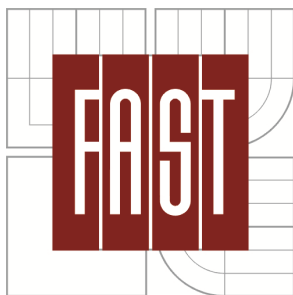


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ

ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

NÁVRH A POSOUZENÍ ASFALTOVÉHO BETONU PRO LOŽNÍ VRSTVY S ASFALTEM MODIFIKOVANÝM PRYŽOVÝM GRANULÁTEM

DESIGN AND EVALUATION OF ASPHALT CONCRETE FOR BINDER COURSES WITH
ASPHALT RUBBER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. LUKÁŠ MUSÍLEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. JAN KUDRNA, CSc.

BRNO 2013

SEM VLOŽTE ZADÁNÍ

Abstrakt v českém a anglickém jazyce

V diplomové práci je proveden návrh asfaltového betonu pro ložní vrstvy s použitím nízkoviskózního a vysokoviskózního asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem. Na těchto směsích jsou provedeny vybrané funkční laboratorní zkoušky (nízkoteplotní vlastnosti, tuhost a odolnost vůči únavě) a odolnosti proti účinkům vody a výsledky jsou vzájemně porovnány.

The design of asphalt concrete for binder courses with high-viscosity asphalt rubber and low-viscosity asphalt rubber is carried out in the diploma thesis. Selected performance tests (low temperature characteristics, stiffness and fatigue) and water sensitivity are performed for these mixtures. Results are compared each other.

Klíčová slova v českém a anglickém jazyce

Asfalt, pryžový granulát, asfalt modifikovaný pryžovým granulátem, asfaltová směs, asfaltový beton, ložní vrstva, nízkoteplotní vlastnosti, tuhost, únava

Bitumen, crumb rubber, asphalt rubber, asphalt mixture, asphalt concrete, binder course, low temperature characteristics, stiffness, fatigue

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně, pod vedením vedoucího této práce.

V Brně dne.....

.....

Lukáš Musílek

Bibliografická citace VŠKP

Musílek, Lukáš. *Návrh a posouzení asfaltového betonu pro ložní vrstvy s asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem.*

Brno, 2013. 80 s., 23 s. příl. Diplomové práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební.

Ústav pozemních komunikací. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Jan Kudrna, CSc.

Poděkování

Rád bych využil této příležitosti a poděkoval prof. Ing. Janu Kudrnovi, CSc a Ing. Ondřeji Daškovi za vedení mé práce, ochotu a cenné rady, díky kterým jsem tuto práci dokončil. Dále bych rád poděkoval kolektivu školní laboratoře VUT FAST v Brně, který mi byl nápomocen při vypracování, za jejich čas a užitečné informace.

OBSAH

1	ÚVOD	9
1.1	Cíl diplomové práce	9
1.2	Asfaltové směsi s asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem	9
1.2.1	Metody aplikace pryžového granulátu do asfaltových směsí	11
1.2.2	Přehled asfaltových směsí s CRmB	12
1.2.3	Výhody a nevýhody směsi s CRmB oproti běžné směsi	15
2	POSTUPY PROVEDENÝCH METOD	16
2.1	Postupy zkoušek pro kamenivo a asfaltová pojiva	16
2.1.1	Sítový rozbor	16
2.1.2	Stanovení dynamické viskozity	17
2.1.3	Stanovení penetrace jehlou	18
2.1.4	Penetrace a pružná regenerace (resilience)	19
2.1.5	Bod měknutí	20
2.2	Postupy zkoušek provedených na zhotovených tělesech	21
2.2.1	Stanovení objemové hmotnosti	22
2.2.2	Stanovení maximální objemové hmotnosti	23
2.2.3	Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí	24
2.2.4	Stanovení mezerovitosti kameniva	24
2.2.5	Stupeň vyplnění mezer pojivem	25
2.2.6	Stanovení odolnosti proti účinkům vody	26
2.2.7	Nízkoteplotní vlastnosti	28
2.2.8	Modul tuhosti asfaltové směsi	31
2.2.9	Odolnost proti únavě	35
2.3	Návrh asfaltového betonu s CRmB dle ČSN EN 13108-1	37

2.3.1	Definice	37
2.3.2	Popis požadavků	37
2.4	Návrh asfaltového betonu s CRmB dle TP 148	39
2.4.1	Definice	39
2.4.2	Popis požadavků	39
2.4.3	Vztah ČSN EN 13108-1 a TP 148	41
3	POUŽITÉ MATERIÁLY	41
3.1	Kamenivo	41
3.2	Silniční asfalt	43
3.2.1	Výsledky provedených zkoušek silničního asfaltu	43
3.3	Pryžový granulát	44
3.4	Asfalt modifikovaný pryžovým granulátem CRmB	44
3.4.1	Výroba CRmB v laboratoři	45
3.4.2	Výsledky provedených zkoušek CRmB	46
4	NÁVRH ASFALTOVÝCH SMĚSÍ	47
4.1	Návrh a výroba směsí ACL 16 S	47
4.1.1	Výsledky volumetrických charakteristik Marshallových těles	50
4.2	Příprava zkušebních těles	56
4.2.1	Výroba Marshallových těles	56
4.2.2	Výroba trámečků	57
4.2.3	Výroba trapezoidů	59
5	VÝSLEDKY ZKOUŠEK	60
5.1	Stanovení odolnosti proti účinkům vody	60
5.2	Nízkoteplotní vlastnosti	62
5.3	Modul tuhosti	66
5.4	Odolnost proti únavě	70

5.5	Porovnání naměřených výsledků	73
6	ZÁVĚR.....	74
7	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	76
8	SEZNAM OBRÁZKŮ	78
9	SEZNAM TABULEK	79
10	SEZNAM GRAFŮ.....	80
11	SEZNAM PŘÍLOH.....	81
11.1	Hodnoty komplexních modulů tuhosti směsí ACL 16 S	81
11.2	Formuláře ze zkoušky odolnosti asfaltové směsi.....	90

1 ÚVOD

Doprava je obecně neodmyslitelnou součástí našeho života. Je to činnost vyvolaná každodenní aktivitou člověka. Česká republika se nachází ve středu Evropy a významně se tedy podílí na rozvoji dopravy. Důležitým předpokladem hospodářského růstu a prosperity nejen České republiky, ale celé Evropy je funkčnost dopravy. Nejrozšířenějším druhem dopravy je doprava silniční. Neustále zde dochází ke zvyšování stupně automobilizace. Tento dlouhodobý trend zvyšuje nároky na přepravní kapacity a kvalitu dopravy obecně. Zároveň ale dochází k neřízenému zahlcování a přetěžování silniční sítě především nákladní dopravou. V české republice je více než 55 tisíc kilometrů silnic a dálnic. Celkově je tak více než 1 % povrchu ČR pokryto asfaltovými vrstvami. Zachování kvalitní silniční sítě je podmíněno odpovídající správou těchto komunikací, což je dnes v době snižování financí v dopravním sektoru velmi obtížné. Tyto skutečnosti vyžadují hledat taková řešení a technologie, které budou splňovat podmínky technické a zároveň ekonomické.

Tato práce je zaměřena na zlepšování a optimalizaci vlastností konstrukční vrstvy vozovky. Bude zde proveden laboratorní návrh a posouzení směsi asfaltového betonu pro ložní vrstvy použitím pryžového granulátu z odpadních pneumatik. Jedná se o technologii pocházející z USA, která spočívá ve vmíchávání pryžového granulátu do asfaltového pojiva.

1.1 Cíl diplomové práce

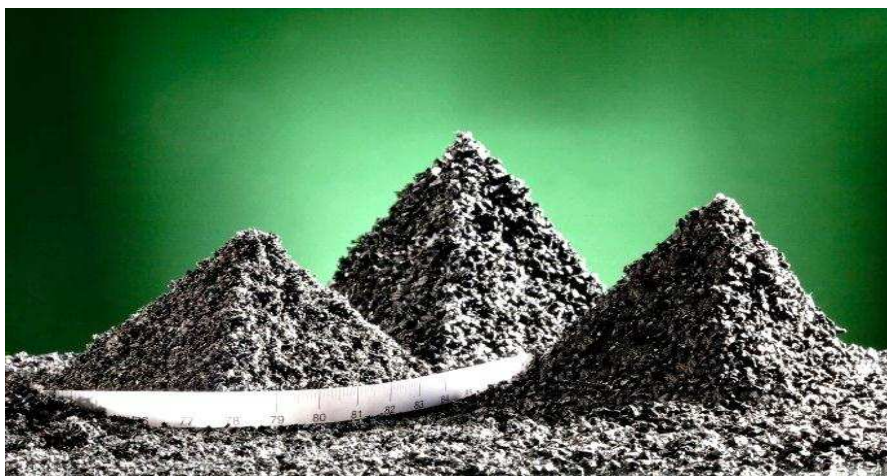
Cílem práce je navrhnout a posoudit asfaltový beton pro ložní vrstvy (ACL) s použitím asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem. Na základě volumetrických charakteristik Marshallových těles upravím optimalizaci složení směsi. Následně provedu návrhy směsí ACL. Zhotovím směsi s nízkoviskózním a vysokoviskózním pojivem a pro oba druhy směsi budu dávkovat pojiva o různém množství. Provedu vybrané funkční laboratorní zkoušky a porovnáím jednotlivé výsledky zkoušek směsí ACL s nízkoviskózním a vysokoviskózním CRmB.

1.2 Asfaltové směsi s asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem

V dnešní době jsou kladeny stále vyšší nároky na životnost a provozní způsobilost vozovek. Snahou je navržení co nejtrvanlivější směsi, což znamená mimo jiné i zvýšené

požadavky na jednotlivé složky směsí. Silniční asfalty jsou upravovány modifikačními přísadami, které zlepšují jejich fyzikálně-mechanické vlastnosti. Tyto přísady zvyšují pružnost pojiv, dále jejich odolnost vůči trvalým deformacím, snižují teplotní citlivost a křehkost v oblasti nízkých teplot, upravují přilnavost ke kamenivu, tuhost a také přispívají ke snížení vlivu stárnutí asfaltu. V případě modifikovaných asfaltů se jako přísady používají například termoplastické polymerní látky, nebo jako v tomto případě pryžový granulát. [1]

S postupným rozvojem společnosti a průmyslu dochází mimo jiné i k nárůstu stupně automobilizace, s tím je spjat nárůst spotřeby paliv, materiálů a výrobků, mezi které patří i automobilové pneumatiky. V současné době se odpadní pneumatiky v ČR nejčastěji spotřebovávají energeticky jako palivo. Jednou z dalších možností využití odpadních pneumatik je výroba pryžového granulátu (Obrázek 1). Ten lze mimo jiné použít jako náhradu části kameniva v asfaltových směsích nebo jako modifikační přísadu do silničního asfaltu. [2]



Obrázek 1: Pryžový granulát z recyklovaných pneumatik [30]

Asfalt modifikovaný pryžovým granulátem (CRmB) je složen ze silničního asfaltu, pryžového granulátu a případně dalších přísad. Tato směs se dále připravuje v mísícím zařízení uvedeném na obrázku 2. Pojivo je heterogenní fázový systém vzájemně působícího nabobtnalého pryžového granulátu a asfaltové matrice. Výsledkem této reakce je zlepšení fyzikálně mechanických vlastností asfaltového pojiva. Charakteristické vlastnosti CRmB jsou uvedeny v tabulce 1. CRmB může být dále podrobněji specifikováno. [3]

Podle viskozity měřené při zpracování na obalovně rozlišujeme CRmB na:

- **Nízkoviskózní** (obsah pryžového granulátu v pojivu 5 % až 15 %)
- **Vysokoviskózní** (obsah pryžového granulátu v pojivu 15 % až 25 %)

Pojivo	CRmB	
	Nízkoviskózní	Vysokoviskózní
Obvyklé dávkování pryžového granulátu, % z hmotnosti pojiva	5 - 15	15 - 25
Viskozita, ČSN EN 13302, Pa.s	0,5 až 1,0 při 150 °C	1,5 až 4,0 při 175 °C
Penetrace 25 °C, ČSN EN 1426, p.j.	25 až 75	25 až 75
Bod měknutí, ČSN EN 1427, °C	min. 55	min. 55
Resilience při 25 °C, ČSN EN 13880-3, %	min. 20	min. 20

Tabulka 1: Vlastnosti CRmB



Obrázek 2: Mísící zařízení G asphalt [11]

1.2.1 Metody aplikace pryžového granulátu do asfaltových směsí

Pryžový granulát je do asfaltových směsí vpravován různými způsoby. Následující text obsahuje dvě základní skupiny technologií, které obsahují rozdílné postupy zabudování granulátu.

Mokrý proces (wet process, Crumb Rubber modified Bitumen, CRmB). Pomocí této technologie byla vyrobena asfaltová směs pro potřeby této diplomové práce. Postup metody je uveden v TP 148 [3] a jedná se obecně o nejpoužívanější metodu pro použití pryžového granulátu do asfaltových směsí. V případě mokrého procesu rozlišujeme dva základní postupy:

- **Continuous blend** – Při této metodě je granulát do asfaltu vmícháván ve speciálním mísícím zařízení na obalovně. Výroba probíhá při 170 °C až 185 °C, kdy je přidáno 15 % až 25 % granulátu zrnitosti 0/1 mm až 0/2 mm. Výroba probíhá kontinuálně za stálého dávkování a mísení.
- **Terminal blend** – Je metoda kdy se přímo v rafinerii asfalt modifikuje jemnozrnným pryžovým granulátem. Při výrobě se používá nižší množství granulátu než v případě metody Continuous blend (5 %, 15 %). Výsledné pojivo je podmíněně skladovatelné za dodržení kritérií uvedených v TP 148 [3].
- **TecRoad** – Tato technologie kombinuje výhody suchého procesu a Terminal blend. Nejprve je vyroben granulovaný koncentrát modifikovaného asfaltu z jemného granulátu a asfaltu. Ten je vyráběn v Rakousku a dodáván v pytlích. Následně je tato směs dávkována spolu s kamenivem do míchačky na obalovně.

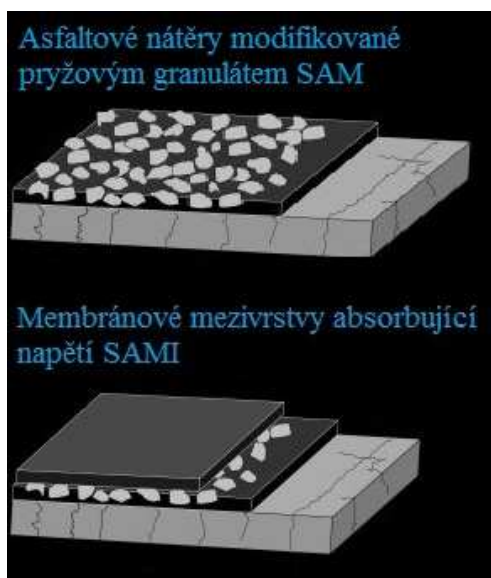
Suchý proces (dry process, Rubit). Jedná se o původem švédskou technologii, kdy je do míchačky na obalovně smícháván pryžový granulát zároveň spolu s kamenivem. Z důvodu zajištění potřebné homogenizace směsi je třeba přizpůsobit dobu míchání a také dodržet minimální potřebnou teplotu. [1, 2]

1.2.2 Přehled asfaltových směsí s CRmB

Zde jsou uvedeny základní vyráběné silniční materiály obsahující asfalt modifikovaný pryžovým granulátem:

- **Asfaltové nátěry modifikované pryžovým granulátem SAM (Stress Absorbing Membrane)** – Jedná se o technologii, která se nejčastěji používá jako preventivní opatření nebo údržba vozovek v USA. Nátěry obsahují vyšší obsah CRmB, díky tomu tato směs umožňuje uvolňovat napětí působící ze spodních vrstev vozovky. Výsledkem je pružný povrch vozovky, který

zlepšuje její odolnost před vznikem reflexních trhlin a oxidací. Významně také prodlužuje životnost vozovky (Obrázek 3). [5]



Obrázek 3: Porovnání nátěru SAM a mezivrstvy SAMI [31]

- **Membránové mezivrstvy absorbující napětí SAMI (Stress Absorbing Membrane Interlayer)** – Jsou to asfaltové nátěry modifikované CRmB pokládáné ve vrstvách. Nejprve je položen asfaltový nátěr (SAMI), který plní funkci mezivrstvy na stávajícím povrchu vozovky. Na tuto vrstvu je poté pokládána vrstva asfaltové směsi. Spodní vrstva SAMI uvolňuje napětí od spodních vrstev, omezuje šíření reflexních trhlin a má významný vliv na delší životnosti vrchní asfaltové vrstvy. Nevýhodou je vyšší pořizovací cena, která je ovšem akceptovatelná z důvodu delší životnosti směsi a nižších nákladů na údržbu v porovnání s jinými technologiemi (Obrázek 3). [5]
- **Asfaltové směsi s CRmB s otevřenou zrnitostí (open graded)** – Při této technologii se navrhují asfaltové směsi s mezerovitostí kostry směsi 8 % až 32 %. Patří sem například asfaltové koberce drenážní PA ($V_m > 14 \%$). Tyto směsi se vyznačují nižšími emisemi hluku, dobrými protismykovými vlastnostmi, propustností a také odolností vrstev proti trvalým deformacím. [6]



Obrázek 4: Drenážní koberec s otevřenou zrnitostí [32]

- **Asfaltové směsi s CRmB s přerušenou zrnitostí (gap graded)** – Směs obsahuje převážující zastoupení jedné frakce, kdy se jemnější frakce vyskytují v pouze malém množství. Mezerovitost směsí se pohybuje od 4 % do 7 %. Mezi směsi s přerušenou čarou zrnitosti patří například asfaltový koberec mastixový SMA. Tyto směsi mají dobré únavové a nízkoteplotní vlastnosti a díky tomu mají vysokou odolnost proti trvalým deformacím a trhlinám. [6]



Obrázek 5: Asfaltový koberec mastixový s přerušenou zrnitostí [33]

- **Asfaltové směsi s plynulou zrnitostí (dense graded)** — Nejpoužívanějším druhem asfaltové směsi je asfaltový beton AC. Ve směsi jsou rovnoměrně obsažena zrna kameniva různých velikostí. Asfaltový beton se používá pro výrobu vícevrstevných systémů, tedy obrusných, ložních a podkladních vrstev. Při návrhu asfaltobetonových směsí se uvažuje s vyšším dávkováním pojiva, nižším zastoupením drobného kameniva a mezerovitostí 4 % až 7 %. Obecně mají směsi asfaltobetonu jednak dobrou odolnost proti trvalým deformacím a zároveň zabraňují vzniku a šíření trhlin. [7]



Obrázek 6: Asfaltový beton s plynulou zrnitostí

1.2.3 Výhody a nevýhody směsi s CRmB oproti běžné směsi

Zde jsou vypsány hlavní rozdíly mezi vlastnostmi asfaltových směsí s CRmB a mezi nemodifikovanou asfaltovou směsí [11]:

Nevýhody:

- o *Pořizovací náklady jsou vyšší oproti běžné směsi*
- o *Vyšší náročnost na technologii a organizaci*
- o *Vyšší energetická náročnost*
- o *Komplikovaná skladovací stabilita pojiva*
- o *Teoretické šíření škodlivých látek*

Výhody:

- o *Delší životnost směsi s použitím CRmB*
- o *Směs je odolnější proti únavě, trvalým deformacím, trhlinám, stárnutí pojiva*
- o *Uplatnění odpadní pryže z ojetých pneumatik*
- o *Snižuje úroveň hluku*
- o *Díky lepším vlastnostem směsi s CRmB je možné navrhovat menší tloušťky vrstev*
- o *Možnost lepší optimalizace směsi aktuálním potřebám*

2 POSTUPY PROVEDENÝCH METOD

2.1 Postupy zkoušek pro kamenivo a asfaltová pojiva

V následujícím textu budou vysvětleny metody dle platných evropských norem pro zkoušky vlastností použitého kameniva a obou asfaltů modifikovaných pryžovým granulátem.

- **Kamenivo** - síťový rozbor
- **CRmB** - stanovení dynamické viskozity, stanovení penetrace jehlou, resilience a bod měknutí

2.1.1 Síťový rozbor

Stanovení zrnitosti kameniva provádíme pomocí zkušebních sít. Metoda je popsána v evropské normě ČSN EN 933-1 [8]. Podstatou zkoušky je oddělení a zařídění kameniva použitím normované sady sít. Podle požadavků na přesnost a vlastnosti posuzovaného vzorku se zvolí počet sít s příslušnými otvory. Jednotlivá typizovaná síta jsou seřazená sestupně dle velikosti otvorů. Ta jsou popsána v normě ČSN EN 933-2 [9] a vyhovují požadavkům ISO 3310-1 a ISO 3310-2. Pro provedení zkoušek zrnitosti se používají síta s otvory o velikosti 0,063 mm, 0,125 mm, 0,25 mm, 0,5 mm, 1,0 mm, 2,0 mm, 4,0 mm; 8,0 mm; 11,2 mm, 16,0 mm, 22,4 mm, 31,5 mm, 63 mm, 125 mm.

Síta sestavíme do sloupce a pod sestavu sít umístíme misku pro zachycení propadu. Na vrchní síto s největšími otvory nasypeme zváženy, vypraný a vysušený vzorek kameniva. Následně se síta upnou ve vibračním přístroji a spustí se vibrace (Obrázek 7). Otřesy selektují

jednotlivá zrna, která propadají síty a zachycují se na příslušném sítu. Množství kameniva zachyceného na každém sítu se zváží a stanoví se procentuální hmotnost zrn určité frakce. Následně určíme síťový rozbor jednotlivých frakcí kameniva uvedený v tabulce 4. Tyto hodnoty pro lepší orientaci vyneseme do grafu čáry zrnitosti uvedeného v grafu 1. [8, 9]



Obrázek 7: Vibrační přístroj [34]

2.1.2 Stanovení dynamické viskozity

Viskozita je obecně velikost míry odporu tekutiny, která je silně závislá na teplotě. Je to poměr mezi smykovým napětím a smykovou rychlostí. Čím vyšší je viskozita, tím více dochází k brždění pohybu kapaliny. Dynamická viskozita pojiva byla stanovována rotačním vřetenovým viskozimetrem RION VT – 04F dle ČSN EN 13302 [10]. Viskozimetr je uveden na obrázku 8.



Obrázek 8: Viskozimetr

Před provedením zkoušky dynamické viskozity je třeba připravit zkoušený vzorek. Pojivo bylo nalito to plechové nádoby, která byla vytemperována na teplotu 175 °C. Následně se vložil rotor viskozimetru do zahřátého pojiva a ihned byla odečtena zjištěná hodnota viskozity. Z důvodu rychlého vychladnutí pojiva by doba měření neměla přesáhnout 60 s. Provedením aritmetického průměru naměřených hodnot byla stanovena výsledná hodnota dynamické viskozity. [10]

2.1.3 Stanovení penetrace jehlou

Podstatou této metody je změření průniku normalizované jehly do vytemperovaného vzorku. Penetrace je odolnost zkoušeného materiálu proti vniknutí jehly vyjádřená jako hloubka v desetinách milimetru. Při provádění zkoušky penetrace jehlou bylo postupováno podle ČSN EN 1426 [12] a TP 148 [3].

Nejprve se vzorek pojiva v kovové nádobě o rozměrech 35 mm x 55 mm nechal vytemperovat ve vodní lázni na ustálenou teplotu 25 °C. Po dosažení této teploty se ihned provedla penetrace zatlačením jehly do vzorku pod zatížením 100 g. Doba zatěžování byla 5 s. Následně byly odečteny naměřené hodnoty na penetrometru (Obrázek 9) s přesností 0,1 mm. Z těchto hodnot byl vyjádřen aritmetický průměr, který představuje hodnotu penetrace pro daný vzorek pojiva. Minimální a maximální hodnotu penetrace při 25 °C stanovuje TP 148 [3] a zde je uvedena v tabulce 1. [3, 12]



Obrázek 9: Penetrometr [35]

2.1.4 Penetrace a pružná regenerace (resilience)

Pomocí této metody byly zjišťovány elastomerní vlastnosti CRmB. Určovaná hodnota resilience představuje procentuální vrácení pojiva do původního stavu po zatížení penetrometrem. Metoda pružné regenerace – resilience byla provedena dle ČSN EN 13880-3[13].

