

ČVUT v Praze, Fakulta stavební, studijní obor: Si-KD

Autor: Bc. Tomáš Slatinka, Ročník: 5., rok 2018/2019

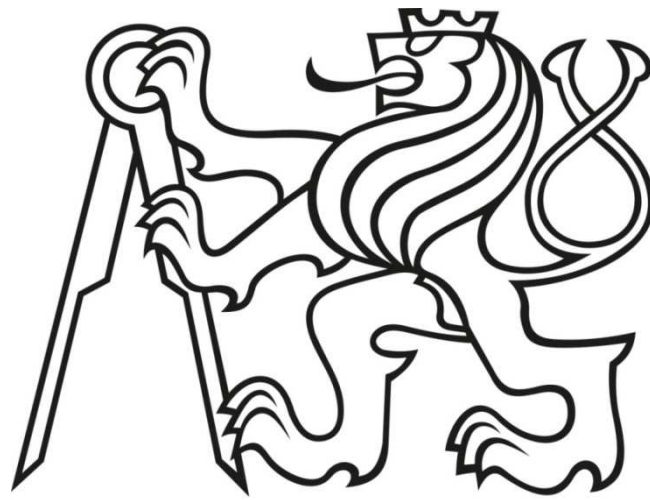


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby



Diplomová práce

Tenké a ultratenké asfaltové obrusné vrstvy

Thin and Ultrathin Asphalt Layers

Autor: Bc. Tomáš Slatinka

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

Rok zpracování: 2018/2019



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

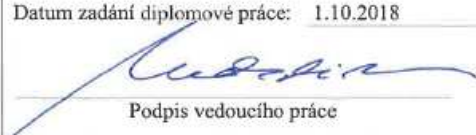
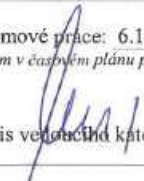
Tháškurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE


Příjmení: Slatinka	Jméno: Tomáš	Osobní číslo: 426 366
Zadávající katedra: Katedra silničních staveb		
Studijní program: Stavební inženýrství		
Studijní obor: Konstrukce a doprava		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Tenké a ultratenké asfaltové obrusné vrstvy	
Název diplomové práce anglicky: Thin and Ultrathin Asphalt Layers	
Pokyny pro vypracování: Rešerše problematiky tenkých a ultratenkých asfaltových obrusných vrstev, životní cyklus obrusné vrstvy, praktický (laboratorní) návrh ultratenkého koberce	
Seznam doporučené literatury: ČSN EN 13108-9, Karol Grüner Asfaltové emulzie při výstavbě a údržbě cest, příslušná TP www.pjpk.cz	
Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Petr Mondschein, Ph.D.	
Datum zadání diplomové práce: 1.10.2018	Termín odevzdání diplomové práce: 6.1.2019 <small>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</small>
 Podpis vedoucího práce	 Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

5. 10 2018 Datum převzetí zadání	 Podpis studenta(ky)
-------------------------------------	---



Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

.....

Podpis studenta

V Praze dne



Poděkování

Tato diplomová práce byla vypracována na Katedře silničních staveb Fakulty stavební Českého vysokého učení technického v Praze v roce 2019 pod vedením Ing. Petra Mondscheina Ph.D., jemuž patří mé poděkování za jeho rady a odborné vedení při tvorbě této práce. Také bych rád poděkoval za spolupráci a věcné rady členům silniční laboratoře katedry silničních staveb FSv ČVUT v Praze a společnosti EUROVIA CS. V neposlední řadě bych také rád poděkoval své rodině, která mě po dobu mého studia vždy podporovala.



Anotace

Tato diplomová práce pojednává o tenkých a ultratenkých asfaltových směsích, pokládaných jako obrusné vrstvy v tloušťce do 30 mm. Zabývá se popisem základních vlastností a způsobem využití tenkých asfaltových vrstev pokládaných za horka a za studena. V praktické části této práce je popsán návrh asfaltové směsi pro ultratenké vrstvy (AUTL) a jsou zde stanoveny a porovnávány základní laboratorní charakteristiky směsi AUTL.

Klíčová slova

Asfaltová směs pro ultratenké vrstvy (AUTL), tenké a ultratenké asfaltové vrstvy pokládané za horka a za studena (BBTM, SMA, CRmB a Emulzní kalové vrstvy), návrh asfaltových směsí, tuhost, šíření trhliny zkouškou ohybem, odolnost proti tvorbě trvalých deformací, odolnost proti působení vody

Abstract

The diploma thesis deals with thin and ultra-thin asphalt mixtures that are laid as surface courses up to 30 mm thick. It deals with the description of basic attributes and the use of hot and cold asphalt mixtures. The practical part of this thesis describes the design of the asphalt mixture for the ultra-thin layers (AUTL) and the basic laboratory characteristics of the mixture of AUTL are determined and compared.

Keywords

Asphalt mixture for Ultra-Thin Layer (AUTL), thin and ultrathin hot and cold mix asphalt layers (BBTM, SMA, CRmB a Slurry surfacing), design of asphalt mixtures, stiffness, crack propagation by bending test, resistance to permanent deformation, water sensitivity of bituminous specimens



Obsah

Úvod.....	8
Cíle práce	9
1. Tenkovrstvé úpravy pro obrusné vrstvy	10
2. Náklady životního cyklu asfaltové vozovky – LCC.....	14
3. Tenké a ultratenké obrusné vrstvy pokládané za horka.....	19
3.1. AUTL	22
3.2. BBTM	28
3.3. Tenkovrstvé protihlukové úpravy	30
3.3.1. SMA, SMA NH	32
3.3.2. BBTM NH	34
3.4. CRmB.....	36
4. Obrusné vrstvy pokládané za studena	40
4.1. Asfaltové emulze.....	43
4.1.1. Kationtaktivní asfaltové emulze (KAE)	45
4.1.2. Aniontaktivní asfaltové emulzu (AAE)	47
4.2. Výroba asfaltových emulzí	49
4.3. Pokládka emulzních kalových vrstev	52
4.4. Emulzní kalové vrstvy.....	55
4.4.1. Emulzní kalové zákryty (EKZ).....	56
4.4.2. Emulzní mikrokoberce (EMK).....	58
4.5. Postříkové technologie.....	61
5. Návrh asfaltových směsí.....	66
5.1. Vstupní materiály k návrhu asfaltové směsi	67
5.1.1. Pojivo	67
5.1.2. Kamenivo.....	69
5.1.3. Organická vlákna	71
5.2. Postup prací.....	72
5.3. Návrh směsi BBTM 5B.....	75
5.3.1. Optimalizace A (+ Lašovice 0/4).....	77



5.4.	Návrh směsi BBTM 8A	78
5.4.1.	Optimalizace B a C (+ Lašovice 0/4, bez Zbraslav 2/5).....	80
5.4.2.	Optimalizace D	81
5.5.	Návrh směsi AUTL 8	83
5.5.1.	Mezerovitost utěsněného zkušebního tělesa	85
5.6.	Souhrn navržených směsí.....	88
6.	Laboratorní zkoušky	89
6.1.	Příprava zkušebních vzorků	90
6.2.	Laboratorní výsledky - směsi pro porovnání	92
6.3.	Moduly tuhosti	92
6.4.	Odolnost vůči lomu	99
6.5.	Odolnost zkušebních těles vůči vodě	104
6.6.	Odolnost proti trvalým deformacím.....	107
	Závěr	112
	Seznam tabulek	116
	Seznam grafů	118
	Seznam obrázků.....	119
	Seznam použité literatury	121



Úvod

Diplomová práce se bude zabývat tenkými a ultratenkými asfaltovými vrstvami, které se řadí mezi obrusné vrstvy pokládáné v tloušťce do 30 mm. Vzhledem k této tloušťce není většinou únosnost tenké vrstvy brána v potaz při výpočtu celkové únosnosti vozovky. To nikterak nesnižuje využitelnost těchto tenkých krytů, jelikož nejsou navrhovány ke zvyšování únosnosti, nýbrž k využití jejich hlavních předností, jako je kvalitní makrotextura povrchu vozovky, kvalitní protismykové vlastnosti, schopnost snižovat hlukovou zátěž a rychlá obnovitelnost asfaltové vrstvy. V posledních letech se navrhovaly tenké a ultratenké asfaltové vrstvy spíše pro potřeby rekonstrukcí stávajících krytů vozovek, ale v současnosti již pronikají do návrhů nových vozovek.

Tenké a ultratenké asfaltové vrstvy představují jeden z možných směrů budoucího vývoje vozovek s nekonečnou životností. Vývoj netuhých vozovek se upíná zejména k návrhu vozovkového souvrství, které by se skládalo z odolných a tuhých podkladních vrstev a kvalitní, rychle obnovitelné tenké obrusné vrstvy. Snahou je totiž vytvořit takovou vozovku, která by měla dlouhodobou životnost, kvalitní povrchové vlastnosti a nízké výdaje na údržbu a opravy.



Cíle práce

Primárně se tato práce bude zabývat směsí pro ultratenké obrusné vrstvy, známé pod označením AUTL, se kterou jsou v České republice minimální zkušenosti a následným návrhem této směsi s vyhodnocením laboratorních parametrů, které by mohly vytvořit základní vstupy pro budoucí vývoj této směsi.

Teoretická část diplomové práce bude rozdělena do čtyř kapitol. Postupně bude věnována pozornost obecným informacím o tenkých a ultratenkých asfaltových směsích a nákladům na životní cyklus asfaltové vozovky s využitím ekonomického přínosu tenkých obrusných vrstev. Dále zde budou popsány tenké asfaltové vrstvy pokládané za horka, mezi které budou zařazeny směsi AUTL, BBTM, a směsi, ve kterých je využíván pryžový granulát k modifikaci silničního asfaltu (CRmB). Dále budou popsány tenkovrstvé směsi typu BBTM NH a SMA NH a jejich schopnost snižovat hluk. Jelikož jsou součástí ultratenkých obrusných vrstev také asfaltové vrstvy pokládané za studena, bude jim věnována pozornost v poslední kapitola teoretické části. V této části dojde k hlubšímu popsání problematiky asfaltových emulzí, jejich výroba a pokládka a jednotlivé možnosti aplikací emulzních kalových vrstev.

Praktická část bude založena na návrhu a laboratorních zkouškách tří směsí využívaných jako tenké obrusné vrstvy. Stěžejní směsí této práce bude asfaltová směs pro ultratenké vrstvy z asfaltového betonu (AUTL), která se řadí mezi směsi v České republice prozatím neodzkoušené a nepokládané. Cílem bude vytvoření optimalizovaného návrhu směsi AUTL na základě zejména zahraničních zkušeností a získání primárních laboratorních parametrů, konkrétně objemové hmotnosti a mezerovitosti směsi, tuhosti, odolnosti proti trvalým deformacím, odolnosti proti působení vody a odolnosti vůči lomu. Pro účely porovnání navržené směsi AUTL a již používaných směsí typu asfaltového betonu pro tenké obrusné vrstvy budou vyrobeny směsi BBTM 8A a BBTM 5B. Tyto směsi budou navrženy dle příslušné normy ČSN EN 13108-2 (736140).



1. Tenkovrstvé úpravy pro obrusné vrstvy

Tenké a ultratenké asfaltové obrusné vrstvy představují technologie, které se zejména v posledních letech dostávají do popředí zájmu odborníků a stavebních firem v silničním stavitelství. Je to dáno zejména změnou pohledu na skladbu asfaltového souvrství. Vlivem neustálého stupňování intenzity dopravních proudů, zvyšování počtu pomalu jedoucích plně zatížených nákladních automobilů, nárůstu rozdílu teplot v zimním a letním čase a vyšších extrémních teplot zejména v létě dochází ke zvýšení pravděpodobnosti vzniku trvalých deformací, což je pro netuhé vozovky jedna z nejzávažnějších poruch, protože vychází z neúnosnosti podkladních a ložných vrstev. Snahou tedy je zvýšit odolnost asfaltových vozovek proti vzniku trvalých deformací pomocí úpravy návrhu asfaltových směsí, přidáním příměsí pro zvýšení tuhosti nebo modifikací asfaltových pojiv. Je zapotřebí si uvědomit, že jakékoliv aditivum přidané do asfaltových pojiv nebo asfaltových směsí zvyšuje celkovou cenu netuhé vozovky. Z tohoto důvodu je na místě vždy zvážit poměr mezi zlepšením funkčních vlastností pojiv, tloušťkou vrstev a zvýšením ceny. [1]

Při návrhu asfaltového souvrství vozovek je v současnosti trendem zvyšování únosnosti a tuhosti podkladních vrstev s následným snižováním tloušťky ložné a zejména obrusné vrstvy. Jedním z možných řešení na dopravně silně zatížených komunikacích je využití směsí s vysokým modulem tuhosti - VMT, které mají ze zkušeností prokazatelně větší schopnost odolávat vzniku trvalých deformací. Ačkoliv jsou tyto vrstvy dražší oproti klasickým podkladním vrstvám, jsme při jejich aplikaci schopni snižovat tloušťky krytových vrstev se zachováním kvalitativních vlastností asfaltového souvrství netuhé vozovky. Vlivem zvýšené tuhosti jsou podkladní vrstvy náchylnější ke vzniku trhlin při nízkých teplotách. Této skutečnosti se dá v určité míře předejít uložením vrstev s vyšší tuhostí do přiměřené hloubky pod povrchem vozovky. Vyšší riziko vzniku trhlin je pro údržbu vozovek přijatelnější, nežli je tomu u poruch trvalými deformacemi. V případě vzniku trhlin je možné odfrézovat jen obrusnou vrstvu, provést lokální opravy ložné vrstvy a položit novou tenkou obrusnou vrstvu. Oproti tomu při vzniku trvalých deformací je zapotřebí odfrézovat a nahradit větší část tloušťky vozovky, s čímž souvisí zvýšení nákladů na opravu a také delší doba uzavírky. [1]



Vzhledem ke zvyšujícím se nárokům na náklady a rychlost opravy je tedy vhodné u netuhých vozovek s vyšší tuhostí provádět obrusné vrstvy v tenké vrstvě, tzn. využívat tenké a ultratenké asfaltové koberce, jejichž pokládka je realizována v tloušťkách mezi 15 až 30 mm. Nižší tloušťku obrusných vrstev s výhodou rychlé údržby využijeme při opravě vozovek se zhoršenými povrchovými vlastnostmi. Při opravě dochází k odfrézování menší tloušťky než je tomu u klasických typů obrusných vrstev (asfaltový beton či asfaltový koberec mastixový) dle vzorových technologických listů VTL 5 a 6 v TP 87 [2]. Tenké úpravy obrusných vrstev mají také při správném návrhu příznivější protismykové vlastnosti. [1]

Tenké a ultratenké asfaltové vrstvy je možné využít taktéž při údržbě obrusných vrstev, u kterých došlo ke ztrátě asfaltového tmelu, hloubkové korozi, ztrátě protismykových vlastností nebo k vytvoření nehomogenního povrchu v důsledku průběžných zásahů do obrusné vrstvy vysprávkami starších trhlin. V takovýchto případech dochází k pokládce a zhutnění asfaltové směsi na předem očištěný a spojovacím postříkem opatřený povrch stávající obrusné vrstvy dle vzorových technologických listů VTL 1 až 4, které jsou zaneseny v TP 87 [2]. Nové obrusné vrstvy komunikací je možné zhotovit pomocí dvou základních technologií. Prvním a v České republice již pevně zaběhnutým typem opravy obrusných vrstev je technologie pokládky tenkých asfaltových vrstev za studena. Mezi tyto opravy patří emulzní nátěry, emulzní kalové zákrty (EKZ) a emulzní mikrokoberce. Druhou kategorií jsou tenké a ultratenké obrusné vrstvy pokládané za horka (Eng. TAL - Thin Asphalt layer). Do této skupiny asfaltových vrstev se řadí asfaltová beton pro velmi tenké vrstvy (BBTM 8A; BBTM 5B) s tloušťkou vrstev mezi 20 – 25 mm, asfaltový koberec mastixový (SMA 4; SMA 5) s tloušťkou vrstev mezi 15 – 30 mm a ultratenké vrstvy z asfaltového betonu (AUTL) s tloušťkou do 20 mm. [2] [33]

V Tabulce 1 jsou uvedeny skupiny poruch povrchu obrusné vrstvy dle TP 87 a k nim přiřazené možnosti typu údržby. Z tabulky vyplývá, že pro opravu méně degradovaného povrchu obrusné vrstvy, ve smyslu ztráty protismykových vlastností, ztráty asfaltového tmelu nebo koroze povrchu, využíváme zejména technologie pokládky asfaltových vrstev za studena. K využití klasické pokládky asfaltových vrstev za horka



se přikláníme převážně ve chvíli, kdy dojde ke vzniku a rozvětvení trhlin. V závislosti na větším počtu vstupních kritérií, na základě kterých se investor rozhoduje, nevychází samozřejmě výběr technologie údržby obrusné vrstvy z tabulky z TP 87. Zohledňuje se zejména ekonomická stránka údržby, účel a význam komunikace, třída dopravního zatížení, vzdálenost a dostupnost obaloven a další nezbytné parametry. Záleží také na zamýšlené době životnosti údržby. V Tabulce 2, která je taktéž zanesena v TP 87, jsou uvedeny předpokládané doby životnosti jednotlivých úprav v závislosti na TDZ. Délky životnosti se využívají zejména pro ekonomické posouzení variant údržeb a oprav, proto mohou být jedním z nástrojů pro výběr technologie údržby. [2]

Tabulka 1: Přehled poruch, příslušných technologií údržby a předpisů

Provozní způsobilost a skupina poruch podle TP 82	Technologie údržby	Předpis
Ztráta protismykových vlastností povrchu vozovky	Nátěry Emulzní kalový zákryt Emulzní mikroborec Bezpečnostní protismykové úpravy povrchů vozovek	ČSN EN 12271, ČSN 73 6129, TKP 26 ČSN EN 12273, ČSN 73 6130, TKP 27 ČSN EN 12273, ČSN 73 6130, TKP 28 TP 213
Ztráta asfaltového tmelu	Regenerační postřik	ČSN 73 6129
Ztráta asfaltového tmelu	Nátěry Emulzní kalový zákryt Emulzní mikroborec	ČSN EN 12271, ČSN 73 6129, TKP 26
Kaverny v obrusné vrstvě		ČSN EN 12272, ČSN 73 6130, TKP 27
Koroze (opotřebení) EKZ		ČSN EN 12272, ČSN 73 6130, TKP 28
Ztráta kameniva z nátěru		
Hlubková koroze ¹	Nátěry Emulzní kalový zákryt Emulzní mikroborec Asfaltový beton pro velmi tenké vrstvy	ČSN EN 12271, ČSN 73 6129, TKP 26
Výtluky ¹		ČSN EN 12273, ČSN 73 6130, TKP 27
Trhliny úzké nepravidelné ¹		ČSN EN 12273, ČSN 73 6130, TKP 28
Trhliny široké příčné, podélné, nepravidelné ¹		ČSN EN 13108-2, ČSN 73 6121, TKP 7
Trhliny rozvětvené a mozaikové ¹		
¹ POZNÁMKA: Poruchy se před provedením údržby ošetří technologiemi běžné údržby podle tabulky 9		

Zdroj: [2]



Při pohledu na Tabulku 2 je velice důležité uvědomit si, že příslušné doby životnosti údržby jsou orientační, opět závisí na mnoha proměnných, jako je skladba dopravního proudu, účel a význam komunikace, kvalita podkladních vrstev a kvalita samotného provedení údržby. Také je zapotřebí vzít v potaz zbytkovou životnost konstrukce stávající vozovky. V případě, že dojde k jejímu překročení, mělo by neprodleně dojít k rekonstrukci daného úseku v tloušťce větší než je tloušťka samostatné obrusné vrstvy.

Tabulka 2: Orientační předpokládané doby životnosti údržby obrusných vrstev vozovek v letech v závislosti na třídě dopravního zatížení

Technologie údržby a opravy	Třída dopravního zatížení						
	VI	V	IV	III	II	I	S
Běžná údržba asfaltových krytů	4	4	3	2	1	1	1
Běžná údržba nestmelených krytů	1	1	0,5				
Vysprávky asfaltovou směsí za horka	5	4	4	4	3	3	3
Nátěr jednovrstvý	4	3	2				
Nátěr jednovrstvý – modifikovaný asfalt			5	3			
Nátěr dvouvrstvý	6	6	5	4			
Nátěr dvouvrstvý – modifikovaný asfalt			7	6	5	4	3
Penetrační makadam	8	6	4				
EKZ – JV	6	5	4	3			
EKZ – DV s modifikovanou asfaltovou emulzí				5	4	3	
EMK – jednovrstvý	10	8	7	5			
EMK – dvouvrstvý			10	10	8	7	6
ACO S				14	14	12	10
ACO +			14	12	10		
ACO	16	14	12				
SMA S				16	16	14	12
SMA +			16	14	12		
MA I				25	25	20	15
MA II				25			
BBTM S				12	12	10	8
BBTM +			12	10	8		
BBTM	15	12	10				
PA s asfaltem modif. pryžovým granulátem				12	12	10	8
Čištění krajnice	4	4	3	3	3	3	3
Čištění příkopů	6	6	6	5	4	4	4

Zdroj: [2]



2. Náklady životního cyklu asfaltové vozovky – LCC

Tato kapitola se LCC (Life cycle cost) tenkých a ultratenkých obrusných vrstev dotkne jen okrajově, je to z důvodu nedostatečných zkušeností s únosností, životností a údržbou těchto povrchů. Spíše se bude zabývat zhodnocením získaných poznatků, porovnáním s klasickými obrusnými vrstvami a otázkami budoucího rozvoje. Dle ISO 15688 v [4] je LCC popsáno jako *technika, která umožňuje vyčíslení srovnatelných nákladů ve vymezeném časovém období, s přihlédnutím ke všem relevantním ekonomickým faktorům jak z hlediska prvotních pořizovacích nákladů, tak z hlediska budoucích provozních nákladů*. Náklady životního cyklu staveb LCC jsou rozloženy do čtyř fází stavebního projektu, tj. předinvestiční, investiční, provozní a likvidační fáze. Vzhledem k tomu, že skoro většina komunikací je po skončení své celkové životnosti rekonstruována, náklady spojené s likvidací nehrají při posuzování LCC žádnou roli. Nepodstatný vliv při porovnání nákladů na obrusné vrstvy mají taktéž náklady spjaté s předinvestiční fází (investiční záměr, posouzení vlivu na ŽP, výkup pozemků, tvorba PD atd., protože u různých návrhů zůstávají náklady obdobné. Zajímavějšími se stávají proměnné náklady na materiál, stavební práce, provozní údržbu, opravy a rekonstrukce odvíjející se od typu směsí, tloušťky vrstev, únosnosti, životnosti, opravitelnosti (délka trvání oprav) a dopadu na životní prostředí (uhlíková stopa, hluk). [4]

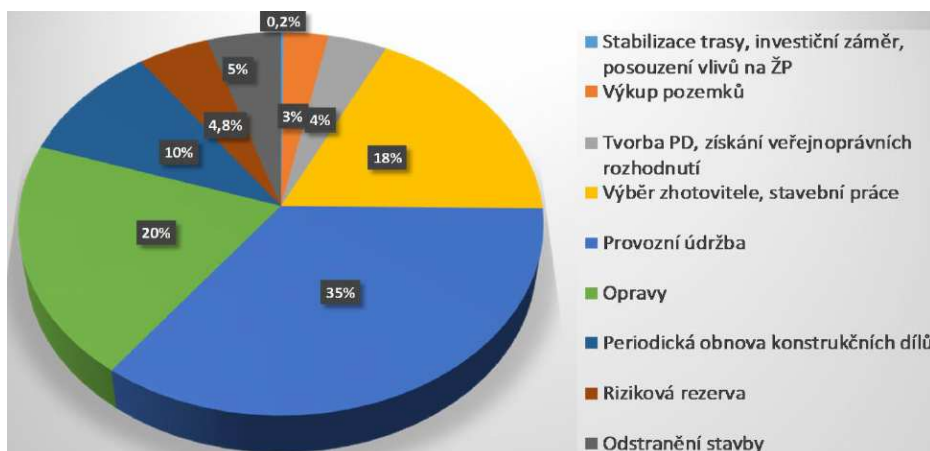
Obrázek 1: Struktura nákladů životního cyklu



Zdroj: [4]



Graf 1: Struktura nákladu životního cyklu průměrné dálniční stavby v USA (2015)



Zdroj: [4]

Vzhledem k tomu, že je v současnosti návrh skladby vozovky nové komunikace s ultratenkou nebo tenkou úpravou obrusné vrstvy skoro totožný (ve smyslu typu a množství podkladních vrstev a jejich tloušťky) jako návrh osvědčených typů vozovek s ACO nebo SMA, vidí odborníci výhodu ultratenkých a tenkých obrusných vrstev z finančního hlediska ve snížení nákladů zejména na rekonstrukci obrusné vrstvy v průběhu návrhového období vozovek (v ČR 25 let). Na grafu 1, který popisuje náklady životního cyklu průměrné dálniční stavby v USA, je patrné, že náklady na provozní údržbu a opravy zabírají cca 65 % z celkových nákladů. V ČR je situace obdobná. [8]

Porovnání skladeb vozovky pozemní komunikace:

Výstavby obchvatu silnice II/101

BBTM 8 NH	30 mm
ACL 22S	70 mm
ACP 16S	80 mm
SC 0/32 C _{3/4}	200 mm
<u>ŠDa</u>	<u>250 mm</u>
Celkem	630 mm

[5]

Odpovídající katalogový list D0-N-5-II-PIII

SMA 11S	40 mm
ACL 22S	80 mm
ACP 22S	100 mm
SC 0/32 C _{3/4}	180 mm
<u>ŠDa</u>	<u>250 mm</u>
Celkem	650 mm

[6]



K přesvědčení investorů, aby byly využívány tenké a ultratenké asfaltové povrchy (TAL) vede prozatím dlouhá cesta. Vývoj silničního stavitelství se v současnosti vydal směrem tzv. věčně trvalých netuhých vozovek s životností do 50 let (1999 vznik pracovní skupiny ELLPAG - European Long-Life Pavement Group). Je to jedna z cest, ve které je možné skloubit kvalitní a rychle rekonstruovatelnou tenkou obrusnou vrstvu s tuhými ložnými a podkladními vrstvami typu VMT nebo SMA. V tomto směru je zapotřebí si uvědomit, jaké jsou požadavky na jednotlivé vrstvy vozovkového souvrství, k jakému účelu jsou navrhovány a jakým negativním účinkům odolávají. Základním stavebním kamenem takovéto úpravy je únosná podkladní vrstva s vysokou odolností vůči únavě, ložná vrstva s odolností vůči tvorbě trvalých deformací, dostatečnou smykovou pevností a odolností vůči vzniku mrazových trhlin, které přebírají „neomezené“ dopravní zatížení a dále kvalitní cyklicky obnovitelná tenká obrusná vrstva. A ačkoliv je pořizovací cena vrstvy TAL na středně až vysoce zatížené komunikace stejná jako cena standardní obrusné vrstvy ACO v tl. 40 mm (nikoliv při porovnání s SMA), při variantním porovnání LCC bude možné kombinací TAL s konceptem věčné vozovky dojít ke smazání tohoto počátečního hendikepu vlivem odlišných postupů při rekonstrukcích. V případě správně navržených podkladních vrstev skýtá návrh „věčné“ vozovky výhodu při obnově obrusných vrstev v tom, že dojde k odfrézování jen obrusné vrstvy v tl. do 30 mm. Naproti tomu u klasických vozovkových souvrství na dopravně vysoce zatížených komunikacích dochází většinou po uplynutí životnosti obrusné vrstvy k výměně i ložné vrstvy s určitým procentem lokálních oprav podložené vrstvy. [8]

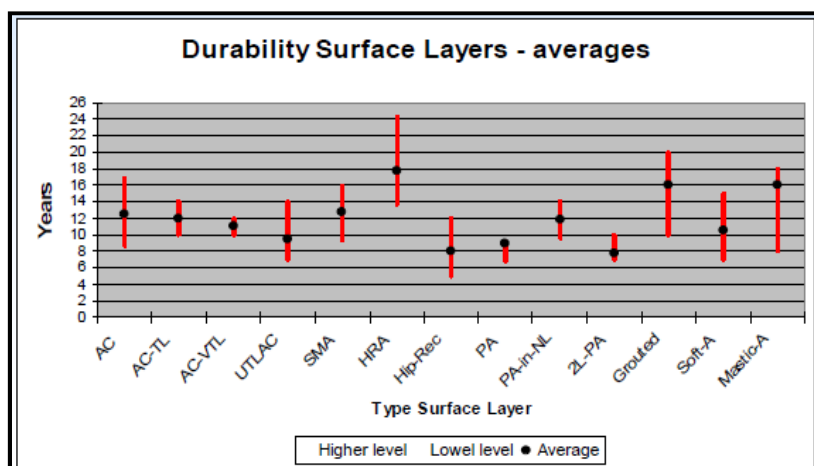
Jedním z hlavních faktorů, který ovlivňuje LCC jednotlivých obrusných vrstev je jejich životnost. Vzhledem k menšímu množství zkušeností s TAL v dlouhodobějším časovém měřítku je možné prozatím vycházet jen z předpokládané životnosti 8 – 10 let u směsí AUTL a 12 let u BBTM. To by předpokládalo obnovu krytu vozovky dvakrát během životnosti vozovky. Oproti tomu u běžných asfaltových směsí ACO, SMA jsou zaznamenány optimální průměrné doby životnosti okolo 13 let, což znamená, že dochází k obnově obrusné vrstvy jen 1x za životnost vozovky. Na první pohled se toto může jevit jako nevýhoda při zvažování využití TAL, ale v porovnání s SMA, které mají vyšší náklady na výrobu směsi i na obnovu obrusné vrstvy, může dojít



k podobným výsledkům (závislost na mnoha dalších parametrech). Ze současných stavebních zkušeností v ČR vyplývá, že obrusné vrstvy typu ACO nebo SMA mají životnost okolo 10 let. To by v posouzení s TAL hrálo velkou roli a za předpokladu podobně dlouhé životnosti u vrstev TAL, zvýhodňovalo návrh vozovky s tenkými a ultratenkými obrusnými vrstvami. [8]

Při předpokladu obnovy jen obrusné vrstvy s určitým procentem lokálních oprav ložné vrstvy vozovky lze porovnat AUTL 8 (do 20 mm) nebo BBTM 8 (do 30 mm) s obrusnou vrstvou ACO 11 (40 mm) nebo SMA 11 (40 mm) z hlediska snížení nákladů vycházejících z nižší tloušťky obrusné vrstvy. Při odstranění ultratenké živice vrstvy dojde ke snížení množství odpadního materiálu ukládaného na skládku (možnost využití jako R-materiál). Vzhledem k poloviční tloušťce obrusné vrstvy dochází ke snížení spotřeby materiálu potřebného k výrobě asfaltové směsi. Tím dochází k redukcí spotřeby nerostných surovin a při porovnání BBTM 8 (Bmin 5,2 % hm.) s SMA 11 (Bmin 6,2 % hm.) je zřetelná redukce čím dál více nákladnějšího asfaltového pojiva. Vlivem snížení doby odstranění krytu, doby pro přepravu materiálu a pro pokládku, dochází ke snížení doby uzavírek, což zajímá jak investory, tak širokou veřejnost, protože v současnosti probíhají na území ČR zejména opravy a rekonstrukce starých komunikací. Nezanedbatelným přínosem TAL je také snížení vlivu rekonstrukce na životní prostředí z hlediska snížení spotřeby pohonných hmot a vypouštění výfukových plynů dopravními prostředky převážejícími stavební materiál. [8]

Obrázek 2: Životnost vybraných obrusných vrstev



- AC = asfaltový beton
- AC-TL = asfaltový beton
- AC-VTL = asfaltový beton
- UTLAC = asfaltový beton
- SMA = asfaltový koberec mastixový
- HRA = Hor Rolled Asfalt
- Hip-Rec = recyklovaný koberec mastix.
- PA = drenážní koberec
- PA-in-NL = drenážní koberec z NL
- 2L-PA = dvouvrstvý drenážní koberec
- Grouted = penetrační makadam
- Soft-A = měkká „severská“ asf. úprava
- Mastic-A = litá asfalt

Zdroj: [7]



Další myšlenka využití TAL spočívá v úpravě postupu obnovy obrusné vrstvy po vypršení životnosti TAL (např. tl. 30 mm), kdy se odfrézuje stávající obrusná vrstva v celé tloušťce společně s určitou částí ložné vrstvy (např. tl. 10 – 20 mm) a poté se položí již klasická obrusná vrstva ACO nebo SMA v tl. 40 – 50 mm. Tím by se dalo zajistit lepší propojení stávající a nové vrstvy, taktéž by se dalo vyhnout vzniku tzv. map, které se vytvářejí při odfrézování jedné vrstvy tím, že fréza neodfrézuje přesně danou živičnou vrstvu. Tato obnova obrusné vrstvy by mohla mít za následek zrychlení a zvýšení kvality prováděné opravy a tím vznik finanční prosperity v následném časovém horizontu do doby další rekonstrukce. [5]

Dalším zajímavým aspektem pozorovatelným u vrstev TAL je peněžní ocenění vnějších vlivů, jako jsou vlivy na životní prostředí (hluk, znečištění ovzduší a globální oteplování), bezpečnost, provoz vozidel a čas atd.. Snížení nákladů na redukci hluku je v souvislosti s TAL obzvláště zajímavé. Vyhodnocení nákladů týkajících se hluku nejprve vyžaduje soupis počtu osob postižených hlukem, kterému jsou vystaveny. To je třeba provést pro každé alternativní řešení (např. TAL a alternativní obrusná vrstva). Ocenění jsou odvozena z různých metodik, jako jsou „vedené preference“, nebo „hédonické ceny“ a studie „ochota zaplatit“, které odhalují peněžní vnímání hluku. U těchto peněžních ocenění lze náklady na každou osobu sčítat po celou dobu výpočtu pro každou alternativu. Výsledkem je pak rozdíl v nákladech na hluk mezi alternativami. [8]

Z hlediska nákladů životního cyklu asfaltových vozovek bude spíše upřena pozornost na vozovku jako celek a obrusná vrstva ve smyslu TAL může dopomoci ke snížení nákladů na danou alternativu. Vývoj „věčné“ vozovky a zkušenosti s ní nejsou v takovém rozsahu, aby mohlo dojít k plnohodnotnému porovnání s běžně využívanými typy vozovek. Je důležité pokračovat ve výstavbě nových typů vozovek a s tím je třeba systematicky shromažďovat data za účelem získání povědomí o funkčních vlastnostech „věčných“ vozovek a tenkých a ultratenkých vrstev (např. protismykové vlastnosti, účinek snižování hluku a celková životnost), aby tato data dala pevný základ pro budoucí vývoj v silniční dopravě. [8]



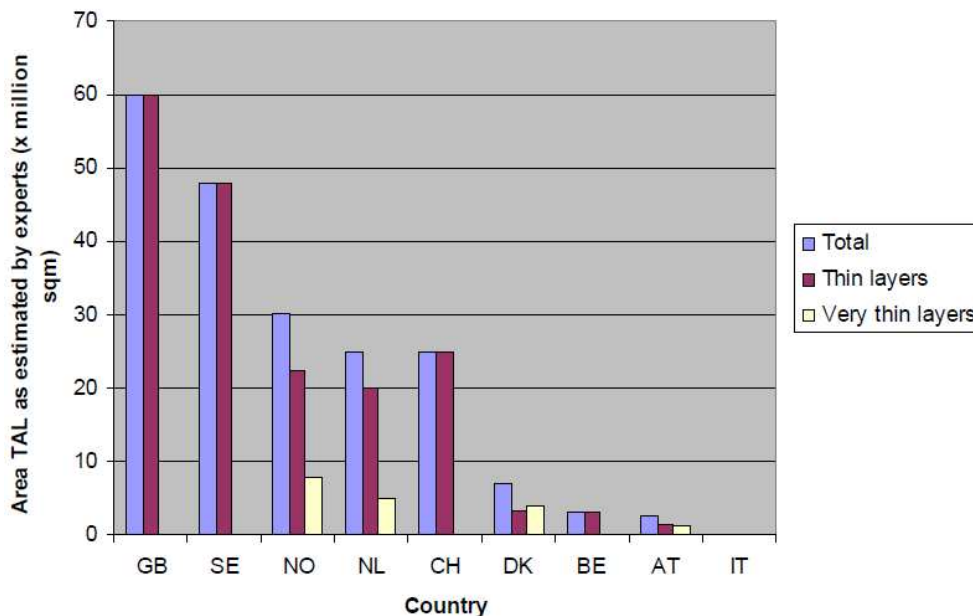
3. Tenké a ultratenké obrusné vrstvy pokládáné za horka

