



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

**VYUŽITÍ PĚNOASFALTU V ASFALTOVÝCH
SMĚSÍCH**

USAGE OF FOAM BITUMENS IN ASPHALT MIXTURES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Michaela Venclíková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR HÝZL, Ph.D.

BRNO 2018



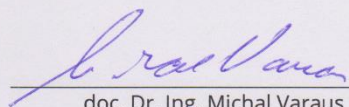
VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T009 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav pozemních komunikací

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Michaela Venclíková
Název	Využití pěnoasfaltu v asfaltových směsích
Vedoucí práce	Ing. Petr Hýzl, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2017
Datum odevzdání	12. 1. 2018

V Brně dne 31. 3. 2017



doc. Dr. Ing. Michal Varau
Vedoucí ústavu



prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Specifikační normy pro asfaltové směsi řady ČSN EN 13108
Zkušební normy pro asfaltové směsi za horka řady ČSN EN 12697
ČSN 736160 Zkoušení asfaltových směsí
ČSN 736121 Hutněné asfaltové vrstvy
Sborníky s konferencí Asfaltové vozovky 2009, 2011, 2013, 2015
Internetové zdroje

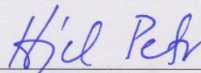
ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Práce je věnována problematice využití zpěněného asfaltu jako pojiva do za horka vyráběných asfaltových směsí. V diplomové práci bude prováděno zjišťování vybraných empirických a funkčních vlastností asfaltové směsi s pěnoasfaltem.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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



Ing. Petr Hýzl, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

V této diplomové práci je popsána problematika využití pěnoasfaltu jako pojiva do asfaltových směsí. Práce je rozdělena do dvou částí, teoretickou a praktickou. V teoretické části diplomové práce bylo cílem zpracovat přehled technologií, které umožňují snížit pracovní teplotu při výrobě a pokládce asfaltových směsí. Cílem praktické části diplomové práce bylo porovnat vybrané empirické a funkční parametry dvou typů asfaltových směsí vyrobených vždy ve dvou variantách, a to s běžným asfaltovým pojivem a s pěnoasfaltovým pojivem. Pozornost byla věnována především tuhostním a nízkoteplotním parametrům.

KLÍČOVÁ SLOVA

Asfaltová směs, asfaltový beton, horká asfaltová směs, teplá asfaltová směs, horký asfalt, organické a chemické přísady, pěnicí techniky, pěnoasfalt, voda, empirické a funkční zkoušky, modul tuhosti, nízkoteplotní charakteristiky.

ABSTRACT

In this diploma thesis there are described the issues use of foamed bitumen as binder in asphalt mixtures. The thesis is divided into two parts, theoretical and practical. The aim of theoretical part was to elaborate an overview of technologies, which allow to reduce the temperature during the production and laying of asphalt mixtures. The aim of the practical part was to compare the selected empirical and functional parameters of two types of asphalt mixtures produced in two variants, with hot bitumen and foamed bitumen. Attention was paid mainly to stiffness and low temperature parameters.

KEYWORDS

Asphalt mixture, asphalt concrete, hot mix asphalt, warm mix asphalt, hot bitumen, organic and chemical additives, foaming techniques, foamed bitumen, water, empirical and functional tests, stiffness module, low-temperature characteristics.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Michaela Venclíková *Využití pěnoasfaltu v asfaltových směsích*. Brno, 2018. 93 s., 20 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Petr Hýzl, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 12. 01. 2018

Bc. Michaela Venclíková

autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Hýzlovi, Ph.D. za vzorné vedení při zpracování této práce. Dále děkuji zaměstnancům laboratoře Ústavu pozemních komunikací VUT FAST v Brně, především Matěji Šafránkovi za ochotu a rady. V neposlední řadě bych ráda poděkovala celé své rodině, která mě podporovala během studia.

OBSAH

1	ÚVOD.....	12
2	DOSAVADNÍ STAV PROBLEMATIKY	13
2.1	Asfaltová vrstva.....	13
2.2	Snižování pracovních teplot.....	15
2.3	Teplá asfaltová směs „WMA“	17
2.3.1	Organické přísady	18
2.3.2	Chemické přísady.....	19
2.3.3	Pěnicí přísady.....	19
2.4	Výhody teplé asfaltové směsi	20
2.5	Výroba teplé asfaltové směsi použitím technologie pěnoasfaltu	21
2.6	Výroba asfaltové pěny	22
2.7	Vlastnosti asfaltové pěny.....	24
2.8	Zkušenosti s technologií teplých asfaltových směsí v zahraničí	26
2.9	Zkušenosti s technologií teplých asfaltových směsí v České republice	29
2.10	Legislativa.....	32
3	CÍL PRÁCE.....	34
4	PRAKTICKÁ ČÁST	35
4.1	Použité materiály.....	35
4.1.1	Kamenivo	35
4.1.2	Pojivo	36
4.2	Asfaltové směsi	37
4.2.1	ACO 11+	38
4.2.2	ACO 11+ F.....	40
4.2.3	ACP 16+	42
4.2.4	ACP 16+ F.....	44

4.3	Použité zkušební metody	46
4.3.1	Zhutněné asfaltové desky	46
4.3.2	Objemová hmotnost zhutněné asfaltové směsi	47
4.3.2.1	Termíny a definice	47
4.3.2.2	Podstata zkoušky	47
4.3.2.3	Příprava zkušebních těles a zařízení	47
4.3.2.4	Postup zkoušky	47
4.3.2.5	Výpočet	48
4.3.3	Příprava zkušebních těles	49
4.3.4	Stanovení modulu tuhosti asfaltové směsi	52
4.3.4.1	Termíny a definice	52
4.3.4.2	Podstata zkoušky	53
4.3.4.3	Příprava zkušebních těles a zařízení	53
4.3.4.4	Postup zkoušky	54
4.3.4.5	Vyjádření výsledků	54
4.3.5	Zkouška nízkoteplotních vlastností s rovnoměrným řízeným poklesem teploty (TSRST)	56
4.3.5.1	Termíny a definice	56
4.3.5.2	Podstata zkoušky	56
4.3.5.3	Příprava zkušebních těles a zařízení	57
4.3.5.4	Postup zkoušky	57
4.3.5.5	Vyjádření výsledků	58
4.4	Výsledky a vyhodnocení	59
4.4.1	Výsledky objemové hmotnosti	59
4.4.2	Výsledky modulu tuhosti	60
4.4.2.1	Asfaltová směs ACO 11+	61

4.4.2.2	Asfaltová směs ACO 11+ F.....	63
4.4.2.3	Porovnání ACO 11+/ACO 11+ F	65
4.4.2.4	Asfaltová směs ACP 16+	69
4.4.2.5	Asfaltová směs ACP 16+ F	71
4.4.2.6	Porovnání ACP 16+/ACP 16+ F.....	73
4.4.3	Výsledky nízkoteplotních vlastností	77
4.4.3.1	Asfaltová směs ACO 11+.....	78
4.4.3.2	Asfaltová směs ACO 11+ F.....	79
4.4.3.3	Porovnání ACO 11+/ACO 11+ F	80
4.4.3.4	Asfaltová směs ACP 16+	81
4.4.3.5	Asfaltová směs ACP 16+ F	82
4.4.3.6	Porovnání ACP 16+/ACP 16+ F.....	83
4.4.3.7	Shrnutí výsledků nízkoteplotních vlastností.....	84
5	ZÁVĚR	85
6	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	86
7	SEZNAM GRAFŮ	90
8	SEZNAM OBRÁZKŮ	92
9	SEZNAM TABULEK	93
10	SEZNAM PŘÍLOH	94
10.1	Díličí výsledky modulu tuhosti	94
10.1.1	ACO 11+	94
10.1.2	ACO 11+ F.....	96
10.1.3	ACP 16+.....	98
10.1.4	ACP 16+ F.....	100
10.2	Díličí protokoly nízkoteplotních vlastností	102
10.2.1	ACO 11+	102
10.2.2	ACO 11+ F.....	105

10.2.3	ACP 16+.....	108
10.2.4	ACP 16+ F.....	111

1 ÚVOD

Doprava je nedílnou součástí života každého z nás. Celosvětový nárůst silniční dopravy vede k neustále se zvyšujícím požadavkům na konstrukci vozovky. Nejrozšířenějším typem vozovek jsou netuhé, konkrétně vozovky s asfaltovým krytem. S rostoucím dopravním zatížením je žádoucí, věnovat se vstupním materiálům potřebným k výrobě asfaltové směsi, která je standardně realizována za poměrně vysokých teplot.

Výroba asfaltové směsi za vyšších teplot je spojována s energetickou náročností i s produkcí skleníkových plynů, což může mít negativní dopad na životní prostředí. V této souvislosti je potřeba zmínit Kjótský protokol, ve kterém se průmyslové země, jejichž součástí je i Evropská unie, zavázaly snížit emise skleníkových plynů. V důsledku závazných ujednání představuje ochrana životního prostředí stále větší motivaci k hledání nových technologií výroby asfaltových směsí. Jedním ze současných trendů, které lze sledovat v oblasti výroby a pokládky asfaltových směsí je problematika možnosti snižování pracovních teplot. Existuje několik způsobů, jak snížit pracovní teplotu asfaltové směsi, a tedy vyrobit tzv. teplou asfaltovou směs. Poměrně dobře známy jsou zkušenosti s použitím nízkoviskózních asfaltových pojiv nebo využitím organických či jiných chemických přísad, které snižují viskozitu asfaltového pojiva. Méně rozšířenou je však technologie pěnoasfaltu. Jde o technologii, při které je asfaltové pojivo zpěněno přidáním malého množství vody do horkého asfaltového pojiva. Snížením výrobní teploty se současným zachováním kvality asfaltové směsi, lze docílit výrazného snížení energetické náročnosti a tím také snížení tvorby skleníkových plynů.

Technologii pěnoasfaltu je doposud věnována pozornost především v zahraničí. Z tohoto důvodu je diplomová práce věnována právě problematice využití zpěněného asfaltu jako pojiva do asfaltových směsí.

2 DOSAVADNÍ STAV PROBLEMATIKY

Teoretická část diplomové práce je věnována dosavadnímu stavu problematiky využití pěnoasfaltu jako pojiva do asfaltových směsí. V úvodu této kapitoly je uvedeno základní rozdělení asfaltových vrstev, dále je zmíněna problematika snižování pracovních teplot. Hlavním cílem teoretické části diplomové práce je seznámit se s problematikou technologie pěnoasfaltu. V závěru této kapitoly jsou zmíněny dosavadní zkušenosti s použitím pěnoasfaltu v zahraničí a České republice.

2.1 Asfaltová vrstva

Z ekonomických i praktických důvodů se vozovky staví z více konstrukčních vrstev vzájemně odlišného složení, kde každá vrstva plní svou specifickou úlohu v závislosti na způsobu jejího namáhání. Vždy se jedná o konstrukční vrstvu vyrobenou z jednoho stavebního materiálu nebo ze stavební směsi jedním uceleným technologickým postupem. Konstrukční vrstvy vozovek mohou být buď nestmelené, nebo stmelené vhodným pojivem. V silničním stavitelství se používají pojiva na bázi asfaltu nebo pojiva hydraulická, jejichž typickým reprezentantem je cement.

Nejrozšířenějším typem konstrukčních vrstev používaných pro kryt vozovky jsou asfaltové vrstvy. Jedná se o směs kameniva a asfaltového pojiva, případně dalších přísad zlepšujících vlastnosti této směsi. Asfaltovým pojivem může být buď silniční asfalt, asfaltová emulze, která je zpracovatelná za běžných teplot, nebo třeba pěnoasfalt. Podle účelu použití existují různé druhy asfaltových směsí, např. asfaltový beton (AC), asfaltový koberec mastixový (SMA), asfaltový koberec drenážní (PA), asfaltový koberec otevřený (AKO).

Standardní asfaltová vrstva vzniká zhutněním čerstvě vyrobené horké asfaltové směsi. Výroba asfaltových směsí se provádí na obalovnách. Cyklus výroby asfaltové směsi se řídí výrobním předpisem, ve kterém jsou uvedeny minimální a maximální teploty, které nesmí být překročeny v žádném místě obalovny. Mezní teploty vybraných asfaltových směsí jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1: Mezní teploty vybraných asfaltových směsí [1]

Druh asfaltu	Specifikace	Mezní teploty podle druhu vyráběné směsi [°C]		
		AC	PA	AKO
100/150	ČSN EN 12591	130 - 170	130 - 160	110 - 140
50/70; 70/100		140 - 180	140 - 175	120 - 160
35/50; 40/60		150 - 190	150 - 180	-
30/45		155 - 195	-	-

Kromě horkých směsí existují i tzv. směsi studené. Použití asfaltových vrstev za studena jako náhrada standardních asfaltových vrstev je rozšířeno jen v některých zemích (např. Francie), v našich podmínkách se používají v omezeném rozsahu pro vysprávkové technologie. Studené směsi jsou vyráběny nejčastěji na bázi asfaltové emulze.

Do kategorie asfaltových vrstev prováděných za studena patří postříkové a nátěrové technologie, tenké úpravy neboli emulzní kalové vrstvy a studené asfaltové směsi pro vysprávky. Asfaltové vrstvy prováděné za studena jsou typické zejména pro opravy a souvislou údržbu stávajících vozovek. Výjimku tvoří pouze spojovací postříky, které slouží pro zajištění spojení dvou asfaltových vrstev, jakož i provádění membránových vrstev, které jsou užívané i při provádění nových konstrukcí vozovek. Základním znakem asfaltových vrstev za studena je technologický proces, který je realizován za běžných klimatických teplot (15–25 °C), což vede jednak k urychlení postupu prací, zejména ale ke snížení emisí z materiálů na bázi asfaltu, a tedy i k vyšší ochraně pracovníků a životního prostředí. Studené směsi jsou vyráběny nejčastěji na bázi asfaltové emulze. V některých případech jsou používána speciálně upravená asfaltová pojiva, např. ředěné nebo fluxované asfalty.

Zajímavou technologií jsou studené pěnoasfaltové vrstvy. Základem této technologie je použití zpěněného asfaltu, který obaluje mokré zejména drobné kamenivo za studena [1]. Použití zpěněného asfaltu je možné i v případě tzv. teplých asfaltových směsí.

2.2 Snižování pracovních teplot

Otázkám snižování pracovních teplot při výrobě, zpracování a pokládce asfaltových směsí je pozornost věnována již řadu let. Motivací je především snaha omezit energetickou náročnost a docílit menší produkce CO₂ a ostatních emisí při výrobě a zpracování asfaltové směsi, včetně uvolňování výparů a aerosolů z asfaltového pojiva při jeho zpracování za horka. Důležité je zmínit, že koncentrace emisí závisí na teplotě asfaltové směsi [15], [17].

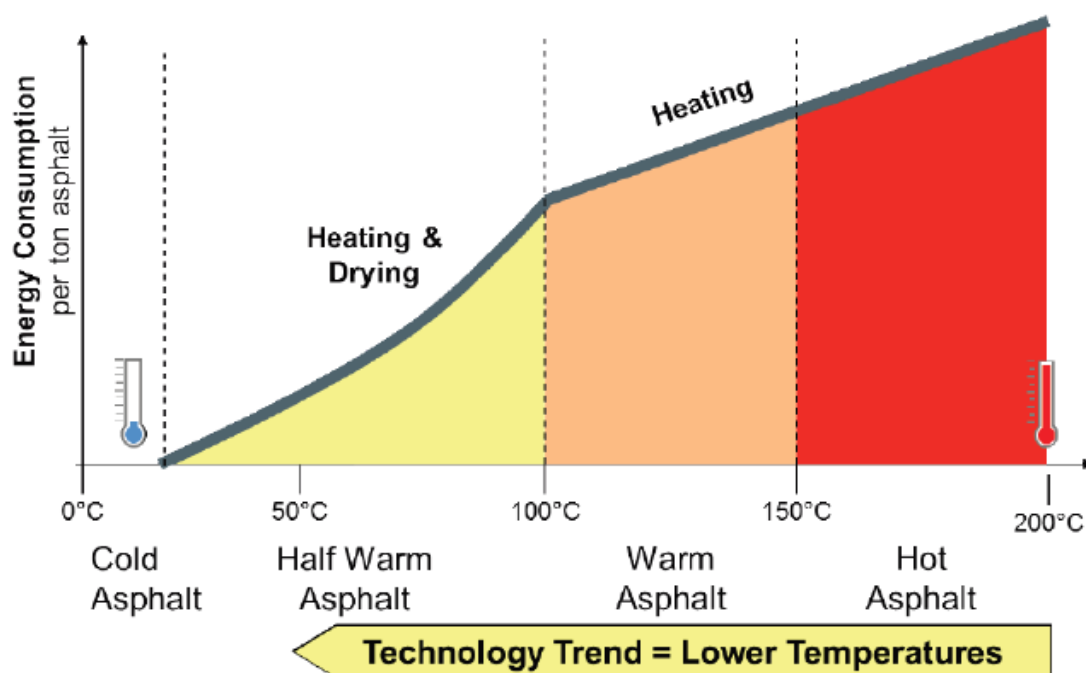
Existuje řada technologických možností, které umožňují snížit pracovní teplotu případně rozšířit teplotní interval výroby a pokládky asfaltové směsi. Cílem všech technologických postupů je v dostatečné míře ztekutit asfaltové pojivo tak, aby umožnilo dostatečné obalení zrn kameniva [8]. Způsoby, jak toho lze docílit, závisejí na míře snížení teploty.

Na základě grafického znázornění závislosti spotřeby energie na pracovní teplotě asfaltové směsi lze tyto směsi kategorizovat na [2]:

- studenou asfaltovou směs – Cold mixes,
- poloteplou asfaltovou směs – Half Warm Asphalt,
- teplou asfaltovou směs – Warm Mix Asphalt,
- horkou asfaltovou směs – Hot Mix Asphalt.

Technologický proces výroby studené asfaltové směsi je realizován za běžných klimatických teplot. Poloteplá asfaltová směs se vyrábí v rozmezí pracovních teplot 70–100 °C. V případě teplé asfaltové směsi se jedná o interval pracovních teplot 100–150 °C. U standardních za horka vyráběných asfaltových směsí se pracovní teploty pohybují zhruba v rozmezí 140–180 °C. Pracovní teploty jsou závislé na použitém asfaltu.

Na základě grafu 1 je zřejmé, že s rostoucí pracovní teplotou asfaltové směsi logicky narůstá i spotřeba energie. Snížením pracovní teploty lze snížit spotřebu energie, což je potřeba vnímat jako ekonomický přínos pro samotné výrobce asfaltových směsí.



Graf 1: Rozdělení asfaltových směsí v závislosti na výrobní teplotě [2]

Na základě zahraničních průzkumů na asfaltových vozovkách, které jsou v provozu osm a méně let a u nichž byly použity různé přísady umožňující snížení pracovních teplot prokázaly, že takto upravené asfaltové směsi lze v porovnání se standardními za horka vyráběnými asfaltovými směsmi považovat za technicky rovnocenné [15].

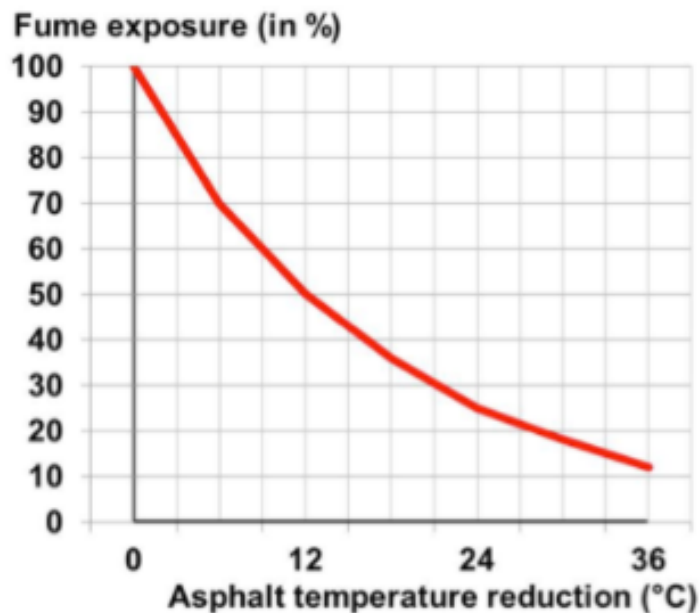
2.3 Teplá asfaltová směs „WMA“

V zahraniční literatuře známá jako „Warm Mix Asphalt“ (WMA), v českém překladu jako teplá asfaltová směs je asfaltová směs, která se vyrábí a zpracovává při teplotách o 20 až 40 °C méně než standardní za horka vyráběná asfaltová směs neboli Hot Mix Asphalt (HMA).

Obecně existuje několik technologických možností, které umožňují vyrobit teplou asfaltovou směs, a tedy snížit výrobní teplotu asfaltové směsi [2]:

- použití organických přísad,
- použití chemických přísad,
- použití pěnících přísad (přírodní a syntetický zeolit, voda).

Snížení pracovní teploty o 20-40 °C se na první pohled nemusí jevit jako velký rozdíl, ale každá redukce výrobní teploty o cca 12 °C snižuje produkce emisí o cca 50 % [2]. Grafické znázornění závislosti snížení výrobní teploty asfaltové směsi na množství produkovaných emisí je vidět z grafu 2.



Graf 2: Graf závislosti redukce teploty na množství emisí [3]

2.3.1 Organické přísady

První technologickou možností snížení výrobní teploty asfaltové směsi je použití organických přísad.

Organické přísady jsou látky, které umožňují změnit reologické vlastnosti asfaltových pojiv tak, že při použití těchto asfaltových pojiv lze snížit teplotu výroby a pokládky asfaltové směsi. Organické přísady snižují viskozitu asfaltového pojiva, tím pádem i celé asfaltové směsi.

Mohou být dávkovány do asfaltového pojiva přímo na obalovně při výrobě asfaltové směsi nebo lze k výrobě asfaltové směsi použít tzv. průmyslově vyrobené nízkoviskózní asfaltové pojivo, které je dodáváno již s namíchanou organickou přísadou. Lze říci, že nízkoviskózní asfaltová pojiva jsou pojiva na bázi běžných silničních asfaltových pojiv, polymerem modifikovaných asfaltových pojiv, případně multigrádových asfaltových pojiv, jejichž reologické vlastnosti byly vhodnými organickými přísadami změněny tak, že mohou snížit teplotu při výrobě a pokládce asfaltové směsi v důsledku změněného vztahu mezi teplotou a viskozitou. Výrobce v tomto případě ručí za vlastnosti tohoto asfaltového pojiva [15].

Za účelem snížení viskozity asfaltového pojiva lze použít různé organické přísady, které lze dle svého původu rozdělit do následujících skupin [6]:

- na bázi syntetických vosků,
- na bázi amidů mastných kyselin,
- tenzid (povrchově aktivní látka) na bázi aminů.

Mezi základní reprezentanty organických přísad na bázi syntetických vosků patří montánní vosky a Fischer-Tropschovy parafíny.

Přísady na bázi syntetických vosků a amidů mastných kyselin se dávkuje do asfaltového pojiva nebo asfaltové směsi v množství 2-3 % z hmotnosti asfaltového pojiva. Tenzidy na bázi aminů se přidávají v menším množství cca 0,3-1,0 % z hmotnosti asfaltového pojiva, přičemž základní vlastnosti se přidáním těchto přísad výrazně nemění, sníží se však viskozita a zpracovatelnost asfaltové směsi [15].

2.3.2 Chemické přísady

Další technologickou možností, jak snížit výrobní teplotu asfaltové směsi, je použití chemických přísad. Chemické přísady nemění viskozitu asfaltového pojiva, ale jsou zde uplatňovány nanotechnologické poznatky. Použitím chemickým přísad je docíleno snížení pracovní teploty o 20-40 °C [2].

2.3.3 Pěnicí přísady

Třetí technologickou možností, která umožňuje snížit výrobní teplotu asfaltové směsi, je použití pěnicích přísad. K docílení napěnění asfaltového pojiva lze použít dvou pěnových technologií [2]:

- zpěňovacího zařízení,
- minerálů.

Obě metody využívají malé množství vody, které je dávkováno v předepsaném množství do horkého asfaltového pojiva. Vlivem vysoké teploty voda změní své skupenství z kapalného na plynné. Vlivem přeměny na páru se zvětší objem asfaltového pojiva a na krátký časový úsek je snížena viskozita asfaltového pojiva. Tato expanze umožňuje lépe obalit kamenivo a zbytková vlhkost zlepšit zhutnitelnost asfaltové směsi. Použití zpěňovacího zařízení umožňuje snížení pracovní teploty o 20–40 °C.

Druhá metoda využívá jako zdroj vody ke zpěnění různé přísady. Nejběžněji jsou využívány hydrofilní minerály ze skupiny zeolitů. Zeolity jsou hlinitokřemičité minerály, které mají mikroporézní strukturu. Tato struktura jim umožňuje do jejich pórů zachytávat látky různých skupenství, zejména pak krystalickou vodu v množství kolem 20 %. Při zahřátí kameniva nad 100 °C se vázaná voda uvolní a zapříčiní napěnění pojiva. Výsledná směs umožňuje prodloužení zpracovatelnosti o 6 až 7 hodin, nebo do té doby, než teplota směsi klesne pod 100 °C. Tato technika umožňuje rovněž snížení pracovní teploty o 30 °C [2].

Příkladem technologie, která využívá jemně granulovaný syntetický zeolit pro výrobu asfaltové směsi je Aspha-Min®. Tato technologie vznikla na základě dlouholetého výzkumu prováděného společnostmi MHI Group a EUROVIA [18].

2.4 Výhody teplé asfaltové směsi

Teplé asfaltové směsi se vyrábějí za nižších teplot, a přesto se při pokládce dosahuje stejných parametrů finální vrstvy jako u horkých asfaltových vrstev.

V důsledku snížení výrobní teploty se současným zachováním kvality asfaltové směsi docílíme výrazného snížení energetické náročnosti, dochází též k omezení množství produkovaných emisí CO_2 , díky čemuž lze přispět k dosažení požadovaných nižších limitů tohoto skleníkového plynu a technologii výroby teplých asfaltových směsí je možné považovat za aktivně přistupující k problematice udržitelného rozvoje. Lepší pracovní podmínky pro posádky finišerových čt jsou dalším benefitem teplých asfaltových směsí.

Základní výhody teplých asfaltových směsí lze spatřit ve [3]:

- snížení výrobní teploty (20-40 °C),
- snížení energetické náročnosti (~ -15 %),
- nižších emisích ze zařízení a na staveništi, (CO_2 ~ -64 %, NO_x -19 %),
- lepší podmínky při práci z hlediska BOZP,
- dobrém obalení,
- dobré přilnavosti,
- delší zpracovatelnost směsi,
- pomalejší stárnutí pojiva při výrobě.

Mezi proměnné faktory při výrobě teplé asfaltové směsi patří [3]:

- typ asfaltového pojiva (např. silniční, modifikované),
- schopnost zpěnění pojiva,
- množství vody použité ke zpěnění,
- přísada, pokud je použita,
- R-materiál, pokud je použit,
- teplota při výrobě,
- technologie zpěňování.

2.5 Výroba teplé asfaltové směsi použitím technologie pěnoasfaltu

Výroba standardních asfaltových směsí se provádí na obalovnách. Z pohledu technologie výroby rozlišujeme dva základní typy obaloven, kontinuální a šaržové. Kontinuální obalovny se používají zejména pro větší liniové stavby, kde se předpokládá použití jednoho druhu asfaltové směsi po delší dobu. V České republice není tento typ obaloven až na výjimky používán, naopak v USA tvoří cca 80 % všech obaloven [1].

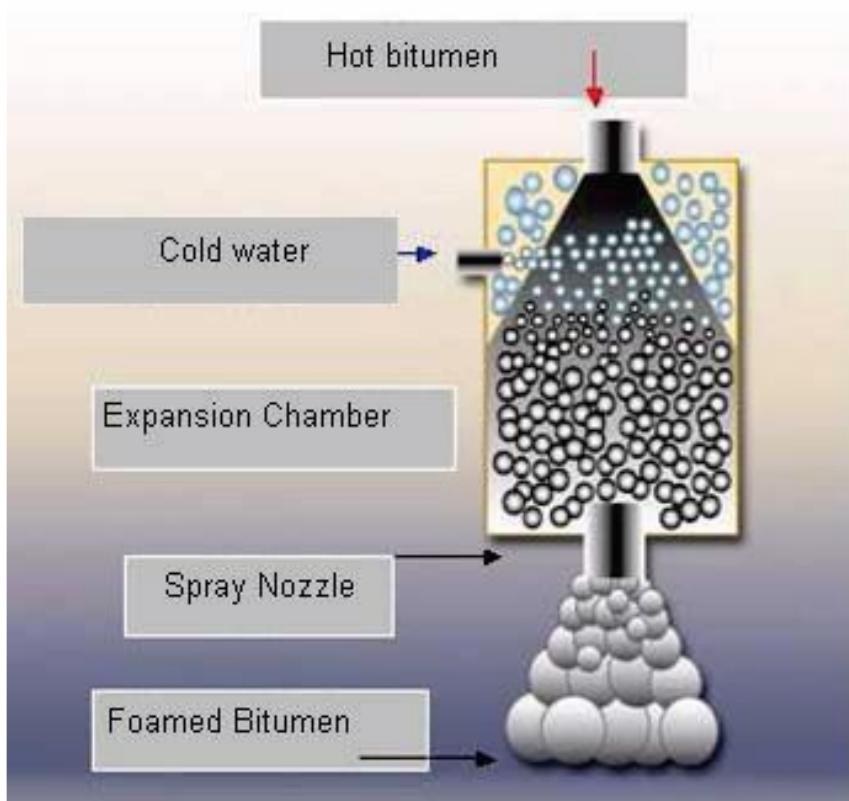
Nedílnou součástí výrobního zařízení asfaltové směsi je míchačka, kde dochází k míchání kameniva s asfaltového pojivem, případně dalších přísad. V horní části míchačky jsou umístěny výpusti násypek přetříděného kameniva, R-materiálu, fileru (včetně vratného fileru), součtová váha a přívod pojiva. Při výrobě teplých asfaltových směsí pomocí technologie pěnoasfaltu je potřeba modifikovat obalovnu asfaltových směsí, respektive před mísící buben je nutné instalovat přídavné zpěňovací zařízení, které má za úkol vyrobit asfaltovou pěnu neboli pěnoasfalt. V míchačce probíhá obvykle nejdříve míchání kameniva „na sucho“ v délce 5–10 s. Poté se do míchačky vstříkne asfaltová pěna, která se navažuje přes asfaltovou váhu. Následuje míchání kameniva s asfaltovou pěnou, přičemž délka míchání je dána druhem asfaltové směsi. Výsledným produktem je teplá asfaltová směs [1], [4].



Obrázek 1: Laboratorní zpěňovací zařízení [19]

2.6 Výroba asfaltové pěny

Při výrobě asfaltové pěny je nejprve čerpáno horké asfaltové pojivo standardní teploty do expanzní komory zpěňovacího zařízení. Úkolem tohoto zařízení je vstříknout pod vysokým tlakem předepsané množství studené vody bez chemických přísad do expanzní komory. Nadávkovaná voda se pod vlivem vysoké teploty změní z kapalného na plynné skupenství (vodní páru), zvětší objem asfaltového pojiva a na krátký časový interval sníží jeho viskozitu. V expanzní komoře zpěňovacího zařízení vznikne asfaltová pěna, která je následně vytlačována výstupním otvorem zpěňovacího zařízení a pomocí přívodu pojiva dávkována do míchačky obalovny [4].



Obrázek 2: Zpěňovací zařízení [2]

Legenda k obrázku 3:

- hot bitumen – horké asfaltové pojivo,
- cold water – studená voda,
- expansion chamber – expanzní komora,
- spray nozzle – rozprašovací tryska,
- foamed bitumen – asfaltová pěna, pěnoasfalt.

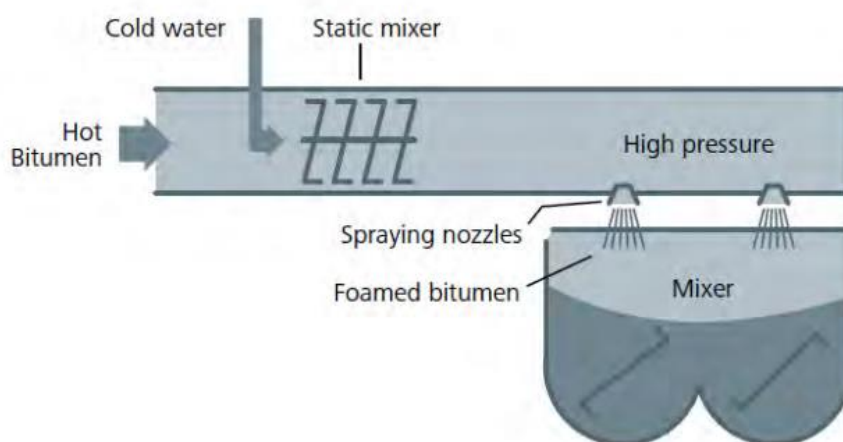
Vstupní materiály pro výrobu asfaltové pěny [4]:

- předepsané množství horkého asfaltového pojiva, jehož teplota se pohybuje od 170 až 190 °C (silniční asfalt 50/70 až 160/220 případně polymerem modifikovaný asfalt),
- předepsané množství studené vody o teplotě 15 až 25 °C je 2 až 4 % z hmotnosti asfaltu.



