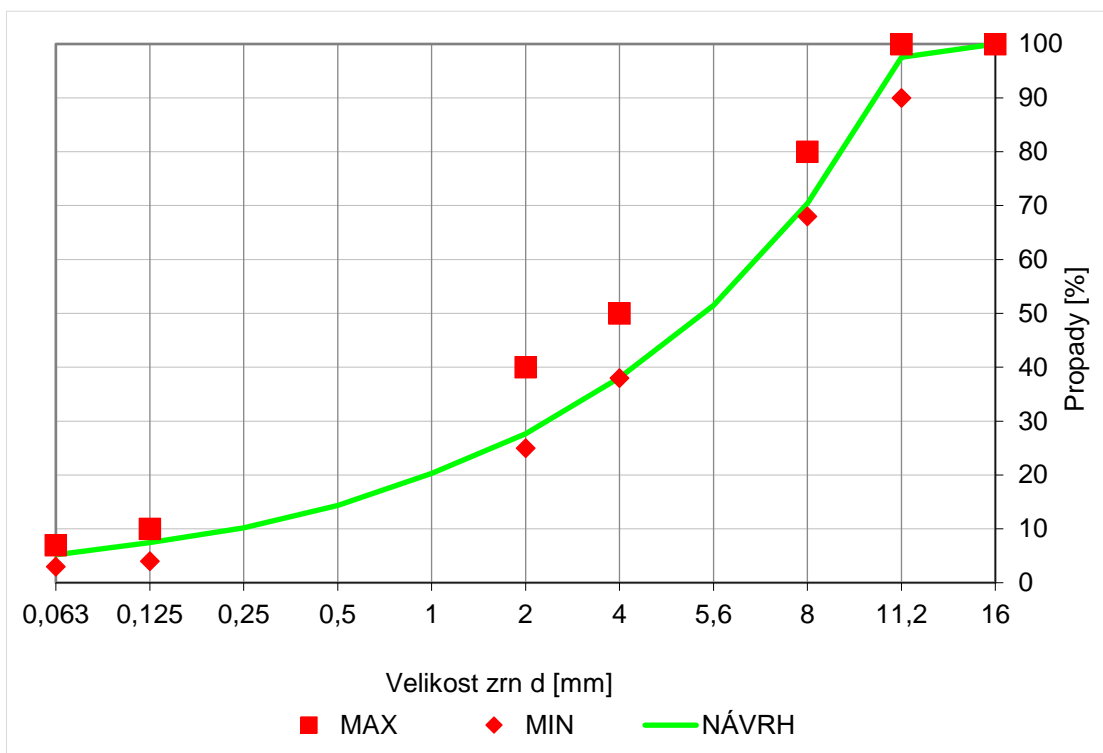


Graf 26 -Čára zrnitosti varianty 1 a varianty 2



Síta [mm]	MAX [%]	NÁVRH [%]	MIN [%]
16	100	100,0	100
11,2	100	97,5	90
8	80	70,4	68
5,6		51,5	
4	50	38,1	38
2	40	27,7	25
1		20,3	
0,5		14,3	
0,25		10,2	
0,125	10	7,4	4
0,063	7	5,2	3

Tab. 48 – Zrnitostní návrh pro variantu 3 a variantu 4



Graf 27 – Čára zrnitosti varianty 3 a varianty 4



V1 2x75	h ₁ [mm]	h ₂ [mm]	h ₃ [mm]	h ₄ [mm]	h [mm]	D ₁ [mm]	D ₂ [mm]	D ₃ [mm]	D ₄ [mm]	D [mm]	V [cm ³]	m ₁ [g]	m ₂ [g]	m ₃ [g]	t _w [°C]	ρ _w [g/cm ³]	ρ _{b,SSSD} [g/cm ³]	Øρ _{b,SSSD} [g/cm ³]
1	61,02	61,39	62,12	61,58	61,5	103,04	102,88	103,06	103,56	103,1	514,22	1198,3	693,4	1201,4	19,3	0,998417	2,36	
2	63,22	63,2	63,02	62,48	63,0	101,52	101,71	101,63	101,65	101,6	511,08	1196,1	693	1197,9	19,3	0,998417	2,37	
3	63,64	64,11	62,93	62,79	63,4	101,57	101,72	101,71	101,74	101,7	514,81	1197,2	693,8	1198,9	19,3	0,998417	2,37	2,36
4	61,97	63,03	63,17	62,3	62,6	102,22	102,04	102,17	102,14	102,1	513,30	1202,7	696,8	1204,5	19,3	0,998417	2,37	
5	62,73	63,38	63,03	62,56	62,9	101,95	101,93	102,01	102,15	102,0	514,49	1198,5	694,4	1200,3	19,3	0,998417	2,37	
6	62,25	62,07	63,01	62,87	62,6	101,81	101,44	102,03	101,6	101,7	508,52	1193,7	691,4	1195,4	19,3	0,998417	2,36	

V1 2x25	h ₁ [mm]	h ₂ [mm]	h ₃ [mm]	h ₄ [mm]	h [mm]	D ₁ [mm]	D ₂ [mm]	D ₃ [mm]	D ₄ [mm]	D [mm]	V [cm ³]	m ₁ [g]	ρ _{b,DIM} [g/cm ³]	Øρ _{b,DIM} [g/cm ³]
1	60,06	60,96	59,92	60,19	60,3	101,83	101,95	102,13	102,1	102,0	492,81	1100,6	2,23	
2	60,42	60,58	61,07	60,93	60,8	102,09	102,15	101,98	101,61	102,0	496,19	1101,6	2,22	
3	60,44	60,8	60,23	59,83	60,3	101,8	102,1	101,87	102,05	102,0	492,70	1097,3	2,23	
4	60,04	59,42	59,87	60,05	59,8	102,19	101,94	101,98	102,51	102,2	490,70	1096,4	2,23	
5	59,99	60,23	59,67	59,72	59,9	102,45	102,35	102,38	102,51	102,4	493,74	1106,2	2,24	2,23
6	59,83	60,35	59,34	59,5	59,8	101,83	101,77	102,16	102,01	101,9	487,92	1090,8	2,24	
7	60,48	60,6	61,08	61,58	60,9	102,07	101,84	101,88	101,85	101,9	497,24	1106,8	2,23	
8	59,75	59,35	59,73	60,23	59,8	102,36	102,38	102,15	102,33	102,3	491,48	1098,7	2,24	
9	60,86	61,53	61,2	61,92	61,4	102,07	102,39	101,96	101,86	102,1	502,42	1102,9	2,20	

