



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební
Katedra silničních staveb

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Asfaltové směsi s vyšším podílem
R-materiálu modifikované v míchacím
procesu**

Asphalt Mixes with Reclaimed Material Modified in the
Mixing Process

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

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

Bc. Filip Hlávka

Praha 2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Hlávka Jméno: Filip Osobní číslo: 434805Zadávací katedra: K136 - Katedra silničních stavebStudijní program: SI - Stavební inženýrstvíStudijní obor: K - Konstrukce a dopravní stavby

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Asfaltové směsi s vyšším podílem R-materiálu modifikované v míchacím procesuNázev diplomové práce anglicky: Asphalt Mixes with Reclaimed Material Modified in the Mixing Process

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. Praktické ověření vlastností asfaltových směsí dodatečně modifikovaných v procesu výroby v míchacím zařízení. 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 Mondschein, Ph.D.Datum zadání diplomové práce: 25.9.2020Termín 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“.

30-09-2020

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)



Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně, s výjimkou odborných konzultací s vedoucím mé práce p. Ing. Petrem Mondscheinem, Ph.D. a ostatními pracovníky silniční laboratoře Fakulty stavební ČVUT.

Dále prohlašuji, že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Praze dne

.....
Bc. Filip Hlávka



Poděkování

Tímto bych rád poděkoval především vedoucímu mé bakalářské práce p. Ing. Petrovi Mondsheinovi, Ph.D. za poskytnutí rad, trpělivé vedení a čas strávený při konzultacích. Dále děkuji všem ostatním členům silniční laboratoře Fakulty stavební ČVUT za odborné rady, výpomoc a ochotu, a to především p. Ing. Janovi Valentinovi, Ph.D., pí. Ing. Pavle Vackové, Ph.D. a p. Ing. Ondřeji Rynešovi. Dále děkuji p. Ing. Františkovi Buráňovi z firmy CIUR a.s. za poskytnutí podrobných informací o využívaném granulátu a p. Radkovi Pazynovi z firmy Froněk, spol. s r.o. za výrobu a dodání asfaltových směsí.



Abstrakt

Teoretická část se zabývá vlastnostmi asfaltových pojiv, jejich výrobou a rozdělením s důrazem na pojiva modifikovaná. Vysvětluje pojem stárnutí v souvislosti s asfaltovými pojivy a způsoby rejuvenace. Seznamuje s pojmem recyklace asfaltových vrstev vozovek se zaměřením na metody recyklace za horka na obalovně. Poslední kapitola se věnuje R-materiálu, jeho získávání pomocí selektivního frézování a jeho uplatnění ve směsích obsahujících modifikovaná pojiva.

Praktická část porovnává asfaltové směsi modifikované v procesu výroby v mísicím zařízení obsahující různá množství R-materiálu. Popisuje výrobu zkušebních těles, analýzu znovuzískaného asfaltového pojiva z asfaltových směsí a provedení volumetrických, mechanicko-fyzikálních a funkčních zkoušek za účelem vyhodnocení vlivu modifikace a obsahu R-materiálu na základě dostupných informací o směsích.

Klíčová slova

R-materiál, Recyklace, Asfalt, Asfaltové pojivo, Modifikované asfaltové pojivo, Asfaltová směs, Asfaltový beton, Stárnutí asfaltových pojiv

Abstract

The theoretical part is focused on properties of bituminous binders, their production and selection with emphasis on the modified binders. Further the concept of aging focused on connection between bituminous binders and methods of rejuvenation is explained. The concept of recycling asphalt pavement layers with a focus on hot recycling methods in the asphalt plant is introduced. The last chapter is dedicated to Reclaimed asphalt (RA), its extraction by selective milling and its application in asphalt mixtures with modified binders.

The practical part compares asphalt mixtures modified during manufacturing process in an asphalt plant containing different amounts of RA. Further it describes the manufacturing of test specimens, the analysis of the extracted binder from asphalt mixtures and the performance of volumetric, mechanical-physical and functional tests in order to evaluate the effect of modification and RA content on the basis of available information about mixtures.

Key words

RA (Reclaimed asphalt), Recycling, Asphalt, Asphalt binder, Modified bituminous binder, Asphalt mixtures, Asphalt concrete, Aging of asphalt binders



Obsah

1.	ÚVOD	- 8 -
1.1	Recyklace asfaltových vozovek	- 8 -
1.2	Cíle práce	- 10 -
2.	TEORETICKÁ ČÁST	- 12 -
2.1	Asfalt	- 12 -
2.1.1	Základní rozdělení asfaltů	- 13 -
2.1.2	Výroba asfaltů	- 14 -
2.1.3	Vlastnosti asfaltů	- 15 -
2.1.4	Asfalt v číslech	- 16 -
2.2	Rozdělení asfaltových pojiv	- 16 -
2.2.1	Silniční asfalty	- 17 -
2.2.2	Tvrdé silniční asfalty	- 17 -
2.2.3	Multigradové silniční asfalty	- 17 -
2.2.4	Modifikované asfalty	- 17 -
2.2.5	Ředěné a fluxované asfalty	- 21 -
2.3	Stárnutí asfaltových pojiv	- 21 -
2.3.1	Termooxidační stárnutí	- 22 -
2.3.2	Destilační procesy	- 22 -
2.3.3	Migrační procesy	- 22 -
2.3.4	Strukturální stárnutí	- 23 -
2.3.5	Simulace stárnutí	- 23 -
2.4	R-materiál a recyklace asfaltových směsí	- 23 -
2.4.1	Selektivní frézování	- 24 -
2.4.2	Recyklace za horka na obalovně	- 27 -
2.4.3	Oživování R-materiálu	- 31 -
2.4.4	R-materiál v modifikovaných směsích	- 32 -
3.	PRAKTICKÁ ČÁST	- 33 -
3.1	Informace o asfaltových směsích	- 33 -
3.1.1	Druh směsi, pojivo, R-materiál a kamenivo	- 34 -
3.1.2	Granulát Improcel ® K	- 35 -
3.2	Analýza znovuzískaného pojiva ze směsí	- 36 -
3.2.1	Znovuzískání pojiva z vyrobených směsí	- 37 -
3.2.2	Stanovení penetrace a bodu měknutí	- 38 -
3.2.3	MSCR	- 40 -
3.2.4	BTSV	- 44 -



3.3	Zkoušky na asfaltových směsích.....	- 46 -
3.3.1	Požadavky na směsi	- 46 -
3.3.2	Výroba zkušebních těles	- 48 -
3.3.3	Maximální objemová hmotnost	- 49 -
3.3.4	Objemová hmotnost.....	- 51 -
3.3.5	Mezerovitost, stupeň vyplnění mezer pojivem	- 52 -
3.3.6	Odolnost vůči vodě a mrazu	- 54 -
3.3.7	Zkouška pojíždění kolem.....	- 59 -
3.3.8	Tuhost	- 62 -
3.3.9	Marshallova zkouška	- 66 -
3.3.10	Odolnost vůči šíření trhliny	- 68 -
3.3.11	Pevnost v tahu za ohybu	- 74 -
4.	ZÁVĚR	- 83 -
5.	SEZNAM LITERATURY	- 85 -
6.	SEZNAM TABULEK	- 90 -
7.	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	- 90 -
8.	SEZNAM VZORCŮ.....	- 91 -
9.	SEZNAM GRAFŮ	- 92 -
10.	SEZNAM PŘÍLOH.....	- 92 -

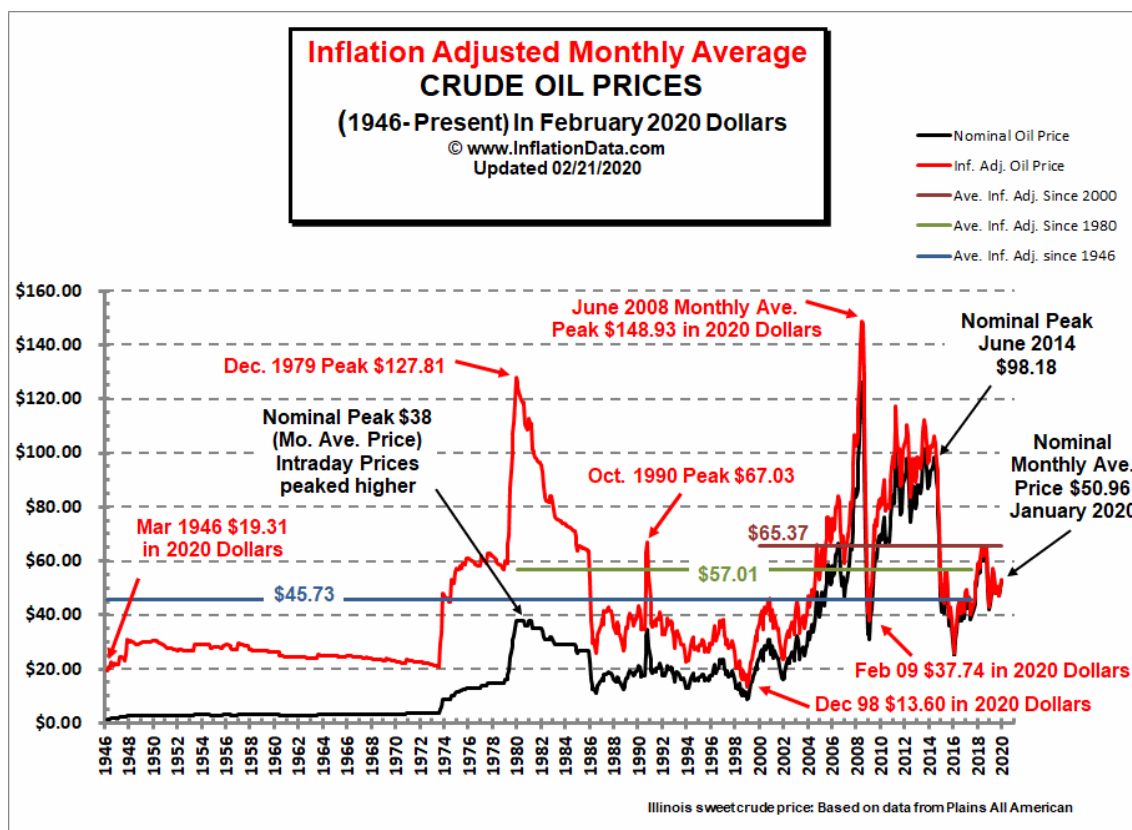


1. ÚVOD

Téma diplomové práce vychází z nutnosti porozumění potřeby rozvoje recyklace v silničním stavitelství. V úvodu je popsána problematika recyklace se specifikací na asfaltové vozovky, její důvody, cíle a současné trendy. Zároveň jsou zde uvedeny cíle (motivace) práce.

1.1 Recyklace asfaltových vozovek

Pojem recyklace je fenomén dnešní doby, který je a bude aktuálním tématem ve společnosti v celosvětovém měřítku. Proces nakládání s odpadem tak, aby ho bylo možno znovu použít, je v dnešní době nutností, a proto není divu, že ve stavitelství se jedná o jeden z předních problémů. Budeme-li se soustředit především na silniční stavby, v tomto oboru se již několik desetiletí celosvětově využívá recyklace asfaltových vrstev netuhých vozovek. K jejímu dřívějšímu rozvoji přispěla především ropná krize v průběhu 70. let 20. století, kdy se skokově zvýšila cena za barel ropy, která tvoří hlavní surovinu pro výrobu asfaltového pojiva. V dnešní době vede k rozvoji zejména snaha o snížení spotřeby přírodního kameniva a asfaltového pojiva, tedy snaha o udržitelný rozvoj silničního stavitelství a překlenutí rozporu mezi ekonomickým růstem a ochranou životního prostředí. [1]



Obrázek 1: Vývoj cen ropy uvažující inflaci od roku 1946 do současnosti [2]



Recyklace asfaltových vozovek je progresivní technologií dopravního stavitelství. Za správného návrhu řešení konkrétní situace umožňuje ve srovnání s finančně náročnou klasickou technologií rekonstrukce opravit při stejném objemu investic více kilometrů vozovek a díky efektivnímu využití strojů výrazně zkrátit dobu oprav. Recyklace nám dovoluje zvládnout opravu během krátké doby, a přitom je šetrnější k životnímu prostředí. Způsobů recyklace asfaltových vrstev netuhých vozovek je opravdu mnoho. Dnešní doba nahrává tomu, aby investor, projektant i zhotovitel dokázali najít řešení, jak někdy až statisíce tun materiálu ze stavby využít do nových konstrukcí (v ideálním případě hned na stavbě, čímž se ušetří za nákup materiálu nového). [3]

Důvody pro recyklaci jsou především následující:

- Zachování materiálových a energetických zdrojů
 - Materiálových (kamenivo, asfalt) – využití druhotných surovin
 - Energetických (pohonné hmoty, topná média atd.)
- Ochrana životního prostředí
 - Redukce skleníkových plynů, zejména CO₂
 - Snížení znečištění ovzduší (výfukové plyny, hluk)
 - Omezení skládek, snížení objemu odpadů
 - Udržitelné hospodaření s neobnovitelnými přírodními zdroji
 - Menší zásahy do krajiny
- Ekonomický přínos
 - Snížení nákladů, dlouhodobě dosažitelný efekt pro daňové poplatníky
 - Snížení zatížení komunikací, zkrácení doby výstavby [4] [5]

Cíle recyklace:

- Přeměna poškozené a nehomogenní konstrukce vozovky vykazující zjevné známky postupné degradace
- Zlepšení proměnlivosti fyzikálně mechanických a reologických vlastností vrstev původní konstrukce vozovky
- Zvýšení celkové únosnosti a prodloužení životnosti konstrukce vozovky
- Zvýšení odolnosti obrusné vrstvy vůči mechanickému opotřebení
- Zlepšení protismykových vlastností a zajištění reprofilace krytu vozovky s vyrovnáním nerovností
- Ekologicky šetrné odstranění škodlivých složek konstrukcí vozovek, kde bylo použito dehtové pojivo (u recyklace za studena) [5]

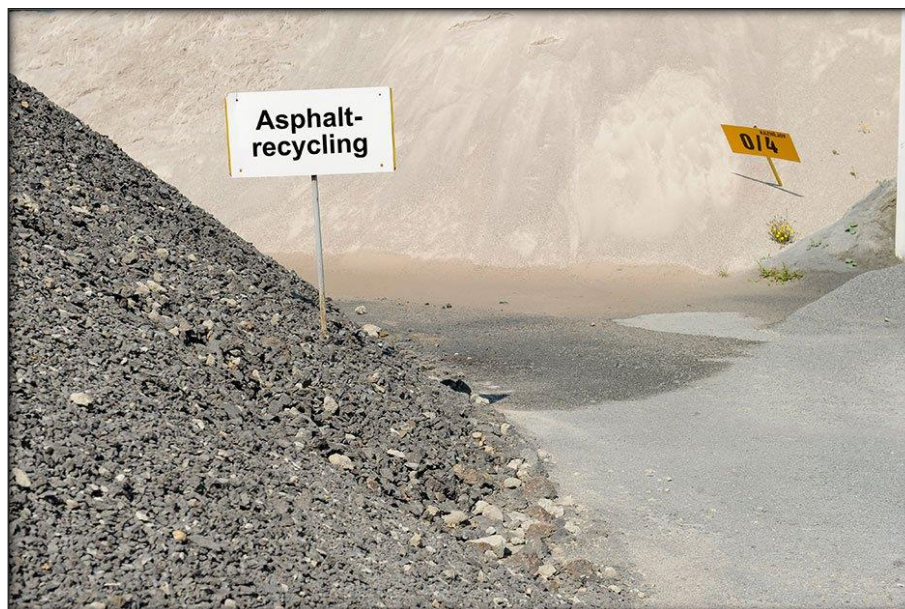
Současné trendy recyklace:

- Zvyšování podílu R-materiálu ve směsích pro konstrukční vrstvy vozovek
- Prezentace zejména asfaltové vozovky jako 100 % recyklovatelné (bezodpadová konstrukce)
- Prosazování recyklace prováděné za studena, pěnoasfaltových technologií a recyklace za horka
- Jasně určené možnosti nakládání se znovuzískanou asfaltovou směsí (*Vyhláška 130/2019 Sb.* – více viz. kapitola 2.4.1) [5]



Základní rozdělení metod recyklace:

- Za studena na místě
- Za studena v míchacím centru
- Za horka na místě
- Za horka v obalovně



Obrázek 2: Recyklace asfaltových vrstev [6]

1.2 Cíle práce

Cílem teoretické části diplomové práce je seznámení s asfaltovými pojivy se zaměřením na modifikované asfalty, s recyklací asfaltových vrstev vozovky s důrazem na získávání materiálu pomocí selektivního frézování a metodou recyklace za horka na obalovně, se způsoby stárnutí a ožívování asfaltových pojiv a zpracování rešerše v těchto oblastech.

V praktické části je cílem ověřit vlastnosti asfaltových směsí dodatečně modifikovaných v procesu výroby s různým obsahem R-materiálu pomocí volumetrických, mechanicko-fyzikálních a funkčních zkoušek.

Hlavní motivací této práce je umožnění přidávání vyšších množství R-materiálu do asfaltových směsí s použitím polymerem modifikovaných pojiv. Jak je více popsáno v kapitole 2.4.4, je zvykem používat do těchto směsí maximálně 15 % R-materiálu z celkové hmotnosti směsi. V normě ČSN 73 6121 Stavba vozovek – Hutněné asfaltové vrstvy – Provádění a kontrola shody se nachází tabulka E.1 (Tabulka 1), která doporučuje, jaké druhy asfaltových pojiv je vhodné používat v závislosti na třídě dopravního zatížení a konkrétním typu asfaltového betonu. Z tabulky je patrné, že pro třídy S a I, které odpovídají těm nejzatíženějším komunikacím (dálnice a silnice I. třídy), je doporučeno používat výhradně polymerem modifikovaná pojiva, a to ve všech asfaltových vrstvách vozovky. Cílem je u těchto směsí umožnit přidávání většího množství R-materiálu



(i z původně nemodifikovaných vrstev) a zajistit, aby výsledná směs splňovala kvality odpovídající směsím s běžným polymerem modifikovaných pojivem. [7]

Označení směsi	Tloušťka vrstvy (mm)	Třída dopravního zatížení ²⁾								
		S	I	II	III	IV	V	VI	CH	
Obrusné vrstvy^{3) 4)}										
ACO 8	25–50	–					50/70, 70/100		–	
ACO 8 CH	25–40	–							50/70, 70/100	
ACO 11S ACO 16S	35–50 45–60	PMB 45/80-65, PMB 25/55-60		–						
ACO 11+ ACO 16+	35–50 45–60	–		PMB 45/80-55, PMB 25/55-60, 50/70			–		–	
ACO 11 ACO 16	35–50 45–60	–				50/70, 70/100		–		
Ložní vrstvy^{4) 5)}										
ACL 16S ACL 22S	50–70 60–90	PMB 25/55-60, PMB 45/80-65		–						
ACL 16+ ACL 22+	50–70 60–90	–		PMB 25/55-60, PMB 45/80-55, 30/45, 50/70			–		–	
ACL 16 ACL 22	50–70 60–90	–				50/70, 70/100		–		
Podkladní vrstvy										
ACP 16S ACP 22S	50–80 60–100	PMB 25/55-60, PMB 10/40-65, 30/45, 50/70			–					
ACP 16+ ACP 22+	50–80 60–100	–		(30/45), 50/70, (70/100)				–		

Tabulka je v souladu s ČSN EN 12591, ČSN 65 7204, resp. ČSN EN 14023, ČSN 65 7222-1. V případě použití nízkoteplotních nebo nízkoviskozních pojiv musí být použito odpovídající pojivo ve variantě „NT“ v souladu s ČSN 65 7222-3, resp. ČSN 65 7204. V případě použití asfaltů modifikovaných pryžovým granulátem musí být použito odpovídající pojivo ve variantě „N“ v souladu s ČSN 65 7222-2.

¹⁾ K dosažení předepsaných technických požadavků asfaltových směsí lze použít asfalty podle ČSN EN 12591 a ČSN 65 7204, ČSN EN 14023 a ČSN 65 7222-1, příp. v jejich kombinaci s přírodními asfalty a polymerními nebo dalšími chemickými přísadami.

²⁾ Volba gradace pojiva musí být provedena na základě vícekritériálního posouzení konkrétních podmínek dané stavby (poloha, vedení trasy, dopravní zatížení, složení konstrukčních vrstev apod.). Jednotlivé uvedené typy udávají min. požadavek na druh pojiva. V případě PMB pojiv však nevylučují příp. využití pojiva s vyšším bodem měknutí KK (v souladu se specifikací ČSN 65 7222-1) zejména při prokazatelně vyšším, resp. extrémním namáhání. Pokud specifikace a zkouška typu obsahuje pojivo 35/50, jedná se o rovnocennou náhradu pojiva 30/45.

³⁾ Použití nemodifikovaných asfaltových pojiv s penetrací menší než 50 p.j. a modifikovaných pojiv s penetrací menší než 45 p.j. se nedoporučuje v nadmořské výšce vyšší než 450 m.n.m. a není přípustné v nadmořské výšce vyšší než 900 m.n.m. s ohledem na možné nebezpečí vzniku mrazových trhlin.

⁴⁾ V případě odsouhlasení zadavatelem lze použít i modifikaci vyrobené asfaltové směsi například anorganickými nebo organickými vlákny s prokázanými výtuznými účinky.

⁵⁾ Jako vyrovnávací vrstvu pod nově pokládanou ložní nebo obrusnou vrstvu lze použít uvedené směsi ložních vrstev s $D \leq 22$ příslušné kvality, též ACO 8, ACO 11S, ACO 11+, ACO 11 deklarované jako obrusné vrstvy, avšak s ohledem na tuhost se doporučuje upravit mezerovitost směsi tak, aby odpovídala požadavkům na ložní vrstvu. Vyrovnávací vrstvy jsou pokládány v minimální tloušťce 2D s druhem pojiva odpovídajícího umístění v konstrukci vozovky a TDZ. Pro tyto vrstvy neplatí požadavky na obsah rozpustného pojiva uvedené v tabulce E.7. V případě použití vyrovnávací vrstvy pod litý asfalt (MA), může být maximální mezerovitost až $V_{max} = 7\%$ obj. (8,5 % pro kontrolní zkoušky).

Pro přidávané množství R-materiálu platí mezní hodnoty uvedené v tabulce E.6.

Tabulka 1: Doporučené druhy asfaltových pojiv podle třídy dopravního zatížení a typu asfaltového betonu včetně přípustných tloušťek vrstev [7]



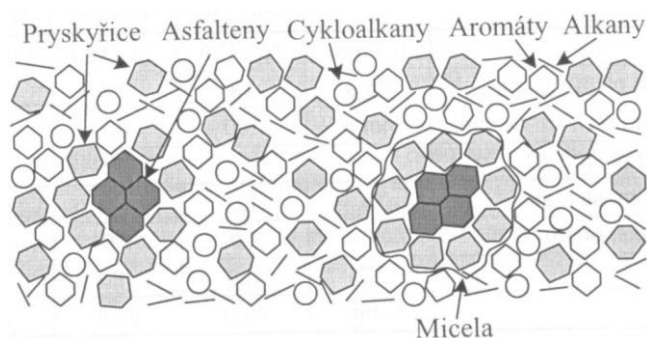
2. TEORETICKÁ ČÁST

Teoretická část diplomové práce je rešerší v oblasti asfaltů se zaměřením na jejich vlastnosti, rozdělení a výrobu. V práci jsou popsány různé druhy modifikovaných asfaltových pojiv. Práce se dále zaměřuje na pojem stárnutí, který souvisí s R-materiálem, jemuž přísluší závěrečná kapitola teoretické části. Ta popisuje R-materiál, jeho získávání (s důrazem na selektivní frézování), jeho způsob zpracování variantou recyklace za horka na obalovně, jeho ožívování (rejuvenaci) a jeho možnosti využití ve směsích obsahujících modifikovaná pojiva.

2.1 Asfalt

Asfalt je dle definice téměř netěkavý, přilnavý a hydroizolační materiál pocházející z ropy nebo přítomný v přírodním asfaltu, který je úplně nebo téměř úplně rozpustný v toluenu a při normální teplotě je velmi viskózní nebo téměř tuhý. Pojivo je materiál, který přilne ke kamenivu a zajistí kohezi směsi. Pojmem asfaltové pojivo lze tedy označit přilnavý materiál obsahující asfalt. [8]

Asfaltová pojiva jsou koloidní směsi vysokomolekulárních uhlovodíků, jejichž elasticko-viskózní vlastnosti se mění se změnou teploty. Skutečný poměr jednotlivých chemických látek (uhlovodíky, kyslík, dusík, síra, kovy, nečistoty) obsažených v asfaltových pojivech je velmi složité určit. Směs lze rozdělit na složky kapalné (mezimicelární – malteny, tj. oleje a pryskyřice) a pevné (micelární – asfalteny). Asfalteny, které jsou považovány za nositele tvrdosti asfaltu, obalené pryskyřicemi (které tak poskytují ochrannou vrstvu před srážením pevných látek) tvoří tzv. micely. Výsledné vlastnosti směsi ovlivňuje množství micel a jejich rozptýlení v kapalné fázi. [9] [10]



Obrázek 3: Koloidní struktura asfaltů [10]



2.1.1 Základní rozdělení asfaltů

Asfalty patří mezi skupinu živic, což jsou směsi uhlovodíků a jejich nekovových derivátů, které jsou rozpustné v sirouhlíku. Živice pak dělíme na asfaltické a pyrogenetické (dehty). Asfaltické živice rozlišujeme na přírodní a ropné asfalty. [10]

Přírodní asfalty

Jak již název napovídá, jedná se o asfalty nacházející se v přírodě. Vyskytují se poměrně vzácně a největším zdrojem je jezero Trinidad o rozloze 35 ha a hloubce přibližně 90 m. Asfalt se získává zahřátím na 160 °C a následným prolitím přes síta, na kterých se zachycují nečistoty a organické zbytky. Přírodní asfalty jsou nevhodné pro použití jako pojivo kvůli své tvrdosti. Z toho důvodu se míchají s měkkým ropným asfaltem, který je pak běžně užíván v silničním stavitelství. [9]

Jejich konzistence je polotuhá až tuhá a obsahují příměsi minerálních látek. Ve světě můžeme dále nalézt asfalt bermudský, venezuelský a v Evropě pak asfalt albánský (ložisko Selenica). [10]



Obrázek 4: Pitch Lake – jezero Trinidad [11]

Ropné asfalty

Jde o asfalty získané destilací ze surové ropy. Ropu rozlišujeme podle chemického a látkového složení na:

- asfaltickou – s velkým množstvím asfaltických látek (asfaltenu a pryskyřice)
- poloasfaltickou (poloparafinickou) – s malým množstvím asfaltických látek
- neasfaltickou (parafinickou) – téměř bez asfaltických látek [9]

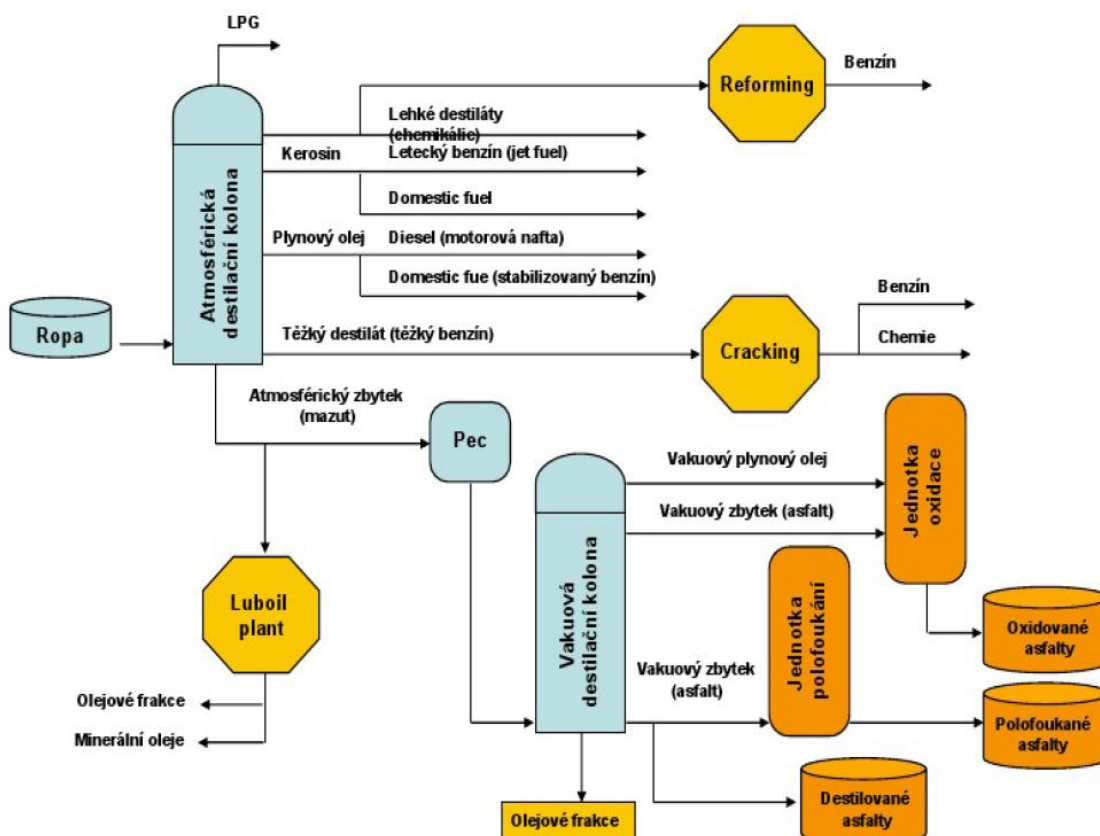


2.1.2 Výroba asfaltů

Nejrozšířenějším způsobem výroby silničních asfaltů je vakuová destilace mazutů, které vzniknou destilací kerosinu, benzínu, petroleje a oleje z již odsolené ropy. Posledním produktem tohoto třístupňového výrobního zařízení je asfalt. Ten se může dále zpracovávat kontinuální oxidací, při které dochází ke změně struktury jednotlivých složek uhlovodíků, čímž je možné ovlivňovat některé vlastnosti asfaltu. Dosažení požadovaných vlastností asfaltu se zajistí přivedením stlačeného vzduchu. V průběhu oxidace se zvyšuje množství asfaltenů, díky čemuž stoupá bod měknutí a zároveň dochází ke snížení hodnoty penetrace a bodu lámavosti. [9] [10]

Podle postupu výroby rozlišujeme asfalty na:

- destilační – získané přímo po destilaci vhodné pro použití v silničním stavitelství
- polofoukané – vyráběné z destilačních asfaltů umělým stárnutím, oxidací vakuového zbytku
- foukané – vyráběné z destilačních asfaltů umělým stárnutím, oxidací k získání vysoce viskózních asfaltů používaných v izolacích proti vodě a vlhkosti
- modifikované – destilační nebo polofoukané jsou nadále upraveny přísadami, v silničním stavitelství se používají pro vysoce namáhané asfaltové směsi a zálivky [9]



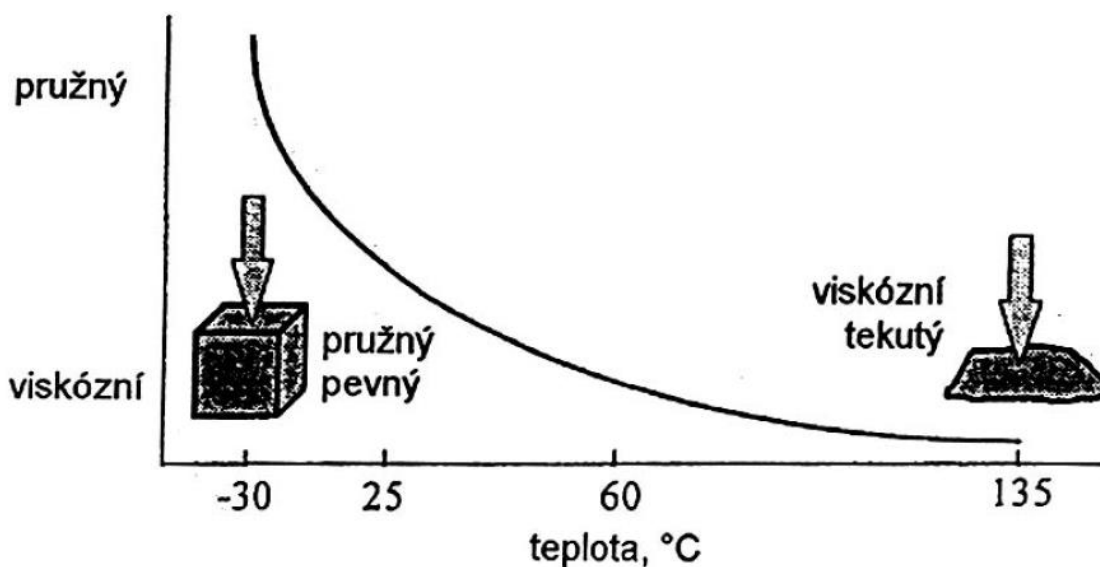
Obrázek 5: Výroba asfaltů v rafinérii [10]



2.1.3 Vlastnosti asfaltů

Asfalt je téměř nerozpustný, neobtná a vodu přijímá jen ve stopových množstvích na svém povrchu. Jeho hustota se pohybuje od 980 kg/m^3 do 1100 kg/m^3 . Asfalt je mrazuvzdorný, avšak za nízkých teplot je křehký. Obecně je odolný proti polárním chemickým látkám, louhům, nízkým koncentracím kyselin i posypovým hmotám. Jeho rozpustnost v organických rozpouštědlech (benzín, benzen apod.) se využívá při výrobě asfaltových laků a nátěrových hmot. Asfalt je hořlavý a velmi výhřevný. [12]

Jeho nejzásadnější charakteristikou je teplotní citlivost. Chování asfaltového pojiva závisí na teplotě. V této souvislosti je označován jako viskoelastický materiál. Asfalt se za vysokých teplot chová jako kapalina (charakterizována svou viskozitou) a za nízkých teplot jako pružná látka. Za běžné teploty vykazuje obojaké vlastnosti (visko-elastické). Pomocí viskozity je vyjádřen silový odpor proti deformaci, který je úměrný rychlosti deformace. Velikost deformace závisí na viskozitě a délce zatížení. Viskózní složka se výrazně projeví v závislosti chování asfaltových směsí na rychlosti zatížení. Při vysokých rychlostech dochází k malé deformaci, zatímco při rychlostech nízkých (nebo stání) vznikají deformace velké. Toto můžeme vyzorovat například na autobusových zastávkách, před křižovatkami nebo ve stoupajících pruzích na dálnicích. [9]



Obrázek 6: Asfalt jako viskoelastický materiál [9]

Jelikož je asfalt organickou látkou, reaguje s kyslíkem z okolního prostředí, čímž dochází k tzv. oxidativnímu tvrdnutí a stárnutí asfaltu, z čehož plyne tvrdší a křehčí struktura. K tomuto procesu (oxidaci asfaltu) dochází rychleji za vysokých teplot (například při míchání horké asfaltové směsi na obalovně). [9]

Jak se bude asfalt při aplikaci v praxi chovat, nám nejlépe popisují jeho mechanicko-fyzikální vlastnosti. Díky dnes už díky běžným zkušebním metodám můžeme u asfaltového pojiva stanovit bod měknutí, penetraci, bod lámavosti, silovou duktilitu nebo jeho přilnavost ke kamenivu. Funkčními zkouškami je možno simulovat stav během výroby asfaltové směsi (oxidativní stárnutí) nebo únavové vlastnosti. [9] [10]



2.1.4 Asfalt v číslech

Asfalt se využívá po celém světě v obrovských množstvích. Více než 90 % všech vozovek je právě asfaltových. Za účelem sdílení informací a znalostí z tohoto odvětví vznikají sdružení, která rozšiřují povědomí a své vzácné zkušenosti. Jako českého zástupce můžeme jmenovat například *Sdružení pro výstavbu silnic*. Na mezinárodní úrovni je pak jedním z hlavních *EAPA (European Asphalt Pavement Association)*, která poskytuje mimo jiné přehled spotřeby asfaltu a asfaltových směsí v rámci Evropy. Momentálně nejnovější publikací od tohoto sdružení týkající se přehledu spotřeby je *Asphalt in Figures 2018* vydaná v únoru 2020 shrnující data do roku 2018. [13]

Celková produkce horkých asfaltových směsí se v Evropě pohybuje průměrně kolem 300 milionů tun za rok, v České republice to v roce 2018 bylo 7,9 milionů tun a pro porovnání USA vyprodukovalo 353 milionů tun. Do obrusných vrstev jsme u nás využili 53 % asfaltových směsí, do ložných pak 24 % a do podkladních 23 %. Z 87 % procent se jednalo o asfaltové betony, z 10,6 % o SMA, pouze 1,1 % představovaly lité asfalty, 0,4 % asfaltový beton pro velmi tenké vrstvy (BBTM) a 0,2 % asfaltový koberec drenážní. Pro zajímavost například ve skandinávských zemích se kvůli problematice mrazových trhlin využívá tzv. velmi měkká asfaltová směs (ve Finsku tyto směsi představovaly 6,1 % z celkové produkce), do které se používají pojiva s gradací 250/330 až 650/900. Tato směs se u nás neprovádí. Celková spotřeba asfaltu v pozemním stavitelství v ČR v roce 2018 byla 420 tisíc tun, přičemž v 27 % případů se jednalo o asfalt modifikovaný. 14 tisíc tun bylo použito do emulzí. [13] [14] [15]

V roce 2018 u nás bylo k dispozici celkem 2 700 000 tun R-materiálu. Toto těžko představitelné množství materiálu bylo z 12 % recyklováno za horka, z 25 % za studena (s přidáním asfaltových emulzí, cementu či zpěněného asfaltu), z 25 % využito v nestmelených vrstvách vozovek, dalších 10 % se použilo mimo pozemní stavitelství a celých 28 % se uložilo na skládky nebo bylo využito neznámo kde. Z dostupných informací je na tom v Evropě hůře jen Slovinsko, kde na skládkách skončilo 61 % R-materiálu. [13]

Roku 2018 bylo v ČR evidováno 28 společností, které asfaltové směsi pouze vyrábějí, 24 společností asfaltové směsi vyrábí i pokládá, a více než 40 se jich dle znalosti *EAPA* zabývá pouze pokládkou. V ČR bylo tohoto roku 103 stacionárních obaloven, 2 mobilní a 76 bylo schopno recyklace za horka. Většina z těchto 76 obaloven přidává R-materiál tzv. za studena (tedy bez ohřevu). Paralelním nebo dvouplášťovým bubnem je v ČR vybaveno pouze cca 15 obaloven. [13]

2.2 Rozdělení asfaltových pojiv

Asfaltová pojiva jsou normou rozdělena dle jejich původu, aplikace, vlastností a výroby. Asfalty aplikované na silnicích rozlišujeme na silniční, speciální silniční (tvrdé silniční a multigradové silniční), polymerem modifikované a dále pak na asfalty ředěné a fluxované. Současně se na silnicích asfaltová pojiva použijí v kationaktivních a anionaktivních asfaltových emulzích. Využití najdou asfalty i v průmyslovém odvětví, kde se rozlišují asfalty oxidované a tvrdé průmyslové. [8]



2.2.1 Silniční asfalty

Silniční asfalty jsou v současnosti nejpoužívanějším pojivem v asfaltových směsích. Jejich primárním využitím je tedy výstavba a údržba pozemních komunikací, dále najdou využití například ve vodním stavitelství. Označují se podle hodnoty penetrace stanovené zkušební metodou popsanou v normě *ČSN EN 1426 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou*, která vyjadřuje konzistenci materiálu. Nejčastěji v ČR používané asfaltové pojivo je 50/70, dále pak například 35/50 nebo 70/100. Každý druh silničních asfaltů musí splňovat požadavky uvedené v normě *ČSN EN 12591 Asfalty a asfaltová pojiva – Specifikace pro silniční asfalty*. [10] [16]

2.2.2 Tvrdé silniční asfalty

Hranice mezi silničními asfalty a tvrdými silničními asfalty není pevně daná, ale obecně se za tvrdé silniční asfalty uvažují asfaltová pojiva 10/20, 15/25 a 20/30. Tato pojiva se aplikují v asfaltových směsích, kdy je vyžadována vysoká únosnost a tuhost. Požadavky pro tyto asfaltová pojiva obsahuje norma *ČSN EN 13924-1 Asfalty a asfaltová pojiva – Systém specifikace pro speciální silniční asfalty – Část 1: Tvrdé silniční asfalty*. [10] [17]

2.2.3 Multigradové silniční asfalty

Jedná se o speciální asfalty pro silniční aplikace s nižší teplotní citlivostí (vylepšené vlastnosti za nízkých a vysokých teplot) v porovnání se standardními silničními asfalty. Dosahují vyšších modulů tuhosti a větší odolnosti vůči trvalým deformacím. Druhy multigradových asfaltů se značí rozsahem penetrace (obvykle 20/30, 35/50 a 50/70) a bodu měknutí - např. MG 20/30-67/74. Vlastnosti jsou předepsané v normě *ČSN EN 13924-2 Asfalty a asfaltová pojiva – Systém specifikace pro speciální asfalty – Část 2: Multigradové silniční asfalty*. [8] [18] [19]

2.2.4 Modifikované asfalty

Modifikovanými asfalty se rozumí asfaltová pojiva, kterým byly při výrobě modifikovány jejich chemické nebo fyzikálně-mechanické vlastnosti použitím jedné nebo více chemických přísad (aditiv). Mezi tyto přísady patří například přírodní kaučuk, syntetické polymery, síra nebo organokovové sloučeniny. [9] [10]

K modifikaci asfaltů aditivы vede stále se zvyšující dopravní zatížení, čímž vzniká potřeba vyrábět kvalitnější asfaltové směsi. Modifikací můžeme dosáhnout zlepšení přilnavosti asfaltu ke kamenivu, zlepšení odolnosti proti vzniku trvalých deformací (zejména při vysokých teplotách), snížení teplotní citlivosti a jeho křehkosti v oblasti nízkých teplot (snížení bodu lámavosti), zvýšení bodu měknutí (dojde k rozšíření oboru plasticity), snížení stárnutí asfaltu, zlepšení únavových vlastností a s tím související trvanlivosti vozovek, větší odolnosti proti vzniku mrazových trhlin, snížení či zvýšení pružného chování, větší tažnosti nebo menšího stékání. [9] [12] [20]

Nejběžnějším modifikátorem jsou termoplastické polymery, které se do asfaltu vmíchávají za vysokých teplot. Zahřátím se stávají reversibilně plastickými a výsledná směs je pak vysoce viskózní. Termoplastické polymery lze rozdělit na elastomery (kaučuky) a plastomery (termoplasty). Výsledné vlastnosti modifikovaných asfaltů závisí



jak na druhu a množství modifikátoru, tak na použitém výchozím asfaltovém pojivu. Polymerem modifikované asfalty se označují PMB (Polymer Modified Bitumen) a pro jejich kompletní značení je potřeba dodat rozsah penetrace a bod měknutí (např. PMB 25/55-65). Polymerem modifikovanými asfalty se zabývá norma ČSN EN 14023 *Asfalty a asfaltová pojiva – Systém specifikace pro polymerem modifikované asfalty*. [9] [21]

SBS

Elastomer styren-butadien-styren (SBS) je termoplastický kaučuk, který se do asfaltového pojiva přidává pro dostatečnou modifikaci v množství kolem 4 % hmotnosti. Je složen z kaučukového butadienu a styrenu. SBS při rozpouštění v asfaltu absorbuje naftenové (olejové) podíly a část přítomných asfaltenů, čímž vzniká pružná hmota s vysokou tažností. Dochází ke zvýšení bodu měknutí, snížení bodu lámavosti, zvýšení tažnosti (duktility) a nárůstu vratné deformace. Po absorpci olejové frakce z pojiva SBS nabobtná (až osmkrát jeho původního objemu), proto se někdy polymer přidává přímo do asfaltové směsi na obalovně. Polymer tak nemá čas na interakci s asfaltem a nebude tak vykazovat výrazné zvýšení objemu. Nicméně takto vytvořená směs nebude dosahovat stejných vlastností jako při správném postupu modifikace asfaltového pojiva. [12] [22]