Význam tenkých a ultratenkých obrusných vrstev pokládaných za horka je na vzestupu zejména v posledních 15 letech, a to v souvislosti se změnou pohledu na konstrukci vozovkového souvrství a s návrhem ekonomicky efektivních krytů vozovek. V současném silničním stavitelství je jedním z hlavních témat vývoj tzv. věčné vozovky s doživotní únosností a životností. Základním principem věčné vozovky je takový návrh souvrství, že bude zapotřebí, vlivem stárnutí, dopravního zatížení a přímých klimatických procesů, s určitou periodicitou vyměnit jen obrusnou vrstvu vozovky. Díky této myšlence mají tenké obrusné vrstvy značnou vývojovou perspektivu, protože s nižší tloušťkou obrusné vrstvy se snižují také náklady na rekonstrukci, požadavky na neobnovitelné zdroje a požadavky na rychlost provedení rekonstrukce. Je také potřeba zdůraznit, že vzhledem k nízké tloušťce vrstvy, tenké obrusné vrstvy nezvyšují významně celkovou únosnost vozovky. Proto při návrhu asphaltových směsí pro tenké vrstvy je upřena pozornost zejména na povrchové vlastnosti a na zajištění maximálně možné životnosti, která poté hraje velký význam při hodnocení ekonomické efektivity údržby v porovnání s klasickými obrusnými vrstvami. [8] [9]

V zahraniční literatuře jsou označovány tenké a ultratenké obrusné vrstvy v tloušťce do 30 mm jako vrstvy TAL (Thin Asphalt layer). Nejvíce zkušeností s pokládkou vrstev TAL mají zejména evropské země v čele s Velkou Británií a severskými státy. Například v Dánsku TAL představují přibližně 95 % všech nově pokládaných obrusných vrstev. Graf 2 ukazuje využití (udávané v pokládané ploše) TAL v jednotlivých evropských zemích do roku 2010. Jedním z hlavních důvodů využití je možné zefektivnění údržby vozovek v průběhu jejich životnosti. Za výhody TAL oproti běžně pokládaným obrusným vrstvám (SMA 11, ACO 11) jsou považovány velice kvalitní protismykové vlastnosti zlepšující bezpečnost silničního provozu, lepší světelné charakteristiky za mokra, efektivnější způsob údržby, rychlejší provedení pokládky a vzhledem k jejich větší mezerovitosti a textuře povrchu schopnost snižovat hluk vznikající od pneumatik automobilů. [8]



Graf 2: Plocha využití TAL ve vybraných zemích do roku 2010 (v mil. m²)



Zdroj: [8]

Ze zkušeností v severských zemích vyplývá, že TAL mají vyšší citlivost na povětrnostní podmínky při pokládce, která vede ke snížení životnosti obrusné vrstvy. V ČR nejsou klimatické podmínky tak nepříznivé jako ve Skandinávii, ale často jsou zhotovitelé tlačeni do rekonstrukcí vozovek v období chladnějších měsíců, proto se tento problém dá vztáhnout i na ČR. Tuto citlivost je možné vyřešit optimalizací pokládky (speciální přísady ve směsi, kratší přepravní vzdálenosti, ohřívače směsi) nebo kombinací TAL s WMA (Warm mix asphalt - směsi pokládané při teplotách 100 – 140 °C), což je technologie budoucnosti. K nevýhodám omezujícím použití TAL dále patří vyšší náchylnost k tvorbě mrazových trhlin, potřeba velmi kvalitního a dražšího kameniva s vysokou odolností proti opotřebení a s velmi dobrou otěruvzdorností. Otevřenější struktura TAL může snížit trvanlivost na dopravně významně zatížených komunikacích. Také je zapotřebí pravidelná údržba povrchu samosběrnými stroji s vysokotlakým systémem čištění, protože dochází k zanesení mezer nečistotami a ke snížení akusticky pohltivých vlastností vozovek. Dále není doporučeno pokládat TAL v místech, kde jsou vozidla vyvolávány vysoké smykové síly (např. prostor křižovatek, komunikace s vyššími sklony). [8]



Tabulka 3: Využitelnost TAL na různých typech komunikací

		Nižší náklady	Valivý odpor	Snížení hluku	Životnost	Protismykové vlastnosti	Tloušťka
Intravilán	Uliční prostor, nižší dopravní intenzity	+++	+++	+++	+++	++	+++
	Prostor křižovatek	o	o	--	-	+	o
	Komunikace s oblouky menších poloměrů	o	+	+	-	+	o
	Komunikace s větším sklonem nivelety	o	o	--	--	o	o
	Středně zatížené komunikace	+++	+++	+++	++	++	++
	Vysoce zatížené komunikace - vnitřní část měst	++	+	+	+	++	+++
	Vysoce zatížené komunikace - hlavní tahy	++	++	+++	++	+	+
Extravilán	Silnice III. třídy	+++	+++	+++	+++	++	+
	Silnice I.+II. Třídy (rychlost do 80 km/h)	+++	+++	+++	+++	++	++
	Silnice I.+II. Třídy (rychlost nad 80 km/h)	+++	++	++	++	+	++
	Dálnice a rychlostní silnice	+++	+	o	+	+	++
	Horské cesty	+	++	+	--	+	+

+++	Velice doporučeno
++	Doporučeno
+	Doporučeno (s vyšší opatrností)
o	Neutrální (vyšší riziko negativních vlastností)
-	Nedoporučeno
--	Nevhodné k aplikaci

Zdroj: [8]

Jak již bylo zmíněno, tenké obrusné vrstvy jsou vrstvy pokládáné v tloušťce do 30 mm. Podrobněji lze tenkovrstvé úpravy rozdělit do tří základních skupin dle jejich max. tloušťky na tenké obrusné vrstvy (25 – 30 mm), velmi tenké obrusné vrstvy (25 – 20 mm) a ultratenké obrusné vrstvy (do 20 mm). Do prvních dvou skupin spadá již běžně známý a v Evropě hojně využívaný asfaltový beton pro velmi tenké vrstvy (všechny typy BBTM), dále se sem řadí klasické obrusné vrstvy, které je možné pokládat v tl. do 30 mm jako je asfaltový koberec mastixový (SMA 5 a SMA 8) nebo protihlukové úpravy zmíněných typů (BBTM NH, SMA NH a asfaltový koberec otevřený AKO). Do skupiny ultratenkých obrusných vrstev řadíme asfaltovou směs pro ultratenké vrstvy z asfaltového betonu (AUTL - Asphalt for Ultra-Thin Layer). [10]



3.1. AUTL

System AUTL byl vyvinut v polovině 80. let 20. století ve Francii jako směs, ve které se skloubí vlastnosti asfaltových emulzí a za horka pokládaných směsí. V této době se AUTL označovalo zkratkou UTHMAL (Ultrathin hotmix asphalt layer). Vývoj byl poháněn zejména stavebními firmami, které chtěly představit vlastní typy ultratenkých směsí. Nejznámějším typem AUTL se stala směs „NOVACHIP“ společnosti Screg Routes (nynější COLAS), která byla a stále je s určitými vývojovými změnami pokládána. V současnosti je směs AUTL normou EN 13108-9 pojmenována ve francouzštině jako směs BBUM (Bétonsbitumineux pour couches ultramines). V roce 1991 byla směs AUTL v UK představena pod názvem „SAFEPAVE“. Směsi AUTL se od té doby rozšířily do USA, Japonska, Austrálie a dalších částí Evropy. [18]

V USA v roce 1993 vznikl první typ ultratenké asfaltové směsi UTA (Ultra thin layer), který byl během následujících 10 let položen přibližně na 3,6 milionech m². Nicméně do roku 2005 bylo zaznamenáno mnoho případů nižší životnosti, než se předpokládalo a zanedbané údržby (pozdní diagnostiky rozvoje trhlin), čímž docházelo k náhlému rozpadu celé obrusné vrstvy. Po těchto zkušenostech byla provedena změna návrhu asf. směsi (změna návrhu čáry zrnitosti, pojivo PMB, min. obsah asfaltu 5,3 %, optimalizace tl. obrusné vrstvy s postupy její kontroly). UTA se po těchto optimalizacích s výbornými referencemi využívá dodnes, v některých jižních státech USA (Texas, Nevada, Severní Karolína) s životností až 12 (13) let. [13]

Ve Spolkové republice Německo je nejznámějším typem AUTL směs DSH-V s max. zrnem $D = 5$ nebo 8 mm, objemovou hmotností 30 až 50 kg/m², což odpovídá tloušťce vrstvy od 12 do 20 mm. Oproti většině typů AUTL čára zrnitosti není přerušovaná, což má za následek snížení mezerovitosti na 3,5 až 5,5 % obj. (otevřenější typy AUTL jsou navrhovány s mezerovitostí větší než 10 %). [12]



Asfaltová směs pro ultratenké vrstvy z asfaltového betonu (AUTL) je v ČR zatím jen málo známým typem asfaltové směsi. Jedná se o směs pro obrusné vrstvy, která není v ČR zatím pokládána. Teprve v lednu 2018 vznikla norma ČSN EN 13108-9 Asfaltové směsi - Specifikace pro materiály - Část 9: Asfaltová směs pro ultratenké vrstvy z asfaltového betonu (AUTL), která je českým ekvivalentem evropské normy z roku 2016. AUTL se řadí k moderním a progresivním typům směsí pro obrusné vrstvy, ale prozatím bez většího množství dlouhodobějších zkušeností s kvalitou a životností. [11]

Označení AUTL dle normy ČSN EN 13108-9 [11]: AUTL D

Např: AUTL 10 50/70 Asfaltová směs pro ultra tenké vrstvy s velikostí oka horního síta zrn kameniva 10 mm a penetrací asfaltového pojiva 50/70.

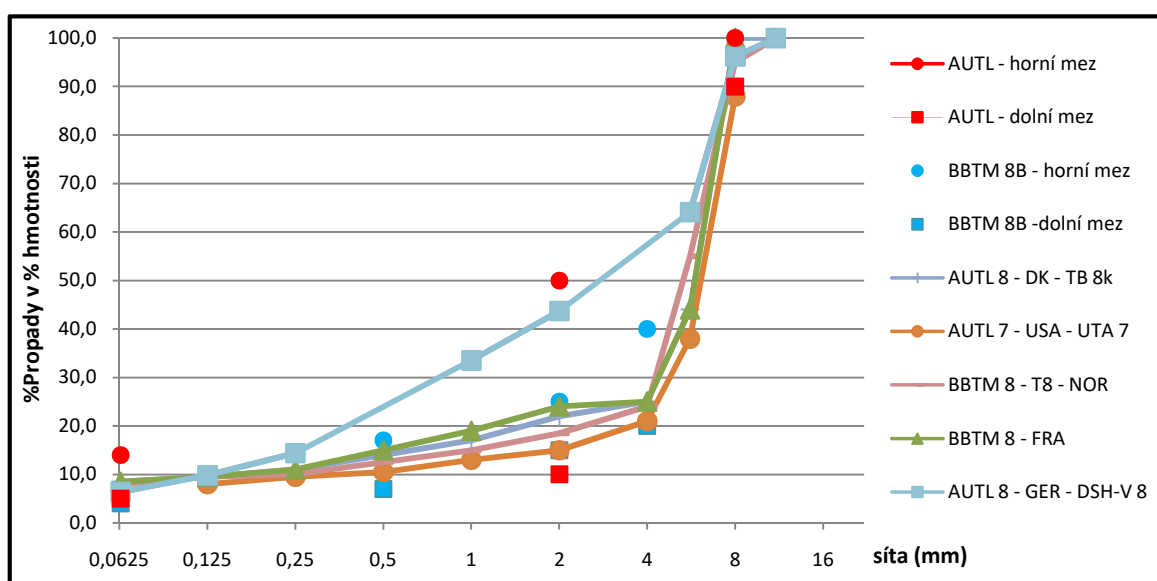
AUTL je využitelná jen jako obrusná vrstva netuhých vozovek s maximální tloušťkou vrstvy 20 mm. Byla vyvinuta zejména pro rychlou údržbu komunikací, kdy vzhledem ke způsobu pokládky dokáže utěsnit a ochránit podkladní vrstvu. Pokládka se provádí jen na mírně degradovaný povrch, tj. povrch s max. hloubkou vyjetých kolejí do 10 mm, s úzkými samostatnými nebo větvenými trhlinami neprojevujícími se po celé šířce komunikace. Vzhledem k nízké tloušťce vrstvy je její použití výhodné na komunikacích s omezenou změnou nivelety, s omezeným průjezdným profilem pod mostními objekty nebo na místních komunikacích pro snížení nákladů na úpravu obruby. Také je možné a v budoucnu zajisté žádoucí využít AUTL jako obrusnou vrstvu na nově vznikajících komunikacích, která by byla s ohledem na její předpokládanou životnost 7 – 10 let ekonomicky efektivnější než klasické obrusné vrstvy. [12] [13]

Z důvodu chybějící evropské harmonizované normy, která by definovala meze pro složení asfaltové směsi pro ultratenké vrstvy, je složení odvislé ze zkušeností jednotlivých zemí. Směs se standardně skládá z kameniva s maximální velikostí zrna $D = 8$ nebo 6 mm, ale například ve Francii se používá maximální velikostí zrna $D = 10$ mm. Zrnitostní složení kameniva je charakterizováno přerušenou čarou zrnitosti (na frakci 2/5), což znamená, že určitá frakce kameniva ve směsi buď úplně chybí, nebo je jeho množství značně sníženo. Tímto vzniká otevřenější struktura hotové směsi s vyšší mezerovitostí 10 – 15 % obj. (opět záleží na zkušenostech jednotlivých



zhotovitelů). V mnoha případech čára zrnitosti kameniva pro AUTL má velice podobný průběh jako otevřenější typy BBTM (viz Graf 3). Jako asfaltové pojivo je používán výhradně polymerem modifikované (PMB) v rozmezí 5,2 – 5,6 % hmotnosti směsi. Do AUTL se také přidávají výztužná vlákna (0,3 – 1,2 % hmotnosti směsi), která vyztužují asfaltovou směs a podporují schopnost odolávat vzniku trhlin. Také by měla, při větším obsahu asfaltového pojiva, zabránit stékání asfaltového pojiva z kameniva. [10] [13]

Graf 3: Čára zrnitostí kameniva vybraných typů směsí AUTL v porovnání s BBTM 8.



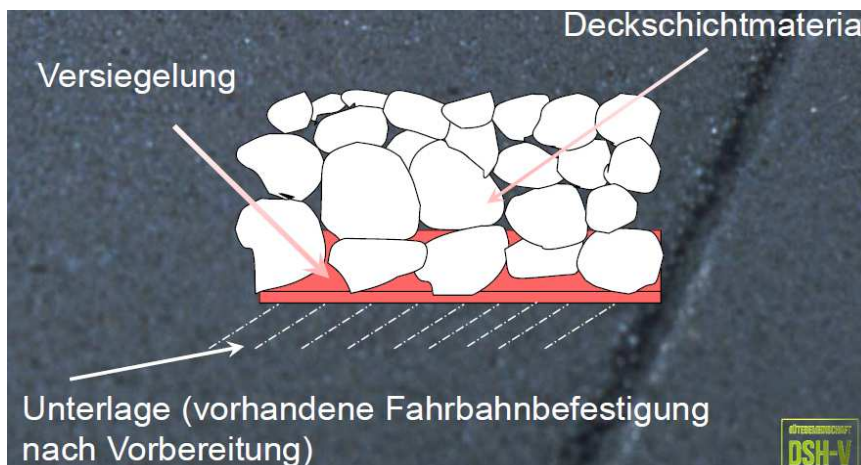
Zdroj: [Vlastní zpracování na základě [8] [11] [12] [14] [15] [16] [17]]

V případě údržby stávající komunikace je pro zajištění dostatečné kvality obrusné vrstvy AUTL žádoucí, aby podklad byl řádně připraven, tj. aby byl únosný, rovinný, bez větších deformací nebo vyjetých kol a řádně očištěný. Větší deformace stávajícího povrchu je zapotřebí frézováním odstranit a větší trhliny zajistit asfaltovou membránou (SAMI) s geotextilií nebo geokompozitem. Pokládka na nevyhovující podklad může mít za následek nedostatečné zhutnění, snížení životnosti, rychlejší stárnutí, rozpad obrusné vrstvy, vznik a rozvoj trhlin a ztrátu asfaltového tmelu. [12] [13]



Samotný průběh pokládky je o něco náročnější než klasická pokládka asfaltových vrstev a je zapotřebí odborný a zkušený zhotovitel, který zajistí správný průběh. Zhotovení asfaltové vrstvy provádí speciálně upravený finišer opatřený zásobníkem na spojovací postřík z asfaltové emulze a soustavou trysek pro postřík podkladní vrstvy. Spojovací postřík (0,8 až 1,0 kg/m²) je kladen tryskami současně s pokládkou směsi AUTL. Asfaltová emulze použitá jako spojovací postřík obsahuje 70 % zbytkového množství asfaltu. Vzhledem k tomu, že spojovací postřík je stále v emulzním stavu (nedojde k oddělení vody z asfaltové fáze), dojde ke vzlínání asfaltové emulze do obrusné vrstvy do výšky cca 5 - 8 mm, čímž se docílí velmi silného spojení vrstev a utěsnění podkladní vrstvy proti pronikání vody. Tím také dochází ke snížení výsledné mezerovitosti vrstvy, protože mezery jsou vyplněny zbytkovým asfaltovým pojivem z emulze. Pokládka se nesmí provádět ručně. Následné hutnění probíhá klasicky minimálně dvěma tandemovými ocelovými válci, které hutní vrstvu okamžitě po pokládce ve vzdálenosti max. 150 m za finišerem. Válce vybavené zařízením GPS mohou být velice užitečným nástrojem pro dosažení optimálního zhutnění a vytvoření správné tloušťky vrstvy po celé délce komunikace. [12] [13]

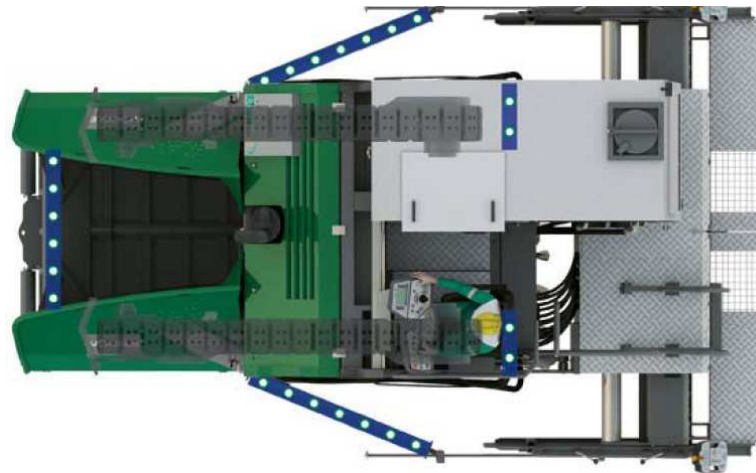
Obrázek 3: Propojení vrstev pomocí vzlínání asfaltové emulze



Zdroj: [12] *(Deckschichtmaterial – Materiál obrusné vrstvy, Versiegelung – Těsnění spojovacím postříkem, Unterlage – Podkladní vrstva)



Obrázek 4: Finišer se sestavou trysek pro rozstřík spojovacího postřiku (modře označené lišty)

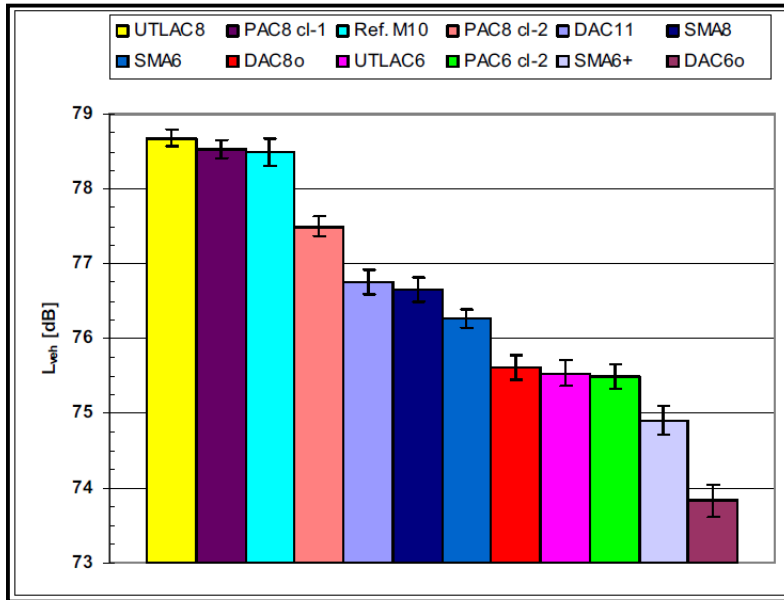


Zdroj: [12]

- Výhody AUTL [8] [12] [13]
 - Vzhledem k nízké tloušťce asfaltové vrstvy snížení nákladů údržby v průběhu životnosti konstrukce vozovky. Snaha o vytvoření tzv. věčné vozovky s doživotní životností, kde by se rekonstruovala ve většině případech jen obrusná vrstva.
 - Snížení spotřeby neobnovitelných zdrojů (ropa, kamenivo)
 - Použití na komunikacích všech TDZ (dálnice, silnice, místní komunikace)
 - Zajištění povrchu s kvalitní texturou a dobrými protismykovými vlastnostmi
 - Otevření komunikace pro dopravu do 20 minut po pokládce (rychlé snížení teploty obrusné vrstvy)
 - Snížení ekvivalentní hladiny akustického tlaku (zejména AUTL 6)
- Nevýhody AUTL [8] [12] [13]
 - Potřeba dokonalé podkladní vrstvy. Nedodržení vede k rychlé degradaci obrusné vrstvy.
 - Náročnost pokládky
 - Finanční zátěž pro zhotovitele ve smyslu nákupu speciálně upravených finišerů
 - Chybějící dlouhodobé zkušenosti
 - Nízký počet zkušebních projektů
 - Životnost obrusné vrstvy (rozdílná schopnost odolávat nepříznivým dopravním a klimatickým podmínkám v různých zemích a v různých podnebných pásech)



Graf 4: Naměřené hodnoty ekvivalentní hladiny akustického tlaku na různých typech obrusných vrstev v Dánsku



Zdroj: [16]

Na grafu 4 jsou zobrazeny výsledky měření akustického tlaku na tenkých protihlukových obrusných vrstvách v Dánsku v roce 2006. Měření probíhalo metodou SPB při rychlosti osobního automobilu 90 km/h. Stáří každého povrchu bylo přibližně jeden měsíc.

Typy povrchů:

UTLAC – AUTL (mezerovitost 14 %)

SMA – Asfaltový koberec mastixový (mezerovitost 4 %)

PAC cl-1 - Asfaltový koberec drenážní (Semi-porous asphalt concrete)

PAC cl-2 - Asfaltový koberec drenážní (Porous asphalt concrete)

DAC – asfaltový beton pro obrusné vrstvy (mezerovitost 8 – 14 %)

Z výsledků je patrná nižší hluková zátěž vznikající od povrchu UTLAC 6 ($L_{A,eq}=75,5$ dB), která je srovnatelná například s asfaltovým kobercem drenážním PAC 6. Na druhé straně grafu se nachází UTLAC 8 s $L_{A,eq}=78,6$ dB, čímž je patrné, že z prezentovaných typů tenkých protihlukových obrusných vrstev má nejmenší schopnost snižovat hluk nejpoužívanější typ AUTL.



3.2. BBTM

Asfaltový beton pro velmi tenké vrstvy se řadí mezi obrusné vrstvy s tloušťkou vrstvy 20 – 35 mm. Pod zkratkou BBTM se nachází francouzské označení Bétons bitumineux très minces. Směs pro BBTM byla vyvinuta na počátku 90. let 20. století, zejména k účelům opravy netuhých i tuhých vozovek umožňující efektivní, rychlou a relativně levnou pokládku obrusné vrstvy při dodržení všech kvalitativních požadavků. Vzhledem k dobrým zkušenostem s pokládkou (rychlost provedení) a s funkčními vlastnostmi (únosnost, odolnost, protismykové vlastnosti nebo schopnost snižovat dopravní hluku) se během následujících let dostala do popředí zájmu stavebních inženýrů. V současnosti se využívá jak pro údržbu, tak zejména pro stavbu nových silničních, dálničních i letištních vozovek. [33]

Příklad označení vrstvy BBTM dle normy ČSN EN 13108-2 [14]:

BBTM	D	Třída	Pojivo
------	---	-------	--------

- BBTM je asfaltový beton pro velmi tenké vrstvy;
- D velikost horního síta;
- Třída A, B, C nebo D;
- Pojivo označení použitého pojiva.

BBTM 8 B 50/70; 25 mm; ČSN EN 13108-2:2008

Asfaltový beton pro velmi tenké vrstvy s velikostí maximálního zrna 8 mm třídy B třídy dopravního zatížení např. IV, tloušťka vrstvy 25 mm

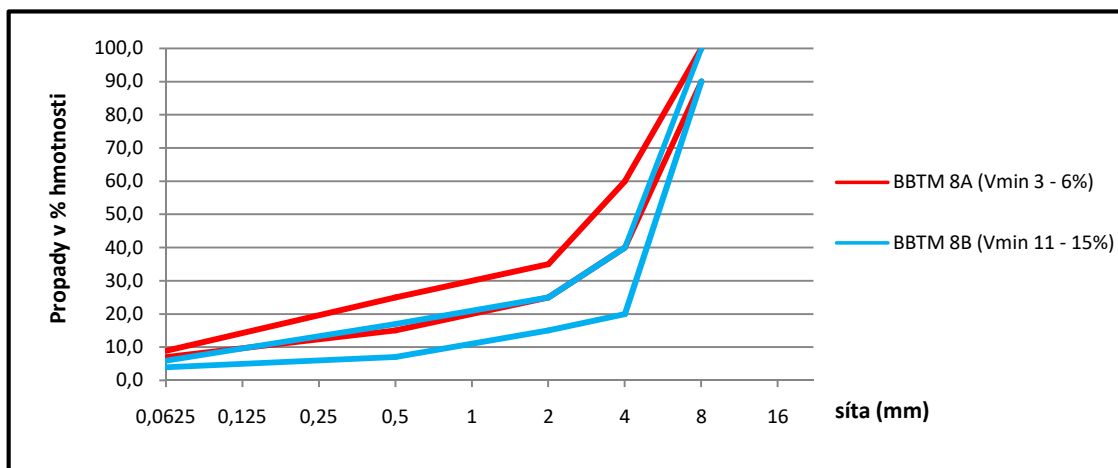
Základní návrhové parametry jednotlivých typů BBTM jsou zaneseny v normě ČSN EN 13108-2 Asfaltové směsi - Specifikace pro materiály - Část 2: Asfaltový beton pro velmi tenké vrstvy z března 2008. Směsi BBTM se stejně jakou směsí AUTL vyznačují přerušenou čarou zrnitosti, což má za následek vytvoření skeletové kostry směsi s maximální velikostí zrna do 5 mm, 8 mm nebo 11 mm. Jako silniční pojivo se nejčastěji používá silniční asfalt s gradací v rozmezí od 35/50 do 160/220 včetně, nebo polymerem modifikované asfalty. Doporučené minimální množství zbytkového asfaltového pojiva je stanoveno na 4,8 až 5,4 % hm.. Součástí výzkumu na poli tenkých



obrusných vrstev je také využití asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem. (viz kapitola 3.4). [14]

Výsledné směsi se vyznačují mezerovitostí mezi 2,5 až 15 % v závislosti na oboru zrnitosti jednotlivých typů BBTM. Požadovaná mezerovitost BBTM s označením A (směs s vyšším obsahem drobného kameniva a jemných částic) je 3 až 10 % obj., B (směs s nižším obsahem drobného kameniva a jemných částic) je 11 až 15 % obj. a C (směs s vyšším obsahem drobného kameniva a jemných částic) je 2,5 až 4 % obj. Při výběru typu směsi pro obrusné vrstvy je vycházeno z několika parametrů např.: typ komunikace, TDZ, složení dopravních proudů, plynulost dopravy, speciální požadavky typu snížení hlukové zátěže nebo zvýšení protismykových hodnot. [14]

Graf 5: Obor zrnitosti asfaltové směsi BBTM 8A a BBTM 8B



Zdroj: Vlastní zpracování na základě [14]



3.3. Tenkovrstvé protihlukové úpravy

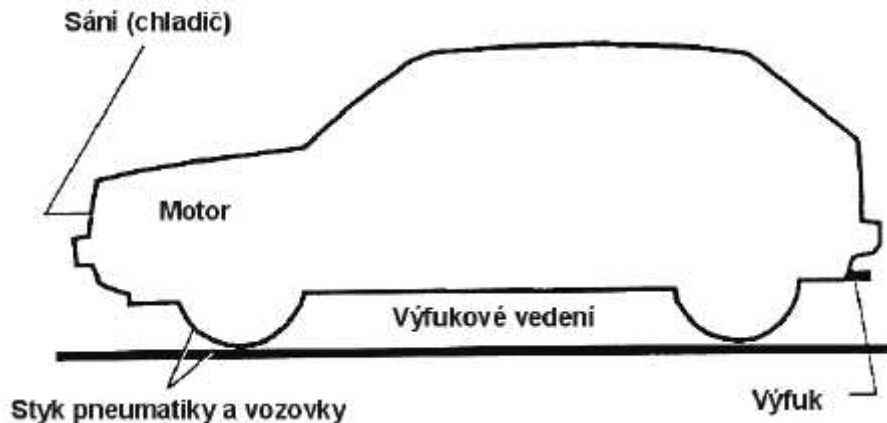
Zvyšující se hluková zátěž související s prudkým rozvojem dopravní infrastruktury se stala jedním z hlavních problémů, kterými se stále zabývají odborníci v oblasti silničního stavitelství. Hluk z dopravy se stal faktorem, který snižuje kvalitu života a je potřeba jej důmyslnými a efektivními protihlukovými opatřeními snižovat. Výzkum dopravního hluku a jeho účinků na lidský organismus prokázal, že lidé vystaveni ve dne dlouhodobému nadměrnému hluku (55 dB), jsou náchylní ke vzniku různých zdravotních komplikací od poruch spánku, přes zhoršení sluchu až po zvýšení rizika vzniku infarktu myokardu. [21]

V ČR nejvíce rozšířenou metodou pro snížení hladin hluku na komunikacích je výstavba různých protihlukových clon nebo valů. Dále je možné snížit hluk pomocí dopravně-organizačních opatření (např. snižování intenzit dopravy, snižování maximální povolené rychlosti) nebo výstavbou protihlukových oken. Tyto metody představují opatření, která eliminují hlukovou imisi, což ale řeší pouze následek vzniku hluku. V současnosti se u nás (v zahraničí přibližně již před 10 lety) orientace přesunula na protihluková opatření, která eliminují hluk přímo u zdroje (redukce hlukové emise). [21]

Zdrojem hluku je automobil a jeho části (motor, sání, aerodynamický tvar karoserie a styk pneumatiky s povrchem vozovky). Kromě styku pneumatiky a povrchu vozovky jsou ostatní zdroje odvislé od návrhu a práce odborníků z automobilového průmyslu. Na dopravní inženýry zbývá úprava hluku vznikajícího v důsledku tření na styku pneumatiky a obrusné vrstvy vozovky. Většina tenkovrstvých protihlukových úprav vychází z klasických tenkých obrusných vrstev a jejich vhodné úpravy, aby bylo možno vytvořit povrch s kvalitní texturou a odpovídající vyšší mezerovitostí, který je schopen snížit hladinu hluku o 4 až 8 dB v závislosti na typu komunikace, složení dopravního proudu, maximální povolené rychlosti a stavu původní obrusné vrstvy. [21]



Obrázek 5: Hlavní zdroje hluku u osobního automobilu



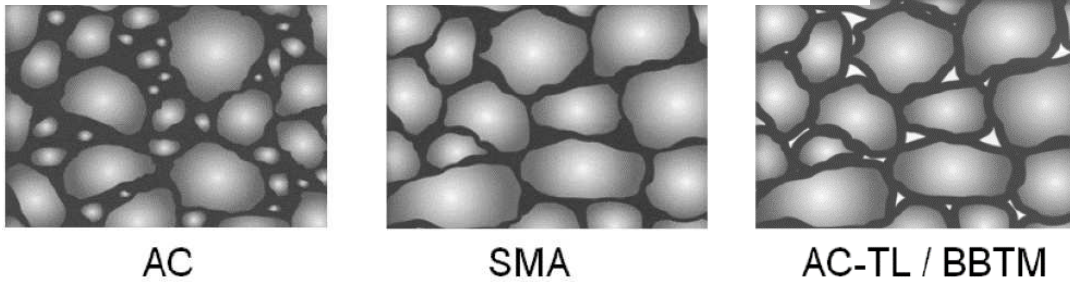
Zdroj: [21]

Pro účely návrhu, provádění, kontroly a zkoušení nízkohlučných obrusných vrstev jako SMA NH, BBTM NH, AKO byla v listopadu 2017 schválena technická podmínka TP 259 - Asfaltové směsi pro obrusné vrstvy se sníženou hlučností s účinností do doby, než bude vytvořena příslušná ČSN. V TP 259 [22] je uveden následující cíl tohoto dokumentu „Jedním z hlavních cílů tohoto technického předpisu je souhrnné zpracování doporučených technických postupů a parametrů pro rozvoj řešení a běžnou aplikaci různých typů akustických asfaltových vrstev či systémů využitelných v intravilánu a u kapacitních komunikací v okolí měst a obcí“. Tato TP umožnila vytvořit prostor pro využití obrusných vrstev s protihlukovými vlastnostmi, které není možné zařadit pod normu ČSN EN 13108-7: Asfaltové směsi - Specifikace pro materiály - Část 7: Asfaltový koberec drenážní. [22]

Jedním z hlavních kritérií při rozhodování, zda položit na daném úseku komunikace obrusnou vrstvu se sníženou hlučností, je nejvyšší dovolená rychlost. V průběhu studie nízkohlučných obrusných vrstev bylo prokázáno, že co do snížení hlukové zátěže je nejefektivnější minimálně rychlost 50 km/h na komunikacích s podílem nákladních automobilů větším než 30 % a 40 km/h na komunikacích s převažující osobní automobilovou dopravou. Je to dáno tím, že hluk vznikající na styku pneumatiky a vozovka se stává dominantním nad hlukem z motoru až při zmíněných rychlostech. [22]



Obrázek 6: Struktury různých typů asfaltových směsí



Zdroj: [20]

Na obrázku 6 je zobrazeno porovnání zrnitosti směsi asfaltového betonu (AC), asfaltového koberce mastixového (SMA) a BBTM. Asfaltový beton se oproti SMA nebo BBTM vyznačuje plynulou čarou zrnitosti, podíl jednotlivých frakcí kameniva je přibližně rovnoměrný a drobné kamenivo společně s asfaltovým pojivem uzavírá asfaltovou směs. Rozdíl mezi SMA a BBTM je zejména v množství asfaltového pojiva a podílu nejmenších zrn kameniva ve směsi. Ve větší míře se tyto návrhové parametry nacházejí u směsi SMA a tvoří asfaltovou maltu tzv. mastix, který spojuje nosnou nejhrubší frakci. U směsi BBTM asfaltové pojivo spíše obaluje zrna nosné kostry a tím vytváří otevřenější strukturu, čímž jsou zajištěny nízkohlučné vlastnosti.