Tab. 49 – Rozměry a obj. hmotnosti zkušebních těles varianty 1



V2 2x75	h ₁ [mm]	h ₂ [mm]	h ₃ [mm]	h ₄ [mm]	h [mm]	D ₁ [mm]	D ₂ [mm]	D ₃ [mm]	D ₄ [mm]	D [mm]	V [cm ³]	m ₁ [g]	m ₂ [g]	m ₃ [g]	t _w [°C]	ρ _w [g/cm ³]	ρ _{b,sssd} [g/cm ³]	∅ρ _{b,sssd} [g/cm ³]
1	64,50	63,70	63,79	64,65	64,2	102,04	101,87	102,03	101,95	102,0	524,20	1198,8	689,8	1203,2	19,2	0,998437	2,33	2,34
2	63,59	64,12	64,17	63,45	63,8	102,14	101,98	102,00	101,67	101,9	521,28	1199,9	691,0	1203,3	19,2	0,998437	2,34	
3	62,98	62,24	62,46	62,91	62,6	102,71	102,81	102,29	102,42	102,6	517,73	1180,0	679,8	1182,8	19,2	0,998437	2,34	
4	64,30	63,88	64,43	64,02	64,2	101,95	102,07	101,99	102,00	102,0	524,49	1188,4	683,5	1191,5	19,2	0,998437	2,34	
5	64,45	63,82	63,76	64,51	64,1	101,85	102,01	101,97	101,94	101,9	523,69	1193,9	687,4	1197,0	19,2	0,998437	2,34	
6	63,73	63,84	62,82	63,43	63,5	101,80	101,97	102,03	102,05	102,0	518,34	1200,1	692,1	1201,6	19,2	0,998437	2,35	

V2 2x25	h ₁ [mm]	h ₂ [mm]	h ₃ [mm]	h ₄ [mm]	h [mm]	D ₁ [mm]	D ₂ [mm]	D ₃ [mm]	D ₄ [mm]	D [mm]	V [cm ³]	m ₁ [g]	ρ _{b,DIM} [g/cm ³]	∅ρ _{b,DIM} [g/cm ³]
1	61,82	61,07	61,23	61,96	61,5	101,75	101,79	101,63	101,87	101,8	500,54	1106,4	2,21	2,23
2	59,61	59,51	59,83	60,43	59,8	101,75	101,78	102,01	101,77	101,8	487,55	1096,9	2,25	
3	60,74	60,02	61,27	60,23	60,6	101,51	101,92	101,82	102,09	101,8	493,49	1104,4	2,24	
4	59,64	59,89	59,41	59,75	59,7	102,15	102,40	102,34	102,33	102,3	490,72	1093,6	2,23	
5	59,20	59,84	59,51	58,94	59,4	102,71	103,23	103,21	103,28	103,1	495,94	1098,3	2,21	
6	60,09	59,84	59,76	60,41	60,0	101,59	102,00	101,82	101,85	101,8	488,90	1105,7	2,26	
7	60,73	60,24	61,07	61,32	60,8	101,67	102,02	102,11	101,91	101,9	496,63	1104,5	2,22	
8	60,77	59,84	60,84	60,48	60,5	102,35	102,26	102,40	102,24	102,3	497,45	1103,6	2,22	
9	60,60	60,18	59,83	60,44	60,3	101,84	101,90	101,78	101,87	101,8	491,15	1075,2	2,19	

Tab. 50 - Rozměry a obj. hmotnosti zkušebních těles varianty 2



V3	h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	h	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D	V	m ₁	m ₂	m ₃	t _w	ρ _w	ρ _{b,sssd}	Øρ _{b,sssd}
2x75	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[cm ³]	[g]	[g]	[g]	[°C]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[g/cm ³]
1	61,84	62,31	61,38	61,17	61,7	101,83	101,92	101,87	102,18	102,0	503,7	1196,0	705,5	1198,5	19,2	0,998437	2,42	2,42
2	61,05	61,51	61,18	61,81	61,4	101,97	102,01	102,20	101,66	102,0	501,4	1193,7	702,9	1195,2	19,2	0,998437	2,42	
3	62,10	61,80	62,89	62,63	62,4	101,83	101,68	101,82	101,72	101,8	507,4	1197,8	704,4	1200,0	19,2	0,998437	2,41	
4	61,46	60,81	61,67	61,14	61,3	102,18	102,37	102,24	102,41	102,3	503,8	1197,8	705,4	1198,8	19,2	0,998437	2,42	
5	61,10	62,05	61,83	61,02	61,5	102,25	101,91	102,05	102,00	102,1	503,3	1191,2	701,8	1192,7	19,2	0,998437	2,42	
6	61,58	60,99	61,27	61,76	61,4	101,86	101,91	102,00	101,87	101,9	501,0	1189,8	701,1	1191,2	19,2	0,998437	2,42	

V3	h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	h	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D	V	m ₁	ρ _{b,DIM}	Øρ _{b,DIM}
2x25	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[cm ³]	[g]	[g/cm ³]	[g/cm ³]
1	58,93	59,79	60,11	58,60	59,4	101,73	102,17	101,82	102,23	102,0	485,10	1090,9	2,25	2,27
2	57,49	58,29	57,78	57,36	57,7	102,26	102,83	102,68	102,37	102,5	476,88	1088,3	2,28	
3	59,44	59,88	59,51	59,18	59,5	101,90	102,08	101,78	101,94	101,9	485,69	1102,6	2,27	
4	57,21	57,72	57,95	57,12	57,5	103,19	103,34	103,37	102,92	103,2	481,21	1101,9	2,29	
5	59,02	59,81	59,85	59,05	59,4	102,10	101,94	101,74	102,08	102,0	485,50	1102,0	2,27	
6	57,69	57,23	57,00	57,65	57,4	103,65	103,86	103,28	103,14	103,5	482,90	1099,4	2,28	
7	58,34	58,56	59,40	58,87	58,8	102,86	102,47	102,66	102,59	102,6	486,70	1098,5	2,26	
8	58,50	58,89	59,50	58,43	58,8	102,04	102,13	101,89	101,85	102,0	480,70	1088,0	2,26	
9	59,26	58,48	58,73	59,30	58,9	102,24	102,30	102,07	101,94	102,1	483,13	1093,8	2,26	