EVA

EVA (etylen-vinyl-acetát) je jeden z nejpoužívanějších plastomerů pro modifikaci asfaltových pojiv. Vyznačuje se změkčováním při ohřevu a tvrdnutím při chlazení. Má tendenci více ovlivňovat penetraci asfaltového pojiva než bod měknutí, čímž se liší od elastomerů. Obecně je prokázáno, že zvětšuje tuhost. Vlastnosti EVA se klasifikují podle molekulové hmotnosti a obsahu vinylacetátu. Je teplotně stabilní za běžných teplot míchání asfaltu, avšak polymer má tendenci separovat se od pojiva během statického ukládání, proto je doporučeno před použitím důkladně promíchat. [22] [23]



Obrázek 7: EVA a SBS [22]



RET

Reaktivní elastomerní terpolymer (RET) je schopný chemického provázání s asfaltovou matricí, modifikace tak není postavena pouze na fyzikálním rozptýlení modifikátoru v asfaltovém pojivu. Vzniklá chemická vazba mezi polymerem a asfaltem brání separaci při skladování, což běžně bývá problém. Terpolymer se v horkém asfaltu dobře rozpouští a vytváří tak homogenní materiál (např. na rozdíl od modifikací pomocí SBS). [24]

HiMA

HiMA (Highly Modified Asphalt = vysoce modifikovaný asfalt) je vysoce polymerem modifikovaný asfalt, který se v Evropě začal používat teprve v nedávné době. Jeho složení vychází z použití elastomeru SBS. Výraznou změnou je obrácení objemových fází ve směsi asfaltu s polymerem (překročení hranice obsahu polymeru SBS – 7 až 7,5 % hmotnosti oproti běžným 4 %), kdy v pojivu nabobtnáním polymeru vzniká spojitá polymerová síť, která působí jako poddajná výztuž. [25] [26] [27]



Obrázek 8: Poměr objemové fáze SBS polymeru a asfaltu [25]

Větší obsah polymeru v asfaltovém pojivu výrazně přispívá ke zlepšení odolnosti asfaltových směsí proti vyjíždění kolejí, odolnosti vůči únavě materiálu a praskání. Asfaltové vrstvy s HiMA více brání šíření únavových trhlin, což umožňuje snížení tloušťky vrstvy. Využití vysoce modifikovaných asfaltů je především tam, kde je vyžadována velmi vysoká trvanlivost konstrukce (při vystavení asfaltových povrchů velkým tlakům a deformacím, při potřebě zvýšené odolnosti ložných vrstev proti únavě či zvýšení odolnosti vrstev vůči nízkým teplotám). Použití HiMA do podkladních vrstev prodlouží životnost vozovky až na 50 let (vozovky pak nesou označení „věčné“). [25] [26]

Hodnoty penetrace těchto asfaltů se pohybují na poměrně široké škále, zatímco bod měknutí nabývá 80 °C a více. Měkčí asfalty (např. 65/105-80) se využijí tam, kde je vyžadována velká tuhost a zároveň pružnost, tj. v obrusných vrstvách s BBTM, PA, SMA nebo u speciální technologie tryskové metody vrstvy SAMI či při tvorbě asfaltových emulzí. Univerzální pojivo (např. 45/80-80) vysoce odolné proti únavě a vyjíždění kolejí lze použít do všech asfaltových vrstev vozovky. Tvrdší asfalty (např. 25/55-80) jsou



určeny pro použití do směsí vyžadující nadstandardní odolnost vůči deformacím (místa stání nebo pomalým provozem těžkých vozů či kontejnerových terminálů). [25] [27]

Zvýšená pozornost u těchto vysoce modifikovaných asfaltů je potřeba při návrhu asfaltových směsí. Pro dosažení požadovaných vlastností asfaltových směsí s HiMA je doporučeno zvýšit množství pojiva o 0,3 až 0,4 % oproti stejné asfaltové směsi za použití běžného asfaltového pojiva. Výroba asfaltové směsi je vhodná při teplotě 160 až 170 °C (stejně tak i skladování HiMA). [25]

CRMB

CRMB (Crumb Rubber Modified Bitumen) je označení pro asfalt modifikovaný pryžovým granulátem. Pryžovým granulátem se rozumí odpadní pryž (např. z ojetých pneumatik) zbavená kordu a upravená mechanicky drcením a mletím. Modifikace silničního asfaltu pryží v mísicím centru příznivě ovlivňuje výsledné vlastnosti asfaltové vrstvy, která se pak vyznačuje zlepšením nízkoteplotních vlastností (odolnost proti vytváření smršťovacích trhlin a prokopírování trhlin do dalších vrstev), zvýšením odolnosti proti únavě (omezení vzniku síťových a mozaikových trhlin), snížením hlučnosti a zlepšením protismykových vlastností povrchu. [28]



Obrázek 9: Pryžový granulát [29]

Obvykle se dávkuje 5 až 25 % pryžového granulátu z hmotnosti pojiva, přičemž dávkování pryže výrazně ovlivňuje viskozitu pojiva (přidáním 5 až 15 % vznikne tzv. nízkoviskózní asfalt, 15 až 25 % pak asfalt vysokoviskózní). Procesem absorpce lehké frakce asfaltu nastane bobtnání pryže (zvětšení objemu granulátu), což vede k dalšímu zvyšování viskozity. Výroba probíhá za teplot 170 až 185 °C, čímž se z tekutého pojiva stává „řidká kaše“, kdy se zvýší viskozita 5 až 50krát. Tímto procesem se snižuje penetrace a zvyšuje bod měknutí. Pojivo pak vykazuje zvýšené vratné přetváření (vratnou duktilitu) a resilienci (pružnost). Pro zvýšení tuhosti či trvanlivosti lze do směsi vmístit přísady jako např. vápenný hydrát v množství minimálně 20 % hmotnosti CRMB, dále pak například aditiva zlepšující adhezi apod. Stupeň modifikace má významný vliv na mezerovitost směsi. [28] [30] [31]



Mimo výše zmíněné vlastnosti směsi CRMB vykazují zpravidla nižší hodnoty odolnosti vůči ITSR, nižší moduly tuhosti a dobrou zhutnitelnost. Mezi nevýhody lze zařadit náročnost na skladovatelnost pojiva, organizační opatření při výrobě směsi a vyšší počáteční náklady. Na druhou stranu klady jsou však například zvýšená odolnost při stárnutí pojiva, větší odolnost proti trvalým deformacím, delší životnost vozovky a možnost snížení tloušťky vrstev s CRMB s vyšším obsahem pojiva. Dalším pozitivem je znovuvyužití „odpadních“ materiálů. [30]

Technické podmínky Ministerstva dopravy TP 148 z roku 2009 zabývající se hutněnými asfaltovými vrstvami s CRMB nedoporučují přidávání R-materiálu do takto modifikovaných směsí. Roku 2012 však vyšlo Doporučení pro asfalty a asfaltové směsi modifikované pryžovým granulátem vydané Výzkumnou společností pro silniční stavitelství a dopravu, které použití R-materiálu nevyklučuje. Při výrobním procesu je mimo jiné potřeba zajistit homogenitu již klasifikovaného R-materiálu a sledovat proměnlivé obsahy pojiva. [31]

2.2.5 Ředěné a fluxované asfalty

Ředěné a fluxované asfalty jsou takové asfalty, jejichž viskozita byla snížena přísadou. Viskozita ropných ředěných asfaltů se snižuje rozpouštědlem pocházejícím z ropy (např. lakový benzín a petrolej) a viskozita asfaltů fluxovaných se pak snižuje přísadou fluxuačního oleje (olejů). Výhodou těchto asfaltů je jejich zpracovatelnost za běžných teplot. [8]

Do ředěných asfaltů se přidávají organická rozpouštědla (obvykle na bázi ropných frakcí) v množství 40 až 50 % hmotnosti. Uvolňované páry z rozpouštědel mají nepříznivý vliv na životní prostředí a zvyšují nebezpečí vzniku požáru, mimo jiné proto se tyto asfalty již příliš nepoužívají. Dříve se využívaly při zpracování asfaltových směsí za studena, výhodou taktéž je možnost použití kyselého či mokrého kamenivo. Ředěné asfalty na bázi benzínových ředitel jsou rychle tuhnutí AR-RT, zatímco na bázi petrolejových ředitel tuhnou normálně AR-NT (výroba studené směsi na obalově mícháním s kamenivem pro výpravu výtluků). Pro zlepšení přilnavosti k mokrému či kyselému kamenivu se případně užívají aditiva. Dále se ředěné asfalty mohou použít jako postřiky či nátěrové hmoty. [9] [10] [12]

Jako fluxovadla jsou používány minerální (např. ropné) oleje značeny Fm a oleje rostlinného původu značeny Fv. Ředěnými a fluxovanými asfalty se zabývá norma ČSN EN 15322 *Asfalty a asfaltová pojiva – Systém specifikace ředěných a fluxovaných asfaltových pojiv*. [32]

2.3 Stárnutí asfaltových pojiv

Vlivem působení vzdušného kyslíku, tepla a ultrafialového záření na asfaltové pojivo dochází k negativním změnám jeho vlastností. Tento jev je nazýván jako stárnutí asfaltového pojiva. Zhoršení vlastností pojiva vede ke snížení trvanlivosti asfaltové směsi (asfaltové vrstvy), která pak méně odolává účinkům zatížení a je více náchylná na poruchy za nízkých teplot. V průběhu času dochází především ke změně reologických



vlastností, které se mohou sledovat empirickými (zaznamenáme snížení hodnoty penetrace a zvýšení bodu měknutí) či funkčními zkouškami. [33]

Stárnutí asfaltových pojiv se projevuje v celém životním cyklu pojiva. Dochází k němu během jeho výroby, skladování, zpracování, dopravy, pokládky asfaltových směsí a jejich životnosti. Stárnutí tak neustále negativně ovlivňuje užité vlastnosti asfaltových pojiv (směsí). Dochází ke změně modulu tuhosti (zvysování), snižuje se odolnost proti trhlinám a plastickým deformacím, což vede ke snižování kvality a trvanlivosti asfaltových vrstev. Zvyšuje se komplexní smykový modul a klesají fázové úhly, čímž se snižuje gradace asfaltového pojiva. Vlivem tvrdnutí pojiva dochází k jeho křehnutí za nízkých teplot a ke zhoršení únavových charakteristik, tím se pojivo stane náchylnějším ke tvorbě trhlin. [33]

2.3.1 Termooxidační stárnutí

Termooxidační stárnutí nejvíce přispívá k degradaci asfaltových materiálů. Jde o soubor chemických pochodů, které mají povahu radikálových řetězových reakcí. Závisí v největší míře na teplotě a přístupu vzdušného kyslíku k pojivu (velikosti kontaktní plochy se vzduchem). Dochází k zabudování kyslíkových atomů do organických uhlovodíkových molekul a jejich přeměně na sloučeniny. Tento proces následně ovlivňuje fyzikální vlastnosti pojiv (pružnost, moduly tuhosti, křehkost za nízkých teplot atd.). Tyto negativní degradační změny lze souhrnně označit za oxidační stárnutí pojiva. [10] [33] [34]

Vliv oxidačního stárnutí je nejvýraznější ve fázích výroby, dopravy a pokládky asfaltové směsi, protože asfaltové pojivo je v tu chvíli zahřáto na vysoké teploty a oxidaci je vystavena velká plocha materiálu. Proces oxidačního stárnutí však pokračuje v průběhu celé životnosti asfaltové vrstvy vozovky. Dalšími faktory ovlivňující stárnutí jsou v tuto chvíli difúzní odpor asfaltového filmu (roste s jeho tloušťkou), permeabilita (propustnost) asfaltové vrstvy pro molekuly vzdušného kyslíku (závislá na její mezerovitosti a tloušťce), ultrafialové záření atd. Výše zmíněné reakce jsou pomalé, nastávají při styku asfaltu se zemskou atmosférou a jsou řízeny teplotou. Zvyšující teplota tak významně ovlivňuje oxidační účinek. [10] [33] [34]

2.3.2 Destilační procesy

Destilační procesy (odpařování) probíhají nejvíce při zpracování asfaltových pojiv za horka. Často se vyskytují u asfaltů, u kterých dochází v důsledku termooxidačních dějů ke štěpení uhlovodíkových molekul za vzniku nízkomolekulárních sloučenin nebo obsahují lehké olejovité podíly. Při udržování vysoké teploty, dochází k vydestilování (odpaření) těchto lehkých olejů a sloučenin. Toto odpařování závisí především na teplotě, velikosti povrchu a penetraci asfaltu. Stárnutí odpařováním je méně významné pro změnu vlastností asfaltu v porovnání s oxidačním stárnutím. [10] [33] [34]

2.3.3 Migrační procesy

Migrační procesy probíhají za běžných teplot a s menší rychlostí. Typicky probíhají v situacích, kdy jsou do asfaltového pojiva přimíchány malé podíly fluxačních olejů nebo pokud nejsou při výrobě použity dostatečně výkonné destilační kolony. Následkem dochází k nárůstu velikosti koloidních částic v asfaltu. Asfaltový se shlukují do větších



seskupení a fluxační oleje vnikají do kameniva. Nárůstem velikosti částic postupně vznikne hrubá disperze a vícefázový systém. Tímto dochází k vytvrzování (křehnutí) asfaltového pojiva, pojivo tak ztrácí plasticitu a pružnost. [10] [33] [34]

2.3.4 Strukturální stárnutí

Strukturální stárnutí (tvrdnutí) se projevuje, když je asfaltové pojivo vystaveno nízkým teplotám po delší časové období. Většinou jde o reverzibilní proces, který není spojen s chemickými změnami materiálu. Jde o fyzikální procesy (reorganizaci, agregaci a fixaci molekul a sloučenin), které ve svém důsledku zdánlivě vedou ke zvýšení tvrdosti materiálu. [10] [33] [34]

2.3.5 Simulace stárnutí

Vliv stárnutí na asfaltová pojiva lze v dnešní době zrychleně simulovat v laboratořích. Pomocí laboratorních zkoušek lze posoudit náchylnost asfaltových pojiv k výše zmíněným změnám vlastností. Zkoušky mohou probíhat na asfaltových pojivech či na vyrobených asfaltových směsích. [10] [33] [34]

Pro simulaci stárnutí asfaltových pojiv se rozlišuje krátkodobé a dlouhodobé stárnutí. Krátkodobým stárnutím se simuluje stárnutí probíhající při výrobě, dopravě a pokládce asfaltové směsi. Využívají se metody RTFOT (klasická a modifikovaná), TFOT a RFT. Dlouhodobým stárnutím se simuluje degradace asfaltového pojiva, které se již nachází ve ztuhnuté asfaltové vrstvě. Využívají se metody PAV (tlaková nádoba), HiPAT (vysokotlaká metoda), RCAT (stárnutí v rotačním válci), LTRFT (stárnutí v rotační baňce) a 3xRTFOT. [10] [33] [34]

Pro simulaci procesu stárnutí asfaltových směsí se využívá metoda BSA. Spočívá v urychleném oxidativním stárnutí tenkého filmu asfaltového pojiva na povrchu kameniva směsi, která je neztuhnutá rozprostřená na ocelových pleších v tenké vrstvě a vystavena teplotě 80 °C po dobu 96 hodin za nuceného přívodu vzduchu. [10] [34]

2.4 R-materiál a recyklace asfaltových směsí

R-materiál (RA = Reclaimed Asphalt) popisuje norma *ČSN EN 13108-8 ed. 2 Asfaltové směsi - Specifikace pro materiály - Část 8: R-materiál* jako upravený materiál (frézovaný, drcený, tříděný, smíchaný s jiným materiálem atd.) ze znovuzískané asfaltové směsi, který je po řádném odzkoušení, posouzení a klasifikaci vhodný a připravený k použití jako stavební materiál pro asfaltovou směs. Znovuzískanou asfaltovou směsí (ZAS) se rozumí odfrézovaný nebo jiným způsobem vybouraný materiál z asfaltových vrstev určený k recyklaci, může jít i o produkt neshodné výroby. R-materiál může obsahovat maximálně 5 % hmotnosti ostatních recyklovaných materiálů (recyklátu z betonu, ze zdiva atd.) [35] [36]

Využitelnost R-materiálu při výstavbě a údržbě pozemních komunikací je široká. Využívá se zejména pro hutněné asfaltové vrstvy, provádění výsprav výtlučků za horka malým recyklérem a do asfaltových směsí obalovaných za studena. Užití R-materiálu je dáno především frakcí kusové zrnitosti. R-materiál se v dnešní době používá již pro všechny



třídy dopravního zatížení pozemních komunikací, pro konstrukce jiných dopravních ploch, nemotoristických komunikací nebo pro zpevnování krajnic či konstrukcí polních a lesních cest. [37]

2.4.1 Selektivní frézování

Získání R-materiálu z vozovky je prvním krokem v procesu recyklace asfaltových vozovek, přičemž frézování je ve většině případů tím nejvhodnějším způsobem. Silniční frézy jsou konstruovány pro frézování selektivní či hromadné. Tyto stroje jsou přizpůsobeny k odstranění předem stanovených tloušťek obrusných, ložných i podkladních vrstev (asfaltových, betonových, cementových stabilizací atd.) vozovky pomocí frézovacích hrotů osazených na frézovacím bubnu. [38]

Frézování probíhá nejčastěji za studena (za běžné teploty). Při frézování pozemních komunikací jsou využívány samohybné silniční frézy, u kterých je vstřikována voda na frézovací nástroje, čímž se zvyšuje jejich životnost a snižuje prašnost. Materiál je pásovým dopravníkem přesouván na dopravní prostředky, kterými je dopravován do mísících center či na deponie. [39]



Obrázek 10: Silniční fréza [40]

Silniční frézy lze rozlišit podle hmotnosti (velikosti), což souvisí s možnostmi jejich využití.

- Malé frézy s šířkou frézovacího válce do 600 mm a provozní hmotností do 13 t se používají k frézování ne příliš dostupných míst, opravám vozovek či frézování chodníků. Výkon fréz při frézovací hloubce menší než 100 mm se pohybuje kolem 500 m²/den.
- Kompaktní frézy kombinují výhody malých a velkých tříd fréz. Jejich provozní hmotnost je až 20 t a šířka záběru nabývá až 1300 mm. Uplatní se při pracích v omezeném prostoru, ale jsou schopné vyfrézovat i rozsáhlé komunikace.



Disponují širokou škálou frézovacích bubnů, což rozšiřuje rozsah jejich použití. Při frézovací hloubce 100 mm se výkon může pohybovat kolem 3000 m²/den.

- Velké frézy mají šířku frézovacího bubnu až 2200 mm a provozní hmotnost i přes 40 t. Využití najdou především při frézování velkých ploch jako parkovišť, letišť nebo dálnic. Snadná výměna různých frézovacích bubnů umožňuje využití frézy pro odstranění konstrukce vozovky až do hloubky 350 mm v jednom záběru nebo naopak pro jemné frézování. Výkony se pohybují kolem 7000 m²/den. [39] [40] [41]

Selektivní frézování znamená frézování po jednotlivých vrstvách konstrukce vozovky. Takto prováděné frézování přináší významné přínosy z hlediska ekologického i ekonomického. Frézování po vrstvách zajistí oddělení mletého materiálu podle typu směsi (rozdílné zrnitosti, pojiva, kvalita), což je základním předpokladem pro správné využití R-materiálu. Selektivní frézování neznamena výrazně časové znevýhodnění. Díky menší tloušťce frézované konstrukční vrstvy pracují frézy za studena rychleji než při odstraňování celé vozovky při maximální možné hloubce v jednom záběru. Frézování dvou nebo tří vrstev může být ve výsledku i rychlejší než frézování všech vrstev najednou. Některé moderní frézy jsou speciálně uzpůsobeny selektivnímu frézování. Obrusné vrstvy vozovek s modifikovaným asfaltem je potřeba frézovat (odvážet i skladovat) samostatně. Nejčastěji se selektivní frézování využije na dálnicích a silnicích I. tříd. [38] [42] [43] [44]



Obrázek 11: Selektivní frézování [45]

Další motivací pro selektivní frézování je nově definovaný způsob nakládání se znovuzískanou asfaltovou směsí. Vyhláška č. 130/2019 Sb.: Vyhláška o kritériích, při jejichž splnění je asfaltová směs vedlejším produktem nebo přestává být odpadem z roku 2019 vydaná Ministerstvem životního prostředí ve spolupráci s Ministerstvem průmyslu a obchodu klasifikuje znovuzískanou asfaltovou směs, řeší, jak s ní naložit a definuje pravidla recyklace a jejího použití. Znovuzískaná asfaltová směs (ZAS) je rozdělena do

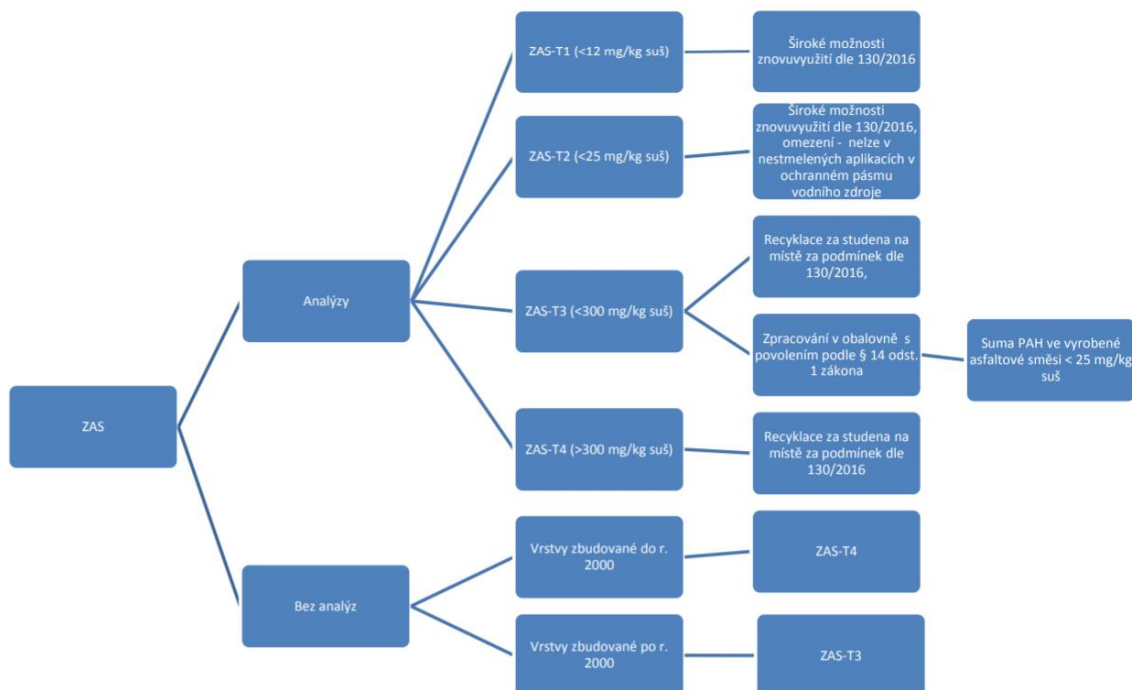


kvalitativních tříd ZAS-T1, ZAS-T2, ZAS-T3 a ZAS-T4 podle obsahu celkového množství polyaromatických uhlovodíků (PAU) (viz. *Tabulka 2*). [46]

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

Tabulka 2: Klasifikace znovuzískané asfaltové směsi [46]

Cílem vyhlášky je přesně určit podmínky a kritéria, kdy je možné ZAS považovat za vedlejší produkt a nikoliv odpad, a kdy přestává být odpadem ZAS a z něj vyrobená asfaltová směs. Tímto je umožněno vyvést materiál z režimu odpadů, čímž odpadá administrativa spojená s nakládáním s odpadem. Po stanovení obsahu PAU akreditovanou laboratoří v jednotlivých asfaltových směsích a jejich zařazení do kvalitativní třídy je tak jasně dáno, jak se s materiálem může nakládat. Vyhláška dále například stanovuje, kdy se ZAS klasifikuje jako nebezpečný odpad. Jak se znovuzískanou asfaltovou směsí nakládat hrubě shrnuje schéma níže (*Obrázek 12*). [46] [47]



Obrázek 12: Schéma ustanovení vyhlášky [48]

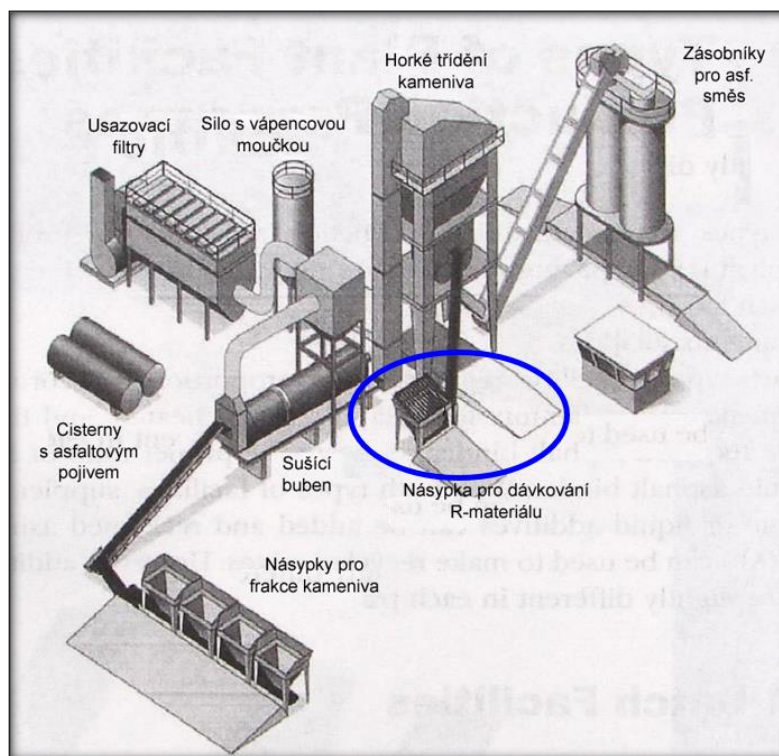


2.4.2 Recyklace za horka na obalovně

Recyklovat netuhé vozovky je možno v míchacím centru (obalovně, mobilní jednotce) nebo na místě, přičemž podle teploty zpracování se rozlišuje recyklace za horka a za studena. Co se týče asfaltových vrstev, recyklací za studena se rozumí míchání R-materiálu s asfaltovou emulzí nebo pěnou, případně pak s cementem nebo vápenným hydrátem. Základní způsoby recyklace se tak rozlišují celkem 4 a to v míchacím centru (obalovně) za horka, v míchacím centru za studena, na místě za horka a na místě za studena. Tato práce se dále zabývá pouze recyklací asfaltem stmelených vrstev za horka na obalovně. Lze rozlišovat čtyři způsoby tohoto druhu recyklace. [49]

Dávkování R-materiálu přímo do míchačky šaržové obalovny

Upravený R-materiál (tříděním a drcením na frakce dle druhu směsi) se přidává přímo do míchačky šaržové obalovny. Takto dávkovaného R-materiálu se doporučuje přidávat maximální množství 25 % z celkové hmotnosti směsi, obvykle se uvažuje však 15 až 20 %. Toto omezení je dáno nutností předejít kamenivo na vyšší teplotu s ohledem na výslednou teplotu směsi a vlhkostí, kterou zpracováváný R-materiál obsahuje, jelikož se skládky R-materiálu ne vždy zastřešují. Během výroby vzniká vodní pára, kterou je nutno řádně odvětrat. V případě přidání více jak 15 % R-materiálu se doporučuje výpočet gradace přidávaného pojiva. [49] [37]

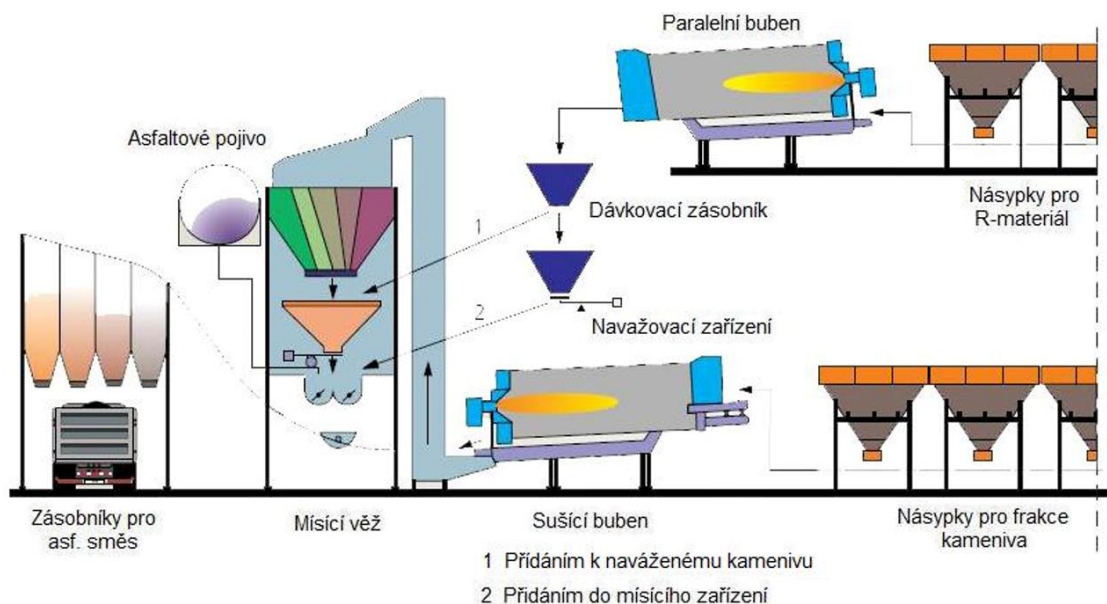


Obrázek 13: Dávkování R-materiálu přímo do míchačky šaržové obalovny [49]



Přehřívání R-materiálu v paralelním bubnu šaržové obalovny

Další možností recyklace za horka na obalovně je metoda, při které se přehřívá R-materiál v paralelním bubnu šaržové obalovny pomocí hořáků obvykle na 130 °C, což umožňuje výrazně vyšší procento dávkování R-materiálu (v České republice za ideálních podmínek se současným technologickým zázemím až 80 %). R-materiál je potřeba zastřešovat a pravidelně u něj kontrolovat vlastnosti pojiva. Použití frézovaného materiálu je vhodné podle vrstev (vysoce hodnotný R-materiál z obrusných vrstev opět použit do obrusných vrstev). V případě asfaltových směsí s modifikovaným asfaltem a vyšším podílem R-materiálu je třeba použít modifikovaný asfalt se zvýšeným obsahem polymeru nebo speciální asfaltová pojiva typu PMB RC. [49] [37]

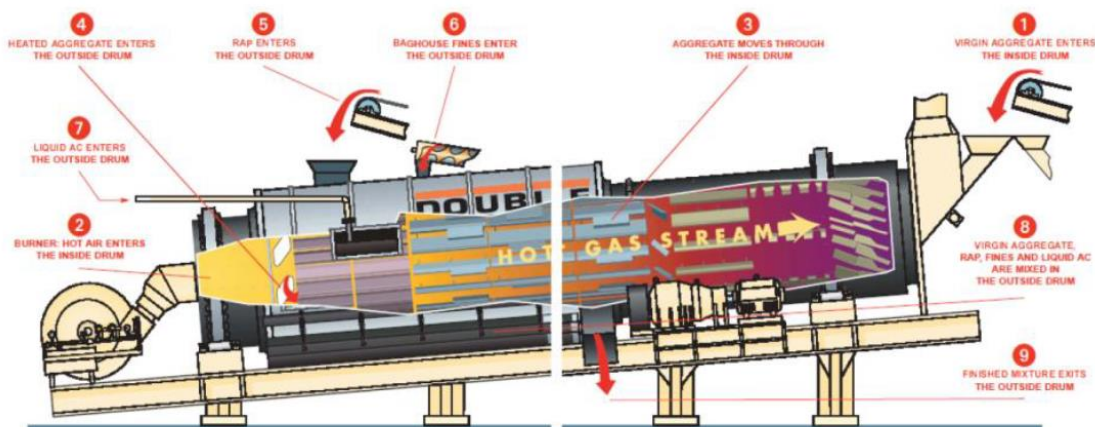


Obrázek 14: Přehřívání R-materiálu v paralelním bubnu [49]

Roku 2020 se objevila v České republice nová (v Evropě i ve světě již odzkoušená) technologie obalovny umožňující zpracovat až 90 % R-materiálu. R-materiál je ohříván v paralelním horkovzdušném sušícím bubnu s rekuperací odpadních plynů. Hlavním ekologickým přínosem tohoto nového typu sušícího bubnu je, že ohřívání R-materiálu nepříjde do přímého styku s plamenem hořáku, eliminují se tak výrazně zplodiny, které při ohřevu vznikají. Zároveň je možno R-materiál ohřívát až na 160 °C bez jeho degradace, což umožňuje přidávání vysokých procent do směsí. [50]

Nepřímý ohřev R-materiálu v dvouplášťovém bubnu

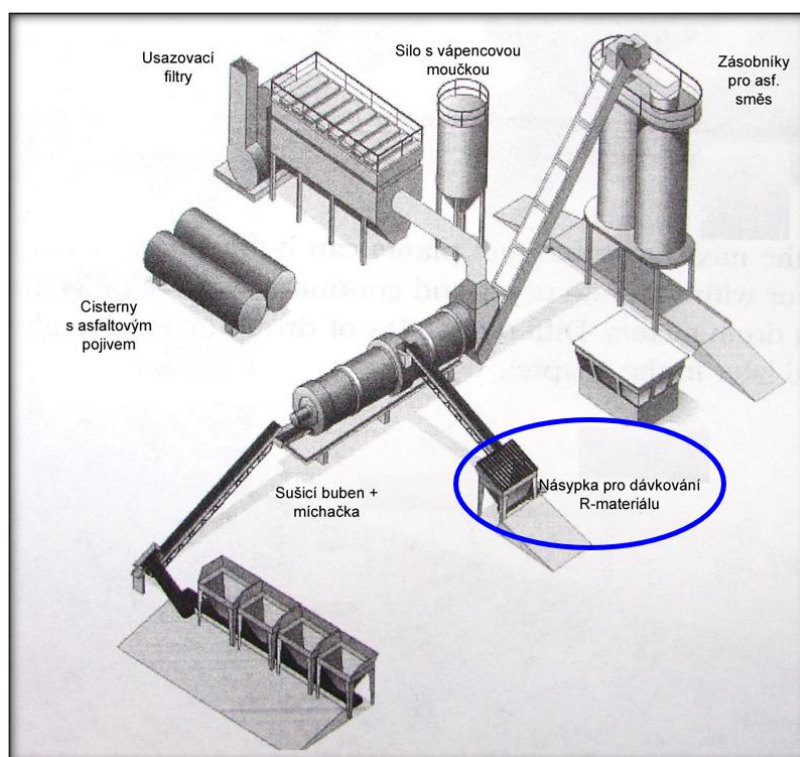
Dalším druhem jsou obalovny využívající metodu se speciálně navrženým dvouplášťovým bubnem s nepřímým ohřevem R-materiálu. Buben je rozdělen na vnější a vnitřní část. Do vnitřní části se zavádí kamenivo, které po přehřátí horkým proudem plynu propadne do části vnější, kde byl mezitím ohříván R-materiál. V případě kontinuálních obaloven zde probíhá promísení složek společně s filerem a asfaltovým pojivem, což je jen jednou z variant využití této technologie. [37]



Obrázek 15: Princip dvouplášťového bubnu [51]

Metoda Drum-mix pro kontinuální obalovny

Recyklace za horka v kontinuální obalovně je nezastavující proces, který vyžaduje konstantní kvalitu vstupních materiálů. R-materiál se dávkuje ve střední části sušícího a ohřívacího bubnu průběžně. Následně se míchá kamenivo s asfaltovým pojivem. Tento typ se využívá především v USA, kde je takto tvořeno až 80 % směsí. [49] [37]

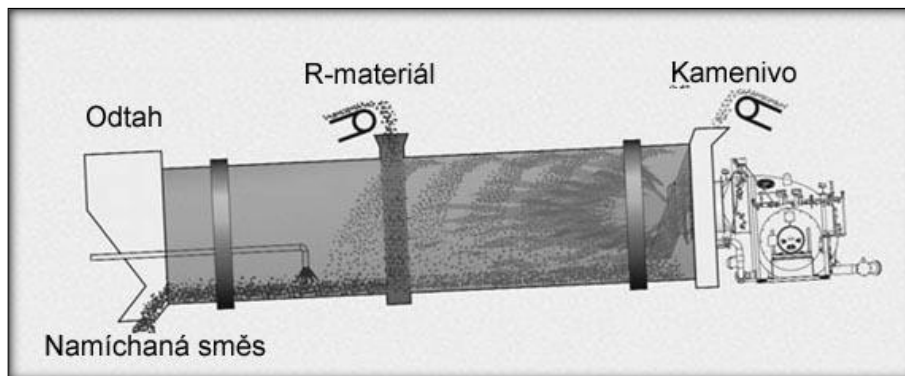


Obrázek 16: Kontinuální obalovna [49]

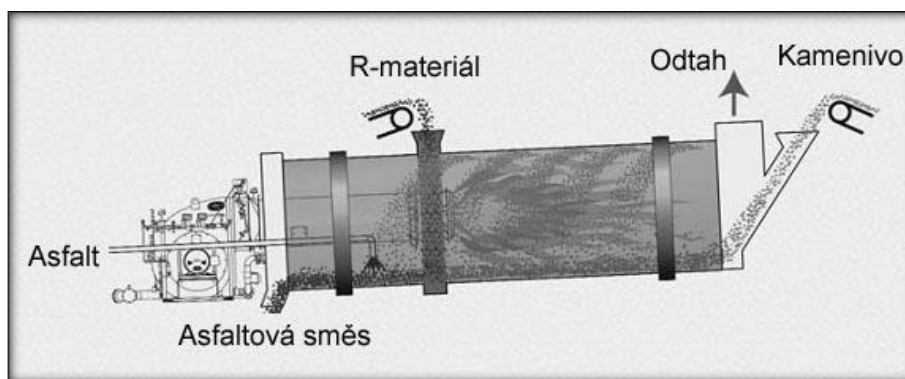


Existují tři způsoby přidávání R-materiálu do asfaltové směsi:

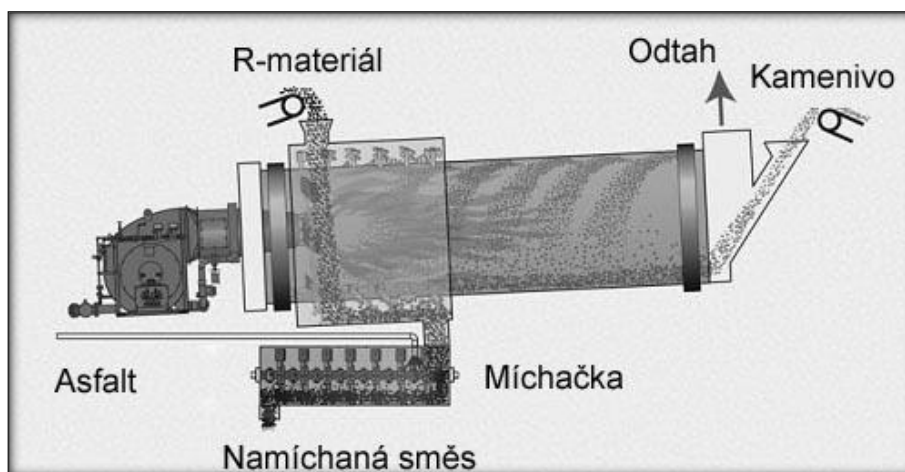
- R-materiál se přidává souběžně s proudem horkého vzduchu
- R-materiál se přidává proti proudu horkého vzduchu
- Separátní vysoušení R-materiálu, míchání v míchačce [49] [37]



Obrázek 17: Přidávání R-materiálu souběžně s proudem horkého vzduchu [49]



Obrázek 18: Přidávání R-materiálu proti proudu horkého vzduchu [49]



Obrázek 19: Separátní vysoušení R-materiálu, míchání v míchačce [49]



2.4.3 Ožívování R-materiálu

R-materiál obsahuje zestárlé pojivo, které již nemá požadované vlastnosti. To se samozřejmě odráží do výsledné asfaltové směsi, u které se tento fakt projevuje rostoucí tuhostí, menší odolností proti únavovému a termálnímu namáhání a zkrácenou životností. Z tohoto důvodu je nutné vliv pojiva v nově vyráběných směsích kompenzovat pojivem vyšší gradace (problematika na obalovnách – nebývá dostatek zásobníků, aby byl k dispozici méně standardní měkký asfalt) nebo pomocí speciálních oživovacích přísad (tzv. rejuvenátorů), které mají za cíl obnovit reologické chování zestárlého asfaltového pojiva. [37] [52]

Při dávkování vyšším než 50 % R-materiálu z hmotnosti asfaltové směsi spočívá neefektivnější způsob oživení v použití oživovací přísady. Při aplikaci běžných pojiv vyšší gradace by totiž nebylo možné dosáhnout požadované výsledné penetrace pojiva. Použití oživovacích přísad v těchto případech může přinést výhody jako použití libovolného množství R-materiálu a jednoduché přidání přísady bez nutnosti použití dalšího skladovacího síla, jako v případě používání pojiv vyšší gradace. [37] [52]

Existuje několik základních typů oživovacích přísad. Získávají se například zpracováním ropy, z bio-olejů, z odpadních produktů zpracování biomasy nebo z papírenské výroby. Jednotlivé oživovací přísady v ideálním případě obnoví nejenom chemickou strukturu pojiva, ale také mechanicko-fyzikální vlastnosti včetně odolnosti vůči termooxidačním změnám v čase. Použitá oživovací přísada musí splnit několik zásadních požadavků:

- Oživit zestárlé pojivo za účelem snížení jeho tuhosti a navrácení některých vlastností na hodnoty podobné silničnímu asfaltu požadované kategorie.
- Změnit vlastnosti asfaltového pojiva v R-materiálu tak, aby se nesnížila trvanlivost asfaltové směsi po dlouhodobém stárnutí.
- Zajistit přítomnost dostatečného množství asfaltového pojiva, aby došlo k řádnému obalení zrn kameniva v asfaltové směsi a zároveň, aby byly splněny požadavky na vlastnosti asfaltových směsí. [37] [52]

Pod pojmem oživovací přísada lze na trhu objevit velké množství produktů s různou účinností, které se dají rozdělit do dvou kategorií:

- Změkčovadla – fluxační přísady (přidáním dojde ke zředění maltenové fáze a tím ke snížení viskozity pojiva)
- Rejuvenátory – rejuvenační přísady (přidáním dojde k obnovení chemické struktury pojiva a přerušování shlukování asfaltu) [37] [52]

Dávkováním oživovacích přísad se zabývá metodika vydaná roku 2019 *Metodika pro návrh dávkování oživovacích přísad*. Jejím hlavním cílem je popis návrhu dávkování těchto přísad při přidání R-materiálu přesahující množství 40 % z hmotnosti asfaltové směsi (avšak metodika je obecně použitelná i pro dávkování R-materiálu v menším množství). Metoda návrhu uživatele přísad upozorňuje na možná rizika spojená s poddávkováním nebo předávkováním konkrétní použité přísady a upozorněním na podmínky, za kterých k němu může dojít. Metodika posuzuje účinnost konkrétní přísady vzhledem ke změnám mechanicko-fyzikálního chování zestárlého oživeného pojiva,



odhaduje optimální množství oživovací přísady vzhledem k množství zestárlého pojiva v R-materiálu a upozorňuje na případy, kdy nemusí být požadované oživení možné. [53]

2.4.4 R-materiál v modifikovaných směsích

Problematika používání vyšších množství R-materiálu do asfaltových směsí s modifikovanými pojivy spočívá v nejistotě dosažení pro ně typických vlastností. Nejvyšší přípustný obsah R-materiálu v % hmotnosti se obecně liší dle typu směsi. Zároveň se v současné době vyskytuje limitující podmínka v případě použití polymerem modifikovaných pojiv. Odborníci za tento limit považují hodnotu 15 %, která se vyskytuje v tabulce E.6 normy ČSN 73 6121 *Stavba vozovek – Hutněné asfaltové vrstvy – Provádění a kontrola shody*. Pokud by se tato tabulka však měla brát doslovně, toto omezení platí pouze pro směsi ACL 16 S a ACL 22 S. [7]

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

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

Tabulka 3: Nejvyšší přípustný obsah R-materiálu v % hmotnosti asfaltové směsi [7]

Je snahou dosáhnout přidávání co nejvyššího množství R-materiálu do směsí s modifikovanými pojivy, nicméně je potřeba zaručit požadované chování. Základním předpokladem je kvalitní homogenní R-materiál (využití selektivního frézování) a znalost chování modifikovaného pojiva. Dle výsledků ze zkušebních úseků například není doporučeno přidávat oživovací přísady do směsí obsahující vyšší množství R-materiálu a modifikovaná pojiva. Předvídání chování těchto pojiv v kombinaci s rejuvenátory je v současné době komplikované (dochází k nejvýraznějším změnám v chování) a je potřeba se s touto problematikou více seznámit. [54]



3. PRAKTICKÁ ČÁST

Praktická část diplomové práce porovnává asfaltové směsi ACO 11 S vyrobené na obalovně, které se liší druhem použitého asfaltového pojiva, procentuálním obsahem R-materiálu a množstvím přidaného granulátu. Porovnání vychází z výsledků analýzy zpětně získaného pojiva ze směsí a provedených volumetrických, mechanicko-fyzikálních a funkčních zkoušek na vyrobených tělesech. Postupy zkoušek v práci nebyly povětšinou detailně popisovány, ve většině případů se jedná o normové postupy a vždy je uveden odkaz na normu či předpis, podle kterých byla zkouška prováděna. V případě odlišného postupu či netradičních zkoušek bylo uvedeno více informací.