Obrázek 3: Zpěněné asfaltové pojivo (foamed bitumen) [19]

Tato technologie výroby asfaltové pěny umožňuje snížit výrobní teplotu asfaltové směsi o 20 °C až 40 °C. Důležité je zmínit, že každé snížení výrobní teploty o cca 12 °C, znamená snížení výparů o cca 50 % [2].



Obrázek 4: Napěňovací tryska [2]

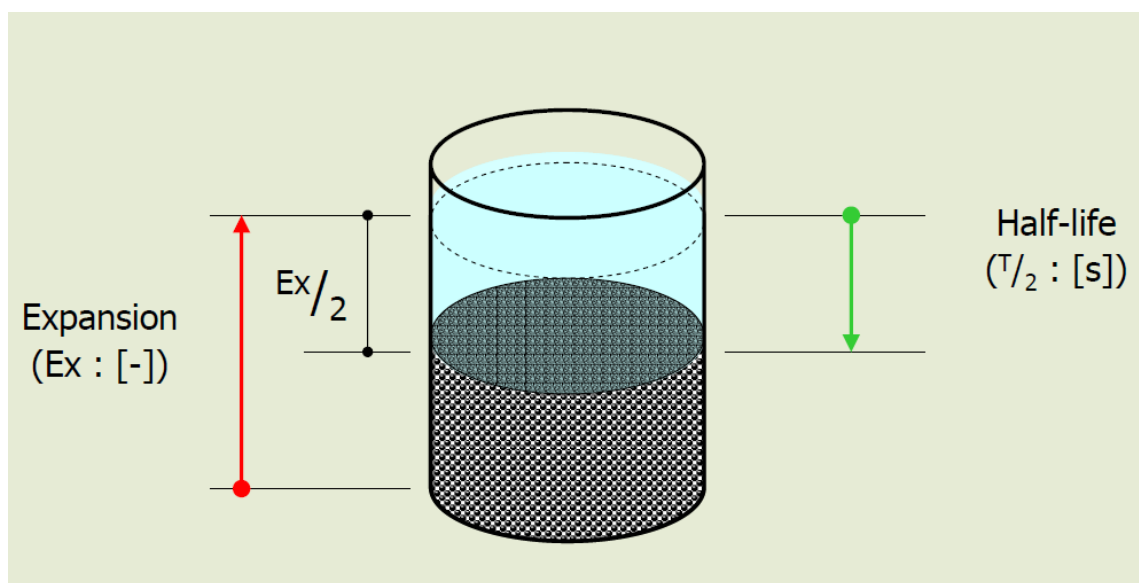
2.7 Vlastnosti asfaltové pěny

Z hlediska kvality jsou u asfaltové pěny sledovány dva parametry [5]:

- expanzní poměr (ER),
- poločas usazení pěny ($\tau_{1/2}$).

Prvním sledovaným parametrem kvality u asfaltové pěny je expanzní poměr, který udává poměr maximálního dosaženého objemu asfaltové pěny a objemu původního asfaltového pojiva. U kvalitní asfaltové pěny by měl expanzní poměr nabývat hodnoty 8 až 15.

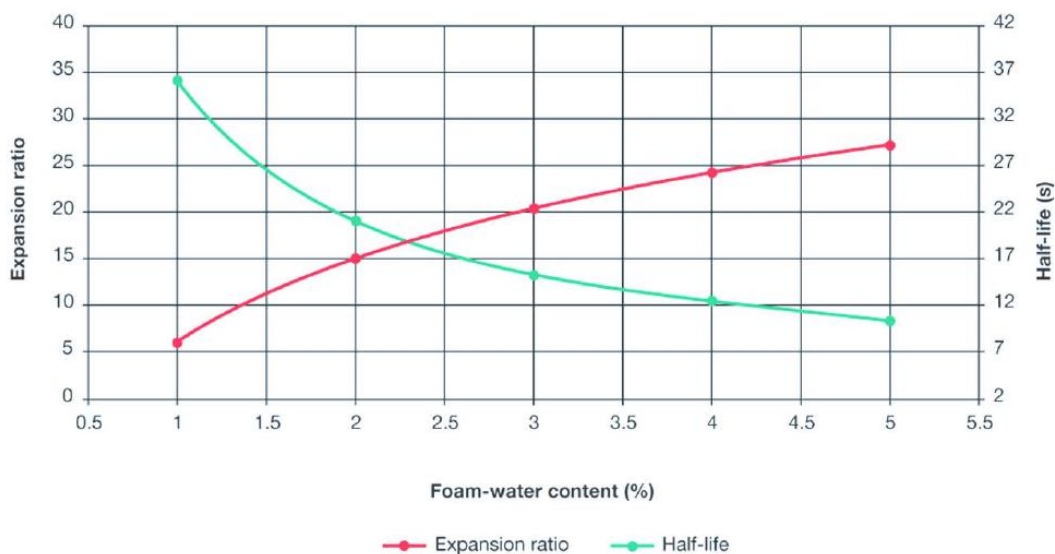
Tím druhým sledovaným parametrem kvality u asfaltové pěny je poločas usazení pěny. Ten je definován jako doba, za kterou dojde ke snížení maximálního dosaženého objemu asfaltové pěny o 50 %.



Obrázek 5: Vztah expanzního poměru a poločasu rozpadu usazení pěny [20]

Obecně platí, že čím delší je poločas usazení pěny, tím kvalitnější a stabilnější je asfaltová pěna. Poločas usazení pěny je uveden ve vteřinách a standardně nabývá hodnot 10 až 15 vteřin. Poločas usazení pěny u kvalitní asfaltové pěny by měl nabývat hodnoty větší než 15 vteřin.

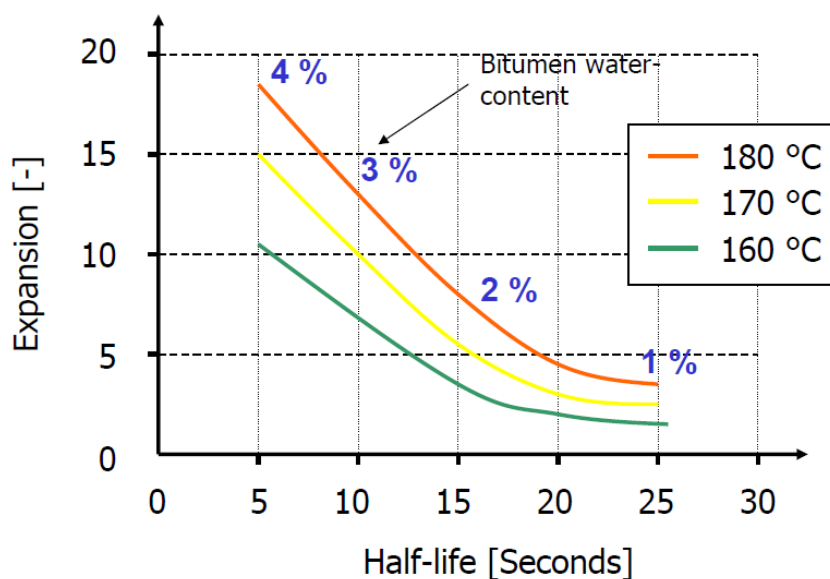
S rostoucím množstvím dávkované vody roste také expanzní poměr, naopak klesá poločas usazení pěny viz graf 3.



Graf 3: Závislost množství dávkované vody na parametrech asfaltové pěny [20]

Oba výše uvedené parametry jsou závislé na druhu a původu asfaltového pojiva, na teplotě horkého asfaltového pojiva, na množství přidávaného stlačeného vzduchu a tlaku, kterým je voda vstřikována do horkého asfaltového pojiva.

Na základě expanzního poměru, poločasu usazení pěny a podílu vstřikované vody lze stanovit tzv. index napěnění (FI), který vymezuje vhodnost asfaltové pěny pro smísení s kamenivem nebo R-materiálem. Poločas usazení pěny je nepřímo úměrný expanznímu poměru viz graf 4 [5].



Graf 4: Nepřímá úměra mezi expanzním poměrem a poločasem usazení [20]

2.8 Zkušenosti s technologií teplých asfaltových směsí v zahraničí

V zahraničí nejsou pěnoasfalty žádnou inovací. Každé asfaltové pojivo, které v horkém stavu přijde do kontaktu s vodou, začne pění a několikanásobně zvýší svůj objem. Takový jev není ve většině případů žádoucí, protože při neřízeném vývoji může dojít k nadměrnému a rychlému zvýšení objemu asfaltového pojiva, úniku ze skladovací nádoby a v krajním případě k popálení osob.

Princip řízené technologie výroby pěnoasfaltu neboli asfaltové pěny byl patentován v roce 1956 profesorem Ladis H. Csanyi z Engineering Experiment Station of Iowa State University v USA. Původně se jednalo o vylepšené pojivo pro stabilizaci zemin při výstavbě silnic americké armády na tichomořských ostrovech s využitím vulkanického popelu. K napěnění asfaltového pojiva byla využívána pára při daném tlaku a teplotě.

První zaznamenaný zkušební úsek byl uskutečněn v roce 1957 na místní silnici ve státě Iowa. V roce 1960 následovaly další projekty v Arizoně a počátkem šedesátých let také v Kanadě.

V roce 1968 byl Csanyiův patent odkoupen společností Mobil Oil Australia, která provedla klíčovou úpravu technologie a nahradila v procesu výroby asfaltové pěny vodní páru vstřikováním studené vody do horkého asfaltového pojiva v nízkotlakém systému, včetně možnosti užití případných přísad. Až do roku 1993 byl tento postup chráněn patentovými právy a zájemci mohli od společnosti Mobil Oil Australia koupit pouze licenci na technologický postup [5].

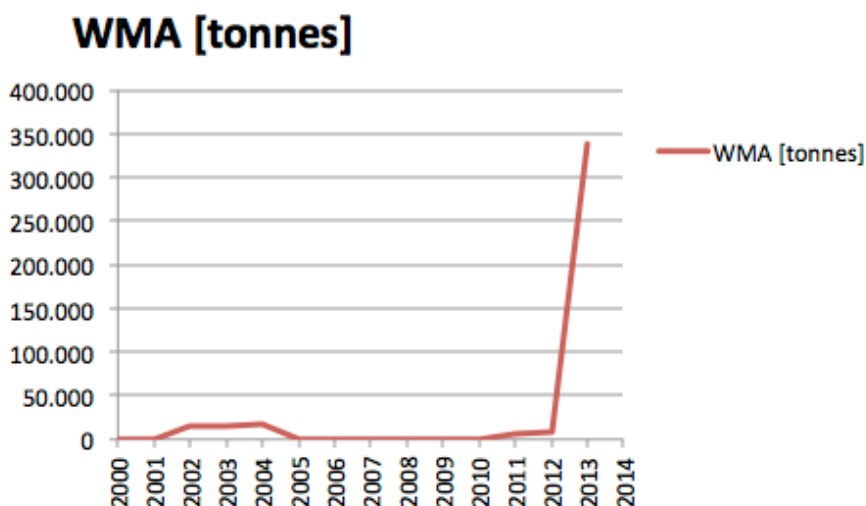
V Dánsku vyrábí společnost NCC nízkoteplotní asfaltové směsi technologií pěnoasfaltu s využitím patentovaného vyvíječe pěny. V roce 2012 byl proveden pokusný úsek (poblíž Ulladulla) srovnávající nízkoteplotní technologii (snížení teploty o cca 20 °C) s konvenční technologií a byly zjištěny identické volumetrické parametry i přilnavost obou směsí. Nízkoteplotní směs byla navíc lépe aplikovatelná finišerem. Později byly v Dánsku provedeny další pokusné úseky.

Ve Francii je technologie teplých asfaltových směsí na vzestupu. Používají se všechny technologie ke snížení pracovní teploty asfaltové směsi. Stále častěji se WMA vyrábí s R-materiálu, což je jedno velké plus z hlediska ochrany životního prostředí.

V roce 2010 byla v Norsku započata realizace projektu „Low temperature asphalt“ (LTA-2011), ve kterém se hodnotí vliv technologií na zdraví pracovníků a na kvalitu asfaltových směsí. Pomocí šesti technologií bylo provedeno jedenáct pokusných úseků. Výrobní teplota byla snížena o 30 °C. Závěry této studie [2]:

- nebyly nalezeny významné rozdíly v zatížení pracovníků,
- došlo k poklesu emisí kouře o cca 50 %,
- nebyly pozorovány žádné rozdíly v kvalitě (mezerovitost, rovinatost, trvalé deformace) oproti klasickým technologiím za horka.

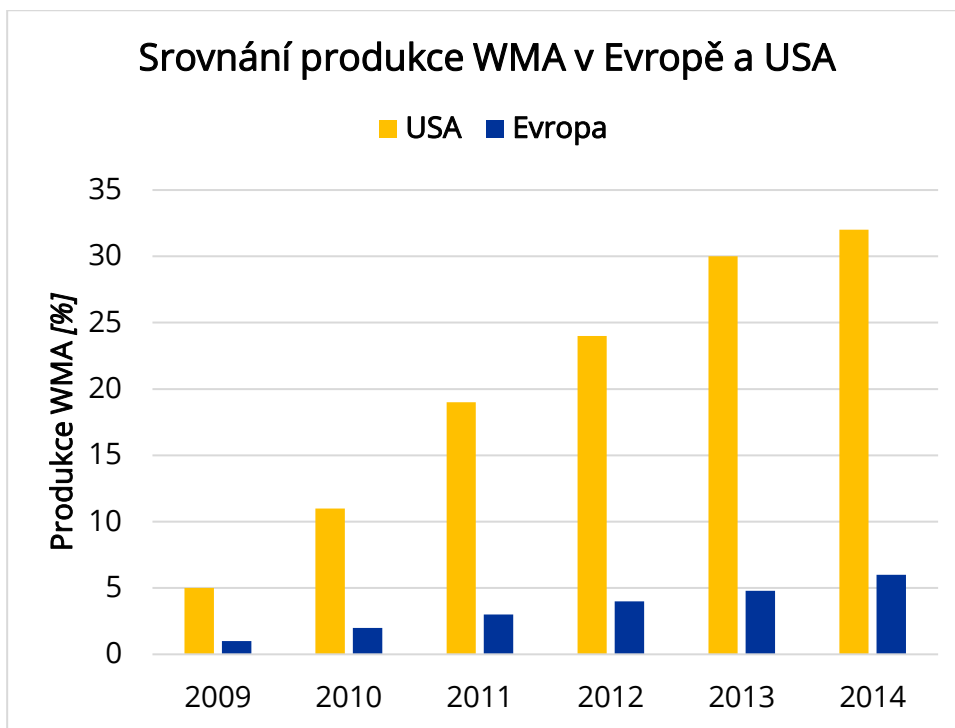
Od roku 2012 jsou v Norsku nízkoteplotní technologie (snížení pracovní teploty minimálně o 25 °C oproti běžné výrobě při zachování stejné kvality směsi) finančně zvýhodňovány ze strany státu. Výsledkem toho byl obrovský nárůst v počtu vyrobených tun nízkoteplotních asfaltových směsí, který je zřejmý z grafu 5.



Graf 5: Nárůst výroby teplých asfaltových směsí v Norsku [2]

Na Slovensku realizovala po roce 2014 společnost Colas první pokusné úseky s pěnoasfaltem. Pro vytvoření asfaltové pěny bylo využito 2,5 % vody. Bylo zjištěno, že kvalita pěnoasfaltových směsí je srovnatelná s klasickými technologiemi za horka.

Největší pokrok, co se týče produkce teplých asfaltových směsí, zaznamenávají Spojené státy americké. V USA se WMA rozšiřují o poznání rychleji než v Evropě. V grafu 6 je patrný velký pokrok USA oproti Evropě v podílu produkce WMA.



Graf 6: Srovnání produkce WMA v Evropě a USA [6]

Například v roce 2012 bylo v USA vyrobeno 24 % teplých asfaltových směsí z celkové produkce asfaltových směsí viz tabulka 2. Z toho přibližně 88 % tvořily pěnoasfaltové technologie [2].

Tabulka 2: Podíl produkce WMA v letech 2009 až 2012 v USA [2]

Rok	Produkce asfaltových směsí [x 10 ⁶ t]	Produkce WMA	
		[x 10 ⁶ t]	[%]
2009	325,0	15,2	5
2010	326,0	37,3	11
2011	332,0	62,3	19
2012	323,5	77,1	24

2.9 Zkušenosti s technologií teplých asfaltových směsí v České republice

České vysoké učení technické v Praze ve spolupráci s Vysokým učení technickým v Brně vydalo v roce 2012 předběžné technické podmínky Ministerstva dopravy s označením TP 238 - Nízkoteplotní asfaltové směsi (NTAS). Předpis popisuje technologické možnosti, jak vyrobit teplou asfaltovou směs použitím nízkoviskózních pojiv, nebo dávkováním organických, chemických či minerálních přísad (např. zeolit). Předpis ale nepopisuje výrobu teplé asfaltové směsi za pomoci technologie pěnoasfaltu [2].

První zkušenost s technologií pěnoasfaltu byla v České republice získána koncem roku 2013. Firma Froněk provedla dva zkušební úseky s využitím pěnoasfaltu. Hlavním cílem realizovaných úseků bylo ověření možnosti výroby a pokládky asfaltových směsí s použitím zpěněného asfaltu a vyššího podílu R-materiálu ve výsledné asfaltové směsi. Technologie zpěněného asfaltu byla odzkoušena v ložních vrstvách s asfaltovým pojivem gradace 70/100 a se dvěma úrovněmi dávkovaného množství R-materiálu, konkrétně s 50 % a 75 % hmotnosti ve výsledné směsi. V obrusných vrstvách byly opětovně realizovány asfaltové směsi typu ACO 11 + s pojivem 50/70 ve variantách 20 % a 40 % R-materiálu, resp. s rejuvenátorem Storbit nebo bez jeho aplikace. Výrobní teplota byla cca 130 °C. Návrh směsi provedlo České vysoké učení technické v Praze. Tato technologie pěnoasfaltu se ovšem dále nerozvíjela [21].



Obrázek 6: Hutnění asfaltové směsi s recyklátem se současným snížením výrobní teploty metodou pěnoasfaltu [21]



Obrázek 7: Jádrové vývrty vozovky s „pěnoasfaltovou“ ložní vrstvou [21]

V rámci projektu CESTI započatého v roce 2013 se mimo jiné řeší vývoj nízkoteplotní směsi typu litý asfalt, ovšem využívají se chemické nízkoteplotní přísady.

Při výstavbě tunelového komplexu Blanka v Praze bylo z důvodu omezené možnosti větrání a zachování bezpečného pracovního prostředí pro pracovníky nutné snížit množství výparů a exhalací z horkého asfaltu a strojní mechanizace. Z tohoto důvodu byla využita se technologie teplých asfaltových směsí. Konkrétně byla využita organická přísada na principu povrchově aktivních látek a sice Evotherm® MA3, která umožnila snížení pracovní teploty o 20 °C u asfaltového betonu pro velmi tenkou vrstvu a o 30 °C u asfaltového betonu pro ložní vrstvu. Jedná se tedy o nízkoteplotní asfaltovou směs [6], [22].

Koncem roku 2016 provedla společnost Colas pokusnou výrobu malého množství pěnoasfaltové směsi pro pokládku obrusné a ložní vrstvy místní komunikace v Olbramkostele. Asfaltová pěna ovšem obsahovala nízké množství vody [4].



Obrázek 8: Pokládka pěnoasfaltové směsi v Olbramkostele [23]



Obrázek 9: Odebírání vzorků za účelem laboratorního zkoušení [23]

Cílem společnosti Colas do budoucna je zaměřit se na lepší využití recyklátu do asfaltových směsí se současným snížením výrobní teploty metodou foambitumenu. Je to celosvětový trend, který by rádi prosadili i v České republice.

2.10 Legislativa

Výrobní normy řady ČSN EN 13108 nezakazují používání teplých asfaltových směsí čili ani pěnoasfaltových směsí. Jedná se o normy, které obsahují požadavky na maximální teploty výroby pro jednotlivé typy směsí. Minimální teploty výroby jsou deklarovány výrobcem. Tyto normy dále obsahují ustanovení, jak zacházet s asfaltovými směsmi obsahujícími aditiva, pokud tyto směsi dosahují ekvivalentních vlastností. Z toho důvodu je možné shrnout, že evropské normy nezakazují použití nízkoteplotních technologií včetně pěnoasfaltové technologie [2].

V České republice existují technické podmínky Ministerstva dopravy:

- TP 112 – Studené pěnoasfaltové vrstvy [13],
- TP 238 – Nízkoteplotní asfaltové směsi [15].

Technické podmínky Ministerstva dopravy z roku 2007 pod označením TP 112 - Studené pěnoasfaltové vrstvy stanovují zásady pro použití, provádění a kontrolu konstrukčních vrstev pozemních komunikací včetně dočasných provizorních tras (vozovky PK) a konstrukcí dopravních a jiných ploch (konstrukce DJP), nemotoristických komunikací a zpevněných krajnic (konstrukce ZK) z pěnoasfaltové směsi při jejich výstavbě, opravách a údržbě. Předpis uvádí několik termínů souvisejících s problematikou pěnoasfaltů [13]:

- studená pěnoasfaltová vrstva – podkladní, ložní a případně obrusná vrstva z pěnoasfaltové směsi,
- pěnoasfaltová směs – stavební směs s případnými přísadami obalená za studena asfaltovou pěnou,
- asfaltová pěna – speciálním postupem zpěněný ropný nebo přírodní asfalt s případným obsahem vhodných přísad, jehož viskozita a povrchové napětí jsou změněny natolik, že za studena obaluje vlhké jemnozrnné materiály.

V TP 112 jsou sice uvedeny informace o technologii pěnoasfaltu, ale pouze pro pěnoasfaltové směsi za studena. V předpise je dále uvedeno, že tyto směsi je možné využívat bez omezení pouze pro podkladní vrstvy, pro ložní vrstvy jen do třídy

dopravního zatížení (V) a pro obrusné vrstvy jen pro nejnižší třídy dopravního zatížení (VI). Navíc je nutné opatřit povrch této obrusné vrstvy nátěrem nebo emulzní kalovou vrstvou. Z toho vyplývá, že se nejedná o technologii výroby standardních asfaltových směsí za horka ani o technologii teplých asfaltových směsí, které by byly vhodné pro provádění obrusných nebo ložních asfaltových vrstev, a zároveň srovnatelné se za horka vyráběnými asfaltovými směsmi [13].

Předběžné technické podmínky Ministerstva dopravy z roku 2012 pod označením TP 238 - Nízkoteplotní asfaltové směsi platí pro návrh, výrobu, dopravu, pokládku, kontrolu a zkoušení nízkoteplotních asfaltových směsí, které jsou využitelné pro všechny typy asfaltových úprav aplikované v jednotlivých vrstvách konstrukce vozovky, včetně směsí typu VMT definovaných v TP 151 – Asfaltové směsi s vysokým modulem tuhosti (VMT). Nízkoteplotní asfaltové směsi jsou směsi, které se vyrábějí a zpracovávají při teplotách nad 100 °C, přičemž dochází k využití přísad, které upravují (snižují) viskozitu asfaltového pojiva, resp. směsí. Oproti běžným asfaltovým směsím u nich lze docílit dílčího snížení pracovních teplot, zpravidla v rozsahu 10 °C až 30 °C. Popsané přísady mohou v případě nevyčerpání celého potenciálu snížení teploty zlepšit zpracovatelnost litého asfaltu a míru zhutnění ostatních asfaltových směsí. TP uvádějí i některé základní údaje pro jejich aplikaci v konstrukcích vozovek. Předpis popisuje technologické možnosti, jak vyrobit teplou asfaltovou směs použitím nízkoviskózních pojiv, nebo dávkováním organických, chemických či minerálních přísad (např. zeolit). Předpis ale nepopisuje výrobu teplé asfaltové směsi za pomoci technologie pěnoasfaltu [15].

3 CÍL PRÁCE

Cílem diplomové práce bylo zpracovat problematiku využití zpěněného asfaltu jako pojiva do asfaltových směsí. Diplomová práce je rozdělena do dvou částí, teoretickou a praktickou.

V teoretické části diplomové práce bylo cílem zpracovat přehled technologií, které umožňují snížit pracovní teplotu při výrobě a pokládce asfaltových směsí.

Cílem praktické části diplomové práce bylo porovnat vybrané empirické a funkční parametry dvou typů asfaltových směsí vyrobených vždy ve dvou variantách, a to s běžným asfaltovým pojivem a s pěnoasfaltovým pojivem. Pozornost byla věnována především tuhostním a nízkoteplotním parametrům stanovených dle platných českých norem. Cílem diplomové práce bylo zjistit, do jaké míry ovlivňuje malé množství vody dávkované do horkého asfaltového pojiva sledované parametry pěnoasfaltové směsi vůči standardní za horka vyráběné asfaltové směsi.

Výsledky jednotlivých zkoušek byly zpracovány do tabulek a grafů, vyhodnoceny a shrnuty v závěru diplomové práce.

4 PRAKTICKÁ ČÁST

Praktická část diplomové práce je rozdělena do několika kapitol. Úvodní kapitola se zabývá vstupními materiály potřebnými pro výrobu jednotlivých asfaltových směsí. Další kapitoly jsou věnovány složení asfaltových směsí a použitým zkušebním metodám. V závěru této kapitoly jsou shrnuty výsledky jednotlivých zkoušek.

4.1 Použité materiály

Každá asfaltová směs se skládá z kameniva a asfaltového pojiva, případně z dalších přidávaných materiálů zlepšujících výsledné vlastnosti směsi.

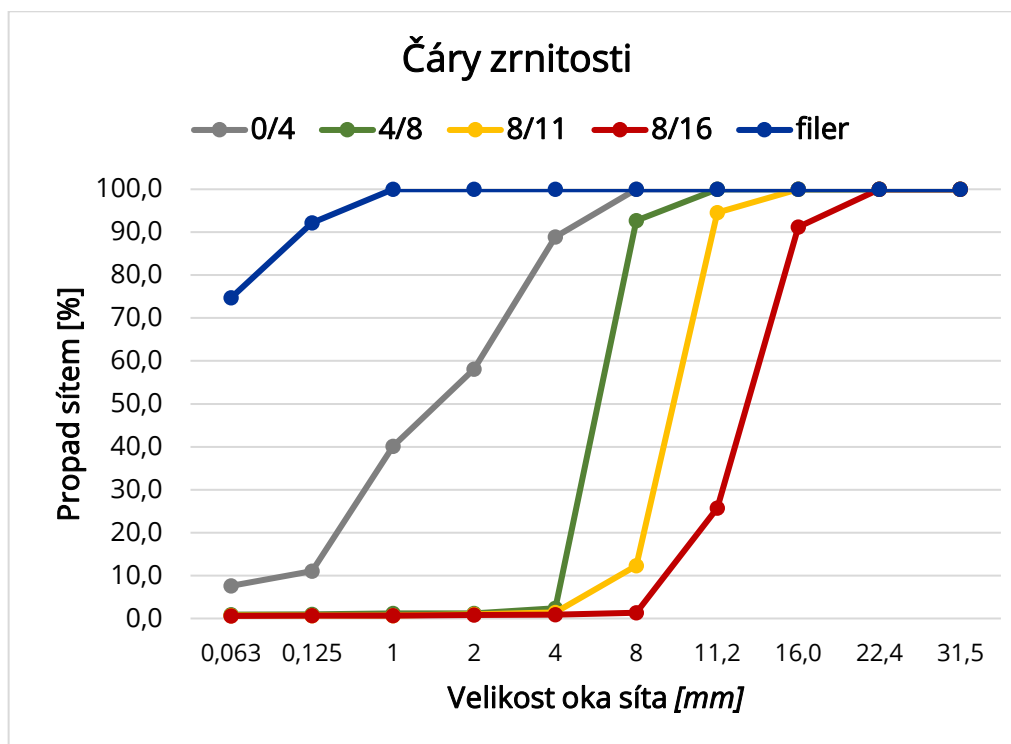
4.1.1 Kamenivo

Pro výrobu asfaltových směsí v rámci praktické části diplomové práce bylo použito kamenivo z lomu Tasovice. Jedná se o drcené kamenivo, které se vyznačuje svým ostrohranným tvarem zrn a drsným lomovým povrchem. Právě proto je tento druh kameniva vhodný do asfaltových směsí. Pro výrobu asfaltových směsí bylo použito frakcí 0/4, 4/8, 8/11, 8/16. Dále byl potřeba přídatný filer neboli kamenná moučka původem z cementárny v Mokré. U každé frakce byl stanoven síťový rozbor. V tabulce 3 jsou uvedeny síťové rozборы jednotlivých frakcí kameniva.

Tabulka 3: Síťový rozbor jednotlivých frakcí kameniva [24], [25], [26], [27]

Propad sítem [%]		Frakce kameniva				
		0/4	4/8	8/11	8/16	filer
Velikost oka síta [mm]	31,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	22,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	16,0	100,0	100,0	100,0	91,2	100,0
	11,2	100,0	100,0	94,6	25,7	100,0
	8,0	100,0	92,7	12,3	1,3	100,0
	4,0	88,9	2,4	1,4	0,9	100,0
	2,0	58,1	1,2	1,0	0,8	100,0
	1	40,1	1,2	0,7	0,7	100,0
	0,125	11,0	1,0	0,7	0,7	92,2
	0,063	7,6	0,9	0,7	0,6	74,7

Ze síťových rozborů jednotlivých frakcí kameniva, které jsou uvedeny v tabulce 3, lze sestavit čáry zrnitosti, které slouží jako podklad pro návrh čáry zrnitosti jednotlivých asfaltových směsí použitých v této diplomové práci viz graf 7.



Graf 7: Čáry zrnitosti jednotlivých frakcí kameniva

4.1.2 Pojivo

Jako pojivo do asfaltových směsí byl použit silniční asfalt 50/70. Silniční asfalt je označen vždy penetračním zlomkem, který vyjadřuje rozmezí pro něj charakteristické hodnoty penetrace. V tabulce 4 je uvedena hodnota penetrace v penetračních jednotkách a bod měknutí ve stupních celsia.

Tabulka 4: Vlastnosti silničního asfaltu 50/70 [24], [25], [26], [27]

50/70	Minimální hodnota	Maximální hodnota	Zkušební vzorek
Penetrace [p.j.]	50	70	63
Bod měknutí [°C]	46	54	51,2

4.2 Asfaltové směsi

Praktická část diplomové práce se zabývá zkoušením asfaltových směsí, které byly pro účely diplomové práce dodány v podobě zhutněných asfaltových desek. Celkem byly zaslány čtyři asfaltové směsi, všechny typu asfaltový beton (AC). Jedná se o druh asfaltové směsi, který je určen pro stavbu krytových (ložních i obrusných) a podkladních vrstev silničních a dálničních vozovek, letištních a jiných zpevněných ploch. Tento typ asfaltové směsi se vyznačuje plynulou čarou zrnitosti, což znamená přibližně rovnoměrné zastoupení zrn všech velikostí [1].

Pro návrh asfaltové směsi typu asfaltový beton platí obecně zásada, že by čára zrnitosti měla procházet pod tzv. Fullerovou parabolou, což je křivka představující čáru zrnitosti s nejtěsnějším uspořádáním zrn. Dochází tak k zaklínění zrn hrubších frakcí, vytvoření pevnější kostry kameniva a tím i k dosažení vyšší odolnosti proti tvorbě trvalých deformací. Fullerovu parabolu charakterizuje rovnice.

$$Y = (d/D)^{0,5} \times 100$$

- Kde: Y procentuální propad kameniva na daném síti [%]
d velikost oka síta, na kterém počítáme propad [mm]
D velikost oka horního síta nejhrubší použité frakce kameniva
(tzv. nominálního síta) pro daný druh asfaltové směsi [mm]

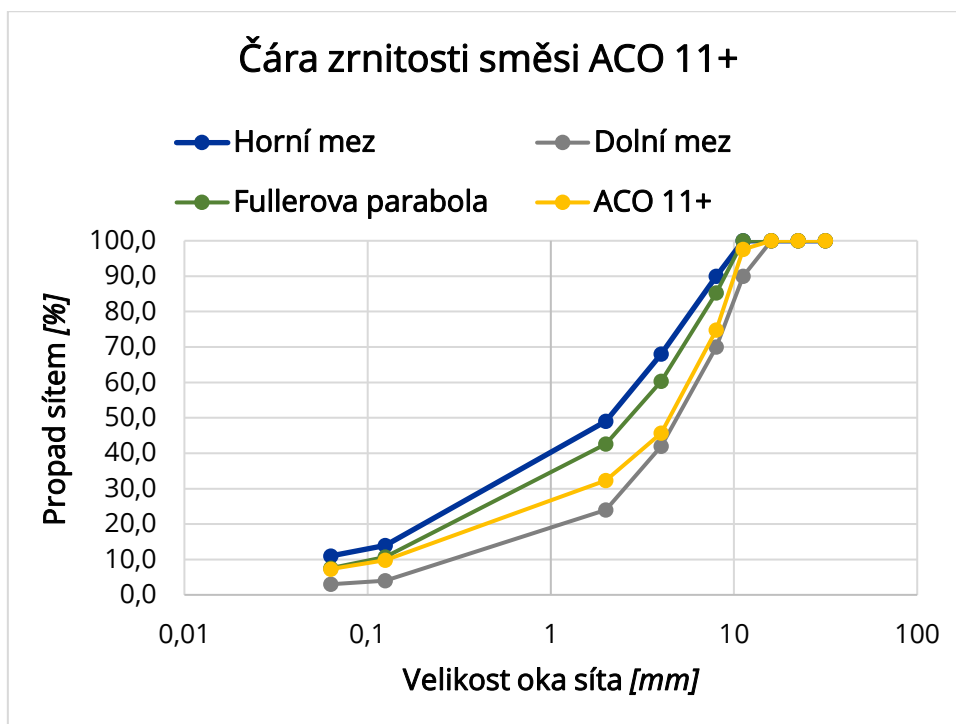
Výpočet čáry zrnitosti je výpočtem zastoupení jednotlivých frakcí. Obor zrnitosti neboli rozsah propadu vymezený horními a dolními mezními hodnotami na jednotlivých sítích je uveden v normě ČSN EN 13108-1 - Asfaltové směsi – Specifikace pro materiály – Část 1: Asfaltový beton [9].