Tab. 51 - Rozměry a obj. hmotnosti zkušebních těles varianty 3



V4	h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	h	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D	V	m ₁	m ₂	m ₃	t _w	ρ _v	ρ _{b,SSSD}	Øρ _{b,SSSD}
2x75	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[cm ³]	[g]	[g]	[g]	[°C]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[g/cm ³]
1	61,32	60,02	59,67	61,26	60,6	103,20	103,20	103,41	103,38	103,3	507,79	1190,7	701,6	1192,2	21,1	0,99804	2,42	
2	60,46	60,05	61,10	60,63	60,6	102,02	101,98	102,00	102,24	102,1	495,63	1178,4	694,9	1179,8	21,1	0,99804	2,43	
3	61,68	61,25	60,99	62,67	61,6	101,91	101,99	102,07	102,15	102,0	504,24	1191,0	701,8	1192,8	21,1	0,99804	2,42	
4	61,27	61,43	62,56	61,46	61,7	102,06	102,15	102,15	102,05	102,1	505,22	1188,2	699,2	1189,9	21,1	0,99804	2,42	
5	62,31	62,21	61,71	61,68	62,0	102,02	101,85	102,00	101,99	102,0	506,29	1191,8	701,0	1193,5	21,1	0,99804	2,42	
6	60,14	59,83	59,69	59,80	59,9	103,57	103,52	103,55	103,69	103,6	504,67	1190,5	700,9	1192,1	21,1	0,99804	2,42	2,42

V4	h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	h	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D	V	m ₁	ρ _{b,DIM}	Øρ _{b,DIM}
2x25	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[cm ³]	[g]	[g/cm ³]	[g/cm ³]
1	102,30	102,30	102,43	102,44	102,4	57,50	57,16	57,86	58,12	57,7	474,75	1082,4	2,28	
2	101,94	101,84	101,85	101,87	101,9	58,79	59,15	58,52	58,53	58,7	479,06	1083,2	2,26	
3	102,20	102,20	102,16	102,27	102,2	58,00	58,12	57,97	57,58	57,9	475,38	1100,9	2,32	
4	101,81	102,08	101,95	101,93	101,9	57,21	56,73	56,73	57,47	57,0	465,71	1082,9	2,33	
5	101,96	101,90	102,00	101,99	102,0	58,29	57,63	57,78	58,28	58,0	473,74	1091,5	2,30	2,29
6	101,43	101,85	101,90	101,78	101,7	59,72	58,98	58,86	59,77	59,3	482,55	1092,3	2,26	
7	101,98	101,93	101,90	101,84	101,9	59,02	58,93	59,74	59,01	59,2	482,90	1095,1	2,27	
8	102,06	102,17	102,07	102,35	102,2	57,92	58,42	59,36	58,50	58,6	480,15	1107,9	2,31	
9	101,51	101,66	101,77	101,75	101,7	58,98	58,54	58,86	58,95	58,8	477,85	1090,5	2,28	

Tab. 52 - Rozměry a obj. hmotnosti zkušebních těles varianty 4



V1	h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	h ₅	h ₆	h	m ₁	m ₂	m ₃	t _w	ρ _w	ρ _{b,sssd}	míra zhutnění [%]
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[g]	[g]	[°C]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[%]
1	39,86	39,32	40,46	39,23	39,81	41,19	40,0	7886,2	4585,4	7894,7	18,5	0,9986	2,38	100,7 %
2	39,43	39,64	40,67	39,85	39,6	40,47	39,9	7901,9	4600,4	7909,7	18,5	0,9986	2,38	100,9 %

V2	h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	h ₅	h ₆	h	m ₁	m ₂	m ₃	t _w	ρ _w	ρ _{b,sssd}	míra zhutnění [%]
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[g]	[g]	[°C]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[%]
1	39,86	39,85	40,77	39,79	39,78	40,88	40,2	7836,2	4543	7845,6	16,4	0,9989	2,37	101,3 %
2	39,89	39,74	40,46	39,82	39,9	40,82	40,1	7834,4	4540,8	7844,5	16,4	0,9989	2,37	101,2 %

V3	h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	h ₅	h ₆	h	m ₁	m ₂	m ₃	t _w	ρ _w	ρ _{b,sssd}	míra zhutnění [%]
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[g]	[g]	[°C]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[%]
1	40,24	40,01	41,44	40,23	39,74	40,61	40,4	8102,2	4801,2	8111,4	16,4	0,9989	2,45	101,0 %
2	39,84	39,84	40,91	39,94	39,5	40,93	40,2	8110,6	4805,1	8119,3	16,4	0,9989	2,44	100,9 %

V4	h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	h ₅	h ₆	h	m ₁	m ₂	m ₃	t _w	ρ _w	ρ _{b,sssd}	míra zhutnění [%]
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[g]	[g]	[°C]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[%]
1	39,42	39,55	40,34	39,66	39,43	40,81	39,9	8117,3	4806,8	8122,3	18,5	0,9986	2,44	101,0 %
2	39,63	39,82	40,54	39,49	39,43	40,05	39,8	8085,9	4785,5	8094,2	18,5	0,9986	2,44	100,8 %

Tab. 53 – Rozměry a objemové hmotnosti desek V1, V2, V3, V4



		D	D	ØD	t	t	t	Øt	h	h	Øh
V1	3	101,32	101,26	101,29	50,30	52,16	51,21	51,22	47,76	47,51	47,64
	3'	101,98	101,83	101,91	50,40	52,17	51,68	51,42	51,02	50,58	50,80
	4	101,77	101,80	101,79	49,06	50,94	49,23	49,74	48,36	47,94	48,15
	4'	102,38	102,30	102,34	51,60	49,94	51,99	51,18	50,80	51,05	50,93
	5	101,89	102,04	101,97	52,02	50,34	51,69	51,35	51,17	52,01	51,59
	5'	101,53	101,42	101,48	49,56	51,39	50,22	50,39	47,15	47,47	47,31
V2	3	102,01	101,93	101,97	49,67	51,60	50,53	50,60	48,63	48,45	48,54
	3'	101,95	102,32	102,14	51,76	49,77	51,03	50,85	50,54	50,67	50,61
	4	101,45	100,22	100,84	50,18	51,25	50,10	50,51	48,22	47,94	48,08
	4'	101,41	102,05	101,73	52,03	51,00	52,30	51,78	50,27	50,71	50,49
	5	101,87	102,04	101,96	50,41	51,72	51,06	51,06	51,14	51,23	51,19
	5'	101,16	101,21	101,19	50,46	51,75	51,56	51,26	47,09	47,44	47,27
V3	3	101,72	101,44	101,58	50,96	50,02	51,87	50,95	49,86	50,17	50,02
	3'	101,38	101,13	101,26	51,84	49,90	50,65	50,80	47,83	48,34	48,09
	4	100,97	101,01	100,99	49,71	50,26	51,30	50,42	50,32	50,23	50,28
	4'	100,82	100,79	100,81	51,34	49,64	51,09	50,69	48,38	48,71	48,55
	5	101,30	101,22	101,26	50,07	50,65	49,61	50,11	47,12	46,92	47,02
	5'	101,88	101,89	101,89	51,55	50,74	51,29	51,19	50,88	51,32	51,10
V4	3	101,22	101,42	101,32	49,89	49,55	48,37	49,27	47,45	46,91	47,18
	3'	101,84	101,85	101,85	50,52	50,92	52,10	51,18	51,11	51,43	51,27
	4	101,95	102,09	102,02	51,38	51,44	51,63	51,48	51,39	50,94	51,17
	4'	101,51	101,32	101,42	50,53	51,48	50,04	50,68	47,30	47,06	47,18
	5	101,43	101,58	101,51	48,23	51,72	49,47	49,81	48,66	48,29	48,48
	5'	101,98	101,74	101,86	49,44	51,41	50,49	50,45	49,81	49,97	49,89

