



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

**VYUŽITÍ POLYMERŮ DO KONSTRUKCÍ VOZOVEK
POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ**

USE OF POLYMERS IN ROAD CONSTRUCTIONS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jana Klusková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. DUŠAN STEHLÍK, Ph.D.

BRNO 2020

PODKLADY A LITERATURA

ČSN EN 13108-1 až 8 Asfaltové směsi

ČSN EN 13285 Nestmelené směsi - Specifikace

ČSN EN 14227-1 až 5 Směsi stmelené hydraulickým pojivem

veřejně přístupné články a literatura z internetu

výzkumné zprávy zabývající se danou problematikou

diplomové práce z minulých let zabývající se podobnou problematikou

sborníky českých a zahraničních technických konferencí

apod.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Práce je zaměřená na rozsáhlejší rešeršní studii sledování využití polymerů v konstrukcích vozovek pozemních komunikací. Cílem práce je zmapovat využití polymerů (termoplasty, reaktoplasty) především z recyklovaných zdrojů jako přísad nebo příměsí stavebních silničních směsí. Ověřit pomocí laboratorních, především funkčních, zkoušek vlastnosti cca 3 stavebních směsí pro možné využití v ČR. Dalším cílem je ověřit možnosti dostupných přísad z těchto zdrojů na území ČR. Závěr práce je vhodné doplnit ekonomickou rozvahou a porovnáním zkoušených stavebních silničních směsí běžně používaných a upravených polymery.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

doc. Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá možností využití recyklovaných polymerů do asfaltových směsí. V teoretické části práce je přiblížena celosvětová problematika s plastovými odpady, včetně zkušeností zahraničních zemí, kde je již tato technologie zavedena a používá se.

Praktická část je věnována návrhu využití recyklovaného plastu do asfaltové směsi, popisu použitých laboratorních zkoušek a samotnému zhodnocení vlivu nízkohustotního polymeru (LDPE) na asfaltovou směs typu AC. V laboratoři proběhly zkoušky pevnosti v příčném tahu, zkoušky na odolnost vůči vodě a stanovení modulů tuhosti (E).

Výstupem této práce je vyhodnocení naměřených hodnot, zpracování výsledků a jejich interpretace v závislosti k možnému použití této technologie v ČR.

KLÍČOVÁ SLOVA

Asfaltová směs, asfalt, modifikace, polymery, modul tuhosti, odolnost vůči vodě, recyklace, polyethylen, LDPE, recyklované plasty

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the use of recycled polymers in asphalt mixtures. In the theoretical part of the thesis there is discussed the global issue of plastic waste including the experience of foreign countries, where this technology has already been introduced and used.

The practical part is devoted to the proposal of using recycled plastic in asphalt mixture, description of used laboratory tests and the evaluating the effect of low-density polyethylen (LDPE) on the asphalt mixture type AC. There were performed tensile strenght tests, water resistant tests and stiffness modulus tests in the laboratory (E).

The output of this work is an evaluation of measured values, processing of results and their interpretation depending on the possible use of this technology in Czech republic.

KEYWORDS

Asphalt mixture, asphalt, bitumen, modification, polymers, stiffness, water sensitivity, recyclation, polyethylen, LDPE, recycled plastics

Bibliografická citace

Bc. Jana Klusková *Využití polymerů do konstrukcí vozovek pozemních komunikací*. Brno, 2019. 84 s. textu. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce doc. Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Využití polymerů do konstrukcí vozovek pozemních komunikací* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 8.1.2020

Bc. Jana Klusková
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Využití polymerů do konstrukcí vozovek pozemních komunikací* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 8.1.2020

Bc. Jana Klusková
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji především vedoucímu mé diplomové práce, panu **doc. Ing. Dušanu Stehlíkovi, PhD.**, za věcnou a přínosnou pomoc při vedení diplomové práce. Ráda bych také poděkovala všem pracovníkům silniční laboratoře na fakultě stavební VUT v Brně. V neposlední řadě chci poděkovat profesoru Silvino Dias Capitão z polytechnické univerzity ISEC v Coimbre v Portugalsku.

Děkuji VUT v Brně za poskytnuté vzdělání.

OBSAH

1. Úvod.....	9
2. Cíle práce.....	10
3. Rešerše literatury.....	11
3.1. Asfaltové směsi.....	11
3.1.1. Základní rozdělení asfaltových směsí.....	12
3.1.1.1. Asfaltový beton – AC (Asphalt concrete) ČSN EN 13108-1 ed.2.....	12
3.1.1.2. Asfaltový beton pro velmi tenké vrstvy – BBTM (Beton bitumineux Trés Minces) ČSN EN 13108-2 ed.2.....	15
3.1.1.3. Asfaltový koberec mastixový –SMA (Stone Mastix Asphalt) - ČSN EN 13108-5 ed.2.....	15
3.1.1.4. Asfaltový koberec drenážní – PA (Porous Asphalt) ČSN EN 13108-7 ed.2	16
3.1.1.5. Litý asfalt – MA (Mastic Asphalt).....	15
3.2. Asfaltové pojivo.....	16
3.2.1. Přírodní asfalty.....	17
3.2.2. Ropné asfalty.....	18
3.2.3. Dehty.....	19
3.2.4. Modifikované asfalty.....	19
3.2.4.1. CRmB – crumb Rubber modified bitumen.....	22
3.3. Plasty.....	24
3.3.1. Polyethylén.....	26
3.3.2. Nízkohustotní polyethylen.....	27
3.3.3. Působení LDPE a asfaltu.....	28
3.3.4. Recyklace.....	29
3.3.4.1. Recyklace LDPE v ČR.....	30
3.3.5. Plasty a jejich použití ve světě.....	32
3.3.5.1. Modifikace asfaltových směsí ve světě.....	32
3.3.5.2. Nizozemsko.....	34
3.3.5.3. Jihovýchodní Asie.....	36
3.3.5.4. Velká Británie.....	37
3.3.5.5. Indie.....	38
3.3.5.5.1. Využití plastů v silničním stavitelství v Indii.....	40
3.3.5.6. Portugalsko.....	41
4. Použité materiály a asfaltové směsi.....	51
5. Použité zkušební metody.....	53
5.1. Příprava zkušebních těles.....	53
5.1.1. Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem.....	54
5.1.2. Příprava zkušebních těles zhutňovačem desek.....	58
5.2. Zkoušky asfaltové směsi na zkušebních vzorcích.....	61
5.2.1. Stanovení objemové hmotnosti.....	61

5.2.2. ITS zkouška (Indirect Tensile Strenght).....	63
5.2.3. Stanovení modulu tuhosti asfaltové směsi.....	65
5.2.4. Stanovení penetrace jehlou.....	69
5.2.5. Stanovení bodu měknutí metodou kroužek kulička.....	71
6. Výsledky laboratorních zkoušek.....	72
6.1. Výsledky objemové hmotnosti Marshallových těles a zkušebních desek.....	72
6.2. Výsledky citlivosti na vodu.....	74
6.3. Výsledky měření modulu tuhosti.....	77
7. Závěr.....	80
8. Seznam použité literatury.....	82

1. ÚVOD

Stále se zvyšující dopravní zatížení na pozemních komunikacích v posledních letech úzce souvisí s rychlejším vývojem poruch a deformací vozovek a tím i snižování jejich životnosti. To vede především k náročnějším požadavkům na krytové vrstvy vozovek, zejména kvalitu asfaltové směsi a jejich spotřebu, na technologie, ale také k větší náročnosti na kvalitu materiálů, z nichž jsou asfaltové směsi vyráběny. Jednou z možností, jak příznivě ovlivnit kvalitu použitých stavebních materiálů, je použití příměsí recyklovaných plastů. Zároveň lze použitím plastů do navrhovaných asfaltových směsí eliminovat skládkování a nevhodnou likvidaci těchto odpadních materiálů.

V dnešní době hrají plasty důležitou roli v průmyslové výrobě, ekonomice a každodenním životě každého z nás, v jehož důsledku denně vzniká velké množství polymerních odpadů. Celosvětová produkce v průběhu jen několika desetiletí exponenciálně stoupla z 1,5 milionů tun v roce 1950 na 348 milionů tun v roce 2017, z nichž 99,6 milionů tun tvoří produkce polyethylenu. Nejčastější způsob likvidace plastových odpadů v Evropě hned po ukládání na skládky je energetické využití ve spalovnách [1]. Ekologicky nejvýhodnějším způsobem by ovšem bylo znovupoužití, recyklace anebo takové zpracování těchto odpadů, aby našly znovu své uplatnění a neznečišťovaly tak naši planetu. Pomocí recyklace lze výrazně snížit ekologickou zátěž na životní prostředí, šetřit přírodní zdroje a náklady na výrobu. V Evropě je plastového odpadu recyklováno méně než 30 %, přičemž se míra recyklace v jednotlivých státech výrazně liší (v některých státech je procento recyklace nulové, naopak v Německu je recyklováno až 60 % plastového odpadu) [1]. Nejprodukovanějším druhem plastových výrobků jsou plastové obaly, které pokrývají více než 40 % celkové výroby plastů, z nichž zhruba 50 % z plastových odpadů z domácností jsou plastové folie a sáčky ve formě nízkohustotního polyethylenu (LDPE). [2]. Plastové folie zahrnují veškeré pružné obaly, např. sáčky na potraviny, sáčky na skladování potravin, obaly průmyslových a potravinářských produktů, různé přilepovací folie, atd. Většinou se jedná o biologicky nerozložitelné plastové výrobky na jedno použití, což vede k vysoké kontaminaci s ekologickými, ale i zdravotními následky. Miliony tun odpadu, převážně plastového, končí každý rok v mořích a díky tomu vznikají útvary jako Great Pacific Garbage Patch (Velký pacifický odpadkový pás). [9] Jedná se o jakousi skvrnu tvořenou zejména plasty a chemickými kaly, která významně ovlivňuje a ohrožuje mořský biotop a je hrozbou pro celý mořský ekosystém, počínaje zooplanktonem a konče rybami či mořskými ptáky.

2. CÍLE PRÁCE

Již v některých státech na světě stavitelé používají pro výstavbu komunikací recyklované plasty jako náhradu pojiva anebo modifikátorů za účelem zlepšení vlastností asfaltových směsí v krytových vrstvách vozovek pozemních komunikací a především kvůli efektivní likvidaci plastového odpadu. V zemích, kde je již taková technologie zavedena, využívají do asfaltových směsí přibližně 2 – 10 % různých druhů recyklovaných plastů.

Svou diplomovou prací se zabývám možností využití co největšího množství odpadního polymeru do asfaltových směsí. Cílem práce je ověřit, zda je možné přidávat do asfaltových směsí větší množství odpadních plastů bez toho, aby výrazně zhoršil vlastnosti asfaltové směsi, popř. jestli vlastnosti zůstanou alespoň stejné jako u referenční směsi.

Pro svou diplomovou práci jsem zvolila nízkohustotní polyethylen ve formě drti obalových folií a sáčků. Tento typ recyklovaného plastu jsem si vybrala kvůli jeho teplotě tání, která se nejvíce přibližuje teplotě tání asfaltu, ale taky proto, že je to nejvíce používaný druh plastu na světě.

Cílem diplomové práce je ověřit možnost použití odpadních plastů, konkrétně nízkohustotního polyethylenu (LDPE) pro asfaltové vrstvy vozovek jako modifikační přísady. Cílem je zkoumat vlivy nízkohustotního polyethylenu na nejčastěji používanou směs v ČR, asfaltový beton ACO. Pomocí funkčních zkoušek v laboratoři jsem ověřovala, zda lze LDPE zužitkovat při modifikaci asfaltové směsi – asfaltového betonu (AC)) a vylepšit tak jeho fyzikální a mechanické vlastnosti. Možnosti využití nízkohustotního polyethylenu by znamenala ekonomické a environmentální benefity na jedné straně tím, že je ekonomičtější než dosud používané syntetické a přírodní polymery pro modifikace asfaltových směsí. Na druhou stranu by jeho použití při modifikacích asfaltových směsí mohly vyřešit velký environmentální problém dnešní doby. Roční produkce asfaltových směsí jsou vysoké. Například v roce 2017 bylo ve všech evropských zemích vyprodukováno průměrně 300 milionů tun asfaltového betonu. [3]. Proto by mohlo začlenění i malého procenta LDPE do asfaltových směsí znamenat obrovské množství recyklovaného plastu. Pokud by se do směsí začlenily 2 % LDPE (v závislosti na váze asfaltové směsi), znamenalo by to 6 milionů tun plastového odpadu recyklovaného ročně, a to pouze v Evropě.

První část mé diplomové práce se zabývá stručným souhrnem informací o vlastnostech asfaltů, asfaltových směsí, jejich modifikací, polymerů a možnosti jejich využití v silničním stavitelství.

Druhá část je věnována popisu použitých laboratorních zkoušek a samotnému měření a stanovení parametrů na zkušebních vzorcích. Výstupem této práce bude vyhodnocení naměřených hodnot, zpracování výsledků a jejich interpretace.

3. REŠERŠE LITERATURY

Jak již bylo zmíněno v úvodu této diplomové práce, plasty jsou v dnešní době závažným ekologickým problémem. V některých zemích je již snahou takový odpad prakticky recyklovat použitím nebo přidáním mimo jiné do asfaltových směsí. Ve správném poměru různých polymerů v asfaltových směsí lze docílit zlepšení vlastností asfaltových směsí a prodloužit tak jejich životnost. V některých případech lze tímto způsobem docílit snížení tloušťky vrstev anebo procentuálnímu snížení asfaltového pojiva a tím získat ekonomičtější materiál pro výstavbu pozemních komunikací a zároveň se efektivně zbavit velkého množství plastového odpadu.

V následujících kapitolách jsou popsány druhy asfaltových směsí používaných v České republice, druhy, vznik a původ asfaltových pojiv včetně jejich nejčastějších modifikací a chemické vlastnosti nízkohustotního polyethylenu (LDPE) použitého v praktické části této diplomové práce. V této části diplomové práce jsem také sepsala informace o využití různých druhů plastových odpadů do konstrukcí vozovky, které se již ve světě používají.

3.1 ASFALTOVÉ SMĚSI:

Existuje několik druhů asfaltových směsí. Dělí se podle toho, pro jakou konstrukční krytovou vrstvu a jakou konstrukci vozovky v závislosti na dopravním zatížení a klimatických podmínkách jsou určeny. Všeobecně lze říct, že se asfaltová směs skládá ze směsi kameniva a asfaltového pojiva. Asfaltové pojivo může být asfalt, asfaltová emulze anebo dříve používaný ředěný asfalt.

Běžné za horka zpracovávané asfaltové směsi se skládají z cca 93 – 96 % hmotnostního podílu kameniva a 4 – 7 % hmotnostního podílu asfaltového pojiva. Ve zhutněné asfaltové směsi tvoří kamenivo objemově 80 – 85 %, asfaltové pojivo 10 – 17 % a 3 – 5 % tvoří vzduchové mezery [17].

Zhutněním horké směsi vzniká třífázový systém, ve kterém vytváří kamenivo vzájemně zaklíněnou kostru a pojivo na povrchu zrn kameniva spojuje jednotlivá zrna kostry dohromady. Částice kameniva do velikosti 2mm vytvoří po obalení asfaltem tzv. mastix - asfaltovou maltu tužší než samotný asfalt, a ta se vzájemně podílí na fixaci hrubé asfaltové kostry. Třetí fázi tvoří vzduchové mezery, jenž slouží k tomu, aby asfaltová směs správně fungovala. Obsah vzduchových mezer v asfaltové směsi musí být optimální. Příliš vysoký obsah mezer hlavně u ohrubné vrstvy (cca nad 5 % celkového objemu směsi) způsobuje, že asfaltová směs začne propouštět vodu, a tak dochází k postupnému narušování spojení kameniva a asfaltového pojiva. Naopak příliš nízký obsah vzduchových mezer (pod 2 % celkového objemu směsi) může způsobit, že asfaltové pojivo díky vysoké teplotní roztažnosti vyplní v letních měsících, kdy povrch asfaltových vozovek dosahuje teplot větších než 60°C,

většinu vzduchových mezer, následně začne odtlačovat jednotlivá zrna zaklíněné kostry kameniva od sebe, čímž kamenná kostra ztratí smykovou pevnost a pod účinkem zatížení dochází k tvorbě trvalých deformací.

Rozhodující vypovídající schopnost o kvalitě asfaltové směsi má celkově více faktorů, a to např. zrnitost směsi kameniva, mezerovitost, obsah a druh asfaltového pojiva, přilnavost asfaltu ke kamenivu, ale také dodržování správného pracovního a technologického postupu při výrobě, dopravě a pokládce asfaltových směsí na stavbě. Celková únosnost asfaltové směsi je dána správným zhutněním asfaltové směsi v konstrukční vrstvě, třením mezi zrny kameniva, jejich vzájemným stmelením a působením asfaltového pojiva (jedinou výjimkou mezi asfaltovými směsmi je litý asfalt, v němž má kamenivo pouze funkci výplňovou a nehutní se.)

3.1.1. ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ ASFALTOVÝCH SMĚSÍ:

Pro pochopení celkové problematiky zde uvádím základní a nejpoužívanější typy asfaltových směsí v České republice. Výrobu asfaltových směsí v České republice, konkrétně asfaltového betonu řeší norma *ČSN EN 13108-1 Asfaltové směsi - Specifikace pro materiály – Část 1: Asfaltový beton*.

Dle zrnitosti použitého kameniva se podle dalších kritérií asfaltové směsi dělí následovně:

- Asfaltový beton – ACx (Asphalt Concrete)
- Asfaltový koberec mastixový – SMA (Stone mastix asphalt)
- Asfaltový koberec drenážní – PA (Porous Asphalt)
- Asfaltový beton pro velmi tenké vrstvy – BBTM (Beton Bitumineux Très Minces)
- Litý asfalt – MA (Mastic Asphalt)

Srovnání čar zrnitosti jednotlivých směsí je znázorněn na *Obr.5*

3.1.1.1. Asfaltový beton – AC (Asphalt concrete) ČSN EN 13108-1 ed.2.

Asfaltový beton je nejrozšířenější a nejpoužívanější směsí do krytů netuhých konstrukcí vozovek. Vyznačuje se plynulou čarou zrnitosti, tzn., že je rovnoměrně zastoupena všemi druhy frakce kameniva včetně fileru (kamenivo, jehož většina zrn propadne sítem 0,063mm). Tím je dosaženo většího zaplnění prostoru, tedy menší mezerovitosti a menší velikosti jednotlivých mezer. V závislosti na typu krytové konstrukční vrstvy by se mezerovitost měla pohybovat v rozpětí od 2 do 7 %. Asfaltová směs typu asfaltový beton má spíše uzavřenou texturu povrchu a po zhutnění je obrusná vrstva prakticky vodotěsná. Jako pojivo se používají silniční anebo polymerem modifikované asfalty. [17]

Asfaltový beton je určen pro stavbu obrusných, ložních, podkladních a vyrovnávacích asfaltových vrstev vozovky. Asfaltový beton se označuje podle použití do konstrukční vrstvy následovně:

ACO – asfaltový beton pro obrusné vrstvy

ACL – asfaltový beton pro ložní vrstvy

ACP – asfaltový beton pro podkladní vrstvy

Dále se asfaltový beton označuje číslem „D“, které odpovídá velikosti oka horního síta nejhrubší použité frakce kameniva v mm. V České republice se používají frakce 8mm, 11mm, 16mm a 22mm, přičemž se menší frakce kameniva používají do obrusných vrstev a větší frakce kameniva do ložních a podkladních vrstev konstrukce vozovky.

Podle kvalitativních požadavků dle dopravního zatížení se asfaltový beton dále označuje doplňujícím symbolem k číslu „D“:

S – směsi pro vysoké intenzity dopravního zatížení (dopravní zatížení S – II)

+ – směsi pro střední intenzity dopravního zatížení (dopravní zatížení II – IV)

Bez označení – směsi pro vysoké intenzity dopravního zatížení (dopravní zatížení IV – VI)

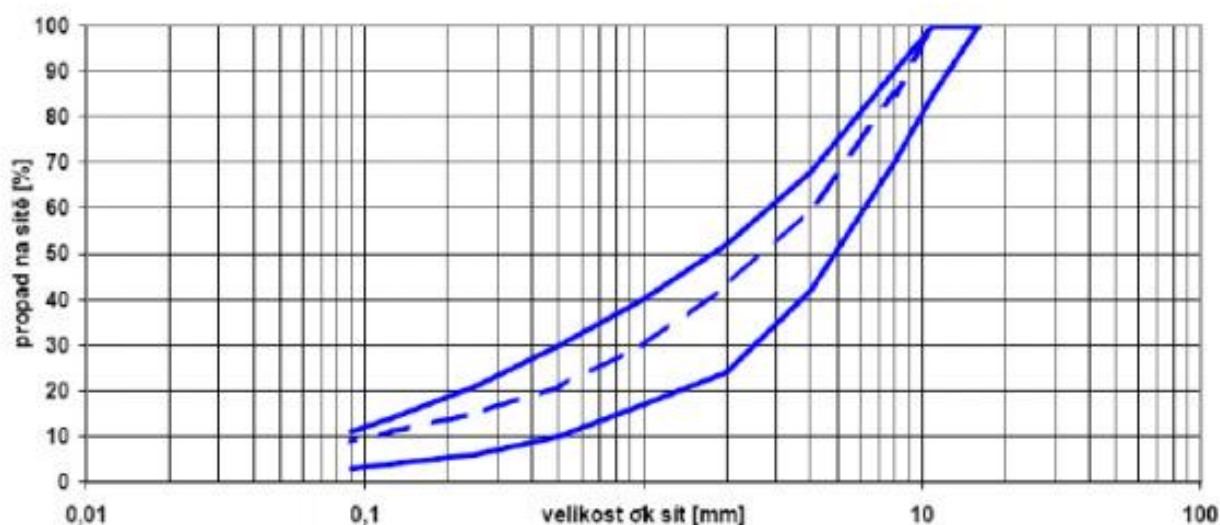
CH – směsi pro nemotoristické komunikace a chodníkové úpravy

Označení asfaltového betonu			
obrusné vrstvy		ložní vrstvy	
Nové	Staré (ČSN 73 6121)	nové	Staré (ČSN 73 6121)
ACO-8	ABJ II	ACL-16S	ABH I (0-16) – TP 109
ACO-8CH	ABJ II, III	ACL-16+	ABH I
		ACL-16	ABH II, III, OKS I
ACO-11S	ABS I (0-11) – TP 109	ACL-22S	ABVH I (0-22) – TP 109
ACO-11+	ABS I	ACL-22+	ABVH I
ACO-11	ABS II, III	ACL-22	ABVH II, III, OKH I
ACO-16S	ABH I (0-16) – TP 109	podkladní vrstvy	
ACO-16+	ABH I	ACP-16S	-
ACO-16	ABH II, III	ACP-16+	OKS I, II
		ACP-22S	OKH I (0-22) – TP 109
		ACP-22+	OKH I, II

Obr.1 Nové a staré označení asfaltových směsí podle kvalitativních požadavků a umístění vrstvy ve vozovce [32]

V případě vysoce zatížených vozovek je důležitá tloušťka vrstvy, která je zároveň závislá na největší frakci kameniva. Celková tloušťka vrstvy by měla být minimálně 2,5 x vyšší než největší frakce kameniva.

Pro návrh asfaltové směsi lze použít Fullerovu parabolu, která představuje nejtěsnější uspořádání zrn ve zhutněné kostře kameniva. Výsledná čára zrnitosti by měla vést 5 % - 10 % pod Fullerovou parabolou, aby došlo k zaklínění hrubších zrn kamenné kostry. Takto navržená čára zrnitosti ve směsi je ideální pro dosažení požadované mezerovitosti a prostoru pro pojivo. Směsi jsou tak odolnější proti tvorbě trvalých deformací.



Obr.2 Obor zrnitosti asfaltové směsi ACO 11+ [17]



Obr.3 Struktura povrchu ACO 11+ [vlastní]



Obr.4 Struktura povrchu ACL 22S [vlastní]

3.1.1.2. Asfaltový beton pro velmi tenké vrstvy – BBTM (Beton Bitumineux Très Minces) - ČSN EN 13108-2 ed.2

Asfaltový beton pro velmi tenké vrstvy je určen do obrusných vrstev, lze použít také pro provádění údržby a oprav silnic. Frakce kameniva jsou ve směsi odstupňovány tak, aby tvořily otevřené povrchové struktury. Jako pojivo se používají silniční asfalty, polymerem modifikované asfalty anebo asfalty modifikované pryžovým granulátem.

3.1.1.3. Asfaltový koberec mastixový – SMA (Stone mastix asphalt) ČSN EN 13108-5 ed.2

Tato směs byla vyvinuta v 70. letech v Německu pro vozovky, kde se používaly pneumatiky s hřeby. Asfaltový koberec mastixový je odolnější vůči zatížení, mrazovým trhlinám a trvalým deformacím, proces stárnutí je pomalejší. Pro tyto vlastnosti určen pro stavbu obrusných vrstev vysoce zatížených silničních a dálničních vozovek. Nemá plynulou čáru zrnitosti, nosnou kostru tvoří zejména nejhrubší frakce vysoce kvalitního kameniva, které vyplňuje tzv. mastix, což je směs asfaltu, drobného kameniva do 2 mm a další přísady, např. celulózová či akrylátová vlákna, používaná k zabránění stékavosti pojiva. V České republice se jako pojivo používají modifikované asfalty a jeho obsah v asfaltové směsi je 6 – 8 %. [17].