3.3.1. SMA, SMA NH

Asfaltový koberec mastixový byl vyvinut v 70. letech 20. století jako obrusná asfaltová vrstva s vysokou odolností proti tvorbě trvalých deformací. Vzhledem k větším ekonomickým nárokům na výrobu směsi se SMA využívá na komunikacích s TDZ S až TDZ III, tedy převážně na dálnicích, silnicích pro motorová vozidla a silnicích I. třídy. Taktéž se podkládají na místních komunikacích se sníženou plynulostí, na komunikacích s větším výskytem dopravních kolon nebo v místech křižovatek. [33]

Základem asfaltové směsi je kostra a tzv. mastix. Kostra je tvořena nejhrubšími frakcemi blízcími se max. zrnu směsi a tvoří nosnou část směsi. Mastix, neboli asfaltový tmel je složen z kameniva frakce menší než 2 mm a modifikovaného asfaltového pojiva, které se dávkuje ve větším množství než je tomu u ACO (cca 6 až 8 %). Pro takovéto rozložení kameniva ve směsi je zapotřebí navrhnout přerušovanou čarou zrnitosti, kdy např. u SMA 8 se frakce 2/5 vyskytuje v menším poměru.



S vyšším množstvím asfaltového pojiva je spojeno nebezpečí snížení přilnavosti pojiva na kamenivo, proto se do směsi dávkuje stabilizační přísady, např. celulósová vlákna. Hodnoty výsledné mezerovitosti se pohybují v rozmezí 2,5 až 4,5 % obj. [33]

Základní charakteristiky SMA dle [33]:

- Vysoká odolnost proti trvalým deformacím
- Odolnost proti tvorbě mrazových trhlin
- Příznivá makrotextura a s ní související mírný útlum hluku z dopravy
- Pomalý proces stárnutí
- Dobrá přilnavost k podkladu

Novou kapitolu začínají SMA psát v 90. letech 20. století, kdy v Německu a Rakousku byla vyvinuta nová obrusná vrstva typu asfaltového koberce mastixového se sníženou hlučností LSMA. Této směsi byly uchovány její hodnotné vlastnosti a upravením návrhu směsi a výsledné textury a mezerovitosti asfaltové vrstvy byla navrch přidána schopnost snižovat hluk. Odborné články uvádí, že je možné pomocí LSMA snížit hladinu hluku až o 4 dB. V Německu je nejvíce využívaná směs s maximálním zrnem 8 mm, ačkoliv směsi s menším maximálním zrnem ($D = 5$ mm) snižují hluku ještě o cca 2 až 2,5 dB, ale při větším dopravním zatížení mají obecně nižší únosnost a trvanlivost. Oproti klasickému asfaltovému koberci mastixovému se jeho nízkohlučná verze vyznačuje upraveným návrhem čáry zrnitosti s vyšším podílem jemných částic a tím dochází ke zvýšení mezerovitosti směsi na hodnotu 10 až 15 % obj. V současnosti se v ČR tyto směsi označují jako SMA NH. [19]

Výhodou směsi SMA NH oproti směsi PA je možnost pokládky na komunikacích všech tříd dopravního zatížení, vyšší životnost, menší nároky na čištění a údržbu asfaltové vrstvy, menší požadavky na odvodnění, využití směsi jako R-materiálu a nižší cena ve srovnání PA s referenčním SMA 8S. Všechny tyto výhody vedou k rostoucí tendenci využívání SMA NH na úkor asfaltových koberců drenážních. [23]

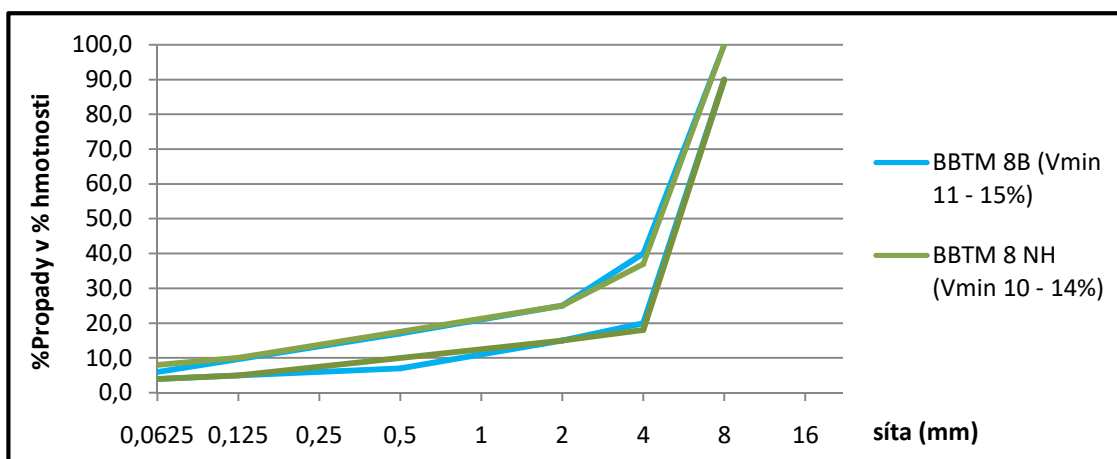


3.3.2. BBTM NH

S uspokojivými výsledky co do snížení hlukové zátěže z dopravy se směsi BBTM pokládají na místních komunikacích a průtazích měst v blízkostech lidských domovů. Z odborných měření a zkušeností vyplývá, že obecně směsi na bázi tenkých obrusných vrstev jsou schopny snižovat hluk o 3 dB. [19]

Asfaltová směs pro tenkou obrusnou vrstvu se sníženou hlučností, uvedená v TP 259, má podobné návrhové parametry jako BBTM 8B. Minimální množství asfaltového pojiva je stanoveno na 5,3 % hm. (BBTM 8B – 5,2 % hm.), mezerovitost na hodnoty mezi 10 – 14 % obj. (BBTM 8B – 11 – 15 % obj.). Asfaltové pojivo se výhradně modifikuje, a to polymerem nebo pryží dle TP 148. [22]

Graf 6: Rozdíl oboru zrnitosti asfaltové směsi BBTM 8B a BBTM 8 NH



Zdroj: Vlastní zpracování na základě [14] [22]

Vozovky opatřené obrusnou vrstvou se sníženou hlučností, ať je to SMA NH nebo BBTM NH, ztrácejí v průběhu času své akustické vlastnosti. Je to dáno mimo jiné stářím vozovky, degradací obrusné vrstvy nebo zanášením mezer a pórů nečistotami z dopravy, zimní údržby nebo prachu z okolí. Tato ztráta nízkohlučných vlastností se dá snížit pravidelným čištěním vysokotlakými čistícími zařízeními, která dokonale vymyjí zanesené mezery a póry, aniž by došlo k degradaci povrchu. Pomocí pravidelného čištění (v odborné literatuře je uváděno dvakrát do roka, a to na jaře a na podzim)



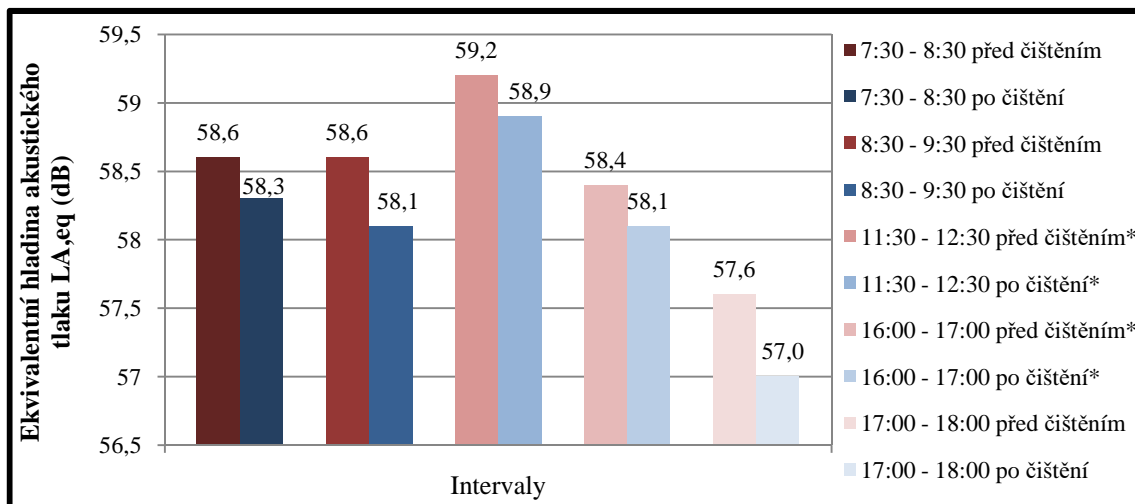
je možné docílit meziročního snížení hlukové zátěže na komunikacích cca o 0,3 až 1 dB při měření metodou SPB. [24]

Obrázek 7: Detail povrchu Viaphone (BBTM NH) před a po čištění



Zdroj: [25]

Graf 7: Srovnání naměřených hodnot ekvivalentní hladiny akustického tlaku A před a po čištění (obrusná vrstva Viaphone)



Zdroj: [25]



3.4. CRmB

Jedním z aktuálních témat v silničním stavitelství je modifikace silničního asfaltu pomocí pryžového granulátu získaného z ojetých pneumatik. Základní myšlenka využívání pryže ve vrstvách vozovek tkví ve vytvoření asfaltové směsi, která dokáže odolat trvalým deformacím a většímu rozkmitu teplot a tím prodloužit životnost asfaltové vrstvy. Modifikací asfaltového pojiva pryžovým granulátem dochází k nárůstu bodu měknutí a ke snížení bodu lámavosti pojiva, což vede k rozšíření oboru plasticity. Odborné články zabývající se CRmB uvádějí, že při použití CRmB je možné snížit tloušťku pokládané asfaltové vrstvy, aniž by došlo ke snížení funkčních vlastností a životnosti, proto je snahou zaimplementovat CRmB do směsí pro tenké a ultratenké asfaltové vrstvy. [26]

Pryžový granulát je získáván drcením a mletím ojetých pneumatik zbavených jejich ocelové a kordové kostry. Pneumatika je nejčastěji zpracovávána vícenásobným drcením (na zrnitost 3 – 5 mm) a mletím (na zrnitost 0 – 2 mm) za normálních teplot, kdy prochází recyklační linkou s jednotlivými drtiči a je rozmělnována na požadované frakce. Druhou metodou pro zpracování pneumatik je kryogenní metoda, která je založena na zmrazení pryže na teplotu pod $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ pomocí tekutého dusíku. Pryž se stane křehkou a pro rozdrčení je zapotřebí zlomek vynaložené síly oproti předešlé metodě (snížení potřebné síly cca o 90 %). Při této metodě se snadněji oddělují textilní a kovové části kordu od částic pryže. Drtiče mají delší životnost a je možné využít drtiče menších rozměrů. Samotná zrna granulátu jsou ostrohranná, hladká a bez teplotní degradace. Výhody kryogenní metody prozatím přebíjejí vyšší náklady na zmrazení, protože je potřeba velké množství drahého tekutého dusíku. [27]

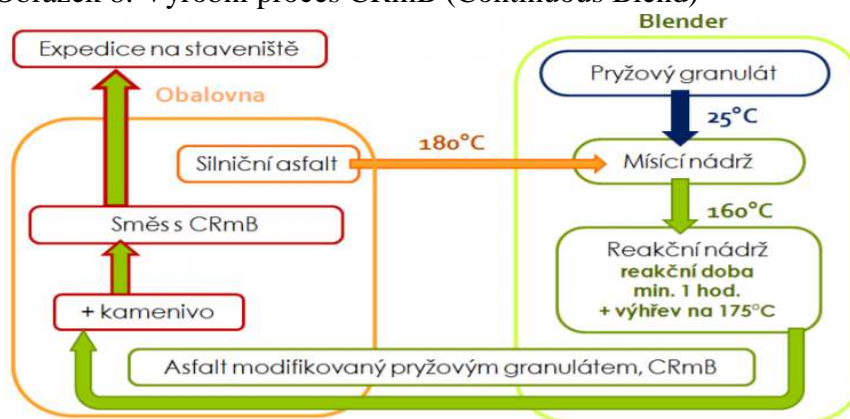
Technologie využívající pryžový granulát byla vyvinuta v USA v 80. letech 20. století pod názvem Asphalt Rubber hovorově gumoasfalt, v jehož názvu je obsaženo jak pojivo, tak i asfaltová směs. Pro zpracování pryžového granulátu do asfaltových směsí existují dvě základní metody. První metoda, pocházející ze Švédska a v ČR prvně použita na přelomu 20. století pod názvem Rubit, je označována jako „Suchý proces“. Pryžový granulát zrnitosti 0/1 a 0/4 je dávkován ke kamenivu v míchačce obalovny,



tudíž nedochází k modifikaci asfaltového pojiva, ale k vytvoření pryžovým granulátem modifikované asfaltové směsi. Používají se silniční asfalty gradace 70/100 nebo 50/70. Dávkováním granulátu přímo do míchačky obalovny není možné kontrolovat následný výrobní proces asfaltové směsi. Navíc tyto směsi nesplňovaly požadavky na životnost, proto se od této technologie ustoupilo. [28]

V současnosti nejvíce aplikovaná metoda je označována jako „Mokrý proces“, kdy je pryžovým granulátem modifikováno přímo asfaltové pojivo a vzniká asfalt modifikovaný pryžovým granulátem (zkratka CRmB z ang. Crumb Rubber modified Bitumen). Jedná se o nejpoužívanější metodu zpracování pryžového granulátu do asfaltových směsí, přičemž její zásady jsou stanoveny v TP 148 – Hutněné asfaltové vrstvy s asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem z pneumatik. Výrobní proces CRmB je uveden na Obrázku 8. [28]

Obrázek 8: Výrobní proces CRmB (Continuous Blend)



Zdroj: [29]

Samotné mísení granulátu (15-20 % z celkové hm. pojiva) a asfaltového pojiva probíhá v mobilním přístroji tzv. Blenderu v prostorách obaloven (Obrázek 8), kdy pryžové částice absorbují lehké frakce asfaltu a následně začnou bobtnat. Tímto procesem dojde k zahuštění asfaltu a tím ke zvýšení dynamické viskozity, snížení penetrace a zvýšení bodu měknutí. Vyšší hodnoty dynamické viskozity umožňují dávkovat větší množství pojiva do směsi, aniž by docházelo k problémům se stékavostí. Viskozitu je během modifikace asfaltového pojiva zapotřebí kontrolovat rotačním viskozimetrem, protože při předávkování pryžového granulátu může dojít



k náhlému snížení viskozity a ke změně reologických vlastností pojiva. Průběh modifikace je závislý na teplotě, době trvání reakce, na intenzitě míchání částic pryžového granulátu s asfaltem, chemickém složení asfaltu i granulátu, způsobu výroby pryžového granulátu a na velikosti a tvaru částic pryže. Možnost zvýšeného dávkování pojiva CRmB do asfaltových směsí zlepšuje jejich funkční vlastnosti, mezi které patří snížení citlivosti vůči vysokým a nízkým teplotám, zvýšení pružnosti a odolnosti proti stárnutí a únavě. [30]

Obrázek 9: Blender



Zdroj: [28]

Výhody CRmB dle HEGR [30]:

- *Zvýšená odolnost proti trhlinám,*
- *Zlepšení protismykových vlastností - kratší brzdná dráha,*
- *Vysoká odolnost proti tvorbě trvalých deformací,*
- *Velmi dobrá odolnost vůči únavě a nižší stárnutí pojiva,*
- *Snížení emisí hluku (open graded),*
- *Snížení tvorby vodní mlhy a aquaplaningu (open graded),*
- *Vyšší bod měknutí oproti silničním asfaltům,*
- *Materiálové využití odpadní pryže z ojetých pneumatik,*
- *Delší životnost nebo snížení tloušťky vrstvy s CRmB s vyšším obsahem pojiva.*



Nevýhody CRmB dle HEGR [30]:

- *Pracnost, energetická a organizační náročnost*
- *Nezbytné použití míchacího zařízení*
- *Neekonomičnost u menších projektů*
- *Obtížnější zpracovatelnost (vliv vyšší viskozity)*
- *Charakteristický zápach při výrobě a pokládce*
- *Opotřebením dopravních zařízení (čerpadel obalovny)*

Asfaltové směsi s pojivem modifikovaným pryžovým granulátem většinou svým návrhem čary zrnitosti odpovídají konvenčním asfaltovým směsím. Návrh směsi se odvíjí dle účelu, který má daná asfaltová vrstva splňovat. Jsou využívány otevřenější typy směsí, pomocí kterých dochází ke snižování valivého hluku, dále směsi s vyšším obsahem pojiva odolnější vůči reflexním trhlinám a termooxidativnímu stárnutí pojiva nebo směsi s klasickou plynulou čarou zrnitosti a mezerovitostí od 3 – 5 %. Negativní přínosy těchto směsí se podobají běžně pokládaným směsím. Neméně významným způsobem pokládky asfaltové směsi s pojivem modifikovaným pryžovým granulátem je, ve smyslu vrstvy pohlcující tahového napětí, vrstva SAL (Stress Absorbing Layer) využívaná například na rekonstruovaných CB krytech dálničních úseků, a to díky její vysoké odolnosti proti únavovým trhlinám a prokopírování reflexních trhlin. [30]



4. Obrusné vrstvy pokládáné za studena

V předešlé kapitole jsme se seznámili s tenkými a ultratenkými obrusnými vrstvami pokládány za horka, které v současnosti představují nový směr jak v pokládce nových obrusných vrstev, tak i v údržbě netuhých vozovek. Z celkového pohledu na technologie pokládek, zaujímá pokládka za horka nejvýznamnější podíl v silničním stavitelství. Avšak již na počátku 80. let a zejména v 90. letech 20. století, především na základě šířících se hlasů ohledně environmentálních otázek, začaly být více využívány asfaltové emulze, což jsou technologie umožňující pokládat obrusné vrstvy za nízkých teplot a běžných klimatických podmínek. Obrusné vrstvy pokládáné za studena (v anglickém jazyce: Cold mix Asphalt (CMA)) byly vynalezeny jako alternativa k obrusným vrstvám pokládaným za horka ((v anglickém jazyce: Hot mix Asphalt (HMA)).

Studené asfaltové vrstvy se vyznačují velmi nízkou tloušťkou, proto se výhradně používají jako obrusné vrstvy netuhých vozovek. Výroba a využití asfaltových emulzních směsí do podkladních a ložných vrstev je předmětem výzkumu jen v několika zemích např. v USA a Francii, kde je možné výhodně využít jednoduché mobilní míchací zařízení a místní materiálové zásoby v rozlehlých oblastech s velkými přepravními vzdálenostmi. V České republice využíváme asfaltové emulzní směsi zejména pro údržbu a opravu poruch obrusných vrstev vozovek ve smyslu zlepšení protismykových vlastností, prodloužení trvanlivosti obrusné vrstvy a obnovu obrusné vrstvy po ztrátě asfaltového tmelu nebo kameniva. Dále se můžeme s asfaltovými emulzemi setkat u postřikových technologií. [33]

Mezi asfaltové směsi pokládáné za studena řadíme: [33]

- a) Postřikové a nátěrové technologie (postřiky, membrány, nátěry);
- b) Emulzní kalové vrstvy (emulzní kalové zákryty, emulzní mikrokoberce)
- c) Studené asfaltové směsi pro vysprávky (provádění v době, kdy klimatické podmínky neumožňuje užití běžných technologií)



Studená asfaltová směs se skládá z: [31]

- a) Kamenivo
- b) Kationtaktivní asfaltová emulze nebo aniontaktivní asfaltová emulze (nemodifikovaná i modifikovaná)
- c) Voda
- d) Stabilizátory
- e) Další vhodné přísady

V současnosti se klade velký důraz na energetickou úsporu či omezení emisí a škodlivých látek během výroby a pokládky asfaltových směsí. Mnoho odborných studií uvádí, že při využití studené asfaltové směsi může dojít k ušetření až poloviny energie, která by byla potřeba na zpracování stejného množství horké asfaltové směsi. Studené emulzní asfaltové směsi se tudíž dají označit za velmi atraktivní, a to z důvodu nižších emisí vypouštěných při výrobě a zpracování směsí, což má za následek pozitivní vliv na životní prostředí. [31]

Při využití asfaltových emulzí dochází ke snížení hodnot uhlíkové stopy. Uhlíková stopa se dá popsat jako hodnota vyjadřující množství skleníkových plynů, které se uvolní během životního cyklu daného produktu. [31] Oproti asfaltovým směsím pokládaným za studena je zapotřebí při výrobě a pokládce horkých asfaltových směsí provést několik úkonů, které zvyšují hodnotu uhlíkové stopy. Jsou jimi například vysušení a přehřátí kameniva v sušícím bubnu, který pomocí plynového hořáku snižuje přirozenou vlhkost kameniva před tříděním a zvyšuje jeho teplotu pro mísení s asfaltovým pojivem. Dále je zapotřebí udržovat stálou teplotu asfaltového pojiva v zásobovacích nádržích okolo 140 – 160 °C, což má za následek spotřebu energie. Nezanedbatelná je i spotřeba elektrické energie během míchání asfaltové směsi, dopravy jednotlivých složek na obalovně, třídění na vibračních sítích, vážení a dalších procesech. V neposlední řadě zvyšuje uhlíkovou stopu u pokládky za horka hutnění asfaltových vrstev, a to z důvodu nezbytného a časově náročnějšího hutnění, což způsobuje větší spotřebu pohonných hmot. [32]



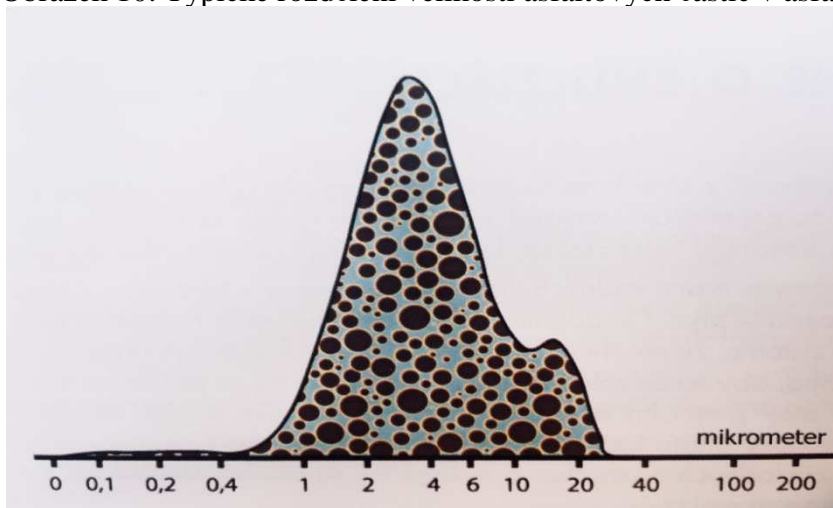
Několik posledních let je velikým tématem vliv plynných emisí exhalovaných během zpracování horkých asfaltových směsí. Je pravdou, že se asfaltová pojiva skládají z polycyklických aromatických uhlovodíků (PAU) charakterizujícími se počtem benzenových jader. PAU se třemi až sedmi benzenovými jádry jsou označovány jako karcinogenní a zejména benzo(a)pyren a benz(a)antrax je silně karcinogenní a mutagenní. Na základě obav z možného rizika bylo v minulosti provedeno velké množství epidemiologických studií, a ačkoliv se došlo k závěru, že množství škodlivých látek ve výparech nepředstavuje žádné riziko, stále je mnohými kritiky uváděno, že pokládka horkých asfaltových směsí může být potenciálně škodlivá pro životní prostředí a zdraví pracovníků. Proto je snahou stavebních inženýrů a stavebních firem pokračovat ve vývoji asfaltových směsí se sníženou výrobní i zpracovatelskou teplotou (např. Nízkoteplotní asfaltové směsi) a zvyšovat využití studených asfaltových směsí, u kterých jsou plynné emise víceméně eliminovány, protože asfalt je zahříván jen při emulzifikačním procesu a při pokládce je samostatná asfaltová emulze dovážena při teplotách okolo 30 – 40 °C v závislosti na typu emulze. Mezi výhody emulzí patří jednoduchost a rychlost provedení pokládky, nenáročnost hutnicího procesu a v neposlední řadě schopnost skladovat nebo převážet asfaltové emulze na větší vzdálenosti bez potřeby použití speciálně izolovaných nákladních automobilů. Tudíž jsou studené asfaltové směsi efektivní zejména při realizaci oprav v menším měřítku a v oblastech s velkými přepravními vzdálenostmi. [31]



4.1. Asfaltové emulze

Princip asfaltových emulzí je znám již z konce dvacátých let 20. století a v silničním stavitelství se začal využívat na začátku 50. let 20. století. Obecně považujeme emulze za disperzní systém, ve kterém jsou kapky jedné kapalné fáze (disperzní fáze) rozptýleny ve druhé kapalné fázi (disperzní prostředí), aniž by došlo k jejich promíchání jako je tomu u běžných roztoků. V případě asfaltových emulzí mluvíme o takzvané „přímé emulzi“, tedy takové emulzi, ve které disperzní fázi tvoří mikroskopické částice asfaltového pojiva s vyšší viskozitou a disperzní prostředí tvoří voda. Velikost částic asfaltového pojiva se pohybuje v rozsahu 1 až 30 μm . Jmenovitý obsah asfaltového pojiva v emulzi se nachází obvykle v rozmezí 60 až 70 %, ale můžeme se setkat s menším (40 %) i s větším (až 80 %) obsahem. [31]

Obrázek 10: Typické rozdělení velikosti asfaltových částic v asfaltové emulzi



Zdroj: [36]

V asfaltových emulzích tedy dochází k rozptýlení mikroskopických částí asfaltu ve vodě. Za normálních okolností je asfalt s vodou nemísitelný, což je dáno jejich chemickým složením, zejména tedy polaritou obou látek. Asfalt je koloidní disperze tvořena dvěma skupinami látek, asfalteny a maltény. Asfalteny jsou složeny převážně z uhlíku a vodíku, dále z dusíku, síry a kyslíku a vzhledem k jejich složení jsou značně polárními látkami. Asfalteny jsou rozptýleny v malténech, které můžeme rozdělit na tři základní druhy; satureované oleje, aromatizované oleje a pryskyřice. Satureované oleje

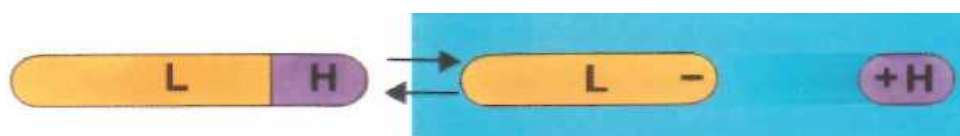


jsou látkami nepolárními, tvořenými řetězci alifatických uhlovodíků a tvoří 5 až 20 % asfaltu. Aromatizované oleje jsou taktéž nepolární a jsou složeny z alifatických řetězců a nenasycených aromatických kruhů a tvoří okolo 40 až 60 % asfaltu. Pryskyřice mají podobnou chemickou strukturu jako asfalteny a jsou polární. [31]

Ačkoliv je asfalt tvořen z části polárními látkami, tak v globálu je to nepolární látka, což znamená, že v jednotlivých molekulách jsou elektrony rozděleny rovnoměrně. Na druhou stranu voda, tvořená jednotlivými iontovými sloučeninami H_3O^+ , OH^- , H^+ a molekulou H_2O , je polární látka. Polární látka je taková, ve které jsme schopni přesně určit kladnou a zápornou oblast molekuly tj. dipolový moment. U molekuly H_2O to je oblast záporného náboje v okolí kyslíku a oblast kladného náboje v okolí vodíku. To v podstatě znamená, že při vytvoření směsi asfaltu s vodou dochází k oddělení obou látek, protože molekuly vody se snaží zrušit kladnou a zápornou oblast náboje, a proto se váží sami na sebe. [31]

Na základě výše popsaných skutečností je tedy zapotřebí při výrobě asfaltových směsí použít vhodné emulgátory, což jsou povrchově aktivní látky, které působí na mezifázovém rozhraní asfaltové emulze. Molekuly povrchově aktivních látek jsou tvořeny polární (hydrofilní = schopné navázat se na vodu) a nepolární (lipofilní = schopné navázat se na olej (méně polární či nepolární látku)) částí, což má za následek schopnost emulgátoru snížit povrchové napětí mezi asfaltem a vodou a umožnit jejich disperzní chování. Emulgátory jsou schopné obalit povrch asfaltových částic a předat jim elektrický náboj. Zároveň obal vytvořený emulgátorem zabraňuje brzké koagulaci asfaltové emulze. Na základě předaného typu ele. náboje lipofilní částí emulgátoru dělíme asfaltové emulze na aniontaktivní nebo kationtaktivní. [31] [34]

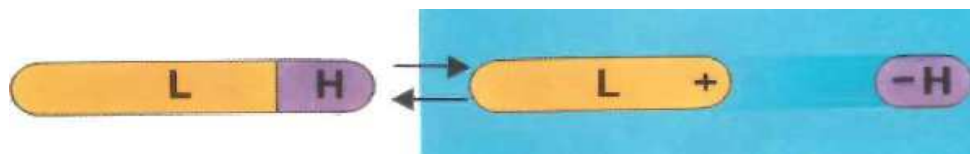
Obrázek 11: Schematické znázornění aniontaktivní povrchové látky



Zdroj: [36]



Obrázek 12: Schematické znázornění kationtaktivní povrchové látky



Zdroj: [36]

L – lipofilní část povrchově aktivní látky

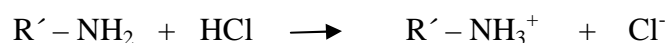
P - hydrofilní část povrchově aktivní látky

4.1.1. Kationtaktivní asfaltové emulze (KAE)

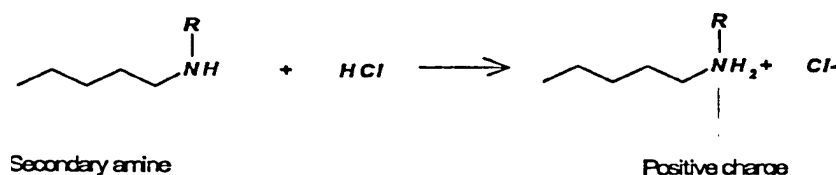
Za kationtaktivní pokládáme takové asfaltové emulze, ve kterých příslušné emulgátory předají mikročásticím asfaltu kladný náboj. První zmínky o využití takto upravených emulzí se datují do 50. let 20. století a díky svým vhodným vlastnostem se v současnosti využívají v přibližně 95 % všech aplikací asfaltových emulzí v silničním stavitelství. V roce 2015 vyšla norma ČSN EN 73 6132 - Stavba vozovek - Kationaktivní asfaltové emulze, která byla v roce 2018 aktualizována. [31] [36]

Jako emulgátory se využívají aminy vyšších mastných kyselin a jejich deriváty, které se přidávají do vodní fáze před smícháním s asfaltovou fází v koloidním mlýně. Pro aktivaci emulgátoru je zapotřebí emulgátor sloučit s kyselinou chlorovodíkovou (HCl), protože aminy jsou schopny odštěpit z kyseliny chlorovodíkové vodíkový proton a vytvořit aminhydrochlorid ($R'NH_3^+ Cl^-$). [31] [36]

Reakce primární aminu s kyselinou chlorovodíkovou:



Obrázek 13: Reakce sekundárního aminu s HCl

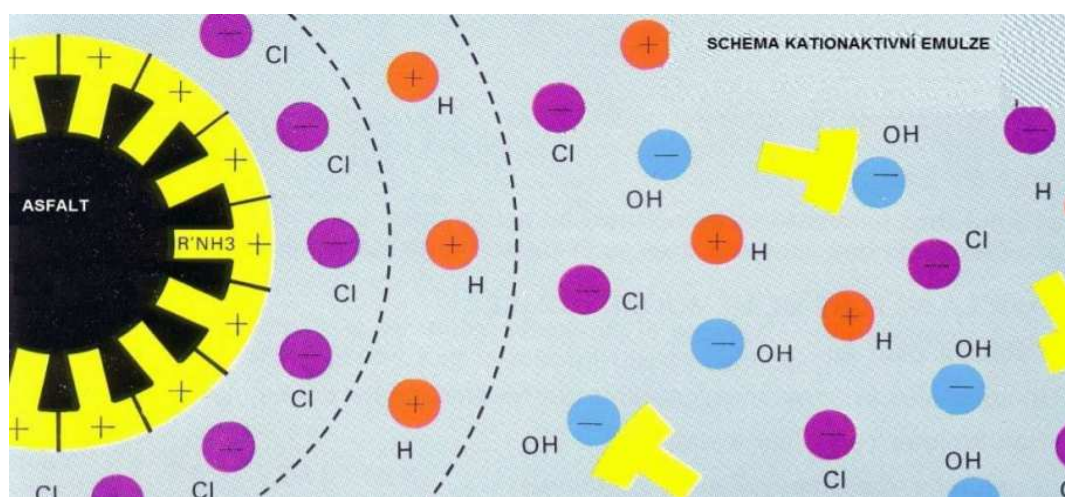


Zdroj: [31]



V případě emulgátoru typu aminhydrochloridu je lipofilní částí dlouhý uhlovodíkový řetězec R' a hydrofilní částí skupina NH_3Cl . V samostatné vodní fázi dochází k ionizaci na kationty $R'-NH_3^+$ a anionty Cl^- . Při sloučení asfaltové a vodní fáze účinkem mezipovrchových přitažlivých sil poté dochází ke hromadění lipofilní části emulgátoru na povrchu asfaltových částic a vytvoření kladně nabitého obalu ze skupiny NH_3^+ , díky kterému se částice asfaltu navzájem odpuzují, čímž klesá riziko předčasné sedimentace a následné koagulace pojiva. Schéma takto vytvořené kationtaktivní emulze i s obalem je zobrazeno na obrázku 14. [31] [36]

Obrázek 14: Schéma kationtaktivní asfaltové emulze

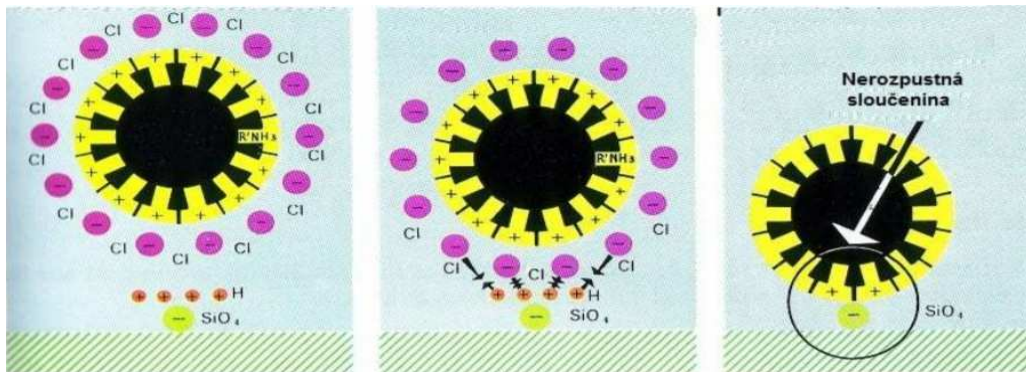


Zdroj: [34]

Na obrázku 15 můžeme pozorovat jednotlivé procesy při štěpení kationtaktivní asfaltové emulze. Částičky asfaltu s kladným nábojem jsou elektrolyticky přitahovány ke kamenivu se záporným nábojem při současném vytěsnění vody a štěpení emulze. Vzhledem k tomu, že většina druhů kameniva má záporný náboj, má KAE velice dobrou přilnavost ke kamenivu. Velikou výhodou KAE je také její schopnost dobře přilnout k vlhkému kamenivu. Je to dáno tím, že štěpení probíhá chemickou reakcí bez závislosti na vlhkosti. K výhodám můžeme zařadit také rychlost samotného štěpení. Mezi nevýhody patří poměrně větší náklady na emulgátory, náročnější emulgovatelnost a náchylnost ke koagulaci (shlukování) asfaltových částic. Tomuto stavu se dá předejít zejména aplikací přísady nebo stabilizátoru, který upraví štěpitelnost emulze. [34] [35]