Pro potřeby zkoušky bude použit penetrometr s nástavcem a kuličkou vyhovující požadavkům ČSN EN 1426 [12]. Tato metoda byla provedena na vzorku pojiva v kovové nádobě o rozměrech 45 mm x 70 mm. Tato nádoba byla vložena do vodní lázně, kde se temperovala na teplotu $25 \pm 0,1$ °C. Po dosažení požadované teploty se ihned provedla zkouška. Nejprve se umístila kulička penetračního nástavce do kontaktu s povrchem zkušebního vzorku. Penetrometr s nástavcem pro měření resilience je znázorněn na obrázku 10. Ta působila na povrch se zatížením $75 \pm 0,1$ g po dobu 5 s. Po uplynutí této doby se odečetla počáteční hodnota penetrace kuličkou P. Následně bylo provedeno další zatížení vzorku bez vynulování přístroje. Opět uvolnila aretace penetrometru a nástavec s kuličkou se rovnoměrnou rychlostí během 10 s zatlačil o dalších 10 mm do pojiva. Nato se penetrometr vynuloval, uvolnil a zkušební vzorek se nechal regenerovat po dobu 20 s. Poté se přístroj opět zaaretoval a již zaznamenala konečná hodnota penetrace F s přesností $\pm 0,1$ mm. Tento postup se dál opakoval. Pro každý vzorek pojiva třeba provést měření na třech místech. Rovnoměrná vzdálenost mezi jednotlivými místy zatlačování kuličky penetrometru a okraji nádoby je minimálně 10 mm. [ČSN EN 13880-3]

- Stanovení resilience bylo provedeno dle rovnice:

$$R = (P + 10 - F) \frac{1000}{10}$$

kde	R	resilience v procentech (%)
	P	počáteční penetrace kuličky (mm)
	F	konečná penetrace (mm)

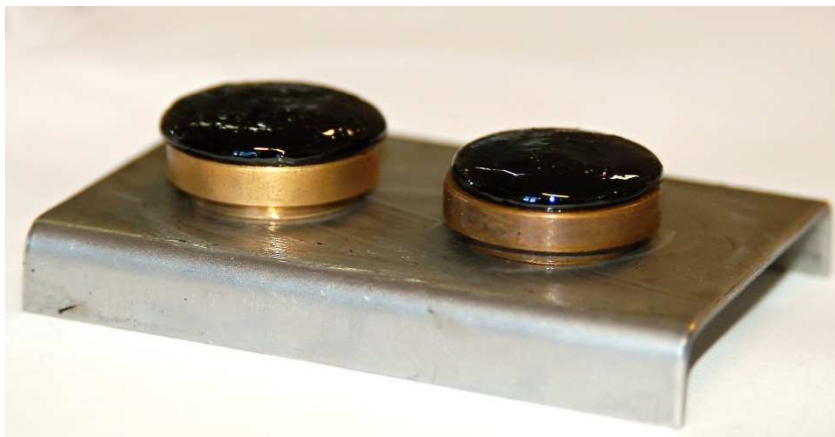


Obrázek 10: Penetrometr pro zkoušku resilience

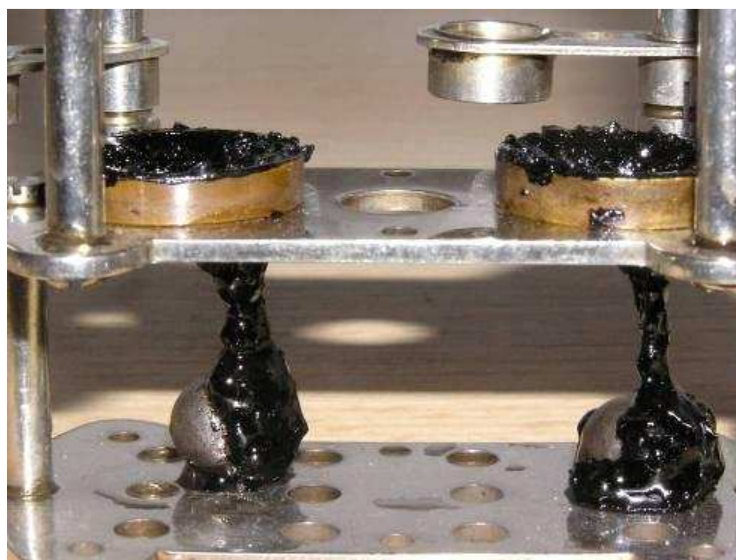
2.1.5 Bod měknutí

Pomocí této metody zjišťujeme teplotu, za které určitý vzorek pojiva dosáhne stanovené konzistence. Zkouška byla provedena na dvou kotoučcích z navržených CRmB zobrazených na obrázku 11. Při provádění byla dodržena norma ČSN EN 1427 [14].

Pojivo zahřáté na vyšší teplotu, než byl předpokládaný bod měknutí, bylo odlito do mosazných kroužků. Na tyto vzorky se do vodní lázně umístily do středícího zařízení kovové kuličky se stejnou počáteční teplotou. Vodní lázeň obsahovala odvzdušněnou destilovanou vodu o počáteční teplotě $5\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$. Kapalina byla za stálého míchání ze spodu zahřívána rychlostí 5 °C na minutu a kulička se začínala nořit do kroužku pojiva (Obrázek 12). Zajištění přesného dodržení rychlosti zahřívání je nutné pro dodržení reprodukovatelnosti výsledků. V okamžiku, kdy se asfalt obalující kovovou kuličku dotkl základní desky měřícího přístroje, byl proveden záznam konečné teploty. Bod měknutí je vyjádřen jako aritmetický průměr naměřených teplot, zaokrouhlených na $0,2\text{ °C}$. Minimální hodnoty bodu měknutí stanovuje TP 148 [3]. Zde je tato hodnota uvedena v tabulce 1. [14]



Obrázek 11: Vzorky CRmB pro zkoušku bodu měknutí



Obrázek 12: Průběh zkoušky bodu měknutí

2.2 Postupy zkoušek provedených na zhotovených tělesech

Dále zde budou popsány použité zkušební metody dle norem řady ČSN EN 12697 pro asfaltové směsi provedené za horka. Zde jsou vypsány zkoušky provedené na zhotovených tělesech:

- **Marshallova tělesa** – stanovení objemové hmotnosti, maximální objemové hmotnosti, mezerovitost, stupeň vyplnění mezer pojivem, stanovení odolnosti proti účinkům vody, pevnost v příčném tahu
- **Trámečky** – nízkoteplotní vlastnosti
- **Trapezoidy** – moduly tuhosti, odolnost proti únavě

2.2.1 Stanovení objemové hmotnosti

Je to hmotnost při dané zkušební teplotě, připadající na jednotku objemu zkušebního tělesa včetně mezer. Metoda je popsána v normě ČSN EN 12697-6 [15]. Stanovujeme objemovou hmotnost zhutněného asfaltového tělesa získanou z objemu a hmotnosti tělesa.

Objemovou hmotnost stanovíme zvážení zhutněného Marshallova tělesa za sucha, saturovaného ve vodní lázni a následně nasyceného. Nejprve stanovíme hmotnost suchého zkušebního tělesa (m_1). Poté ponoříme těleso do vodní lázně o teplotě 25 °C. Hustota vody při této teplotě je 997,1 kg/m³. Zcela ponořené těleso necháme saturovat po dobu přibližně 30 minut. Zkontrolujeme, zda z tělesa již neunikají vzduchové bubliny a zda má těleso ustálenou hmotnost. Poté stanovíme hmotnost nasyceného tělesa (m_2). Následně těleso vyjmeme z vody a necháme odtéci vodu. Povrch otřeme vlhkou jelenicí. Pokud již z tělesa samovolně neodtéká voda, ihned stanovíme hmotnost nasyceného tělesa (m_3). Výsledek této metody je uveden v tabulce 10 a 11. [15]

- Výpočet objemové hmotnosti tělesa nasyceného, s osušeným povrchem:

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

kde ρ_{bSSD} objemová hmotnost SSD [kg/m³]
 m_1 hmotnost suchého tělesa [g]
 m_2 hmotnost tělesa ve vodě [g]
 m_3 hmotnost tělesa nasyceného vodou a povrchově osušeného [g]
 ρ_w hustota vody [kg/m³]

- Výpočet objemové hmotnosti dle rozměrů Marshallova tělesa:

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

kde $\rho_{b,dim}$ objemová hmotnost zkušebního tělesa dle rozměrů [kg/m³]
 m_1 hmotnost suchého tělesa [g]
 h výška zkušebního tělesa [mm]
 d průměr tělesa [mm]

2.2.2 Stanovení maximální objemové hmotnosti

Zkouška maximální objemové hmotnosti byla provedena za účelem výpočtu obsahu mezer ve ztuhnutém vzorku a dalších objemových charakteristik asfaltových směsí. Byl proveden **volumetrický postup**, při kterém byl objem Marshallových těles měřen jako objem rozpouštědla (trichlorethylen) vytěsněný v pyknometru (Obrázek 13). Při provádění zkoušky bylo postupováno dle ČSN EN 12697-5 [16].



Obrázek 13: Pyknometr [36]

Nejprve bylo třeba připravit zahřátý vzorek Marshallova tělesa rozbitím a rozdělením na hrubé částice a shluky. Určí se hmotnost prázdného pyknometru (m_1) včetně nástavce o známém objemu (V_p). Následně se vysušený vzorek vsypal do pyknometru, nechal se temperovat na okolní teplotu a stanovila se hmotnost včetně nástavce (m_2). Poté se pyknometr vyplnil rozpouštědlem (trichlorethylen) do výšky maximálně 30 mm pod okraj. Naplněný pyknometr se ještě protřepal z důvodu odstranění vzduchu zachyceného v mezerách vzorku směsi. Takto připravený pyknometr se ponořil do vodní lázně s rovnoměrnou zkušební teplotou ($\pm 0,2$ °C) na dobu minimálně 60 minut. Po této době došlo k vyrovnání teploty vzorku a rozpouštědla v pyknometru a vodní lázni. Bylo doplněno rozpouštědlo po značku na nástavci pyknometru. Následně se pyknometr vyjmul z vodní lázně, osušil se a okamžitě byla stanovena jeho hmotnost (m_3) s přesností 0,1 g. Výsledek této metody je uveden v tabulkách 12 a 13. [16]

- Výpočet maximální objemové hmotnosti ρ_{mv} asfaltové směsi v případě volumetrického postupu:

$$\rho_{mv} = \frac{m_2 - m_1}{1000 * (V_p - \frac{m_3 - m_2}{\rho_w})}$$

kde	ρ_{mv}	maximální objemová hmotnost asfaltové směsi [kg/m^3]
	m_1	hmotnost pyknometru, nástavce a pružiny [g]
	m_2	hmotnost pyknometru, nástavce, pružiny a zkušební vzorku [g]
	m_3	hmotnost pyknometru, nástavce, pružiny, zkušební vzorku a rozpouštědla [g]
	V_p	objem pyknometru při naplnění po referenční značce nástavce [m^3]
	ρ_w	hustota rozpouštědla při zkušební teplotě s přesností na 0,1 kg/m^3 [kg/m^3]

2.2.3 Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí

Mezerovitost navržených asfaltových směsí byla provedena na základě výpočtu z maximální objemové hmotnosti směsi a objemové hmotnosti zkušební tělesa. Objem mezer asfaltové směsi je vyjádřený v %. Zkouška byla provedena dle ČSN EN 12697-8 [17]. Výsledky mezerovitosti směsí s nízkoviskózním i vysokoviskózním pojivem jsou uvedeny v tabulce 14. [17]

- Výpočet mezerovitosti asfaltových směsí V_m byl proveden dle vzorce:

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} * 100 \%$$

kde	V_m	mezerovitost směsi s přesností na 0,1 %
	ρ_m	maximální objemová hmotnost směsi [kg/m^3]
	ρ_b	objemová hmotnost zkušební tělesa [kg/m^3]

2.2.4 Stanovení mezerovitosti kameniva

Mezerovitost kameniva je vyjádření objemu mezer mezi kamenivem zhutněné asfaltové směsi včetně mezer vyplněných vzduchem a objemu asfaltového pojiva ve zkušebním tělese. Popis této metody je uveden v normě ČSN EN 12697-8 [17]. Výsledná mezerovitost je uvedena jako procentuální množství celkového objemu zkušební tělesa.

Naměřené hodnoty mezerovitosti směsí s nízkoviskózním i vysokoviskózním pojivem jsou uvedeny v tabulce 15. [17]

- Výpočet mezerovitosti kameniva VMA dle:

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

kde	VMA	mezerovitost směsi kameniva [%]
	V_m	mezerovitost zkušebního tělesa [%]
	B	obsah pojiva ve zkušebním tělese [%]
	ρ_b	objemová hmotnost zkušebního tělesa [kg/m ³]
	ρ_B	objemová hmotnost pojiva [kg/m ³]

2.2.5 Stupeň vyplnění mezer pojivem

V této zkušební metodě je popsáno stanovení vyplnění mezer ve směsi kameniva pojivem. Tato hodnota je vyjádřena v procentech s přesností 0,1 %. Stupeň vyplnění mezer se vypočítá z obsahu pojiva, mezerovitosti směsi kameniva, objemové hmotnosti zkušebního tělesa a objemové hmotnosti pojiva. Popis metody je uveden v ČSN EN 12697-8 [17]. Výsledky provedené zkoušky jsou popsány v tabulce 16. [17]

- Výpočet stupně vyplnění mezer pojivem VFB je proveden dle:

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

kde	VFB	stupeň vyplnění mezer ve směsi kameniva pojivem [%]
	VMA	mezerovitost směsi kameniva [%]
	B	obsah pojiva ve zkušebním tělese [%]
	ρ_b	objemová hmotnost zkušebního tělesa [kg/m ³]
	ρ_B	objemová hmotnost pojiva [kg/m ³]

2.2.6 Stanovení odolnosti proti účinkům vody

V normě ČSN EN 12697-12 [18] jsou popsány tři zkušební metody, pomocí kterých lze stanovit odolnost zkušebních těles (Marshallova tělesa) proti účinkům vody. V tomto případě byla použita metoda **A**, která stanovuje pevnost v příčném tahu zkušebních těles z asfaltové směsi.



Obrázek 14: Marshallova tělesa

Tato zkouška byla provedena na sadě Marshallových těles zobrazených na obrázku 14. Tělesa byla rozdělena do dvou skupin podle jejich stejné průměrné výšky a objemové hmotnosti. Rozdělení bylo provedeno z důvodu odlišného temperování zkušebních těles. Výsledkem je skupina **suchých** a **mokrých** zkušebních těles. Skupina suchých těles byla pouze uchována na vodorovném povrchu při laboratorní teplotě (20 ± 5 °C). Skupina mokrých těles byla vložena vakuové komory (Obrázek 15), kde byla zcela nasycena destilovanou vodou o teplotě (20 ± 5 °C). Minimální hloubka ponořených těles byla 20 mm pod hladinou vody. Následně se v průběhu 10 minut postupně snižoval tlak ve vakuové komoře až na hodnotu $6,7 \pm 0,3$ kPa. Tlak byl snižován z důvodu ochrany zkušebních těles před rozpínajícím se vzduchem. Ve vakuové komoře byla tělesa udržována 30 minut a následně byl tlak vyrovnán. Dalších 30 ± 5 minut byla zkušební tělesa ponechána v destilované vodě a poté byla přemístěna do vodní lázně o teplotě 40 ± 1 °C na dobu 72 hodin. Hloubka ponoření byla opět minimálně 20 mm pod hladinou vody. Před provedením zkoušky odolnosti se

skupiny suchých i mokrých zkušebních těles temperovaly na teplotu 15 ± 2 °C. Skupina suchých těles v termostaticky regulované komoře a skupina mokrých těles ve vodní lázni.



Obrázek 15: Vakuová komora

Následovalo stanovení pevnosti v příčném tahu. V případě skupiny mokrých těles se stanovení pevnosti provedlo do 1 minuty po vytažení tělesa z vodní lázně a po jeho osušení. Takto připravená zkušební tělesa se po jednom osazovala do zkušebního přístroje. Zkušební tělesa byla pomocí lisu přístroje centricky zatěžována. Tělesa byla stlačována konstantní rychlostí 50 ± 2 mm za minutu, dokud nedošlo k jejich porušení (Obrázek 16). Byly zjištěny hodnoty maximálního dosaženého zatížení pro každé zkušební těleso a pomocí těchto výsledků byla vypočítána pevnost v příčném tahu ITS. [19]

- Výpočet pevnosti v příčném tahu ITS byla stanovena dle vzorce:

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

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



Obrázek 16: Měření příčného tahu na Marshallově tělese

Dále byla ze stanovených pevností v příčném tahu vypočítána odolnost proti působení vody. Tato odolnost je zde vyjádřena jako pevnostní poměr **ITSR** a je stanovena v procentech. [18]

- Výsledky poměru pevností v příčném tahu ITSR jsou stanoveny dle:

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

kde	ITSR	poměr pevností v příčném tahu [%]
	ITS_w	průměrná pevnost v příčném tahu skupiny mokrých zkušebních těles [kPa]
	ITS_d	průměrná pevnost v příčném tahu skupiny suchých zkušebních těles [kPa]

2.2.7 Nízkoteplotní vlastnosti

Tato metoda byla provedena z důvodu zjištění nízkoteplotních charakteristik jednotlivých asfaltových směsí. Působením nízkých teplot na asfaltovou směs dochází ve

vozovce ke vzniku mrazových trhlin, které se dále šíří a narušují konstrukční vrstvy vozovek. Cílem této zkoušky je stanovení kritické teploty a tahové síly neboli napětí v okamžiku, kdy je zkušební těleso porušeno trhlinou. Ke vzniku trhliny dochází při postupném ochlazování konstantní rychlostí 10 °C/hod. Při snižování teploty je nutno zabránit podélnému zkracování zkušebního tělesa $\varepsilon_t = 0$. Toho docílíme zahříváním upínacího zařízení zkušebního přístroje. Míra zahřívání je automaticky vyhodnocována dle snímačů deformace, které jsou umístěny v podložkách upevňujících zkušební těleso. [20]



Obrázek 17: Měřicí přístroj nízkoteplotních charakteristik



Obrázek 18: Zkušební tělesa – trámečky

Zkouška nízkoteplotních vlastností byla provedena v zařízení Cyklon -40 (Obrázek 17) na zkušebních tělesech - trámečcích uvedených na obrázku 18. Trámečky byly zhotoveny vyřezáním na kotoučové pile z laboratorně vyrobených desek dle ČSN EN 12697-33 [21]. Pro tuto zkoušku byly použity tři nařezané trámečky. Potom byla všechna tělesa na obou koncích opatřena upevňujícími podložkami a celé těleso bylo připevněno ve speciálním kovovém rámu. Zkušební tělesa jsou podrobně popsána v ČSN EN 12697-26 [22]. Kovový rám se zkušebním tělesem byl připevněn na spojovací tyče uvnitř zkušební komory. Tímto spojením byl simulován reálný stav ve vozovce, kdy trámeček spolupůsobí jako nekonečný pás. Následně je pomocí obslužného programu regulován ohřev upínacích prvků za postupného snižování teploty v komoře (Obrázek 19). Poté je možné na základě vyhodnocených výsledků stanovit maximální tahovou sílu neboli pevnost za kritické teploty. V tento okamžik dochází ke vzniku mrazové trhliny. [20]



Obrázek 19: Průběh zkoušky nízkoteplotních vlastností

2.2.8 Modul tuhosti asfaltové směsi

Cílem této zkušební metody je charakterizovat tuhost asfaltových směsí. Jedná se o dvoubodovou zkoušku na jednostranně vetknutém ztuhlém asfaltovém materiálu. Tento je namáhán ustáleným harmonickým zatěžováním na zařízení pro měření modulů tuhosti asfaltových směsí uvedeném na obrázku 20. Zkušební vzorky jsou deformovány v rozsahu lineárního přetvoření. Na základě této zkoušky je stanovena amplituda napětí, poměrného přetvoření a také fázový úhel mezi napětím a poměrným přetvořením. [22] Průběh modulu tuhosti napodobuje chování asfaltových směsí v konstrukci vozovky. Zjišťovanou veličinou je komplexní modul E^* . Jedná se o charakteristiku přetvoření při namáhání harmonickým proměnným zatížením. Komplexní modul tuhosti popisuje velikost deformace při měření o různých teplotách a frekvencích. Modul tuhosti je potom absolutní hodnota komplexního modulu $|E^*|$. [22] Moduly tuhosti byly určovány pro zkušební tělesa při teplotách - 5 °C, + 10 °C, + 15 °C, + 25 °C, + 40 °C a při frekvencích 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz.



Obrázek 20: Zařízení pro měření modulů tuhosti asfaltových směsí

Jako zkušební tělesa byly použity komolé klíny – trapezoidy, uvedené na obrázku (Obrázku 21). Byla zhotovena vyřezáním laboratorně vyrobených desek dle ČSN EN 12697-33 [21]. Všechna tělesa byla opatřena kovovou podkladní deskou ve spodní části a příchýtkou v horní části. Ta slouží pro upevnění tělesa k zařízení vyvolující harmonické zatížení (Obrázek 22). Zkušební tělesa jsou podrobně popsána v ČSN EN 12697-26 [22].



Obrázek 21: Zkušební tělesa - komolé klíny



Obrázek 22: Upevnění zkušebního tělesa

Nejprve bylo třeba zkušební tělesa temperovat po dobu minimálně 4 hodin na požadovanou teplotu v klimatizované komoře. Takto připravené těleso bylo stabilizováno, vycentrováno pod vodící tyč zatěžovacího zařízení pomocí podložek a šroubů do tuhého rámu a následně upevněno. Dále byly zadány do programu počítače řídicího průběh zkoušky parametry trapezoidu. Pro zjištění komplexního modulu tuhosti byly zadány rozměry a hmotnost zkušebních těles. Následně bylo zařízení spuštěno a byly stanoveny hodnoty komplexních modulů tuhostí jednotlivých trapezoidů. Tyto hodnoty byly postupně zjišťovány pro teploty - 5 °C, + 10 °C, + 15 °C, + 25 °C, + 40 °C. V průběhu měření byly zaznamenávány hodnoty amplitudy síly a průhybu trapezoidu. Dále také fázový úhel posunu působením deformace při postupně zvyšovaných frekvencích. Tyto hodnoty byly stanoveny pro frekvence zatěžování 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz. [22]

2.2.8.1 Výpočet modulu tuhosti

Zde jsou popsány jednotlivé postupy a výpočtové rovnice potřebné pro stanovení modulu tuhosti.

- Výpočet okamžitého napětí σ je proveden dle:

$$\sigma = \sigma_0 * \cos(\omega t + \varphi)$$

kde	σ	okamžité napětí [MPa]
	σ_0	amplituda maximálního napětí ve zkušebním tělese [MPa]
	ω	úhlová rychlost [s^{-1}], $\omega = 2\pi f$
	φ	fázový úhel posunu průběhu přetvoření za průběhem síly [$^\circ$]

- Výpočet velikosti přetvoření ε při působení cyklického namáhání dle:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 * \cos(\omega t + \Psi)$$

kde	ε	okamžité poměrné přetvoření [-]
	ε_0	amplituda maximálního přetvoření ve zkušebním tělese [-]
	ω	úhlová rychlost [s^{-1}], $\omega = 2\pi f$
	Ψ	fázový úhel posunu průhybu a síly [$^\circ$]

- Výpočet komplexního modulu složený z reálné a imaginární složky:

$$E^* = E_1 + iE_2$$

$$E_1 = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot \cos \varphi$$

$$E_2 = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot \sin \varphi$$

kde	E^*	komplexní modul
	E_1	reálná složka charakterizující pružné vlastnosti
	E_2	imaginární složka charakterizující vazké vlastnosti

- Výpočet modulu tuhosti S je vypočten jako poměr maximálního napětí a porušení:

$$S = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} = |E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}$$

kde	S	modul tuhosti [MPa]
	σ_0	amplituda maximálního napětí ve zkušebním tělese [MPa]
	ε_0	amplituda maximálního přetvoření ve zkušebním tělese [-]
	E^*	komplexní modul
	E_1	reálná složka charakterizující pružné vlastnosti
	E_2	imaginární složka charakterizující vazké vlastnosti

2.2.9 Odolnost proti únavě

Únava zkušebního tělesa obecně popisuje vliv porušování vnitřní struktury tělesa opakovaným zatížením. Působením toho namáhání dochází v závislosti na počtu zatěžovacích cyklů k poklesu komplexního modulu a k šíření únavových trhlin. Únavové trhliny se na reálné konstrukční vrstvě vozovky dále šíří jako mapové a síťové trhliny. Cílem této zkušební metody je stanovení životnosti asfaltové směsi s CRmB. Obecně se jako konec životnosti považuje porušení zkušebního tělesa trhlinou nebo v případě poklesu modulu tuhosti na 50 % původní naměřené hodnotu. V tento okamžik těleso smluvně přestává vzdorovat účinkům působících zatížení. Tato metoda je blíže popsána v normě ČSN EN 12697-24. [23]

Odolnost proti únavě byla v této práci zjišťována pomocí metody **Strain control**. Při této metodě se zvolí konstantní počáteční přetvoření pro celý průběh zkoušky. Během zkoušky dochází zvyšováním zatěžovacích cyklů ke snížení síly a následně k poklesu modulu tuhosti.

Zkouška odolnosti proti únavě byla provedena při teplotě $10 \pm 0,5$ °C a při frekvenci zatěžovacích cyklů 25 Hz. Únavové charakteristiky byly zjišťovány na zkušebních tělesech (trapezoidech), na kterých již byla provedena zkouška modulu tuhosti. Tato tělesa jsou popsána v kapitole 2.2.8.

Pro potřeby zkoušky byla nejprve zkušební tělesa temperována po dobu 4 hodin v klimatizované komoře na požadovanou teplotu 10 °C. Potom byly jednotlivé trapezoidy postupně upevněny do zkušebního přístroje ve kterém se již zjišťovala hustota modulů tuhosti. Upevnění bylo provedeno stejným způsobem popsaným v kapitole 2.2.8. Po připravení zkušebních vzorků bylo nastaveno zatěžovací zařízení s maximální amplitudou přetvoření trapezoidů byla v rozsahu $1,0 \cdot 10^{-4}$ až $4,0 \cdot 10^{-4}$. Při tomto nastavení byla

předpokládaná životnost trapezoidů od 10^3 do 10^7 cyklů. Po zapnutí přístroje byla ihned stanovena amplitudy síly a průhybu. Později dochází s úbytkem měřené síly na polovinu i k poklesu komplexního modulu tuhosti. V tento okamžik je zkouška ukončena. Výsledné naměřené hodnoty lze použít pro vykreslení únavové přímky do Wöhlerova diagramu, který vyjadřuje v logaritmickém měřítku závislost deformace na počtu cyklů před dosažením únavy. [23] V následujícím textu jsou uvedeny výpočty únavových charakteristik pomocí regresní analýzy.