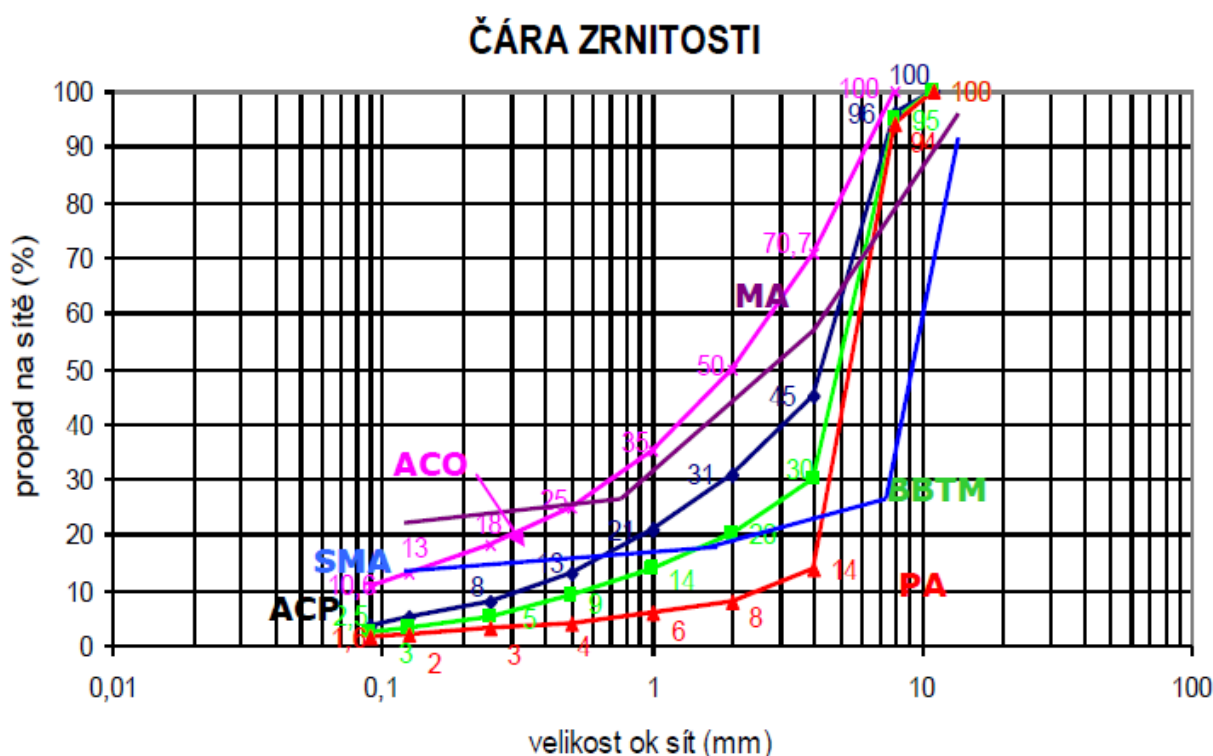
3.1.1.4. Asfaltový koberec drenážní – PA (Porous Asphalt) ČSN EN 13108-7 ed.2.

Asfaltový koberec drenážní je směs s vysokou mezerovitostí – 16 – 30 % (v Německu min. 23 %). Směs je pro své vlastnosti využívána pro stavby obrusných vrstev silničních a dálničních vozovek za účelem snížení hluku (až o 6 dB). Ve zhutněné směsi jsou mezery, které umožňují průchodu vzduchu za účelem snížení hluku. Čára zrnitosti není plynulá, typická je nosná kostra tvořená alespoň ze 70 % z kameniva hrubé frakce a menšího obsahu frakce 0/4mm a fileru. Jsou zde kladeny vysoké požadavky na ohladitelnost, tvarový index a odolnost proti drcení kameniva. Jako pojivo se používá polymerem modifikovaný asfalt, anebo asfalt modifikovaný drcenou pryží. [17]

3.1.1.5. Litý asfalt – MA (Mastic Asphalt)

Litý asfalt je dvoufázová asfaltová směs (nemá prakticky žádnou mezerovitost), u níž veškeré dopravní zatížení přenáší pojivo. Na rozdíl od hutněných asfaltových směsí je obsah pojiva vyšší, a to 7,5 až 9,5 %. Kamenivo nevytváří kostru směsi ale je pouze kamenivem výplňovým - ve směsi se díky tomu prakticky nedotýká a nedochází tak ke tření mezi jednotlivými zrny. Aby směs mohla správně fungovat, jako pojiva se používají tvrdší silniční asfalty nebo polymerem modifikované asfalty. Směs dále obsahuje 25 – 35 % hm. vápencové

μούčky, která směs ještě více ztuhuje. Litý asfalt se využívá pro stavbu ohrusných vrstev, chodníků a mostních izolací. [17]



Obr. 5 Schematické znázornění čar zrnitosti vyjmenovaných asfaltových směsí [39]

3.2. ASFALTOVÉ POJIVO

Asfalt, v anglické terminologii a v Evropě označován jako *bitumen*, v americké terminologii *asphalt*, je jedním ze základních stavebních materiálů v silničním stavitelství.

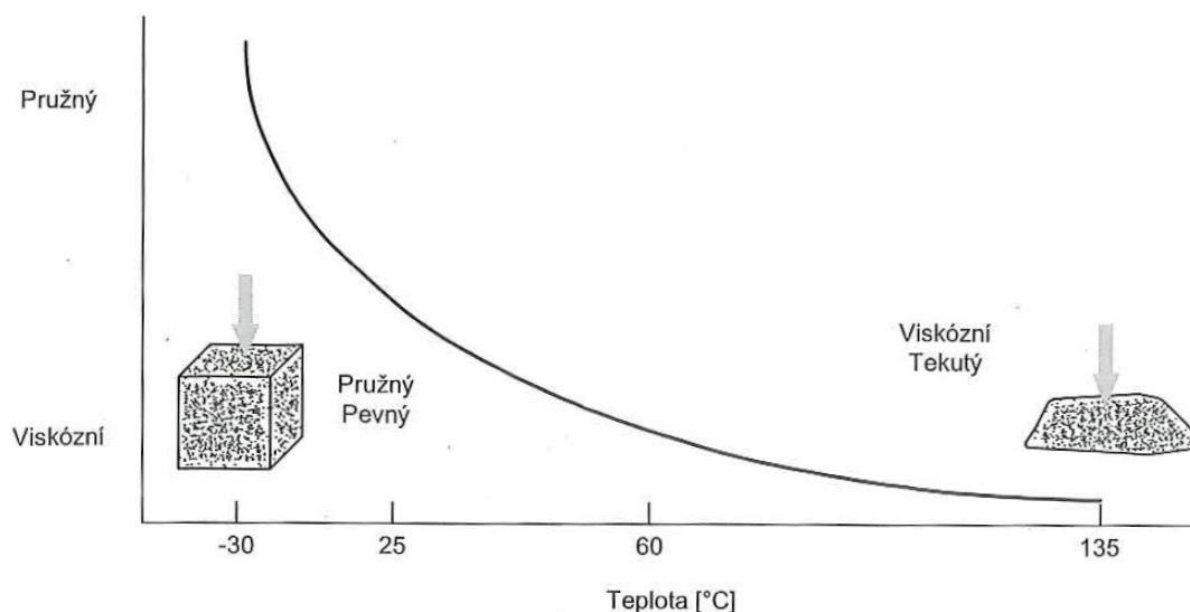
Jeho charakteristická vlastnost je velká termoplastičita. Jeho další vlastnosti jsou výborná odolnost proti vodě a mrazuvzdornost – asfalt se často používá jako hydroizolace, anebo pro asfaltobetonové vrstvy vozovek, asfaltové pásy, penetrační nátěry, asfaltové zálivky, asfaltové emulze. Všechny asfalty jsou hořlavé látky, kdy bod vzplanutí je nad teploty 230°C.

Asfalt je z chemického pohledu koloidní směs vysoce molekulárních uhlovodíků, ve které je zastoupeno široké spektrum různých organických sloučenin. Tyhle uhlovodíkové látky se rozdělují na dvě základní skupiny:

- Asfalteny: jsou tvrdé a křehké složky. V podobě kulovitých micel (částic) jsou rozptýleny v maltenické kapalině.
- Malteny: nebo také pryskyřice, jsou olejovité a měkce plastické látky

Asfalt obsahuje také malé množství síry, kyslíku, dusíku a stopové množství kovů jako je vanad, železo, nikl, vápník a hořčík [29].

Z fyzikálního hlediska je asfalt amorfni, visko-elastický materiál, jehož chování se mění v závislosti na teplotě. Při vysokých teplotách se chová jako kapalina, charakterizována viskozitou závislou na teplotě. Při nízkých teplotách se materiál chová jako pružná až pevná látka. Při teplotách mezi bodem lámavosti a bodem měknutí má asfalt visko-elastické chování.



Obr.6 Viskoelastické chování asfaltu [17]

Vlastnosti asfaltového pojiva jsou silně závislé na změně teploty. K ověřování vlastností asfaltů existuje několik laboratorních zkoušek – penetrace, bod měknutí, bod lámavosti a zkouška vratné duktility.

V základní terminologii lze podle původu asfalty rozdělit na přírodní, ropné a dehty.

3.2.1. Přírodní asfalty:

Přírodní asfalty se nacházejí volně v přírodě a jejich výskyt je poměrně vzácný. Díky svým výborným hydroizolačním a tmelícím vlastnostem byl přírodní asfalt používán již 6000 let př.n.l. nejstaršími civilizacemi v Sumeru, Mezopotámii, Číně či Egyptě. [17].

Nejnámější a zároveň největší naleziště přírodního asfaltu je na ostrově Trinidad známé jako jezero Pitch Lake. Bylo objeveno v roce 1595 Angličanem Walterem Raleighem. Tento asfalt je těžen z jezera a následně se čistí zahříváním přibližně na 160°C a poté prochází síty, aby byl zbaven organických a mechanických nečistot [17]. Tento přírodní asfalt

je známý jako Trinidad Epuré. Je velmi tvrdý a pro silniční stavitelství se používá pouze jako přísada do ropných asfaltů.



Obr.7 Pitch Lake, Trinidad [36]

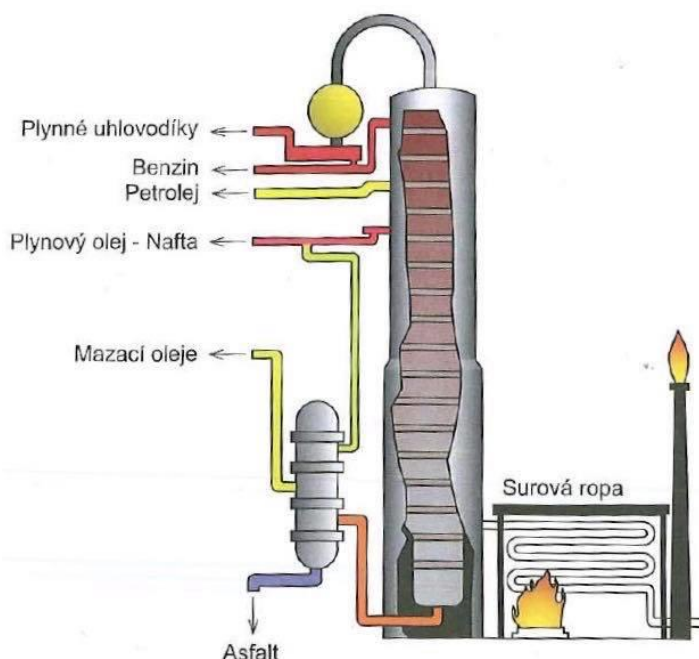
V Evropě je nejznámější přírodní naleziště asfaltů v Albánii, v oblasti Selenica.

3.2.2. Ropné asfalty:

Ropný asfalt je posledním produktem při destilaci vybraných druhů surové ropy, která se provádí v rafineriích smícháním nejtěžších frakcí. Elementární složení běžných druhů rop se pohybuje v rozmezí 84 – 87 % uhlíku, 11 – 14 % vodíku, 4 % síry a 1 % kyslíku a dusíku (% hm.). Ostatní prvky jsou v ropách zastoupeny pouze ve stopovém množství. V závislosti na nastavení jednotlivých rafinerií z jedné tuny ropy vznikne cca 40 kg asfaltu. [17]

Ropa vznikla přirozeně z organické hmoty před miliony let za různých podmínek teploty a tlaku. Podle chemického a látkového složení lze rozlišit tři základní druhy rop:

- asfaltické ropy - obsahují větší množství asfaltických látek
- poloasfaltické ropy (též poloparafinické) s malým obsahem asfaltických látek
- neasfaltické (parafinické) s nepatrným množstvím asfaltických látek. [17]



Obr. 8 Zjednodušené schéma frakční destilace ropy [17]

3.2.3. Dehty

Dehet nebo též tér, je směs několika set chemických sloučenin. Je to hustá vysokoviskózní olejovitá kapalina tmavohnědé až černé barvy. Dehty vznikají při tepelném rozkladu uhlí, dřeva, rašeliny a dalších rostlinných materiálů při omezeném přístupu vzduchu. Mají nízký bod měknutí, nižší bod vzplanutí a jsou méně trvanlivé než asfalty. Dehty mají karcinogenní účinky a z toho důvodu se v dnešní době již ve stavebnictví nepoužívají.

3.2.4. Modifikované asfalty

Modifikované asfalty jsou asfalty, jejichž reologické vlastnosti byly účelně změněny přidáním aditiv, jež změnily jejich chemické nebo fyzikálně-mechanické vlastnosti, např.:

- Zlepšení přilnavosti asfaltu ke kamenivu
- Zlepšení odolnosti vůči vzniku trvalých deformací
- Snížení teplotní citlivost a jeho křehkosti v oblasti nízkých teplot → snížení bodu lámavosti
- Zvýšení bodu měknutí → rozšíření oboru plasticity
- Snížení stárnutí asfaltu

Obecně lze říci, že modifikací asfaltů se zlepšují jejich nízkoteplotní a vysokoteplotní vlastnosti. Modifikované asfaltové směsi jsou odolnější vůči trvalým deformacím anebo tvorbě mrazových trhlin. Výsledné ovlivnění vlastností závisí na mnoha faktorech, jako je množství a druh aditiv, polymerů, druh asfaltu atd., čímž se v práci budu zabývat. Mezi

chemická činidla řadíme především přírodní kaučuk, syntetické polymery, vosky, síru a určité organokovové sloučeniny. Za modifikátory asfaltu se nepovažují různé katalyzátory oxidace jako je chlorid železitý, kyselina fosforečná, oxid fosforečný [30].

Běžně používané polymery pro modifikace asfaltu v ČR i ve světě můžeme rozdělit do dvou skupin:

1) Termosetické polymery

Při zahřátí nevratně tvrdnou, pro modifikaci nejsou vhodné a pro modifikace asfaltových směsí se moc nepoužívají

2) Termoplastické polymery

Při zahřátí se stávají reversibilně neboli vratně plastickými. Za vysokých teplot se vmíchávají do asfaltů. Výsledná směs je díky nim vysoce viskózní. Dělí se dále na elastomery a plastomery.

Mezi nejčastěji používané elastomery k modifikaci asfaltů patří styren-butadien-styren (SBS), označovaný také jako termoplastický kaučuk. Způsobuje primárně nárůst tuhosti a zvýšení teploty bodu měknutí. Dalšími, dnes už ne tolik používanými elastomery, jsou styren-butadien (SBR). Nevýhodou těchto modifikátorů je náchylnost k dekantaci, tj. vypadávání polymeru z modifikovaného asfaltu.

Mezi plastomery vhodné pro modifikaci řadíme polypropylen (PP), polyetylen (PE) a etylen-vinyl-acetát (EVA) [30].

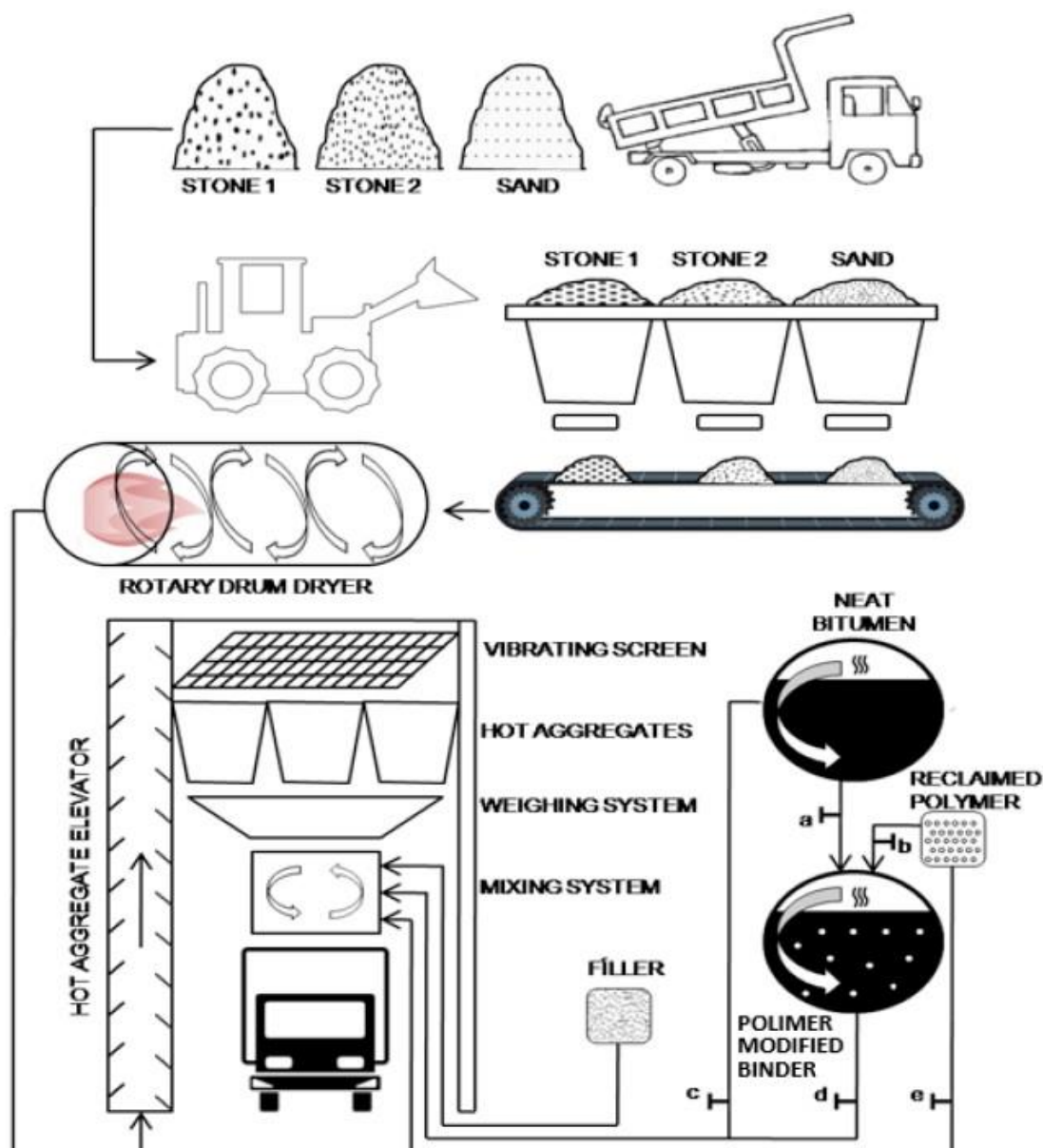
Všechny tyto polymery mohou zlepšit teplotní vlastnosti asfaltových směsí, avšak každá z nich má navíc své specifické vlastnosti. Termoplastické elastomery mají například největší vliv na elastické vlastnosti směsi, zvyšují tak odolnost proti únavě. Plastomery naproti tomu primárně zvyšují tuhost a odolnost vůči trvalým deformacím [31].

Polymerem modifikované asfalty se označují zkratkou PmB s rozmezím penetrace při 25 °C a minimálním bodem měknutí dle ČSN EN 14023.

Existují dva způsoby výroby modifikovaných asfaltových pojiv:

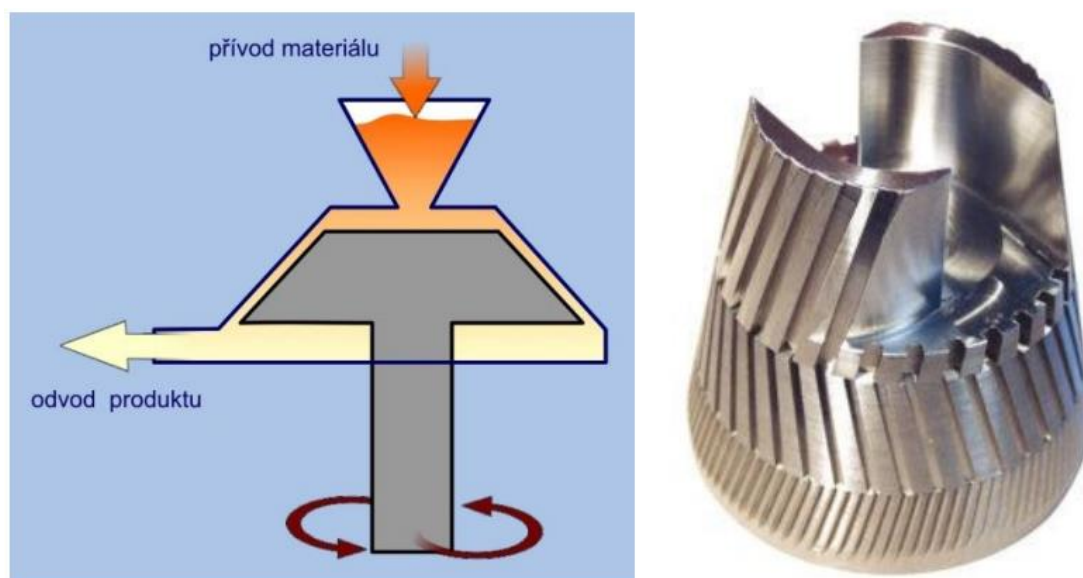
Suchý způsob: Název je přenesený z anglického výrazu „dry proces“. Částečky polymerů se přidávají přímo do míchačky obalovny ve stejné fázi jako kamenivo. (křivky „c“ a „e“ na Obr. 31)

Mokrý způsob: Název přenesený z angl. „wet proces“. Při modifikaci nejdříve dojde ke smíchání polymeru s asfaltovým pojivem. Ty jsou míchány v míchačce za vysokých teplot tak dlouho, aby došlo k chemickým a fyzickým interakcím. Tak vznikne modifikovaný asfalt (pojivo, např. PmB Polymer modified bitumen). Teprve potom následuje smíchání s kamenivem. (křivky „a“, „b“ a „d“ na Obrázku).



Obr. 9 Schéma procesu výroby modifikované asfaltové směsi [31]

Výroba polymerem modifikovaných asfaltových pojiv probíhá v koloidním mlýnu za vysoké teploty a smykového napětí. Na Obrázku 10 je znázorněn koloidní mlýn, kde hlavní částí přístroje je kuželovitý stator, ve kterém se otáčí rotor umístěný na svislé hřídeli. Štěrbina, kterou je materiál protlačován, je velmi malá a rotor se otáčí velkou rychlostí. Materiál je rozdrcen především třením, v menší míře nárazy. Následně odchází výpustným otvorem [30].



Obr.10 Koloidní mlýn [30]

3.2.4.1. CRmB - Crumb Rubber Modified Bitumen

V některých zemích se asfaltová pojiva modifikují pryžovým granulátem získaného zpracováním použitých pneumatik. Takto modifikované pojivo se označuje jako CRmB (Crumb Rubber Modified Bitumen). Jedná se o metodu modifikace asfaltových pojiv recyklovanými drcenými, popř. rozemletými pneumatikami. Takto zpracovaný materiál se přidává do asfaltových směsí a tím zlepšují jejich vlastnosti.



Obr.11 Míchací zařízení vyrábějící CRmB přímo na obalovně [17]

CRmB vzniká suchým anebo mokrým způsobem modifikace:

Suchý proces:

Jedná se o technologii pocházející ze Švédska. Při využití této technologie je pryžový granulát zrnitosti 0/1 mm a 1/4 mm přidáván do míchačky obalovny ve stejné fázi jako kamenivo. Používají se silniční asfalty gradace 70/100 nebo 50/70 podle ČSN EN 12591 a kamenivo stejné zrnitosti jako pro směs asfaltového koberce mastixového podle ČSN EN 13108-5 se zrnitostí 0/11 mm. Během suchého procesu je vyrobena asfaltová směs modifikovaná pryžovým granulátem

Mokrý proces:

V ČR označovaný jako asfalt modifikovaný pryžovým granulátem (zkratka CRmB). Tento postup se v ČR označuje jako „gumoasfalt“ a je světově nejrozšířenější technologií zpracovávající pryžový granulát v asfaltových směsích. Během mokrého procesu je vyrobeno asfaltové pojivo modifikované pryžovým granulátem.

ČSN 65 7222-2 rozlišuje základní typ CRMB s typickým obsahem pryže 5 % až 15 % z celkového pojiva, které jsou vhodné k výrobě asfaltových směsí dle výrobních norem EN 13108-1, EN 13108-2, EN 13108-5 a ČSN 73 6121 místo silničních asfaltů jako pojiva se zlepšeným chováním.

Druhým typem je CRMB se zvýšenou viskozitou a s typickým obsahem pryže 15 % až 25 % z celkového pojiva vyráběný převážně ve speciálních mísicích zařízeních na obalovnách asfaltových směsí. Typ CRMB se zvýšenou viskozitou se z důvodu možných obtíží při přepravě a skladování přednostně vyrábí na obalovně asfaltových směsí. Je nestabilní a nevhodný k dlouhodobé přepravě a skladování.

Vznik silničních pojiv s přídavkem pryžového granulátu se datuje do konce třetího desetiletí 20. století a pochází z USA. Tam se pro tuto technologii používá název „Asphalt Rubber“, popř. „Rubberized Asphalt“. Tato technologie se nejčastěji využívá také v Portugalsku, Švédsku, Španělsku, Brazílii a Číně. V USA má tato technologie různá využití. V některých částech USA se používá především do konstrukcí vozovek s vysokým dopravním zatížením, snižování hluku vlivem dopravy anebo k eliminaci mrazových trhlin [34].