3.1 Informace o asfaltových směsích

Jak již bylo napsáno, cílem diplomové práce bylo zjistit, jaký vliv má zvyšování obsahu R-materiálu na směsi s modifikovanými pojivy. Pro dostatečné porovnání bylo vyrobeno 7 směsí lišícími se druhem použitého pojiva, obsahem R-materiálu a dávkováním granulátu Improcel K. Tyto směsi vyrobené na obalovně firmou Froněk, spol. s r.o. byly dodány pro účely této diplomové práce do laboratoří ČVUT na katedru silničních staveb, kde byla práce vykonávána. Směsi byly přivezeny v označených pytlích. Složení a označení směsí bylo dáno formou tabulky (viz. níže). Pro zachování přehlednosti bylo dané označení směsí (směs 5 až 11) v rámci práce nadále používáno. Ve směsích nebyla použita oživovací přísada.

Směs	Pojivo	R-materiál	Improcel K	Označení
ACO 11 S	COLFLEX 45/80-65	15 % RA	1,4 kg / 3 t směsi	5
		30 % RA	2,8 kg / 3 t směsi	6
		50 % RA	4,9 kg / 3 t směsi	7
	50/70	0 % RA	9,6 kg / 3 t směsi	8
		15 % RA	9,6 kg / 3 t směsi	9
		30 % RA	9,6 kg / 3 t směsi	10
		50 % RA	9,6 kg / 3 t směsi	11

Tabulka 4: Přehled směsí



Obrázek 20: Asfaltová směs doručená v označených pytlích

3.1.1 Druh směsi, pojivo, R-materiál a kamenivo

S ohledem na motivaci práce umožnit využívání vyšších množství R-materiálu ve směsích s modifikovaným pojivem, byl zvolen druh asfaltové směsi ACO 11 S, který je využíván především s modifikovanými pojivy na těch nejzatíženějších komunikacích. Tento druh asfaltového betonu vyžaduje ty nejpřísnější požadavky (viz. kapitola 3.3.1).

Směsi byly podle pojiva rozděleny do dvou skupin. První skupina směsí obsahovala polymerem modifikované pojivo Colflex® 45/80-65 firmy COLAS CZ, a.s., které parametry odpovídá běžně využívaným PMB pojivům do pozemních komunikací. Druhá skupina pak obsahovala tradiční asfaltové silniční pojivo 50/70.

Množství R-materiálu ve směsích bylo zvoleno 15, 30 a 50 % z celkové hmotnosti směsi. 15 % představuje současnou maximální hodnotu přidávání R-materiálu do tohoto druhu směsi a zároveň limitní hodnotu pro směsi s modifikovanými pojivy. Množství 30 a 50 % jsou hodnoty, již byly v minulosti v tomto druhu směsi odzkoušeny, ale zpravidla s nemodifikovanými asfaltovými pojivy. V kombinaci s PMB pojivy však vznikají otázky, zda výsledné směsi lze při použití takto vysokých množství R-materiálu neobsahující modifikovaná pojiva nadále považovat za modifikované asfaltové směsi. R-materiál použitý pro výrobu těchto směsí byl frakce 0/16, který firma běžně do asfaltových směsí využívá.

Kamenivo do směsí poskytla provozovna Brant společnosti Froněk, spol. s.r.o. Konkrétně byly při výrobě využity frakce 0/2, 2/5, 5/8 a 8/11. Procentuální složení asfaltových směsí (výrobní předpis z obalovny) podle obsahu R-materiálu je v tabulce níže. Směsi byly vyrobeny přímo na obalovně, jejich receptura byla navržena na základě zkušeností obalovny a laboratoře firmy Froněk, spol. s.r.o.



Složení	0 % RA		15 % RA		30 % RA		50 % RA	
	kg	%	kg	%	kg	%	kg	%
Brant 0/2*	357	35,7 %	197	19,7 %	183	18,3 %	125	12,5 %
Brant 2/5*	109	10,9 %	178	17,8 %	121	12,1 %	102	10,2 %
Brant 5/8*	164	16,4 %	130	13,0 %	62	6,2 %	55	5,5 %
Brant 8/11*	220	22,0 %	248	24,8 %	255	25,5 %	181	18,1 %
Vratný filer	40	4,0 %	50	5,0 %	40	4,0 %	10	1,0 %
Filer	55	5,5 %	0	0,0 %	0	0,0 %	0	0,0 %
Pojivo	55	5,5 %	47	4,7 %	39	3,9 %	27	2,7 %
R-materiál	0	0,0 %	150	15,0 %	300	30,0 %	500	50,0 %
Celkem	1000	100,0 %	1000	100,0 %	1000	100,0 %	1000	100,0 %

Tabulka 5: Receptura vyrobených směsí podle obsahu R-materiálu

* *Boxy horkého třídění*

3.1.2 Granulát Improcel ® K

Do směsí byl využit granulát Improcel K od společnosti CIUR a.s. za účelem kompenzace předpokládaných zhoršených vlastností směsí vlivem obsahu vysokých množství R-materiálu. Ve směsích s PMB bylo použito menší množství granulátu, za to bylo odstupňováno v závislosti na množství R-materiálu. Nezávisle na podílu recyklátu ve směsi pak ve variantách s pojivem 50/70 bylo použito 9,6 kg Improcelu K na 3 t směsi, což spíše odpovídá doporučenému dávkování (viz. níže).

Improcel K je granulát určený pro modifikaci asfaltových směsí, který obsahuje rychle reagující SBS polymery. Ideální využití granulátu je pro vyšší úrovně SBS modifikace a do konstrukcí na namáhaných plochách (parkoviště, logistické areály atd.). Zvyšuje životnost silniční komunikace a zlepšuje odolnost proti tvorbě trvalých deformací, a to zejména při vysokých teplotách za současného snížení teplotní citlivosti (zlepšuje tak vysokoteplotní, ale i nízkoteplotní vlastnosti). Zvyšuje pevnost v ohybu a moduly tuhosti, zlepšuje adhezni a kohezni vlastnosti směsi. Díky polymeru SBS výsledné pojivo dosahuje zvýšeného bodu měknutí a snížení penetrace. [55] [56]



Obrázek 21: Granulát Improcel K [55]



Doporučené dávkování je uváděno v množství 3 % aktivní látky (polymeru SBS) granulátu z hmotnosti pojiva, dávkování Improcelu K se tak pohybuje v rozmezí 3 až 5 % z hmotnosti pojiva (cca od 2 do 5 kg / t směsi). Granulát se dávkuje běžnou cestou z násypky do míchacího zařízení obalovny společně s kamenivem. Obsah aktivní látky v granulátu se pohybuje mezi 40 a 60 %, zbylé množství tvoří celulózová vlákna. Vhodné použití granulátu je především ve chvílích, kdy je potřeba dosáhnout modifikace asfaltových pojiv (respektive přímo asfaltových směsí) v menších množstvích bez nutnosti použití dalších modifikovaných pojiv – vyplatí se tak především pro menší plochy, kde je potřeba zlepšených vlastností pojiv (již zmíněná parkoviště či logistické areály). Vmícháním Improcelu K do směsi obsahující běžně používané asfaltové pojivo (např. 50/70) vznikne směs modifikovaná na stejné bázi jako za použití PMB. [55] [56] [57]

Společnost VUIS – CESTY, spol. s r. o. v roce 2020 provedla porovnání asfaltobetonových směsí obsahující pojivo 50/70, směsí navíc modifikované pomocí granulátu Improcel K a směsí s PMB 45/80-75. Granulát byl do směsi dávkován v množství 5 % z hmotnosti asfaltu. V porovnání se směsí s 50/70 došlo ke zlepšení zhruba o 30 % v průměrné hloubce vyjeté koleje. Důležitým poznatkem bylo, že výsledná hodnota tohoto parametru se u směsí modifikované pomocí granulátu a směsí s PMB prakticky rovnala, čemuž určitou měrou přispělo vyšší množství obsaženého granulátu. S obdobnými výsledky dopadla zkouška odolnosti vůči vodě (ITSR). Závěrem tak bylo, že vlastnosti granulátem modifikované směsí byly porovnatelné s vlastnostmi směsí s PMB. [57]

Na základě použití směsí modifikované granulátem na stavbě bylo autory zprávy konstatováno několik užitečných poznatků. Výroba těchto směsí by neměla být pro standardní obalovny problémem, musí však být vybaveny vhodným dávkovačem přísady a při výrobě směsí je třeba počítat se snížením výkonu obalovny z důvodu dávkování přísady a prodloužení doby míchání. Je nutno dodržovat pokyny výrobce přísady a kontrolovat rozptýlení přísady ve směsi. Co se týče ekonomické výhodnosti využití granulátu, je třeba toto posouzení vyhodnotit pro každou jednotlivou stavbu. [57]

3.2 Analýza znovuzískaného pojiva ze směsí

Vlastnosti asfaltového pojiva použitého při výrobě směsí byly deklarovány výrobcem. Pro polymerem modifikované pojivo Colflex® 45/80-65 se penetrace pohybuje mezi 45 až 80 penetračními jednotkami a bod měknutí musí být větší nebo roven 65 °C. Pro silniční pojivo 50/70 je penetrace 50 až 70 penetračních jednotek a bod měknutí 46 až 54 °C. Z důvodu analýzy asfaltového pojiva až po jeho znovuzískání z již vyrobených směsí, které navíc obsahují zestárlé pojivo z R-materiálu a granulát Improcel K, byly získané hodnoty využity především k porovnání směsí mezi sebou.



3.2.1 Znovuzískání pojiva z vyrobených směsí

Od každé směsi byla odebrána navážka (cca 2 000 g), ze které bylo získáno pojivo. Pojivo bylo odděleno od kameniva v extraktoru za horka dle normy *ČSN EN 12697-1 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 1: Obsah rozpustného pojiva*, kde je postup popsán v příloze *B.1.1*. Zvážené množství směsi bylo proléváno rozpouštědlem a umístěno v drátěném koši do extraktoru. Patrona byla vyložena filtračním papírem, kde se po extrakci usadily jemné částice, které propadly sítím drátěného koše. Po dokončení extrakce bylo pojivo společně s rozpouštědlem odstředěno do připravené nádoby. Očištěné kamenivo a jemné částice byly zváženy za účelem zjištění obsahu pojiva v navážce. [58]



Obrázek 22: Extraktor

Obsah pojiva v dané navážce byl vypočítán podle následujícího vzorce. Výsledky jsou shrnuty v *Tabulce 6*.

$$S = \frac{M_1 - M_2 - M_3}{M_1} * 100$$

Vzorec 1: Obsah asfaltového pojiva [58]

Kde je

S obsah asfaltového pojiva [%]

M_1 hmotnost navážky směsi [g]

M_2 hmotnost kameniva po extrakci [g]

M_3 hmotnost zachycených jemných částic po extrakci [g]



Asfaltové pojivo vyextrahované ze směsi bylo třeba oddělit od rozpouštědla. Proces destilace je popsán v normě *ČSN EN 12697-3+A1 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 3: Znovuzískání extrahovaného pojiva – Rotační vakuové destilační zařízení*. Tato zkušební metoda funguje na principu vakuové destilace pomocí rotačního zařízení. Vhodná nádoba s pojivem a rozpouštědlem byla připevněna na rotační vakuové zařízení a z části ponořena do olejové lázně za zvýšené teploty, aby docházelo k odpařování rozpouštědla. Po celou dobu bylo potřeba nechat chladičem protékat studenou vodu. Po odseparování veškerého rozpouštědla bylo možno připravit pojivo do zkušebních forem. [59]



Obrázek 23: Rotační vakuové destilační zařízení

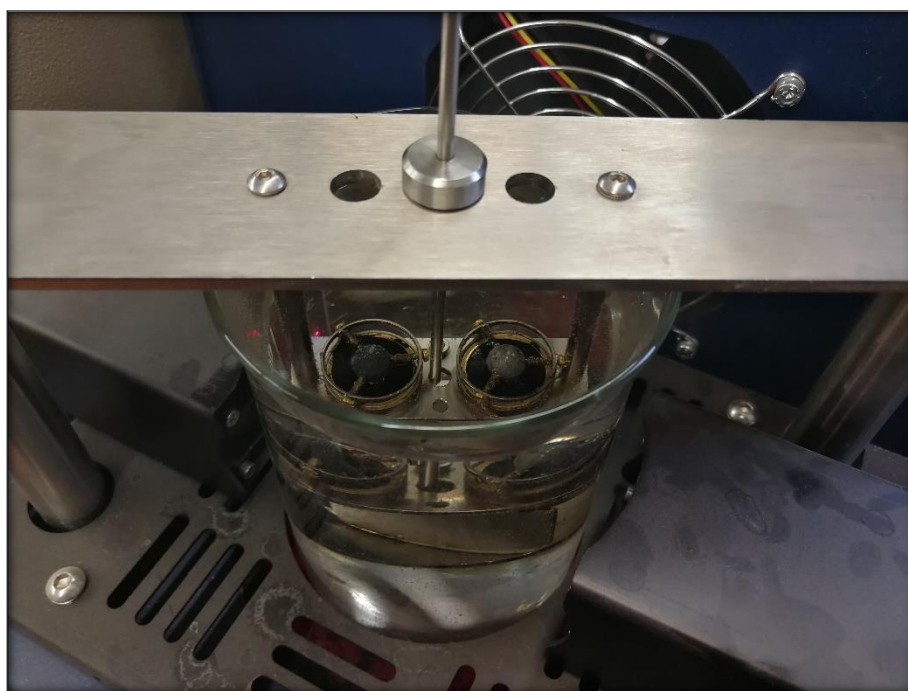
3.2.2 Stanovení penetrace a bodu měknutí

Na pojivu byla stanovena jeho konzistence pomocí zkoušky penetrace jehlou podle normy *ČSN EN 1426 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou*. Metoda spočívá v průniku normalizované jehly do vytemperovaného vzorku, který je ponořen ve vodní lázni o teplotě 25 °C. Zkouška byla provedena pomocí penetrometru. [60]



Obrázek 24: Penetrometr

Na pojivu bylo dále potřeba stanovit bod měknutí. Byla využita metoda kroužek a kulička popsaná v normě ČSN EN 1427 *Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička*. Vzorky asfaltového pojiva odlité do mosazných kroužků byly zahřívány řízenou rychlostí ve vodní lázni (demineralizované vodě) s počáteční teplotou 5 °C, přičemž na každém z nich byla umístěna ocelová kulička. Bod měknutí byl určen teplotou, při které pojivo změklo natolik, aby umožnilo kuličce propadnout o vzdálenost 25 mm. [61]



Obrázek 25: Stanovení bodu měknutí



Pojivo	R-materiál	Improcel K	Směs	Obsah pojiva	Penetrace [0,1 mm]	Bod měknutí
		kg / 3 t směsi		[%]		[°C]
COLFLEX 45/80-65	15 % RA	1,4	5	5,10 %	22	75,6
	30 % RA	2,8	6	5,17 %	27	70,0
	50 % RA	4,9	7	5,15 %	23	71,0
50/70	0 % RA	9,6	8	6,67 %	20	65,0
	15 % RA	9,6	9	6,69 %	18	65,2
	30 % RA	9,6	10	5,28 %	20	65,2
	50 % RA	9,6	11	5,99 %	18	69,2

Tabulka 6: Obsah pojiva, penetrace a bod měknutí

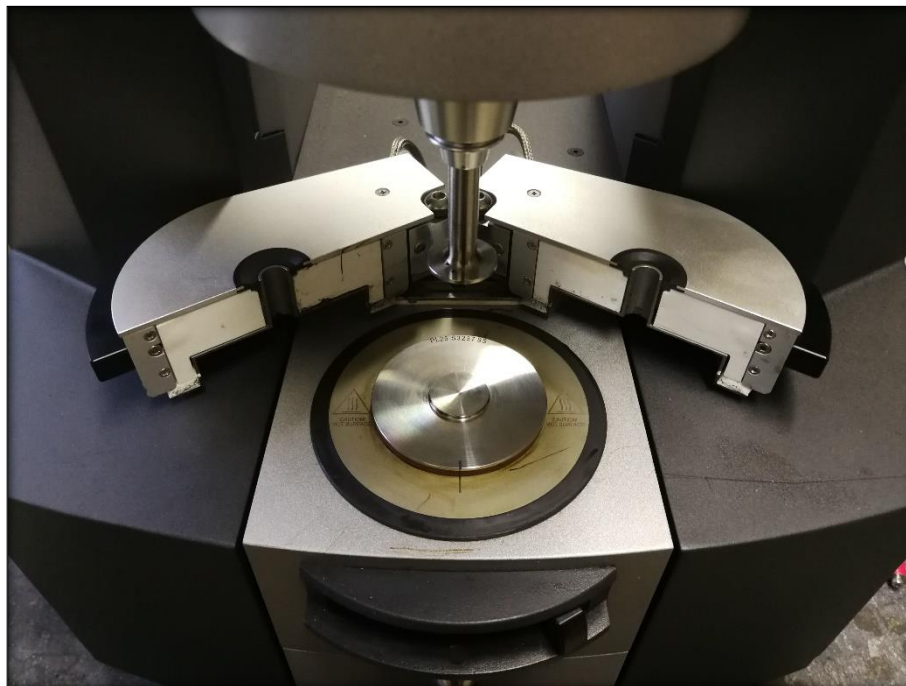
Obsah pojiva ve směsi by byl pravděpodobně přesněji určen extrakcí vícero navážek, které se z časových důvodů již nestihlo provést. Podle výrobního předpisu z obalovny (Tabulka 5) by se celkový hmotnostní obsah pojiva ve směsích měl pohybovat kolem 5,5 %. U směsi s R-materiálem lze odchytku odůvodnit heterogenitou směsí.

Penetrace dle očekávání dosahuje nízkých hodnot vlivem zestárlého pojiva a granulátu. Pojivo však nevykazovalo jasný trend závislosti na zvyšujícím se podílu recyklátu ani na obsahu Improcelu. Vyšší hodnoty u směsí s PMB mohly být způsobeny menším dávkováním granulátu nebo menší počáteční hodnotou penetrace pojiva Colflex.

Bod měknutí by se měl vlivem R-materiálu a Improcelu zvýšit, což bylo splněno. Z výsledků však opět nelze určit jasné chování pojiva ze směsi. Zvyšující se množství recyklátu by mělo zvětšovat bod měknutí, to sice pojivo ze směsi 11 splňuje, nicméně výsledné hodnoty ostatních směsí s pojivem 50/70 se pohybovaly vůči sobě na stejné úrovni. U variant s PMB překvapivě největší hodnotu vykazovala směs s 15 % R-materiálu, což korespondovalo s nejmenší naměřenou penetrací.

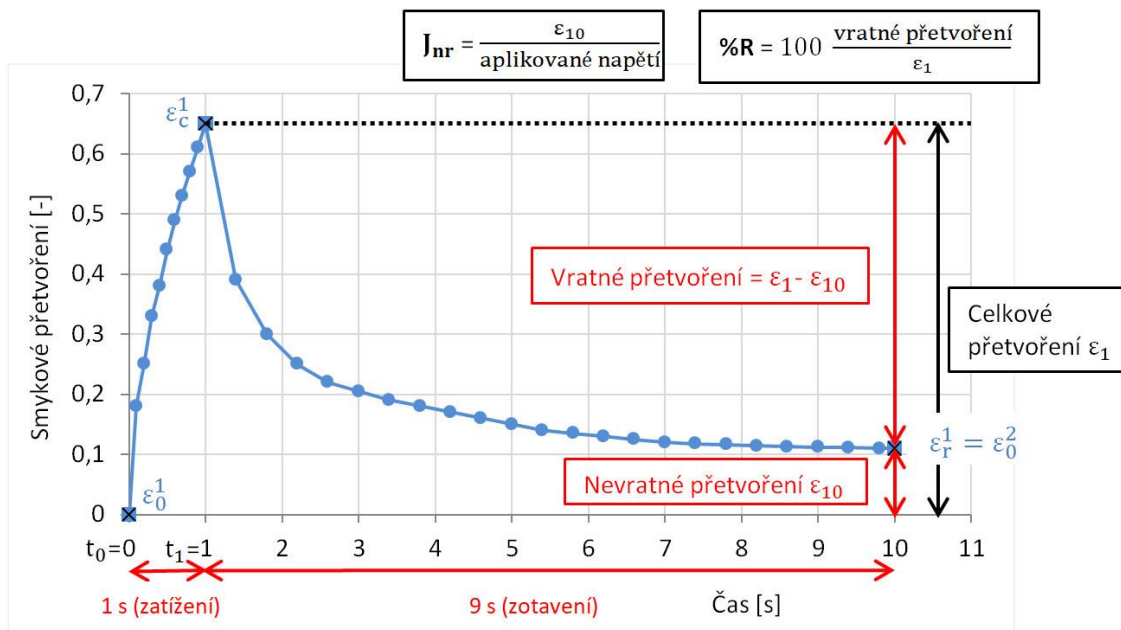
3.2.3 MSCR

Mimo základní empirické zkoušky, ke kterým patří penetrace a bod měknutí bylo pojivo podrobena funkční zkoušce opakovaného namáhání, která je v silničním stavitelství známá jako MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery test). Jde o zkoušku opakovaného zatěžování a odlehčení, přičemž se v současnosti označuje za nejvhodnější zkoušku pro posuzování odolnosti asfaltových pojiv proti trvalým deformacím. Zkouška je popsána v normě ČSN EN 16659 *Asfalty a asfaltová pojiva – Zkouška MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery Test)*, její princip je založený na měření smykového dotvarování v oblasti pomalého toku (creep) při vyšších provozních teplotách, které do jisté míry simulují účinek vysokých letních teplot ve vozovce, a je vhodná především pro modifikovaná pojiva. [62] [63]



Obrázek 26: Zkouška MSCR

Podstatou zkoušky je vícenásobné zatížení a relaxace vzorku (zatížení po dobu 1 s při konstantním napětí a následně odtížení po dobu 9 s, tento proces se opakuje minimálně 10x pro každou úroveň napětí, které se u zkoušky zvolí), z čehož se stanoví procentuální hodnota elastického zotavení (%R) a nevratná smyková poddajnost (J_{nr}) asfaltového pojiva. V současné době jsou předepsány dvě úrovně napětí, a to 0,1 kPa a 3,2 kPa. Elastické zotavení charakterizuje, do jaké míry se asfaltové pojivo poměrově vrací po zatížení do původního stavu (snadno rozlišuje modifikované a nemodifikované asfalty), identifikuje se tak elastická a trvalá složka přetvoření. Nevratná smyková poddajnost znázorňuje zbylé přetvoření vzorku po ukončení celého cyklu dotvarování a zotavení dělené aplikovaným napětím, zároveň lze z dat získat jistou indikaci citlivosti asfaltových pojiv k tvorbě trvalých deformací při opakovaném zatížení. Kromě těchto nejdůležitějších hodnot je v současnosti zjišťována i hodnota citlivosti $J_{nr,diff}$ (diference pro nevratnou smykovou poddajnost) porovnávající velikost J_{nr} mezi napětím 0,1 a 3,2 kPa. Tento parametr popisuje, jak dobře je pojivo modifikované – čím kvalitnější je interakce polymeru s asfaltovým pojivem, tím je nižší parametr citlivosti. Například v USA, kde se se zkouškou MSCR standardně pracuje při hodnocení asfaltových pojiv, platí, že pokud je hodnota tohoto poměrového parametru vyšší než 75 %, asfaltové pojivo je klasifikováno jako velmi citlivý materiál na změnu napětí a nedoporučuje se pro použití při výstavbě pozemních komunikací. [62] [63]



Graf 1: Typický první cyklus zatížení a odtížení při zkoušce MSCR [63]

V Evropě pro tuto zkoušku platí, že je stále v jisté fázi „vývoje“ a přesné zkušební teploty nejsou definovány, často se nicméně provádí za teploty, při které se realizuje zkouška pojíždění kolem, což je odlišný přístup od USA, kde se teploty zkoušky odvozují od zavedených výkonnostních tříd PG. Ačkoli se zkouška pojíždění kolem v České republice uskutečňuje při 50 °C, zkouška MSCR se většinou určuje za teploty 60 °C a to z důvodu, že při nižších teplotách jsou dosahovány velmi malé hodnoty nevratné smykové poddajnosti, které jsou v zásadě na hranici rozumné měřitelnosti. Na základě zkušeností byla zkouška v případě pojiv ověřovaných v této diplomové práci provedena za teplot 60 °C a 70 °C. Výsledné parametry byly vypočteny podle vzorců níže, pro lepší představu je výše přiložen názorný graf prvního cyklu (z deseti) zatížení. Hodnoty v tabulce jsou potom vždy průměrem parametrů z deseti zatěžovacích cyklů. [63]

$$\%R_{0,1(3,2)} = \frac{\varepsilon_1^N - \varepsilon_{10}^N}{\varepsilon_1^N} * 100$$

Vzorec 2: Elastické zotavení [63]

Kde je

$\%R_{0,1(3,2)}$ elastické (procentuální) zotavení N-tého cyklu při napětí 0,1 (3,2) kPa [%]

ε_1^N celkové přetvoření N-tého cyklu [-]

ε_{10}^N nevratné přetvoření N-tého cyklu [-]



$$J_{nr,0,1(3,2)}^N = \frac{\varepsilon_{10}^N}{\tau_0}$$

Vzorec 3: Nevratná smyková poddajnost [63]

Kde je

$J_{nr,0,1(3,2)}^N$ nevrtná smyková poddajnost N -tého cyklu při napětí 0,1 (3,2) kPa [kPa^{-1}]

ε_{10}^N nevrtné přetvoření N -tého cyklu [-]

τ_0 aplikované napětí [kPa]... $\tau_0 = 0,1 \text{ kPa}$; $\tau_0 = 3,2 \text{ kPa}$

$$J_{nr,diff} = 100 * \frac{J_{nr,3,2} - J_{nr,0,1}}{J_{nr,0,1}}$$

Vzorec 4: Diference pro nevrtnou smykovou poddajnost [63]

Kde je

$J_{nr,diff}$ procentuální rozdíl J_{nr} mezi napětím 0,1 kPa a 3,2 kPa [%]

$J_{nr,3,2}$ nevrtná smyková poddajnost při napětí 3,2 kPa [kPa^{-1}]

$J_{nr,0,1}$ nevrtná smyková poddajnost při napětí 0,1 kPa [kPa^{-1}]

Pojivo ze směsi	Teplota	Nevratná smyková poddajnost [kPa^{-1}]		Elastické zotavení [%]		Diference pro nevrtnou smykovou poddajnost [%]
		$J_{nr,0,1}$	$J_{nr,3,2}$	%R _{0,1}	%R _{3,2}	$J_{nr,diff}$
5	60 °C	0,025	0,027	80,3	78,4	10,5
	70 °C	0,079	0,119	77,2	65,3	50,8
6	60 °C	0,049	0,058	77,6	75,1	16,8
	70 °C	0,198	0,280	69,3	59,2	41,5
7	60 °C	0,042	0,049	74,2	71,2	18,5
	70 °C	0,177	0,250	63,7	53,2	41,0
8	60 °C	0,086	0,098	52,1	48,2	13,3
	70 °C	0,371	0,519	40,0	25,6	39,8
9	60 °C	0,042	0,051	66,5	52,5	19,4
	70 °C	0,189	0,254	55,3	44,8	34,4
10	60 °C	0,141	0,160	40,9	35,9	13,5
	70 °C	0,618	0,812	27,2	14,6	31,4
11	60 °C	0,066	0,073	51,2	48,2	9,8
	70 °C	0,300	0,389	37,9	25,8	29,8

Tabulka 7: Výsledky zkoušky MSCR posuzovaných zpětně získaných asfaltových pojiv

Čím nižší nevrtná smyková poddajnost je, tím větší podíl napětí je pojivo schopno absorbovat a je tudíž méně náchylné k plastické deformaci. Při vyšších teplotách dochází ke zvýšení smykového přetvoření a pojivo je tak náchylnější k tvorbě trvalých deformací, J_{nr} tím pádem vykazuje větších hodnot za teploty 70 °C (u elastického zotavení je tomu naopak – vyšší hodnoty jsou zjištěny při zkušební teplotě 60 °C). Z výsledků lze usoudit,



že v tomto směru na tom lépe byly varianty s PMB. Vzestupná či sestupná tendence u směsí zjevná nebyla, avšak směsi s 30 % R-materiálu z výsledných hodnot negativně vyčnívaly. [64]

Co se týče elastického zotavení, byl zjevný větší rozdíl mezi druhy testovaných pojiv, kdy varianty s PMB vykazovaly lepší hodnoty, které s rostoucím obsahem zestárlého pojiva z R-materiálu mírně klesaly, avšak byly dostatečně kompenzovány rostoucím množstvím použitého přídavku granulátu. Varianty se silničním pojivem 50/70 vykazovaly menší hodnoty, obzvláště pak varianta s 30 % R-materiálu.

Diference pro nevratnou smykovou poddajnost charakterizuje, jak moc je pojivo citlivé na změny napětí (tudíž jak moc je celkově odolnější). V textu výše byla zmíněna hodnota meze 75 %, která je jistou hranicí zvolenou dle poznatků v USA, kdy po jejím překročení je pojivo označeno jako velmi citlivý materiál. Žádná varianta se k této hodnotě nepřiblížila. Za teploty 70 °C byla citlivější PMB pojiva a vždy se citlivost snižovala s rostoucím obsahem R-materiálu. Citlivost při 60 °C dosahovala nízkých hodnot. V porovnání variant s obsahem 15, 30 a 50 % R-materiálu u PMB citlivost rostla, zatímco při použití silničního asfaltu 50/70 klesala.

Tato zkouška na rozdíl od výsledků zkoušek stanovení penetrace a bodu měknutí jednotlivé posuzované asfaltové směsi mezi sebou výrazně rozlišila. Výsledky tak více odpovídají původním předpokladům chování pojiva na základě složení směsí. Porovnání se zkouškou vyjetí kolem je provedeno v kapitole 3.3.7.

3.2.4 BTSV

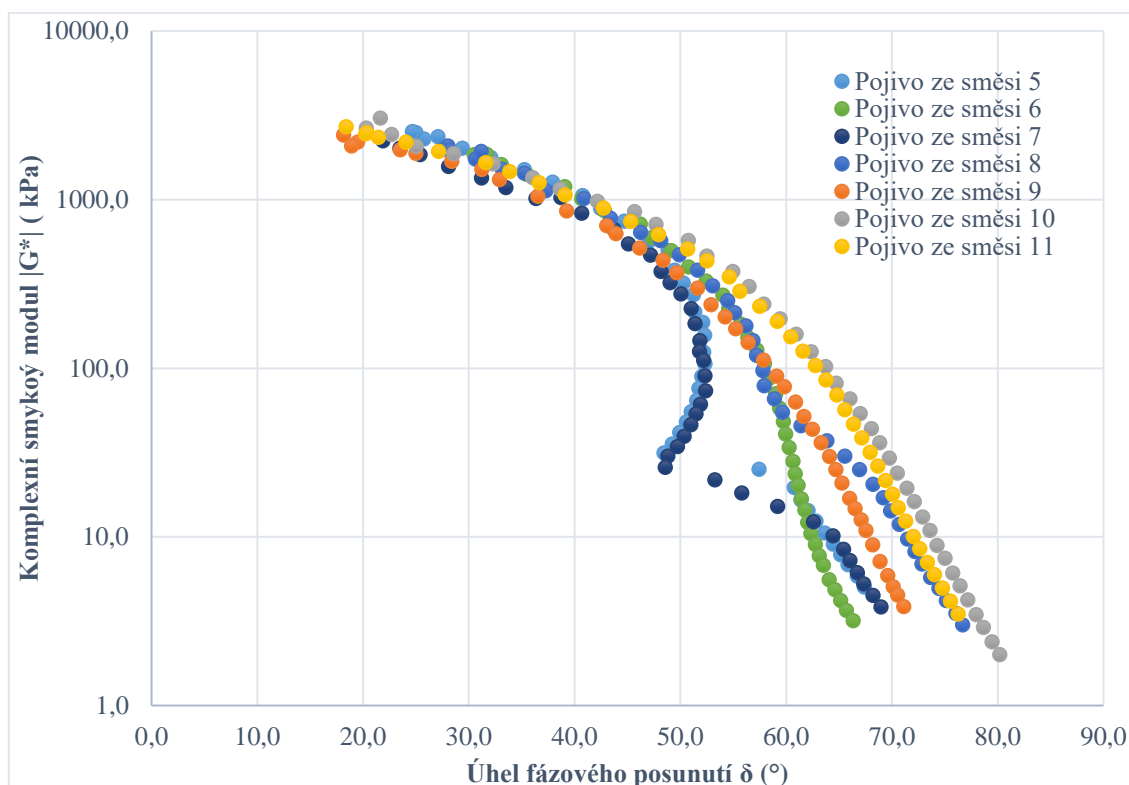
Dále byla na zpětně získaných asfaltových pojivech provedena zkouška BTSV, která je popsána v německém technickém předpisu *AL DSR-Prüfung (BTSV): Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Verformungsverhaltens von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln im Dynamischen Scherrheometer (DSR) - Teil 4: Durchführung des Bitumen-Typisierungs-Schnell-Verfahrens*. Jedná se o typizační funkční zkoušku, která by měla s pomocí využití teplotní rampy identifikovat teplotu, která odpovídá bodu měknutí a vymezuje tak horní mez oboru plasticity asfaltového pojiva. Zdaleka se však nejedná o jedinou charakteristiku, kterou lze touto zkouškou získat, což je v porovnání s empirickou zkouškou stanovení bodu měknutí nesporná výhoda. Zkouška se označuje jako zrychlená, přičemž trvá zhruba 1 hodinu, a to v závislosti na celkovém intervalu teplot a míře jeho zahuštění měřenými body. Měření v tomto případě probíhalo v dynamickém smykovém reometru (DSR) s použitím geometrie PP25 (destička-destička) a tloušťkou asfaltového vzorku 1 mm. Při zkoušce byly hledány teploty, při kterých komplexní smykový modul ($|G^*|$) dosáhne hodnoty 15 kPa a 50 kPa (německý předpis je zaměřen na identifikaci teploty při hodnotě 15 kPa). Pro každou zjištěnou teplotu byla následně odvozena také hodnota úhlu fázového posunutí (δ). Zkouška byla prováděna v teplotním intervalu 25 až 90 °C v oscilačním režimu teplotní rampy za frekvence 1,59 Hz, smykového napětí $\tau = 500$ Pa a s rychlostí nárůstu teploty 1,2 °C/min. Ve zvoleném intervalu teplot bylo provedeno 40 měření, která byla lineárně rozložena v celém intervalu. Výsledky provedených měření jsou uvedeny v tabulce níže. [65] [66]



Pojivo ze směsi	Teplota [°C]		Úhel fázového posunutí (δ) [°]	
	$ G^* = 15 \text{ kPa}$	$ G^* = 50 \text{ kPa}$	$ G^* = 15 \text{ kPa}$	$ G^* = 50 \text{ kPa}$
5	78,7	67,2	61,1	56,0
6	74,3	63,1	63,1	58,3
7	76,5	64,9	60,3	54,9
8	75,2	64,4	69,2	62,5
9	77,2	66,2	67,7	60,6
10	73,1	63,2	73,1	65,6
11	77,2	66,5	72,1	64,5

Tabulka 8: Výsledky zkoušky BTVS se stanovením teploty a δ při $|G^*| = 15 \text{ kPa}$ a 50 kPa

Komplexní smykový modul charakterizuje celkovou odolnost materiálu vůči deformaci, respektive je považován za deformační charakteristiku, která závisí na vneseném napětí, frekvenci zatížení i teplotě. Fázový úhel určuje viskoelasticitu materiálu, přičemž pro zcela viskózní kapalinu by byl roven 90° , zatímco pro ideální elastický pevný materiál by byl 0° . Teploty získané zkouškou BTVS při zvolených dvou hodnotách $|G^*|$ lze porovnat s body měknutí pojiv. U pojiv asfaltových směsí s PMB se teploty bodu měknutí více blížily hodnotám při dosažení komplexního smykového modulu 15 kPa , přičemž se chovaly podle stejného vzoru, kdy nejvyšší teplota byla u pojiva získaného ze směsi 5 a nejnižší u varianty 6. Teploty u pojiv z asfaltových směsí s použitím silničního asfaltu 50/70 se naopak přibližovaly hodnotám při komplexním smykovém modulu 50 kPa . Úhel fázového posunutí se zvyšujícím smykovým modulem klesal, což se velmi často vyjadřuje pomocí Black diagramu, který je uveden níže. [66]



Graf 2: Závislost úhlu fázového posunutí na komplexním smykovém modulu znovuzískaných pojiv



3.3 Zkoušky na asfaltových směsích

Mimo zkoušky a výrobu těles jsou zde uvedeny požadavky zaměřené na zkoušené směsi typu ACO 11 S. Na směsích byla zjištěna mezerovitost, stupeň vyplnění mezer asfaltovým pojivem, odolnost vůči vodě a mrazu, odolnost proti tvorbě trvalých deformací, stabilita pomocí Marshallovy zkoušky, moduly tuhosti za rozdílných teplot, odolnost proti šíření trhliny (únarové a mrazové), pevnost v tahu za ohybu (s vlivem teploty a stárnutí) a další související charakteristiky typické pro popis chování asfaltové směsi.

3.3.1 Požadavky na směsi

Požadavky na asfaltové směsi jsou obsaženy v ČSN 73 6121 *Stavba vozovek – Hutněné asfaltové vrstvy – Provádění a kontrola shody. Příloha E* se zde zaměřuje na směsi asfaltového betonu (AC) a je možno v ní najít požadavky na stavební materiály (pojivo, kamenivo, filer a R-materiál) a na asfaltové směsi. *Tabulka E.1* doporučuje, jaké druhy asfaltových pojiv použít v závislosti na třídě dopravního zatížení a typu asfaltového betonu. Pro směs ACO 11 S, která by měla být využívána především pro dopravní zatížení S a I, norma doporučuje použití PMB 45/80-65 a PMB 25/55-60. *Tabulka E.2* je zaměřena na požadavky na kamenivo do obrusných vrstev (na jeho zrnitost, obsah a kvalitu jemných částic, odolnost proti drcení atd.). Zásadní je *Tabulka E.7 (Tabulka 9)*, která obsahuje požadavky na asfaltové betony do obrusných asfaltových vrstev. Jsou v ní uvedeny požadavky na zrnitost (křivku zrnitosti) směsi, limitní hodnoty mezerovitosti a obsahu pojiva, minimální hodnoty zkoušky ITSR, maximální hodnotu poměrné hloubky vyjeté koleje, přírůstek hloubky koleje a další. Tato tabulka je důležitá pro vyhodnocení některých zjištěných parametrů v rámci této práce. Směs ACO 11 S (tedy směs se zvýšenou odolností proti tvorbě trvalých deformací) musí být navržena na ty nejnáročnější podmínky, co se týče dopravního zatížení vozovek (dálnice, silnice I. třídy atd.). [7]



Obrusné vrstvy									
Typ	S		+		bez označení		CH		
Označení směsi ACO	11 S, 16 S		11 +, 16 +		8, 11, 16		8 CH		
Počet úderů Marshallova pěchu	2 x 75		2 x 50		2 x 50		2 x 50		
Obecné požadavky									
Zrnitost / síto (mm) ¹⁾	ACO 11 S	ACO 16 S	ACO 11 +	ACO 16+	ACO 8	ACO 11	ACO 16	ACO 8CH	
22,4	-	100	-	100	-	viz ACO 11+	viz ACO 16+	-	
16	100	90-100	100	90-100	-			-	
11,2	90-100	-	90-100	-	100			100	
8	68-80	60-75	70-90	52-80	90-100			90-100	
4	40-56	38-55	42-68	31-61	53-80			55-80	
2	29-42	26-40	24-49	20-45	30-55			35-60	
0,125	6-13	5-12	4-14	4-12	4-16			4-16	
0,063	5-10	4-9	3-11	3-10	3-12	3-12			
Minimální mezerovitost V_{min} (%) ²⁾	2,5 (2,0)		2,5 (2,0)		2,5 (2,0)		1,5 (1,0)		
Maximální mezerovitost V_{max} (%) ²⁾	4,0 (5,5)		4,5 (6,0)		4,5 (6,0)		4,0 (6,0)		
Minimální poměr pevnosti v příčném tahu $ITSR$ (%) ³⁾	80		70		-		-		
Maximální poměrná hloubka koleje PRD_{AIR} (%) ⁴⁾ po 5 000 cyklech	5,0		6,0		-		-		
Maximální přírůstek hloubky koleje WTS_{AIR} (mm/10 ³ cyklů) ⁴⁾	0,07		0,08		-		-		
Mezní hodnoty teploty asfaltové směsi pro silniční asfalty (°C) ⁵⁾	30/45 = 155 °C – 195 °C, 50/70 a 70/100 = 140 °C – 180 °C, 100/150 = 130 °C – 170 °C								
Maximální podíl DTK nebo STK ve směsi kameniva (%)	10 %		15 %		20 %		-		
Empirické požadavky									
Minimální obsah rozpustného pojiva B_{min} (% hm.) ⁶⁾	5,4	5,0	5,6	5,2	6,0	viz ACO 11+	viz ACO 16+	6,2	
Minimální obsah rozpustného pojiva B_{vol} (% obj.) ⁷⁾	12,5	11,8	13,0	12,2	13,8			-	
Minimální stupeň vyplnění mezer VFB_{min} (%) ²⁾⁸⁾	-		75		75			-	
Maximální stupeň vyplnění mezer VFB_{max} (%) ²⁾⁸⁾	-		83		86			-	
¹⁾ Při různé objemové hmotnosti HDK a DDK (SDK) lze čáru zrnitosti vyhodnocovat v % objemu. ²⁾ Mezerovitost zhuštěné asfaltové směsi a stupeň vyplnění mezer směsi se stanoví podle ČSN EN 13108-20 ed. 2:2018, tabulka B.1, řádek 3. Hodnoty v závorkách platí pro kontrolní zkoušky. ³⁾ Stanovení odolnosti vůči vodě se provede podle ČSN 13108-20 ed. 2:2018, tabulka B.1, řádek 7. ⁴⁾ Zkouška odolnosti proti tvorbě trvalých deformací se provede podle ČSN 13108-20 ed. 2:2018, tabulka D.1, řádek 4. ⁵⁾ Uvedené minimální a maximální teploty nesmí být překročeny na žádném místě obalovny. Teploty pro modifikované asfalty se řídí údaji výrobce pojiva. ⁶⁾ Minimální hodnota obsahu asfaltu se násobí korekčním faktorem $\alpha = 2,650/\rho_a$, kde ρ_a je objemová hmotnost kameniva v Mg/m ³ stanovená podle EN 1097-6. ⁷⁾ Obsah asfaltu v % objemu se vypočítá podle vzorce $B_{vol} = \rho_b \times B/1,020$ (%), kde ρ_b je objemová hmotnost zhuštěné směsi (Mg/m ³), B je obsah asfaltu v % hmotnosti, 1,020 je objemová hmotnost asfaltového pojiva (Mg/m ³). ⁸⁾ Doporučené hodnoty.									