4.2.1 ACO 11+

První zkoušenou asfaltovou směsí typu asfaltový beton je směs s označením ACO 11+ 50/70. Jedná se o asfaltový beton pro ložní vrstvu vozovky s velikostí maximálního zrna 11 mm třídy dopravního zatížení II – IV a silničním asfaltem 50/70. V rámci zjednodušení je tato směs dále v diplomové práci označována jako ACO 11+.

Tabulka 5: Zrnitost směsi kameniva ACO 11+ [24]

Propad sítem [%]					
ACO 11+		Čára zrnitosti			
		Návrh	Fuller	Dolní mez	Horní mez
Velikost oka síta [mm]	31,5	100,0	100,0	100,0	100,0
	22,4	100,0	100,0	100,0	100,0
	16	100,0	100,0	100,0	100,0
	11,2	97,6	100,0	90,0	100,0
	8	74,8	85,3	70,0	90,0
	4	45,7	60,3	42,0	68,0
	2	32,3	42,6	24,0	49,0
	0,125	9,8	10,7	4,0	14,0
	0,063	7,3	7,6	3,0	11,0



Graf 8: Čára zrnitosti asfaltové směsi ACO 11+

Graficky je znázorněna čára zrnitosti asfaltové směsi ACO 11+, horní a dolní meze dle ČSN EN 13108-1 [9] a dále Fullerova parabola viz graf 8. Horní i dolní meze jsou zobrazeny křivkou, neboť hodnoty mezí se nacházejí ve frakcích, které následují po sobě.

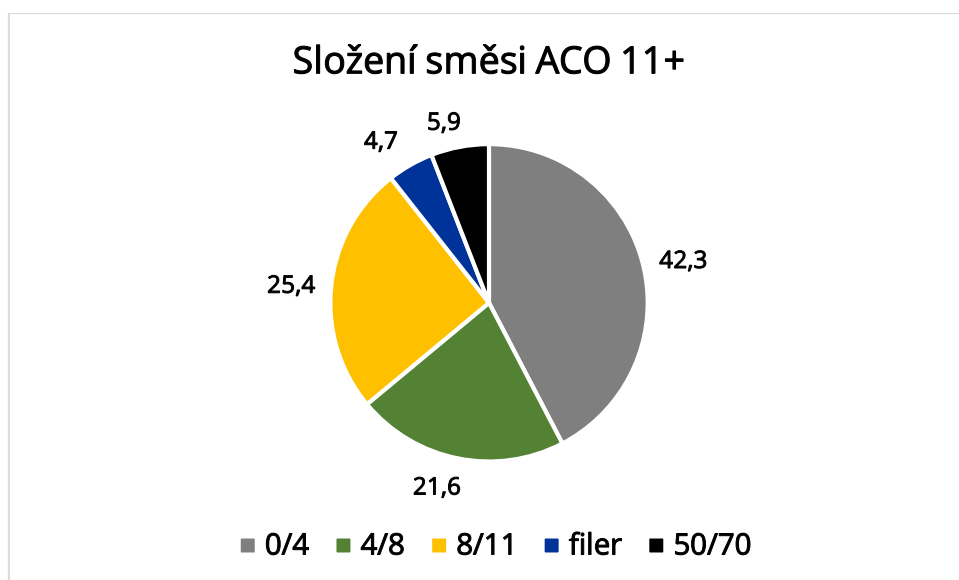
Tabulka 6: Studené dávkování kameniva směsi ACO 11+ [24]

Skladba kameniva směsi ACO 11+ [%]				
Zdroj a frakce kameniva				
Tasovice 0/4	Tasovice 4/8	Tasovice 8/11	Mokrý filer	Σ
45,0	23,0	27,0	5,0	100,0

Základní složkou asfaltové směsi je kamenivo a asfaltové pojivo. Asfaltová směs ACO 11+ se skládá:

- z kameniva frakce 0/4, 4/8, 8/11,
- přídatného fileru neboli vápencové moučky,
- jako pojivo je použit silniční asfalt gradace 50/70 v množství 5,9 %,
- do směsi je dále přidáváno adhezivo addibit L300 v množství 0,2 % z hmotnosti asfaltu, které zlepšuje přilnavost asfaltu ke kamenivu.

Procentuální zastoupení všech složek této asfaltové směsi je vidět z grafu 9.



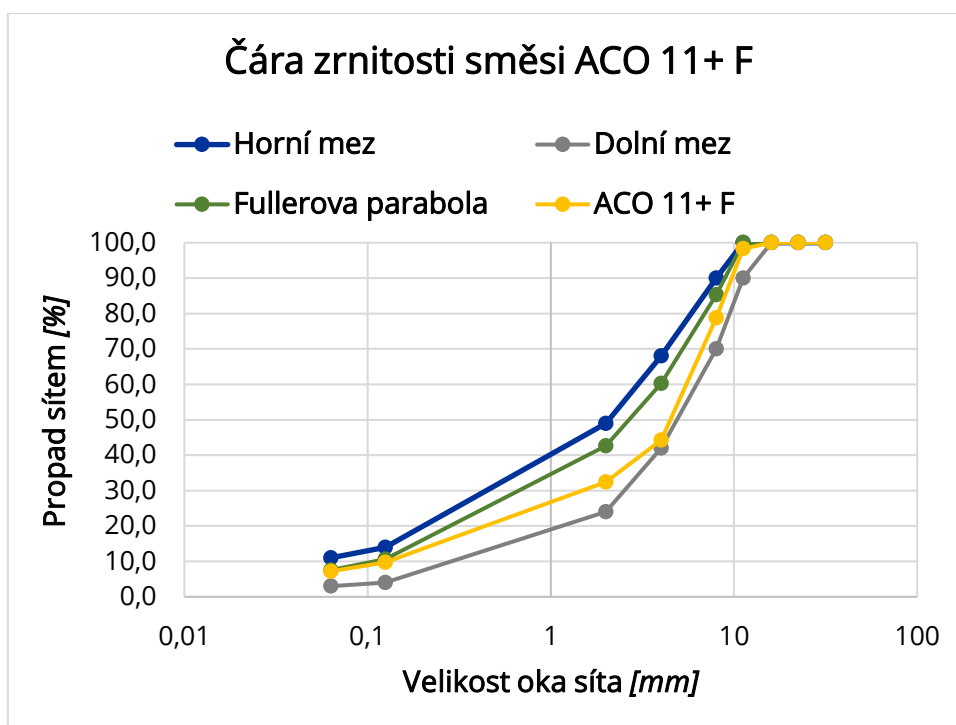
Graf 9: Procentuální složení asfaltové směsi ACO 11+

4.2.2 ACO 11+ F

Druhou zkoušenou asfaltovou směsí typu asfaltový beton je směs s označením ACO 11+ F 50/70. Jedná se o asfaltový beton pro ložní vrstvu vozovky s velikostí maximálního zrna 11 mm třídy dopravního zatížení II – IV a pěnoasfaltem (silniční asfalt gradace 50/70 a voda). V rámci zjednodušení je tato směs dále v diplomové práci označována jako ACO 11+ F.

Tabulka 7: Zrnitost směsi kameniva ACO 11+ F [25]

Propad sítem [%]		Čára zrnitosti			
ACO 11+ F		Návrh	Fuller	Dolní mez	Horní mez
Velikost oka síta [mm]	31,5	100,0	100,0	100,0	100,0
	22,4	100,0	100,0	100,0	100,0
	16	100,0	100,0	100,0	100,0
	11,2	98,3	100,0	90,0	100,0
	8	78,8	85,3	70,0	90,0
	4	44,3	60,3	42,0	68,0
	2	32,4	42,6	24,0	49,0
	0,125	9,7	10,7	4,0	14,0
	0,063	7,2	7,6	3,0	11,0



Graf 10: Čára zrnitosti asfaltové směsi ACO 11+ F

Graficky je znázorněna čára zrnitosti asfaltové směsi ACO 11+ F, horní a dolní meze dle ČSN EN 13108-1 [9] a dále Fullerova parabola viz graf 10. Horní i dolní meze jsou zobrazeny křivkou, neboť hodnoty mezí se nacházejí ve frakcích, které následují po sobě.

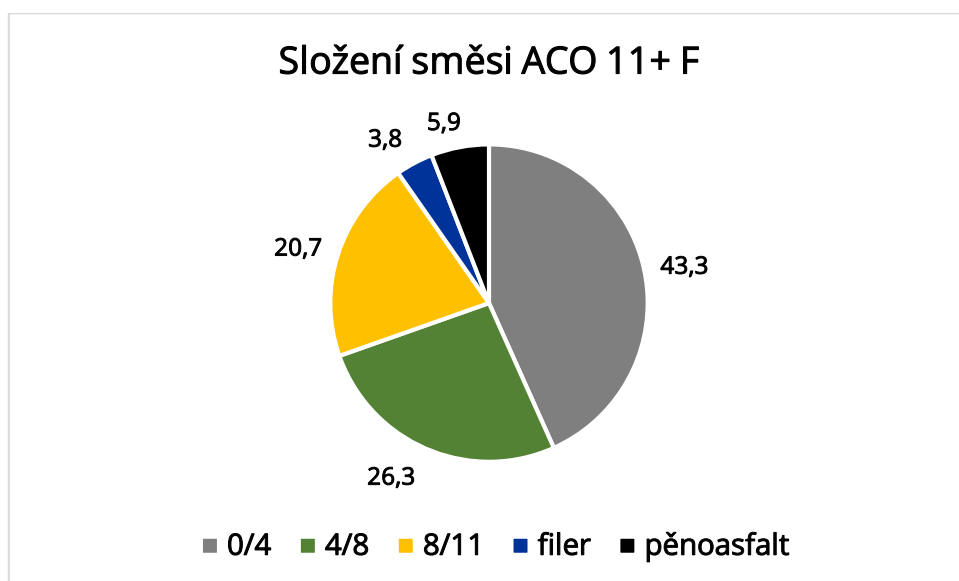
Tabulka 8: Studené dávkování kameniva směsi ACO 11+ F [25]

Skladba kameniva směsi ACO 11+ F [%]				
Zdroj a frakce kameniva				
Tasovice 0/4	Tasovice 4/8	Tasovice 8/11	Mokrý filer	Σ
46,0	28,0	22,0	4,0	100,0

Asfaltová směs ACO 11+ F má obdobné složení jako předchozí asfaltová směs. Skládá se z:

- kameniva frakce 0/4, 4/8, 8/11
- přídatného fileru neboli vápencové moučky,
- jako pojivo je použit tzv. pěnoasfalt (silniční asfalt gradace 50/70 v množství 5,9 % + voda v množství 2,5 % z hmotnosti asfaltu).
- do směsi je dále přidáváno adhezivo addibit L300 v množství 0,2 % z hmotnosti asfaltu, které zlepšuje přilnavost asfaltu ke kamenivu.

Procentuální zastoupení všech složek této asfaltové směsi je vidět z grafu 11.



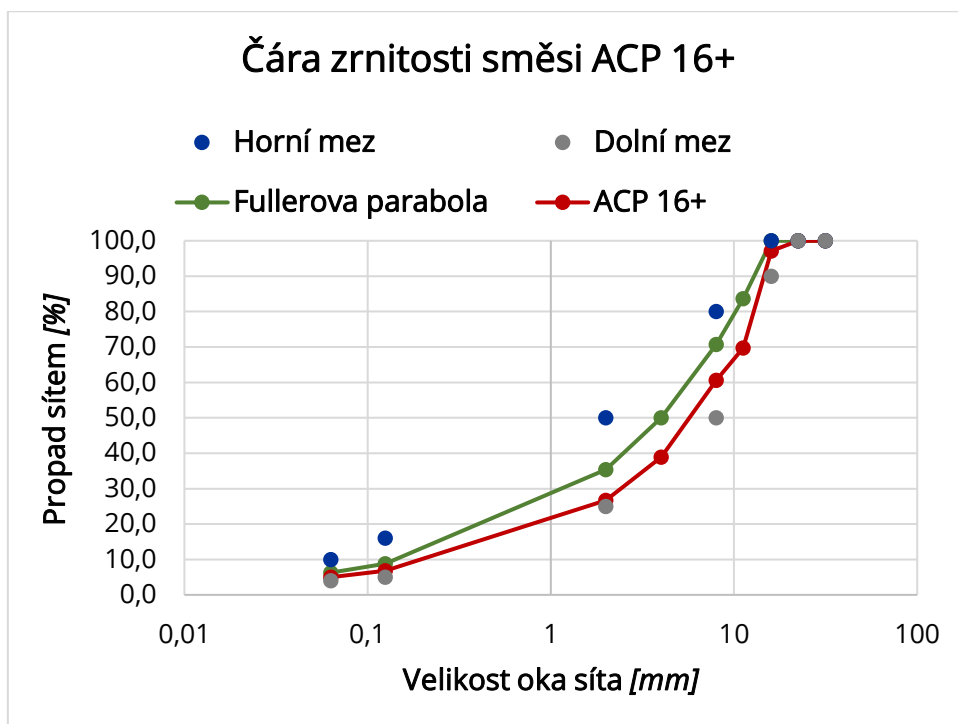
Graf 11: Procentuální složení asfaltové směsi ACO 11+ F

4.2.3 ACP 16+

Třetí zkoušenou asfaltovou směsí typu asfaltový beton je směs s označením ACP 16+ 50/70. Jedná se o asfaltový beton pro podkladní vrstvu vozovky s velikostí maximálního zrna 16 mm třídy dopravního zatížení II – IV a silničním asfaltem 50/70. V rámci zjednodušení je tato směs dále v diplomové práci označována jako ACP 16+.

Tabulka 9: Zrnitost směsi kameniva ACP 16+ [26]

Propad sítem [%]					
ACP 16+		Čára zrnitosti			
		Návrh	Fuller	Dolní mez	Horní mez
Velikost oka síta [mm]	31,5	100,0	100,0	100,0	100,0
	22,4	100,0	100,0	100,0	100,0
	16	97,1	100,0	90,0	100,0
	11,2	69,7	83,7	/	/
	8	60,6	70,7	50,0	80,0
	4	38,9	50,0	/	/
	2	26,7	35,4	25,0	50,0
	0,125	6,8	8,8	5,0	16,0
	0,063	5,0	6,3	4,0	10,0



Graf 12: Čára zrnitosti asfaltové směsi ACP 16+

Graficky je znázorněna čára zrnitosti asfaltové směsi ACP 16+, horní a dolní meze dle ČSN EN 13108-1 [9] a dále Fullerova parabola viz graf 12. Horní i dolní meze jsou zobrazeny bodově, neboť hodnoty mezi se nenacházejí vždy ve frakcích následujících po sobě.

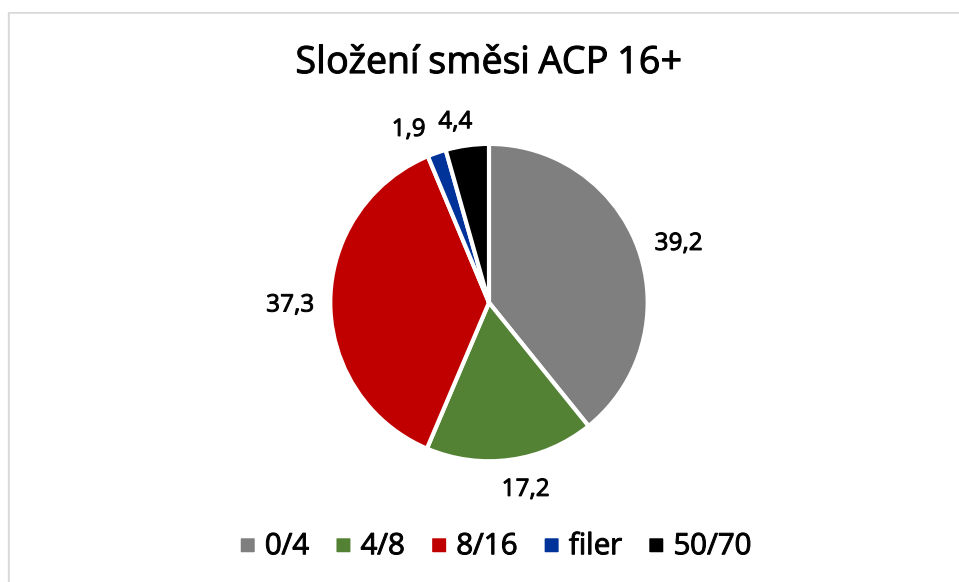
Tabulka 10: Studené dávkování kameniva směsi ACP 16+ [26]

Skladba kameniva směsi ACP 16+ [%]				
Zdroj a frakce kameniva				
Tasovice 0/4	Tasovice 4/8	Tasovice 8/16	Mokrý filer	Σ
41,0	18,0	39,0	2,0	100,0

Základní složkou asfaltové směsi je kamenivo a asfaltové pojivo. Asfaltová směs ACP 16+ se skládá:

- z kameniva frakce 0/4, 4/8, 8/16,
- přídatného fileru neboli vápencové moučky,
- jako pojivo je použit silniční asfalt 50/70 v množství 4,40 %.

Procentuální zastoupení všech složek této asfaltové směsi je vidět z grafu 13.



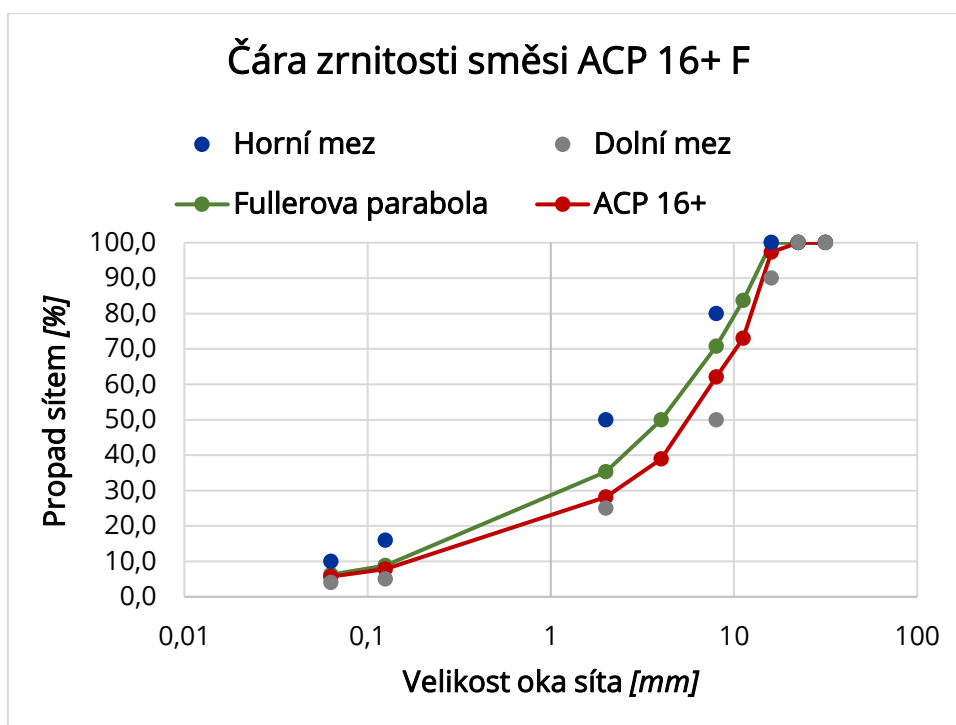
Graf 13: Procentuální složení asfaltové směsi ACP 16+

4.2.4 ACP 16+ F

Poslední zkoušenou asfaltovou směsí typu asfaltový beton je směs s označením ACP 16+ F 50/70. Jedná se o asfaltový beton pro podkladní vrstvu vozovky s velikostí maximálního zrna 16 mm třídy dopravního zatížení II – IV a pěnoasfaltem (silniční asfalt gradace 50/70 a voda). V rámci zjednodušení je tato směs dále v diplomové práci označována jako ACP 16+ F.

Tabulka 11: Zrnitost směsi kameniva ACP 16+ F [27]

Propad sítem [%]		Čára zrnitosti			
ACP 16+ F		Návrh	Fuller	Dolní mez	Horní mez
Velikost oka síta [mm]	31,5	100,0	100,0	100,0	100,0
	22,4	100,0	100,0	100,0	100,0
	16	97,3	100,0	90,0	100,0
	11,2	73,0	83,7	/	/
	8	62,1	70,7	50,0	80,0
	4	38,9	50,0	/	/
	2	28,2	35,4	25,0	50,0
	0,125	7,8	8,8	5,0	16,0
	0,063	5,7	6,3	4,0	10,0



Graf 14: Čára zrnitosti asfaltové směsi ACP 16+ F

Graficky je znázorněna čára zrnitosti asfaltové směsi ACP 16+, horní a dolní meze dle ČSN EN 13108-1 [9] a dále Fullerova parabola viz graf 14. Horní i dolní meze jsou zobrazeny bodově, neboť hodnoty mezí se nenacházejí vždy ve frakcích následujících po sobě.

Tabulka 12: Studené dávkování kameniva směsi ACP 16+ F [27]

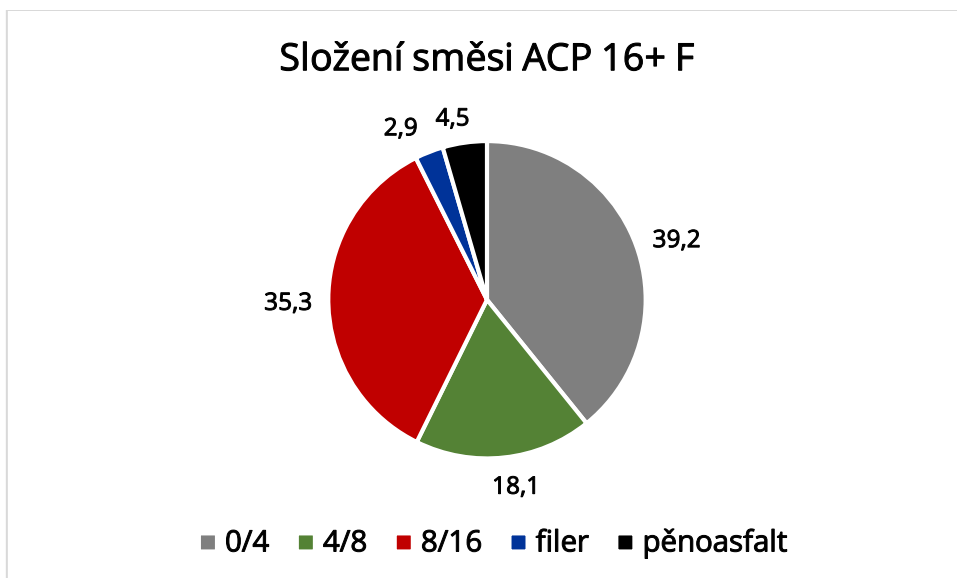
Skladba kameniva směsi ACP 16+ F [%]				
Zdroj a frakce kameniva				
Tasovice 0/4	Tasovice 4/8	Tasovice 8/16	Mokrý filer	Σ
41,0	19,0	37,0	3,0	100,0

Asfaltová směs ACP 16+ F má obdobné složení jako předchozí asfaltová směs.

Skládá se z:

- kameniva frakce 0/4, 4/8, 8/16,
- přídatného fileru neboli vápencové moučky,
- jako pojivo je použit tzv. pěnoasfalt (silniční asfalt gradace 50/70 v množství 4,50 % + voda v množství 2,5 % z hmotnosti asfaltu).
Přičemž voda se průběžně dávkuje zpěňovacím zařízením do potrubí s horkým asfaltem ještě před asfaltovou váhou.

Procentuální zastoupení všech složek této asfaltové směsi je vidět z grafu 15.



Graf 15: Procentuální složení asfaltové směsi ACP 16+ F

4.3 Použité zkušební metody

V této kapitole je pozornost věnována laboratornímu zkoušení asfaltových směsí. Podobně jako u zkoušení asfaltových pojiv lze využít dvou přístupů, empirického a funkčního. V rámci praktické části diplomové práce bude stanovena objemová hmotnost zhutněných asfaltových směsí [10]. Dále bude provedeno stanovení funkčních parametrů, při nichž je materiál podrobován zkoušení v podmínkách simulujících skutečné namáhání asfaltových směsí v konstrukci vozovky. Konkrétně se jedná o dvoubodovou zkoušku ohybem na tělesech tvaru jednostranně vetknutého komolého klínu (2PB-TR) [10] a zkoušku nízkoteplotních vlastností s rovnoměrným řízeným poklesem teploty (TSRST) [11].

4.3.1 Zhutněné asfaltové desky

Pro účely diplomové práce byly dodány zhutněné asfaltové desky. Celkem bylo zasláno 8 zhutněných asfaltových desek, od každé asfaltové směsi dvě desky. Mezní teploty asfaltu při výrobě směsi byly 150-180 °C, u horké asfaltové směsi byly mezní teploty směsi 140-180 °C, u pěnoasfaltových směsí pak 130-180 °C. Výroba asfaltových směsí neprobíhala za současného snížení výrobní teploty, protože se jedná o první fázi porovnání asfaltové směsi bez a s pěnoasfaltem.

Ať už jsou zhutněné asfaltové desky dodány odkudkoliv, i s certifikovaným složením či vlastnostmi, je žádoucí stanovit alespoň objemovou hmotnost dílčích zhutněných asfaltových desek. Na základě porovnání objemové hmotnosti zjištěné vážením s objemovou hmotností Marshalových těles dle zkoušky typu pro danou asfaltovou směs lze získat míru zhutnění.



Obrázek 10: Sada asfaltových desek směsí ACO a ACP

4.3.2 Objemová hmotnost zhutněné asfaltové směsi

Jedná se o empirickou zkoušku asfaltových směsí, která je popsána v normě ČSN EN 12697-6 neboli Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa. V normě jsou uvedeny čtyři postupy pro zjištění objemové hmotnosti zhutněné asfaltové směsi. V praktické části diplomové práce byla použita objemová hmotnost – nasycený suchý povrch (SSD) [10].

4.3.2.1 Termíny a definice

Objemová hmotnost – hmotnost při dané zkušební teplotě, připadající na jednotku objemu zkušebního tělesa včetně mezer.

4.3.2.2 Podstata zkoušky

Objemová hmotnost neporušeného zkušebního asfaltového tělesa se stanoví z hmotnosti zkušebního tělesa a jeho objemu. Hmotnost zkušebního tělesa se získá vážením suchého vzorku na vzduchu. Objem zkušebního tělesa se získá z jeho hmotnosti na vzduchu a ve vodě. Při zvoleném postupu SSD se zkušební těleso nejdříve nasytí vodou a poté se jeho povrch osuší vlhkou jelenicí.

4.3.2.3 Příprava zkušebních těles a zařízení

Zkušebním tělesem je zhutněná asfaltová deska. Základem zařízení pro stanovení objemové hmotnosti je laboratorní váha s možností měření na suchu i ve vodě s přesností vážení nejméně $\pm 0,1$ g. Dále pro měření hmotnosti ve vodě je zapotřebí vodní lázeň a teploměr s přesností $\pm 1,0$ °C. Pro povrchové osušení zkušebního tělesa je vhodné použít jelenici. Před zkouškou je nutné zajistit, aby zkušební těleso bylo suché. Pokud by bylo těleso vlhké, je nutné jej osušit na ustálenou hmotnost v laboratorní sušárně.

4.3.2.4 Postup zkoušky

V prvním kroku se nejprve stanoví hmotnost suchého zkušebního tělesa m_1 tak, že se vloží na laboratorní váhy a zapíše se jeho suchá hmotnost. Následně se na laboratorní váhy připevní kovový koš vytáruje se hodnota vah a vloží se do něj zkušební těleso. Kovový koš i se zkušební tělesem se ponoří do vodní lázně, která je

udržována při známé zkušební teplotě, u které se zjistí hustota. Zkušební těleso by mělo být ve vodě ponořené na dobu alespoň 30 minut. Po ustálení hmotnosti se může zapsat hodnota m_2 , tedy hmotnost zkušební tělesa ve vodě. V posledním kroku se zjistí hmotnost zkušební tělesa po vytažení m_3 , která se zjistí tak, že se zkušební těleso vytáhne z vodní lázně, povrchově se osuší pomocí jelenice, a nakonec se zváží na laboratorní váze [10].

4.3.2.5 Výpočet

Objemovou hmotnost ztuhlé asfaltové směsi dle postupu objemová hmotnost – nasycený suchý povrch (SSD, lze zjistit dle následujícího vztahu [10]:

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

- kde: ρ_{ssd} je objemová hmotnost SSD [kg/m^3],
 m_1 hmotnost suchého zkušební tělesa [g],
 m_2 hmotnost zkušební tělesa ve vodě [g],
 m_3 hmotnost zkušební tělesa nasyceného vodou a povrchově osušeného [g],
 ρ_w hustota vody při zkušební teplotě [kg/m^3].



Obrázek 11: Vážení zkušební desky ve vodě

4.3.3 Příprava zkušebních těles

Pro účely diplomové práce byly dodány zhutněné asfaltové desky. Celkem bylo zasláno 8 zhutněných asfaltových desek, od každé asfaltové směsi dvě desky. Zkušební tělesa se získají vyřezáním z asfaltových desek pomocí pily s diamantovým kotoučem na hranolová zkušební tělesa tzv. trámečky, na kterých se stanoví nízkoteplotní vlastnosti, a komolé klíny tzv. trapezoidy pro zjištění modulu tuhosti.



Obrázek 12: Řezání zkušebních těles

Při výrobě asfaltové desky se standardně hutní deska o rozměrech 240 x 320 mm a výšce 40–90 mm. Za účelem zkoušení byly zaslány asfaltové desky o výšce 60 mm, což znamenalo broušení zkušebních těles viz obrázek 13 na hodnotu 50 mm, protože požadovaná tloušťka trapezoidů i tráměček je 50 mm. Po nařezání se nechají zkušební tělesa vyschnout při laboratorní teplotě a jsou zjištěny jejich rozměry a hmotnost, které jsou zapsány do záznamového protokolu.



Obrázek 13: Broušení zkušebních těles



Obrázek 14: Příprava lepidla

Komolý klín má standardně tloušťku 50 mm, dolní hrana o šířce 70 mm, horní hrana o šířce 25 mm a délka je 250 mm viz obrázek 15. Po vyschnutí trapezoidů se zkušební tělesa nalepí na ocelovou destičku a na špičku trapezoidu se nalepí ocelový háček. Pro nalepení se používá epoxidová pryskyřice, která se smíchá s tvrdidlem a filerem. Po namíchání na požadovanou hustotu se lepidlo nanese na ocelovou desku pomocí špachtle a vzorek se při mírném stlačení nastaví do požadované polohy. Po částečném zaschnutí lepidla v podložce se malá vrstva lepidla nanese na spodní hranu háčku a přilepí na trapezoid. Před samotnou zkouškou je vhodné nechat lepidlo zatvrdnout po dobu nejméně 2 dnů.



Obrázek 15: Komolý klín (trapezoid)

Standardní rozměry trámečku jsou 50 mm x 50 mm x 200 mm, kdy výška je zvolena jako čtyřnásobek velikosti hrany tzn. 200 mm. Po vyschnutí trámečků se zkušební tělesa do speciálního stojanu. Pro nalepení se používá epoxidová pryskyřice, která se smíchá s tvrdidlem a filerem. Po namíchání na požadovanou hustotu se lepidlo nanese na ocelovou podložky pomocí špachtle a vzorek se při mírném stlačení nastaví do požadované polohy.



Obrázek 16: Kovový rám pro centrické nalepování vzorků

4.3.4 Stanovení modulu tuhosti asfaltové směsi

Jedná se o funkční zkoušku asfaltových směsí, která je popsána v normě ČSN EN 12697-26 neboli Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 26: Tuhost. Pro zjištění charakteristik tuhosti asfaltových směsí norma uvádí několik zkušebních postupů. V praktické části diplomové práce byla použita dvoubodová zkouška ohybem na tělesech jednostranně vetknutého komolého klínu (2PB-TR) [11].