Směs používaná při výrobě pneumatik obsahuje různé složky, z nichž hlavní představují syntetický a přírodní kaučuk. Po přidání pryžového granulátu získaného zpracováním ojetých pneumatik do silničního asfaltu výrazně vzroste dynamická viskozita pojiva. Reakce silničního asfaltu s pryžovým granulátem je závislá zejména na teplotě, době trvání reakce, na intenzitě míchání částic granulátu s asfaltem, chemickém složení asfaltu i granulátu, způsobu výroby pryžového granulátu a na velikosti a tvaru částic pryže [18].

Asfaltové směsi s asfaltovým pojivem modifikovaným pryžovým granulátem má výhody jako např.

- Vyšší odolnost vůči trvalým deformacím
- Vysoká odolnost vůči únavě a nižší stárnutí pojiva
- Zvýšená odolnost proti trhlinám
- Kratší brzdná dráha a snížení rizika smyku na komunikacích z tohoto materiálu
- Delší životnost anebo snížení tloušťky obrusné vrstvy
- Snížení hlučnosti vozovek
- Materiálové využití odpadní pryže z ojetých pneumatik

Ve své diplomové práci se zabývám možností modifikace asfaltových směsí pomocí odpadních plastů, resp. nízkohustotním polymerem ve formě granulátu. Proto v následujících kapitolách popíšu celkový problém s tímto recyklovaným materiálem, jeho vlastnostmi a potencionální využití v silničním stavitelství. Popíšu zde také již prokázané výzkumy použití LDPE do asfaltových směsí v různých částech světa, včetně mých dosavadních zkušeností v silniční laboratoři na polytechnické univerzitě ISEC v Portugalsku.

3.3. PLASTY

Plasty jsou syntetické a polosyntetické polymerní materiály vyráběné z rafinované surové ropy, které obsahují nejrůznější aditiva. Historie plastů sahá až do poloviny 19. století, kdy Angličan Alexandr Parks vynalezl nitrát celulózy. Prvním ryze syntetickým plastem byl bakelit, vynalezený roku 1909. Postupem času vznikaly další druhy plastů jako PVC, PS, PE, atd. Plasty se podle molekulárního složení dělí na termoplasty, které jsou od určité teploty plastické a po vychladnutí jsou opět pevné a reaktoplasty, které po tepelném vytvrzení již nelze zpětným ohřátím vrátit do původního stavu. [1]

Jejich vlastnosti jako je vysoká hodnota bodu tání, vysoká teplota rozpadu anebo odolnost vůči UV záření poskytuje velké množství benefitů. Díky těmto vlastnostem má velmi dlouhou životnost, a tak setrvává v životním prostředí stovky let, a tím ho zatěžuje.

Problém s plastem se neustále zvětšuje, podle světových průzkumů bude v roce 2050 v oceánech víc plastů než ryb. Celosvětovým problémem s plasty byly postiženy v neposlední řadě zvířata, která plasty nerozeznají, a tak je často považují za potravu, což většinou vede k jejich úmrtí, a tím narušování potravinového řetězce a celkového ekosystému.



Obr.12 Důsledek znečištění moří plasty – racek s plnými útroby odpadního plastu [9]

Největší podíl těchto odpadů tvoří průmyslové plasty a obaly, plastové tašky, sáčky a plastové lahve [4]. V důsledku toho je stále větší zájem o recyklaci odpadních plastů včetně použití do stavebních materiálů [3]. Po určitou dobu se recyklované plasty v oblasti stavebních výrobků využívaly primárně ve výrobcích z betonu a pro zdění, jako jsou levné cihly pro bytovou výstavbu v rozvojových zemích a v nekonstrukčních betonech, ale v poslední době jsou recyklované plasty využívány také jako náhrada kameniva, náhrada asfaltů a k modifikaci pojiva v asfaltových směsích při výstavbě silnic [4]. Ačkoliv náhrady kameniva a asfaltu nabízejí způsob k znovuvyužití plastů, které by jinak skončily na skládce a vedou tedy k snížení spotřeby nových surovin. Modifikace pojiva rovněž nabízí potenciál ke zlepšení vlastností asfaltů a tedy i vozovek.

Existuje velké množství polymerů, jejichž vlastnosti se liší hlavně chemickým řetězcem, molekulové hmotnosti, prostorovém uspořádání atomů a molekul v řetězci makromolekuly, stupni krystalinity, a celkově jejich molekulární a nadmolekulární strukturou [1]. Pokud se uvažuje o použití recyklovaných plastů při výrobě asfaltových směsí, pro volbu recyklovaného plastu je primárně určující jeho teplota tání, která je u různých druhů polymerů výrazně odlišná. Z tohoto důvodu existují důležité rozdíly pro použití recyklovaných plastů při výrobě asfaltových směsí ve formě modifikátoru, náhradou kameniva či asfaltu.

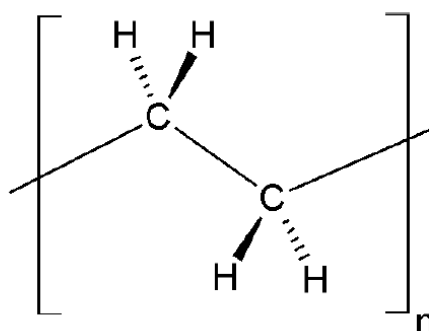
Ročně se v Evropě vyprodukuje kolem 25 mil. tun plastových odpadů. Průměrný Čech přitom vyprodukuje až 100 kg plastů z rok [9]. Největší část plastových odpadů v životním prostředí tvoří plastové lahve od nápojů, vyráběné z polyetylén-tereftalátu (PET) a jednorázově použité nákupní tašky, které jsou vyráběny z polyetylénu s nízkou (LDPE – „low density polyethylene“) nebo vysokou hustotou (HDPE – „high density polyethylene“). Bod

tání polyetylén-tereftalátu (PET) je přibližně 260 °C a bod tání polyetylénu dle hustoty od 115 °C do 270 °C, přičemž typická teplota při výrobě asfaltu je 160 – 180 °C. Z tohoto důvodu PET a řada výrobků z LDPE/HDPE nemohou být přímo použity jako náhrada pojiva a modifikátory při výrobě asfaltu. To zdůvodňuje důležitý rozdíl mezi plastem s nízkým bodem tání užitým jako náhrada pojiva (a potenciálního modifikátoru) a plastem s vysokým bodem tání vhodným do asfaltové směsi nebo jako náhrada kameniva.

V mé práci jsem se zaměřila na náhradu pojiva a modifikaci asfaltového pojiva při použití komerčně dostupných recyklovaných plastů s nízkým bodem tání. Jako modifikátor jsem zvolila nízkohustotní polyethylen (LDPE), a to především kvůli jeho nízké teplotě tání v porovnání s ostatními polymery a také proto, že je celosvětově nejvíce používaným druhem polymeru jak v domácnostech, tak v průmyslovém odvětví. O jeho vlastnostech budu pojednávat v následující kapitole.

3.3.1. POLYETHYLÉN

Polyethylen patří do skupiny termoplastů. Termoplast je druh plastu, který je od určité vyšší teploty plastický – tvárný až kapalný. Po ochlazení se stane pevným, přičemž tyto teplotou dané změny tvárnosti mohou nastávat opakovaně. Je to polymer složený z lineárních makromolekul s dlouhým řetězcem. Řetězce jsou drženy u sebe pouze mezimolekulárními interakcemi (van der Waalsovými silami). Při zahřívání termoplastu tyto interakce slábnou a polymer „měkne“. Při dalším zvyšování jeho teploty může znovu zkapalnět. Jeho vlastnosti jsou silně závislé na molekulové hmotnosti, prostorovém uspořádání atomů a molekul v řetězci makromolekuly a stupni krystalinity v pevném stavu. Tyto vlastnosti jsou dány způsobem výroby polyetylénu. Molekulární vzorec PE je na obrázku [14].



Obr.13 Molekulární vzorec polyetylénu

První PE připravil v roce 1898 chemik Hans von Peckmann zahřátím diazometanu. Průmyslově použitelná syntéza PE byla objevena náhodou až v roce 1933 chemiky E. Facettom a R. Gibsonem ve společnosti ICI Chemicals. Ve směsi ethyleny a benzaldehydu po vytvoření vysokého tlaku 140 – 170 MPa se na vnějších stěnách autoklávy vytvořila bílá

vrstva polyethylenu. Protože reakce byla iniciována kyslíkem, který do aparatury pronikl, nedařilo se tento experiment úspěšně reprodukovat. Až dva roky poté se podařilo Michaelovi Perrinovi připravit dostatečně vysokomolekulární homopolymer ethylenu s vlastnostmi plastu polymerací ethylenu v plynné fázi za tlaku 100 – 200 MPa při teplotě 150 – 400 °C za přítomnosti iniciátoru, kyslíku. Ten položil základy pro průmyslovou výrobu polyethylenu (PE), která začala v roce 1939. [1].

Dnes se vyrábí mnoho druhů polyethylenu. Liší se molekulární a nadmolekulární strukturou (konformace molekul, jejich délka, prostorové uspořádání merů v řetězci a stupeň krystalinity). V případě PE má na rozmanitost vlastností vliv molární hmotnost a míra větvení řetězců, s čímž souvisí i rozdíly v obsahu krystalické fáze. Na základě různé krystalinity má každý typ PE jinou hustotu a právě hustota polymeru se spolu s charakterizací řetězce stala stavebním kamenem pro třídění polymerů. Typy polyethylenu se podle hustoty, která se pohybuje mezi 0,888g/cm³ a 0,957g/cm³ dělí na několik druhů. Nejpoužívanější z nich je nízkohustotní polymer LDPE, polymer se střední hustotou MDPE a lineární vysokohustotní polymer HDPE. Obalové materiály se vyrábí ze všech těchto druhů polyethylenu, ale převažuje nízkohustotní polymer LDPE a polymer se střední hustotou MDPE. Jeho nízká cena je způsobena relativně snadným a levným získáváním petrochemických surovin, ropy a zemního plynu, ze kterých jsou monomery PE vyráběny.

3.3.2. NÍZKOHUSTOTNÍ POLYETHYLEN:

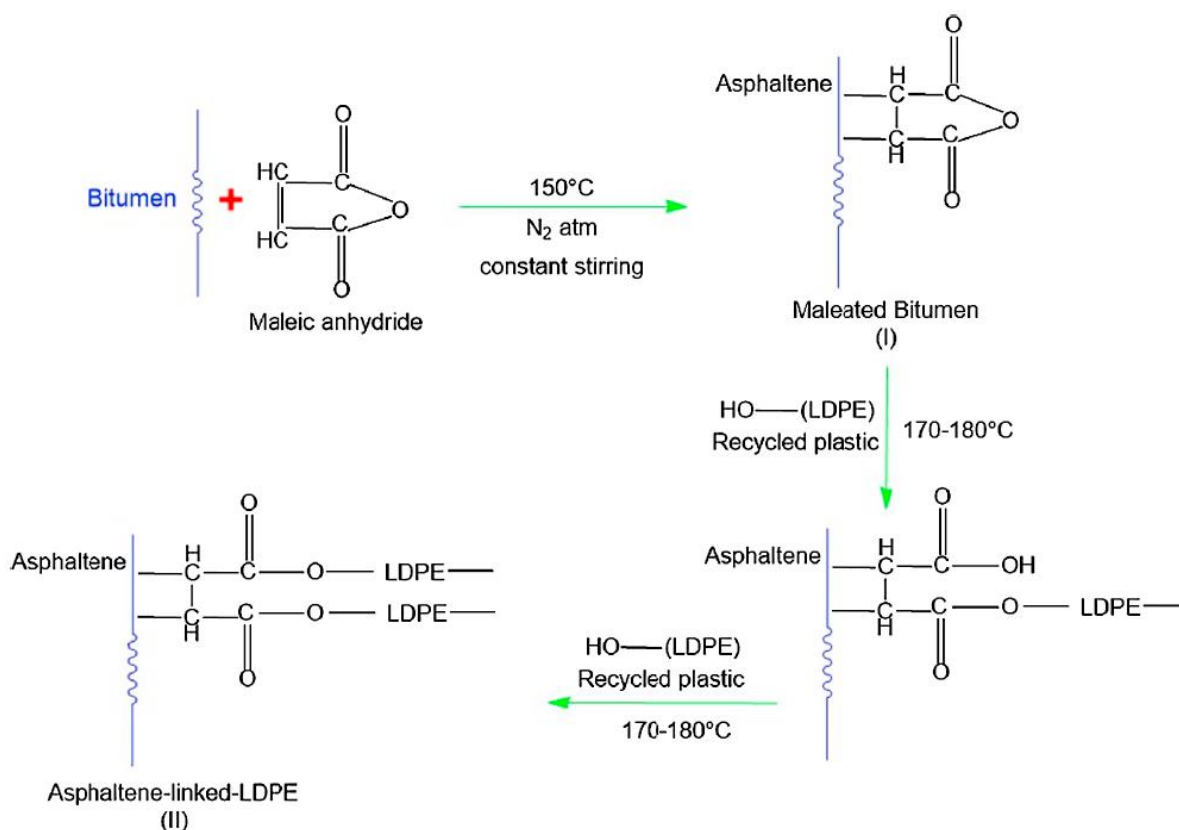
Nízkohustotní polyethylen (LDPE), někdy označovaný jako polyethylen s nízkou hustotou (PE-LD) je plast průmyslově vyráběný radikálovou polymerací za extrémně vysokého tlaku (100 – 210 MPa) a teploty okolo 200 °C. Má silně rozvětvenou strukturu, díky níž má vysokou ohebnost. V porovnání s ostatními typy polyethylenu má tedy vyšší transparentnost a tažnost. Mezi jeho kladné vlastnosti dále patří pružnost, odolnost prostředí, pevnost ve smyku a dobré tepelné vlastnosti. Za normálních podmínek je LDPE mléčně zakalený a míra průhlednosti klesá s rostoucím stupněm rozvětvení. [1].

Díky své zpracovatelnosti a cenové dostupnosti je polyethylen s nízkou hustotou používán všemi technologiemi zpracování plastů. Jedná se o technologie vytlačování, vstřikování, tvarování a vyfukování. Aplikační technologie vyžadují především snadnost zpracování, inertnost, těsnost a nenavlhavost, proto je v dnešní době LDPE hojně používaným polymerem. Používá se pro vyfukování folií, a to díky fyzikálním vlastnostem jako měkký, ohebný a pevný materiál, což je výsledkem rozvětvené struktury [1]. Různé fólie se používají pro balení potravin, osobní hygieny, hydroizolace, reklamní materiály, paletizační folie, aj.

3.3.3. PŮSOBENÍ LDPE A ASFALTU

Na rozdíl od syntetických polymerů, faktory, které řídí viskoelastické chování asfaltových pojiv nejsou dobře definovány především kvůli jejich nejasné molekulární struktuře. Chemické složení asfaltového pojiva ovlivňuje jeho životnost, tuhost a viskoelastické vlastnosti. Chemické složení asfaltového pojiva bylo vysvětleno v kapitole 2.2.

Od začátku dvacátého století bylo použito několik různých metod pro studium přesnějšího určení struktury asfaltového pojiva. Hlavní strukturální složkou asfaltu je asfaltén, a ten má významný vliv na viskoelastické chování a dalších vlastnostech asfaltu. Na viskoelastické vlastnosti asfaltového pojiva mají vliv také pryskyřice (maltény) [29].



Obr.14 Schéma chemické interakce mezi asfaltovým pojivem a recyklovaným LDPE [29]

Spolupůsobení asfaltového pojiva a polymeru je obtížné kvůli velkému rozdílu v molekulové hmotnosti, struktuře a viskozitě. Pokud je hustota polymeru a asfaltu velmi rozdílná, nemusí ke spojení těchto složek vůbec dojít a složky se od sebe separují. Pro získání homogenní modifikované asfaltové směsi mají významnou roli také velikosti polymerních částic. Pokud jsou částice polymeru dostatečně malé, Brownův pohyb je schopen kompenzovat gravitační a separační pohyb a částice stabilizuje v asfaltovém pojivu. Na druhou stranu, částice větší, než $10\ \mu\text{m}$ efektivně zvyšují viskozitu asfaltu. Polymery

s vysokou molekulovou hmotností mohou prudce zlepšit vlastnosti asfaltu, avšak se zvyšující se molekulovou hmotností polymeru klesá kompatibilita asfaltu s polymerem. Při vyšších teplotách může neslučitelnost asfaltového pojiva s polymerem vést až k oddělení fáze. Z kinetického hlediska je spojení těchto dvou fází stabilní při nízkých teplotách. Pokud však teplota stoupne nad kritickou, tyto polymery mají tendenci segregovat, což znamená velký problém při skladování takto modifikované asfaltové směsi [29].

Celkové spolupůsobení asfaltu s polymerem závisí na několika faktorech. Je to množství a velikost částic asfaltenů a maltenů, množství a velikost molekul polymeru.

Reakce silničního asfaltu s nízkohustotním polymerem je celkově závislá především na teplotě, době trvání reakce, době míchání nízkohustotního polymeru do asfaltové směsi, dále chemickém složení asfaltu, chemickém složení drti nízkohustotního polymeru a také na velikosti částic nízkohustotního polymeru. Silniční asfalty s nižší molekulovou hmotností a větším poměrem malténů vykazují rychlejší reakci s polymerem LDPE. Maltény tvoří tekutou fázi koloidního systému pojiva. Po zamíchání začne polymer reagovat s asfaltovým pojivem tak, že vlákna LDPE začnou absorbovat maltény, tedy lehké frakce asfaltu na sebe. Tato interakce mezi asfaltem a polymerem je pouze „spojení“ těchto dvou látek dohromady, přičemž se nejedná o chemickou reakci. Přidáním nízkohustotního polymeru do asfaltové směsi vzroste celková viskozita směsi, podobně jako po přidání aditiv ve formě vláken [29].

3.3.4. RECYKLACE

Recyklace je proces nakládáním s odpady, který vede k jeho opětovnému využití. Recyklace umožňuje šetřit obnovitelné i neobnovitelné zdroje a většinou díky ní snižuje zátěž na životní prostředí. Hlavní přínosy recyklace jsou snížení těžby nových surovin, využití odpadu namísto jeho uložení na skládku a celkové šetření životního prostředí. Existuje několik forem provedení recyklace plastů, z nichž nejběžnější jsou

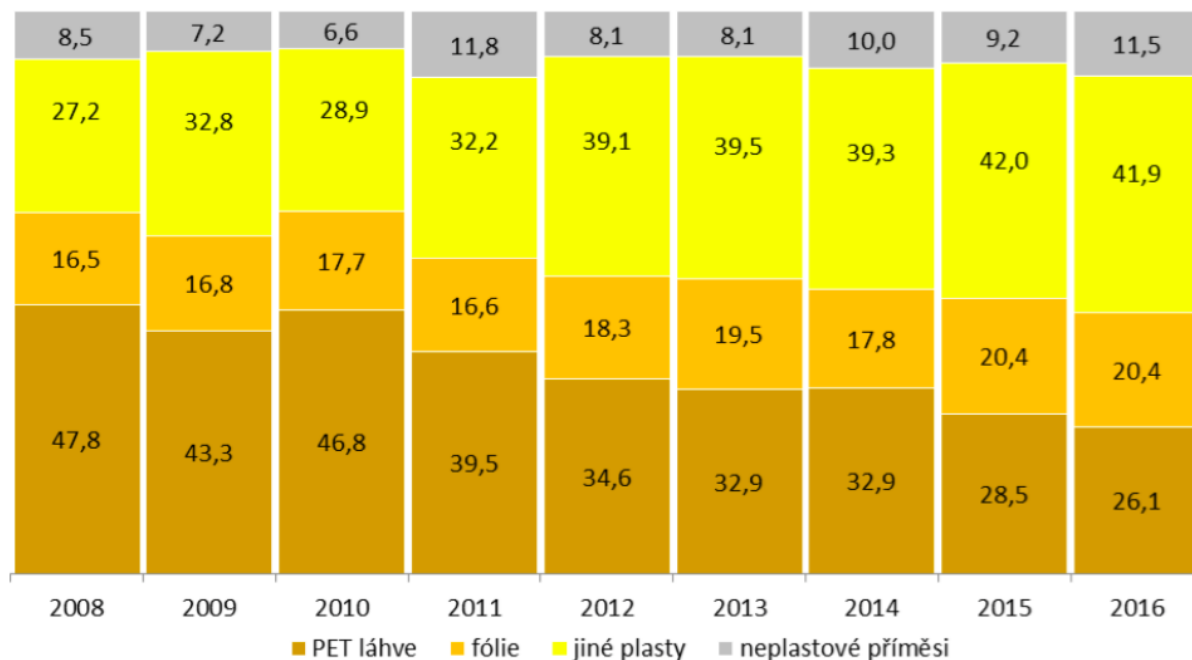
- Úprava a zpracování polymerního odpadu na druhově jednotný recyklát
- Přetváření odpadu na tvarované dílce či polotovary
- Využití jako aditiva do stavebnin

Většina polymerů se rozkládá velmi snadno pod vlivy jako je světlo, teplo, působení vlhka. Proto jsou polymerní produkty navrhovány a chemicky stabilizovány tak, aby byla zapříčiněna možnost jejich dlouhodobého užívání. Pouze u mála u nich platí, že nejsou recyklovatelné a ty končí na skládkách. Na základě agentury Enviromental Protection Agency (agentura pro ochranu životního prostředí) tvoří plasty 21 % celkového pevného odpadu. [8]

První požadavek na recyklaci plastů vyvstal v 80. letech 20. století. Do roku 1994 se recyklovaly plasty pouze ze 6,4 % z celkového množství recyklovatelného odpadu. V současné době se recykluje velké množství různých druhů plastů, z nichž LDPE zaujímá 64 % ze všech druhů plastů.

V České republice se ročně vytrídí 69 % plastových obalů, z nichž se podaří recyklovat cca 50 % [10].

Graf 5: Vývoj skladby tříděného plastu z obecních nádobových a pytlových sběru v ČR v letech 2008 až 2016 (vážené roční průměry; hodnoty jsou uvedené v % hm.). Zdroj: EKO-KOM.



Obr. 15 Složení průměrného kontejneru na plasty [10]

Polyethylen je recyklovatelný plast. Lze skládkovat i spalovat, aniž by se uvolňovaly látky výrazně nebezpečné životnímu prostředí. Pro životní prostředí je ale nebezpečný převážně velkým množstvím, kvůli kterému se ve většině zemích nedá 100 % recyklovat. Tak často končí na skládkách, v horších případech se dostane do přírody, kde si ho ve formě různých folií a sáčků zvířata pletou s potravou. V případě skládkování se postupem času rozloží na mikročástice v podobě mikroplastů. Mikroplasty jsou úlomky plastů o velikosti od 100 nanometrů až po 5 milimetrů, které se při rozkládání dostanou do země, podzemní vody a dostávají se tak i do trávicího ústrojí lidí. Sedimenty na dně oceánů ukazují, že míra usazování mikroplastů se zdvojnásobuje přibližně každých 15 let již od poloviny 20. století [11].

3.3.4.1. RECYKLACE LDPE V ČR

Obsah kontejnerů je nejdříve odvezen na dotřídovací linku, kde dochází k roztřídění jednotlivých druhů plastů. Takto vytríděný plastový odpad je slisován do balíků a odvážen do různých recyklačních firem.

Jelikož není o způsobu dalšího zpracování mnoho literatury, popíšu postup firmy SUEZ Využití zdrojů a.s., která mi k mojí práci poskytla materiál ve formě drti LDPE a informace o tom, jak proces recyklace funguje. Firma SUEZ Využití zdrojů a.s. je jednou z předních firem

pro odpadové hospodářství v České republice. Snaží se minimalizovat produkci odpadů, především těch nerecyklovatelných. Využívá 40 moderních technologií na zpracování odpadů a ročně zpracuje 145 000 t odpadů. V Němčicích nad Hanou firma vybudovala recyklační linku na zpracovávání plastů, a to se zaměřením na folie vyrobené z LDPE.

Odpadový materiál ve formě slisovaných balíků je dále tříděn a zbavován nežádoucích odpadů, které obsahují např. jiné polymery, anebo odpadní materiál. Vytříděné LDPE folie jsou dávkovány na pásový podávací dopravník, nad kterým je magnetický separační detektor, který zachytí případný kovový odpad. Dopravník dopravuje folie až do násypky drtiče, kde dochází k rozvolnění a následnému drcení materiálu na frakci s maximální velikostí zrna 35 mm. Požadovaná frakce je zajištěna sítí, kterým následně projde nadrcený materiál. Následně je vytříděný materiál pomocí dalšího pásového dopravníku dopraven do sestavy na praní drtě. V úvodní části technologické sestavy pro praní drtě je řazena předpírací odstředivka na principu šnekového dopravníku, ve kterém je materiál oplachován vodou. Během postupu na dopravníku dochází ke tření částic materiálu vzájemně o sebe, o stěny dopravníku a o povrch šroubovice šneku, takže jsou současně uvolňovány nečistoty z povrchu drti. Následuje rozplavovací nádrž, ve které dochází k rozplavení drti a sedimentaci nečistot. Polyethylenová drť zůstává na hladině, kde je promíchána a rozplavována systémem pádel, přičemž dochází k dalšímu uvolňování nečistot. Na výstupu z rozplavovací nádrže přechází drť přepadem do další odstředivé pračky, ve které dochází k dalšímu otěru nečistot. Následuje další rozplavovací nádrž pro zvýšení účinnosti separace nečistot. Dalším prvkem je opět odstředivá pračka pro oplach materiálu. Na závěr praní je zařazeno odvodňovací zařízení, které stlačuje materiál směrem k výstupu zužující se šroubovice a dochází k vypuzení vody z drti. Odvodněný materiál je pneumatickým dopravníkem převeden do zásobního sila, ze kterého je pásem dávkován do aglomerátoru.

Následuje další úprava materiálu až do výsledného produktu – granulí LDPE. Tu zde popisovat nebudu, jelikož jsem pro svou práci použila drť LDPE, nikoliv granule, resp. výsledný produkt recyklační linky [1].