Tab. 54 – Rozměry půválcových těles



Varianta 1		Stiffness modulus						Horizontal stress			Horizontal deformation			Vertical		Δ od Ø
Temper. (°C)	U Spec. (-)	1. dir. (MPa)	2. dir. (MPa)	Avg (MPa)	Stiffness (MPa)	relative value	1. dir. (kPa)	2. dir. (kPa)	Avg (kPa)	1. dir. (micron)	2. dir. (micron)	Avg (micron)	1. dir. (kN)	2. dir. (kN)	Avg (kN)	
0	1	16 413	16 772	16 593	17 368	100 %	594,0	601,9	632,23	3,0	3,0	3,0	5,8	5,9	6,3	4,5%
	2	16 201	18 381	17 291			579,8	669,1		3,0	3,0		5,8	6,7		0,4%
	3	17 636	18 803	18 220			662,7	685,9		3,1	3,0		6,7	6,9		-4,9%
15	1	7 538	7 676	7 607	7 577	44 %	400,1	409,3	405,42	5,0	5,0	5,0	4,0	4,1	4,1	-0,4%
	2	7 400	7 084	7 242			396,7	379,2		5,0	5,0		4,0	3,8		4,4%
	3	8 446	7 482	7 964			436,4	398,6		4,8	5,0		4,4	4,0		-5,1% dovolená odchylnka od průměru +10 % až - 20 %
	4	7 784	7 298	7 541			425,9	391,6		5,1	5,0		4,3	3,9		0,5%
	5	7 451	7 782	7 617			400,1	417,1		5,0	5,0		4,0	4,2		-0,5%
	6	7 494	7 490	7 492			404,6	405,4		5,0	5,0		4,0	4,1		1,1%
27	4	2 958	2 685	2 822	2 959	17 %	143,0	127,5	143,53	5,1	5,0	5,1	1,4	1,3	1,4	4,6%
	5	3 048	2 914	2 981			148,7	142,2		5,1	5,1		1,5	1,4		-0,7%
	6	2 966	3 182	3 074			147,2	152,6		5,2	5,0		1,5	1,5		-3,9%
40	1	1 361	1 278	1 320	1 426	8 %	59,5	55,4	63,67	5,1	5,1	5,2	0,6	0,6	0,6	7,4%
	2	1 429	1 456	1 443			64,0	63,0		5,2	5,0		0,6	0,6		-1,2%
	3	1 674	1 356	1 515			73,2	66,9		5,0	5,7		0,7	0,7		-6,3%

Tab. 55 – Výsledky zkoušky IT-CY – varianta 1



Varianta 2		Stiffness modulus						Horizontal stress			Horizontal deformation			Vertical force			Δ od \emptyset
Temper. (°C)	β Spec. (-)	1. dir. (MPa)	2. dir. (MPa)	Avg (MPa)	Stiffness (MPa)	relative value	1. dir. (kPa)	2. dir. (kPa)	Avg (kPa)	1. dir. (micron)	2. dir. (micron)	Avg (micron)	1. dir. (kN)	2. dir. (kN)	Avg (kN)		
0	1	17 995	16 488	17 242	16 779	100 %	670,2	618,6	609,83	3,1	3,1	3,1	6,9	6,4	6,2	-2,8%	
	2	16 953	15 832	16 393			613,1	578,4		3,0	3,1		6,3	5,9		2,3%	
	3	18 071	15 333	16 702			640,1	538,6		3,0	3,0		6,5	5,43		0,5%	
15	0,31	1	6 605	6 841	6 723	7 113	42 %	352,7	362,5	379,13	5,0	5,0	5,0	3,6	3,7	3,9	5,5%
		2	7 383	7 214	7 299			403,9	388,8		5,1	5,0		4,1	4,0		-2,6%
		3	6 645	7 848	7 247			353,3	420,5		5,0	5,0		3,6	4,2		-1,9%
		4	7 071	7 002	7 037			376,3	373,7		5,0	5,0		3,9	3,8		1,1% dovolená odchylka od průměru
		5	7 103	7 402	7 253			378,6	381,2		5,0	4,8		3,9	3,9		-2,0%
		6	7 136	7 102	7 119			383,5	374,6		5,0	4,9		3,9	3,8		-0,1% +10 % až -20 %
27	0,38	4	3 392	3 074	3 233	3 244	19 %	161,3	147,4	156,37	5,0	5,0	5,0	1,7	1,5	1,6	0,3%
		5	3 204	3 311	3 258			157,2	160,3		5,1	5,1		1,6	1,6		-0,4%
		6	3 369	3 114	3 242			162,5	149,5		5,0	5,0		1,7	1,5		0,1%
40	0,45	1	1 512	1 441	1 477	1 652	10 %	66,0	61,0	70,15	5,1	4,9	4,9	0,7	0,6	0,7	10,6%
		2	1 881	1 799	1 840			82,4	77,7		5,1	5		0,8	0,8		-11,4%
		3	1 785	1 492	1 639			69,3	64,5		4,5	5		0,7	0,7		0,8%