Tabulka 9: Požadavky na asfaltové betony do obrusných asfaltových vrstev [7]



3.3.2 Výroba zkušebních těles

Od každé směsi bylo potřeba vyrobit 18 těles ve tvaru válce a 3 desky. Potřebné množství směsi bylo před samotnou výrobou vytemperováno na 165 °C. Válcová tělesa byla vyrobena pomocí rázového zhutňovače. Proces popisuje norma *ČSN EN 12697-30 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem*. Devět válcových těles bylo hutněno 2 x 75 údery (viz. požadavek pro ACO 11 S z *ČSN 73 6121 Stavba vozovek – Hutněné asfaltové vrstvy – Provádění a kontrola shody* uvedený v *Tabulce C.7 – Hutnění zkušebních těles*) a devět těles 2 x 25 údery (požadavek zkoušky odolnosti vůči vodě a mrazu). [7] [67]



Obrázek 27: Válcové těleso ve formě po zhutnění

Dále byla vyrobena 3 zkušební tělesa ve tvaru desky pomocí metody využívající hladký ocelový válec. Výroba těchto těles je popsána v *ČSN EN 12697-33 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 33: Příprava zkušebních těles zhutňovačem desek*. Půdorysné rozměry desky byly určeny formou (320 mm x 260 mm) a její požadovaná tloušťka se lišila podle následného využití desky. Pro zkoušku vyjetí kolem (2 desky) byla potřeba tloušťka 40 mm (obvyklá tloušťka vrstvy ACO 11 S ve vozovce), pro zkoušku na trámčích (vyrobených rozřezáním jedné desky) pak tloušťka 50 mm. Pro dosažení požadované tloušťky desek bylo třeba nejdříve zjistit mezerovitost a maximální objemovou hmotnost jednotlivých směsí, čímž byla následně zjištěna hmotnost asfaltové směsi potřebné pro výrobu desky. [68]



$$M = 10^{-6} * L * l * e * \rho_m * \frac{100 - v}{100}$$

Vzorec 5: Hmotnost desky [68]

Kde je

M hmotnost desky [g]

L vnitřní délka formy [mm] ... $L = 320$ mm

l vnitřní šířka formy [mm] ... $l = 260$ mm

e konečná tloušťka desky [mm] ... $e = 40$ (50) mm

ρ_m maximální objemová hmotnost asfaltové směsi [kg/m³]

v požadovaná mezerovitost v desce [%]



Obrázek 28: Výroba desek pomocí ocelového válce

Na všech tělesech byly změřeny rozměry podle normy ČSN EN 12697-29 *Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 29: Stanovení rozměrů asfaltových zkušebních těles.* [69]

3.3.3 Maximální objemová hmotnost

Pro každou směs byla potřeba stanovit její maximální objemová hmotnost, která udává hmotnost připadající na jednotku objemu asfaltové směsi bez mezer. Byl využit tzv. volumetrický postup pomocí pyknometru popsáný v ČSN EN 12697-5 *Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti.* Ke zkoušce byla použita demineralizovaná voda. Výpočet byl proveden pomocí vzorců níže. Výsledky jsou shrnuty v kapitole 3.3.5. [70]



$$\rho_{mv} = \frac{m_2 - m_1}{10^{-3} * V_p - \frac{m_3 - m_2}{\rho_w}}$$

Vzorec 6: Maximální objemová hmotnost asfaltové směsi [70]

Kde je

ρ_{mv} maximální objemová hmotnost asf. směsi stanovená volumetrickým postupem [kg/m^3]

m_1 hmotnost pyknometru + nástavce [g]

V_p objem pyknometru s nástavcem po značku [cm^3]

m_2 hmotnost pyknometru + nástavce + navážky [g]

m_3 hmotnost pyknometru + nástavce + navážky + vody [g]

ρ_w hustota vody při zkušební teplotě (viz. Vzorec 7) [kg/m^3]

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

Vzorec 7: Hustota vody [70]

Kde je

ρ_w hustota vody při zkušební teplotě [kg/m^3]

t teplota vody [$^{\circ}\text{C}$]



Obrázek 29: Maximální objemová hmotnost



3.3.4 Objemová hmotnost

Objemová hmotnost je hmotnost připadající na jednotku objemu zkušební tělesa včetně mezer. Byla zjištěna na všech tělesech, přičemž na tělesech zhutněných 2 x 25 úderů se využil „Postup D: Objemová hmotnost podle rozměrů“ a u zbylých těles (u těles tvaru válce hutněných 2 x 75 úderů a u desek) „Postup B: Objemová hmotnost – nasycený suchý povrch (SSD)“, který je určen pro tělesa s uzavřeným povrchem. Tyto postupy jsou popsány v ČSN EN 12697-6 *Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušební tělesa*. Jako výslednou objemovou hmotností asfaltové směsi byl určen průměr zkušebních těles zhutněných 2 x 75 úderů. Pro výpočet byly využity vzorce níže, výsledky jsou shrnuty v kapitole 3.3.5. [71]

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

Vzorec 8: Objemová hmotnost – nasycený suchý povrch (SSD) [71]

Kde je

ρ_{bssd} objemová hmotnost SSD – nasycený suchý vzorek [kg/m^3]

m_1 hmotnost suchého zkušební tělesa [g]

m_2 hmotnost zkušební tělesa ve vodě [g]

m_3 hmotnost zkušební tělesa nasyceného vodou a povrchově osušeného [g]

ρ_w hustota vody při zkušební teplotě (viz. Vzorec 7) [kg/m^3]

$$\rho_{bdim} = \frac{m_1}{\frac{\pi}{4} * h * d^2} * 10^6$$

Vzorec 9: Objemová hmotnost podle rozměrů (pro těleso tvaru válce) [71]

Kde je

ρ_{bdim} objemová hmotnost podle rozměrů [kg/m^3]

m_1 hmotnost suchého zkušební tělesa [g]

h výška zkušební tělesa [mm]

d průměr zkušební tělesa [mm]



Obrázek 30: Tělesa zhutněná 2 x 25 údery (vlevo) a 2 x 75 údery (vpravo)

3.3.5 Mezerovitost, stupeň vyplnění mezer pojivem

Mezerovitost je definována jako objem mezer v asfaltovém zkušebním tělese vyjádřený v % celkového objemu zkušebního tělesa. Pro její výpočet je nutná znalost maximální objemové hmotnosti asfaltové směsi (viz. kapitola 3.3.3) a objemové hmotnosti zkušebních těles (viz. kapitola 3.3.4). Mezerovitost se stanovuje podle ČSN EN 12697-8 *Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 8: Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí*. Objemová hmotnost je ve výpočtu uvažovaná jako průměrná hodnota objemových hmotností válcových zkušebních těles příslušné směsi zhutněných 2 x 75 údery. Mezerovitost je tak vypočtena pro danou směs. [72]

$$V_a = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} * 100$$

Vzorec 10: Mezerovitost směsi [72]

Kde je

V_a mezerovitost směsi [%]

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

ρ_b objemová hmotnost zkušebních těles [kg/m^3]

Stejná norma se zabývá stupněm vyplnění mezer asfaltovým pojivem, který udává, kolik procent z mezerovitosti směsi kameniva vyplňuje asfaltové pojivo. V práci je použit zjednodušený vzorec, který nezohledňuje použití přísad ve směsi. Důvodem je fakt, že přísada je ve směsi obsažena v tak malém množství, že výsledek ovlivní naprosto



minimálně. Zároveň není známa přesná objemová hmotnost granulátu, která je pro výpočet přesné hodnoty potřebná. Pro výpočet byly použity vzorce níže. [72]

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

Vzorec 11: Stupeň vyplnění mezer pojivem [72]

Kde je

VFB stupeň vyplnění mezer pojivem [%]

B hmotnostní obsah pojiva ve směsi [%]

ρ_b objemová hmotnost zkušebních těles [kg/m^3]

ρ_B objemová hmotnost asfaltového pojiva [kg/m^3]... $\rho_B = 1020 \text{ kg}/\text{m}^3$

VMA mezerovitost směsi kameniva (Vzorec 12) [%]

$$VMA = V_a + \frac{B * \rho_b}{\rho_B}$$

Vzorec 12: Mezerovitost směsi kameniva [72]

Kde je

V_a mezerovitost asfaltové směsi [%]

Směs	Maximální objemová hmotnost	Objemová hmotnost	Mezerovitost	Mezerovitost směsi kameniva	Stupeň vyplnění mezer pojivem
	ρ_{mv} [kg/m^3]	ρ_{bssd} [kg/m^3]	V_a [%]	VMA [%]	VFB [%]
5	2671	2476	7,3	19,7	62,9
6	2606	2534	2,8	15,6	82,2
7	2597	2508	3,4	16,1	78,7
8	2595	2551	1,7	18,4	90,7
9	2607	2485	4,7	21,0	77,7
10	2602	2541	2,4	15,5	84,7
11	2628	2508	4,6	19,3	76,3

Tabulka 10: Mezerovitost a stupeň vyplnění mezer pojivem

Maximální objemová hmotnost závisí na použitém kamenivu, množství R-materiálu a obsahu asfaltového pojiva. Z hodnot vystupovala směs 5 obsahující 15 % R-materiálu, která zároveň vykazovala největší mezerovitost a nízký obsah pojiva. Objemová hmotnost a mezerovitost asfaltové směsi pak závisí na návrhu křivky zrnitosti směsi (nového kameniva a kameniva obsaženého v R-materiálu). Požadavek v normě pro směs ACO 11 S udává $V_{\min} = 2,5$ (2,0) % a $V_{\max} = 4,0$ (5,5) %, přičemž hodnoty v závorce platí pro kontrolní zkoušky (ČSN 73 6121 - Tabulka 9). Z tohoto hlediska směsi 5 a 8 nebyly



příliš vhodně navrženy. Limitní hodnoty pro stupeň vyplnění mezer pojivem norma pro ACO 11 S neudává, nicméně lze s hodnotami pracovat u dalšího vyhodnocení.



Obrázek 31: Rozdíl v mezerovitostech směsí

3.3.6 Odolnost vůči vodě a mrazu

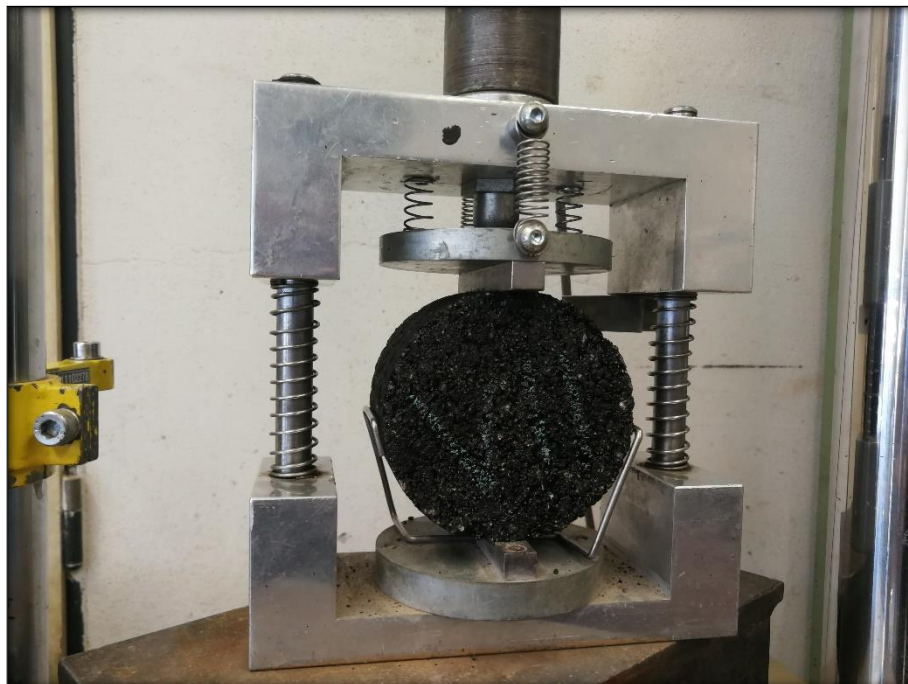
Odolnost asfaltových směsí vůči vodě a mrazu byla zjištěna pomocí metody využívající stanovení pevnosti v příčném tahu. Zkouška byla provedena podle ČSN EN 12697-12 *Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 12: Stanovení odolnosti zkušebního tělesa vůči vodě* a AASHTO T-283-03 *Standard Method of Test for: Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage*. Principem zkoušky bylo porovnání pevností zkušebních těles v příčném tahu, které byly vystaveny třem různým podmínkám. [73] [74]

Sada válcových těles hutněných 2 x 25 údery byla rozdělena do tří skupin po třech tělesech (pro každou směs) tak, aby se průměrné výšky a průměrné objemové hmotnosti skupin rovnaly. První a druhá skupina byla temperována podle ČSN EN 12697-12, třetí pak podle AASHTO T-283-03. První skupina byla udržována na vzduchu při pokojové teplotě (ve výsledcích označeno jako „d“). Druhá skupina byla nasycena vodou (pomocí vakuové komory) a uložena do vodní lázně se zvýšenou teplotou temperace (40 °C po dobu 72 ± 2 hodin) (ve výsledcích označeno jako „w“). Třetí skupina byla po nasycení vodou uložena do mrazáku o teplotě -18 °C po dobu 16 hodin a poté uložena do vodní lázně nastavené na teplotu 60 °C, kde byla tělesa ponechána 24 hodin (ve výsledcích označeno jako „w+f“). [73] [74]



Obrázek 32: Sycení těles ve vakuové komoře

Po této přípravě byla tělesa vytemperována na zkušební teplotu 15 °C. Suchá tělesa byla uložena do sušárny, zatímco skupiny mokrých těles bylo potřeba temperovat ve vodní lázni. Následovalo stanovení pevnosti v příčném tahu pomocí lisu a tlačných čelistí dle postupu popsáno v ČSN EN 12697-23 *Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 23: Stanovení pevnosti v příčném tahu*. Těleso umístěné do tlačných čelistí lisu bylo zatěžováno uprostřed konstantní silou do doby, než došlo k porušení tělesa. Byla zaznamenána hodnota naměřeného maximálního zatížení a příčné deformace. Výsledkem zkoušky byly poměry pevností v příčném tahu u skupin temperovaných ve vodní lázni k pevnosti v příčném tahu u skupiny udržované na vzduchu. [73] [75]



Obrázek 33: Osazení zkušebního tělesa pro zjištění pevnosti v příčném tahu

$$ITS = \frac{2 * P}{\pi * D * H} * 1000$$

Vzorec 13: Pevnost v příčném tahu [75]

Kde je

ITS pevnost v příčném tahu [MPa]

P maximální zatížení [kN]

D průměr zkušebního tělesa [mm]

H výška zkušebního tělesa [mm]

$$ITSR = \frac{ITS_w}{ITS_d} * 100$$

Vzorec 14: Poměr pevností v příčném tahu [75]

Kde je

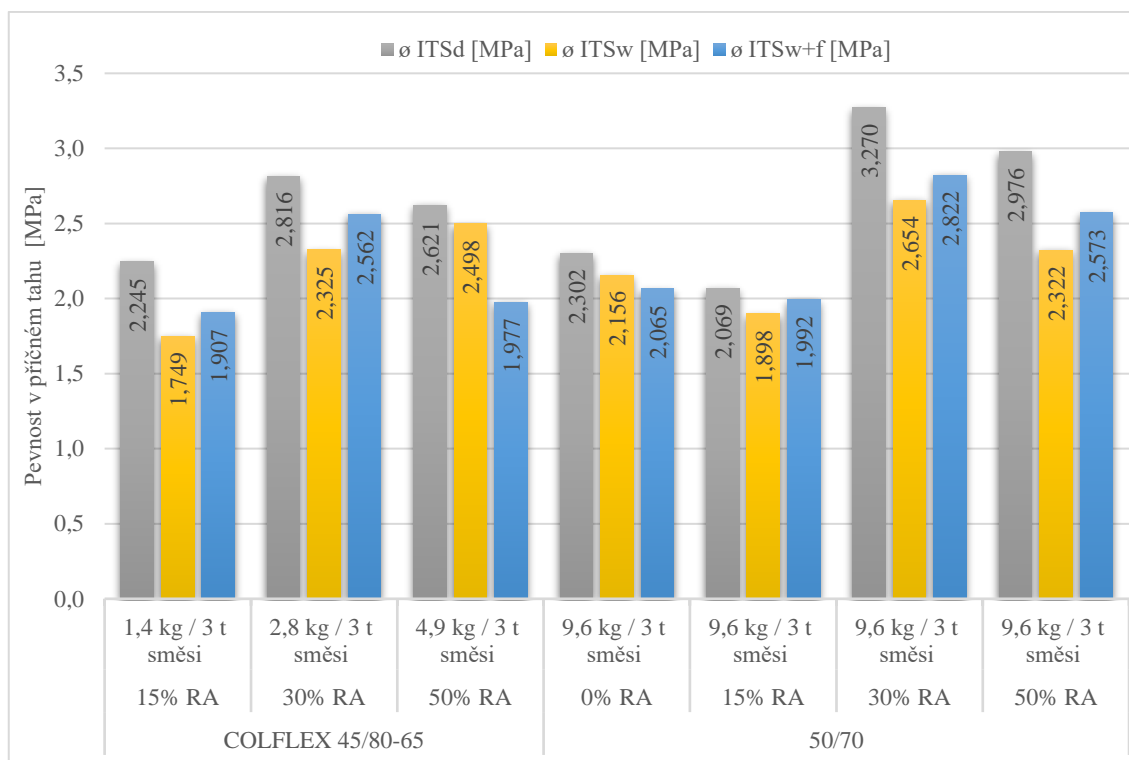
$ITSR$ poměr pevnosti v příčném tahu (při porovnání 3 a 1 skupiny – $ITSR_f$) [%]

ITS_w průměrná pevnost v příčném tahu skupiny mokrých zkušebních těles (skupina 2 - ITS_w , skupina 3 - ITS_{w+f}) [MPa]

ITS_d průměrná pevnost v příčném tahu skupiny suchých zkušebních těles (skupina 1) [MPa]

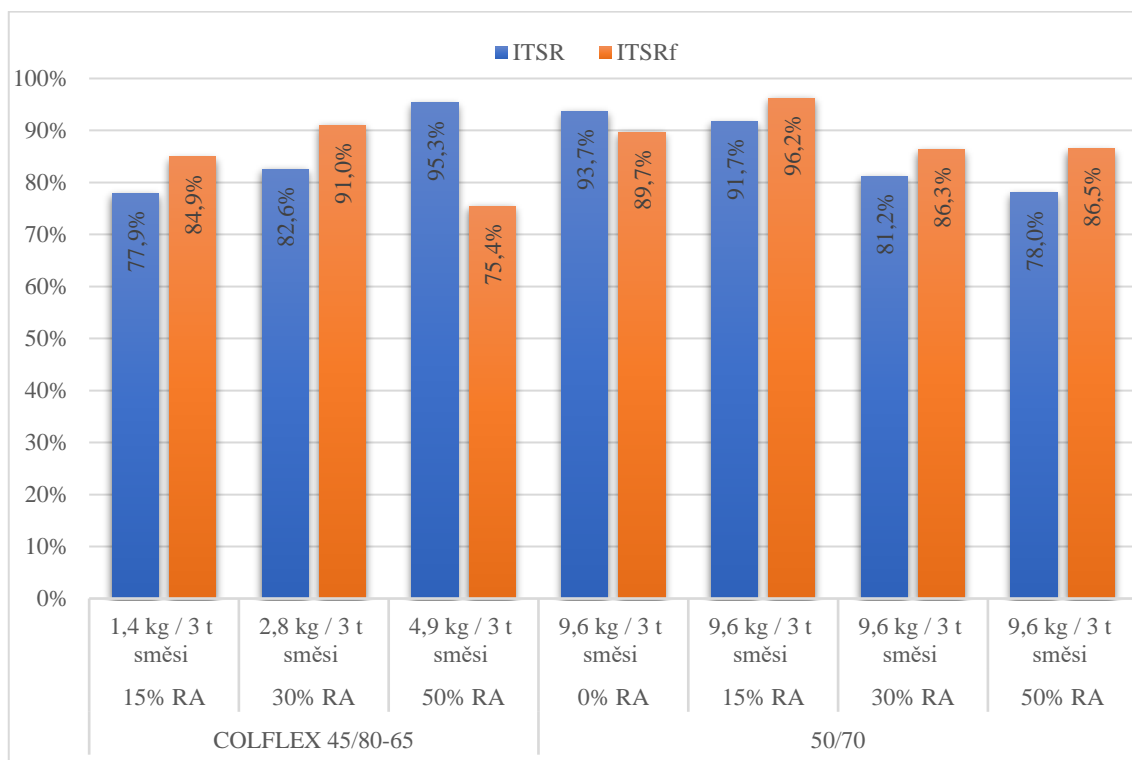


Obrázek 34: Zkušební těleso po zkoušce pevnosti v příčném tahu



Graf 3: Pevnost v příčném tahu (ITS)

Závislost pevnosti v příčném tahu na obsahu R-materiálu či Improcelu K z výsledků příliš vyčíst nelze. Směsi s obsahem 15 i 30 % R-materiálu měly v rámci skupin (druhu pojiva) pevnosti na různě temperovaných tělesech srovnatelné. Směsi s obsahem 0 a 15 % R-materiálu vykazovaly nižší pevnosti, zatímco především směsi s 30 % je měly výrazně větší.



Graf 4: Poměr pevností v příčném tahu (ITSR)

Poměr pevností ITSR vykazoval vzrůstající tendenci v závislosti na obsahu R-materiálu u směsí s PMB a klesající u směsí s 50/70. Toto lze odůvodnit nedostatečnou kompenzací zvyšujícího se množství R-materiálu ve směsi pomocí Improcelu (hodnoty by pravděpodobně zlepšilo vyšší dávkování granulátu). Norma udává minimální poměr pevností 80 % (ČSN 73 6121 - Tabulka 9), který nesplňovaly pouze směsi 5 (PMB s 15 % R-materiálu) a 11 (50/70 s 50 % R-materiálu), nicméně hodnoty nebyly vyloženy špatně. Poměr pevností ITSR_f očividnou tendenci nevykazoval, avšak hodnoty vycházely ve většině dokonce lépe než u ITSR. Zmrazující cyklus tak pravděpodobně kvůli modifikaci neměl na směsi takový vliv, jak by se mohlo očekávat. Z důvodu vyššího množství R-materiálu směs není homogenní materiál, což může vysvětlovat nižší výslednou hodnotu u směsi 7.



3.3.7 Zkouška pojiždění kolem

Zkouška pojiždění kolem stanovuje náchylnost asfaltové směsi k trvalé deformaci, což se usuzuje v závislosti na hloubce vyjeté koleje způsobené opakovaným pojižděním zatěžovacím kolem při stálé teplotě. Zkouška je popsána v ČSN EN 12697-22 *Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 22: Zkouška pojiždění kolem*. Vytemperované desky byly vystaveny celkem 10 000 zatěžovacím cyklům. Výsledkem zkoušky byly přírůstek hloubky vyjeté koleje a průměrná hloubka vyjeté koleje, které se vypočítají podle vzorců níže. V přílohách jsou uvedeny výstupy s grafy z automatizovaného přístroje. [76]



Obrázek 35: Pojiždění kolem

$$WTS_{AIR} = \frac{d_{10\,000} - d_{5\,000}}{5}$$

Vzorec 15: Přírůstek hloubky vyjeté koleje na vzduchu [76]

Kde je

WTS_{AIR} přírůstek hloubky vyjeté koleje [mm]

$d_{10\,000}$ hloubka vyjeté koleje po 10 000 cyklech [mm]

$d_{5\,000}$ hloubka vyjeté koleje po 5 000 cyklech [mm]



$$PRD_{AIR} = \frac{d_{5\,000}}{h} * 100$$

Vzorec 16: Průměrná hloubka vyjeté koleje [76]

Kde je

PRD_{AIR} průměrná hloubka vyjeté koleje [%]

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

h průměrná výška desek [mm]

V tabulce níže jsou shrnuty výsledky zkoušky poježdění kolem. Základní informace o deskách a naměřené parametry pro výpočet jsou uvedeny v Příloze 7 a 8.

Pojivo	R-materiál	Improcel K	WTS _{AIR} [mm]	PRD _{AIR} [%]
COLFLEX 45/80-65	15 % RA	1,4 kg / 3 t směsi	0,008	1,4 %
	30 % RA	2,8 kg / 3 t směsi	0,018 *	1,9 % *
	50 % RA	4,9 kg / 3 t směsi	0,014	1,7 %
50/70	0 % RA	9,6 kg / 3 t směsi	0,018	3,5 %
	15 % RA	9,6 kg / 3 t směsi	0,015	1,6 %
	30 % RA	9,6 kg / 3 t směsi	0,051	3,2 %
	50 % RA	9,6 kg / 3 t směsi	0,023	2,4 %

Tabulka 11: Zkouška poježdění kolem

Kde

* značí výsledek vypočítaný pouze z jedné desky, výsledek druhé desky je zavádějící – deska pravděpodobně nebyla v zařízení dostatečně upevněna (viz. Příloha 10)

Pro zkoušku poježdění kolem norma uvádí podmínku pro maximální poměrné hloubky koleje $PRD_{AIR} = 5,0 \%$ a maximální přírůstek hloubky koleje $WTS_{AIR} = 0,07 \text{ mm}$ (ČSN 73 6121 - Tabulka 9). Všechny směsi tyto podmínky bezpečně splnily. Nejnižších hodnot (tedy největších odolností proti trvalým deformacím) dosahovaly směsi s PMB, a to s nízkým i vysokým obsahem R-materiálu. Nejlepší výsledky v rámci druhů pojiva vykazovaly směsi s 15 % R-materiálu. Směsi s PMB v kombinaci s Improcelem K byly dostatečně modifikovány, aby vyvážily vysoká množství R-materiálu obsahující nemoifikované pojivo, a měly tak lepší odolnost proti tvorbě trvalým deformacím oproti směsím, kde bylo použito běžné asfaltové pojivo.

Směsi 8 a 10 (50/70 s 0 a 30 % R-materiálu) dosahovaly nejhorších výsledků, což mohlo souviset s nízkou mezerovitostí a s vyššími hodnotami stupně vyplnění mezer pojivem (viz. Tabulka 10). Asfaltové pojivo při vysokých teplotách mění svůj objem, mezery se tak vyplní pojivem a zpravidla tak dojde k vyšším trvalým deformacím. Asfaltová směs se nemá kam rozpínat, čímž dochází k jejímu vytlačování a vzniku vyjetých kolejí.

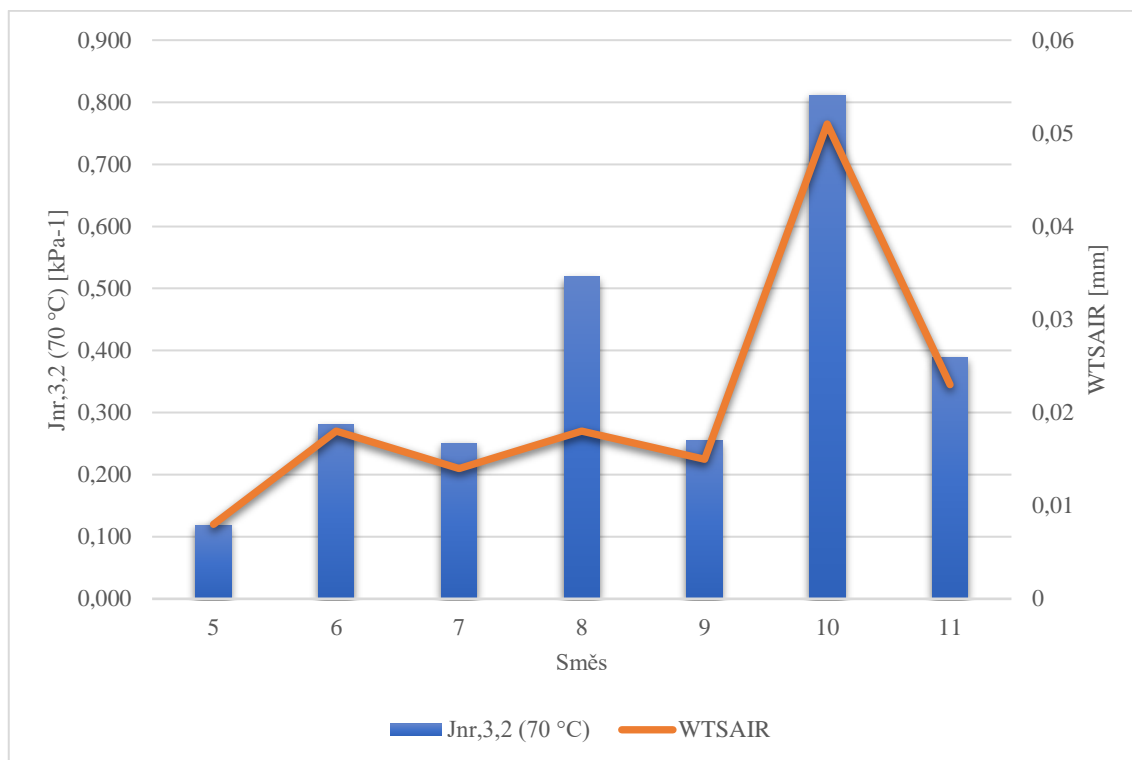


Obrázek 36: Vyjetá kolej v desce

V následující tabulce a grafu jsou porovnány výsledky parametrů charakterizující odolnost proti trvalým deformacím znovuzískaného asfaltového pojiva (zkouška MSCR – viz. kapitola 3.2.3) a asfaltové směsi (zkouška poježdění kolem). Z hodnot lze vyčíst, že nižší hodnoty smykové poddajnosti u směsi s PMB korespondovaly s nízkými výsledky ze zkoušky poježdění kolem, což potvrdilo vysokou odolnost proti tvorbě trvalých deformací. Směsi se silničním pojivem 50/70 vykazovaly srovnatelný průběh výsledků v závislosti na podílu R-materiálu. Porovnáním směsí s obsahem 15, 30 a 50 % recyklátu vyšly lépe směsi s PMB, a to ve všech parametrech kromě difference pro nevratnou smykovou poddajnost, kde vykazovaly mírně vyšší citlivost za vysokých teplot na změnu napětí.

Směs	Parametry znovuzískaného asfaltového pojiva ze směsí		Parametry směsi ze zkoušky poježdění kolem	
	Nevratná smyková poddajnost [kPa-1]	Diference pro nevratnou smykovou poddajnost [%]	Přírůstek hloubky vyjeté koleje [mm]	Průměrná hloubka vyjeté koleje [%]
	$J_{nr,3,2} (70\text{ °C})$	$J_{nr,diff} (70\text{ °C})$	WTS_{AIR}	PRD_{AIR}
5	0,119	50,8	0,008	1,4 %
6	0,280	41,5	0,018	1,9 %
7	0,250	41,0	0,014	1,7 %
8	0,519	39,8	0,018	3,5 %
9	0,254	34,4	0,015	1,6 %
10	0,812	31,4	0,051	3,2 %
11	0,389	29,8	0,023	2,4 %

Tabulka 12: Porovnání parametrů charakterizujících odolnost proti trvalým deformacím – hodnoty ze zkoušky na znovuzískaném pojivu (MSCR) a zkoušky na asfaltové směsi (poježdění kolem)



Graf 5: Porovnání odolnosti směsí proti trvalým deformacím

3.3.8 Tuhost

K odhadu chování asfaltové směsi ve vozovce (a odhadu chování celé konstrukce vozovky) se využívá klasifikace asfaltových směsí podle modulů tuhosti. Modul tuhosti vyjadřuje vztah mezi aplikovaným maximálním napětím a při něm naměřeném maximálním přetvořením. Vzorky (6 válcových těles hutněných 2 x 75 úderů) byly deformovány v rozsahu lineárního přetvoření (pružné tuhosti) zkouškou v příčném tahu (metoda IT-CY). Podrobný postup zkoušky je uveden v ČSN EN 12697-26 *Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 26: Tuhost*. Tělesa byla odzkoušena za 4 teplot (0 °C, 15 °C, 27 °C a 40 °C) a byly sledovány rozdíly v naměřených tuhostech. [77]



Obrázek 37: Měření modulu tuhosti

Po nastavení požadované horizontální deformace, určení zatěžovací rychlosti a zadání rozměrů zkušebních těles a Poissonova čísla (závislé na zkušební teplotě) bylo provedeno zatěžování přístrojem vyvolujícím zatěžovací pulsy. Po prvním odzkoušení bylo těleso otočeno o 90 ° a měření se zopakovalo. Výsledná hodnota modulu tuhosti zkušebního tělesa byl vypočtena jako průměr z těchto dvou měření. Modul tuhosti program automaticky vypočítal podle vzorce níže a následně jej upravil podle součinitele zatěžovací plochy. [77]

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

Vzorec 17: Naměřený modul tuhosti [77]

Kde je

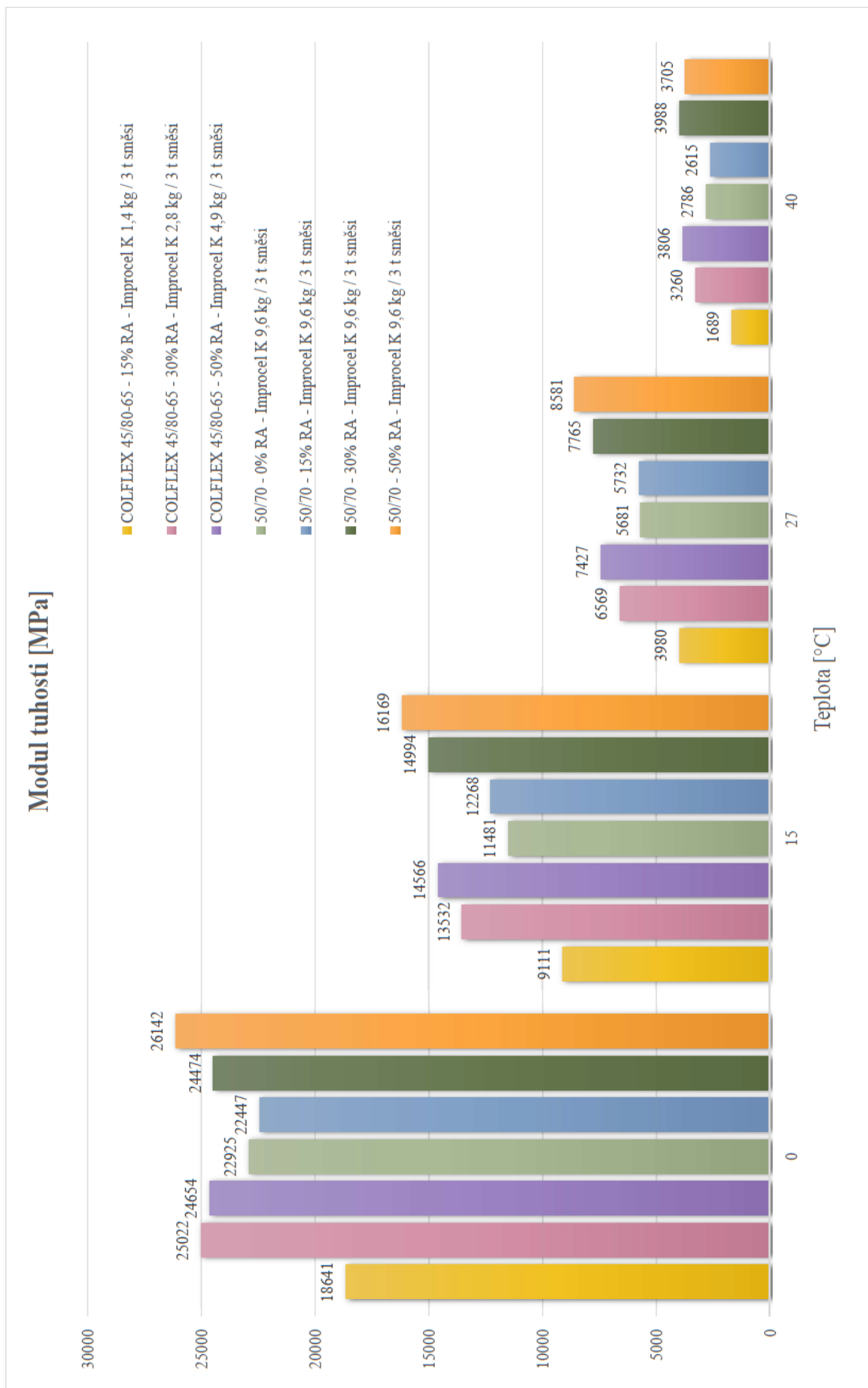
E naměřený modul tuhosti [MPa]

F maximální hodnota zatěžovací síly [N]

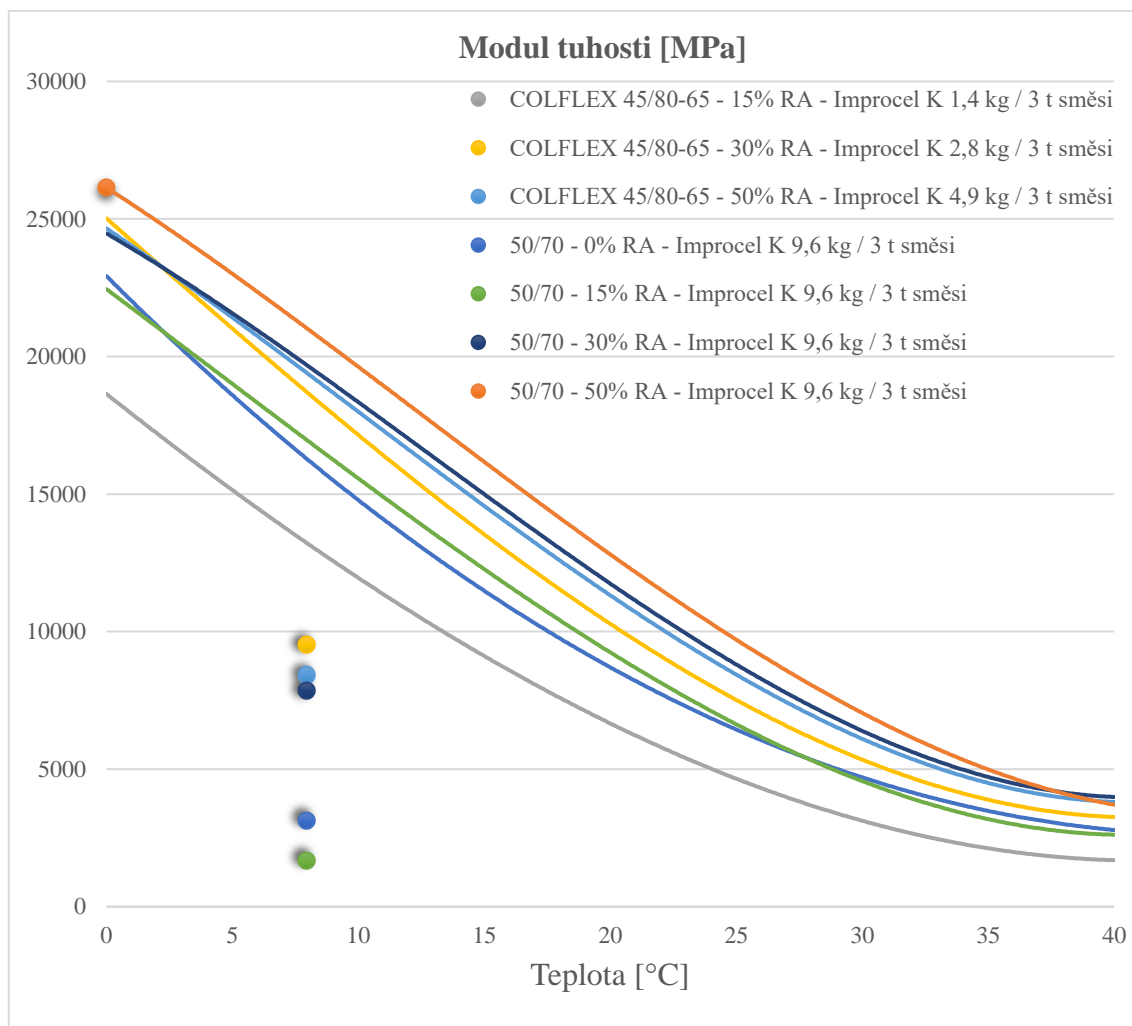
z amplituda pružné horizontální deformace zjištěná v průběhu zatěžovacího cyklu [mm]

h průměrná tloušťka zkušebního tělesa [mm]

v Poissonovo číslo [-]



Graf 6: Modul tuhosti



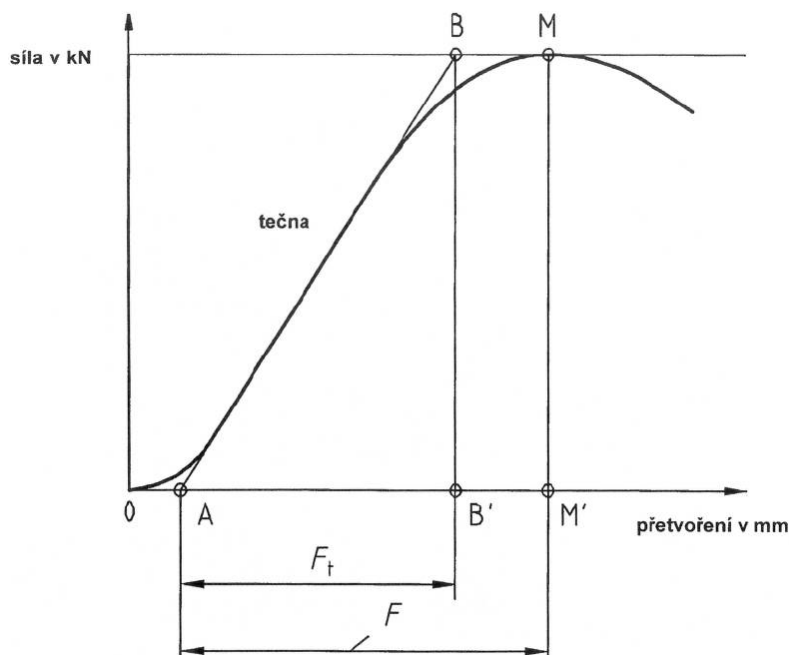
Graf 7: Trend měnící se tuhosti v závislosti na teplotě

Obecně platí, že tuhost směsi klesá s rostoucí teplotou a obvykle roste s narůstajícím obsahem R-materiálu. Trend závislosti na teplotě je z grafů zřejmý, avšak ne při všech teplotách platilo, že čím více R-materiálu směs obsahovala, tím více tuhá byla. Směsi obecně vykazovaly objektivně vysokých tuhostí, a to i při teplotě 15 °C (pro porovnání – směsi s vysokým modulem tuhosti (VMT) dosahují běžně při této teplotě hodnoty 9000 MPa). Směsi nabývaly vyšších tuhostí i za vysokých teplot, což reflektuje vysokou odolnost proti trvalým deformacím (viz. kapitola 3.3.7). Mírně vyšších hodnot nabývaly směsi s pojivem 50/70, vliv PMB a Improcelu K se u modulů tuhosti může, ale i nemusí, projevit. Pro další zhodnocení chování směsí je možné porovnání s lomovou houževnatostí za teplot 0 a 25 °C (viz. kapitola 3.3.10).