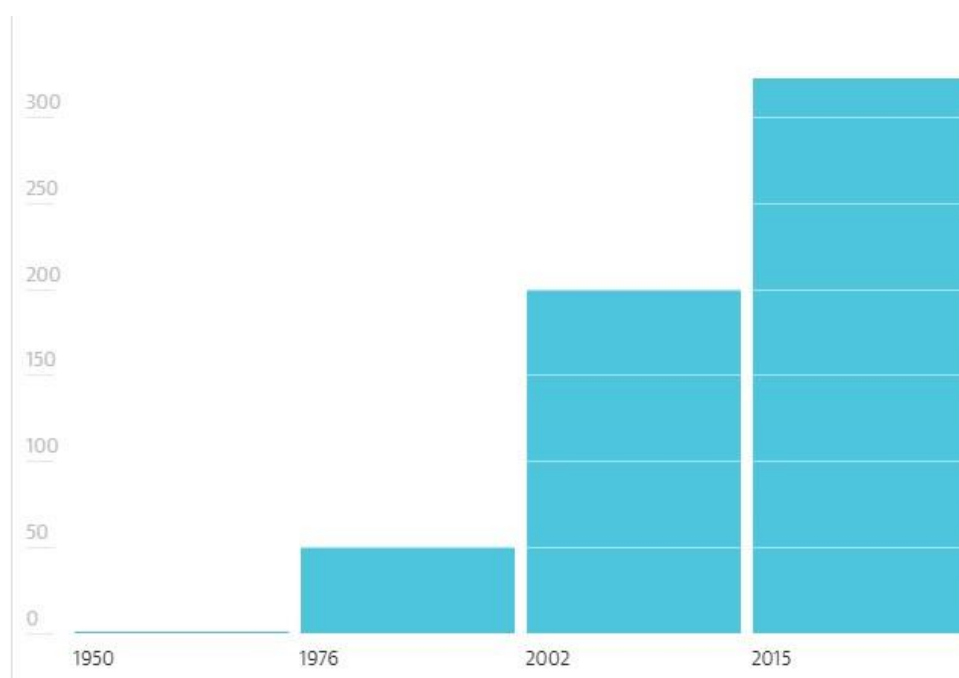


Obr. 16 Linka na mletí, praní a sušení PE folií: 1 – dopravníkový pás, 2 – nožový mlýn, 3 – sedimentační vana s čelistmi, 4 – čistička (filtrace vody s chemickou úpravou), 5 – odvodňovací šnek, 6 – ždímací šnek, 7a – aglomerátor a silo, 7b – regranulační linka [1]

3.3.5. PLASTY A JEJICH POUŽITÍ VE SVĚTĚ

Asie je podle statistik domovem pěti největších světových zemí znečišťujících plasty: Číny, Indonésie, Vietnamu, Thajska a Filipín. Studie oceánu Conservancy a Centra pro podnikání a životní prostředí McKinsey z roku 2015 s názvem Stemming the Tide dospěla k závěru, že pokud by se v těchto zemích zlepšilo nakládání s odpady, mohlo by se do roku 2025 snížit množství globálních plastů zasažených světovými oceány o 45 %. Za současného stavu čelí země jihovýchodní Asie trojnásobnému náporu odpadu: vývozy z rozvinutých zemí, úlomky na jeho pobřeží plus vlastní domácí odpad. V Indonésii se odhaduje, že plastový odpad letos dosáhne 9,5 milionu tun, což představuje 14 % celkového odpadu v zemi. Vládní údaje ukazují, že v roce 2018 došlo v zemi k nárůstu dovozu plastového odpadu o 140 %, což rychle nahradilo Čínu jako světovou jedničku v oblasti plastů [26].

V současné době řada zemí informuje o použití recyklovaných plastů při výrobě asfaltových směsí, a to buď jako náhradu kameniva, náhradu asfaltu nebo modifikátoru pojiva.



Graf 1 Roční světová produkce plastů v milionech tun [26]

3.3.5.1. MODIFIKACE ASFALTOVÝCH SMĚSÍ VE SVĚTĚ

V zahraničí již proběhlo několik různých studií zabývajících se použitím recyklovaných polymerů do asfaltových směsí. Nejběžněji používané polymery pro modifikaci asfaltových směsí můžeme rozdělit do tří kategorií - termoplastické elastomery, plastomery a reaktivní polymery. Polymery ve všech třech kategoriích mají při modifikaci velmi dobrý vliv na tepelné vlastnosti asfaltových směsí. Navzdory tomu má každá kategorie těchto polymerů

specifický efekt při modifikacích asfaltových směsí. Termoplastické polymery mají nejlepší efekt při zlepšování elastických vlastností asfaltových směsí, např. při odolnosti proti únavovým poruchám. Plastomery a reaktivní polymery mají nejlepší výsledky při zvyšování tuhosti asfaltové směsi a odolnosti vůči trvalým deformacím [20].

V různých vědeckých článcích lze najít informace o možnosti použití vysokohustotního polyethylenu (HDPE), polyethylenu (PET), polypropylenu (PP), ABS, polyvinylchloridu (PVC) anebo ethylen vinyl acetátu (EVA) jako modifikátorů do asfaltových směsí. Od roku 1989 bylo provedeno několik studií o začlenění LDPE polymeru do asfaltových směsí. Bylo například zjištěno, že přidáním 5 % recyklovaného LDPE do asfaltových směsí se vylepší odolnost vůči trvalým deformacím a odolnost vůči únavovým trhlinám.

Například v Kanadě byl v roce 2012 použit odpad z plastových přepravek jako voskové aditivum v teplých asfaltových směsích [13].

Na Novém Zélandu začal v roce 2018 novozélandský dodavatel asfaltu přidávat rozdrčené čtyřlitrové kanystry od motorového oleje do asfaltu pro asfaltovou směs použitou na letišti v Christchurch [14].

V Austrálii provedli v květnu 2018 porovnávací zkoušky tří náhrad a modifikátorů z recyklovaných plastů, které byly v krátké době následovány zkouškami v Melbourne, Sydney a Adelaide [15].

Při některých výzkumech využití odpadních polymerů byl použit speciální postup při zpracování především odpadních plastů s vysokým bodem tání. V některých studiích byla provedena tzv. depolymerace PET kyselinami a glykoly a reziduum bylo chemicky recyklováno [6]. Tato metoda recyklace je ale finančně nákladná, tudíž praktické použití této metody je z ekonomického hlediska otázkou.

Naproti tomu Ziari et al. z Iránu sledovali vliv neprocesovaného PET na odolnost vůči vyjždění kolejí. Materiál byl nejdříve očištěn od nečistot, poté rozřezán na pásy šířky 2,5 mm. Tyto pásy byly poté postupně vmíchávány do kameniva a zahřívány na teplotu 180 °C po dobu 5 hodin. Poté byl do kameniva přidán asfalt a provedeny zkoušky na trvalé deformace [21]. Bod tání a objemová hmotnost polymerů je jeden z důvodů, proč se většina výzkumníků více soustředí na měkké plasty jako LDPE, HDPE, ABS, které mají bod tání pod teplotami užívanými při míchání při modifikaci pojiva nebo výroby asfaltové směsi.

V roce 2018 byla v USA postavena první silnice s obsahem plastového odpadu. Díky tomu studenti na univerzitě v Kalifornii v San Diegu testují další možnosti použití odpadních plastů do asfaltových směsí. Podle studentů je hlavní výhoda snížení množství asfaltu, tím pádem i ceny asfaltové směsi a použití plastového odpadu, který by jinak kontaminoval životní prostředí. Pokud by se tato technologie rozšířila po celé zemi, zásadně by ovlivnila životní prostředí, a navíc by pomohla s rychlejší a ekonomičtější výstavbou silniční sítě v zemi [33].

Dalhat & Wahhub prováděli modifikaci asfaltové směsi pomocí nízkohustotního polyethylenu LDPE a vysokohustotního polyethylenu HDPE. Nejdříve polyethylen rozřezali, rozemleli a poté tento materiál vmíchali za mokra do asfaltu. Následně vyrobili asfaltovou směs a zkušební vzorky, na kterých prováděli laboratorní zkoušky. Výsledkem bylo, že se zvýšila viskozita pojiva, stejně jako výkonová třída pojiva za vysoké teploty. U asfaltu se zvýšil modul a následně modelovaná typická asfaltová vozovka v systému hospodaření s vozovkou ukázala výrazné snížení tvorby vyjetých kolejí a tvorby podélných trhlin vznikajících na povrchu a šířících se směrem dolů. Prováděli výzkum modifikace asfaltových směsí i pomocí akrylonitril butadien styrenu (ABS). Tento polymer má rovněž nízkou teplotu tání a byl rovněž vmícháván za sucha i za mokra do obdobných asfaltových směsí v množstvích 4 - 12 % vztaheno na obsah pojiva. V porovnání s kontrolními vzorky se vysokoteplotní výkonnostní třída pojiva zvýšila z 64 °C až na 82 °C, zatímco nízkoteplotní výkonnostní třída pojiva nebyla ovlivněna. Zvýšila se viskozita pojiva a Marshallova stabilita, ale rovněž se zvýšilo přetvoření podle Marshalla [22].

White & Reid [1] provedli modifikaci asfaltové směsi třemi typy recyklovaných plastů, které byly navrženy tak, aby došlo k jejich tání během mísení za sucha při teplotách normální výroby asfaltové směsi. Modul směsi se zvýšil o 120 - 250 %, vyjždění kolejí se snížilo o 0,5 – 1,8 mm a zvýšila se odolnost vůči tvorbě trhlin. V obdobné práci zjistil White [7] srovnatelnou odolnost vůči poškození vlhkostí a zlepšenou únavovou životnost u asfaltových směsí vyrobených ze stejných výchozích látek.

3.3.5.2. NIZOZEMSKO

V Nizozemsku před několika lety vymysleli koncept silnic vyrobených z bloků z plastového odpadu. Jedná se o plastové segmenty vyrobené průmyslově z plastového odpadu vyloveného z oceánu. Životnost vozovky postavené z těchto segmentů je až třikrát delší než konstrukce z klasického asfaltového betonu. Segmenty jsou uvnitř duté, což má výhodu např. při odvodnění anebo pro jednoduché umístění inženýrské sítě. Díky rozdělení silnice na menší části by oprava silnice trvala v řádu dnů, samotná doba stavby se podle autorů koncepce zkrátí o 70 %. Nápad se také počítá s budoucím osázením povrchu bloků panely pro samonabíjecí elektrovozidla nebo senzory pro bezpečnější jízdu. Materiál pokrývající vozovku odolá teplotám od mínus 40 do plus 80 °C. Jejich využitím by tak odpadly problémy s trvalými deformacemi v důsledku vysokých teplot v letních měsících. Autoři tohoto výzkumu také plánují studii nízkoteplotních vlastností tohoto materiálu a jeho použití v zimních měsících [27].



Obr.17 Cyklostezka postavená z plastových segmentů [26]

První cyklistická cesta z plastových segmentů byla postavena v roce 2018 v Nizozemsku, ve městě Zwolle a je dlouhá 30 metrů. V roce 2018 byla v Rotterdamu postavena první plastová komunikace na světě. Jedná se o komunikaci postavenou také z těchto plastových segmentů. V Rotterdamu bylo v roce 2018 postaveno také několik lávek pro cyklisty vyrobených z těchto plastových segmentů.



Obr.18 Plastový segment [28]

3.3.5.3. JIHOVÝCHODNÍ ASIE

V roce 2017 se mezinárodní americká chemická společnost Dow Chemical spojila s indonéskou firmou, aby zahájili výzkum použití plastového odpadu do pozemních komunikací. Téhož roku postavili v Indonésii ve městě Depok zkušební 2 km úsek postavený z klasické asfaltové směsi, do které bylo rozemleto, roztaveno a zamícháno 3,5 tuny plastového odpadu. Takhle společnost má v plánu postavit dalších 100 km silnic ve Spojených státech, Thajsku a Indonésii. V červnu v roce 2016 na konferenci o oceánech OSN Indonésie slíbila, že do roku 2025 sníží množství plastového odpadu o 70 %. Tahle společnost by výstavbou silnic s obsahem plastového odpadu, která v Indonésii právě probíhá mohla k tomuto číslu pomoci. Podle Dow Chemical v Indonésii celkový plastový odpad mohl připravit 190 000 km nových silnic po celé zemi. Pokud by se používal recyklovaný plast do všech asfaltových směsí, ze kterých se staví komunikace v celé Indonésii, pomohlo by to zvládnout veškerý objem plastového odpadu, který země produkuje [26].

Společnost Dow Chemical má v příštím roce v plánu postavit 1 km zkušební úsek, postavený z asfaltové směsi s obsahem recyklovaného plastu ve Vietnamu. Byla by to první silnice s obsahem plastového odpadu postavená v zemi. Celý proces je obdobný – sběrači odpadů nejdříve sesbírají plastový odpad, poté separují těžko recyklovatelné plastové předměty od těch lehce zpracovatelných a odešlou je recyklačním firmám, které plastový materiál rozemelou na malé kousky. Takto rozemletý plastový materiál je odeslán do místních obaloven, kde ho přidávají do asfaltových směsí. Takto zpracovaný recyklovaný plast může v asfaltové směsi nahradit 8 – 10 % asfaltového pojiva, přičemž úspory na takto budovaných komunikacích by byly až 230.000,-Kč za kilometr nové dvoupruhové komunikace. Přestože jsou ve Vietnamu stále ve fázi zkoušení této směsi v laboratořích, výsledky jsou zatím pozitivní – inženýři ve Vietnamu zatím zjistili, že silnice vylepšené obsahem recyklovaných plastů jsou o 15 – 33 % odolnější než konvenční asfaltové směsi. Prodloužením životnosti vozovky by se také snížila frekvence oprav povrchu asfaltových vozovek, což by vedlo k menšímu přerušení dopravy, dalšímu snížení energie a emisí skleníkových plynů. Pokud jde o emise, ekologové již vznesli otázky ohledně toxických látek, které by se mohly uvolňovat z plastů během tavení v asfaltových směsích. Indický profesor chemie Rajagopalan Vasudevan, který se zabývá modifikací asfaltových směsí a použití recyklovaných plastů do asfaltových směsí zjistil, že plast rozkládá a uvolňuje toxické výpary, pokud je zahříván nad teplotu 270°C. Asfaltové směsi se klasicky vyrábí při teplotách do cca 160°C, takže je uvolňování toxických plynů z plastů při výrobě eliminováno. Vietnamský inženýr Hoai Son zjistil, že kvůli uvolňování toxických látek do okolí není vhodné používat polymer PVC a plasty s obsahem hliníku. Každý jiný druh plastu je vhodný pro použití do asfaltových směsí [26].

Společnost Dow Chemical má v plánu rozšířit tyto technologie do Thajska, Indonésie, Filipín, Vietnamu a Malajsie, kde již spolupracuje s tamními vládami.

3.3.5.4. VELKÁ BRITÁNIE

V roce 2015 byly ve Skotsku zahájeny výzkumy využití recyklovaných odpadních plastů jako modifikační přísady do asfaltových směsí. Hlavní cíle těchto výzkumů bylo využití plastových odpadů, které by jinak skončily na skládce, snížení nákladů na výstavbu a údržbu nových silničních komunikací a zvýšení životnosti a odolnosti vůči deformacím.

Během těchto výzkumů byl vyvinut materiál, který funguje jako náhrada modifikátoru. Tento produkt je známý jako MR6. Ve formě granulí byl určen k přímému přimíchávání do asfaltových směsí na obalovně. MR 6 je vyráběna ze 100 % recyklovaného plastu. Použité recyklované plasty měly bod tání pod typickými teplotami při výrobě asfaltových směsí a pojiv a přímo se roztavovaly a mísily do asfaltu, který modifikovaly jako náhrada modifikátoru [19].

Produkt MR 6 byl navržen tak, aby při modifikaci zajistil lepší odolnost vůči deformacím díky výsledné vyšší tuhosti asfaltové směsi. Později byly vyvinuty další produkty, označované jako MR 8 a MR 10, které byly určeny pro jiné aplikace do asfaltových směsí. MR 8 byl vyvinut jako ekonomická náhrada asfaltu bez zlepšení provozních vlastností, zatímco MR 10 byl vyroben s cílem poskytnout pojivu větší odolnost proti tvorbě trhlin. Každý z těchto tří výrobků má odlišnou barvu a formu. MR 8 je ve formě rozřezaného plastu, zatímco MR 6 a MR 10 jsou vyráběny jako granule podobně jako na českých recyklačních linkách LDPE [19].



(a)

(b)

(c)

Obrázek 19: (a) MR 6 granule, (b) MR 8 rozřezaná forma a (c) MR 10 granule [19]

Konkrétní podrobný postup těchto výrobků je chráněným majetkem jednotlivých firem. Výrobky jsou vyráběny z odpadních plastových materiálů pocházejících z komunálního i průmyslového odpadu. Postup výroby je podobný postupu recyklace LDPE firmy SUEZ a.s. Odpadní plasty jsou nejdříve roztrženy, poté očištěny a zbaveny nežádoucích nečistot. Poté jsou nadrceny, roztaveny a na konci vytlačovány ve formě granulí. Různé druhy granulí jsou navzájem smíchávány tak, aby získaly požadované vlastnosti a poté jsou plněny do pytlů pro přepravu. Proces probíhá v certifikovaném systému kvality, který zajišťuje, že každé

jednotlivé balení produktu může být sledováno, a to jak k specifikované výrobní várce, tak i ke zdroji recyklovaného plastu [19].

Používání plastového odpadu do asfaltových směsí a jeho výzkum je ve Velké Británii perspektivní. Nedávno udělilo Ministerstvo dopravy (Department of Transport, UK) grant ve výši 1,6 milionu liber společnosti Cumbria Council pro další rozšíření, již tak významného využití recyklovaných plastů v asfaltových směsích při výstavbě silnic ve Velké Británii [16].

3.3.5.5. INDIE

Indie je díky své rozloze 3 287 590 km² a více než miliardou obyvatel sedmá největší, a zároveň druhá nejlidnatější země na světě. Zcela logicky zde vzniká obrovské množství odpadů, které znamená zásadní problém pro všechny obyvatele jak z environmentálního, tak i zdravotního hlediska.

Tento zásadní problém s odpady v Indii není zapříčiněn pouze vlivem vysoké hustoty obyvatel či nižší vzdělanosti v některých částech Indie, ale pramení z historie a kultury této země. Indie je silně nábožensky založená země, která má několik různých náboženství, podle nichž existuje tzv. „kastovní systém“, který ve své původní podobě představuje vyhodnocení a kodifikaci indické společnosti do čtyř různých vrstev na základě různostvárnosti založené na duchovním vývoji. Mimo tyto čtyři vrstvy existuje skupina obyvatel, tzv. Nedotknutelní, ve které žije přes 160 milionů Indů. Sběr odpadu, jakož i další práce považované podle tradiční indické společnosti za nečisté či podřadné (jako je např. zpopelňování mrtvých, čištění stok, porodní asistence a další fyzicky náročné práce), patří podle indického kastovního systému právě této skupině tzv. „nedotknutelným“ a obyvatelé ze zmíněných čtyř kast se tak odpadu snaží co nejrychleji zbavit. Podle hinduistických pravidel a tradic je narození do „nedotknutelných“ odplatou za hříchy z minulých životů. Proti tomuto tradičnímu jevu nedotknutelnosti bojoval jako jeden z prvních Mahátma Gándhí. Dodnes se tímto zakořeněným sociálním problémem zabývají mezinárodní i lokální humanitární a lidskoprávní organizace.

Správa indických úřadů o stavu životního prostředí v roce 2019 zveřejnila mimořádně znepokojivá čísla. Počet průmyslových podniků, které zásadně znečišťují životní prostředí, a především vodní zdroje se podle ní v zemi za posledních osm let zvedl o 136 %. Momentálně je kriticky znečištěno 86 řek a dalších vodních zdrojů. Zamořené ovzduší odpadem je ročně důvodem 12,5 % veškerých úmrtí v Indii včetně smrti 100 tisíc dětí ve věku do pěti let. Například u Nového Dillí jsou obyvatelé nuceni denně dýchat obrovskou páchnoucí skládku, ze které se do ovzduší uvolňují životu nebezpečné zplodiny. Místní lékař v Novém Dillí se dal slyšet, že denně ošetřuje okolo 70 lidí s různými onemocněními dýchacích cest a žaludku, způsobených znečištěným vzduchem. Mnoho z těchto pacientů jsou často kojenci a děti. V letech 2013 – 2017 v Novém Dillí zemřelo 981 lidí kvůli infekci dýchacích cest [25]. Problémem je také zátěž vznikající z pevného odpadu. Země zaznamenala v letech 2009 až

2017 nárůst o 56 procent v množství nebezpečných pevných odpadů vytvořených průmyslem [23].

Denně se v Indii vyprodukuje 150 tisíc tun pevného odpadu. Z toho je okolo 25,940 tun odpadu plastového. Většina z něj není sesbírána, ale často končí v okolí anebo v řekách. Ze sesbíraného a svezeneho smetí končí přes 80 % bez zpracování na otevřených skládkách [23]. Od 1. března byl zaveden zákaz dovozu veškerého plastového odpadu. Indie uvedla, že zákaz zavádí, protože má k dispozici dostatek vlastního odpadu. Rozhodnutí Indie je překlenout propast mezi produkcí odpadů a recyklační kapacitou. Chce udržet zemi na cestě postupného ukončování všech jednorázových plastových obalů do roku 2020. Odhaduje se, že až 50 % z vyprodukovaného plastového odpadu zůstává nevyužito, kvůli nedostatečným recyklačním kapacitám, takže nemá smysl, aby odpad přivážela z jiných zemí.

Samostatným tématem jsou v současné době v Indii umělé hmoty, resp. plasty. Až 70 % plastů je v zemi využito jen jednorázově a pak vyhozeno buď do okolí anebo do místních řek. Největší řeka v Indii, Ganga, protéká státy Uttarákhand, Uttarpradéš, Bihár, Džhárkhand a Západní Bengálsko v Indii a Bangladéšem. Co se týká průtoku, tak dohromady s Brahmaputrou zaujímá 3. místo na světě. Po čínské řece Jang-c'-ťiang je tak druhým největším zdrojem znečištění světového oceánu umělými hmotami.

Pokud v Indii odpady neodnese voda z řek, končí odpad na tzv. „divokých skládkách“ obrovských rozměrů. Nejznámější skládka, známá pod jménem Ghazipur, roste u metropole Dillí a již překonala výšku 73 metrů, přerostla tím i slavný Taj Mahal. Každý den je na skládku odvezeno více než 2000 tun odpadu, což znamená že každým rokem je skládka vyšší o 10 metrů [24].



Obr.20 Skládka ve městě Ghazipur [41]

3.3.5.5.1. Využití plastů v silničním stavitelství v Indii

Vůbec první na světě s touto myšlenkou využití plastového odpadu do konstrukcí vozovky přišel indický profesor chemie Rajagopalan Vasudevan v roce 2001. Jeho myšlenku provedl jednoduše tak, že posypal rozdrčený plastový odpad na horké kamenivo a poté na kamenivo rozprostřel tenký asfaltový film. Takové kamenivo poté smíchal s asfaltovým pojivem zahřátým na 170 °C a vznikla asfaltová směs modifikovaná recyklovaným polymerem. Asfaltová a plastová složka mezi sebou lehce vytvoří vazby, jelikož jsou obě produkty ropného původu. Indický profesor Rajagopalan Vasudevan na modifikaci používá igelitové sáčky, nákupní tašky, plastové kelímky včetně polystyrenových a pěnové obaly. Použitý plast je nejdříve změkčen na teplotu 170 °C. Jelikož plast začíná uvolňovat toxické výpary až při teplotách větších než 270 °C, takže k uvolňování toxických plynů nedochází. Jelikož plast potahuje kamenivo a působí na horký asfalt, mění se tak jeho vlastnosti a při vystavení světlu a teple se tím pádem nerozkládá [34].

V roce 2001 tak byla vyvinuta metoda pro využití recyklovaného plastu do silničních konstrukcí a patentována v roce 2006.

V roce 2002 byla ve městě Chennai, které se nachází na pobřeží Bengálského zálivu postavena jedna z prvních silnic s obsahem plastů. Tato silnice byla již vystavena několika monsunům, povodním, častým deštům a každý den musí odolávat vysokým teplotám a dopravnímu zatížení. Zatím nevykazuje žádné známky opotřebení ve formě typických poruch, jako jsou mozaikové trhliny, výmoly nebo trvalé deformace. Postupem času se ukázalo, že silnice s krytovými vrstvami s obsahem recyklovaného plastu jsou překvapivě trvanlivější a odolnější vůči poruchám a deformacím než klasické silnice. Vrstvičky roztaveného plastu vyplňují mezery, tak je směs prakticky nepropustná vodě a zabraňuje tak strukturálním poruchám v celé konstrukci vozovky. Vlastnosti těchto polymerem modifikovaných vrstev se využívají především do konstrukcí vozovek s vysokým dopravním zatížením, snižování hluku vlivem dopravy anebo k zabránění mrazových trhlin. Vozovky také mají lepší odolnost vůči vysokým teplotám, pokud teplota okolí nepřesáhne 66°C, odolávají dopravnímu zatížení a nevytvářejí se na nich trvalé deformace. Jsou tedy vhodné pro silnice na Středním Východě.

Zatímco běžně modifikované asfalty např. polymerem styrene-butadiene-styrene (SBS) jsou logicky dražší než asfalty nemodifikované, je tahle metoda ekonomičtější. Do asfaltu jsou přidávány plasty ve formě drti z běžně používaných nákupních tašek, které jsou vyráběny z nízkohustotního nebo vysokohustotního polymeru, které by jinak skončily na skládkách, popř. v řekách a následně v oceánech. Na každém kilometru takto postavené dvoupruhové silnice se ušetří jedna tuna asfaltu a použije se jedna tuna recyklovaného plastu, což znamená že je vozovka o 8 % levnější než nemodifikovaná vozovka. Nová technologie v takové zemi, jako je Indie znamená i nové pracovní možnosti. Pro výrobu směsi jsou potřeba drcené plasty, které firmy odkupují od místních obyvatel. Místní obyvatelé,

především ženy nakupují tzv. „drtiče“ na plasty, a ze sesbíraného plastového odpadu z ulic vyrábějí drť, kterou potom těmto firmám prodávají [34].