Obrázek 15: Štěpení KAE

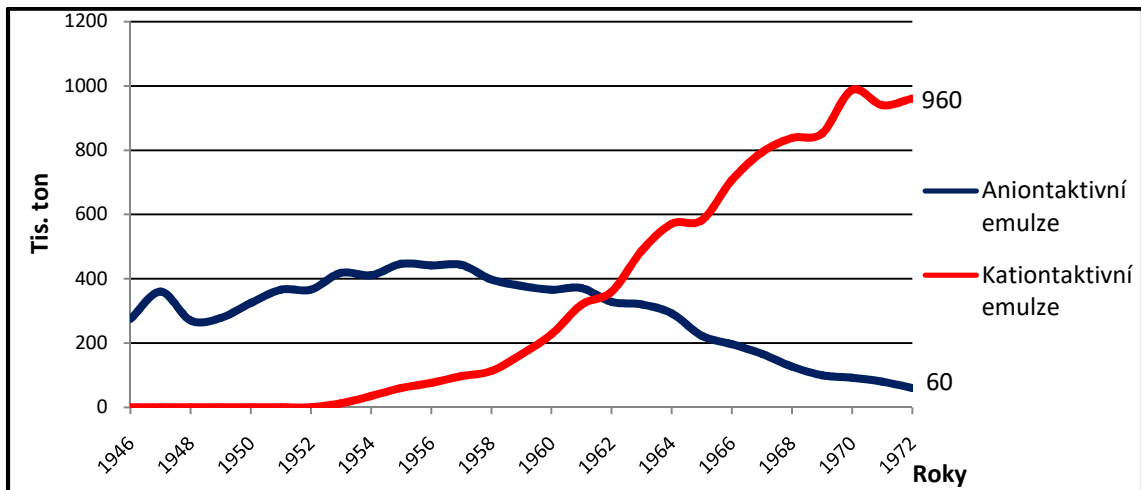


Zdroj: [34]

4.1.2. Aniontaktivní asfaltové emulzu (AAE)

V případě aniontaktivní asfaltové emulze se jedná o emulze, jejichž emulgátory svým složením poskytují částicím asfaltového pojiva záporný náboj. První použití v silničním stavitelství bylo ve Francii a datuje se do 20. let 20. století. Množství vyrobené AAE mělo vzestupnou tendenci zejména po 2. světové válce až po objev KAE, kdy následně došlo k rapidnímu snížení využití AAE. Tato změna je zobrazena na grafu 8. [36]

Graf 8: Vývoj výroby asfaltových emulzí ve Francii (1946 - 1972)



Zdroj: [36]



Je to dáno zejména jejími nevýhodami, tákajícími se omezeného využití. Je nežádoucí pokládat AAE na vlhký podklad, což je zapříčiněné tím, že průběh štěpení je ovlivněn zejména rychlostí odpařování vody a větší množství vody by průběh štěpení ztěžovalo. Dalším omezením je možnost využití jen zásaditého kameniva (např. vápenec - CaCO_3 , čedič), protože u kyselého kameniva s elektronegativním nábojem nedochází k přitahování negativně nabitých částic asfaltu (obě mají stejný náboj) a ani k reakci s emulgátorem, a nedojde tak k adhezi. Problém může nastat také při vlhkém počasí, protože může dojít k opětovné reemulgaci asfaltové emulze. Dále není možné využít AAE při potřebě rychlého vyštěpení emulze. V současnosti se AAE využívají zejména v oblastech suchého a teplého podnebí nebo v oblastech z převažujícím výskytem zásaditého kameniva. Mezi její hlavní výhody patří snadná a levná emulgovatelnost, kdy některé vhodné asfalty obsahují přirozené emulgátory nebo je možné jako emulgátor využít odpad z chemické výroby. [35] [36]

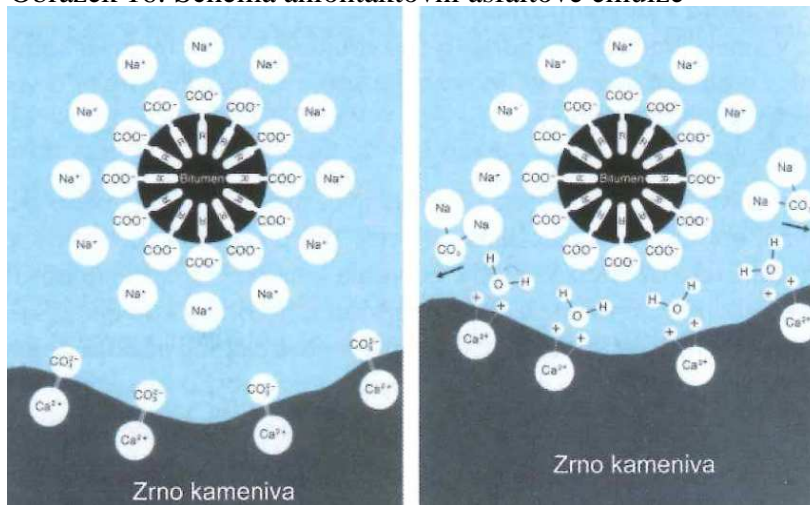
Jako emulgátor se využívají alkalická sodná nebo draselná mýdla nanesycených mastných kyselin ($\text{R}'\text{-COO Na}$, $\text{R}'\text{-COO K}$), která lehce reagují s vápenatými nebo hořečnatými ionty kameniva za vzniku ve vodě nerozpustných solí. Pro aktivaci se využívají silně alkalické sloučeniny hydroxidu sodného nebo draselného. [35] [36]



Stejně jako u KAE, tak i u AAE je lipofilní částí dlouhý uhlovodíkový řetězec a hydrofilní částí je skupina COO Na . V roztoku vody a emulgátoru opět dochází k ionizaci na kationt Na^+ adsorbovaný vodou a na aniont $\text{R}'\text{-COO}^-$, který je přitahován asfaltovými částicemi a předává jim záporný náboj. [35] [36]



Obrázek 16: Schéma aniontaktivní asfaltové emulze



Zdroj: [36]

4.2. Výroba asfaltových emulzí

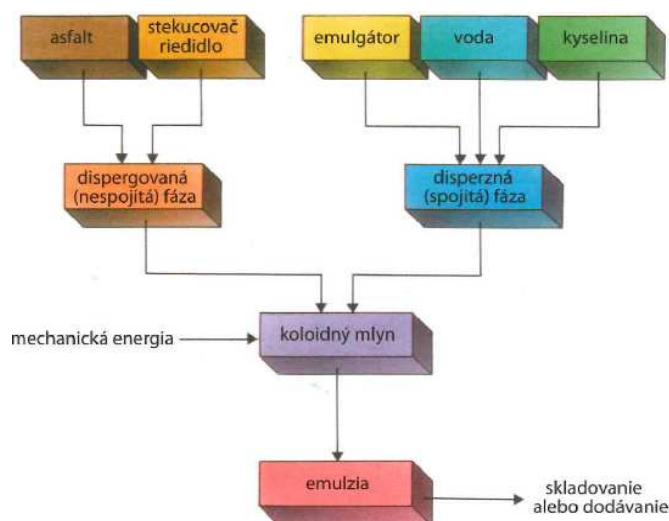
Výroba asfaltových emulzí je založena na jemném rozemletí asfaltového pojiva (1 až 10 μm , což představuje přibližně 10 až 20 miliónů asfaltových kuliček plovoucích v objemu emulze o velikosti špendlíkové hlavičky) a vytvoření disperzního systému společně s vodou, emulgátorem a dalšími přísadami podporujícími zabránění koalescenci asfaltového pojiva v průběhu emulgace nebo pro úpravu doby štěpitelnosti. Emulgace, tedy vytvoření nespojitě fáz rozložením asfaltového pojiva na kapičky, probíhá v tzv. koloidních mlýnech, do kterého jsou přiváděny pomocí čerpadel asfaltová (olejová) fáze a vodní fáze. Stabilita asfaltové emulze, tím je myšlena stálost disperzního prostředí, je zajištěna tím, že síly dispergační, ovlivněné emulgátory a přísadami, jsou větší než kohezní síly částic asfaltu. Částičky asfaltu mají tendenci flokulovat (shromažďovat se) v závislosti na jejich kohezních silách, které se s velikostí částic snižují. [31] [36]

Dále velikost částic asfaltového pojiva ovlivňuje: [36]

- rychlost štěpení, jemnější = pomalejší rychlost štěpení
- adhezi, jemnější = vyšší adheze
- čerpatelnost, jemnější = asfaltová emulze má nižší viskozitu
- skladovací stabilitu, jemnější = vyšší skladovací stabilita



Obrázek 17: Zjednodušené schéma výroby asfaltové emulze



Zdroj: [36]

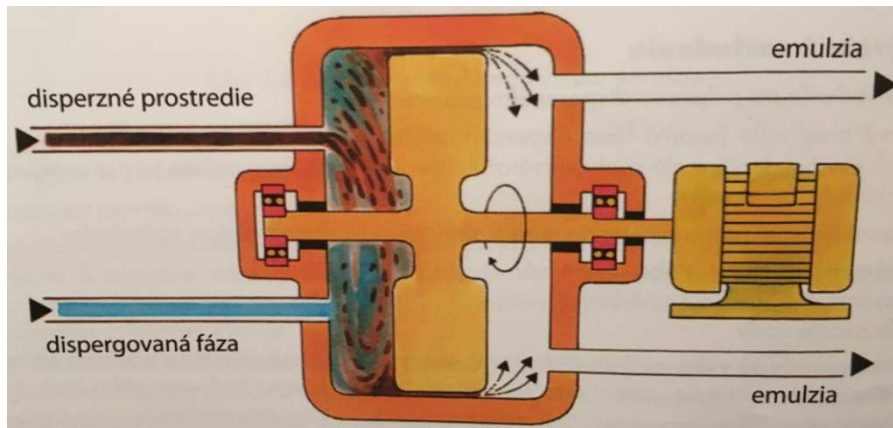
Na obrázku 17 je znázorněno teoretické schéma výroby asfaltové emulze. Výchozími body procesu výroby jsou dvě fáze, asfaltová a vodní. Asfaltová fáze je tvořena čistým nebo modifikovaným asfaltem a rozpouštědlem a je přiváděna čerpadly do koloidního mlýna. Aby bylo zajištěno dobré rozptýlení asfaltu ve vodní fázi a čerpatelnost pojiva, musí mít asfalt relativně nízkou viskozitu. Proto musí být asfalt zahřán na teplotu v rozmezí 110 °C až 160 °C. Spojitá vodní fáze musí být taktéž přiváděna zahřátá na teplotu v rozmezí 30 – 70 °C, aby došlo ke správnému rozpuštění emulgátoru ve vodě. V literatuře je uváděno, že součet teplot obou fází by neměl překročit 200 °C. V případě vyšší teploty by mohlo dojít k varu vodní fáze, čímž by došlo k probublávání asfaltu a vytváření vzduchových bublin. Taktéž příliš nízká teplota vodní fáze by mohla způsobit teplotní šok, při kterém by došlo k tuhnutí asfaltu a tvorbě hrubých asfaltových částic. Moderní tlakové koloidní mlýny jsou schopny využívat přetlaku a zvyšovat bod varu vodní fáze na 120 až 130 °C, čímž zvyšují škálu použitelných teplot. [31] [36]

Koloidní mlýn je tvořen rotorem a statorem, mezi nimiž je nastavitelná nebo pevně daná šterbina. Asfaltové pojivo je rozměňováno pomocí turbulentního proudění vodní fáze, jež je vytvořeno pohybujícím se rotorem rychlostí až 3000 otáček za minuty a hrubým vnitřním pláštěm rotoru a statoru. Jemnost mletí je závislá na rychlosti rotoru a na šířce šterbiny. Poté je emulgovaná asfaltová emulze odváděna čerpadly z koloidního mlýna



do skladovacích nádrží (většinou stojaté nevyhřívané nádrže), kde vzhledem ke svým vlastnostem může být skladována i několik měsíců. [31] [36]

Obrázek 18: Zjednodušené schéma koloidního mlýnu



Zdroj: [36]

V případě delší doby skladování by měly být nádrže opatřeny míchacím zařízením pro občasně promíchání asfaltové emulze, aby nedocházelo k sedimentaci asfaltového pojiva. Emulze je velice náchylná k mrazu. Při teplotách nižších než 2 °C dochází k nevratnému štěpení a emulze se stává nepoužitelná. Z tohoto důvodu je zapotřebí během chladného období oživovat emulzi pomocí topných spirál nebo naftových hořáků. K metodě oživení emulze saháme i v případě čerpání emulze s větším obsahem pojiva (nad 65 %), u které je zapotřebí snížit její viskozitu. [31] [36]

Ve většině případů je odběr hotové směsi nepřetržitý a asfaltová emulze vydrží v nádržích jen několik málo dní nebo i hodin. Zejména v letním období je zapotřebí, aby při reakci asfaltové emulze s kamenivem byla teplota dovezené asfaltové emulze okolo 30 až 40 °C, jinak by mohlo dojít k brzkému vyštěpení emulze již v násypce nákladního automobilu nebo v kladečím rámu a vzniku shluků asfaltu v pokládané vrstvě. Proto bývá někdy plášť skladovací nádrže zkrápen vodou. Například společnost Eurovia CS - odštěpný závod Emulze Kolín, která se zabývá výrobou asfaltových emulzí, využívá k chlazení hotové směsi vodu, pomocí které chladí trubní vedení propojující koloidní mlýn se skladovacími nádržemi. Výhodou je, že voda, která se při procesu ochlazování ohřála je poté využívána do vodní fáze nově vyráběné asfaltové emulze. [31] [36]



4.3. Pokládka emulzních kalových vrstev

Pokládka asfaltových emulzí je prováděna strojně pomocí míchacího zařízení převážně instalovaného na klasickém podvozku nákladního automobilu a kladečního rámu přimontovaného na zadní části míchacího zařízení. V závislosti na umístění a rozsahu stavby probíhá pokládka za úplné nebo částečné uzavírky. [33]

Obrázek 19: Míchací zařízení a kladeční rám



Zdroj: Vlastní fotodokumentace

Před provedením pokládky je zapotřebí upravit stávající podklad do takové míry, aby byly zajištěny základní technologické podmínky pro pokládání nové obrusné vrstvy. Jedná se o opravy větších výtluků, příčných a podélných trhlin a nerovností vedoucí k zajištění dostatečné pevnosti, únosnosti a rovinnosti podkladu. Podklad musí být zároveň důkladně očištěn, aby nedošlo ke snížení soudržnosti mezi původním povrchem a pokládanou vrstvou. Dále musí být opatřen spojovacím postříkem pro zajištění řádného spojení podkladu s obrusnou vrstvou. Samotná pokládka začíná plněním zásobníků míchacího zařízení jednotlivými složkami asfaltové směsi. Asfaltová emulze je přečerpávána z cisterny a kamenivo je nasypáváno do násypky. Zařízení musí zabezpečit správné dávkování jednotlivých složek směsi, dokonalé promíchání kameniva a přísad a následné kontinuální dávkování směsi do kladečního rámu tak, aby nedocházelo k jeho přepřívání nebo naopak k jeho nedostatečnému plnění. [33] [35]

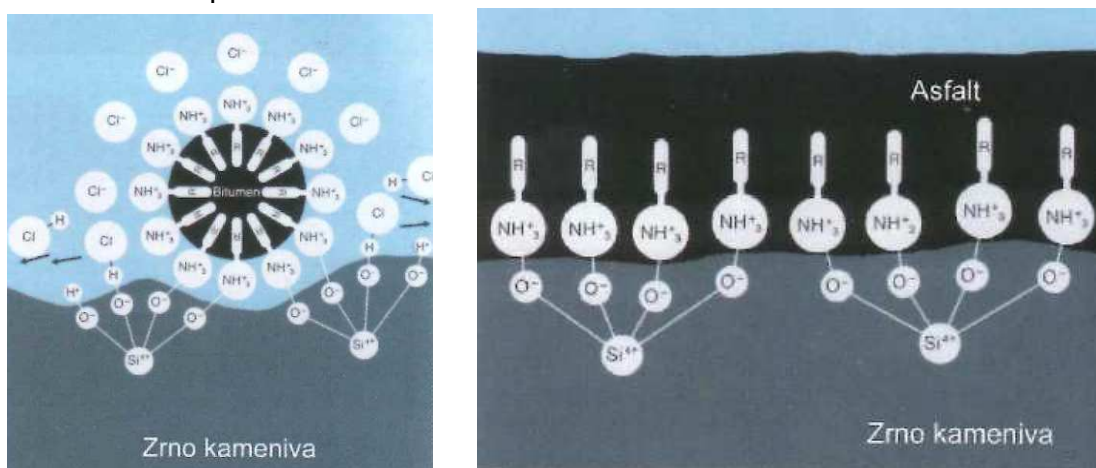


Základním principem pokládky je opětovné a nenávratné rozdělení asfaltové emulze na asfalt a vodu. Vylučování asfaltového podílu z emulze se nazývá štěpení. Tento děj nastává bezprostředně po styku asfaltové emulze s kamenivem. U kationtaktivní emulzí dochází nejdříve, kamenivem se záporným nábojem k adsorpci ve vodní fázi volně rozprostřených kladných iontů emulgátoru a následně vázání polární části emulgátoru vázaného asfaltovým pojivem. Tím dochází k destabilizaci ochranného obalu asfaltových částic, flokulaci (přibližování) a koagulaci (shlukování) částic asfaltu na zrnech kameniva za vzniku tenkého asfaltového filmu. Z hlediska chemické reakce dochází k adsorbování částice NH_3^+ na povrchu záporně nabitého kameniva za vzniku ve vodě nerozpustné soli, přičemž dochází zároveň k vytlačování a odpařování vody. Sůl nám zajistí okamžitou adhezi na kamenivu. [36]

Rychlost štěpení dle [36] závisí na:

- chemických vlastnostech emulgátoru
- jemnosti rozemletých částic asfaltu
- pH vodní fáze
- teplotě směsi
- klimatickým podmínkách

Obrázek 20: Štěpení kationtaktivní asfaltové emulze



Zdroj: [36]



Ke štěpení asfaltové emulze dochází přibližně 90 až 300s po styku s kamenivem, v závislosti na teplotě emulze, okolní teplotě a klimatických podmínkách. Proto se začíná s pokládkou směsi ihned po smíchání v míchacím zařízení, aby nedošlo k vytvoření shluků asfaltu již v míchacím zařízení nebo v kladečím rámu, což by mělo za následek znehodnocení položené asfaltové vsrty. Asfaltová emulze je dopravována otvorem ke kladečímu rámu obdélníkového tvaru, který šnekovým dopravníkem rovnoměrně rozděljuje směs v příčném směru a pomocí ocelové nebo gumové stěrky urovnává povrch pokládané směsi. Rám kladeče je buď šířkově nastavitelný, nebo má pevnou šířku s možností operativního upevnění nástavců. Čerstvě položená obrusná vrstva má zřetelně hnědou barvu, která se po vyštěpení a konsolidaci směsi změní na klasickou černou barvu. [33]

Obrázek 21: Pokládka studené asfaltové směsi



Zdroj: Vlastní fotodokumentace

Po pokládce je zapotřebí čerstvě položenou vrstvu ztuhnout. Proces hutnění neprobíhá pojížděním klasickými ocelovými válci jako je tomu u asfaltových vrstev pokládaných za horka. V závislosti na typu dopravního omezení využíváme pneumatikové válce buď při úplné uzavírce (4 – 6 pojezdů, např. dálniční tahy), nebo při částečné uzavírce, kdy uvolníme opravovanou část vozovky pro dopravu. Přičemž maximální povolená rychlost je snížena na 40 km/h, v případě mikrokoberců na dálnici na 60 km/h po dobu



1 až 3 dnů. V literatuře je uváděna minimální a maximální doporučená doba, po které je možné pustit provoz na nově položenou obrusnou vrstvu. Je důležité, minimálně orientačně, tuto dobu dodržovat, protože je nutné vytěsnit zbývající vodu z emulze a zajistit dostatečnou konsolidaci vrstvy. Poslední částí technologického postupu je čištění, při kterém čistící zařízení pomocí zametačů pro hrubé nečistoty, vysokotlakých trysek a odsávačů zametá nadbytečně uvolněné kamenivo. Toto čištění může být provedeno až po úplném vyžrání směsi, proto je prováděno zpravidla až po 3 dnech od pokládky. [33]

Tabulka 4: Doba uvolnění provedené úpravy pro dopravu

Typ kalové směsi	Doba uvolnění doporučená	Doba uvolnění maximální
EKZ	45 – 90 min	4 h
EMK	20 – 45 min	60 min

Zdroj: [33]

Obecně by se studené asfaltové směsi neměly pokládat při teplotě nižší než +10 °C a teplota během posledních 24h by neměla klesnout pod +5 °C. Vzhledem k tomu, že emulze jsou velice náchylné na mraz, pokládka nesmí být provedena při nebezpečí mrazu v následujících 24 hodinách od provedení emulzní úpravy. Dále by měly být prováděné práce zastaveny při dešti. Ačkoliv lze provádět pokládku asfaltové emulze na vlhký podklad, nesmí být na podkladu souvislý vodní film. [36]

4.4. Emulzní kalové vrstvy

Emulzní kalové vrstvy (známé také pod anglickým označením Slurry surfacing) se řadí mezi technologie, které jsou využívány jako obrusné vrstvy pokládané za studena. Jsou tvořeny za studena vyráběnými kationtaktivními asfaltovými emulzemi, kamenivem, vodou, stabilizátory a dalšími přísadami. V závislosti na typu komunikace, třídě dopravního zatížení a životnosti obrusné úpravy rozlišujeme tři typy emulzních kalových vrstev. Jsou jimi emulzní kalové zákryty (EKZ), emulzní mikrokoberce (EMK) a emulzní mikrokryty (EMKR). Většinou jsou tyto typy emulzních kalových



vrstev využívány při rekonstrukcích asfaltových vozovek. V žádném případě ale nezvyšují celkovou únosnost vozovky, jen prodlužují její životnost a povrchové vlastnosti. [3]

Základní požadavky na provádění a zkoušení emulzních kalových vrstev jsou uvedeny v odpovídající normě ČSN 73 6130 - Stavba vozovek. Emulzní kalové vrstvy.

4.4.1. Emulzní kalové zákryty (EKZ)

Emulzní kalový zákryt tvoří tenkou a celistvou obrusnou vrstvu asfaltových vozovek. V TKP 27 [39] jsou EKZ popsány jako *technologie souvislé údržby, které slouží k obnově nebo zlepšení původních vlastností obrusné vrstvy vozovky*. Využívají se při údržbě komunikací s cílem prodloužit životnost vozovky, ochránit jednotlivé asfaltové vrstvy proti pronikání vody a zlepšit protismykové vlastnosti. Na komunikacích, kde docházelo v minulosti k dočasným údržbám typu opravy trhlin nebo opravy výtluků, je možné použít EKZ k uzavření povrchu a vytvoření opticky jednotného povrchu. [36] [38] [39]

Směsi jsou tvořeny kamenivem a nemodifikovanou asfaltovou emulzí třídy štěpitelnosti 6 až 8, která se skládá z nemodifikovaného silničního asfaltového pojiva penetrace 70/100 nebo 160/200, vody, emulgátoru a stabilizátoru. Minimální obsah asfaltového pojiva v emulzi je stanoven na hodnotu 58 % hm. Oproti směsím pro mikrokoberce je používáno spíše drobné drcené kamenivo. V závislosti na třídě dopravního zatížení jsou doporučeny frakce 0/4 pro TDZ V – VI a frakce 0/5 pro TDZ III – IV. [36] [38] [39]

EKZ je možné pokládat na všechny typy asfaltových vrstev s výjimkou drenážních koberců, u kterých by došlo k zacelení děr a ke ztrátě drenážních vlastností, na cementobetonové vozovky a dlažby při dodržení předepsaných technologických postupů. EKZ se využívají na komunikacích s třídou dopravního zatížení TDZ III – VI. Dalším kritériem pro pokládku jsou podélné a příčné nerovnosti. Jednovrstvé EKZ se smí pokládat, když podélné nerovnosti měřené 4 m latí nepřekračují 8 mm a příčné nerovnosti měřené 2 m latí nepřekračují 6 mm. EKZ mohou být pokládány jako jednovrstvé nebo dvouvrstvé obrusné vrstvy. Tloušťka pokládané vrstvy odpovídá



přibližně velikosti max. zrna D směsi zvětšené o 25 %. Samotná pokládka probíhá stejně, jak je uvedeno v kapitole 4.3. s jediným rozdílem, kdy při pokládce směsi se zrnitostí kameniva 0/4 je možné využít jen gumovou nebo ocelovou stěrku bez šnekového dopravníku. Minimální obsah zbytkového asfaltu po vyštěpení emulze je stanoven na 7,0 až 12,0 % hmotnosti směsi. [36] [38] [38]

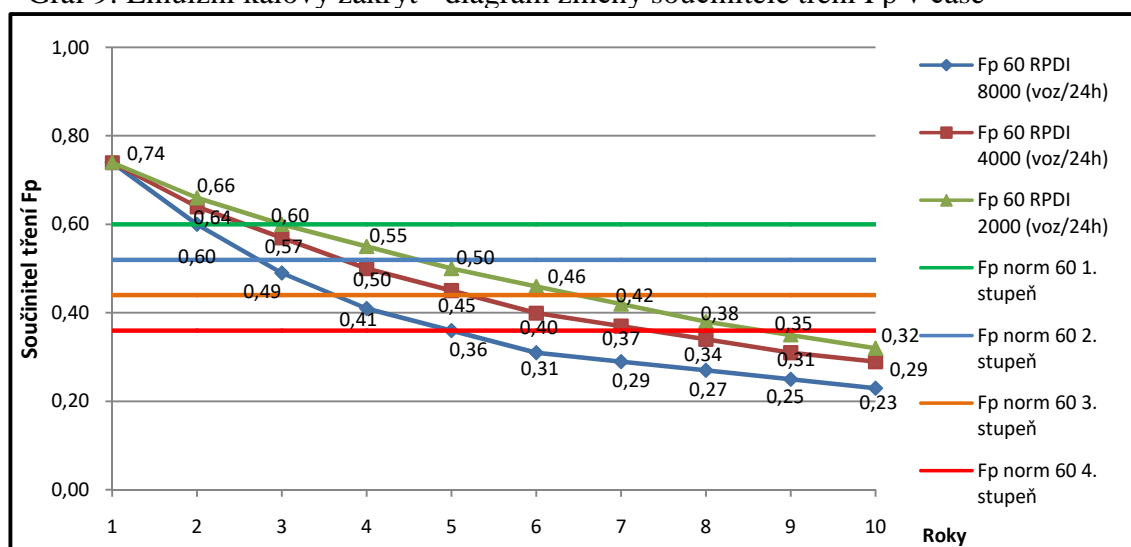
Tabulka 5: Předpokládaná doba životnosti emulzních kalových zákrytů

Typ EKZ	Druh pojiva	Předpokládaná doba životnosti v letech
Jednovrstvá úprava (JV)	silniční asfalt	2 - 3
	modifikovaný asfalt	3 - 4
Dvouvrstvá úprava (DV)	silniční asfalt	2 - 4
	modifikovaný asfalt	3 - 5

Zdroj: [39]

Graf 9 znázorňuje hodnocení povrchu EKZ na základě součinitele F_p měřeného při rychlosti 60 km/h. Vyhodnocení bylo vztaženo ke komunikacím s různým RPDI (ročním průměrem denních jízd). Z průběhu grafu je možné pozorovat snižování součinitele F_p zejména během prvních 3 až 5 let od pokládky. Zejména u komunikace s RPDI 8000 voz/24h dochází během pátého roku provozu ke snížení součinitele F_p pod normovaný klasifikační stupeň 4, což by mělo vést k provedení opatření pro zvýšení protismykových vlastností povrchu vozovky.

Graf 9: Emulzní kalový zákryt - diagram změny součinitele tření F_p v čase



Zdroj: [40]



4.4.2. Emulzní mikrokoberce (EMK)

Emulzní mikroberec je technologie, která se dá pokládat za vyšší a odolnější formu emulzního kalového zákrytu a je využívána na komunikacích s třídou dopravního zatížení TDZ I – IV a pro úseky se zvýšeným namáháním (oblasti křižovatek, odbočovacích a připojovacích pruhů apod.). Norma ČSN EN 73 6130 [38] popisuje EMK jako kalovou vrstvu, která je provedena při použití modifikované kationtaktivní asfaltové emulze a minimálně dvou frakcí kameniva (velikost zrna zpravidla $D \leq 11$ mm). Taktéž jsou EKM využívány k účelům údržby vozovek s větší výslednou životností než je tomu u EKZ. [38]

Využití mikrokoberců pro údržbu vozovek dle TKP 28 [37] :

- *s korozí povrchu*
- *se zvýšeným otěrem*
- *s plastickými deformacemi v příčném směru*
- *s jemnými nepravidelnými trhlinami*
- *se sníženými protismykovými vlastnostmi*
- *s vysokou hlučností*

Za studena pokládána asfaltová emulzní směs mikrokoberce je složena vždy z modifikované kationtaktivní asfaltové emulze třídy štěpitelnosti 4 – 6 a drobného a hrubého kameniva frakce 0/2, 0/4, 2/4, 2/5, 4/8, 8/11. Dle velikosti maximálního zrna D směsi EMK dělíme na hrubozrnný EKM_H do 11 mm, střednězrnný EMK_S do 8 mm a jemnozrnný EMK_J do 6 mm. Asfaltová emulze je vyráběna z polymerem modifikovaného asfaltového pojiva s minimálním obsahem 63 % hmotnosti emulze. [37] [41]

EMK je možné, stejně jako kalové zákryty, pokládat na všechny typy asfaltových vrstev s výjimkou drenážního koberce, cementobetonové kryty a na dlažby s třídou dopravního zatížení TDZ S, I – IV. Podklad musí být pevný, únosný, čistý a rovný. Rovinatost je opět měřena latí v podélném i příčném směru. Hodnoty nerovnosti v podélném směru nesmí překročit hranici 8 mm pro TDZ S, I-III a 10mm pro TDZ IV-VI. Totožné mezní hodnoty nerovností platí taktéž v příčném směru. Při naměření hodnot nerovností



blížících se 1 cm je žádoucí přikročit k pokládce dvouvrstvých emulzních mikrokoberců, kdy spodní vrstva vyrovná nerovnoměrnosti stávajícího povrchu a horní vrstva vytvoří požadovanou obrusnou vrstvu. Při větších nerovnostech je nutné nejprve provést reprofilaci nebo frézování. Dvouvrstvá úprava se využívá taktéž na komunikacích s vyšším dopravním zatížením. Pokládka probíhá stejně, jak je uvedeno v kapitole 4.3. Minimální obsah zbytkového asfaltu po vyštěpení emulze závisí na typu EMK (EMK 0/5 – 6,0 %; EMK 0/8 – 5,0 %; EMK 0/11 – 4,5 %). [37]

Tabulka 6: Předpokládaná doba životnosti emulzních mikrokoberců

Typ EKZ	Druh pojiva	Předpokládaná doba životnosti v letech*
Jednovrstvá úprava (JV)	modifikovaný asfalt	5 - 8
Dvouvrstvá úprava (DV)	modifikovaný asfalt	6 - 9

Zdroj: [39]

V České republice a na Slovensku jsou emulzní mikrokoberce známy pod obchodním označením jednotlivých stavebních firem, zabývajících se asfaltovými emulzemi. V popředí jsou zejména společnosti EUROVIA CS a.s. a BITUNOVA spol. s r.o. (člen koncernu STRABAG a.s.). EUROVIA CS vyvinula emulzní kalovou vrstvu pod názvem GRIPFIBRE®, což je emulzní mikrokoberec s kamenivem frakce 0/5 nebo 0/8 pokládaný v tloušťce cca 1 cm. V závislosti na frakci kameniva je navrhována čára zrnitosti jako spojitá nebo přetržená. Technologie GRIPFIBRE® se vyznačuje speciálním prvkem ve složení směsi, kdy jsou do směsi přidávána syntetická vlákna organického původu působící jako rozptýlená výztuž. Tato vlákna snižují riziko vypadávání zrn po otevření vozovky pro provoz, zaručují dobré dlouhodobé protismykové vlastnosti (vyhovující po dobu 7 let, doloženo měřením ve Francii a v ČR) a v neposlední řadě umožňují pokládat směsi s přetržitou čarou zrnitosti bez rizika segregace zrn. Dalším typem kalové vrstvy pocházejícím z laboratoří společnosti EUROVIA je mikrokryt GRIPSEAL®, prvně položený v létě 2017 na silnicích II/298 mezi obcemi Doly a Val, II/309 mezi Bačetínem a Kounovem a III/29851 v km 3,332 - 4,392 Domašín – Spáleníště. Tato obrusná úprava propojuje technologie



asfaltového nátěru (ochrana vozovky před pronikáním vody) a mikrokoberce GRIPFIBRE® (zkvalitnění protismykových vlastností), kdy je nejprve položena spodní vrstva tvořená emulzním nátěrem s drceným kamenivem frakce 4/8 nebo 8/11. Poté je kladena druhá vrstva z již představeného mikrokoberce GRIPFIBRE®. [42] [43]

Společnost BITUNOVA produkuje mikrokoberce od roku 1996 pod obchodním označením MULTIMAC®. Tato směs je tvořena modifikovanou kationtaktivní asfaltovou emulzí z vlastní produkce typu C 60 PB 5 s příměsí latexu. Je pokládána v tloušťce od 6 do 15 mm jako jednovrstvá nebo dvouvrstvá. Technologie MULTIMAC® byla s úspěchem realizována na několika úsecích slovenských dálnic D1 a D3. [44]

Obrázek 22: Pokládka mikrokoberce typu MULTIMAC®



Zdroj: [44]



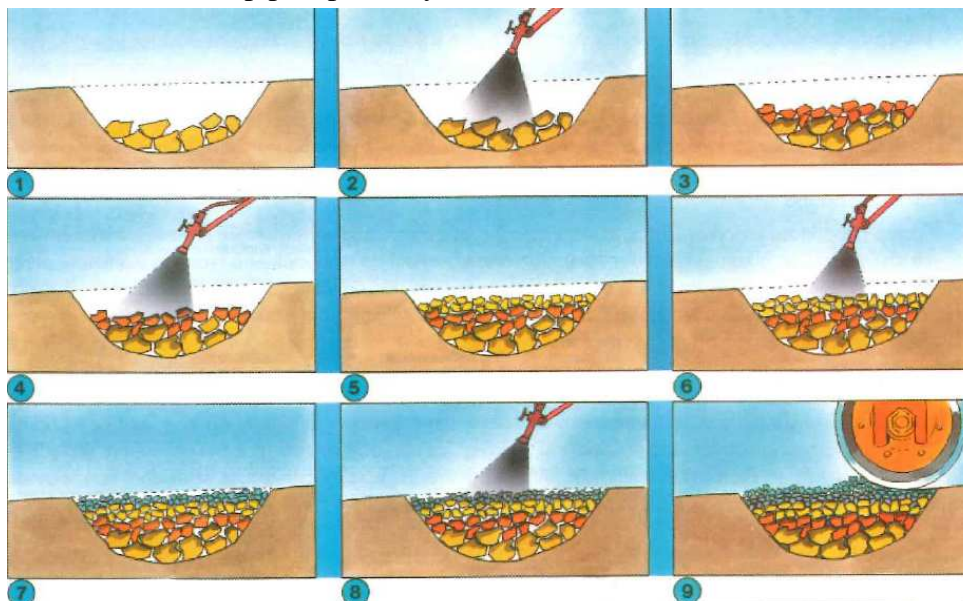
4.5. Postřikové technologie

Za postřikové technologie jsou v silničním stavitelství považovány asfaltové postřiky, nátěry a asfaltové membrány (SAMI – stress absorbing membrane), které mají několikero uplatnění. Kromě klasického využití k ochraně podkladních vrstev, zajištění spojení podkladních vrstev a zlepšení vlastností obrusných vrstev vozovek, jsou postřikové technologie využívány mimo jiné k pokládce prolévaných vrstev (penetrační makadam), opravě výtluků, reprofilaci (opravě) povrchu, zapečetění pláně, vyplnění mezer a trhlin a k zazeleňování svahů. [36]