- Výpočet maximální amplitudy poměrného přetvoření byl stanoven dle:

$$\log \varepsilon_0 = a + b * \log N$$

kde $\log \varepsilon_0$ maximální amplituda poměrného přetvoření na počátku měření
 a kvocient únavové zkoušky
 b sklon únavové křivky
 $\log N$ počet opakování zatěžování

- Výpočet počátečního přetvoření ε_6 odvozený při 10^6 zatěžovacích cyklech:

$$\log \varepsilon_6 = a + 6b$$

kde ε_6 průměrná velikost přetvoření odvozená z únavové přímky při 10^6 cyklech
 a kvocient únavové zkoušky
 b sklon únavové křivky

- Výpočet zatížení odpovídající počátečnímu přetvoření ve zkušebním tělese ε_0 :

$$N = 10^6 * \frac{\varepsilon_6^B}{\varepsilon_0^B}$$

kde B charakteristika únavy
 ε_6 průměrná velikost přetvoření odvozená z únavové přímky při 10^6 cyklech
 ε_0 maximální amplituda poměrného přetvoření na počátku měření

- Výpočet charakteristiky únavy je stanoven:

$$B = -\frac{1}{b}$$

kde b sklon únavové křivky

2.3 Návrh asfaltového betonu s CRmB dle ČSN EN 13108-1

V následující kapitole je popsán návrh směsi typu ACL 16 S dle požadavků ČSN EN 13108-1 [4].

2.3.1 Definice

Cílem této normy je asfaltový beton popsat funkčními charakteristikami, založenými na funkčních vlastnostech. V normě jsou uvedeny dva způsoby této specifikace. Jedná se jednak o **empirický přístup** popisující asfaltový beton na základě návrhového složení směsí včetně požadavků na stavební materiály. A dále je to **funkční přístup**, který asfaltový beton specifikuje na základě požadavků funkčních charakteristik.

2.3.2 Popis požadavků

Návrhové složení směsi musí splňovat všeobecné požadavky a dále empirické nebo funkční požadavky. Ty jsou uvedeny v tabulce 2.

Ložní vrstvy	
Typ	S
Označení směsi ACL	16 S
Počet úderů Marshallova pěchu	2 x 75
Všeobecné požadavky	
Zrnitost/síto	ACL 16 S
31,5	-
22,4	100
16	90-100
11,2	-
8	52-72
4	34-54
2	24-40
0,125	5-13
0,063	4-10
Minimální mezerovitost $V_{\min}$ (%)	4,0 (3,0)
Maximální mezerovitost $V_{\max}$ (%)	6,0 (8,0)
Minimální poměr pevnosti v příčném tahu $ITSR$ (%)	80
Maximální poměrná hloubka koleje PRD_{AIR} (%)	3,0
Maximální přírůstek hloubky koleje WTS_{AIR} (mm/10 ³ cyklů)	0,05
Mezní hodnoty teploty asfaltové směsi pro silniční asfalty (°C)	30/45 = 155 °C - 195 °C, 35/50 a 40/60 = 150 °C - 190 °C, 50/70 a 70/100 140°C - 180°C
Maximální podíl STK v SK nebo DTK v DK (%)	jen drcené
Empirické požadavky	
Minimální obsah rozpustného pojiva $B_{\min}$ (% hm.)	4,2
Minimální obsah rozpustného pojiva B_{vol} (% obj.)	9,8
Minimální stupeň vyplnění mezer $VFB_{\min}$ (%)	-
Maximální stupeň vyplnění mezer $VFB_{\max}$ (%)	-
Funkční požadavky	
Minimální tuhost $S_{\min}$ (MPa)	7000
Odolnost proti únavě ε_6 (% obj.)	115

Tabulka 2: Požadavky na asfaltové ložní vrstvy

2.4 Návrh asfaltového betonu s CRmB dle TP 148

V této kapitole je uveden návrh směsi ACL 16 S podle požadavků platných TP 148 [3] a revidovaných TP 148 [24].

2.4.1 Definice

Technické podmínky určují požadavky pro použití konstrukčních vrstev vozovek obsahující směsi, které jsou stmeleny silničním asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem. Stanovují podmínky návrhu, složení a výroby směsi. Dále také stanovuje požadavky pro provádění a kontrolu konstrukčních vrstev.

2.4.2 Popis požadavků

Požadované fyzikální a mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 3.

Vlastnost	TP 148 (2009) platné	TP 148 schvalované
	1	1
	AC	AC
	ACL S	ACL S
Počet úderů zhutňovače	2 x 75	2 x 75
Minimální obsah CRmB, % hmotnosti směsi s CRmB po extrakci, ČSN EN 12697-1	ložní 7,0 ložní 5,9	ložní 6,3 (V), 5,8 (N) ložní 5,9
Zrnitost, ČSN EN 12697-2		
31,5	-	-
22,4	100	100
16	90-100	90-100
11,2	-	-
8	30-50	54-70
4	25-40	36-52
2	20-35	26-38
0,125	2-9	4-9
0,063	2-5	3-7
Mezerovitost v % objemu směsi zkouška typu, M_s směsi kameniva, VMA_{min} vrstvy, kontrolní zkouška, M_s ČSN EN 12697-8	3 až 5 19 2 až 6	4 až 7 18 2 až 6
Odolnost vůči vodě ČSN EN 12697-12	80	Bez požadavku
Odolnost proti trvalé deformaci: PRD_{AIR} (%) / WTS_{AIR} (mm/103 cyklů) ČSN EN 12697-22, malé zařízení, metoda B, na vzduchu při předepsané teplotě	5/0,07	3/0,05
Minimální tuhost S_{min} (Mpa)	4500	5500
Odolnost proti únavě ϵ_6	160	Bez požadavku
Tloušťka vrstvy (mm)	50 - 70	50 - 70

**Tabulka 3: Požadavky platných a schvalovaných TP 148 pro asfaltový beton pro ložní
vrstvy s CRmB**

2.4.3 Vztah ČSN EN 13108-1 a TP 148

Asfaltové směsi jsou navrhovány na základě požadavků národní přílohy normy ČSN EN 13108-1 [4] a zároveň platných i nově schvalovaných TP 148 [3, 24]. ČSN EN 13108-1 [4] stanovuje požadavky na charakteristiky asfaltových směsí a pomocí TP 148 [3, 24] jsou tyto požadavky upraveny a přizpůsobeny pro směsi stmelené asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem.

Důvodem rozdílných požadavků je vysoký obsah vysokoviskózního pojiva v navržené směsi. Aby byla směs s CRmB zpracovatelná, je nutné dávkovat vyšší obsah pojiva. Vyššímu obsahu pojiva je potřeba vytvořit ve směsi dostatečný prostor. Z toho důvodu musíme vhodně upravit čáru zrnitosti a snížit obsah fileru. Tím umožníme dávkování většího množství pojiva. Obsah pojiva v návrhu asfaltové směsi s CRmB je tudíž znatelně vyšší než uvádí ČSN EN 13108-1 [4]. Z toho důvodu se návrh pojiva upřesní dle požadavků v TP 148 [3, 24].

3 POUŽITÉ MATERIÁLY

V této kapitole, jsou popsány charakteristiky materiálů použitých na výrobu směsi typu ACL.

3.1 Kamenivo

Kamenivo bylo dovezeno z lomu Luleč. Jedná se o moravskou drobu, což je šedá sedimentární hornina tvořená zrnky křemene, živce a jinými minerály. Kamenivo bylo odebráno v únoru 2012 a pro směsi ACL s nízkoviskózním i vysokoviskózním CRmB byly použity stejné frakce tohoto kameniva. Byly použity frakce 0 – 4 mm, 4 – 8 mm, 8 – 11 mm, 8 – 16 mm viz tabulka 4 a obrázek 23. Směsi dále obsahují filer, což je vápencová moučka odebraná z kamenolomu Mokrá v listopadu 2011. Přehled síťových rozborů jednotlivých frakcí kameniva nalezneme v tabulce 5. Použitá kameniva i filer odpovídají požadavkům ČSN EN 13043 [25].



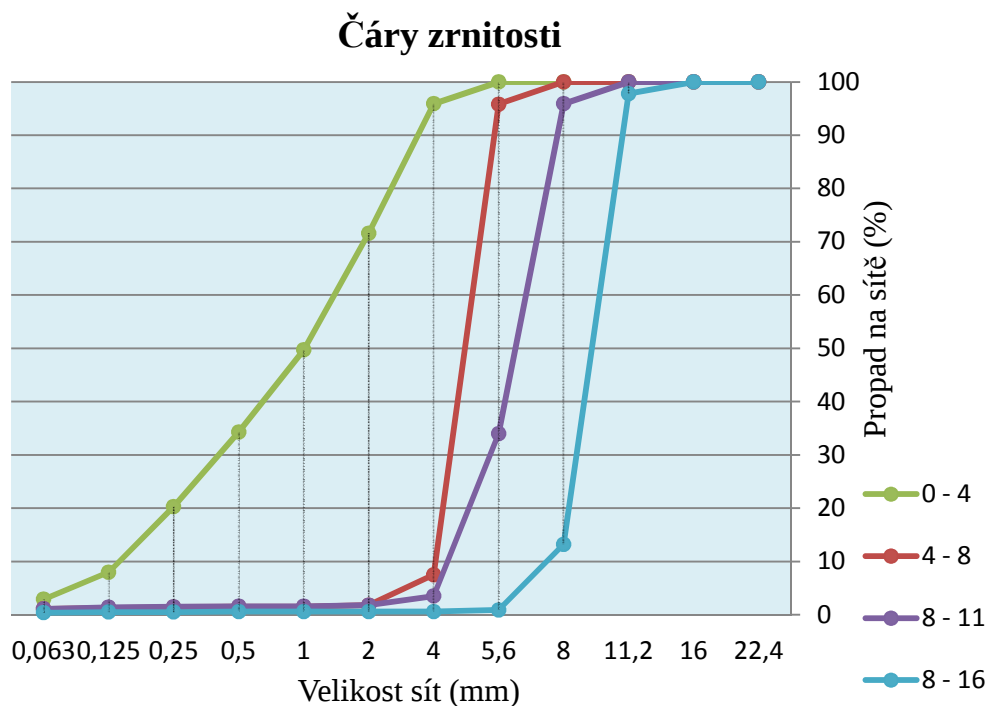
Obrázek 23: Použité frakce kameniva

Frakce kameniva ACL	Lokalita (datum)
0 - 4	Luleč (2.2012)
4 - 8	Luleč (2.2012)
8 - 11	Luleč (2.2012)
8 - 16	Luleč (2.2012)
filer	Mokrá (11.2011)

Tabulka 4: Kamenivo směsi typu ACL

Frakce	8-16	8-11	4-8	0-4	moučka
16	97,8	100,0	100,0	100,0	100,0
11	13,2	95,9	100,0	100,0	100,0
8	0,9	34,0	95,8	100,0	100,0
4	0,6	3,5	7,5	95,9	100,0
2	0,6	1,8	1,8	71,6	100,0
1	0,6	1,6	1,5	49,7	100,0
0,5	0,6	1,6	1,5	34,3	100,0
0,25	0,5	1,5	1,4	20,3	99,5
0,125	0,5	1,4	1,3	8,0	87,2
0,063	0,4	1,1	1,1	2,9	72,3

Pro návrh asfaltových směsí s asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem je důležitým parametrem čára zrnitosti kameniva. Porovnání zrnitosti použitých frakcí kameniva je znázorněno v grafu 1. Při provádění byly dodrženy požadavky normy ČSN EN 933-1 [8].



Graf 1: Čáry zrnitosti použitého kameniva

3.2 Silniční asfalt

Na výrobu asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem byl použit silniční asfalt od výrobce OMV. Silniční asfalt musí splňovat požadavky evropské normy ČSN EN 12591 [26]. Podle klimatických podmínek, dopravního zatížení nebo podle druhu použitých materiálů volíme optimální pojivo asfaltové směsi. V tomto návrhu byl zvolen silniční asfalt o gradaci 50/70.

3.2.1 Výsledky provedených zkoušek silničního asfaltu

Byla provedena zkouška penetrace jehlou a stanoven bod měknutí. V tabulce 6 jsou uvedeny výsledky vlastností asfaltového pojiva použitého na výrobu CRmB.

Silniční asfalt OMV - 50/70	
Penetrace [0,1mm]	60,0
Bod měknutí [°C]	47,7

Tabulka 5: Vlastnosti silničního asfaltu

3.3 Pryžový granulát

Jedná se o odpadní pryže z ojetých pneumatik (Obrázek 1). Pryžový granulát se stále častěji používá jako prášková modifikační přísada do asfaltových pojiv. Aplikace do pojiva může být provedena různými způsoby. Výsledkem je asfaltové pojivo s rozdílnými vlastnostmi, kdy výrazně vzrůstá viskozita pojiva a dochází k zahuštění obdobně jako v případě použití fileru. Další zvýšení viskozity nastává interakcí mezi lehkými frakcemi asfaltu a částicemi pryžového granulátu. Důležitým faktorem je mimo jiné tvar a velikost měrného povrchu částic pryžového granulátu, který ovlivňuje intenzitu, zpracovatelnost a následně průběh reakce se silničním asfaltem. Sítový rozbor použitého pryžového granulátu zrnitosti 0/0,7 mm výrobce Kovosteel je uveden v tabulce 7.

Velikost ok sít [mm]	Granulát Kovosteel 0/0,7 mm
2	100,0
1	99,6
0,5	37,3
0,25	9,0
0,125	2,7
0,063	0,6

Tabulka 6: Sítový rozbor pryžového granulátu

3.4 Asfalt modifikovaný pryžovým granulátem CRmB

Pro stmelení kameniva v asfaltovém betonu pro ložní vrstvy byl zvolen asfalt modifikovaný pryžovým granulátem. Směsi s použitím CRmB mají zlepšené vlastnosti oproti běžným směsím. Jedná se především o prodloužení životnosti směsi, dále vyšší odolnost proti stárnutí, únavě, trvalým deformacím a trhlinám. Nespornou výhodou je také snížení mocnosti

navržených asfaltových vrstev. V případě zlepšení vlastností pomocí modifikovaných asfaltů, které nejsou ověřeny empirickým způsobem, se musí provést dodatečné prokázání těchto vlastností pomocí zkušebních metod podle evropské normy ČSN EN 12697 [27]. Modifikační přísadou v CRmB je použit pryžový granulát z ojetých pneumatik. Zde jsou uvedeny dvě hlavní metody přidávání pryžového granulátu do směsi (obě metody jsou vysvětleny v kapitole 1.2.1):

- **Rubit®** - jedná se o suchý proces, kdy se pryžový granulát o zrnitosti 0/4 mm dává v obalovně přímo do míchačky ke kamenivu bez předešlého smísení s asfaltem.
- **Asfalt modifikovaný pryžovým granulátem** – tato metoda byla použita při návrhu posuzované směsi ACL 16 S. Je to technologie mokrého procesu, při které vmícháváme pryžový granulát zrnitosti 0/1 mm až 0/2 mm do asfaltu. Po smísení asfaltu, granulátu a po zreagování pojiva v mísicím zařízení se vzniklým pojivem obaluje kamenivo v míchačce obalovny.

3.4.1 Výroba CRmB v laboratoři

Pro potřeby návrhu směsi asfaltového betonu pro ložní vrstvy byly vyrobeny dva typy CRmB – nízkoviskózní a vysokoviskózní. Nízkoviskózní CRmB obsahuje 11 % pryžového granulátu od výrobce Kovosteel o zrnitosti 0/0,7 mm z celkové hmotnosti asfaltu. Toto množství odpovídá 9,9 % granulátu z hmotnosti CRmB. Vyskoviskózní CRmB obsahuje 19,5 % pryžového granulátu z hmotnosti silničního asfaltu. Toto množství odpovídá 16,3 % z hmotnosti CRmB. Do stanoveného množství silničního asfaltu byl při teplotě 175 °C za stálého míchání přidán pryžový granulát. Směs byla míchána po dobu 60 minut v laboratorní míchačce. Rychlost míchání byla 100 otáček za minutu. Oba CRmB byly laboratorně vyrobeny dle stanoveného postupu v TP 148 [3]. Pro názornost je na obrázku 24 zobrazena konzistence vysokoviskózního CRmB zahřátého na teplotu 175 °C.



Obrázek 24: Asfalt modifikovaný pryžovým granulátem

3.4.2 Výsledky provedených zkoušek CRmB

Pro oba vyrobené CRmB byly stanoveny jejich charakteristické vlastnosti na základě provedených laboratorních zkoušek. Pro zdůraznění rozdílu chování obou asfaltových směsí byl zvolen obsah pryžového granulátu tak, aby hodnota dynamické viskozity nízkoviskózního CRmB byla mírně pod dolní mezí hodnoty viskozity požadovanou TP 148 [3] a hodnota dynamické viskozity vysokoviskózního CRmB byla mírně nad horní mezí hodnoty viskozity požadovanou TP 148 [3]. Byly provedeny zkoušky penetrace, bod měknutí, resilience a dynamická viskozita. Výsledné hodnoty nízkoviskózního a vysokoviskózního CRmB jsou uvedeny v následující tabulce 8. Při porovnání výsledků je patrné, že vyšší obsah pryžového granulátu má příznivý vliv na vlastnosti CRmB. Vyskoviskózní CRmB má výrazně vyšší viskozitu **6,0** Pa.s proti **1,2** Pa.s u nízkoviskózního pojiva. To potvrzuje i nižší hodnota penetrace jehlou a vyšší hodnota bodu měknutí vysokoviskózního CRmB. Na základě výsledků resilience lze předpokládat, že vyšší obsah granulátu napomáhá ke zvýšení pružnosti pojiva.

CRmB - nízkoviskózní (11 % Kovosteel)	
Penetrace jehlou (25 °C) [0,1mm]	36,5
Bod měknutí [°C]	61,5
Resilience [%]	22
Dynamická viskozita (175 °C)	1,2
CRmB - vysokoviskózní (19,5 % Kovosteel)	
Penetrace jehlou (25 °C) [0,1mm]:	28,3
Bod měknutí [°C]:	71,25
Resilience [%]:	33
Dynamická viskozita (175 °C)	6,0

Tabulka 7: Vlastnosti asfaltů modifikovaných pryžovým granulátem

4 NÁVRH ASFALTOVÝCH SMĚSÍ

Zde je popsán postup návrhu asfaltových směsí. Snahou je navržení směsí s optimálním složením jednotlivých materiálů. Rozhodující je vhodně zvolená čára zrnitosti a určení potřebného množství pojiva přidaného do směsi. Byly zhotoveny dva druhy směsí s použitím nízkoviskózního a vysokoviskózního asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem (CRmB). Návrh asfaltových směsí byl proveden na základě požadavků národní přílohy ČSN EN 13108-1 [4], TP 148 [3] a na základě zkušeností vedoucího práce.

4.1 Návrh a výroba směsí ACL 16 S

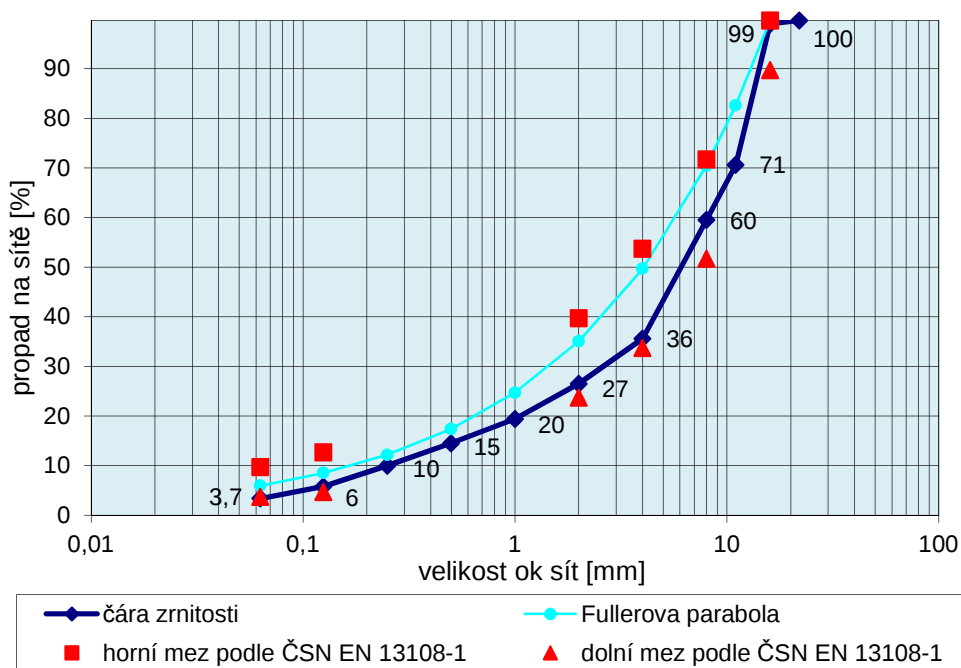
Výsledná čára zrnitosti byla navržena dle pokynů vedoucího práce a je stejná jak pro směs s nízkoviskózním, tak i vysokoviskózním CRmB. Byla navržena na základě sítového rozboru jednotlivých frakcí použitého kameniva s ohledem na požadavky normy ČSN EN 13108-1 [4] a upřesnění v TP 148 [3]. Čára zrnitosti je pro navrhovanou směs ACL 16 S uvedena v tabulce 9 a znázorněna v grafu 2 a 3. Následně bylo stanoveno výsledné dávkování pojiva do směsi. Z grafů 2 a 3 je zřejmé, že čára zrnitosti navržené směsi ACL 16 S vyhovuje požadavkům oboru zrnitosti pro ČSN EN 13108-1 [4] a zároveň pro platné schvalované TP 148 [3]. Byly zjištěny pouze mírné odchylky od dolní meze ČSN EN 13108-

1 [4] na síť 0,063 mm a na síť 8, na kterém nejsou splněny požadavky na horní mez pro platné TP 148 [3]. Čára zrnitosti byla navržena při dolní mezi oboru zrnitosti ve schvalovaných TP 148 [3]. Bylo tak rozhodnuto z důvodu ponechání dostatečného prostoru pro vyšší obsah pojiva s částicemi pryžového granulátu.

Velikost ok sít [mm]	Čára zrnitosti	ČSN EN 13108-1	TP 148 platné (2009)	TP 148 schvalované	Fullerova parabola
31,5	100	-	-	-	-
22,4	100	100	100	100	-
16	99,3	90 - 100	90 - 100	90 - 100	100
11,2	70,9	-	-	-	83,7
8	59,8	52 - 72	30 - 50	54 - 70	70,7
4	35,9	34 - 54	25 - 40	36 - 52	50
2	26,8	24 - 40	20 - 35	26 - 38	35,4
1	19,7	-	-	-	25
0,5	14,8	-			17,7
0,25	10,3	-	-	-	12,5
0,125	6,1	5 - 13	2 - 9	4 - 9	8,8
0,063	3,7	4 - 10	2 - 5	3 - 7	6,3

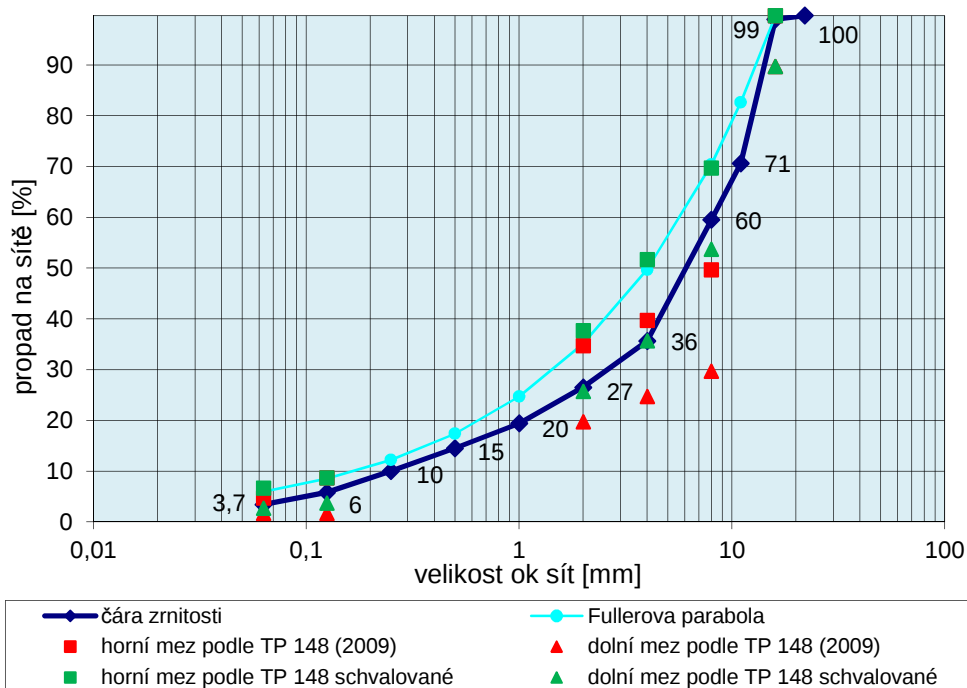
Tabulka 8: Návrh čáry zrnitosti pro ACL 16 S

Čára zrnitosti pro ACL 16 S



Graf 2: Čára zrnitosti pro ACL 16 S – porovnání s ČSN EN 13108-1

Čára zrnitosti směsi ACL 16 S



Graf 3: Čára zrnitosti pro ACL 16 S – porovnání s platnými a schvalovanými TP 148

Při optimalizaci byly shodně navrženy tři sady zkušebních těles s rozdílným obsahem pojiva pro obě směsi s nízkoviskózním i vysokoviskózním pojivem. Pro každou sadu obou směsí byla zhotovena tři Marshallova tělesa (Obrázek 14) dle ČSN EN 12697-30 [28]. Tyto sady obsahovaly množství 5,3 %, 5,8 %, 6,3 % pojiva z celkové hmotnosti směsi. Toto množství bylo stanoveno na základě zkušeností s výrobou směsi. U vzorků s minimálním obsahem pojiva 5,3 % se nepředpokládá splnění požadavků normy ČSN EN 13108-1[4] ani TP 148 [3]. Toto množství je cíleně navrženo kvůli zjištění chování směsi a porovnání s ostatními vzorky. Pro výrobu asfaltových směsí byla v laboratoři připravena modifikovaná pojiva obsahující rozdílné množství pryžového granulátu. V tomto návrhu byl použit silniční asfalt od výrobce OMV o gradaci 50/70. Směs s nízkoviskózním pojivem obsahuje 11 % pryžového granulátu z celkové hmotnosti asfaltu od výrobce Kovosteel 0/0,7 mm. V případě směsi s vysokoviskózním pojivem je zvolen obsah granulátu 19,5 % z celkové hmotnosti asfaltu. Z těchto tří sad Marshallových těles byly pro obě směsi následně zjištěny volumetrické charakteristiky.

