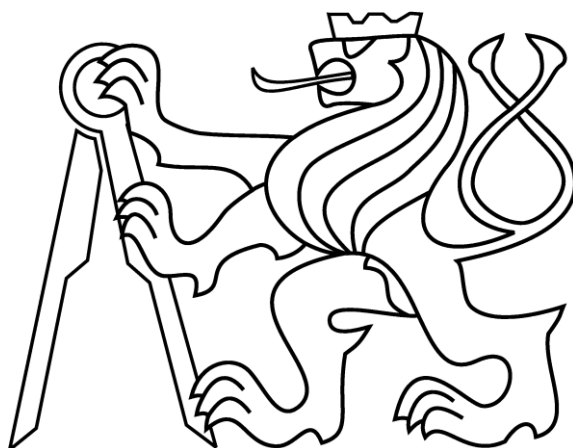


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

KATEDRA SILNIČNÍCH STAVEB

2016



DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Kryty asfaltových vozovek s dlouhou životností a s využitím
tenkých obrusných vrstev**

vypracoval: Bc. Tomáš Král

vedoucí práce: Ing. Jan Valentin, Ph.D.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Král Jméno: Tomáš Osobní číslo: 380862
Zadávací katedra: Katedra silničních staveb
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Kryty asfaltových vozovek s dlouhou životností a s využitím tenkých obrusných vrstev
Název diplomové práce anglicky: Asphalt pavement surfacing with long life-time and the utilization of thin wearing courses
Pokyny pro vypracování:
- řešerše v oblasti tenkých a ultratenkých asfaltových obrusných vrstev a vozovek s dlouhou nebo prodlouženou životností
- zmapování problematiky a rozdílů ložních vrstev s uplatněním směsí typu ACL, VMT, RBL a AC s vlákny
- návrhy směsí ACL16S, VMT 16, RBL 16 a ACL16S s vlákny (využití jednoho typu modifikovaného pojiva)
- provedení empirických a funkčních zkoušek s porovnáním vlastností uvedených směsí
- testování směsí BBTM a SMA se zrnitostí max. 8 mm
- výpočty teoretických konstrukcí vozovek v programu LAYMED
Seznam doporučené literatury:
- technické normy a TP vztahující se k těmto typům směsí
- Partl, M. et al.: Advances in Interlaboratory Testing and Evaluation of Bituminous Materials
Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Jan Valentin, Ph.D.
Datum zadání diplomové práce: 22.02.2016 Termín odevzdání diplomové práce: 22.05.2016

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“.

24.2.2016

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou prací na téma „Kryty asfaltových vozovek s dlouhou životností a s využitím tenkých obrusných vrstev“ vypracoval samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací vedoucího diplomové práce, uvedl veškerý seznam použité literatury a informačních zdrojů, to vše v souladu s Metodickým pokynem č. 1/2009 O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských státních závěrečných prací. Dále prohlašuji, že nemám námitek proti užití této diplomové práce či její části.

V Praze dne

.....

Tomáš Král

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Valentinovi, Ph.D. za jeho cenné rady, připomínky a ochotu pomoci během zpracování této práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Pavle Vackové, Ing. Tereze Valentové a Bc. Janu Mastnému za jejich zkušené rady, ochotu a pomoc při jakémkoliv problému v silniční laboratoři.

ANOTACE

Tato diplomová práce se věnuje vybraným charakteristikám asfaltových směsí typu ACL 16S a VMT 16 a to zejména z pohledu jejich vlivu na životnost vozovky. Úvodní teoretické kapitoly se věnují mapování problematiky vozovek s dlouhou životností zejména z pohledu zahraničních zkušeností. Popisují různé možnosti vyztužování nebo vylepšování podkladních, případně ložních asfaltových vrstev. Dále pak se zabývají analýzou poznatků v oblasti využívání tenkých nebo ultratenkých obrusných vrstev v asfaltovém souvrství s prodlouženou životností. Hlavní část je věnována návrhu, výrobě a zkoušení čtyř asfaltových směsí pro ložní vrstvy vozovek. Dále je v diplomové práci věnován prostor zkoumání vlivu zvýšení obsahu asfaltového pojiva nebo přidání syntetických vláken do směsi na její funkční vlastnosti. Vybranými charakteristikami jsou modul tuhosti (IT-CY), odolnost vůči šíření trhlin na půlválcových tělesech vyjádřená lomovou houževnatostí, citlivost vůči účinkům vody, odolnost vůči vzniku trvalých deformací, pevnost v tahu za ohybu a relaxace asfaltových směsí při nízkých teplotách. Závěrem práce byl proveden teoretický výpočet vozovek s využitím navržených směsí programem Laymed dle TP 170. Pro obrusné vrstvy s aplikací tenkovrstvých asfaltových směsí byla použita data z bakalářské práce Moniky Chmelíkové. Cílem práce je porovnat vlastnosti těchto čtyř směsí a posoudit potenciál prodloužené životnosti, přičemž únavové charakteristiky jsou převzaty z analogických experimentů prováděných na ČVUT v Praze nebo v zahraničí.

Klíčová slova

Asfaltová směs RBL, asfaltová směs VMT, zvýšený obsah asfaltového pojiva, modifikované asfaltové pojivo, příčný tah, modul tuhosti, odolnost vůči šíření trhlin, citlivost vůči účinkům vody, odolnost vůči vzniku trvalých deformací, tah za ohybu, relaxace asfaltových směsí, tenké obrusné vrstvy, asfaltové směsi s vlákny, výpočet konstrukce vozovky

ABSTRACT

This master thesis is devoted to selected characteristics of high modulus asphalt mixtures (VMT) and asphalt concrete. Introductory chapters include theoretical realm of discoursed problem, especially with respect to experience and use of long life pavements abroad. The different possibilities of reinforcing or improving base asphalt layers is described there as well. Further in the theoretical part the thesis deals with the use of thin and ultrathin asphalt wearing courses in the long life pavement concept. The main part of the thesis is devoted to the design, production and testing of four laboratory asphalt mixtures with different contents of bitumen and if applicable the fibers. The effect on performance related characteristics is assessed. The selected material characteristics used and determined in this thesis are stiffness modulus (IT-CY), resistance to crack propagation, water (moisture) susceptibility, resistance to permanent deformation, tensile strength by bending beam test and relaxation of the asphalt mixture. At the end a mechanistic analysis of selected pavement structures is presented using the designed asphalt mixtures for binder course with program Laymed. Properties and parameters of used thin wearing courses are taken from the bachelor thesis of Monika Chmelíková. The object of this thesis is to compare the characteristics of those four asphalt mixtures and evaluate the potential for pavements life extension. Fatigue characteristics necessary for the pavements calculations are derived from analogy experiments done either at CTU in Prague or abroad.

Keywords

Rich Bottom Layer asphalt mixture, HMAC mixture, increase binder content, modified bitumen, indirect tensile test, stiffness modulus, resistance to crack propagation, water susceptibility, resistance to permanent deformation, 3-point beam test, flexural strength, relaxation of asphalt mixture, thin asphalt layers, asphalt mixture with fiber, pavements design calculation

Obsah

1. ÚVOD.....	9
1.1 Cíl práce.....	9
2. TENKÁ OBRUSNÁ VRSTVA	10
2.1 Kompaktní asfalt (Kompakten Asphaltbefestigungen).....	12
2.1.1 Podmínky použití	12
2.1.2 Horké na horké	13
2.2 Technologie DSH-V.....	13
2.3 Asfaltová směs BBTM.....	14
2.4 Asfaltová směs UTLAC.....	15
2.5 Asfaltová směs SMA.....	18
2.6 Asfaltová směs LOA 5D (ACO NH).....	20
2.7 Porovnání asfaltových směsí pro obrusné vrstvy	21
3. PRODLOUŽENÁ ŽIVOTNOST VOZOVKY.....	23
3.1 Skladba souvrství LLP	24
3.1.1 Nestmelená podkladní vrstva	24
3.1.2 Asfaltová podkladní vrstva	25
3.1.3 Asfaltová ložní vrstva.....	25
3.1.4 Asfaltová obrusná vrstva	26
3.2 Plošné vyztužení - výtuzné mříže	27
3.3 Vyztužení vlákný.....	28
3.3.1 Použití polyolefinových a aramidových vláken	28
3.4 Zvýšení obsahu asfaltového pojiva – směsi RBL.....	29
4. EXPERIMENTÁLNÍ VÝROBA A OVĚŘENÍ VLASTNOSTÍ VYBRANÝCH ASFALTOVÝCH SMĚSÍ	31
4.1 Charakteristika vstupních materiálů.....	31
4.1.1 Kamenivo	31
4.1.2 Asfaltové pojivo	32
4.2 Návrh, optimalizace a výroba směsí	33
4.2.1 Návrh směsi	33
4.2.2 Výroba směsi	36
4.2.3 Výroba Marshallových těles	37
4.2.4 Výroba desek	38

4.3	Zkušební metody.....	39
4.3.1	Maximální objemová hmotnost	39
4.3.2	Stanovení objemové hmotnosti zkušebního tělesa vážením ve vodě	40
4.3.3	Mezerovitost asfaltových směsí	40
4.3.4	Měření modulu tuhosti.....	41
4.3.5	Šíření trhliny zkouškou ohybem na půlválcovém tělese	42
4.3.6	Stanovení citlivosti vůči účinkům vody (trvanlivosti asfaltové směsi)	44
4.3.7	Zkouška pojíždění kolem (odolnost proti trvalým deformacím)	46
4.3.8	Zkouška v tahu za ohybu	47
4.3.9	Zkouška relaxace asfaltových směsí	48
4.3.10	Zkouška na laboratorně zestárlých zkušebních tělesech	48
4.3.11	Extrakce asfaltového pojiva z asfaltové směsi	49
4.4	Vyhodnocení zkoušek	50
4.4.1	Měření modulu tuhosti.....	50
4.4.2	Šíření trhliny zkouškou ohybem na půlválcovém tělese	52
4.4.3	Stanovení citlivosti vůči účinkům vody.....	53
4.4.4	Zkouška pojíždění kolem	56
4.4.5	Zkouška pevnosti tahu za ohybu	58
4.4.6	Zkouška relaxace asfaltových směsí při nízkých teplotách	60
4.4.7	Zkoušky provedené na laboratorně zestárlých zkušebních tělesech	61
4.4.8	Extrakce asfaltového pojiva.....	63
5.	POROVNÁNÍ KONSTRUKCÍ VOZOVEK	64
6.	ZÁVĚR	69
	POUŽITÁ LITERATURA.....	71
	SEZNAM TABULEK.....	74
	SEZNAM OBRÁZKŮ	75
	SEZNAM GRAFŮ	76
	PŘÍLOHY	77

1. ÚVOD

V silničním stavitelství jsou kladeny stále větší nároky na úsporu finančních nákladů stavby. Jednou z nejdražších asfaltových směsí, která se při výstavbě vozovek používá, je směs pro obrusné vrstvy. Proto je tu tlak na snižování její tloušťky, která přináší další výhody, jakými jsou například snížení spotřeby asfaltového pojiva a kameniva. Při použití tenkých vrstev dochází i k energetickým úsporám při výrobě, přepravě a pokládce asfaltové směsi. Použitím takovéto technologie tedy můžeme zmenšit negativní dopady na životní prostředí.

Dalším neméně důležitým tématem je celkové zvyšování životnosti vozovek tak, aby z dlouhodobého hlediska byly méně náročné na údržbu a rekonstrukce. Srovnávacím nástrojem jsou náklady životního cyklu vozovky, které vyjadřují investice do výstavby, údržby, oprav a rekonstrukcí vozovky po celou dobu jejího provozu. Správci komunikací by při volbě technologie stavby měli brát v úvahu, nejen to kolik nyní zaplatí za nové stavební dílo, ale to jaké náklady budou mít v budoucnosti se zajištěním provozuschopnosti daného díla.

Uvedenými tématy se zabývá tato diplomová práce nazvaná „Kryty asfaltových vozovek s dlouhou životností a s využitím tenkých obrusných vrstev“. V teoretické části se práce věnuje problematice tenkých a ultratenkých obrusných vrstev. Zmiňuje výhody, nevýhody a zkušenosti s vybranými tenkými obrusnými vrstvami. V následující části se zabývá problematikou prodloužování životnosti asfaltových vozovek a to se zaměřením právě na technická/technologická řešení v ložních a podkladních vrstvách.

1.1 Cíl práce

Hlavním cílem v praktické části práce, je navržení vhodné receptury čtyř asfaltových směsí a výroba zkušebních těles. Na takto vyrobených tělesech byly provedeny vybrané funkční a empirické zkoušky, které byly následně podrobně vyhodnoceny. Stanovena byla objemová hmotnost těles, maximální objemová hmotnost směsi a mezerovitost. Na tělesech byl změřen modul tuhosti při různých teplotách (0, 15, 27 a 40 °C). Na půlválcových tělesech byla stanovena lomová houževnatost při teplotě -10 °C a 0 °C. Na deskách byla provedena zkouška pojíždění kolem. Dále se provedla zkouška v tahu za ohybu a relaxace dle TP 170. Stanovení citlivosti vůči účinkům vody je také obsahem této práce. Výsledky práce byly nakonec použity pro analýzu vybrané konstrukce vozovky v programu Laymed, výstupy z programu jsou v závěru této diplomové práce vyhodnoceny.

2. TENKÁ OBRUSNÁ VRSTVA

Obrusná vrstva je v asfaltovém souvrství vrstvou nejkvalitnější a také nejdražší. Z ekonomických a také ekologických důvodů je tlak na snižování tloušťky této poměrně drahé vrstvy. V roce 1970 se z důvodu ropné krize stala myšlenka snižování spotřeby materiálů, zejména asfaltu a snižování tloušťek asfaltových vrstev, zajímavější. V průběhu dalších let docházelo v této oblasti k dalšímu výzkumu, který byl největší v posledních 20 letech, kdy tenké asfaltové vrstvy byly použity se slibnými výsledky v několika zemích světa.

V zahraniční literatuře se pro označení tenkých obrusných vrstev nejčastěji používá zkratka TAL (Thin Asphalt Layers). Velké využití vozovek s tenkou obrusnou vrstvou je ve Velké Británii, Švýcarsku, Švédsku, Norsku a Nizozemsku. Také v Dánsku a Rakousku se používá TAL poměrně často. Ve Švédsku, Norsku a Švýcarsku se TAL do určité míry používá i pro dálniční síť, zatímco v Nizozemsku a Velké Británii je použití omezeno na krajské a místní komunikace.

Pro návrh a použití směsi je mnoho různých názorů a metodik. Proto se tenké obrusné vrstvy ve světě vyskytují v různých tloušťkách v rozmezí od 10 do 35 mm, jejich mezerovitost je od 1 do 24%. [1] v publikaci ERA-NET road, která se snaží přístup k navrhování TAL sjednotit, se jako tenká obrusná vrstva označuje vrstva od 10 do 30 mm. Obvykle je tloušťka asfaltové vrstvy v rozmezí 2,5 až 4 násobek maximální velikosti zrna kameniva. Zpravidla se tedy pro TAL používá kamenivo do velikosti 11 mm. Případně můžeme použít kamenivo mimo tento velikostní interval, ale musíme mít na paměti, že při pokládce vrstvy tenčí jak 2,5 násobek velikosti kameniva může docházet k problémům s dosažením požadované míry zhutnění a tím ke snížení trvanlivosti vrstvy. Naopak při překročení hranice čtyř násobku velikosti zrna kameniva se v důsledku dopravního zatížení mohou objevit trvalé deformace v této vrstvě.

Použití TAL v souvrství vozovky může mít spoustu výhod. Těmi největšími jsou:

- Rychlejší pokládka, kratší doba uzávěry
- Snížení nákladů
- Zlepšení protismykových vlastností (při nízkých a středních rychlostech)
- Snížení hlukové zátěže
- Snížení produkce CO₂
- U některých typů- pozitivní vliv na redukci rozstříkávání vody

Zlepšení protismykových vlastností můžeme dosáhnout vhodným návrhem křivky zrnitosti asfaltové směsi. Ke snížení produkce CO₂ dochází z důvodu snížení valivého odporu, tím dochází ke snížení spotřeby pohonných hmot. Snížením množství použitého materiálu na jednotku plochy snížíme produkci CO₂, jak na obalovně, tak při dopravě materiálu na stavbu.

Použití TAL má také své nevýhody:

- Při recyklaci se frézováním znehodnocuje materiál
- Kratší živostnost
- Zhoršení protismykových vlastností některých typů TAL za deště
- Snížení pozitivního vlivu na hlukovou zátěž, při zanesení pórů
- Nižší trvanlivost při vysokém zatížení v místech zatížených horizontálními silami (stoupání, klesání, oblasti křižovatek, zatáčky a odstavné plochy)

Tabulka 1: Přehled komerčních verzí tenkých asfaltových vrstev ve Francii, Nizozemsku a Velké Británii [2]

Dubofalt	Novachip	DuraSilent
Nobelpave	Tapisville	Nobelpave HS
ZSM	Fluisterfalt	Deciville
Micropave	Microville	SilentWay
SilentTONE	Decipave	Topfalt
Viagrip	Twinlay-m	Microflex LS
MASTERpave	Stil Mastiek	Microflex HS
Micro-Top 0/6	Bruitville	Microville HS
Micro-Top 0/8	Duolay	Colsoft
Ultraphone	Minifalt	Thinpave
Redufalt	Konwé Stil	UL-M
Accoduit	Rugosoft	Nanosoft

2.1 Kompaktní asfalt (Kompakten Asphaltbefestigungen)

Tato technologie spočívá v pokládce ložní a obrusné vrstvy v jednom pracovním kroku nebo v krátkém časovém sledu. Následně probíhá hutnění obou vrstev současně. Technologii lze dle postupu provádění rozdělit na tři varianty. [3]

Tabulka 2:Varianty pokládky [3]

Varianta	1	2	3
Pokládka	horké na horké		horké na teplé
Potřebné strojní vybavení	1 upravený finišer 1 homogenizátor 1 skupina válců	1 finišer 1 upravený finišer 1 homogenizátor 1 skupina válců	2 finišery 2 skupiny válců
Pojíždění spodní vrstvy	Ne	finišerem pro vrchní vrstvu	nákladní vozy a finišer pro horní vrstvu
Rozestup finišerů	-	konstantní	různý
Využití teplotního potenciálu spodní vrstvy	úplné	skoro úplné	částečné
Spojení vrstev	slepené a zaklíněné		slepené a částečně zaklíněné

První použití varianty 1 s jedním upraveným finišerem (dvě hutnící lišty, dva zásobníky na asfaltovou směs, každý pro jednu směs) bylo v roce 1998 na německé dálnici A7. Použití varianty 2 tzv. „InLine Pave“ je v Německu umožněno od roku 2006.

2.1.1 Podmínky použití

Při rozhodování o použití této metody a volbě varianty pokládky je nutné zohlednit.:

- 1) Dostupnost asfaltových směsí v místě stavby, je nutná výroba dvou různých asfaltových směsí současně
- 2) Jaká bude šířka pokládky a zda bude nebo nebude provedena podélná spára
- 3) Zda je možné pojíždět spodní vrstvu
- 4) Charakteristiky trasy – křivolakost, stoupání

Velká teplotní kapacita pokládaných vrstev umožňuje pokládku při teplotě vzduchu 0°C, pokud na podkladu nejsou zbytky sněhu nebo ledu.

2.1.2 Horké na horké

Metoda „Inline Pave“ - koncept této metody spočívá v pokládce ložní a obrusné vrstvy v jednom pracovním kroku pomocí dvou finišerů jedoucích za sebou. Sestava strojů se skládá z vyhřívaného pásového dopravníku, dvou finišerů a sestavy hutnících válců. Výhodou této technologie oproti běžné pokládce asfaltových vrstev je lepší spojení ložní



Obrázek 1: Detail spojení obrusné a ložní vrstvy [4]

a obrusné vrstvy. Vrstvy nejsou jen „slepeny“, ale jsou také zaklíněny, což má pozitivní vliv na přenos smykových napětí a na životnost vozovky. V Německu byla tato metoda již několikrát použita i pro pokládku tenkých obrusných vrstev. Při pokládce tenké obrusné vrstvy na teplou ložní vrstvu se významně prodlužuje doba, při které můžeme provádět hutnění, vrstva nechladne tak rychle jako při použití běžných postupů. [4]



Obrázek 2: Schéma pokládky Inline Pave [4]

2.2 Technologie DSH-V

Od poloviny osmdesátých let byla vyvíjena tato technologie ve Francii a Dánsku. Slouží k opravě vozovek poničených trhlinami. Metoda spočívá v nanesení těsnící asfaltové emulze a následném položení tenké asfaltové obrusné vrstvy v jednom pracovním kroku. V devadesátých letech byla technologie použita i v Německu, kde byla použita polymerem

modifikovaná asfaltová emulze s 0,4–0,9 kg/m² zbytkového asfaltu a asfaltová směs o velikosti zrna kameniva 5 nebo 8 mm. Od roku 2003 je tato technologie zanesena i v německých stavebních normách. Dle dosavadních zkušeností je životnost této úpravy v závislosti na kvalitě podkladu, počasí a dopravním zatížení 8 až 15 let. [5]

Jako u všech technologií s využitím tenké obrusné vrstvy je nutné docílit perfektního spojení vrstev. Předpokladem pro dlouhou životnost je dostatečná únosnost, čistota a rovinnost podkladní vrstvy.

Finišer je oproti běžné technologii pokládky vybaven nádrží na asfaltovou emulzi a postřikovací lištou, která je schopná rozšíření dle šířky pokládané vrstvy. Rozstřikovací lišta je schopná dávkovat asfaltovou emulzi vysokým tlakem v přesně daném množství těsně před finišer, který následně pokládá asfaltovou směs běžným způsobem. Finišer lze použít i bez postřikovací lišty k běžné pokládce asfaltových vrstev. [5]

2.3 Asfaltová směs BBTM

BBTM z francouzského (Beton Bitumineux Très Minces) je asfaltová směs pro velmi tenké obrusné vrstvy netuhých a polotuhých vozovek. Byla vyvinuta ve Francii na začátku 90. let minulého století. V zahraničí se tato technologie používala při opravách asfaltových i betonových vozovek. Vrstvy z BBTM jsou zpravidla kladeny v tloušťce 20 - 30 mm. Výroba a návrh směsi se řídí normou ČSN EN 13108-2. Směsi lze rozdělit podle obsahu drobného kameniva do třech skupin s označením:

- A – směsi s vyšším obsahem drobného kameniva a jemných částic
- B – směsi s nižším obsahem drobného kameniva a jemných částic
- C – Směsi s vyšším obsahem drobného kameniva a nejvyšším obsahem jemných částic

Podle tohoto rozdělení je tedy možné vyrobit směs BBTM s mezerovitostí od 2,5 do 15 %. Vhodnou volbou složení směsi jsme schopni redukovat hlukovou zátěž nebo zlepšovat protismykové vlastnosti obrusné vrstvy. V závislosti na třídě dopravního zatížení je možné použít různé druhy modifikovaných nebo nemodifikovaných asfaltových pojiv. Tento typ obrusné vrstvy se nezdávka používá k omezení hlukové zátěže, typické snížení hluku se pohybuje kolem 3 dB. Směsi BBTM s mezerovitostí 15 %, které mají čáru zrnitosti podobnou drenážnímu koberci, se nerealizují s cílem zlepšit drenážní schopnosti, ale mezerovitá struktura povrchu umožňuje snižovat air-pumping efekt, bohužel se tyto relativně malé

mezery rychle zanáší a po čase se musí pro obnovu protihlukových vlastností celá vrstva vyměnit. [6]



Obrázek 3: Povrch BBTM 5B [7]

Za dalšího zástupce tohoto typu tenkovrstvé úpravy lze považovat tenké asfaltové koberce s označením Rugosoft, jež jsou patentovanou technologií francouzské společnosti COLAS, která za tuto technologii získala v roce 2003 ocenění od Mezinárodní silniční federace. Dle dostupných informací umožňují snižování hluku až o 7 dB. Tato směs se provádí zpravidla v tloušťce 20–30 mm a existují zkušenosti s jejím použitím v extravilánu i intravilánu. [6] [8]

Další komerční směs, která splňuje standardy asfaltového betonu pro velmi tenké vrstvy a současně má vylepšené akustické charakteristiky je směs Viaphone firmy Eurovia. Tato směs se pokládá v tloušťce 20-30 mm. Viaphone je směs s přerušenou křivkou zrnitosti v oblasti 2 – 4 mm a s vysokým obsahem hrubého kameniva frakce 4/6 nebo 4/8. Jako pojivo se používá silniční asfalt s přídavkem organických vláken, lze také použít polymery modifikovaný asfalt. [9]

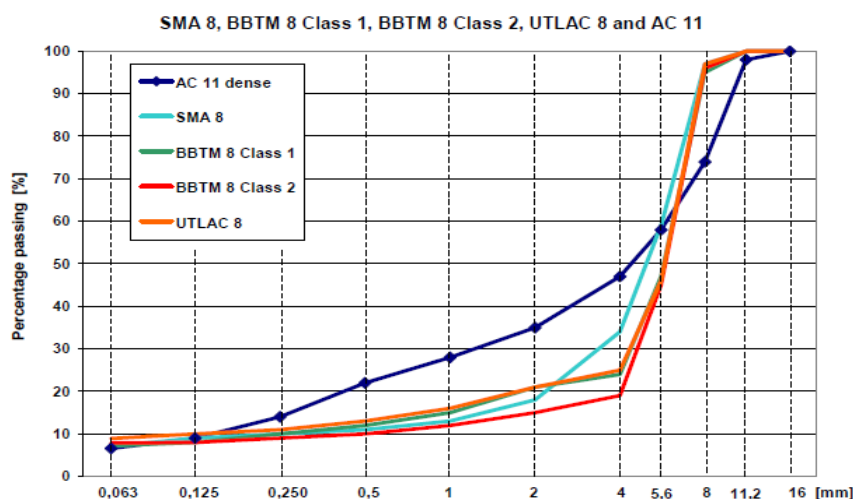
2.4 Asfaltová směs UTLAC

Předpokladem pro kvalitní provedení obrusné vrstvy UTLAC (Ultra Thin Layer Asphalt Concrete) je pokládka na rovný suchý očištěný povrch, který nevykazuje známky snížené únosnosti. Je možné tuto úpravu provést na povrch poškozený



Obrázek 4: Povrch UTLAC 8- šachovnice je 10x10mm [8]

trhlinami, ale tyto trhliny musí vzniknout v důsledku stárnutí pojiva. Technologie UTLAC kombinuje ochranu membránu spolu s tenkým asfaltovým kobercem, jejichž provedení probíhá v jednom pracovním kroku. Pokládku vrstvy provádí speciální finišer vybavený postřikovací lištou, která dávkuje polymerem modifikovanou asfaltovou emulzi s obsahem až 70 % zbytkového asfaltu přímo před „žehličku“ finišeru. Na takto provedenou membránu finišer ihned pokládá asfaltovou směs v tloušťce 10 – 20 mm.