Aplikace penetračního makadamu je založena na pokládce několika vrstev drceného kameniva. Přičemž kamenivo každé následující vrstvy musí být nižší frakce tak, aby mohlo dojít k zavibrování horní vrstvy do dolní. Jednotlivé vrstvy jsou prolévány daným množstvím asfaltové emulze. Tuto úpravu je možné použít na lehce zatížené dopravní komunikace, lesní a jiné účelové komunikace. Oprava výtluků a reprofilace vyjetých kolejí je prováděna na podobném principu, kdy se výtluk nejdříve důkladně vyčistí, nanese se asfaltová emulze a výtluk se začne vyplňovat kamenivem menší frakce než je frakce předešlá. Po aplikaci jednotlivých vrstev dochází vždy k zalití vrstvy minimálně do poloviny tloušťky asfaltovou emulzí. Poslední vrstva z nejjemnějšího kameniva je kladena s malým přebytkem a zaválcována nejlépe pneumatikovým válcem. Uplatnění emulzí při zapečetění pláně spočívá v pokrytí pláně asfaltovou emulzí z důvodu odkrytí pláně po delší dobu. Toto opatření nám zabezpečuje únosnost pláně během zimy, stálost pláně po dešti a schopnost odolávat staveništní přepravě. Pro správné zapečetění pláně je zapotřebí, aby emulze byla přikryta fólií z PVC a následně zatlačena válcem. [36]



Obrázek 23: Postup při opravě výtluku



Zdroj: [36]

Postřiky jsou normou ČSN EN 73 6129 – Stavba vozovek. Nátěry a postřiky. [45] definovány jako „úprava tvořená z vrstvy pojiva naneseného na povrch obrusné nebo jiné konstrukční vrstvy pomocí rozstřikovače pojiva“. Pro důkladné a rovnoměrné rozprostření pojiva musí být každý bod ošetřovaného povrchu postříkán minimálně ze dvou trysek rozstřikovače. Dávkování pojiva závisí na rychlosti rozstřikovače a tlaku v tryskách rámu. Správnost dávkování je v současnosti většinou kontrolována počítačem. Doba rozprostření postřiku musí být přizpůsobena době pokládky následující asfaltové vrstvy. Z technologického hlediska by neměla proběhnout pokládka asfaltové vrstvy dříve, než dojde k vyštěpení asfaltové emulze z postřiku. Doba mezi pokládkami by neměla být delší než jeden den. Postřiky se dělí na tři typy a každý slouží k lehce odlišnému účelu. Jsou jimi postřiky infiltrační, spojovací a regenerační. [36]



Obrázek 24: Rozprostírací rampa rozstříkovače



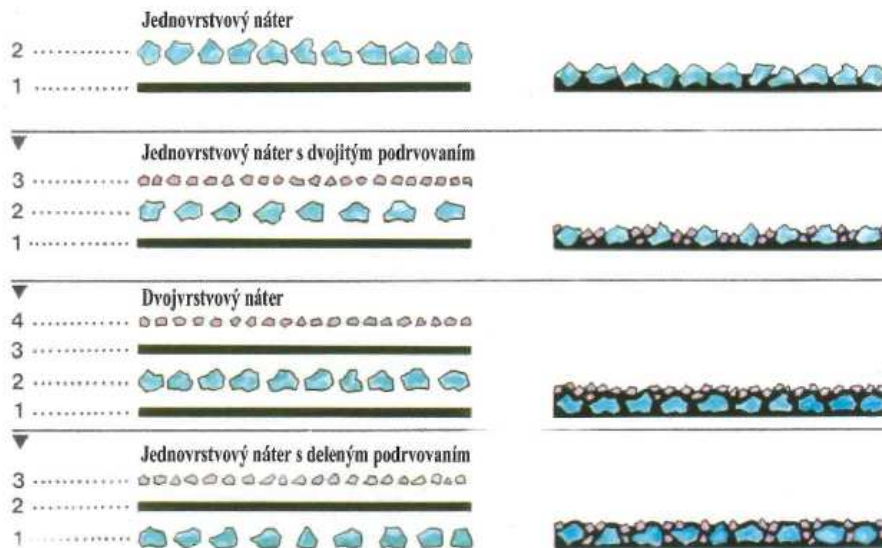
Zdroj: [36]

Postřík infiltrační, dávkovaný v množství zbytkového pojiva 0,8 až 2,5 kg/m², je využíván ke zlepšení vlastností nestmelené nebo cementem stmelené vrstvy před pokládkou vrchní asfaltové vrstvy. Zlepšení vlastností je založeno na proniknutí řídké asfaltové emulze do mezer struktury vrstvy do hloubky přibližně 1 až 4 cm. Infiltračním postříkem je docíleno zvýšení přilnavosti k následné asfaltové vrstvě. Postřík je možné taktéž využít k dočasné stabilizaci šterkové vrstvy. Spojovací postřík, dávkovaný v množství zbytkového pojiva 0,1 až 1,0 kg/m², je využíván ke spojení jednotlivých asfaltových vrstev pro vytvoření tenkého lepidelného filmu. Z hlediska správného přenášení svislých a vodorovných sil z krytových vrstev do podloží je zapotřebí, aby spojovací postřík důkladně spojil asfaltové vrstvy a dal vzniknout kompaktnímu asfaltovému celku. Regenerační postřík, dávkovaný v množství zbytkového pojiva 0,1 až 0,7 kg/m², je používán k zacelení rozrušené obrusné vrstvy tak, že na povrchu vytvoří tenkou vrstvu, která zamezí vnikání vody do podkladních vrstev a ztrátě asfaltového tmelu z obrusné vrstvy. Díky regeneračnímu postříku je možné zvýšit životnost vozovky. [36]



Nátěry jsou normou ČSN EN 73 6129 – Stavba vozovek. Nátěry a postřiky. [45] definovány jako „úpravy pro údržbu vozovek s cílem prodloužit jejich životnost, která se skládá nejméně z jedné vrstvy pojiva naneseného na povrch stávající vozovky a nejméně z jedné vrstvy drceného kameniva vhodné frakce“. Jedná se tedy o obrusnou úpravu komunikací, kdy dochází k rozproštění nátěru s následným kladením kameniva. Nátěry jsou využívány na vozovkách se ztrátou asfaltového tmelu, s jemnými nepravidelně se vyskytujícími trhlinami a se sníženými hodnotami protismykových vlastností. Rozlišujeme dva druhy; uzavírací nátěr, sloužící k uzavření otevřené struktury obrusné vrstvy a zdrsňovací nátěr, sloužící ke zlepšení protismykových vlastností obrusné vrstvy. Nátěry patří mezi rychlou, jednoduchou a relativně levnou technologii údržby vozovek. Problémem často bývá dodržování správného technologického postupu, lidský faktor zde má značný vliv na výslednou kvalitu provedené úpravy. Taktéž je nátěr velice náchylný na klimatické změny. Na obrázku 25 jsou uvedeny jednotlivé typy prováděných nátěrů. [3]

Obrázek 25: Typy prováděných nátěrů



Zdroj: [36]



Postup stavebních prací při pokládce jednovrstvého nátěru dle [36]:

- Úprava povrchu vozovky (oprava výtluku a trhlin)
- Očištění povrchu od uvolněného kameniva, prachu, hlíny a jiných nečistot
- Zhotovení postříku vhodným pojivem z asfaltové emulze
- Posyp kamenivem
 - Posyp je nutné provést bezprostředně po provedení postříku pojivem, dokud se asfaltová emulze nezačala štěpit
 - Maximální odstup podrcovače od rozstřikovače pojiva by měl být 50m
 - Podrcovač musí couvat ve směru pokládky kameniva tak, aby nepojížděl samotným postříkem upravený povrch
- Zatlačení kameniva válcem
 - Provádět vždy, když je to předepsáno v ZDS nebo ve smlouvě o dílo
 - Pneumatikové válce, rychlostí 6 – 10 km/h
 - Ocelové válce, jen v případě pogumovaných běhounů
- Ošetření hotového nátěru (odstranění nepřichyceného kameniva)
 - Omezení maximální povolené rychlosti během prvních 3 až 5 dní na 40 km/h
 - Časový odstup od pokládky 3 až 5 dní v závislosti na rychlosti konsolidace čerstvého nátěru
 - Maximálně přípustný technologický úlet činí 20 % celkového množství použitého kameniva

Tabulka 7: Označení nátěrových technologií

Technologie	Označení
Postřík	P
Postřík infiltrační	PI
Postřík spojovací	PS
Postřík regenerační	PR
Pružná membrána	SAM
Nátěr	N
Jednoduchý nátěr	JN
Jednoduchý nátěr s dvojitým podrcením	JND
Jednoduchý nátěr s předrcením	JNP
Dvojitý nátěr	DN
Dvojitý nátěr s obráceným podrtováním	DNI

Zdroj: [45]



5. Návrh asfaltových směsí

Praktická část této diplomové práce se bude zabývat návrhem a následným testováním tří asfaltových směsí, tj. směs pro ultratenké vrstvy z asfaltového betonu AUTL 8 a směsí asfaltového betonu pro velmi tenké vrstvy BBTM 8A a BBTM 5B. Tyto směsi se řadí do skupiny směsí pro tenké a ultratenké asfaltové obrusné vrstvy.

Návrh směsí BBTM bude vycházet z normy ČSN EN 13108-2 (736140) Asfaltové směsi - Specifikace pro materiály - Část 2: Asfaltový beton pro velmi tenké vrstvy [14], která obsahuje národní přílohu stanovující základní návrhové parametry. Pro návrh směsí typu AUTL byla v roce 2018 připravena a schválena norma ČSN EN 13108-9 (736140) Asfaltové směsi - Specifikace pro materiály - Část 9: Asfaltová směs pro ultratenké vrstvy z asfaltového betonu (AUTL). [11]

Vzhledem k faktu, že se jedná zatím jen o český překlad evropské normy EN 13108-9:2016 a v této normě jsou uvedeny jen obecné specifikace a neexistuje národní příloha (např. jako tomu je u normy k BBTM), nedá se tato norma využít ke zjištění základních návrhových parametrů asfaltové směsí (požadavky na kamenivo do obrusných vrstev, předepsané obory zrnitosti kameniva, typ a minimální obsah pojiva, meze pro mezerovitost). Pro návrh parametrů směsi AUTL 8 se proto bude vycházet zejména ze zahraničních zkušeností ve Francii a v Dánsku a po dohodě s vedoucím práce budou nastaveny meze parametrů na základě předpokladů, které jsou od návrhu směsi očekávány.



5.1. Vstupní materiály k návrhu asfaltové směsi

5.1.1. Pojivo

Vzhledem k tomu, že se jedná o návrh směsi pro tenké a ultratenké obrusné vrstvy, bylo vybráno polymerem modifikované asfaltové pojivo (PMB). Pro prvotní návrhy směsi bylo využito pojivo PMB 45/100-65 a pro optimalizace a následné zkoušky bylo použito pojivo PMB 45/80-65.

Na obou asfaltových pojivech byla provedena zkouška stanovení penetrace jehlou dle normy ČSN EN 1426 (65 7062) [46] a zkouška stanovení bodu měknutí metodou kroužek kulička dle normy ČSN EN 1427 (65 7060) [47].

Obrázek 26: Přístroj pro zkoušku kroužek a kulička



Zdroj: [Vlastní fotodokumentace]

Obrázek 27: Penetrometr



Zdroj: [Vlastní fotodokumentace]

Výsledné hodnoty penetrace v 0,1 mm:

PMB 45/100-65

- a) 58,2
- b) 59,1
- c) 60,6
- d) 60,2

PMB 45/80-65

- a) 61,3
- b) 61,7
- c) 62,8
- d) 62,6

Výsledná hodnota penetrace se určila jako aritmetický průměr předešlých hodnot:

Penetrace = 59,5 = 5,95 mm

Penetrace = 62,1 = 6,21 mm



Na základě penetrace v rozpětí 50 až 149 byl stanoven dle Tabulky 2 v ČSN EN 1426 (65 7062) [46] maximální rozdíl platných stanovení na 4. Tato podmínka byla při obou zkoušek splněna.

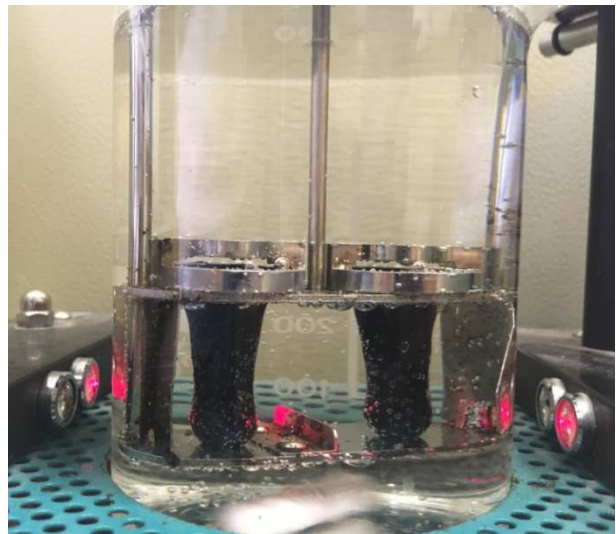
Pro stanovení bodu měknutí bylo připraveno potřebné množství asfaltového pojiva, 4 mosazné kroužky, 4 ocelové kuličky, dvě kádinky s destilovanou vodou zchlazenou na 5 °C a dva držáky kroužků (viz obr. 28). Celá zkušební soustava byla vložena do přístroje pro stanovení bodu měknutí (viz obr. 26). Voda byla zahřívána se stálou změnou teploty. Během zahřívání byla pozorována změna viskozity pojiva a byla sledována teplota, během níž ocelová kulička ležící na vrstvě asfaltu tloušťky 6,4 mm pronikne vrstvou asfaltu a protáhne ji do hloubky 2,5 cm pod spodní okraj prstenu (viz obr. 29).

Obrázek 29: Sestava „Kroužek kulička“



Zdroj: [Vlastní fotodokumentace]

Obrázek 28: Bod měknutí



Zdroj: [Vlastní fotodokumentace]

Stanovené teploty bodu měknutí v °C:

PMB 45/100-65

a) 69,2

b) 69,1

PMB 45/80-65

a) 77,1

b) 76,9

Výsledná hodnota bodu měknutí se určila jako aritmetický průměr předešlých hodnot:

Bod měknutí = 69,1 °C

Bod měknutí = 77,0 °C



5.1.2. Kamenivo

Pro návrh směsí bylo využito kamenivo z lomu Zbraslav, Sýkořice a Lašovice. Filer neboli vápenná moučka byl získán z lomu Velké Hydčice. Vybrané kamenivo podléhá požadavkům normy ČSN EN 13043 (721501) - Kamenivo pro asfaltové směsi a povrchové vrstvy pozemních komunikací, letištních a jiných dopravních ploch.

Pro každou frakci kameniva byla vytvořena čára zrnitosti získaná ze síťového rozboru provedeného dle ČSN EN 933-1 (72 1193) [48]. V souladu s výše uvedenou normou byly naváženy navážky kameniva pro rozbor. Pro kamenivo zrnitosti větší než 4 mm bylo naváženo min. 600 g a pro kamenivo zrnitosti menší než 4 mm bylo naváženo min. 200 g. Kamenivo bylo nejdříve podrobena praní, kdy byly odstraněny jemné částice kameniva menší než 0,063 mm. Zkouška byla prováděna s kontrolním sítím 0,5 mm. Poté došlo k vysušení kameniva v sušárně s teplotou 105 °C. Délka sušení byl odvislá od typu kameniva a rychlosti jeho vysušení. Po vysušení byl proveden klasický síťový rozbor. Každá navážka byla podrobena po dobu 30 minut prosévání sadou kontrolních sítí o velikosti zrn 8; 5,6; 4;2; 1; 0,5; 0,25; 0,0125 a 0,063 mm.

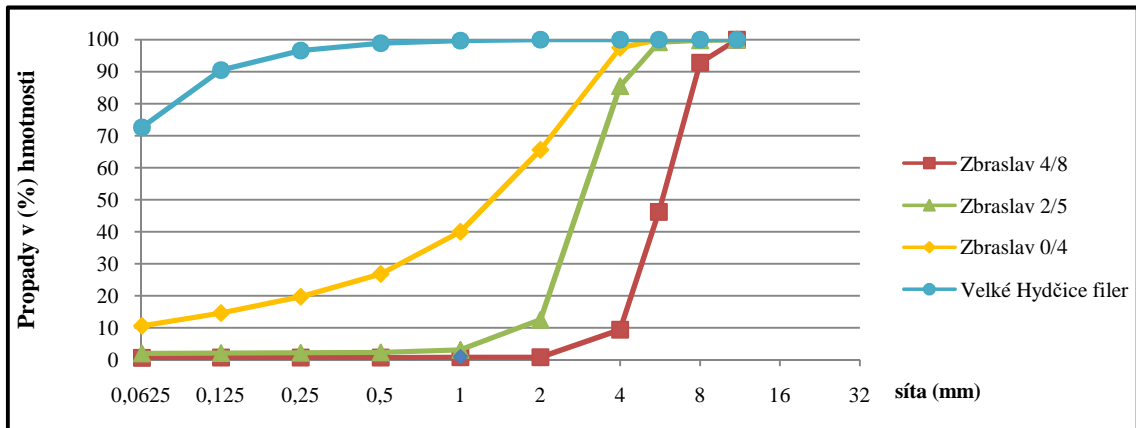
Tabulka 8: Síťový rozbor kameniva pro návrh směsí BBTM*

Frakce/síto mm	Propady na sítích daných frakcí kameniva (%)			
	Zbraslav 4/8	Zbraslav 2/5	Zbraslav 0/4	Velké Hydčice Filer
11	100	100	100	100
8	93	100	100	100
5,6	46	99	100	100
4	9	85	97	100
2	1	12	66	100
1	1	3	40	100
0,5	1	2	27	99
0,25	1	2	20	97
0,125	1	2	15	90
0,063	0,6	2,0	10,6	72,6
dno	0,1	0,0	0,1	0,2
zrn <0,063 (%):	0,56	1,95	10,45	72,41

* kamenivo pro prvotní návrh směsí BBTM 8A a 5B s označením 1. , 2. , 3. , 4. , 5. , 6.



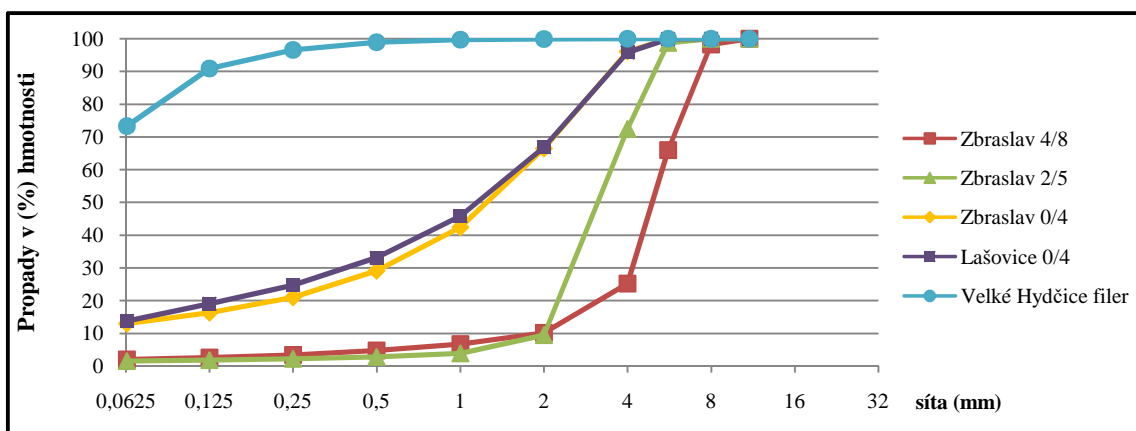
Graf 10: Čára zrnitosti kameniva pro návrh BBTM*



Tabulka 9: Sít'ový rozbor kameniva pro návrh směsí BBTM

Frakce/síto mm	Propady na sítích daných frakcí kameniva (%)				
	Zbraslav 4/8	Zbraslav 2/5	Zbraslav 0/4	Lašovice 0/4	Velké Hydčice filer
11	100	100	100	100	100
8	98	100	100	100	100
5,6	66	99	100	100	100
4	25	72	96	96	100
2	10	9	66	67	100
1	7	4	42	46	100
0,5	5	3	29	33	99
0,25	3	2	21	25	97
0,125	3	2	16	19	91
0,063	2,1	1,5	13,0	14	73,3
dno	0,0	0,1	0,0	0	0,0
zrn <0,063 (%):	2,06	1,44	13,02	13,69	73,28

Graf 11: Čára zrnitosti kameniva pro návrh BBTM

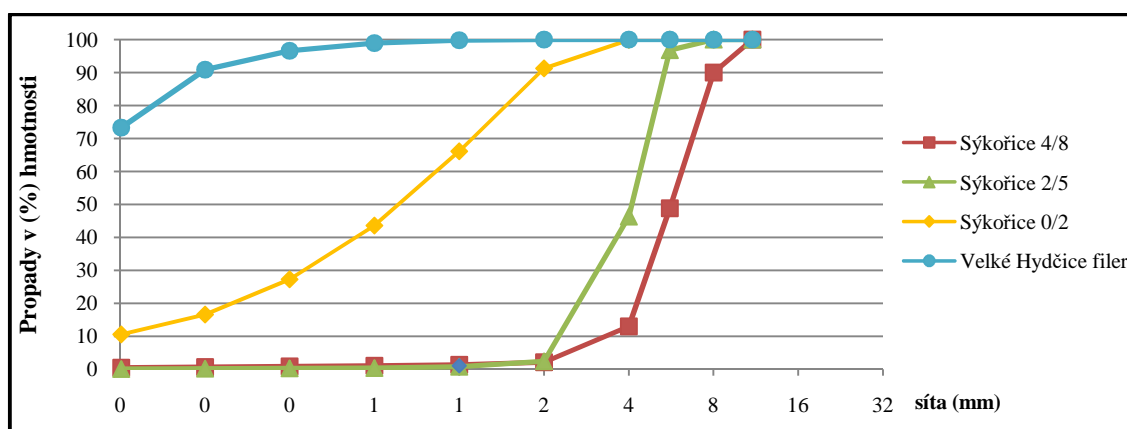




Tabulka 10: Sít'ový rozbor kameniva pro návrh směsi AUTL

Frakce/síto mm	Propady na sítích daných frakcí kameniva (%)			
	Sýkořice 4/8	Sýkořice 2/5	Sýkořice 0/2	Velké Hydčice filer
11	100	100	100	100
8	90	100	100	100
5,6	49	97	100	100
4	13	46	100	100
2	2	2	91	100
1	1	1	66	100
0,5	1	0	44	99
0,25	1	0	27	97
0,125	1	0	17	91
0,063	0,5	0,1	10,6	73,3
dno	0,0	0,0	0,1	0,0
zrn <0,063 (%):	0,48	0,06	10,46	73,28

Graf 12: Čára zrnitosti kameniva pro návrh směsi AUTL



5.1.3. Organická vlákna

Součástí návrhu každé směsi byla celulózová vlákna společnosti CIUR v podobě granulátu s označením S-CEL 7G. Dávkování bylo nastaveno na 0,3 % hm. směsi. Tato přísada funguje jako nosič pojiva, snižuje stékavost asfaltu z kameniva a umožňuje bezpečné zvýšení obsahu asfaltu v asfaltových směsích.



5.2. Postup prací

- a) Na základě zrnitostních rozborů jednotlivých frakcí uvedených v kapitole 5.1.2 navržení křivky zrnitosti asfaltové směsi dle mezí uvedených v příslušných normách a návrh množství asfaltového pojiva v % hm. směsi.
- b) Výroba asfaltové směsi dle normy ČSN EN 12697-35 (736160) Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 35: Laboratorní výroba směsi [49].
- c) Výroba Marshallových těles dle normy ČSN EN 12697-30 (736160) Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem [50].
 - Hutnicí energie: 2x50 úderů
- d) Stanovení rozměrů asfaltových zkušebních těles dle normy ČSN EN 12697-29 (736160) Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 29: Stanovení rozměrů asfaltových zkušebních těles [51].
- e) Výpočet maximální objemové hmotnosti dle normy ČSN EN 12697-5 (736160) Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti [52].
 - Pro stanovení maximální objemové hmotnosti byl vybrán z [52] Postup A: Volumetrický postup.

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

ρ_{mv} = maximální objemová hmotnost v kg/m^3

m_1 = hmotnost pyknometru, nástavce a pružiny v g

m_2 = hmotnost pyknometru, nástavce, pružiny a zkušební vzorku v g

m_3 = hmotnost pyknometru, nástavce, pružiny, zkušební vzorku a vody v g

ρ_w = hustota vody při zkušební teplotě stanovená s přesností na $0,1 \text{ kg/m}^3$

V_p = objem pyknometru v cm^3



f) Výpočet objemové hmotnosti dle normy ČSN EN 12697-6 (736160) Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušební tělesa [53].

- Pro stanovení objemové hmotnosti při návrhu a optimalizaci asfaltových směsí byl vybrán z [53] Postup B: Objemová hmotnost – nasycený suchý povrch (SSD).

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

ρ_{bssd} = objemová hmotnost zkušební tělesa v kg/m^3

m_1 = hmotnost suchého zkušební tělesa v g

m_2 = hmotnost zkušební tělesa ve vodě v g

m_3 = hmotnost zkušební tělesa nasyceného vodou a povrchově osušeného v g

ρ_w = hustota vody při zkušební teplotě stanovená s přesností na $0,1 \text{ kg/m}^3$

- Následně vzhledem k vyšší mezerovitosti optimalizované asfaltové směsi AUTL 8 byl pro stanovení přesnější objemové hmotnosti vybrán z [53] Postup C: Objemová hmotnost – utěsněné zkušební těleso.

$$\rho_{\text{bsea}} = \frac{m_1}{(m_2 - m_3) \cdot \rho_w - (m_2 - m_1) \cdot \rho_{\text{sm}}}$$

ρ_{bssd} = objemová hmotnost zkušební tělesa v Mg/m^3

m_1 = hmotnost suchého zkušební tělesa v g

m_2 = hmotnost suchého utěsněného zkušební tělesa v g

m_3 = hmotnost utěsněného zkušební tělesa ve vodě v g

ρ_w = hustota vody při zkušební teplotě stanovená s přesností na $0,1 \text{ kg/m}^3$

ρ_{sm} = hustota těsnícího materiálu při zkušební teplotě v Mg/m^3



- Při zkoušce ITSR (zkouška odolnosti asfaltové směsi vůči negativním účinkům vody) byl pro stanovení objemové hmotnosti vybrán z [53] Postup D: Objemová hmotnost podle rozměrů.

$$\rho_{b,dim} = \frac{m_1}{\pi/4 \times h \times d^2} \times 10^6$$

$\rho_{b,dim}$ = objemová hmotnost zkušebního tělesa podle rozměrů v kg/m^3

m_1 = hmotnost suchého zkušebního tělesa v g

h = výška zkušebního tělesa v mm

d = průměr zkušebního tělesa v mm

- g) Výpočet mezerovitosti asfaltové směsi dle normy ČSN EN 12697-8 (736160) Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 8: Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí [54].

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \times 100$$

V_m = mezerovitost s přesností na 0,1 % v %

ρ_m = maximální objemová hmotnost v kg/m^3

ρ_b = objemová hmotnost zkušebního tělesa v kg/m^3

- h) V případě nevyhovujících výsledků mezerovitosti asfaltové směsi návrat k bodu a). Vytvoření optimalizovaného návrhu asfaltové směsi.



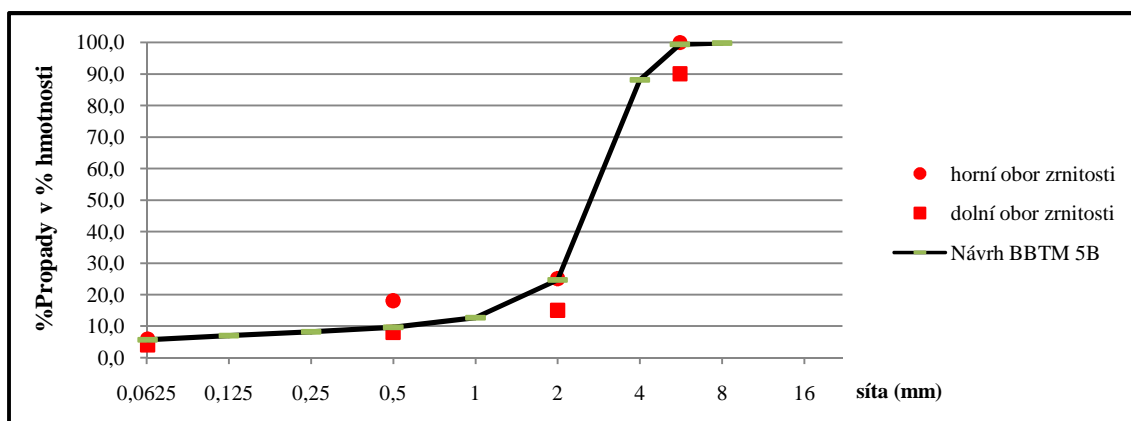
5.3. Návrh směsi BBTM 5B

Návrh směsi BBTM 5B vycházel z normy ČSN EN 13108-2 (736140) [14]. Směs byla tvořena kamenivem frakce 2/5 a 0/4 z lomu Zbraslav, filerem z Velkých Hydčic (viz kapitola 5.1.2 Tabulka 8) a asfaltovým pojivem PMB 45/100-65 v množství 5,2; 5,7 a 6,2 % hm. směsi. Toto množství pojiva bylo záměrně stanoveno na základě příslušné normy, která udává min. množství pojiva 5,2 %. Meze mezerovitosti byly nastaveny na základě normy v rozmezí 11 až 15 %. Vzhledem k větší očekávané mezerovitosti směsi byla navržena přerušená křivka zrnitosti (Graf 13).

Tabulka 11: Návrh směsi BBTM 5B

Zbytky na sítích	%	8	5,6	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
Filer		0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,8	2,3	6,0	17,9
Zbraslav 0/4		0,0	0,0	2,5	32,0	25,5	13,2	7,1	5,1	4,0
Zbraslav 2/5		0,3	0,5	13,7	72,9	9,4	0,8	0,2	0,1	0,2
Návrh směsi	%									
Filer	3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,5
Zbraslav 0/4	18	0,0	0,0	0,5	5,8	4,6	2,4	1,3	0,9	0,7
Zbraslav 2/5	79	0,2	0,4	10,8	57,6	7,4	0,6	0,1	0,1	0,1
Součtová čára zbytků	100	0,2	0,4	11,3	63,4	12,0	3,0	1,5	1,2	1,4
horní obor zrnitosti			100,0		25,0		18,0			6,0
součtová čára propadů		99,8	99,3	88,0	24,7	12,7	9,6	8,2	7,0	5,6
dolní obor zrnitosti					15,0		8,0			4,0

Graf 13: Křivka zrnitosti BBTM 5B





Tabulka 12: Stanovení mezerovitosti BBTM 5B

BBTM 5B												
Vzorky	1.1.	1.2.	1.3.	1.4.	2.1.	2.2.	2.3.	2.4.	3.1.	3.2.	3.3.	3.4.
Obsah pojiva	5,2 %				5,7 %				6,2 %			
Marshallova tělesa												
Průměrný průměr vzorku (mm)	101,7	101,7	102,0	102,2	103,3	102,0	102,1	102,0	101,6	102,4	101,9	103,2
Průměrná výška vzorku (mm)	63,5	64,7	65,9	61,2	61,3	65,7	63,1	65,9	62,3	63,4	62,2	63,2
m ₁ (g)	996,2	1006,0	1057,1	998,8	974,4	1022,1	981,0	1014,6	969,8	991,5	965,8	991,0
m ₂ (g)	558,9	571,9	598,0	522,5	543,4	571,5	549,0	562,3	534,8	546,2	537,7	546,5
m ₃ (g)	1046,4	1060,7	1114,4	1011,1	1024,8	1070,9	1029,6	1066,0	1013,2	1042,2	1012,6	1041,2
teplota vody (°C)	17,0											
hustota vody (kg/m ³)	998,8											
Objemová hmotnost ρ _{bsd} (kg/m ³)	2041,0	2055,6	2044,5	2041,7	2021,6	2044,1	2038,7	2011,8	2024,7	1996,5	2031,2	2000,8
	2045,7				2029,1				2013,3			
Pyknometrická zkouška												
m ₁ (g)	702,3				700,1				699,6			
m ₂ (g)	1367,7				1232,0				1318,0			
m ₃ (g)	2408,7				2327,1				2367,6			
Objem pyknometru (cm ³)	1,311				1,314				1,306			
teplota vody (°C)	24,5											
hustota vody (kg/m ³)	997,2											
Max. objemová hmotnost ρ _{mv} (kg/m ³)	2489,8				2468,6				2442,1			
Mezerovitost												
Mezerovitost V _m (%)	17,84				17,81				17,56			
Min. mezerovitost V _{min} (%)	11											
Max. mezerovitost V _{max} (%)	15											
	Nevyhovuje				Nevyhovuje				Nevyhovuje			

Vzhledem k tomu, že výsledné mezerovitosti asfaltových směsí nedosahovaly potřebných hodnot, bylo zapotřebí optimalizovat návrh směsi BBTM 5B. Kromě kameniva z lomu Zbraslav bylo využito kamenivo z lomu Lašovice frakce 0/4 (viz kapitola 5.1.2 Tabulka 9), které mělo doplnit Zbraslav 0/4 a lépe uzavřít mezery navrhované asfaltové směsi. Množství asfaltového pojiva bylo stanoveno na 6,2 % hm. směsi.



5.3.1. Optimalizace A (+ Lašovice 0/4)

Tabulka 13: Návrh směsi BBTM 5B - optimalizace A

Návrh směsi	%	8	5,6	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
Filer	3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,5
Lašovice 0/4	10	0,0	0,0	0,4	2,9	2,1	1,3	0,8	0,6	0,5
Zbraslav 0/4	10	0,0	0,0	0,4	3,0	2,4	1,3	0,8	0,5	0,3
Zbraslav 2/5	77	0,0	0,9	20,3	48,5	4,3	0,9	0,4	0,3	0,3
Součtová čára zbytků	100	0,0	0,9	21,1	54,4	8,8	3,5	2,1	1,5	1,7
horní obor zrnitosti			100,0		25,0		18,0			6,0
součtová čára propadů		100,0	99,1	78,0	23,6	14,8	11,3	9,2	7,7	6,0
dolní obor zrnitosti			90,0		15,0		8,0			4,0

Tabulka 14: Stanovení mezerovitosti BBTM 5B - optimalizace A

BBTM 5B (A)				
Vzorky	A.1.	A.2.	A.3.	A.4.
Obsah pojiva	6,2 %			
Marshallova tělesa				
Průměrný průměr vzorku (mm)	103,2	102,4	101,7	101,9
Průměrná výška vzorku (mm)	62,1	62,4	62,7	62,6
m ₁ (g)	996,8	996,8	994,8	995,9
m ₂ (g)	557,9	555,7	559,6	556,8
m ₃ (g)	1036,8	1036,7	1034,4	1035,4
teplota vody (°C)	18,3			
hustota vody (kg/m ³)	998,5			
Objemová hmotnost ρ _{ssd} (kg/m ³)	2078,4	2069,3	2092,1	2077,8
	2079,4			
Pyknometrická zkouška				
m ₁ (g)	699,8			
m ₂ (g)	1441,2			
m ₃ (g)	2449,7			
Objem pyknometru (cm ³)	1,315			
teplota vody (°C)	24,5			
hustota vody (kg/m ³)	997,2			
Max. objemová hmotnost ρ _{mv} (kg/m ³)	2437,7			
Mezerovitost				
Mezerovitost V _m (%)	14,70			
Min. mezerovitost V _{min} (%)	11,0			
Max. mezerovitost V _{max} (%)	15,0			
	Vyhovuje			



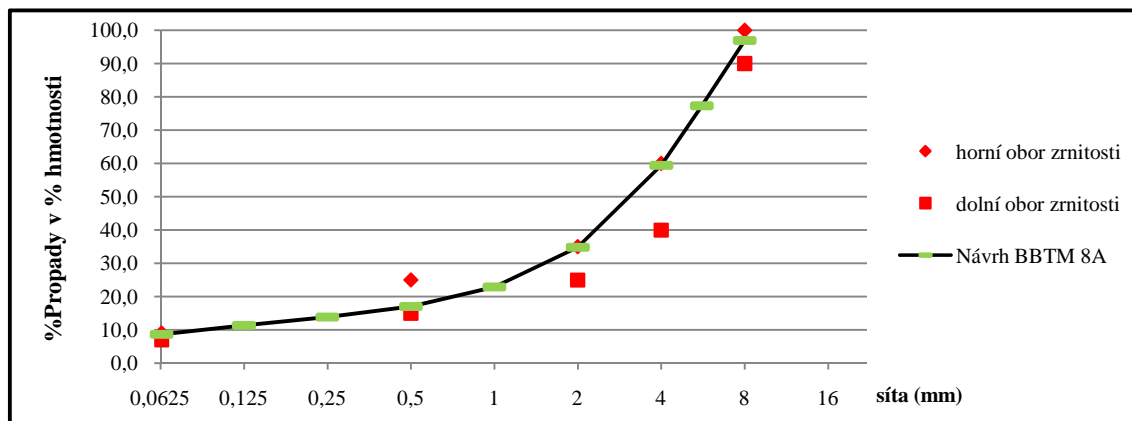
5.4. Návrh směsi BBTM 8A

Předpokladem návrhu BBTM 8A bylo vytvoření uzavřené asfaltové směsi s mezerovitostí v rozmezí 3 až 6 %. Návrh vycházel z parametrů stanovených v normě ČSN EN 13108-2 (736140) [14]. K návrhu směsi posloužilo opět kamenivo z lomu Zbraslav frakce 4/8, 2/5 a 0/4 a filer z Velkých Hydčic. Minimální množství asfaltového pojiva PMB 45/100-65 bylo stanoveno dle normy na 5,4 % hm. směsi.