4.1.1 Výsledky volumetrických charakteristik Marshallových těles

Byly zjišťovány vlastnosti směsi asfaltového betonu pro ložní vrstvy ACL 16 S s použitím nízkoviskózního a vysokoviskózního pojiva o obsahu 5,3 %, 5,8 % a 6,3 % ve směsi.

4.1.1.1 Objemové hmotnosti jednotlivých směsí

Tato zkušební metoda je popsána v kapitole 2.2.1. Výsledné hodnoty objemové hmotnosti zkušebních těles s nízkoviskózním pojivem jsou uvedeny v tabulce 10. S vysokoviskózním pojivem v tabulce 11.

- Objemové hmotnosti směsí ρ_{bssd}

Zkušební těleso	Suché (g)	Pod vodou (g)	Vlhké (g)	Obj. hmotnost $\rho_{\text{(bssd)}} \text{ (kg/m}^3\text{)}$	Průměr
1. 5,3 %	1145,0	653,6	1154,4	2282	2291
2. 5,3 %	1139,7	651,6	1144,9	2306	
3. 5,3 %	1137,6	651,3	1148,8	2283	
1. 5,8 %	1144,1	654,4	1151,4	2298	2292
2. 5,8 %	1146,4	653,8	1154,5	2286	
3. 5,8 %	1143,4	654,1	1151,8	2293	
1. 6,3 %	1146,4	652,9	1152,4	2291	2297
2. 6,3 %	1145,1	653,1	1150,4	2299	
3. 6,3 %	1150,5	655,8	1155,1	2300	

Tabulka 9: Objemové hmotnosti směsí s nízkoviskózním pojivem

Zkušební těleso	Suché (g)	Pod vodou (g)	Vlhké (g)	Obj. hmotnost $\rho_{\text{(bssd)}} \text{ (kg/m}^3\text{)}$	Průměr
1. 5,3 %	1150,0	662,1	1171,3	2255	2273
2. 5,3 %	1152,8	659,9	1163,6	2285	
3. 5,3 %	1151,3	662,9	1167,2	2280	
1. 5,8 %	1152,0	660,7	1159,9	2304	2304
2. 5,8 %	1151,3	663,0	1161,8	2304	
3. 5,8 %	1152,6	661,1	1160,2	2305	
1. 6,3 %	1142,2	655,6	1145,5	2328	2322
2. 6,3 %	1141,4	655,5	1146,9	2319	
3. 6,3 %	1142,5	654,3	1146,2	2319	

Tabulka 10: Objemové hmotnosti směsí s vysokoviskózním pojivem

Z tabulek je zřejmé, že obě směsi mají srovnatelné objemové hmotnosti. Směs s vysokoviskózním CRmB vykázala mírně větší rozdíly objemových hmotností jednotlivých sad než směs s nízkoviskózním CRmB.

- **Maximální objemová hmotnost ρ_{mv}**

Popis této metody je uveden v kapitole 2.2.2. Hodnoty maximální objemové hmotnosti pro směsi s nízkoviskózním a vysokoviskózním CRmB jsou uvedeny v tabulkách 12 a 13.

Obsah pojiva (%)	5,3	5,8	6,3
Označení pyknometru	IV	II	V
Pyknometr prázdný m_1 (g)	690,7	694,7	693,0
Pyknometr + vzorek m_2 (g)	1707,4	1834,1	1835,8
Pyknometr + vzorek + rozpouštědlo m_3 (g)	3033,5	3074,2	3081,6
Objem pyknometru V_p (ml)	1322,7	1314,9	1323,0
Hustota rozpouštědla ρ_w (kg/m ³)	1454,0	1454,0	1454,0
Teplota teploty (°C)	25,0	25,0	25,0
Navážka asf. směsi (g)	1016,7	1139,4	1142,8
Maximální objemová hmotnost ρ_{mv} (kg/m³)	2483	2472	2457

Tabulka 11: Maximální objemová hmotnost s nízkoviskózním pojivem

Obsah pojiva (%)	5,3	5,8	6,3
Označení pyknometru	II	III	V
Pyknometr prázdný m_1 (g)	381,5	382,9	389,8
Pyknometr + vzorek m_2 (g)	1037,3	1018,6	1038,5
Pyknometr + vzorek + rozpouštědlo m_3 (g)	1603,5	1596,3	1610,3
Objem pyknometru V_p (ml)	654,5	656,8	656,8
Hustota rozpouštědla ρ_w (kg/m ³)	1454,0	1454,0	1454,0
Teplota teploty (°C)	25,0	25,0	25,0
Navážka asf. směsi (g)	655,8	635,7	648,7
Maximální objemová hmotnost ρ_{mv} (kg/m³)	2474	2450	2461

Tabulka 12: Maximální objemová hmotnost s vysokoviskózním pojivem

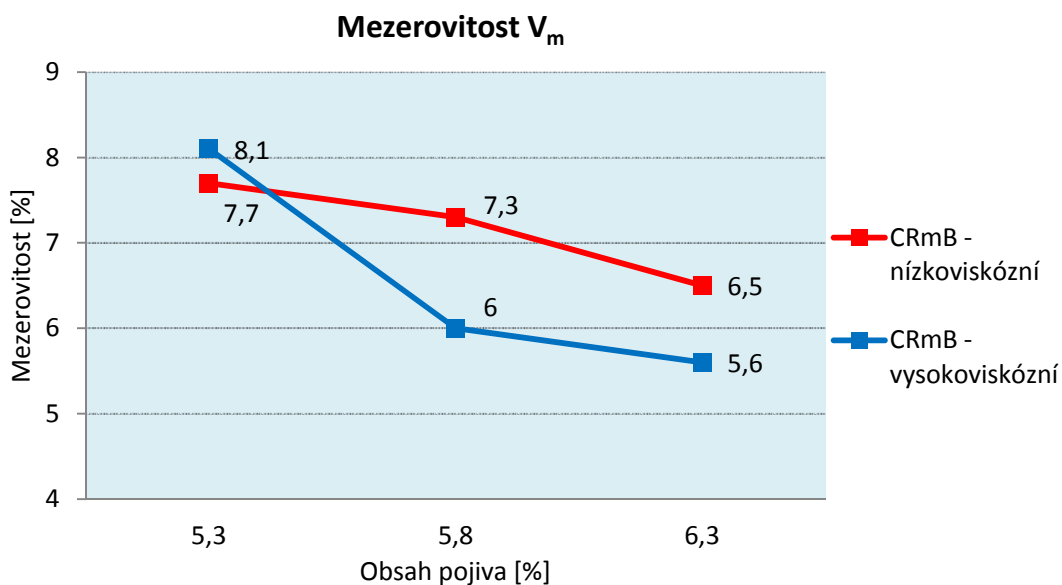
Dle očekávání byly u směsí s rostoucím obsahem pojiva naměřeny klesající hodnoty maximální objemové hmotnosti. Pouze u vzorku s obsahem pojiva 6,3 % u vysokoviskózního pojiva byla naměřena vyšší hodnota. Tento výsledek byl však naměřen z důvodu nepřesnosti měření.

4.1.1.2 Mezerovitost směsí V_m

Zkušební metoda je popsána v kapitolách 2.2.3. V tabulce 14 jsou výsledky stanovení mezerovitosti zkušebních těles s nízkoviskózním a vysokoviskózním pojivem. Tyto výsledky jsou potom zobrazeny v grafu 4.

ACL 16 S - nízkoviskózní			
Obsah pojiva (%)	5,3	5,8	6,3
Max objemová hm. (kg/m ³)	2483	2472	2457
Objemová hm. ρ_{bssd} (kg/m ³)	2291	2292	2297
Mezerovitost z hmotností V_m (%)	7,7	7,3	6,5
ACL 16 S - vysokoviskózní			
Obsah pojiva (%)	5,3	5,8	6,3
Max objemová hm. (kg/m ³)	2474	2450	2461
Objemová hm. ρ_{bssd} (kg/m ³)	2273	2304	2322
Mezerovitost z hmotností V_m (%)	8,1	6,0	5,6

Tabulka 13: Mezerovitost směsí ACL 16 S



Graf 4 : Mezerovitost směsí ACL 16 S

Obě směsi s nízkoviskózním i vysokoviskózním pojivem nesplňují požadavky ČSN EN 13108-1 [4] na maximální mezerovitost $V_{\max} = 6,0$ ani TP 148 [3] požadující $V_{\max} = 5$ (6) %. U směsí s CRmB je problematické v laboratoři dosáhnout nízké mezerovitosti. Je to zapříčiněno přítomností částic pryže, které brání důkladnému zhutnění směsi rázovým zhutňovačem. I přes mírně vyšší mezerovitost byl po dohodě s vedoucím diplomové práce návrh směsí akceptován.

4.1.1.3 Mezerovitost směsi kameniva VMA

Metoda je popsána v kapitole 2.2.4 a její výsledky na zkušebních tělesech jsou uvedeny v tabulce 15.

ACL 16 S - nízkoviskózní			
Obsah pojiva (%)	5,3	5,8	6,3
Mezerovitost z hmotností (%)	7,7	7,3	6,5
Objm.hm. ρ_{bssd} (kg/m ³)	2291	2292	2297
Objm.hm. pojiva (kg/m ³)	1040	1040	1040
Obsah pojiva v tělese (%)	5,3	5,8	6,3
Mezerovitost směsi kameniva VMA (%)	19,4	20,1	20,4
ACL 16 S - vysokoviskózní			
Obsah pojiva (%)	5,3	5,8	6,3
Mezerovitost z hmotností (%)	8,1	6,0	5,6
Objm.hm. ρ_{bssd} (kg/m ³)	2273	2304	2322
Objm.hm. pojiva (kg/m ³)	1040	1040	1040
Obsah pojiva v tělese (%)	8,1	6	5,6
Mezerovitost směsi kameniva VMA (%)	19,7	18,8	19,7

Tabulka 14: Mezerovitost směsí kameniva ACL 16 S

Výsledné hodnoty obou směsí vyhovují požadavkům TP 148 [3] na mezerovitost směsi kameniva. TP 148 požadují minimální mezerovitost směsi kameniva VMA = 19 %. Pouze vzorek s vysokoviskózním pojivem o obsahu pojiva 5,8 % požadavkům TP 148 [3] mírně nevyhovuje.

4.1.1.4 Stupeň vyplnění mezer pojivem VFB

Popis této metody nalezneme v kapitole 2.2.5. Výsledky této metody pro směsi s nízkoviskózním a vysokoviskózním pojivem jsou uvedeny v tabule 16.

ACL 16 S - nízkoviskózní			
Obsah pojiva (%)	5,3	5,8	6,3
Mezerovitost směsi kameniva (%)	19,4	20,1	20,4
Objm.hm. z ρ_{bssd} (kg/m ³)	2291	2292	2297
Objm.hm. pojiva (kg/m ³)	1040	1040	1040
Obsah pojiva v tělese (%)	5,3	5,8	6,3
Stupeň vyplnění mezer pojivem VFB (%)	60,2	63,7	68,1
ACL 16 S - vysokoviskózní			
Obsah pojiva (%)	5,3	5,8	6,3
Mezerovitost směsi kameniva (%)	19,7	18,8	19,7
Objm.hm. z ρ_{bssd} (kg/m ³)	2273	2304	2322
Objm.hm. pojiva (kg/m ³)	1040	1040	1040
Obsah pojiva v tělese (%)	8,1	6	5,6
Stupeň vyplnění mezer pojivem VFB (%)	58,8	68,3	71,3

Tabulka 15: Stupeň vyplnění mezer pojivem ACL 16 S

Na základě těchto výsledků a zkušenostech vedoucího této práce byly jako optimální sada vyhodnoceny Marshallovy tělesa s obsahem pojiva **6,3 %**. U těles s obsahem pojiva menším o 0,5 % se již v laboratoři směs hůře promíchávala a nedocházelo k dostatečně rychlému obalení kameniva pojivem. Průměrná mezerovitost směsí se 6,3 % pojiva byla vyhodnocena jako nejnižší. A to v případě směsi s nízkoviskózním pojivem $V_m = 6,5 \%$ a u vysokoviskózního pojiva $V_m = 5,6 \%$. Požadavky na minimální a maximální na mezerovitost směsi dle ČSN EN 13108-1 [4] jsou 4% až 6%. Podle TP 148 [3] je to potom 3% až 5%. Tyto požadavky jsou uvedeny v tabulkách 2 a 3. Porovnáním naměřených výsledků mezerovitosti směsí a výše uvedených požadavků bylo zjištěno, že směs s nízkoviskózním pojivem (6,3%) nevyhověla požadavkům 13108-1 [4] ani TP148 [3]. Směs s vysokoviskózním pojivem sice vyhověla 13108-1 [4], ale nevyhověla TP148 [4]. Výsledky mezerovitosti obou směsí jsou

uvedeny v tabulce 14. Asfaltový beton s CRmB o obsahu 6,3 % byl dále použit na výrobu zkušebních těles pro provádění zkoušek vlastností směsí.

4.2 Příprava zkušebních těles

V této diplomové práci byly pro potřeby provedených zkoušek zhotoveny tři typy zkušebních těles. Jedná se o Marshallova tělesa, trámečky a trapezoidy. Jednotlivá tělesa jsou blíže popsána v následujících kapitolách 4.2.1, 4.2.2 a 4.2.3.

4.2.1 Výroba Marshallových těles

Marshallova tělesa byla zhotovena dle normy ČSN EN 12697-30. Byly vyrobeny ze směsí ACL 16 S s nízkoviskózním a vysokoviskózním pojivem. Pro obě směsi byly vyrobeny tři sady těles s obsahem pojiva 5,3 %, 5,8 %, 6,3 % z celkové hmotnosti směsi.

Nejprve byla připravena nahřátá a promíchaná navážka směsi potřebná pro výrobu Marshallova tělesa při teplotě 170 °C. Návrh této směsi je popsán v kapitole 4.1. Takto připravené množství směsi bylo postupně vsypáno do speciální předeřáté válcové formy uvedené na obrázku 25. Válcová forma byla temperována v laboratorní peci na teplotu 155 °C. Následně byla vložena do Marshallova zhutňovače. Forma zde byla vycentrována, upevněna a pomocí hutnícího pěchu byla směs zhutněna 2 x 75 rázy. Po zhutnění a vychladnutí se Marshallovo těleso vytlačilo z formy ručním hydraulickým lisem. Na takto vyrobených Marshallových tělesech byly následně provedeny zkušební metody popisující charakteristické vlastnosti směsí ACL 16 S. [28]



Obrázek 25: Příprava Marshallova tělesa

4.2.2 Výroba trámeček

Trámečky byly vyrobeny ze směsí ACL 16 S s nízkoviskózním a vysokoviskózním pojivem (Obrázek 26). Pro výrobu těles byly použity směsi s obsahem pojiva 5,8 % a 6,3 % z hmotnosti směsi. Trámečky byly vyhotoveny pro stanovení zkušební metody nízkoteplotních vlastností směsí.



Obrázek 26: Zkušební trámeček pro stanovení nízkoteplotních charakteristik

Pro výrobu trámečků bylo nutné vyrobit desky z navržených asfaltových směsí dle ČSN EN 12697-33 [21]. Nejprve byla stanovena navážka pro zhotovení desky o tloušťce 50 mm. Byly použity směsi s obsahy pojiv 5,8 % a 6,3 %. Namíchaná směs byla zahřáta na teplotu 170 °C v laboratorní peci a následně byla hutněna pomocí lamelového zhutňovače desek. Tento přístroj popsán v ČSN EN 12697-33 [21] je zobrazen na obrázku 27. Deska je hutněna pomocí vertikálních lamel. Tyto byly zatlačovány konstantními pojezdy válce až do úplného zhutnění. Výsledkem byla deska o rozměrech 260 mm x 320 mm x 50 mm (Obrázek 28).



Obrázek 27: Lamelový zhutňovač



Obrázek 28: Deska ze směsi ACL 16 S

Z této desky byly potom nařezány zkušební trámečky (Obrázek 28). Rozřezání bylo provedeno kotoučovou pilou s diamantovým kotoučem. Byly ověřeny rozměry vyrobených trámečků (50,0 x 50,0 x 200,0 mm) a jejich hmotnost. Potom byly zkušební trámečky připraveny pro provedení zkoušky nízkoteplotních vlastností v Cyklonu -40. Na oba konce trámečku byly pomocí dvousložkového epoxidového lepidla připevněny kovové podložky. A celé těleso bylo upevněno do speciálního centrického kovového rámu. Tento rám slouží pro přesné vycentrování polohy trámečku v podložkách po dobu tvrdnutí lepidla. Po vytvrdnutí lepidla je lepidlo připravené pro provedení zkušební metody. [21]

4.2.3 Výroba trapezoidů

Trapezoidy neboli komolé klíny jsou zkušební tělesa používané pro zkoušky měření komplexního modulu tuhosti a únavových charakteristik asfaltových směsí. Trapezoidy jsou vyrobeny ze směsí ACL 16 S s nízkoviskózním a vysokoviskózním pojivem popsané v kapitole 4.1. Zkušební tělesa měly obsahy pojiv 5,8 % a 6,3 %. Tato tělesa byla vyrobena z desek asfaltových směsí. Obsah a postup výroby desek je totožný jako u výroby trámečků a je popsán v kapitole 4.2.2. Z výše uvedených desek byly nařezány zkušební trapezoidy pomocí kotoučové pily s diamantovým kotoučem o rozměrech 70,0 x 30,0 x 50,0 x 250,0 mm. Nařezané těleso mělo tvar komolého klínu, viz obrázek 29.



Obrázek 29: Komolý klín

Dále byly zjištěny rozměry a hmotnosti jednotlivých těles. Následně byla všechna tělesa v dolní části opatřena kovovou podložkou, která slouží pro spolehlivé upevnění trapezoidu v měřícím přístroji. V horní části potom byla tělesa opatřena kovovým háčkem, pomocí kterého je těleso upevněno k vodící tyči přístroje. Obě tyto kovové podložky byly nejprve vycentrovány a následně byly k trapezoidu připevněny dvousložkovým lepidlem. Po dostatečném vytvrdnutí lepidla byla zkušební tělesa připravena k měření. [21]

5 VÝSLEDKY ZKOUŠEK

Na zkušebních tělesech (Marshallova tělesa, trámečky, trapezoidy) byly provedeny zkušební metody určující charakteristické vlastnosti pro dané asfaltové směsi ACL 16 S. V následujícím textu jsou uvedeny naměřené parametry a celková zhodnocení výsledků jednotlivých zkoušek.

5.1 Stanovení odolnosti proti účinkům vody

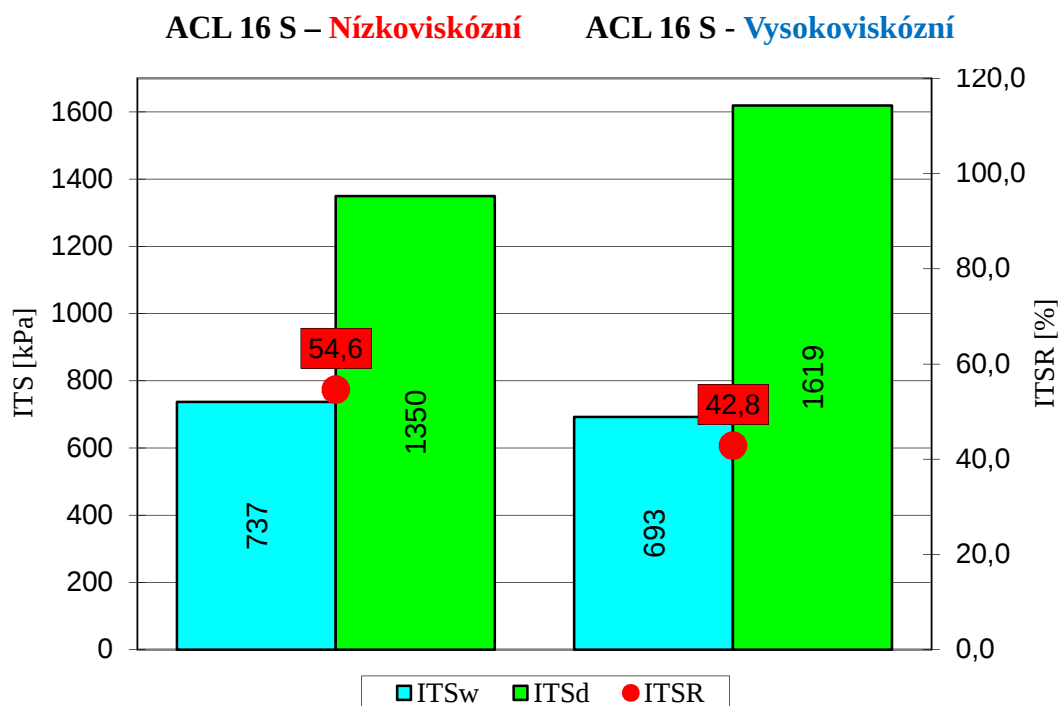
Byla provedena zkouška pevnosti v příčném tahu na skupině suchých a mokrých těles. Odolnost vůči vodě byla zjišťována na směsích asfaltového betonu s nízkoviskózním a vysokoviskózním pojivem o obsahu 6,3 %. Tato zkušební metoda je blíže popsána v kapitole 2.2.6 a výsledky jsou uvedeny v tabulce 17, 18 a znázorněny v grafu 5. Požadavky na zkoušku odolnosti proti účinkům vody jsou stanoveny v ČSN EN 13108-1 [4] a TP 148 [3] a zde jsou uvedeny v tabulce 2 a 3.

ACL 16 S - nízkoviskózní									
SUCHÁ TĚLESA	L	D	hmotnost	objem z rozměrů	obj. hm. z rozměrů	P	ITSd	∅ ITSd	ITSR
	[mm]	[mm]	[g]	[cm ³]	[g/cm ³]	[N]	[MPa]	[MPa]	[%]
9	67,9	102	1155,3	554,83	2,082	15600	1,434	1,350	54,6
12	69,1	101,6	1175,5	560,22	2,098	14500	1,315		
13	66,7	102	1154,5	545,02	2,118	13900	1,301		
8	68,2	101,6	1146,5	552,92	2,074	8500	0,781	0,737	
10	66,8	101,9	1151,9	544,77	2,114	8100	0,758		
11	68,2	101,5	1158	551,83	2,098	7300	0,671		
MOKRÁ TĚLESA	L	D	hmotnost	objem z rozměrů	obj. hm. z rozměrů	P	ITSw	∅ ITSw	ITSR
	[mm]	[mm]	[g]	[cm ³]	[g/cm ³]	[kN]	[MPa]	[MPa]	[%]

Tabulka 16: Odolnost proti účinkům vody směsi ACL 16 S s nízkoviskózním CRmB

ACL 16 S - vysokoviskózní									
SUCHÁ TĚLESA	L	D	hmotnost	objem z rozměrů	obj. hm. z rozměrů	P	ITSd	Ø ITSd	ITSR
	[mm]	[mm]	[g]	[cm ³]	[g/cm ³]	[N]	[MPa]	[MPa]	[%]
3	67,0	101,8	1153,3	545,33	2,115	14800	1,381	1,619	42,8
5	67,0	101,6	1154,6	543,19	2,126	18500	1,732		
7	66,9	101,7	1147,3	543,45	2,111	18600	1,743		
1	66,7	101,8	1153,9	542,89	2,125	8200	0,771	0,693	
2	67,2	101,4	1152,2	542,67	2,123	6700	0,629		
6	67,0	102	1152,2	547,48	2,105	7300	0,679		
MOKRÁ TĚLESA	L	D	hmotnost	objem z rozměrů	obj. hm. z rozměrů	P	ITSw	Ø ITSw	ITSR
	[mm]	[mm]	[g]	[cm ³]	[g/cm ³]	[kN]	[MPa]	[MPa]	[%]

Tabulka 17: Odolnost proti účinkům vody směsi ACL 16 S s vysokoviskózním CRmB



Graf 5 : Odolnost proti účinkům vody směsi ACL 16 S s CRmB

Porovnáním výsledků obou směsí ACL 16 S zjistíme, že lepší odolnost proti účinkům vody vykazuje směs s nízkoviskózním pojivem. ČSN EN 13108-1 [4] a platné TP 148 [3] stanovují požadavky na minimální poměr pevnosti v příčném tahu 80 %. Tento požadavek ani jedna ze směsí nesplňuje. Zkouška ITSR vykazuje neprůkazné výsledky pro směsi s vyšší

tloušťkou filmu asfaltového pojiva, jako například u směsí SMA nebo u směsí obsahujících pryžový granulát.