Tab. 56 – Výsledky zkoušky IT-CY – varianta 2



Varianta 3		Stiffness modulus						Horizontal stress			Horizontal deformation			Vertical force			Δ od Ø
		Temper. (°C)	U Spec. (-)	1. dir. (MPa)	2. dir. (MPa)	Avg (MPa)	Stiffness relative value	1. dir. (kPa)	2. dir. (kPa)	Avg (kPa)	1. dir. (micron)	2. dir. (micron)	Avg (micron)	1. dir. (kN)	2. dir. (kN)	Avg (kN)	
0	1	25 223	23 494	24 359		898,3	862,6		3,0	3,0		8,9	8,5		-8,2%		
	2	22 059	19 940	21 000	22 519	100 %	796,9	724,2	813,78	3,0	3,0	3,0	7,8	7,1	8,0	6,7%	
	3	20 556	23 839	22 198			734,0	866,7		3,0	3,0		7,3	8,6		1,4%	
15	1	9 646	10 430	10 038		514,9	563,2		5,0	5,0		5,1	5,6		-3,2%		
	2	8 964	9 913	9 439		487,4	530,9		5,1	5,0		4,8	5,2		2,9%		
	3	9 031	9 213	9 122	9 724	43 %	486,3	496,9	519,99	5,0	5,0	5,0	4,9	5,0	5,1	6,2% dovolená odchyška od průměru +10 % až - 20 %	
	4	9 731	9 292	9 512		521,2	493,3		5,0	5,0		5,1	4,9		-3,3%		
	5	9 650	10 439	10 045		518,5	559,0		5,0	5,0		5,1	5,5		+10 %		
	6	10 318	10 059	10 189		552,4	515,9		5,0	4,8		5,4	5,1		-4,8%		
27	4	5 223	4 329	4 776		254,5	209,6		5,1	5,1		2,5	2,1		0,6%		
	5	4 661	4 738	4 700	4 805	21 %	222,5	226,8	232,33	5,0	5,0	5,1	2,2	2,2	2,3	2,2%	
	6	4 782	5 096	4 939		233,7	246,9		5,1	5,1		2,3	2,4		-2,8%		
40	1	2 193	2 680	2 437		95,3	96,8		5,0	4,2		0,9	1,0		-4,9%		
	2	2 179	2 100	2 140	2 323	10 %	93,2	91,6	96,57	4,9	5,0	4,8	0,9	0,9	1,0	7,9%	
	3	2 458	2 330	2 394		104,5	98,0		4,9	4,8		1,0	1,0		-3,0%		

Tab. 57 – Výsledky zkoušky IT-CY – varianta 3



Varianta 4		Stiffness modulus						Horizontal stress			Horizontal deformation			Vertical force			Δ od Ø	
Temper. (°C)	V Spec. (-)	1. dir.	2. dir.	Avg	Stiffness	relative	1. dir.	2. dir.	Avg	1. dir.	2. dir.	Avg	1. dir.	2. dir.	Avg			
		(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	value	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(micron)	(micron)	(micron)	(kN)	(kN)	(kN)			
0	4	18 984	17 479	18 232	18 913	100 %	668,5	644,7	663,7	2,9	3,1	3,0	6,6	6,4	6,5			
	5	19 642	17 619	18 631			696,0	631,6		663,7	2,9		3,0	3,0		6,9	6,3	6,5
	6	18 494	21 258	19 876			647,3	694,2		663,7	3,0		2,8	2,8		6,3	6,8	6,8
15	1	8 841	9 658	9 250	9 506	50 %	467,3	505,2	505,9	5,0	5,0	5,0	4,6	5,0	5,0			
	2	9 457	9 482	9 470			509,5	509,8		505,9	5,0		5,0	5,0		5,0	5,0	5,0
	3	8 831	9 755	9 293			473,3	515,7		505,9	5,0		4,9	4,9		4,7	5,1	5,0
	4	9 061	10 306	9 684			486,9	556,6		505,9	5,0		5,1	5,1		4,8	5,5	5,0
	5	9 145	9 713	9 429			495,1	525,6		505,9	5,1		5,1	5,1		4,9	5,2	5,0
	6	10 089	9 731	9 910			514,2	511,6		505,9	4,8		5,0	5,0		5,0	5,0	5,0
27	1	4 078	4 007	4 043	4 236	22 %	194,7	194,2	206,0	5,0	5,1	5,1	1,9	1,9	2,0			
	2	4 559	4 392	4 476			223,8	212,3		206,0	5,1		5,0	5,1		2,2	2,1	2,0
	3	4 107	4 274	4 191			197,8	213,1		206,0	5,0		5,2	5,2		2,0	2,1	2,1
40	1	2 025	1 986	2 006	2 072	11 %	86,2	85,7	88,8	5,0	5,1	5,0	0,8	0,8	0,9			
	2	2 116	2 047	2 082			94,9	88,6		88,8	5,2		5,0	5,0		0,9	0,9	0,9
	3	2 160	2 095	2 128			94	83,4		88,8	5,0		4,6	4,6		0,9	0,8	0,8

Tab. 58 – Výsledky zkoušky IT-CY – varianta 4



Těleso	Deformace (mm)	Síla (kN)	Hloubka drážky (mm)	Přetvoření (%)	Napětí při porušení (MPa)	Faktor f (-)	Lomová houževnatost (N/mm ^{3/2})	Rozdíl od průměru	Práce do max. hodnoty (J)	Práce do max. zkoušky (W _{max}) (J)	Lomová energie do F _{max} - G _{f,max} (J/m ²)	Celková lomová energie - G _f (J/m ²)
1-3	1,62	8,50	10	3,40%	1,64	4,795	44,0	-18%	4,4	6,1	2305	3143
1-3'	0,82	6,15	10	1,61%	1,17	4,794	31,5	16%	2,2	3,3	1035	1589
1-4	-	-	10	2,24%	1,39	4,794	37,4	0%	3,5	5,4	1681	2311
1-4'	1,27	7,30	10	2,49%	1,39	4,793	37,4	-16%	4,1	6,4	1922	2562
1-5	1,34	8,44	10	2,60%	1,61	4,794	43,3	19%	2,4	2,4	1156	2980
1-5'	0,52	5,79	10	1,10%	1,13	4,794	30,4	-3%	2,3	3,9	1521	2021
2-3	0,88	6,86	10	1,81%	1,33	4,794	35,7	-14%	3,1	3,5	1004	1801
2-3'	1,08	7,66	10	2,13%	1,47	4,794	39,6	-3%	1,9	3,9	957	1877
2-4	0,61	6,78	10	1,27%	1,33	4,795	35,8	5%	2,0	5,2	1688	2463
2-4'	0,70	6,52	10	1,39%	1,24	4,794	33,3	13%	1,4	2,9	724	1498
2-5	1,22	6,67	10	2,38%	1,28	4,794	34,4	24%	1,6	2,4	765	1173
2-5'	0,57	5,83	10	1,21%	1,12	4,794	30,2	-12%	3,4	3,9	1680	1921
3-3	0,73	5,80	10	1,46%	1,12	4,795	30,1	-11%	2,3	3,7	1156	1881
3-3'	1,92	8,53	10	3,99%	1,66	4,795	44,6	3%	1,9	2,6	1051	1375
3-4	0,98	8,35	10	1,95%	1,64	4,795	44,1	-11%	2,7	2,7	1305	1305
3-4'	0,80	7,06	10	1,65%	1,38	4,795	37,1	15%	1,6	2,5	868	1373
3-5	0,64	7,26	10	1,36%	1,43	4,795	38,4	-23%	2,9	4,0	1359	1617
3-5'	0,84	8,54	10	1,64%	1,64	4,794	44,0	5%	2,1	3,2	1094	2120
4-3	0,87	5,49	10	1,84%	1,10	4,794	29,6	11%	1,6	1,7	838	1293
4-3'	0,92	8,24	10	1,79%	1,58	4,794	42,5	1%	2,9	2,7	995	1617
4-4	1,18	7,13	10	2,31%	1,36	4,794	36,5	1%	1,6	2,7	838	1293
4-4'	0,79	6,54	10	1,67%	1,27	4,794	34,2	1%	1,6	2,7	838	1293
4-5	0,62	5,81	10	1,28%	1,15	4,794	30,9	1%	1,7	2,7	838	1293
4-5'	0,75	6,69	10	1,50%	1,28	4,794	34,3	1%	1,7	2,7	838	1293