Tabulka 15: Návrh směsi BBTM 8A

Zbytky na sítích	%	8	5,6	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
Filer		0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,8	2,3	6,0	17,9
Zbraslav 0/4		0,0	0,0	2,5	32,0	25,5	13,2	7,1	5,1	4,0
Zbraslav 2/5		0,3	0,5	13,7	72,9	9,4	0,8	0,2	0,1	0,2
Zbraslav 4/8		7,3	46,6	36,7	8,6	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1
Návrh směsi										
Filer	5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	0,9
Zbraslav 0/4	43	0,0	0,0	1,1	13,7	11,0	5,7	3,0	2,2	1,7
Zbraslav 2/5	10	0,0	0,1	1,4	7,3	0,9	0,1	0,0	0,0	0,0
Zbraslav 4/8	42	3,1	19,6	15,4	3,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Součtová čára zbytků	100	3,1	19,6	17,9	24,7	11,9	5,8	3,2	2,5	2,7
horní obor zrnitosti		100,0		60,0	35,0		25,0			9,0
součtová čára propadů		96,9	77,3	59,4	34,8	22,8	17,0	13,8	11,3	8,6
dolní obor zrnitosti		90,0		40,0	25,0		15,0			7,0

Graf 14: Křivka zrnitosti BBTM 8A





Tabulka 16: Stanovení mezerovitosti BBTM 8A

BBTM 8A												
Vzorky	4.1.	4.2.	4.3.	4.4.	5.1.	5.2.	5.3.	5.4.	6.1.	6.2.	6.3.	6.4.
Obsah pojiva	5,4 %				5,7 %				6,0 %			
Marshallova tělesa												
Průměrný průměr vzorku (mm)	101,8	101,8	102,1	101,6	101,8	101,9	101,7	101,9	101,8	102,0	102,1	101,9
Průměrná výška vzorku (mm)	65,9	66,0	64,6	64,3	62,1	65,4	65,6	64,2	63,7	65,0	64,9	66,0
m ₁ (g)	1119,5	1114,4	1103,5	1090,4	1061,6	1122,7	1113,8	1084,7	1104,8	1113,2	1110,8	1119,5
m ₂ (g)	633,0	630,0	624,4	617,4	601,2	637,9	628,7	612,5	624,9	626,5	623,4	631,2
m ₃ (g)	1149,1	1145,3	1134,3	1119,6	1085,1	1154,2	1143,7	1113,4	1130,0	1137,1	1132,4	1147,7
teplota vody (°C)	17,0											
hustota vody (kg/m ³)	998,8											
Objemová hmotnost ρ _{bssd} (kg/m ³)	2166,5	2160,0	2161,5	2168,6	2191,1	2171,8	2160,1	2162,8	2184,6	2177,5	2179,6	2164,8
	2164,1				2171,5				2176,6			
Pyknometrická zkouška												
m ₁ (g)	706,0				699,6				696,5			
m ₂ (g)	1339,2				1452,8				1405,6			
m ₃ (g)	2424,3				2466,8				2429,5			
Objem pyknometru (cm ³)	1,307				1,321				1,317			
teplota vody (°C)	24,5											
hustota vody (kg/m ³)	997,2											
Max. objemová hmotnost ρ _{mv} (kg/m ³)	2483,2				2479,0				2446,2			
Mezerovitost												
Mezerovitost V _m (%)	12,85				12,40				11,02			
Min. mezerovitost V _{min} (%)	3											
Max. mezerovitost V _{max} (%)	6											
	Nevyhovuje				Nevyhovuje				Nevyhovuje			

Prvotní návrh směsi BBTM 8A zdaleka nevyhověl stanoveným mezím mezerovitosti. Z tohoto důvodu byla směs BBTM 8A optimalizována, a to úpravou návrhu křivky zrnitosti pomocí kameniva z lomu Lašovice frakce 0/4. Byly navrženy dvě nové směsi se společným množstvím pojiva PMB 45/80-65 6,2 % hm. směsi. Takto stanovené množství odpovídalo návrhu asfaltového pojiva u směsi BBTM 5B. První optimalizovaný návrh B počítal s rozdělením frakce 0/4 mezi Zbraslav 0/4 (19 %) a Lašovice 0/4 (20 %). Druhý optimalizovaný návrh C počítal s vyjmutím frakce 2/5. Předpokladem těchto změn bylo uzavření asfaltové směsi větším množstvím jemnozrnných zrn do 4 mm.



5.4.1. Optimalizace B a C (+ Lašovice 0/4, bez Zbraslav 2/5)

Tabulka 17: Návrh směsi BBTM 8A - optimalizace B

Návrh směsi	%	8	5,6	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
Filer	3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,5
Lašovice 0/4	20	0,0	0,0	0,8	5,8	4,2	2,5	1,7	1,1	1,1
Zbraslav 0/4	19	0,0	0,0	0,7	5,6	4,6	2,5	1,6	0,9	0,6
Zbraslav 2/5	8	0,0	0,1	2,1	5,0	0,4	0,1	0,0	0,0	0,0
Zbraslav 4/8	50	0,9	16,1	20,3	7,6	1,7	1,0	0,7	0,4	0,3
Součtová čára zbytků	100	0,9	16,3	24,0	24,0	10,9	6,2	4,0	2,6	2,5
horní obor zrnitosti		100,0		60,0	35,0		25,0			9,0
součtová čára propadů		99,1	82,8	58,9	34,8	23,9	17,7	13,7	11,1	8,6
dolní obor zrnitosti		90,0		40,0	25,0		15,0			7,0

Tabulka 18: Návrh směsi BBTM 8A - optimalizace C

Návrh směsi	%	8	5,6	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
Filer	3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,5
Lašovice 0/4	23	0,0	0,0	0,9	6,7	4,8	2,9	1,9	1,3	1,2
Zbraslav 0/4	16	0,0	0,0	0,6	4,8	3,8	2,1	1,3	0,7	0,5
Zbraslav 4/8	58	1,0	18,7	23,6	8,8	2,0	1,2	0,8	0,5	0,3
Součtová čára zbytků	100	1,0	18,8	25,1	20,2	10,6	6,2	4,1	2,7	2,6
horní obor zrnitosti		100,0		60,0	35,0		25,0			9,0
součtová čára propadů		99,0	80,2	55,1	34,9	24,3	18,0	13,9	11,2	8,7
dolní obor zrnitosti		90,0		40,0	25,0		15,0			7,0

Tabulka 19: Stanovení mezerovitosti BBTM 8A - optimalizace B a C

BBTM 8A (B,C)									
Vzorky	B.1.	B.2.	B.3.	B.4.	C.1.	C.2.	C.3.	C.4.	
Obsah pojiva	6,2 %				6,2 %				
Marshallova tělesa									
Průměrný průměr vzorku (mm)	101,77	101,82	101,92	101,79	101,75	101,95	102,29	101,85	
Průměrná výška vzorku (mm)	62,05	61,98	61,08	61,85	60,93	61,5	61,51	61,97	
m1 (g)	1097,6	1094,2	1095,3	1097,7	1094,5	1095,9	1097	1097,3	
m2 (g)	616,3	614,3	617,6	616,5	616,7	619,4	617,8	617,8	
m3 (g)	1105,8	1103,4	1101,3	1108,1	1100,8	1103,3	1101,4	1102,6	
teplota vody (°C)	18,6				18,3				
hustota vody (kg/m ³)	998,5				998,5				
Objemová hmotnost pbsd (kg/m ³)	2238,9	2233,8	2261,0	2229,5	2257,6	2261,4	2265,1	2260,1	
	2240,79				2261,05				
Pyknometrická zkouška									
m1 (g)	696,5				697,8				
m2 (g)	1543,0				1582,7				
m3 (g)	2509,2				2532,2				
Objem pykometru (cm ³)	1,31661				1,31412				
teplota vody (°C)	23,7				23,7				
hustota vody (kg/m ³)	997,4				997,4				
Max. objemová hmotnost ρmv (kg/m ³)	2432,93				2443,22				
Mezerovitost									
Mezerovitost Vm (%)	7,90				7,46				
Min. mezerovitost Vmin (%)					3				
Max. mezerovitost Vmax (%)					6				
	Nevyhovuje				Nevyhovuje				



Optimalizací návrhu BBTM 8A nedošlo k požadovanému snížení mezerovitosti asfaltové směsi, tudíž byla provedena třetí optimalizace. Návrh se skládal jen z kameniva Zbraslav 4/8, Lašovice 0/4 a fileru. Množství asfaltového pojiva zůstalo na hodnotě 6,2 % hm. směsi.

5.4.2. Optimalizace D

Tabulka 20: Návrh směsi BBTM 8A - optimalizace D

Zbytky na sítích	%	8	5,6	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
Filer	3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,5
Lašovice 0/4	39	0,0	0,0	1,6	11,3	8,2	5,0	3,3	2,2	2,1
Zbraslav 4/8	58	1,0	18,7	23,6	8,8	2,0	1,2	0,8	0,5	0,3
Součtová čára zbytků	100	1,0	18,8	25,2	20,1	10,1	6,2	4,1	2,9	2,9
horní obor zrnitosti		100,0		60,0	35,0		25,0			9,0
součtová čára propadů		99,0	80,2	55,0	35,0	24,8	18,7	14,5	11,6	8,8
dolní obor zrnitosti		90,0		40,0	25,0		15,0			7,0

Tabulka 21: Stanovení mezerovitosti BBTM 8A - optimalizace D

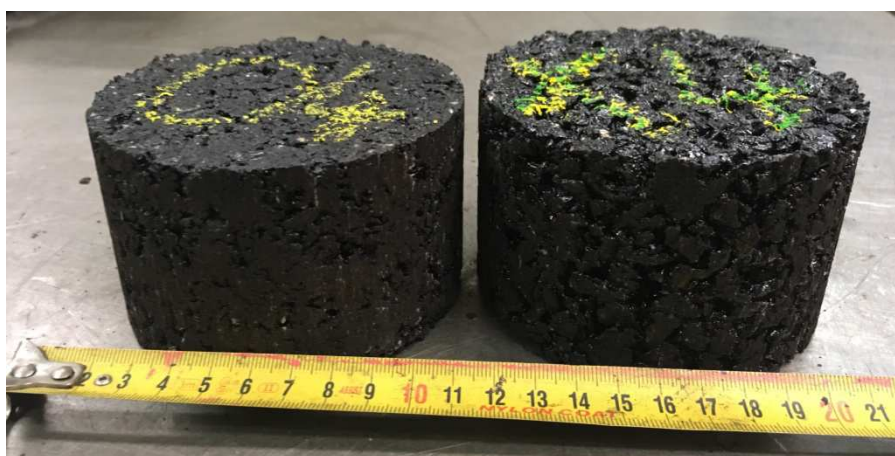
BBTM 8A (D)						
Vzorky	D.1.	D.2.	D.3.	D.4.	D.5.	D.6.
Obsah pojiva	6,2 %					
Marshallova tělesa						
Průměrný průměr vzorku (mm)	103,3	102,5	102,2	101,9	101,7	103,2
Průměrná výška vzorku (mm)	57,2	57,9	57,9	59,0	58,4	56,1
m ₁ (g)	1096,3	1096,7	1096,6	1096,9	1099,7	1096,2
m ₂ (g)	635,2	637,6	634,6	636	637,3	640,3
m ₃ (g)	1098,7	1099,6	1101,1	1101,5	1099,8	1104,6
teplota vody (°C)	20,5					
hustota vody (kg/m ³)	998,1					
Objemová hmotnost ρ _{bsd} (kg/m ³)	2360,8	2369,3	2346,2	2351,9	2373,2	2356,5
	2359,66					
Pyknometrická zkouška						
m ₁ (g)	699,8					
m ₂ (g)	1590,6					
m ₃ (g)	2540,8					
Objem pyknometru (cm ³)	1,3152					
teplota vody (°C)	23,1					
hustota vody (kg/m ³)	997,6					
Max. objemová hmotnost ρ _{mv} (kg/m ³)	2456,00					
Mezerovitost						
Mezerovitost V _m (%)	3,92					
Minimální mezerovitost V _{min} (%)	3					
Minimální mezerovitost V _{max} (%)	6					
	Vyhovuje					



Obrázek 31: Marshallova tělesa BBTM 5B



Obrázek 30: Marshallova tělesa BBTM 8A a AUTL 8



*D4 – BBTM 8A ($V_m = 3,9 \%$)

X4 – AUTL 8 ($V_m = 12,21 \%$)

Zdroj: Vlastní fotodokumentace



5.5. Návrh směsi AUTL 8

Kvůli chybějící národní příloze není možné v současné době vycházet při návrhu směsi AUTL z normy ČSN EN 13108-9 [14]. Ta totiž prozatím neurčuje přesné meze parametrů potřebných k návrhu. Na grafu 15 jsou znázorněny meze křivky zrnitosti kameniva (červené body) pro návrh AUTL 8 dle příslušné normy. Jak je vidět, pomocí těchto mezí se nedá navrhnout odpovídající asfaltová směs. Taktéž požadavky na min. množství pojiva a meze mezerovitosti nejsou v příslušné normě předepsány. V grafu 15 jsou také uvedeny meze pro návrh směsi BBTM 8B, která se velice podobá návrhům směsí AUTL, a proto bylo snahou se v těchto mezích držet.

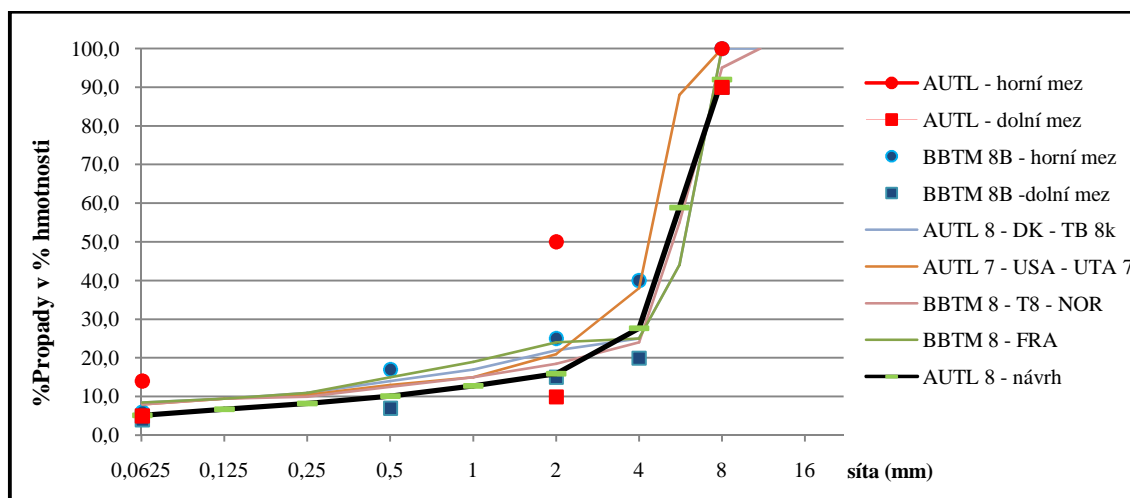
Návrh směsi AUTL 8 vycházel zejména ze zahraničních zkušeností. Min. množství asfaltového pojiva a návrh křivky zrnitosti vycházel z poskytnutých informací společností EUROVIA CS, která má zkušenosti s návrhem i pokládkou AUTL ve Francii. Na grafu 15 jsou znázorněny křivky zrnitosti jednotlivých směsí používaných v Dánsku, Norsku Francii a USA, které svým průběhem taktéž vytvořili předpoklad pro návrh AUTL 8. S ohledem na návrhy směsí BBTM bylo asfaltové pojivo přidáváno v množství 5,7 a 6,2 % hm. směsi. Většina směsí AUTL používaných ve světě má otevřenou strukturu s mezerovitostí nad 10 %, proto meze mezerovitosti směsi AUTL 8 byly stanoveny v rozmezí 12 až 14 %.

Tabulka 22: Návrh směsi AUTL 8

Zbytky na sítích	%	11	8	5,6	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
Fíler		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,8	2,3	5,7	17,6
Sýkořice 0/4		0,0	0,0	0,0	0,1	8,6	25,2	22,5	16,3	10,7	6,0
Sýkořice 2/5		0,0	0,0	3,2	50,6	43,9	1,7	0,3	0,1	0,1	0,1
Sýkořice 4/8		0,0	10,0	41,2	35,8	10,9	0,7	0,3	0,2	0,2	0,2
Návrh směsi	%										
Fíler	5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	0,9
Sýkořice 0/2	10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9	2,5	2,3	1,6	1,1	0,6
Sýkořice 2/5	5	0,0	0,0	0,2	2,5	2,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Sýkořice 4/8	80	0,0	8,0	32,9	28,6	8,7	0,6	0,3	0,1	0,1	0,2
Součtová čára zbytků	100	0,0	8,0	33,1	31,2	11,8	3,2	2,6	1,9	1,5	1,6
BBTM 8B - horní mez			100,0		40,0	25,0		17,0			6,0
horní obor zrnitosti			100,0			50,0					14,0
AUTL 8 - návrh		100,0	92,0	58,9	27,7	15,9	12,7	10,2	8,3	6,8	5,1
dolní obor zrnitosti			90,0			10,0					5,0
BBTM 8B - dolní mez			90,0		20,0	15,0		7,0			4,0



Graf 15: Křivka zrnitosti AUTL 8 v porovnání se zahraničními zkušenostmi



Zdroj: [Vlastní zpracování na základě [8] [11] [14] [15] [16] [17]]

Tabulka 23: Stanovení mezerovitosti AUTL 8

AUTL 8						
Vzorky	X.1.	X.2.	X.3.	Y.1.	Y.2.	Y.3.
Obsah pojiva	6,2 %			5,7 %		
Marshallova tělesa						
Průměrný průměr vzorku (mm)	101,9	101,8	103,1	101,6	101,9	102,3
Průměrná výška vzorku (mm)	62,9	65,3	64,3	63,2	63,7	63,1
m1 (g)	1093,2	1142	1141,7	1094,1	1093,1	1092,8
m2 (g)	636	669	662,7	640,8	645	645,2
m3 (g)	1116,7	1168,6	1165,8	1119,4	1121,8	1119,3
teplota vody (°C)	19,4			20,2		
hustota vody (kg/m ³)	998,3			998,2		
Objemová hmotnost pbsd (kg/m ³)	2270,4	2282,0	2265,5	2281,9	2288,4	2300,8
	2272,6			2290,3		
Pyknetrická zkouška						
m1 (g)	696,5			699,8		
m2 (g)	1595,4			1585,7		
m3 (g)	2562,4			2560,1		
Objem pyknetru (cm ³)	1,31661			1,3152		
teplota vody (°C)	23,6			23,5		
hustota vody (kg/m ³)	997,5			997,5		
Max. objemová hmotnost p _{mv} (kg/m ³)	2589,33			2618,29		
Mezerovitost						
Mezerovitost V _m (%)	12,23			12,53		
Min. mezerovitost V _{min} (%)	12			14		
Max. mezerovitost V _{max} (%)	14			14		
	Vyhovuje			Vyhovuje		

K laboratorním zkouškám bude využita směs s asfaltovým pojivem o množství 5,7 % hm. směsi.



5.5.1. Mezerovitost utěsněného zkušební tělesa

Vzhledem k tomu, že navržená směs AUTL 8 má větší objem mezer a při stanovení objemové hmotnosti těles metodou nasyceného suchého povrchu docházelo při měření hmotnosti nasyceného a povrchově osušeného tělesa ke snížení hmotnosti vlivem vytékání vody z mezer, byl proveden výpočet objemové hmotnosti na utěsněném zkušebním tělese. Předpokládalo se, že dojde ke zpřesnění hodnoty mezerovitosti asfaltové směsi AUTL 8. Výpočet probíhal dle vzorce z [53] Postup C: Objemová hmotnost – utěsněné zkušební těleso. (Kapitola 5.2. Postup prací)

Nejdříve bylo zapotřebí vybrat materiál pro utěsnění tělesa a zjistit jeho objemovou hmotnost. Pro účely této zkoušky byl použit parafín z klasických svíček. Stanovení objemové hmotnosti bylo vypočteno pomocí vzorce pro určení maximální objemové hmotnosti těles z [52] Postup A (Kapitola 5.2. Postup prací). Nejprve bylo snahou využít Guy-Lussacův pyknometr s objemem 100 ml při teplotě 20 °C. Bylo zapotřebí nasekat parafín na jemné částice a vložit je do pyknometru. Obecně má parafín menší hustotu než voda, proto docházelo k nahromadění vzorku (Obrázek 32) u zátky pyknometru a ke vzniku vzduchových bublin, což mělo za následek výpočet neodpovídajících hodnot objemové hmotnosti parafínu.

Obrázek 32: Guy-Lussacův pyknometr pro zjištění obj. hm. parafínu



Zdroj: Vlastní fotodokumentace



Poté se přistoupilo k využití klasických pyknometrů. Zprvu bylo potřeba nařezat svíčku na podobně velké vzorky. Kvůli struktuře svíček, která po odřezu nebyla konzistentní (Obrázek 33) bylo zapotřebí „zatáhnout“ povrch vzorků parafínu pomocí plamene nad kahanem (Obrázek 33), jinak by docházelo k hromadění jemných částic parafínu v okolí nálevky.

Obrázek 33: Úprava parafínu do kostek



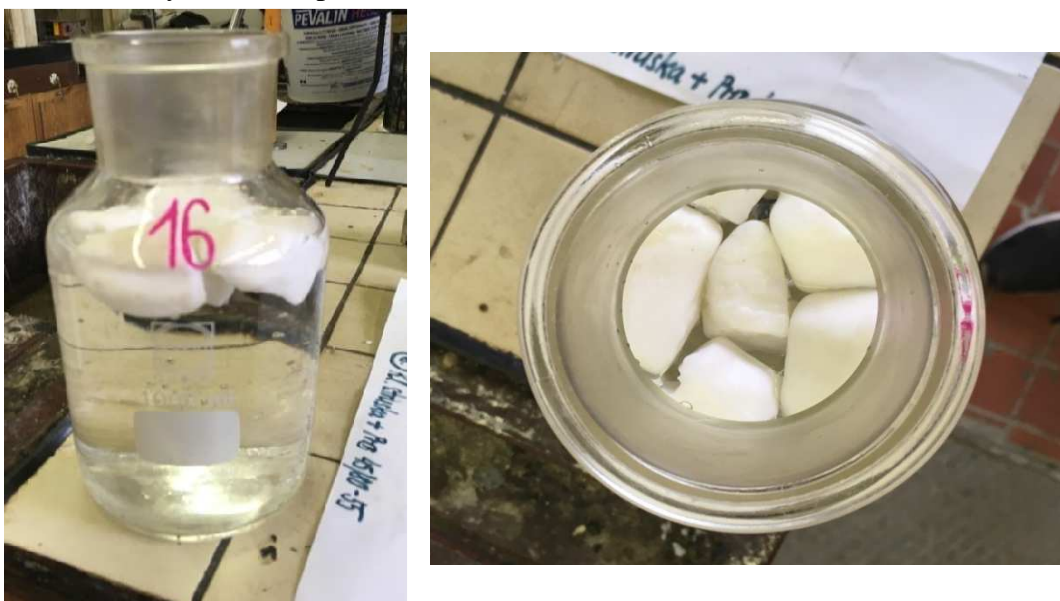
Zdroj: Vlastní fotodokumentace

Tabulka 24: Stanovení objemové hmotnosti parafínu

Pyknometrická zkouška (Parafín)	
m1 (g)	707,4
m2 (g)	806,4
m3 (g)	2003,5
Objem pyknometru (cm ³)	1,316
teplota vody (°C)	23,2
hustota vody (kg/m ³)	997,6
Objemová hmotnost parafínu (kg/m ³)	857,16



Obrázek 34: Pyknometr s parafínem



Zdroj: Vlastní fotodokumentace

Pro stanovení mezerovitosti byla vyrobena tři tělesa AUTL 8 s označením Z. Stanovila se jejich hmotnost v suchého stavu m_1 . Poté došlo k samotnému utěsnění těles, a to pomocí rozeřátého parafínu, do kterého byl povrch těles postupně namáčen po dobu kratší než 5s. Po ochladnutí vosku byl proces namáčení opakován do doby, kdy bylo celé těleso utěsněno. (Obrázek 35) Bylo zapotřebí, aby nedošlo k zalití mezer, které jsou součástí složení asfaltové směsi a zároveň muselo být obalení těles zcela nepropustné.

Obrázek 35: Utěsněné marshallovo těleso



Zdroj: Vlastní fotodokumentace



Poté byla stanovena hmotnost utěsněného zkušební tělesa m_2 , těleso bylo ponořeno do vody, kde byla stanovena hmotnost ponořeného utěsněného tělesa m_3 . Z naměřených hmotností byla vypočtena objemová hmotnost utěsněného tělesa a následně jeho mezerovitost. (Tabulka 25) Z výsledné mezerovitosti 14,41 % vyplývá, že utěsnění těles způsobilo zvýšení mezerovitosti asfaltové směsi o 1,9 % v porovnání s prvotním návrhem AUTL 8 a o 1,3 % oproti zjištěné mezerovitosti těles určených k laboratorním zkouškám. (Kapitola 6)

Tabulka 25: Stanovení mezerovitosti AUTL 8 - utěsněné zkušební těleso

AUTL 8 (Z)			
Vzorky	Z.1.	Z.2.	Z.3.
Obsah pojiva	5,7 %		
Marshallova tělesa			
Průměrný průměr vzorku (mm)	101,7	102,3	101,8
Průměrná výška vzorku (mm)	64,0	63,7	64,2
m_1 (g)	1098,6	1098,6	1100,2
m_2 (g)	642,5	643,1	645,0
m_3 (g)	1127,8	1127,7	1134,4
teplota vody (°C)	19,1		
hustota vody (kg/m ³)	998,4		
Objemová hmotnost ρ_{bssd} (kg/m ³)	2237,1	2228,7	2214,9
	2226,92		
Pyknometrická zkouška			
m_1 (g)	699,8		
m_2 (g)	1531,4		
m_3 (g)	2524,1		
Objem pyknometru (cm ³)	1,3		
teplota vody (°C)	25,00		
hustota vody (kg/m ³)	997,1		
Max. objemová hmotnost ρ_{mv} (kg/m ³)	2601,76		
Mezerovitost			
Mezerovitost V_m (%)	14,41		

5.6. Souhrn navržených směsí

Tabulka 26: Návrh směsí - souhrn

	Zbraslav 2/5	Zbraslav 0/4	Lašovice 0/4	Filer	Organické vlákno	Asfaltové pojivo	Mezerovitost
BBTM 5B	77 %	10 %	10 %	3 %	0,3 %	6,2 %	14,7 %
	Zbraslav 4/8	Lašovice 0/4	Filer	Organické vlákno	Asfaltové pojivo	Mezerovitost	
BBTM 8A	58 %	39 %	3 %	0,3 %	6,2 %	3,9 %	
	Sýkořice 4/8	Sýkořice 2/5	Sýkořice 0/2	Filer	Organické vlákno	Asfaltové pojivo	Mezerovitost
AUTL 8	80 %	5 %	10 %	5 %	0,3 %	5,7 %	12,5 %



6. Laboratorní zkoušky

Pro základní porovnání vlastností navržených směsí byly provedeny následující laboratorní zkoušky:

- a) Stanovení tuhosti asfaltové směsi dle normy ČSN EN 12697-26 (736160) Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 26: Tuhost [55].
 - Bez stárnutí
 - Se stárnutím
- b) Stanovení odolnosti vůči lomu (Lomová houževnatost) dle ČSN EN 12697-44 (736160) Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 44: Šíření trhliny zkouškou ohybem na půlválcovém zkušebním tělese [56].
- c) Stanovení odolnost vůči působení vody dle ČSN EN 12697-12 (73 6160) Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 12: Stanovení odolnosti zkušebního tělesa vůči vodě [57] a AASHTO T 283-14 Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage [58].
 - Pevnost v příčném tahu (ITS) dle ČSN EN 12697-23 (73 6160) Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 23: Stanovení pevnosti v příčném tahu [59].
- d) Stanovení odolnosti proti vzniku trvalých deformací dle ČSN EN 12697-22+A1 (73 6160) Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 22: Zkouška pojíždění kolem [60].



6.1. Příprava zkušebních vzorků

Asfaltové směsi byly vyrobeny na základě výsledných návrhů uvedených v kapitole 5.6.. Pro každou asfaltovou směs bylo zapotřebí vyrobit 6 marshallových těles (hutnicí energie 2x50 úderů) pro stanovení tuhosti, která byla po odzkoušení následně rozřezána na kotoučové pile pro zkoušku šíření trhliny za ohybu. Dále bylo potřeba 9 marshallových těles (hutnicí energie 2x25 úderů) pro stanovení odolnosti vůči působení vody a 4 desky (2x tloušťky 4 cm a 2x tloušťky 2 cm) pro zkoušku pojíždění kolem. Pro jednotlivé asfaltové směsi bylo vyrobeno cca 42 kg asfaltové směsi. Takovéto množství asfaltové směsi bylo nezbytné míchat, oproti přípravě směsí pro návrh, v míchačce.

Marshallova tělesa byla vyráběna dle ČSN EN 12697-30 [50]. Desky byly vyráběny v lamelovém zhutňovači desek (Obrázek 36) dle ČSN EN 12697-33+A1 (73 6160) [61]. Na základě objemové hmotnosti a tloušťky vyráběné desky bylo vypočítáno přesné množství asfaltové směsi, které bylo vloženo do formy, zakryto plechem a lamelami a podle normy hutněno pomocí pojezdů válce po lamelách.

Obrázek 36: Lamelový zhutňovač desek



Zdroj: Vlastní fotodokumentace

Objemová hmotnost těles hutněných 2x50 úderů byla stanovena na základě hmotností stanovených dle Postupu B normy ČSN EN 12697-6 [53] a těles hutněných 2x25 úderů pomocí jejich rozměrů dle postupu D v téže normě. (Kapitola 5.2. Postup prací)



Tabulka 27: Vyrobená tělesa pro laboratorní zkoušky.

BBTM 5B	průměr	výška	$\rho_{bssd,A}$	
A.1.	101,7	62,3	2077,8	Zhutněno 2x50
A.2.	102,1	62,7	2064,5	
A.3.	101,8	62,2	2076,2	
A.4.	101,8	62,7	2080,9	
A.5.	102,3	61,7	2082,9	
A.6.	101,8	62,3	2080,5	
A.7.	102,1	63,9	1904,5	Zhutněno 2x25 (ITSr)
A.8.	101,8	64,5	1890,8	
A.9.	102,3	62,9	1911,3	
A.10.	101,9	65,6	1881,1	
A.11.	101,8	64,00	1905,0	
A.12.	101,9	64,9	1884,7	
A.13.	102,0	64,5	1885,9	
A.14.	102,0	65,4	1866,5	
A.15.	101,6	65,3	1870,4	
BBTM 8A	průměr	výška	$\rho_{bssd,D}$	
D.1.	103,3	57,2	2360,8	Zhutněno 2x50
D.2.	102,5	57,9	2369,3	
D.3.	102,2	57,9	2346,2	
D.4.	101,9	59,0	2351,9	
D.5.	101,7	58,4	2373,2	
D.6.	103,2	56,1	2356,5	
D.7.	102,0	60,3	2272,6	Zhutněno 2x25 (ITSr)
D.8.	102,1	60,3	2290,1	
D.9.	101,7	60,1	2309,0	
D.10.	101,5	60,8	2280,9	
D.11.	101,9	60,4	2283,6	
D.12.	102,2	60,5	2276,4	
D.13.	102,2	59,9	2294,0	
D.14.	102,4	60,4	2289,6	
D.15.	102,4	59,9	2286,2	
AUTL 8	průměr	výška	$\rho_{bssd,Y}$	
Y.1.	102,1	63,4	2268,1	Zhutněno 2x50
Y.2.	101,8	63,8	2287,6	
Y.3.	101,8	64,0	2266,9	
Y.4.	102,0	63,8	2284,1	
Y.5.	102,5	63,2	2287,4	
Y.6.	102,2	64,0	2252,5	
Y.7.	102,1	64,5	2291,9	Zhutněno 2x25 (ITSr)
Y.8.	102,0	63,1	2272,4	
Y.9.	102,0	63,8	2298,2	
Y.10.	101,9	63,6	2273,9	
Y.11.	101,9	64,4	2283,0	
Y.12.	101,8	64,8	2247,6	
Y.13.	101,6	64,1	2282,3	
Y.14.	101,6	63,4	2256,8	
Y.15.	101,8	64,3	2250,2	
	mm	mm	kg/m ³	



6.2. Laboratorní výsledky - směsi pro porovnání

Ve spolupráci se silniční laboratoří ČVUT FSv byla poskytnuta data k porovnání navržených asfaltových směsí s klasickými obrusnými vrstvami ACO s SMA. Pro porovnání byly vybrány směsi navržené z asfaltového pojiva s označením PmB 45/80 – 65 a z kameniva z lomu Zbraslav. Tyto směsi byly vyrobeny na obalovnách a odzkoušeny v silniční laboratoři katedry silniční. Základní parametry těchto směsí jsou uvedeny v Tabulce 28.

Tabulka 28: Základní parametry asfaltových směsí pro porovnání

	ACO 11S	SMA 11S
Pojivo	PmB 45/80 - 65	PmB 45/80 - 65
Mezerovitost	4,6 %	4,4 %
Modul tuhosti při 15°(MPa)	7595	7798
Lomová houževnatost (EN 2011) (N/mm ^{3/2})	48,37	-
Lomová houževnatost (EN 2011) (N/mm ^{3/2}) - stárnutí	47,71	43,49
Lomová energie do max. síly (J)	1,88	-
Lomová energie (J)	2,78	-
Lomová energie do max. síly (J) - stárnutí	1,54	1,89
Lomová energie (J) - stárnutí	2,72	2,87

Zdroj: [64]

6.3. Moduly tuhosti

Moduly tuhosti asfaltových směsí byly stanoveny pomocí zkoušky v příčném tahu na válcových zkušebních tělesech (IT-CY) uvedené jako Příloha C v ČSN EN 12697-26 [55]. Zkouška je založena na měření vodorovných deformací pomocí LVDT senzorů osazených na ocelovém zatěžovacím rámu. Deformace vznikají pneumatickým zatěžovacím zařízením vytvářejícím svislé pulzy s přesně danou dobou náběhu (124 ± 4 ms), periodou zatížení ($3,0 \pm 0,1$ s) a špičkovou hodnotou zatížení. Jedná se o nedestruktivní metodu, jelikož výsledné deformace dosahují hodnot jednotek mikrometrů. Výsledná hodnota modulu tuhosti je závislá na hodnotě svislé zatěžovací síly, příčné deformaci, poissonově čísle (hodnota závislá na teplotě při zatěžování) a rozměrech marshallova tělesa.