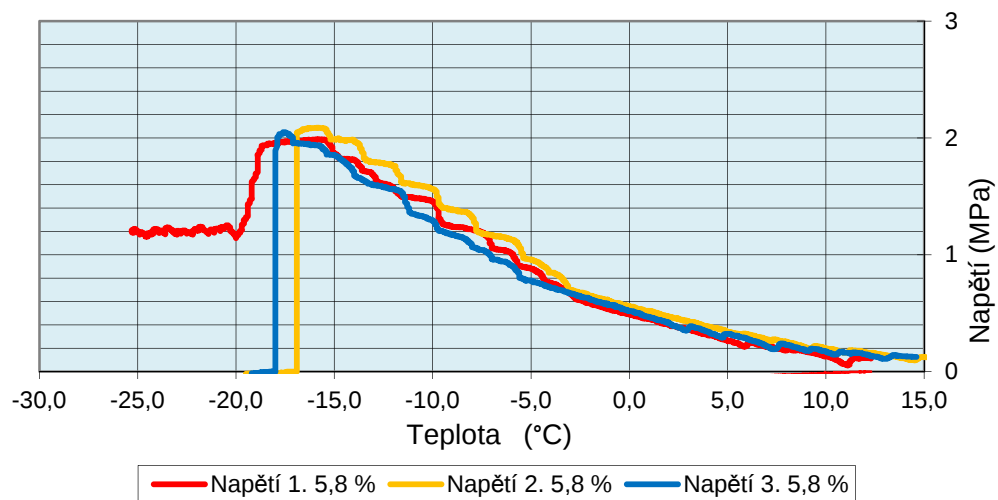
5.2 Nízkoteplotní vlastnosti

Byly stanoveny nízkoteplotní charakteristiky ACL 16 S s nízkoviskózním a vysokoviskózním pojivem. Zkouška byla provedena na zařízení Cyklon -40 a je popsána v kapitole 2.2.8. Nízkoteplotní vlastnosti byly stanoveny na 12 zkušebních tělesech. Byla použita tělesa s obsahem CRmB 5,8 % a 6,3 %. Vzorky s menším obsahem CRmB nebyly posuzovány z důvodu nevyhovujících vlastností směsi. Zkouška byla prováděna za rychlosti ochlazování vzorků 10 °C/h. Výsledky této zkoušky nalezneme v tabulce 19. Porovnání odolnosti jednotlivých směsí proti vzniku mrazových trhlin je znázorněno v grafech 6, 7, 8, 9.

ACL 16 S - nízkoviskózní			
Zkušební těleso	Max. síla při porušení [kN]	Max. napětí při porušení [MPa]	Teplota vzorku při porušení [°C]
1. 5,8 %	4,97	2,02	-15,8
2. 5,8 %	5,22	2,10	-15,9
3. 5,8 %	5,12	2,06	-17,5
Průměr	5,10	2,06	-16,40
1. 6,3 %	6,62	2,67	-19,4
2. 6,3 %	6,36	2,57	-18,8
3. 6,3 %	6,39	2,60	-18,5
Průměr	6,46	2,61	-18,90
ACL 16 S - vysokoviskózní			
Zkušební těleso	Max. síla při porušení [kN]	Max. napětí při porušení [MPa]	Teplota vzorku při porušení [°C]
1. 5,8 %	4,16	1,67	-15,2
2. 5,8 %	5,12	2,04	-23,3
3. 5,8 %	3,81	1,52	-14,8
Průměr	4,36	1,74	-17,77
1. 6,3 %	5,44	2,22	-19,6
2. 6,3 %	5,17	2,07	-16,2
3. 6,3 %	5,79	2,34	-20,4
Průměr	5,47	2,21	-18,73

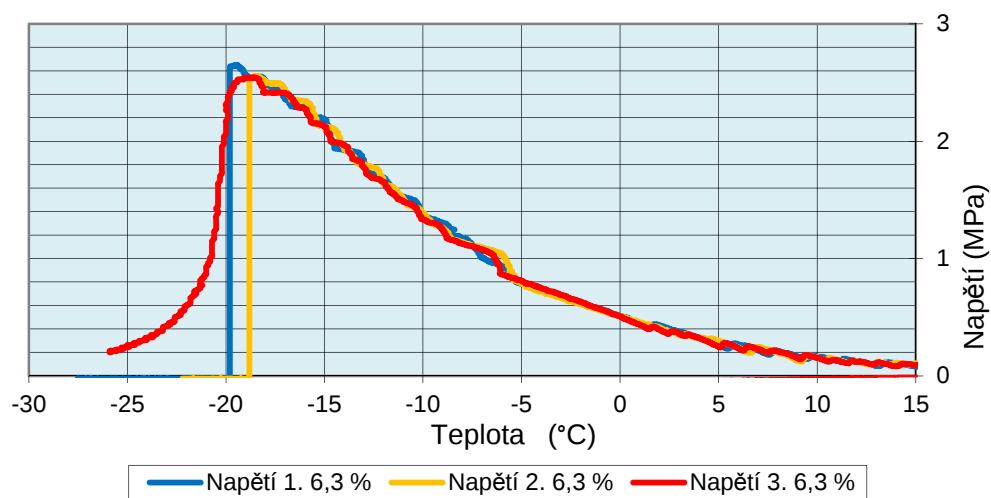
Tabulka 18: Nízkoteplotní vlastnosti ACL 16 S

ACL 16 S – nízkoviskózní 5,8 %



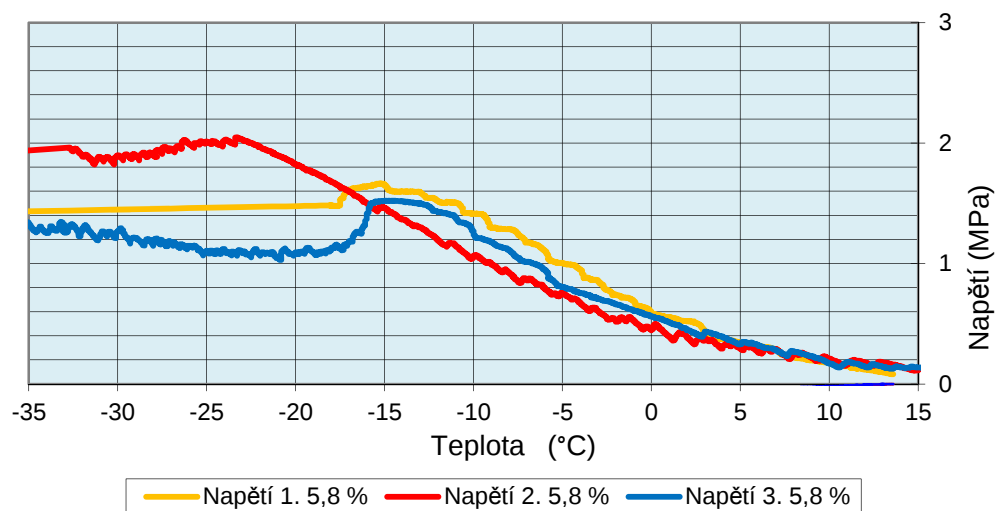
Graf 6: Nízkoteplotní vlastnosti ACL 16 S – nízkoviskózní 5,8 %

ACL 16 S – nízkoviskózní 6,3 %



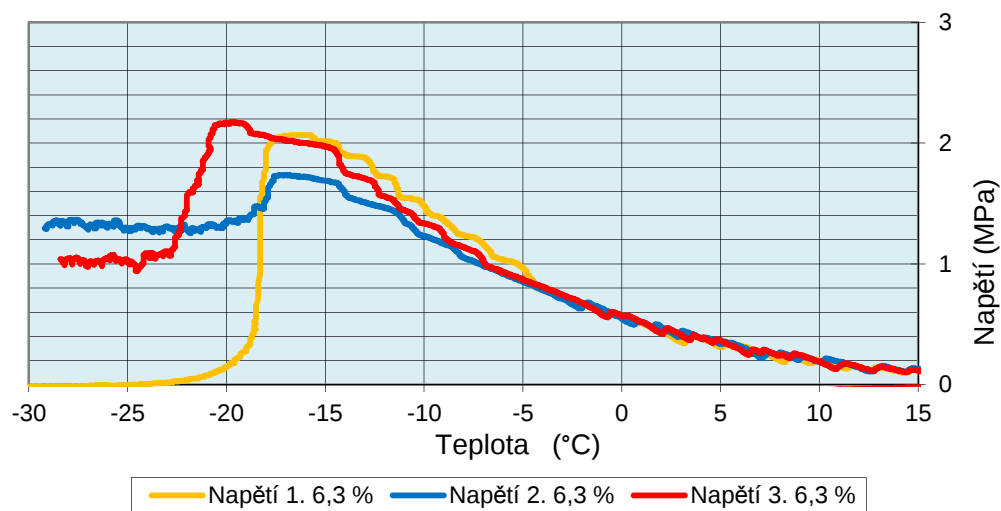
Graf 7: Nízkoteplotní vlastnosti ACL 16 S – nízkoviskózní 6,3 %

ACL 16 S – vysokoviskózní 5,8 %



Graf 8: Nízkoteplotní vlastnosti ACL 16 S – vysokoviskózní 5,8 %

ACL 16 S – vysokoviskózní 6,3 %



Graf 9: Nízkoteplotní vlastnosti ACL 16 S – vysokoviskózní 6,3 %

Obsah CRmB	Tlouška filmu
5,30%	$7,75 \cdot 10^{-3}$
5,80%	$8,52 \cdot 10^{-3}$
6,30%	$9,31 \cdot 10^{-3}$

Tabulka 19: Tloušťky asfaltového filmu jednotlivých směsí

Směs ACL 16 S s vysokoviskózním pojivem dosahuje lepších nízkoteplotních vlastností než směs s nízkoviskózním pojivem. Oba typy směsí dosahovaly dobrých nízkoteplotních vlastností. U směsi s nízkoviskózním pojivem došlo ve většině případů k porušení těles mrazovou trhlinou, u směsí s vysokoviskózním pojivem docházelo především pouze k poklesu tahového napětí se zachováním zbytkového napětí. K porušení zkušebních těles mrazovou trhlinou docházelo u směsí s nízkoviskózním pojivem do teploty - 20 °C, kdy dosahovaly nejvyšších tahových napětí. Příčinou vzniku mrazových trhlin ve zkušebních tělesech je pravděpodobně nižší obsah pryžového granulátu ve směsi s nízkoviskózním pojivem a s tím související vlastnosti tohoto pojiva. Jednotlivé trhliny (Obrázek 30) vznikaly nahodile a k porušení docházelo převážně ve filmu pojiva, nikoliv v kamenivu. Tloušťka filmu byla stanovena pomocí čáry zrnitosti a jednotlivé výsledky jsou uvedeny v tabulce 19. Při porovnání výsledků jsou patrné rozdíly v nárůstu napětí u jednotlivých zkušebních těles. Tyto rozdíly jsou způsobeny kroucením tělesa při působení osového tahu (velká zrna na okraji nejsou obklopeny asfaltovou maltou a je zde oslaben průřez a neutrální osa vybočuje z podélné osy tělesa), což má za následek dřívější poškození zkušebních těles (zvýšení lokálních napětí s tím, že je zaznamenáno kroucení zkušebního tělesa v zeslabeném průřezu, viz detailní záznamy zkoušky v přílohách). Z toho důvodu doporučuji provádět zkoušku nízkoteplotních vlastností na zabroušených tělesech, na kterých k tomu jevu nedochází.



Obrázek 30: Porušení zkušebního tělesa mrazovou trhlinou

Na základě provedené zkoušky lze potvrdit pozitivní vliv vyššího obsahu pojiva na nízkoteplotní vlastnosti směsi. U obou směsí ACL 16 S dokázal zvýšený obsah pojiva o 0,5 % zlepšit nízkoteplotní vlastnosti, kdy kritická teplota byla o 3,0 °C nižší u směsi s nízkoviskózním CRmB a o 4,4 °C nižší u směsi s vysokoviskózním pojivem než u odpovídajících směsí s nižším dávkováním CRmB. U vysokoviskózního pojiva se projevil příznivý vliv tím, že většinou nedošlo k přetržení těles, pouze k poklesu napětí na hodnotu o 10 % až 30 % nižší než maximální (dochází k tažení pojiva a pryžových částic bez přetržení).

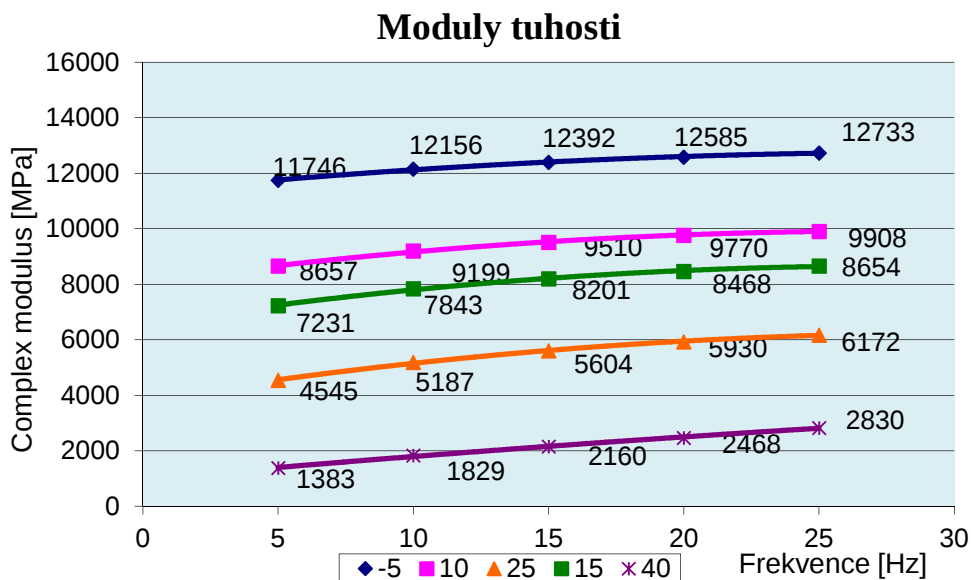
5.3 Modul tuhosti

Zde jsou vyhodnoceny výsledky z měření modulů tuhostí směsí ACL 16 S s nízkoviskózním i vysokoviskózním pojivem o obsahu 6,3 %. Komplexní modul tuhosti byl zjišťován při teplotách -5 °C, 10 °C, 15 °C, 25 °C, 40 °C a měření probíhalo při působení frekvencí 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz a 25 Hz. Popis této zkušební metody je uveden v kapitole 2.2.9. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 20 a znázorněny jsou v grafu 10 a 11. Jedná se o zprůměrované hodnoty patnácti zkušebních těles obou směsí. V grafu 12 jsou potom porovnány průměrné hodnoty obou směsí při frekvenci zatěžování 10 Hz.

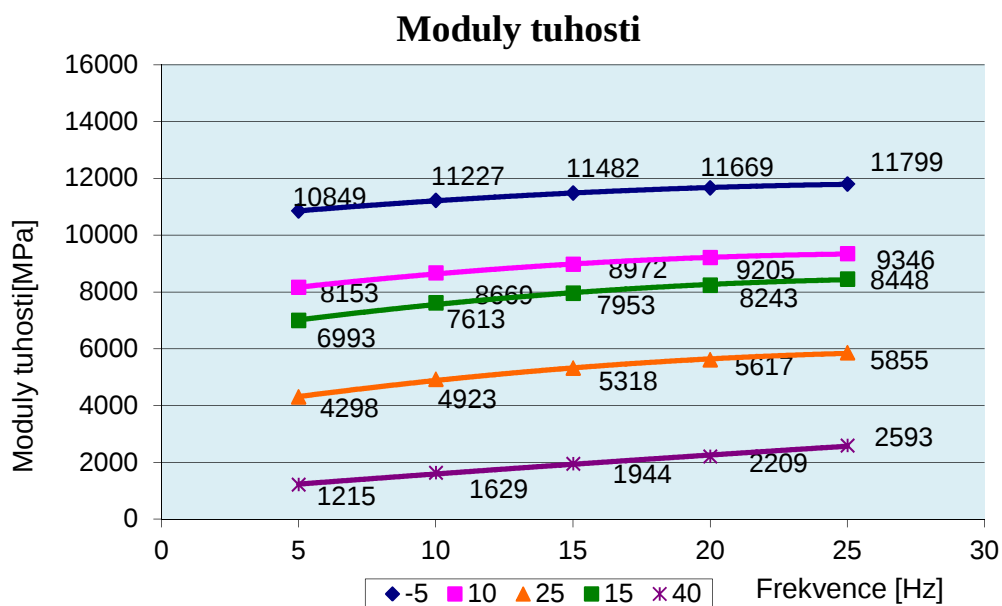
ACL 16 S - nízkoviskózní					
Teplota °C	Modul tuhosti (MPa)				
	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz
-5	11746	12156	12392	12585	12733
10	8657	9199	9510	9770	9908
15	7231	7843	8201	8468	8654
25	4545	5187	5604	5930	6172
40	1383	1829	2160	2468	2830

ACL 16 S - vysokoviskózní					
Teplota °C	Modul tuhosti (MPa)				
	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz
-5	10849	11227	11482	11669	11799
10	8153	8669	8972	9205	9346
15	6993	7613	7953	8243	8448
25	4298	4923	5318	5617	5855
40	1215	1629	1944	2209	2593

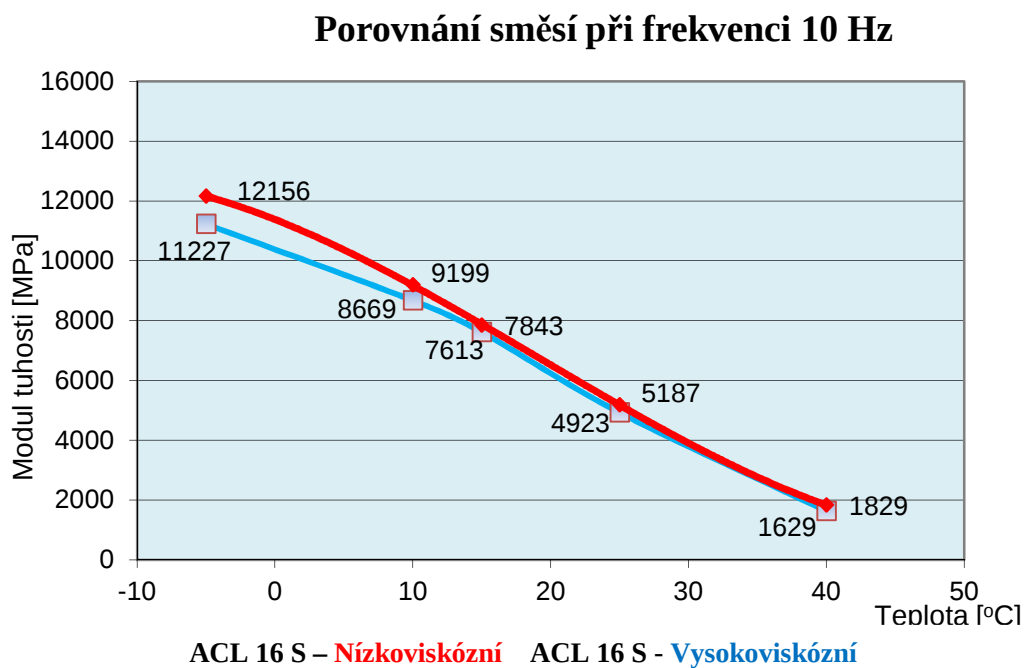
Tabulka 20: Komplexní modul tuhosti pro ACL 16 S



Graf 10: Závislost modulu tuhosti na frekvenci pro ACL 16 S – nízkoviskózní



Graf 11: Závislost modulu tuhosti na frekvenci pro ACL 16 S – vysokoviskózní



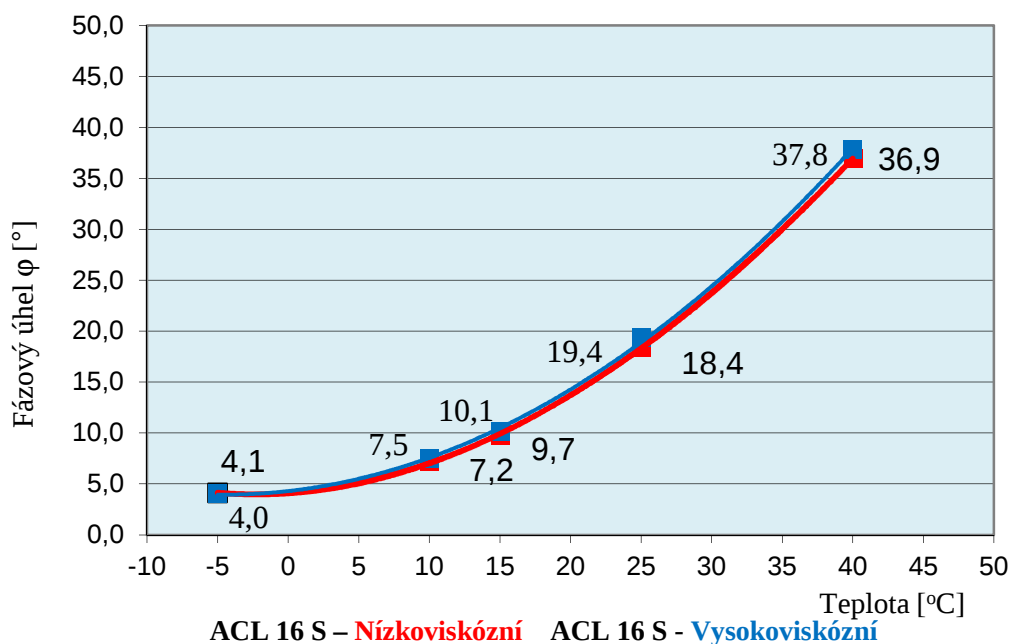
Graf 12: Komplexní moduly tuhosti při frekvenci 10 Hz

ACL 16 S - nízkoviskózní	
Teplota °C	Fázový úhel (°)
	10 Hz
-5	4,1
10	7,2
15	9,7
25	18,4
40	36,9
ACL 16 S - vysokoviskózní	
Teplota °C	Fázový úhel (°)
	10 Hz
-5	4,0
10	7,5
15	10,1
25	19,4
40	37,8

Tabulka 21: Velikost fázových úhlů směsí ACL 16 S

V grafu 13 jsou vykresleny hodnoty fázových úhlů φ [°] pro obě směsi ACL 16 S. Tyto hodnoty odpovídají frekvenci zatěžování 10 Hz. Fázové úhly jsou pro obě směsi srovnatelné. Se zvyšující se teplotou fázový úhel roste, což svědčí o nárůstu viskózního chování materiálu a snižování elastického chování.

Porovnání směsí při frekvenci 10 Hz



Graf 13: Fázové úhly obou směsí ACL 16 S

Za snižující se teploty a zvyšující se frekvence zatěžování docházelo ke zvýšení hodnoty modulu tuhosti asfaltové směsi. U směsi ACL 16 S s nízkoviskózním pojivem byl naměřen mírně vyšší modul tuhosti než u směsi s vysokoviskózním pojivem, který vykazoval nižší teplotní citlivost směsi (plošší vedení čáry tuhosti v grafu 12). I přes vysoký obsah asfaltového pojiva modifikovaného pryžovým granulátem měly obě směsi vysokou tuhost. V případě směsi ACL 16 S s nízkoviskózním pojivem byl naměřen modul tuhosti při 15 °C a 10 Hz 7843 MPa a u směsi s vysokoviskózním pojivem 7613 MPa. Obě směsi splnily funkční požadavek normy ČSN EN 13108-1 na minimální tuhost směsi (7000 MPa). Rovněž požadavek platných TP 148 [3] (4500 MPa) a současně revidovaných TP 148 [24] (5500 MPa) byl s rezervou splněn.