Tab. 59 – Hodnoty jednotlivých měření SCB testu



	Testing temperature [°C]	Width [mm]	Height [mm]	Spane [mm]	Deformation [mm]	Force [kN]	Flexural strength [MPa]			Stiffness modulus of flexural strength [MPa]			Fracture work [J]		
							7,2	8,6	7,5	1437	1895	1387	1,3	1,6	1,4
virgin 1-1	0 °C	49,2	40,7	250,0	1,3	1,6	7,2	8,6	7,5	1437	1895	1387	1,3	1,6	1,4
virgin 1-2	0 °C	49,7	40,9	250,0	1,2	1,9	8,6	7,5	1465	1872	1387	1,4	1,6	1,8	1,5
virgin 1-3	0 °C	49,5	39,9	250,0	1,4	1,6	7,5	8,7	1704	1872	1465	1,5	1,5	1,4	1,4
virgin 1-4	0 °C	50,0	40,9	250,0	1,5	2,0	8,7	9,4	1733	1872	1465	1,5	1,5	1,4	1,4
aged 1-1	0 °C	51,0	41,4	250,0	1,4	2,2	9,4	8,6	1704	1872	1733	1,5	1,5	1,4	1,4
aged 1-2	0 °C	50,6	40,7	250,0	1,3	1,9	8,6	9,1	1704	1872	1733	1,5	1,5	1,4	1,4
aged 1-3	0 °C	49,8	41,6	250,0	1,2	2,1	9,1	9,2	1939	1872	1733	1,4	1,4	1,4	1,4
aged 1-4	0 °C	50,9	40,5	250,0	1,1	2,1	9,2	7,3	2112	1872	1733	1,4	1,4	1,4	1,4
virgin 2-1	0 °C	49,3	40,7	250,0	1,1	1,6	7,3	7,7	1678	1744	1872	1,1	1,1	1,1	1,1
virgin 2-2	0 °C	50,0	39,8	250,0	1,1	1,6	7,7	7,4	1849	1744	1872	1,1	1,1	1,1	1,1
virgin 2-3	0 °C	49,2	39,8	250,0	1,0	1,5	7,4	7,9	1863	1744	1872	1,1	1,1	1,1	1,1
virgin 2-4	0 °C	49,2	39,5	250,0	1,3	1,6	7,9	7,8	1587	1744	1872	1,1	1,1	1,1	1,1
aged 2-1	0 °C	51,6	40,6	250,0	0,8	1,8	7,8	8,5	2640	2256	1944	0,7	0,7	0,7	0,7
aged 2-2	0 °C	51,5	41,1	250,0	1,0	2,0	8,5	8,8	2261	2256	1944	1,1	1,1	1,1	1,1
aged 2-3	0 °C	51,4	41,0	250,0	1,3	2,0	8,8	7,9	1691	2256	1944	-	-	-	0,9
aged 2-4	0 °C	51,0	40,3	250,0	0,8	1,8	7,9	9,6	2433	2256	1944	0,9	0,9	0,9	0,9
virgin 3-1	0 °C	50,9	41,4	250,0	1,3	2,2	9,6	9,3	1855	1944	1944	1,7	1,7	1,7	1,7
virgin 3-2	0 °C	50,7	41,5	250,0	1,2	2,2	9,3	10,4	2038	1944	1944	1,5	1,5	1,5	1,5
virgin 3-3	0 °C	50,1	40,9	250,0	1,5	2,0	9,1	10,6	1595	1944	1944	1,5	1,5	1,5	1,5
virgin 3-4	0 °C	49,6	41,1	250,0	1,2	2,3	10,4	8,8	2287	1944	1944	1,5	1,5	1,5	1,5
aged 3-1	0 °C	50,5	41,4	250,0	1,0	2,4	10,6	8,7	2743	2251	2251	1,4	1,4	1,4	1,4
aged 3-2	0 °C	51,3	40,9	250,0	1,2	2,0	8,8	8,9	1901	2251	2251	1,4	1,4	1,4	1,4
aged 3-3	0 °C	50,6	41,9	250,0	1,5	2,5	10,4	9,1	1734	2251	2251	-	-	-	1,3
aged 3-4	0 °C	51,2	41,1	250,0	0,8	2,0	8,7	9,6	2625	2251	2251	1,0	1,0	1,0	1,0
virgin 4-1	0 °C	50,0	40,1	250,0	1,0	1,9	8,9	9,1	2244	2006	2006	1,2	1,2	1,2	1,2
virgin 4-2	0 °C	49,8	40,3	250,0	1,2	2,0	9,1	9,6	2005	2006	2006	1,3	1,3	1,3	1,3
virgin 4-3	0 °C	49,5	40,0	250,0	1,2	2,0	9,6	8,9	2051	2006	2006	1,6	1,6	1,6	1,6
virgin 4-4	0 °C	49,7	40,9	250,0	1,3	2,0	8,9	10,2	1723	2006	2006	1,6	1,6	1,6	1,6
aged 4-1	0 °C	50,5	41,4	250,0	1,0	2,4	10,2	10,2	2584	2650	2650	1,3	1,3	1,3	1,3
aged 4-2	0 °C	51,2	40,2	250,0	1,0	2,3	10,2	10,4	2669	2650	2650	1,3	1,3	1,3	1,3
aged 4-3	0 °C	51,0	41,8	250,0	0,9	2,5	10,4	9,9	2924	2650	2650	1,4	1,4	1,4	1,4
aged 4-4	0 °C	51,2	40,8	250,0	1,0	2,3	9,9	2,3	2423	2650	2650	1,2	1,2	1,2	1,2