Obrázek 5: Srovnání čar zrnitosti TAL v Dánsku se směsí ACO 11 [2]

Na obrázku 5 můžeme vidět, že křivka zrnitosti UTLAC a některých směsí BBTM si jsou velmi podobné. Obě tyto směsi se zároveň podobají japonskému „otevřenému“ SMA. Jediný rozdíl je, že v Japonsku používají větší maximální zrno kameniva, až 13 mm místo 8 nebo 10 mm. Japonské zkušenosti potvrzují vhodnost této směsi do chladného prostředí.

Na obrázku 6 - 10 jsou znázorněny nejčastější poruchy, které se vyskytují na zkušebních nebo standardně realizovaných úsecích zhotovených s využitím směsí typu UTLAC.



Obrázek 6: Ztráta makrotextury [38]



Obrázek 7: Ztráta asfaltového tmelu, hloubková koroze, tvorba výtluku [38]



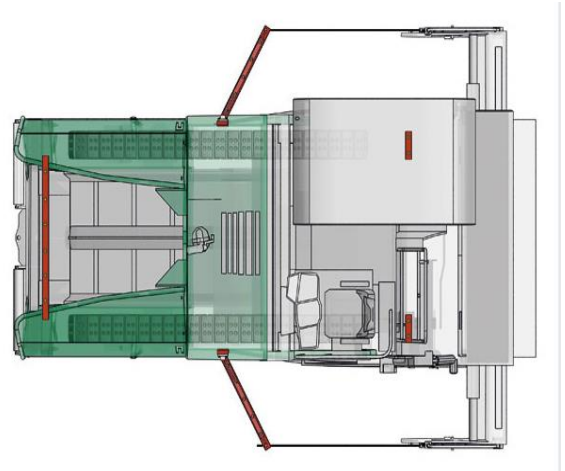
Obrázek 8: Výtluk [38]



Obrázek 9: Ztráta hmoty - hloubková koroze na podélné spáře [38]



Obrázek 10: Nekvalitně provedená příčná spára [39]



Obrázek 11: Finišer Vögele s postřikovými lištami (červené) pro pokládku UTLAC [8]

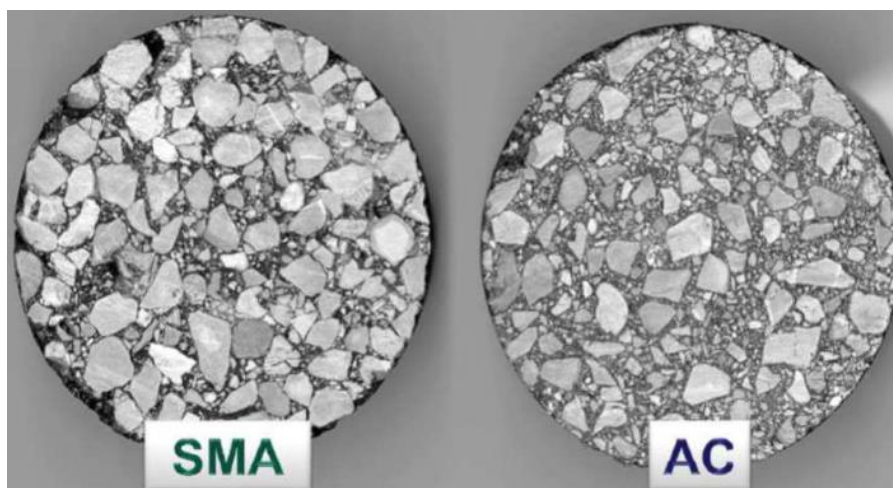
Obecně platí, že vrstvy UTLAC se do celkového výpočtu konstrukce vozovky v zásadě nezapočítávají a to zejména díky své tloušťce. Modul tuhosti směsi UTLAC při použití asfaltového pojiva 40/60 je 3000 MPa. [2]

Tabulka 3: Typické tloušťky, normální mezerovitost a mezerovitost při redukci hluku směsí používaných v Dánsku [2]

Type designation		Range of thickness	Normal range of void content	Void content when used as noise-reducing pavement
In DK	In EN 13108	[mm]	[%]	[%]
TB 6k	UTLAC 6	15 – 20	No requirement	13
AB 6t	AC 6d		2 - 4	-
TB 8k	UTLAC 8	20 – 30	No requirement	12
SMA 6	SMA 6		2 - 5	9
SMA 8	SMA 8			16
AB 6å	AC 6o		2 - 4	-
AB 8t	AC 8d			-
AB 8å	AC 8o			16

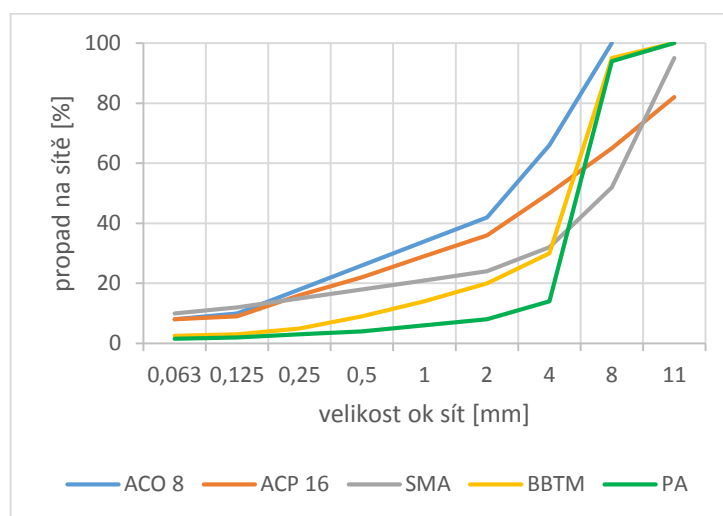
2.5 Asfaltová směs SMA

Asfaltový koberec mastixový je hutněná asfaltová směs vyvinutá v 60. letech 20. století v Německu. Používá se pro obrusné vrstvy extrémně namáhaných vozovek. SMA (Stone Mastix Asphalt) je asfaltová směs s přerušenou čarou zrnitosti. Směs je tedy složena z kostry hrubého kameniva, které je spojeno asfaltovou maltou, která je tvořena jemným kamenivem do velikosti 2 mm, filerem, vlákny (pro vázání asfaltu a zabránění stékavosti pojiva) a asfaltovým pojivem. Tato asfaltová směs je z důvodu vyššího obsahu asfaltového pojiva a fileru dražší než běžně používané směsi AC. Tento ekonomický nedostatek je však potlačen větší životností této vrstvy, její zvýšenou odolností proti vzniku plastických deformací a trhlin. Požadavky na výrobu a označení těchto směsí je uvedeno v normě ČSN EN 13108-5, která v krajních případech umožňuje použití této směsi i jako ložní vrstvy vozovek. Tato norma také doporučuje typ směsi, která by se měla použít jako obrusná vrstva vozovek, u nichž se předpokládá velké dopravní zatížení. Doporučeny jsou směsi SMA 8 S a SMA 11 S v tloušťkách vrstev 25-40 respektive 35-40 mm. [8] [10]



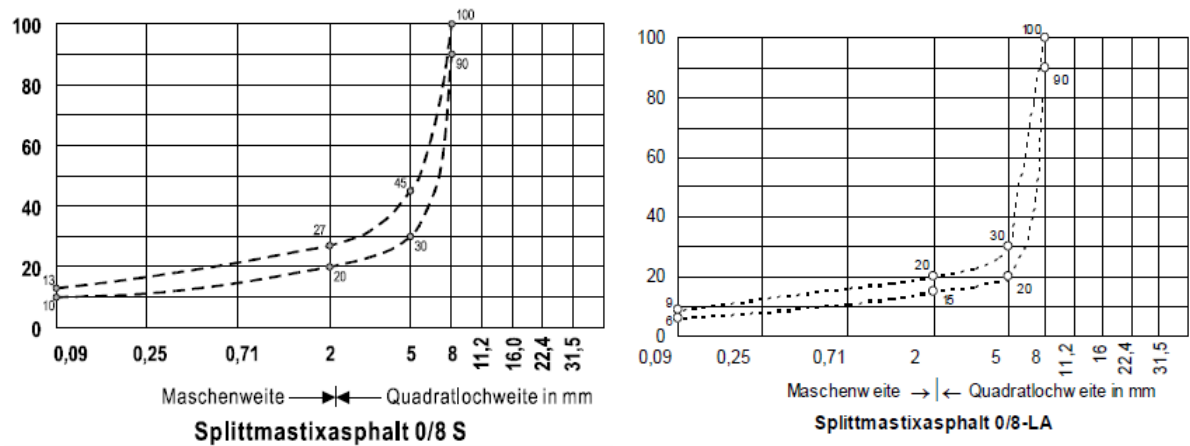
Obrázek 12: Porovnání struktury směsi SMA a AC [11]

Asfaltové koberce mastixové se v České republice používají od počátku 90. let 20. století zejména pro pozemní komunikace s vysokým dopravním zatížením. Složení SMA bylo převzato z německých předpisů, proto se velmi podobá tomu německému. Zásadní odlišností je nižší minimální obsah pojiva než předepisuje příslušná technická norma v Německu, což ale je obecný trend, který v ČR existuje. V závislosti na směsi jsou rozdíly 0,4-0,6 %-hm. v množství pojiva. Velkým problémem u směsí SMA byla z důvodu vyššího obsahu pojiva jeho stékavost, tento problém byl vyřešen přidáváním celulósových vláken do směsi. Kvalitu směsi a výslednou odolnost položené vrstvy můžeme ovlivnit vhodnou volbou asfaltového pojiva, pro mastixové koberce se nejčastěji používá modifikovaných asfaltových pojiv, která mají příznivý vliv na velikosti modulů tuhosti při všech teplotách, na odolnost vůči tvorbě trvalých deformací a na únavové vlastnosti. [12]



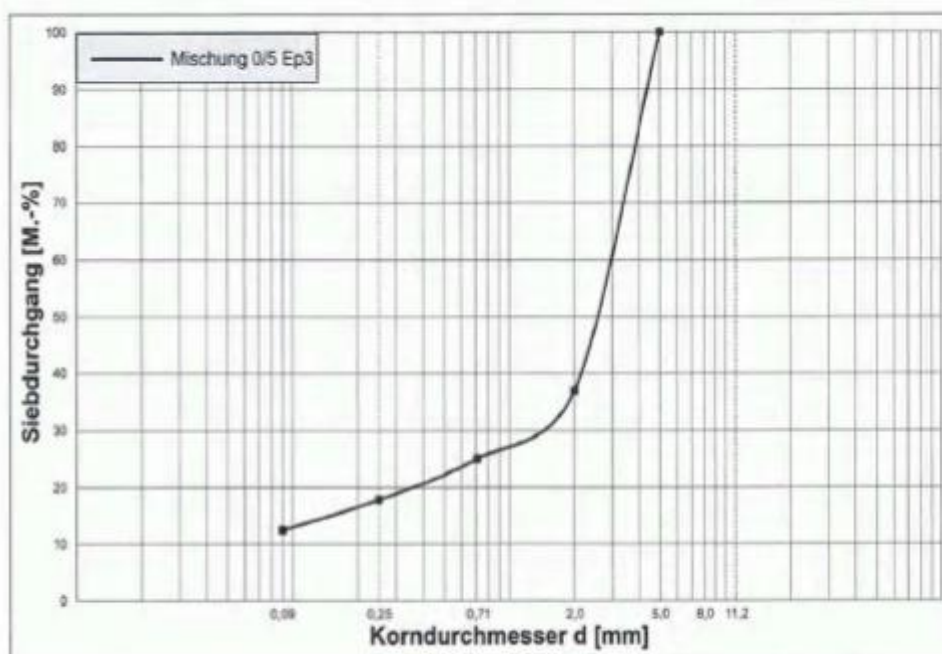
Obrázek 13: Srovnání čar zrnitosti asfaltových směsí [8]

Tuto směs v Německu v roce 2005 optimalizovali a přišli s inovativní variantou asfaltového koberce mastixového SMA LA, která díky upravené křivce zrnitosti a zvýšené mezerovitosti je schopna snížit produkci hluku až o 4 dB. Při využití tohoto typu směsi je třeba, aby ložní či podkladní vrstvy byly chráněny, z důvodu zvýšené mezerovitosti, proti pronikání vody. Proto se od roku 2008 provádí krytové vrstvy na podklad (hybridní ložní vrstvu nebo spodní obrusnou) z podrceného SMA (Splittmastixbinder). [13]



Obrázek 14: Srovnání SMA 8 a SMA 8 LA [13]

2.6 Asfaltová směs LOA 5D (ACO NH)

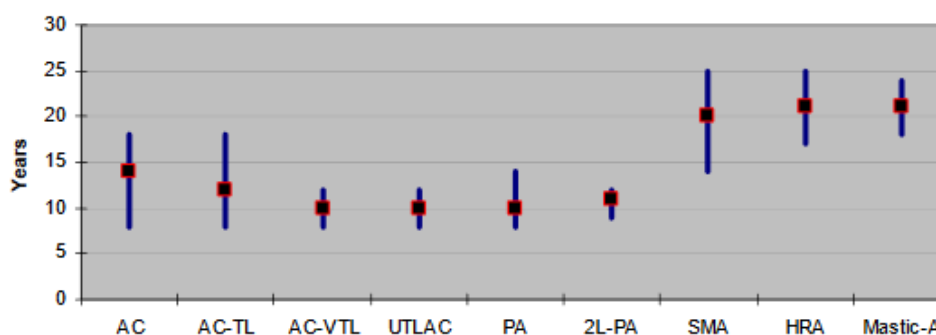


Obrázek 15: Křivka zrnitosti směsi LOA 5D [14]

LOA 5D (Lärmoptimierte Asphaltdeckschicht) je asfaltová směs patřící do skupiny asfaltových směsí pro obrusné vrstvy snižující hlučnost. První zkušební úsek byl proveden

u Düsseldorfu, proto se směsi přezdívá „düsseldorfská asfaltová směs“, celková plocha úpravy byla 2000 m². Při výrobě směsi se používá výhradně modifikované asfaltové pojivo CRmB nebo PMB, jeho dávkování je v porovnání s SMA vyšší. V porovnání s nízkohlučnými SMA se LOA vyznačuje podobnou mezerovitostí jako běžné asfaltové koberce mastixové (5–7 %-obj.), navíc se pro tento typ směsi docilují vyšší hodnoty protismykových vlastností. Účinek snižování hlučnosti vyplývá z optimalizované kostry kameniva směsi využívající maximální velikost zrna 5 mm. Hodnota tvarového indexu je nízká, protože se používá výhradně kamenivo s kubickými zrny. Vrstvy se provádí v tloušťkách 20 – 30 mm. Pro hutnění se používají statické válce o hmotnosti 10 – 12 t. Směs byla poprvé aplikována v roce 2007, z provedených hlukových měření vyplynulo snížení hluku až o 5 dB, v případě osobních aut a průměrné rychlosti 50 km/h. Ani po dvou letech nebyla při opakovaných měření zjištěna ztráta schopnosti snižovat hluk. [14] [15]

2.7 Porovnání asfaltových směsí pro obrusné vrstvy

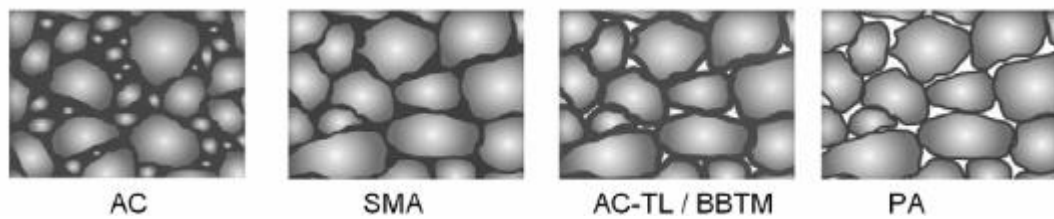


Obrázek 16: Porovnání životností obrusných vrstev na rychlostních silnicích

- AC – Asfaltový beton pro obrusné vrstvy
- AC-TL – Asfaltový beton pro velmi tenké vrstvy 20-30 mm (BBTM)
- UTLAC - Asfaltový beton pro ultra tenké vrstvy 10-20 mm
- PA – Asfaltový koberec drenážní
- 2L-PA – Asfaltový koberec drenážní, pokládaný metodou Kompaktasphalt
- SMA – Asfaltový koberec mastixový
- HRA – Asfaltová směs hutněná za horka používaná zejména ve Velké Británii
- Mastic-A – Litý asfalt

Z obrázku 16 je zřejmé, že nejvyšší životnosti (více jak 20 let) dosahují vrstvy SMA, HRA a litého asfaltu. Zároveň je nutno podotknout, že hodnoty jsou v některých případech nadhodnocené. Příkladem může být směs SMA, u které odborníci udávají životnost, při kvalitním návrhu a

provedení, maximálně 15 let. Podstatně nižší životnosti jsou u obrusných vrstev BBTM, UTLAC nebo PA, jejich výhodou jsou především dobré protihlukové vlastnosti.



Obrázek 17: Porovnání struktury jednotlivých směsí

Na obrázku 17 můžeme vidět, že směsi SMA, BBTM a PA využívají takzvaný „stone-on-stone“ princip, kdy se vytvoří kostra z hrubšího kameniva, která je např. u SMA vyplněna asfaltovou maltou. Naproti tomu směsi AC mají plynulou čáru zrnitosti. V této směsi se zatížení přenáší i přes zrna drobnějšího kameniva.

3. PRODLOUŽENÁ ŽIVOTNOST VOZOVKY

Jednou z největších položek státního rozpočtu jsou investice do silniční infrastruktury. Peníze na tuto infrastrukturu budou vždy omezeny ve své výši a čase, protože pocházejí z daní. Takže by jednou z důležitých otázek měla být otázka týkající se nákladů životního cyklu stavebních konstrukcí. Zkrátka prostředků vynaložených na stavbu a udržování, v našem případě vozovky ve vyhovujícím stavu. Bohužel až příliš často se ve stavební praxi setkáváme s tím, že opravená nebo nově vybudovaná asfaltová komunikace vykazuje po krátké době poruchy v množství, které zcela jistě nekoresponduje s výší vynaložených prostředků. Důvody mohou být různé – nevhodně zvolené pojivo, chybný návrh asfaltové směsi, nízká míra zhutnění nebo nevhodně navržená konstrukce vozovky. Dále se můžeme setkat s tím, že mnoho pozemních komunikací zejména silnic II. a III. tříd je v nevyhovujícím stavu. Mnoho z nich ani nebylo navrhováno na současné dopravní zatížení a intenzity dopravy.

Řešením výše uvedených problémů může být zvolení zcela odlišného způsobu návrhu vozovky, než který se doposud v ČR používal. Jedná se o koncept návrhu „trvalých“ vozovek („Prepetual Pavement – PP“), který byl poprvé formulován v USA kolem roku 2000. Princip spočívá v návrhu a provedení vozovky tak, aby se dosáhlo její životnosti 50 let bez nutnosti výrazných oprav či rekonstrukcí. Předpokládá se pouze periodické obnovení obrusné vrstvy v závislosti na jejím poškození. Podnětem pro rozvoj této teorie PP byl fakt, že některé úseky asfaltových vozovek se vyznačovaly vynikajícím stavem i přesto, že byly vybudovány v 60. letech dvacátého století. Podrobnějším zkoumáním bylo zjištěno, že v některých bodech mají stejné rysy, které jsou nejspíše důvodem jejich dlouhodobé životnosti.

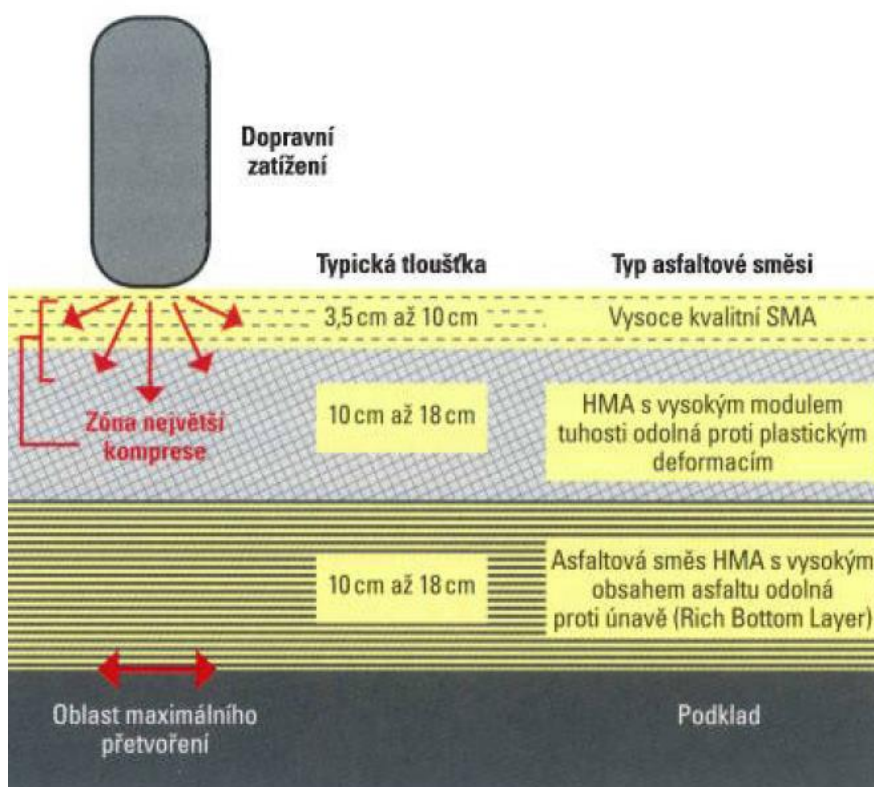
Počáteční investice na zhotovení takovýchto vozovek jsou v porovnání se standardní vozovkou určitě vyšší. Nesmíme se dívat pouze na nutné investiční náklady na začátku životnosti, ale musíme vzít v úvahu hodnocení celého stavebního díla s pomocí analýzy nákladů životního cyklu („Life-Cycle Cost Analysis – LCCA“) [16], která posuzuje celkové náklady v průběhu celé životnosti vozovky. Ukazuje se, že podle této analýzy má smysl používat trvalé vozovky i na méně zatížených komunikacích. Výhodami konceptu vozovek s dlouhou životností jsou nízké náklady životního cyklu, protože se u nich nepředpokládají hloubkové rekonstrukce nebo opravy. Další výhodou jsou nízké národohospodářské náklady na uzavírky, opravuje se jen obrusná vrstva, při které se nepředpokládá dlouhodobá uzavírka.