5.4 Odolnost proti únavě

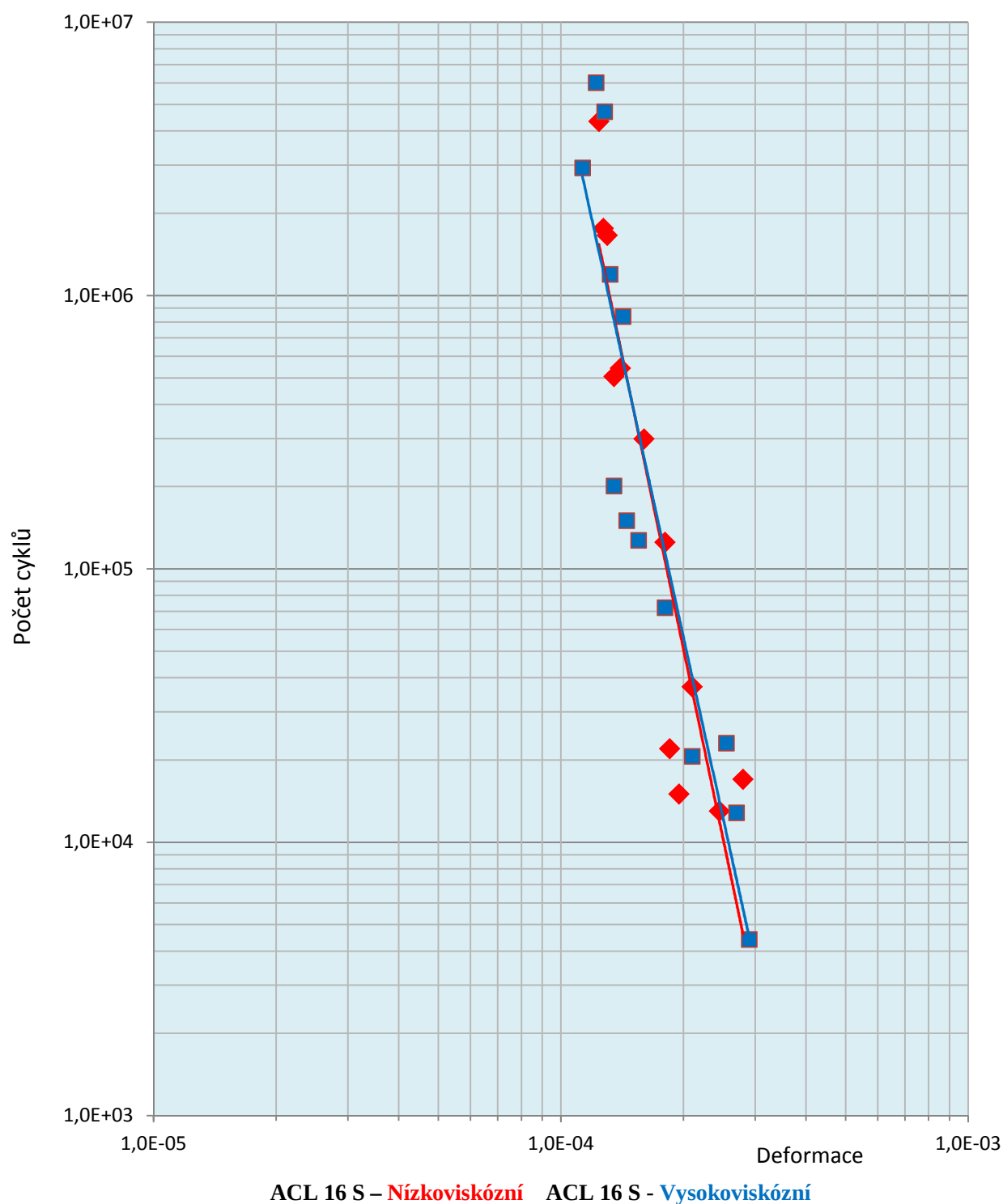
Podle normy ČSN EN 12697-24 [23] byly zjištěny únavové charakteristiky pro směsi asfaltového betonu s obsahem nízkoviskózního i vysokoviskózního pojiva 6,3 %. Byla použita dvoubodová geometrie zkoušky ohybem na komolých klínech (trapezoidech). Na tuto zkoušku byla použita stejná zkušební tělesa, na kterých byly naměřeny moduly tuhosti.

Metoda odolnosti proti únavě je popsána v kapitole 2.2.9. Výsledky této metody a grafické znázornění jsou uvedeny v tabulce 22 a grafu 14.

ACL 16 S - nízkoviskózní					
Zkušební těleso	Poměrné přetvoření	Počet cyklů	Únavové charakteristiky		
			$\epsilon_6 \cdot 10^{-6}$	B	R ²
1	0,000135	505000	131,75	7,13	0,849
2	0,000127	1760000			
3	0,000124	4335000			
4	0,00014	542000			
5	0,00016	299000			
6	0,000185	22000			
7	0,00021	37000			
8	0,000245	13000			
9	0,00028	17000			
10	0,000195	15000			
11	0,00018	125000			
12	0,00013	1660000			
ACL 16 S - vysokoviskózní					
Zkušební těleso	Poměrné přetvoření	Počet cyklů	Únavové charakteristiky		
			$\epsilon_6 \cdot 10^{-6}$	B	R ²
1	0,000113	2930000	130,12	6,75	0,854
2	0,000122	6000000			
3	0,000155	127000			
4	0,000128	4700000			
5	0,00018	72000			
6	0,00021	20600			
7	0,000255	23000			
8	0,000135	201000			
9	0,000132	1195000			
10	0,00029	4400			
11	0,00027	12800			
12	0,000145	150000			
13	0,000142	836000			

Tabulka 22: Únavové charakteristiky směsí ACL 16 S

Wöhlerův diagram



Graf 14: Porovnání únavových charakteristik směsí ACL 16 S

Na základě provedené únavové zkoušky bylo zjištěno, že obě směsi mají téměř shodnou odolnost proti únavě. Pouze u asfaltového betonu s nízkoviskózním pojivem vychází mírně vyšší odolnost proti únavě díky mírně vyšší hodnotě sklonu únavové přímky B. To lze vysvětlit nahrazením části silničního asfaltu pryžovým granulátem ve směsi s vysokoviskózním CRmB. Funkční přístup národní přílohy ČSN EN 13108-1 [4] požaduje minimální odolnost $115 \cdot 10^{-6}$ u modifikovaných asfaltů pro ložní vrstvy. Směsi ACL 16 S s nízkoviskózním pojivem o výsledné odolnosti $132 \cdot 10^{-6}$ a s vysokoviskózním pojivem s odolností $130 \cdot 10^{-6}$ tomuto požadavku vyhovují.

5.5 Porovnání naměřených výsledků

Celkové porovnání naměřených výsledků směsí ACL 16 S s nízkoviskózním a vysokoviskózním pojivem (6,3 %) je uvedeno v tabulce 23.

	ACL 16 S	
	Nízkoviskózní CRmB	Vyskoviskózní CRmB
Obsah pojiva [%]	6,3	
Obsah pryžového granulátu z hmotnosti CRmB [%]	9,9	16,3
Dynamická viskozita (175 °C) [Pa.s]	1,2	6
Mezerovitost V_m [%]	6,5	5,6
Mezerovitost směsi kameniva VMA [%]	20,4	19,7
Stupeň vyplnění mezer pojivem VFB [%]	68,1	71,3
Odolnost vůči vodě ITSR [%]	54,6	42,8
Odolnost proti trhlinám [°C]	-18,9	-18,7
Max. napětí při porušení [MPa]	2,16	2,21
Modul tuhosti dle TP 170 při 15 °C a 10 Hz [MPa]	7843	7613
Průměrná velikost přetvoření ϵ_6 při 10^{-6} cyklech	132	130
Sklon únavové regresní křivky B	7,13	6,75

Tabulka 23: Porovnání výsledků směsí ACL 16 S s nízkoviskózním a vysokoviskózním pojivem

6 ZÁVĚR

V této diplomové práci byl navržen a posouzen asfaltový beton pro ložní vrstvy s použitím asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem. Pro posouzení laboratorních vlastností asfaltového betonu do ložní vrstvy a také z důvodu rozdílného chování směsí obsahující různý obsah asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem (CRmB) byly zhotoveny dvě směsi ACL 16 S. Jedná se o stejné směsi pouze s odlišným obsahem nízkoviskózního a vysokoviskózního CRmB. Tato pojiva byla navržena tak, aby jejich viskozita vycházela v případě nízkoviskózního CRmB lehce pod a v případě vysokoviskózní CRmB lehce nad rozsahem dynamické viskozity požadovaným TP 148 [3]. U nízkoviskózního CRmB byla naměřena viskozita 1,2 Pa.s a u vysokoviskózního pojiva 6,0 Pa.s. Stanovená čára zrnitosti kameniva směsi ACL 16 S je navržena při dolní mezi oboru zrnitosti dle schvalovaných TP 148 [3]. Byla takto zvolena z důvodu vytvoření dostatečného prostoru pro vyšší obsah pojiva obsahujícího částice pryžového granulátu. Pro stanovení optimálního návrhu asfaltové směsi byly navrženy tři sady zkušebních těles s 5,3 %, 5,8 % a 6,3 % pojiva. Tyto sady Marshallových těles byly zhotoveny pro obě směsi s nízkoviskózním i vysokoviskózním CRmB. Jako výsledné optimální dávkování pojiva byl pro obě navržené směsi zvolen obsah 6,3 % z důvodu splnění podmínky mezerovitosti. Takto navržená směs má hodnotu mezerovitosti 6,5 % v případě směsi s nízkoviskózním pojivem a 5,6 % u směsi s vysokoviskózním pojivem.

Výsledky zkušební metody odolnosti proti účinkům vody provedené na zkušebních tělesech obou směsí ACL 16 S potvrdily předpoklad nově schvalovaných TP 148, že v případě směsí s vyšší tloušťkou asfaltového filmu je hodnota ITSR neprůkazná. Na základě naměřených výsledků, kdy směs s vysokoviskózním CRmB prokázala nižší odolnost 42,8 % oproti 54,6 % u směsi s nízkoviskózním CRmB lze soudit, že vyšší obsah pryžového granulátu v pojivu má negativní vliv na hodnotu ITSR.

Zkušební metodou komplexních modulů tuhosti ohybem provedenou na zkušebních tělesech (komolých klínech) bylo zjištěno, že obě směsi vykazovaly srovnatelnou tuhost. Na komolých klínech se směs s vysokoviskózním CRmB byla naměřena mírně nižší tuhost při nízkých teplotách. To ukazuje na nižší teplotní citlivost asfaltové směsi, s vyšším množstvím pryžového granulátu v silničním asfaltu. Požadavky na hodnotu tuhosti při teplotě 15 °C a

frekvenci zatěžování 10 Hz stanovené Národní přílohou ČSN EN 13108-1 a TP 148 směsí ACL 16 S rezervou splňují.

Dále byly u obou směsí zjištěny únavové charakteristiky. Zjištěná mez únavy zkušebních těles obou ACL se nachází kolem poměrného přetvoření $110 \cdot 10^{-6}$, při nižších přetvořeních již téměř nedocházelo k únavě zkušebních těles (regresní přímka Wöhlerova diagramu se při tomto přetvoření zlomila do svislé polohy).

Pro zkoušku nízkoteplotních charakteristik byly použity zkušební tělesa (trámečky) asfaltových směsí s obsahem 5,8 % a 6,3 % nízkoviskózního a vysokoviskózního pojiva. U všech měřených těles byla kritická teplota v intervalu -16°C až -19°C . U většiny zkušebních těles ze směsí s vysokoviskózním CRmB nedošlo v tomto intervalu k porušení mrazovou trhlinou až do teploty -35°C , pouze od kritické teploty docházelo k poklesu tahového napětí. Z těchto výsledků je jasné patrné, že má zvýšený obsah CRmB (6,3 %) i vyšší obsah pryžového granulátu (16,3 %) v asfaltových směsích pozitivní vliv na nízkoteplotní charakteristiky. V případě směsí s nižším dávkováním CRmB docházelo k většímu rozptýlu nízkoteplotního chování, zároveň byly naměřeny nižší pevnosti a vyšší kritické teploty.

Při hodnocení výsledků zkoušek je třeba uvážit, že asfaltová směs s 6,3 % nízkoviskózního CRmB obsahuje 5,7 % silničního asfaltu (a 0,6 % pryžového granulátu), kdežto směs s 6,3 % vysokoviskózního CRmB obsahuje pouze 5,3 % silničního asfaltu (a 1,0 % pryžového granulátu). Rozdíl v množství asfaltu je tedy 0,4 %. To má přirozeně vliv na vyšší materiálové náklady v případě nízkoviskózního pojiva (současná cena tuny pryžového granulátu je běžně 45 % až 50 % ceny tuny silničního asfaltu), ale zároveň při srovnání tak, jak bylo provedeno v diplomové práci, může být negativně ovlivněno nižším obsahem asfaltu ve směsí s vysokoviskózním CRmB. Proto by mohlo být z hlediska popisu vlastností asfaltových betonů s CRmB zajímavé v laboratoři stanovit vlastnosti směsí složených tak, aby obsahovaly stejný obsah silničního asfaltu a různý obsah pryžového granulátu.

Zjednodušeně tak lze navrhnout, aby se posoudil ACL s vysokoviskózním asfaltem o obsahu 6,8 % pojiva. A to z důvodu značně nehomogenních výsledků především u nízkoteplotních charakteristik, kdy při měření docházelo k předčasnému porušení způsobenému kroucením, které je ovlivněno nehomogenitou výroby (segregací kameniva) a ponechání dvou protilehlých povrchů s původní makrotexturou (bez zabroušení jako zarovnání zkušební tělesa).

7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Kudrna, J., Dašek, O.: Hodnocení skladovací stability asfaltů modifikovaných pryžovým granulátem, 2011
- [2] Kudrna, J., Dašek, O.: Možnosti uplatnění odpadní pryže z ojetých pneumatik při modifikaci asfaltů, 2011
- [3] TP 148 – Hutněné asfaltové vrstvy s asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem z pneumatik
- [4] ČSN EN 13108 – 1 – Asfaltový beton
- [5] Dostupné z http://www.rubberpavements.org/RPA_News/july97/page3.html
- [6] Kudrna, Jan, Matejčík, Š, Kučera, R.: Gumoasfaltové směsi
- [7] Varaus, M.: Asfaltové směsi zpracováváné za horka, 2009
- [8] ČSN EN 933-1 – Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor
- [9] ČSN EN 933-2 – Stanovení zrnitosti – Zkušební síta, jmenovité velikosti otvorů
- [10] ČSN EN 13302 - Stanovení dynamické viskozity asfaltových pojiv rotačním vřetenovým viskozimetrem
- [11] Dašek, O.: Gumoasfalt – asfalt modifikovaný pryžovým granulátem
- [12] ČSN EN 1426 – Stanovení penetrace jehlou
- [13] ČSN EN 13880-3 – Zkušební metoda pro stanovení penetrace a pružné regenerace (resilience)
- [14] ČSN EN 1427 – Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek, kulička
- [15] ČSN EN 12697-6 – Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa
- [16] ČSN EN 12697-5 – Stanovení maximální objemové hmotnosti
- [17] ČSN EN 12697-8 – Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí
- [18] ČSN EN 12697-12 – Stanovení odolnosti zkušebního tělesa vůči vodě
- [19] ČSN EN 12697-23 – Stanovení pevnosti v příčném tahu
- [20] ČSN EN 12697-46 – Stanovení nízkoteplotních vlastností asfaltových směsí (schvalování)
- [21] ČSN EN 12697-33 – Příprava zkušebních těles zhutňovačem desek
- [22] ČSN EN 12697-26 - Tuhost

- [23] ČSN EN 12697-24 – Odolnost vůči únavě
- [24] TP 148 – Hutněné asfaltové vrstvy s asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem z pneumatic (nově schvalované)
- [25] ČSN EN 13043 - Kamenivo pro asfaltové směsi
- [26] ČSN EN 12591 – Specifikace pro silniční asfalty
- [27] ČSN EN 12697 - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka
- [28] ČSN EN 12697-30 – Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem
- [29] Dašek, O.: Vliv míry zhutnění na funkční charakteristiky asfaltových směsí, Diplomová práce, VUT v Brně, 2006
- [30] Dostupné z http://www.rubberpavements.org/RPA_News/july97/page3.html
- [31] Dostupné z [http:// www.clemson.edu/ces/arts/samsami.html](http://www.clemson.edu/ces/arts/samsami.html)
- [32] Dostupné z <http://www.highwaysmaintenance.com/bitdiags.htm>
- [33] Dostupné z <http://tti.tamu.edu/2012/09/01/thin-is-in-thin-asphalt-overlay-helps-stretch-budgets-further/>
- [34] Dostupné z <http://www.verkon.cz/prosevecky-laboratorni-retschi/>
- [35] Dostupné z <http://www.ru.all.biz/penetrometr-avtomaticheskij-dlya-nefteproduktov-g119567>
- [36] Dostupné z <http://www.bdl-cee.com/nastavec-pyknometr-s-sirokohrdlou-lahvi-s-konickymi-rameny>

8 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Pryžový granulát z recyklovaných pneumatik [30]	10
Obrázek 2: Mísící zařízení G asphalt [11].....	11
Obrázek 3: Porovnání nátěru SAM a mezivrstvy SAMI [31]	13
Obrázek 4: Drenážní koberec s otevřenou zrnitostí [32]	14
Obrázek 5: Asfaltový koberec mastixový s přerušenou zrnitostí [33]	14
Obrázek 6: Asfaltový beton s plynulou zrnitostí	15
Obrázek 7: Vibrační přístroj [34]	17
Obrázek 8: Viskozimetr	17
Obrázek 9: Penetrometr [35]	18
Obrázek 10: Penetrometr pro zkoušku resilience [36].....	20
Obrázek 11: Vzorky CRmB pro zkoušku bodu měknutí.....	21
Obrázek 12: Průběh zkoušky bodu měknutí [37]	21
Obrázek 13: Pyknometr [38]	23
Obrázek 14: Marshallova tělesa.....	26
Obrázek 15: Vakuová komora	27
Obrázek 16: Měření příčného tahu na Marshallově tělese	28
Obrázek 17: Měřicí přístroj nízkoteplotních charakteristik [29]	29
Obrázek 18: Zkušební tělesa – trámečky	30
Obrázek 19: Průběh zkoušky nízkoteplotních vlastností.....	31
Obrázek 20: Zařízení pro měření modulů tuhosti asfaltových směsí	32
Obrázek 21: Zkušební tělesa - komolý klín	32
Obrázek 22: Upevnění zkušebního tělesa.....	33
Obrázek 23: Použité frakce kameniva	42
Obrázek 24: Asfalt modifikovaný pryžovým granulátem	46
Obrázek 25: Příprava Marshallova tělesa	57
Obrázek 26: Zkušební trámeček pro stanovení nízkoteplotních charakteristik.....	57
Obrázek 27: Lamelový zhutňovač.....	58
Obrázek 28: Deska ze směsi ACL 16 S.....	58
Obrázek 29: Komolý klín	59
Obrázek 30: Porušení zkušebního tělesa mrazovou trhlinou.....	66

9 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Vlastnosti CRmB.....	11
Tabulka 2: Požadavky na asfaltové ložní vrstvy	38
Tabulka 3: Požadavky platných a schvalovaných TP 148 pro asfaltový beton pro ložní vrstvy s CRmB	40
Tabulka 4: Kamenivo směsi typu ACL	42
Tabulka 5: Vlastnosti silničního asfaltu	44
Tabulka 6: Sítový rozbor pryžového granulátu	44
Tabulka 7: Vlastnosti asfaltů modifikovaných pryžovým granulátem.....	47
Tabulka 8: Návrh čáry zrnitosti pro ACL 16 S.....	48
Tabulka 9: Objemové hmotnosti směsí s nízkoviskózním pojivem	51
Tabulka 10: Objemové hmotnosti směsí s vysokoviskózním pojivem.....	51
Tabulka 11: Maximální objemová hmotnost s nízkoviskózním pojivem.....	52
Tabulka 12: Maximální objemová hmotnost s vysokoviskózním pojivem	52
Tabulka 13: Mezerovitost směsí ACL 16 S.....	53
Tabulka 14: Mezerovitost směsí kameniva ACL 16 S	54
Tabulka 15: Stupeň vyplnění mezer pojivem ACL 16 S.....	55
Tabulka 16: Odolnost proti účinkům vody směsí ACL 16 S s nízkoviskózním CRmB	60
Tabulka 17: Odolnost proti účinkům vody směsí ACL 16 S s vysokoviskózním CRmB	61
Tabulka 18: Nízkoteplotní vlastnosti ACL 16 S.....	62
Tabulka 19: Tloušťky asfaltového filmu jednotlivých směsí	65
Tabulka 20: Komplexní modul tuhosti pro ACL 16 S	67
Tabulka 21: Velikost fázových úhlů směsí ACL 16 S	69
Tabulka 22: Únavové charakteristiky směsí ACL 16 S.....	71
Tabulka 23: Porovnání výsledků směsí ACL 16 S s nízkoviskózním a vysokoviskózním pojivem	73

10 SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Čáry zrnitosti použitého kameniva.....	36
Graf 2: Čára zrnitosti pro ACL 16 S – porovnání s ČSN EN 13108-1.....	44
Graf 3: Čára zrnitosti pro ACL 16 S – porovnání s platnými a schvalovanými TP 148.....	45
Graf 4: Mezerovitost směsí ACL 16 S.....	48
Graf 5 : Odolnost proti účinkům vody směsí ACL 16 S s CRmB.....	54
Graf 6: Nízkoteplotní vlastnosti ACL 16 S – nízkoviskózní 5,8 %.....	56
Graf 7: Nízkoteplotní vlastnosti ACL 16 S – nízkoviskózní 6,3 %.....	56
Graf 8: Nízkoteplotní vlastnosti ACL 16 S – vysokoviskózní 5,8 %.....	57
Graf 9: Nízkoteplotní vlastnosti ACL 16 S – vysokoviskózní 6,3 %.....	58
Graf 10: Závislost modulu tuhosti na frekvenci pro ACL 16 S – nízkoviskózní.....	59
Graf 11: Závislost modulu tuhosti na frekvenci pro ACL 16 S – vysokoviskózní...	60
Graf 12: Komplexní moduly tuhosti při frekvenci 10 Hz.....	60
Graf 13: Fázové úhly obou směsí ACL 16 S.....	61
Graf 14: Porovnání únavových charakteristik směsí ACL 16 S.....	64

11 SEZNAM PŘÍLOH

11.1 Hodnoty komplexních modulů tuhosti směsí ACL 16 S

- Naměřené moduly tuhosti směsí ACL 16 S s nízkoviskózním pojivem:

Teplota - 5 °C					
Zkušební těleso:	Modul tuhosti (MPa)				
	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz
6.1	10990	11420	11658	11777	11967
6.2	11284	11664	11905	12112	12212
6.3	12852	13366	13480	13646	13703
6.4	11471	11883	12176	12397	12558
6.5	13277	13690	13951	14187	14332
7.1	12659	13132	13371	13578	13789
7.2	11909	12351	12559	12867	13043
7.3	12104	12716	12980	13231	13498
7.4	11132	11580	11870	12072	12305
7.5	10880	11305	11592	11755	11927
8.1	12033	12322	12508	12636	12753
8.2	11926	12301	12500	12666	12697
8.3	-	-	-	-	-
8.4	10794	11039	11338	11496	11598
8.5	11128	11419	11606	11768	11885
Průměr:	11746	12156	12392	12585	12733

Teplota 10 °C					
Zkušební těleso:	Modul tuhosti (MPa)				
	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz
6.1	8434	9003	9350	9558	9750
6.2	8965	9638	10014	10332	10443
6.3	9101	9663	9933	10235	10399
6.4	8767	9278	9557	9799	9861
6.5	9616	10211	10565	10845	11040
7.1	9128	9780	10023	10278	10451
7.2	7236	7578	7794	7991	8066
7.3	9012	9657	9999	10359	10485
7.4	8982	9570	9972	10292	10398
7.5	7956	8557	8941	9107	9315
8.1	8404	8854	9094	9314	9418
8.2	9369	9825	10097	10347	10490
8.3	-	-	-	-	-
8.4	7309	7763	8084	8285	8375
8.5	8920	9406	9719	10044	10225
Průměr:	8657	9199	9510	9770	9908

Teplota 15 °C					
Zkušební těleso:	Modul tuhosti (MPa)				
	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz
6.1	7559	8133	8446	8746	8987
6.2	7380	7964	8302	8551	8851
6.3	7380	8103	8501	8783	8990
6.4	7356	7991	8307	8601	8718
6.5	7475	8027	8393	8666	8856
7.1	7762	8388	8854	9156	9433
7.2	6948	7458	7862	8104	8313
7.3	7113	7804	8217	8457	8613
7.4	7468	8203	8624	8924	9157
7.5	7183	7971	8384	8688	8868
8.1	6727	7241	7552	7783	7932
8.2	6808	7377	7744	7975	8101
8.3	-	-	-	-	-
8.4	6276	6709	6941	7154	7243
8.5	7798	8427	8682	8959	9095
Průměr:	7231	7843	8201	8468	8654

Teplota 25 °C					
Zkušební těleso:	Modul tuhosti (MPa)				
	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz
6.1	4799	5399	5881	6256	6468
6.2	4672	5327	5762	6070	6337
6.3	4693	5400	5865	6170	6519
6.4	4832	5491	5905	6294	6510
6.5	5102	5743	6149	6538	6787
7.1	4650	5239	5668	6020	6201
7.2	4704	5442	5879	6193	6422
7.3	4831	5413	5861	6252	6471
7.4	4706	5474	5929	6229	6513
7.5	4314	4981	5327	5625	5883
8.1	4415	5099	5558	5864	6056
8.2	3775	4320	4726	4926	5161
8.3	-	-	-	-	-
8.4	3768	4296	4556	4889	5115
8.5	4369	4995	5395	5698	5963
Průměr:	4545	5187	5604	5930	6172

Teplota 40 °C					
Zkušební těleso:	Modul tuhosti (MPa)				
	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz
6.1	1230	1667	2033	2354	2772
6.2	1354	1823	2204	2528	2787
6.3	1355	1817	2207	2515	2831
6.4	1297	1618	1922	2154	2396
6.5	1225	1641	1922	2274	2884
7.1	1158	1569	1884	2205	2774
7.2	1192	1657	2017	2422	2888
7.3	1108	1535	1786	2184	2527
7.4	1110	1559	1955	2202	2570
7.5	1263	1757	2044	2329	2654
8.1	1705	2187	2506	2802	3256
8.2	1830	2279	2596	2921	3179
8.3	-	-	-	-	-
8.4	1732	2229	2576	2781	3047
8.5	1800	2266	2586	2878	3050
Průměr:	1383	1829	2160	2468	2830