Tab. 60 – Hodnoty jednotlivých měření zkoušky pevnosti v tahu za ohybu



Zkouška odolnosti asfaltových směsí proti trvalým deformacím			
provedeno dle ČSN EN 12697-22			
Zkouška opakovaného poježdění kolem			
varianta: V1			
		MZ vzorku č.1	100,7 %
		MZ vzorku č.2	100,9 %
		tloušťka desky 1	40,00 mm
teplota přípravy těles:	170 °C	tloušťka desky 2	39,90 mm
teplota zkoušky:	50 °C	průměrná tloušťka desek	39,95 mm
kolo	průměrná hloubka koleje po 5 000 cyklech v mm	průměrná hloubka koleje po 10 000 cyklech v mm	$d_{10\,000} - d_{5\,000}$ (mm)
1	1,52	1,66	0,14
2	1,61	1,76	0,15
průměr	1,57	1,71	0,15
přírůstek hloubky koleje WTS_{AIR}	$\frac{d_{10\,000} - d_{5\,000}}{5}$		0,029 mm
	PRD_{AIR}		3,9 %

Obr. 28 – Protokol zkoušky poježdění kolem – varianta 1



Zkouška odolnosti asfaltových směsí proti trvalým deformacím			
provedeno dle ČSN EN 12697-22			
Zkouška opakovaného poježdění kolem			
Varianta: V2			
		MZ vzorku č. 1	101,3 %
		MZ vzorku č. 2	101,2 %
datum zkoušky		tloušťka desky 1	40,20 mm
teplota přípravy těles	170 °C	tloušťka desky 2	40,10 mm
teplota zkoušky	50 °C	průměrná tloušťka desek	40,15 mm
kolo	průměrná hloubka koleje po 5 000 cyklech v mm	průměrná hloubka koleje po 10 000 cyklech v mm	$d_{10\,000} - d_{5\,000}$ (mm)
1	1,96	2,08	0,12
2	1,78	1,92	0,14
průměr	1,87	2,00	0,13
přírůstek hloubky koleje WTS_{AIR}	$\frac{d_{10\,000} - d_{5\,000}}{5}$		0,026 mm
	PRD_{AIR}		4,7 %

Obr. 29 - Protokol zkoušky poježdění kolem – varianta 2



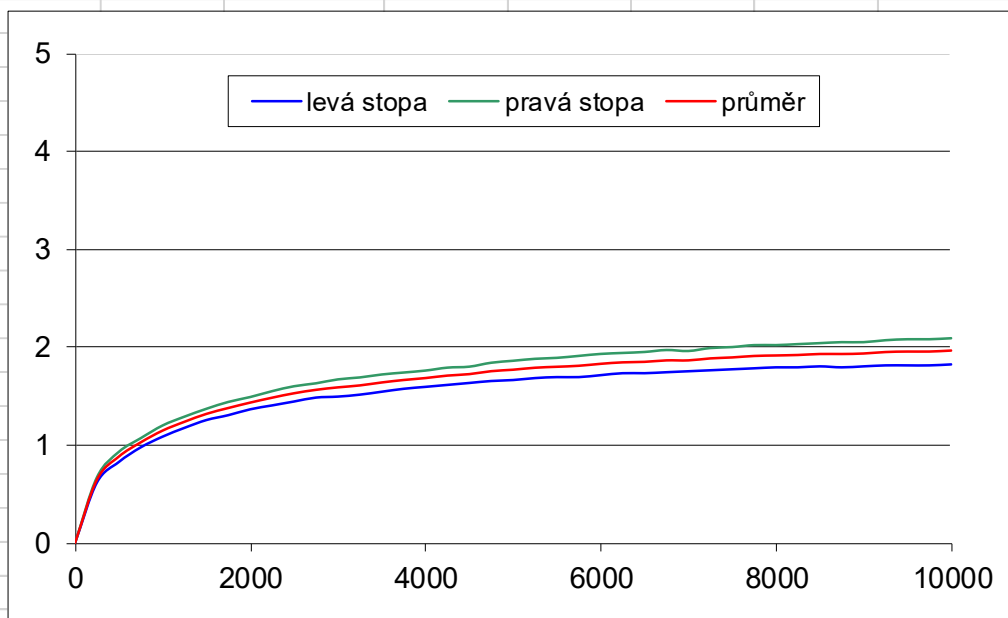
Zkouška odolnosti asfaltových směsí proti trvalým deformacím

provedeno dle ČSN EN 12697-22

Zkouška opakovaného poježdění kolem

Varianta: V3

		MZ vzorku č.1	101,0	%
		MZ vzorku č.2	100,9	%
		tloušťka desky 1	40,40	mm
teplota přípravy těles	170 °C	tloušťka desky 2	40,20	mm
teplota zkoušky	50 °C	průměrná tloušťka desek	40,30	mm



kolo	průměrná hloubka koleje po 5 000 cyklech v mm	průměrná hloubka koleje po 10 000 cyklech v mm	$d_{10\,000} - d_{5\,000}$ (mm)
1	1,67	1,83	0,16
2	1,86	2,09	0,23
průměr	1,77	1,96	0,20
přírůstek hloubky koleje WTS_{AIR}	$\frac{d_{10\,000} - d_{5\,000}}{5}$		0,039 mm
	PRD_{AIR}		4,4 %