4.3.4.1 Termíny a definice

Komplexní modul E^* – vztah mezi napětím a přetvořením pro lineárně visko-elastický materiál vystavený harmonickému (sinusovému) zatížení v čase t , s použitím napětí, jehož výsledkem je poměrné přetvoření, které má posun o fázový úhel v porovnání s průběhem napětí. Komplexní modul je charakterizován dvěma složkami, reálnou a imaginární. E_1 představuje reálnou složku, která charakterizuje pružné vlastnosti asfaltové směsi. E_2 je imaginární složka komplexního modulu, která charakterizuje viskózní vlastnosti asfaltové směsi. Komplexní modul E^* lze vyjádřit ve tvaru:

$$\begin{aligned}E^* &= E_1 + iE_2 \\E_1 &= |E^*| \times \cos(\Phi) \\E_2 &= |E^*| \times \sin(\Phi)\end{aligned}$$

kde: E^* představuje komplexní modul [MPa],
 E_1 je reálná složka komplexního modulu [MPa],
 E_2 je imaginární složka komplexního modulu [MPa],
 Φ fázový úhel [°].

Modul tuhosti S – je roven absolutní hodnotě komplexního modulu. Lze jej vyjádřit ve tvaru:

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

kde: S představuje modul tuhosti [MPa],
 σ_0 je amplituda maximálního napětí [MPa],
 ε_0 je amplituda maximálního přetvoření [m/m].

4.3.4.2 Podstata zkoušky

Vzorky tvaru komolého klínu (trapezoid) jsou deformovány v rozsahu lineárního přetvoření, a to buď při vyvozování stejného zatěžování, nebo při zatěžování konstantním přetvořením. Měří se amplituda napětí a poměrného přetvoření spolu s fázovým úhlem mezi napětím a poměrným přetvořením.

4.3.4.3 Příprava zkušebních těles a zařízení

Příprava zkušebních těles tvaru komolého klínu je uvedena v kapitole 4.3.3. Volí se vhodný rozsah frekvence. V silniční laboratoři se používá sada frekvencí 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz a znovu počáteční frekvence 5 Hz. Poslední měření je pro kontrolu, zdali zkušební těleso nebylo během zatěžování různými frekvencemi poškozeno. Pokud se tuhosti zkušebního tělesa při prvním a při posledním měření při stejné frekvenci a za stejné teploty liší o více než 3 %, lze konstatovat, že zkušební těleso je poškozeno, a proto jej nelze použít pro další zkoušení. Je potřeba kontrolovat teplotu v klimatizované komoře v blízkosti zkušebního tělesa, která musí být stejná jako je předepsaná teplota s přesností $\pm 0,5$ °C. Před samotnou zkouškou musí být zkušební těleso temperováno při zkušební teplotě na dobu nejméně 4 hodin. V silniční laboratoři se uplatňuje sada teplot -5 °C, 10 °C, 15 °C, 25 °C a 40 °C.



Obrázek 17: Detail příchycení trapezoidu na háček

4.3.4.4 Postup zkoušky

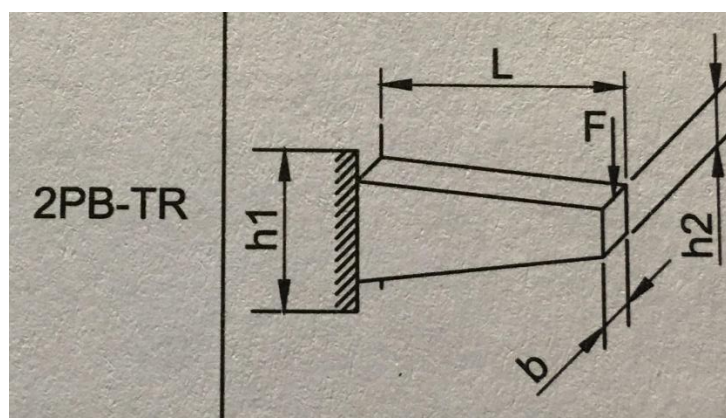
Zkouška probíhá tak, že se vzorky nejprve temperují tak, jak bylo popsáno v předchozí kapitole. Měření probíhá na jednotlivých zkušebních tělesech postupně tak, že se využívá postup 2PB-TR [11]. Nejdříve je nutné těleso přes podložku řádně připevnit pomocí šroubů do rámu zařízení, tak aby byla garantována co nejvyšší tuhost. Následně se připevní táhlo, které bude později budit kmitání na háček opět pomocí šroubů a může se přistoupit k vlastnímu měření. Zkušební zařízení pro měření modulu tuhosti je zobrazeno na obrázku 18.



Obrázek 18: Zařízení pro měření modulu tuhosti asfaltových směsí

4.3.4.5 Vyjádření výsledků

Hodnoty měření získané během zkoušky jsou vyvozená síla F [N], posun z [mm] a jejich fázový úhel Φ [°]. Místo, kde jsou tyto veličiny měřeny, lze vidět na obrázku 19.



Obrázek 19: Dvoubodové zatěžování – trapezoid [1]

Dále lze vypočítat komplexní modul tuhosti, respektive složky komplexního modulu tuhosti. Reálnou složku E_1 [MPa] a imaginární složku E_2 [MPa].

$$E_1 = \gamma \times \left(\frac{F}{Z} \times \cos(\Phi) + 10^{-6} \times \mu \times \omega^2 \right)$$

$$E_2 = \gamma \times \frac{F}{Z} \times \sin(\Phi)$$

kde: γ představuje faktor tvaru jako funkce velikosti a tvaru zkušebního tělesa [1/mm],

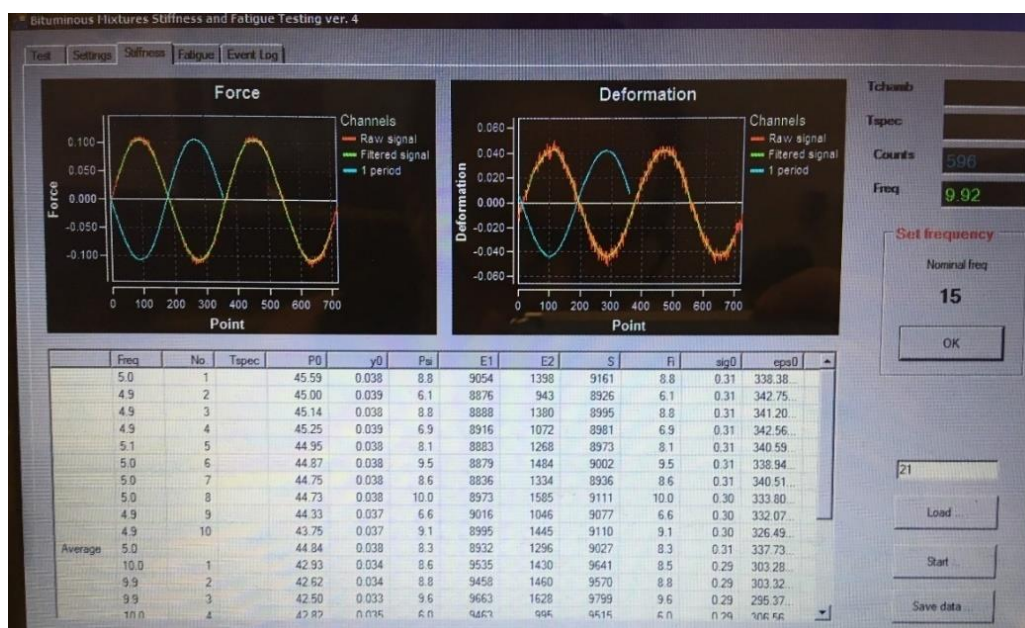
$$\gamma = \frac{12L^3}{b \times (h_1 - h_2)^3} \times \left[\left(2 - \frac{h_2}{2h_1} \right) \times \frac{h_2}{h_1} - \frac{3}{2} - \ln \frac{h_2}{h_1} \right]$$

μ je faktor hmotnosti, který je funkcí hmotnosti zkušebního tělesa M [g] a hmotností pohyblivých částí m [g], které svojí setrvačnou silou ovlivňují výslednou sílu,

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

ω kruhová frekvence vynuceného kmitání [s^{-1}].

V neposlední řadě lze vyjádřit modul tuhosti, který je roven absolutní hodnotě komplexního modulu. Výsledkem stanovení modulu tuhosti je pak aritmetický průměr dílčích výsledků modulu tuhosti jednotlivých zkušebních těles [11].



Obrázek 20: Ukázka měření modulu tuhosti pomocí výpočetního programu

4.3.5 Zkouška nízkoteplotních vlastností s rovnoměrným řízeným poklesem teploty (TSRST)

Jedná se o funkční zkoušku asfaltových směsí, která je popsána v normě ČSN EN 12697-46 neboli Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 46: Nízkoteplotní vlastnosti a tvorba trhlin pomocí jednoosé zkoušky tahem. Norma specifikuje jednoosé zkoušky tahem pro určení charakteristik odolnosti asfaltové směsi vůči tvorbě trhlin při nízkých teplotách. V praktické části diplomové práce byla použita zkouška nízkoteplotních vlastností s rovnoměrným řízeným poklesem teploty (TSRST) [12].

4.3.5.1 Termíny a definice

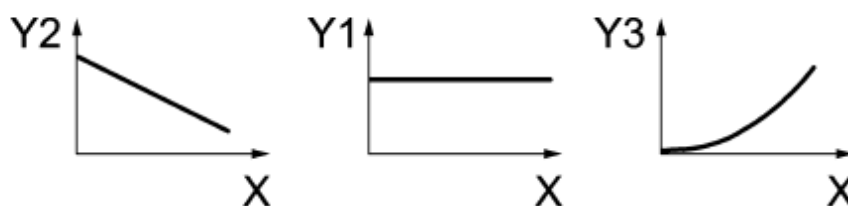
Kryogenní napětí – tahové napětí vyvolané zamezovaným tepelným smrštěním při teplotě T .

Napětí při porušení – kryogenní napětí, které způsobí porušení zkušebního tělesa při zkoušce TSRST.

Teplota při porušení – teplota, při které kryogenní napětí vyvolá porušení zkušebního tělesa při zkoušce TSRST.

4.3.5.2 Podstata zkoušky

Při zkoušce TSRST je vzorek s udržovanou konstantní délkou vystaven poklesu teploty s konstantní rychlostí. Vlivem zamezovaného tepelného smršťování se ve zkušebním tělese vytváří kryogenní napětí. Výsledkem je šíření kryogenního napětí při teplotě $\sigma_{cry}(T)$ a napětí způsobujícího porušení $\sigma_{cry, failure}$ při teplotě $T_{failure}$, při které dojde k porušení.



Obrázek 21: Podstata zkoušky TSRST [7]

Legenda k obrázku 21: X – čas, Y1 – deformace, Y2 – teplota, Y3 – napětí.

4.3.5.3 Příprava zkušebních těles a zařízení

V případě každé kombinace asfaltového materiálu a zkušebních podmínek (teplota a úroveň namáhání) se zkouší nejméně tři zkušební tělesa. Zkouška TSRST se provádí na hranolových zkušebních tělesech (trámečkách) o standardních rozměrech 50 mm x 50 mm x 200 mm, kde délka se volí jako čtyřnásobek velikosti šířky/výšky trámečku. Příprava zkušebních těles tvaru trámečku je uvedena v kapitole 4.3.3. Zkouška probíhá ve zkušebním zařízení CYKLON-40 viz obrázek 22.

4.3.5.4 Postup zkoušky

Zkušební těleso se vyjme z rámu určeného pro centraci, poté se zkušební těleso i s podložkami šroubovým pohybem upevní do zkušebního zařízení. Součástí zkušebního zařízení CYKLON-40 jsou snímače posunu, které je potřeba upevnit k podložkám zkušebního tělesa. Důležitá je teplota komory a po uplynutí 15 minut začne vlastní měření. Při zkoušce jsou zaznamenávány hodnoty.

Při zkoušce TSRST se udržuje konstantní délka zkušebního tělesa, zatímco se jeho teplota v čase snižuje. V důsledku zamezovaného tepelného smršťování je zkušební těleso vystaveno kryogennímu (tahovému) napětí.



Obrázek 22: Pohled na zkušební zařízení CYKLON-40

4.3.5.5 Vyjádření výsledků

Musí se zaznamenat časově závislé kryogenní napětí $\sigma_{cry}(T)$, napětí při porušení $\sigma_{cry, failure}$ a teplota při porušení $T_{failure}$.

Výsledkem zkoušky je grafické znázornění, z něhož lze zjistit maximální sílu při porušení, maximální napětí při porušení, teplotu v komoře při porušení a teplotu vzorku při porušení [12].



Obrázek 23: Detail zkušebního tělesa ve zkušebním zařízení CYKLON-40

4.4 Výsledky a vyhodnocení

V této kapitole je pozornost věnována výsledkům zkoušek, které byly provedeny v rámci praktické části diplomové práce na zkušebních tělesech jednotlivých asfaltových směsí, které jsou uvedeny v kapitole 4.2. Konkrétně se jedná o dvoubodovou zkoušku ohybem na tělesech tvaru jednostranně vetknutého komolého klínu (2PB-TR) [10] a zkoušku nízkoteplotních vlastností s rovnoměrným řízeným poklesem teploty (TSRST) [11]. Dílčí výsledky zkušebních těles a výsledné průměrné hodnoty jednotlivých asfaltových směsí jsou zpracovány do tabulek a grafů, vyhodnoceny a shrnuty v závěru této diplomové práce.

4.4.1 Výsledky objemové hmotnosti

Pro účely diplomové práce byly dodány zhutněné asfaltové desky. Celkem bylo zasláno 8 zhutněných asfaltových desek, od každé asfaltové směsi dvě desky.

V tabulce 13 je uvedena míra zhutnění jednotlivých asfaltových zhutněných desek použitých pro účely diplomové práce. Požadovaná míra zhutnění byla od 99 do 101 %. Lze říci, že na základě níže uvedených hodnot míry zhutnění všechny asfaltové desky vyhověly požadavkům.

Tabulka 13: Objemové hmotnosti a míra zhutnění asfaltových desek

Objemová hmotnost zhutněné asfaltové směsi						
Označení	m ₁ [g]	m ₂ [g]	m ₃ [g]	obj. hm. těles vážením [kg/m ₃]	obj. hm. těles [kg/m ₃]	míra zhutnění [%]
ACO 11+	11538	6750	11573	2392	2394	100
	11541	6762	11572	2399		100
ACO 11+ F	11642	6798	11672	2389	2408	99
	11638	6790	11668	2386		99
ACP 16+	11718	6905	11772	2408	2375	101
	11713	6910	11770	2410		101
ACP 16+ F	11393	6682	11474	2378	2371	100
	11403	6698	11479	2385		101

4.4.2 Výsledky modulu tuhosti

V rámci praktické části diplomové práce bylo provedeno stanovení tuhosti, které je blíže popsáno v kapitole 4.3.4. Měření bylo stanoveno při zkušebních teplotách -5 °C, 10 °C, 15 °C, 25 °C a 40 °C při působení zatěžovacích frekvencí 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz a 25 Hz. Cílem zkoušky bylo zjistit hodnotu modulu tuhosti asfaltové směsi.

K dispozici byly čtyři asfaltové směsi. Za účelem zkoušení byly vyrobeny zkušební tělesa tvaru komolého klínu (trapezoid). Každou asfaltovou směs reprezentovalo sedm zkušebních těles. Celkem bylo vyrobeno dvacet osm trapezoidů. Dílčí výsledky modulu tuhosti jednotlivých zkušebních těles jsou zpracovány do tabulek, které jsou v příloze této diplomové práce. Výsledné průměrné hodnoty modulu tuhosti reprezentujících jednotlivé asfaltové směsi jsou zpracovány do nadcházejících tabulek a grafů.



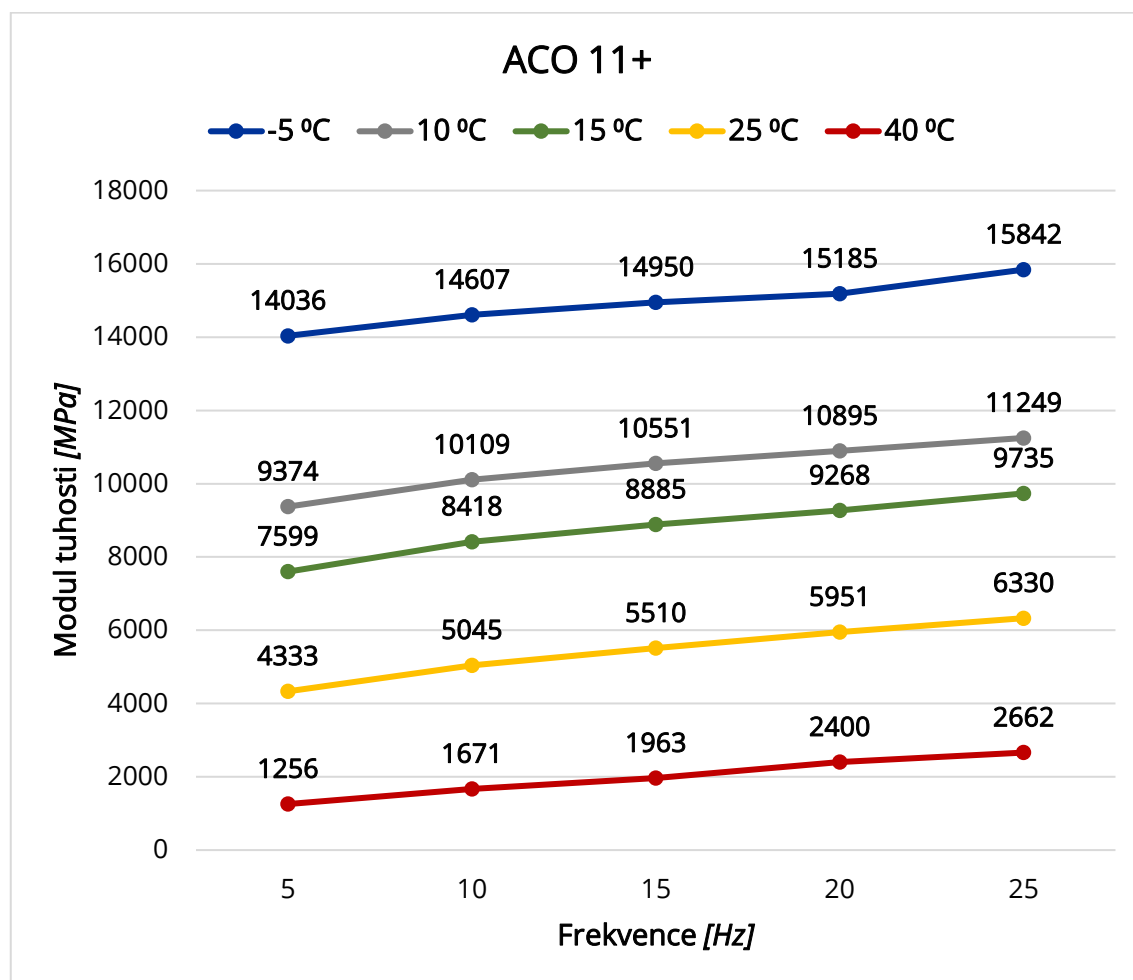
Obrázek 24: Ukázka trapezoidů směsi ACP 16+ F1_4 a ACP 16+ 2_3

4.4.2.1 Asfaltová směs ACO 11+

První zkoušenou asfaltovou směsí byla směs ACO 11+. K dispozici bylo sedm zkušebních těles tvaru komolého klínu. V tabulce 14 jsou uvedeny výsledné průměrné hodnoty modulu tuhosti reprezentující tuto asfaltovou směs.

Tabulka 14: Výsledné průměrné hodnoty modulu tuhosti směsi ACO 11+

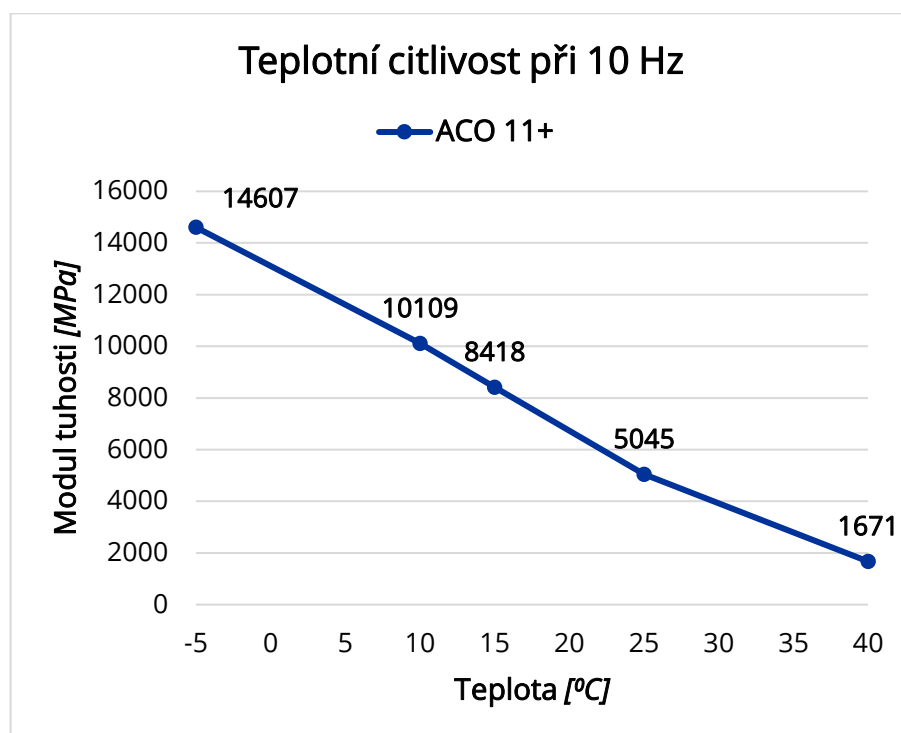
Průměrné hodnoty modulu tuhosti [MPa]						
ACO 11+		Frekvence [Hz]				
		5	10	15	20	25
Teplota [°C]	-5	14036	14607	14950	15185	15842
	10	9374	10109	10551	10895	11249
	15	7599	8418	8885	9268	9735
	25	4333	5045	5510	5951	6330
	40	1256	1671	1963	2400	2662



Graf 16: Výsledné průměrné hodnoty modulu tuhosti směsi ACO 11+

Dle technických podmínek TP 170 – Navrhování vozovek pozemních komunikací [14], [16] je požadována hodnota modulu tuhosti při teplotě 15 °C a frekvenci zatěžování 10 Hz. U asfaltové směsi ACO 11+ byla stanovena tato hodnota modulu tuhosti na 8418 MPa. Oproti požadavkům technických podmínek byla hodnota modulu tuhosti stanovena také při teplotách -5 °C, 10 °C, 25 °C a 40 °C.

Při teplotě -5 °C se hodnoty modulu tuhosti pohybovaly v závislosti na frekvenci zatěžování od 14036 do 15842 MPa. Při teplotě 10 °C se hodnoty modulu tuhosti pohybovaly v závislosti na frekvenci zatěžování od 9374 do 11249 MPa. Při teplotě 15 °C se hodnoty modulu tuhosti pohybovaly v závislosti na frekvenci zatěžování od 7599 do 9735 MPa. Při teplotě 25 °C se hodnoty modulu tuhosti pohybovaly v závislosti na frekvenci zatěžování od 4333 do 6330 MPa. Při teplotě 40 °C se hodnoty modulu tuhosti pohybovaly v závislosti na frekvenci zatěžování od 1256 do 2662 MPa. Na základě grafu 16 lze říci, že s rostoucí frekvencí zatěžování stoupá také hodnota modulu tuhosti, a to při všech zkušebních teplotách. V grafu 17 je zobrazena teplotní citlivost tzn. vliv změny teploty na průměrnou hodnotu modulu tuhosti při frekvenci zatěžování 10 Hz.



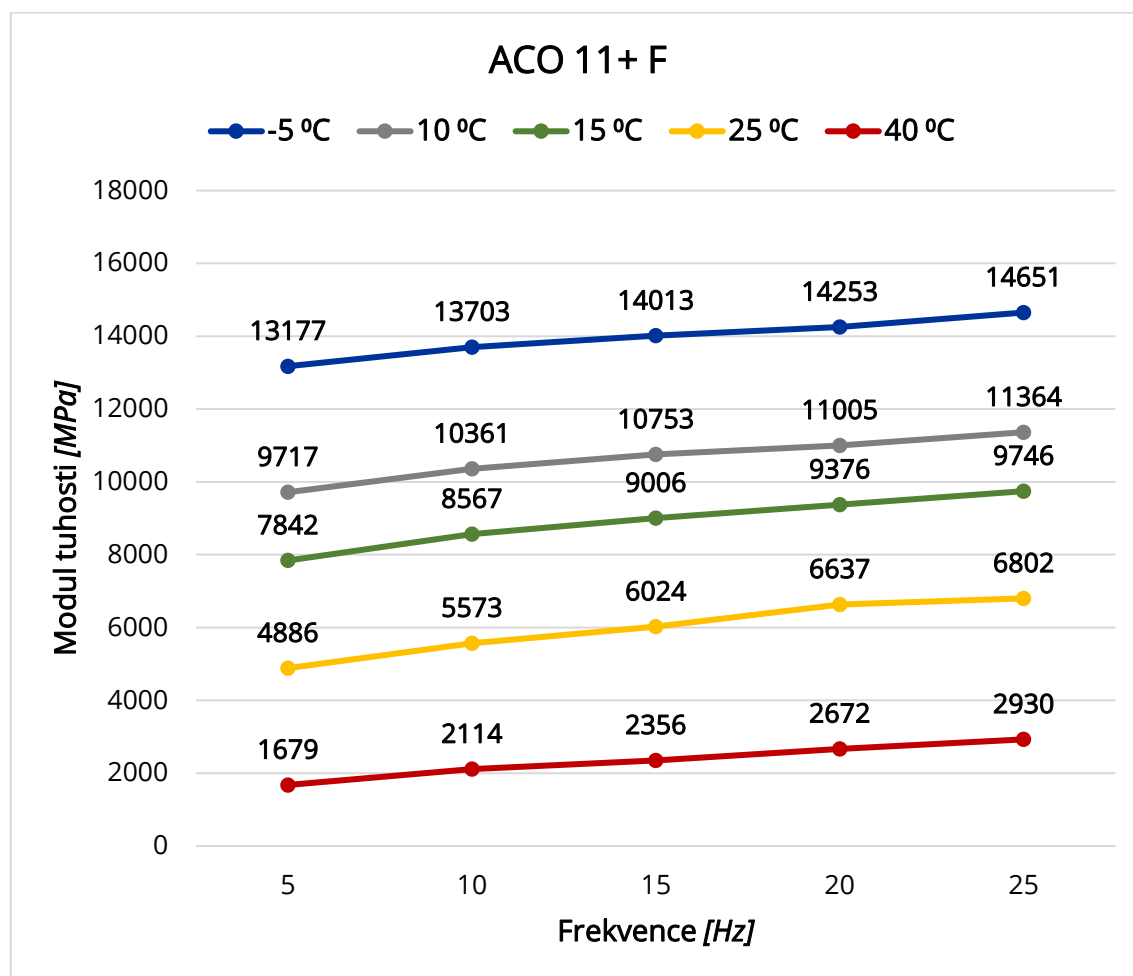
Graf 17: Teplotní citlivost směsi ACO 11+ při 10 Hz

4.4.2.2 Asfaltová směs ACO 11+ F

Druhou zkoušenou asfaltovou směsí byla směs ACO 11+ F. K dispozici bylo sedm zkušebních těles tvaru trapezoidu. V tabulce 15 jsou uvedeny výsledné průměrné hodnoty modulu tuhosti reprezentující tuto asfaltovou směs.

Tabulka 15: Výsledné průměrné hodnoty modulu tuhosti směsi ACO 11+ F

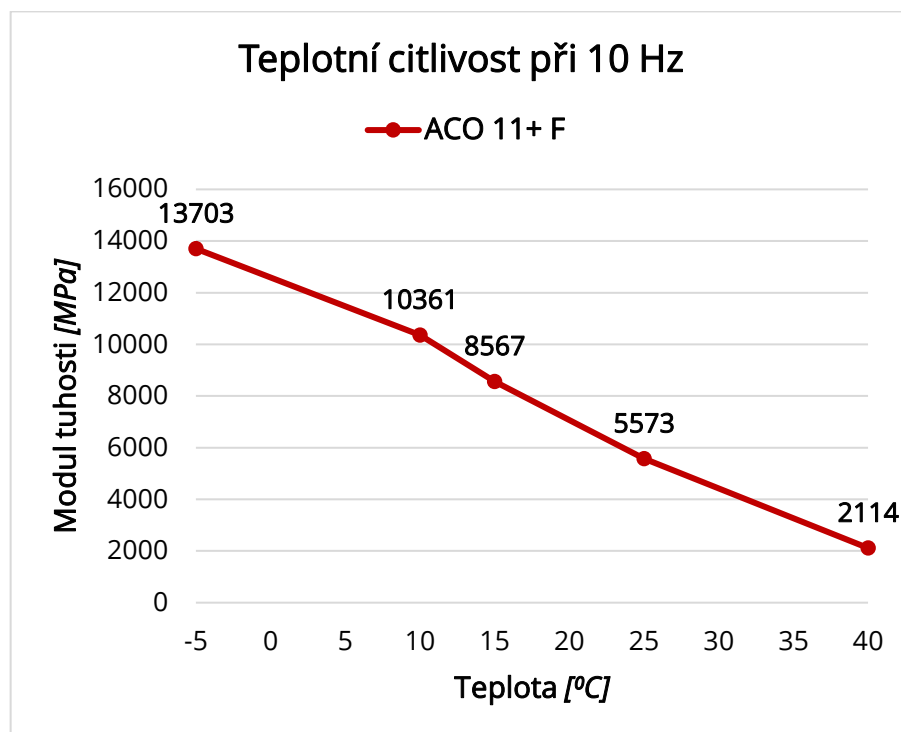
Průměrné hodnoty modulu tuhosti [MPa]						
ACO 11+ F		Frekvence [Hz]				
		5	10	15	20	25
Teplota [°C]	-5	13177	13703	14013	14253	14651
	10	9717	10361	10753	11005	11364
	15	7842	8567	9006	9376	9746
	25	4886	5573	6024	6637	6802
	40	1679	2114	2356	2672	2930



Graf 18: Výsledné průměrné hodnoty modulu tuhosti směsi ACO 11+ F

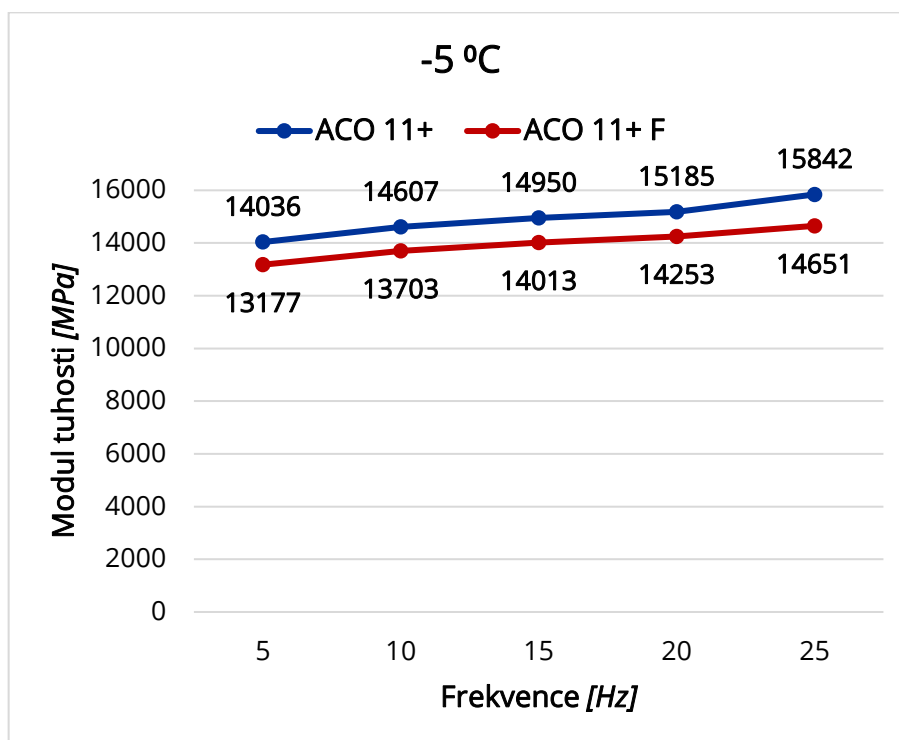
Dle TP 170 [14], [16] je požadována hodnota modulu tuhosti při teplotě 15 °C a frekvenci zatěžování 10 Hz. U asfaltové směsi ACO 11+ F byla stanovena tato hodnota modulu tuhosti na 8567 MPa. Oproti požadavkům technických podmínek byla hodnota modulu tuhosti stanovena také při teplotách -5 °C, 10 °C, 25 °C a 40 °C.

Při teplotě -5 °C se hodnoty modulu tuhosti pohybovaly v závislosti na frekvenci zatěžování od 13177 do 14561 MPa. Při teplotě 10 °C se hodnoty modulu tuhosti pohybovaly v závislosti na frekvenci zatěžování od 9717 do 11364 MPa. Při teplotě 15 °C se hodnoty modulu tuhosti pohybovaly v závislosti na frekvenci zatěžování od 7842 do 9746 MPa. Při teplotě 25 °C se hodnoty modulu tuhosti pohybovaly v závislosti na frekvenci zatěžování od 4886 do 6802 MPa. Při teplotě 40 °C se hodnoty modulu tuhosti pohybovaly v závislosti na frekvenci zatěžování od 1679 do 2930 MPa. Na základě grafu 18 lze říci, že s rostoucí frekvencí zatěžování stoupá také hodnota modulu tuhosti, a to při všech zkušebních teplotách. V grafu 19 je zobrazena teplotní citlivost tzn. vliv změny teploty na průměrnou hodnotu modulu tuhosti při frekvenci zatěžování 10 Hz.