- Naměřené moduly tuhosti směsi ACL 16 S s vysokoviskózním pojivem:

Teplota - 5 °C					
Zkušební těleso:	Modul tuhosti (MPa)				
	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz
4.1	11490	11775	12058	12286	12378
4.2	10477	10964	11180	11432	11570
4.3	12432	12893	13297	13537	13756
4.4	9780	10037	10291	10390	10491
4.5	9549	9811	10083	10196	10333
9.1	11692	12082	12391	12520	12695
9.2	10578	10902	11168	11366	11359
9.3	11443	11957	12170	12445	12544
9.4	9536	9841	10052	10166	10292
9.5	11138	11569	11870	12115	12120
10.1	10403	10809	11012	11249	11408
10.2	10593	10954	11128	11263	11469
10.3	11181	11542	11817	11995	12163
10.4	11653	12069	12341	12483	12704
10.5	10785	11204	11369	11587	11697
Průměr:	10849	11227	11482	11669	11799

Teplota 10 °C					
Zkušební těleso:	Modul tuhosti (MPa)				
	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz
4.1	9255	9741	10046	10328	10408
4.2	8339	8875	9222	9445	9607
4.3	9589	10205	10508	10815	10995
4.4	7936	8388	8610	8850	8906
4.5	8804	9292	9591	9816	10014
9.1	8300	8791	9134	9346	9469
9.2	6994	7471	7744	7900	8009
9.3	8115	8786	9176	9428	9660
9.4	7130	7632	7950	8197	8339
9.5	7971	8521	8832	9068	9173
10.1	8543	9015	9294	9411	9555
10.2	6555	6860	7055	7188	7274
10.3	8176	8609	8852	9128	9269
10.4	8865	9498	9821	10093	10215
10.5	7730	8353	8746	9059	9296
Průměr:	8153	8669	8972	9205	9346

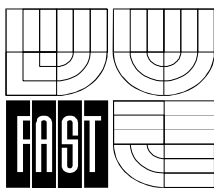
Teplota 15 °C					
Zkušební těleso:	Modul tuhosti (MPa)				
	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz
4.1	8156	8627	9025	9312	9527
4.2	7485	8078	8419	8673	8890
4.3	8417	9014	9334	9646	9952
4.4	6602	7056	7293	7512	7648
4.5	8227	8867	9190	9491	9643
9.1	6539	7262	7619	7922	8138
9.2	5732	6186	6429	6565	6685
9.3	6748	7482	7867	8265	8468
9.4	5837	6420	6675	6949	7134
9.5	6620	7234	7599	7908	8100
10.1	6861	7507	7927	8230	8481
10.2	7183	7811	8193	8518	8689
10.3	6861	7610	7972	8305	8536
10.4	6949	7669	8048	8337	8567
10.5	6675	7370	7708	8011	8268
Průměr:	6993	7613	7953	8243	8448

Teplota 25 °C					
Zkušební těleso:	Modul tuhosti (MPa)				
	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz
4.1	5145	5811	6249	6543	6763
4.2	4548	5261	5651	6007	6224
4.3	5243	5899	6357	6718	6944
4.4	4549	5113	5480	5759	5917
4.5	4685	5201	5542	5730	5900
9.1	3744	4264	4657	4923	5115
9.2	3903	4455	4883	5065	5352
9.3	3908	4580	4980	5350	5532
9.4	3638	4235	4614	4917	5097
9.5	3939	4560	4928	5215	5489
10.1	4212	4846	5205	5514	5737
10.2	4189	4782	5180	5460	5827
10.3	4265	5047	5453	5768	6052
10.4	4369	5010	5425	5777	6095
10.5	4140	4774	5170	5507	5774
Průměr:	4298	4923	5318	5617	5855

Teplota 40 °C					
Zkušební těleso:	Modul tuhosti (MPa)				
	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz
4.1	1570	2006	2403	2652	3128
4.2	1444	1847	2179	2453	2918
4.3	1260	1695	2045	2317	2728
4.4	1222	1597	1904	2216	2508
4.5	1315	1790	2138	2404	2666
9.1	1146	1547	1943	2117	2520
9.2	1122	1495	1801	2056	2345
9.3	1049	1514	1805	2075	2540
9.4	1053	1474	1638	1990	2569
9.5	1033	1504	1793	1983	2280
10.1	1131	1614	1795	2038	2549
10.2	1217	1609	1940	2181	2540
10.3	1189	1519	1919	2174	2581
10.4	1230	1629	2020	2278	2596
10.5	1242	1588	1840	2195	2421
Průměr:	1215	1629	1944	2209	2593

11.2 Formuláře ze zkoušky odolnosti asfaltové směsi

- Formuláře nízkoteplotních charakteristik směsi ACL 16 S s nízkoviskózním pojivem:



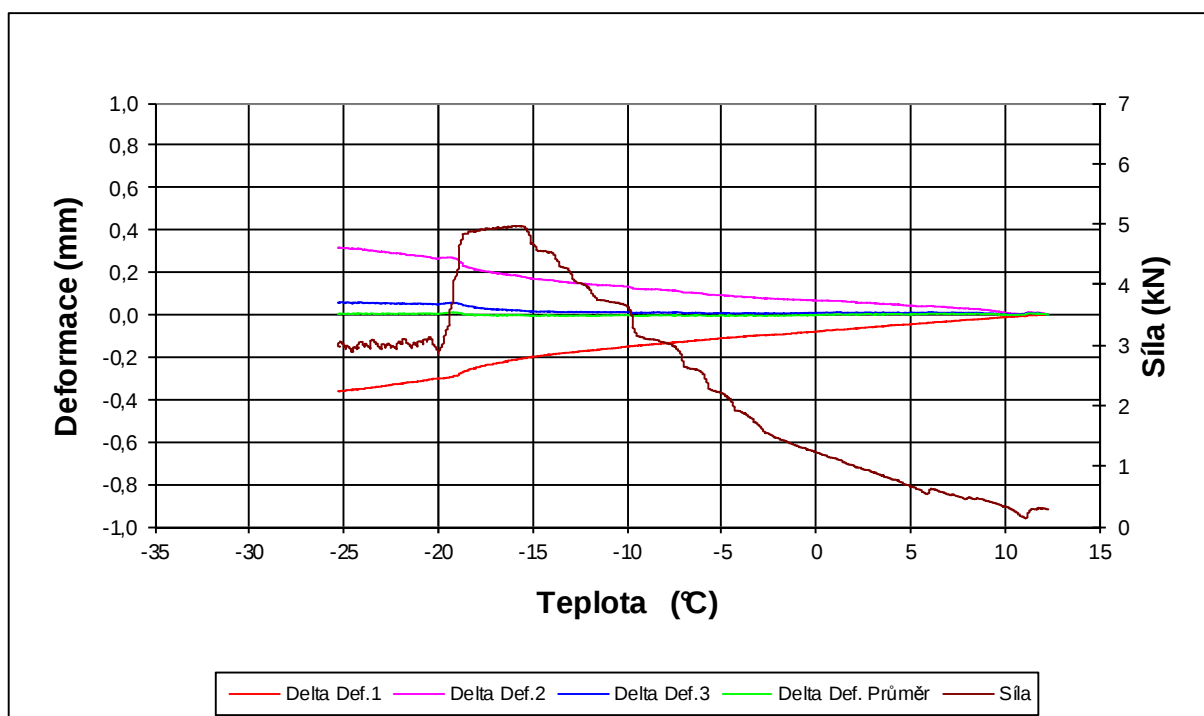
FAKULTA
STAVEBNÍ
Ústav
pozemních
komunikací

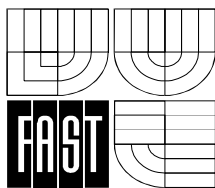
VYSOKÉ
UČENÍ
TECHNICKÉ
V BRNĚ

VUT V BRNĚ, FAKULTA STAVEBNÍ
Ústav pozemních komunikací
Veveří 95
662 37 Brno
tel. : (05) 411 473 40
fax. : (05) 745 147
e-mail : kudrna@sil.fce.vutbr.cz

Zkouška odolnosti asfaltové směsi proti vzniku mrazových trhlin

Akce :	DP
Asfaltová směs :	ALC 16s 5,8% 2.2
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	49.7 x 49.6 x 200.5
Datum zkoušky :	21.6.2012
Zkoušku provedl :	Musílek
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	4,97
Max. napětí při porušení - MPa :	2,02
Teplota v komoře při porušení - °C :	-19,2
Teplota vzorku při porušení - °C :	-15,8





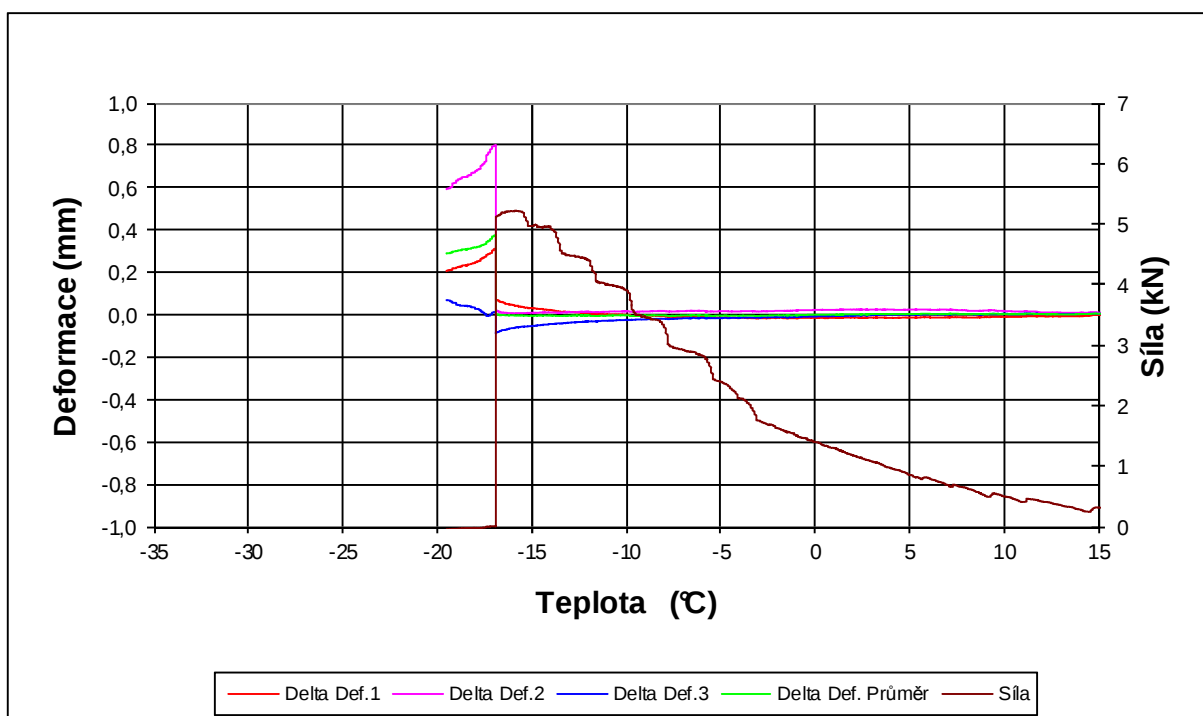
VYSOKÉ
UCENÍ
TECHNICKÉ
V BRNĚ

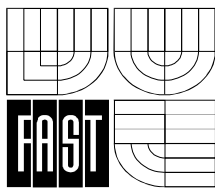
FAKULTA
STAVEBNÍ
Ústav
pozemních
komunikací

VUT V BRNĚ, FAKULTA STAVEBNÍ
Ústav pozemních komunikací
Veveří 95
662 37 Brno
tel. : (05) 411 473 40
fax. : (05) 745 147
e-mail : kudrna@sil.fce.vutbr.cz

Zkouška odolnosti asfaltové směsi proti vzniku mrazových trhlin

Akce :	DP
Asfaltová směs :	ACL16S 5,8 II 2.3
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	49.8 x 50 x 200.5
Datum zkoušky :	22.6.2012
Zkoušku provedl :	Musílek
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	5,22
Max. napětí při porušení - MPa :	2,10
Teplota v komoře při porušení - °C :	-19,3
Teplota vzorku při porušení - °C :	-15,9





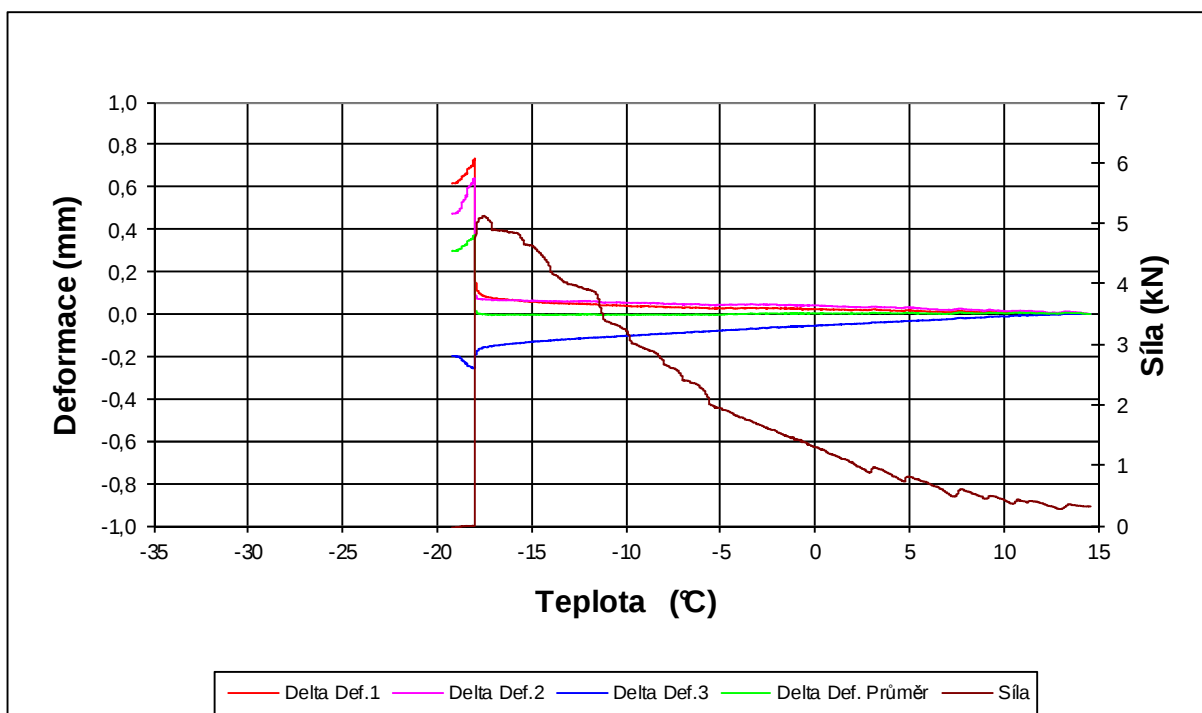
FAKULTA
STAVEBNÍ
Ústav
pozemních
komunikací

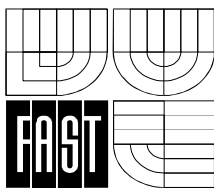
VYSOKÉ
UCENÍ
TECHNICKÉ
V BRNĚ

VUT V BRNĚ, FAKULTA STAVEBNÍ
Ústav pozemních komunikací
Veveří 95
662 37 Brno
tel. : (05) 411 473 40
fax. : (05) 745 147
e-mail : kudrna@sil.fce.vutbr.cz

Zkouška odolnosti asfaltové směsi proti vzniku mrazových trhlin

Akce :	DP
Asfaltová směs :	ACL 16s 5,8% 2.4 II
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	49.7 x 49.9 x 200.7
Datum zkoušky :	25.6.2012
Zkoušku provedl :	Musílek
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	5,12
Max. napětí při porušení - MPa :	2,06
Teplota v komoře při porušení - °C :	-21,0
Teplota vzorku při porušení - °C :	-17,5





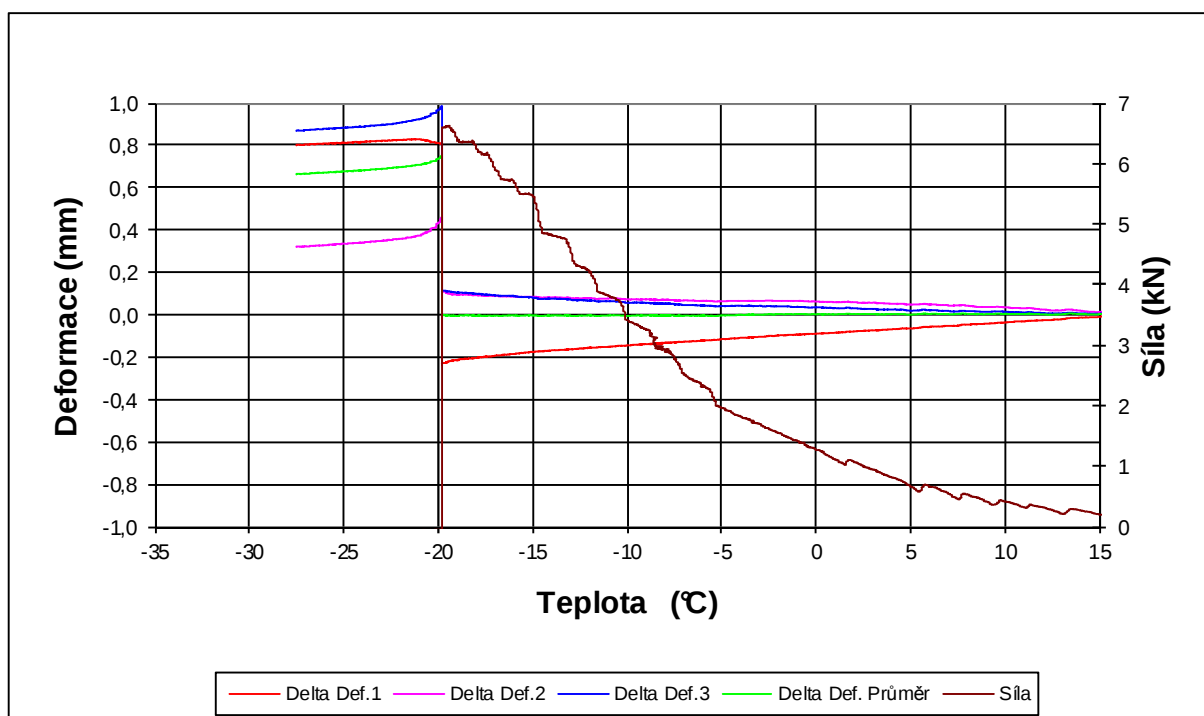
FAKULTA
STAVEBNÍ
Ústav
pozemních
komunikací

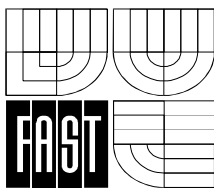
VYSOKÉ
UČENÍ
TECHNICKÉ
V BRNĚ

VUT V BRNĚ, FAKULTA
STAVEBNÍ
Ústav pozemních komunikací
Veveří 95
662 37 Brno
tel. : (05) 411 473 40
fax. : (05) 745 147
e-mail : kudrna@sil.fce.vutbr.cz

Zkouška odolnosti asfaltové směsi proti vzniku mrazových trhlin

Akce :	DP
Asfaltová směs :	ACL 6,3% N 5.1
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	49.3 x 50.3 x 200
Datum zkoušky :	3.9.2012
Zkoušku provedl :	Musílek
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	6,62
Max. napětí při porušení - MPa :	2,67
Teplota v komoře při porušení - °C :	-23,5
Teplota vzorku při porušení - °C :	-19,4





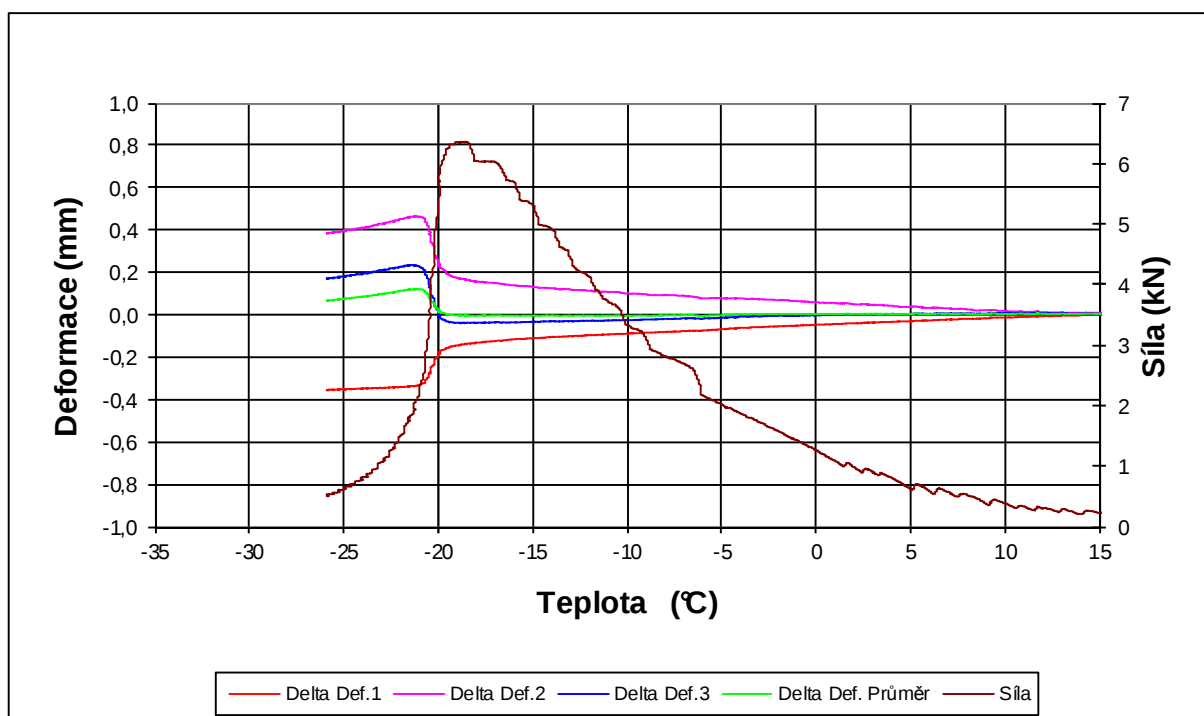
FAKULTA
STAVEBNÍ
Ústav
pozemních
komunikací

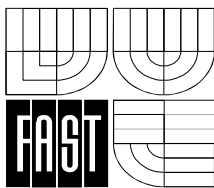
VYSOKÉ
UČENÍ
TECHNICKÉ
V BRNĚ

VUT V BRNĚ, FAKULTA
STAVEBNÍ
Ústav pozemních komunikací
Veveří 95
662 37 Brno
tel. : (05) 411 473 40
fax. : (05) 745 147
e-mail : kudrna@sil.fce.vutbr.cz

Zkouška odolnosti asfaltové směsi proti vzniku mrazových trhlin

Akce :	DP
Asfaltová směs :	ACL 6,3% N 5.2
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	49,5 x 50 x 200
Datum zkoušky :	29.8.2012
Zkoušku provedl :	Musílek
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	6,36
Max. napětí při porušení - MPa :	2,57
Teplota v komoře při porušení - °C :	-22,8
Teplota vzorku při porušení - °C :	-18,8





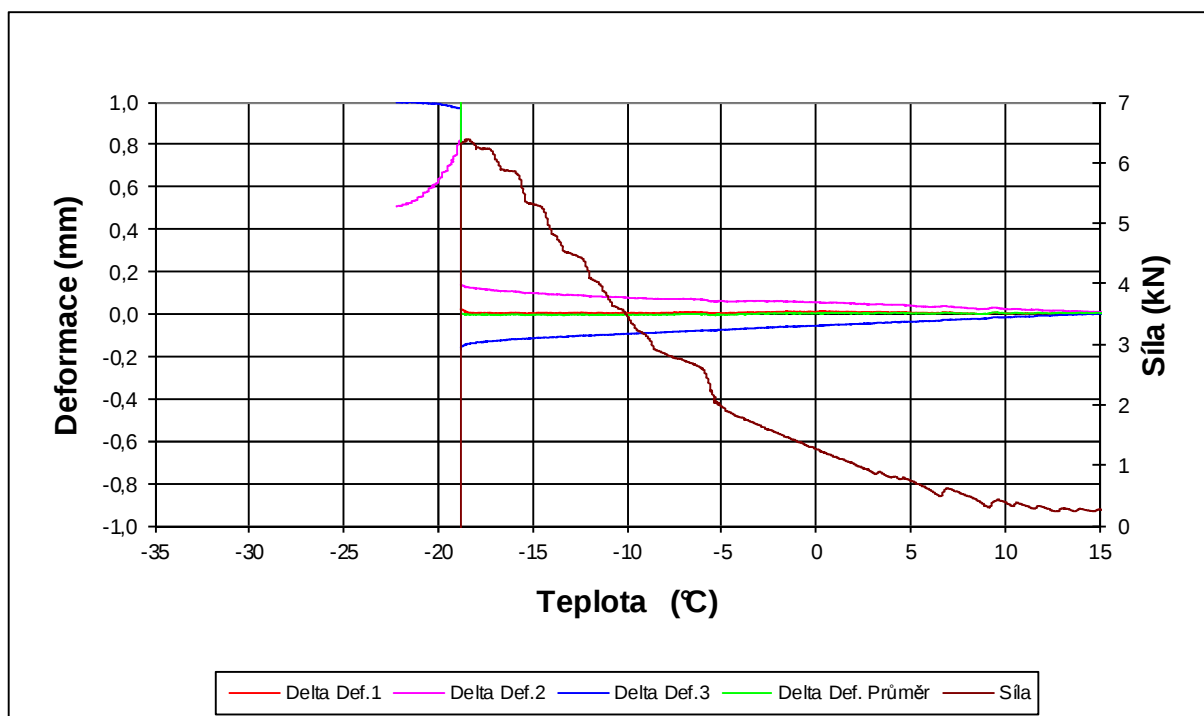
VYSOKÉ
UČENÍ
TECHNICKÉ
V BRNĚ

FAKULTA
STAVEBNÍ
Ústav
pozemních
komunikací

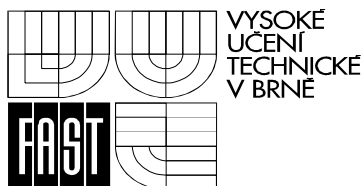
VUT V BRNĚ, FAKULTA
STAVEBNÍ
Ústav pozemních komunikací
Veveří 95
662 37 Brno
tel. : (05) 411 473 40
fax. : (05) 745 147
e-mail : kudrna@sil.fce.vutbr.cz