[17]

Podle umístění v konstrukci vozovky jsou jednotlivé asfaltové vrstvy namáhány účinky dopravy (mechanického namáhání) a atmosférickými vlivy. Mezi požadavky zlepšování vlastností konstrukce vozovky (prodloužení provozní způsobilosti) patří zvyšování tuhosti, odolnosti proti trvalým deformacím a prodloužení životnosti podle zkoušek únavy. Tyto požadavky je možné ovlivňovat složením asfaltové směsi, množstvím asfaltového pojiva, modifikací asfaltového pojiva nebo asfaltové směsi. [18]

3.1 Skladba souvrství LLP

Pro zhotovení vozovek s dlouhou životností se předpokládá zhotovení tří relativně silných asfaltových vrstev spolu s jednou nestmelenou podkladní vrstvou. Každá vrstva by měla být speciálně navržena tak, aby odolávala takovému zatížení, které v dané vrstvě působí. Zároveň nesmíme zapomenout, že všechny vrstvy musí dobře spolupůsobit, aby na jejich rozhraní nedocházelo k separaci vrstev a nevznikaly poruchy. Schéma LLP vozovky je zobrazeno na obrázku 18. [19]



Obrázek 18: Schéma konstrukce vozovky podle konceptu "trvalých vozovek" [17]

3.1.1 Nestmelená podkladní vrstva

Evropští odborníci tvrdí, že tato vrstva je nutností pro správné fungování vozovky. Plní ochrannou funkci, měla by chránit před negativními účinky vody a promrzání. Dále roznáší

zatížení do podloží. Z toho důvodu je kladen požadavek na tuhost této vrstvy. Dle amerického přístupu by tuhost této vrstvy měla tvořit minimálně 5% tuhosti asfaltových vrstev. Ze zkušeností z USA však víme, že při návrhu vozovky na dostatečně únosném podloží je možné tuto vrstvu vynechat. [19] [20]

3.1.2 Asfaltová podkladní vrstva

Na tuto nejspodnější asfaltovou vrstvu působí největší tahová napětí v konstrukci vozovky. Tato vrstva by proto měla být navržena tak, aby byla schopna disipovat napětí v tahu za ohybu a akumulovat tahová přetvoření bez projevů únavových poruch, protože pokud dojde vlivem zatížení k lomové poruše, rozšiřuje se tato porucha směrem k povrchu vozovky a vzniká takzvaná „bottom-up trhlinka“. Což by mělo za následek celkovou rekonstrukci asfaltového souvrství. V ČR je obvyklé pro tyto vrstvy používat směsi typu ACP (asfaltový beton pro podkladní vrstvy) nebo VMT (směsi s vysokým modulem tuhosti), tyto směsi jsou pro návrh LLP z řady ohledů zčásti nebo plně nevhodné. Zvyšování modulu tuhosti se dosahuje používáním tvrdších pojiv nebo snižováním obsahu pojiva ve směsi. Pro návrh LLP potřebujeme zcela opačné vlastnosti, tedy dostatečnou pružnost, odolnost proti únavě a stárnutí. Dostatečné tuhosti asfaltového souvrství docílíme použitím tuhé ložní vrstvy. Požadované flexibility a odolnosti jsme schopni docílit použitím modifikovaných silničních pojiv ve větší míře než je obvyklé u směsí typu ACP nebo VMT, literatura udává zvýšení dávkování pojiva o 0,5 %. Předpokládaná tloušťka podkladní vrstvy je 100 – 180 mm. [19] [20]

3.1.3 Asfaltová ložní vrstva

Vyšší obsah pojiva v podkladní vrstvě zvyšuje riziko tvorby plastických deformací, proto je nutné navrhnout ložní vrstvu tak, aby měla dostatečnou tuhost a roznesla zatížení bez tvorby plastických deformací v podkladní vrstvě.

Tato vrstva by v konstrukci vozovky měla být nejtužší tak, aby byla schopna přenášet nejvíce dopravního zatížení. Musí mít vysokou odolnost vůči tvorbě trvalých deformací, ale současně musí být flexibilní, protože tato vrstva je ohrožena mrazovými trhlinami. Vysoké tuhosti se docílí pomocí vhodné čáry zrnitosti, kdy ji navrhne tak, aby směs měla vytvořenou kostru kameniva s takzvaným „stone-on-stone“ kontaktem. Pružnosti se dosahuje pomocí použití modifikovaných asfaltových pojiv. Tloušťka této vrstvy by se měla pohybovat od 100 do 180 mm. [21] [20] [17]

Jednou ze zkoumaných ložních vrstev je klasická směs ACL 16S, která se řídí technickou normou ČSN EN 13108-1, která předepisuje požadavky na křivku zrnitosti, podle kterých by mezerovitost měla být od 4 % do 6 %. Dále stanovuje požadavky pro zkoušku pojiždění kolem (odolnost směsi proti trvalým deformacím), minimální obsah rozpustného pojiva 4,2 % hmotnosti a řadu dalších technických požadavků, některé z nich jsou uvedeny v dalších kapitolách této práce. Norma přitom umožňuje použití různých přísad, jednou z nich jsou i anorganická vlákna. [22]

Další směsí, kterou se tato práce zabývá, je směs VTM 16. Asfaltové směsi označované jako VMT jsou za horka zpracovávané asfaltové směsi s vysokým modulem tuhosti, s relativně vyšším obsahem asfaltů tvrdších druhů (popř. dalších ztužujících přísad) a upravenou mezerovitostí vhodnou pro aplikace v ložních a podkladních vrstvách. Podle zrnitosti použité směsi kameniva se rozdělují asfaltové směsi VMT na druhy 0/16 a 0/22. Návrh směsi se řídí předpisem TP 151, požadavky na směs VMT jsou mírně odlišné než u směsi ACL. Křivka zrnitosti má zúžený obor hodnot, směs má nižší mezerovitost (3 % až 5 %), minimální obsah pojiva je na druhé straně vyšší (4,3 %-hm.) Největší odlišností je požadavek na zvýšený modul tuhosti, který má při zkušební teplotě 15 °C být minimálně 9000 MPa (směs ACL má požadavek pouze na minimální modul tuhosti 7000 MPa). Dále jsou v TP 151 uvedeny postupy pro zkoušku relaxace a pevnosti v tahu za ohybu, tyto zkoušky byly v rámci této práce také prováděny. [23]

U směsi RBL (Rich bottom layer) stále ještě probíhá výzkum, tudíž není žádný předpis nebo technické podmínky, kterými by se návrh směsi měl řídit. Návrhu, vlastnostem a dosavadním zkušenostem s použitím této asfaltové směsi se práce věnuje v následujících kapitolách.

3.1.4 Asfaltová obrusná vrstva

Tato vrstva by měla být navržena tak, aby byla schopna odolávat velkému zatížení těžké dopravy a klimatickým podmínkám bez známek poškození v podobě trhlin, plastických deformací nebo ztráty protismykových vlastností. Preferovaný typ asfaltové směsi je asfaltový koberec mastixový (SMA). Jak bylo uvedeno, tato směs má přerušenu čáru zrnitosti a je zde použit vyšší obsah asfaltu k obalení jemných částí kameniva, které spolu s pojivem tvoří takzvanou asfaltovou maltu neboli mastix, který vyplňuje mezery v hrubší kostře kameniva. To všechno velice příznivě ovlivňuje makrotexturu povrchu, která při vhodném návrhu směsi, tlumí hluk vznikající při kontaktu pneumatiky s povrchem vozovky. Obrusná vrstva je jedinou vrstvou v konceptu LLP, která vyžaduje údržbu. Pokud se tato údržba nezanedbá a opravy jsou

prováděny včas a při dostatečné technologické kázni, je zaručena ochrana ostatních vrstev vozovky, a tudíž může být využit potenciál prodloužení životnosti celé konstrukce. Doporučená tloušťka vrstev je 35-50 mm. [20] [19] [17]

3.2 Plošné vyztužení - výztužné mříže

Vyztužování asfaltových vrstev se používá od 70. let 20. století. Původní verze byla výztužná mříž s oky velikosti 10 mm bez impregnace asfaltovým pojivem. Dnes je vyvinuto mnoho různých typů geosyntetik, které jsou přizpůsobeny specifickým požadavkům použití. Geosyntetikum je výrobek, který je vyroben ze syntetického nebo přírodního polymeru ve formě folie, pásku, mřížoviny nebo trojrozměrné struktury. Geosyntetika se používají k vyztužení asfaltových vrstev v oblasti vozovky, kde působí tahová napětí. Mají za funkci toto tahové napětí rozložit do větší plochy. Výztužné mříže mohou sloužit jako jedno z opatření, zabraňující nebo oddalující tvorbu trhlin a tím zvyšují životnost vozovky.

Jelikož nově navržená konstrukce vozovky by měla mít určitou kvalitu a tahová napětí by měla být respektována, nachází geosyntetikum větší využití při rekonstrukcích vozovek. Při stavbě nových vozovek je využití výztuží pouze lokálního charakteru (např. na křižovatkách, autobusových zastávkách, železničních přejezdech nebo stoupacích pruzích).

Geomříž je plošná výztuž, která se skládá z na sebe kolmých tahových podélných a příčných žebek, která jsou v místě styku spojena. Tímto spojením se vytvoří síť s otvory o velikosti 10-100 mm. Těmito otvory mohou proniknout různé materiály včetně asfaltové směsi a tím dochází ke spojení vrstev. Geomříže můžeme podle poměru pevnosti v jednotlivých směrech rozdělit na jednoosé (převládá pevnost v jednom směru) a dvouosé (pevnost v na sebe kolmých směrech je srovnatelná).

Geokompozit s výztužnou funkcí můžeme rozdělit na dva základní typy geokompozit s geomříží ze skelných vláken a geokompozit s geomříží na bázi polymeru. První typ, u kterého má geomříž podobnou tloušťku jako sdružená geotextilie, má mříž ze skelných vláken zachycujících tahové napětí. Geotextilie je nasycena asfaltovým pojivem a vytváří asfaltovou membránu pro správné spojení asfaltových vrstev. Naopak u Geokompozitu s geomříží na bázi polymeru má mříž větší tloušťku než geotextilie, to umožňuje zaklínění větších zrn asfaltové směsi a tím zvyšuje odolnost pro tvorbu trvalých deformací. [24]

Při použití plošného vyztužení, je nutné docílit dokonalého spojení vrstev, aby bylo zajištěno spolupůsobení všech konstrukčních vrstev vozovky. Bohužel se při provádění prací lze setkat s mnoha nedostatky, které více či méně ovlivní spojení vrstev. Proto tato metoda není mezi odborníky příliš oblíbená. [10]

3.3 Vyztužení vláknny

Vláknna se v asfaltových směsích používají k zabránění stékání asfaltového pojiva z kameniva nebo k vyztužení asfaltových směsí, které potom lépe odolávají tvorbě trhlin a trvalých deformací. V práci se budu více věnovat vláknům pro vyztužení směsi. Výhodou vyztužení vláknny oproti vyztužení mříží je, že zatímco textilie působí jako anizotropní výztuž, přidání vláken tvoří izotropické vyztužení neboli stejnou pevnost ve všech třech rozměrech. I přes vznik jakkoliv orientované trhliny v konstrukční vrstvě, si vrstva zachová zvýšenou pevnost díky vláknům překlenujícím trhlínu ve všech směrech. [25]

Vláknna se používají za účelem dosáhnutí následujících výhod [26]:

- Zvýšení pevnosti v tahu vedoucí k zvýšení odolnosti vůči tvorbě trhlin
- Snížení závažnosti trhlin, pokud se už vyskytly
- Zvýšení odolnosti vůči únavě
- Zvýšení odolnost proti trvalým deformacím
- Zvýšení odolnost proti oděru
- Nižších nákladů životního cyklu vozovky vyplývající z prodloužené životnosti

Vláknna pro použití v silničním stavitelství se mohou vyrábět z různých materiálů, nejčastěji uváděná vláknna jsou [26]:

- Minerální
- Polyesterová
- Polypropylénová
- Aramidová
- Skelná

3.3.1 Použití polyolefinových a aramidových vláken

Jednou z možností modifikace asfaltové směsi je využití tzv. 3D rozptýlené výztuže. Jedná se o směs polyolefinových a aramidových vláken. Vyztužením asfaltové směsi touto kombinací

vláken dochází ke zvýšení tuhosti asfaltové směsi, zlepšení únavového chování a zvýšení odolnosti asfaltové směsi vůči tvorbě trvalých deformací.

Použití vláken je vhodné pro:

- Vozovky s vysokou intenzitou těžkých nákladních vozidel
- V místech, kde se očekává působení tangenciálních sil (křižovatky, přechody pro chodce, rampy, stoupací pruhy, směrové prvky s vysokým parametrem křivosti, místa kde dochází k pravidelným kongescím dopravy apod.)

Výsledky laboratorních zkoušek provedených silniční laboratoří ČVUT v Praze potvrdily pozitivní vliv přidávaných vláken na funkční vlastnosti asfaltových směsí. Při zkouškách byly porovnány varianty stejné asfaltové směsi s vlákny a bez nich.

- Přidání vláken přispívá ke zvýšení modulů tuhosti při 0-40°C o 6 až 44 %
- Moduly tuhosti při 15°C splňují požadavek pro směsi typu VMT
- Při zkoušce odolnosti proti vyjíždění kolem se hloubka vyjeté koleje snížila o 27% [18]

3.4 Zvýšení obsahu asfaltového pojiva – směsi RBL

Návrh konstrukce vozovky vychází z předpokladu poměrně tlustého asfaltového souvrství, které v sobě obsahuje pružnou podkladní vrstvu s vysokým obsahem pojiva (anglicky: „Rich bottom layer“ – RBL), která je schopna odolávat tahovému namáhání na spodní straně vrstvy. K některým komunikacím vykazující vlastnosti LLP („Long-Life Pavement“ – vozovky s velmi dlouhou životností) a skvělou životností se došlo opakovanou pokládkou asfaltových vrstev bez předchozího frézování. Byla to reakce na stále větší dopravní zatížení těžkými nákladními vozidly.

Největšími problémy, které musí vozovka konceptu LLP redukovat, jsou trhliny a trvalé plastické deformace. Předpokládá se, že vozovka je dobře navržena, pokud nevykazuje zvýšenou náchylnost k tvorbě mrazových trhlin. Při dodržení tohoto předpokladu lze tvrdit, že trhliny jsou generovány překročením velikosti tahového přetvoření, které je schopna vrstva přenést, důsledkem toho je vznik únavových trhlin na spodní straně podkladní vrstvy. Odtud se trhliny během opakovaného namáhání šíří odspodu nahoru a způsobuje destrukci konstrukce, která vede ke snížení její únosnosti. Další poruchou je již dříve zmíněná plastická deformace, která se tvoří v horních vrstvách asfaltové vozovky v důsledku tlakového

namáhání. Takové deformace by měly být v LLP omezeny pouze na obrusnou vrstvu. Vozovky s dlouhou životností by měly eliminovat oba jevy.

Při klasickém návrhu asfaltové vozovky je prvním krokem odhadnutí konstrukce vozovky buď inženýrským odhadem nebo výběrem z katalogu vozovek TP 170. Druhým krokem je výpočetní posouzení celkového porušení této vozovky na konci životnosti. Pokud je porušení vozovky příliš vysoké, přistoupí se ke třetímu kroku, kterým je optimalizace skladby vozovky. Naproti tomu při projektování LLP je základem numerický výpočet přetvoření na spodní straně podkladní vrstvy vozovky. Toto přetvoření by mělo vykazovat dostatečnou výkonovou rezervu vůči limitnímu únavovému prahu FEL. Prahové přetvoření „Fatigue Endurance Limit – FEL“ je velikost největšího přetvoření, při kterém se počet cyklů zatížení, nutný k vyvolání únavového porušení, blíží nekonečnu. Základním předpokladem pro návrh LLP je tedy navrhnout vozovku tak, aby přetvoření na spodní straně podkladní asfaltové vrstvy bylo menší, než je hodnota únavového prahu FEL. [17] [19]

4. EXPERIMENTÁLNÍ VÝROBA A OVĚŘENÍ VLASTNOSTÍ VYBRANÝCH ASFALTOVÝCH SMĚSÍ

4.1 Charakteristika vstupních materiálů

Základní materiály pro výrobu asfaltových směsí jsou kamenivo, asfaltové pojivo a filer. Smícháním těchto složek v určitém poměru získáme asfaltovou směs, se kterou budeme dále pracovat. Pro tuto práci bylo použito kamenivo z lomu firmy B E S v Mladovicích, stejné kamenivo se používá pro výrobu asfaltových směsí v obalovně v Chotýšanech. Pro výrobu v rámci této práce bylo použito frakcí 0/4, 4/8 a 8/16.

Do referenční směsi bylo použito asfaltového pojiva s gradací 20/30 od firmy TOTAL. Do ostatních směsí se použilo modifikované pojivo PMB 25/55-60 také od firmy TOTAL.

Filer, který se také nazývá kamenná moučka, byl použit z Velkých Hydčic.

4.1.1 Kamenivo

Před samotnou výrobou asfaltových směsí bylo nutné stanovit čáry zrnitosti jednotlivých frakcí kameniva. Ty jsme stanovili pomocí síťového rozboru. Síťový rozbor byl proveden dle normy [27]. U frakcí 4/8 a 8/16 byla použita tzv. suchá metoda, kdy se vysušené kamenivo prosévalo na sítěch. U frakce 0/4 byla použita mokrá metoda, doplněná o prosévání vysušeného vzorku.

4.1.1.1 Prosévání suchého vzorku

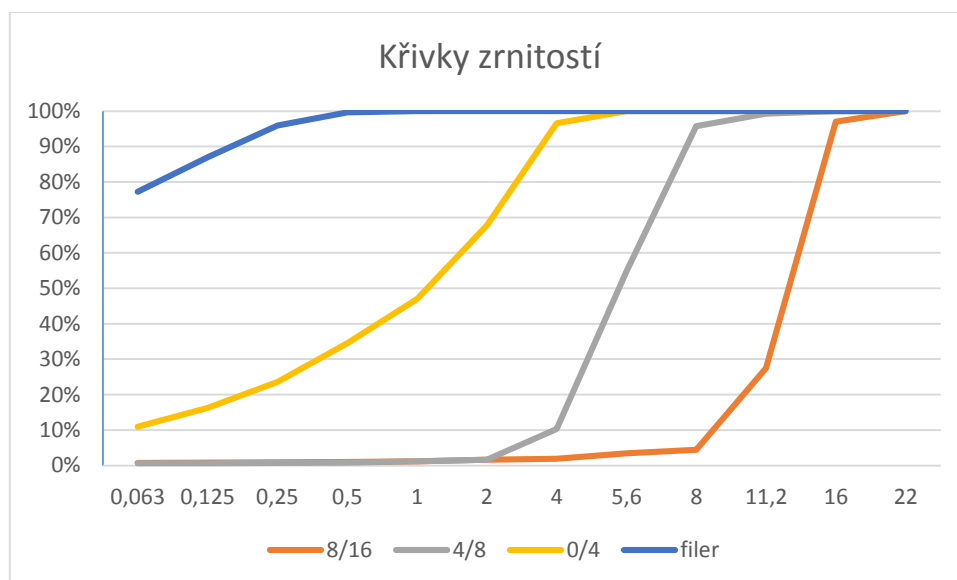
Pro tuto zkoušku je sestavena sada sít podle dané frakce kameniva. Nejprve jsme si navázili normou stanovené množství vysušeného kameniva, které se následně nasypalo na sloupec sít, který obsahuje také víko a dno. Následně se sloupcem mechanicky a ručně třáslo. Poté byla postupně odebrána jednotlivá síta a určila se hmotnost zbytku na sítěch. Výpočtem se určily propady na jednotlivých sítěch a ty se zaznamenaly do tabulky 4.

4.1.1.2 Praní kameniva

Zkušební navážka se vsype na sloupec sít opatřený přívodem a odtokem vody. Voda proudí přes síta tak dlouho, dokud není odtékající voda čirá. Potom se kamenivo zachycené na spodním síti vysuší a zváží. Z rozdílu zkušební navážky a vysušeného zbytku se určí hmotnost částic menších jak 0,063 mm. Dále se proséváním vysušeného vzorku určí zbytek čáry zrnitosti.

Tabulka 4: Souhrnná procenta propadu kameniva a fileru

Síto	Souhrnná procenta propadu [%]			
	8/16	4/8	0/4	filer
22	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
16	97,0%	100,0%	100,0%	100,0%
11,2	27,5%	99,3%	100,0%	100,0%
8	4,4%	95,8%	100,0%	100,0%
5,6		54,8%	100,0%	100,0%
4	1,9%	10,3%	96,6%	100,0%
2	1,6%	1,6%	67,8%	100,0%
1	1,2%	1,2%	46,9%	100,0%
0,5	1,0%	0,8%	34,5%	99,6%
0,25	0,9%	0,7%	23,6%	95,9%
0,125	0,8%	0,6%	16,2%	87,0%
0,063	0,7%	0,6%	11,0%	77,2%



Graf 1: Křivky zrnitostí kameniva a fileru

4.1.2 Asfaltové pojivo

Asfaltové pojivo je viskoelastický organický materiál – za vysokých teplot se chová jako kapalina, za nízkých teplot je to pružná látka. Základní charakteristikou asfaltového pojiva je jeho penetrace, podle které můžeme asfaltová pojiva rozřadit do mnoha kategorií. Zjišťuje se zkouškou stanovení penetrace jehlou dle ČSN EN 1426. Pro potřeby této práce byl použit silniční asfalt 20/30 v souladu s požadavky ČSN EN 12591. To znamená, že při zkoušce tohoto pojiva při teplotě 25 °C pronikne zkušební jehla do hloubky 2-3 mm. Druhým použitým pojivem je polymerem modifikovaný asfalt PMB 25/55-60 dle ČSN EN 14023. 25/55 vyjadřuje hodnoty

penetrace, 60 je minimální požadovaná teplota bodu měknutí v °C. Při vyšší teplotě přechází asfalt do tekutého stavu.

4.2 Návrh, optimalizace a výroba směsí

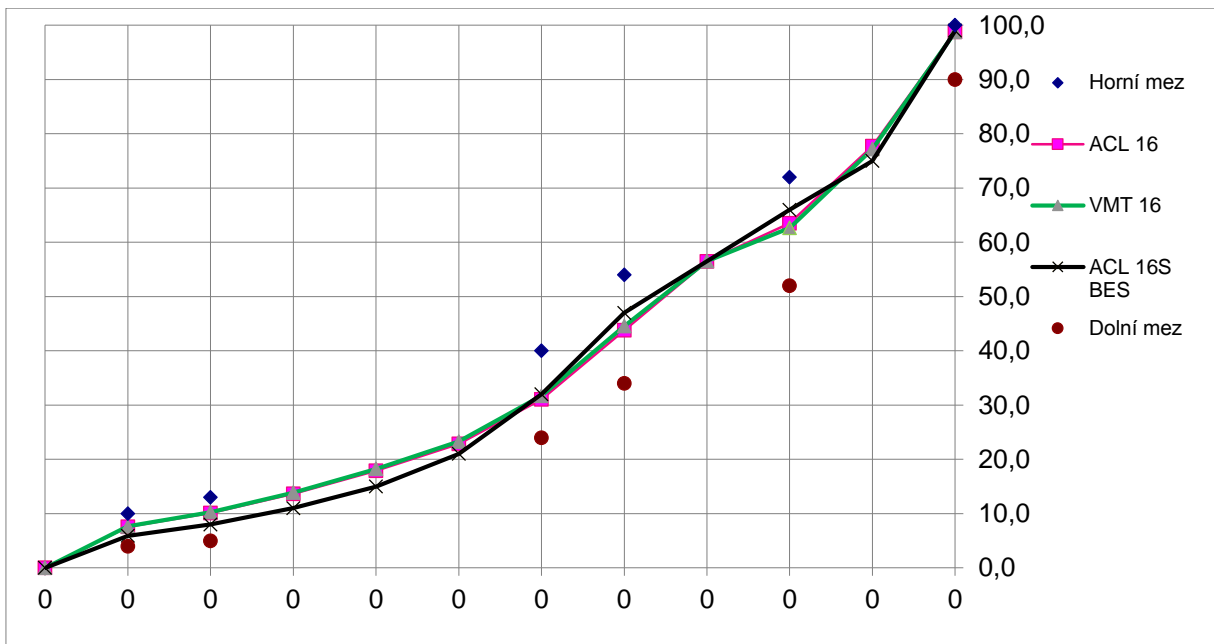
4.2.1 Návrh směsí

Při návrhu receptury jsme vycházeli ze souhrnných procent propadů jednotlivých frakcí, viz tabulka 4. Podstatou návrhu receptury dané asfaltové směsi je určení podílu jednotlivých frakcí kameniva tak, aby výsledná čára zrnitosti ležela v normou požadovaných mezích.