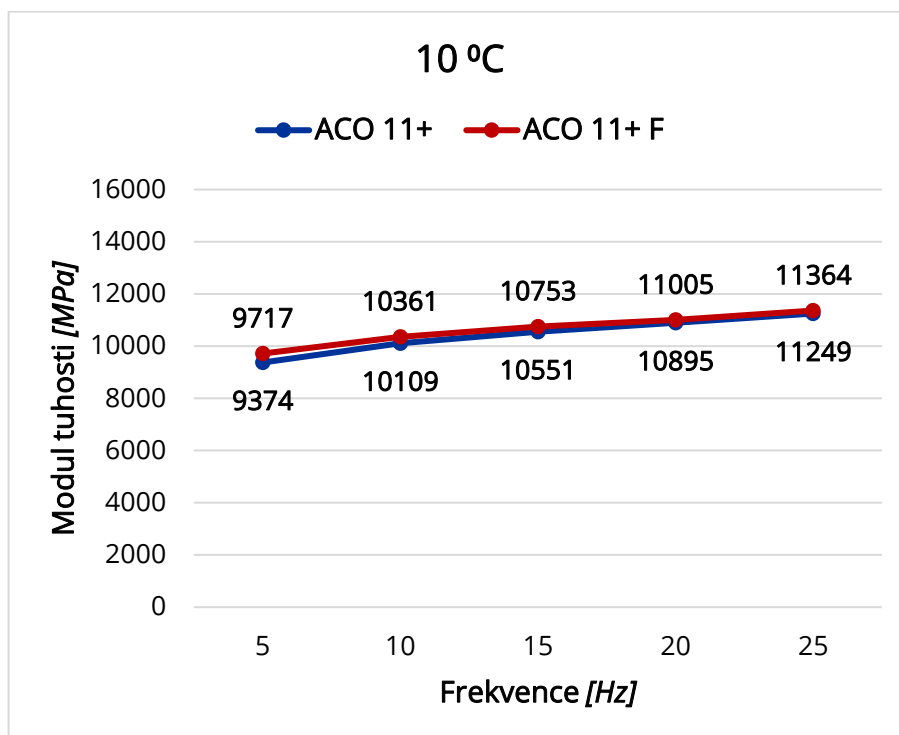


Graf 19: Teplotní citlivost směsi ACO 11+ F při 10 Hz

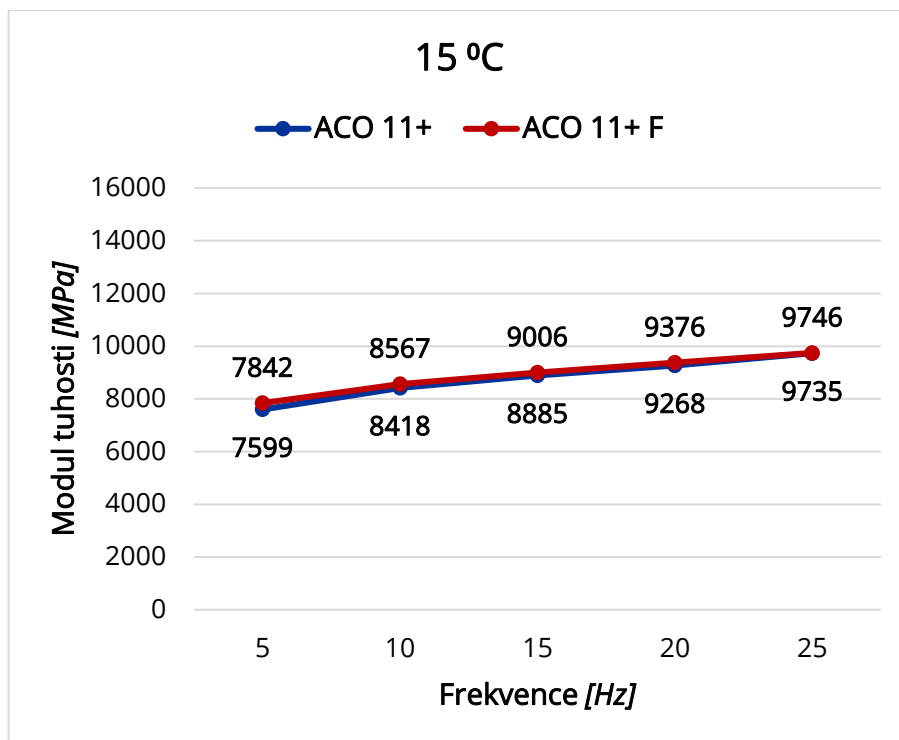
4.4.2.3 Porovnání ACO 11+/ACO 11+ F



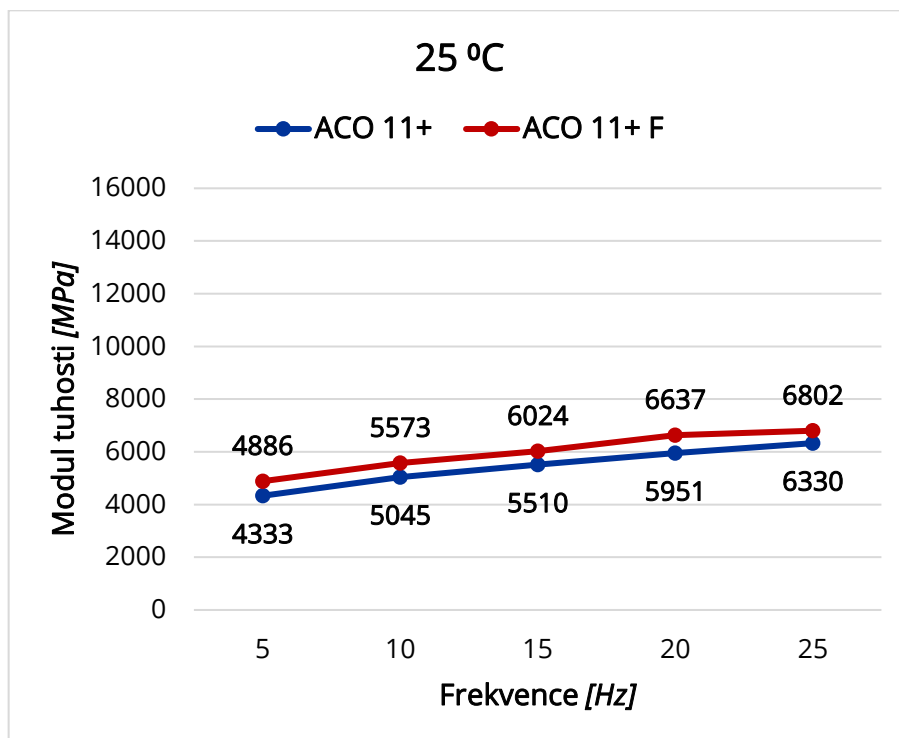
Graf 20: Porovnání výsledných průměrných hodnot modulu tuhosti směsi ACO 11+ a ACO 11+ F při teplotě -5 °C



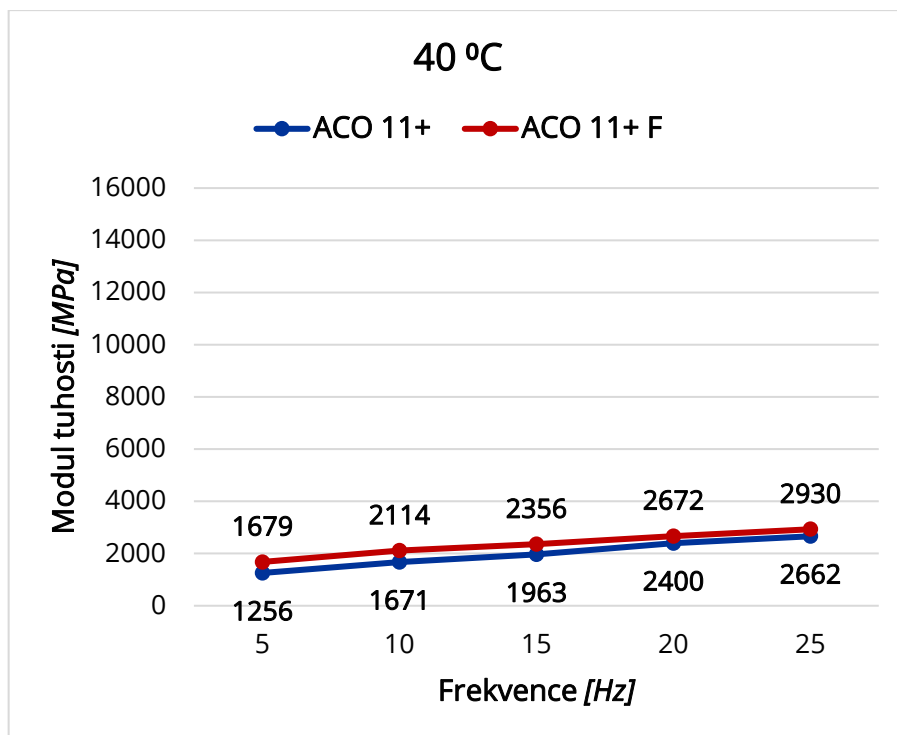
Graf 21: Porovnání výsledných průměrných hodnot modulu tuhosti směsi ACO 11+ a ACO 11+ F při teplotě 10 °C



Graf 22: Porovnání výsledných průměrných hodnot modulu tuhosti směsi ACO 11+ a ACO 11+ F při teplotě 15 °C



Graf 23: Porovnání výsledných průměrných hodnot modulu tuhosti směsi ACO 11+ a ACO 11+ F při teplotě 25 °C

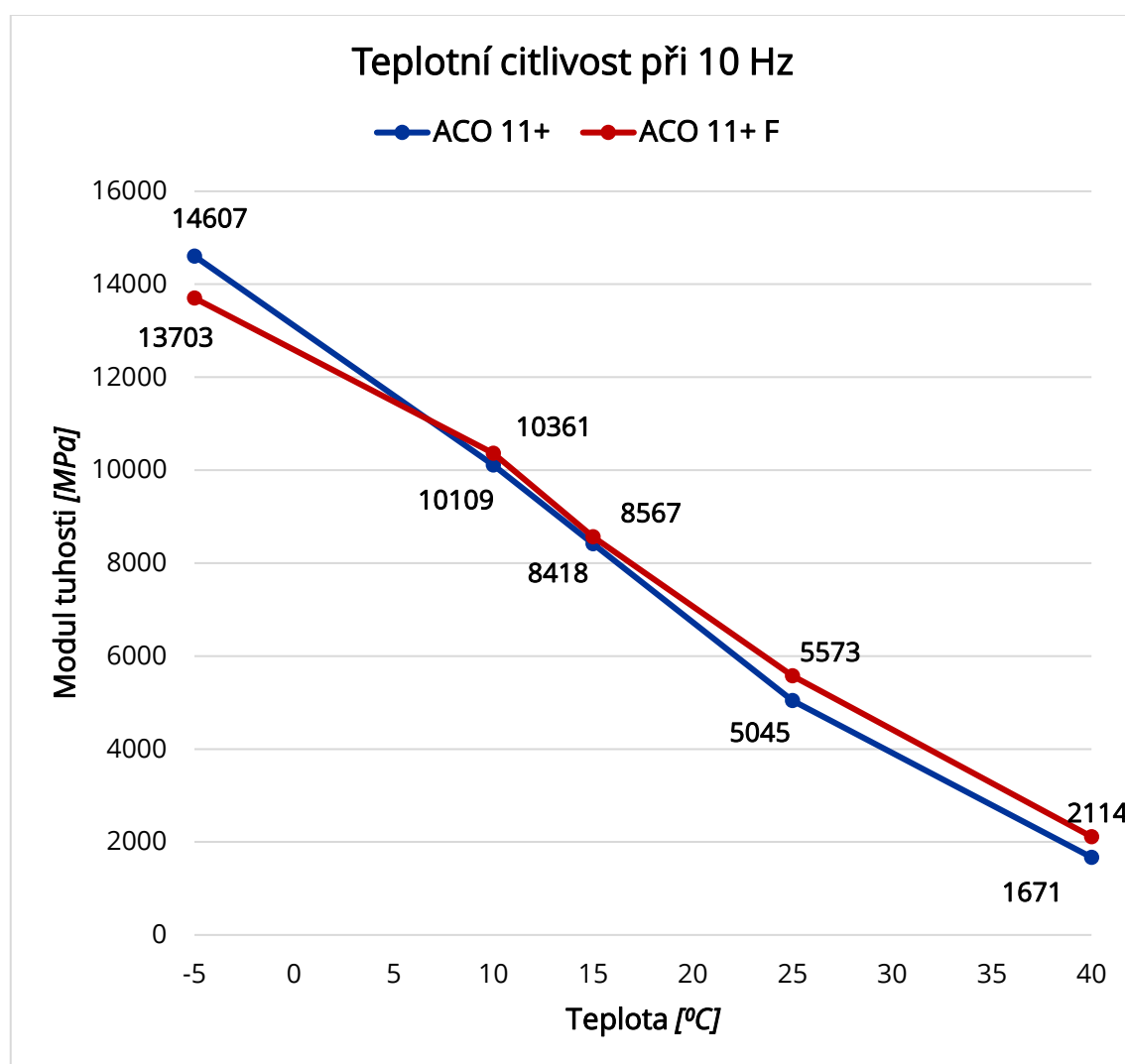


Graf 24: Porovnání výsledných průměrných hodnot modulu tuhosti směsi ACO 11+ a ACO 11+ F při teplotě 40 °C

Jedním z cílů diplomové práce bylo porovnat vybrané funkční parametry asfaltových směsí vyrobených ve dvou variantách – s běžným pojivem (ACO 11+) a s pěnoasfaltovým pojivem (ACO 11+ F). Prvním porovnávaným funkčním parametrem byla tuhost.

Na základě grafického znázornění viz grafy 20-24 lze konstatovat, že křivka reprezentující standardní za horka vyráběnou asfaltovou směs ACO 11+ se téměř vždy překrývá s křivkou, která reprezentuje pěnoasfaltovou směs ACO 11+ F, a to při všech zkušebních teplotách. Znamená to jediné, že tuhost pěnoasfaltových směsí je srovnatelná s tuhostí standardních za horka vyráběných asfaltových směsí.

V grafu 25 lze vidět porovnání teplotní citlivosti asfaltové směsi ACO 11+ a ACO 11+ F při frekvenci zatěžování 10 Hz. Z grafického znázornění průběhu křivek reprezentujících tyto směsi vyplývá, že pokles teploty má na hodnotu modulu tuhosti u obou směsí přibližně stejný vliv. K výpočtu a posouzení konstrukce netuhých vozovek v souladu s technickými podmínkami TP 170 - Navrhování vozovek pozemních komunikací [14], [16] slouží program LayEPS. Do návrhové metody vstupuje hodnota modulu tuhosti při teplotě 15 °C a frekvenci zatěžování 10 Hz. V tomto případě se jedná o hodnoty 8418 MPa u směsi ACO 11+ a 8567 MPa u směsi ACO 11+ F, které jsou téměř shodné.



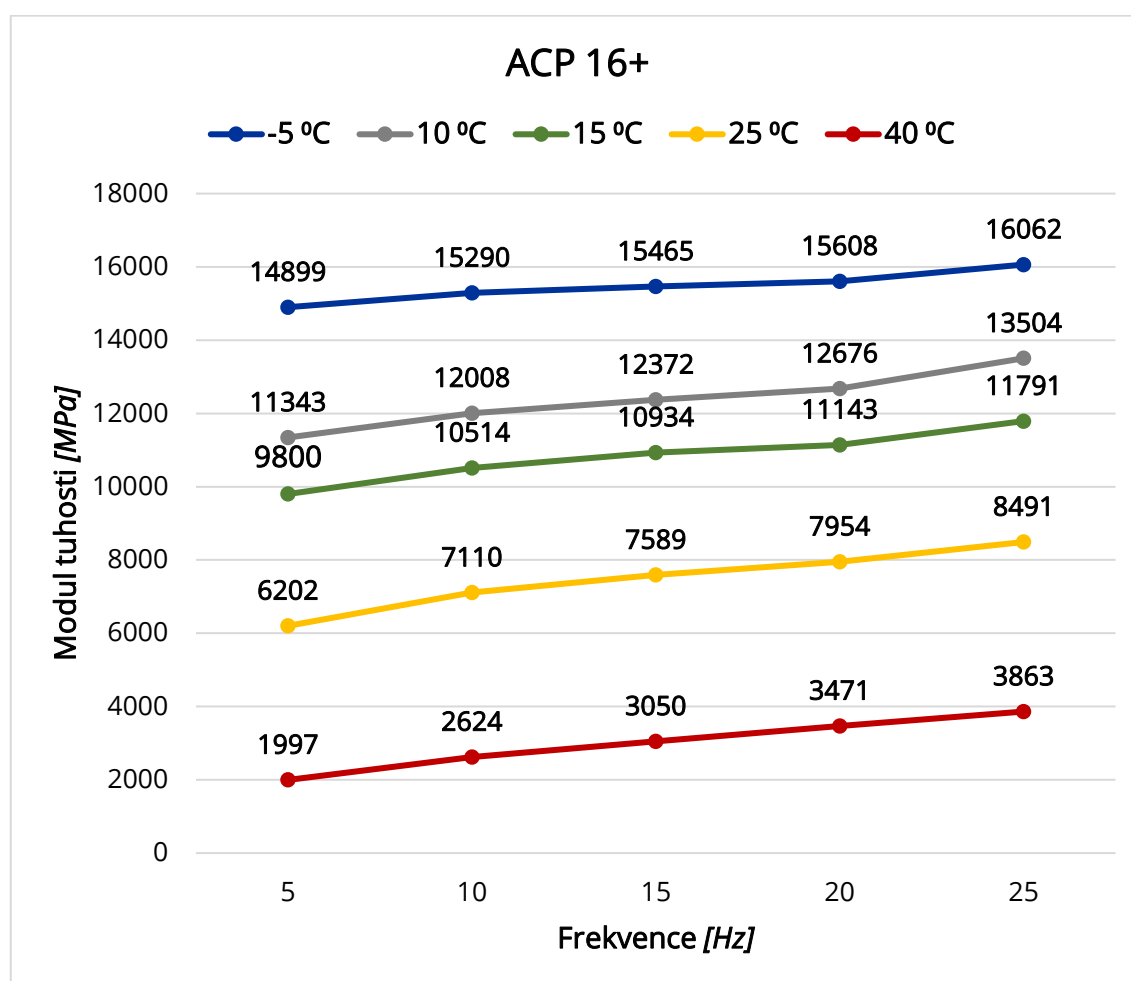
Graf 25: Porovnání teplotní citlivosti směsi ACO 11+ a ACO 11+ F při 10 Hz

4.4.2.4 Asfaltová směs ACP 16+

Třetí zkoušenou asfaltovou směsí byla směs ACP 16+. K dispozici bylo sedm zkušebních těles tvaru komolého klínu. V tabulce 16 jsou uvedeny výsledné průměrné hodnoty modulu tuhosti reprezentující tuto asfaltovou směs.

Tabulka 16: Výsledné průměrné hodnoty modulu tuhosti směsi ACP 16+

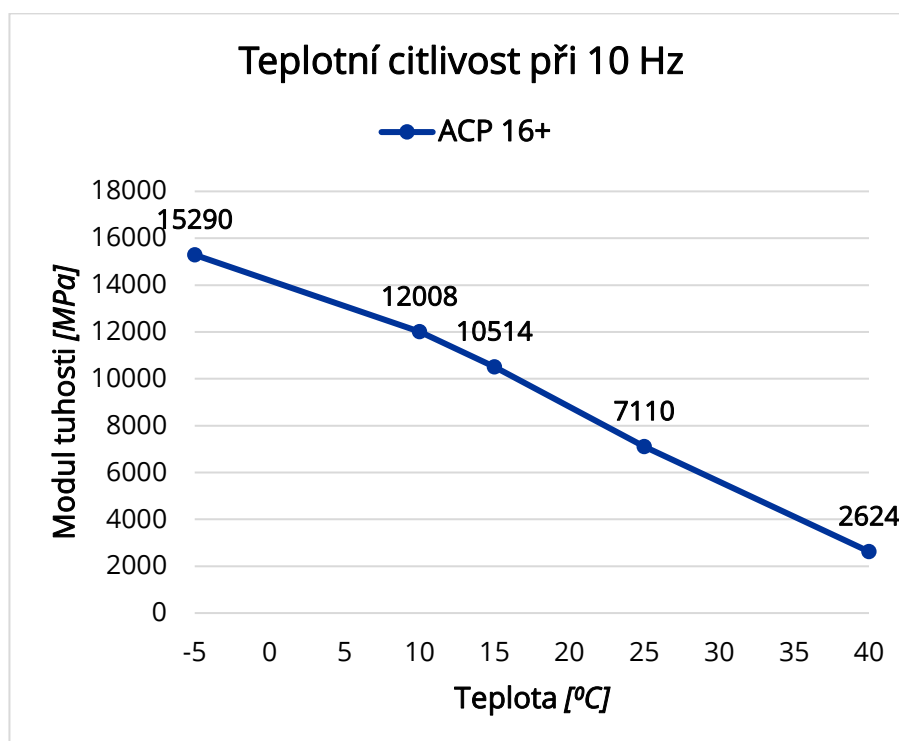
Průměrné hodnoty modulu tuhosti [MPa]						
ACP 16+		Frekvence [Hz]				
		5	10	15	20	25
Teplota [°C]	-5	14899	15290	15465	15608	16062
	10	11343	12008	12372	12676	13504
	15	9800	10514	10934	11143	11791
	25	6202	7110	7589	7954	8491
	40	1997	2624	3050	3471	3863



Graf 26: Výsledné průměrné hodnoty modulu tuhosti směsi ACP 16+

Dle TP 170 [14], [16] je požadována hodnota modulu tuhosti při teplotě 15 °C a frekvenci zatěžování 10 Hz. U asfaltové směsi ACP 16+ byla stanovena tato hodnota modulu tuhosti na 10514 MPa. Oproti požadavkům technických podmínek byla hodnota modulu tuhosti stanovena také při teplotách -5 °C, 10 °C, 25 °C a 40 °C.

Při teplotě -5 °C se hodnoty modulu tuhosti pohybovaly v závislosti na frekvenci zatěžování od 14899 do 16062 MPa. Při teplotě 10 °C se hodnoty modulu tuhosti pohybovaly v závislosti na frekvenci zatěžování od 11343 do 13504 MPa. Při teplotě 15 °C se hodnoty modulu tuhosti pohybovaly v závislosti na frekvenci zatěžování od 9800 do 11791 MPa. Při teplotě 25 °C se hodnoty modulu tuhosti pohybovaly v závislosti na frekvenci zatěžování od 6202 do 8491 MPa. Při teplotě 40 °C se hodnoty modulu tuhosti pohybovaly v závislosti na frekvenci zatěžování od 1997 do 3863 MPa. Na základě grafu 26 lze říci, že s rostoucí frekvencí zatěžování stoupá také hodnota modulu tuhosti, a to při všech zkušebních teplotách. V grafu 27 je zobrazena teplotní citlivost tzn. vliv změny teploty na průměrnou hodnotu modulu tuhosti při frekvenci zatěžování 10 Hz.



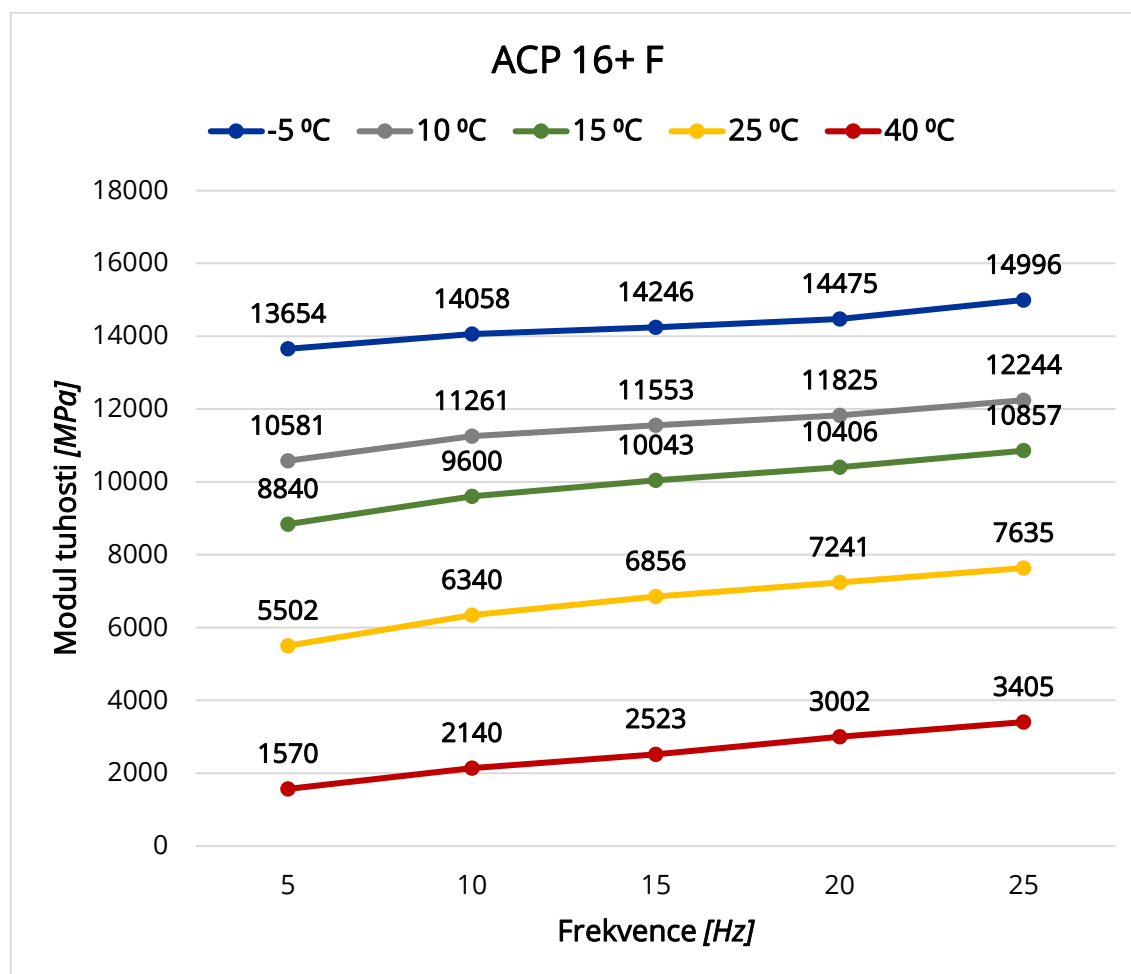
Graf 27: Teplotní citlivost směsi ACP 16+ při 10 Hz

4.4.2.5 Asfaltová směs ACP 16+ F

Poslední zkoušenou asfaltovou směsí byla směs ACP 16+ F. K dispozici bylo sedm zkušebních těles tvaru komolého klínu. V tabulce 17 jsou uvedeny výsledné průměrné hodnoty modulu tuhosti reprezentující tuto asfaltovou směs.

Tabulka 17: Výsledné průměrné hodnoty modulu tuhosti směsi ACP 16+ F

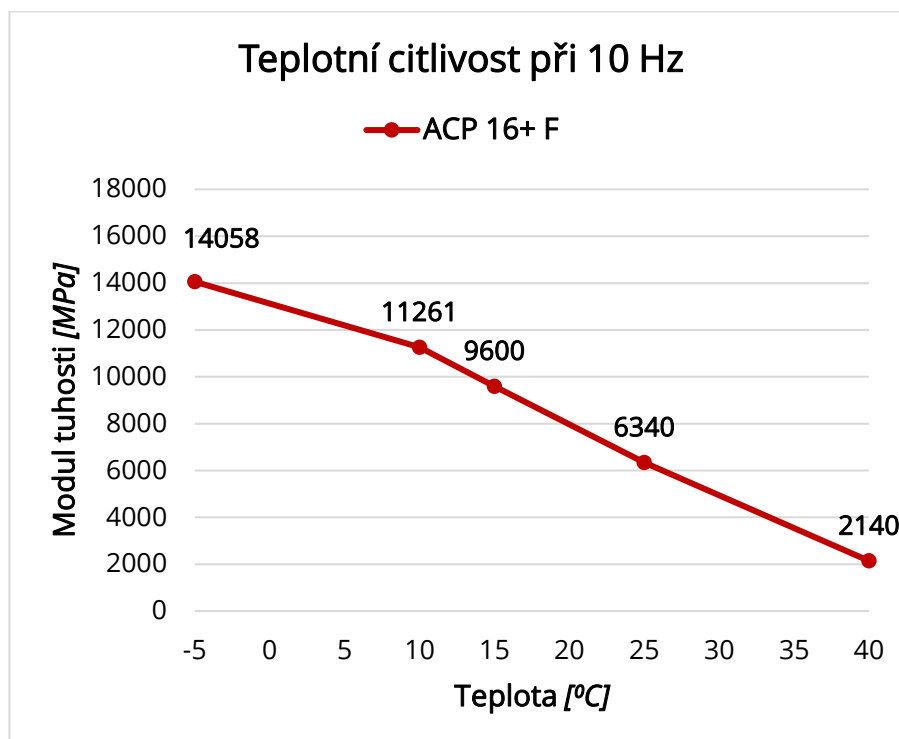
Průměrné hodnoty modulu tuhosti [MPa]						
ACP 16+ F		Frekvence [Hz]				
		5	10	15	20	25
Teplota [°C]	-5	13654	14058	14246	14475	14996
	10	10581	11261	11553	11825	12244
	15	8840	9600	10043	10406	10857
	25	5502	6340	6856	7241	7635
	40	1570	2140	2523	3002	3405



Graf 28: Výsledné průměrné hodnoty modulu tuhosti směsi ACP 16+ F

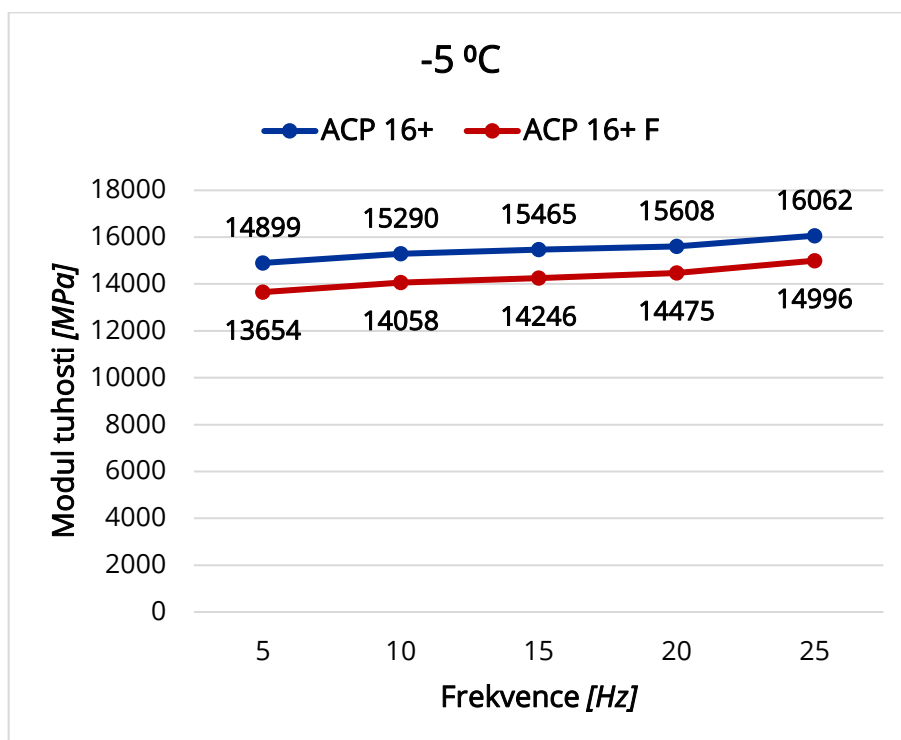
Dle TP 170 [14], [16] je požadována hodnota modulu tuhosti při teplotě 15 °C a frekvenci zatěžování 10 Hz. U asfaltové směsi ACP 16+ byla stanovena tato hodnota modulu tuhosti na 9600 MPa. Oproti požadavkům technických podmínek byla hodnota modulu tuhosti stanovena také při teplotách -5 °C, 10 °C, 25 °C a 40 °C.