V listopadu roku 2015 bylo v Indii vládou nařízeno povinné přidávání plastového odpadu do asfaltových směsí. V roce 2016 byla tato technologie poprvé použita v Indii na dálniční komunikaci, mezi městy Chennai a Villupuran. Ve městě Janshedpur bylo oznámeno snížení použití asfaltu o 7 % využitím vmíchávání rozdrčených plastů za sucha při výrobě asfaltové směsi [10].

Od roku 2006 bylo v Indii postaveno více než 100 000 km komunikací s obsahem plastového odpadu.

3.3.5.6. PORTUGALSKO

Portugalsko je zemí, která se nachází na jihozápadním cípu Evropy. Celá západní a jižní část země je obklopena Atlantským oceánem. Většina odpadů, které v této zemi odnesou řeky tak končí vždy v oceánu. I proto by jejich použití znamenalo ekonomické a environmentální výhody. Z environmentálního hlediska by využití odpadních plastů do asfaltových směsí bylo pro Portugalsko přinejmenším přínosné stejně jak pro Indii nebo jiné země, které přímo sousedí s oceánem.

Jak už bylo v předchozích kapitolách zmíněno, odpadní polymery jsou levnější než synteticky vyráběné polymery pro modifikace asfaltových směsí. Velkou měrou přispívá využití recyklovaných plastů k řešení problémů s likvidací velkého množství odpadu. Roční produkce asfaltového betonu jsou vysoké. V roce 2017 bylo ve všech evropských zemích vyrobeno kolem 300 milionů tun asfaltového betonu. Pokud by se začlenilo např. 6 % odpadního plastu (k obj. asfaltového pojiva) do směsí asfaltového betonu v Evropě, zužitkovalo by se tak 1 milion tun plastového odpadu ročně, a to pouze v Evropě.

Během mého zahraničního studia v Portugalsku jsem pracovala v tamní silniční laboratoři na výzkumu užití polymeru LDPE do asfaltových směsí. Konkrétně šlo o klasický městský plastový odpad ve formě plastových obalů, sáčků, tašek, aj.

V laboratoři jsme zkoumali účinnost směsí asfaltobetonu AC obsahující drť polyethylenu s nízkou hustotou. Nejdříve se pomocí ITS zkoušek definovala optimální množství LDPE v asfaltových směších a poté byla posuzována zpracovatelnost a citlivost asfaltové směsi na vodu. Následně jsme hodnotili odolnost na stárnutí materiálu pomocí zkoušek na tuhost, únavovou odolnost a odolnost vůči trvalým deformacím. Po procesu stárnutí směsi vykazovala modifikovaná směs ve srovnání s nemodifikovanou směsí značnou citlivost na vlhkost, přijatelnou zpracovatelnost, vyšší tuhost, vyšší odolnost vůči trvalým deformacím a lehce menší odolnost vůči únavovým deformacím. Všechny tyto vlastnosti po procesu stárnutí měly lepší výsledky než konvenční směs AC.

Materiály výzkumu:

Pro výzkum jsme použili konvenční hrubozrnné asfaltové směsi, běžně používané při provádění obrusných vrstev v Portugalsku, kde maximální zrno kameniva bylo 16 mm, tzn. ACO 16. Průměrná roční teplota je na severu země kolem 13 °C a na jihu 18 °C, kdy v zimě jsou průměrné teploty kolem 12 °C a v létě 30 °C. Vzhledem k těmto teplotám jsme jako pojivo ve směsích použili konvenční asfalt 35/50. Obsah pojiva byl stanoven na 5% hmotnosti směsi.

Jako modifikační polymer jsme použili vlákna z plastového odpadu vytříděného nejdříve na recyklační lince a následně pomletého na vlákna viz Obr. 24. Jedná se o městský odpad ve formě plastových tašek, sáčků, fólií, plastových obalů atd. Recyklační proces začíná sesbíráním z popelnic určených na plasty popelářskými auty, která se ve formě stlačených balíků svezou na recyklační linku. Na lince jsou dle typu plastu/polymeru roztrženy, rozebrány na vlákna, očištěny od nečistot, usušeny a dále jsou z nich dále vyráběny tzv. peletky. V naší studii jsme namísto peletek použili vlákna LDPE, posbírány po očištění a osušení. Tím jsme chtěli snížit náklady na recyklaci těchto odpadů a zjednodušení přidávání LDPE polymeru do asfaltové směsi.



Obr.21 Drť LDPE posbírána v městském odpadu [38]

Jako modifikátor byl použit městský plastový odpad, který zahrnuje různé druhy plastového odpadu (plastové tašky, sáčky, plastové obaly, potravinářské tašky, plastové obaly na ukládání potravin, ...), jenž nebyl homogenní a jejich vlastnosti nebyly stejné – viz Tab.1

Properties of the plastic film flakes.

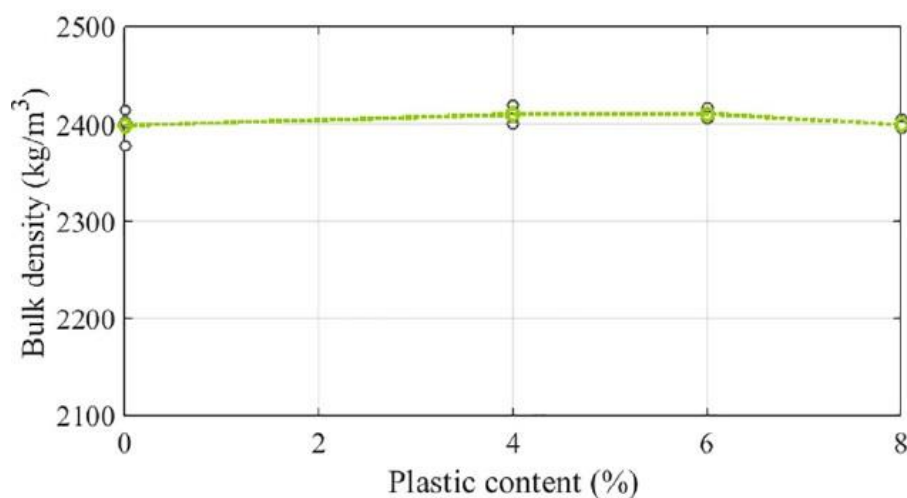
Property	values
Thickness, mm	≤ 0.1 mm
Size, mm	2–100
Density, g/cm ³	0.8–0.9
Melting point, °C	105–125

Tab. 1 Vlastnosti plastové drti [38]

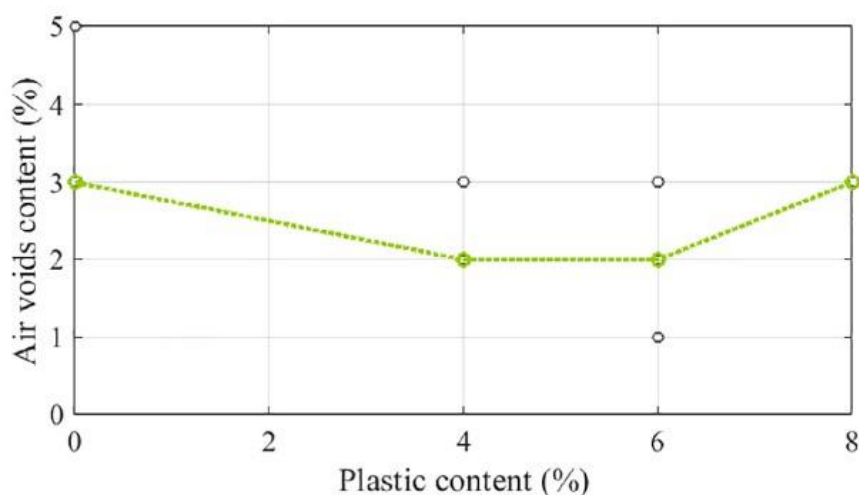
Studie byla rozdělena do třech částí. V první části jsme stanovili ideální množství LDPE pro modifikaci asfaltové směsi. Ve druhé části jsme provedli zkoušky na citlivost směsi vůči vodě a zpracovatelnost směsi. Třetí část obsahovala zkoušky a vyhodnocení odolnosti vůči trvalým deformacím a únavě. Všechny zkoušky byly provedeny podle evropských norem.

Pro stanovení ideálního obsahu plastů v asfaltové směsi bylo zvažováno následujících 5 procent: 0 %, 2 %, 4 %, 6 % a 8 % hmotnosti asfaltového pojiva. 0 % bylo uvažováno jako referenční směr pro porovnání výsledků s modifikovanými směsmi.

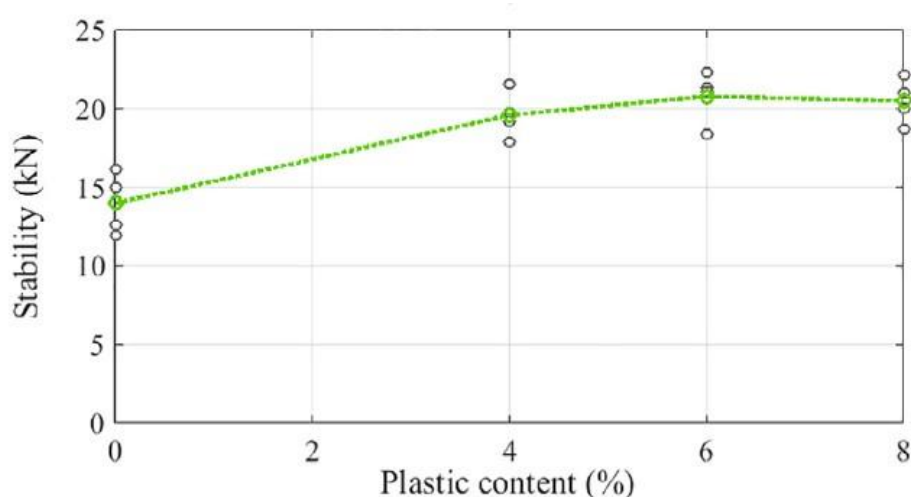
Na následujících grafech je znázorněno, jak jsou výsledky v závislosti na poměru LDPE v asfaltové směsi odlišné. Např. nejlepší stabilitu měla směs s obsahem 6 % LDPE, obsah vzduchových mezer má však při 4 % a 6 % nejmenší.



Graf 2: Objemová hmotnost asfaltových směsí v závislosti na obsahu LDPE [38]



Graf 3: Mezerovitost asfaltových směsí v závislosti na obsahu LDPE [38]



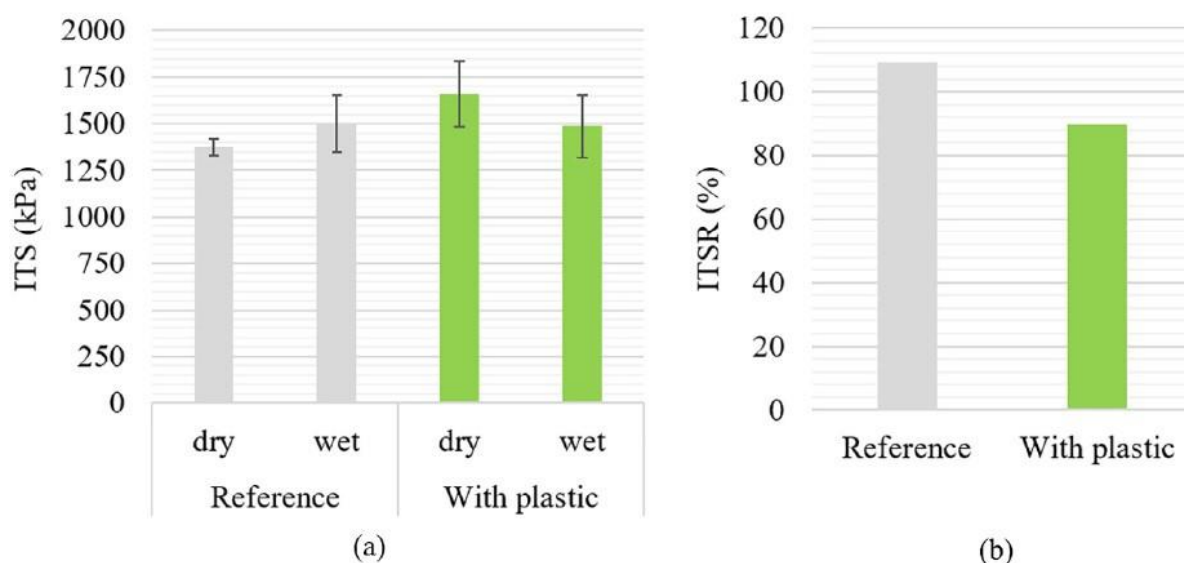
Graf 4: Stabilita asfaltových směsí v závislosti na obsahu LDPE [38]

Citlivost na vodu

K vyhodnocení této vlastnosti jsme provedli zkoušky pevnosti v tahu ITS a citlivost na vlhkost výpočtem pevnosti v tahu ITSR dle normy EN 12697-12.

K této zkoušce jsme v laboratoři vyrobili zkušební Marshallovy tělesa, z nichž polovina byla vystavena účinkům vody o teplotě 40 °C po dobu 72 hodin. Ze 4 těles pro každou skupinu těles dle % množství LDPE byl stanoven průměr naměřených hodnot. Hodnota ITS je definována jako maximální napětí v tahu vypočtená jako funkce maximálního zatížení v poměru k rozměrům zkušební tělesa.

$$ITS = \frac{2P}{\pi DH}$$



Graf.5 Srovnání pevnosti v příčném tahu a citlivosti na vodu u referenční směsi a směsi s obsahem LDPE [38]

Graf 5 reprezentuje výsledky ITS a ITSr pro suché i mokré zkušební vzorky. Z grafů je zřejmé, že suché vzorky s obsahem LDPE vykazují větší hodnoty ITS, mokré mají výsledky přibližně stejné. Odolnost směsi vůči vlhkosti byla u vzorků s obsahem plastů nižší než u referenční směsi. I přesto měly zkušební vzorky s obsahem LDPE odolnost vyšší než 82 %, což je dobrá odolnost asfaltové směsi.

Zpracovatelnost

Zpracovatelnost je obecná vlastnost asfaltových směsí, která určuje schopnost směsi být přepravována a poté pokládána a optimálně zhutněna. Zavedení části recyklovaného polymeru LDPE do asfaltové směsi může mít vliv na zpracovatelnost směsi. Pro analýzu potenciálních změn při zhutnění byly provedeny zkoušky zhutnění pomocí gyrátoru, kdy část asfaltového pojiva byla nahrazena právě polymerem LDPE.

Výsledkem měření je *graf 6*, ve kterém jsou na ose x vyneseny počty zatěžování vzorku a na ose y naměřená objemová hmotnost vzorku. Výsledná křivka byla vytvořena pomocí evropské normy EN 12697-10 a určena dle vzorce

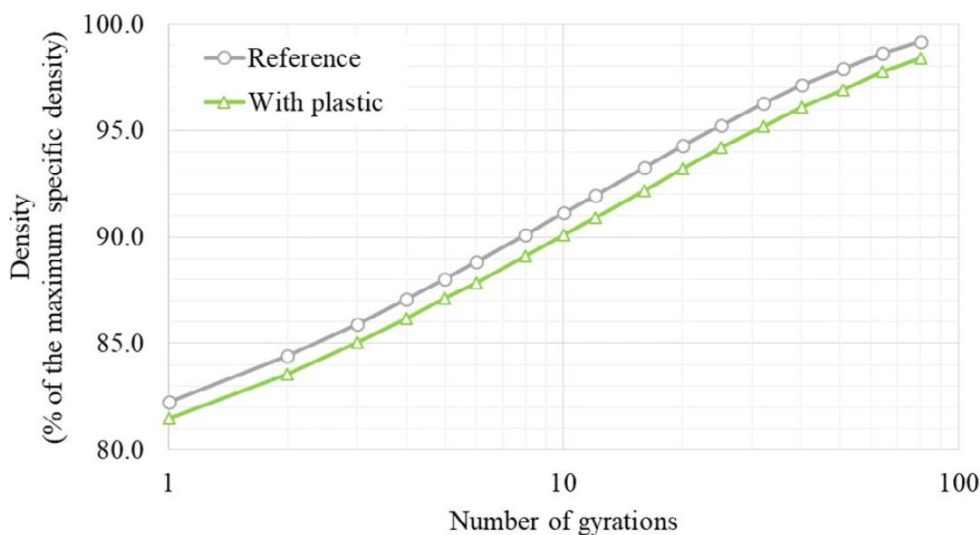
$$v(ng) = v(1) - k * \ln(ng)$$

Následující *graf č. 6* reprezentuje průměrné naměřené hodnoty získané ze 4 zkušebních vzorků. Rozptyl výsledků byl nízký, s maximálními hodnotami variačního koeficientu 0,83 % a 0,28 % pro referenční směs a směs modifikovanou LDPE.

Křivky byly vymodelovány dle dosazení následujících hodnot do vzorce:

$$v(ng) = 18,3 - 4,106 * \ln(ng) \text{ pro referenční směs}$$

$$v(ng) = 19,2 - 4,082 * \ln(ng) \text{ pro modifikovanou směs}$$



Graf 6: Zhutnitelnost referenční směsi a směsi s obsahem LDPE [38]

Analýza výsledků ukazuje, že použití LDPE jako náhrady části asfaltového pojiva sníží zpracovatelnost asfaltové směsi. Dle výsledků vykazuje referenční směs lepší výsledky ve zpracovatelnosti i zhutnitelnosti během výstavby. Co se týká odolnosti vůči dopravnímu zatížení, vyšší hodnoty TDI ukazují, že asfaltová směs s obsahem LDPE odolává zatížení lépe než směs referenční.



Obr.22 Gyrátor [37]

Odolnost vůči únavovým trhlinám

Zkouška proběhla také pomocí 4 bodového zatěžování dle evropské normy *EN 12697-24*, při teplotě 20 °C, která reprezentuje průměrné portugalské teploty. Při frekvenci 10 Hz byly použity tři úrovně napětí – 100, 200 a 300 µm/m. Kritérium porušení bylo stanoveno na základě evropské normy *EN 12697-24*. Po 100 zatěžovacích cyklech došlo k 50 % snížení počátečního modulu tuhost zkušebních těles.

Výsledky 4 bodového testu byly vyneseny do grafu v logaritmickém měřítku dle vzorce:

$$\varepsilon = A \times N^b$$

Kde:

ε je poměrné přetvoření v [µm/m]

N je počet zatěžovacích cyklů

A a B jsou regresivní koeficienty

Fatigue resistance results for the studied AC mixtures.

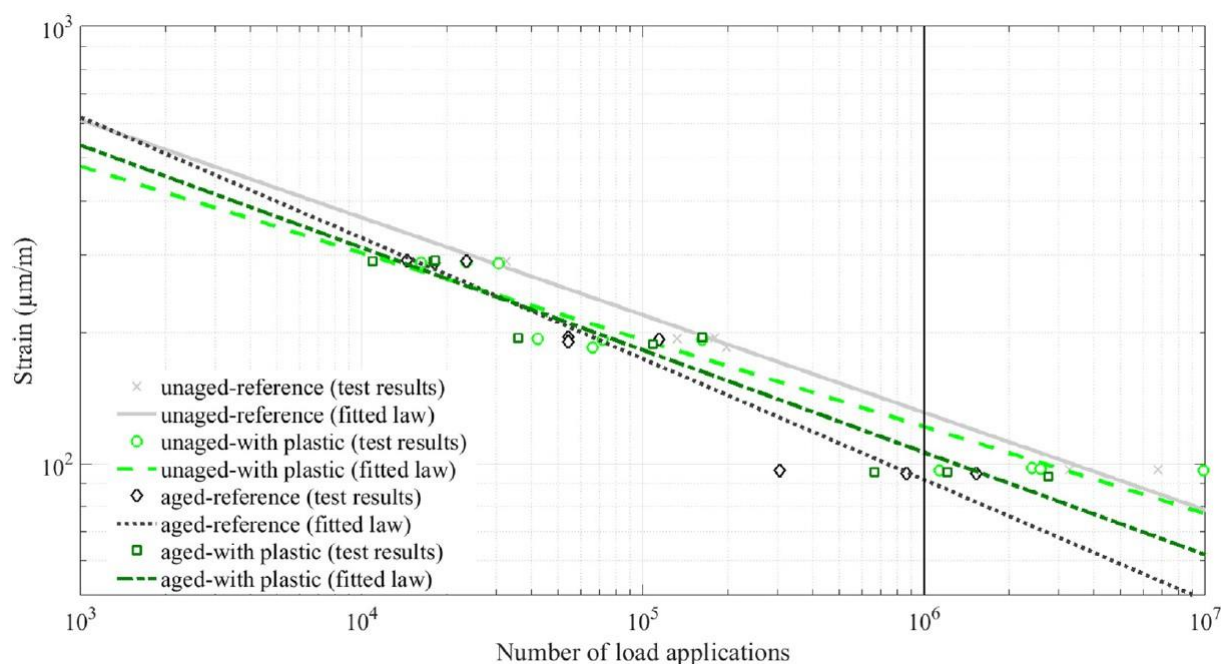
AC mixture	A	B	Adjusted R ² (%)	ε_6 (µm/m)
unaged-reference	2847.1	−0.223	98.3	131
unaged-with plastic	1888.7	−0.199	92.0	122
aged-reference	4183.1	−0.276	93.4	92
aged-with plastic	2693.7	−0.234	93.1	106

Tab 2: Výsledky odolnosti referenční asfaltové směsi a směsi s obsahem LDPE vůči únavě [38]

Na *grafu č.7* je zřejmé, že bez procesu stárnutí má referenční asfaltová směs lepší odolnost vůči mrazovým trhlinám než modifikovaná směs. Přičemž asfaltová směs s obsahem LDPE se zvyšujícím se zatížením se přibližuje hodnotám nemodifikované směsi. Když srovnáme hodnoty na ε_6 , má asfaltová směs pouze o 7 % vyšší odolnost než směs s obsahem LDPE.

Při účinku stárnutí asfaltová směs s obsahem LDPE při nízké a střední úrovni napětí vykazuje lepší vlastnosti, např. odolnost vůči únavovým trhlinám. Referenční asfaltová směs má lepší výsledky pouze při velkých zatíženích. Nepříznivý účinek stárnutí asfaltových vrstev vozovky by mohl být vyřešen přidáním LDPE do asfaltové směsi.

Ve výsledku u obou směsí odolnost vůči únavě časem vždy klesá.



Graf 7: Odolnost vůči únavovým trhlinám [38]

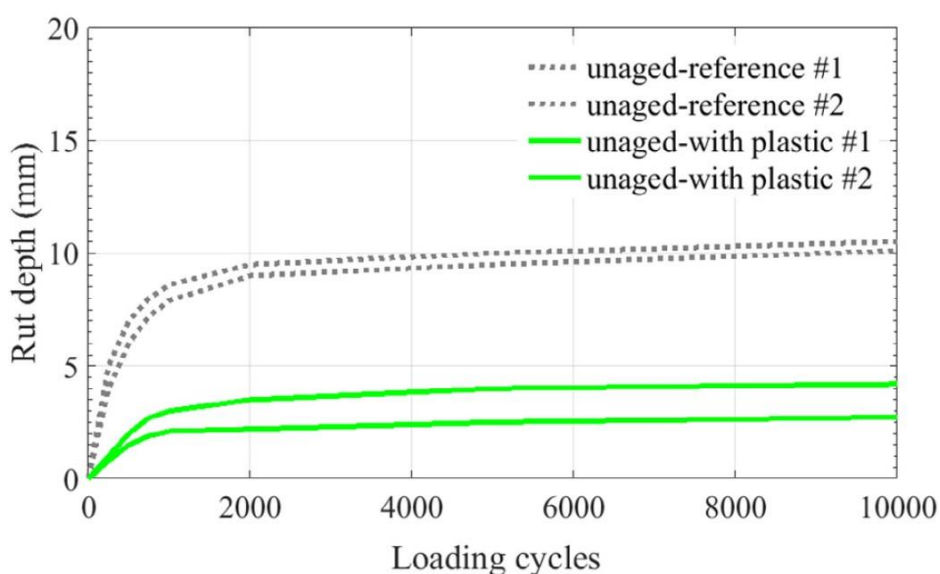
Trvalé deformace

Odolnost směsi vůči trvalým deformacím byla provedena pomocí zkoušek pojížděním kolem podle evropské normy EN 12697-22.

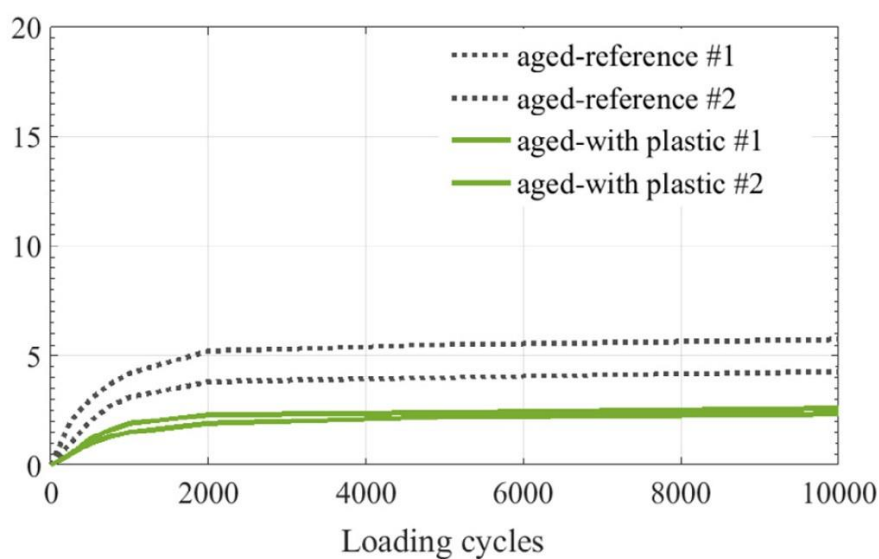
Zkouška na odolnost vůči trvalým deformacím simuluje zatížení vozovek těžkými nákladními vozidly a měří odezvu asfaltových směsí ve formě poměrné hloubky vyjeté koleje a přírůstku hloubky koleje, v našem případě při teplotě 60°C. Měřili jsme relativní hloubku vyjeté koleje po 5000 cyklech opakovaným pojížděním kolem, které reprezentovalo standardizované zatížení na těžkou nákladní dopravu. Po 10000 cyklech se opět změří hloubka vyjeté koleje, která se pak srovná s hloubkou po 5000 cyklech. Podle těchto dvou parametrů jsme vyhodnotili odolnost asfaltové směsi proti tvorbě trvalých deformací.