3.3.9 Marshallova zkouška

Pro stanovení hodnot stability a přetvoření byla využita Marshallova zkouška popsaná v ČSN EN 12697-34 *Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 34: Marshallova zkouška*. Stabilitou se rozumí maximální odolnost zkušebního tělesa proti deformaci, přetvořením pak deformace zkušebního tělesa definovaná jako vzdálenost od průsečíku tečny a přímky základny po bod, kde je dosaženo maximální síly. Podíl těchto dvou hodnot se označuje jako míra tuhosti. Pro lepší představu je níže přiložen graf z normy, hodnota přetvoření je označena písmenem F. [78]



Graf 8: Grafická definice Marshallovy zkoušky [78]

Pro zkoušku byla využita 3 válcová tělesa zhutněná 2 x 75 údery. Před samotnou zkouškou byla tělesa temperována 30 minut ve vodní lázni o teplotě 60 °C. Těleso bylo poté osazeno mezi čelisti a zatěžováno konstantní rychlostí 50 mm/min do dosažení maximální síly. Z programu byly zaznamenány hodnoty stability (S) a přetvoření (F). Vynásobením stability s korekčním faktorem byla získána korigovaná stabilita, která zohledňuje rozměry zkušebních těles. [78]

$$c = 5,2 * e^{-0,0259 * h}$$

Vzorec 18: Korekční faktor zohledňující výšku tělesa [78]

Kde je

c korekční faktor [-]

h výška zkušebního tělesa [mm]



Obrázek 38: Marshallova zkouška

Pojivo	R-materiál	Improcel K	S	F	S/F
			[kN]	[mm]	[kN/mm]
COLFLEX 45/80-65	15 % RA	1,4 kg / 3 t směsi	15,9	4,7	3,4
	30 % RA	2,8 kg / 3 t směsi	22,2	4,7	4,7
	50 % RA	4,9 kg / 3 t směsi	21,1	3,7	5,7
50/70	0 % RA	9,6 kg / 3 t směsi	18,8	4,2	4,4
	15 % RA	9,6 kg / 3 t směsi	17,0	5,0	3,4
	30 % RA	9,6 kg / 3 t směsi	21,5	5,1	4,2
	50 % RA	9,6 kg / 3 t směsi	20,9	3,8	5,6

Tabulka 13: Marshallova zkouška

Vyšší hodnoty odolnosti proti deformaci dosahovaly směsi s obsahem 30 a 50 % R-materiálu, a to mírně lepších hodnot u směsi s PMB. Jedině směs s 15 % R-materiálu na tom byla lépe s pojivem 50/70. Nejnižších hodnot deformace vykazovaly směsi s 50 % R-materiálu, ale v rámci skupin podle druhu pojiva na tom byly směsi porovnatelné. Hodnoty se obecně držely na podobných hodnotách. Míra tuhosti je pro přehlednost v tabulce obsažena, nicméně závěry z ní vyvozeny nebyly.

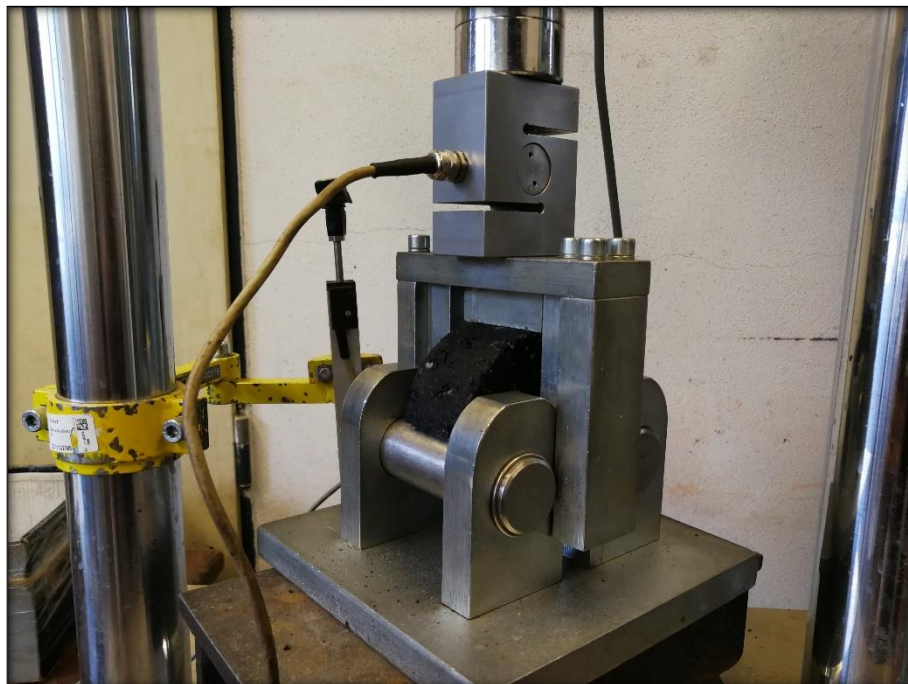


Obrázek 39: Zkušební těleso po Marshallově zkoušce

3.3.10 Odolnost vůči šíření trhliny

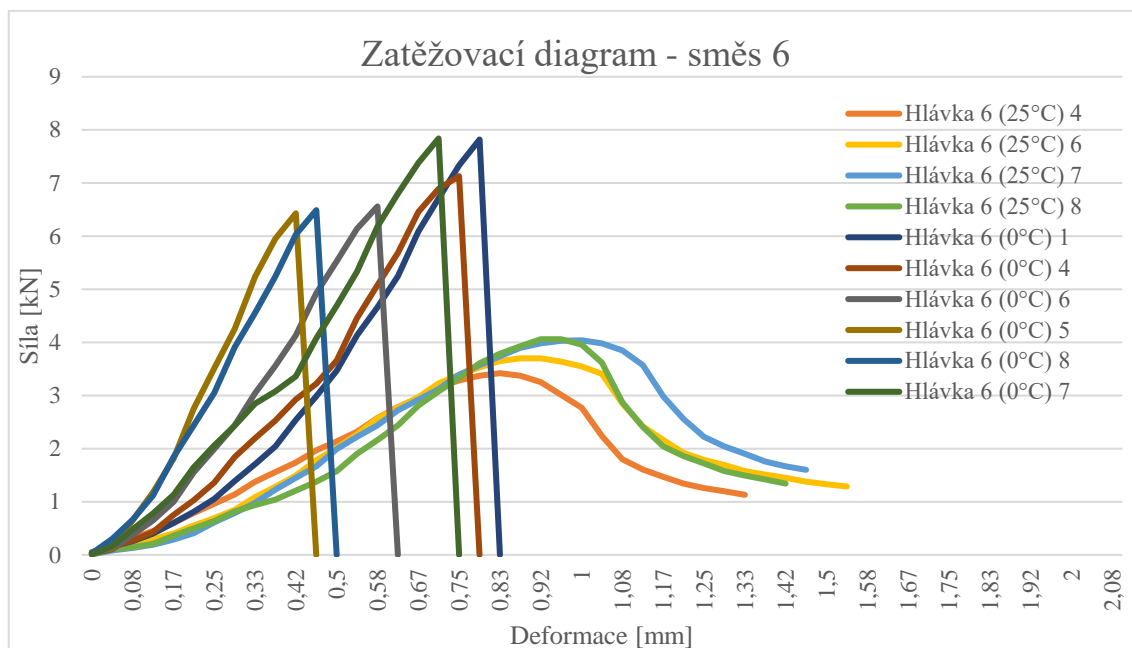
Zkušební metoda ohybem na půlválcovém zkušebním tělese (SCB) se používá ke stanovení pevnosti v tahu a odolnosti vůči lomu asfaltové směsi pro hodnocení možného šíření trhlin. Podstata zkoušky je popsána v *ČSN EN 12697-44 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 44: Šíření trhliny zkouškou ohybem na půlválcovém zkušebním tělese*. Oproti normě se tato zkouška provádí v laboratořích ČVUT v Praze s modifikacemi přizpůsobenými českému zkušebnictví a s rozšířením zkušebních parametrů. [79] [80]

Zkouška probíhala na půlválcových tělesech vyrobených rozřezáním těles dříve použitých při zjišťování modulu tuhosti (průměr těles tak byl 100 mm místo 150 mm dle normy). Z každého tělesa tvaru válce tak byla vytvořena dvě půlválcová tělesa a seříznuta na požadovanou výšku 50 mm. Na spodní hraně každé poloviny byla vytvořena přesně definovaná trhlina hloubky 10 mm a šířky 0,9 mm (modifikace z důvodu dostupnosti vhodných rezných kotoučů). Před zkouškou bylo potřeba změřit průměr, tloušťku a výšku každého půlválcového tělesa. Jedna polovina byla odzkoušena za teploty 0 °C, což odpovídá šíření mrazové trhliny, druhá pak při teplotě 25 °C, kdy lze mluvit o šíření únavové trhliny. Zatěžovací rychlost byla oproti normě snížena na 2,5 mm/min (z 5 mm/min). [79] [80]



Obrázek 40: Odolnost v tahu za ohybu

Parametry získanými z této zkoušky jsou přetvoření při maximální síle, maximální napětí a odolnost vůči lomu (kritická hodnota lomové houževnatosti). Tyto parametry vycházejí z hodnoty dosažené maximální síly a deformace (v okamžiku porušení zkušebního tělesa). Kromě těchto normových parametrů byly zjištěny i další, a to pomocí záznamového zařízení, díky kterému byl vykreslen pracovní diagram. Ten byl využit pro výpočet lomové práce (plocha pod křivkou) a lomové energie (práce přepočtena na jednotku plochy). Tyto parametry byly stanoveny pouze do hodnoty maximální síly (iniciace trhliny). Posledním hodnotícím parametrem byl zatěžovací úhel (sklon) tečny stanovován v místě 50 % maximální síly v zatěžovací větvi. Ze sklonů lze zjistit jistý poměr tuhosti a křehkosti materiálu. Lze říci, že čím je sklon pozvolnější, tím je asfaltová směs více flexibilnější. Dosahuje tedy vyšších deformací při stejném zatížení a tím zpravidla i vyšších lomových energií nutných ke zlomení zkušebního tělesa. Názorný zatěžovací diagram je uveden níže. Z grafu je vidět, že zatímco za teploty 25 °C byla tělesa deformována i po dosažení maximální síly, u vzorků za teploty 0 °C se projevil tzv. křehký lom. [80]



Graf 9: Zatěžovací diagram těles při zkoušce odolnosti vůči šíření trhlin – směs 6

$$\varepsilon_{max} = \frac{\Delta w}{w} * 100$$

Vzorec 19: Přetvoření při maximální síle [79]

Kde je

ε_{max} přetvoření při maximální síle [%]

ΔW svislý posun zkušebního tělesa při maximální síle [mm]

W výška zkušebního tělesa při maximální síle [mm]

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{D * t}$$

Vzorec 20: Maximální napětí při porušení [79]

Kde je

σ_{max} maximální napětí při porušení [MPa]

F_{max} maximální síla [N]

D průměr zkušebního tělesa [mm]

t tloušťka zkušebního tělesa [mm]



$$K_c = \sigma_{max} * Y_1 * \sqrt{\pi * a}$$

Vzorec 21: Odolnost vůči lomu – lomová houževnatost [79]

Kde je

K_c odolnost vůči lomu (kritická hodnota lomové houževnatosti) [N/mm^{3/2}]

σ_{max} maximální napětí při porušení [MPa]

Y_1 faktor intenzity napětí při standardním režimu I (viz. Vzorec 22) [-]

a hloubka drážky zkušební tělesa [mm] ... $a = 10$ mm

$$Y_1 = 4,782 - 1,219 * (a/r) + 0,063 * e^{7,045 * (a/r)}$$

Vzorec 22: Faktor intenzity napětí [79]

Kde je

Y_1 faktor intenzity napětí při standardním režimu I [-]

a hloubka drážky zkušební tělesa [mm]

r poloměr zkušební tělesa ($D = 2 * r$) [mm]

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

Vzorec 23: Lomová energie [80]

Kde je

G_f lomová energie [J/m²]

W lomová práce [J]

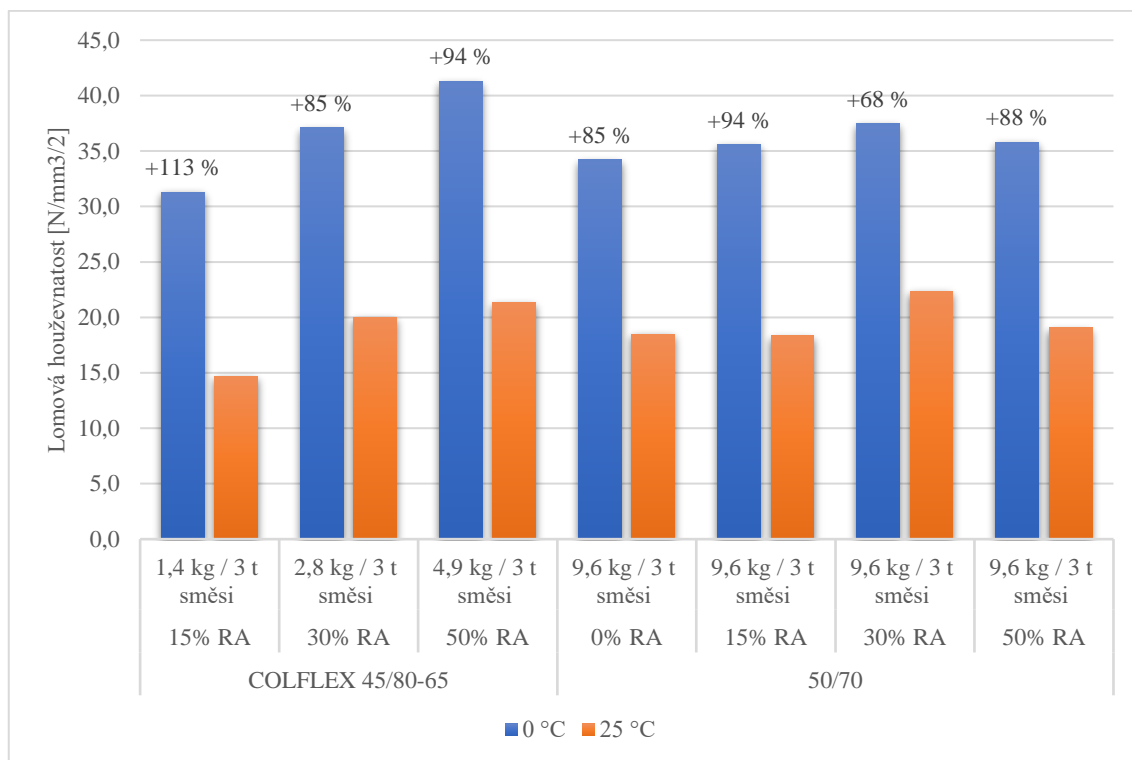
t tloušťka zkušební tělesa [m]

w výška zkušební tělesa [m]

a hloubka drážky zkušební tělesa [m] ... $a = 0,01$ m

Směs	Přetvoření		Napětí při porušení		Lomová houževnatost		
	[%]		[MPa]		[N/mm ^{3/2}]		Teplotní citlivost
	0 °C	25 °C	0 °C	25 °C	0 °C	25 °C	0 °C / 25 °C [-]
5	1,37 %	2,08 %	1,16	0,55	31,3	14,7	2,13
6	1,25 %	1,82 %	1,38	0,74	37,1	20,0	1,85
7	1,10 %	1,61 %	1,54	0,79	41,3	21,3	1,94
8	1,28 %	2,04 %	1,27	0,69	34,2	18,5	1,85
9	1,59 %	1,97 %	1,32	0,68	35,6	18,3	1,94
10	1,11 %	1,62 %	1,39	0,83	37,5	22,3	1,68
11	1,19 %	1,53 %	1,33	0,71	35,8	19,1	1,88

Tabulka 14: Přetvoření, napětí a lomová houževnatost



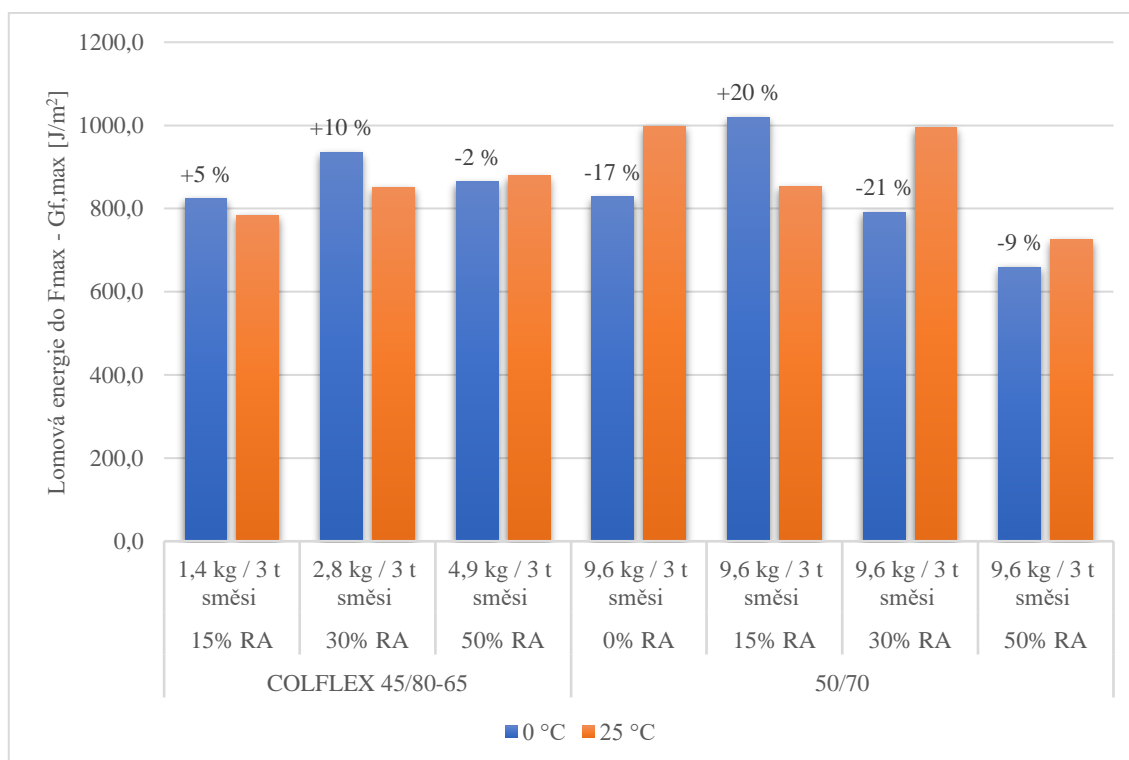
Graf 10: Lomová houževnatost v závislosti na teplotě

Ve směsích s PMB platí závislost snižování přetvoření a zároveň zvyšování napětí při přetvoření i lomové houževnatosti s rostoucím podílem R-materiálu. U směsí s pojivem 50/70 tento trend evidentní není. Čím je hodnota lomové houževnatosti vyšší, tím směs přenese vyšší energii. Směsi s PMB (kromě směsi s 15 % R-materiálu, která stejně jako při Marshallově zkoušce a modulech tuhosti vykazovala nižších hodnot) s vysokým obsahem R-materiálu zde dosáhly vysoké odolnosti proti lomu, a to za obou teplot. Směsi s 30 % R-materiálu vyšly podobně, zatímco směs s 50 % byla lepší s PMB pojivem. Názor, že směsi s vyšším obsahem R-materiálu díky vysokým tuhostem budou dosahovat nižších lomových houževnatostí (že budou křehčí), se v tomto případě nepotvrdil, a to pravděpodobně z důvodu použití PMB a granulátu, díky kterým byly zlepšeny nízkoteplotní vlastnosti směsí. V tabulce a na grafu je vidět porovnání teplotní citlivosti, ta značí, jak směs náchylná na změny klimatu (čím větší číslo je, tím je směs více citlivá). Směsi byly v tomto ohledu porovnatelné s výjimkou směsi 5, která vykazovala o poznání větší citlivost než ostatní a směsi 10, která byla naopak nejméně citlivá a dosahovala vysokých hodnot lomové houževnatosti za teploty 0 i 25 °C.



Směs	Práce do max. hodnoty (W)		Lomová energie do F_{max} ($G_{f,max}$)			Úhel zatěžování mezi 0 a $0,5 F_{max}$ (α)	
	[J]		[J/m ²]		Teplotní citlivost	[°]	
	0 °C	25 °C	0 °C	25 °C	0 °C / 25 °C [-]	0 °C	25 °C
5	1,6	1,5	824	785	1,05	83,8	70,5
6	1,8	1,6	935	850	1,10	85,3	76,8
7	1,7	1,7	865	879	0,98	86,2	79,5
8	1,7	1,9	828	998	0,83	84,8	74,4
9	2,0	1,6	1020	852	1,20	83,6	74,9
10	1,5	2,0	791	995	0,79	85,8	79,7
11	1,3	1,4	659	725	0,91	85,7	78,6

Tabulka 15: Práce, energie a úhel zatěžování



Graf 11: Lomová energie do F_{max}

Hodnoty práce a lomové energie spolu souvisí. Čím jsou hodnoty vyšší, tím směs vydrží déle a přeneše více opakování. Směs je tak schopná více se deformovat. Směsi v tomto ohledu jasný vzorec chování nevykazovaly, avšak varianty s vyšším obsahem R-materiálu vycházely povětšinou lépe u směsí s PMB. Na teplotní citlivosti lze vyzpozorovat, že u směsí byly zlepšeny jejich nízkoteplotní vlastnosti vlivem modifikace a měřené hodnoty tak v rámci rozdílných teplot byly porovnatelné. Čím je úhel zatěžování vyšší, tím je směs tužší, což je předpoklad, který směsi splnily jak v rámci teplot, tak v souvislosti se zvyšujícím se obsahem R-materiálu. Na základě grafů byly některé



naměřené hodnoty z výsledků vyřazeny, odlehlé hodnoty a průběhy mohly být způsobeny nepřesností při řezání či měření a heterogenitou vlivem obsahu R-materiálu.



Obrázek 41: Trhlina na půlválcovém tělese

3.3.11 Pevnost v tahu za ohybu

Podstatou zkoušky pevnosti v tahu za ohybu je stanovení deformačních charakteristik asfaltových směsí při nízkých teplotách a orientační posouzení odolnosti proti tvoření trhlin. Princip zkoušky je popsán v Příloze 2 v *Technických podmínkách Ministerstva dopravy TP 151*. Zkouška byla provedena na tělesech tvaru hranolu (na trámčích) namáhaných silou působící uprostřed vzdálenosti podpor (tříbodový ohyb). Pro tuto zkoušku byla vyrobena tělesa tvaru hranolu o rozměrech 50 x 50 x 320 mm rozřezáním desky tloušťky 50 mm. Vzniklo tak 5 těles, přičemž 3 z nich byla odzkoušena za teploty 0 °C a 2 při -10 °C. Zatěžování lisem probíhalo za rychlosti 1,25 mm/min, přičemž zatěžování bylo ukončeno při dosažení maximální síly. Byly zaznamenány nejvyšší dosažená síla a průhyb uprostřed rozpětí při porušení vzorku. Kromě těchto hodnot byl průběh zkoušky zaznamenáván a data byla použita k vykreslení zatěžovacího diagramu a stanovení lomové práce (plocha pod křivkou po dosažení maximální síly). [81] [80]



Obrázek 42: Tělesa tvaru hranolu po rozřezání desek



Obrázek 43: Tříbodový ohyb



$$R = \frac{3}{2} * \frac{P * l}{b * h^2}$$

Vzorec 24: Pevnost v tahu za ohybu [81]

Kde je

- R* 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]

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

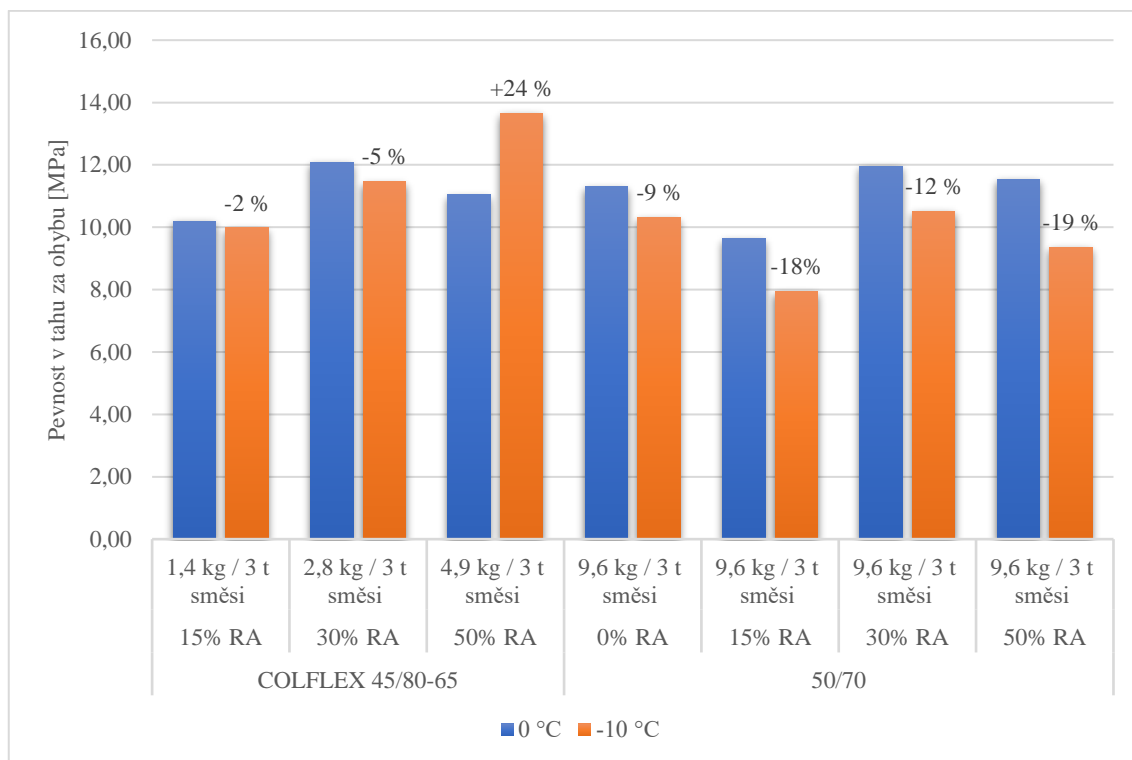
Vzorec 25: Modul tuhosti v tahu za ohybu [81]

Kde je

- E_s* modul tuhosti v tahu za ohybu [MPa]
Y_s průhyb zjištěný uprostřed rozpětí při okamžiku porušení vzorku [mm]
P největší dosažená síla [N]
l vzdálenost podpor zkušebního tělesa [mm]
b šířka zkušebního tělesa [mm]
h výška zkušebního tělesa [mm]

Směs	Pevnost v tahu za ohybu (R)			Modul tuhosti v tahu za ohybu (E _s)		Lomová práce (W)		
	[MPa]		Teplotní citlivost	[MPa]		[J]		Teplotní citlivost
	0 °C	-10 °C	-10 °C / 0 °C [-]	0 °C	-10 °C	0 °C	-10 °C	-10 °C / 0 °C [-]
5	10,20	9,98	0,98	2066	3074	2,04	1,03	0,51
6	12,09	11,46	0,95	2285	3695	2,32	1,10	0,47
7	11,04	13,66	1,24	2745	4508	1,57	1,42	0,90
8	11,30	10,31	0,91	3085	3586	1,36	0,96	0,71
9	9,63	7,94	0,82	2971	3519	0,94	0,60	0,64
10	11,96	10,52	0,88	3557	4780	1,27	0,69	0,54
11	11,54	9,36	0,81	3230	3590	1,39	0,78	0,56

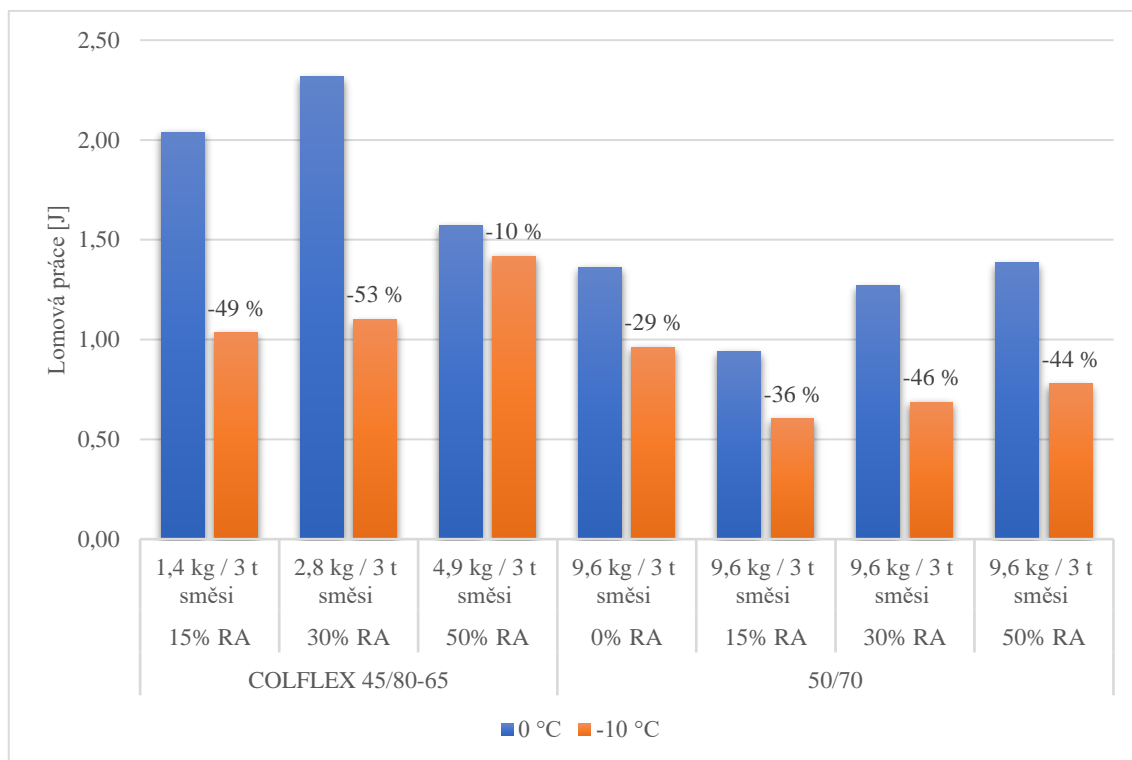
Tabulka 16: Pevnost v tahu za ohybu na trámčích – teplota



Graf 12: Pevnost v tahu za ohybu – teplota

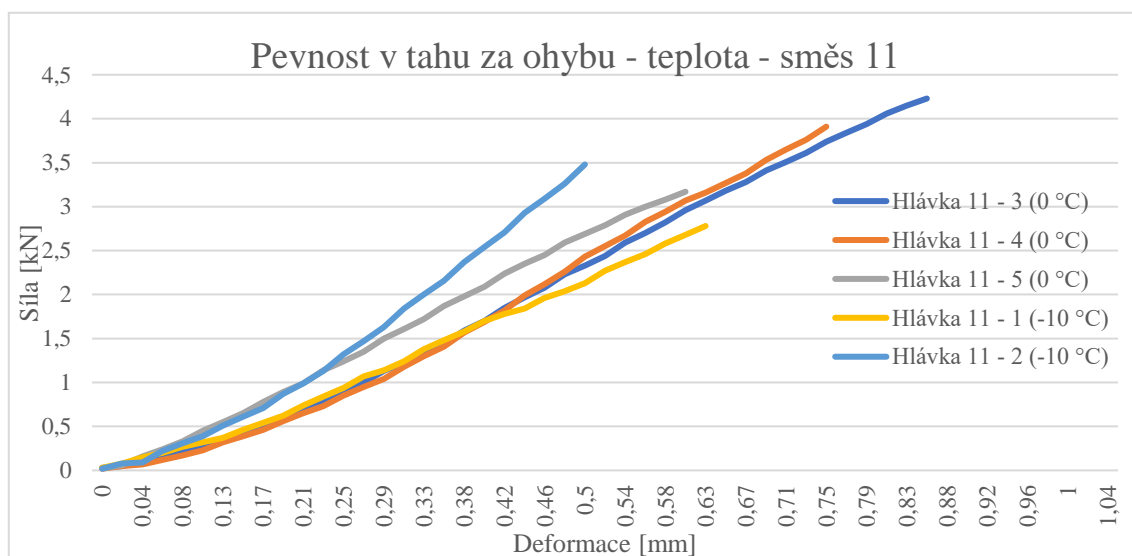
Pevnost v tahu za ohybu lze uvažovat podobně jako lomovou houževnatost – čím větší je hodnota, tím větší sílu směs přenese. Dle očekávání by větší sílu měly přenést směsi při -10 °C, což se ve výsledcích ukázalo pouze u směsi 7. To však nic nemění na faktu, že všechny směsi dosahovaly vysokých pevností (pro VMT je požadavek minimální pevnost 6 MPa při 0 °C) a to i za vysokého obsahu R-materiálu. Dle teplotní citlivosti lze usoudit, že většina směsí v tomto ohledu nebyla příliš náchylná na změny klimatu.

Z modulů tuhosti v tahu za ohybu je opět možno vyčíst vzrůstající tendenci se zvyšujícím se obsahem R-materiálu obzvláště pro směsi s PMB, a to za obou teplot. Směsi s pojivem 50/70 však dosahovaly v porovnání s nimi převážně vyšších hodnot, nicméně závislost na obsahu R-materiálu z výsledků zjevná není. Stále však platí, že s nižší teplotou modul tuhosti roste.



Graf 13: Lomová práce – teplota

Práce potřebná k porušení zkušebních těles nabývala větších hodnot u směsi s PMB, a to za obou zkušebních teplot. Platilo, že jakmile byl ve směsi použit recyklát, lomová práce rostla se vzrůstajícím obsahem (s výjimkou směsi 7, kdy práce za teploty 0 °C byla nejnižší ze skupiny PMB, avšak za obou teplot převyšovala všechny varianty s pojivem 50/70). Výsledky byly zjištěny ze 2, respektive 3, těles, přičemž některé hodnoty nebyly do výsledku zahrnuty z důvodu neobvyklých průběhů zatěžovacích diagramů či odlehlých hodnot. Kromě již zmíněné směsi 7 vykazovaly směsi v rámci lomové práce poměrně velkou teplotní citlivost. Na grafu níže je vidět, že za teploty 0 °C byla tělesa schopná více se deformovat, což vedlo k větším hodnotám lomové práce.



Graf 14: Zatěžovací diagram – tříbodový ohyb na trámčích směsi 11 – teplota

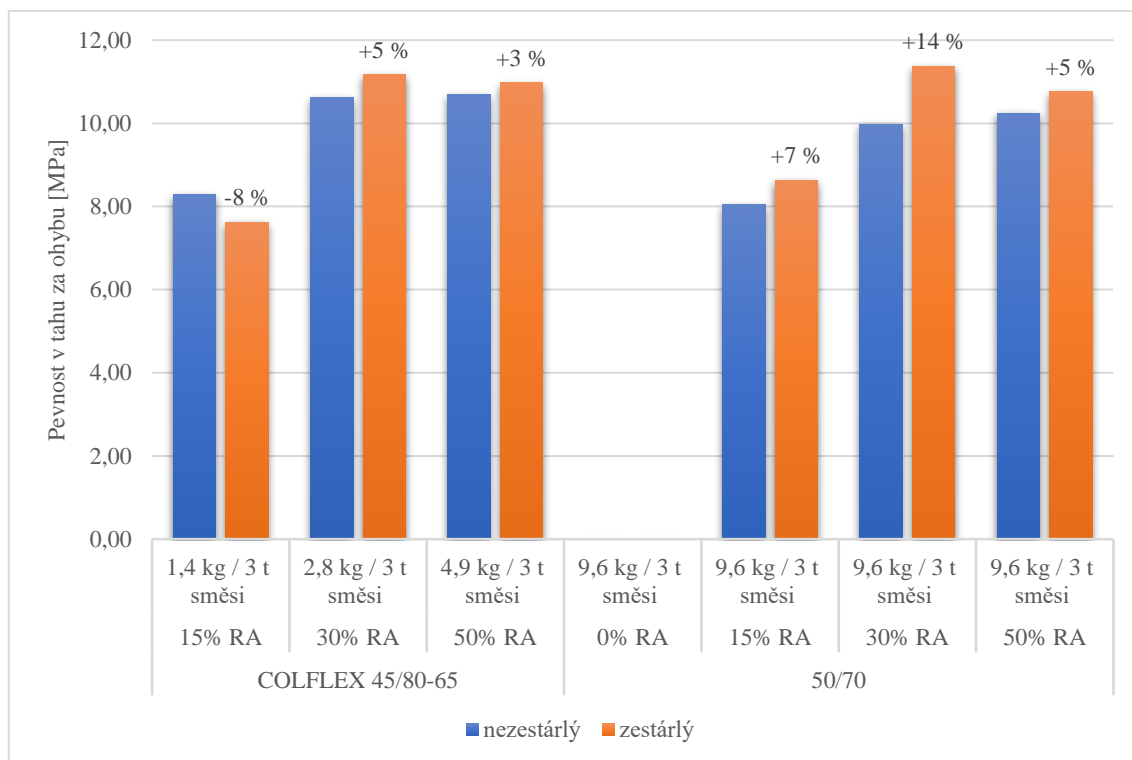


Zkouška byla obdobně provedena i na trámčích vyrobených rozřezáním desek tloušťky 40 mm, na kterých byla dříve provedena zkouška stanovení odolnosti vůči trvalým deformacím (vyjetí kolem). Trámky byly z desek řezány v šířce 50 mm od okrajů desky. Středová část desky (vyjetá kolej) byla ze zkoušení vyloučena, protože bylo prokázáno, že i když je vyjetí koleje v desce velmi malé, dochází ke změně vlastností směsi a trámky by tak vykazovaly velmi odlišné výsledky. Z každé desky byly vyrobeny 4 trámky o rozměrech 50 x 40 x 320 mm (celkem tak vzniklo 8 zkušebních těles pro každou směs). Tato tělesa navíc byla rozdělena do dvou skupin, kdy jedna byla vystavena navíc oxidativnímu stárnutí podle *prEN 12697-52 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 52: Oxidativní stárnutí*. To spočívalo v ponechání trámek v sušárně s nucenou cirkulací vzduchu za teploty 85 °C po dobu 5 dní, což vedlo ke stárnutí asfaltového pojiva ve vzorcích. Na tělesech byla provedena zkouška pevnosti v tahu za ohybu po teplotě na 0 °C. Zkouška nebyla provedena na směsi 8. [80] [82]

Směs	Pevnost v tahu za ohybu (R)			Modul tuhosti v tahu za ohybu (E _s)		Lomová práce (W)		
	nezest.	zest.	index stárnutí	nezest.	zest.	nezest.	zest.	index stárnutí
	[MPa]		zestárlé / nezest. [-]	[MPa]		[J]		zestárlé / nezest. [-]
5	8,29	7,62	0,92	2286	4145	1,00	0,38	0,38
6	10,62	11,17	1,05	4822	4167	0,66	0,81	1,23
7	10,69	10,98	1,03	3965	3537	0,86	1,03	1,20
8	-	-	-	-	-	-	-	-
9	8,05	8,63	1,07	3647	4088	0,57	0,53	0,93
10	9,98	11,37	1,14	2940	3906	1,08	0,96	0,89
11	10,24	10,76	1,05	4338	4779	0,69	0,70	1,00

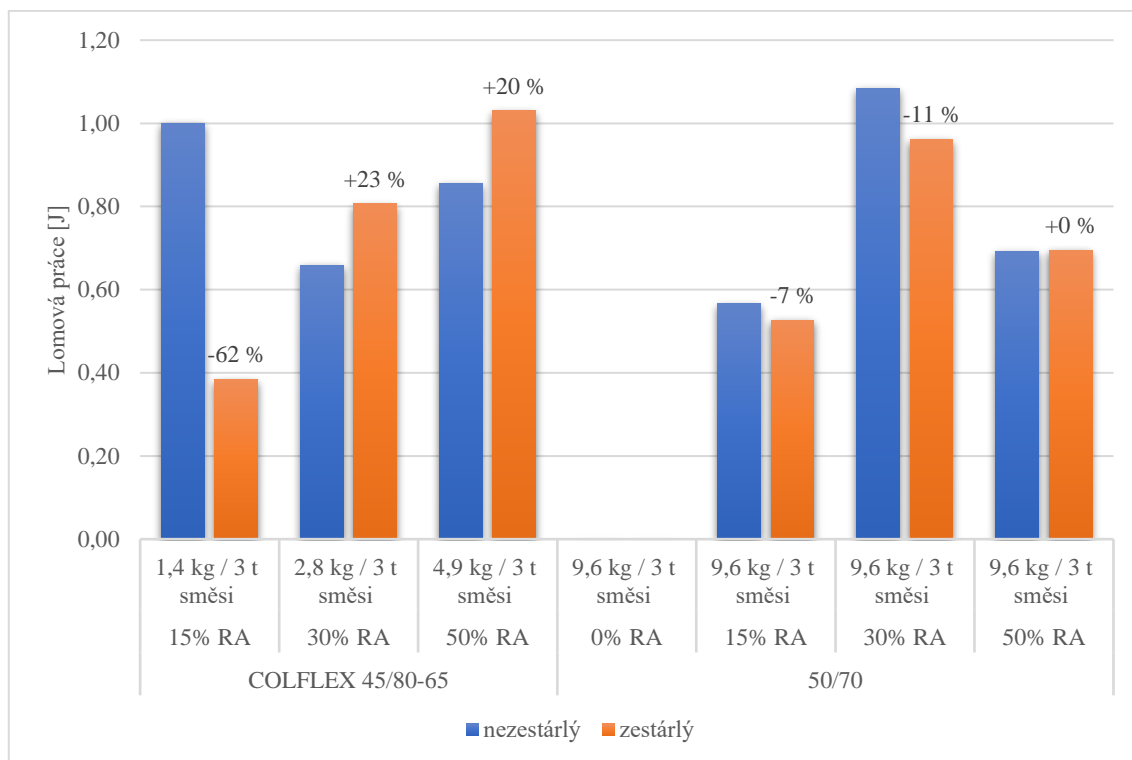
Tabulka 17: Pevnost v tahu za ohybu na trámčích – stárnutí

V rámci této zkoušky bylo využito stárnutí, které by mělo ovlivňovat především pojivo. Čím více je pojivo náchylné, tím více je znát rozdíl v naměřených hodnotách. S tělesy, která byla vystavena oxidativnímu stárnutí, muselo být zacházeno opatrně, protože byly náchylnější k porušení při manipulaci. Čím více se index stárnutí blíží hodnotě 1, tím méně náchylná směs na stárnutí byla. Předpoklad byl, že čím více R-materiálu směs obsahovala, tím méně náchylná směs na stárnutí byla, jelikož pojivo z recyklátu již jednou procesem stárnutí prošlo. Menší náchylnost znamená větší stabilitu v čase, naopak při větší náchylnosti pojivo ve směsi rychleji degraduje a směs může popraskat. Stárnutí má velký vliv na měkkost pojiva, což není tento případ, jelikož směsi obsahují vysoký podíl R-materiálu a standardní pojiva. Pro dosažení menších změn vlivem stárnutí je vhodné směsi více modifikovat.



Graf 15: Pevnost v tahu za ohybu – stárnutí

Vlivem stárnutí se pevnost v tahu za ohybu většinou zvedá, což při zkoušce bylo potvrzeno (kromě směsi 5, kde nedošlo k výraznému propadu – směs pravděpodobně dosáhla limitních hodnot pevnosti nebo byla tělesa při stárnutí poškozena). Pojivo stárnutím zvětšilo svou pevnost a tuhost. Opět platilo dosažení vyšších hodnot u směsí s vysokým obsahem R-materiálu a směsí v tomto ohledu jsou mezi sebou porovnatelné. Pevnosti u směsí s PMB by měly být vyšší než u směsí s pojivem 50/70, nicméně všechny směsi opět dosahují poměrně vysokých hodnot. Stárnutí se u směsí z ohledu pevnosti příliš neprojevovalo, dle předpokladu nejmenších změn dosáhly směsí s nejvyšším obsahem R-materiálu.