Při teplotě -5 °C se hodnoty modulu tuhosti pohybovaly v závislosti na frekvenci zatěžování od 13654 do 14996 MPa. Při teplotě 10 °C se hodnoty modulu tuhosti pohybovaly v závislosti na frekvenci zatěžování od 10581 do 12244 MPa. Při teplotě 15 °C se hodnoty modulu tuhosti pohybovaly v závislosti na frekvenci zatěžování od 8840 do 10857 MPa. Při teplotě 25 °C se hodnoty modulu tuhosti pohybovaly v závislosti na frekvenci zatěžování od 5502 do 7635 MPa. Při teplotě 40 °C se hodnoty modulu tuhosti pohybovaly v závislosti na frekvenci zatěžování od 1570 do 3405 MPa. Na základě grafu 28 lze říci, že s rostoucí frekvencí zatěžování stoupá také hodnota modulu tuhosti, a to při všech zkušebních teplotách. V grafu 29 je zobrazena teplotní citlivost tzn. vliv změny teploty na průměrnou hodnotu modulu tuhosti při frekvenci zatěžování 10 Hz.

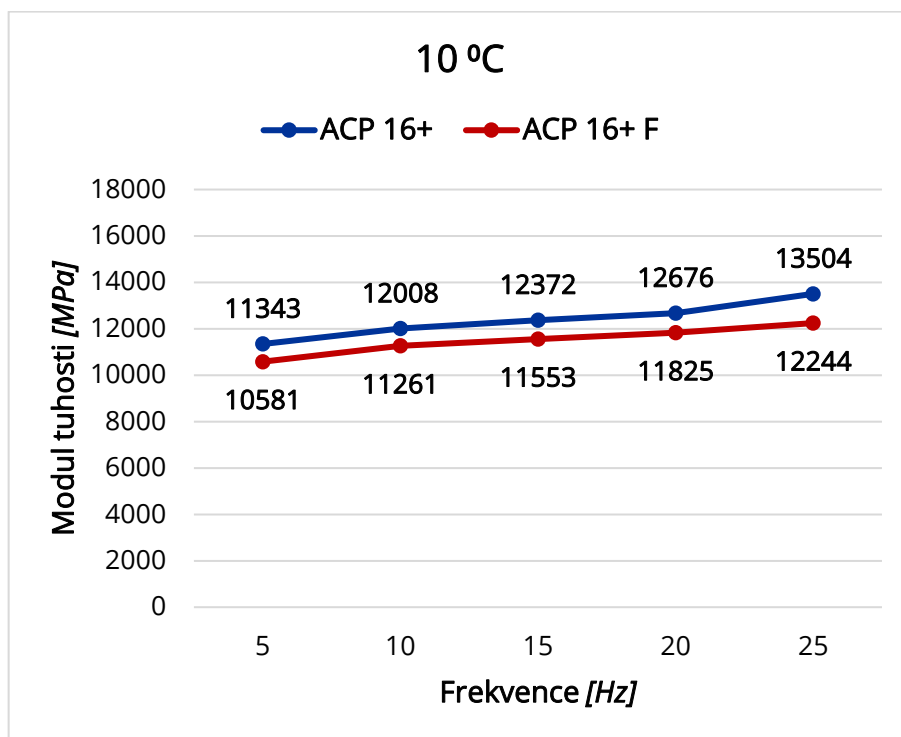


Graf 29: Teplotní citlivost směsi ACP 16+ F při 10 Hz

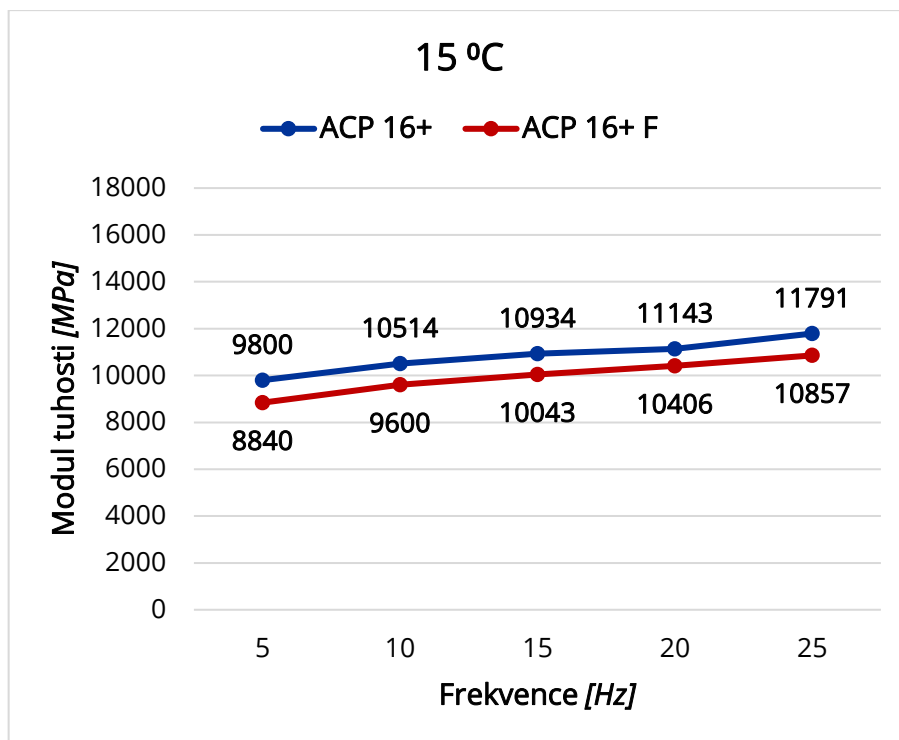
4.4.2.6 Porovnání ACP 16+/ACP 16+ F



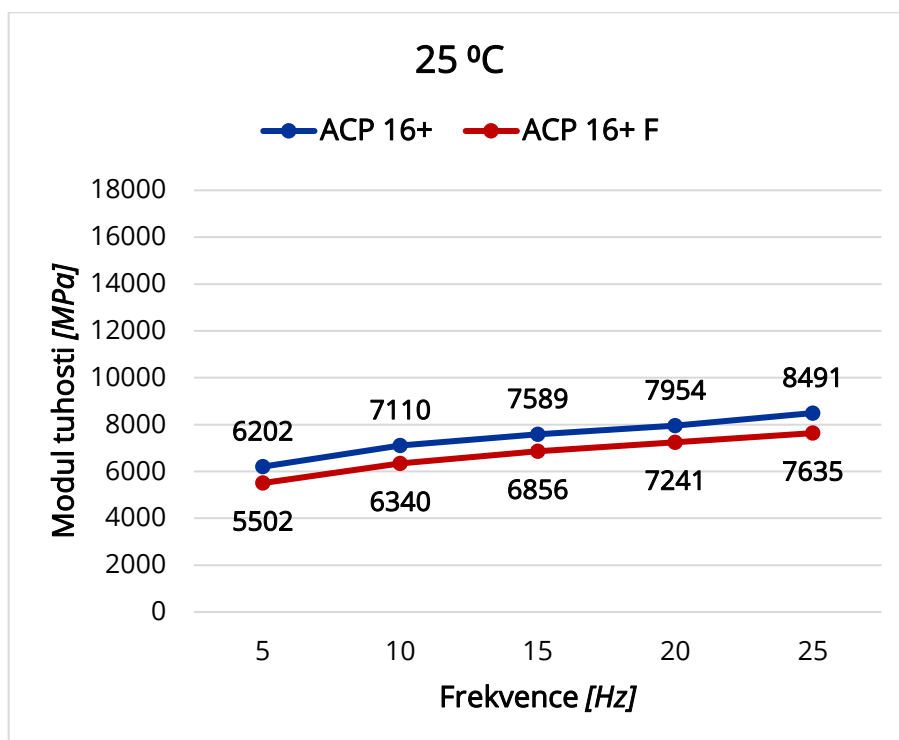
Graf 30: Porovnání výsledných průměrných hodnot modulu tuhosti směsi ACP 16+ a ACP 16+ F při teplotě -5 °C



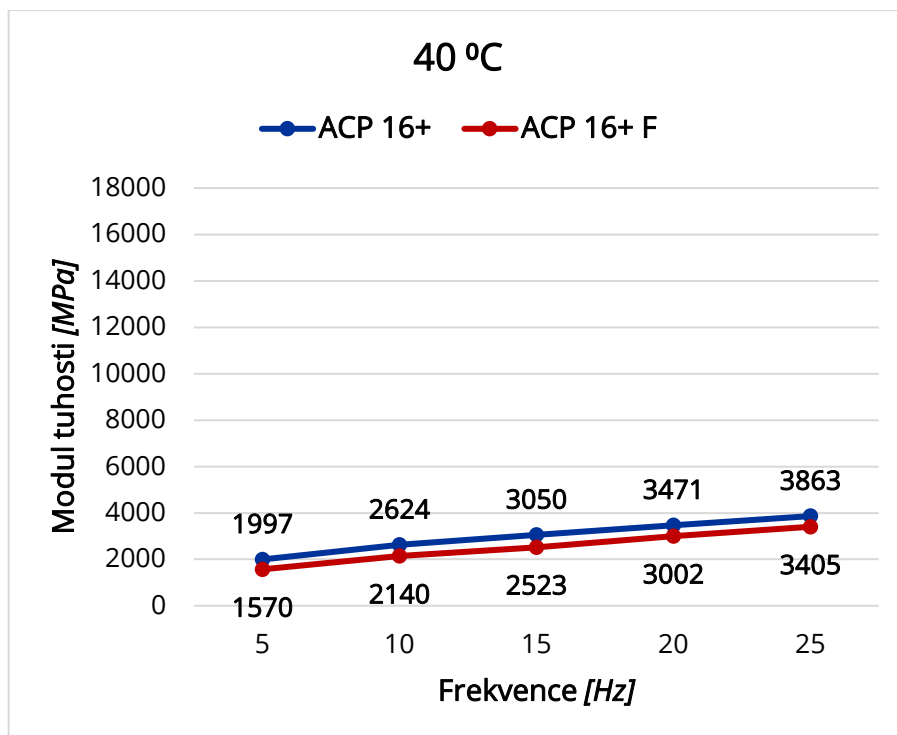
Graf 31: Porovnání výsledných průměrných hodnot modulu tuhosti směsi ACP 16+ a ACP 16+ F při teplotě 10 °C



Graf 32: Porovnání výsledných průměrných hodnot modulu tuhosti směsi ACP 16+ a ACP 16+ F při teplotě 15 °C



Graf 33: Porovnání výsledných průměrných hodnot modulu tuhosti směsi ACP 16+ a ACP 16+ F při teplotě 25 °C

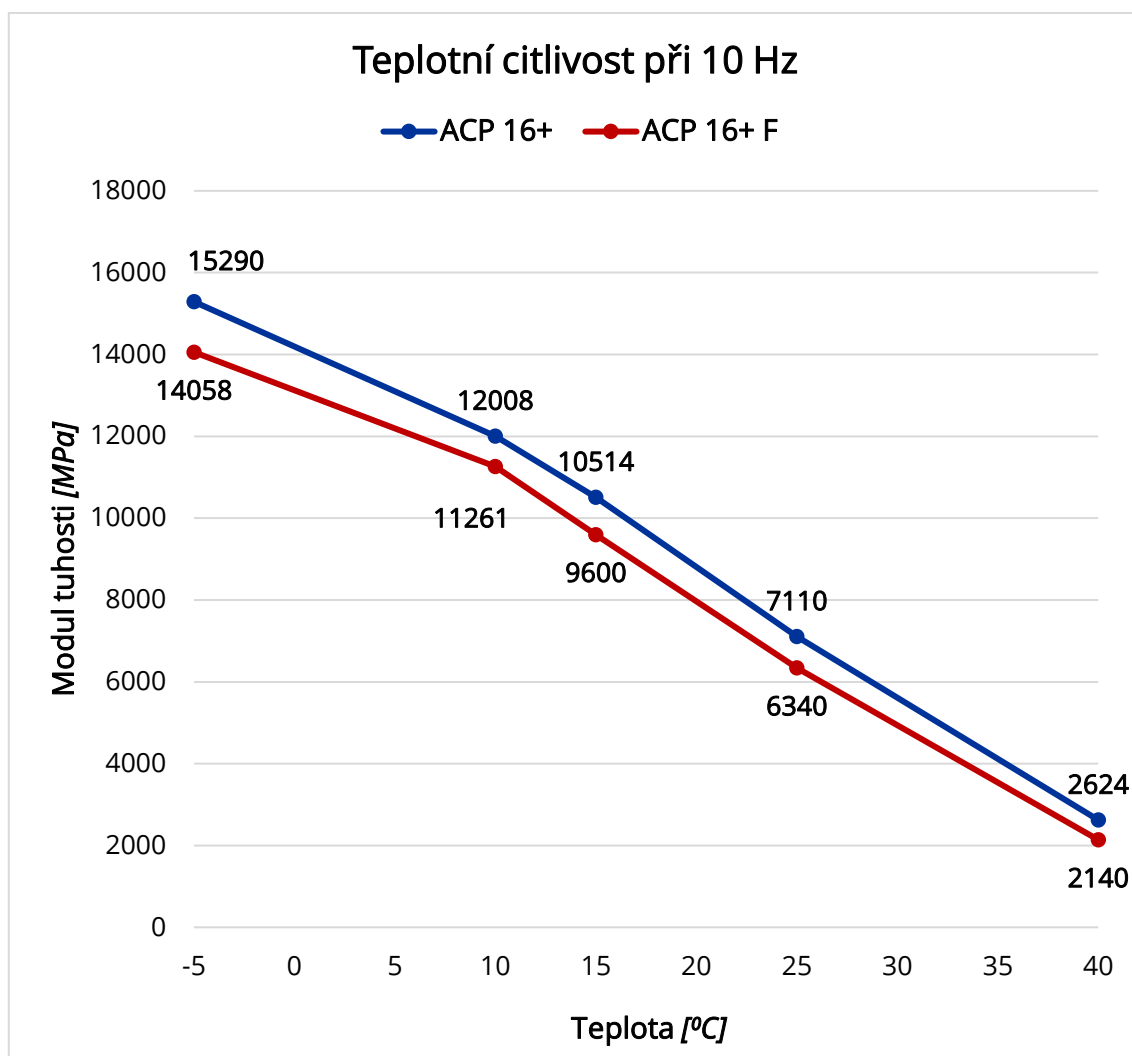


Graf 34: Porovnání výsledných průměrných hodnot modulu tuhosti směsi ACP 16+ a ACP 16+ F při teplotě 40 °C

Jedním z cílů diplomové práce bylo porovnat vybrané funkční parametry asfaltových směsí vyrobených ve dvou variantách – s běžným pojivem (ACP 16+) a s pěnoasfaltovým pojivem (ACP 16+ F). Prvním porovnávaným funkčním parametrem byla tuhost.

Na základě grafického znázornění viz grafy 30-34 lze konstatovat, že křivka reprezentující standardní za horka vyráběnou asfaltovou směs ACP 16+ se blíží křivce, které představuje pěnoasfaltovou směs ACP 16+ F, a to při všech zkušebních teplotách. Znamená to jediné, že tuhost pěnoasfaltových směsí je srovnatelná s tuhostí standardních za horka vyráběných asfaltových směsí. Nepatrné rozdíly v hodnotách modulu tuhosti mohou být způsobeny např. nehomogenitou směsí, která vzniká při hutnění asfaltových desek.

V grafu 35 lze vidět porovnání teplotní citlivosti asfaltové směsi ACP 16+ a ACP 16+ F při frekvenci zatěžování 10 Hz. Z grafického znázornění průběhu křivek reprezentujících tyto směsi vyplývá, že pokles teploty má na hodnotu modulu tuhosti u obou směsí přibližně stejný vliv. Vyšších hodnot modulu tuhosti dosahuje asfaltová směs ACP 16+. K výpočtu a posouzení konstrukce netuhých vozovek v souladu s technickými podmínkami TP 170 - Navrhování vozovek pozemních komunikací [14], [16] slouží program LayEPS. Do návrhové metody vstupuje hodnota modulu tuhosti při teplotě 15 °C a frekvenci zatěžování 10 Hz. V tomto případě se jedná o hodnoty 10514 MPa u směsi ACO 11+ a 9600 MPa u směsi ACO 11+ F, které lze považovat za velmi podobné.



Graf 35: Porovnání teplotní citlivosti směsí ACP 16+ a ACP 16+ F při 10 Hz

4.4.3 Výsledky nízkoteplotních vlastností

V rámci praktické části diplomové práce byla provedeno stanovení nízkoteplotních vlastností s rovnoměrným řízeným poklesem teploty (TSRST), které je blíže popsáno v kapitole 4.3.5. Touto zkouškou lze simulovat vznik mrazových trhlin. Cílem zkoušky bylo zjistit teplotu a velikost tahového napětí zkušební tělesa z asfaltové směsi při porušení, které vzniká při jeho ochlazení z výchozí teploty konstantní rychlostí za podmínky nulové podélné deformace zkušební tělesa. Zkouška byla provedena v nízkoteplotní komoře Cyklon -40 při rychlosti ochlazení 10 °C/hod.

K dispozici byly čtyři asfaltové směsi. Za účelem zkoušení byly vyrobeny zkušební tělesa tvaru trámečku. Každou asfaltovou směs reprezentovaly tři zkušební tělesa. Celkem bylo vyrobeno dvanáct trámečků. Dílčí výsledky nízkoteplotních charakteristik jednotlivých zkušebních těles jsou zpracovány do protokolu, které jsou v příloze této diplomové práce. Výsledné průměrné hodnoty nízkoteplotních vlastností reprezentujících jednotlivé asfaltové směsi jsou zpracovány do nadcházejících tabulek a grafů.



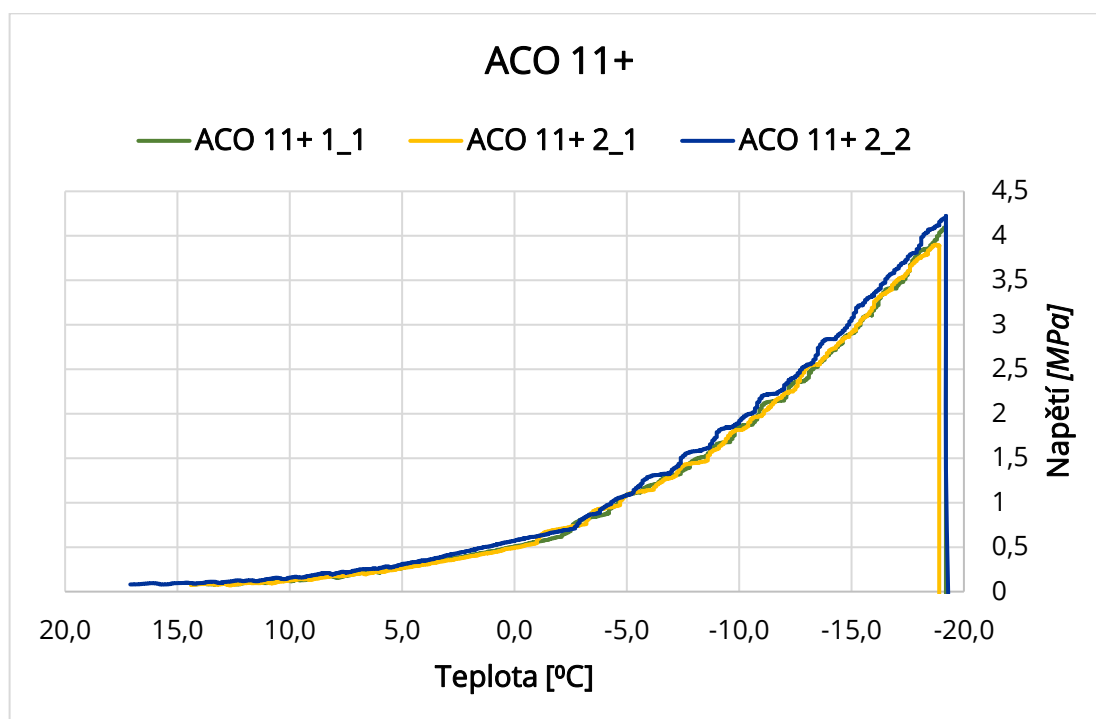
Obrázek 25: Ukázka porušeného zkušební tělesa směsi ACP 16+ 1_1

4.4.3.1 Asfaltová směs ACO 11+

První zkoušenou asfaltovou směsí byla směs ACO 11+. K dispozici byly celkem tři zkušební tělesa. V tabulce 18 jsou uvedeny naměřené hodnoty nízkoteplotních vlastností všech zkušebních těles reprezentujících tuto směs. Konkrétně se jedná o maximální tahovou sílu, maximální tahové napětí a teplotu vzorku při porušení. Průběh kryogenního napětí v závislosti na teplotě zkušebního tělesa je znázorněn v grafu 36. Na základě grafického znázornění lze říci, že všechna zkušební tělesa byla porušena lomem a napětí rázem kleslo k nule. Na základě uvedených výsledků všech tří zkušebních těles lze říci, že charakteristiky nabývají téměř stejných hodnot.

Tabulka 18: Hodnoty nízkoteplotních vlastností směsi ACO 11+

Hodnoty nízkoteplotních vlastností				
ACO 11+		Max. síla při porušení [kN]	Max. napětí při porušení [MPa]	Teplota vzorku při porušení [°C]
Označení	ACO 11+ 1_1	10,34	4,14	-19,20
	ACO 11+ 2_1	9,86	3,95	-18,80
	ACO 11+ 2_2	10,90	4,36	-19,20
	Celkový ø	10,37	4,15	-19,07



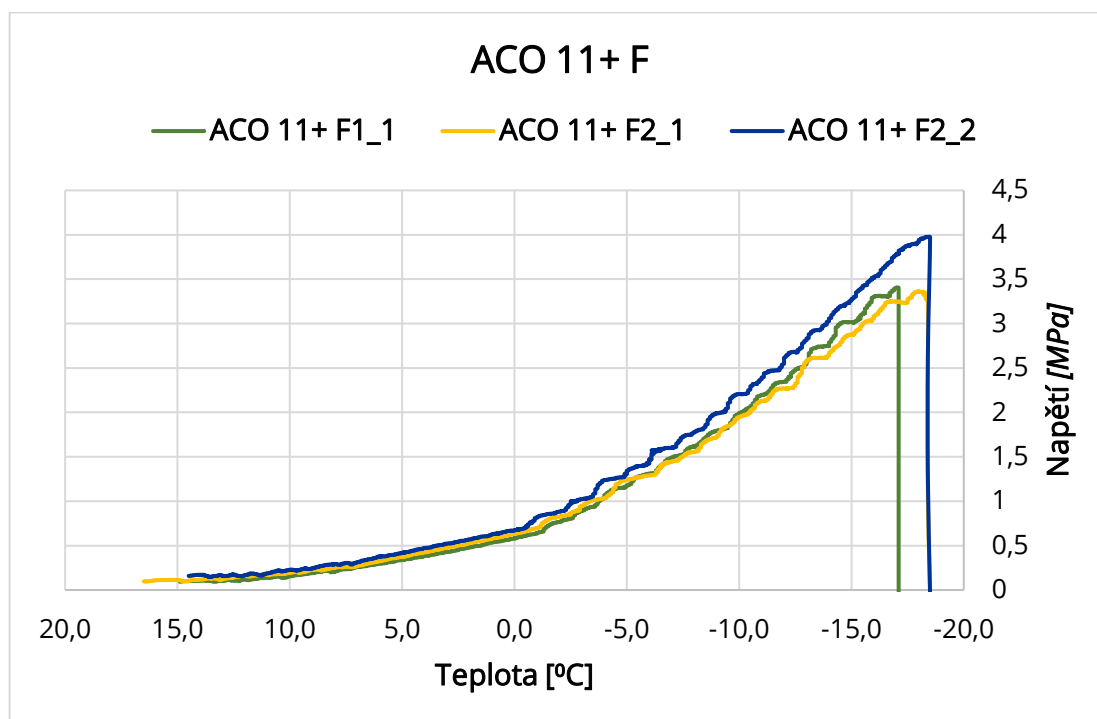
Graf 36: Závislost napětí na teplotě zkušebního tělesa směsi ACO 11+

4.4.3.2 Asfaltová směs ACO 11+ F

Druhou zkoušenou asfaltovou směsí byla směs ACO 11+ F. K dispozici byly celkem tři zkušební tělesa. V tabulce 19 jsou uvedeny naměřené hodnoty nízkoteplotních charakteristik všech zkušebních těles reprezentujících tuto směs. Průběh kryogenního napětí v závislosti na teplotě zkušebního tělesa je znázorněn v grafu 37. Na základě grafického znázornění lze říci, že všechna zkušební tělesa byla porušena lomem a napětí rázem kleslo k nule. Na základě uvedených výsledků všech tří zkušebních těles lze říci, že charakteristiky nabývají poměrně stejných hodnot.

Tabulka 19: Hodnoty nízkoteplotních vlastností směsi ACO 11+ F

Hodnoty nízkoteplotních vlastností				
ACO 11+ F		Max. síla při porušení [kN]	Max. napětí při porušení [MPa]	Teplota vzorku při porušení [°C]
Označení	ACO 11+ F1_1	8,47	3,39	-17,00
	ACO 11+ F2_1	8,37	3,36	-18,00
	ACO 11+ F2_2	10,18	3,98	-18,40
	Celkový ø	9,01	3,58	-17,80



Graf 37: Závislost napětí na teplotě zkušebního tělesa směsi ACO 11+ F

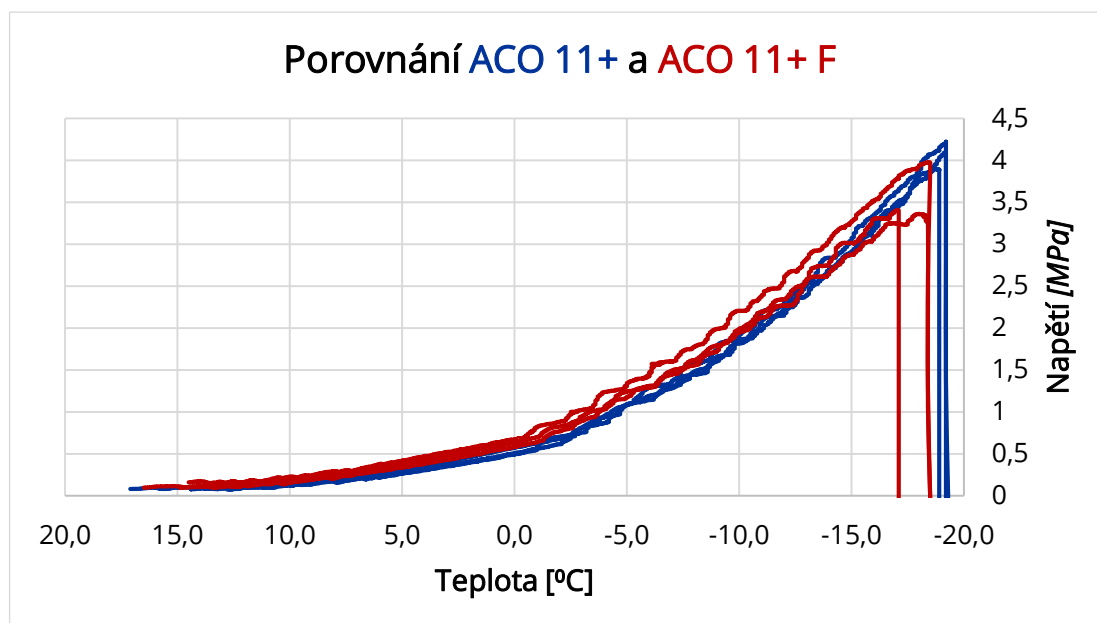
4.4.3.3 Porovnání ACO 11+/ACO 11+ F

Jedním z cílů diplomové práce bylo porovnat vybrané funkční parametry asfaltových směsí vyrobených ve dvou variantách – s běžným pojivem (ACO 11+) a s pěnoasfaltovým pojivem (ACO 11+ F). Druhým porovnávaným funkčním parametrem byly nízkoteplotní vlastnosti. Konkrétně se jednalo zejména o maximální tahové napětí a teplotu vzorku při porušení.

Grafické porovnání dílčích závislostí kryogenního napětí na teplotě zkušebního tělesa u směsí ACO 11+ a ACO 11+ F lze vidět v grafu 38. Křivky jsou si velice podobné. U směsi ACO 11+ vychází průměrná teplota vzorku při porušení na -19,07 °C, u směsi ACO 11+ F pak na -17,80 °C. Lze konstatovat, že z pohledu nízkoteplotních vlastností jsou pěnoasfaltové směsi srovnatelné se za horka vyráběnými asfaltovými směsmi.

Tabulka 20: Porovnání nízkoteplotních parametrů směsí ACO 11+ a ACO 11+ F

Hodnoty nízkoteplotních vlastností			
Označení	Max. síla při porušení [kN]	Max. napětí při porušení [MPa]	Teplota vzorku při porušení [°C]
ACO 11+	10,37	4,15	-19,07
ACO 11+ F	9,01	3,58	-17,80



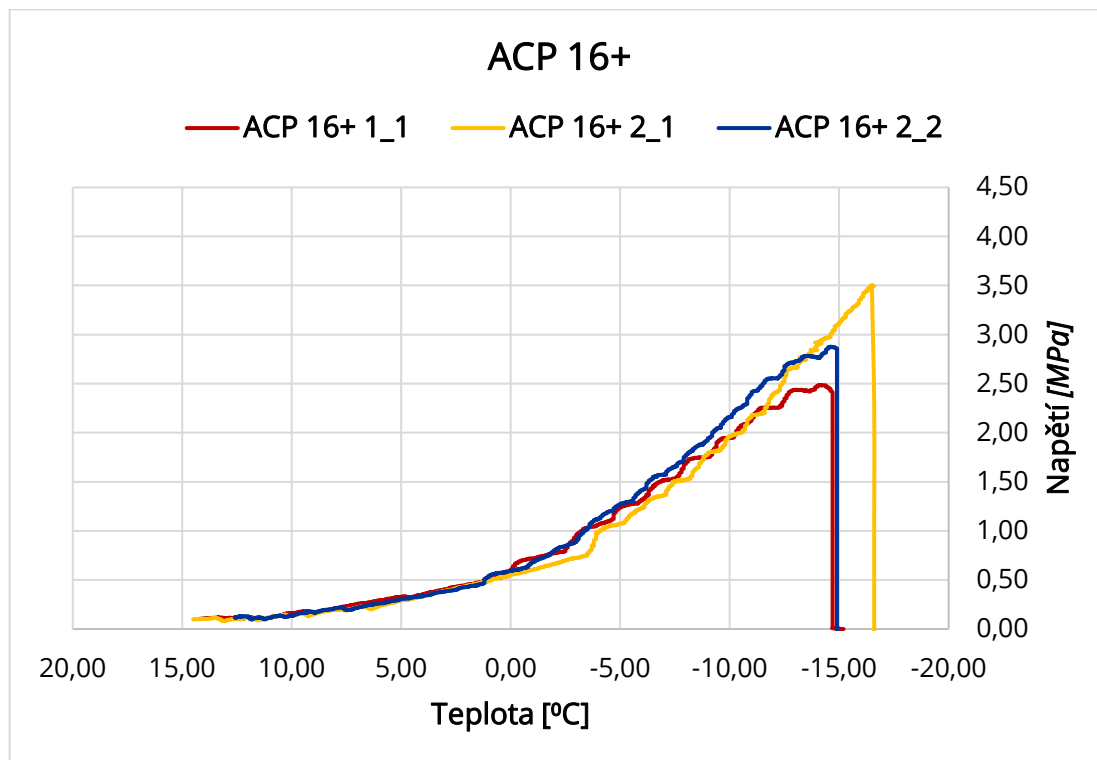
Graf 38: Porovnání závislosti kryogenního napětí na teplotě zkušebního tělesa směsí ACO 11+ a ACO 11+ F

4.4.3.4 Asfaltová směs ACP 16+

Třetí zkoušenou asfaltovou směsí byla směs ACP 16+. K dispozici byly celkem tři zkušební tělesa. V tabulce 21 jsou uvedeny naměřené hodnoty nízkoteplotních charakteristik všech zkušebních těles reprezentujících tuto směs. Průběh kryogenního napětí v závislosti na teplotě zkušební tělesa je znázorněn v grafu 39. Na základě grafického znázornění lze říci, že všechna zkušební tělesa byla porušena lomem a napětí rázem kleslo k nule. Na základě uvedených výsledků všech tří zkušebních těles lze říci, že charakteristiky nabývají poměrně stejných hodnot.