V *grafu č. 8* jsou znázorněny průběhy deformací na zkušebních tělesech vystavených 10000 cyklů pro teplotě 60°C, ve *grafu č. 9* jsou tytéž průběhy na zkušebních tělesech, které nejdříve prošly procesem stárnutí.

Výsledkem této zkoušky je fakt, že přidáním LDPE do asfaltové směsi se výrazně zvýší odolnost vůči trvalým deformacím, a to až o 66 %. Ve zkušebních tělesech, které prošly procesem stárnutí došlo také ke zvýšení odolnosti vůči trvalým deformacím, a to o 30 % u směsi s přídavkem LDPE.



Graf 8: Hloubka trvalých deformací bez procesu stárnutí [38]



Graf 9: Hloubka trvalých deformací s procesem stárnutí [38]

V této studii byla zkoumána možnost použití polymeru LDPE posbíraného z klasického městského odpadu ve formě igelitových sáčků, nákupních tašek, obalových folií atd. Byla zkoumána odolnost modifikované směsi s obsahem tohoto polymeru a srovnávána s referenční směsí. Obě směsi byly také vystaveny účinkům stárnutí, byly provedeny zkoušky na tuhost, odolnost vůči únavě anebo odolnost vůči mrazovým trhlinám.

Na základě vyhodnocení a výsledků těchto zkoušek zde prezentuji hlavní výsledky celé studie:

- Nejlepší výsledky v Marshallových zkouškách měla směs s 6 % LDPE.
- Přestože asfaltová směs s obsahem LDPE vykazovala menší odolnost vůči vlhkosti ve srovnání s referenční směsí, hodnota ITSR byla o 80 % vyšší ve srovnání s referenční směsí.
- Při vyhodnocování zpracovatelnosti obou směsí měla směs s obsahem LDPE horší výsledky než referenční směs, avšak vykazovala lepší odolnost vůči dopravnímu zatížení.
- Přidáním LDPE do asfaltové směsi se zvýšila tuhost směsi a odolnost vůči trvalým deformacím.
- Odolnost vůči únavě byla u referenční směsi lepší než u směsi s obsahem LDPE, ale pouze u zkušebních vzorků, které nebyly vystaveny procesu stárnutí. Pokud zvažujeme výsledky zkoušek zkušebních těles, které prošly procesem stárnutí, směs s přídatkem LDPE měla při středních a nízkých úrovních napětí lepší vlastnosti a odolnost vůči únavovým trhlinám

Celkově tato studie umožnila dospět k závěru, že modifikace asfaltové směsi AC polymerem LDPE nashromážděným z městského odpadu, obsahujícího několik druhů plastových zdrojů, jako jsou tašky, igelitové sáčky, folie, obaly, aj. jsou slibným řešením pro recyklaci plastů, ekonomické zlepšení a zlepšení odolnosti takto modifikovaných vozovek vůči poruchám a deformacím ve středních a vysokých teplotách.

Schopnost recyklovaných plastů zlepšovat provozní vlastnosti asfaltových směsí byla jasně potvrzena jak v UK, tak i v jiných zemích. Avšak neexistují žádné informace o objektivním zkoumání praktických přínosů pro návrhy vozovek. V důsledku toho existuje stále potřeba zjistit praktické přínosy spojené s modifikací asfaltových směsí recyklovanými plasty pro výstavbu typických konstrukcí vozovek.

Zabudováním drti z recyklovaného LDPE do asfaltových směsí dojde nejen k využití odpadního materiálu do nového výrobku, kterým je asfaltová směs, ale při optimální aplikaci dojde rovněž ke zlepšení jejích vlastností. Primárním podnětem pro využití LDPE v asfaltové směsi tedy není pouze zabudovat odpadní materiál, ale zlepšit vlastnosti a trvanlivost hutněné asfaltové vrstvy.

4. POUŽITÉ MATERIÁLY A ASFALTOVÉ SMĚSI:

Zkoušky jsem prováděla na třech různých směsích asfaltového betonu z obalovny Tasovice (COLAS, a.s.) s asfaltem 50/70.

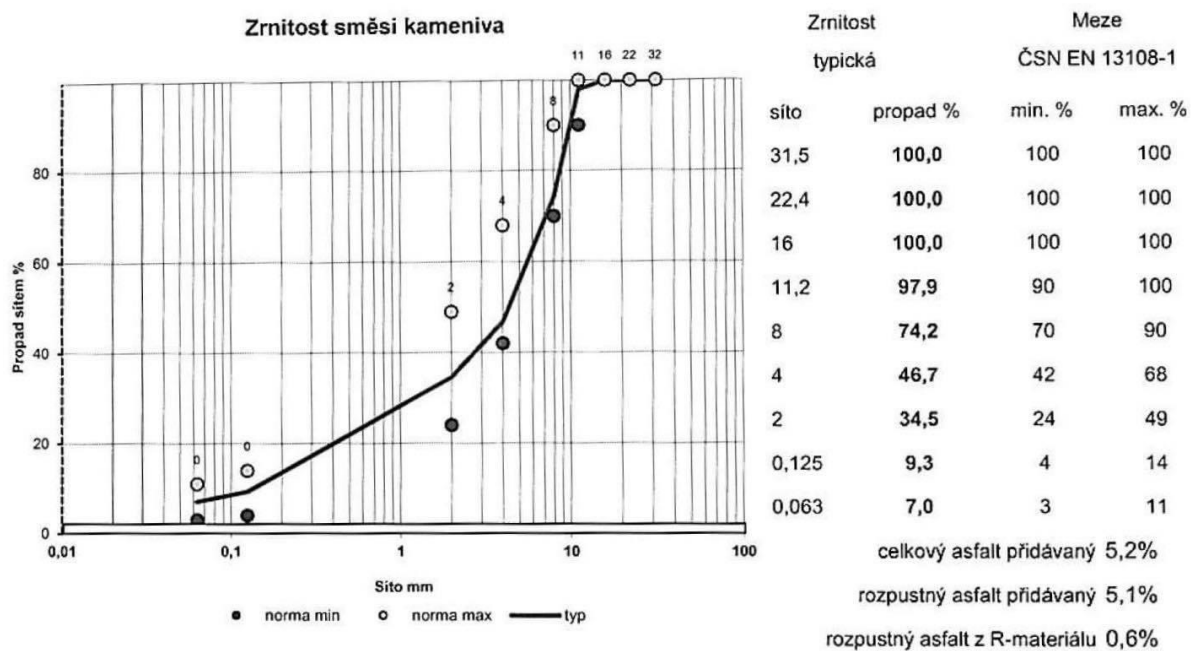
- Asfaltový beton pro obrusné vrstvy ACO 11+
- Asfaltový beton pro ložní vrstvy ACL 22+
- Asfaltový beton pro podkladní vrstvy ACP 22+

Jako modifikátor směsi jsem zvolila polymer LDPE, tedy nízkohustotní polyethylen ve formě drti. Tento materiál mi poskytla firma SUEZ Využití zdrojů a.s., která se v Němčicích nad Hanou zabývá recyklací a zpracováním odpadních plastů, především právě polymeru LDPE. Tento druh polymeru jsem si vybrala pro jeho nízkou hustotu a nízkou teplotu tání, která se ze všech druhů polymerů nejvíce podobá teplotním charakteristikám asfaltového pojiva.

Samotná vlákna polymeru LDPE jsou vyrobeny z použitých, vytríděných průmyslových folií. jsou podélného tvaru maximální šířky cca 15 mm a maximální délky cca 50mm. Vlákna jsou přímo z recyklační linky a obsahují z 95% LDPE, zbylých 5% obsahuje směs LLDPE, HDPE, PP a CaCO_3 v různém poměru.



Obr.23 Drť nízkohustotního polymeru (LDPE) použitá v práci



Graf 10: Zrnitost směsi kameniva [42]

Zrnitost směsi kameniva v asfaltové směsi ACO 11+ je znázorněná v *Grafu 10*. Obsah pojiva v asfaltové směsi je 5,8 % a mezerovitost směsi 3,6 %.

5. POUŽITÉ ZKUŠEBNÍ METODY

V této části mé diplomové práce jsou popsány zkušební metody a průběh laboratorních zkoušek, které byly použity v rámci práce. Jednotlivé metody jsou rozděleny do dvou kapitol:

1. Příprava zkušebních těles
2. Použité zkušební metody

5.1. Příprava zkušebních těles

Pro mou diplomovou práci bylo potřeba vyrobit zkušební tělesa ve formě Marshallových těles a zkušebních desek. Ze zkušebních desek byly vyřezány na kotoučové pile zkušební tělesa – trapezoidy (70 mm x 30 mm x 50 mm x 250 mm). U všech zkušebních těles jsem si nejdříve stanovila požadované množství zkušebních těles a samostatně hmotnost navážky každého tělesa.



Obr.24 Zkušební tělesa – trapezoidy



Obr.25 Zkušební tělesa – Marshallova tělesa



Obr.26 Zkušební tělesa – Marshallova tělesa

5.1.1. Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem

Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem je popsána v normě ČSN EN 12697-30+A1 *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem*. Tato norma popisuje metody výroby zkušebních těles asfaltových směsí pomocí rázového zhutňovače. Marshallova tělesa jsou používána především pro stanovení objemové hmotnosti a stanovení ITS a ITS_R.

Nejdříve jsem vyrobila tzv. Marshallova tělesa rázovým zhutňovačem. Zkušební tělesa jsou válcovitého tvaru o průměru $D = 101,6 \pm 0,2 \text{ mm}$ a výšce $h = (63,5 \pm 2,5) \text{ mm}$. Maximální velikost kameniva ve směsi může být maximálně 22,4 mm. Vznikají hutněním směsi v nahřáté formě při požadované teplotě a hutnicím cyklu – směs se nejdříve vytemperuje na požadovanou teplotu spolu s formou a nasype se do ocelové formy pro hutnění. Poté se ihned umístí do rázového zhutňovače a hutí se požadovaným počtem rázů na horní povrch zkušební tělesa, a to z obou stran. Vyrobené zkušební těleso se nechá zchladnout ve formě na chladicí podložce na laboratorní teplotu. Jakmile je těleso vychladnuté, může se pomocí hydraulického lisu vytlačit z formy.



Obr.27 Laboratorní sušárna/pec pro rozechřívání asfaltové směsi



Obr.28 Forma s nástavcem a podložkou na výrobu Marshallových těles



Obr.29 Rázový zhutňovač



Obr.30 Hydraulický lis

Postup výroby Marshallových těles

Pomocí zkoušek ITS na Marshallových tělesech jsem zjišťovala, která směs je nejvhodnější na modifikaci polymerem LDPE. Ověřovala jsem vlastnosti směsí pro všechny krytové vrstvy netuhé vozovky:

- Pro ohrusnou vrstvu ACO 11+
- Pro ložná vrstvu ACL 22+
- Pro podkladní vrstvu ACP 22 S

Z každé této směsi jsem vyrobila 6 referenčních těles a každou z těchto směsí jsem modifikovala stejným množstvím recyklovaným polymerem LDPE, abych porovnála výsledné vlastnosti ze zkoušky pevnosti v příčném tahu a vybrala typ směsi, která vykazovala nejlepší vlastnosti. Každou směs jsem modifikovala nejdříve 2 % LDPE hm. a dále 4 % hm. LDPE a následně porovnála s výsledky referenční směsi. Celkem jsem tak vyrobila 54 Marshallových těles.

Nejdříve jsem si spočítala hmotnost navážky pro každou směs. Asfaltovou směs jsem nahřála v sušárně na vyšší teplotu, aby se směs dala zpracovat a poté jsem směs ručně promíchala tak, aby byla homogenní. Takhle zhomogenizovanou směs jsem vždy rozdělila na 6 dílů pro 6 zkušebních těles podle předem stanovené hmotnosti navážky. Navážku jsem nahřála na požadovanou teplotu, v mém případě 160°C, spolu s formou, nástavcem a podložkou (*Obr.30*). Po nahřátí směsi na teplotu 160°C jsem formu složila a zaplnila navážkou tak, aby nedošlo k segregaci směsi. Po naplnění formy jsem ji ihned vložila do zhutňovače a zhutnila. Pro účely stanovení objemové hmotnosti byla Marshallova tělesa zhutněna 50 úderů z každé strany. Pro účely zjištění účinků vody 25 úderů na každou stranu tělesa.

Po zhutnění jsem těleso ve formě vzala a odložila na chladicí podložku, kde těleso zchladlo na laboratorní teplotu, aby se dalo bezpečně, bez poškození z formy vytlačit pomocí hydraulického lisu.

V případě zkušebních těles modifikovaných LDPE byl postup složitější. Navážku jsem nejdříve nahřála na požadovanou teplotu 160 °C a mezitím jsem si zvlášť na digitální váze připravila hmotnost požadovaného množství drti LDPE. Jakmile navážka dosáhla požadované teploty, přemístila jsem ji ze sušárny na elektrický vařič a na něm jsem mechanicky po dobu 1 minuty do směsi vmíchávala drť LDPE. Poté jsem směs ihned přesunula zpět do sušárny a nechala nahřát po dobu 30 minut zpět na požadovaných 160 °C opět spolu s formou, nástavcem a podložkou. Po nahřátí směsi na teplotu 160 °C jsem postupovala stejně jako při výrobě Marshallových těles u referenční směsi bez drti LDPE.



Obr 31,32,33 Výroba směsi – vmíchávání drti LDPE do asfaltové směsi





Obr.34,35 Marshallovo zkušební těleso z ACO 11+ s obsahem 2% LDPE



Obr.36,37 Marshallovo zkušební těleso ACO 11+ s obsahem 4 % LDPE

5.1.2. Příprava zkušebních těles zhutňovačem desek

Tato metoda je popsána normou ČSN EN 12697-33+A1 *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 33+A1: Příprava zkušebních těles zhutňovačem desek*. Norma platí pro asfaltové směsi připravené v laboratoři nebo vyrobené v obalovně a popisuje tři metody hutnění vzorku:

- Metoda hutnění jedním nebo dvěma koly opatřenými pneumatikou
- Metoda hutnění hladkým ocelovým válcem
- Metoda hutnění ocelovými lamelami

V rámci této práce byla výroba zkušebních desek provedena dle metody hutnění ocelovými lamelami [OBRÁZEK]. Jedná se o zhutňování asfaltové směsi v ocelové formě do tvaru desky. Výsledkem je deska o rozměrech 260 mm x 320 mm x 50 mm (Obr. 38)



Obr.38 Zkušební desky z lamelového zhutňovače

Postup výroby zkušebních desek

Nejdříve jsem spočítala hmotnost směsi na jednu desku pomocí vztahu:

$$M = L \cdot l \cdot e \cdot \rho_m \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{100 - v}{100} \right)$$

Kde

M	hmotnost potřebné navážky asfaltové směsi na desku v [kg]
L	vnitřní délka formy v [mm]
l	vnitřní šířka formy v [mm]
e	tloušťka desky konečná (snížená o tloušťku plechu) v [mm]
ρ_m	zhutněná maximální objemová hmotnost směsi v [kg/m ³]
V	mezerovitost směsi v [%]

Po stanovení hmotnosti navážky jsem asfaltovou směs nahřála v sušárně na teplotu 160 °C, aby se se směsí dalo pracovat a poté směs ručně promíchala tak, aby byla homogenní – stejně jako u Marshallových těles. Takto zhomogenizovanou směs jsem pomocí digitální váhy rozdělila na 4 díly o hmotnosti stanovené navážky na 4 zkušební desky. Na základě nejpriznivějších výsledků zkoušky ITS jsem 2 zkušební desky vyrobila ze směsi ACO 11+ s obsahem 2% LDPE a druhé 2 desky ze směsi ACO 11+, jako referenční směsi pro porovnání výsledků.

Každou navážku jsem nechala nahřát na požadovanou teplotu zhutnění, 160 °C. Mezitím jsem si nachystala formu zhutňovače, krycí plech a lamely. Formu jsem sešroubovala a pak ji vymazala společně s krycím plechem separačním prostředkem, aby se na ni nelepila asfaltová směs.

Referenční směs ACO 11+ jsem po nahřátí přenesla ke zhutňovači, nasypala a rozprostřela ji do formy. Po rozprostření jsem směs přikryla krycím plechem, na něj jsem naskládala lamely a spustila hutnění asfaltové směsi po dobu několika minut. Zhutněnou desku jsem nechala 30 minut vychladnout ve formě, poté formu rozšroubovala a desku z formy vyjmula. V případě směsi ACO 11+ s obsahem 2 % hm. drti LDPE jsem nejdříve směs nahřála na 160 °C a přemístila na podložku, kde jsem do směsi ihned ručně vmíchala předem naváženou drť LDPE (Obr.39, Obr. 40) Takto upravenou směs jsem přesunula zpět do sušárny/pece a nechala opět nahřát na požadovaných 160 °C. Jakmile směs dosáhla této teploty, vyjmula jsem směs z pece, přemístila ke zhutňovači a pokračovala jsem ve zhutňování stejně jako u referenční směsi.



Obr. 39 Přidávání LDPE do navážky zkušební desku



Obr. 40 LDPE vmíchané do navážky na zkušební desku



Obr.41 Forma na desku



Obr.42 Hutnící válec nad zapuštěnými lamelami

5.2. Zkoušky asfaltové směsi na zkušebních vzorcích

Zkoušky asfaltových směsí jsem prováděla dle *normy ČSN EN 12697 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka*:

- **Marshallova tělesa** – stanovení objemové hmotnosti, Stanovení citlivosti asfaltové směsi vůči účinkům vody podle ČSN EN 12697-12
- **Desky** – stanovení objemové hmotnosti
- **Trapezoidy** – Měření modulu tuhosti podle ČSN EN 12697-26

5.2.1. Stanovení objemové hmotnosti

Zkouška je popsána v normě *ČSN EN 12697-6+A1 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa*. Objemovou hmotnost jsem určila zvážení zkušebního tělesa za sucha, saturovaného ve vodní lázni a následně nasyceného vodou.

Postup zkoušky

Nejdříve jsem zjistila hmotnost zkušebního tělesa za sucha (m_{1h}) zvážení tělesa na digitální váze. Po zvážení jsem těleso ponořila do vodní lázně při laboratorní teplotě a o známé hustotě ρ_w (Obr. 43, Obr. 44) a nechala ho saturovat po dobu přibližně 30 minut, dokud se těleso nenasytilo vodou a nepřestaly z něj unikat vzduchové bublinky a dokud se hmotnost na váze neustálila na konstantní hodnotě. Poté jsem stanovila hmotnost saturovaného zkušebního tělesa (m_{2h}). Po odečtení hmotnosti jsem těleso vyjmula z vodní lázně, povrchově ho osušila a ihned stanovila hmotnost nasyceného zkušebního tělesa na digitální váze (m_{3h}).

Objemovou hmotnost desky jsem vypočetla ze vztahu:

$$\rho_{bssd} = \rho_w * \left(\frac{m_{1h}}{m_{3h} - m_{2h}} \right)$$

Kde

ρ_{bssd} objemová hmotnost SSD, v [kg/m³]

m_{1h} hmotnost suchého tělesa, v [g]

m_{2h} hmotnost tělesa ve vodě, v [g]

m_{3h} hmotnost tělesa nasyceného vodou a povrchově osušeného, v [g]

ρ_w hustota vody při zkušební teplotě stanovená z Tabulky 2, v [kg/m³]



Obr.43 Zkušební deska ve vodní lázni



Obr.44 Marshallovo těleso ve vodní lázni

5.2.2. ITS zkouška (Indirect Tensile Strenght)

Zkouška ITS umožňuje stanovení odolnosti zkušebních těles vůči vodě. Zkouška je popsána v evropské normě *ČSN EN 12697-12 Asfaltové směsi – zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – část 12: Stanovení odolnosti zkušebního tělesa vůči vodě*. V normě jsou popsány tři zkušební metody, podle kterých lze stanovit odolnost zkušebních těles vůči účinkům vody. V mé práci jsem použila metodu A, která stanovuje pevnost v příčném tahu zkušebních těles asfaltové směsi.

Metoda spočívá v porovnání pevností v příčném tahu skupiny těles v suchém stavu, tzn. že nejsou vystavena účinkům vody, se skupinou těles, která byla vystavena účinkům vody a dané teplotě. Účinek působení vody se stanoví jako poměr pevnosti v příčném tahu skupiny těles nasycených vodou a těles v suchém stavu.

Výpočet pevnosti v příčném tahu:

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

Kde

ITS pevnost v příčném tahu, v [MPa]

P maximální zatížení, v [N]

D průměr zkušebního tělesa, v [mm]

H výška zkušebního tělesa, v [mm]

Výpočet poměru pevnosti v příčném tahu:

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

Kde

ITSR poměr pevnosti v příčném tahu, v [%]

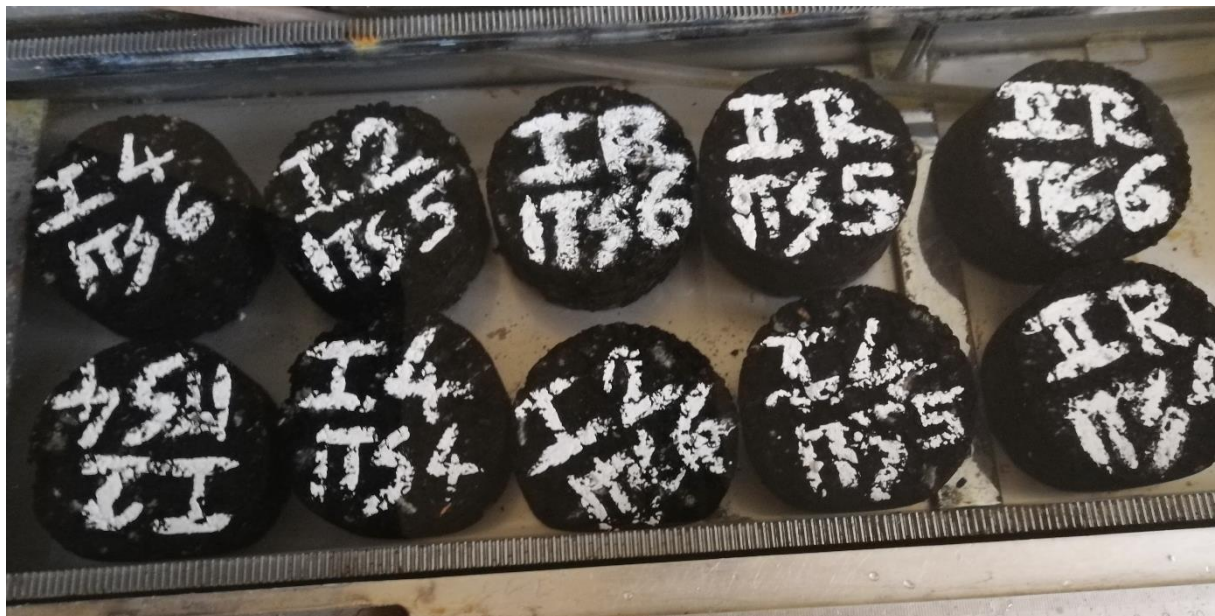
ITS_w průměrná pevnost v příčném tahu skupiny mokrých těles, v [kPa]

ITS_d průměrná pevnost v příčném tahu skupiny suchých těles, v [kPa]

Postup zkoušky

Zkušební tělesa jsem nejdříve rozdělila na dvě skupiny. Skupinu suchých těles jsem vložila do termostatické komory, kde byly vystaveny teplotě 17 °C po dobu minimálně 2 h. Skupinu těles, které byly určeny pro vystavení účinkům vody, jsem umístila do vakuové

komory s destilovanou vodou o teplotě $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$ 20 mm pod hranu hladiny. Následně se ve vakuové komoře zvedl tlak na $(6,7 \pm 0,3)$ kPa po dobu (10 ± 1) min. během této doby se tlak postupně snižuje, aby nedošlo k poškození zkušebních těles. Požadovaný tlak se ve vakuové komoře ponechá po dobu 30 min. Poté se pomalu vpouští běžný atmosferický tlak. Po vyrovnání vnějších a vnitřních tlaků se zkušební tělesa ponechají ve vakuové komoře ještě ve vodní lázni po dobu 30 min. Následně se zkušební tělesa vloží do vodní lázně o teplotě $40 ^\circ\text{C}$ a nechají se temperovat po dobu 72 hodin. [Obr. 46] Po uplynutí této doby jsem tělesa z vodní lázně vyjmula a uložila do druhé vodní lázně, kde jsem je nechala temperovat na dobu minimálně 2 hodin.



Obr.45 Zkušební tělesa ve vodní lázni při teplotě $40 ^\circ\text{C}$



Obr.46 Zkušební tělesa ve vodní lázni při teplotě $17 ^\circ\text{C}$

Po uplynutí doby temperování jsem provedla samotnou zkoušku. Zkouška na každém zkušebním tělese se musí provést během 1 minuty od vyjmutí z vodní lázně. Z výsledků, které jsem zjistila měřením, jsem stanovila pevnost v příčném tahu ITS a odolnost proti působení vody ITS_R.



