VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ
INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

NÍZKOTEPLOTNÍ VLASTNOSTI ASFALTOVÝCH POJIV A SMĚSÍ

LOW TEMPERATURE PROPERTIES OF ASPHALT BINDERS AND MIXTURES

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE — Bc. Petr Veselý
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. ONDŘEJ DAŠEK, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2020

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. Petr Veselý
Název	Nízkoteplotní vlastnosti asfaltových pojiv a směsí
Vedoucí práce	Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2020
Datum odevzdání	15. 1. 2021

V Brně dne 31. 3. 2020

doc. Dr. Ing. Michal Varaus Vedoucí ústavu	prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc. Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Předané vzorky materiálů
ČSN EN 13108-1
Návrh nových národních požadavků na směsi typu AC
Zkušební normy pro asfaltová pojiva
Normy řady ČSN EN 12697
Literatura z internetu

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

V rámci diplomové práce budou stanoveny nízkoteplotní vlastnosti různých tříd silničních asfaltů. Z těchto pojiv budou následně vyrobeny asfaltové směsi, na kterých se bude zjišťovat vliv použité třídy silničního asfaltu na nízkoteplotní chování těchto směsí.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:
1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Dnešní společnost je vysoce závislá na fungující silniční infrastruktuře, která je díky kolektivní snaze z hlediska hlavní dopravní sítě téměř vybudována, a pozornost se nyní upíná k její životnosti především vzhledem ke změně klimatu a častějším teplotním extrémům. Tato práce si dává za cíl provedení základních zkoušek asfaltových pojiv, zejména ve vztahu k nízkoteplotním vlastnostem, na nejčastěji používaných silničních asfaltech a směsích z nich vyrobených. V teoretické části se práce zabývá obecnou definicí asfaltových pojiv a studiemi provedenými na obdobné téma. Praktická část popisuje jednotlivé použité zkoušky, kterými jsou mimo jiné zkouška penetrace jehlou, bodu měknutí, určení kritické teploty bodu lámavosti pomocí metody dle Fraasse a pomocí trámečkového reometru a určení kritické teploty dle TSRST. V závěru jsou zkoušky okomentovány a určeny vzájemné korelace mezi výsledky zkoušek.

KLÍČOVÁ SLOVA

Silniční asfalt, asfaltová směs, mrazové trhliny, nízkoteplotní vlastnosti, TSRST, koeficient determinace.

ABSTRACT

Today's society is highly reliable on a working road infrastructure, which is because of collective efforts already built, in terms of main net of roadways, and the attention is now paid to its service life primarily from a point of view of a climate change which is causing more frequent temperature extremes. This thesis sets its goal to perform basic tests for bitumen, especially ones dealing with low temperature properties, on types of bitumen usually used in out day to day world and asphalt mixtures made with those types of bitumen. The theoretical part talks about the basic definition of bitumen and studies performed on the similar issue. Practical part of the thesis is focused on performing the tests of bitumen and asphalt, which include but are not limited to, penetration test, softening point test, critical temperature detected by method by Fraasse and the bending beam rheometer and the test to set critical temperature of asphalt by using TSRST. At the end of the thesis the evaluation of results and its mutual correlation is performed.

KEYWORDS

Bitumen, asphalt mixtures, low-temperature cracking, low temperature properties, TSRST, coefficient of determination.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Petr Veselý *Nízkoteplotní vlastnosti asfaltových pojiv a směsí*. Brno, 2021. 80 s., 9 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Nízkoteplotní vlastnosti asfaltových pojiv a směsí* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 12. 1. 2021

Bc. Petr Veselý
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Nízkoteplotní vlastnosti asfaltových pojiv a směsí* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 12. 1. 2021

Bc. Petr Veselý
autor práce

Poděkování:

Chtěl bych především poděkovat vedoucímu mé diplomové práce Ing. Ondřeji Daškovi Ph.D. za cenné rady, pomoc a trpělivost při konzultacích mé práce. Dále bych chtěl poděkovat pracovníkům laboratoře PKO na fakultě stavební VUT za pomoc při provádění jednotlivých zkoušek materiálů.

Obsah

1 Úvod 10
2 Problematika a cíle práce 11
3 Teoretická část 12
3.1 Historie 12
3.2 Rozdělení a výroba 12
3.3 Nízkoteplotní zkoušky asfaltů 14
3.4 Studie provedena v Sofii, Bulharsku 16
4 Použité zkušební metody 19
4.1 Penetrace jehlou dle ČSN EN 1426 19
4.1.1 Popis zkoušky 19
4.1.2 Vzorky pro zkoušku penetrace 20
4.2 Bod měknutí dle ČSN EN 1427 21
4.2.1 Popis zkoušky 21
4.2.2 Vzorky pro testování bodu měknutí 22
4.2.3 Provedení zkoušky 22
4.3 Bod lámavosti dle Fraasse dle ČSN EN 12593 24
4.3.1 Popis zkoušky 24
4.3.2 Příprava vzorků 24
3.3.3 Provedení zkoušky 25
4.4 Modul tuhosti za ohybu dle ČSN EN 14771 26
4.4.1 Popis zkoušky 26
3.4.2 Vzorky pro test BBR 27
3.4.3 Provedení zkoušky 29
4.5 Stanovení objemové hmotnosti asfaltové směsi 31
4.5.1 Příprava těles 31
4.5.2 Postup zkoušky 34
4.6 Maximální objemová hmotnost 36
4.6.1 Postup zkoušky 36
4.7 Mezerovitost 38
4.8 Míra zhutnění 38
4.9 Zkouška TSRST dle ČSN EN 12697-46 39
4.9.1 Popis zkoušky 39
4.9.2 Příprava asfaltové směsi pro desky 41