Obr. 30 - Protokol zkoušky poježdění kolem – varianta 3



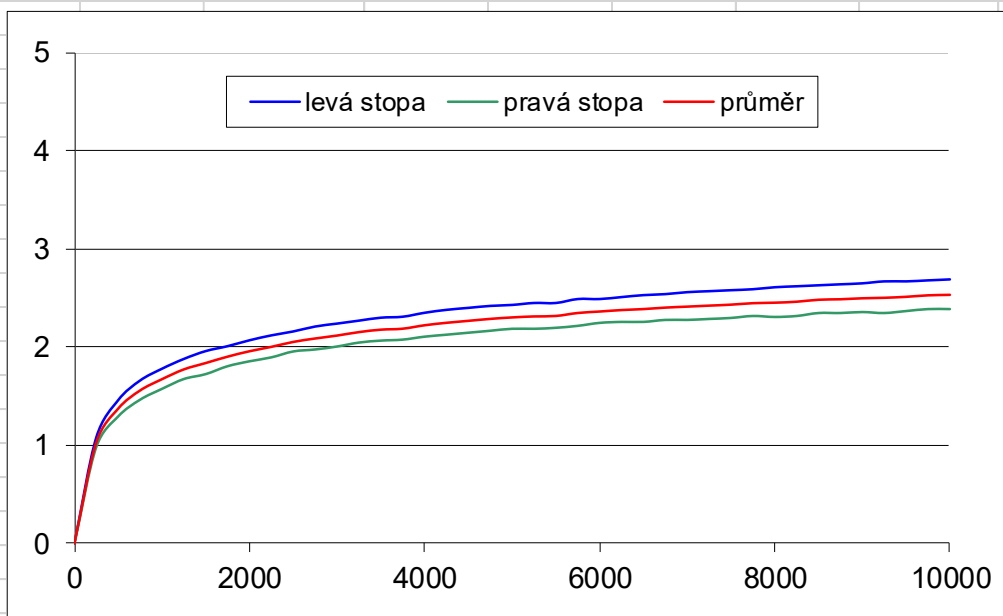
Zkouška odolnosti asfaltových směsí proti trvalým deformacím

provedeno dle ČSN EN 12697-22

Zkouška opakovaného poježdění kolem

Varianta: V4

		MZ vzorku č. 1	101,0 %
		MZ vzorku č. 2	100,8 %
datum zkoušky		tloušťka desky 1	39,90 mm
teplota přípravy těles	170 °C	tloušťka desky 2	39,80 mm
teplota zkoušky	50 °C	průměrná tloušťka desek	39,85 mm



kolo	průměrná hloubka koleje po 5 000 cyklech v mm	průměrná hloubka koleje po 10 000 cyklech v mm	$d_{10\,000} - d_{5\,000}$ (mm)
1	2,43	2,69	0,26
2	2,18	2,38	0,20
průměr	2,31	2,54	0,23
přírůstek hloubky koleje WTS_{AIR}	$\frac{d_{10\,000} - d_{5\,000}}{5}$ 5		0,046 mm
	PRD_{AIR}		5,8 %

Obr. 31 - Protokol zkoušky poježdění kolem – varianta 4



		obj.hm.	přetvoření		stabilita		míra thosti		platnost výsledků		
		$\rho_{b,SSSD}$	F	$\emptyset F$	S	$\emptyset S$	S/F	$\emptyset S/F$	F	S	
č.t.	[g/cm ³]	[mm]	[mm]	[kN]	[kN]	[kN/mm]	[kN/mm]				
V1	1	2,6	4,6	5,0	12,3	12,5	2,7	2,5	8,6%	1,3%	stabilita +- 15%, přetvoření +-20%
	2	2,37	5,5		13,2		2,4		-9,3%	-5,9%	
	6	2,36	5,0		11,9		2,4		0,7%	4,5%	
V2	1	2,33	4,9	4,9	14,2	14,1	2,9	2,9	0,7%	-0,5%	
	2	2,34	4,8		13,5		2,8		2,7%	4,5%	
	6	2,35	5,1		14,7		2,9		-3,4%	-4,0%	
V3	1	2,42	3,1	4,6	14,7	15,9	4,7	3,5			
	2	2,42	4,9		17,3		3,5		-7,7%	-8,8%	
	6	2,42	4,2		14,5		3,5		7,7%	8,8%	
V4	1	2,42	5,1	3,6	12,9	13,1	2,5	3,7			
	2	2,43	3,6		13,2		3,7		-1,4%	-1,1%	
	6	2,42	3,5		12,9		3,7		1,4%	1,1%	

Tab. 61 – Výsledky Marshallovy zkoušky



	č.	D	h	přetvoření		síla		ITS		ITSR	
				Δ		F		[MPa]	[MPa]		
				[mm]	[mm]	[kN]	[kN]	[MPa]	[MPa]		[%]
V1	suchá	5	102,4	59,9	2,41	2,55	20,24	18,97	2,10	1,96	-
		3	102,0	60,3	2,44		19,65		2,03		
		9	102,1	61,4	2,81		17,02		1,73		
	voda	1	102,0	60,3	3,94	3,59	20,35	20,81	2,11	2,15	110,09
		7	101,9	60,9	3,45		20,86		2,14		
		8	102,3	59,8	3,39		21,22		2,21		
	mráz	2	102,0	60,8	3,26	3,19	17,79	17,53	1,83	1,82	93,09
		4	102,2	59,8	3,27		17,14		1,79		
		6	101,9	59,8	3,04		17,67		1,85		
V2	suchá	6	101,8	60,0	2,50	2,70	17,76	16,70	1,85	1,73	-
		8	102,3	60,5	2,78		16,65		1,71		
		9	101,8	60,3	2,83		15,70		1,63		
	voda	3	101,8	60,6	3,35	7,38	19,77	17,91	2,04	1,85	106,88
		5	103,1	59,4	8,23		16,96		1,76		
		7	101,9	60,8	10,55		16,99		1,75		
	mráz	1	101,8	61,5	2,98	3,04	15,82	15,55	1,61	1,61	93,00
		2	101,8	59,8	3,16		15,34		1,61		
		4	102,3	59,7	2,98		15,50		1,62		
V3	suchá	1	102,0	59,4	2,71	2,78	21,85	21,74	2,30	2,31	-
		4	103,2	57,5	2,66		22,01		2,36		
		9	102,1	58,9	2,96		21,37		2,26		
	voda	2	102,5	57,7	3,36	3,07	20,78	20,32	2,24	2,18	94,27
		6	103,5	57,4	2,66		20,18		2,16		
		8	102,0	58,8	3,18		20,01		2,13		
	mráz	3	101,9	59,5	3,03	2,86	20,32	20,50	2,13	2,16	93,52
		5	102,0	59,4	2,87		20,59		2,16		
		7	102,6	58,8	2,69		20,60		2,17		
V4	suchá	1	102,4	57,7	2,66	3,07	19,55	19,53	2,11	2,11	-
		2	101,9	58,7	2,60		20,18		2,15		
		4	101,9	57,0	3,95		18,86		2,07		
	voda	7	101,9	59,2	2,78	2,79	18,69	19,62	1,97	2,08	98,52
		8	102,2	58,6	3,12		19,95		2,12		
		6	101,7	59,3	2,48		20,22		2,14		
	mráz	3	102,2	57,9	3,52	3,59	17,94	16,81	1,93	1,80	85,54
		5	102,0	58,0	3,59		16,63		1,79		
		9	101,7	58,8	3,67		15,85		1,69		

Tab. 62 – Podrobné výsledky zkoušky pevnost v příčném tahu (ITS) a hodnoty ITSR