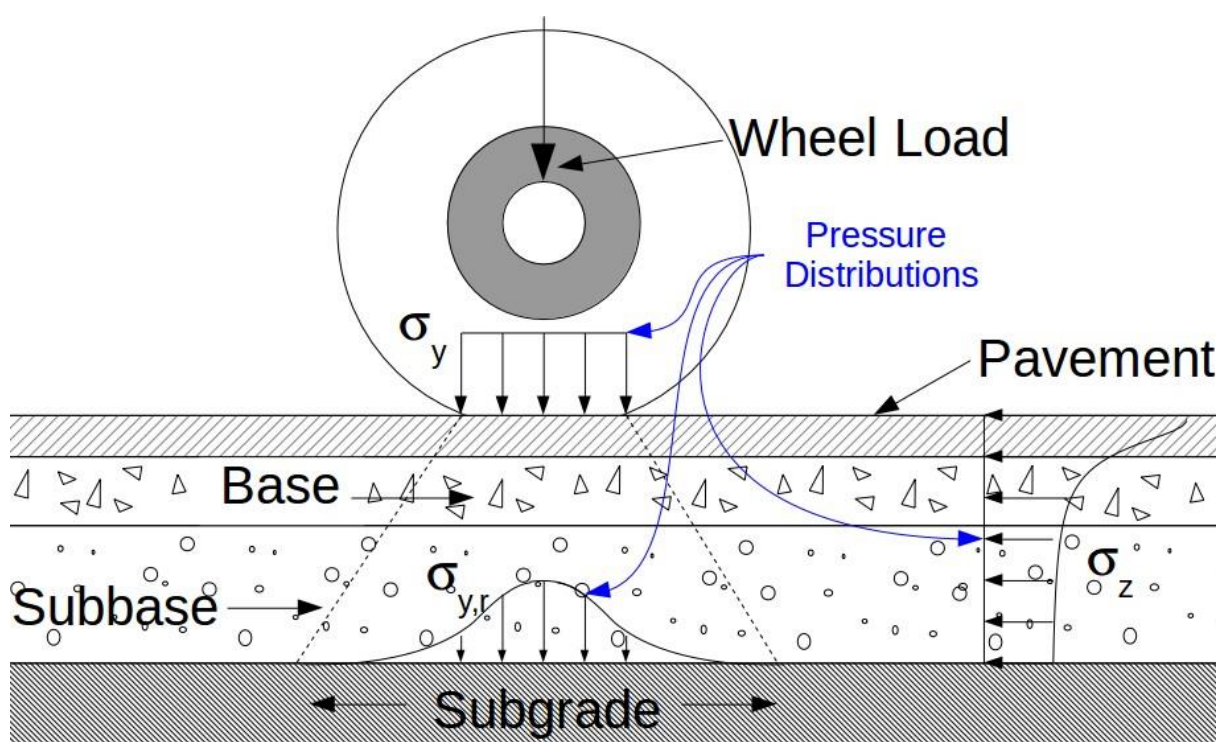
Obr. 47 Zkušební lis



Obr. 48 Vnitřní struktura porušeného zkušebního tělesa s obsahem 2% drti LDPE

5.2.3. Stanovení modulu tuhosti asfaltové směsi

Zkouška patří mezi únavové zkoušky asfaltových směsí a je popsána v normě ČSN EN 12697-5 *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 26: Tuhost*. Únava je definována jako porušování vnitřní struktury asfaltové směsi. Při každém přejezdu vozidla přes vozovku jsou jednotlivé materiály v konstrukci vozovky vystavovány krátkodobému opakovanému zatěžování, které má za následek mikroporušení. Tato mikroporušení mají za následek ztrátu tuhosti zhutněné směsi, která se později projeví ve formě únavových trhlin. Únavová trhlina může vzniknout na povrchu vozovky a šířit se směrem dolů důsledkem opakovaného tahového napětí vlivem zatížení od projíždějících vozidel, anebo vznikne v podkladní vrstvě konstrukce vozovky, kde vznikají největší tahová napětí a pokračuje směrem k povrchu vozovky viz Obr.51



Obr.49 Průběh napětí v konstrukci vozovky vlivem zatížení od nápravy vozidla [40]

Zkouška se provádí na zhutněných tělesech tvaru jednostranně vetknutého komolého klínu, při ustáleném harmonickém zatížení v čase t . Jedná se o tzv. dvoubodovou zkoušku 2PB-TR, jednu z možných zkoušek pro zjištění modulu tuhosti asfaltové směsi dle evropské normy. Pomocí této zkoušky je měřeno napětí, poměrné přetvoření a fázový úhel mezi napětím a poměrným přetvořením. Ustáleným harmonickým namáháním zkušební tělesa se zjišťuje komplexní veličinu modulu E^* . Modul tuhosti je potom absolutní hodnota komplexního modulu a reprezentuje vztah mezi napětím a přetvořením.

V mojí práci jsem modul tuhosti zjišťovala při frekvencích 5, 10, 15, 20 a 25 Hz a teplotách 15 °C a 40 °C.

Postup zkoušky

Zkušební tělesa použité na zkoušku byly vyrobeny ze zkušebních desek. Z desek, které jsem vyrobila zhutňovačem desek viz kapitola 3.1.2, byly vyrobeny zkušební tělesa ve tvaru tzv. trapezoidů rozřezáním na kotoučové pile. Nejdříve jsem zjistila rozměry a hmotnost všech zkušebních těles pro samotné měření. Zkušební vzorky jsem poté upevnila připraveným lepidlem na zkušební podložky. Po vytvrdnutí lepidla jsem nechala vzorky temperovat po dobu minimálně 4 hodin do klimatizované komory, ve které byla teplota 15 °C pro první měření a 40 °C pro druhé měření. Poté jsem zkušební tělesa pomocí podložek a šroubů upevňovala do rámu v přístroji a prováděla samostatnou zkoušku [Obr.56,57]

Nejdříve jsem zkušební tělesa zkoušela na teplotu 15 °C a poté na 40 °C.



*Obr.50 Zkušební tělesa – trapezoidy,
ACO 11+*



*Obr.51 Zkušební tělesa – trapezoidy, referenční směs
směs ACO 11+ modifikovaná 2% LDPE*



Obr.52,53 Trapezoidy upevněné na ocelových podložkách

Během zkoušky jsou zkušební tělesa zatěžována v rozsahu lineárního přetvoření. Měří se amplituda napětí a poměrné přetvoření spolu s fázovým úhlem mezi napětím a poměrným přetvořením. Hodnoty měření získané během zkoušky, jsou vyvozená síla F , posun Z a fázový úhel Φ . Z těchto hodnot lze vypočítat dvě složky modulu tuhosti E_1 a E_2 .

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

$$E_2 = \gamma * \left(\frac{F}{Z} * \sin(\Phi)\right)$$

γ je faktor tvaru jako funkce velikosti a tvaru zkušební tělesa:

$$\gamma = \frac{12L^3}{b(h_1 - h_2)^3} \left[\left(2 - \frac{h_2}{2h_1}\right) \frac{h_2}{h_1} - \frac{3}{2} - \ln \frac{h_2}{h_1} \right]$$

μ je faktor hmotnosti, který je funkcí hmotnostního složení tělesa M a hmotností pohyblivých částí m , které ovlivňují svojí setrvačnou silou výslednou sílu. M a m se vyjadřují v gramech.

$$\gamma = 0,135M + m$$

Měřený komplexní modul tuhosti asfaltových směsí E^* je materiálová charakteristika viskoelastického přetváření při krátkodobém namáhání harmonicky proměnným zatížením, závislá na teplotě a frekvenci zatěžování. Komplexní modul E^* je komplexní číslo, které se vyjadřuje pomocí vztahu:

$$E^* = E_1 + i E_2$$

Kde

E_1 reálná složka, která charakterizuje pružné vlastnosti asfaltové směsi

E_2 imaginární složka, která charakterizuje viskózní vlastnosti

Výsledkem měření je aritmetický průměr dílčích výsledků modulu tuhosti a fázového posunu při dané teplotě a frekvenci.



Obr.54,55 Zkušební zařízení pro měření modulu tuhosti asfaltové směsi metodou 2PB-TR a upevnění zkušebního tělesa

Protože jsem pracovala z asfaltovou směsí odebranou přímo v obalovně bylo kromě provedených funkčních zkoušek důležité i stanovení základních empirických vlastností použitého asfaltu. Stanovení penetrace a hodnoty bodu měknutí kroužek kulička asfaltu po provedených zkouškách odhalí rychlost stárnutí asfaltu.

5.2.4. Stanovení penetrace jehlou

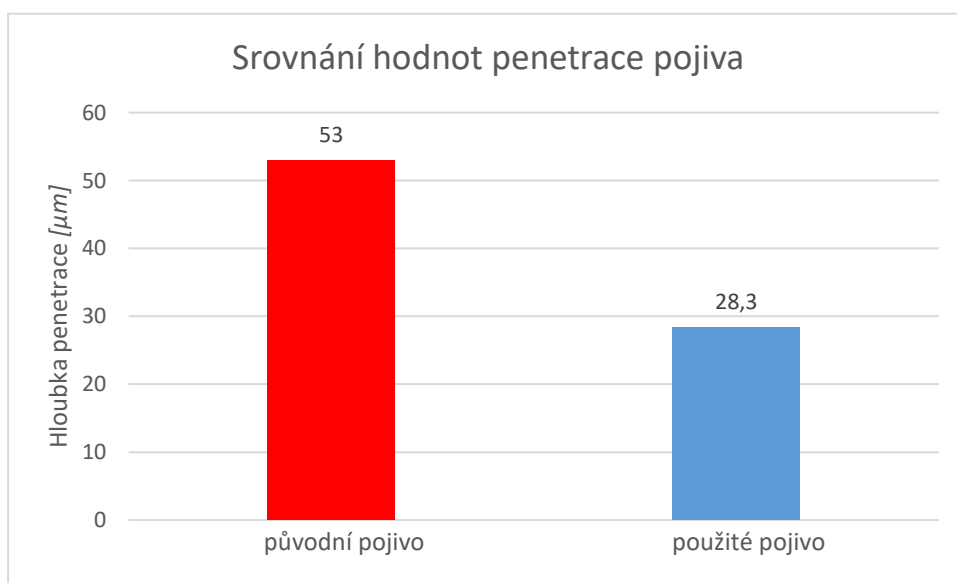
Stanovení penetrace jehlou je jedna ze základních empirických zkoušek asfaltů. Zkouška byla provedena dle normy ČSN EN 1426. Hodnota penetrace vyjadřuje hloubku průniku jehly do asfaltového pojiva při teplotě 25 °C, zatížení 100g po dobu 5 s. Hloubka průniku jehly se měří v penetračních jednotkách (1 p.j. = 0,1mm) a zaokrouhluje se na nejbližší celé číslo v mm.

Naměřená hodnota penetrace jehlou slouží k zatřídění asfaltového pojiva do gradačních tříd.



Obr. 56 Měřicí zařízení na stanovení hodnoty penetrace

Naměřené hodnoty penetrace byly 28,7 μm ; 28,3 μm a 27,9 μm . Původní gradace asfaltového pojiva v asfaltové směsi byla 50/70 s hodnotou penetrace 53 μm . Došlo ke snížení penetrace o jednu třídu.



Graf 11: Srovnání hodnot penetrace pojiva

5.2.5. Stanovené bodu měknutí metodou kroužek kulička (Ring and Ball)

Zkouška se provádí podle normy ČSN EN 1427. Pomocí této zkoušky se určuje bod měknutí asfaltového pojiva, který je definován teplotou v jednotkách °C, při které vrstva asfaltu o tl. 6,4mm, která vyplňuje kovový kroužek při ohřívání v tekutinové lázni změkne natolik, že se kulička položená na této vrstvě proboří na délku 25mm. Tekutinová lázeň probíhá do 80°C v odvzdušněné vodě a od 80°C v glyrecinu.

Nejdříve jsem si nachystala dva mosazné kroužky, které jsem očištěné nahřála a poté umístila na odlévací destičku. Zkoušené asfaltové pojivo jsem opatrně nalila do kroužků a nechala zchladnout po dobu 30 min. Po uplynutí této doby jsem nahřátou špachtlí seřízla přebytečné pojivo z kroužku a takto nachystané pojivo přemístila do vodní lázně. Takto nachystané vzorky pojiva jsem nechala temperovat po dobu 30 min při teplotě 5°C a poté provedla samotnou zkoušku.

Pomocí této zkoušky jsem zjistila, že bod měknutí asfaltového pojiva v asfaltové směsi je 57,1°C, což odpovídá standardu.



Obr.57 Nachystaný vzorek asfaltového pojiva



Obr.58 Zkouška Kroužek kulička

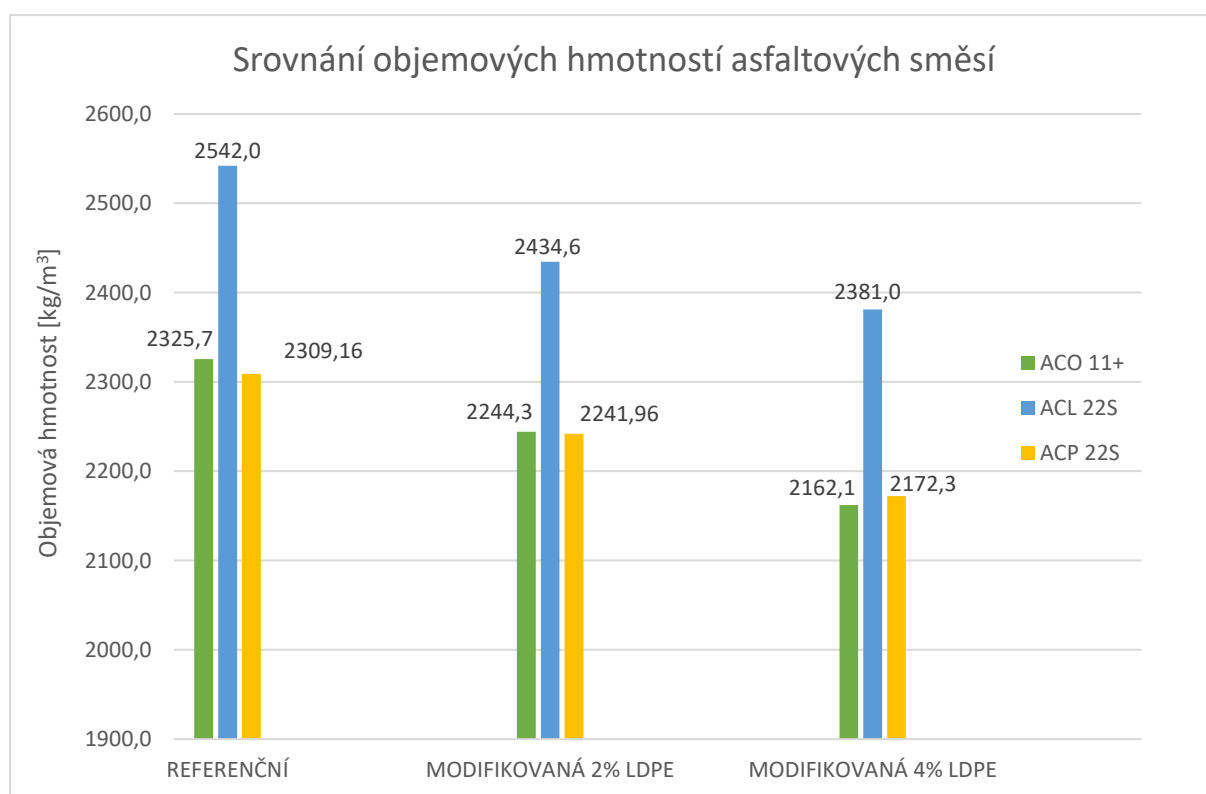
6. VÝSLEDKY LABORATORNÍCH ZKOUŠEK

V následující kapitole jsou prezentovány výsledky zkoušek, které byly prováděny v rámci praktické části diplomové práce. Jejich postup je popsán v kapitole 3. *Použité zkušební metody.*

6.1. Výsledky objemové hmotnosti Marshallových těles a zkušebních desek

V této kapitole jsou uvedeny hodnoty objemové hmotnosti zkušebních Marshallových těles a zkušebních desek. Měření objemové hmotnosti bylo popsáno v kapitole 5.2.1. *Stanovení objemové hmotnosti.*

U všech směsí bylo provedeno měření objemové hmotnosti pomocí vážení těles za sucha, ve vodě a po osušení povrchu tělesa. Výsledky jsou zpracovány v *Tabulce 3,4,5* a graficky znázorněné v *Grafu 12.*



Graf 12: Srovnání objemových hmotností asfaltových směsí

Z *Grafu 9* je zřetelně vidět, že přidáváním polymeru LDPE do asfaltové směsi klesá její objemová hmotnost, a to u všech druhů asfaltových směsí. U hrubozrnějších směsí (ACP 22S a ACL 22S) nejsou rozdíly hodnot objemových hmotností tak markantní jako u jemnozrné směsi ACO 11+. U asfaltové směsi ACP 22S je při obsahu 4% LDPE objemová hmotnost vyšší než u asfaltové směsi ACL 22S, kdy v referenčním stavu jsou hodnoty opačné.

OBJEMOVÁ HMOTNOST [kg/m ³]	ACO 11+								
	REFERENČNÍ			MODIFIKOVANÁ 2% LDPE			MODIFIKOVANÁ 4% LDPE		
Číslo vzorku	4	5	6	4	5	6	4	5	6
Hmotnost za sucha [g]	1262,7	1235,5	1252,9	1268,9	1273,5	1250,0	1066,4	1082,3	1074,6
Hmotnost ve vodě [g]	720,8	706,0	715,2	704,7	711,1	693,9	584,1	589,6	585,4
Hmotnost osušená [g]	1263,8	1237,1	1254,0	1271,9	1276,1	1251,5	1078,4	1090,7	1080,8
Objemová hmotnost	2325,4	2326,3	2325,4	2237,1	2254,0	2241,8	2157,4	2159,8	2169,2
	2325,7 kg/m³			2244,3 kg/m³			2162,1 kg/m³		

Tab. 3 – Objemové hmotnosti asfaltové směsi ACO 11+

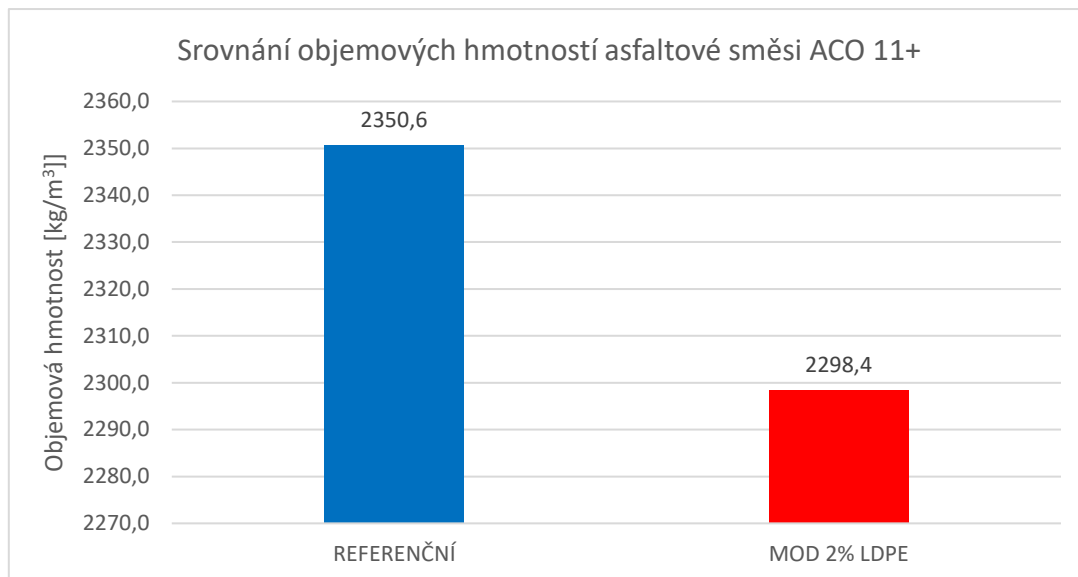
OBJEMOVÁ HMOTNOST [kg/m ³]	ACL 22S								
	REFERENČNÍ			MODIFIKOVANÁ 2% LDPE			MODIFIKOVANÁ 4% LDPE		
Číslo vzorku	4	5	6	4	5	6	4	5	6
Hmotnost za sucha [g]	1263,7	1244,8	1267,6	1268,9	1268,6	1279,7	1293,3	1290,7	1292,0
Hmotnost ve vodě [g]	769,8	759,7	774,4	757,4	759,4	763,9	761,1	762,1	759,0
Hmotnost osušená [g]	1269,1	1248,6	1271,7	1280,8	1278,0	1289,8	1304,6	1303,8	1301,7
Objemová hmotnost	2530,9	2546,1	2549,0	2424,3	2446,2	2433,4	2379,6	2382,7	2380,7
	2542,0 kg/m³			2434,6 kg/m³			2381,0 kg/m³		

Tab. 4 – Objemové hmotnosti asfaltové směsi ACP 22S

OBJEMOVÁ HMOTNOST [kg/m ³]	ACP 22S								
	REFERENČNÍ			MODIFIKOVANÁ 2% LDPE			MODIFIKOVANÁ 4% LDPE		
Číslo vzorku	4	5	6	4	5	6	4	5	6
Hmotnost za sucha [g]	1168,6	1172,6	1168,3	1153,1	1163,5	1197,4	1162,2	1190,6	1143,8
Hmotnost ve vodě [g]	686,1	681,1	680,2	662,6	666,1	677,0	644,5	661,5	637,9
Hmotnost osušená [g]	1187,7	1192,9	1186,7	1173,6	1184,1	1215,6	1179,9	1211,0	1162,7
Objemová hmotnost	2329,7	2291,1	2306,6	2256,6	2246,1	2223,2	2170,7	2166,7	2179,5
	2309,2 kg/m³			2242,0 kg/m³			2172,3 kg/m³		

Tab. 5 – Objemové hmotnosti asfaltové směsi ACL 22S

Pro zkoušky na stanovení modulu tuhosti jsem vybrala asfaltovou směs ACO 11+. Pro tyto účely jsem vyrobila zkušební desky, z nichž jsem měřením zjistila hodnoty, znázorněné v *Grafu 9*. Měření objemové hmotnosti zkušebních desek potvrdilo zmenšení hodnoty objemové hmotnosti přidáním LDPE jako u Marshallových těles.



Graf 13: Srovnání objemových hmotností zkušebních desek

OBJEMOVÁ HMOTNOST ACO 11+ [kg/m³]			
REFERENČNÍ		MOD 2% LDPE	
1	2	1	2
9449	9476	9297	9281
5474,0	5504	5296	5287
9505,0	9524	9355	9311
2344,1	2357,2	2290,5	2306,4
2350,6 kg/m³		2298,4 kg/m³	

Tab. 6 – Objemové hmotnosti asfaltové směsi ACO 11+ na zkušebních deskách

6.2. Výsledky citlivosti na vodu

Zkouška odolnosti zkušebních těles vůči účinkům vody byla popsána v kapitole 3.2.2. *ITS zkouška (Indirect Tensile Strenght)*.

Pro stanovení odolnosti asfaltové směsi vůči účinkům vody jsem provedla zkoušku pevnosti v příčném tahu na skupině suchých těles a těles vystavených účinkům vody. Vyhodnocením naměřených hodnot jsem získala poměr pevností v příčném tahu (ITSR).

Zkušební tělesa jsem rozdělila podle druhu asfaltové směsi na 3 skupiny. Každou skupinu jsem pak rozdělila na další 3 skupiny dle podílu LDPE ve směsi, kdy první skupinu zkušebních těles tvořila Marshallova tělesa z referenční směsi pro srovnávání výsledků a další dvě skupiny pak byly tvořeny ze zkušebních těles s obsahem 2% LDPE a 4% LDPE v asfaltové směsi. Výsledky měření jsou znázorněny v *Tabulce 6,7,8*.

Citlivost na vodu ITSR byla u směsí ACO11+ a ACL 22 s obsahem 2% a 4% LDPE naměřena horší než u směsi referenční. U asfaltové směsi ACP 22S byla u referenční směsi naměřena pouze hodnota 55%, kdy s obsahem LDPE měla hodnoty ITSR 55% v případě obsahu 2% LDPE a 66% v případě 4% LDPE.

Pevnost v příčném tahu se u směsi ACO 11+ výrazně nezhoršila, ani nezlepšila. U směsi ACP 22S byly hodnoty pevnosti v příčném tahu naměřeny nízké i u referenční směsi. U směsi ACL 22S došlo ke zlepšení v případě směsi s obsahem 2% LDPE. Ve výsledku takto vysoký obsah LDPE v asfaltové směsi snížil pevnost v příčném tahu s výjimkou asfaltové směsi pro ložní konstrukční vrstvy ACL 22S s obsahem 2% LDPE.