Tabulka 21: Hodnoty nízkoteplotních vlastností směsi ACP 16+

Hodnoty nízkoteplotních vlastností				
ACP 16+		Max. síla při porušení [kN]	Max. napětí při porušení [MPa]	Teplota vzorku při porušení [°C]
Označení	ACP 16+ 1_1	6,18	2,48	-14,10
	ACP 16+ 2_1	8,62	3,50	-16,50
	ACP 16+ 2_2	7,15	2,88	-14,60
	Celkový ø	7,32	2,95	-15,07



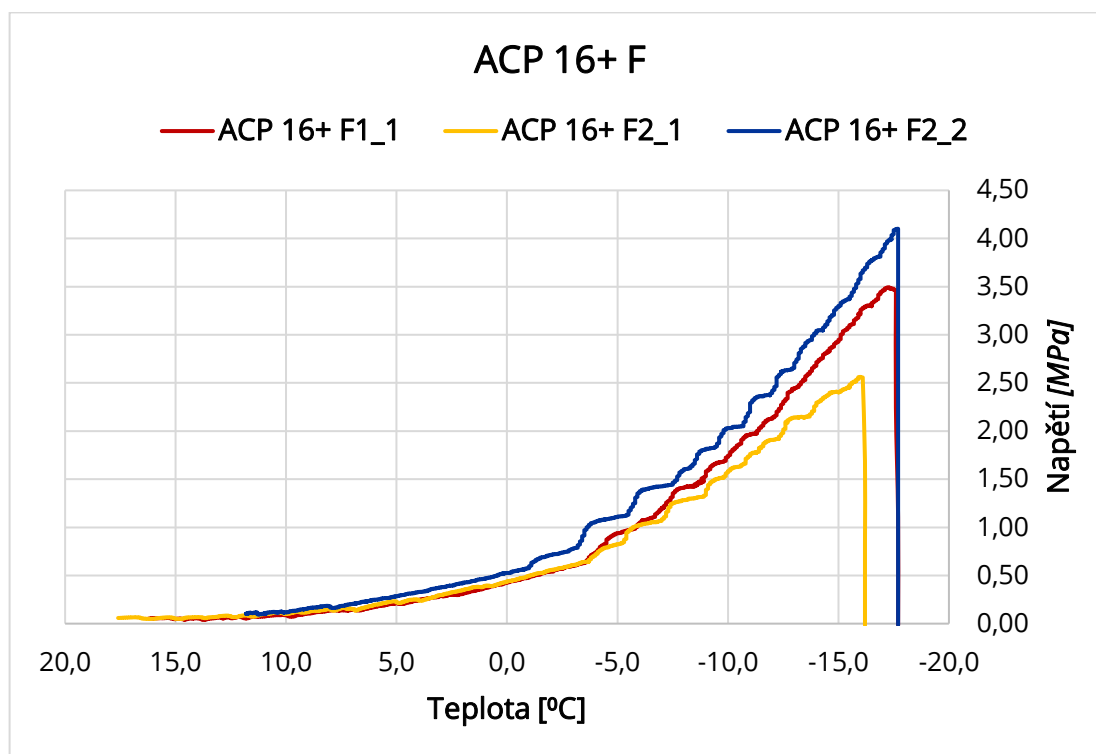
Graf 39: Závislost napětí na teplotě zkušební tělesa směsi ACP 16+

4.4.3.5 Asfaltová směs ACP 16+ F

Poslední zkoušenou asfaltovou směsí byla směs ACP 16+ F. K dispozici byly celkem tři zkušební tělesa. V tabulce 22 jsou uvedeny naměřené hodnoty nízkoteplotních charakteristik všech zkušebních těles reprezentujících tuto směs. Průběh kryogenního napětí v závislosti na teplotě zkušebního tělesa je znázorněn v grafu 40. Na základě grafického znázornění lze říci, že všechna zkušební tělesa byla porušena lomem a napětí rázem kleslo k nule. Na základě uvedených výsledků všech tří zkušebních těles lze říci, že charakteristiky nabývají poměrně stejných hodnot.

Tabulka 22: Hodnoty nízkoteplotních vlastností směsi ACP 16+ F

Hodnoty nízkoteplotních vlastností				
ACP 16+ F		Max. síla při porušení [kN]	Max. napětí při porušení [MPa]	Teplota vzorku při porušení [°C]
Označení	ACP 16+ F1_1	8,51	3,49	-17,30
	ACP 16+ F2_1	6,34	2,56	-16,00
	ACP 16+ F2_2	10,21	4,10	-17,70
	Celkový ø	8,35	3,38	-17,00



Graf 40: Závislost napětí na teplotě zkušebního tělesa směsi ACP 16+ F

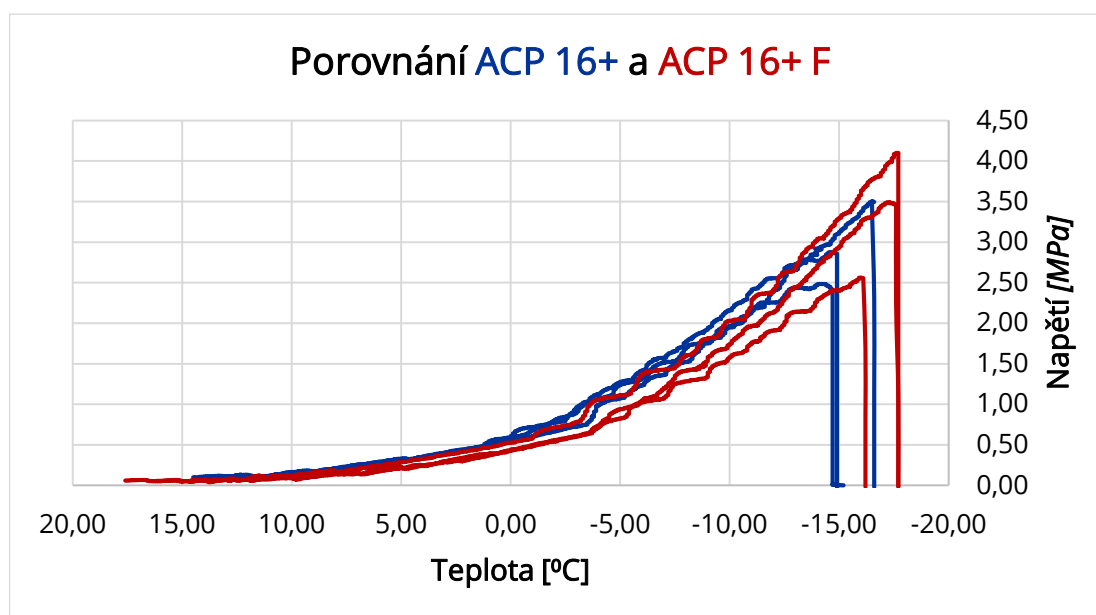
4.4.3.6 Porovnání ACP 16+/ACP 16+ F

Jedním z cílů diplomové práce bylo porovnat vybrané funkční parametry asfaltových směsí vyrobených ve dvou variantách – s běžným pojivem (ACP 16+) a s pěnoasfaltovým pojivem (ACP 16+ F). Druhým porovnávaným funkčním parametrem byly nízkoteplotní vlastnosti. Konkrétně se jednalo zejména o maximální tahové napětí a teplotu vzorku při porušení.

Grafické porovnání dílčích závislostí kryogenního napětí na teplotě zkušebního tělesa u směsí ACP 16+ a ACP 16+ F lze vidět v grafu 41. Křivky jsou si dosti podobné. U směsi ACP 16+ vychází průměrná teplota vzorku při porušení na -15,07 °C, u směsi ACP 16+ F pak na -17,00 °C. Lze konstatovat, že z pohledu nízkoteplotních vlastností jsou pěnoasfaltové směsi srovnatelné se za horka vyráběnými asfaltovými směsmi.

Tabulka 23: Porovnání nízkoteplotních parametrů směsí ACP 16+ a ACP 16+ F

Hodnoty nízkoteplotních vlastností			
Označení	Max. síla při porušení [kN]	Max. napětí při porušení [MPa]	Teplota vzorku při porušení [°C]
ACP 16+	7,32	2,95	-15,07
ACP 16+ F	8,35	3,38	-17,00



Graf 41: Porovnání závislosti kryogenního napětí na teplotě zkušebního tělesa směsí ACP 16+ a ACP 16+ F

4.4.3.7 Shrnutí výsledků nízkoteplotních vlastností

Z obrázků 26 a 27 je zřejmé, že mrazová trhlinka nevzniká vždy uprostřed výšky trámečku. Což je způsobeno tím, že poloha oslabeného průřezu závisí na mezerovitosti a míře zhutnění asfaltové směsi, které jsou nerovnoměrně rozloženy po výšce tělesa. Při zhutňování desek v lamelovém zhutňovači může navíc dojít k podrcení větších zrn kameniva. Nehomogenity tedy vznikají při hutnění asfaltových desek, ze kterých se zkušební tělesa řezou, čímž ovlivňují polohu mrazové trhliny při zkoušce TSRST [8].



Obrázek 26: Porušená zkušební tělesa směsí ACO 11+ a ACO 11+ F



Obrázek 27: Porušená zkušební tělesa směsí ACP 16+ a ACP 16+ F

5 ZÁVĚR

V diplomové práci byla pozornost věnována problematice využití pěnoasfaltu jako pojiva do asfaltových směsí. Práce byla rozdělena do dvou částí, teoretickou a praktickou.

Cílem teoretické části diplomové práce bylo zpracovat přehled technologií umožňujících snížit pracovní teplotu při výrobě a pokládce asfaltových směsí. Dále byl rozebrán princip technologie pěnoasfaltu včetně popisu dosavadních zkušeností ze zahraničí.

V praktické části práce bylo provedeno porovnání tuhostních a nízkoteplotních parametrů dvou druhů asfaltových směsí, které byly vyrobeny s použitím pěnoasfaltu a porovnány s totožnými asfaltovými směsmi vyrobenými s běžnými silničními asfalty gradace 50/70.

Na základě porovnání dosažených výše uvedených výsledků funkčních charakteristik u jednotlivých variant zkoušených asfaltových směsí je možno konstatovat, že díky použití technologie zpěněného asfaltu nedošlo ke zhoršení sledovaných parametrů. Díky těmto pozitivním závěrům by bylo vhodné, aby v dalších diplomových pracích zabývajících se touto problematikou byla pozornost soustředěna na použití technologie pěnoasfaltu při současném snížení pracovních teplot např. o 20 °C.

Navzdory velkému potenciálu v oblasti teplých asfaltových směsí se stále nedaří ve větší míře realizovat tyto technologie do běžné praxe v České republice. Může za to především omezená legislativní podpora ze strany státu. Pozitivním krokem v tomto ohledu bylo vydání technických podmínek TP 238 zabývajících se problematikou nízkoteplotních asfaltových směsí. Předpis ale nepopisuje výrobu teplé asfaltové směsi za pomoci technologie pěnoasfaltu.

6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ZAJÍČEK, Jan. *Technologie stavby vozovek*. Praha: ČKAIT, 2014. ISBN 978-80-87438-59-6.
- [2] European Asphalt Pavement Association. *The use of Warm Mix Asphalt. EAPA-Position paper* [online]. Brussels: 10. 2014. [cit. 2017-01-12]. Dostupné z: <http://www.eapa.org/userfiles/2/Asphalt%20-%20WMA/EAPA%20Position%20Paper%20-%20WMA%20-%20version%20October%202014.pdf>
- [3] DUPUY, Jean Paul a CARBONNEAU, Xavier. Pěnoasfaltové směsi. In: *asfaltove-vozovky.cz* [online]. České Budějovice: 28. – 29. 11. 2017 [cit. 2017-01-12]. Dostupné z: http://www.asfaltove-vozovky.cz/av2017/data/prezentace/t1-8_dupuy.pdf
- [4] HÝZL, Petr a DÁŠEK Ondřej. *Rešerše na stav techniky pro využití technologie pěnoasfaltu při výrobě asfaltových směsí za horka*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací, 2017.
- [5] MONDSCHIEIN, Petr. ČVUT, Fakulta stavební, Katedra silničních staveb. *Recyklace vozovek*. Přednáška předmětu: Silniční stavby 2. Dostupné z: <http://mondy.webnode.cz/prednasky/>
- [6] MASTNÝ, Jan. *Vliv syntetických vosků a rejuvenátorů na vlastnosti asfaltové směsi s R-materiálem*. Praha, 2017. 78 s., 27 s. příl. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra silničních staveb. Vedoucí práce Ing. Jan Valentin, Ph.D.
- [7] ŠTĚPANOVSÝ, Vlastimil. *Chování asfaltových směsí za nízkých teplot*. Brno, 2013. 47 s., 9 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Petr Hýzl, Ph.D.
- [8] KOMENDA, Radek. *Snižování pracovních teplot při výrobě a pokládce asfaltových směsí*. Brno, 2012. 115 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně,

Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Petr Hýzl, Ph.D.

- [9] ČSN EN 13108-1. *Asfaltové směsi – Specifikace pro materiály – Část 1: Asfaltový beton*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [10] ČSN EN 12697-6. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa*. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [11] ČSN EN 12697-26. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 26: Tuhost*. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [12] ČSN EN 12697-46. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 46: Nízkoteplotní vlastnosti a tvorba trhlin pomocí jednoosé zkoušky tahem*. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [13] TP 112. *Studené pěnoasfaltové vrstvy*. Ministerstvo dopravy, Odbor infrastruktury, 2007.
- [14] TP 170. *Navrhování vozovek pozemních komunikací*. Ministerstvo dopravy České republiky, 2004.
- [15] TP 238. *Nízkoteplotní asfaltové směsi*. Ministerstvo dopravy, Odbor pozemních komunikací, 2012.
- [16] HÝZL, Petr a VARAUS, Michal. Funkční zkoušky asfaltových směsí. *Časopis stavebnictví* [online]. Brno: 2007 [cit. 2017-01-12]. Dostupné z: https://www.casopisstavebnictvi.cz/funkcni-zkousky-asfaltovych-smesi_N278
- [17] VALENTIN, Jan a MONDSCHNEIN, Petr. Vybrané experimentální poznatky o nízkoteplotních asfaltových směsích. *Silnice a železnice* [online]. 2010 [cit. 2017-01-12]. Dostupné z: <http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/vybrane-experimentalni-poznatky-o-nizkoteplotnich-asfaltovych-smesich/>

- [18] National Asphalt Pavement Association. *WMA Technologies* [online]. [cit. 2017-01-12]. Dostupné z: <http://www.warmmixasphalt.org>
- [19] Dostupné z: https://media.wirtgen-group.com/media/02_wirtgen/media_1/media_1_product_divisions/media_1_product_divisions_soil_stabilizers___cold_recyclers/W_brochure_Foamed-Bitumen_0116_EN.pdf
- [20] Dostupné z: http://www.crp.pt/docs/A18S104-6_2_AndreasMarquardt.pdf
- [21] Státní fond dopravní infrastruktury. Příspěvky na nové technologie. In: sfdi.cz [online]. 2015 [cit. 2017-01-12]. Dostupné z: http://www.sfdi.cz/soubory/obrazky-clanky/poskytovani-prispevku/projektove-cinnosti/2015_sfdi_nove_technologie_brozura.pdf
- [22] FIEDLER, Jiří. Nízkoteplotní asfaltové směsi. In: *sdruzeni-silnice.cz* [online]. 02. - 03. 2015 [cit. 2017-01-12]. Dostupné z: <http://www.sdruzeni-silnice.cz/Download.aspx?param=jx3godhnp7M1LWTdfUhRePwrqzsjKBVUCefaBKzV8QujBfcXCYMZG74gcARIHDZDZPAn686QSm0zhOHJns3An%2FGbEtDvRwLuQ24Povob%2BP%2BwRaUUg92AM5y3a12bm7kapqoN7sR4j%2FH6zxb4M1qDSSQyGNW2282niM%2FLKLyC5I7Uc%2BpCFjLb82Rjj%2FH8mT6xhObShBy5b%2B1UU2Efhxz4OX1cUePskEL%2BVBqZSpfozEQq%2Bzqde1VLVRI0hG3o94vkcMd8CW6KIhJwEfamZOrhKXHc0FDmTT3vx2nt1qnfGuWWZdObaqnFm4CMYgUp07q2HDxnDScBSb4ymctWnGY60Ysgo%2BjnuGf%2FJ68GsL1v0dN7Eznm3vUYjHkL8BxM84D1tVMHItNAIZN48DVvZUaUJdkMlyVvQn0Lw6wo4F5M8dGu9Q%2FfS5Fb1HQdaAT2dMGJ%2BI7CalpWyBQy4HOH8APO0n5I%2F1iu4Eh5s7vQBEVpwkcCla6KpbmRfq9kYhydN2sxVj7gcSbbX7VlqLZ8UZHqA%3D%3D&tname=SiteContent.aspx>
- [23] *Archiv – Petr Hýzl*
- [24] Protokol o zkoušce typu č. 9-2013 - Ta, ACO 11+ s asfaltem 50/70. Vydal: COLAS CZ, a.s., Jihlava, 2013.

- [25] Protokol o zkoušce typu č. 2-2014 - Ta, ACO 11+ F s asfaltem 50/70. Vydal: COLAS CZ, a.s., Jihlava, 2014.
- [26] Protokol o zkoušce typu č. 15-2013 -Ta, ACP 16+ s asfaltem 50/70. Vydal: COLAS CZ, a.s., Jihlava, 2013.
- [27] Protokol o zkoušce typu č. 3-2014 -Ta, ACP 16+ F s asfaltem 50/70. Vydal: COLAS CZ, a.s., Jihlava, 2014.

7 SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Rozdělení asfaltových směsí v závislosti na výrobní teplotě [2].....	16
Graf 2: Graf závislosti redukce teploty na množství emisí [3]	17
Graf 3: Závislost množství dávkované vody na parametrech asfaltové pěny [20]...	25
Graf 4: Nepřímá úměra mezi expanzním poměrem a poločasem usazení [20]	25
Graf 5: Nárůst výroby teplých asfaltových směsí v Norsku [2]	27
Graf 6: Srovnání produkce WMA v Evropě a USA [6].....	28
Graf 7: Čáry zrnitosti jednotlivých frakcí kameniva	36
Graf 8: Čára zrnitosti asfaltové směsi ACO 11+	38
Graf 9: Procentuální složení asfaltové směsi ACO 11+	39
Graf 10: Čára zrnitosti asfaltové směsi ACO 11+ F.....	40
Graf 11: Procentuální složení asfaltové směsi ACO 11+ F	41
Graf 12: Čára zrnitosti asfaltové směsi ACP 16+	42
Graf 13: Procentuální složení asfaltové směsi ACP 16+	43
Graf 14: Čára zrnitosti asfaltové směsi ACP 16+ F	44
Graf 15: Procentuální složení asfaltové směsi ACP 16+ F	45
Graf 16: Výsledné průměrné hodnoty modulu tuhosti směsi ACO 11+	61
Graf 17: Teplotní citlivost směsi ACO 11+ při 10 Hz.....	62
Graf 18: Výsledné průměrné hodnoty modulu tuhosti směsi ACO 11+ F	63
Graf 19: Teplotní citlivost směsi ACO 11+ F při 10 Hz.....	64
Graf 20: Porovnání výsledných průměrných hodnot modulu tuhosti směsi ACO 11+ a ACO 11+ F při teplotě -5 °C	65
Graf 21: Porovnání výsledných průměrných hodnot modulu tuhosti směsi ACO 11+ a ACO 11+ F při teplotě 10 °C	65
Graf 22: Porovnání výsledných průměrných hodnot modulu tuhosti směsi ACO 11+ a ACO 11+ F při teplotě 15 °C	66
Graf 23: Porovnání výsledných průměrných hodnot modulu tuhosti směsi ACO 11+ a ACO 11+ F při teplotě 25 °C	66
Graf 24: Porovnání výsledných průměrných hodnot modulu tuhosti směsi ACO 11+ a ACO 11+ F při teplotě 40 °C	67

Graf 25: Porovnání teplotní citlivosti směsi ACO 11+ a ACO 11+ F při 10 Hz.....	68
Graf 26: Výsledné průměrné hodnoty modulu tuhosti směsi ACP 16+	69
Graf 27: Teplotní citlivost směsi ACP 16+ při 10 Hz	70
Graf 28: Výsledné průměrné hodnoty modulu tuhosti směsi ACP 16+ F.....	71
Graf 29: Teplotní citlivost směsi ACP 16+ F při 10 Hz	72
Graf 30: Porovnání výsledných průměrných hodnot modulu tuhosti směsi ACP 16+ a ACP 16+ F při teplotě -5 °C.....	73
Graf 31: Porovnání výsledných průměrných hodnot modulu tuhosti směsi ACP 16+ a ACP 16+ F při teplotě 10 °C.....	73
Graf 32: Porovnání výsledných průměrných hodnot modulu tuhosti směsi ACP 16+ a ACP 16+ F při teplotě 15 °C.....	74
Graf 33: Porovnání výsledných průměrných hodnot modulu tuhosti směsi ACP 16+ a ACP 16+ F při teplotě 25 °C.....	74
Graf 34: Porovnání výsledných průměrných hodnot modulu tuhosti směsi ACP 16+ a ACP 16+ F při teplotě 40 °C.....	75
Graf 35: Porovnání teplotní citlivosti směsi ACP 16+ a ACP 16+ F při 10 Hz	76
Graf 36: Závislost napětí na teplotě zkušebního tělesa směsi ACO 11+	78
Graf 37: Závislost napětí na teplotě zkušebního tělesa směsi ACO 11+ F.....	79
Graf 38: Porovnání závislosti kryogenního napětí na teplotě zkušebního tělesa směsi ACO 11+ a ACO 11+ F.....	80
Graf 39: Závislost napětí na teplotě zkušebního tělesa směsi ACP 16+	81
Graf 40: Závislost napětí na teplotě zkušebního tělesa směsi ACP 16+ F	82
Graf 41: Porovnání závislosti kryogenního napětí na teplotě zkušebního tělesa směsi ACP 16+ a ACP 16+ F	83

8 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Laboratorní zpěňovací zařízení [19].....	21
Obrázek 2: Zpěňovací zařízení [2]	22
Obrázek 3: Zpěněné asfaltové pojivo (foamed bitumen) [19].....	23
Obrázek 4: Napěňovací tryska [2].....	23
Obrázek 5: Vztah expanzního poměru a poločasu rozpadu usazení pěny [20]	24
Obrázek 6: Hutnění asfaltové směsi s recyklátem se současným snížením výrobní teploty metodou pěnoasfaltu [21]	29
Obrázek 7: Jádrové vývrty vozovky s „pěnoasfaltovou“ ložní vrstvou [21]	30
Obrázek 8: Pokládka pěnoasfaltové směsi v Olbramkostele [23]	31
Obrázek 9: Odebírání vzorků za účelem laboratorního zkoušení [23]	31
Obrázek 10: Sada asfaltových desek směsí ACO a ACP	46
Obrázek 11: Vážení zkušební desky ve vodě	48
Obrázek 12: Řezání zkušebních těles.....	49
Obrázek 13: Broušení zkušebních těles	50
Obrázek 14: Příprava lepidla	50
Obrázek 15: Komolý klín (trapezoid).....	51
Obrázek 16: Kovový rám pro centrické nalepování vzorků	51
Obrázek 17: Detail přichycení trapezoidu na háček	53
Obrázek 18: Zařízení pro měření modulu tuhosti asfaltových směsí	54
Obrázek 19: Dvoubodové zatěžování – trapezoid [1].....	54
Obrázek 20: Ukázka měření modulu tuhosti pomocí výpočetního programu	55
Obrázek 21: Podstata zkoušky TSRST [7]	56
Obrázek 22: Pohled na zkušební zařízení CYKLON-40	57
Obrázek 23: Detail zkušebního tělesa ve zkušebním zařízení CYKLON-40	58
Obrázek 24: Ukázka trapezoidů směsi ACP 16+ F1_4 a ACP 16+ 2_3.....	60
Obrázek 25: Ukázka porušeného zkušebního tělesa směsi ACP 16+ 1_1	77
Obrázek 26: Porušená zkušební tělesa směsí ACO 11+ a ACO 11+ F	84
Obrázek 27: Porušená zkušební tělesa směsí ACP 16+ a ACP 16+ F.....	84

9 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Mezní teploty vybraných asfaltových směsí [1].....	14
Tabulka 2: Podíl produkce WMA v letech 2009 až 2012 v USA [2].....	28
Tabulka 3: Sítový rozbor jednotlivých frakcí kameniva [24], [25], [26], [27].....	35
Tabulka 4: Vlastnosti silničního asfaltu 50/70 [24], [25], [26], [27]	36
Tabulka 5: Zrnitost směsi kameniva ACO 11+ [24]	38
Tabulka 6: Studené dávkování kameniva směsi ACO 11+ [24]	39
Tabulka 7: Zrnitost směsi kameniva ACO 11+ F [25]	40
Tabulka 8: Studené dávkování kameniva směsi ACO 11+ F [25]	41
Tabulka 9: Zrnitost směsi kameniva ACP 16+ [26]	42
Tabulka 10: Studené dávkování kameniva směsi ACP 16+ [26].....	43
Tabulka 11: Zrnitost směsi kameniva ACP 16+ F [27].....	44
Tabulka 12: Studené dávkování kameniva směsi ACP 16+ F [27].....	45
Tabulka 13: Objemové hmotnosti a míra zhutnění asfaltových desek.....	59
Tabulka 14: Výsledné průměrné hodnoty modulu tuhosti směsi ACO 11+	61
Tabulka 15: Výsledné průměrné hodnoty modulu tuhosti směsi ACO 11+ F.....	63
Tabulka 16: Výsledné průměrné hodnoty modulu tuhosti směsi ACP 16+.....	69
Tabulka 17: Výsledné průměrné hodnoty modulu tuhosti směsi ACP 16+ F.....	71
Tabulka 18: Hodnoty nízkoteplotních vlastností směsi ACO 11+	78
Tabulka 19: Hodnoty nízkoteplotních vlastností směsi ACO 11+ F	79
Tabulka 20: Porovnání nízkoteplotních parametrů směsí ACO 11+ a ACO 11+ F....	80
Tabulka 21: Hodnoty nízkoteplotních vlastností směsi ACP 16+	81
Tabulka 22: Hodnoty nízkoteplotních vlastností směsi ACP 16+ F.....	82
Tabulka 23: Porovnání nízkoteplotních parametrů směsí ACP 16+ a ACP 16+ F	83

10 SEZNAM PŘÍLOH

10.1 Dílčí výsledky modulu tuhosti

10.1.1 ACO 11+

Hodnoty modulu tuhosti [MPa] při teplotě -5 °C						
ACO 11+		Frekvence [Hz]				
		5	10	15	20	25
Označení	ACO 11+ 1_1	13967	14521	14830	15021	15873
	ACO 11+ 1_2	15051	15581	15803	16280	17093
	ACO 11+ 1_3	15611	16233	16528	16595	17649
	ACO 11+ 1_4	12967	13675	14058	14527	14842
	ACO 11+ 2_1	14269	14794	15338	15571	16079
	ACO 11+ 2_2	13386	13876	14197	14332	14892
	ACO 11+ 2_3	13004	13567	13897	13970	14469
Celkový ø		14036	14607	14950	15185	15842

Hodnoty modulu tuhosti [MPa] při teplotě 10 °C						
ACO 11+		Frekvence [Hz]				
		5	10	15	20	25
Označení	ACO 11+ 1_1	9152	10042	10392	10849	11309
	ACO 11+ 1_2	9688	10407	10878	11414	12078
	ACO 11+ 1_3	9866	10831	11412	11767	12297
	ACO 11+ 1_4	8091	8654	8981	9126	8980
	ACO 11+ 2_1	9782	10583	10972	11425	11754
	ACO 11+ 2_2	9473	10108	10582	10790	11156
	ACO 11+ 2_3	9564	10135	10642	10891	11166
Celkový ø		9374	10109	10551	10895	11249

Hodnoty modulu tuhosti [MPa] při teplotě 15 °C						
ACO 11+		Frekvence [Hz]				
		5	10	15	20	25
Označení	ACO 11+ 1_1	7673	8426	8992	9327	9854
	ACO 11+ 1_2	8164	9154	9636	9986	10352
	ACO 11+ 1_3	7961	8873	9313	9846	10346
	ACO 11+ 1_4	7095	7858	8197	8595	9003
	ACO 11+ 2_1	7449	8250	8870	9274	9865
	ACO 11+ 2_2	7228	8052	8448	8719	9168
	ACO 11+ 2_3	7622	8313	8739	9126	9556
Celkový ø		7599	8418	8885	9268	9735

Hodnoty modulu tuhosti [MPa] při teplotě 25 °C						
ACO 11+		Frekvence [Hz]				
		5	10	15	20	25
Označení	ACO 11+ 1_1	4105	4979	5417	5804	6263
	ACO 11+ 1_2	4182	4902	5553	6179	6606
	ACO 11+ 1_3	4239	4993	5466	5964	6381
	ACO 11+ 1_4	4403	5088	5525	5938	6255
	ACO 11+ 2_1	4193	5047	5435	5814	6177
	ACO 11+ 2_2	4442	5165	5647	6173	6401
	ACO 11+ 2_3	4769	5142	5528	5782	6224
Celkový ø		4333	5045	5510	5951	6330

Hodnoty modulu tuhosti [MPa] při teplotě 40 °C						
ACO 11+		Frekvence [Hz]				
		5	10	15	20	25
Označení	ACO 11+ 1_1	1326	1768	1850	2234	2571
	ACO 11+ 1_2	1224	1567	1769	2295	2453
	ACO 11+ 1_3	1144	1475	1805	2252	2438
	ACO 11+ 1_4	1181	1602	2007	2464	2629
	ACO 11+ 2_1	1153	1756	2053	2418	3030
	ACO 11+ 2_2	1464	1949	2070	2806	2930
	ACO 11+ 2_3	1300	1578	2188	2328	2581
Celkový ø		1256	1671	1963	2400	2662

10.1.2 ACO 11+ F

Hodnoty modulu tuhosti [MPa] při teplotě -5 °C						
ACO 11+ F		Frekvence [Hz]				
		5	10	15	20	25
Označení	ACO 11+ F1_1	13383	14110	14385	14671	14923
	ACO 11+ F1_2	13869	14484	14825	15220	16145
	ACO 11+ F1_3	12273	12668	12919	13085	13440
	ACO 11+ F1_4	12935	13397	13830	13939	14096
	ACO 11+ F2_1	13152	13721	13982	14242	14689
	ACO 11+ F2_2	14087	14551	14929	15221	15526
	ACO 11+ F2_3	12542	12987	13223	13391	13737
Celkový ø		13177	13703	14013	14253	14651

Hodnoty modulu tuhosti [MPa] při teplotě 10 °C						
ACO 11+ F		Frekvence [Hz]				
		5	10	15	20	25
Označení	ACO 11+ F1_1	9684	10468	10864	11179	11647
	ACO 11+ F1_2	10353	10967	11720	11842	12063
	ACO 11+ F1_3	9027	9559	9735	9996	10444
	ACO 11+ F1_4	9648	10270	10570	10916	11256
	ACO 11+ F2_1	9527	10096	10598	10691	11063
	ACO 11+ F2_2	10098	10880	11197	11573	11738
	ACO 11+ F2_3	9679	10290	10589	10835	11339
Celkový ø		9717	10361	10753	11005	11364

Hodnoty modulu tuhosti [MPa] při teplotě 15 °C						
ACO 11+ F		Frekvence [Hz]				
		5	10	15	20	25
Označení	ACO 11+ F1_1	8275	9051	10864	9729	10115
	ACO 11+ F1_2	7946	8687	11720	9624	10072
	ACO 11+ F1_3	7402	8027	9735	8653	9054
	ACO 11+ F1_4	7760	8476	10570	9404	9674
	ACO 11+ F2_1	7610	8275	8721	9102	9467
	ACO 11+ F2_2	8023	8840	9373	9751	10100
	ACO 11+ F2_3	7878	8612	9085	9366	9740
Celkový ø		7842	8567	10010	9376	9746

Hodnoty modulu tuhosti [MPa] při teplotě 25 °C						
ACO 11+ F		Frekvence [Hz]				
		5	10	15	20	25
Označení	ACO 11+ F1_1	4908	5680	6018	6544	6844
	ACO 11+ F1_2	4824	5459	6071	6473	6828
	ACO 11+ F1_3	4714	5317	5642	6163	6214
	ACO 11+ F1_4	4885	5557	6059	6452	6926
	ACO 11+ F2_1	4823	5494	5860	6311	6606
	ACO 11+ F2_2	5050	5767	6314	7958	7226
	ACO 11+ F2_3	5001	5739	6207	6557	6969
Celkový ø		4886	5573	6024	6637	6802

Hodnoty modulu tuhosti [MPa] při teplotě 40 °C						
ACO 11+ F		Frekvence [Hz]				
		5	10	15	20	25
Označení	ACO 11+ F1_1	1518	2077	2366	2602	2837
	ACO 11+ F1_2	1565	2068	2300	2541	2891
	ACO 11+ F1_3	1606	2023	2251	2603	2791
	ACO 11+ F1_4	1930	2298	2534	2897	3220
	ACO 11+ F2_1	1573	1993	2273	2493	2744
	ACO 11+ F2_2	1809	2147	2412	2927	3099
	ACO 11+ F2_3	1751	2195	2356	2641	2931
Celkový ø		1679	2114	2356	2672	2930

10.1.3 ACP 16+

Hodnoty modulu tuhosti [MPa] při teplotě -5 °C						
ACP 16+		Frekvence [Hz]				
		5	10	15	20	25
Označení	ACP 16+ 1_1	15382	15743	16030	16051	16435
	ACP 16+ 1_2	15158	15479	15798	15955	16331
	ACP 16+ 1_3	16126	16562	16676	16852	17167
	ACP 16+ 1_4	15381	15816	15938	16149	16558
	ACP 16+ 2_1	13390	13697	13858	14092	14477
	ACP 16+ 2_2	15550	16093	16177	16361	17236
	ACP 16+ 2_3	13307	13639	13777	13796	14231
Celkový ø		14899	15290	15465	15608	16062

Hodnoty modulu tuhosti [MPa] při teplotě 10 °C						
ACP 16+		Frekvence [Hz]				
		5	10	15	20	25
Označení	ACP 16+ 1_1	10909	11424	11705	11907	13444
	ACP 16+ 1_2	11793	12472	12824	13235	14565
	ACP 16+ 1_3	11857	12685	13109	13386	14308
	ACP 16+ 1_4	11930	12573	13006	13697	14127
	ACP 16+ 2_1	10910	11392	11711	11976	12511
	ACP 16+ 2_2	11933	12716	13285	13538	14074
	ACP 16+ 2_3	10070	10797	10965	10995	11501
Celkový ø		11343	12008	12372	12676	13504