Zkoušení probíhalo na marshallových tělesech temperovaných postupně na 0, 15 a 27 °C. Temperace probíhala v termostatické komoře s nuceným oběhem minimálně po dobu 4h (většinou temperováno přes noc). Po vytemperování byla tělesa usazena do zatěžovacího rámu a zatížena 10 kalibračními zatěžovacími pulzy a následně odzkoušena 5 zatěžovacími pulzy. Hodnoty modulu tuhosti byly vypočítány jako aritmetický průměr z pěti zatěžovacích pulzů pomocí softwaru dle vzorce z [55]:

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

S_m = Modul tuhosti v MPa

F = Maximální hodnota svislého zatížení (N)

z = Amplituda horizontální deformace v průběhu zatěžovacího cyklu (mm)

h = Průměrná tloušťka zkušební tělesa (mm)

v = Poissonovo číslo závislé na zkušební teplotě

A následně upraveno dle součinitele plochy zatížení (0,60) dle vzorce:

$$S'_m = S_m \times (1 - 0,322 \times (\log(S_m) - 1,82) \times (0,60 - k))$$

S'_m = Modul tuhosti upravený na součinitel plochy zatížení 0,60 (MPa)

k = Naměřený součinitel plochy zatížení

S_m = Modul tuhosti při součiniteli zatížení k, s uvedením teploty (°C)

Každé těleso bylo odzkoušeno ve dvou rovinách podle horizontální osy (těleso otočeno o $90^\circ \pm 10^\circ$). Modul tuhosti tělesa byl vypočten jako aritmetický průměr ze dvou dílčích měření. Zkoušce v příčném tahu bylo podrobena celkově šest marshallových těles od každé asfaltové směsi. Výsledná hodnota modulu tuhosti asfaltové směsi byla stanovena jako aritmetický průměr ze všech šesti modulů tuhosti jednotlivých těles. Dílčí hodnoty modulu tuhosti těles musely být v rozmezí +10 % až -20 % od modulu tuhosti asfaltové směsi, jinak nesměly být využity k výpočtu. Také byla nastavena podmínka, že dvě měření na tomtéž tělese se nesměla odlišovat o více než 15 %.



Obrázek 37: Zkušební sestava pro stanovení modulu tuhosti



Zdroj: Vlastní fotodokumentace

Původní snahou bylo odzkoušet asfaltové směsi i při teplotě 40 °C, ale vzhledem k nízkým hodnotám naměřeným při teplotě 27 °C (Tabulka 27), byly moduly tuhosti při 40 °C neměřitelné. Bylo to dáno tím, že tělesa byla temperována na takovou teplotu, při které je zapotřebí jen velice nízká hodnota silového zatížení pro deformaci v rozmezí 3 – 5 μm a senzory tuto sílu nebyly schopny zaznamenat.

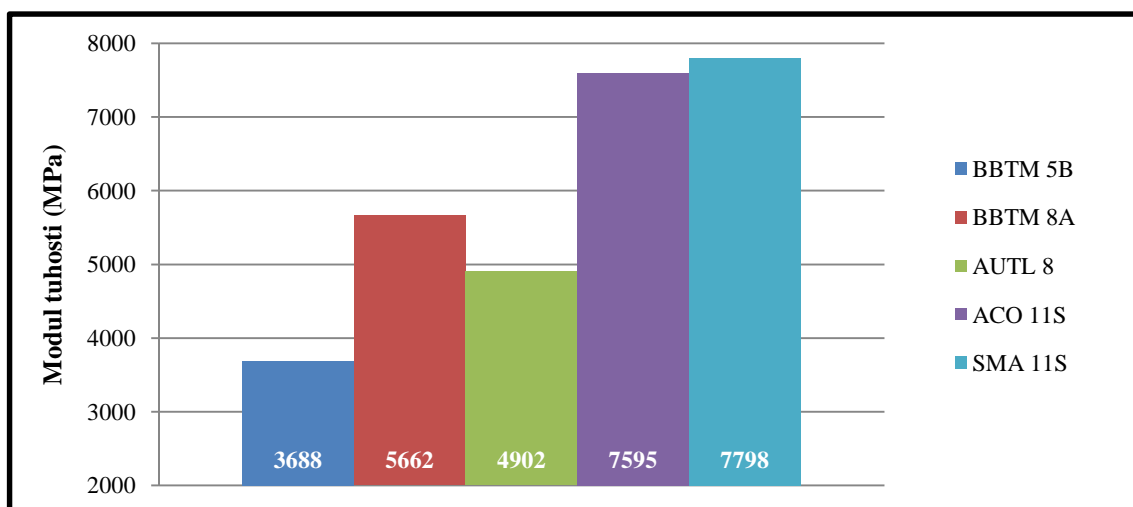


Tabulka 29: Stanovené moduly tuhosti

Směs	Teplota	Modul tuhosti			Směs (Mpa)	Podmínka 1		Podmínka 2
		Těleso 1 (MPa)	Těleso 2 (MPa)	Těleso (Mpa)		10 %	-20 %	± 15 %
BBTM 5B	0°C	9426	8877	9152	9013	9915	7211	6,0%
		9580	9558	9569				0,2%
		8699	9807	9253				12,0%
		9094	9490	9292				4,3%
		8671	8578	8625				1,1%
		7779	8600	8190				10,0%
BBTM 8A	0°C	15625	15144	15385	15879	17467	12703	3,1%
		16737	16372	16555				2,2%
		16397	15505	15951				5,6%
		16851	15869	16360				6,0%
		15807	14486	15147				8,7%
		17136	14498	15817				16,7%
AUTL 8	0°C	12991	13996	13494	12668	13934	10134	7,4%
		13168	11446	12307				14,0%
		12201	15632	13917				24,7%
		11927	11709	11818				1,8%
		12579	12469	12524				0,9%
		13382	13009	13196				2,8%
Směs	Teplota	Těleso 1 (MPa)	Těleso 2	Těleso (Mpa)	Směs (Mpa)	10 %	-20 %	± 15 %
BBTM 5B	15°C	3522	3724	3623	3688	4057	2951	5,6%
		3729	3938	3834				5,5%
		3431	3835	3633				11,1%
		3477	3367	3422				3,2%
		3740	3667	3704				2,0%
		3834	3994	3914				4,1%
BBTM 8A	15°C	5442	4953	5198	5662	6228	4529	9,4%
		5701	5512	5607				3,4%
		5838	5501	5670				5,9%
		6207	5953	6080				4,2%
		6074	5436	5755				11,1%
		6491	6412	6452				1,2%
AUTL 8	15°C	5088	4675	4882	4902	5392	3922	8,5%
		4858	4328	4593				11,5%
		5073	4836	4955				4,8%
		5184	5075	5130				2,1%
		4690	4658	4674				0,7%
		5233	5127	5180				2,0%
Směs	Teplota	Těleso 1 (MPa)	Těleso 2	Těleso (Mpa)	Směs (Mpa)	10 %	-20 %	± 15 %
BBTM 5B	27°C	1371	1424	1398	1403	1544	1123	3,8%
		1351	1415	1383				4,6%
		1533	1494	1514				2,6%
		1392	1261	1327				9,9%
		1342	1254	1298				6,8%
		1517	1485	1501				2,1%
BBTM 8A	27°C	2123	2205	2164	2133	2346	1706	3,8%
		2078	2118	2098				1,9%
		2105	2105	2105				0,0%
		2186	2152	2169				1,6%
		2120	2138	2129				0,8%
		2385	2478	2432				3,8%
AUTL 8	27°C	1870	1658	1764	1707	1877	1365	12,0%
		1610	1619	1615				0,6%
		1784	1608	1696				10,4%
		2212	2349	2281				6,0%
		1742	1761	1752				1,1%
		2121	2110	2116				0,5%



Graf 16: Moduly tuhosti stanovené při 15°C



Všechny naměřené hodnoty modulů tuhosti odpovídají hodnotám uvedeným v TP 170 [6] v tabulce B.2, které stanovují minimální návrhové hodnoty modulů tuhosti asfaltových směsí při teplotě 15 °C. Pro BBTM A stanovuje hodnotu 5 500 MPa a pro otevřenější typy obrusných vrstev 3 600 MPa. Ačkoliv jsou tyto minimální hodnoty splněny, tak navržené směsi nedosahují takových hodnot modulů tuhosti jako je tomu u prezentovaných ACO nebo SMA. Nejvyšší moduly tuhosti z navržených směsí byly naměřeny u BBTM 8A. Je to dáno zejména větším maximálním zrnem D a nižší mezerovitostí směsi, kdy je svislá síla přenášena celistvější asfaltovou maltou, která lépe odolává vznikající deformaci. Z důvodu vyšší mezerovitosti u otevřenějších typů asfaltových směsí dochází ke snížení počtu kontaktních ploch mezi zrny, ke zvýšenému namáhání kamenné kostry a tím ke snížení tuhosti asfaltové směsi. Nejvyšší teplotní citlivost, což je poměr mezi modulem tuhosti při 0 °C a při 27 °C, byla naměřena u směsi BBTM 8A (7,44), následovala směs AUTL 8 (7,42) a BBTM 5B (6,42).

Po stanovení tuhosti byla marshallova tělesa každé asfaltové směsi vystavena simulaci dlouhodobého stárnutí dle AASHTO R30-02 [62]. V této normě je uveden postup, kdy jsou tělesa uložena do teplotní komory a při stálé teplotě 85 °C po dobu pěti dní jsou vystavena stárnutí. K tomu bylo zapotřebí rozdělit tělesa do dvou skupin po třech tělesech. Bylo žádoucí, aby obě skupiny měly stejnou průměrnou hodnotu objemové



hmotnosti, a to z důvodu porovnatelnosti výsledků na nezestárlých a zestárlých tělesech. Během stárnutí jsou tělesa vystavena vyšším teplotám, při kterých by mohlo dojít k nežádoucím deformacím, z tohoto důvodu byla jednotlivá tělesa obalena ocelovou síťovinou (Obrázek 38).

Obrázek 38: Obalení těles ocelovou síťovinou



Zdroj: Vlastní fotodokumentace

Tabulka 30: Stanovené moduly tuhosti (se stárnutím)

Směs	Teplota	Modul tuhosti				Podmínka 1		Podmínka 2
		Těleso 1 (MPa)	Těleso 2 (MPa)	Těleso (Mpa)	Směs (Mpa)	10 %	-20 %	± 15 %
BBTM 5B	15°C	5675	5428	5552	5588	6147	4471	4,45%
		5900	5804	5852				1,64%
		5316	5407	5362				1,70%
BBTM 8A	15°C	7975	8013	7994	8045	8849	6436	0,48%
		8021	7756	7889				3,36%
		8388	8114	8251				3,32%
AUTL 8	15°C	6895	7116	7006	6921	7613	5537	3,15%
		6448	6654	6551				3,14%
		7299	7116	7208				2,54%

Tabulka 31: Index stárnutí

	BBTM 5B	BBTM 8A	AUTL 8
Index stárnutí	1,524	1,421	1,412



Dle očekávání vlivem stárnutí došlo ke zvýšení modulu tuhosti u všech tří navržených směsí (Tabulka 30). Je to dáno přístupem vzdušného kyslíku za zvýšených teplot k asfaltovému pojivu, čímž dochází k termooxidačnímu stárnutí asfaltového pojiva, což má za následek tuhnutí asfaltové směsi. Vliv stárnutí na tuhost asfaltové směsi je závislý mimo jiné na druhu a množství asfaltového pojiva, tloušťce asfaltového filmu na kamenivu nebo mezerovitosti směsi. Opět byly nejvyšší hodnoty naměřeny u směsi BBTM 8A.

V Tabulce 31 jsou uvedeny Indexy stárnutí, které vyjadřují vliv stárnutí na změnu modulu tuhosti asfaltové směsi. Tento index zpravidla nabývá hodnot větších než 1. Dá se tvrdit, že vlivem stárnutí dochází ke zlepšení vlastností asfaltové směsi, ale jen do určité doby. Čím větší tuhost, tím se směs stává za nízkých teplot křehčí a náchylnější ke vzniku mrazových trhlin. Je zapotřebí si uvědomit, že vzhledem k účelům obrusné vrstvy není tuhost směsi rozhodujícím faktorem. Obrusná vrstva musí být odolná jak proti mrazovým trhlinám, tak i proti plastické deformaci (vyjetí kolem). Proto je nejideálnější směsí směs s nejmenším indexem stárnutí, protože je nejméně náchylná k termooxidačnímu stárnutí.

Nejvyšší index stárnutí byl stanoven pro směs BBTM 5B. Mohlo by to být dáno vyšší mezerovitostí směsi, kdy se kyslík dostane k větší ploše asfaltového pojiva. Také to mohlo být způsobeno návrhem směsi BBTM 5B z jemnějších zrn kameniva vytvářejícího větší plochu pro obalení asfaltovým pojivem, než je tomu u směsí s max. zrnem $D = 8$ mm. Tím došlo ke vzniku tenčí vrstvy asfaltového filmu, u kterého dochází k výraznějšímu stárnutí. Rozdíl mezi BBTM 8A a AUTL 8 je skoro bezvýznamný. Odůvodněním je menší mezerovitost BBTM 8A a na druhou stranu menší množství asfaltového pojiva u AUTL 8.



6.4. Odolnost vůči lomu

Zkouška odolnosti asfaltové směsi proti porušení lomem je založena na třibodovém ohybu půlválcového zkušební tělesa opatřeného drážkou o šířce $0,35 (\pm 0,1)$ mm a hloubce $10 (\pm 1,0)$ mm. Příprava půlválcového tělesa spočívala v seříznutí již vyrobených marshallových těles na tloušťku 50 mm, jejich následné rozpůlení kotoučovou pilou a vytvoření drážky uprostřed tělesa (Obrázek 39).

Obrázek 39: Půlválcová zkušební tělesa opatřená drážkou



Zdroj: Vlastní fotodokumentace

Na vytvořených tělesech bylo provedeno měření rozměrů pomocí šuplery, a to dvakrát šířka (delší rozměr základny tělesa), třikrát tloušťka (kratší rozměr základny) a dvakrát jejich výška. Následně byla tělesa umístěna do klimatické komory a po dobu minimálně 4h temperována při teplotě 0°C . Poté byla tělesa jedno po druhém kladena do zkušebního zařízení (Obrázek 40) a zkoušena. Při zkoušce dochází k zatěžování svislou silou, která je řízená konstantní rychlostí svislé deformace $2,5 \text{ mm/min}$. Zaznamenávala se maximální dosažená síla a maximální svislá deformace stanovená lisem zkušebního zařízení. Taktéž byl ke zkušebnímu zařízení připojen datalogger, který zapisuje průběh celého zatěžovacího cyklu (Graf 17). Data byla poté porovnávána a v případě podobnosti obou hodnot byly brány do výpočtu hodnoty odečtené z lisu. Počáteční hodnota zatěžovacího cyklu byla stanovena na $0,03 \text{ kN}$ a koncová hodnota zatěžovacího cyklu byla stanovena na $0,3 \text{ kN}$.

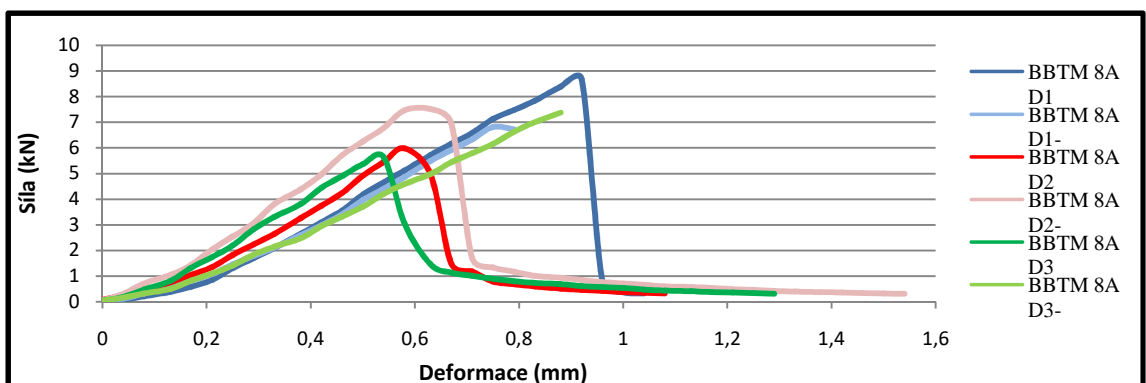
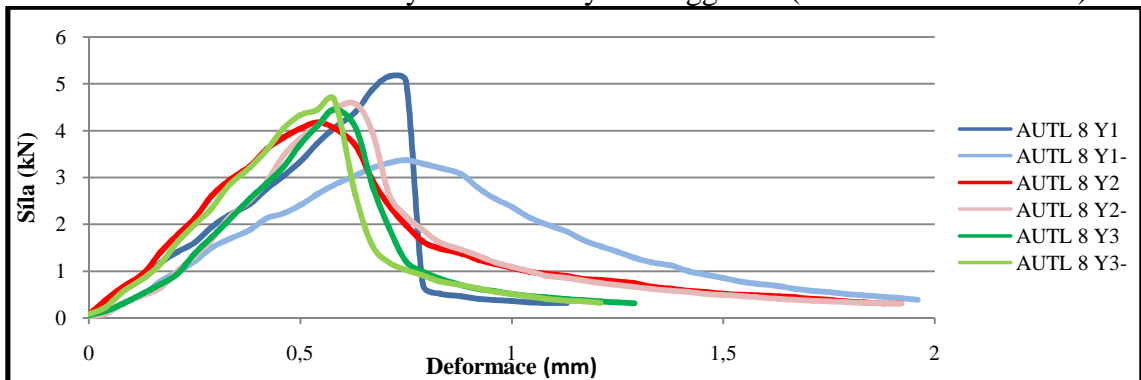


Obrázek 40: Zkušební zatěžovací zařízení



Zdroj: Vlastní fotodokumentace

Graf 17: Průběh zatěžovacích cyklů stanovený dataloggerem (AUTL 8 a BBTM 8A)





Po dokončení zatěžovacího cyklu musela být provedena kontrola platnosti zkoušky, a to pomocí plastové destičky s vyznačenou plochou, ve které se musela nacházet vzniklá trhлина.

Obrázek 41: Zkušební tělesa po odzkoušení



Zdroj: Vlastní fotodokumentace

Tabulka 32: Stanovené hodnoty odolnosti proti lomu ($N/mm^{3/2}$) a spotřebované energie (J)

Směs	Kritická hodnota (EN 2011)	Kritická hodnota (EN 2016)	Energie do max. hodnoty	Celková energie zkoušky
	($N/mm^{3/2}$)	($N/mm^{3/2}$)	(J)	(J)
BBTM 5B	23,79	22,12	0,86	1,51
BBTM 8A	45,07	41,97	2,12	2,73
AUTL 8	28,25	26,17	1,29	2,44
ACO 11S	48,37	----	1,88	2,78

V Tabulce 32 jsou uvedeny kritické hodnoty udávající odolnosti proti lomu. Tyto hodnoty byly získány jako aritmetický průměr z dílčích hodnot naměřených na jednotlivých tělesech. V prvním sloupci jsou uvedeny kritické hodnoty dle normy ČSN EN 12697-44 [56] z roku 2011 a ve druhém sloupci jsou uvedeny kritické hodnoty dle téže normy z roku 2016, která byla prozatím schválena v Evropě, nikoliv však v ČR.

Z navržených směsí nejvyšší kritické hodnoty dosahuje směs BBTM 8A, která se vyrovná i směsi ACO 11S. Je to dáno nižší mezerovitostí směsi, která lépe odolává tahovému napětí, vznikajícímu na spodním líci zkušebního tělesa. Předpokládalo se, že u směsi AUTL 8 budou naměřeny vyšší kritické hodnoty odolnosti proti lomu a rozdíl v porovnání s BBTM 5B bude markantnější.



V Tabulce 32 jsou také uvedeny hodnoty energie potřebné k porušení (vzniku trhliny) a energie spotřebované v průběhu celého zatěžovacího cyklu. Při zatěžování těles směsi BBTM 8A je zapotřebí k porušení největší množství energie, ale zbytková únosnost je oproti zbylým směsím nejmenší. Zatímco schopnost směsi AUTL 8 odolávat reziduálním napětím je největší a spotřebou celkové energie se vyrovnává jak BBTM 8A, tak i ACO 11S. Tento stav je možné pozorovat také na Grafu 17, kde jsou uvedeny průběhy zatěžovacích cyklů. Při rozdělení plochy pod křivkou maximální dosaženou silou, dochází u směsi AUTL 8 k vytvoření dvou podobných ploch. Oproti tomu u směsi BBTM 8A došlo u tří těles k náhlému lomu bez zbytkové odolnosti a plochy pod křivkou jsou nerovnoměrné.

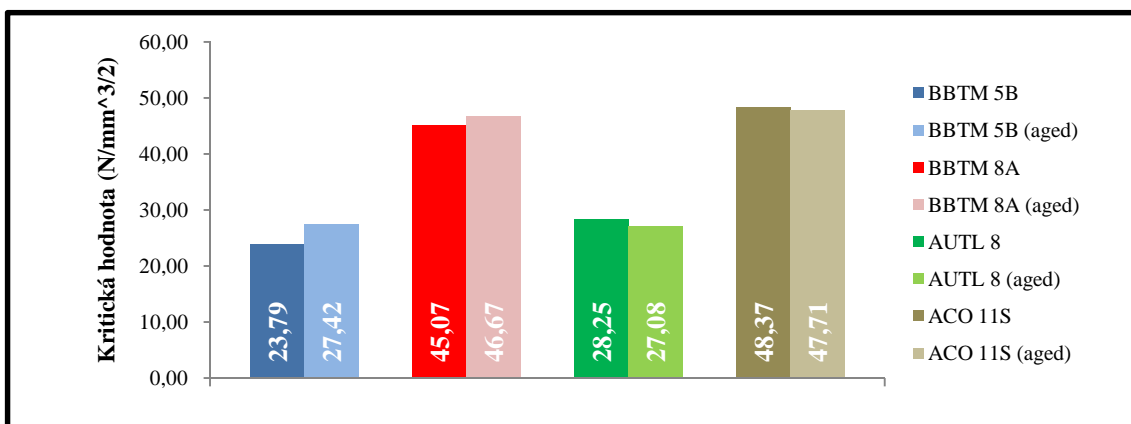
Také u zkoušky odolnosti proti lomu došlo k testování zestárých asfaltových směsí. Jejich výsledky jsou uvedeny v Tabulce 33.

Tabulka 33: Stanovené hodnoty odolnosti proti lomu ($N/mm^{3/2}$) a spotřebované energie (J) - stárnutí

Směs	Kritická hodnota (EN 2011)	Kritická hodnota (EN 2016)	Energie do max. hodnoty [J]	Celková energie zkoušky [J]
	($N/mm^{3/2}$)	($N/mm^{3/2}$)	(J)	(J)
BBTM 5B	27,42	25,45	1,17	3,88
BBTM 8A	46,67	43,35	2,11	4,11
AUTL 8	27,08	25,13	0,94	3,88
ACO 11S	47,71	-----	1,54	2,72
SMA 11S	43,49	-----	1,89	2,87



Graf 18: Porovnání výsledků odolnosti proti lomu na tělesech nezestárých a zestárých



Graf 18 znázorňuje porovnání naměřených hodnot odolnosti proti lomu. Jak je vidět, u směsí BBTM došlo vlivem stárnutí (zvýšením modulu tuhosti) ke zvýšení těchto hodnot. Mohlo by se zdát, že stárnutí je proces, který napomáhá ke zvyšování únosnosti asfaltových vrstev. Do jisté míry je tomu tak, na druhou stranu vlivem zvýšené tuhosti se mohou stávat některé asfaltové směsi náchylnější ke křehkému lomu. Tento stav je možné pozorovat u směsí AUTL 8 i ACO 11S. V současnosti zatím není možné správně interpretovat výsledky a určit hranici modulu tuhosti jednotlivých asfaltových směsí, při které by ještě nedocházelo ke snižování odolnosti proti lomu. Stárnutí a s tím související změna vlastností asfaltových směsí tvoří téma, které by vydalo na samostatnou vysokoškolskou práci.

Vlivem stárnutí došlo u směsí AUTL 8 ke snížení energie potřebné ke vzniku trhliny. U všech navržených směsí došlo ke zvýšení celkové spotřebované energie a také ke zvýšení reziduální odolnosti proti lomu.



6.5. Odolnost zkušebních těles vůči vodě

Odolnost zkušebního tělesa vůči vodě (ITSR) byla stanovena dle americké normy AASHTO T 283-14 [58], která kromě v ČR běžně používaného postupu (tělesa suchá a tělesa temperovaná ve vodní lázni) zahrnuje také zkoušení těles vystavených zmrazovacímu cyklu. Výpočet ITSR (ITSR_f) je založen na stanovení poměru pevnosti v příčném tahu těles temperovaných ve vodní lázni (těles vystavených zmrazovacímu cyklu) a těles suchých.

Výpočet ITSR dle [58]:

$$\text{ITSR} = \frac{\text{ITS}_w}{\text{ITS}_d} \times 100$$

ITSR= Poměr pevností v příčném tahu (%)

ITS_w= Průměrná pevnost v příčném tahu skupiny mokrých zkušebních těles (kPa)

ITS_d= Průměrná pevnost v příčném tahu skupiny suchých zkušebních těles (kPa)

$$\text{ITSR}_f = \frac{\text{ITS}_{w+f}}{\text{ITS}_d} \times 100$$

ITSR= Poměr pevností v příčném tahu (%)

ITS_{w+f}= Průměrná pevnost v příčném tahu skupiny „zmražených“ zkušebních těles (kPa)

ITS_d= Průměrná pevnost v příčném tahu skupiny suchých zkušebních těles (kPa)

Pro testování ITSR bylo vyrobeno 9 marshallových těles od každé navržené směsi hutnicí energií 2x25 úderů. Je žádoucí zvýšit mezerovitosti směsi tak, aby se voda při temperaci dostala ve větším objemu do mezer zkušebního tělesa. Jednotlivá tělesa byla rozdělena do tří sad po třech tělesech tak, aby opět měly sady stejnou průměrnou objemovou hmotnost. Každá sada těles byla temperována dle postupu uvedeného v normě [58].

Po temperaci jednotlivých sad byla všechna tělesa temperována při společné teplotě 15 °C po dobu 2h s tím, že mokrá i zmražená tělesa byla temperována ve vodní lázni. Připravená zkušební válcová tělesa byla po temperaci vložena do zatěžovacího zařízení



(Obrázek 42) a podrobena zkoušce pevnosti v příčném tahu (ITS) s řízenou rychlostí zatěžování 50 mm/min. K výpočtu ITS bylo zapotřebí zaznamenat maximální zatěžovací sílu při porušení a deformaci.

Postup temperace jednotlivých sad zkušebních těles:

- a) 1. Sada – suchá tělesa
 - Temperace při laboratorní teplotě po dobu 72h
- b) 2. Sada – mokrá tělesa
 - Laboratorní sycení ve vodě po dobu 30 minut
 - Temperace ve vodní lázni při teplotě 40 °C po dobu 72h
- c) 3. Sada – zmražená tělesa
 - Laboratorní sycení ve vodě po dobu 30 minut
 - Uložení do igelitových sáčků a přilítí 5 mg vody
 - Temperace v mrazáku při teplotě -18 °C po dobu 24h
 - Temperace ve vodní lázni při teplotě 60 °C po dobu 24h

Obrázek 42: Zkušební zařízení pro stanovení ITS



Zdroj: Vlastní fotodokumentace



Výpočet ITS dle normy ČSN EN 12697-23 [59]

$$ITS = \frac{2 \times F}{\pi \times D \times H} \times 1000$$

ITS = Pevnost v příčném tahu (kPa)

F = Maximální zatížení (N)

D = Průměr zkušebního těles (mm)

H = Výška zkušebního těles (mm)

Tabulka 34: Stanovené hodnoty odolnosti vůči vodě

		BBTM 5B	BBTM 8A	AUTL 8	
Síla porušení tělesa	F_{dry}	12,58	19,28	13,83	kN
	F_{wet}	11,76	18,21	12,61	
	F_{w+f}	10,59	17,37	13,05	
Příčná deformace	Δ_{dry}	2,86	3,02	3,16	mm
	Δ_{wet}	3,02	3,51	2,91	
	Δ_{w+f}	3,36	3,37	3,12	
Pevnost v příčném tahu	ITS_d	1,22	2,01	1,35	MPa
	ITS_w	1,14	1,88	1,23	
	ITS_{w+f}	1,02	1,79	1,26	
Odolnost vůči vodě	ITSR	93,6	94,0	90,9	%
	ITSR_f	83,9	89,5	93,6	

V normě ČSN EN 13108-2 [14] jsou uvedeny hodnoty minimálního poměru pevnosti v příčném tahu $ITSR_{min}$. Pro BBTM s označením S je $ITSR_{min}$ stanoven na hodnotu 80 %. Ze stanovených hodnot v Tabulce 34 vyplývá, že toto kritérium všechny tři navržené asfaltové směsi splňují. Nejlépe odolává působení vody směs BBTM 8A s $ITSR$ 94 %. Neočekávaného výsledku dosáhla směs AUTL 8, u které byla získána pevnost v příčném tahu těles vystavených zmrazovacímu cyklu (ITS_{w+f}) vyšší, než tomu bylo u těles temperovaných jen ve vodní lázni (ITS_w).



6.6. Odolnost proti trvalým deformacím

Odolnost proti trvalým deformacím byla testována pomocí zkoušky pojíždění kolem dle normy ČSN EN 12697-22 [60]. Podstatou zkoušky je stanovení hloubky vyjeté koleje na desce, vzniklé opakovaným pojezdem kola při stálé teplotě.

Pro každou směs byly vyrobeny dvě desky tloušťky 4 cm a vzhledem k využití navržených asfaltových směsí v obrusných vrstvách do 20 mm dvě desky tloušťky 2 cm. Desky byly vyráběny v lamelovém zhutňovači desek (Kapitola 6.1.). Každé desce byla stanovena průměrná tloušťka (měřeno 2x na delších stranách a 1x na kratších stranách) a objemová hmotnost dle postupu B z ČSN EN 12697-6 [53]. Na základě objemových hmotností byla vypočtena míra zhutnění desek jako poměr mezi objem. hmotností desky a objem. hmotností maršhalových těles. U směsí BBTM 5B a AUTL 8A byla vypočtena míra zhutnění vyšší než 101,5 %, což by znamenalo, že došlo k přehutnění desek. Bylo to zapříčiněno mezerovitostí směsí s tím, že docházelo k nadměrnému vylití většího množství vody z mezer desky při vážení desky nasycené vodou a povrchově osušené. Proto bylo přistoupeno k výpočtu objemových hmotností těles i desek dle Postupu A uvedeného v ČSN EN 12697-6 [53].

Postup A – Objemová hmotnost suchá

$$\rho_{\text{bdry}} = \frac{m_1 \times \rho_w}{m_1 - m_2}$$

ρ_{bdry} = objemová hmotnost - suchá v kg/m^3

m_1 = hmotnost suchého zkušební tělesa v g

m_2 = hmotnost zkušební tělesa ve vodě v g

ρ_w = hustota vody při zkušební teplotě stanovená s přesností na $0,1 \text{ kg/m}^3$

Stanovení objemových hmotností a míry zhutnění bylo provedeno jen na deskách tloušťky 4 cm, a to z důvodů opravdu nízké tloušťky a křehkosti desek tl. 2 cm.



Tabulka 35: Stanovené hodnoty míry zhutnění desek

	BBTM 5B		BBTM 8A		AUTL 8	
	Deska 1	Deska 2	Deska 1	Deska 2	Deska 1	Deska 2
Průměrná tloušťka (mm)	40,14	40,72	40,19	40,32	40,50	40,04
m_1 (g)	6898,7	6897,5	7846,1	7832,2	7497,9	7491,8
m_2 (g)	3866,3	3868,0	4583,8	4552,2	4423,7	4398,1
m_3 (g)	7126,2	7138,0	7877,1	7873,5	7665,0	7642,8
$\rho_{\text{bssd,těleso}}$ (kg/m^3)	2077,1		2359,7		2256,0	
$\rho_{\text{bssd,deska}}$ (kg/m^3)	2112,8	2105,9	2378,2	2353,9	2309,1	2304,8
Míra zhutnění (%)	101,7	101,4	100,8	99,8	102,4	102,2
$\rho_{\text{bdry,těleso}}$ (kg/m^3)	2266,4		-----		2408,6	
$\rho_{\text{bdry,deska}}$ (kg/m^3)	2271,3	2273,1	-----	-----	2434,6	2417,3
Míra zhutnění (%)	100,2	100,3	-----	-----	101,1	100,4

Obrázek 43: Vyrobené desky směsi BBTM 5A (4 cm)



Zdroj: Vlastní fotodokumentace

Zkouška vyjetí kolem spočívá v uložení vyhotovených desek do zkušební formy, následné temperaci v temperovací komoře při teplotě 60 °C po dobu minimálně 4h a pojíždění kolem uprostřed desky za stálé teploty. Zkouška byla tvořena 10 000 zatěžovacími cykly. Jeden zatěžovací cyklus se skládá ze dvou pojezdů zatěžovacího kola (tam a zpět). Výsledky odolnosti proti trvalým deformacím jsou uvedeny v Tabulce 36. Jelikož se v normách ČSN EN 13108-9 [11] a ČSN EN 13108-2 [14] nenacházejí hodnoty pro maximální poměrnou hloubku koleje PRD_{AIR} (%) po 5 000 cyklech ani pro maximální přírůstek hloubky koleje WTS_{AIR} ($\text{mm}/10^3$ cyklů), byla k porovnání využita norma ČSN EN 13108-5 [63], která dané hodnoty stanovuje



pro SMA 11S (tyto mezní hodnoty jsou uvedeny taktěž v Tabulce 36 (tučné zvýraznění)).

Tabulka 36: Výsledné hodnoty odolnosti proti trvalým deformacím

	Tl. desky	WTS _{AIR}	PRD _{AIR}
	(cm)	(mm)	(%)
BBTM 5B	4	1,086	8,7
	2	0,008	2,5
BBTM 8A	4	0,013	1,8
	2	0,038	3,5
AUTL 8	4	0,020	1,8
	2	0,061	4,0
SMA 11S	-----	0,070	5,0

Obrázek 44: Vyjeté koleje směsi BBTM 5B a AUTL 8 (desky tl. 4 cm)



Zdroj: Vlastní fotodokumentace



Při zkoušce vyjetí kolem dopadla nejhůře směs BBTM 5B (4 cm), u které došlo k vytvoření nadměrných kolejí (Obrázek 44 – směs BBTM 5B). Tato směs nesplnila stanovenou maximální hloubku vyjetí kolem. Velice překvapivého výsledku dospěla směs BBTM 5B (2 cm), ačkoliv jedna z desek se při zkoušce drolila, a proto nebyla zahrnuta do výpočtu, u druhé desky nedošlo k tak velikým deformacím a celkově směs vyšla dobře (Obrázek 45). Je na uvážení, zda se dá výsledek směsi BBTM 5B (2 cm) brát v potaz, protože prozatím není moc zkušeností s testováním a vyhodnocením zkoušek vyjetí kolem na deskách tloušťky do 2 cm. Také mohlo dojít k chybě měřicího zařízení.

U směsí BBTM 8A (4 cm, 2 cm) i AUTL 8 (4 cm, 2 cm) dopadly výsledky velice pozitivně. Stanovené výsledky PRD_{AIR} a WTS_{AIR} byly pod maximální povolenou hodnotou. Po odzkoušení desek tloušťky 4 cm nebyly na povrchu patrné vyjeté koleje (Obrázek 44 – směs AUTL 8). U směsi AUTL 8 (2 cm) již byly patrnější vyjeté koleje, ale stále to bylo v rámci mezí (Obrázek 46).