Tabulka 5: Výpočet součtové čáry propadů směsi ACL 16S

	%	22	16	11,2	8	5,6	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	<0,063	
Zrnitosti jednotlivých frakcí	8/16		0,0	3,0	52,4	34,1		9,6	0,0	0,1			0,3	0,3	0,2
	4/8		0,0	0,0	0,7	3,5	41,0	44,4	8,7	0,4	0,4	0,1	0,1	0,0	0,6
	0/4		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,4	28,8	20,9	12,4	10,9	7,3	5,2	11,0
	Filer		0,0	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0			13,0	9,8	77,2
Zbytky na jednotlivých sítích návrh	8/16	40,00	0,0	1,2	21,0	13,6	0,0	3,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1
	4/8	17,00	0,0	0,0	0,1	0,6	7,0	7,6	1,5	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1
	0/4	39,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3	11,2	8,1	4,9	4,3	2,9	2,0	4,3
	Filer	4,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,4	3,1
	Souč.čár a zbytků	100,00	0,0	1,2	21,1	14,2	7,0	12,7	12,7	8,2	4,9	4,3	3,5	2,6	7,6
			22	16	11,2	8	5,6	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	<0,063
Celkové propady na sítích	Horní mez		100,0		72,0		54,0	40,0				13,0	10,0		
	Součtová čára prodadů	100,0	98,8	77,7	63,5	56,5	43,8	31,1	22,8	17,9	13,6	10,1	7,6	0,0	
	Dolní mez		90,0		52,0		34,0	24,0				5,0	4,0		

Při návrhu směsí se vycházelo z již používané receptury směsi ACL 16S firmou B E S na obalovně v Chotýšanech, která pracuje se stejným kamenivem. Pro směs ACL 16S byla zvolena čára zrnitosti blížíící se čáře používané v obalovně.



Graf 2: Čáry zrnitosti asfaltových směsí

Zcela totožné čáry zrnitosti jsme bohužel nebyli schopni docílit, protože se odlišují čáry zrnitosti kameniva. Jak je vidět na grafu 2. Navržená směs ACL 16S, se kterou budeme pracovat v rámci této diplomové práce, se nejvíce liší v podílu jemných částí menších jak 2 mm. V této části grafu je čára zrnitosti z obalovny níže položená než naše čára navržená, to znamená, že ve směsi navržené pro tuto práci je vyšší podíl jemných částic.

Pro návrh receptury asfaltové směsi je důležité stanovit nejen poměr jednotlivých frakcí kameniva, ale také obsah asfaltového pojiva. Pro směs ACL 16S je na základě empirických požadavků normy [22] stanoven minimální obsah rozpustného pojiva B_{\min} 4,2 % hm. Pro stanovení teoretického množství pojiva ve směsi lze pro směsi AC použít výpočet podle součinitele sytosti.

Měrný povrch kameniva v m^2/kg vypočteme podle následujícího vzorce

$$\varepsilon = 0,01(0,174 G + 0,4 g + 2,3 S + 15,33 s + 140 f) \quad (1)$$

- Kde
- G Podíl kameniva v % hmotnosti, které zadrží síto 8
 - g Podíl kameniva v % hmotnosti, které propadne sítem 8 a zadrží síto 4
 - S Podíl kameniva v % hmotnosti, které propadne sítem 4 a zadrží síto 0,25
 - s Podíl kameniva v % hmotnosti, které propadne sítem 0,25 a zadrží síto 0,063
 - f Podíl kameniva v % hmotnosti, které propadne sítem 0,063

Teoretické množství pojiva p se stanoví jako

$$p = n \times \sqrt[5]{\varepsilon} \times \frac{2,650}{\rho a} \quad (2)$$

Pro navrhovanou asfaltovou směs je měrný povrch kameniva roven 12,44 m²/kg vypočteno teoretické množství 5,13 kg pojiva/100 kg kameniva (4,88 %-hm.)

Dle ITT protokolu poskytnutého obalovnou společností B E S byla provedena optimalizační zkouška, kdy se vyrobily tři sady zkušebních těles. Jedna s vypočteným obsahem pojiva a další s +0,5 %-hm. respektive -0,5 %-hm. asfaltového pojiva. Na těchto tělesech byla stanovena objemová hmotnost, maximální objemová hmotnost, stupeň vyplnění mezer a mezerovitost směsi. Tyto hodnoty se dále porovnávaly s požadavky normy. Dle výsledků optimalizační zkoušky se nejlépe jeví směs s vypočítaným obsahem pojiva. Z tohoto důvodu byla pro potřeby této práce zkoušena směs s vypočteným obsahem asfaltového pojiva, pokud by tato směs nevyhovovala normovým požadavkům, přistoupilo by se k optimalizaci.

Tabulka 6: Složení navržených směsí

	ACL 16S	VMT 16	RBL 16	ACL 16S
	%	%	%	%
Mladovice 0/4	37,2	38,0	37,8	37,2
Mladovice 4/8	16,2	14,3	14,2	16,2
Mladovice 8/16	38,1	39,0	38,8	38,1
Filer	3,8	3,8	3,8	3,8
Pojivo	4,7	4,9	5,4	4,7
Vlákna FORTA FI	x	x	x	0,05

4.2.1.1 Směs ACL 16S

Pro potřeby této diplomové práce bylo vyrobeno šest zkušebních těles (A1-A3 a C1-3), kdy varianty asfaltové směsi (A, C) se lišily obsahem asfaltového pojiva. Na tělesech byla stanovena objemová hmotnost, maximální objemová hmotnost a mezerovitost. Výsledná mezerovitost se porovnávala s normou požadovanou mezerovitostí 4 – 6 %. Mezerovitost těles C1-3 byla 5,8 %, těles A1-3 6,1 %. Pro další zkoušky směsi ACL 16S byla zvolena receptura C.

4.2.1.2 Směs VMT 16

Směs VMT 16 má mírně upravenou čáru zrnitosti oproti směsi ACL 16S. Pro výrobu bylo aplikováno 4,9 %-hm. asfaltového pojiva 20/30. Podle této receptury byla vyrobena sada těles B1-15.

4.2.1.3 Směs ACL 16S s vlákny

Receptura směsi vychází ze směsi ACL 16S, ke které bylo pouze přidáno 0,05 %-hm. syntetických vláken FORTA FI. Předpokládá se, že jejich přidáním dojde ke zlepšení některých charakteristik této asfaltové směsi.

4.2.1.4 Směs RBL 16

Tato směs má stejnou čáru zrnitosti jako VMT 16. Do směsi bylo použito o 0,5 %-hm. více asfaltového pojiva než je optimum stanovené pro směs s vysokým modulem tuhosti, tedy 5,4 %-hm. Očekává se, že zvýšené dávkování asfaltového pojiva bude mít pozitivní vliv na zvýšení lomové houževnatosti, zlepšení relaxačních schopností a v konečném důsledku i únavové charakteristiky, které nicméně k časové náročnosti tohoto testu nebyly ověřovány. Mírně negativní vliv se předpokládá u zkoušky pojíždění kolem.

Tabulka 7: Charakteristiky navržených směsí

Směs	Tělesa	Množství pojiva	Objemová hmotnost	Maximální objemová hmotnost	Mezerovitost	Mezerovitost norma
		%	g/cm ³	g/cm ³	%-obj.	%-obj.
ACL 16 S	C4-9	4,7	2,340	2,464	5,0	4-6
VMT 16	B4-6	4,9	2,361	2,438	3,2	3-5
ACL 16 S vlákna	F1-6	4,7	2,348	2,443	3,9	4-6
RBL 16	R1-6	5,4	2,380	2,423	1,8	x

4.2.2 Výroba směsi

Výroba směsi probíhala dvěma způsoby ručně nebo v míchačce. Ručně se míchaly malé záměsi do 4 kg směsi a velké ve vyhřívané míchačce. Postup výroby oběma způsoby je velmi podobný. Navážené kamenivo a filer se společně s asfaltovým pojivem vložilo do vyhřáté trouby, kde se nahřálo na požadovanou teplotu. Aby se předešlo nepotřebnému ochlazení směsi při jeho výrobě, bylo nutné nahřát také laboratorní míchačku respektive nádobu a lopatku pro ruční míchání.

4.2.2.1 Výroba směsi v míchačce

Poté co byly materiály nahřáty na potřebnou teplotu, se kamenivo vložilo do míchačky a bylo promícháno po dobu 180 s. Následně se do míchačky ke kamenivu přidalo požadované množství asfaltového pojiva a znovu byl spuštěn proces míchání. Nakonec se přidal také filer a směs byla znovu 180 s míchána. Filer se přidával až na konci míchání proto, aby došlo nejprve k obalení velkých zrn kameniva a ve směsi nevznikali shluky pouze z fileru a asfaltu. Při výrobě směsi byla sledována kvalita míchání. Nejčastěji docházelo k nepromíchání jemných částic směsi usazených na vnějšku míchacího bubnu.



Obrázek 19: Laboratorní míchačka s vyhříváním

Tento nedostatek byl eliminován ručním promícháním v této oblasti.

4.2.2.2 Výroba směsi ručním mícháním

Vysušené kamenivo bylo vloženo do vyhřáté trouby již promíchané tak, abychom zkrátili výrobní proces a proces ochlazování na minimum. Při dosažení požadované teploty byla nádoba s kamenivem přemístěna na váhu, kde se navážilo požadované množství pojiva a tato směs byla ihned promíchána. Po obalení všech zrn kameniva byl přidán i filer a směs byla znovu promíchána.

4.2.3 Výroba Marshallových těles

Postup výroby Marshallových těles byl v souladu s normou [28]. Vyrobená směs byla rozdělena do předehřátých plechových nádob - fanek. Jednotlivé navážky byly voleny podle objemové hmotnosti směsi tak, abychom dosáhli požadovaných rozměrů Marshallových těles. Po navážení se misky vrátily zpět do vyhřáté trouby, kde se nechaly



Obrázek 20: Trychtýř, fanka, válcová forma, špachtle, horní nástavec, podložka

vytemperovat na požadovanou teplotu hutnění. Spolu s miskami se do vyhřáté trouby vložily formy, horní nástavec, ocelová podložka a trychtýř pro výrobu těles.

Po vytemperování na požadovanou teplotu hutnění se sestavila forma pro hutnění i s podložkou a horním nástavcem. Do formy byla vložena kruhová separační podložka z papíru. Následně se skrz trychtýř nasypala vyhřátá asfaltová směs. Směs se ve formě pomocí špachtle urovnala a vložil se na ni druhý separační papír tak, aby nedocházelo k zašpinění podložky a rázového zhutňovače. Takto připravená forma se vložila do rázového zhutňovače, kde byla směs zhutněna nejprve z jedné strany, poté se forma otočila a byl zhutněn směs i z druhé strany požadovaným počtem úderů rázového zhutňovače.



Obrázek 21: Rázový zhutňovač

Po zhutnění se těleso umístilo na kovovou podložku, kde se nechalo vychladnout. Po vychladnutí bylo těleso z formy pomocí lisu vytlačeno. Následně se očistil povrch tělesa a těleso se pro následnou identifikaci označilo příslušnou značkou.

4.2.4 Výroba desek

Výroba desek pro zkoušku poježdění kolem probíhala podobně jako výroba válcových zkušebních těles. Nejprve bylo třeba směs řádně vytemperovat na požadovanou teplotu hutnění, spolu s podkladní ocelovou deskou a plechem. Nahřátá deska se vložila do lamelového zhutňovače. Na formu se nanasíl silikonový olej proti nalepování směsi. Následně byla šrouby připevněna boční strana formy. Do takto připravené formy se vsypalo přesně stanovené množství asfaltové směsi. Množství se určilo z požadovaných rozměrů desky a objemové hmotnosti zhutněných Marshallových těles pro jednotlivé typy asfaltové směsi. Urovnaný povrch



Obrázek 22: Lamelový zhutňovač

asfaltové směsi se zakryl plechem a do formy byly vloženy lamely. Následně došlo ke spuštění přístroje, který pomocí hydraulického lisu přitlačoval hutnící válec, a několika pojezdy se deska zhutnila. Proces hutnění byl ještě dvakrát zopakován v počtu deseti pojezdů válce tak, aby se simulovalo hutnění podobné tomu na stavbě.

4.3 Zkušební metody

4.3.1 Maximální objemová hmotnost

Stanovení maximální objemové hmotnosti je popsáno v normě ČSN EN 12697-5+A1. Dle této normy byl použit postup A: Volumetrický postup.

Před měřením bylo nutné směs nahřát na 80 °C. Následně se směs vysypala na plech, kde se od sebe rozdělila jednotlivá zrna kameniva. Takto rozdělená směs se nasypala do prázdného pyknometru známé hmotnosti (m_1) a objemu (V_p). Po nasypání asfaltové směsi se zaznamenala hmotnost pyknometru s nástavcem a směsí (m_2). Následně se do pyknometru dolila destilovaná voda. Vše se důkladně zamíchalo tak, aby v pyknometru zůstalo co nejméně vzduchových bublin.

Následně se pyknometr vložil do vakuového přístroje, kde za sníženého tlaku došlo k úniku zbývajících bublin vzduchu ze směsi. Po vyjmutí se pyknometr dolil po rysku a zaznamenala se hmotnost (m_3).

Maximální objemová hmotnost (ρ_{mv}) se stanovila z tohoto vzorce:

$$\rho_{mv} = \frac{m_2 - m_1}{1000 \times \left(V_p - \frac{m_3 - m_2}{\rho_w} \right)} \quad [kg/m^3] \quad (3)$$

- Kde:
- m_1 je hmotnost pyknometru a nástavce v g;
 - m_2 hmotnost pyknometru a zkušební vzorku v g;
 - m_3 hmotnost pyknometru, zkušební vzorku a vody v g;
 - V_p objem pyknometru při naplnění po referenční značce;
 - ρ_w hustota vody při zkušební teplotě stanovená s přesností na 0,1kg/m³



Obrázek 23: Pyknometr pro se směsí pro stanovení objemové hmotnosti

4.3.2 Stanovení objemové hmotnosti zkušební tělesa vážením ve vodě

Objemovou hmotnost na zkušebních tělesech hutněných 2x75 údery rázového zhutňovače jsme stanovili podle normy ČSN EN 12697-6+A1 postup B: Objemová hmotnost – nasycený suchý povrch (SSD). Na zkušebních tělesech hutněných 2x25 údery byl použit postup D: Objemová hmotnost podle rozměrů.

Objemová hmotnost SSD (ρ_{bssd}) se vypočítá podle následujícího vzorce:

$$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w \quad [kg/m^3] \quad (4)$$

Kde: m_1 je hmotnost suchého tělesa v g;
 m_2 hmotnost tělesa ve vodě v g;
 m_3 hmotnost tělesa nasyceného vodou a povrchově osušeného v g;
 ρ_w hustota vody při zkušební teplotě stanovená s přesností na 0,1kg/m³.

Objemová hmotnost podle rozměrů válcového tělesa ($\rho_{b,dim}$) se vypočítala podle následujícího vzorce [30]:

$$\rho_{b,dim} = \frac{m_1}{\frac{\pi}{4} \times h \times d^2} \times 10^6 \quad [kg/m^3] \quad (5)$$

Kde: m_1 je hmotnost suchého tělesa v g;
 h výška zkušební tělesa v mm;
 d průměr zkušební tělesa v mm.

4.3.3 Mezerovitost asfaltových směsí

Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí vychází z hodnoty určených v předchozích kapitolách 4.3.1 a 4.3.2. Výpočet popisuje ČSN EN 12697-8.

Mezerovitost se vypočítala pomocí této rovnice:

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \times 100 \% \quad (6)$$

Kde: V_m je mezerovitost s přesností 0,1 %;
 ρ_m maximální objemová hmotnost směsi v kg/m³;
 ρ_b objemová hmotnost zkušební tělesa v kg/m³.

[31]

4.3.4 Měření modulu tuhosti

Zkouška byla provedena v souladu s normou [32] dle přílohy C – Zkouška v příčném tahu na válcových zkušebních tělesech (IT-CY). Norma [22] udává požadavek na minimální hodnotu modulu tuhosti 7000 MPa pro směs ACL 16S při 15 °C. V TP 151 je uveden požadavek na minimální hodnotu modulu tuhosti 9000 MPa při teplotě 15 °C pro směs VMT 16. Moduly tuhosti byly měřeny při teplotách 0 °C, 15 °C, 27 °C a 40 °C pro jejich lepší porovnání při různých podmínkách.

Před samotnou zkouškou bylo nutné nechat tělesa temperovat na požadovanou teplotu po dobu nejméně 4 hodin.

1 – pneumatický zdroj zatížení

2 – ocelový zatěžovací rám

3 – snímač síly

4 – horní zatěžovací pás

5 – zkušební těleso

6 – LVDT nastavovací šroub

7 – rámeček s LVDT

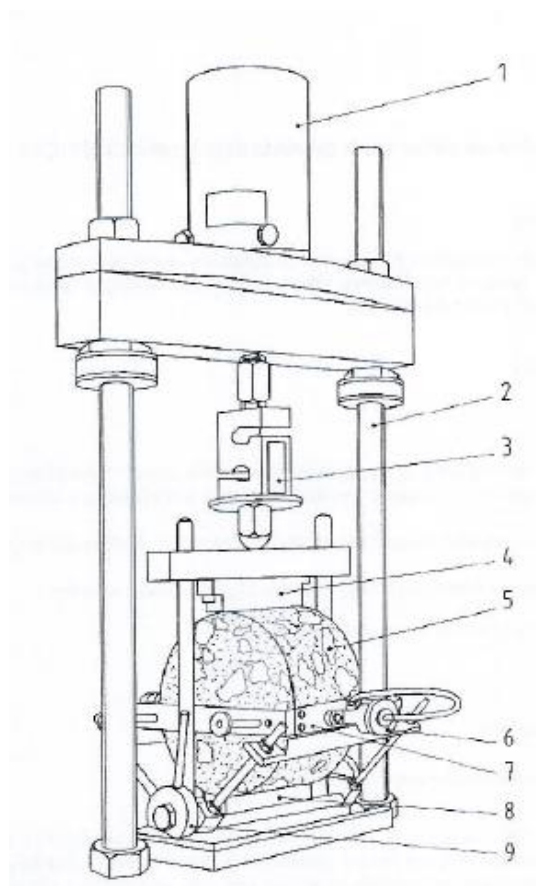
8 – spodní zatěžovací pás

9 – nastavovací podpěra rámečku

Pro zatěžování tělesa o průměru přibližně 100 mm bylo zapotřebí zatěžovacích pásů o šířce $12 \pm 0,1$ mm a správné nastavení ostatních komponent

měřicího přístroje, které jsou vyobrazeny na obrázku *Obrázek 24: Zkušební zařízení*

24.



Samotná zkouška probíhala tak, že bylo vloženo vytemperované těleso do kovového rámečku na spodní zatěžovací pás. Těleso bylo upnuto pomocí 4 upínacích šroubů a byl na něj položen horní zatěžovací pás. Celá soustava se vložila pod zatěžovací trn, který se přiblížil k hornímu zatěžovacímu pásu. V tuto chvíli byly k tělesu přiloženy sondy snímající příčnou

deformaci tělesa. Poté byl spuštěn kalibrační proces systému, který optimalizoval sílu potřebnou k vyvození zadané příčné deformace. Po skončení kalibrace bylo ověřeno, zda jsou sondy ve správné poloze. Při splnění podmínky bylo možné pokračovat a na těleso bylo vyvozeno pět impulzů, při kterých byla sledována síla nutná k vyvození zadaného přetvoření. Moduly tuhosti byly vyhodnoceny automaticky na základě zadaných parametrů (Poissonovo číslo, průměr a výška tělesa).

$$E = \frac{F \times (v + 0,27)}{z \times h} \quad (7)$$

- Kde:
- E je naměřený modul tuhosti v MPa;
 - F maximální hodnota použitého svislého zatížení v N;
 - z amplituda horizontální deformace zjištěná v průběhu; zatěžovacího cyklu v mm;
 - h průměrná tloušťka zkušební tělesa v mm;
 - v Poissonovo číslo.

Zkouška probíhala ve dvou fázích, ve druhé bylo těleso do přístroje vloženo pootočené o 90° kolem horizontální osy a měření se opakovalo.

4.3.5 Šíření trhliny zkouškou ohybem na půlválcovém tělese

Pro tuto zkoušku se musela Marshallova tělesa seříznout na normou [33] požadovanou tloušťku 50 ± 3 mm. Poté bylo těleso rozděleno na dva půlválce, v jehož středu se vyřízla drážka o hloubce 10 ± 1 mm. Na takto připravené těleso se v místech styku tělesa s podpěrami přilepily kovové podpěrné pásy normových rozměrů.

Zkouška se prováděla při teplotě 0 °C a -10 °C. Těleso vytemperované na požadovanou teplotu se vložilo do středu zkušebního zařízení. Poté bylo těleso zatěžováno rychlostí $50 \pm 0,2$ mm/min. Zkušební zařízení zaznamenávalo maximální vyvinutou sílu v kN a



Obrázek 25: Vzniklá trhlina



Obrázek 26: Kontrola trhliny pomocí příložné desky

maximální deformaci při této síle v mm. Celý proces od vyjmutí tělesa z chladicího boxu by neměl trvat déle jak 60 s.

Vzniklé trhliny na obou stranách zkušební tělesa je nutné zkontrolovat, zda leží v oblasti 10 % průměru zkušební tělesa. Pro toto ověření se použije destička s výsečí. Pokud celá trhlina probíhá výsečí, může se výsledek zkoušky započítat. Pokud by trhlina neležela ve výsečí, musí být výsledky vyřazeny. Zkouška musí být provedena na nejméně čtyřech kusech zkušebních těles s platnými výsledky.

Nejdříve se vypočítalo přetvoření ε_{max} při maximální síle a to ze vztahu:

$$\varepsilon_{max} = \frac{\Delta W_i}{W_i} \times 100 \% \quad (8)$$

Kde: W_i je výška zkušební tělesa i v mm;
 ΔW_i svislý posun zkušební tělesa i při maximální síle v mm.

Maximální napětí při porušení $\sigma_{max,i}$:

$$\sigma_{max,i} = \frac{4,263 \times F_{max,i}}{D_i \times t_i} \text{ N/mm}^2 \quad (9)$$

Kde: $F_{max,i}$ je maximální síla zkušební tělesa i v N;
 t_i tloušťka zkušební tělesa i v mm;
 D_i průměr zkušební tělesa i v mm.

Odolnosti vůči lomu (lomová houževnatost) $K_{lc,i}$:

$$K_{lc,i} = \sigma_{max,i} \times f \left(\frac{a_i}{W_i} \right) \text{ N/mm}^{3/2} \quad (10)$$

Kde: W_i je výška zkušební tělesa i v mm;
 a_i hloubka drážky zkušební tělesa i v mm;
 $\sigma_{max,i}$ napětí při porušení zkušební tělesa i v N/mm²;
 $f(a_i/W_i)$ geometrický faktor zkušební tělesa i podle rovnice bezrozměrný.

pro $9 < a_i > 11$ mm a $70 < W_i < 75$ mm pak:

$$f \left(\frac{a_i}{W_i} \right) = 5,956 \quad (11)$$

V našem případě však platí:

$$f\left(\frac{a_i}{W_i}\right) = -4,9965 + 155,58\left(\frac{a_i}{W_i}\right) - 799,94\left(\frac{a_i}{W_i}\right)^2 + 2141,9\left(\frac{a_i}{W_i}\right)^3 - 2709,1\left(\frac{a_i}{W_i}\right)^4 + 1398,6\left(\frac{a_i}{W_i}\right)^5 \quad (12)$$

4.3.6 Stanovení citlivosti vůči účinkům vody (trvanlivosti asfaltové směsi)



Obrázek 28: Umístění tělesa v tlačných čelistech



Obrázek 27: Lis pro zkoušku ITS

Zkouška byla provedena podle normy ČSN EN 12697 - 12 [34] a podle AASHTO T 283 – 03 [35]. Pro každou směs bylo vyrobeno 9 zkušebních těles, která byla zhutněna rázovým zhutňovačem 2x25 úderů. Tělesa byla zvážena, změřena a byla stanovena jejich objemová hmotnost. Na základě objemové hmotnosti byla tělesa rozdělena do tří skupin – suchá, syčená podle ČSN [34] a podle AASHTO [35] tak, aby průměrná objemová hmotnost skupin těles byla nejlépe stejná.