Zkouška odolnosti asfaltové směsi proti vzniku mrazových trhlin

Akce :	DP
Asfaltová směs :	ACL 6,3% N 5.3
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	49.4 x 49.8 x 200
Datum zkoušky :	30.8.2012
Zkoušku provedl :	Musílek
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	6,39
Max. napětí při porušení - MPa :	2,60
Teplota v komoře při porušení - °C :	-22,5
Teplota vzorku při porušení - °C :	-18,5



- Formuláře nízkoteplotních charakteristik směsi ACL 16 S s vysokoviskózním pojivem:

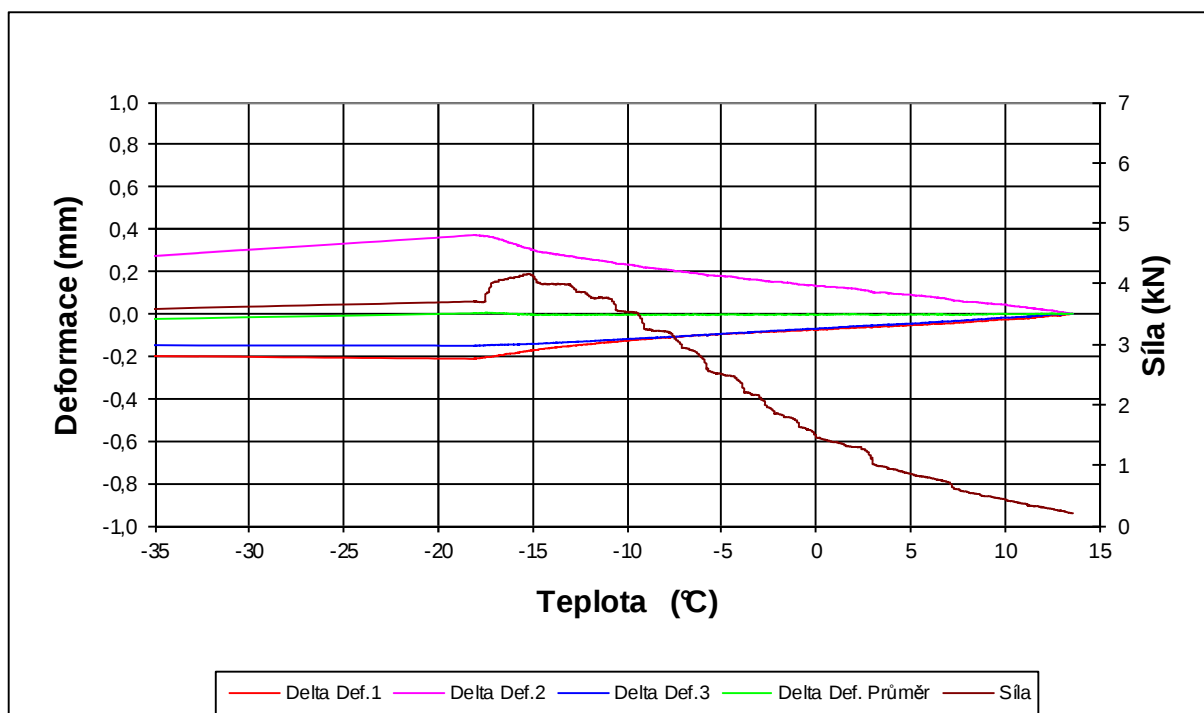


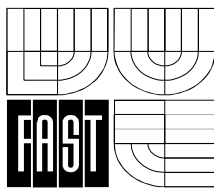
FAKULTA
STAVEBNÍ
Ústav
pozemních
komunikací

VUT V BRNĚ, FAKULTA
STAVEBNÍ
Ústav pozemních komunikací
Veveří 95
662 37 Brno
tel. : (05) 411 473 40
fax. : (05) 745 147
e-mail : kudrna@sil.fce.vutbr.cz

Zkouška odolnosti asfaltové směsi proti vzniku mrazových trhlin

Akce :	DP
Asfaltová směs :	ACL16 5,8 1.2 vysoko.
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	49.9 x 49.9 x 200
Datum zkoušky :	18.6.2012
Zkoušku provedl :	Musílek
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	4,16
Max. napětí při porušení - MPa :	1,67
Teplota v komoře při porušení - °C :	-18,4
Teplota vzorku při porušení - °C :	-15,2





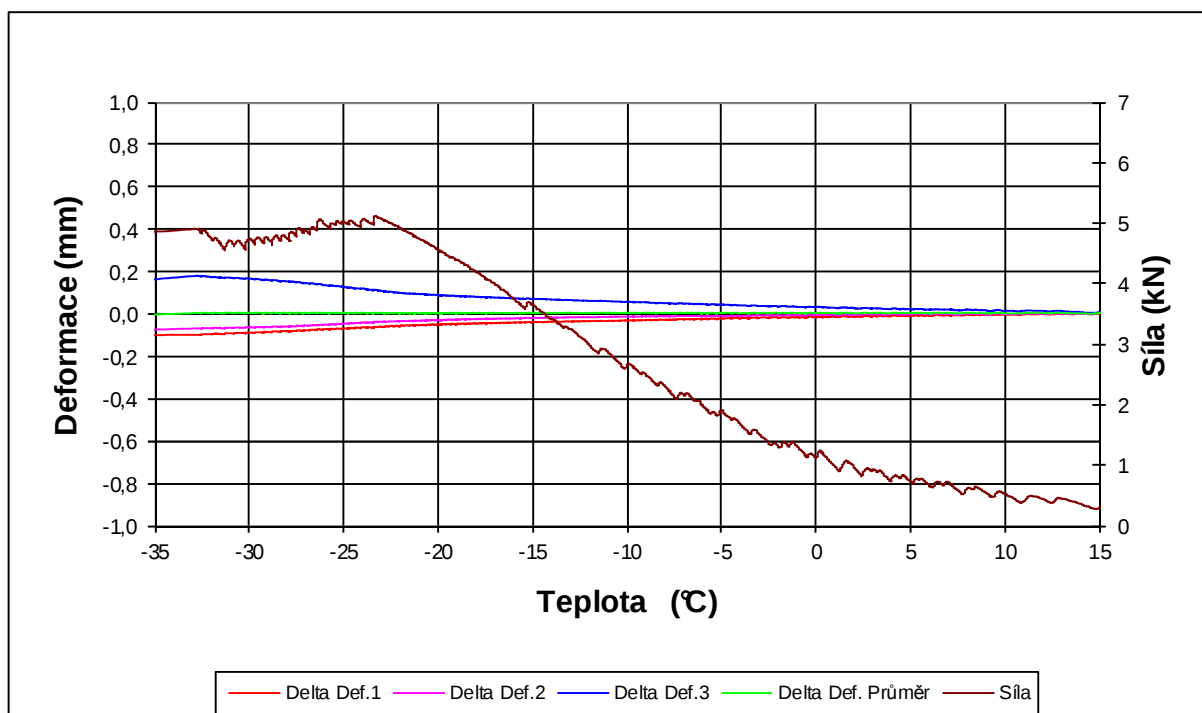
FAKULTA
STAVEBNÍ
Ústav
pozemních
komunikací

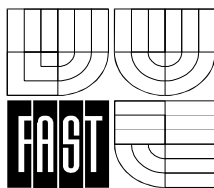
VYSOKÉ
UČENÍ
TECHNICKÉ
V BRNĚ

VUT V BRNĚ, FAKULTA
STAVEBNÍ
Ústav pozemních komunikací
Veveří 95
662 37 Brno
tel. : (05) 411 473 40
fax. : (05) 745 147
e-mail : kudrna@sil.fce.vutbr.cz

Zkouška odolnosti asfaltové směsi proti vzniku mrazových trhlin

Akce :	DP
Asfaltová směs :	ACL 16 5.8 1.3 vysoko.
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	50 x 50.1 x 19.99
Datum zkoušky :	19.6.2012
Zkoušku provedl :	Musílek
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	5,12
Max. napětí při porušení - MPa :	2,04
Teplota v komoře při porušení - °C :	-26,6
Teplota vzorku při porušení - °C :	-23,3





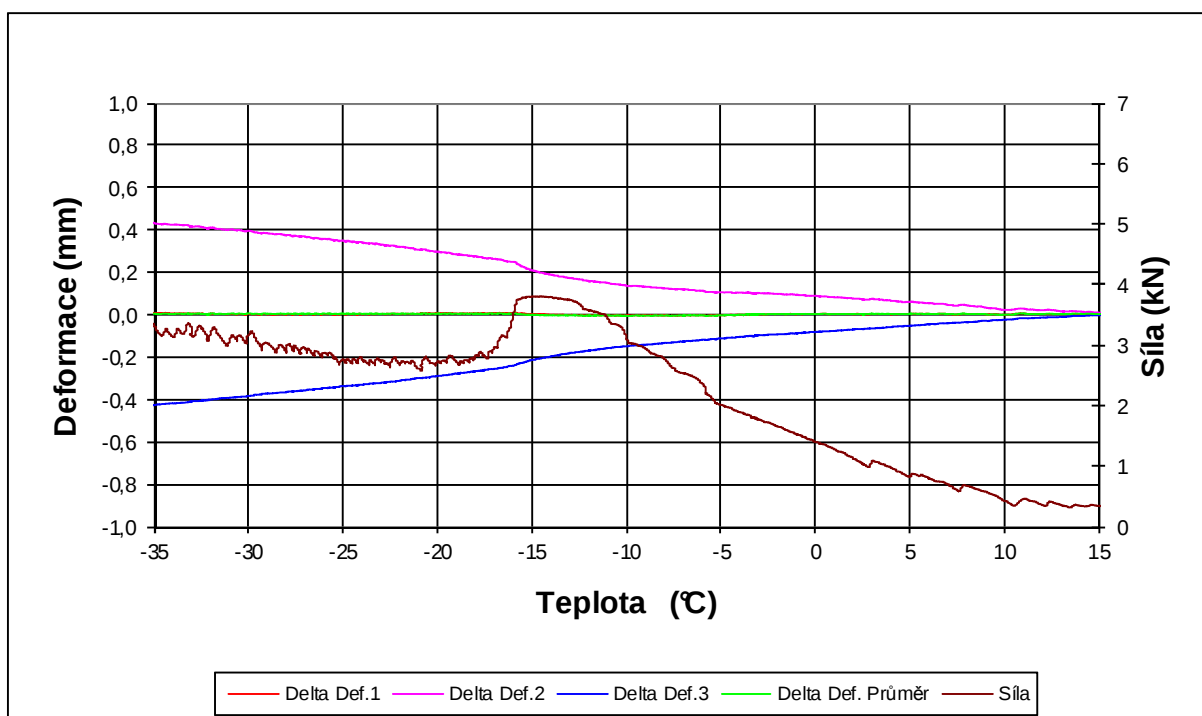
FAKULTA
STAVEBNÍ
Ústav
pozemních
komunikací

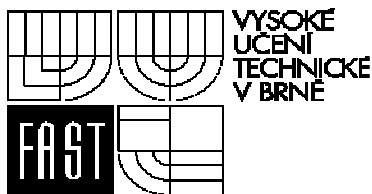
VYSOKÉ
UČENÍ
TECHNICKÉ
V BRNĚ

VUT V BRNĚ, FAKULTA
STAVEBNÍ
Ústav pozemních komunikací
Veveří 95
662 37 Brno
tel. : (05) 411 473 40
fax. : (05) 745 147
e-mail : kudrna@sil.fce.vutbr.cz

Zkouška odolnosti asfaltové směsi proti vzniku mrazových trhlin

Akce :	DP
Asfaltová směs :	ACL16 I vysoko 1.4
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	50 x 50 x 200
Datum zkoušky :	20.6.2012
Zkoušku provedl :	Musílek
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	3,81
Max. napětí při porušení - MPa :	1,52
Teplota v komoře při porušení - °C :	-18,0
Teplota vzorku při porušení - °C :	-14,8



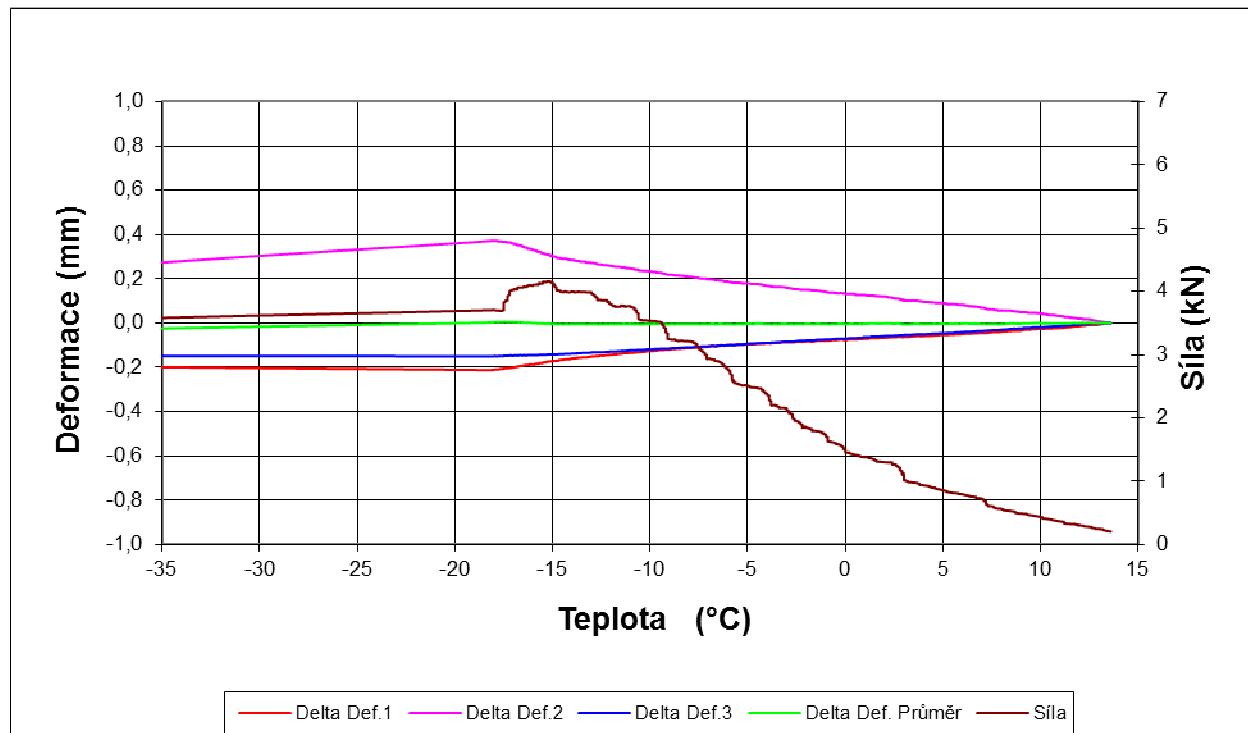


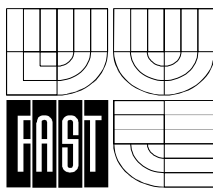
FAKULTA
STAVEBNÍ
Ústav
pozemních
komunikací

VUT V BRNĚ, FAKULTA STAVEBNÍ
Ústav pozemních komunikací
Veveří 95
662 37 Brno
tel. : (05) 411 473 40
fax. : (05) 745 147
e-mail : kudrna@sil.fce.vutbr.cz

Zkouška odolnosti asfaltové směsi proti vzniku mrazových trhlin

Akce :	DP
Asfaltová směs :	ACL16 5,8 1.2 vysoko.
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	49.9 x 49.9 x 200
Datum zkoušky :	18.6.2012
Zkoušku provedl :	Musílek
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	4,16
Max. napětí při porušení - MPa :	1,67
Teplota v komoře při porušení - °C :	-18,4
Teplota vzorku při porušení - °C :	-15,2





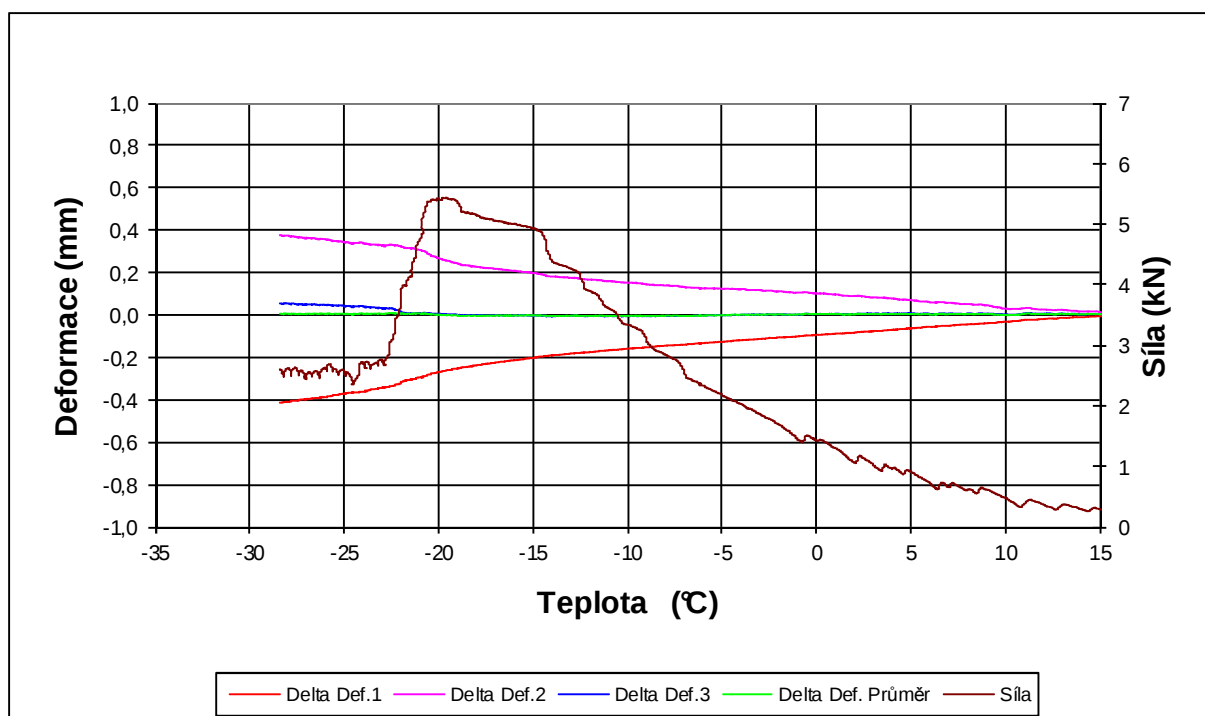
FAKULTA
STAVEBNÍ
Ústav
pozemních
komunikací

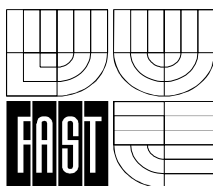
VYSOKÉ
UČENÍ
TECHNICKÉ
V BRNĚ

VUT V BRNĚ, FAKULTA
STAVEBNÍ
Ústav pozemních komunikací
Veveří 95
662 37 Brno
tel. : (05) 411 473 40
fax. : (05) 745 147
e-mail : kudrna@sil.fce.vutbr.cz

Zkouška odolnosti asfaltové směsi proti vzniku mrazových trhlin

Akce :	DP
Asfaltová směs :	ACL 6,3% V 3.2
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	48.8 x 50.2 x 200
Datum zkoušky :	24.8.2012
Zkoušku provedl :	Musílek
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	5,44
Max. napětí při porušení - MPa :	2,22
Teplota v komoře při porušení - °C :	-23,2
Teplota vzorku při porušení - °C :	-19,6





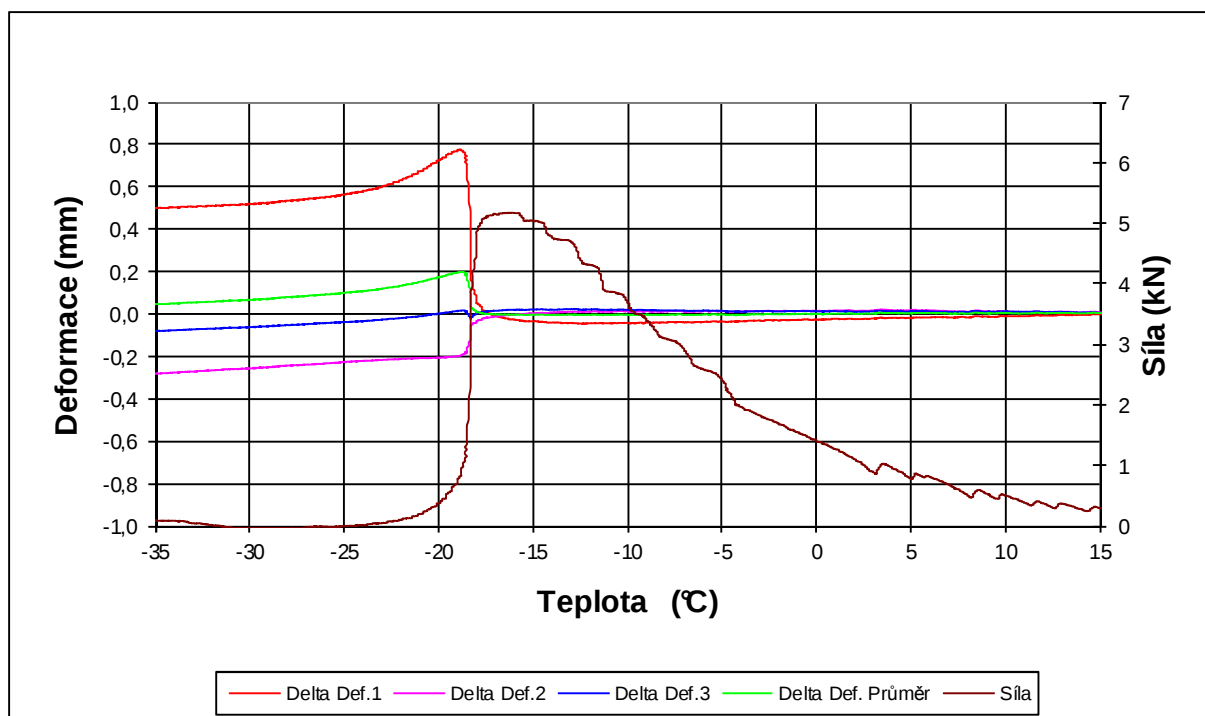
FAKULTA
STAVEBNÍ
Ústav
pozemních
komunikací

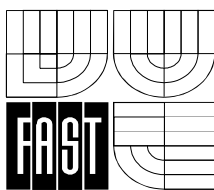
VYSOKÉ
UČENÍ
TECHNICKÉ
V BRNĚ

VUT V BRNĚ, FAKULTA STAVEBNÍ
Ústav pozemních komunikací
Veveří 95
662 37 Brno
tel. : (05) 411 473 40
fax. : (05) 745 147
e-mail : kudrna@sil.fce.vutbr.cz

Zkouška odolnosti asfaltové směsi proti vzniku mrazových trhlin

Akce :	DP
Asfaltová směs :	ACL 6,3% V 3.3
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	50 x 50 x 250
Datum zkoušky :	27.8.2012
Zkoušku provedl :	Musílek
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	5,17
Max. napětí při porušení - MPa :	2,07
Teplota v komoře při porušení - °C :	-20,2
Teplota vzorku při porušení - °C :	-16,2





FAKULTA
STAVEBNÍ
Ústav
pozemních
komunikací

VYSOKÉ
UCENÍ
TECHNICKÉ
V BRNĚ

VUT V BRNĚ, FAKULTA STAVEBNÍ
Ústav pozemních komunikací
Veveří 95
662 37 Brno
tel. : (05) 411 473 40
fax. : (05) 745 147
e-mail : kudrna@sil.fce.vutbr.cz

Zkouška odolnosti asfaltové směsi proti vzniku mrazových trhlin

Akce :	DP
Asfaltová směs :	ACL 6,3% V 3.4
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	49.8 x 50.2 x 200
Datum zkoušky :	28.8.2012
Zkoušku provedl :	Musílek
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	4,34
Max. napětí při porušení - MPa :	1,74
Teplota v komoře při porušení - °C :	-20,9
Teplota vzorku při porušení - °C :	-17,0