3.6.3 Hutnění desek z asfaltové směsi ... 43
4.9.4 Výroba zkušebních trámců ... 45
4.9.5 Získání zkušebních těles z trámců ... 46
5 Materiály použitých vzorků ... 47
5.1 Asfaltová pojiva ... 47
5.2 Směs ACO 11 ... 47
6 Výsledky ... 50
6.1 Penetrace jehlou ... 50
6.2 Bod měknutí ... 51
6.3 Určení bodu lámavosti dle Fraasse ... 53
6.4 Modul tuhosti za ohybu pomocí BBR ... 55
6.5 Stanovení objemové hmotnosti asfaltové směsi ... 58
6.6 Maximální objemová hmotnost ... 59
6.7 Mezerovitost ... 59
6.8 Míra zhutnění ... 60
6.9 Test TSRST ... 61
6.10 Korelace výsledků ... 63
7 Závěr ... 72
8 Seznam použitých zdrojů ... 74
9 Seznam obrázků ... 77
10 Seznam tabulek ... 78
11 Seznam grafů ... 79
12 seznam příloh ... 80

1 ÚVOD

Jedním ze základních typů pojiv, které se používají v silničním stavitelství je asfalt. Tento materiál existuje jako přírodní, nacházející se v přírodních ložiscích, ale především ropný, který se získává destilací surové ropy jako jeden z posledních zbytkových produktů tohoto procesu. Nejtypičtějším druhem asfaltového pojiva používaného u nás je silniční asfalt s penetrací 50/70.

Asfalt je označován jako visko-elastický materiál. To znamená, že za vysokých teplot se asfalt chová jako kapalina určená svou viskozitou a se snižující se teplotou se zvyšuje tuhost látky, která se začíná chovat elasticky. Tato skutečnost znamená, že v závislosti na typu asfaltu se mění jeho odolnost vůči nízkým teplotám a schopnost odolávat vznikajícímu tahovému napětí.

Ovšem ve skutečné netuhé vozovce není pouze asfalt, ale asfaltová směs, složena z kombinací daných frakcí kameniva a asfaltového pojiva. U netuhých vozovek se při výstavbě nevytváří dilatační spáry, ale tahové napětí je přenášeno směsí a zároveň částečně vyrušeno relaxací materiálu a spolupůsobením s přilehlou vrstvou. S klesající teplotou však schopnost relaxace materiálu klesá a materiál se stává náchylnějším ke vzniku mrazových trhlin. Nejenom klesající teplota asfaltu, ale i jeho stárnutí snižuje schopnost materiálu odolávat nízkým teplotám. [1]

Proto u asfaltů určujeme obor použitelnosti, což je jedna ze základních charakteristik tohoto materiálu. Je to vlastnost určující teplotní rozpětí mezi bodem měknutí na horní hranici oboru a bodem lámavosti na hranici spodní. Požadavky na obor použitelnosti se liší podle místního klimatu kde bude netuhá vozovka vystavena.

S přibývajícími teplotními extrémy v posledních několika letech z důvodu změny klimatu a bez vyhlídek do budoucnosti na změnu tohoto trendu přibývajících extrémů se požadavky na obor použitelnosti zvyšují na obě strany.

2 PROBLEMATIKA A CÍLE PRÁCE

Pro správné použití pojiva v konstrukci je potřeba znát vlastnosti asfaltového pojiva a zároveň i asfaltové směsi. Bohužel nízkoteplotní zkoušky těchto dvou materiálů se mezi sebou liší a korelační závislost mezi nimi prozatím nebyla v odborné literature dostatečně popsána. Jejich určení je však kritické pro návrh asfaltové směsi.

Při špatném návrhu asfaltové směsi vzhledem k nízkoteplotním vlastnostem se stává největším rizikem na porušení vozovky vznik mrazových trhlin. Vznikající mrazové trhliny vytvářejí cestu pro vodu protékající z povrchu do podkladu a podloží, což velmi výrazně napomáhá k degradaci vozovky.

V teoretické části si práce dává za cíl provést rešerši odborné literatury týkající se nízkoteplotních zkoušek asfaltu a asfaltových směsí s využitím českých i zahraničních zdrojů. Dále budou zmíněny typy zkoušek využívané k této problematice. V posledním kroce budou zmíněné některé nové zkoušky aplikované ve světě s vyhlídkou do budoucnosti.