Skupina suchých těles byla vložena do klimatizačního boxu a vytemperována na zkušební teplotu.

Skupina těles syčených podle ČSN byla vložena do vakuové komory naplněné destilovanou vodou 2 cm nad horní okraj zkušebních těles. V komoře byl během 10 minut postupně snižován tlak. Požadovaný tlak byl v komoře udržován dalších 30 minut. Následně se do

komory vpustil atmosférický tlak a tělesa byla pod vodou ponechána dalších 30 minut. Poté se tělesa vložila do vodní lázně o teplotě $40 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ na dobu 70 ± 2 hodiny.

Skupina těles syčených podle AASHTO T 283 – 03 se také sytila ve vakuové komoře, ale pouze po dobu 10 minut. Poté byla ponechána 10 minut pod vodou, následně se osušená tělesa zvážila. Stanovil se stupeň nasycení podle nasycené a suché hmotnosti těles. Po zvážení se tělesa jednotlivě vložila do igelitových sáčků s 10 ml destilované vody. Celý sáček byl umístěn do mrazicího boxu. Po uplynutí 16 hodin byla tělesa přenesena do vodní lázně o teplotě $60 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. Zde byla ponechána minimálně po dobu 24 hodin.

Následně se všechna mokrá tělesa vložila do vodní lázně v chladničce o teplotě $15 \text{ }^\circ\text{C}$. Skupina suchých těles byla také temperována na $15 \text{ }^\circ\text{C}$. Temperování probíhalo minimálně 3 hodiny, při kterých byla sledována teplota vody a vzduchu v chladničce.

Po vytemperování byla na tělesech zkoušena pevnost v příčném tahu podle [36]. Těleso bylo umístěno do zkušebního zařízení mezi zatěžovací pásy tak, že svislá osa tělesa procházela osou pásů. Těleso bylo zatěžováno při konstantní rychlosti $50 \pm 2 \text{ mm/min}$ až do dosažení maximálního zatížení. Zkouška by měla proběhnout do 2 minut od vyjmutí tělesa z chladničky. Zaznamenávána byla maximální vyvinutá síla v kN a svislá deformace v mm. Výsledkem zkoušky je poměr pevnosti na mokřích a suchých vzorcích.

Výpočet poměru pevností v příčném tahu (*ITSR*) se určil dle vzorce:

$$ITSR = 100 \times \frac{ITS_w}{ITS_d} \quad (13)$$

Kde: ITS_w je průměrná pevnost v příčném tahu skupiny mokřích (mokřích a zmrazených pro zkoušku AASHTO) zkušebních těles, v kPa;
 ITS_d průměrná pevnost v příčném tahu skupiny suchých zkušebních těles, v kPa.

Hodnoty pevnosti v příčném tahu (*ITS*) se vypočítaly z následujícího vztahu:

$$ITS = \frac{2P}{\pi D H} \quad (14)$$

Kde: P je maximální zatížení v N;
D průměr zkušební tělesa v mm;

H výška zkušební tělesa v mm.

4.3.7 Zkouška pojezdění kolem (odolnost proti trvalým deformacím)

Postup zkoušky probíhal v souladu s normou [37] na malém zkušebním zařízení. Dvě desky stejné směsi o tloušťce 6 cm a rozměrech 26x32 cm byly upevněny do zkušební formy, se kterou se vložily do zkušebního zařízení. Do desky byl zaveden teploměr a na povrch desek byla v místě pojezdu pogumovaného kola natažena igelitová fólie. Poté bylo zahájeno temperování desek na vzduchu. Po ohřátí desek na teplotu 50 °C byl zahájen pojezd desek kolem. V průběhu zkoušky byl zaznamenáván přírůstek hloubky vyjeté koleje.

Výsledkem této zkoušky byla průměrná hloubka vyjeté koleje v % (PRD_{AIR})

$$PRD_{AIR} = \frac{d_{10\,000}}{h} \times 100\% \quad (15)$$

Kde: PRD_{AIR} je poměrná hloubka vyjeté koleje na vzduchu v %
 $d_{10\,000}$ hloubka vyjeté koleje po 10 000 cyklech v mm
 h výška zkušební tělesa

Přírůstek hloubky vyjeté koleje WTS_{AIR} v mm/ 10^3 zatěžovacích cyklů se určí:

$$WTS_{AIR} = \frac{d_{10\,000} - d_{5\,000}}{5} \quad (16)$$

Kde: WTS_{AIR} je přírůstek hloubky vyjeté koleje v mm/ 10^3 zatěžovacích cyklů
 $d_{5\,000}$ hloubka vyjeté koleje po 5 000 cyklech v mm



Obrázek 29: Zařízení pro zkoušku pojiždění kolem

4.3.8 Zkouška v tahu za ohybu

Postup zkoušky probíhal v souladu s TP 151 [38] na hranolech nařezaných z desek vytemperovaných na $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Před samotnou zkouškou byla tělesa změřena. Na tělesa se následně nalepily kovové plíšky ve vzdálenosti 250 mm. Tělesa byla vložena do zatěžovacího lisu se záznamovým zařízením na válcové podpory, do středu tělesa se umístil plíšek a ocelový břit, přes který se na těleso přenášelo zatížení. Jedna skupina těles byla zkoušena při rychlosti zatížení 1,25 mm/min, druhá při 50 mm/min. Zkouška by měla proběhnout od 120 s od vyjmutí vzorku z chladicího boxu. Při zkoušce se sledovala maximální síla působící na těleso při porušení a tomu odpovídající deformace. Z naměřených hodnot lze vypočítat:

Pevnost v tahu za ohybu R_i [MPa]

$$R_i = \frac{3 P \times I}{2 b \times h^2} \quad (17)$$

Kde: P je největší dosažená síla v N;

I vzdálenost podpor zkušební tělesa v mm;

b šířka zkušební vzorku tělesa v mm;

h výška zkušební tělesa v mm;

Modul tuhosti v tahu za ohybu E_S [MPa]

$$E_S = \frac{1}{4Y} \frac{P \times I^3}{b \times h^3} \quad (18)$$

Kde Y_S je průhyb zjištěný uprostřed rozpětí při okamžiku porušení vzorku v mm.

Maximální relativní přetvoření ε_S [%]

$$\varepsilon_S = \frac{600h}{I^2} \times Y_S \quad (19)$$

Lomová energie (W)

$$W = P \times Y_S \quad (20)$$

4.3.9 Zkouška relaxace asfaltových směsí

Postup zkoušky byl podobný jako při zkoušce v tahu za ohybu. Rozdílem je, že zkouška probíhala při teplotě 0 °C ve vodní lázni, pro udržení stálé teploty vody byl použitý led. Vodu bylo v průběhu zkoušky potřeba vířit, aby bylo dosaženo požadované teploty v celé nádobě. Další rozdílem je, že při zkoušce nedochází k porušení tělesa, ale je dosaženo pouze 2/3 maximální síly stanovené při zkoušce dle kapitoly 4.3.8. Po jejím dosažení se posun lisu rychlostí 10 mm/min zastavil a zaznamenala se síla a deformace. Poté se v různých časových intervalech sledovala velikost síly. Zkouška byla ukončena po 10 minutách.

Velikost relativního relaxačního napětí v čase se vypočítá ze vztahu:

$$\sigma_r(t) = \frac{Pr(t)}{Pr(t_0)} \quad (21)$$

Kde: $Pr(t_0)$ je největší dosažená síla v [N] (na začátku relaxace)

$Pr(t)$ síla zaznamenaná v čase t [N]

4.3.10 Zkouška na laboratorně zestárlých zkušebních tělesech

Simulace laboratorního stárnutí probíhala na zhutněných tělesech, která byla po dobu 5 dní uložena při teplotě 85 °C. Po vyjmutí a ochlazení těles, se na nich dle postupu z kapitoly 4.3.4 změřily moduly tuhosti. Následně se tělesa připravila dle postupu z kapitoly 4.3.5 na

zkoušení šíření trhliny při ohybu na půlválcovém tělese, tato zkouška probíhala při 15 °C rychlostí 1 mm/min. Vyhodnocení zkoušky se provedlo dle vztahů uvedených v kapitole 4.3.5.

4.3.11 Extrakce asfaltového pojiva z asfaltové směsi

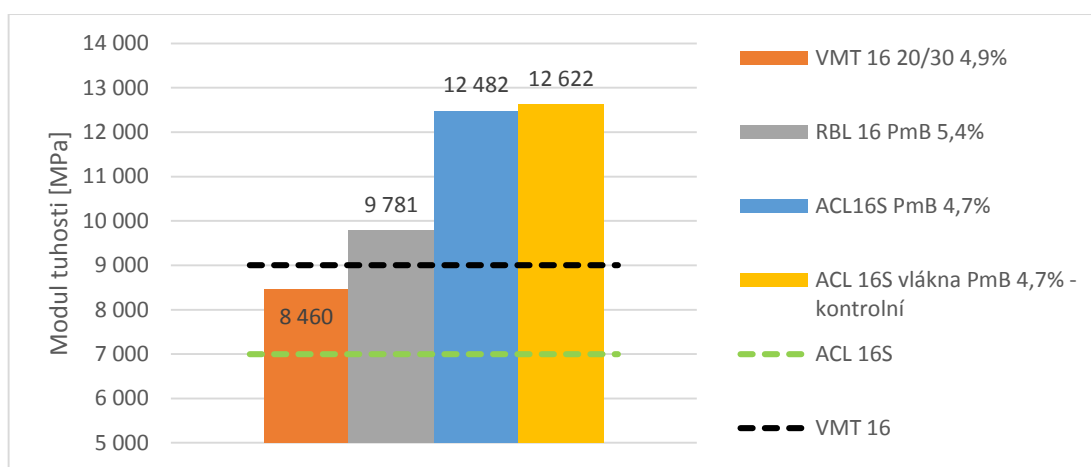
Extrakce asfaltového pojiva se používá k ověření použité křivky zrnitosti a určení množství pojiva v asfaltové směsi. Provedení extrakce asfaltového pojiva bylo zvoleno z důvodu naměření neočekávaných hodnot modulu tuhosti u asfaltové směsi F (ACL 16S s vlákny FORTA FI). Tato směs vykazovala hodnoty modulu tuhosti velmi malé oproti srovnatelné směsi ACL 16S.

Tělesa, která byla odzkoušena na odolnost vůči lomu se nahřála a následně se musela odstranit zrna kameniva poškozené při řezání zkušebního tělesa. Poté se od sebe oddělila zrna kameniva. Tato směs byla vložena do nádoby s trichlorethylenem, který rozpustil asfaltové pojivo. Do centrifugy asfaltového analyzátoru byla vložena patrona, která se předem zvažila. Do přístroje se následně umístila sada sít, na které se nalila v rozpouštědle dezintegrovaná směs z nádoby. Přístroj se uzavřel horním dílem s tryskami trichlorethylenu a po spuštění se směs prolévala rozpouštědlem a prosévala se skrze síta. Po vyčištění vzorku od asfaltu se síta s kamenivem vložila do sušárny a zde byl vzorek vysušen. Z rozdílu hmotností patrony před a po zkoušce byl stanoven podíl filerických částic o velikosti menší než 0,063 mm. Ostatní kamenivo bylo proseto sadou sít, viz kapitola 4.1.1.1, a byla stanovena křivka zrnitosti. Z rozdílu hmotností se určilo celkové množství asfaltového pojiva ve směsi.

4.4 Vyhodnocení zkoušek

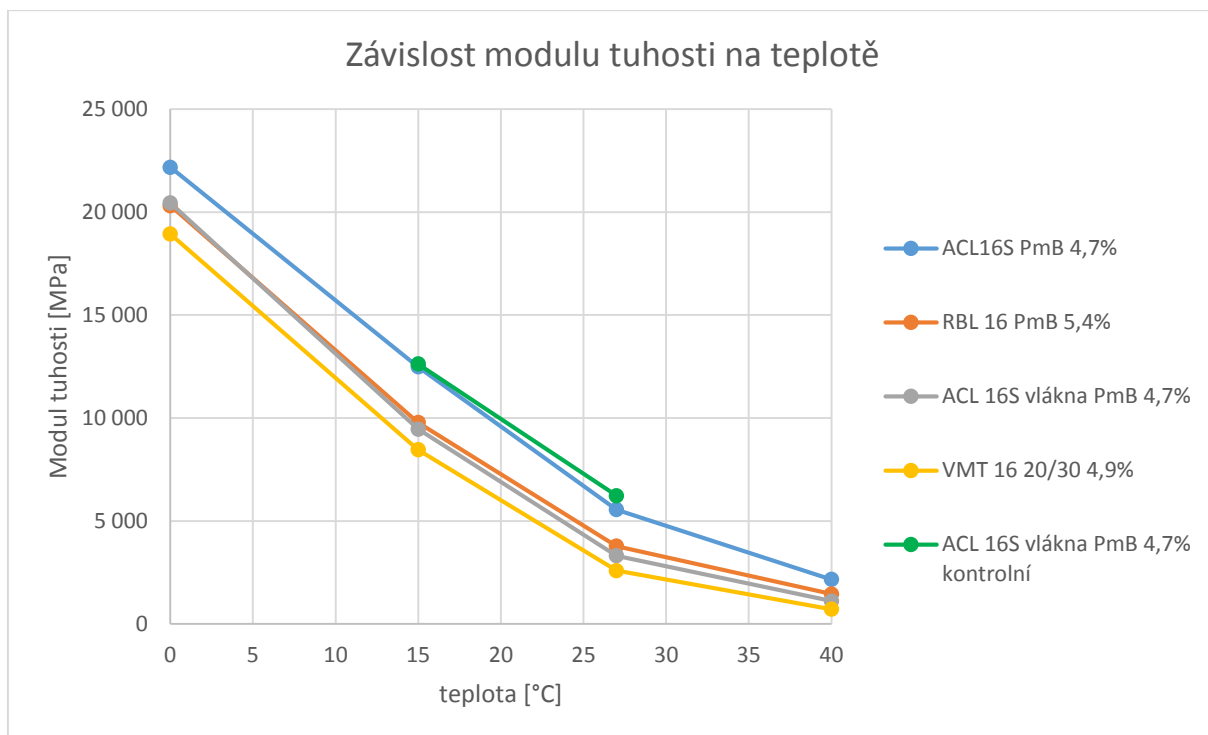
4.4.1 Měření modulu tuhosti

Moduly tuhosti byly měřeny při teplotách 0, 15, 27 a 40 °C. Při vyhodnocení zkoušky norma [32] požaduje vyřazení těch těles, u kterých se hodnota modulu tuhosti nevejde do intervalu – 20 % a +10 % průměru z naměřených hodnot. Při nízkých teplotách 0 °C a 15 °C nebylo potřeba vyřadit žádná tělesa. Odchytky se projeví u vyšších teplot zkoušky, 27 °C a 40 °C, kde již bylo třeba některá tělesa s ohledem k nadměrné odchylce vyřadit. Nutno doplnit, že v drtivé většině se vyřazovala tělesa, která vykazovala modul tuhosti vyšší než naměřený průměr, to znamená, že výsledky jsou na straně bezpečnosti.



Graf 3: Moduly tuhostí při zkušební teplotě 15°C

Graf 3 zobrazuje požadavky příslušných technických norem a předpisů na hodnotu modulu tuhosti při zkušební teplotě 15 °C. Je jasně patrné, že směs navrhovaná jako VMT 16 nespĺnila normové požadavky TP 151 a je tedy spíše směsí ACL 16S, jejíž požadavky spĺňuje. Tento pokles modulu tuhosti je nejspíše zapříčiněn vyšším obsahem asfaltového pojiva než u směsi ACL 16S a použitím jiného druhu asfaltového pojiva, jakkoli se jedná o tvrdý silniční asfalt.



Graf 4: Porovnání modulů tuhosti

Jak již bylo uvedeno dříve, požadavkem na směs typu VMT 16 je minimální modul tuhosti 9000 MPa při zkušební teplotě 15 °C. Z grafu 3 lze vyčíst, že tuto podmínku nespĺňuje pouze směs s asfaltovým pojivem gradace 20/30. Dále při porovnání směsi RBL a VMT, které mají stejnou čáru zrnitosti, můžeme pozorovat pozitivní účinky modifikovaného pojiva na modul tuhosti, ten se zvýšil o 46 % při teplotě 27 °C respektive 102 % při teplotě 40 °C.

Při porovnání směsi ACL 16S s vlákny Forta FI a bez vláken byl předpoklad zvýšení modulu tuhosti o 6 až 44% [39]. To se bohužel při prvním měření neprojevilo. Naměřené hodnoty směsi s vlákny vykazovaly úbytek tuhosti o 15 až 67 % v závislosti na teplotě. Proto byla vyrobena další kontrolní sada zkušebních těles, na kterých se ověřovala správnost předchozích výsledků. Zkouška byla provedena při teplotě 27 °C. Naměřené hodnoty u většiny směsí byly srovnatelné, pouze směs s vlákny vykazovala vlastnosti o 88 % vyšší. Z tohoto porovnání se dá usoudit, že nejspíše došlo k chybě při výrobě prvních těles s vlákny, později bylo stanoveno množství pojiva a čára zrnitosti pomocí extraktoru a síťového rozboru a potvrdila se domněnka špatného dávkování pojiva. Na kontrolních tělesech se ještě provedla zkouška při 15 °C, výsledky jsou uvedeny v grafu 4.

Podrobné výsledky ze zkoušení modulu tuhosti jsou uvedeny v detailu v příloze.

4.4.2 Šíření trhliny zkouškou ohybem na půlválcovém tělese

Zkouška byla provedena při teplotách 0°C a -10°C podle postupu z kapitoly 4.3.5 a dle víceleté zkušenosti katedry silničních staveb ČVUT v Praze. Na základě dostupné literatury se předpokládalo, že zvýšení obsahu asfaltového pojiva bude mít za následek zvýšení odolnosti vůči šíření trhlin zejména při teplotě 0 °C. Dalším předpokladem bylo zvýšení odolnosti použitím syntetických vláken Forta FI.

Měření probíhalo vždy na šesti vzorcích pouze u směsi ACL 16S s pojivem 20/30 se hodnoty měřily pouze na třech tělesech. V následujících tabulkách 8 a 9 jsou uvedeny výsledky měření:

ϵ_{\max} – vypočtené relativní protažení při maximální síle, F_{\max} – maximální vyvinutá síla při porušení, σ_{\max} – maximální napětí při porušení, K_{Ic} – Odolnost vůči lomu (lomová houževnatost).

Tabulka 8: Odolnost vůči šíření trhlin při 0°C

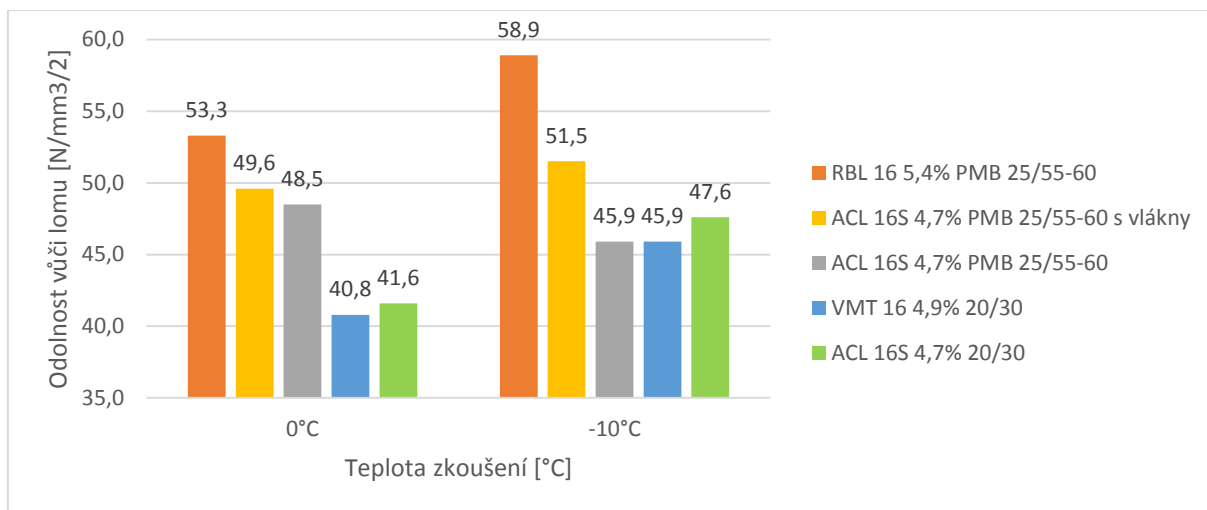
	ϵ_{\max}	F_{\max}	σ_{\max}	K_{Ic}
Asfaltová směs	[%]	[kN]	[N/mm ²]	[N/mm ^{3/2}]
RBL 16 5,4 % PMB 25/55-60	1,6%	8,59	7,2	53,3
ACL 16S 4,7 % PMB 25/55-60 s vlákny	1,9%	8,00	6,7	49,6
ACL 16S 4,7 % PMB 25/55-60	1,6%	7,80	6,6	48,5
VMT 16 4,9 % 20/30	1,3%	6,65	5,5	40,8
ACL 16S 4,7 % 20/30	1,6%	6,77	5,6	41,6

Tabulka 9: Odolnost vůči šíření trhlin při -10°C

	ϵ_{\max}	F_{\max}	σ_{\max}	K_{Ic}
Asfaltová směs	[%]	[kN]	[N/mm ²]	[N/mm ^{3/2}]
RBL 16 5,4 % PMB 25/55-60	1,6%	9,36	7,9	58,9
ACL 16S 4,7 % PMB 25/55-60 s vlákny	1,6%	8,27	6,9	51,5
ACL 16S 4,7 % PMB 25/55-60	1,5%	7,35	6,1	45,9
VMT 16 4,9 % 20/30	1,5%	7,52	6,2	45,9
ACL 16S 4,7 % 20/30	1,6%	7,72	6,4	47,6

U všech směsí došlo při zkoušce provedené při teplotě -10 °C k nárůstu odolnosti vůči lomu zkoušce porovnání s výsledky získanými při teplotě 0 °C, pouze u směsi ACL 16S 4,7% PMB 25/55-60, tato hodnota klesla. Vyhodnocením zkoušky jsme potvrdili jeden z předpokladů a to, pozitivní vliv zvýšení obsahu asfaltového pojiva na zvýšení odolnosti vůči šíření trhlin, ta se zvýšila o 10 – 28 % v závislosti na teplotě a typu zkoušené asfaltové směsi. Při porovnání směsí

ACL 16S s různým druhem pojiva jsme pozorovali vliv modifikovaného asfaltového pojiva na zvýšení odolnosti proti šíření trhliny, ta se při použití modifikovaného pojiva zvýšila o 16 %. Při zkoušení se nepotvrdil kladný vliv použití syntetických vláken v asfaltové směsi. Odolnost při 0 °C se zvýšila pouze o 2 %, což není nijak výrazný nárůst odolnosti proti šíření trhliny. Zvýšení odolnosti při teplotě -10 °C je velmi ovlivněno již dříve zmíněným nevysvětlitelným poklesem odolnosti proti šíření trhliny u asfaltové směsi ACL 16S 4,7% PMB 25/55-60.



Graf 5: Odolnost vůči šíření trhlin

4.4.3 Stanovení citlivosti vůči účinkům vody

Pro tuto zkoušku bylo vyrobeno pro každou směs 9 zkušebních těles, která byla zhutněna rázovým zhutňovačem 2x25 údery. Zkouška probíhala podle postupu uvedeného v kapitole 4.3.6.

V tabulkách jsou zobrazeny výsledky zkoušky spolu s průměrnými objemovými hmotnostmi a mezerovitostmi skupin těles. V grafech jsou zobrazeny hodnoty ITSR s ohledem na typ směsi.