Obrázek 45: Vyjeté koleje směsi BBTM 5B a BBTM 8A (desky tl. 2 cm)



Zdroj: Vlastní fotodokumentace



Obrázek 46: Vyjetí kolem směsi AUTL 8 (deska tl. 2 cm)



Zdroj: Vlastní fotodokumentace



Závěr

Cílem této práce bylo vytvoření uceleného pohledu na tenké a ultratenké asfaltové vrstvy pokládané za horka i za studena, jelikož prozatím nedochází k využití jejich potenciálu. Snahou stavebních inženýrů je neustálý vývoj netuhých vozovek a právě problematika tenkých a ultratenkých asfaltových vrstev je jedním z hlavních směrů, kudy se mohou v budoucnu vydat. Pro zvýšení využívání těchto směsí je zapotřebí získávat nové poznatky z laboratorních zkoušek a zkušenosti z pokusných úseků a následně z reálných projektů.

V teoretické části byly nejdříve popsány tenkovrstvé obrusné úpravy v obecné rovině a poté směsi typu BBTM, SMA nebo směsi využívající pryžový granulát, které jsou v ČR již nějakou dobu známé a pokládané. Taktéž ale byla popsána asfaltová směs pro ultratenké vrstvy z asfaltového betonu (AUTL), která je v ČR zatím jen málo známým typem asfaltové směsi. Proto bylo zapotřebí čerpat podklady zejména ze zahraničních studií, které byly publikovány ve Francii, USA, Německu nebo Velké Británii. V kapitole popisující náklady životního cyklu asfaltové vozovky byla pozornost upřena zejména na možnosti snižování nákladů v souvislosti s využitím tenkých obrusných vrstev. Byly zde porovnávány tenké obrusné vrstvy s klasickými typy vrstev jako je ACO nebo SMA.

Kapitola zabývající se obrusnými vrstvami pokládanými za studena byla věnována popisu základních výrobních principů asfaltových emulzí, rozdílů a využití kationtaktivních a aniontaktivních asfaltových emulzí a zabývala se pokládkou a využitím asfaltových emulzí v silničním stavitelství. V této kapitole jsou využity také poznatky autora, které byly získány při osobní exkurzi ve společnosti EUROVIA CS – odštěpný závod Emulze Kolín a při účasti na pokládce emulzního mikrokoberce na silničním okruhu kolem Prahy, na části 517 ve směru na Ruzyň.



V praktické části se tato práce zabývala návrhem směsí AUTL 8, BBTM 5B a BBTM 8A. Vzhledem k chybějící národní příloze normy ČSN EN 13108-9 (736140), která by stanovovala základní návrhové parametry směsi AUTL, byl návrh AUTL 8 založen na zkušenostech získaných ze zahraničí (Francie, Německo a USA). Pro stanovení základní čáry zrnitosti kameniva a obsahu asfaltového pojiva byla také využita spolupráce se společností EUROVIA CS, kdy návrh směsi AUTL vznikl na základě jejich doporučení a zkušeností získaných ve Francii.

K návrhu směsi AUTL 8 bylo využito kamenivo z lomu Sykořice frakce 4/8, 2/5 a 0/2 a k návrhu směsí BBTM kamenivo z lomu Zbraslav frakce 4/8, 2/5 a 0/4 a z lomu Lašovice frakce 0/4. Vápenná moučka, neboli filer byl získán z lomu Velké Hydčice. Dále bylo použito polymerem modifikované asfaltové pojivo PMB 45/80 – 65. Vzhledem k tomu, že se jednalo o tenké obrusné vrstvy, byla do směsi přidávána organická vlákna společnosti CIUR. Návrhy každé směsi byly minimálně jednou optimalizovány, protože stanovené mezerovitosti se nenacházely v normou stanoveném rozpětí.

Tabulka 37: Návrh směsí - souhrn

	Zbraslav 2/5	Zbraslav 0/4	Lašovice 0/4	Filer	Organické vlákno	Asfaltové pojivo	Mezerovitost
BBTM 5B	77 %	10 %	10 %	3 %	0,3 %	6,2 %	14,7 %

	Zbraslav 4/8	Lašovice 0/4	Filer	Organické vlákno	Asfaltové pojivo	Mezerovitost
BBTM 8A	58 %	39 %	3 %	0,3 %	6,2 %	3,9 %

	Sýkořice 4/8	Sýkořice 2/5	Sýkořice 0/2	Filer	Organické vlákno	Asfaltové pojivo	Mezerovitost
AUTL 8	80 %	5 %	10 %	5 %	0,3 %	5,7 %	12,5 %

Zdroj: Vlastní zpracování

Pro základní vyhodnocení a porovnání navržených směsí byly zkoumány čtyři základní laboratorní vlastnosti asfaltových směsí (tuhost, odolnost vůči lomu, odolnost vůči působení vody a odolnost proti vzniku trvalých deformací). Pro provedení všech zkoušek bylo vyrobeno celkově cca 135 kg asfaltových směsí.



Tuhost asfaltových směsí byla stanovena pomocí zkoušky v příčném tahu na válcových zkušebních tělesech při třech různých teplotách (0, 15, 27 °C). Při každé teplotě byla nejvyšší tuhost naměřena u směsi BBTM 8A, což bylo dáno vyšším obsahem asfaltového pojiva a nižší mezerovitostí směsi. Stanovené moduly tuhosti při 15 °C byly posouzeny s minimálními hodnotami uvedenými v TP 170 a všechny navržené směsi obstály, ačkoliv u směsi AUTL 8 (modul tuhosti při teplotě 15 °C = 5662 MPa) bylo předpokládáno, že bude dosaženo vyšších hodnot modulu tuhosti. Je si ale zapotřebí uvědomit, že směsi s vyšším modulem tuhosti se stávají za nízkých teplot křehčí a tím pádem náchylnější ke vzniku mrazových trhlin. Obrusné vrstvy jsou vystaveny přímo zatížení dopravou a klimatickými podmínkami, proto u nich musí být náležitě skloubena jak odolnost proti vzniku mrazových trhlin, tak odolnost proti vzniku plastické deformace.

Odolnost asfaltové směsi proti porušení lomem byla stanovena pomocí zkoušky šíření trhliny na půlválcových zkušebních tělesech při teplotě 0 °C. Tato zkouška je stále brána jako zkouška popisující chování asfaltové směsi v oboru nízkých teplot. Ze zkoušky opět vyšla nejlépe směs BBTM 8A s kritickou hodnotou lomové houževnatosti při porušení 45,07 N/mm^{3/2}. U směsi AUTL 8 byly naměřeny kritické hodnoty 28,25 N/mm^{3/2}, což odpovídá zvýšené mezerovitosti v porovnání s BBTM 8A, kdy vzniku trhliny odolává méně soudržná asfaltová směs.

Tělesa od každé navržené směsi byla podrobena dlouhodobému stárnutí, které bylo simulováno vložením těles do teplotní komory a jejich vystavením teplotě 85 °C po dobu pěti dní. Na těchto tělesech byly opět provedeny zkoušky na určení modulu tuhosti a lomové houževnatosti. Dle předpokladů se tuhost u všech směsí zvýšila. Stárnutí se nejvíce projevilo u směsi BBTM 5B s indexem stárnutí 1,524. Směs AUTL 8 vykazala index stárnutí 1,412 a byla nejméně náchylná ke stárnutí. To bylo podpořeno i tím, že u směsi AUTL 8A byla na zestárlých tělesech naměřena hodnota lomové houževnatosti nižší, což neodpovídalo prvotním předpokladům.

Odolnost vůči působení vody (ITSR), stanovená pomocí zkoušky pevnosti v příčném tahu, byla provedena dle americké normy AASHTO, kdy byla tělesa kromě vystavení



působení vody podrobena i zmrazovacímu cyklu. U všech směsí byla stanovena hodnota ITSR a výsledky dopadly velice dobře (BBTM 5B – 93,6 %, BBTM 8A – 94,0 % a AUTL 8 – 90,9 %). U obou směsí BBTM byly stanoveny hodnoty odolnosti vůči mrazu ITSR_f nižší oproti hodnotám odolnosti proti působení vody. Je velice zajímavé, že u směsi AUTL tomu bylo právě naopak a odolnost proti mrazu ITSR_f byla vyšší o 2,7 %.

Odolnost proti vzniku trvalých deformací byla stanovena pomocí zkoušky pojíždění kolem na deskách tloušťky 4 a 2 cm. Směs AUTL 8 vykázala velice uspokojivé výsledky odolnosti proti trvalým deformacím, kdy hodnoty pro maximální poměrnou hloubku koleje PRD_{AIR} (%) po 5 000 cyklech a hodnoty pro maximální přírůstek hloubky koleje WTS_{AIR} (mm/10³ cyklů) byly porovnatelné s hodnotami u směsi BBTM 8A. Jelikož nejsou v normách pro směsi AUTL 8 ani pro BBTM 8 stanoveny žádné minimální hodnoty, podle kterých by se dala zkouška vyjetí kolem posuzovat, byly naměřené hodnoty posuzovány dle požadavků uvedených v normě ČSN EN 13108-5 pro směsi SMA 11. Směsi AUTL 8 a BBTM 8A tyto požadavky splnily jak na deskách tloušťky 4 cm, tak i na deskách tloušťky 2 cm.

Získané zkušenosti s návrhem směsi AUTL a jejich laboratorní výsledky mohou tvořit základ pro budoucí vývoj. Je zapotřebí nadále systematicky shromažďovat podklady o tenkovrstvých úpravách, rozšiřovat povědomí o vhodnosti využití, vytvářet nové návrhy, provádět další laboratorní zkoušky a následně tyto tenké obrusné vrstvy pokládat na zkušebních úsecích. Jednou z hlavních neznámých u směsí typu AUTL je totiž jejich životnost a pro její získání je nezbytná praktická zkušenost s ultratenkými povrchy.



Seznam tabulek

Tabulka 1: Přehled poruch, příslušných technologií údržby a předpisů.....	12
Tabulka 2: Orientační předpokládané doby životnosti údržby obrusných vrstev vozovek v letech v závislosti na třídě dopravního zatížení.....	13
Tabulka 3: Využitelnost TAL na různých typech komunikací.....	21
Tabulka 4: Doba uvolnění provedené úpravy pro dopravu	55
Tabulka 5: Předpokládaná doba životnosti emulzních kalových zákrytů.....	57
Tabulka 6: Předpokládaná doba životnosti emulzních mikrokoberců.....	59
Tabulka 7: Označení nátěrových technologií	65
Tabulka 8: Síťový rozbor kameniva pro návrh směsí BBTM*	69
Tabulka 9: Síťový rozbor kameniva pro návrh směsí BBTM	70
Tabulka 10: Síťový rozbor kameniva pro návrh směsi AUTL.....	71
Tabulka 11: Návrh směsi BBTM 5B	75
Tabulka 12: Stanovení mezerovitosti BBTM 5BBBTM 5B	76
Tabulka 13: Návrh směsi BBTM 5B - optimalizace A	77
Tabulka 14: Stanovení mezerovitosti BBTM 5B - optimalizace A.....	77
Tabulka 15: Návrh směsi BBTM 8A.....	78
Tabulka 16: Stanovení mezerovitosti BBTM 8A	79
Tabulka 17: Návrh směsi BBTM 8A - optimalizace B	80
Tabulka 18: Návrh směsi BBTM 8A - optimalizace C	80
Tabulka 19: Stanovení mezerovitosti BBTM 8A - optimalizace B a C	80
Tabulka 20: Návrh směsi BBTM 8A - optimalizace D	81
Tabulka 21: Stanovení mezerovitosti BBTM 8A - optimalizace D.....	81
Tabulka 22: Návrh směsi AUTL 8	83
Tabulka 23: Stanovení mezerovitosti AUTL 8.....	84
Tabulka 24: Stanovení objemové hmotnosti parafínu	86
Tabulka 25: Stanovení mezerovitosti AUTL 8 - utěsněné zkušební těleso.....	88
Tabulka 26: Návrh směsí - souhrn.....	88
Tabulka 27: Vyrobená tělesa pro laboratorní zkoušky.	91



Tabulka 28: Základní parametry asfaltových směsí pro porovnání.....	92
Tabulka 29: Stanovené moduly tuhosti	95
Tabulka 30: Stanovené moduly tuhosti (se stárnutím)	97
Tabulka 31: Index stárnutí	97
Tabulka 32: Stanovené hodnoty odolnosti proti lomu ($N/mm^{3/2}$) a spotřebované energie (J)	101
Tabulka 33: Stanovené hodnoty odolnosti proti lomu ($N/mm^{3/2}$) a spotřebované energie (J) - stárnutí	102
Tabulka 34: Stanovené hodnoty odolnosti vůči vodě.....	106
Tabulka 35: Stanovené hodnoty míry zhutnění desek	108
Tabulka 36: Výsledné hodnoty odolnosti proti trvalým deformacím.....	109
Tabulka 37: Návrh směsí - souhrn	113



Seznam grafů

Graf 1: Struktura nákladu životního cyklu průměrné dálniční stavby v USA (2015)	15
Graf 2: Plocha využití TAL ve vybraných zemích do roku 2010 (v mil. m ²)	20
Graf 3: Čára zrnitostí kameniva vybraných typů směsí AUTL v porovnání s BBTM 8.24	
Graf 4: Naměřené hodnoty ekvivalentní hladiny akustického tlaku na různých typech obrusných vrstev v Dánsku	27
Graf 5: Obor zrnitosti asfaltové směsi BBTM 8A a BBTM 8B	29
Graf 6: Rozdíl oboru zrnitosti asfaltové směsi BBTM 8B a BBTM 8 NH	34
Graf 7: Srovnání naměřených hodnot ekvivalentní hladiny akustického tlaku A před a po čištění (obrusná vrstva Viaphone)	35
Graf 8: Vývoj výroby asfaltových emulzí ve Francii (1946 - 1972)	47
Graf 9: Emulzní kalový zákryt - diagram změny součinitele tření Fp v čase	57
Graf 10: Čára zrnitosti kameniva pro návrh BBTM*	70
Graf 11: Čára zrnitosti kameniva pro návrh BBTM	70
Graf 12: Čára zrnitosti kameniva pro návrh směsi AUTL	71
Graf 13: Křivka zrnitosti BBTM 5B	75
Graf 14: Křivka zrnitosti BBTM 8A	78
Graf 15: Křivka zrnitosti AUTL 8 v porovnání se zahraničními zkušenostmi	84
Graf 16: Moduly tuhosti stanovené při 15°C	96
Graf 17: Průběh zatěžovacích cyklů stanovený dataloggerem (AUTL 8 a BBTM 8A)	100
Graf 18: Porovnání výsledků odolnosti proti lomu na tělesech nezestárých a zestárých	103



Seznam obrázků

Obrázek 1: Struktura nákladů životního cyklu	14
Obrázek 2: Životnost vybraných obrusných vrstev	17
Obrázek 3: Propojení vrstev pomocí vzlínání asfaltové emulze.....	25
Obrázek 4: Finišer se sestavou trysek pro rozstřík spojovacího postříku.....	26
Obrázek 5: Hlavní zdroje hluku u osobního automobilu	31
Obrázek 6: Struktury různých typů asfaltových směsí	32
Obrázek 7: Detail povrchu Viaphone (BBTM NH) před a po čištění	35
Obrázek 8: Výrobní proces CRmB (Continuous Blend)	37
Obrázek 9: Blender	38
Obrázek 10: Typické rozdělení velikosti asfaltových částic v asfaltové emulzi	43
Obrázek 11: Schematické znázornění aniontaktivní povrchové látky	44
Obrázek 12: Schematické znázornění kationtaktivní povrchové látky.....	45
Obrázek 13: Reakce sekundárního aminu s HCl	45
Obrázek 14: Schéma kationtaktivní asfaltové emulze	46
Obrázek 15: Štěpení KAE.....	47
Obrázek 16: Schéma aniontaktivní asfaltové emulze	49
Obrázek 17: Zjednodušené schéma výroby asfaltové emulze	50
Obrázek 18: Zjednodušené schéma koloidního mlýnu	51
Obrázek 19: Míchací zařízení a kladecí rám	52
Obrázek 20: Štěpení kationtaktivní asfaltové emulze.....	53
Obrázek 21: Pokládka studené asfaltové směsi	54
Obrázek 22: Pokládka mikrokoberce typu MULTIMAC®	60
Obrázek 23: Postup při opravě výtluku	62
Obrázek 24: Rozprostírací rampa rozstříkovače.....	63
Obrázek 25: Typy prováděných nátěrů.....	64
Obrázek 26: Příklad pro zkoušku kroužek a kulička.....	67
Obrázek 27: Penetrometr	67



Obrázek 28: Sestava „Kroužek kulička“	68
Obrázek 29: Bod měknutí	68
Obrázek 31: Marshallova tělesa BBTM 8A a AUTL 8	82
Obrázek 30: Marshallova tělesa BBTM 5B.....	82
Obrázek 32: Guy-Lussacův pyknometr pro zjištění obj. hm. parafínu.....	85
Obrázek 33: Úprava parafínu do kostek	86
Obrázek 34: Pyknometr s parafínem	87
Obrázek 35: Utěsněné marshallovo těleso.....	87
Obrázek 36: Lamelový zhutňovač desek	90
Obrázek 37: Zkušební sestava pro stanovení modulu tuhosti.....	94
Obrázek 38: Obalení těles ocelovou síťovinou.....	97
Obrázek 39: Půlválcová zkušební tělesa opatřená drážkou	99
Obrázek 40: Zkušební zatěžovací zařízení	100
Obrázek 41: Zkušební tělesa po odzkoušení.....	101
Obrázek 42: Zkušební zařízení pro stanovení ITS.....	105
Obrázek 43: Vyrobené desky směsi BBTM 5A (4 cm).....	108
Obrázek 44: Vyjeté koleje směsi BBTM 5B a AUTL 8 (desky tl. 4 cm).....	109
Obrázek 45: Vyjeté koleje směsi BBTM 5B a BBTM 8A (desky tl. 2 cm)	110
Obrázek 46: Vyjetí kolem směsi AUTL 8 (deska tl. 2 cm)	111



Seznam použité literatury

- [1] RACEK, Ivan. *Nové technologie výstavby pozemních komunikací, zkušenosti ze zahraničí*. Časopis Stavebnictví. 2007(06-7).
Dostupné z: https://www.casopisstavebnictvi.cz/nove-technologie-vystavby-pozemnich-komunikaci-zkusenosti-ze-zahranici_N281
- [2] TP 87 – *Navrhování údržby a oprav netuhých vozovek*. 03/2010
- [3] GSCHWENDT, Ivan a kolektiv. *VOZOVKY – Materiály a technologie*. Bratislava: Jaga group, v. o. s., 2001, 205 s. ISBN 80-88905-52-4
- [4] SCHNEIDEROVÁ HERALDOVÁ, Renáta a kolektiv. *Analýza nákladů životního cyklu dopravních staveb*[online]. In: Centre for Effective and Sustainable Transport Infrastructure (CESTI): WP7, Workshop CESTI 2015. [cit. 2019-03-21]. Dostupné z: <http://www.cesti.cz/wc15/CESTI2015.pdf>
- [5] Interní zdroj EUROVIA CS
- [6] TP 170 – *Navrhování vozovek pozemních komunikací*. 12/2004
- [7] FILIP, Hanzík. Příspěvek k výběru konstrukcí asfaltových vozovek z hlediska celkových nákladů životního cyklu. In: *Konference Projektování pozemních komunikací* [online]. [cit. 2019-04-19].
Dostupné z: <https://docplayer.cz/107688243-Konference-projektovani-pozemnich-komunikaci-prispevek-k-vyberu-konstrukci-celkovych-nakladu-zivotniho-cyklu-ing-filip-hanzik-ph-d.html>
- [8] Danish road institute (DRI), Belgian road research centre (BRRC) and Swedish national road and transport research institute (VTI). *OPTHINAL: Optimization of Thin Asphalt Layers (Final Report March 2011)* [online]. In: . 2011, 30.11.2011, s. 82 [cit. 2018-11-13].
Dostupné z: <http://vti.diva-portal.org/smash/get/diva2:674028/FULLTEXT02.pdf>
- [9] VALENTIN, Jan a Monika CHMELÍKOVÁ. *Výchozí návrhy asfaltových směsí pro tenké obrusné vrstvy s využitím směsí SMA či BBTM*. In: Centre for Effective and Sustainable Transport Infrastructure (CESTI): WP1 pozemní komunikace - inteligentní a trvanlivá technologická řešení s vysokou technickou účinností [online]. 2016 [cit. 2018-11-15].
Dostupné z: http://www.cesti.cz/technicke_listy/tl2016/2016_WP1_TL1_03.pdf



- [10] BELLANGER, J., Y. BROSSEAUD a J.L. GOURDON. *Thinner and Thinner Asphalt Layers for Maintenance of French Roads* [online]. In: . Transportation Research Board, 1992, 5.8.1993, s. 9-11 [cit. 2019-01-05]. ISBN 0309052025. ISSN 0361-1981.
Dostupné z: <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1992/1334/1334-002.pdf>
- [11] ČSN EN 13108-9 (736140) *Asfaltové směsi - Specifikace pro materiály - Část 9: Asfaltová směs pro ultratenké vrstvy z asfaltového betonu (AUTL)*. 01/2018.
- [12] KÜNNING, Carsten. *Qualitätssicherung bei Dünnen Asphaltdeckschichten in Heißbauweise* [online]. In: . Magdeburg, 24.4.2014 [cit. 2019-01-12].
Dostupné z:
https://www.asphalt.de/fileadmin/user_upload/asphaltberatung/downloads/2014_b_dsh-vdnen_asphaltdeckschichten_in_heibauweise_vgele.pdf
- [13] Technical Note 76: ULTRA THIN ASPHALT (UTA). In: *GEOPAVE - Materials technology* [online]. 6/2006, s. 2 [cit. 2019-01-12].
Dostupné z: <https://www.vicroads.vic.gov.au/-/media/files/technical-documents-new/technical-notes/technical-note-tn-076--ultra-thin-asphalt.ashx>
- [14] ČSN EN 13108-2 (736140) *Asfaltové směsi - Specifikace pro materiály - Část 2: Asfaltový beton pro velmi tenké vrstvy*. 03/2008.
- [15] BROSSEAUD, Yves. *Adhérence des revêtements en service: Adhérence et matériaux* [online]. In: Paris: Laboratoire central des ponts et chaussées, 19.7.2005 [cit. 2019-01-12].
Dostupné z: http://media.lcpc.fr/ext/pdf/sem/2005_secu_19-07.pdf
- [16] BENDTSEN, Hans a Erik NIELSEN. *Danish Road Institute - Technical note 36: Noise reducing thin layers - Promising concepts*[online]. In: Road Directorate, Danish Road Institute, Prosinec 2005 [cit. 2019-01-12]. ISBN 87-91177-81-2. Dostupné z:
http://www.vejdirektoratet.dk/DA/viden_og_data/publikationer/Lists/Publikationer/Attachments/241/not36vi.pdf
- [17] ANDERSON, Paul. *Application of Ultra Thin Asphalt* [online]. In: [cit. 2019-01-12].
Dostupné z: http://www.reaaa.co.nz/wp-content/uploads/bsk-pdf-manager/Application-of-Ultra-Thin-Asphalt-paul-anderson_232.pdf



- [18] O'FLAHERTY, Coleman. *Highways: The locations, Design, Construction & Maintenance of Pavements* [online]. 4. vydání. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002 [cit. 2019-01-16]. ISBN 978-0-7506-5090-8.
- Dostupné z:
https://books.google.cz/books?id=PHdeM5szL6gC&pg=PA512&lpg=PA512&dq=UTHMAL+france&source=bl&ots=Ap7G8TPa5f&sig=QLw1ytYB4JNcxil-j1dqSb3aF08&hl=cs&sa=X&ved=2ahUKEwj8svf14_LfAhXIaVAKHWhfAUAQ6AEwAHoECAAQAQ#v=onepage&q=UTHMAL%20france&f=false
- [19] MONDSCHNEIN, Petr a Jan VALENTIN. *Snižování hluku možnými úpravami obrusné vrstvy vozovky*. SILNICE ŽELEZNICE [online]. 2010 [cit. 2019-01-20]. ISSN 1803-8441.
- Dostupné z: <http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/snizovanihluku-moznymi-upravami-obrusne-vrstvy-vozovky/>
- [20] BEUVING, Egbert. *Use of SMA in Europe* [online]. In: . Japan: EAPA - EUROPEAN ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION, 2/2018 [cit. 2019-01-20].
- Dostupné z:
[http://hosou.hscet.com/img/SMA%20presentation%20Japan%202018%20Egbert%20Beuving\(2\).pdf](http://hosou.hscet.com/img/SMA%20presentation%20Japan%202018%20Egbert%20Beuving(2).pdf)
- [21] MONDSCHNEIN, Petr a Jan VALENTIN. *Snižování hluku možnými úpravami obrusné vrstvy vozovky*. SILNICE ŽELEZNICE [online]. 2010 [cit. 2019-01-21]. ISSN 1803-8441.
- Dostupné z: <http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/snizovani-hluku-moznymi-upravami-obrusne-vrstvy-vozovky/>
- [22] TP 259 – *Asfaltové směsi pro obrusné vrstvy se sníženou hlučností*. 11/2017
- [23] VALENTIN, Jan, Petr MONDSCHNEIN, Petr HÝŽL a Michal VARAUS. *Metodika pro návrh, výrobu a provádění akusticky asfaltových vrstev*. Praha, 2015, 47 s. ISBN 978-80-01-05833-6. Fakulta stavební, ČVUT v Praze
- [24] BUREŠ, Petr a Jiří FIEDLER. *Pokročilé metodiky laboratorního a in-situ měření hluku dopravy: Ověření účinnosti čištění nízkohlučných povrchů*. In: Centre for Effective and Sustainable Transport Infrastructure (CESTI):



- WP5 Ochrana životního prostředí a zelená dopravní infrastruktura [Interní zdroj EUROVIA CS]. 2013. [cit. 2019-01-24].
- [25] SLATINKA, Tomáš. *Akusticky pohltivé asfaltové směsi*. Praha, 2017. Bakalářská práce. ČVUT - České vysoké učení technické. Vedoucí práce Ing. Petr Mondschein, Ph.D.
- [26] NĚMEC, Miroslav, Jiří SYNEK a Rudolf KOŘÍNEK. *Zkušenosti s použitím technologie modifikace asfaltu pryžovým granulátem (CRmB) v praxi na silnicích v Pardubickém kraji*. SILNICE ŽELEZNICE [online]. 2018 [cit. 2019-02-08]. Dostupné z: <http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/zkusenosti-s-pouzitim-technologie-modifikace-asfaltu-pryzovym-granulatem-crmb-v-praxi-na-silnicich-v-pardubickem-kraji/>
- [27] KUDRNA, Jan a Ondřej DAŠEK. *Využití gumoasfaltového pojiva do obrusných vrstev vozovek*. *Časopis stavebnictví* [online]. Informační centrum ČKAIT s.r.o., 7/2007, (6) [cit. 2019-02-05]. Dostupné z: https://www.casopisstavebnictvi.cz/vyuziti-gumoasfaltoveho-pojiva-do-obrusnych-vrstev-vozovek_N277
- [28] Recyklace pneumatik: *Využití a funkce pryžového granulátu v silničním asfaltu - asfalt modifikovaný pryžovým granulátem* [online]. [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: <http://gumoasfalt.cz/recyklace.html>
- [29] VALENTIN, Jan. *Nízkoteplotní asfaltové směsi, nízkohlučné asfaltové směsi, využití CRMB* [online]. Konference – Asfaltové vozovky 2013. [cit. 2019-02-10]. Dostupné na: <http://www.asfaltove-vozovky.cz/av2013/data/tema3-valentin.pdf>
- [30] HEGR, Zdeněk a Petr, ŠPAČEK. *Zkušenosti s realizací asfaltových vrstev s CRmB*. *Silniční obzor*. Praha: Nakladatelství Silniční společnosti, 2017, 78(2), 272-277. ISSN 0322-7154.
- [31] NEEDHAM, D. *Developments in bitumen emulsion mixtures for roads* [online]. Nottingham, 1996 [cit. 2018-09-04]. Dostupné z: <http://eprints.nottingham.ac.uk/11101/1/319925.pdf>. PhD thesis. University of Nottingham. University of Nottingham.



- [32] BO, Peng, Cai CHUNLI, Yin GUANGKAI, Li WENYING a Zhan YAOWEN. *Evaluation system for CO₂ emission of hot asphalt mixture. Journal of Traffic and Transportation Engineering* [online]. 2015, April 2015, 2(2), 116-124 [cit. 2018-09-05].
Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095756415000124>
- [33] ZAJÍČEK, Jan. *Technologie stavby vozovek*. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2014. ISBN 9788087438596.
- [34] PLITZ, Jiří. *Asfaltová pojiva a kationaktivní emulze*. In: *Emulzní technologie (SENS 12)* [online]. Sdružení pro výstavbu silnic [cit. 2018-09-18]. Dostupné z:
<http://www.sdruzeni-silnice.cz/Download.aspx?param=jx3godhnp7M1LWTdfUhReGv3yzUM57B7KejTvDaO4V2%2B1LDN%2BF3LuiZppC8MsaEC2jHPiLq8Np7hXajsl%2Bvs687Iu3PXS5U%2BAiUnnvMhzGm51pNbHaJwiXljbHOe0esfFOegsXW2snZDV1e31mzlyUA9BNg9in1lNkscBly%2Bqg50iZKtTKjmTy0BXkUiACvrfz0NyLZY2BuBCGbJbtjX5MDnAPSkPJeuGuG479FO8tnIcoybAdvCrXJMvvo5ZsXjbfIJemcfFI4vHDvnFFZ%2BsVfgF%2F11B3%2FTyZCUfJ%2FY9aGwVbUojhBfRsZjvT911w18x7Wr2sdUvxysrD84VJk1K0HY5p12302n1nmsYeh0jC3xOOjRDrh6xLtNISLFLS9cmlZCYyb2LMfW%2FXCeFmM0ItQOMX1EW%2BBNgY7jdO%2FRZ5VqnmwxeVry%2BJp8%2FmQThJg3KMmXHB%2BjDjzHDUwcu4UvbhYMpyaKjLawPpbGFSFVFFtJjKxz5HWh9WrQ%2BIjjRDVwPqYlG SFj1RxP82UkX2mhTg%3D%3D&tname=SiteContent.aspx>
- [35] VALENTIN, Jan. *Asfaltové emulze: Specifikace a principy*. Přednáška předmětu: Silniční stavby 4. Praha: ČVUT, FSv, Katedra silničních staveb, 2012. Projekt FRVŠ F1/795/2012; Modernizace a rozšíření výuky předmětu Stavba Pozemních Komunikací. [cit. 2018-09-18].
Dostupné z <http://d2051.fsv.cvut.cz/ss04d.htm>.
- [36] GRÜNNER, Karol. *Asfaltové emulzie pri výstavbe a údržbe ciest*. Harmanec: Bitunova, 2007. ISBN 978-809-6977-154.
- [37] TKP 28 – *Mikrokoberce prováděné za studena*. 03/2008
- [38] ČSN 73 6130 - *Stavba vozovek. Emulzní kalové vrstvy*. 12/2018



- [39] TKP 27 – *Emulzní kalové zákryty*. 02/2015
- [40] VARAUS, Michal. *Konference Asfaltové vozovky 2011: Technologie oprav a údržby vozovek ve správě ŘSD, ve správě krajů a měst* [online]. In: . 23. 11. 2011, s. 64 [cit. 2018-10-26]. Dostupné z: http://www.asfaltove-vozovky.cz/av2011/data/tema3_varaus.pdf
- [41] ŠTEFÍK, Ján. *Emulzní technologie (SENS 12): Emulzné kalové vrstvy* [online]. In: . leden 2017, s. 36 [cit. 2018-10-27]. Dostupné z: <http://www.sdruzeni-silnice.cz/Download.aspx?param=jx3godhnp7M1LWTdfUhReHqObz8hzEjp1cxjbCLqZp%2bl69M1PHXyfu%2bHit91HihSmJNGl6MjpXKR8%2bsCf9eWmoay4Vg%2fpdqhmyW7VhWmTopFA91BLS1X4OeQYArOjS%2bjvYkQaAPTG3KBmhY9XvobIa7xS3sLznaSE8zciIyJRM4PaRuEpyl3Q7R5TQKI7YLYSLSo vHYt2Lp5%2bIGGw%2bpWXJ7aHbAR656ZVGomWRT7gvdYXQOcanXHibHn2aHjygcLUluSiZyFwIx8L3hsuPCOgo%2f9P7vbzB3wCdjyRGlhwuBYX%2fBa24VvkZh4K8ID1Hem%2bFK9gJlivxT%2bzVfeobv2p1g3EH597yRpgQkAWe8kmxttH2MtyCVDYWoJYP41ftpQo4EL1ekbzpkhJkIpm73jKJkQr8kSx9%2bPvdISaLqwXB5MbEVie4trsQhd%2bFDNZiB0uDrCJmxASg0yqq6cGHEH2%2bnaX2pp6fWBPVJ882EhqA9%2b6GxfuaBEOKsxE%2fsRvupKmfRiJTeRXQ1rZfji5YlnQg%3d%3d&tname=SiteContent.aspx>
- [42] EUROVIA SERVICES S.R.O. *GRIPFIBRE®: MIKROKOBBEREC S VELMI DOBRÝMI PROTISMYKOVÝMI VLASTNOSTMI*. Interní zdroj EUROVIA CS, 2014.
- [43] EUROVIA CS, A.S. *EUROVIA CS poprvé použila novou technologii GRIPSEAL® - efektivní řešení v dlouhodobé údržbě silnic. SILNICE ŽELEZNICE* [online]. 15.9.2017 [cit. 2018-11-04]. Dostupné z: <http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/eurovia-cs-poprve-pouzila-novou-technologie-gripseal-efektivni-reseni-v-dlouhodobu-udrzbe-silnic/>
- [44] BITUNOVA SPOL. S R.O. *Mikrokoberce: MULTIMAC® (DSK)* [online]. In: 1.4.2012 [cit. 2018-11-04]. Dostupné z: http://bitunova.cz/databases/internet/_public/content.nsf/web/CZ-BITUNOVA.CZ-duenneschichten.html
- [45] ČSN 73 6129 - *Stavba vozovek. Postřiky a nátěry*. 12/2018



- [46] ČSN EN 1426 (65 7062) – *Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou.* 12/2015.
- [47] ČSN EN 1427 (65 7060) – *Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička.* 12/2015.
- [48] ČSN EN 933-1 (72 1193) – *Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Síťový rozbor.* 06/2012.
- [49] ČSN EN 12697-35 (736160) *Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 35: Laboratorní výroba směsi.* 05/2018.
- [50] ČSN EN 12697-30 (736160) *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem.* 10/2012.
- [51] ČSN EN 12697-29 (736160) *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 29: Stanovení rozměrů asfaltových zkušebních těles.* 07/2003.
- [52] ČSN EN 12697-5 (736160) *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti.* 07/2010.
- [53] ČSN EN 12697-6 (736160) *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa.* 11/2012.
- [54] ČSN EN 12697-8 (736160) *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 8: Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí.* 05/2004.
- [55] ČSN EN 12697-26 (736160) *Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 26: Tuhost.* 05/2019.
- [56] ČSN EN 12697-44 (736160) *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 44: Šíření trhliny zkouškou ohybem na půlválcovém zkušebním tělese.* 03/2011.
- [57] ČSN EN 12697-12 (73 6160) *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 12: Stanovení odolnosti zkušebního tělesa vůči vodě.* 01/2019.
- [58] AASHTO T 283-14 *Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage.* 08/2014.



- [59] ČSN EN 12697-23 (73 6160) *Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 23: Stanovení pevnosti v příčném tahu*. 12/2018.
- [60] ČSN EN 12697-22+A1 (73 6160) *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 22: Zkouška poježdění kolem*. 12/2007.
- [61] ČSN EN 12697-33+A1 (73 6160) *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 33: Příprava zkušebních těles zhutňovačem desek*. 12/2007.
- [62] AASHTO R30-02 *Mixtur Conditioning of Hot Mix Asphalt*.
- [63] ČSN EN 13108-5 (73 6140) *Asfaltové směsi – Specifikace pro materiály – Část 5: Asfaltový koberec mastixový*. 03/2008.
- [64] Výsledky laboratorních zkoušek provedených Silniční laboratoří fakulty stavební ČVUT FSv