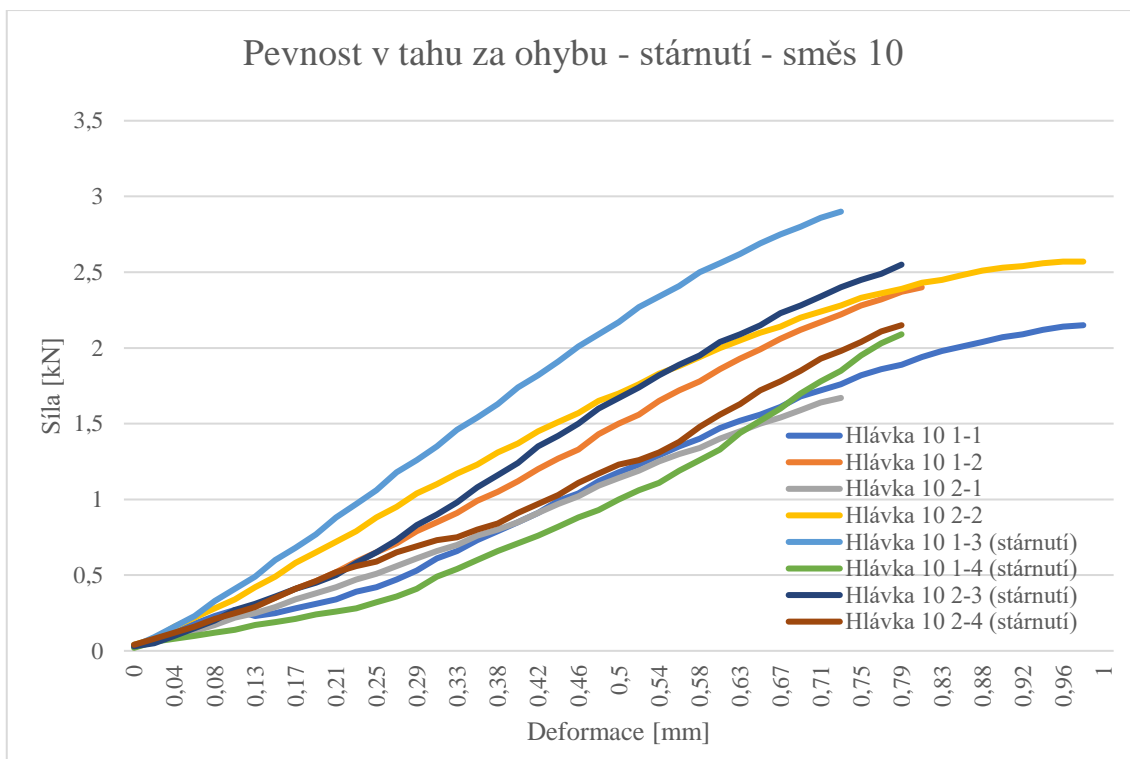


Graf 16: Lomová práce – stárnutí

Lomová práce vlivem stárnutí bývá zpravidla menší, nicméně tento fakt nelze generalizovat. Jelikož směsi jsou obvykle tužší, vykazují tak větší křehkost a menší flexibilitu. Je tedy většinou potřeba větší síly k porušení, nicméně při dosažení menší deformace, a tudíž i nižší lomové práce. Tuhost směsí nabývala opět vysokých hodnot, nicméně vlivem stárnutí se u všech směsí nezvýšila. U směsí 6 a 7 to mohlo souviset s vysokým obsahem R-materiálu, díky kterému pojivo už příliš nezestárla a nezvýšila se tak jeho tuhost, která už i tak byla vysoká. Tuhost korespondovala s lomovou prací potřebnou k porušení těles. Kromě již zmíněných směsí práce byla při stárnutí menší nebo prakticky stejná a kromě směsi 5 nenastaly výraznější rozdíly. Přestože u směsi 5 došlo vlivem stárnutí k mírnému poklesu pevnosti, modul tuhosti výrazně narostl a rozdíl v lomové práci tak vyšel poměrně nízký. Jak již bylo řečeno, tělesa při procesu stárnutí mohla být poškozena, což by se projevilo na výsledcích.



Na grafu níže lze vypořadovat, že trámky po stárnutí dosahovaly průměrně vyšších pevností a zároveň menších deformací. Nicméně obecně se průběhy závislosti působící síly na deformaci příliš nelišily.



Graf 17: Zatěžovací diagram – tříbodový ohyb na trámcích směsi 10 – stárnutí



Obrázek 44: Porušení trámku



4. ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo porovnat mezi sebou asfaltové směsi vyrobené na obalovně lišící se druhem použitého asfaltového pojiva, množstvím obsaženého R-materiálu a dávkováním přísady Improcel® K. Hlavním tématem práce bylo použití vyšších množství R-materiálu ve směsích s polymerem modifikovanými pojivy, které se využívají na těch nejzatíženějších komunikacích (dálnice a silnice I. tříd). Otázka, na kterou diplomová práce hledala odpověď, byla, zda lze při přidání vysokého množství R-materiálu (až 50 %) obsahujícího nemodifikované pojivo do směsi ACO 11 S s běžně využívaným polymerem modifikovaným asfaltovým pojivem (použito pojivo Colflex® 45/80-65) o výsledné směsi stále hovořit jako o směsi s modifikovaným pojivem. Diplomová práce se tak zaměřovala jak na porovnání směsí v rámci druhu použitého pojiva, tak na porovnání jednotlivých variant se stejným podílem R-materiálu. Ve výsledcích byl zohledněn dodatečný efekt modifikace směsí pomocí granulátu Improcel K.

Porovnání asfaltových směsí spočívalo v analýze znovuzískaného asfaltového pojiva a provedení volumetrických, mechanicko-fyzikálních a funkčních zkoušek na vyrobených tělesech. Asfaltové pojivo bylo ze směsí získáno extrakcí a následnou destilací. Kromě běžných empirických zkoušek stanovení penetrace a bodu měknutí byly na pojivu provedeny zkoušky charakterizující odolnost asfaltových pojiv proti trvalým deformacím, které byly využity pro porovnání s běžně prováděnou zkouškou vyjíždění kolem, horní mez oboru plasticity (obdobně jako bod měknutí) v závislosti na komplexním smykovém modulu a viskoelasticitu materiálu na základě fázového úhlu. Po výrobě těles byly provedeny první zkoušky, které určily mezerovitost či stupeň vyplnění mezer asfaltovým pojivem, na základě kterých byl možno posoudit návrh asfaltových směsí. Následovala zkouška odolnosti proti vodě a mrazu, zkouška pojíždění kolem, zkouška zjištění modulů tuhosti, Marshallova zkouška, zkouška odolnosti proti šíření trhlin a zkouška pevnosti v tahu za ohybu.

Při stanovení penetrace a bodu měknutí na znovuzískaném pojivu dosahovaly vyšších hodnot varianty s PMB pojivy, hodnoty se v závislosti na obsahu R-materiálu a přísady od sebe však příliš nelišily. Lepší porovnání pak přinesly funkční zkoušky MSCR a BTSV, u kterých byl rozdíl mezi variantami s PMB a pojivem 50/70 výraznější. Znovuzískaná pojiva ze směsí s PMB vykazovala lepší odolnosti proti trvalým deformacím, a to i za vysokého podílu R-materiálu, nicméně byly mírně citlivější na změny napětí za vysokých teplot.

Mezerovitosti směsí (s výjimkou směsí 5 a 8) splňovaly normové požadavky. U směsí 5 a 8 tato skutečnost mohla mít vliv na obecně horší výsledné hodnoty provedených zkoušek, které vykazovala především směs 5. Požadavek na odolnost proti vodě splnila opět většina směsí a zvyšující se obsah R-materiálu ji u směsí s PMB negativně neovlivnil (u varianty s 50/70 došlo k mírné sestupné tendenci). Vliv mrazu pak pravděpodobně kvůli modifikaci směsí neměl takový vliv, jak by se mohlo očekávat, a hodnoty vycházely velice dobře. Všechny směsi bezpečně splňovaly požadavky na parametry ze zkoušky pojíždění kolem, přičemž největší odolnosti proti tvorbě trvalých deformací vykazovaly směsi s PMB nezávisle na množství R-materiálu a potvrdily tak jejich dostatečnou modifikaci. Výsledky byly podpořeny zkouškou MSCR na znovuzískaném asfaltovém



pojivu, která vyvodila obdobný závěr. Moduly tuhosti vycházely obecně vyšší, a to i za vysokých teplot, což reflektovalo dobré hodnoty odolnosti proti trvalým deformacím. Předpokládaná vzrůstající tendence v závislosti na obsahu R-materiálu se ve většině případů potvrdila. Lepší stability měřené při Marshallově zkoušce dosahovaly směsi s vysokým podílem R-materiálu. V tomto ohledu na tom byly nejlépe směsi s obsahem 30 % recyklátu. S výjimkou již zmiňované směsi 5 lepší výsledky vykazovaly směsi s PMB. Při zkoušce trhlin si směsi s vysokými podíly R-materiálu varianty s PMB vedly velice dobře. Za teploty 0 i 25 °C dosáhly v porovnání s ostatními vysokých odolností vůči lomu, v případě obsahu recyklátu 50 % vyšla lépe varianta s PMB, zatímco při obsahu 30 % vyšly směsi obdobně. Díky dobré modifikaci tak směsi vlivem R-materiálu nebyly natolik křehké a lépe odolávaly. Při zkoušce pevnosti v tahu za ohybu všechny směsi dosahovaly vysokých hodnot, a to jak v závislosti na teplotě, tak na stárnutí. Větší citlivost zkoušených směsí na teplotu ani na stárnutí se u této zkoušky příliš neprojevila.

Vysoké množství R-materiálu přidávaného do směsí s modifikovaným pojivem nemělo na odzkoušené směsi negativní vliv. Přestože směsi dosahovaly díky zvyšujícímu se podílu R-materiálu vysokých tuhostí, nevykazovaly nízké hodnoty lomových houževnatostí (nebyly křehčí), což bylo pravděpodobně ovlivněno použitím PMB a granulátu, díky kterým byly zlepšeny nízkoteplotní vlastnosti směsí. Odolnost směsí proti trvalým deformacím vyžadovaná u směsí s PMB zůstala na velmi vysoké úrovni, což souviselo s již zmíněnou vyšší tuhostí i za vysokých teplot. Odolnosti vůči vodě a mrazu dosahovala také vysokých hodnot. U směsí bylo možno vyzorovat kvalitních nízkoteplotních i vysokoteplotních vlastností. Směsi nevykazovaly vyšší citlivost vůči teplotě ani stárnutí.

Varianty s PMB pojivy vycházely povětšinou lépe v porovnání se směsmi s pojivem 50/70. Je potřeba brát v úvahu modifikaci pomocí přísady Improcel K (na bázi SBS, stejně jako u PMB), která zlepšovala vlastnosti směsí. Granulát byl ve větším množství dávkován do směsí s pojivem 50/70, což pravděpodobně ovlivnilo výsledné hodnoty a následné porovnání. Dávkování přísady dostatečně kompenzovalo vysoké obsahy R-materiálu.

Na základě výsledků bylo dokázáno, že do směsí s PMB pojivy lze přidávat vyšší množství R-materiálu a dosahovat přitom velmi kvalitních hodnot. Zlepšit úroveň modifikace směsí lze případně pomocí celé řady přísad, které pozitivně ovlivní potřebné vlastnosti a nekomplikují výrobu ani pokládku směsí. Přidávání vyšších množství recyklátu je však nezbytným krokem v silničním stavitelství. S rostoucím stupněm automobilizace a s tím souvisejícím zvyšováním zatížení komunikací bude potřeba vyrábět více kvalitních směsí, ve kterých recyklovaný materiál bude muset najít své zastoupení. Čím dříve a čím více, tím lépe.



5. SEZNAM LITERATURY

- [1] VARAUS, Michal. *Asfaltové směsi s vysokým obsahem R-materiálu*. In: .
- [2] Inflation data. *Inflationdata.com* [online]. [cit. 2019-05-17].
- [3] Recyklace komunikací. *Silnice.com* [online]. [cit. 2019-03-15].
Dostupné z: <http://www.silnice.com/cinnost/velke-stavby/recyklace-komunikaci/2>
- [4] VARAUS, Michal. Recyklace netuhých vozovek. In: : *prezentace* [online].
Brno, 2012 [cit. 2019-03-20].
- [5] VALENTIN, Jan. *Recyklace asfaltových vozovek* [online]. , 22 [cit. 2019-03-16].
- [6] *Trvale zajistit budoucnost* [online]. [cit. 2021-01-05].
Dostupné z: <https://bergerholding.eu/cs/%C4%8Desko/skupina-berger/spole%C4%8Dnost/energie-ochrana-%C5%BEivotn%C3%ADho-prost%C5%99ed%C3%AD>
- [7] ČSN 73 6121 *Stavba vozovek - Hutněné asfaltové vrstvy - Provádění a kontrola shody*. 2019.
- [8] ČSN EN 12597 *Asfalty a asfaltová pojiva - Terminologie*.
- [9] MICHAL, Varaus. *Pozemní komunikace II: Modul 3 - Asfaltová pojiva* [online]. [cit. 2020-09-24].
- [10] MONDSCHNEIN, Petr. *Prezentace SS02* [online]. In: . ČVUT [cit. 2019-03-21].
- [11] PATOWARY, Kaushik. *Pitch Lake, Trinidad - The Largest Natural Deposit of Asphalt* [online]. [cit. 2021-01-13]. Dostupné z: <https://www.amusingplanet.com/2012/10/pitch-lake-trinidad-largest-natural.html>
- [12] SVOBODA, Lukáš. *Stavební hmoty*. 2013. Praha.
- [13] *Asphalt in figures 2018* [online]. , 13 [cit. 2020-09-30]. Dostupné z: <https://eapa.org/asphalt-in-figures/>
- [14] VARAUS, Michal. *Nízkoteplotní chování asfaltových směsí* [online]. [cit. 2020-09-30]. Dostupné z: <http://old.silnice-zeleznice.cz/clanek/nizkoteplotni-chovani-asfaltovych-smesi/>
- [15] ŠEVČÍK, Pavel. *Revize ČSN 73 6121 - změny v použití asfaltových pojiv a zvýšení limitů pro používání R-materiálu* [online]. In: . [cit. 2020-09-30]. Dostupné z: <https://www.konference-projektovani.cz/prezentace/data/14.pdf>
- [16] ČSN EN 12591 *Asfalty a asfaltová pojiva - Specifikace pro silniční asfalty*.
- [17] ČSN EN 13924-1 *Asfalty a asfaltová pojiva - Systém specifikace pro speciální silniční asfalty - Část 1: Tvrdé silniční asfalty*.
- [18] *Multigrádové asfalty* [online]. [cit. 2020-10-14]. Dostupné z: <https://www.orlen-asfalt.pl/CZ/NaseNabidka/V%C3%ADcedruhoveAsfalty/Stranky/default.aspx>
- [19] ČSN EN 13924-2 *Asfalty a asfaltová pojiva - Systém specifikace pro speciální asfalty - Část 2: Multigrádové silniční asfalty*.
- [20] Asfaltové silniční výrobky. <Http://www.petroleum.cz/index.aspx> [online].



- [cit. 2020-10-15]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/vyrobyky/asfalty-silnicni.aspx>
- [21] ČSN EN 14023 *Asfalty a asfaltová pojiva - Systém specifikace pro polymerem modifikované asfalty.*
- [22] DE BONDT, A.H. *A brief introduction to polymer modified bitumen (PMB).*
- [23] HUNTER, Robert N., Self ANDY a John READ. *The Shell Bitumen Handbook.* Sixth edition. One Great George Street, Westminster, London SW1P 3AA: ICE Publishing, 2015. ISBN 978-0-7277-5837-8.
- [24] PLITZ, Jiří a Svoboda FRANTIŠEK. *Modifikace silničních asfaltů RET polymerem* [online]. 2008 [cit. 2020-10-26].
- [25] BŁAŻEJOWSK, Krzysztof. *Vysoce modifikované asfalty ORBITON HiMA* [online]. ORLEN Asphalt Sp. z o.o. [cit. 2020-10-25]. Dostupné z: <https://www.orlen-asfalt.cz/CS/Documents/Vysoce%20modifikovan%C3%A9%20asfalty%20ORBITON%20HiMA.pdf>
- [26] *Vysoce modifikované asfalty u „věčných“ vozovek* [online]. [cit. 2020-10-25]. Dostupné z: <http://old.silnice-zeleznice.cz/clanek/vysoce-modifikovane-asfalty-u-vecnych-vozovek/>
- [27] VALENTIN, Jan. *Moderní a chytré vozovky* [online]. In: . [cit. 2020-10-25]. Dostupné z: https://www.asfaltove-vozovky.cz/av2019/data/prezentace/t4-1_valentin.pdf
- [28] *TP 148: Hutněné asfaltové vrstvy s pojivem modifikovaným pryžovým granulátem z pneumatik.* In: . Brno: Ministerstvo dopravy ČR, 2009.
- [29] *Pryžový granulát* [online]. [cit. 2020-10-29]. Dostupné z: <https://www.asscorecycling.cz/pryzovy-granulat-epdm>
- [30] NĚMEC, Miroslav a Jiří SYNEK. *Zkušenosti s použitím technologie modifikace asfaltu pryžovým granulátem (CRmB) v praxi na silnicích v Pardubickém kraji* [online]. [cit. 2020-10-26]. Dostupné z: <http://old.silnice-zeleznice.cz/clanek/zkusenosti-s-pouzitim-technologie-modifikace-asfaltu-pryzovym-granulatem-crmb-v-praxi-na-silnicich-v-pardubickem-kraji/>
- [31] *Specifika použití R-materiálu v asfaltových směsích modifikovaných pryžovým granulátem* [online]. [cit. 2020-10-26]. Dostupné z: <https://www.silnice-mosty.cz/504-specifika-pouziti-r-materialu-v-asfaltovych-smesich-modifikovanych-pryzovym-granulatem/>
- [32] ČSN EN 15322 *Asfalty a asfaltová pojiva - Systém specifikace ředěných a fluxovaných asfaltových pojiv.*
- [33] STRÁŠÁKOVÁ, Monika. *Stárnutí asfaltových pojiv.* Brno, 2016. Diplomová práce. VUT v Brně.
- [34] ŠTĚPANOVSÝ, Vlastimil. *Problematika stárnutí asfaltových pojiv a směsí.* Brno, 2015. Diplomová práce. VUT v Brně.
- [35] ČSN EN 13108-8 ed. 2 *Asfaltové směsi - Specifikace pro materiály - Část 8: R-materiál.*
- [36] *TP 210: Užití recyklovaných stavebních demoličních materiálů do PK.* In: . Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2011.



- [37] HLÁVKA, Filip. *Analýza složení asfaltového R-materiálu a jeho využití v asfaltové směsi*. Praha, 2019. Bakalářská práce. ČVUT v Praze.
- [38] *Při recyklaci asfaltových směsí musí být v souladu celý řetězec jednotlivých procesů* [online]. [cit. 2020-10-29]. Dostupné z: <https://www.silnice-mosty.cz/1198-pri-recyklaci-asfaltovych-smesi-musi-byt-v-souladu-cely-retezec-jednotlivych-procesu/>
- [39] ŽIŽKA, Tomáš. *Frézování vozovek pozemních komunikací*. Brno, 2018. Bakalářská práce. VUT v Brně.
- [40] *WIRTGEN GROUP* [online]. [cit. 2020-10-29]. Dostupné z: <https://www.wirtgen-group.com/en-et/products/wirtgen/technologies/cold-milling/>
- [41] BLÁHA, Jan. *Mechanizace v silničním stavitelství*. Praha, 2017. Bakalářská práce. ČVUT v Praze.
- [42] *Key impact of cold milling machines on road rehabilitation quality* [online]. In: . [cit. 2020-10-29]. Dostupné z: <https://www.constructionmachines.info/road-construction-machines/key-impact-of-cold-milling-machines-on-road-rehabilitation-quality.html>
- [43] *Wirtgen: Cold milling machines have a decisive impact on quality of road rehabilitation* [online]. [cit. 2020-10-29]. Dostupné z: <https://www.nbmw.com/tech-articles/roads-and-pavements/39681-wirtgen-cold-milling-machines-have-a-decisive-impact-on-quality-of-road-rehabilitation.html>
- [44] HÝZL, Petr. *ČSN 73 6141 Požadavky na použití R-materiálu do asfaltových směsí* [online]. In: . [cit. 2020-10-29].
- [45] *Asphalt Recycling is all about the Perfect Process Chain* [online]. [cit. 2020-10-29]. Dostupné z: <https://highways.today/2019/10/08/asphalt-recycling-process-chain/>
- [46] *Vyhláška č. 130/2019 Sb.: Vyhláška o kritériích, při jejichž splnění je asfaltová směs vedlejším produktem nebo přestává být odpadem*. In: . Ministerstvo životního prostředí, Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2019.
- [47] *ASFALT JIŽ NEMUSÍ BÝT ODPADEM* [online]. [cit. 2020-11-07]. Dostupné z: https://www.alsglobal.cz/aktuality/Asfalt-jiz-nemusi-byt-odpadem_1193
- [48] KOTRBA, David. *VYHLÁŠKA 130/2019 O KRITÉRIÍCH, PŘI JEJICHŽ SPLNĚNÍ JE ASFALTOVÁ SMĚS VEDLEJŠÍM PRODUKTEM NEBO PŘESTÁVÁ BÝT ODPADEM* [online]. In: . [cit. 2020-11-07]. Dostupné z: http://www.ekomonitor.cz/sites/default/files/filepath/prezentace/11_kotrba.pdf
- [49] VARAUS, Michal. *Recyklace vozovek za horka* [online]. In: . 2020 [cit. 2020-11-08]. Dostupné z: <http://www.silnicniseminar.cz/index.html>
- [50] *Nová obalovna Herink – první svého druhu v ČR* [online]. [cit. 2020-12-30]. Dostupné z: <https://silnice-zeleznice.cz/stavebni-materialy/nova-obalovna-herink-prvni-sveho-druhu-v-cr-359>
- [51] *Astec Inc.* [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://www.astecinc.com/products/drying-mixing/double-barrel-drum-dryer-mixer.html>
- [52] *Rejuvenátory* [online]. [cit. 2019-03-22]. Dostupné z: <http://web.rejuvenator.eu/index.html>



- [53] *Metodika pro návrh dávkování oživovacích přísad: Použití oživovacích přísad pro prodloužení životnosti recyklovaných vozovek s vysokým obsahem R-materiálu* [online]. In: . Brno: Vysoké učení technické v Brně, Froněk spol. s r.o., SQZ s.r.o., 2019 [cit. 2020-11-17]. Dostupné z: <https://www.mdcz.cz/getattachment/Dokumenty/Veda-a-vyzkum/Certifikovane-metodiky/Metodika-pro-navrh-davkovani-ozivovacich-prisad/Metodika-pro-navrh-davkovani-ozivovacich-prisad.pdf.aspx>
- [54] VARAUS, Michal a Tomáš KOUDELKA. *SLEDOVÁNÍ VLASTNOSTÍ ASFALTOVÉHO POJIVA VE SMĚSÍCH S RMATERIÁLEM - POKUSNÝ ÚSEK SILNICE II/204 KAZNĚJOV – MRTNÍK* [online]. In: . [cit. 2020-11-10]. Dostupné z: http://www.cesti.cz/technicke_listy/tl2018/2018_WP1_TL1_05a.pdf
- [55] *Granulát Improcel K* [online]. [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: <https://www.ciur.cz/produkty/obsah/granulat-improcel-k>
- [56] CIUR A.S. *TECHNICKÉ INFORMACE VÝROBKU* [online]. In: . [cit. 2021-01-06].
- [57] POLAKOVIČ, Lubomír a Magdaléna KONDRCOVÁ. *ASFALTOVÁ ZMES TYPU PMAZ (POLYMÉROM MODIFIKOVANÁ ASFALTOVÁ ZMES) ALTERNATIVA K ASFALTOVEJ ZMESI S POUŽITÍM MODIFIKOVANÉHO SPOJIVA TYPU PMB*. VUIS – CESTY, spol. s r. o., 2020.
- [58] *ČSN EN 12697-1 Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 1: Obsah rozpustného pojiva*. 2020.
- [59] *ČSN EN 12697-3+A1 Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 3: Znovuzískání extrahovaného pojiva - Rotační vakuové destilační zařízení*. 2020.
- [60] *ČSN EN 1426 Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení penetrace jehlou*. 2015.
- [61] *ČSN EN 1427 Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení bodu měknutí - Metoda kroužek a kulička*. 2015.
- [62] *ČSN EN 16659 Asfalty a asfaltová pojiva - Zkouška MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery Test)*. 2016.
- [63] BENEŠOVÁ, Lucie. *Analýza vybraných reologických charakteristik asfaltových pojiv*. Praha, 2019. Disertační práce. ČVUT v Praze.
- [64] BENEŠOVÁ, Lucie a Jan VALENTIN. *Vliv vybraných vstupních parametrů na naměřené hodnoty zkoušky MSCR* [online]. [cit. 2021-01-06]. Dostupné z: <https://www.silnice-mosty.cz/464-vliv-vybranych-vstupnich-parametru-na-namerene-hodnoty-zkousky-mscr/>
- [65] *AL DSR-Prüfung (BTSV): Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Verformungsverhaltens von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln im Dynamischen Scherrheometer (DSR) Teil 4: Durchführung des Bitumen-Typisierung-Schnell-Verfahrens*. 2017.
- [66] ZÁBRANSKÝ, Ivo. *VLASTNOSTI NÍZKOTEPLNÍCH POLYMEREM MODIFIKOVANÝCH ASFALTŮ*. Brno, 2019. Diplomová práce. VUT v Brně.
- [67] *ČSN EN 12697-30 Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem*. 2020.
- [68] *ČSN EN 12697-33 Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 33: Příprava zkušebních těles zhutňovačem desek*. 2020.



- [69] ČSN EN 12697-29 *Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 29: Stanovení rozměrů asfaltových zkušebních těles*. 2020.
- [70] ČSN EN 12697-5 *Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti*.
- [71] ČSN EN 12697-6 *Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa*. 2020.
- [72] ČSN EN 12697-8 *Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 8: Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí*. 2020.
- [73] ČSN EN 12697-12 *Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 12: Stanovení odolnosti zkušebního tělesa vůči vodě*. 2020.
- [74] *AASHTO T-283-03, Standard Method of Test for: Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage*. Washington: American Association of State and Highway Transportation Officials, 2007.
- [75] ČSN EN 12697-23 *Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 23: Stanovení pevnosti v příčném tahu*. 2018.
- [76] ČSN EN 12697-22 *Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 22: Zkouška poježdění kolem*. 2020.
- [77] ČSN EN 12697-26 *Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 26: Tuhost*. 2019.
- [78] ČSN EN 12697-34 *Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 34: Marshallova zkouška*. 2020.
- [79] ČSN EN 12697-44 *Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 44: Šíření trhliny zkouškou ohybem na půlválcovém zkušebním tělese*. 2019.
- [80] VACKOVÁ, Pavla. *Použité metody a jejich modifikace - odolnost proti šíření mrazové trhliny a pevnost tahu za ohybu*. ČVUT v Praze.
- [81] *TP 151: Asfaltové směsi s vysokým modulem tuhosti (VMT)*. In: . Ministerstvo dopravy, Odbor silniční infrastruktury, 2010.
- [82] *PrEN 12697-52 Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 52: Oxidativní stárnutí*.



6. SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1: Doporučené druhy asfaltových pojiv podle třídy dopravního zatížení a typu asfaltového betonu včetně přípustných tlouštěk vrstev [7].....</i>	<i>- 11 -</i>
<i>Tabulka 2: Klasifikace znovuzískané asfaltové směsi [46].....</i>	<i>- 26 -</i>
<i>Tabulka 3: Nejvyšší přípustný obsah R-materiálu v % hmotnosti asfaltové směsi [7].....</i>	<i>- 32 -</i>
<i>Tabulka 4: Přehled směsí.....</i>	<i>- 33 -</i>
<i>Tabulka 5: Receptura vyrobených směsí podle obsahu R-materiálu.....</i>	<i>- 35 -</i>
<i>Tabulka 6: Obsah pojiva, penetrace a bod měknutí.....</i>	<i>- 40 -</i>
<i>Tabulka 7: Výsledky zkoušky MSCR posuzovaných zpětně získaných asfaltových pojiv.....</i>	<i>- 43 -</i>
<i>Tabulka 8: Výsledky zkoušky BTSV se stanovením teploty a δ při $G^* = 15 \text{ kPa}$ a 50 kPa.....</i>	<i>- 45 -</i>
<i>Tabulka 9: Požadavky na asfaltové betony do obrusných asfaltových vrstev [7].....</i>	<i>- 47 -</i>
<i>Tabulka 10: Mezerovitost a stupeň vyplnění mezer pojivem.....</i>	<i>- 53 -</i>
<i>Tabulka 11: Zkouška poježdění kolem.....</i>	<i>- 60 -</i>
<i>Tabulka 12: Porovnání parametrů charakterizujících odolnost proti trvalým deformacím – hodnoty ze zkoušky na znovuzískaném pojivu (MSCR) a zkoušky na asfaltové směsi (poježdění kolem).....</i>	<i>- 61 -</i>
<i>Tabulka 13: Marshallova zkouška.....</i>	<i>- 67 -</i>
<i>Tabulka 14: Přetvoření, napětí a lomová houževnatost.....</i>	<i>- 71 -</i>
<i>Tabulka 15: Práce, energie a úhel zatěžování.....</i>	<i>- 73 -</i>
<i>Tabulka 16: Pevnost v tahu za ohybu na trámčích – teplota.....</i>	<i>- 76 -</i>
<i>Tabulka 17: Pevnost v tahu za ohybu na trámčích – stárnutí.....</i>	<i>- 79 -</i>

7. SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1: Vývoj cen ropy uvažující inflaci od roku 1946 do současnosti [2].....</i>	<i>- 8 -</i>
<i>Obrázek 2: Recyklace asfaltových vrstev [6].....</i>	<i>- 10 -</i>
<i>Obrázek 3: Koloidní struktura asfaltů [10].....</i>	<i>- 12 -</i>
<i>Obrázek 4: Pitch Lake – jezero Trinidad [11].....</i>	<i>- 13 -</i>
<i>Obrázek 5: Výroba asfaltů v rafinérii [10].....</i>	<i>- 14 -</i>
<i>Obrázek 6: Asfalt jako viskoelastický materiál [9].....</i>	<i>- 15 -</i>
<i>Obrázek 7: EVA a SBS [22].....</i>	<i>- 18 -</i>
<i>Obrázek 8: Poměr objemové fáze SBS polymeru a asfaltu [25].....</i>	<i>- 19 -</i>
<i>Obrázek 9: Pryžový granulát [29].....</i>	<i>- 20 -</i>
<i>Obrázek 10: Silniční fréza [40].....</i>	<i>- 24 -</i>
<i>Obrázek 11: Selektivní frézování [45].....</i>	<i>- 25 -</i>
<i>Obrázek 12: Schéma ustanovení vyhlášky [48].....</i>	<i>- 26 -</i>
<i>Obrázek 13: Dávkování R-materiálu přímo do míchačky šaržové obalovny [49].....</i>	<i>- 27 -</i>
<i>Obrázek 14: Předehřívání R-materiálu v paralelním bubnu [49].....</i>	<i>- 28 -</i>
<i>Obrázek 15: Princip dvouplášťového bubnu [51].....</i>	<i>- 29 -</i>
<i>Obrázek 16: Kontinuální obalovna [49].....</i>	<i>- 29 -</i>
<i>Obrázek 17: Přidávání R-materiálu souběžně s proudem horkého vzduchu [49].....</i>	<i>- 30 -</i>
<i>Obrázek 18: Přidávání R-materiálu proti proudu horkého vzduchu [49].....</i>	<i>- 30 -</i>
<i>Obrázek 19: Separátní vysoušení R-materiálu, míchání v míchačce [49].....</i>	<i>- 30 -</i>
<i>Obrázek 20: Asfaltová směs doručená v označených pytlích.....</i>	<i>- 34 -</i>
<i>Obrázek 21: Granulát Improcel K [55].....</i>	<i>- 35 -</i>
<i>Obrázek 22: Extraktor.....</i>	<i>- 37 -</i>
<i>Obrázek 23: Rotační vakuové destilační zařízení.....</i>	<i>- 38 -</i>
<i>Obrázek 24: Penetrometr.....</i>	<i>- 39 -</i>
<i>Obrázek 25: Stanovení bodu měknutí.....</i>	<i>- 39 -</i>
<i>Obrázek 26: Zkouška MSCR.....</i>	<i>- 41 -</i>
<i>Obrázek 27: Válcové těleso ve formě po zhutnění.....</i>	<i>- 48 -</i>
<i>Obrázek 28: Výroba desek pomocí ocelového válce.....</i>	<i>- 49 -</i>
<i>Obrázek 29: Maximální objemová hmotnost.....</i>	<i>- 50 -</i>
<i>Obrázek 30: Tělesa zhutněná 2 x 25 údery (vlevo) a 2 x 75 údery (vpravo).....</i>	<i>- 52 -</i>



Obrázek 31: Rozdíl v mezerovitostech směsi	- 54 -
Obrázek 32: Sycení těles ve vakuové komoře	- 55 -
Obrázek 33: Osazení zkušebního tělesa pro zjištění pevnosti v příčném tahu	- 56 -
Obrázek 34: Zkušební těleso po zkoušce pevnosti v příčném tahu	- 57 -
Obrázek 35: Pojíždění kolem	- 59 -
Obrázek 36: Vyjetá kolej v desce	- 61 -
Obrázek 37: Měření modulu tuhosti	- 63 -
Obrázek 38: Marshallova zkouška	- 67 -
Obrázek 39: Zkušební těleso po Marshallově zkoušce	- 68 -
Obrázek 40: Odolnost v tahu za ohybu	- 69 -
Obrázek 41: Trhlina na půlválcovém tělese	- 74 -
Obrázek 42: Tělesa tvaru hranolu po rozřezání desek	- 75 -
Obrázek 43: Třibodový ohyb	- 75 -
Obrázek 44: Porušení trámků	- 82 -

8. SEZNAM VZORCŮ

Vzorec 1: Obsah asfaltového pojiva [58]	- 37 -
Vzorec 2: Elastické zotavení [63]	- 42 -
Vzorec 3: Nevratná smyková poddajnost [63]	- 43 -
Vzorec 4: Diference pro nevratnou smykovou poddajnost [63]	- 43 -
Vzorec 5: Hmotnost desky [68]	- 49 -
Vzorec 6: Maximální objemová hmotnost asfaltové směsi [70]	- 50 -
Vzorec 7: Hustota vody [70]	- 50 -
Vzorec 8: Objemová hmotnost – nasycený suchý povrch (SSD) [71]	- 51 -
Vzorec 9: Objemová hmotnost podle rozměrů (pro těleso tvaru válce) [71]	- 51 -
Vzorec 10: Mezerovitost směsi [72]	- 52 -
Vzorec 11: Stupeň vyplnění mezer pojivem [72]	- 53 -
Vzorec 12: Mezerovitost směsi kameniva [72]	- 53 -
Vzorec 13: Pevnost v příčném tahu [75]	- 56 -
Vzorec 14: Poměr pevností v příčném tahu [75]	- 56 -
Vzorec 15: Přírůstek hloubky vyjeté koleje na vzduchu [76]	- 59 -
Vzorec 16: Průměrná hloubka vyjeté koleje [76]	- 60 -
Vzorec 17: Naměřený modul tuhosti [77]	- 63 -
Vzorec 18: Korekční faktor zohledňující výšku tělesa [78]	- 66 -
Vzorec 19: Přetvoření při maximální síle [79]	- 70 -
Vzorec 20: Maximální napětí při porušení [79]	- 70 -
Vzorec 21: Odolnost vůči lomu – lomová houževnatost [79]	- 71 -
Vzorec 22: Faktor intenzity napětí [79]	- 71 -
Vzorec 23: Lomová energie [80]	- 71 -
Vzorec 24: Pevnost v tahu za ohybu [81]	- 76 -
Vzorec 25: Modul tuhosti v tahu za ohybu [81]	- 76 -



9. SEZNAM GRAFŮ

<i>Graf 1: Typický první cyklus zatížení a odtížení při zkoušce MSCR [63]</i>	- 42 -
<i>Graf 2: Závislost úhlu fázového posunutí na komplexním smykovém modulu znovuzískaných pojiv</i>	- 45 -
<i>Graf 3: Pevnost v příčném tahu (ITS)</i>	- 57 -
<i>Graf 4: Poměr pevností v příčném tahu (ITSR)</i>	- 58 -
<i>Graf 5: Porovnání odolnosti směsi proti trvalým deformacím</i>	- 62 -
<i>Graf 6: Modul tuhosti</i>	- 64 -
<i>Graf 7: Trend měnící se tuhosti v závislosti na teplotě</i>	- 65 -
<i>Graf 8: Grafická definice Marshallovy zkoušky [78]</i>	- 66 -
<i>Graf 9: Zatěžovací diagram těles při zkoušce odolnosti vůči šíření trhlin – směs 6</i>	- 70 -
<i>Graf 10: Lomová houževnatost v závislosti na teplotě</i>	- 72 -
<i>Graf 11: Lomová energie do Fmax</i>	- 73 -
<i>Graf 12: Pevnost v tahu za ohybu – teplota</i>	- 77 -
<i>Graf 13: Lomová práce – teplota</i>	- 78 -
<i>Graf 14: Zatěžovací diagram – tříbodový ohyb na trámčích směsi 11 – teplota</i>	- 78 -
<i>Graf 15: Pevnost v tahu za ohybu – stárnutí</i>	- 80 -
<i>Graf 16: Lomová práce – stárnutí</i>	- 81 -
<i>Graf 17: Zatěžovací diagram – tříbodový ohyb na trámčích směsi 10 – stárnutí</i>	- 82 -

10. SEZNAM PŘÍLOH

<i>Příloha 1: Obsah a parametry pojiva</i>	- 93 -
<i>Příloha 2: Objemová hmotnost a rozměry těles hutněných 2 x 25 údery</i>	- 93 -
<i>Příloha 3: Objemová hmotnost a rozměry těles hutněných 2 x 75 údery</i>	- 95 -
<i>Příloha 4: Maximální objemová hmotnost směsí</i>	- 96 -
<i>Příloha 5: ITS</i>	- 97 -
<i>Příloha 6: ITSR</i>	- 99 -
<i>Příloha 7: Objemová hmotnost, míra zhutnění a výška desek</i>	- 99 -
<i>Příloha 8: Vyjždění kolem</i>	- 100 -
<i>Příloha 9: Vyjždění kolem – směs 5</i>	- 101 -
<i>Příloha 10: Vyjždění kolem – směs 6</i>	- 102 -
<i>Příloha 11: Vyjždění kolem – směs 7</i>	- 103 -
<i>Příloha 12: Vyjždění kolem – směs 8</i>	- 104 -
<i>Příloha 13: Vyjždění kolem – směs 9</i>	- 105 -
<i>Příloha 14: Vyjždění kolem – směs 10</i>	- 106 -
<i>Příloha 15: Vyjždění kolem – směs 11</i>	- 107 -
<i>Příloha 16: Modul tuhosti – směs 5</i>	- 108 -
<i>Příloha 17: Modul tuhosti – směs 6</i>	- 109 -
<i>Příloha 18: Modul tuhosti – směs 7</i>	- 110 -
<i>Příloha 19: Modul tuhosti – směs 8</i>	- 111 -
<i>Příloha 20: Modul tuhosti – směs 9</i>	- 112 -
<i>Příloha 21: Modul tuhosti – směs 10</i>	- 113 -
<i>Příloha 22: Modul tuhosti – směs 11</i>	- 114 -
<i>Příloha 23: Marshallova zkouška</i>	- 115 -
<i>Příloha 24: Odolnost vůči šíření trhlin - 0 °C</i>	- 116 -
<i>Příloha 25: Odolnost vůči šíření trhliny - 25 °C</i>	- 117 -
<i>Příloha 26: Pevnost v tahu za ohybu – tříbodový ohyb – teplota</i>	- 118 -
<i>Příloha 27: Pevnost v tahu za ohybu – tříbodový ohyb – stárnutí</i>	- 119 -



Příloha 1: Obsah a parametry pojiva

Směs	Hmotnost navážky směsi (M ₁)	Hmotnost kameniva po extrakci (M ₂)	Hmotnost zachycených jemných částic po extrakci (M ₃)	Obsah asfaltového pojiva (S)
	[g]	[g]	[g]	[%]
5	-	-	-	5,10 %
6	2084,5	1820,1	156,6	5,17 %
7	2295,7	1995,3	182,1	5,15 %
8	2129,6	1848,5	139,1	6,67 %
9	2109,9	1837,9	130,8	6,69 %
10	1007,9	873,4	81,3	5,28 %
11	2001,7	1751,8	130,0	5,99 %

Směs	Penetrace [0,1 mm]					Rozdíl max a min
5	22,5	21,8	21,9	21,9	22	0,7
6	26,3	26,7	28,3	27,9	27	2,0
7	23,6	23,3	22,2	22,7	23	1,4
8	21,1	20,0	20,1	20,2	20	1,1
9	17,3	18,5	17,7	18,8	18	1,5
10	19,4	20,3	19,3	19,1	20	1,2
11	18,9	17,6	17,6	18,3	18	1,3

Směs	Bod měknutí [°C]					Rozdíl max a min
5	76,2	74,9	75,0	76,5	75,6	1,6
6	70,3	70,4	69,3	69,9	70,0	1,1
7	71,3	71,7	70,4	70,9	71,0	1,3
8	65,6	64,3	64,2	65,8	65,0	1,6
9	65,1	65,1	64,8	65,7	65,2	0,9
10	65,2	65,9	64,8	65,0	65,2	1,1
11	68,9	69,0	69,0	70,2	69,2	1,3

Příloha 2: Objemová hmotnost a rozměry těles hutněných 2 x 25 údery

Směs	Těleso	h [mm]	d [mm]	m ₁ [g]	ρ _{b,dim} [kg/m ³]
5	1	66,2	101,7	1219,5	2268,6
	2	65,7	101,8	1208,8	2259,6
	3	66,0	101,7	1214,4	2263,5
	4	65,5	101,9	1204,7	2254,4
	5	65,1	102,1	1214,8	2278,2
	6	65,8	101,8	1214,1	2266,1
	7	66,4	101,6	1213,9	2257,3
	8	65,8	101,7	1208,4	2259,5
	9	66,1	102,0	1223,2	2262,8



6	1	62,2	101,7	1196,2	2365,1
	2	63,2	101,9	1217,3	2362,0
	3	63,0	101,9	1214,7	2364,3
	4	63,5	102,0	1213,0	2339,2
	5	63,5	102,3	1216,6	2333,0
	6	62,7	101,9	1214,2	2372,0
	7	63,2	101,9	1210,8	2350,0
	8	62,7	101,9	1216,3	2376,5
	9	63,2	102,3	1218,8	2346,1
7	1	62,7	103,2	1209,9	2305,0
	2	62,1	103,6	1204,9	2303,3
	3	63,4	102,4	1208,5	2315,9
	4	63,1	102,4	1206,2	2318,7
	5	63,5	102,4	1207,1	2310,9
	6	63,7	101,8	1203,9	2320,5
	7	63,6	101,9	1205,4	2323,8
	8	63,2	102,5	1206,8	2313,5
	9	63,9	102,0	1208,0	2315,0
8	1	61,3	101,9	1196,1	2391,4
	2	61,2	101,9	1199,5	2403,2
	3	59,8	103,4	1197,1	2384,0
	4	61,3	102,0	1197,7	2392,8
	5	61,0	102,4	1200,9	2389,0
	6	61,0	102,0	1198,9	2403,9
	7	61,8	102,0	1200,5	2378,2
	8	61,6	102,1	1200,5	2383,0
	9	61,4	102,0	1197,8	2387,7
9	1	63,8	101,8	1202,8	2312,7
	2	63,7	101,9	1199,9	2307,9
	3	63,8	102,0	1204,1	2310,3
	4	64,1	101,9	1200,9	2296,9
	5	63,0	102,3	1196,5	2311,9
	6	63,0	102,5	1198,6	2308,1
	7	63,2	102,3	1199,1	2306,4
	8	63,1	102,5	1196,8	2300,8
	9	63,5	101,9	1199,5	2316,7
10	1	60,6	102,5	1204,2	2409,9
	2	61,2	102,4	1209,1	2399,6
	3	61,3	101,9	1205,6	2412,7
	4	59,8	103,1	1204,4	2412,3
	5	61,4	101,8	1200,5	2400,7
	6	61,5	102,0	1208,2	2404,2
	7	61,1	102,0	1202,4	2412,1
	8	60,6	102,3	1201,3	2412,2
	9	61,1	102,1	1204,4	2411,0