Hodnoty modulu tuhosti [MPa] při teplotě 15 °C						
ACP 16+		Frekvence [Hz]				
		5	10	15	20	25
Označení	ACP 16+ 1_1	9338	9978	10340	10425	11366
	ACP 16+ 1_2	9902	10494	10792	11059	11374
	ACP 16+ 1_3	10231	10880	11316	11568	11798
	ACP 16+ 1_4	10377	11113	11495	11770	12433
	ACP 16+ 2_1	9361	10159	10690	10841	11604
	ACP 16+ 2_2	9948	10943	11433	11637	12544
	ACP 16+ 2_3	9445	10033	10474	10701	11415
Celkový ø		9800	10514	10934	11143	11791

Hodnoty modulu tuhosti [MPa] při teplotě 25 °C						
ACP 16+		Frekvence [Hz]				
		5	10	15	20	25
Označení	ACP 16+ 1_1	5831	6624	7224	7533	7815
	ACP 16+ 1_2	5656	6598	7030	7401	7736
	ACP 16+ 1_3	6647	7655	8167	8509	9001
	ACP 16+ 1_4	6868	7889	8346	8671	8903
	ACP 16+ 2_1	6087	6894	7334	7756	8923
	ACP 16+ 2_2	6283	7255	7668	8158	9049
	ACP 16+ 2_3	6043	6852	7351	7648	8010
Celkový ø		6202	7110	7589	7954	8491

Hodnoty modulu tuhosti [MPa] při teplotě 40 °C						
ACP 16+		Frekvence [Hz]				
		5	10	15	20	25
Označení	ACP 16+ 1_1	2102	2670	2913	3308	3687
	ACP 16+ 1_2	2314	2895	3529	3840	4259
	ACP 16+ 1_3	2515	3201	3505	4098	4552
	ACP 16+ 1_4	1819	2444	2901	3537	3777
	ACP 16+ 2_1	1671	2475	2649	3102	3692
	ACP 16+ 2_2	1748	2204	2793	3060	3545
	ACP 16+ 2_3	1808	2482	3062	3352	3527
Celkový ø		1997	2624	3050	3471	3863

10.1.4 ACP 16+ F

Hodnoty modulu tuhosti [MPa] při teplotě -5 °C						
ACP 16+ F		Frekvence [Hz]				
		5	10	15	20	25
Označení	ACP 16+ F1_1	13646	13974	14136	14267	15362
	ACP 16+ F1_2	12696	13175	13255	13451	14105
	ACP 16+ F1_3	13779	14099	14208	14396	15134
	ACP 16+ F1_4	12972	13377	13539	13741	14136
	ACP 16+ F2_1	13406	13767	13984	14332	14596
	ACP 16+ F2_2	14646	15189	15576	15787	15999
	ACP 16+ F2_3	14436	14828	15023	15350	15641
Celkový ø		13654	14058	14246	14475	14996

Hodnoty modulu tuhosti [MPa] při teplotě 10 °C						
ACP 16+ F		Frekvence [Hz]				
		5	10	15	20	25
Označení	ACP 16+ F1_1	10578	11230	11578	11811	12124
	ACP 16+ F1_2	10058	10714	11027	11255	11878
	ACP 16+ F1_3	10163	10750	11161	11406	11673
	ACP 16+ F1_4	10190	11011	11456	11678	12430
	ACP 16+ F2_1	10524	11064	11198	11453	11950
	ACP 16+ F2_2	11459	12121	12452	12775	13030
	ACP 16+ F2_3	11094	11935	11999	12398	12625
Celkový ø		10581	11261	11553	11825	12244

Hodnoty modulu tuhosti [MPa] při teplotě 15 °C						
ACP 16+ F		Frekvence [Hz]				
		5	10	15	20	25
Označení	ACP 16+ F1_1	8502	9295	11578	10137	10694
	ACP 16+ F1_2	8938	9684	11027	10465	11070
	ACP 16+ F1_3	9270	10178	11161	10972	11745
	ACP 16+ F1_4	8369	9071	11456	10369	10579
	ACP 16+ F2_1	8780	9415	9676	9921	10272
	ACP 16+ F2_2	9227	10043	10688	10937	11255
	ACP 16+ F2_3	8796	9512	9728	10044	10383
Celkový ø		8840	9600	10759	10406	10857

Hodnoty modulu tuhosti [MPa] při teplotě 25 °C						
ACP 16+ F		Frekvence [Hz]				
		5	10	15	20	25
Označení	ACP 16+ F1_1	5271	6249	6789	7149	7661
	ACP 16+ F1_2	5355	6024	6529	6886	7342
	ACP 16+ F1_3	5086	6106	6463	6932	7216
	ACP 16+ F1_4	5501	6242	6837	7186	7714
	ACP 16+ F2_1	5738	6537	6881	7283	7568
	ACP 16+ F2_2	5865	6761	7422	7814	8091
	ACP 16+ F2_3	5696	6464	7073	7434	7853
Celkový ø		5502	6340	6856	7241	7635

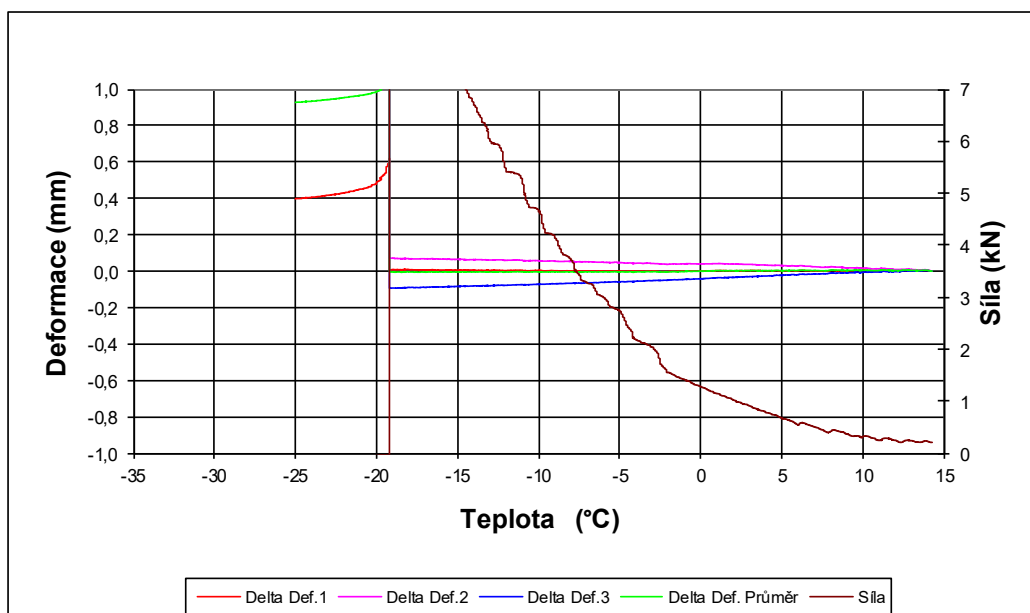
Hodnoty modulu tuhosti [MPa] při teplotě 40 °C						
ACP 16+ F		Frekvence [Hz]				
		5	10	15	20	25
Označení	ACP 16+ F1_1	1464	1959	2320	2851	3103
	ACP 16+ F1_2	1489	2125	2693	3138	3433
	ACP 16+ F1_3	1350	2066	2446	3044	3228
	ACP 16+ F1_4	1323	1942	2159	2622	3178
	ACP 16+ F2_1	1749	2355	2823	3202	3509
	ACP 16+ F2_2	1669	2232	2651	3193	3682
	ACP 16+ F2_3	1947	2300	2566	2964	3701
Celkový ø		1570	2140	2523	3002	3405

10.2 Dílčí protokoly nízkoteplotních vlastností

10.2.1 ACO 11+

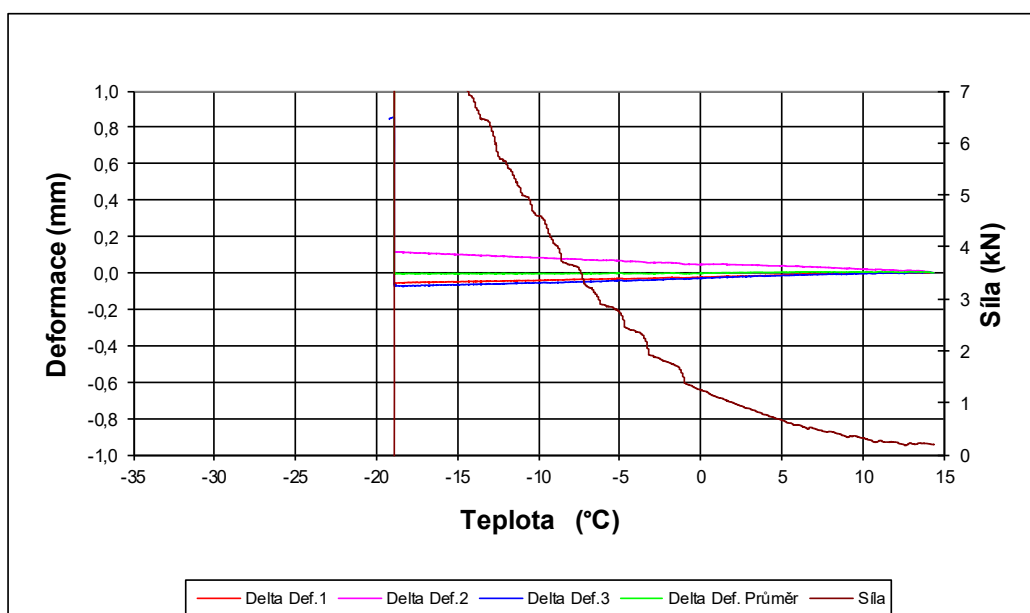
Zkouška odolnosti asfaltové směsi proti vzniku mrazových trhlin

Akce :	Venclíková DP
Asfaltová směs :	ACO 11+ 1_1
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	49.7 x 50.7 x 199.8
Datum zkoušky :	21.11.2017
Zkoušku provedl :	Venclíková
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	10,34
Max. napětí při porušení - MPa :	4,14
Teplota v komoře při porušení - °C :	-22,1
Teplota vzorku při porušení - °C :	-19,2



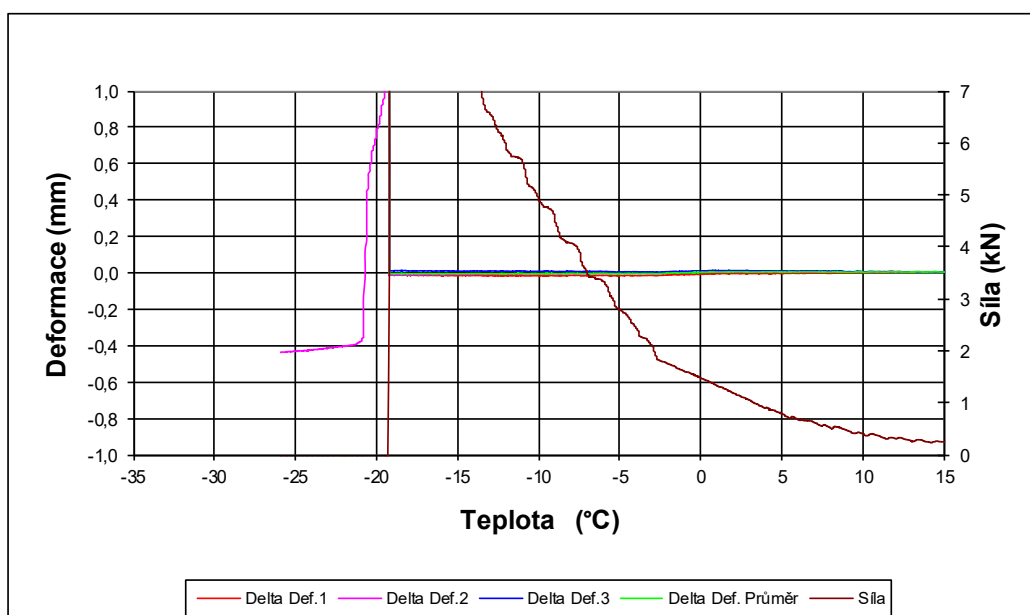
**Zkouška odolnosti asfaltové směsi
proti vzniku mrazových trhlin**

Akce :	Venclíková DP
Asfaltová směs :	ACO 11+ 2 1
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	49.4 x 51.2 x 199.5
Datum zkoušky :	22.11.2017
Zkoušku provedl :	Venclíková
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	9,86
Max. napětí při porušení - MPa :	3,95
Teplota v komoře při porušení - °C :	-23,0
Teplota vzorku při porušení - °C :	-18,8



**Zkouška odolnosti asfaltové směsi
proti vzniku mrazových trhlin**

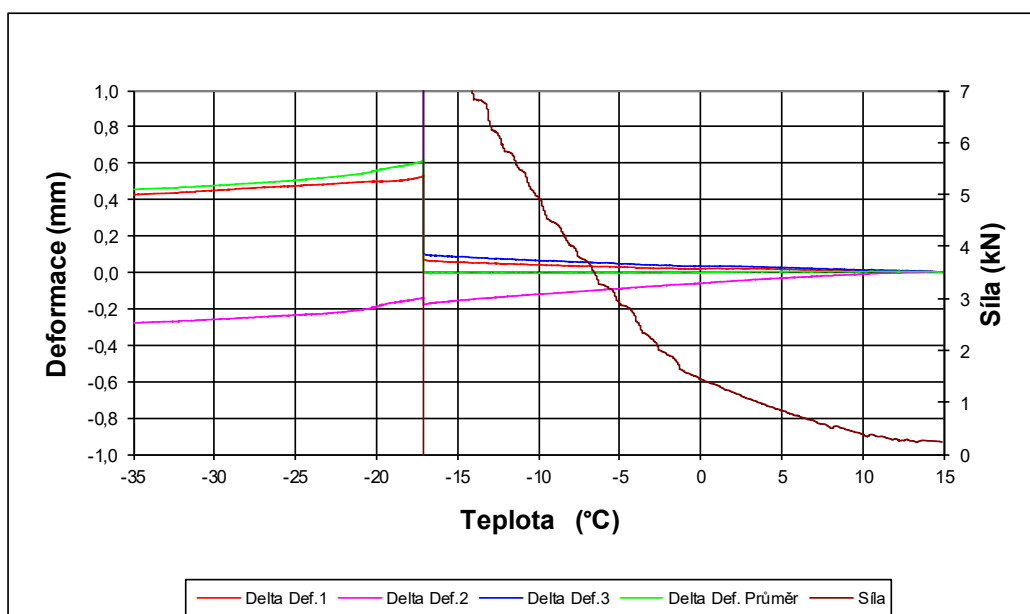
Akce :	Venclíková DP
Asfaltová směs :	ACO 11+ 2 2
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	50.2 x 51.4 x 199.4
Datum zkoušky :	28.11.2017
Zkoušku provedl :	Venclíková
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	10,90
Max. napětí při porušení - MPa :	4,36
Teplota v komoře při porušení - °C :	-21,8
Teplota vzorku při porušení - °C :	-19,2



10.2.2 ACO 11+ F

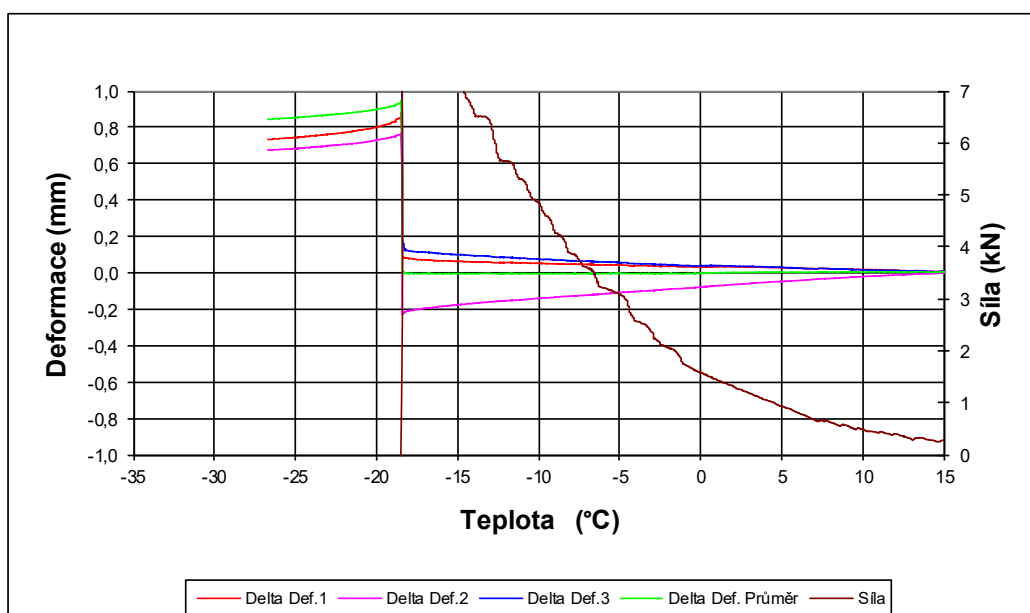
Zkouška odolnosti asfaltové směsi proti vzniku mrazových trhlin

Akce :	Venclíková DP
Asfaltová směs :	ACO 11+ F1 1
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	49.7 x 50.0 x 200.4
Datum zkoušky :	27.11.2017
Zkoušku provedl :	Venclíková
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	8,47
Max. napětí při porušení - MPa :	3,39
Teplota v komoře při porušení - °C :	-20,8
Teplota vzorku při porušení - °C :	-17,0



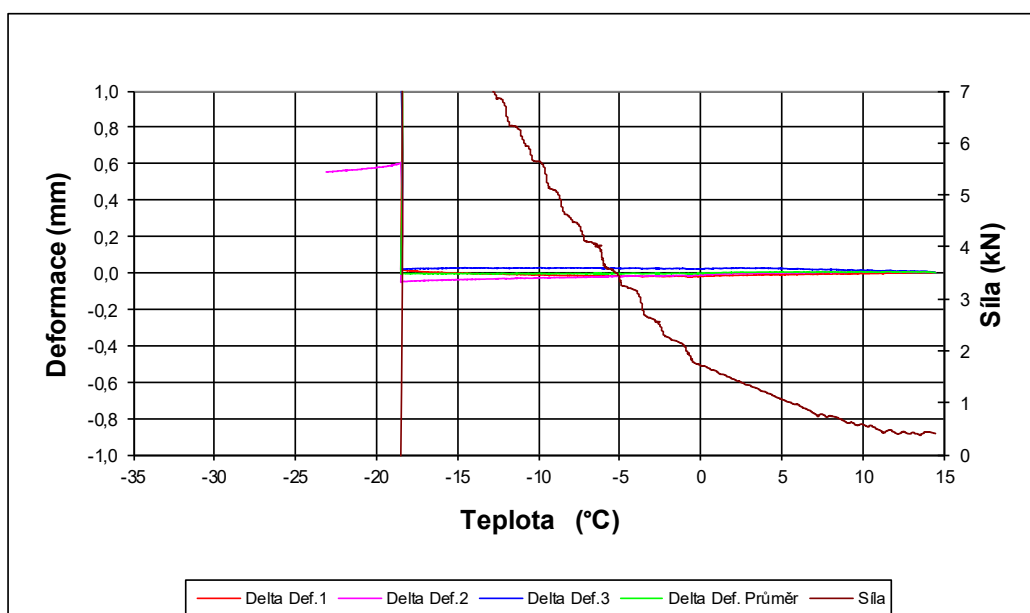
**Zkouška odolnosti asfaltové směsi
proti vzniku mrazových trhlin**

Akce :	Venclíková DP
Asfaltová směs :	ACO 11+ F2 1
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	49.8 x 50.0 x 200.3
Datum zkoušky :	01.12.2017
Zkoušku provedl :	Venclíková
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	8,37
Max. napětí při porušení - MPa :	3,36
Teplota v komoře při porušení - °C :	-21,4
Teplota vzorku při porušení - °C :	-18,0



**Zkouška odolnosti asfaltové směsi
proti vzniku mrazových trhlin**

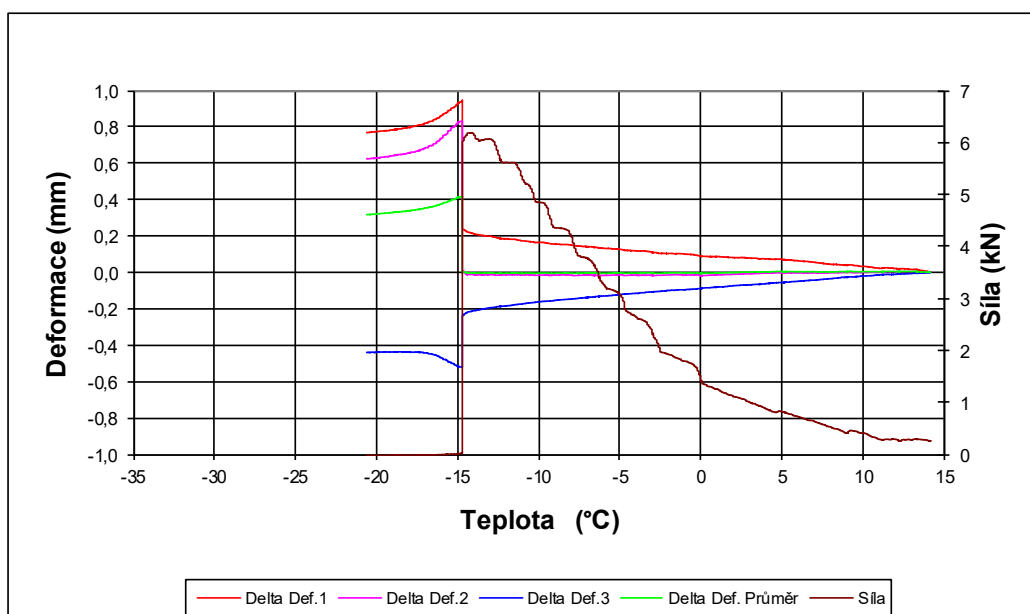
Akce :	Venclíková DP
Asfaltová směs :	ACO 11+ F2 2
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	49.4 x 51.8 x 201.2
Datum zkoušky :	30.11.2017
Zkoušku provedl :	Venclíková
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	10,18
Max. napětí při porušení - MPa :	3,98
Teplota v komoře při porušení - °C :	-22,7
Teplota vzorku při porušení - °C :	-18,4



10.2.3 ACP 16+

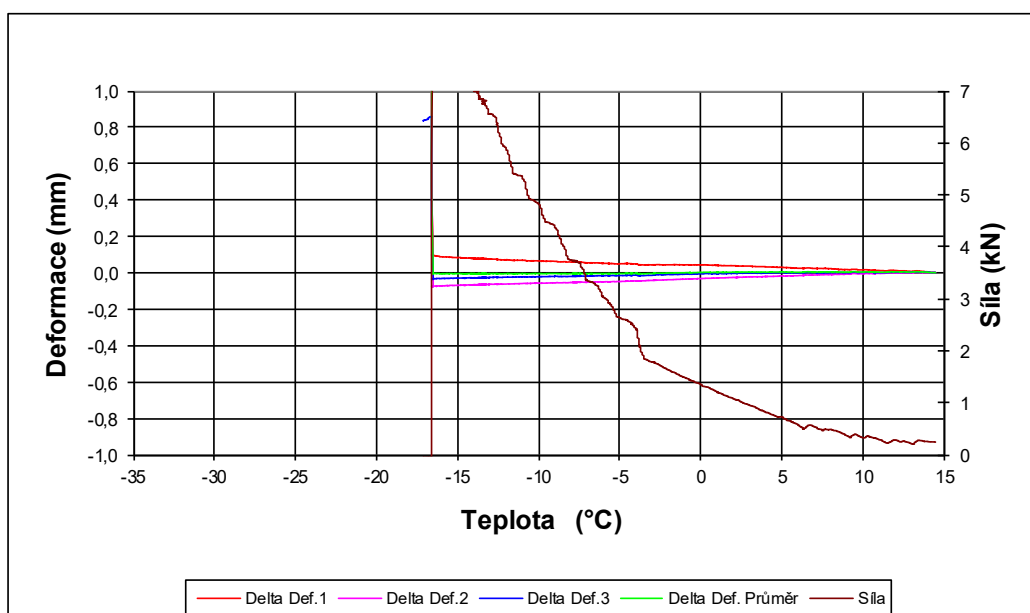
Zkouška odolnosti asfaltové směsi proti vzniku mrazových trhlin

Akce :	Venclíková DP
Asfaltová směs :	ACP 16+ 1 1
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	49.0 x 50.8 x 199.9
Datum zkoušky :	05.12.2017
Zkoušku provedl :	Venclíková
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	6,18
Max. napětí při porušení - MPa :	2,48
Teplota v komoře při porušení - °C :	-17,3
Teplota vzorku při porušení - °C :	-14,1



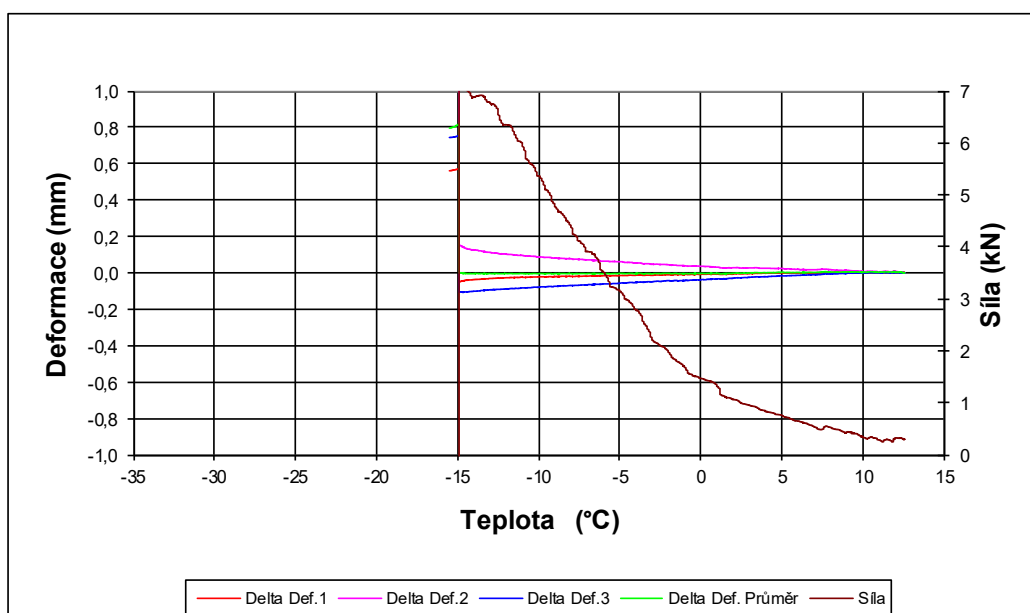
**Zkouška odolnosti asfaltové směsi
proti vzniku mrazových trhlin**

Akce :	Venclíková DP
Asfaltová směs :	ACP 16+ 2 1
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	49.5 x 49.7 x 199.2
Datum zkoušky :	04.12.2017
Zkoušku provedl :	Venclíková
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	8,62
Max. napětí při porušení - MPa :	3,50
Teplota v komoře při porušení - °C :	-19,8
Teplota vzorku při porušení - °C :	-16,5



**Zkouška odolnosti asfaltové směsi
proti vzniku mrazových trhlin**

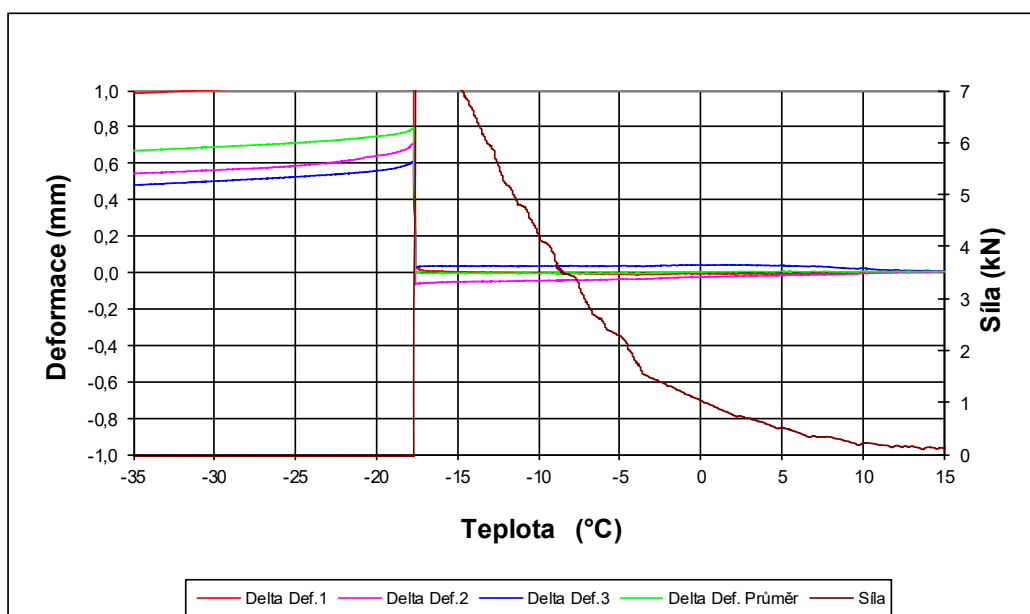
Akce :	Venclíková DP
Asfaltová směs :	ACP 16 + 2 ₂
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	50.0 x 49.7 x 200.0
Datum zkoušky :	06.12.2017
Zkoušku provedl :	Venclíková
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	7,15
Max. napětí při porušení - MPa :	2,88
Teplota v komoře při porušení - °C :	-17,8
Teplota vzorku při porušení - °C :	-14,6



10.2.4 ACP 16+ F

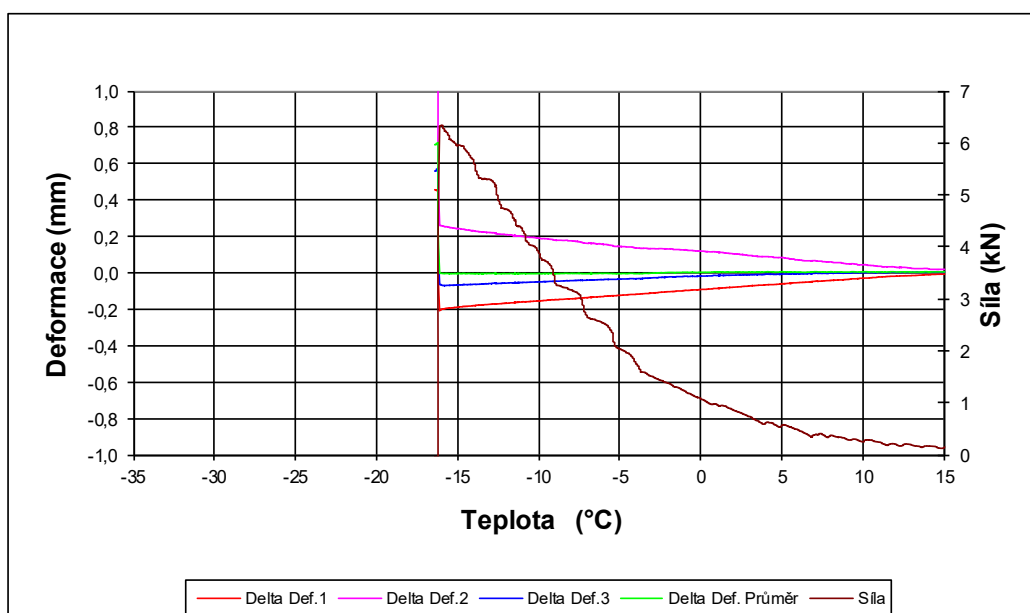
Zkouška odolnosti asfaltové směsi proti vzniku mrazových trhlin

Akce :	Venclikova DP
Asfaltová směs :	ACP 16+ F1 1
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	49.0 x 49.7 x 200.0
Datum zkoušky :	11.12.2017
Zkoušku provedl :	Venclíková
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	8,51
Max. napětí při porušení - MPa :	3,49
Teplota v komoře při porušení - °C :	-21,7
Teplota vzorku při porušení - °C :	-17,3



**Zkouška odolnosti asfaltové směsi
proti vzniku mrazových trhlin**

Akce :	Venclíková DP
Asfaltová směs :	ACP 16+ F2_1
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	48.9 x 50.6 x 201.3
Datum zkoušky :	08.12.2017
Zkoušku provedl :	Venclíková
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	6,34
Max. napětí při porušení - MPa :	2,56
Teplota v komoře při porušení - °C :	-20,6
Teplota vzorku při porušení - °C :	-16,0



**Zkouška odolnosti asfaltové směsi
proti vzniku mrazových trhlin**

Akce :	Venclíková DP
Asfaltová směs :	ACP 16+ F2_2
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	49.0 x 50.8 x 199.1
Datum zkoušky :	07.12.2017
Zkoušku provedl :	Venclíková
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	10,21
Max. napětí při porušení - MPa :	4,10
Teplota v komoře při porušení - °C :	-21,0
Teplota vzorku při porušení - °C :	-17,7