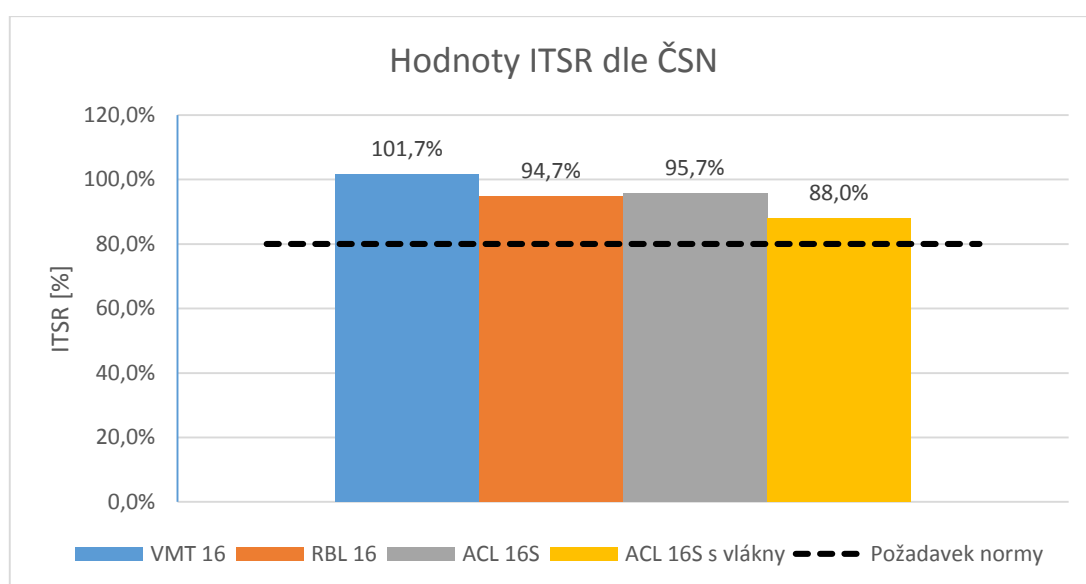
Tabulka 10: Stanovení ITSR

Směs B VMT16 s 4,9 % asfaltového pojiva 20/30				
soubor těles	obj. hmotnost [g.cm ⁻³]	mezerovitost [%]	ITS [MPa]	ITSR [%]
Suchá	2,199	6,9%	1,72	
ČSN	2,201	6,8%	1,75	101,7%
AASHTO	2,203	6,7%	1,68	97,9%

Směs R RBL 16 s 5,4 % asfaltového pojiva				
soubor těles	obj. hmotnost [g.cm ⁻³]	mezerovitost [%]	ITS [MPa]	ITSR [%]
Suchá	2,228	8,0%	2,66	
ČSN	2,231	7,9%	2,52	94,7%
AASHTO	2,226	8,1%	2,50	94,0%

Směs C ACL 16S s 4,7 % asfaltového pojiva				
soubor těles	obj. hmotnost [g.cm ⁻³]	mezerovitost [%]	ITS [MPa]	ITSR [%]
Suchá	2,112	14,3%	1,93	
ČSN	2,110	14,4%	1,85	95,7%
AASHTO	2,110	14,4%	1,66	86,3%

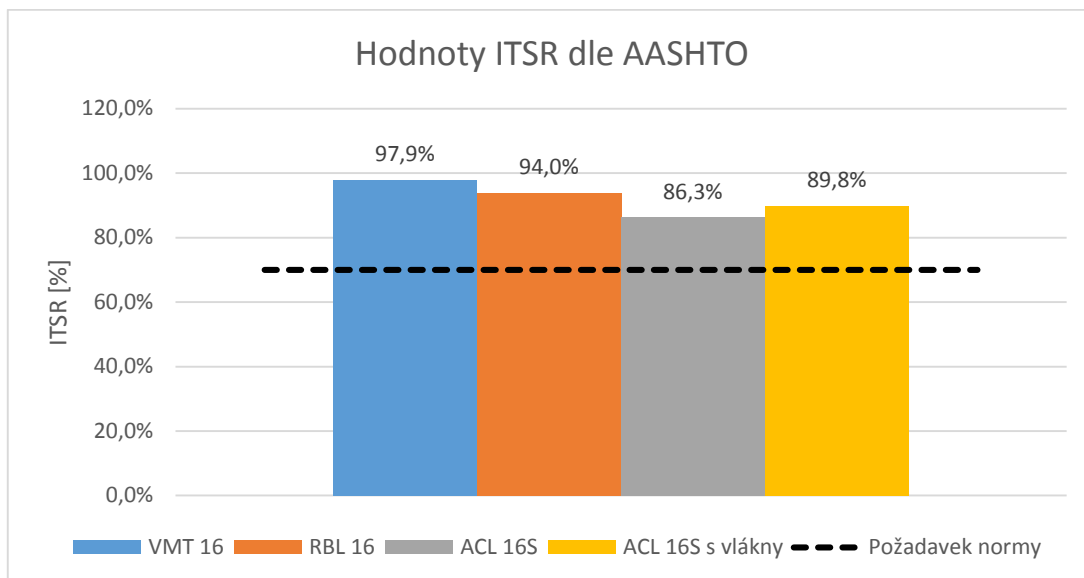
Směs F ACL 16S s vlákny 4,7% asfaltového pojiva				
soubor těles	obj. hmotnost [g.cm ⁻³]	mezerovitost [%]	ITS [MPa]	ITSR [%]
Suchá	2,169	11,2%	2,23	
ČSN	2,168	11,2%	1,96	88,0%
AASHTO	2,169	11,2%	2,00	89,8%



Graf 6: Porovnání hodnot ITSR s ohledem na typ směsi dle ČSN

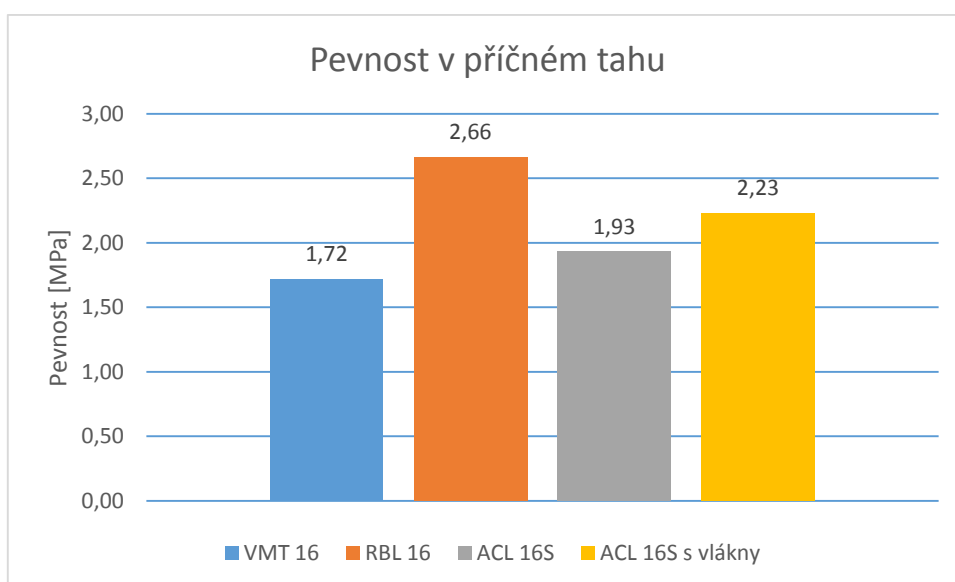
Z grafu 6 je patrné, že všechny směsi splňují požadavky normy [22], [38] na minimální hodnotu ITSR, která je 80 %. Předpokládá se, že při sycení tělesa vodou se pevnostní charakteristiky materiálu zhorší, to znamená, že hodnoty ITSR by měly být menší než 100 %. U směsi VMT můžeme pozorovat nežádoucí překročení této hranice, které může být způsobeno špatným rozdělením těles do skupin nebo nedodržením technologické kázně při výrobě Marshallových těles. V našem případě to nejspíš bude ovlivněno nedodržením kázně

při výrobním procesu těles, protože hodnoty objemových hmotností obou skupin těles jsou srovnatelné.



Graf 7: Porovnání hodnot ITSR s ohledem na typ směsi dle AASHTO

Všechna tělesa splňují požadavek na minimální hodnotu 70 % ITSR (hodnota je stanovená v rámci experimentálních měření prováděných na katedře silničních staveb ČVUT v Praze). Při porovnání hodnot z grafu 6 a 7 se potvrdil předpoklad toho, že vystavením tělesa horším podmínkám, v našem případě zmrazovacímu cyklu a vyšší teplotě vodní lázně při zkoušce AASHTO se sníží pevnost tělesa při zkoušce v příčném tahu.



Graf 8: Porovnání hodnot ITS s ohledem na typ směsi

Z grafu 8 je patrný pozitivní vliv zvýšeného množství pojiva na pevnost v příčném tahu stanovenou při teplotě 15 °C na suchých zkušebních tělesech. Pevnost se oproti referenční

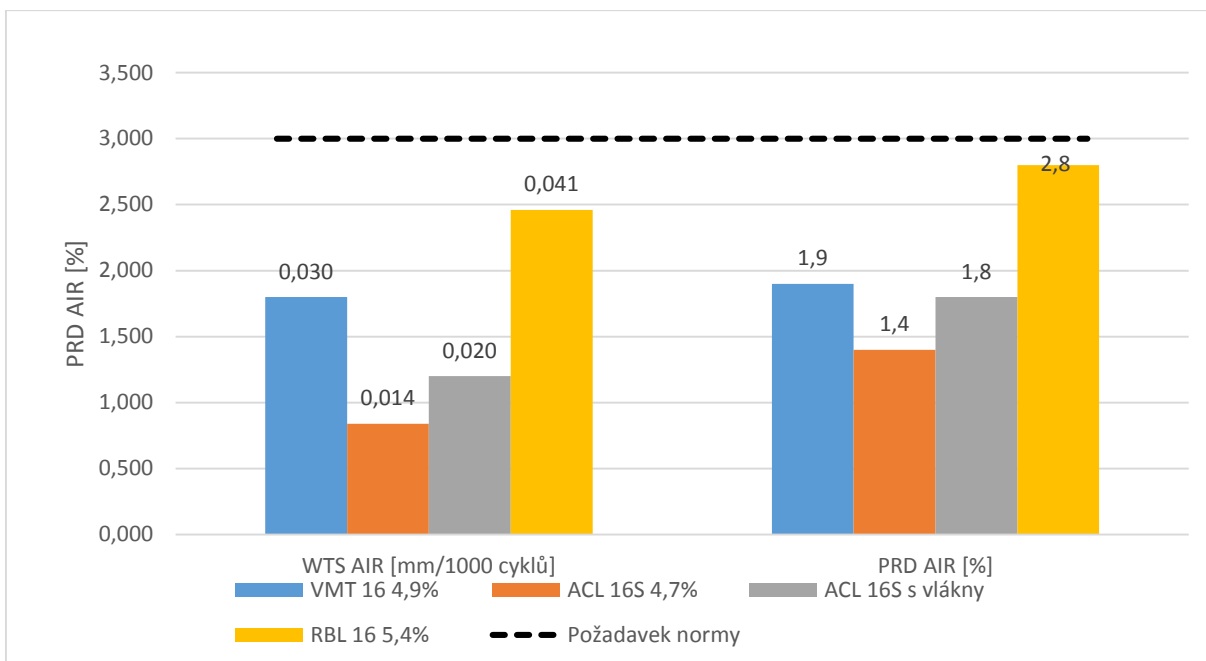
směsi ACL 16S zvýšila o 38 %. Sporný je nárůst pevnosti směsi ACL 16S s vlákny, protože došlo při výrobě směsi k vyššímu dávkování asfaltového pojiva. Při porovnání směsi VMT 16 a ACL 16S můžeme pozorovat pozitivní vliv modifikovaného asfaltového pojiva na pevnost v příčném tahu. Tělesa ACL 16S s PmB pojivem vykazují zvýšení pevnosti o 11 % oproti VMT 16 s pojivem gradace 20/30 i přesto, že je ve směsi o 0,2 % méně asfaltového pojiva.

4.4.4 Zkouška pojiždění kolem

Zkouška byla provedena na deskách při teplotě 50 °C dle postupu z kapitoly 4.3.7. Vždy byly zkoušeny dvě desky stejné směsi najednou. Hodnoty maximálního přírůstu hloubky koleje (WTS_{AIR}) a maximální poměrné hloubky koleje (PRD_{AIR}) jsou vymezeny v TP 151 a v ČSN EN 13108-1. Normy předepisují hodnotu WTS_{AIR} 0,05 mm/10³ cyklů, tento požadavek byl splněn u všech směsí. Maximální přípustná hodnota PRD_{AIR} je 3 %, ta také nebyla překročena u žádné z posuzovaných asfaltových směsí. Dá se tedy tvrdit, že i směs RBL, která je u obou sledovaných parametrů na horní hranici přípustného intervalu, splňuje požadavky TP 151 na zkoušku pojiždění kolem při standardní teplotě této zkoušky.

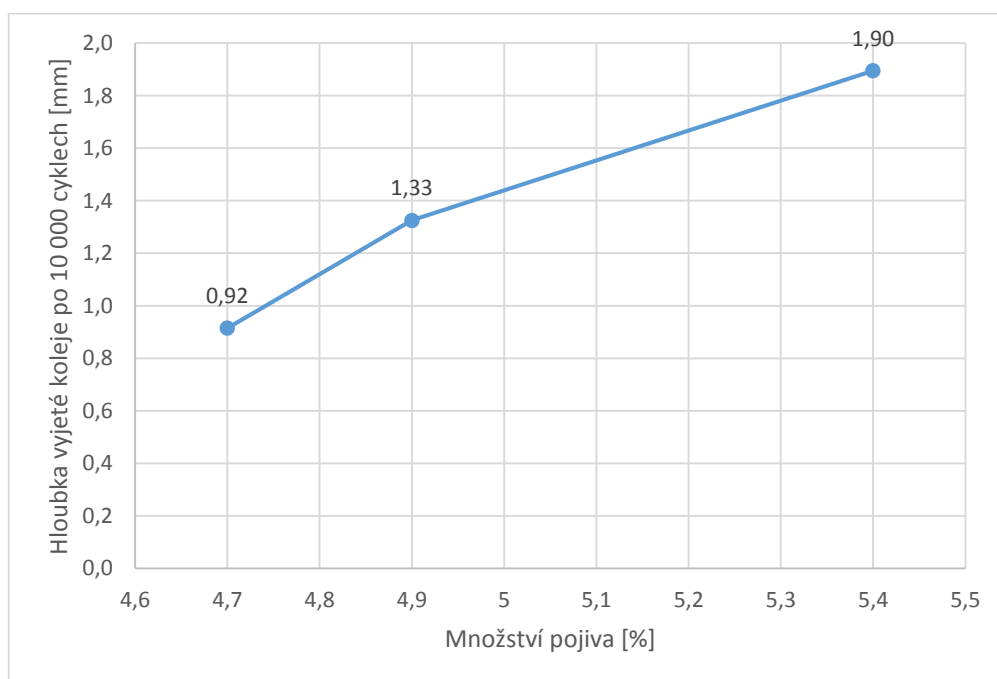
Tabulka 11: Výsledky zkoušky pojiždění kolem při 50°C

Asfaltová směs	tloušťka	obj. hm.	mezerovitost	míra zhutnění	průměrná hloubka koleje po 10 000 cyklech v mm		WTS_{AIR}	PRD_{AIR}
	[mm]	[g/cm ³]	[%]	[%]	[mm]	[mm]	[mm/10 ³ cyklů]	[%]
VMT 16 4,9 %	60,19	2,354	3,46	99,69	1,26	1,33	0,030	1,93
	60,38	2,335	4,26	98,87	1,39			
ACL 16S 4,7 %	60,51	2,324	5,69	99,07	0,66	0,92	0,014	1,41
	60,30	2,321	5,80	98,95	1,17			
ACL 16S s vlákny	60,15	2,377	2,67	101,24	1,02	1,18	0,020	1,77
	60,22	2,377	2,68	101,23	1,34			
RBL 16 5,4 %	60,26	2,370	2,20	99,58	2,11	1,90	0,041	2,82
	60,27	2,376	1,94	99,84	1,68			



Graf 9: Výsledky zkoušky pojiždění kolem

Z výsledků zkoušky je patrný vztah mezi množstvím použitého pojiva ve směsi a hloubkou vyjeté koleje. Můžeme sledovat i pozitivní vliv přidání syntetických vláken Forta FI do směsi, kdy směs ACL 16S s vlákny vykazuje o 11% menší hloubku vyjeté koleje než směs ACL 16S bez vláken. Hodnoty WTS_{AIR} a PRD_{AIR} jsou sníženy o 34 % respektive 8 %.



Graf 10: Závislost hloubky vyjeté koleje na obsahu asfaltového pojiva

4.4.5 Zkouška pevnosti tahu za ohybu

Průběh zkoušky je popsán v kapitole 4.3.8. Při zkoušce jsme sledovali závislost velikosti síly na deformaci tělesa, tyto hodnoty byly zaznamenávány datalogerem 17 krát za sekundu. Dále byla pomocí měřicího přístroje lisu sledována maximální síla při porušení tělesa a tomu odpovídající deformace.

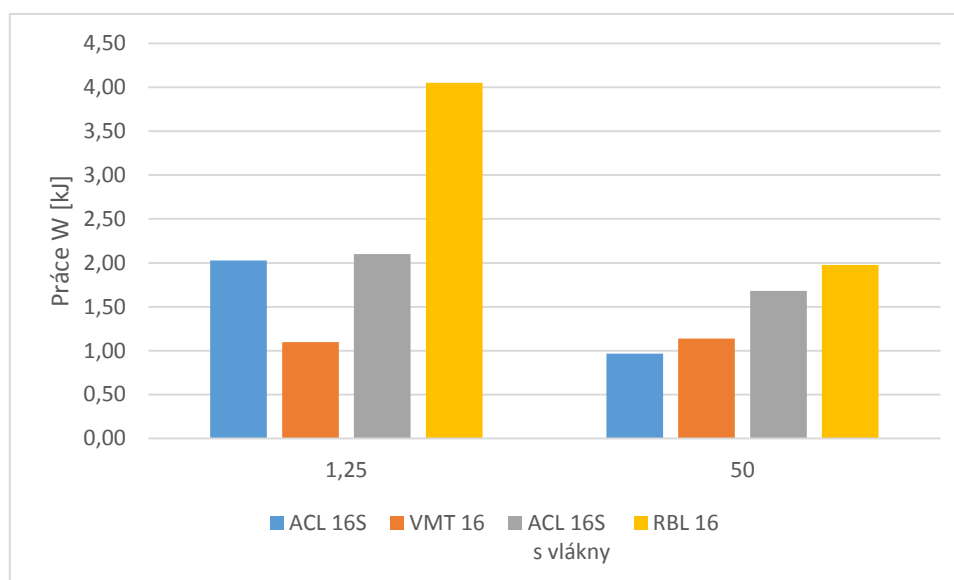
Při zkoušení těles bylo zjištěno, že se data udávána lisem a zachycená datalogerem mírně liší, jelikož budeme data z datalogeru dále analyzovat, použili jsme pro výpočet výše uvedených charakteristik tato data. Uvedená odchylka naměřených hodnot se zvětšuje spolu s rostoucí rychlostí zatěžování, je tedy velmi pravděpodobné, že měřící zařízení lisu není schopno dosáhnout stejné frekvence měření jako dataloger a maxima, která trvají zlomek sekundy, jednoduše nezaznamená.

Výpočet lomové energie (přetvárné práce) potřebné k porušení tělesa byl proveden ze zaznamenaných hodnot síly v čase. Práce se vypočítá jako součin síly a deformace. Graficky lze lomovou energii vyjádřit jako plochu pod křivkou, matematicky by se tento problém řešil výpočtem integrálu. Bohužel zaznamenaná data netvoří funkci, která je pro výpočet integrálu nutná, ale jsou tou pouze zaznamenané body s velkou hustotou. Proto byla práce vypočítána pro jednotlivé časové intervaly $\Delta t \approx 0,059s$ (17 měření za sekundu), součet těchto hodnot je námi vypočtená lomová energie (přetvárná práce).

Vypočtená lomová energie je nutná k vytvoření trhliny a porušení tělesa, dalo by se tedy tvrdit, že je to určité vyjádření schopnosti materiálu odolávat vnějším vlivům. Z příložené tabulky 12 a grafu 11 lze vyčíst určitý trend závislosti velikosti vykonané práce (potřebné deformační/lomové energie) na obsahu asfaltového pojiva, a to že se zvýšením obsahu pojiva se zvyšuje i energie nutná k porušení tělesa. Stejně tak vyčteme i zvýšení odolnosti proti porušení vliv přidání vláken Forta FI do asfaltové směsi. Graf 11 zobrazuje obě rychlosti zatěžování. Při nižší rychlosti zatěžování je vykonaná práce vyšší nejspíše z toho důvodu, že zatěžované těleso určitým způsobem skutečně může relaxovat, což je předpoklad volby pokud možno co nejnižších rychlostí (např. přístup u zkoušky šíření trhliny).

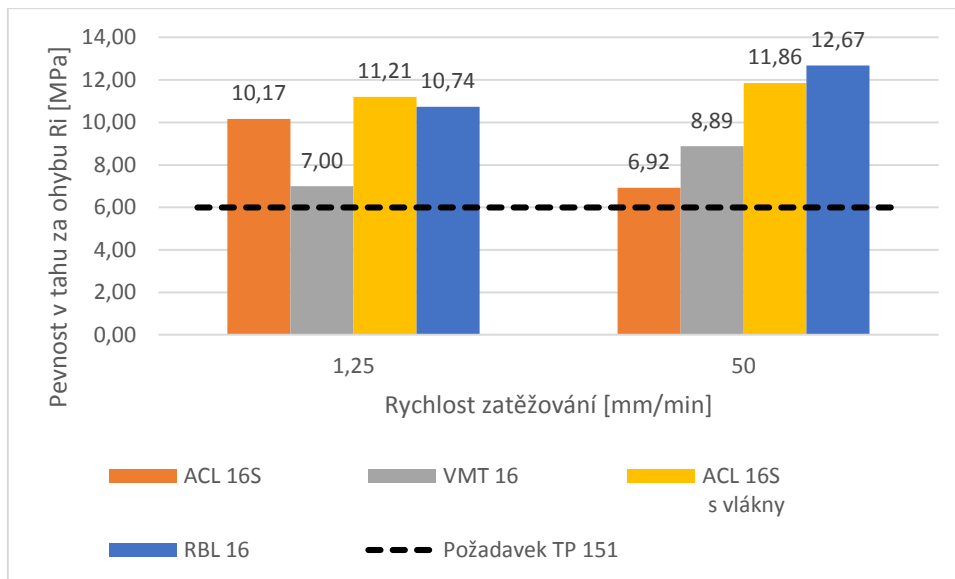
Tabulka 12: Vyhodnocení zkoušky v tahu za ohybu

Asfaltová směs	Y _s Deformace [mm]	P Síla [kN]	W Práce [kJ]	R _i Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	E _s Modul tuhosti v tahu za ohybu [MPa]	ε _s Maximální relativní přetvoření [%]	Rychlost zatěžování:
ACL 16S	0,882	4,57	2,03	10,17	2014	0,51	1,25
VMT 16	0,711	3,42	1,14	7,00	1696	0,42	
ACL 16S s vl.	0,824	5,47	2,10	11,21	2350	0,48	
RBL 16	1,465	5,33	4,05	10,74	1265	0,85	
ACL 16S	0,736	3,51	0,97	6,92	1703	0,43	50
VMT 16	0,746	4,51	1,10	8,89	2092	0,44	
ACL 16S s vl.	0,908	5,76	1,68	11,86	2532	0,53	
RBL 16	0,753	6,25	1,98	12,67	2884	0,44	

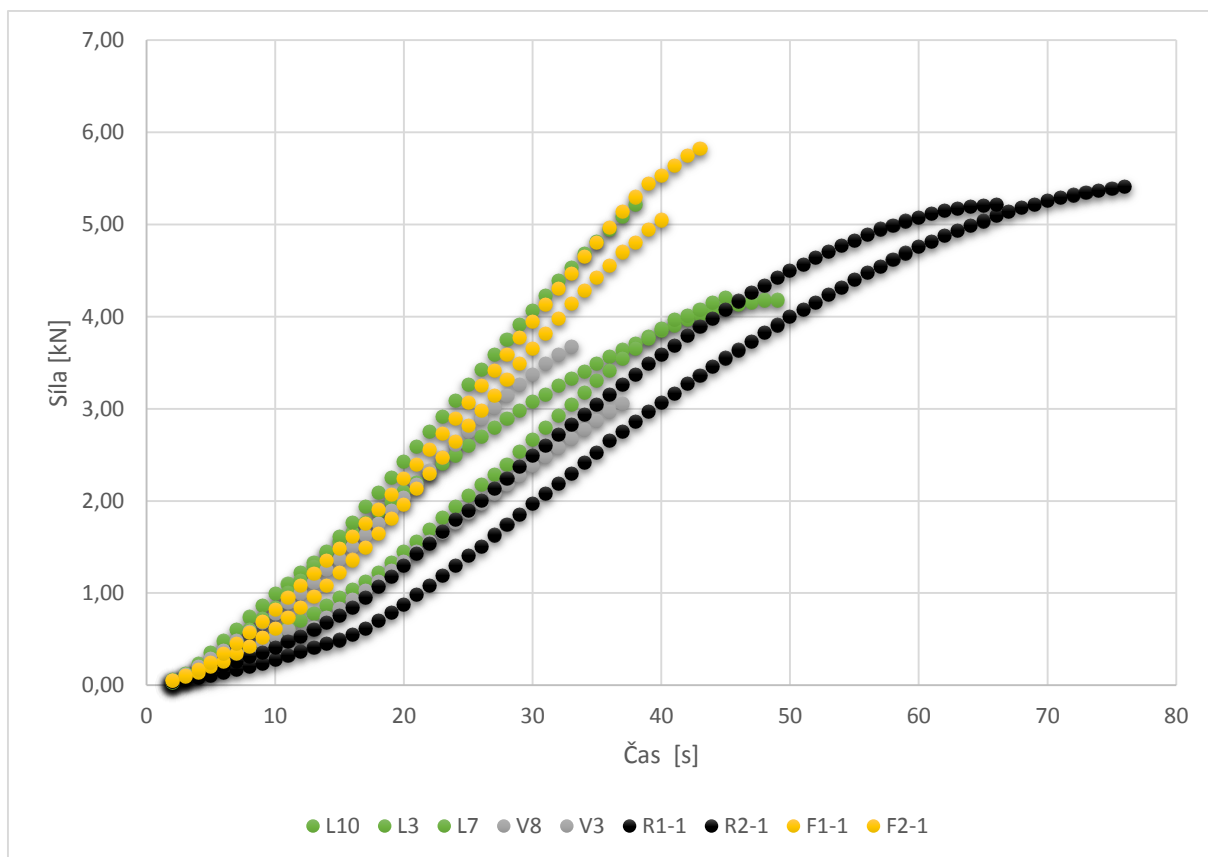


Graf 11: Vykonaná energie nutná k porušení tělesa při zkoušce v tahu za ohybu

Graf 12 znázorňuje pevnosti v tahu za ohybu pro jednotlivé směsi a různé rychlosti zatěžování v porovnání s požadavkem TP 151, které stanovují požadavek na minimální hodnotu pevnosti v tahu za ohybu 6 MPa. Tomuto požadavku vyhověly všechny námi zkoušené směsi. I při této zkoušce lze pozorovat pozitivní vliv jak přidání vláken Forta FI, tak zvýšení obsahu asfaltového pojiva.