11	1	63,1	101,9	1202,6	2337,1
	2	63,8	102,0	1206,3	2316,2
	3	63,7	101,9	1206,5	2322,5
	4	64,7	101,8	1208,1	2292,5
	5	63,0	102,3	1203,5	2326,7
	6	63,5	102,0	1205,2	2321,4
	7	63,2	102,3	1204,4	2318,4
	8	62,8	101,9	1204,0	2350,5
	9	63,2	102,0	1205,6	2334,0

Příloha 3: Objemová hmotnost a rozměry těles hutněných 2 x 75 údery

Směs / Těleso	h [mm]	d [mm]	t [°C]	ρ_w [kg/m ³]	m ₁ [g]	m ₂ [g]	m ₃ [g]	ρ_{bssd} [kg/m ³]	
5	1	62,4	103,3	24,7	997,2	1248,5	748,9	1253,8	2476,0
	2	63,6	102,1	24,7	997,2	1251,8	751,5	1254,9	
	3	63,6	102,4	24,7	997,2	1247,9	746,3	1251,6	
	4	63,4	101,9	24,7	997,2	1246,6	750,1	1249,0	
	5	64,0	102,0	24,7	997,2	1252,6	751,8	1255,2	
	6	63,9	102,0	24,7	997,2	1253,6	752,3	1255,9	
	7	64,0	101,9	24,5	997,2	1251,4	753,1	1255,8	
	8	64,4	102,0	24,5	997,2	1253,7	750,2	1257,0	
	9	64,3	102,0	24,5	997,2	1253,3	750,5	1256,3	
6	1	60,8	102,3	24,5	997,2	1247,8	762,4	1249,4	2533,8
	2	62,5	102,0	24,7	997,2	1256,9	764,2	1258,8	
	3	62,1	102,4	24,7	997,2	1260,8	766,4	1262,7	
	4	63,0	101,8	24,7	997,2	1258,7	765,1	1261,7	
	5	62,9	101,9	24,7	997,2	1258,5	763,8	1260,7	
	6	61,9	102,4	24,7	997,2	1261,0	767,0	1263,4	
	7	60,8	103,2	24,7	997,2	1256,5	764,1	1259,0	
	8	62,3	102,0	24,7	997,2	1258,2	764,9	1260,8	
	9	61,6	102,5	24,7	997,2	1257,8	765,2	1260,3	
7	1	62,7	102,0	24,3	997,3	1257,7	760,3	1259,8	2507,8
	2	62,4	101,9	24,3	997,3	1249,9	754,2	1252,8	
	3	62,3	102,1	24,3	997,3	1250,2	755,7	1252,0	
	4	62,4	102,0	24,3	997,3	1245,8	752,2	1247,8	
	5	62,7	101,9	24,3	997,3	1251,0	753,9	1252,9	
	6	62,8	101,9	24,3	997,3	1252,9	758,1	1255,0	
	7	62,2	103,3	24,3	997,3	1271,4	767,2	1273,4	
	8	62,4	102,4	24,3	997,3	1258,1	758,7	1259,4	
	9	62,7	102,0	24,3	997,3	1259,2	761,7	1261,2	
8	1	60,7	102,0	24,0	997,4	1247,8	761,4	1249,0	2551,0
	2	60,9	102,0	24,0	997,4	1243,5	757,6	1245,0	
	3	59,2	102,0	24,0	997,4	1215,5	743,1	1216,6	
	4	60,7	102,1	24,0	997,4	1247,8	762,9	1248,9	
	5	60,2	102,1	24,0	997,4	1242,2	758,6	1243,1	
	6	60,6	101,9	24,0	997,4	1244,0	759,4	1245,1	



	7	61,2	102,1	24,0	997,4	1246,1	755,5	1247,1	2528,1	
	8	59,9	102,4	24,0	997,4	1243,0	758,2	1244,2	2550,9	
	9	61,0	101,8	24,0	997,4	1245,1	759,3	1246,2	2550,5	
9	1	63,4	102,0	19,3	998,4	1245,7	747,8	1248,2	2485,5	2485,1
	2	63,3	101,9	19,3	998,4	1247,7	747,8	1250,2	2479,5	
	3	62,9	102,1	19,3	998,4	1242,1	744,6	1244,6	2480,3	
	4	61,6	103,3	19,3	998,4	1245,3	746,5	1248,0	2479,2	
	5	63,1	101,9	19,3	998,4	1248,7	751,3	1250,5	2497,4	
	6	62,9	102,0	19,3	998,4	1246,8	749,3	1250,1	2485,7	
	7	63,2	102,0	19,3	998,4	1247,2	748,8	1250,1	2484,0	
	8	63,2	102,0	19,3	998,4	1247,8	749,3	1250,2	2487,2	
	9	63,2	102,0	19,3	998,4	1244,0	747,5	1246,9	2487,0	
10	1	61,3	102,0	19,6	998,4	1256,0	765,4	1258,8	2541,4	2540,5
	2	61,7	101,8	19,6	998,4	1253,6	762,6	1256,3	2535,0	
	3	61,4	101,9	19,6	998,4	1251,1	761,1	1253,0	2539,2	
	4	61,4	102,0	19,6	998,4	1256,0	763,4	1257,9	2535,8	
	5	60,6	102,3	19,6	998,4	1250,4	761,9	1252,4	2545,0	
	6	60,7	102,5	19,6	998,4	1252,9	762,8	1255,1	2540,8	
	7	61,0	102,0	19,6	998,4	1249,0	760,6	1250,2	2546,9	
	8	61,1	102,0	19,6	998,4	1252,1	761,3	1253,6	2539,2	
	9	61,5	101,9	19,6	998,4	1254,7	763,1	1256,0	2541,4	
11	1	63,1	101,8	21,5	998,0	1252,6	755,7	1255,9	2499,1	2507,8
	2	62,7	102,0	21,5	998,0	1251,4	757,0	1254,3	2511,2	
	3	62,2	102,4	21,5	998,0	1252,0	757,0	1255,5	2506,4	
	4	61,4	103,4	21,5	998,0	1252,4	755,9	1255,4	2502,2	
	5	62,8	101,9	21,5	998,0	1252,4	757,7	1254,6	2515,3	
	6	62,3	102,4	21,5	998,0	1255,2	758,8	1258,2	2508,3	
	7	62,3	102,0	21,5	998,0	1251,9	758,4	1254,6	2517,8	
	8	63,2	101,9	21,5	998,0	1253,5	756,3	1256,4	2501,4	
	9	62,5	102,4	21,5	998,0	1255,3	758,4	1257,8	2508,5	

Příloha 4: Maximální objemová hmotnost směsí

Směs	t [°C]	ρ_w [kg/m ³]	m ₁ [g]	V _p [cm ³]	m ₂ [g]	m ₃ [g]	ρ_{mv} [kg/m ³]
5	26,4	996,7	690,4	1321,2	1623,1	2591,9	2670,9
6	26,4	996,7	697,8	1314,1	1617,7	2575,7	2606,0
7	26,4	996,7	707,4	1315,5	1640,0	2593,3	2597,0
8	26,5	996,7	697,8	1314,1	1637,0	2586,1	2595,2
9	26,4	996,7	707,4	1315,5	1638,3	2593,6	2606,8
10	20,8	998,1	691,4	1321,1	1629,8	2588,5	2602,5
11	20,8	998,1	695,4	1315,9	1624,0	2584,8	2628,2



Příloha 5: ITS

Směs 5	Těleso	$\rho_{b,dim}$ [kg/m ³]	H [mm]	D [mm]	P [kN]	Δ [mm]	ITS [MPa]	ϕ ITS [MPa]
ITS _d	1	2268,63	66,2	101,7	23,64	2,45	2,235	2,245
	8	2259,46	65,8	101,7	22,57	2,43	2,146	
	9	2262,83	66,1	102,0	24,94	2,96	2,354	
ITS _w	2	2259,64	65,7	101,8	18,14	3,26	1,726	1,749
	3	2263,48	66,0	101,7	18,10	2,96	1,716	
	6	2266,07	65,8	101,8	19,00	2,83	1,806	
ITS _{w+f}	4	2254,37	65,5	101,9	19,95	3,74	1,903	1,907
	5	2278,24	65,1	102,1	20,57	2,97	1,970	
	7	2257,27	66,4	101,6	19,56	2,51	1,847	

Směs 6	Těleso	$\rho_{b,dim}$ [kg/m ³]	H [mm]	D [mm]	P [kN]	Δ [mm]	ITS [MPa]	ϕ ITS [MPa]
ITS _d	1	2365,12	62,2	101,7	25,27	3,31	2,541	2,816
	2	2362,02	63,2	101,9	29,24	2,55	2,890	
	4	2339,21	63,5	102,0	30,68	2,76	3,016	
ITS _w	3	2364,33	63,0	101,9	22,44	3,15	2,225	2,325
	5	2332,96	63,5	102,3	23,72	3,16	2,326	
	6	2372,01	62,7	101,9	24,35	3,48	2,424	
ITS _{w+f}	7	2349,98	63,2	101,9	26,58	3,15	2,627	2,562
	8	2376,52	62,7	101,9	25,93	2,74	2,582	
	9	2346,11	63,2	102,3	25,17	-	2,478	

Směs 7	Těleso	$\rho_{b,dim}$ [kg/m ³]	H [mm]	D [mm]	P [kN]	Δ [mm]	ITS [MPa]	ϕ ITS [MPa]
ITS _d	1	2305,04	62,7	103,2	26,29	2,41	2,585	2,621
	3	2315,90	63,4	102,4	27,05	2,41	2,653	
	6	2320,49	63,7	101,8	26,75	2,27	2,625	
ITS _w	2	2303,32	62,1	103,6	26,24	3,04	2,598	2,498
	7	2323,77	63,6	101,9	25,25	3,17	2,481	
	9	2315,01	63,9	102,0	24,71	2,59	2,414	
ITS _{w+f}	4	2318,73	63,1	102,4	20,27	3,85	1,996	1,977
	5	2310,90	63,5	102,4	23,51	2,72	2,303	
	8	2313,54	63,2	102,5	19,92	4,59	1,957	

Směs 8	Těleso	$\rho_{b,dim}$ [kg/m ³]	H [mm]	D [mm]	P [kN]	Δ [mm]	ITS [MPa]	ϕ ITS [MPa]
ITS _d	1	2391,44	61,3	101,9	23,13	2,82	2,356	2,302
	6	2403,85	61,0	102,0	22,12	2,67	2,263	
	7	2378,24	61,8	102,0	22,63	2,86	2,286	
ITS _w	4	2392,83	61,3	102,0	21,96	3,60	2,238	2,156
	5	2388,99	61,0	102,4	20,53	3,94	2,091	
	9	2387,73	61,4	102,0	21,05	3,94	2,140	
ITS _{w+f}	2	2403,16	61,2	101,9	21,23	3,33	2,167	2,065
	3	2384,02	59,8	103,4	18,76	3,58	1,932	



	8	2383,01	61,6	102,1	20,69	3,40	2,096	
--	---	---------	------	-------	-------	------	--------------	--

Směs 9	Těleso	$\rho_{b,dim}$ [kg/m ³]	H [mm]	D [mm]	P [kN]	Δ [mm]	ITS [MPa]	ϕ ITS [MPa]
ITS _d	2	2307,86	63,7	101,9	21,43	2,94	2,101	2,069
	5	2311,90	63,0	102,3	20,31	2,57	2,008	
	7	2306,40	63,2	102,3	21,34	2,71	2,100	
ITS _w	3	2310,31	63,8	102,0	20,73	2,69	2,028	1,898
	4	2296,90	64,1	101,9	18,47	4,38	1,800	
	9	2316,74	63,5	101,9	18,98	3,97	1,867	
ITS _{w+f}	1	2312,70	63,8	101,8	20,19	3,82	1,977	1,992
	6	2308,06	63,0	102,5	20,70	3,69	2,042	
	8	2300,85	63,1	102,5	19,86	3,62	1,956	

Směs 10	Těleso	$\rho_{b,dim}$ [kg/m ³]	H [mm]	D [mm]	P [kN]	Δ [mm]	ITS [MPa]	ϕ ITS [MPa]
ITS _d	3	2412,70	61,3	101,9	34,36	3,12	3,502	3,270
	5	2400,72	61,4	101,8	32,05	2,76	3,263	
	9	2411,05	61,1	102,1	29,81	3,10	3,045	
ITS _w	1	2409,92	60,6	102,5	20,61	-	2,113	2,654
	6	2404,22	61,5	102,0	26,32	2,72	2,670	
	8	2412,20	60,6	102,3	25,68	3,14	2,638	
ITS _{w+f}	2	2399,56	61,2	102,4	28,00	3,21	2,845	2,822
	4	2412,33	59,8	103,1	26,45	2,69	2,732	
	7	2412,06	61,1	102,0	28,26	2,60	2,890	

Směs 11	Těleso	$\rho_{b,dim}$ [kg/m ³]	H [mm]	D [mm]	P [kN]	Δ [mm]	ITS [MPa]	ϕ ITS [MPa]
ITS _d	1	2337,09	63,1	101,9	30,73	2,84	3,043	2,976
	2	2316,21	63,8	102,0	29,73	2,73	2,910	
	6	2321,39	63,5	102,0	25,17	2,99	2,473	
ITS _w	3	2322,51	63,7	101,9	21,59	3,32	2,118	2,322
	7	2318,36	63,2	102,3	23,91	2,58	2,354	
	9	2334,02	63,2	102,0	25,24	2,54	2,493	
ITS _{w+f}	4	2292,54	64,7	101,8	22,56	2,88	2,180	2,573
	5	2326,70	63,0	102,3	25,80	2,50	2,551	
	8	2350,49	62,8	101,9	26,09	2,59	2,596	

Kde

- „-“ hodnota deformace nebyla zaznamenána
- šedivě zbarvená tělesa byla z průměru vyřazena, protože vykazovala odchylku od průměru o více než 10 % (norma tento požadavek neuvádí, tento limit byl zvolen)



Příloha 6: ITSR

Směs	σ ITS _d [MPa]	σ ITS _w [MPa]	σ ITS _{w+f} [MPa]	ITSR	ITSR _f
5	2,245	1,749	1,907	77,9 %	84,9 %
6	2,816	2,325	2,562	82,6 %	91,0 %
7	2,621	2,498	1,977	95,3 %	75,4 %
8	2,302	2,156	2,065	93,7 %	89,7 %
9	2,069	1,898	1,992	91,7 %	96,2 %
10	3,270	2,654	2,822	81,2 %	86,3 %
11	2,976	2,322	2,573	78,0 %	86,5 %

Příloha 7: Objemová hmotnost, míra zhutnění a výška desek

Deska	t [°C]	ρ_w [kg/m ³]	m ₁ [g]	m ₂ [g]	m ₃ [g]	ρ_{bssd} [kg/m ³]	Míra zhutnění	v [mm]
5I	24,0	997,4	8234,5	5001,8	8264,7	2517,0	101,66 %	40,0
5II	24,0	997,4	8223,8	4995,3	8254,3	2516,8	101,65 %	39,8
5T	24,5	997,2	10268,5	6220,3	10332,0	2490,5	100,59 %	49,7
6I	23,2	997,6	8407,2	5157,7	8419,7	2571,0	101,47 %	39,4
6II	23,2	997,6	8422,1	5162,1	8438,2	2564,5	101,21 %	39,9
6T	22,9	997,6	10508,0	6436,4	10528,0	2562,1	101,12 %	49,4
7I	24,1	997,3	8330,7	5071,0	8355,8	2529,4	100,86 %	40,1
7II	24,1	997,3	8328,3	5069,5	8349,4	2532,5	100,98 %	40,1
7T	24,5	997,2	10427,4	6337,1	10450,5	2528,0	100,81 %	49,9
8I	21,9	997,9	8476,0	5195,5	8501,9	2558,0	100,28 %	40,3
8II	21,9	997,9	8477,1	5195,4	8493,2	2565,0	100,55 %	40,2
8T	21,5	998,0	10605,0	6487,9	10623,0	2559,4	100,33 %	50,0
9I	20,9	998,1	8264,6	5014,5	8300,5	2510,3	101,01 %	40,3
9II	20,9	998,1	8267,5	5013,0	8301,8	2509,0	100,96 %	40,1
9T	21,3	998,0	10334,9	6268,2	10372,6	2513,0	101,12 %	50,0
10I	21,6	997,9	8441,7	5158,6	8455,2	2555,4	100,59 %	40,0
10II	21,6	997,9	8443,7	5161,1	8464,4	2550,9	100,41 %	40,0
10T	16,6	998,9	10564,6	6454,2	10579,5	2558,1	100,69 %	50,0
11I	22,7	997,7	8344,6	5068,7	8371,8	2520,4	100,50 %	40,5
11II	22,7	997,7	8346,7	5070,0	8371,0	2522,7	100,59 %	40,2
11T	17,3	998,8	10438,0	6344,5	10464,5	2530,4	100,90 %	50,0



Příloha 8: Vyjždění kolem

Směs	Deska	v [mm]	d _{5 000} [mm]	d _{10 000} [mm]	WTS _{AIR} [mm]	PRD _{AIR} [%]
5	5I	40,0	0,41	0,44	0,008	1,4 %
	5II	39,8	0,73	0,78		
6	6I	39,4	1,60	1,67	0,014	4,1 %
	6II	39,9	0,74	0,83	0,018	1,9 %
7	7I	40,1	0,58	0,63	0,014	1,7 %
	7II	40,1	0,78	0,87		
8	8I	40,3	1,39	1,46	0,018	3,5 %
	8II	40,2	1,43	1,54		
9	9I	40,3	0,59	0,66	0,015	1,6 %
	9II	40,1	0,68	0,76		
10	10I	40,0	1,04	1,30	0,051	3,2 %
	10II	40,0	1,49	1,74		
11	11I	40,5	1,03	1,15	0,023	2,4 %
	11II	40,2	0,93	1,04		

Kde šedivě zbarvená deska byla z průměru vyřazena na základě jejího netypického průběhu přetvoření



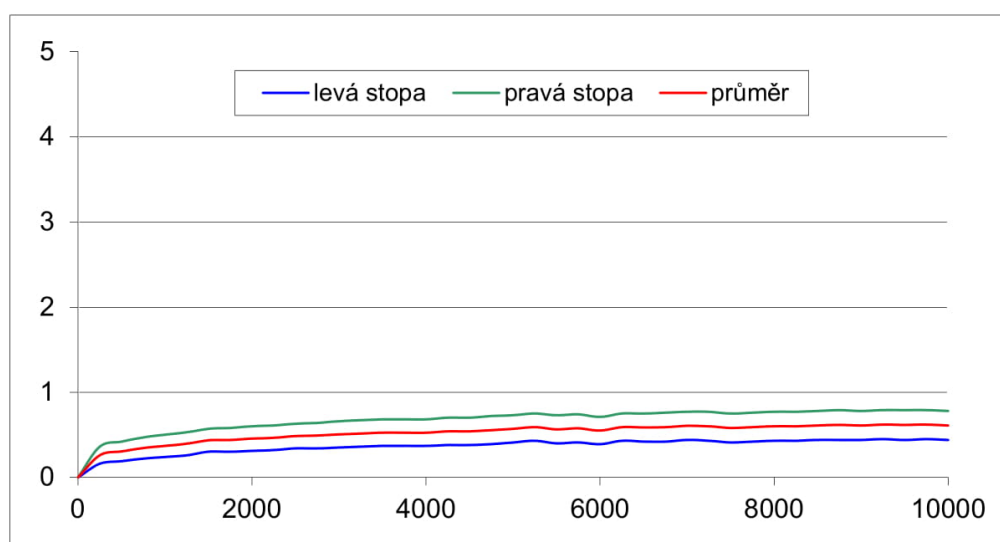
Příloha 9: Vyjždění kolem – směs 5

Zkouška odolnosti asfaltových směsí proti trvalým deformacím

provedeno dle ČSN EN 12697-22

Zkouška opakovaného pojíždění kolem

objednavatel:		druh směsi	směs 5
výrobce		druh pojiva	
číslo objednávky:		MZ vzorku č.1	101,7 %
datum výroby vzorku		MZ vzorku č.2	101,7 %
datum zkoušky		tloušťka desky 1	40,00 mm
teplota přípravy těles	165 °C	tloušťka desky 2	39,80 mm
teplota zkoušky	50 °C	průměrná tloušťka desek	39,90 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	0,41	0,44	0,03
2	0,73	0,78	0,05
průměr	0,57	0,61	0,04
přírůstek hloubky koleje WTS_{AIR}	$\frac{d_{10\,000} - d_{5\,000}}{5}$		0,008 mm
PRD_{AIR}			1,4 %



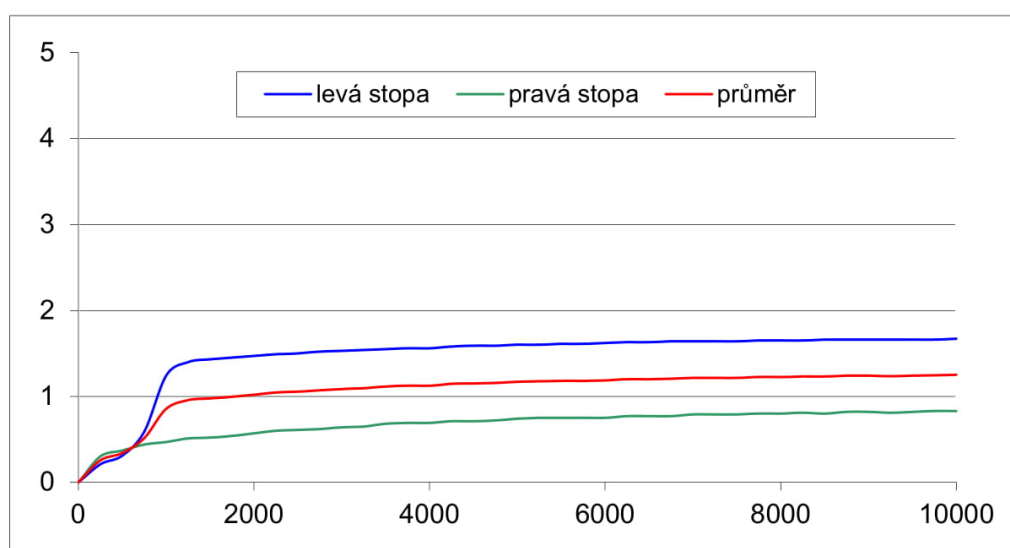
Příloha 10: Vyjždění kolem – směs 6

Zkouška odolnosti asfaltových směsí proti trvalým deformacím

provedeno dle ČSN EN 12697-22

Zkouška opakovaného poježdění kolem

objednavatel:		druh směsi	směs 6
výrobce		druh pojiva	
číslo objednávky:		MZ vzorku č.1	101,5 %
datum výroby vzorku		MZ vzorku č.2	101,2 %
datum zkoušky		tloušťka desky 1	39,40 mm
teplota přípravy těles	165 °C	tloušťka desky 2	39,90 mm
teplota zkoušky	50 °C	průměrná tloušťka desek	39,65 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	1,60	1,67	0,07
2	0,74	0,83	0,09
průměr	1,17	1,25	0,08
přírůstek hloubky koleje WTS_{AIR}	$\frac{d_{10\,000} - d_{5\,000}}{5}$		0,016 mm
PRD_{AIR}			3,0 %



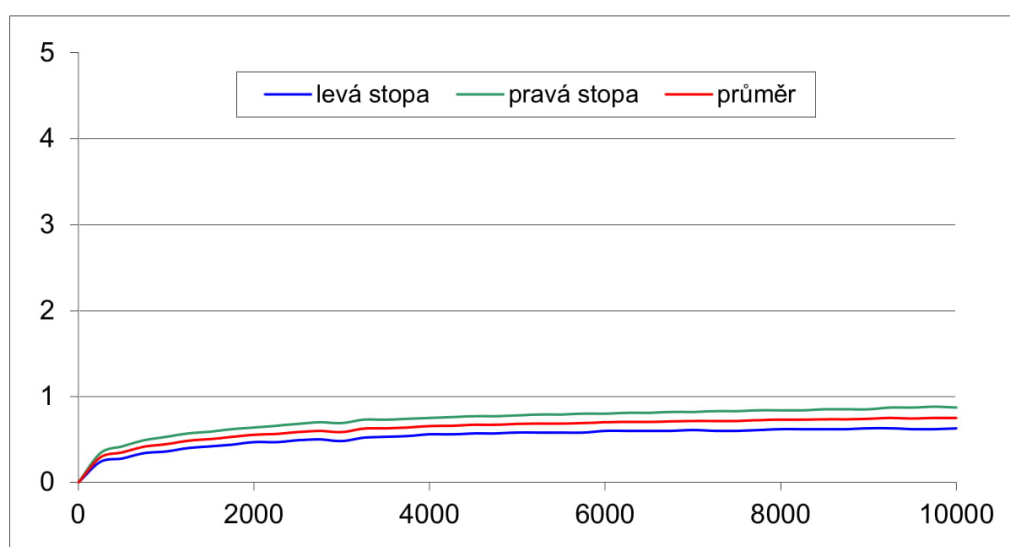
Příloha 11: Vyjždění kolem – směs 7

Zkouška odolnosti asfaltových směsí proti trvalým deformacím

provedeno dle ČSN EN 12697-22

Zkouška opakovaného poježdění kolem

objednavatel:		druh směsi	směs 7
výrobce		druh pojiva	
číslo objednávky:		MZ vzorku č.1	100,9 %
datum výroby vzorku		MZ vzorku č.2	101,0 %
datum zkoušky		tloušťka desky 1	40,10 mm
teplota přípravy těles	165 °C	tloušťka desky 2	40,10 mm
teplota zkoušky	50 °C	průměrná tloušťka desek	40,10 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	0,58	0,63	0,05
2	0,78	0,87	0,09
průměr	0,68	0,75	0,07
přírůstek hloubky koleje WTS_{AIR}	$\frac{d_{10\,000} - d_{5\,000}}{5}$		0,014 mm
PRD_{AIR}			1,7 %



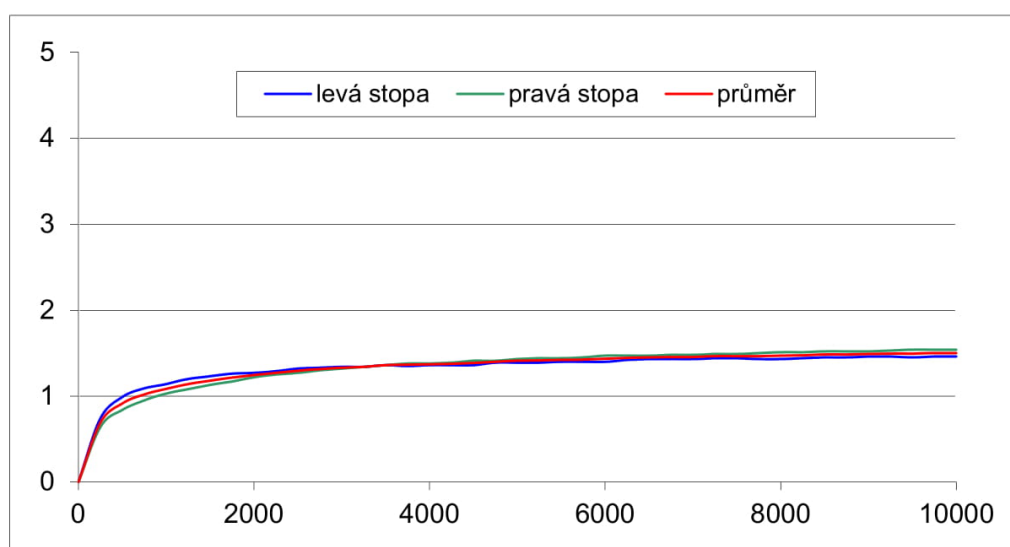
Příloha 12: Vyjždění kolem – směs 8

Zkouška odolnosti asfaltových směsí proti trvalým deformacím

provedeno dle ČSN EN 12697-22

Zkouška opakovaného pojiždění kolem

objednavatel:		druh směsi	směs 8
výrobce		druh pojiva	
číslo objednávky:		MZ vzorku č.1	100,3 %
datum výroby vzorku		MZ vzorku č.2	100,6 %
datum zkoušky		tloušťka desky 1	40,30 mm
teplota přípravy těles	165 °C	tloušťka desky 2	40,20 mm
teplota zkoušky	50 °C	průměrná tloušťka desek	40,25 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	1,39	1,46	0,07
2	1,43	1,54	0,11
průměr	1,41	1,50	0,09
přírůstek hloubky koleje WTS_{AIR}	$\frac{d_{10\,000} - d_{5\,000}}{5}$		0,018 mm
	PRD_{AIR}		3,5 %



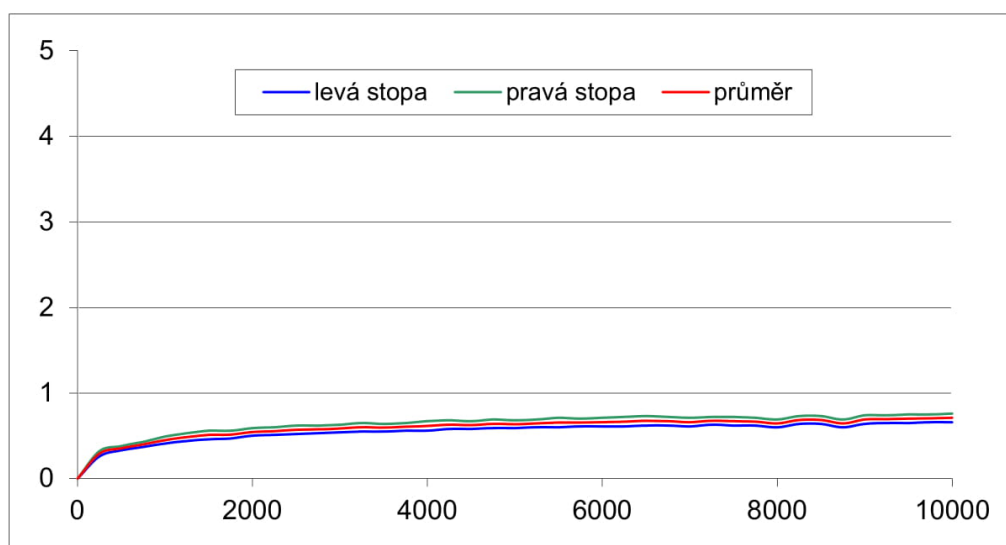
Příloha 13: Vyjždění kolem – směs 9

Zkouška odolnosti asfaltových směsí proti trvalým deformacím

provedeno dle ČSN EN 12697-22

Zkouška opakovaného poježdění kolem

objednavatel:		druh směsi	směs 9
výrobce		druh pojiva	
číslo objednávky:		MZ vzorku č.1	101,0 %
datum výroby vzorku		MZ vzorku č.2	101,0 %
datum zkoušky		tloušťka desky 1	40,30 mm
teplota přípravy těles	165 °C	tloušťka desky 2	40,10 mm
teplota zkoušky	50 °C	průměrná tloušťka desek	40,20 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	0,59	0,66	0,07
2	0,68	0,76	0,08
průměr	0,64	0,71	0,08
přírůstek hloubky koleje WTS_{AIR}	$\frac{d_{10\,000} - d_{5\,000}}{5}$		0,015 mm
	PRD_{AIR}		1,6 %



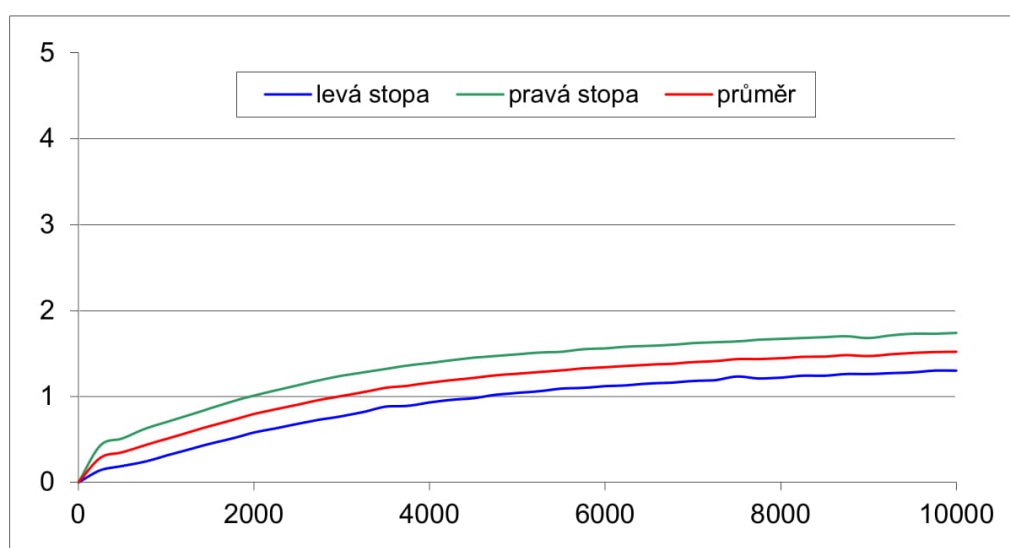
Příloha 14: Vyjždění kolem – směs 10

Zkouška odolnosti asfaltových směsí proti trvalým deformacím

provedeno dle ČSN EN 12697-22

Zkouška opakovaného pojíždění kolem

objednavatel:		druh směsi	směs 10
výrobce:		druh pojiva	
číslo objednávky:		MZ vzorku č.1	100,6 %
datum výroby vzorku		MZ vzorku č.2	100,4 %
datum zkoušky		tloušťka desky 1	40,00 mm
teplota přípravy těles	165 °C	tloušťka desky 2	40,00 mm
teplota zkoušky	50 °C	průměrná tloušťka desek	40,00 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	1,04	1,30	0,26
2	1,49	1,74	0,25
průměr	1,27	1,52	0,26
přírůstek hloubky koleje WTS_{AIR}	$\frac{d_{10\,000} - d_{5\,000}}{5}$		0,051 mm
PRD_{AIR}			3,2 %



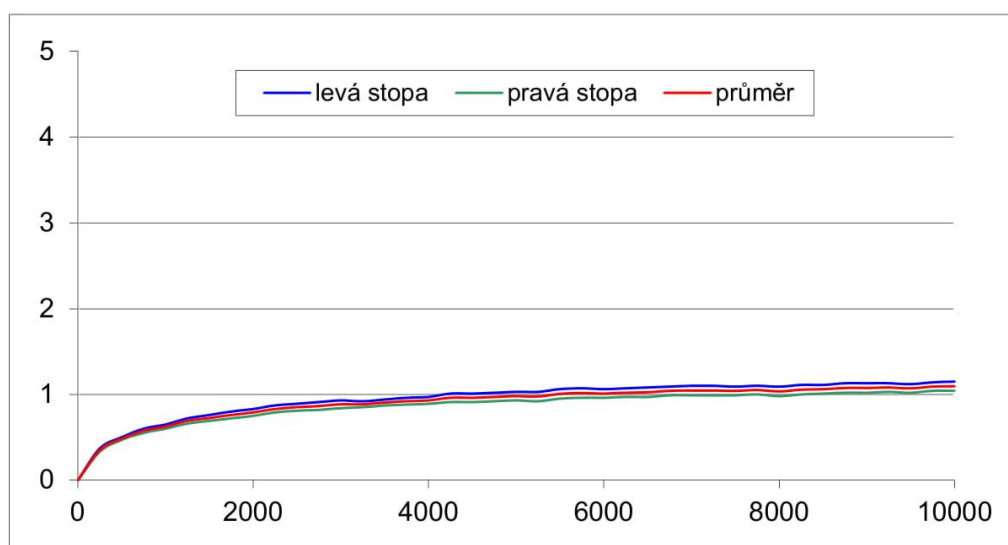
Příloha 15: Vyjždění kolem – směs 11

Zkouška odolnosti asfaltových směsí proti trvalým deformacím

provedeno dle ČSN EN 12697-22

Zkouška opakovaného pojiždění kolem

objednavatel:		druh směsi	směs 11
výrobce		druh pojiva	
číslo objednávky:		MZ vzorku č.1	100,5 %
datum výroby vzorku		MZ vzorku č.2	100,6 %
datum zkoušky		tloušťka desky 1	40,50 mm
teplota přípravy těles	165 °C	tloušťka desky 2	40,20 mm
teplota zkoušky	50 °C	průměrná tloušťka desek	40,35 mm

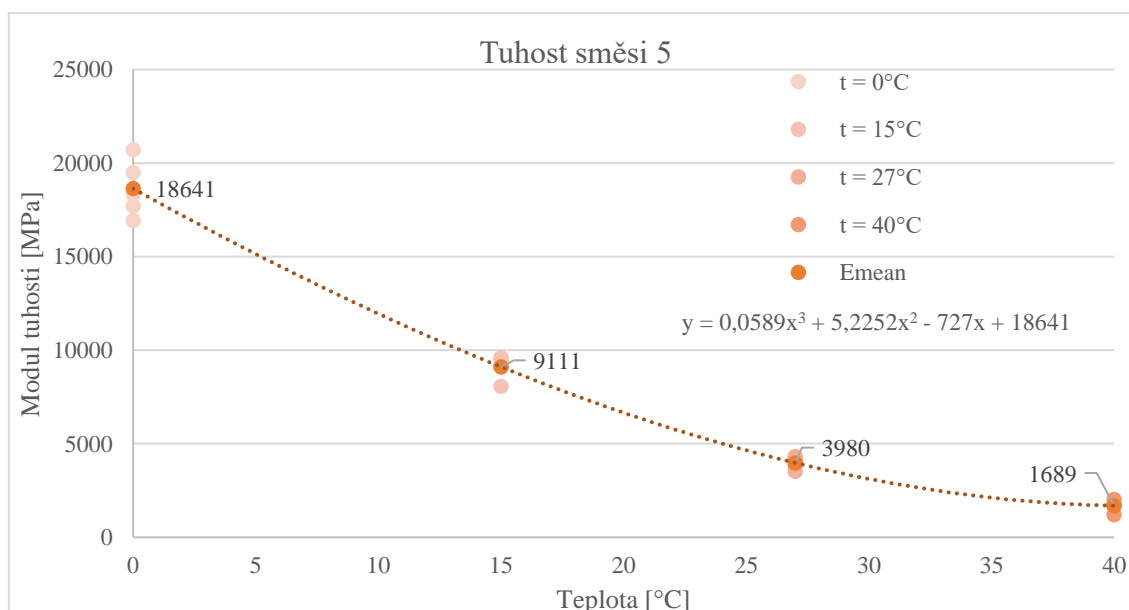


kolo	průměrná hloubka koleje po 5 000 cyklech v mm	průměrná hloubka koleje po 10 000 cyklech v mm	$d_{10\,000} - d_{5\,000}$ (mm)
1	1,03	1,15	0,12
2	0,93	1,04	0,11
průměr	0,98	1,10	0,12
přírůstek hloubky koleje WTS_{AIR}	$\frac{d_{10\,000} - d_{5\,000}}{5}$		0,023 mm
PRD_{AIR}			2,4 %



Příloha 16: Modul tuhosti – směs 5

Směs / Těleso	t [°C]	v [-]	E ₁ [MPa]	E ₂ [MPa]	E [MPa]	0,8*E ₁ <E ₂	E ₂ <1,1*E ₁	E _{mean}
5	0	0,25	20148	21280	20714	ano	ano	18641
			20085	18919	19502	ano	ano	
			16349	17515	16932	ano	ano	
			18364	21954	20159	ano	ne	
			17936	17490	17713	ano	ano	
			17758	18931	18345	ano	ano	
	15	0,31	9019	10118	9569	ano	ne	9111
			9880	8588	9234	ano	ano	
			8341	7817	8079	ano	ano	
			9467	8778	9123	ano	ano	
			9793	9446	9620	ano	ano	
			9549	9446	9498	ano	ano	
	27	0,38	3860	3885	3873	ano	ano	3980
			3717	3346	3532	ano	ano	
			2806	3114	2960	ano	ne	
			3618	4054	3836	ano	ne	
			4578	4065	4322	ano	ano	
			4275	4114	4195	ano	ano	
	40	0,45	2731	1636	2184	ne	ano	1689
			1694	1760	1727	ano	ano	
			1266	1152	1209	ano	ano	
			1760	1332	1546	ne	ano	
			1953	2092	2023	ano	ano	
			1865	1729	1797	ano	ano	

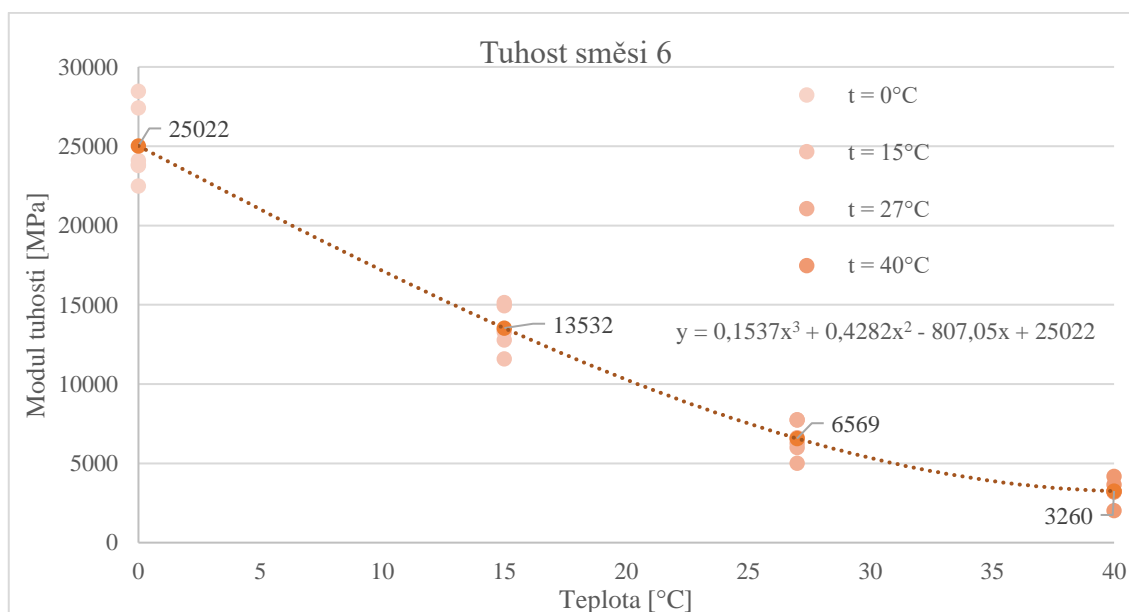


Kde šedivě zbarvená tělesa jsou vyřazena z výsledných průměrů (nesplňují jednu nebo obě podmínky podle normy).