ACO 11+						
		Maximální zatížení [N]	Přetvoření [mm]	ITS [MPa]	Průměr ITS [MPa]	ITSR [%]
Suchá tělesa	referenční	27690	2000	2,86	2,90	103%
		26710	2683	2,8		
		29490	2323	3,04		
	2% LDPE	24900	2456	2,54	2,62	66%
		26760	2770	2,65		
		27250	2522	2,67		
	4% LDPE	23680	1764	2,16	2,33	50%
		25540	1925	2,36		
		21920	2139	2,48		
Mokrā tělesa	referenční	28220	2432	2,89	2,98	103%
		29830	2432	3,11		
		28960	2288	2,94		
	2% LDPE	17419	1760	1,71	1,72	66%
		17191	2050	1,71		
		17652	1860	1,73		
	4% LDPE	12731	1970	1,39	1,17	50%
		12330	1930	1,35		
		6914	1740	0,77		

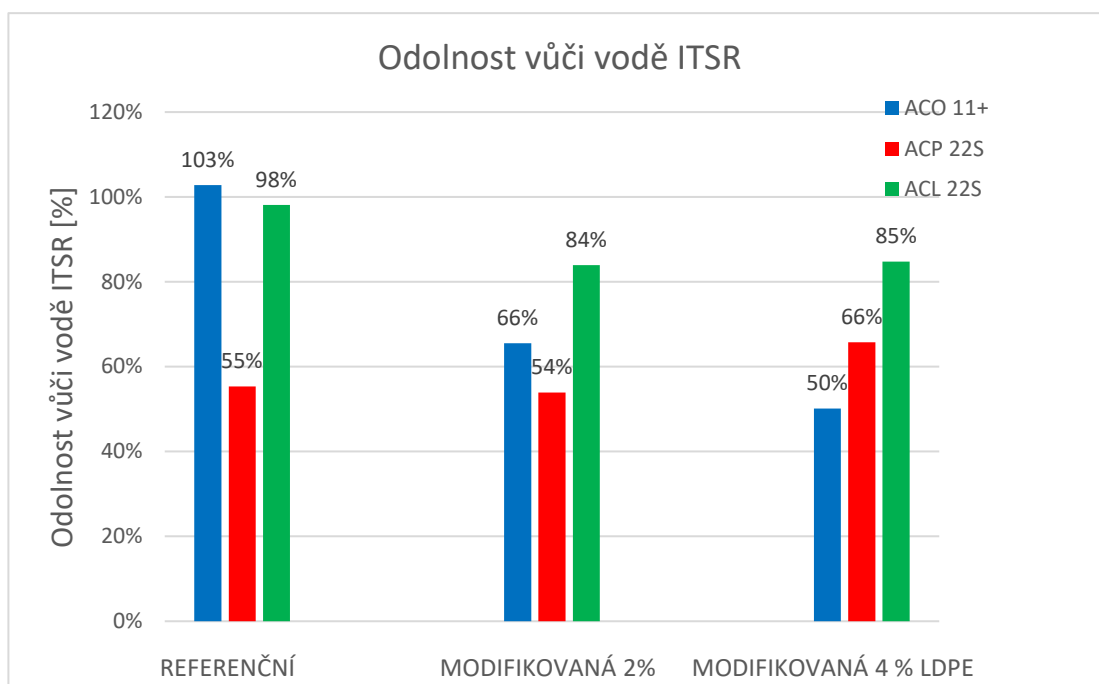
Tab. 7 – Odolnost vůči vodě u asfaltové směsi ACO 11+

ACP 22S						
		Maximální zatížení [N]	Přetvoření [mm]	ITS [MPa]	Průměr ITS [MPa]	ITSR [%]
Suchá tělesa	referenční	16160	2359	1,67	1,79	55%
		17530	1888	1,77		
		18800	2376	1,93		
	2% LDPE	16310	1881	1,62	1,53	54%
		15580	2253	1,55		
		14400	1892	1,43		
	4% LDPE	14600	2282	1,45	1,32	66%
		10500	1609	1,04		
		15770	2228	1,48		
Mokrā tělesa	referenční	9567	1570	0,97	0,99	55%
		9621	1390	0,96		
		10000	1810	1,04		
	2% LDPE	8732	1180	0,87	0,83	54%
		6380	1790	0,61		
		10434	1590	1,00		
	4% LDPE	9845	1210	0,95	0,87	66%
		9162	1280	0,87		
		8026	1090	0,79		

Tab. 8 – Odolnost vůči vodě u asfaltové směsi ACL 22S

ACL 22S						
		Maximální zatížení [N]	Přetvoření [mm]	ITS [MPa]	Průměr ITS [MPa]	ITSR [%]
Suchá tělesa	referenční	27540	2521	2,98	2,95	98%
		25780	2530	2,77		
		28370	2315	3,10		
	2% LDPE	30570	2522	3,24	3,09	84%
		27150	2806	2,74		
		31690	2052	3,30		
	4% LDPE	21440	3121	2,10	2,49	85%
		29590	2398	3,10		
		23490	3065	2,27		
Mokrā tělesa	referenční	27440	2736	2,90	2,89	98%
		25930	2945	2,76		
		28030	2991	3,02		
	2% LDPE	20650	2083	2,09	2,60	84%
		30760	5912	3,01		
		27050	2819	2,69		
	4% LDPE	24070	3893	2,22	2,11	85%
		22410	2036	2,08		
		21040	2683	2,03		

Tab. 9 – Odolnost vůči vodě u asfaltové směsi ACL 22S



Graf 14: Srovnání odolnosti asfaltových směsí vůči vodě

6.3. Výsledky měření modulu tuhosti

Postup měření byl popsán v kapitole 3.2.3. *Stanovení modulu tuhosti asfaltové směsi.* Komplexní modul tuhosti byl zjišťován při teplotách 15°C a 40°C. Měření probíhalo při působení frekvencí 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz a 25 Hz.

Výsledky jsou zprůměrované hodnoty 10 zkušebních těles od každé směsi a jsou znázorněné v *Tabulce 9* a názorně zobrazeny v *Grafu 11*.

Modul tuhosti [MPa]		Teplota	
typ směsi	Frekvence zatěžování	15 °C	40 °C
ACO 11+ referenční	5 Hz	9343,9	1677,9
	10 Hz	10290,3	3043,8
	15 Hz	10772,2	3779,5
	20 Hz	11246,3	4714,1
	25 Hz	11432,4	6448,9
ACO 11+ 2% LDPE	5 Hz	9038,2	2277
	10 Hz	9651,7	3244,9
	15 Hz	9978,9	3415,7
	20 Hz	10270,8	3591,7
	25 Hz	10366,2	3961,5

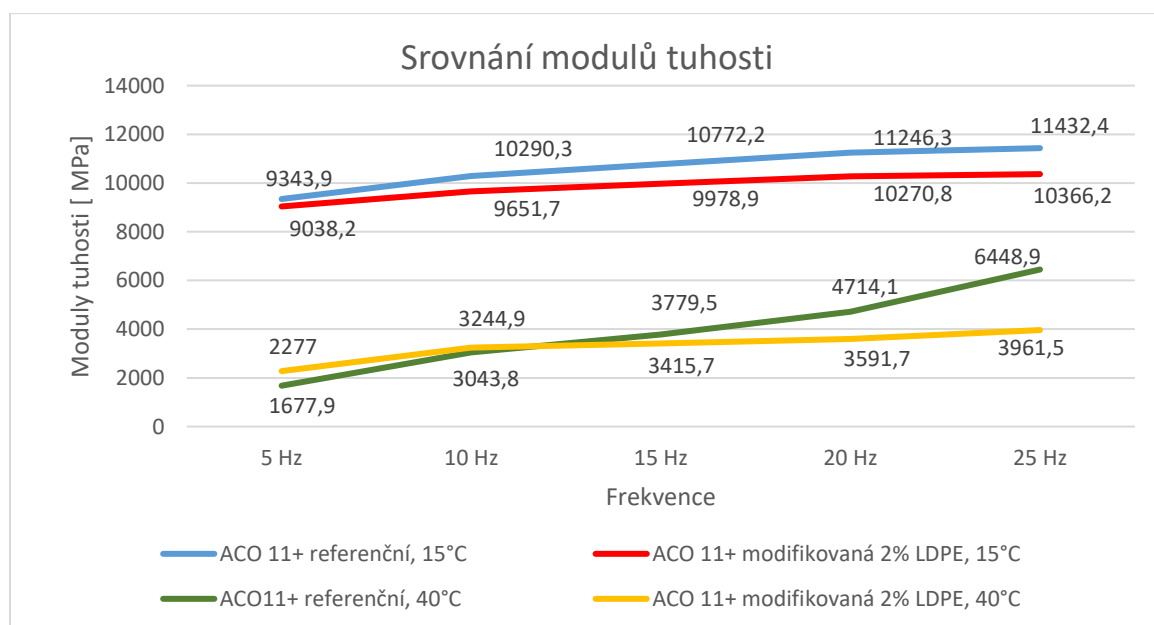
Tab. 10 Komplexní modul tuhosti asfaltových směsí

Dle TP 170 je návrhová hodnota modulu tuhosti určována při frekvenci 10 Hz a teplotě +15 °C. Proto jsem vytvořila *Graf 12*, který znázorňuje závislost modulů tuhosti na teplotě při základní frekvenci 10 Hz.

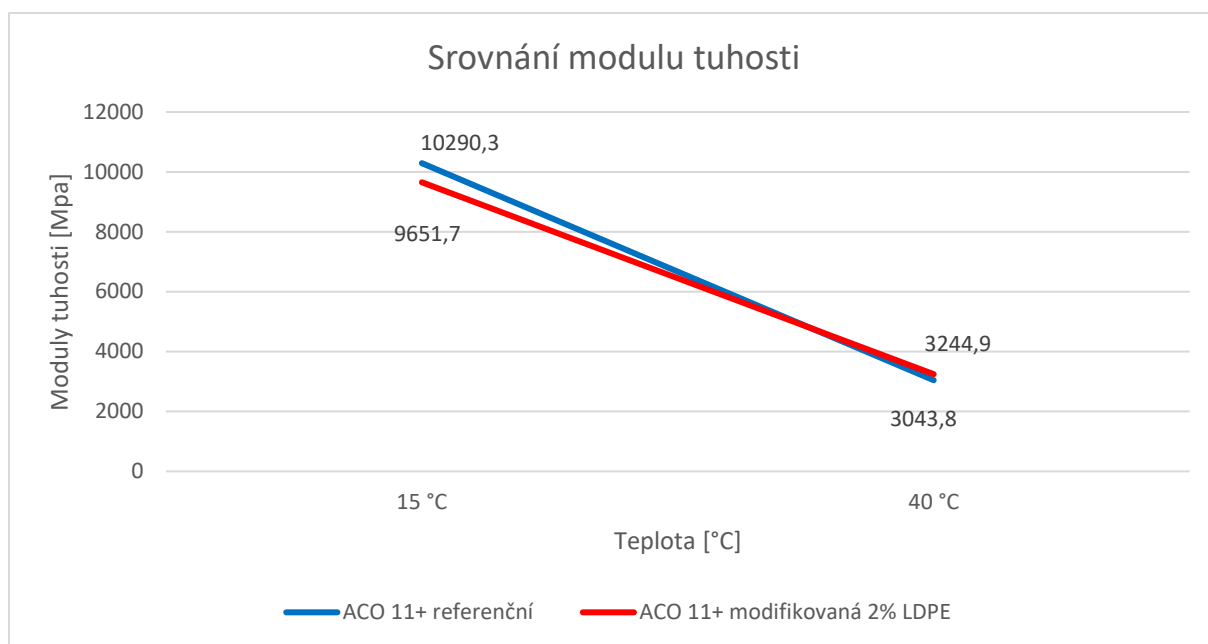
Při zvyšování frekvence zatěžování docházelo ke zvyšování modulu tuhosti u všech asfaltových směsí. U směsi referenční směsi ACO 11+ i u modifikované směsi ACO 11+ 2% polymeru LDPE byly moduly tuhosti naměřeny nadprůměrně vysoké. Podle sklonu čáry tuhosti v závislosti na teplotě vykazovala nižší citlivost na teplotu směs ACO 11+ v případě teplot do cca 33°C, což v praxi znamená, že má tato směs lepší odolnost vůči mrazovým trhlinám. V případě vyšších teplot od cca 33°C a více vykazuje nižší teplotní citlivost směs ACO 11+ modifikovaná 2% LDPE. To má za následek lepší odolnost vůči trvalým deformacím, což potvrzuje zahraniční studie a fakt, že takto modifikovaná směs je vhodná pro použití v zemích s vysokými ročními průměrnými teplotami.

Při teplotě 15 °C a frekvenci 10 Hz byl naměřen modul tuhosti 10290,3 MPa u referenční asfaltové směsi ACO 11+. U směsi ACO 11+ modifikované 2% polymeru LDPE byl naměřen modul tuhosti 9651,7 MPa. Srovnání minimálních hodnot modulů tuhosti dle normy ČSN EN 3108-1 ed.2 *Asfaltový beton* a dle TP 148 *Hutněné asfaltové vrstvy s pojivem modifikovaným pryžovým granulátem z pneumatik* s naměřenými hodnotami v laboratoři jsou znázorněny v *Tabulce 10*.

Tuhost obou směsí byla výrazně vyšší, než požaduje norma ČSN EN 3108-1 ed.2 *Asfaltový beton* a dle TP 148 *Hutněné asfaltové vrstvy s pojivem modifikovaným pryžovým granulátem z pneumatik*.



Graf 15: Závislost modulů tuhosti na frekvenci zkoušených směsí



Graf 16: Závislost modulů tuhosti na teplotě zkoušených směsí

Minimální moduly tuhosti při 15 °C a 10 Hz	ČSN EN 13108-1	TP 148	naměřené
referenční ACO11+	> 7000 MPa	> 3500 Mpa	10290,3 MPa
ACO 11+ modifikovaná 2% LDPE			9651,7 MPa

Tab.10 Porovnání modulů tuhosti s normami

7. ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo zjistit, zda je možné využití většího množství recyklovaných odpadních plastů do asfaltových směsí. Z výsledků světových studií hranice maximálního množství použitého LDPE na 1,6 % objemu asfaltové směsi. Hlavním cílem bylo ověřit použití maximálního množství recyklovaného plastu do asfaltové směsi, aniž dojde k výraznému snížení vlastností používané asfaltové směsi. Takto použité recyklované plasty by výrazně eliminovaly skládkování a ukládání odpadních plastů, které jinak končí na trvalých skládkách, spalovnách a v nejhorším případě v mořích a oceánech.

V teoretické části diplomové práce byly přiblíženy nejpoužívanější typy asfaltových směsí v České republice a také byly vysvětleny metody modifikace asfaltových směsí termoplasty, které se v současné době ve světě používá. Dále jsou v práci popsány druhy polymerů a jejich použití jako modifikátoru do asfaltových směsí ve světě. Polyethylen s nízkou hustotou jsem v práci charakterizovala i z chemického pohledu, včetně jeho chemického působení s asfaltem. V závěru teoretické části diplomové práce byl popsán výzkum využití polymeru LDPE do asfaltových směsí, na kterém jsem se podílela během mého zahraničního studia v Portugalsku.

V praktické části diplomové práce byly popsány použité zkoušky a zkušební metody asfaltů a asfaltových směsí, které jsem během diplomové práce prováděla v silniční laboratoři. Dále jsem v práci popsala a charakterizovala jednotlivé materiály použité pro diplomovou práci.

Praktická část mojí diplomové práce probíhala v silniční laboratoři připravováním a zkoušením zkušebních těles pomocí laboratorních zkoušek. Pro diplomovou práci jsem zvolila asfaltový beton AC, protože je nejpoužívanějším druhem asfaltové směsi v České republice a je nejvhodnější pro modifikaci polymerem kvůli svojí plynulé zrnitosti a nízké mezerovitosti. Zkoušky na asfaltovém betonu jsem pro typ ACO 11+, ACL 22S a ACP 22S. Asfaltové směsi jsem získala z obalovny, přidávala do ní 2% a 4% LDPE a zkoumala vlivy tohoto polymeru na chování asfaltové směsi.

Stanovením objemových hmotností zkušebních těles jsem zjistila, že přidáním polymeru LDPE do asfaltové směsi úměrně klesá objemová hmotnost.

Pomocí zkoušky pevnosti v příčném tahu jsem zaznamenala zvýšení výsledné hodnoty pevnosti u asfaltové směsi ACL 22S s obsahem 2 % LDPE, a to na hodnotu 3,09 MPa z hodnoty 2,95 MPa zjištěné na referenčním tělese.

Zkoušky citlivosti asfaltových směsí na vodu ukázaly, že přidáním polymeru LDPE do asfaltových směsí klesá odolnost vůči vodě.

Stanovení modulu tuhosti jsem provedla jen na asfaltové směsi pro obrusné vrstvy vozovek, tedy ACO 11+, a to za teploty 15 °C a 40 °C při frekvencích 5, 10, 15, 20 a 25 Hz. Jednak se jedná o směs pro obrusnou vrstvu, tedy vrstvu, kde by měla podle zahraničních

zdrojů modifikovaná směs plastem pozitivně ovlivnit odolnosti proti trvalým deformacím. Dále asfaltová směs ACO 11+ vykazovala při zkouškách ITS největší rozdíly v pevnostech i poměru ITSr. Porovnáním výsledků jsem zjistila, že při teplotě 15°C jsou moduly tuhosti u referenční

i modifikované směsi výrazně vyšší než při teplotě 40°C. Hodnoty modulů tuhosti zkoušené asfaltové směsi byly při teplotě 15°C na hranici 10000 MPa. Z tohoto důvodu byly na závěr práce doplněny zkoušky asfaltu, které byly porovnány s výrobními hodnotami tak, aby se vyloučila možnost velkého snížení gradace asfaltu. Zkouškou penetrace asfaltového pojiva jsem zjistila hodnoty 28,7/28,3 a 27,9, takže tak vysoké moduly tuhosti s největší pravděpodobností nejsou vlivem rychlého zestárnutí asfaltového pojiva. Vysoké moduly tuhosti při obou teplotách značí výbornou teplotní odolnost. Na druhou stranu tak vysoký modul tuhosti může být příčinou trhlin, které vznikají dopravním zatížením komunikací.

V závěru lze říci, že přidáním tak velkého množství LDPE do asfaltových směsí výrazně neklesají jejich vlastnosti. Na provedených laboratorních zkouškách nebyl kromě překvapivě snadné zpracovatelnosti, zaznamenán výrazný nárůst vlastností tak, jak to uvádí některé zahraniční zdroje. Do budoucna bude důležité sledovat nejen maximální možné dávkování modifikátoru LDPE, ale především prostudovat optimální množství tohoto polymeru, které by se dalo použít do asfaltových směsí pro použití v České republice při vývoji výrazněji pozitivnějších výsledků.

8. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Kocandová Jana, Mechanické vlastnosti a struktura směsí recyklovaného polyethylénu a velmi nízko hustotního polyethylénu, [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta chemická. 2019
- [2] Mepex Consult AS, Basic Facts Report on Design for Plastic Packaging Recyclability, 2017 [online] Dostupné z <https://www.grontpunkt.no/media/2777/report-gpn-design-for-recycling-0704174.pdf>
- [3] L.M.B. Costa, H.M.R.D. Silva, J. Peralta, J.R.M. Oliveira, Using waste polymers as a reliable alternative for asphalt binder modification – performance and morphological assessment, *Constr. Build. Mater.* 198 (2019) 237–244, [online] Dostupné z <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.279>
- [4] White, G & Reid, G 2018, 'Recycled waste plastic for extending and modifying asphalt binders', 8th Symposium on Pavement Surface Characteristics (SURF 2018), Brisbane, Queensland, Australia, 2-4 April. [online] Dostupné z <https://trid.trb.org/view/1538158>
- [5] Grause, G & Yoshikoka, T 2015, 'Recycling of waste plastics', *Topical Themes in Energy and Resources*, pp. 195-214, January. [online] Dostupné z <http://www.davidpublisher.org/Public/uploads/Contribute/5ddb2c76d3b73.pdf>
- [6] Leng, Z, Sreeram, A, Padham, RK & Tan, Z 2018, 'Value-added application of waste PET based additives in bituminous mixtures containing high percentage of reclaim asphalt pavements (RAP)', *Journal of Cleaner Production*, no. 196, pp. 615-625. [online] Dostupné z <http://ira.lib.polyu.edu.hk/handle/10397/79403>
- [7] Raouf, MR, Eweed, KM & Rahma, NM 2018, 'Recycled polypropylene to improve asphalt physical properties', *International Journal of Civil Engineering and Technology*, vol. 9, no. 12, pp. 1260-1267. [online]
- [8] J. Kizlink, *Nakládání s odpady*, 1. vydání, Brno: Fakulta chemická VUT v Brně, 2007.
- [9] <http://www.ecoservis.eu/co-se-deje-se-starymi-plasty>
- [10] <https://zajimej.se/faq-trideni-a-recyklace-plastu-v-cr/>
- [11] <https://phys.org/news/2019-09-explosion-plastic-pollution-post-world-war.html>
- [12] <https://www.plasticroad.eu/en/>
- [13] Ridden, P 2012, 'The streets of Vancouver are paved with.... Recycled plastic', *New Atlas*, 1 December, accessed 7 April 2019, [online], Dostupné z <http://newatlas.com/vancouver-recycled-plastic-warm-mix-asphalt/25254/>
- [14] Parkes, R 2018, 'Recycled plastic used in airport asphalt' *Roads & Infrastructure Australia*, 5 April, accessed 7 April 2019, [online], Dostupné z <http://roadsonline.com.au/recycled-plastic-used-in-airport-asphalt>
- [15] Pisani, A 2018, 'SA's first recycled road made from binned plastic and glass', *news.com.au*, 11 December, accessed 7 April 2019, [online], Dostupné z www.news.com.au/national/south-australia/sas-first-recycled-road-made-from-binned-plastic-and-glass/news-story/e7f03a9b43f797e651256d6bc8a4fc90
- [16] Coleman, T 2019, 'Pothole busting plastic roads coming to Cumbria', *The Cumberland News*, 2 February, accessed 7 April 2019, [online], Dostupné z www.newsandstar.co.uk/news/17402195.pothole-busting-plastic-roads
- [17] ZAJIČEK, Jan. *Technologie stavby vozovek*. Praha: ČKAIT, 2014. ISBN 978-80-87438-59-6.
- [18] <http://www.gumoasfalt.cz/recyklace.html>
- [19] White, G & Reid, G 2018, 'Recycled waste plastic for extending and modifying asphalt binders', 8th Symposium on Pavement Surface Characteristics (SURF 2018), Brisbane, Queensland, Australia, 2-4 April. [online] Dostupné z <https://trid.trb.org/view/1538158>

- [20] Reclaimed Polymers as Asphalt Binder Modifiers for More Sustainable Roads: A Review Luzana Brasileiro 1, Fernando Moreno-Navarro 2, Raúl Tauste-Martínez 2, Jose Matos 1 and Maria del Carmen Rubio-Gámez 2,* [online] Dostupné z https://www.researchgate.net/publication/330706261_Reclaimed_Polymers_as_Ashphalt_Binder_Modifiers_for_More_Sustainable_Roads_A_Review
- [21] Ziari, H, Kaliji, AG & Babagoli, R 2016, 'Laboratory evaluation of the effect of waste plastic bottle (PET) on rutting performance of hot mix asphalt mixtures', Petroleum Science and Technology, vol. 34, no. 9, pp. 819-823. [online] Dostupné z https://www.researchgate.net/publication/304069557_Laboratory_evaluation_of_the_effect_of_waste_plastic_bottle_PET_on_rutting_performance_of_hot_mix_asphalt_mixtures
- [22] Objective evaluation of the practical benefits of asphalt binders modified with recycled Plastic, Dr. Greg White, University of the Sunshine Coast, Queensland, Australia [online] Dostupné z https://www.researchgate.net/publication/337486137_OBJECTIVE_EVALUATION_OF_THE_PRACTICAL_BENEFITS_OF ASPHALT BINDERS MODIFIED WITH RECYCLED PLASTIC
- [23] <https://www.euro.cz/byznys/temna-strana-rustu-indie-se-topi-v-odpadu-1470878>
- [24] <https://www.hindustantimes.com/delhi-news/cost-keeps-nhai-from-using-ghazipur-waste-for-road-work/story-dmnaizc3WQezuPwIW3harl.html>
- [25] <https://www.sciencealert.com/a-growing-mountain-of-rubbish-in-india-will-soon-require-aircraft-warning-lights>
- [26] <https://southeastasiaglobe.com/how-plastic-roads-can-pave-our-way-to-redemption/>
- [27] <https://www.ekontech.cz/clanek/silnice-vyrobene-recyklovaneho-plastu-jako-budoucnost-dopravy>
- [28] <https://www.dutchwatersector.com/news/opening-of-worlds-first-modular-plasticroad-bike-path-in-zwolle-the-netherlands>
- [29] Morphology, rheology, and physical properties of polymer-modified asphalt binders, Ali Behnood*, Mahsa Modiri Gharehveran [online] Dostupné z https://www.researchgate.net/publication/328647387_Morphology_Rheology_and_Physical_Properties_of_Polymer-Modified_Ashphalt_Binders
- [30] COUFALÍKOVÁ, I. Použití R-materiálu do asfaltových směsí typu asfaltový koberec mastixový [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. 2019
- [31] Reclaimed Polymers as Asphalt Binder Modifiers for More Sustainable Roads: A Review; Luzana Brasileiro 1, Fernando Moreno-Navarro 2, Raúl Tauste-Martínez 2, Jose Matos 1 and Maria del Carmen Rubio-Gámez, [online] Dostupné z https://www.researchgate.net/publication/330706261_Reclaimed_Polymers_as_Ashphalt_Binder_Modifiers_for_More_Sustainable_Roads_A_Review
- [32] Ing. Petr Hýzl, Ph.D, Praktické aplikace v pozemních komunikacích, Modul 6, Asfaltové směsi
- [33] <https://www.globalcitizen.org/en/content/plastic-road-california-environment/>
- [34] <https://www.theguardian.com/sustainable-business/2016/jun/30/plastic-road-india-tar-plastic-transport-environment-pollution-waste>
- [35] ČSN EN 12697-6+A1 Asfaltové směsi-Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušební tělesa. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [36] <https://www.richard-seaman.com/Travel/TrinidadAndTobago/Trinidad/PitchLake/>
- [37] <https://www.strojeprozkusebnictvi.cz/gyrator-gyrocomp.html>

- [38] Performance of AC mixtures containing flakes of LDPE plastic film collected from urban waste considering ageing; Arminda Almeida, Silvino Capitão, Rita Bandeira, Mariana Fonseca, Luís Picado-Santos, [online] Dostupné z <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819327059>
- [39] MOTT MACDONALD CZ, Návrh a stavba vozovek. Krytové vrstvy vozovek, Téma II, Materiály a hmoty ve výstavbě pozemních komunikací, [online] Dostupné z <https://docplayer.cz/11814596-Navrh-a-stavba-vozovek-krytove-vrstvy-vozovek.html>
- [40] <http://damontallen.github.io/Construction-materials/Asphalt.slides.html#/>
- [41] <https://metro.co.uk/2019/06/11/indias-mount-everest-trash-growing-larger-taj-mahal-9898888/>
- [42] Protokol průkazní zkoušky, Zkouška typu č.12-2018-Ta podle ČSN EN 13108-20, Colas CZ, a.s.