Graf 12: Pevnost při zkoušce v tahu za ohybu



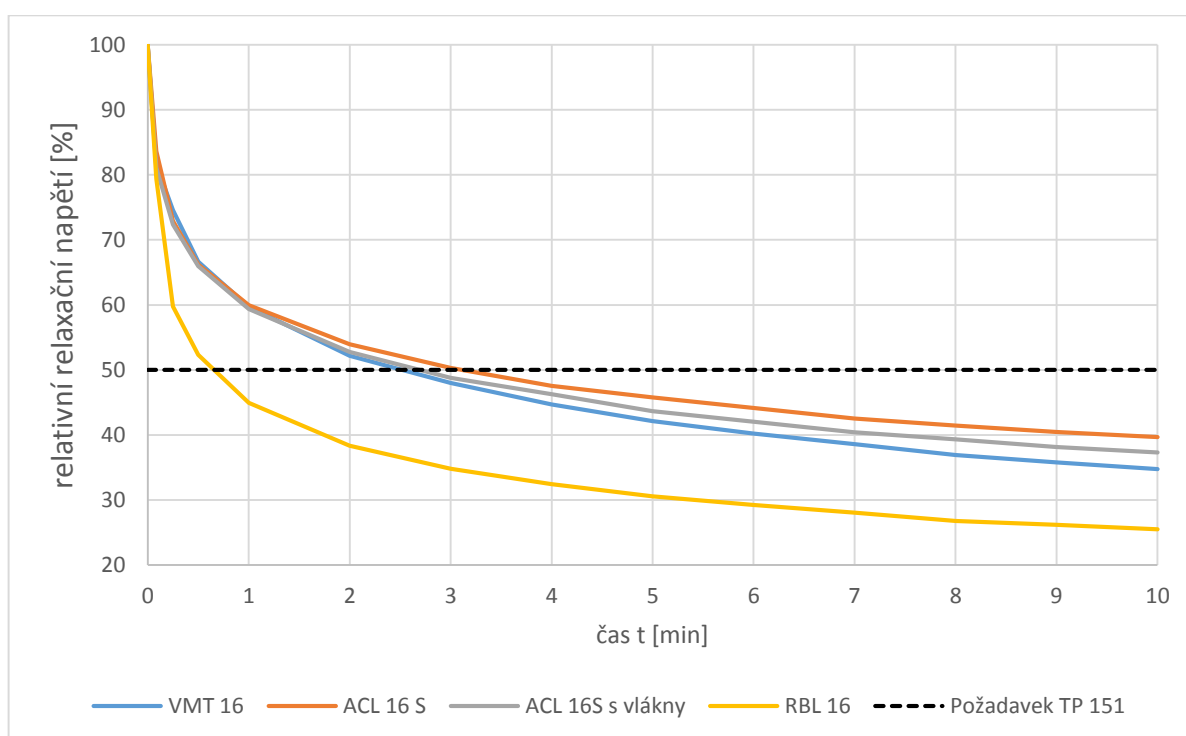
Graf 13: Průběh naměřených sil při zkoušce v tahu za ohybu

4.4.6 Zkouška relaxace asfaltových směsí při nízkých teplotách

Průběh této zkoušky je popsán v kapitole 4.3.9. Relaxace je odbourání napětí v důsledku existence viskoelastického chování asfaltového pojiva. Předpokládalo se tedy, že zvýšené množství pojiva bude mít kladný vliv na relaxační chování asfaltové směsi. Zkouška probíhala na třech tělesech každé směsi. Velikost zatěžovací síly byla zaznamenávána v čase 0, 5, 15 a

30s a poté každou celou minutu. Zkouška byla ukončena po 10 minutách. Graf 14 znázorňuje průběh relativního relaxačního napětí v čase.

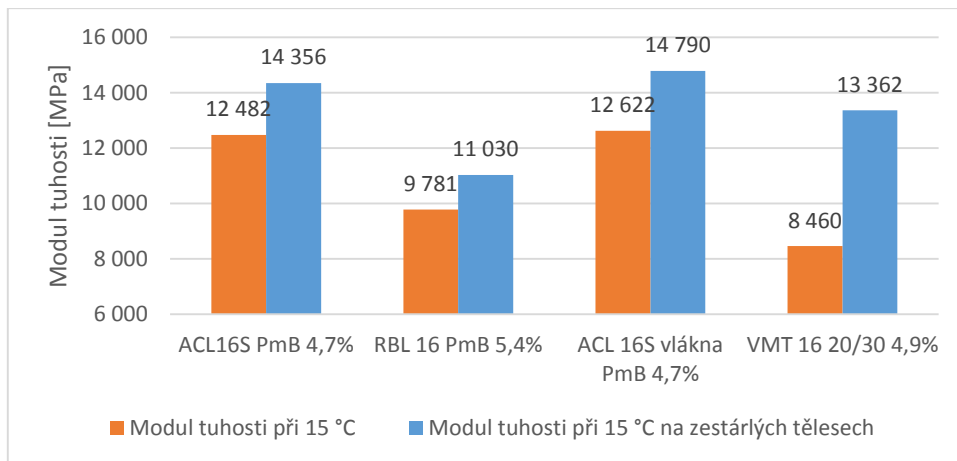
Předpis TP 151 předepisuje, že pokles napětí na 50% hodnotu relativního relaxačního napětí by měl pro ložní vrstvy proběhnout nejdéle do 10 minut, pro pokladní vrstvy se tato doba prodlužuje na 20 minut. Všechny námi zkoušené směsi splnili přísnější požadavky na ložní vrstvu. Směs RBL 16 vykazuje hodnotu nižší než 50 % relaxačního napětí již po 1 minutě. Ostatní směsi se na normou požadovanou hodnotu dostávají mezi druhou a čtvrtou minutou. Můžeme tedy při předpokladu splnění ostatních požadavků TP 151 tyto směsi použít jako podkladní a ložní vrstvy s označením VMT 16.



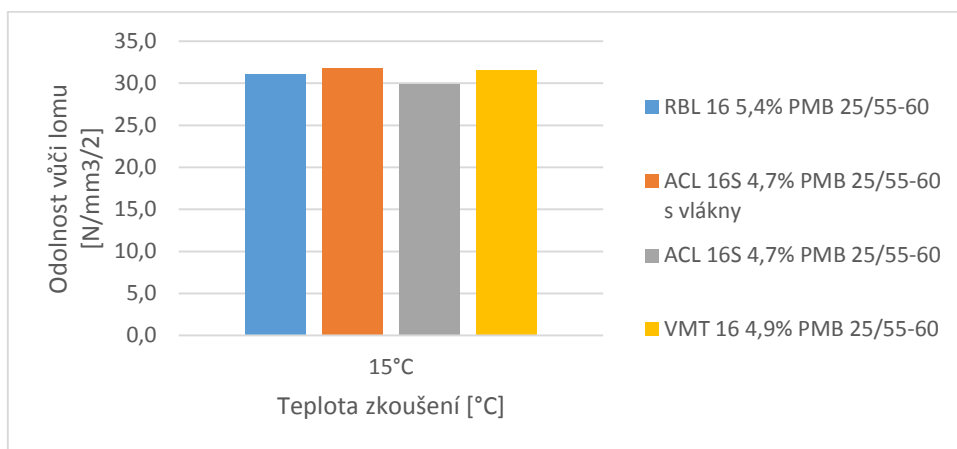
Graf 14: Průběh relativního relaxačního napětí při zkoušce relaxace dle TP 151

4.4.7 Zkoušky provedené na laboratorně zestárlých zkušebních tělesech

Na zestárlých zkušebních tělesech byl nejprve změřen modul tuhosti při 15 °C. Graf 15 zobrazuje porovnání modulů tuhosti před a po stárnutí. Můžeme vidět, že vlivem stárnutí se zvýšil modul tuhosti o 13-17 % v závislosti na asfaltové směsi.



Graf 15: Modul tuhosti zestárých těles



Graf 16: Odolnost vůči lomu při 15 °C na zestárých zkušebních tělesech

Tabulka 13: Odolnost vůči šíření únavové trhliny při 15 °C na zestárých zkušebních tělesech

Asfaltová směs	ϵ_{\max}	F_{\max}	σ_{\max}	K_{Ic}
	[%]	[kN]	[N/mm ²]	[N/mm ^{3/2}]
RBL 16 5,4% PMB 25/55-60	1,5	4,99	4,2	31,1
ACL 16S 4,7% PMB 25/55-60 s vlákny	1,3	4,99	4,3	31,8
ACL 16S 4,7% PMB 25/55-60	1,4	4,77	4,0	29,9
VMT 16 4,9% PMB 25/55-60	1,5	5,06	4,3	31,6

Zkouška únavové trhliny probíhala při zkušební teplotě 15 °C, rychlost zatěžování byla 1 mm/min. Tyto hodnoty a zkouška samotná vychází ze současných trendů v USA, kde se podobná měření v posledních letech provádějí. Z grafu 16 a tabulky 13 je patrné, že se odolnost vůči lomu u jednotlivých skupin testovaných těles moc neliší, rozdíly jsou v řádu jednotek procent. Mohlo by se tedy zdát, že tento druh zkoušení únavové trhliny je nevhodný. Na ostatních výsledcích silniční laboratoře ČVUT při podobné zkoušce lze sledovat podstatné rozdíly v naměřených hodnotách řádově v desítkách procent, zkoušky byly prováděny na

tělesech s různými čarami zrnitostí a rozdílným pojivem. Pravděpodobně tedy v našem případě hraje velkou roli to, že tělesa mají podobnou čaru zrnitosti a při výrobě bylo použito stejného pojiva.

4.4.8 Extrakce asfaltového pojiva

Jak již bylo v této práci dříve zmíněno, extrakce probíhala pouze na směsi ACL 16S s vlákny Forta FI, protože při měření modulu tuhosti směs vykazovala nízké hodnoty modulu tuhosti oproti srovnatelné směsi bez vláken, což se jeví jako krajně nelogické. Extrakcí jsme chtěli ověřit dodržení navržené receptury asfaltové směsi zejména pak obsahu asfaltového pojiva.

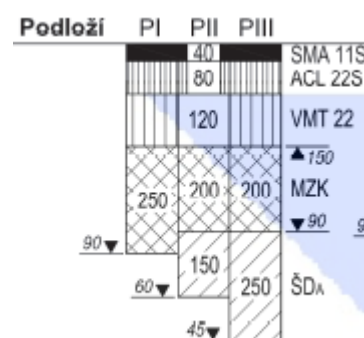
Tabulka 14: Čara zrnitosti a obsah asfaltového pojiva při extrakci

Síto	Marshallova tělesa			Desky		
	Hmotnost na sítěch	Hmotnost na sítěch	Propady	Hmotnost na sítěch	Hmotnost na sítěch	Propady
[mm]	[g]	[%]	[%]	[g]	[%]	[%]
16	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	100,0
11,2	224,9	14,9	85,1	250,5	16,6	83,4
8	207,4	13,7	71,4	237,8	15,8	67,6
5,6	221,0	14,6	56,9	195,7	13,0	54,6
4	137,6	9,1	47,8	132,7	8,8	45,8
2	174,7	11,5	36,2	171,7	11,4	34,4
1	131,1	8,7	27,6	112,6	7,5	26,9
0,5	81,6	5,4	22,2	98,4	6,5	20,4
0,25	90,8	6,0	16,2	71,2	4,7	15,7
0,125	55,6	3,7	12,5	53,6	3,6	12,1
0,063	48,7	3,2	9,3	48,8	3,2	8,9
<0,063	140,7	9,3	0,0	133,8	8,9	0,0
zbytek	1 514,1			1 506,8		
navážka	1 599,2			1 578,3		
obsah pojiva	5,32%			4,53%		

Extrakce byla provedena dvakrát z každé směsi. Výsledek obsahu asfaltového pojiva je tedy průměr ze dvou hodnot. Při extrakci bylo zjištěno nadměrné dávkování asfaltového pojiva při výrobě Marshallových těles u směsi s označením ACL 16S s vlákny Forta FI. Při vyhodnocení výsledků této směsi bychom měli tuto skutečnost zohlednit.

5. POROVNÁNÍ KONSTRUKCÍ VOZOVEK

Pro porovnání relativního porušení obrusných, ložních a podkladních vrstev jsme použili program Laymed, který provádí výpočet dle návrhové metody uvedené v TP 170. Při posouzení vypočítává relativní porušení na konci teoretické životnosti vozovky a je schopen vyhodnotit i napětí a deformace na jednotlivých vrstvách. Do programu je nutné zadat skladbu vozovky. Pro naše účely jsme použili upravenou skladbu vozovky D0-N-2 dle TP 170 pro třídu dopravního zatížení S.



Obrázek 30: Konstrukce vozovky [41]

Obrusné vrstvy jsme vybírali ze směsí navržených v bakalářské práci Moniky Chmelíkové, [40], kde bylo využito stejného kameniva jako v případě asfaltových směsí posuzovaných v této diplomové práci. Charakteristiky ložní vrstvy korespondují s měřením modulů tuhosti při 15 °C provedených v rámci této práce. Celkem bylo posuzování 15 konstrukcí, které vznikly kombinací navržených asfaltových směsí.

Pro výpočet v programu je nutné zadat některé další proměnné parametry. Pro výpočet jsme uvažovali typ podloží PIII, vodní režim pendulární a nenamrzavé zeminy v podloží vozovky. Ostatní návrhové parametry jsme pro všechny výpočty ponechali stejné, abychom dostali porovnatelné výsledky. Návrhovou životnost jsme zvolili 25 let, rozdíl koeficientů růstu dopravy 1,28. Únavový parametr byl odvozen z poznatků, kterými pro obdobné asfaltové směsi disponuje katedra silničních staveb. Přesnější by bylo samozřejmě stanovení únavových charakteristik laboratorními zkouškami. Pro ty ale z časového hlediska při zvoleném rozsahu směsí nebyl prostor, a proto se přistoupilo k méně přesnému řešení.

Vstupní údaje pro návrh vozovky jsou v souladu s [41] [42] následující:

- návrhová úroveň porušení,
- dopravní zatížení a návrhové období pro konstrukci vozovky,
- charakteristiky podloží
- klimatické podmínky

Návrhová úroveň porušení je předpokládaný vývoj porušování vozovky, které je vyjádřené přípustnou plochou výskytu konstrukčních poruch na konci návrhového období. Pro zvolenou úroveň D0 je plocha s konstrukčními poruchami uvažovaná na úrovni menší než 1 % plochy.

Ve výpočtu jsme použili zatížení návrhovou nápravou, které má následující charakteristiky:

- zatížení nápravy $Q_k = 100 \text{ kN}$,
- počet kol se zdvojenými pneumatikami 2,
- vzdálenost středu dotykových ploch 0,344 m,
- poloměr dotykových (zatěžovacích) ploch $a_k = 0,1203 \text{ m}$,
- průměrný dotykový tlak $q_k = 0,550 \text{ MPa}$.

Další vstupní hodnotou pro výpočet je počet těžkých nákladních vozidel označovaný jako TNV_0 , tato hodnota byla zvolena 10 000 vozidel/den. Program umožňuje výpočet, ve kterém lze zohlednit růst intenzit automobilové dopravy. Růst dopravy popisují součinitele nárůstu intenzit provozu pro roky počátku a konce návrhového období (pro výpočet $\delta_z=1,05$ a $\delta_k=1,33$).

V první fázi provede program výpočet hodnoty TNV_k , což je průměrná hodnota denní intenzity provozu TNV v návrhovém období, ze vzorce:

$$TNV_k = 0,5(\delta_z + \delta_k)TNV_0 \quad (22)$$

Dále se určuje návrhová hodnota (TNV_d) denní intenzity provozu TNV pro nejvíce zatížený jízdní pruh ze vzorce:

$$TNV_d = C_1 \times TNV_k \quad (23)$$

Kde C_1 je součinitel vyjadřující podíl intenzity TNV na nejvíce zatíženém jízdním pruhu. V našem případě je roven 0,5 (pro obousměrné komunikace s jedním pruhem v jednom směru).

Návrhovou hodnotu celkového počtu přejezdů TNV program stanoví ze vztahu:

$$TNV_{cd} = TNV_d \times 365 \times t_d \quad (24)$$

Kde t_d je délka návrhového období v rocích.

Celkové poměrné porušení D_{cd} musí splňovat podmínku:

$$D_{cd} \leq 1$$

A můžeme ho vypočítat pomocí vztahu:

$$D_{cd} = \frac{TNV_{cd}}{TNV_{cd,lim}} \quad (25)$$

Kde $TNV_{cd,lim}$ je mezní hodnota počtu přejezdů TNV za návrhové období, které můžeme určit pomocí vztahu:

$$TNV_{cd,lim} = \frac{10^6}{\gamma_d C_2 C_3 C_4} \left(\frac{\gamma_u \gamma_{Di} \varepsilon_6}{\gamma_{up} \varepsilon_j} \right)^B \quad (26)$$

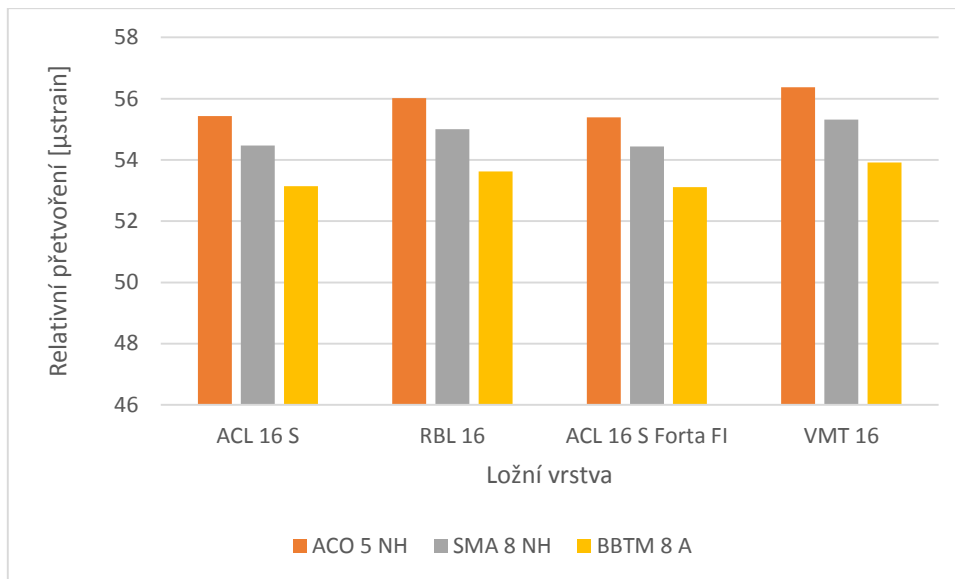
- Kde ϵ_j je poměrné protažení stmelené vrstvy a poměrné stlačení podloží vozovky,
 ϵ_6 velikost přípustného poměrného stlačení podloží vozovky pro 10^6 zatěžovacích cyklů zatížení,
 B charakteristika nárůstu trvalé deformace podloží vozovky,
 γ_d dílčí součinitel spolehlivosti výpočtového modelu
 γ_u dílčí součinitel spolehlivosti aplikace únavové zkoušky na podmínky zatížení vyskytující se ve vozovce,
 γ_{up} dílčí součinitel rozptylu únavové zkoušky,
 γ_{Di} dílčí součinitel spolehlivosti porušení vozovky,
 C_2 součinitel vyjadřující fluktuaci stop,
 C_3 součinitel spektra hmotnosti náprav,
 C_4 součinitel vyjadřující vliv rychlosti pohybu.

Výstupem z programu je posouzení relativního porušení jednotlivých stmelených vrstev a podloží vozovky. Dále program počítá hodnoty napětí, deformací a posunutí pro jednotlivé body výpočtové sítě.

Tabulka 15: Vstupní údaje pro výpočet

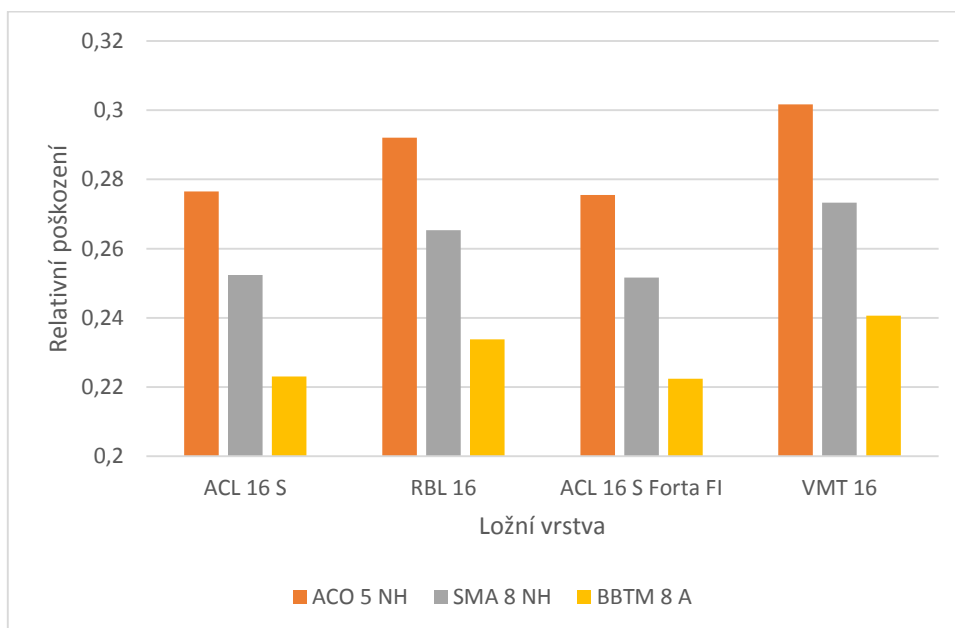
Vrstvy vozovky		Modul tuhosti	ϵ_6
		[MPa]	[μ strain]
Obrusná vrstva tl. 20-30 mm	ACO 5 NH	6300	115
	SMA 8 NH	3400	115
	BBTM 8 A	7000	115
Ložní vrstva tl. 70 mm	ACL 16 S	12400	135
	RBL 16	9700	148
	ACL 16 S Forta FI	12600	135
	VMT 16	8400	135
Podkladní vrstva tl. 120 mm	VMT 22 PMB	9000	135
Spodní podkladní vrstva tl. 200 mm	MZK	600	0
Ochranná vrstva tl. 300 mm	ŠD _A	400	0

Pro sestavení grafu byly vybrány nejvyšší hodnoty přetvoření pro spodní stranu stmelených vrstev. Pokud má být asfaltová směs typu RBL s úspěchem použita do konstrukce vozovky, měla by se deformace vlivem působení dopravy nacházet pod hranicí hodnot 50 - 70 μ m/m. Splnění tohoto předpokladu můžeme vidět v následujícím grafu.