Příloha 17: Modul tuhosti – směs 6

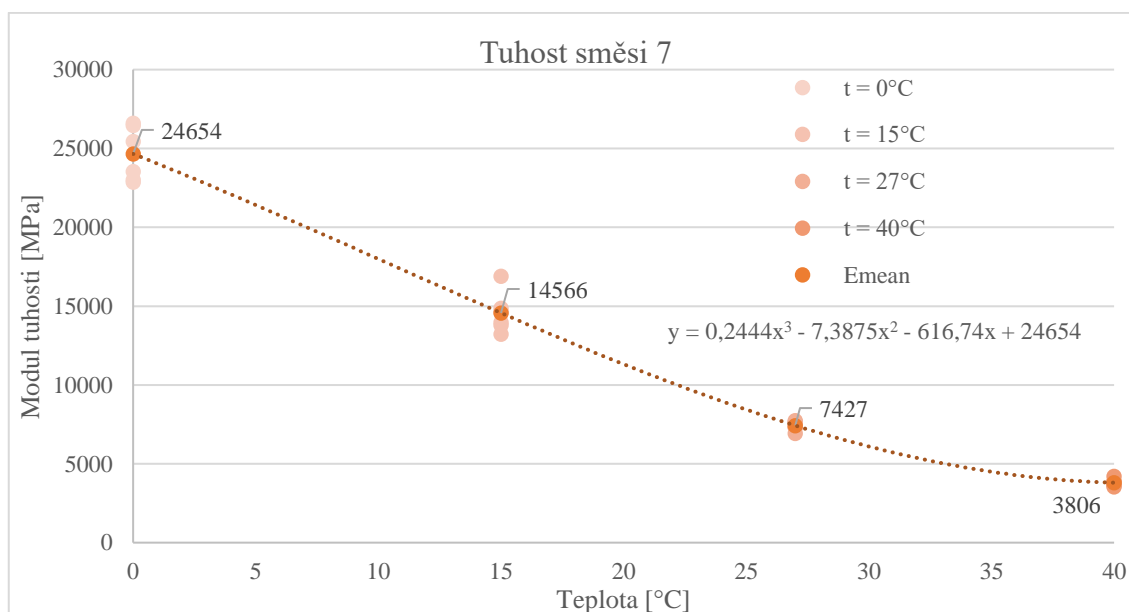
Směs / Těleso	t [°C]	ν [-]	E_1 [MPa]	E_2 [MPa]	E [MPa]	$0,8 \cdot E_1 < E_2$	$E_2 < 1,1 \cdot E_1$	E_{mean}	
6	0	0,25	1	28214	26646	27430	ano	ano	25022
			4	23254	24973	24114	ano	ano	
			5	25600	21982	23791	ano	ano	
			6	22446	22538	22492	ano	ano	
			7	23361	24325	23843	ano	ano	
			8	30687	26241	28464	ano	ano	
	15	0,31	1	11953	11226	11590	ano	ano	13532
			4	13122	13443	13283	ano	ano	
			5	16074	13815	14945	ano	ano	
			6	13364	12206	12785	ano	ano	
			7	14101	12771	13436	ano	ano	
			8	15061	15242	15152	ano	ano	
	27	0,38	1	5215	4806	5011	ano	ano	6569
			4	6486	6095	6291	ano	ano	
			5	7562	7938	7750	ano	ano	
			6	6132	5866	5999	ano	ano	
			7	6702	6548	6625	ano	ano	
			8	8292	7181	7737	ano	ano	
	40	0,45	1	1980	2067	2024	ano	ano	3260
			4	3362	3044	3203	ano	ano	
			5	4066	4315	4191	ano	ano	
			6	3382	3035	3209	ano	ano	
			7	3290	3233	3262	ano	ano	
			8	3656	3684	3670	ano	ano	





Příloha 18: Modul tuhosti – směs 7

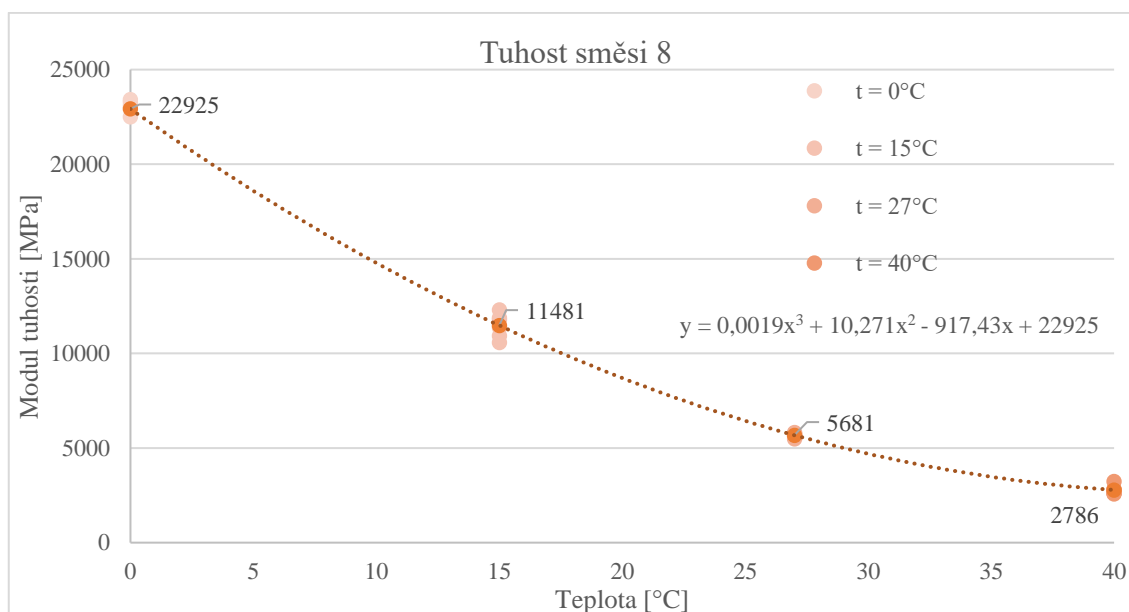
Směs / Těleso	t [°C]	ν [-]	E_1 [MPa]	E_2 [MPa]	E [MPa]	$0,8 \cdot E_1 < E_2$	$E_2 < 1,1 \cdot E_1$	E_{mean}	
7	0	0,25	1	26026	26897	26462	ano	ano	24654
			2	22881	22872	22877	ano	ano	
			4	23656	23413	23535	ano	ano	
			5	23303	22712	23008	ano	ano	
			6	26712	24190	25451	ano	ano	
			9	27359	25828	26594	ano	ano	
	15	0,31	1	15295	13977	14636	ano	ano	14566
			2	15061	14673	14867	ano	ano	
			4	13985	13604	13795	ano	ano	
			5	13886	14069	13978	ano	ano	
			6	17225	16580	16903	ano	ano	
			9	12951	13482	13217	ano	ano	
	27	0,38	1	8382	7092	7737	ano	ano	7427
			2	7813	7453	7633	ano	ano	
			4	7198	7418	7308	ano	ano	
			5	6845	7025	6935	ano	ano	
			6	7716	7509	7613	ano	ano	
			9	7569	7106	7338	ano	ano	
	40	0,45	1	4136	4274	4205	ano	ano	3806
			2	4025	3698	3862	ano	ano	
			4	3542	3552	3547	ano	ano	
			5	4024	3781	3903	ano	ano	
			6	3764	3502	3633	ano	ano	
			9	3797	3578	3688	ano	ano	





Příloha 19: Modul tuhosti – směs 8

Směs / Těleso	t [°C]	v [-]	E ₁ [MPa]	E ₂ [MPa]	E [MPa]	0,8*E ₁ <E ₂	E ₂ <1,1*E ₁	E _{mean}
8	0	0,25	22306	22724	22515	ano	ano	22925
			22800	23759	23280	ano	ano	
			23914	22261	23088	ano	ano	
			24900	21950	23425	ano	ano	
			19938	22627	21283	ano	ne	
			23243	21396	22320	ano	ano	
	15	0,31	12386	11379	11883	ano	ano	11481
			12129	12486	12308	ano	ano	
			11344	11416	11380	ano	ano	
			11264	9889	10577	ano	ano	
			11929	11676	11803	ano	ano	
			10860	11019	10940	ano	ano	
	27	0,38	5647	5626	5637	ano	ano	5681
			6172	5472	5822	ano	ano	
			5641	5835	5738	ano	ano	
			5664	5593	5629	ano	ano	
			5701	5829	5765	ano	ano	
			5810	5177	5494	ano	ano	
	40	0,45	3294	3169	3232	ano	ano	2786
			2934	2735	2835	ano	ano	
			2953	2676	2815	ano	ano	
			2728	2526	2627	ano	ano	
			2665	2502	2584	ano	ano	
			2733	2520	2627	ano	ano	

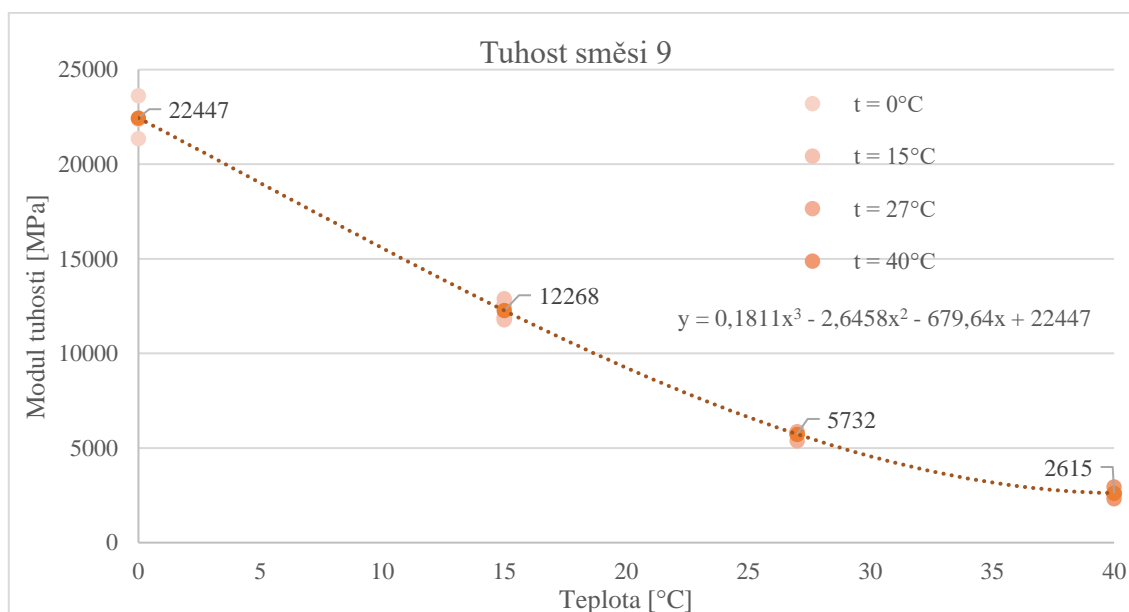


Kde šedivě zbarvená tělesa jsou vyřazena z výsledných průměrů (nesplňují jednu nebo obě podmínky podle normy).



Příloha 20: Modul tuhosti – směs 9

Směs / Těleso	t [°C]	v [-]	E ₁ [MPa]	E ₂ [MPa]	E [MPa]	0,8*E ₁ <E ₂	E ₂ <1,1*E ₁	E _{mean}	
9	0	0,25	1	21899	22853	22376	ano	ano	22447
			2	20782	23409	22096	ano	ne	
			4	20717	21981	21349	ano	ano	
			5	24098	23134	23616	ano	ano	
			6	26515	20359	23437	ne	ano	
			7	19370	21925	20648	ano	ne	
			15	0,31	1	12389	11263	11826	
	2	12030			12984	12507	ano	ano	
	4	12046			11531	11789	ano	ano	
	5	12052			11841	11947	ano	ano	
	6	12152			13135	12644	ano	ano	
	7	12492			13302	12897	ano	ano	
	27	0,38			1	6199	5274	5737	ano
			2	5799	5905	5852	ano	ano	
			4	5996	5664	5830	ano	ano	
			5	5876	5831	5854	ano	ano	
			6	5459	5312	5386	ano	ano	
			7	7717	6051	6884	ne	ano	
			40	0,45	1	2629	2587	2608	ano
	2	2419			2213	2316	ano	ano	
	4	2706			2537	2622	ano	ano	
5	2602	2529			2566	ano	ano		
6	2721	2547			2634	ano	ano		
7	3029	2866			2948	ano	ano		

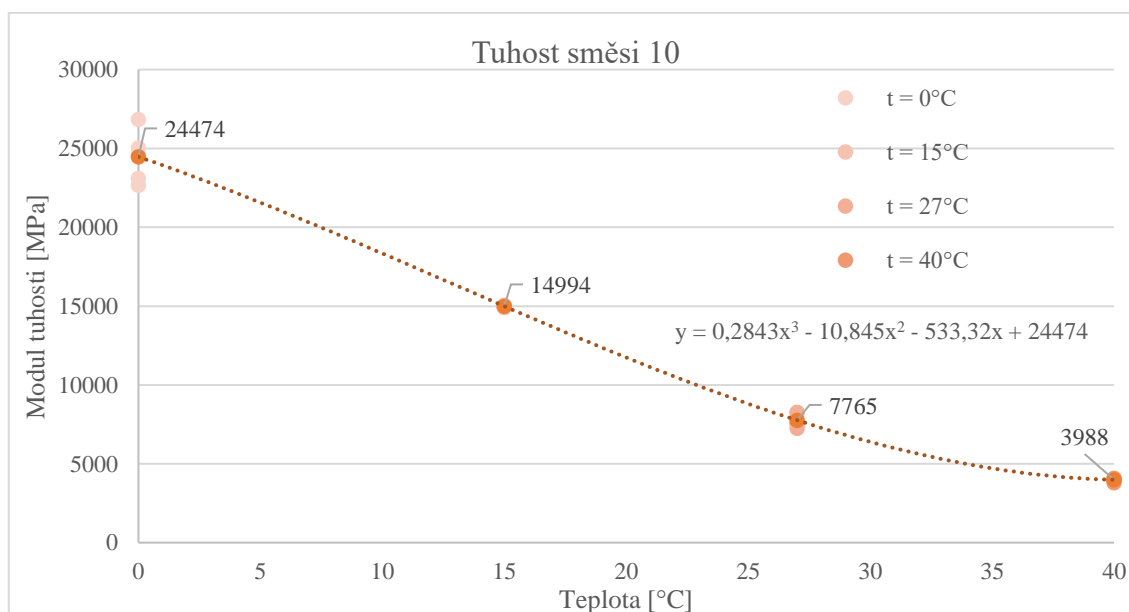


Kde šedivě zbarvená tělesa jsou vyřazena z výsledných průměrů (nesplňují jednu nebo obě podmínky podle normy).



Příloha 21: Modul tuhosti – směs 10

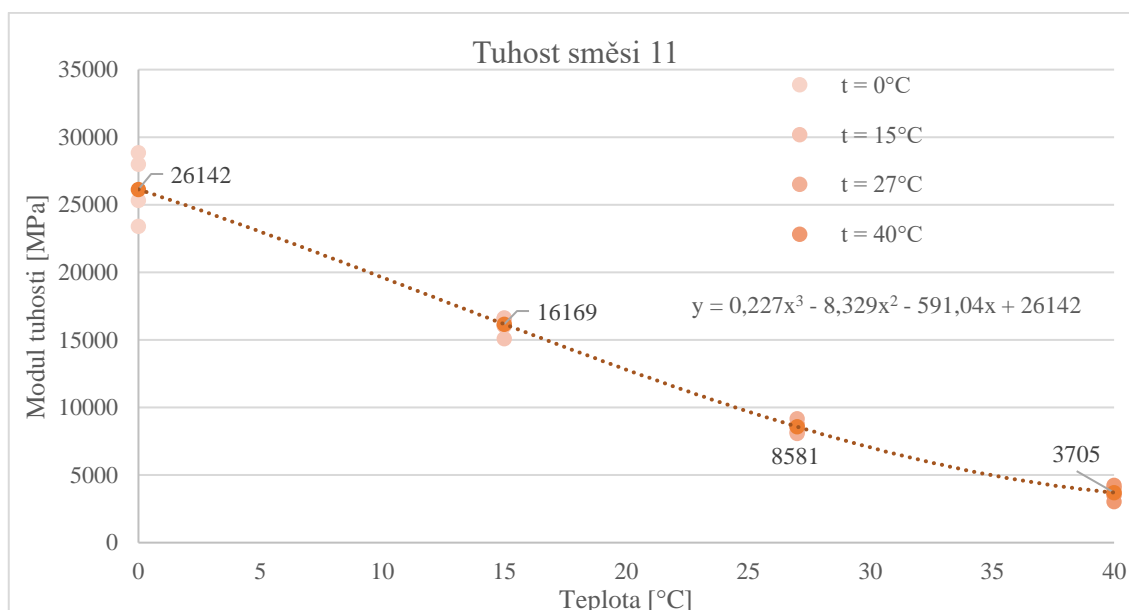
Směs / Těleso	t [°C]	v [-]	E ₁ [MPa]	E ₂ [MPa]	E [MPa]	0,8*E ₁ <E ₂	E ₂ <1,1*E ₁	E _{mean}	
10	0	0,25	1	27783	25910	26847	ano	ano	24474
			2	26350	22955	24653	ano	ano	
			3	23411	22807	23109	ano	ano	
			4	22806	22516	22661	ano	ano	
			5	24014	25063	24539	ano	ano	
			7	26915	23156	25036	ano	ano	
			15	0,31	1	15106	14753	14930	
	2	14793			15012	14903	ano	ano	
	3	15402			14642	15022	ano	ano	
	4	14579			15555	15067	ano	ano	
	5	15402			14666	15034	ano	ano	
	7	15367			14647	15007	ano	ano	
	27	0,38			1	8005	7334	7670	ano
			2	7964	8525	8245	ano	ano	
			3	8618	7938	8278	ano	ano	
			4	7199	7321	7260	ano	ano	
			5	7462	7739	7601	ano	ano	
			7	7404	7673	7539	ano	ano	
			40	0,45	1	3862	4098	3980	ano
	2	3715			3881	3798	ano	ano	
	3	4118			3825	3972	ano	ano	
4	4064	4056			4060	ano	ano		
5	4232	3820			4026	ano	ano		
7	4089	4090			4090	ano	ano		





Příloha 22: Modul tuhosti – směs 11

Směs / Těleso	t [°C]	v [-]	E ₁ [MPa]	E ₂ [MPa]	E [MPa]	0,8*E ₁ <E ₂	E ₂ <1,1*E ₁	E _{mean}	
11	0	0,25	1	25775	24898	25337	ano	ano	26142
			3	29919	26096	28008	ano	ano	
			5	23769	23035	23402	ano	ano	
			6	28622	29086	28854	ano	ano	
			7	26721	32629	29675	ano	ne	
			8	23989	26233	25111	ano	ano	
	15	0,31	1	17005	16260	16633	ano	ano	16169
			3	16202	13993	15098	ano	ano	
			5	15888	16234	16061	ano	ano	
			6	15381	16766	16074	ano	ano	
			7	17196	15905	16551	ano	ano	
			8	17113	16084	16599	ano	ano	
	27	0,38	1	8622	8872	8747	ano	ano	8581
			3	7797	8395	8096	ano	ano	
			5	8563	8500	8532	ano	ano	
			6	8311	8085	8198	ano	ano	
			7	9275	8207	8741	ano	ano	
			8	8912	9437	9175	ano	ano	
	40	0,45	1	4399	4098	4249	ano	ano	3705
			3	3833	3548	3691	ano	ano	
			5	3945	4115	4030	ano	ano	
			6	3216	3781	3499	ano	ne	
			7	2986	3078	3032	ano	ano	
			8	3730	3321	3526	ano	ano	



Kde šedivě zbarvená tělesa jsou vyřazena z výsledných průměrů (nesplňují jednu nebo obě podmínky podle normy).



Příloha 23: Marshallova zkouška

Směs	Těleso	v [mm]	c [-]	S _{orig} [kN]	S [kN]	∅ S [kN]	F [mm]	∅ F [mm]	S/F [kN/mm]
5	2	63,6	1,001	17,1	17,1	15,9	4,7	4,7	3,4
	7	64,0	0,990	16,2	16,0		4,4		
	8	64,4	0,980	14,9	14,6		4,9		
6	2	62,5	1,030	21,8	22,4	22,2	5,3	4,7	4,7
	3	62,1	1,042	22,1	23,0		4,9		
	9	61,6	1,055	20,0	21,1		4,0		
7	3	62,3	1,036	21,0	21,8	21,1	4,2	3,7	5,7
	7	62,2	1,040	20,1	20,9		3,3		
	8	62,4	1,032	20,1	20,7		3,6		
8	2	60,9	1,073	17,2	18,5	18,8	4,1	4,2	4,4
	5	60,2	1,092	18,1	19,8		5,0		
	8	59,9	1,103	16,5	18,2		3,6		
9	3	62,9	1,021	16,6	16,9	17,0	5,3	5,0	3,4
	8	63,2	1,013	16,1	16,3		2,9		
	9	63,2	1,012	16,9	17,1		4,7		
10	6	60,7	1,081	19,5	21,1	21,5	4,9	5,1	4,2
	8	61,1	1,067	20,4	21,8		4,9		
	9	61,5	1,057	20,4	21,6		5,4		
11	2	62,7	1,026	19,5	20,0	20,9	3,9	3,8	5,6
	4	61,4	1,059	20,4	21,6		3,7		
	9	62,5	1,030	20,5	21,1		3,7		

Kde šedivě zbarvená tělesa jsou vyřazena z výsledných průměrů, protože nesplňují alespoň jednu z následujících podmínek dle normy:

- Rozdíl získané hodnoty od průměru parametru *S* je větší než 15 %
- Rozdíl získané hodnoty od průměru parametru *F* je větší než 20 %



Příloha 24: Odolnost vůči šíření trhlin - 0 °C

Těleso	Deformace	Síla	Hloubka drážky	Přetvoření	Napětí při porušení (EN 2019)		Faktor f	Lomová houževnatost (EN 2019)	Práce do max. hodnoty (W)	Lomová energie do F _{max} - G _{f,max}	Úhel zatěžování mezi 0 a 0,5 F _{max} - α		
	(mm)	(kN)	(mm)	(%)	(MPa)			(-)				(N/mm ^{3/2})	(J)
Hlávka 5 (0°C) 1	0,56	6,90	10	1,09%	1,37	1,16	4,793	36,9	1,7	864	85,6		
Hlávka 5 (0°C) 3	0,66	5,08	10	1,34%	0,97		4,794	26,1	1,5		734	82,7	
Hlávka 5 (0°C) 5	0,90	5,78	10	1,86%	1,16		4,794	31,2	2,1		1132	81,4	
Hlávka 5 (0°C) 4	0,72	6,54	10	1,45%	1,26		4,794	33,8	1,8		865	84,2	
Hlávka 5 (0°C) 9	0,71	6,13	10	1,40%	1,17		4,794	31,4	1,6		756	84,6	
Hlávka 5 (0°C) 6	0,53	5,34	10	1,10%	1,06		4,794	28,4	1,1		594	84,6	
Hlávka 6 (0°C) 1	0,82	7,90	10	1,63%	1,57	1,38	4,794	42,1	2,6	1289	84,2		
Hlávka 6 (0°C) 4	0,74	7,05	10	1,50%	1,36		4,795	36,6	2,1		1060	84,4	
Hlávka 6 (0°C) 6	0,56	6,51	10	1,14%	1,29		4,794	34,7	1,4		744	85,4	
Hlávka 6 (0°C) 5	0,41	6,51	10	0,86%	1,30		4,794	34,9	1,3		701	86,6	
Hlávka 6 (0°C) 8	0,46	6,49	10	0,92%	1,28		4,793	34,5	1,2		593	86,7	
Hlávka 6 (0°C) 7	0,71	7,68	10	1,45%	1,48		4,794	39,8	2,4		1223	84,5	
Hlávka 7 (0 °C) 1	0,55	7,41	10	1,11%	1,44	1,54	4,794	38,6	1,7	869	85,9		
Hlávka 7 (0 °C) 5	-	-	10				4,794						
Hlávka 7 (0 °C) 2	0,52	8,21	10	1,03%	1,61		4,794	43,3	1,7		851	86,7	
Hlávka 7 (0 °C) 4	-	-	10				4,794						
Hlávka 7 (0 °C) 6	0,55	8,51	10	1,12%	1,66		4,794	44,5	2,0		1006	86,4	
Hlávka 7 (0 °C) 9	0,55	7,18	10	1,13%	1,44		4,794	38,6	1,4		732	85,8	
Hlávka 8 (0°C) 1	0,79	6,81	10	1,56%	1,31	1,27	4,794	35,1	2,1	992	84,1		
Hlávka 8 (0°C) 3	0,70	6,84	10	1,39%	1,33		4,794	35,8	1,9		937	84,2	
Hlávka 8 (0°C) 4	0,49	5,77	10	1,01%	1,14		4,794	30,6	1,2		650	85,2	
Hlávka 8 (0°C) 6	0,60	6,96	10	1,23%	1,34		4,794	36,0	1,5		778	85,5	
Hlávka 8 (0°C) 7	0,60	6,52	10	1,22%	1,25		4,794	33,6	1,6		785	85,1	
Hlávka 8 (0°C) 9	-	-	10				4,794						
Hlávka 9 (0°C) 1	-	-	10			1,32	4,794			1147			
Hlávka 9 (0°C) 2	0,67	7,21	10	1,35%	1,39		4,794	37,2	2,3		1147	85,0	
Hlávka 9 (0°C) 4	0,79	7,91	10	1,59%	1,51		4,793	40,4	2,2		1083	84,5	
Hlávka 9 (0°C) 5	-	-	10				4,794						
Hlávka 9 (0°C) 6	1,09	6,12	10	2,21%	1,17		4,794	31,5	2,2		1105	80,2	
Hlávka 9 (0°C) 7	0,60	6,15	10	1,20%	1,23		4,794	33,1	1,5		744	84,7	
Hlávka 10 (0°C) 1	0,75	6,73	10	1,55%	1,31	1,39	4,794	35,3	1,6	842	83,9		
Hlávka 10 (0°C) 2	0,47	5,82	10	0,97%	1,18		4,794	31,7	1,2		630	85,9	
Hlávka 10 (0°C) 3	0,43	7,10	10	0,87%	1,37		4,794	36,7	1,4		685	86,5	
Hlávka 10 (0°C) 4	0,57	6,84	10	1,15%	1,33		4,794	35,8	1,7		841	85,3	
Hlávka 10 (0°C) 5	0,53	7,50	10	1,08%	1,50		4,794	40,3	1,7		884	86,3	
Hlávka 10 (0°C) 7	0,51	8,48	10	1,03%	1,68		4,794	45,1	1,7		864	86,9	
Hlávka 11 (0 °C) 1	0,49	6,50	10	1,03%	1,28	1,33	4,795	34,4	1,5	795	85,8		
Hlávka 11 (0 °C) 6	0,54	6,43	10	1,08%	1,22		4,793	32,9	1,4		681	86,1	
Hlávka 11 (0 °C) 2	0,40	5,54	10	0,82%	1,08		4,794	29,0	0,9		477	86,3	
Hlávka 11 (0 °C) 7	-	-	10				4,794						
Hlávka 11 (0 °C) 5	1,02	7,94	10	2,09%	1,54		4,794	41,3					83,2
Hlávka 11 (0 °C) 8	0,47	8,01	10	0,92%	1,54		4,794	41,4	1,4		684	87,2	

Kde tělesa s chybějícími hodnotami byla vyřazena z výsledných průměrů především na základě zatěžovacích diagramů a odlehklých hodnot oproti ostatním tělesům ve směsi.

V některých případech byla na základě předchozí poznámky vyřazena pouze Lomová energie a práce.



Příloha 25: Odolnost vůči šíření trhliny - 25 °C

Těleso	Deformace	Síla	Hloubka drážky	Přetvoření	Napětí při porušení (EN 2019)		Faktor f	Lomová houževnatost (EN 2019)		Práce do max. hodnoty (W)		Lomová energie do F _{max} - G _{r,max}		Úhel zatěžování mezi 0 a 0,5 F _{max} - α
					(MPa)	(-)		(N/mm ^{3/2})	(J)	(J/m ²)	(°)			
	(mm)	(kN)	(mm)	(%)										
Hlávka 5 (25°C) 1	0,98	2,44	10	2,04%	2,08%	0,48	0,55	4,793	13,0	14,7	1,3	1,5	703	69,7
Hlávka 5 (25°C) 3	0,96	3,07	10	1,95%		0,61		4,794	16,3		1,6		832	73,2
Hlávka 5 (25°C) 4	1,05	2,35	10	2,17%		0,46		4,794	12,5		1,3		652	66,0
Hlávka 5 (25°C) 5	1,25	2,85	10	2,51%		0,54		4,794	14,5		1,7		841	66,9
Hlávka 5 (25°C) 6	1,05	3,43	10	2,10%		0,66		4,794	17,6		2,0		993	73,3
Hlávka 5 (25°C) 9	0,81	2,63	10	1,71%	0,53	4,794	14,2	1,3	686	73,7				
Hlávka 6 (25°C) 1	-	-	10		1,82%		0,74	4,794		20,0		1,6		
Hlávka 6 (25°C) 4	0,83	3,36	10	1,71%		0,68		4,794	18,2		1,4		747	76,7
Hlávka 6 (25°C) 5	-	-	10					4,794						
Hlávka 6 (25°C) 6	0,88	3,67	10	1,78%		0,72		4,794	19,3		1,6		803	76,7
Hlávka 6 (25°C) 7	0,96	4,00	10	1,95%		0,80		4,794	21,4		1,9		998	76,5
Hlávka 6 (25°C) 8	0,91	4,04	10	1,85%	0,79	4,793	21,1	1,7	853	77,4				
Hlávka 7 (25°C) 1	0,79	3,99	10	1,62%	1,61%	0,79	0,79	4,794	21,2	21,3	1,7	1,7	881	79,4
Hlávka 7 (25°C) 2	0,70	3,76	10	1,47%		0,73		4,794	19,7		1,5		786	80,0
Hlávka 7 (25°C) 4	-	-	10					4,794						
Hlávka 7 (25°C) 5	0,65	3,75	10	1,32%		0,73		4,794	19,7		1,3		656	81,0
Hlávka 7 (25°C) 6	0,84	4,23	10	1,71%		0,85		4,794	22,8		1,9		991	79,0
Hlávka 7 (25°C) 9	0,96	4,50	10	1,93%	0,86	4,794	23,1	2,2	1082	78,2				
Hlávka 8 (25°C) 1	0,87	3,21	10	1,83%	2,04%	0,63	0,69	4,794	16,9	18,5	1,6	1,9	865	75,2
Hlávka 8 (25°C) 3	1,14	3,30	10	2,38%		0,65		4,794	17,5		1,8		972	71,6
Hlávka 8 (25°C) 4	0,96	3,61	10	1,92%		0,71		4,794	19,1		2,1		1050	75,3
Hlávka 8 (25°C) 6	0,90	3,52	10	1,83%		0,69		4,794	18,5		1,8		908	76,1
Hlávka 8 (25°C) 7	1,00	3,65	10	2,04%		0,75		4,794	20,0		2,1		1140	75,2
Hlávka 8 (25°C) 9	1,10	3,56	10	2,25%	0,70	4,794	18,9	2,0	1052	73,2				
Hlávka 9 (25°C) 1	1,34	3,45	10	2,73%	1,97%	0,68	0,68	4,794	18,2	18,3		1,6		69,4
Hlávka 9 (25°C) 2	0,88	3,25	10	1,81%		0,64		4,794	17,2		1,7		859	75,5
Hlávka 9 (25°C) 4	0,91	3,83	10	1,83%		0,75		4,793	20,0		1,7		857	77,2
Hlávka 9 (25°C) 5	1,02	3,45	10	2,10%		0,69		4,794	18,6		1,8		934	74,0
Hlávka 9 (25°C) 6	0,92	3,45	10	1,89%		0,69		4,794	18,6		1,7		902	75,4
Hlávka 9 (25°C) 7	0,71	3,30	10	1,47%	0,64	4,794	17,3	1,4	709	78,1				
Hlávka 10 (25°C) 1	0,81	4,45	10	1,63%	1,62%	0,86	0,83	4,794	23,0	22,3	2,1	2,0	1061	79,9
Hlávka 10 (25°C) 2	-	-	10					4,794						
Hlávka 10 (25°C) 3	0,81	4,40	10	1,66%		0,87		4,794	23,4		1,9		1001	79,7
Hlávka 10 (25°C) 4	0,80	3,99	10	1,64%		0,79		4,794	21,2		1,8		960	78,9
Hlávka 10 (25°C) 5	0,77	4,49	10	1,55%		0,86		4,794	23,1		1,9		929	81,1
Hlávka 10 (25°C) 7	0,79	4,02	10	1,63%	0,78	4,794	21,0	2,0	1024	78,7				
Hlávka 11 (25°C) 1	-	-	10		1,53%		0,71	4,794		19,1		1,4		
Hlávka 11 (25°C) 2	-	-	10					4,793						
Hlávka 11 (25°C) 5	0,88	3,42	10	1,79%		0,68		4,794	18,2		1,5		780	76,2
Hlávka 11 (25°C) 6	0,59	3,54	10	1,21%		0,70		4,794	18,7		1,2		622	79,5
Hlávka 11 (25°C) 7	0,82	3,80	10	1,67%		0,76		4,794	20,3		1,5		801	78,9
Hlávka 11 (25°C) 8	0,69	3,51	10	1,47%	0,71	4,794	19,1	1,3	698	79,6				

Kde tělesa s chybějícími hodnotami byla vyřazena z výsledných průměrů především na základě zatěžovacích diagramů a odlehklých hodnot oproti ostatním tělesům ve směsi.

V některých případech byla na základě předchozí poznámky vyřazena pouze Lomová energie a práce.



Příloha 26: Pevnost v tahu za ohybu – tříbodový ohyb – teplota

Těleso	Teplota zkoušky [°C]	b [mm]	h [mm]	l [mm]	Deformace [mm]		Síla (P) [kN]		Pevnost v tahu za ohybu (R) [MPa]		Moult tuhosti v tahu za ohybu (E _s) [MPa]		Lomová práce (W) [J]	
Hlavka 5_II 1	0 °C	50,8	49,7	250,0	1,0		3,0		8,9		1868		1,8	
Hlavka 5_II 2	0 °C	49,3	50,1	250,0	1,0	1,0	3,5	3,4	10,5	10,2	2199	2066	2,0	2,0
Hlavka 5_II 3	0 °C	48,6	50,2	250,0	1,1		3,7		11,2		2133		2,3	
Hlavka 5_II 4	-10 °C	48,5	50,1	250,0	0,6	0,7	3,9	3,2	11,9	10,0	3923	3074	1,2	1,0
Hlavka 5_II 5	-10 °C	49,1	49,8	250,0	0,8		2,6		8,1		2225		0,9	
Hlavka 6_II 1	0 °C	50,5	49,6	250,0	1,2	1,1	3,6	4,0	11,0	12,1	1918	2285	2,2	2,3
Hlavka 6_II 2	0 °C	49,3	49,9	250,0	1,0		4,3		13,2		2652		2,4	
Hlavka 6_II 3	0 °C	48,8	49,8	250,0										
Hlavka 6_II 4	-10 °C	48,8	49,7	250,0	0,7	0,7	3,7	3,7	11,6	11,5	3688	3695	1,1	1,1
Hlavka 6_II 5	-10 °C	48,8	49,7	250,0	0,6		3,6		11,3		3702		1,1	
Hlavka 7_II 3	0 °C	49,6	50,1	250,0										
Hlavka 7_II 4	0 °C	50,2	49,7	250,0	0,9	0,8	3,5	3,5	10,5	11,0	2570	2745	1,6	1,6
Hlavka 7_II 5	0 °C	47,4	49,6	250,0	0,8		3,6		11,6		2921		1,5	
Hlavka 7_II 1	-10 °C	49,6	50,1	250,0	0,6	0,6	4,4	4,5	13,4	13,7	4556	4508	1,3	1,4
Hlavka 7_II 2	-10 °C	49,5	50,2	250,0	0,7		4,7		14,0		4460		1,5	
Hlavka 8_II 1	0 °C	50,0	50,0	250,0	0,7	0,8	3,6	3,7	10,7	11,3	3317	3085	1,1	1,4
Hlavka 8_II 2	0 °C	49,4	50,2	250,0	0,9		4,2		12,6		3075		1,7	
Hlavka 8_II 3	0 °C	48,4	50,3	250,0	0,8		3,5		10,7		2863		1,2	
Hlavka 8_II 4	-10 °C	49,1	50,3	250,0	0,6	0,6	3,7	3,4	11,3	10,3	4040	3586	1,0	1,0
Hlavka 8_II 5	-10 °C	49,4	49,9	250,0	0,6		3,1		9,3		3132		0,9	
Hlavka 9_II 3	0 °C	51,1	50,1	250,0	0,6	0,7	3,3	3,1	9,7	9,6	3300	2971	1,0	0,9
Hlavka 9_II 4	0 °C	51,1	50,1	250,0	0,6		3,6		10,5		3560		1,0	
Hlavka 9_II 5	0 °C	39,9	49,9	250,0	0,9		2,3		8,8		2055		0,8	
Hlavka 9_II 1	-10 °C	51,1	50,0	250,0	0,5	0,5	2,6	2,7	7,5	7,9	2891	3519	0,7	0,6
Hlavka 9_II 2	-10 °C	50,5	50,1	250,0	0,4		2,8		8,4		4148		0,5	
Hlavka 10_II 3	0 °C	50,2	49,9	250,0	0,8	0,7	4,1	4,0	12,4	12,0	3404	3557	1,4	1,3
Hlavka 10_II 4	0 °C	49,4	49,8	250,0	0,7		3,8		11,5		3710		1,1	
Hlavka 10_II 5	0 °C	48,2	49,7	250,0										
Hlavka 10_II 1	-10 °C	46,8	49,8	250,0	0,5	0,5	3,2	3,4	10,4	10,5	4714	4780	0,7	0,7
Hlavka 10_II 2	-10 °C	50,1	49,9	250,0	0,5		3,6		10,7		4845		0,7	
Hlavka 11_II 3	0 °C	49,7	50,4	250,0	0,9	0,7	4,3	3,9	12,8	11,5	3077	3230	1,7	1,4
Hlavka 11_II 4	0 °C	49,8	50,4	250,0	0,8		4,1		12,2		3271		1,5	
Hlavka 11_II 5	0 °C	49,0	50,1	250,0	0,6		3,2		9,6		3342		1,0	
Hlavka 11_II 1	-10 °C	49,5	50,2	250,0	0,6	0,6	2,7	3,1	8,2	9,4	2837	3590	0,8	0,8
Hlavka 11_II 2	-10 °C	48,9	50,5	250,0	0,5		3,5		10,5		4343		0,8	

Kde tělesa s chybějícími hodnotami byla vyřazena z výsledných průměrů především na základě zatěžovacích diagramů a odlehklých hodnot oproti ostatním tělesům ve směsi.



Příloha 27: Pevnost v tahu za ohybu – tříbodový ohyb – stárnutí

Těleso	Teplota zkoušky [°C]	b [mm]	h [mm]	l [mm]	Deformace [mm]		Síla (P) [kN]		Pevnost v tahu za ohybu (R) [MPa]		Moult tuhosti v tahu za ohybu (E _t) [MPa]		Lomová práce (W) [J]	
Hlávka 5 1-1	0 °C	49,3	40,9	250,0	0,9		1,5		6,7		1809		0,9	
Hlávka 5 1-2	0 °C	48,8	41,5	250,0	1,0	0,9	2,1	1,8	9,3	8,3	2420	2286	1,1	1,0
Hlávka 5 2-1	0 °C	49,6	40,7	250,0	0,8		1,7		7,9		2475		0,8	
Hlávka 5 2-2	0 °C	49,2	40,9	250,0	1,0		2,0		9,3		2439		1,2	
Hlávka 5 1-3	0 °C	48,7	39,9	250,0										
Hlávka 5 1-4	0 °C	49,5	40,0	250,0	0,5	0,5	1,4	1,6	6,8	7,6	3674	4145	0,4	0,4
Hlávka 5 2-3	0 °C	48,8	39,9	250,0	0,5		1,7		8,4		4782		0,4	
Hlávka 5 2-4	0 °C	49,0	40,1	250,0	0,5		1,6		7,7		3979		0,4	
Hlávka 6 1-1	0 °C	48,5	39,3	250,0	0,5				1,8				8,9	
Hlávka 6 1-2	0 °C	48,1	39,3	250,0	0,6	0,6	2,3	2,1	11,8	10,6	5391	4822	0,7	0,7
Hlávka 6 2-1	0 °C	48,6	39,4	250,0	0,6		1,9		9,3		3967		0,6	
Hlávka 6 2-2	0 °C	48,0	39,1	250,0	0,7		2,5		12,5		4824		0,9	
Hlávka 6 1-3	0 °C	48,8	40,1	250,0	0,7		2,7		12,7		4591		1,0	
Hlávka 6 1-4	0 °C	49,0	39,9	250,0	0,8	0,7	2,5	2,3	11,8	11,2	3851	4167	0,8	0,8
Hlávka 6 2-3	0 °C	49,6	40,1	250,0	0,7		2,3		10,6		3782		0,8	
Hlávka 6 2-4	0 °C	48,8	39,9	250,0	0,6		2,0		9,5		4444		0,6	
Hlávka 7 1-1	0 °C	49,1	39,5	250,0	0,6				1,7				8,3	
Hlávka 7 1-2	0 °C	49,2	40,0	250,0	0,8	0,7	2,7	2,2	12,6	10,7	4104	3965	1,1	0,9
Hlávka 7 2-1	0 °C	49,2	40,1	250,0	0,8		2,0		9,3		3092		0,8	
Hlávka 7 2-2	0 °C	49,3	39,7	250,0	0,7		2,6		12,6		5099		1,0	
Hlávka 7 1-3	0 °C	48,9	41,7	250,0	0,8		2,6		11,6		3630		1,2	
Hlávka 7 1-4	0 °C	49,3	41,4	250,0		0,8		2,4		11,0		3537		1,0
Hlávka 7 2-3	0 °C	48,4	41,2	250,0	0,8		2,6		11,7		3889		1,0	
Hlávka 7 2-4	0 °C	48,7	40,5	250,0	0,8		2,1		9,6		3092		0,9	
Hlávka 9 1-1	0 °C	49,2	39,9	250,0	0,6				1,8				8,5	
Hlávka 9 1-2	0 °C	50,1	40,1	250,0	0,6	0,6	1,6	1,7	7,6	8,0	3601	3647	0,5	0,6
Hlávka 9 2-1	0 °C	50,0	40,2	250,0										
Hlávka 9 2-2	0 °C	50,3	40,0	250,0										
Hlávka 9 1-3	0 °C	50,2	39,9	250,0	0,6		2,2		10,3		4183		0,7	
Hlávka 9 1-4	0 °C	49,0	39,7	250,0		0,6	1,7	1,8	8,1	8,6	4311	4088	0,6	0,5
Hlávka 9 2-3	0 °C	49,1	39,8	250,0	0,5		1,8		8,7		4311		0,5	
Hlávka 9 2-4	0 °C	49,0	39,7	250,0	0,5		1,5		7,5		3769		0,4	
Hlávka 10 1-1	0 °C	49,4	40,9	250,0	1,0				2,1				9,5	
Hlávka 10 1-2	0 °C	48,5	41,4	250,0	0,8	0,9	2,4	2,2	10,6	10,0	3350	2940	1,0	1,1
Hlávka 10 2-1	0 °C	49,3	40,1	250,0	0,7		1,6		7,7		2789		0,7	
Hlávka 10 2-2	0 °C	49,4	40,5	250,0	1,0		2,6		12,0		3122		1,6	
Hlávka 10 1-3	0 °C	49,7	39,7	250,0	0,7		2,7		12,7		4628		1,2	
Hlávka 10 1-4	0 °C	49,1	40,0	250,0	0,8	0,8	2,5	2,4	11,7	11,4	3803	3906	0,7	1,0
Hlávka 10 2-3	0 °C	49,4	39,9	250,0	0,7		2,3		10,8		3846		1,1	
Hlávka 10 2-4	0 °C	49,9	39,7	250,0	0,8		2,2		10,3		3347		0,8	
Hlávka 11 1-1	0 °C	49,6	39,8	250,0	0,6				1,8				8,4	
Hlávka 11 1-2	0 °C	49,2	39,7	250,0	0,6	0,6	2,2	2,2	10,4	10,2	4412	4338	0,7	0,7
Hlávka 11 2-1	0 °C	49,6	40,0	250,0	0,7		2,2		10,6		4184		0,8	
Hlávka 11 2-2	0 °C	49,8	40,2	250,0	0,6		2,5		11,6		4920		0,8	
Hlávka 11 1-3	0 °C	50,8	41,5	250,0	0,7		2,6		11,3		4378		0,8	
Hlávka 11 1-4	0 °C	50,6	41,1	250,0		0,6		2,5		10,8		4779		0,7
Hlávka 11 2-3	0 °C	51,0	41,3	250,0	0,6		2,6		11,4		5122		0,7	
Hlávka 11 2-4	0 °C	51,2	40,4	250,0	0,5		2,1		9,6		4837		0,6	

Kde tělesa s chybějícími hodnotami byla vyřazena z výsledných průměrů především na základě zatěžovacích diagramů a odlehklých hodnot oproti ostatním tělesům ve směsi.

Kde šedivě vyznačená tělesa byla vystavena procesu stárnutí.