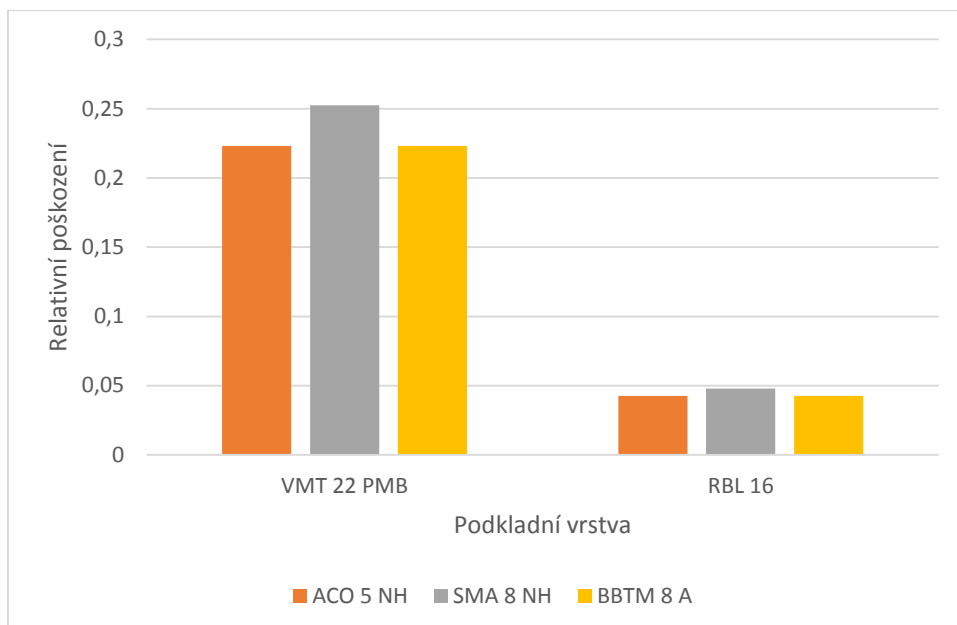


Graf 17: Relativní přetvoření na spodní straně asfaltu stmelých vrstev v závislosti na volbě ložní a obrusné vrstvy

Graf 18 znázorňuje relativní poškození podkladní asfaltové vrstvy v závislosti na skladbě vozovky. Lze zde sledovat spojitost mezi modulem tuhosti a relativním poškozením. Při použití asfaltových směsí s vyšším modulem tuhosti dosahujeme menšího relativního poškození, tedy vyšší životnosti vozovky.



Graf 18: Relativní porušení podkladní asfaltové vrstvy v závislosti na volbě ložní a obrusné vrstvy



Graf 19: Relativní porušení podkladní asfaltové vrstvy

Graf 19 znázorňuje smysluplnost volby pružné podkladní vrstvy s lepšími únavovými charakteristikami. V grafu je znázorněno porovnání vozovek lišících se pouze podkladní vrstvou. Při výpočtu jsme uvažovali zvýšení únavové charakteristiky ϵ_6 o 10 %. Jak již bylo uvedeno, nemohla být tato charakteristika, bohužel, stanovena měřením z důvodu nefunkčnosti měřicího přístroje na jedné straně a značné časové náročnosti těchto testů na straně druhé.

6. ZÁVĚR

Diplomová práce byla zaměřena především na experimentální návrh a výrobu čtyř směsí pro ložní vrstvy asfaltových vozovek, které se odlišovaly množstvím pojiva a principy jejich funkčnosti (použití vláken, směsi typu RBL apod.). Ze směsí byla vyrobena zkušební tělesa, na kterých byly provedeny vybrané funkční a empirické zkoušky. Při vyhodnocení jednotlivých charakteristik byly vlastnosti posuzovaných asfaltových směsí porovnány.

Nejprve byla stanovena maximální objemová hmotnost a objemová hmotnost zkušebních těles vážením ve vodě. Následně byla vypočítána mezerovitost jednotlivých směsí, která byla porovnána s požadavky příslušných technických norem.

Další prováděnou zkouškou bylo měření modulu tuhosti zkušebních těles. V tomto případě bylo zjištěno, že použitím modifikovaného pojiva dochází ke zvýšení modulu tuhosti při všech zkušebních teplotách, největší vliv jsme pozorovali při vyšších teplotách 27 °C a 40 °C. Vliv vláken na hodnotu modulu tuhosti je také pozitivní, při zkušební teplotě 27 °C vykazuje směs s vlákny nárůst modulu tuhosti o 12 %. Dále bylo zjištěno nesplnění požadavků TP 151 na minimální hodnotu modulu tuhosti při teplotě 15 °C u asfaltové směsi označené jako VMT 16, při použití této směsi bychom ji tedy měli označovat spíše jako ACL 16S, naopak směsi označované jako ACL 16S splňovaly přísnější požadavky na označení směsí s vysokým modulem tuhosti bez větších problémů. Lze dokonce tvrdit, že dosahované moduly tuhosti mohou být do určité míry příliš vysoké a rizikem těchto směsí by mohla být nižší únavová životnost nebo zhoršené chování při nízkých teplotách. Takový předpoklad je nicméně vždy třeba ověřit.

Při zkoušce odolnosti vůči šíření trhlin se ukázalo, že směsi s vyšším obsahem asfaltového pojiva mají větší odolnost vůči šíření trhlin, ta se zvýšila až o 28 %. Naopak při použití syntetických vláken jsme pozorovali pouze mírné zvýšení odolnosti v řádu jednotek procent.

Všechny navržené směsi splnili také požadavky příslušné technické normy při zkoušce citlivosti směsí vůči účinkům vody. Požadovanou hodnotu 80 % ITRR jsme dodrželi u všech směsí. Směs RBL s vyšším obsahem asfaltového pojiva vykazovala vyšší pevnost v příčném tahu (zvýšení až o 38 %) oproti ostatním standardním recepturám. Při této zkoušce jsme také pozorovali vliv modifikovaného asfaltového pojiva na zvýšení pevnosti v příčném tahu, výsledkem bylo zvýšení pevnosti o 11 %.

Výsledky zkoušky pojíždění kolem ukázaly, že všechny navržené směsi splňují požadavky TP 151 na maximální přírůstek hloubky koleje a maximální poměrnou hloubku koleje při zkušební teplotě 50 °C. Při vyhodnocení zkoušek jsme pozorovali přímou spojitost mezi množstvím asfaltového pojiva ve směsi a hloubkou vyjeté koleje po 10 000 cyklech.

Při zkoušce pevnosti tahu za ohybu dle TP 151 bylo zjištěno, že všechny posuzované směsi splňují požadavek tohoto předpisu. Stejně jako v předchozích zkouškách zde byly, při použití modifikovaného pojiva, naměřeny vyšší hodnoty pevnosti. Další prováděnou zkouškou dle TP 151 byla zkouška relaxace asfaltových směsí při nízkých teplotách. Zde byly nejlepší hodnoty naměřeny u směsi RBL, u které byl úbytek relaxačního napětí na hodnotu 50 % již v první minutě zkoušky. Požadavek předpisu pro ložní vrstvy (10 minut) splnily i další směsi, které dosáhly požadované hodnoty během 3-4 minut.

Zkouška únavové trhliny se prováděla na základě současných trendů v USA. Zkouška probíhala na tělesech o teplotě 15 °C při rychlosti zatěžování 1 mm/min. Námi zkoušené směsi dosáhly velmi podobných výsledků, nejspíše je to důsledek podobné křivky zrnitosti všech směsí.

V poslední části se práce zabývala výpočetním posouzením vozovek, které využívají námi navržené asfaltové směsi v ložní, případně podkladní, vrstvě konstrukce vozovky. Zanalyzováno bylo celkem 15 různých skladeb vozovek se stejným druhem podloží. Vyhodnocena byla relativní porušení asfaltem stmelených vrstev a maximální relativní deformace na spodní straně stmelené podkladní vrstvy.

Pozitivní je, že zvýšený obsah pojiva ve směsi, který má vliv na prodloužení životnosti vozovky, nijak zásadně nezhoršil sledované parametry. Potvrdila se tak smysluplnost dalšího zkoumání těchto směsí. Bylo by vhodné doplnit soubor zkoušek o únavovou zkoušku, kterou bychom mohli přesněji stanovit únavové charakteristiky pro výpočet konstrukce vozovky. Rozšířením této práce by mohlo být provedení zkušebního úseku, jeho další sledování v provozu a provedení ekonomické analýzy nákladů spojených s životním cyklem vozovky.

POUŽITÁ LITERATURA

1. *Optimization of Thin Asphalt Layers*. ERA-NET ROAD, duben 2011.
2. Ulf Sandberg, Jørgen Kragh, Luc Goubert, Hans Bendtsen, Anneleen Bergiers, Krishna P. Biligiri, Robert Karlsson, Erik Nielsen, Erik Olesen, Stefan Vansteenkiste. *Optimization of Thin Asphalt Layers – State-of-the-Art Review* . [Online] [Citace: 8. 5 2016.]
3. Schäfer, Dipl.-Ing. V. Bau von Kompakten Asphaltbefestigungen. *Straße und Autobahn*. 6 2013.
4. Anwendung des „Inline-Pave-Verfahrens“ in Sachsen-Anhalt im Zuge der Erneuerung der B 245 Bebetal-Haldensleben. *Straße und Autobahn*. 2009, 1.
5. Dröge, Dr.Ing. C. Dünne Asphaltdeckschichten in Heißbauweise auf Versiegelung - Nei in den ZTV BEA-StB. *Straße und Autobahn*. 2011, 1.
6. Ing. Jan Valentin Ph.D, Ing. Petr Mondschein Ph.D. Snižování hluku možnými úpravami obrusné vrstvy vozovky. [Online] [Citace: 1. 5 2016.] <http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/snizovani-hluku-moznymi-upravami-obrusne-vrstvy-vozovky/>.
7. Hotař, Petr. *Návrh a posouzení asfaltové směsi asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem* *Bakalářská práce, vedoucí práce prof. Ing. Jan Kudrna, CSc.* Brno : VUT Fast, 2012.
8. Prof. Ing. Jan Kudrna, CSc. Vzděláváním ke kvalitě. [Online] [Citace: 6. 5 2016.] <http://www.vzdelavanimkekvalite.cz/PDFs/DT%203%20Asfaltove%20vrstvy.pdf>.
9. Viaphone. [Online] [Citace: 8. 5 2016.] www.eurovia.cz/download/VIAPHONE_NEW.pdf.
10. Vavříčka, Jiří. *Vlákna v asfaltových hutněných směsích*. Praha : ČVUT, 2010.
11. Pfeiferová, Bc. Magdaléna. *Nové směry v oblasti asfaltových koberců mastixových*. Brno, 2012.
12. *Zkušenosti s prováděním asfaltových koberců mastixových Příspěvek 2. 6 ve sborníku konference Asfaltové vozovky 2009*. Doc. Ing. Václav Hanzík, CSc. a Rosenbaum, Ing Miloš. 2009.
13. Gärtner, Dipl.-Ing. Kerstin. Lärmindernde Asphaltbauweisen in Bayern. [Online] 25. 3 2009. [Citace: 8. 5 2016.] www.ifbgauer.de/global/gfx/file/RAS_2009_Gaertner.pdf.
14. SANDER, Rolf. *Lärmoptimierte Asphaltbetone für Städte*.
15. Radenberg, M., Sander, R. Lärmtechnisch optimiertes Asphaltdecksichtkonzept für den kommunalen Straßenbau. *Asphalt*. 8, 2007.
16. *dot.ca*. [Online] [Citace: 26. 4 2016.] www.dot.ca.gov/hq/maint/Pavement/Offices/Pavement_Engineering/LCCA_index.html.
17. Stoklásek, RNDr. Svatopluk. Základní principy návrhu asfaltových vozovek s velmi dlouhou životností (tzv. "trvalých vozovek"). *Silnice mosty*. 2014, 2.

18. Ing. Lubomír Žalman, Ing. Petr Špaček, Ing. Petr Mondschein. Možnosti aplikace vláken Forta FI ve směsi typu ACO jako příměsí pro zlepšení životnosti asfaltové úpravy. [Online] 2013. [Citace: 10. 4 2016.] http://www.cesti.cz/technicke_listy/tl2013/2013_WP1_TL1_1_6b.pdf.
19. Svatopluk, Stoklásek. *Základní principy návrhu asfaltových vozovek s velmi dlouhou životností (tzv. "trvalých vozovek")*. Praha, 2014. 3.
20. Ing. Petr Mondschein, Ph.D. [Online] [Citace: 6. 5 2016.] <http://files.mondy.webnode.cz/200000453-7f321802be/p%C5%99edn%C3%A1%C5%A1ka%201%20student.pdf>.
21. Dočkalová, Alena. *Nové generace asfaltových směsí pro trvanlivé vozovky*. ČVUT. 2015. Bakalářská práce.
22. ČSN EN 13108-1 *Asfaltové směsi – Specifikace pro materiály – Část 1: Asfaltový beton*. Praha : Český normalizační institut, Březen 2008.
23. Kolektiv autorů. *TP 151 - Asfaltové směsi s vysokým modulem tuhosti*. Praha : MD ČR, 2010.
24. IGS, kolektiv autorů společnosti. Geosyntetické názvosloví. [Online] IGS ČR. [Citace: 9. 5 2016.] <http://www.igs.cz/geosynteticke-nazvoslovi.html>.
25. MacDonald, Kaloush, Lang, Zednicek, Biligiri. Prodloužení životnosti asfaltových vrstev vyztužením vláknou. [Online] [Citace: 10. 4 2016.] www.emzet.cz/download/produkty/asfaltovevozovky09.pdf.
26. Rebecca, McDaniel. *Fiber additives in asphalt mixtures*. Washington, DC : Transportation Research Board of the National Academies, 2015.
27. ČSN EN 933 – 1 *Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 1: Stanovení zrnitosti - Sítový rozbor*. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, červenec 2012.
28. ČSN EN 12697 - 30+A1. *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka: Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem*. Praha : Český normalizační institut, Prosinec 2007.
29. ČSN EN 12697-5+A1 *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti*. Praha : Český normalizační institut, prosinec 2007.
30. ČSN EN 12697-6+A1 *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa*. Praha : Český normalizační institut, prosinec 2007.
31. ČSN EN 12697-8 *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 8: Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí*. Praha : Český normalizační institut, květen 2004.
32. ČSN EN 12697 - 26. *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - část 26: Tuhost*. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Zář 2012.

33. ČSN EN 12697 - 44. *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka- Část 44: Šíření trhliny zkouškou ohybem na půlválcovém zkušebním tělese*. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Březen 2011.
34. ČSN EN 12697 - 12. *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka- Část 12: Stanovení odolnosti zkušebního tělesa vůči vodě*. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Únor 2009.
35. AASHTO. *Restitance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage*. USA
36. ČSN EN 12697 - 23. *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka- Část 23: Stanovení pevnosti v příčném tahu*. Praha : Český normalizační institut, Březen 2005.
37. ČSN EN 12697 - 22+A1. *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka- Část 22: Zkouška pojíždění kolem*. Praha : Český normalizační institut, Prosinec 2007.
38. VUT v Brně, ČVUT v Praze, PSVS a.s., EUROVIA CS a.s. *Asfaltové směsi s vysokým modulem tuhosti (VMT)*. Praha : Ministerstvo dopravy, 2010.
39. Ing. Lubomír Žalman, Ing. Petr Špaček, Ing. Petr Mondschein Ph.D. CESTI. [Online] 2013. [Citace: 21. 4 2016.] http://www.cesti.cz/technicke_listy/tl2013/2013_WP1_TL1_1_6b.pdf.
40. Chmelíková, Monika. *Tenké a velmi tenké asfaltové vrstvy a jejich využití v konstrukci vozovky, Bakalářská práce, vedoucí práce Ing. Jan Valentin Ph.D.* Praha : ČVUT, 2016.
41. Kolektiv autorů. *Dodatek TP 170 - Navrhování vozovek pozemních komunikací*. Praha, 2010.
42. Kolektiv autorů. *TP 170 - Navrhování vozovek pozemních komunikací*. Praha : MD ČR, listopad 2004.
43. Ing. Mondschein Petr Ph.D., Ing. Zedníček Jiří. *Aramidová vlákna – moderní způsob vyztužení asfaltových směsí*. [Online] 2014. [Citace: 10. 4 2016.] <http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/aramidova-vlakna-moderni-zpusob-vyztuzeni-asfaltovych-smesi/>.
44. BERNHARD, WAYSON. *An introduction to Tire/Pavement Noise of Asphalt Pavement*. [Online] [Citace: 15. 4 2016.] <http://driveasphalt.org/noise/docs/AnIntroductiontoTire/PavementNoiseofAsphaltPavement.pdf>.
45. *Ultra thin layer asphalt concrete*. Brusel : EOTA, 2011.
46. Schäfer, V. *Bau von Kompakten Asphaltbefestigungen. Straße und Autobahn*. 2013, 6.

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Přehled komerčních verzí tenkých asfaltových vrstev ve Francii, Nizozemsku a Velké Británii [2]	11
Tabulka 2: Varianty pokládky [3]	12
Tabulka 3: Typické tloušťky, normální mezerovitost a mezerovitost při redukci hluku směsí používaných v Dánsku [2]	18
Tabulka 4: Souhrnná procenta propadu kameniva a fileru	32
Tabulka 5: Výpočet součtové čáry propadů směsi ACL 16S	33
Tabulka 6: Složení navržených směsí	35
Tabulka 7: Charakteristiky navržených směsí	36
Tabulka 8: Odolnost vůči šíření trhlin při 0°C	52
Tabulka 9: Odolnost vůči šíření trhlin při -10°C	52
Tabulka 10: Stanovení ITSR	54
Tabulka 11: Výsledky zkoušky pojíždění kolem při 50°C	56
Tabulka 12: Vyhodnocení zkoušky v tahu za ohybu	59
Tabulka 13: Odolnost vůči šíření únavové trhliny při 15 °C na zestárých zkuš. tělesech	62
Tabulka 14: Čára zrnitosti a obsah asfaltového pojiva při extrakci	63
Tabulka 15: Vstupní údaje pro výpočet	66
Tabulka 16: Rozměry Marshallových těles	77
Tabulka 17: Rozměry Marshallových těles	78
Tabulka 18: Rozměry těles na zkoušku ITSR sada B a C	79
Tabulka 19: Rozměry těles na zkoušku ITSR sada F a R	80
Tabulka 20: Objemová hmotnost těles pro zkoušku ITSR	81
Tabulka 21: Rozměry Marshallových těles před stárnutím	82
Tabulka 22: Stanovení maximální objemové hmotnosti	83
Tabulka 23: Objemová hmotnost Marshallových těles před stárnutím	83
Tabulka 24: Měření modulu tuhosti při 0°C	84
Tabulka 25: Měření modulu tuhosti při 15°C	85
Tabulka 26: Měření modulu tuhosti při 27°C	86
Tabulka 27: Měření modulu tuhosti při 40° C	87
Tabulka 28: Měření modulu tuhosti - kontrolní sada těles C	88

Tabulka 29: Odolnost vůči lomu při 0°C	89
Tabulka 30: Odolnost vůči lomu při -10°C	90
Tabulka 31: Odolnost vůči lomu při 15°C – zestárlá tělesa	91
Tabulka 32: Měření relaxace	92
Tabulka 33: Rozměry a objemová hmotnost desek	92
Tabulka 34: Rozměry trámečků	93
Tabulka 35: Stanovení ITSR.....	94
Tabulka 36: Stanovení ITSR.....	95

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Detail spojení obrusné a ložní vrstvy [4]	13
Obrázek 2: Schéma pokládky Inline Pave [4].....	13
Obrázek 3: Povrch BBTM 5B [7].....	15
Obrázek 4: Povrch UTLAC 8- šachovnice je 10x10mm [8].....	15
Obrázek 5: Srovnání čar zrnitosti TAL v Dánsku se směsí ACO 11 [2]	16
Obrázek 6: Ztráta makrotextury [38].....	17
Obrázek 7: Ztráta asfaltového tmelu, hloubková koroze, tvorba výtluku [38]	17
Obrázek 8: Výtluk [38]	17
Obrázek 9: Ztráta hmoty - hloubková koroze na podélné spáře [38]	17
Obrázek 10: Nekvalitně provedená příčná spára [39].....	17
Obrázek 11: Finišer Vögele s postřikovacími lištami (červené) pro pokládku UTLAC [8].....	17
Obrázek 12: Porovnání struktury směsi SMA a AC [11]	19
Obrázek 13: Srovnání čar zrnitosti asfaltových směsí [8].....	19
Obrázek 14: Srovnání SMA 8 a SMA 8 LA [13].....	20
Obrázek 15: Křivka zrnitosti směsi LOA 5D [14]	20
Obrázek 16: Porovnání životností obrusných vrstev na rychlostních silnicích.....	21
Obrázek 17: Porovnání struktury jednotlivých směsí.....	22
Obrázek 18: Schéma konstrukce vozovky podle konceptu "trvalých vozovek" [17]	24
Obrázek 19: Laboratorní míchačka s vyhříváním	37
Obrázek 20: Trychtýř, fanka, válcová forma, špachtle, horní nástavec, podložka.....	37
Obrázek 21: Rázový zhutňovač.....	38
Obrázek 22: Lamelový zhutňovač.....	38

Obrázek 23: Pyknometr pro se směsí pro stanovení objemové hmotnosti.....	39
Obrázek 24: Zkušební zařízení	41
Obrázek 25: Vzniklá trhlina.....	42
Obrázek 26: Kontrola trhliny pomocí příložené desky	42
Obrázek 27: Lis pro zkoušku ITS	44
Obrázek 28: Umístění tělesa v tlačných čelistech	44
Obrázek 29: Zařízení pro zkoušku pojíždění kolem	47
Obrázek 30: Konstrukce vozovky [41]	64

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Křivky zrnitosti kameniva a fileru	32
Graf 2: Čáry zrnitosti asfaltových směsí	34
Graf 3: Moduly tuhostí při zkušební teplotě 15°C.....	50
Graf 4: Porovnání modulů tuhosti	51
Graf 5: Odolnost vůči šíření trhlin	53
Graf 6: Porovnání hodnot ITSR s ohledem na typ směsi dle ČSN.....	54
Graf 7: Porovnání hodnot ITSR s ohledem na typ směsi dle AASHTO.....	55
Graf 8: Porovnání hodnot ITS s ohledem na typ směsi	55
Graf 9: Výsledky zkoušky pojíždění kolem.....	57
Graf 10: Závislost hloubky vyjeté koleje na obsahu asfaltového pojiva	57
Graf 11: Vykonaná energie nutná k porušení tělesa při zkoušce v tahu za ohybu	59
Graf 12: Pevnost při zkoušce v tahu za ohybu.....	60
Graf 13: Průběh naměřených sil při zkoušce v tahu za ohybu	60
Graf 14: Průběh relativního relaxačního napětí při zkoušce relaxace dle TP 151.....	61
Graf 15: Modul tuhosti zestárých těles	62
Graf 16: Odolnost vůči lomu při 15 °C na zestárých zkušebních tělesech	62
Graf 17: Relativní přetvoření na spodní straně asfaltem stmelených vrstev v závislosti na volbě ložní a obrusné vrstvy.....	67
Graf 18: Relativní porušení podkladní asfaltové vrstvy v závislosti na volbě ložní a obrusné vrstvy	67
Graf 19: Relativní porušení podkladní asfaltové vrstvy.....	68