Cílem praktické části práce je posouzení nízkoteplotních vlastností asfaltů s různou hodnotou penetrace, a zároveň výroba asfaltových směsí z těchto asfaltů s použitím stejného složení směsi. K tomuto bude využito těchto zkoušek:

- Bod měknutí, dle ČSN EN 1427
- Penetrace, dle ČSN EN 1426
- Bod lámavosti dle Fraasse, dle ČSN EN 12593
- Modul tuhosti za ohybu, dle ČSN EN 14771
- Zkouška nízkoteplotních vlastností s rovnoměrným řízeným poklesem teploty (TSRST), dle ČSN EN 12697-46

Výsledky těchto zkoušek budou poté porovnány mezi sebou a provede se zhodnocení korelace mezi jejich hodnotami, které prokáží nebo naopak vyvrátí závislost mezi výsledky nízkoteplotních zkoušek asfaltových pojiv a asfaltových směsí.

3 TEORETICKÁ ČÁST

Asfalt je v oxfordském slovníku definován jako černá viskózní směs uhlovodíků získávána přirozenou cestou z přírodních zdrojů, či jako zbytek z ropné destilace, používaná na vozovky a střechy. Tento materiál se ale dnes využívá v několika oborech a není omezený jen do těchto dvou. [2]

3.1 HISTORIE

V historii se první asfaltová pojiva získávala na místech s velkými ložisky ropy, z kterých vyvěrala směs asfaltu smíchaná s okolní horninou. Tato velká ložiska se například nacházela na dálném východě, kde první důkazy o využití asfaltových pojiv se datují do doby přibližně 3500 let př.n.l. jako izolant proti pronikání vody. Na území dnešního pákistánu ve městě Mohendžodaro se nalezla vodní nádrž vybudovaná přibližně 3000 let př.n.l. s využitím přírodního asfaltu jako spojovací materiál pro kamenné bloky, a zároveň jako izolace vnitřního prostoru pro zachování vody. Tato metoda izolace se při stavbě přehrad využívá dodnes. I když tyto země využívaly asfaltová ložiska pokud k nim měly jednoduchý přístup, do Evropy se tento materiál dostal až ke konci devatenáctého století. [3]

Spotřeba asfaltu v Evropě začala stoupat ve dvacátém století s příchodem ropy a jejího zpracování. Ve dvacátých letech dvacátého století se například ve Velké Británii použilo 200 000 tun asfaltu za rok a v sedmdesátých letech už spotřeba stoupla na 2,4 milionu tun. Pro jiné země v Evropě takto stará data využívání asfaltového pojiva nejsou, ale očekává se, že takový nárůst probíhal v Evropě plošně s podobnými hodnotami.

3.2 ROZDĚLENÍ A VÝROBA

Jedno ze základních rozdělení asfaltových pojiv je na přírodní a ropné asfalty. Nejznámější ložisko přírodního asfaltu je jezero na ostrově Trinidad v Karibském moři objevené v roce 1595. Toto jezero má rozlohu přibližně 35 hektarů s průměrnou hloubkou okolo 90 m. Jezero obsahuje přibližně 10 milionů tun asfaltového pojiva.

Ropné asfalty vznikají destilací ropy. Prvním krokem je frakční destilace, při které se rozdělují produkty v ocelové věži ohříváním na teploty 350 až 380 °C při tlaku mírně

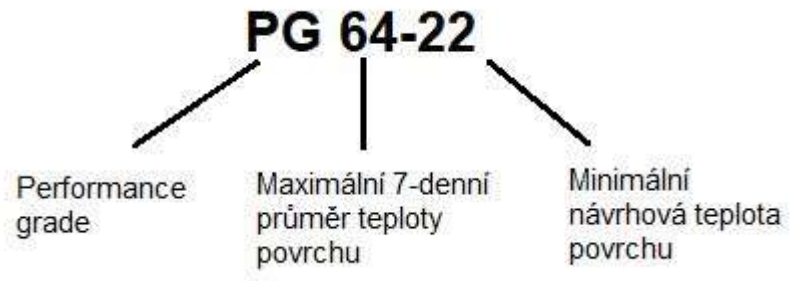
navýšeném nad hodnotu atmosférického tlaku. Na vrchu věže se usazují plynné produkty destilace jako propan a butan. Směrem dolů se poté vyskytují produkty jako nafta, kerosin, který je využívaný jako letecké palivo, plynový olej a posledním materiálem usazeným na dně je mazut. Z mazutu se poté vakuovou destilací při teplotě mezi 350 a 425 °C. Z této vakuové destilace se získává znovu několik materiálů, z nichž zbytkový materiál je použit pro výrobu asfaltových pojiv. Tento zbytkový materiál se poté při ohřevu profoukne vzduchem a dochází ke vzniku finálního produktu – asfaltu.

Chemické složení asfaltu se liší podle místa výroby a ropného zdroje. I přes tento faktor, většina asfaltů se složením shoduje v několika klíčových prvcích:

- Uhlík 82 – 88 %
- Vodík 8 – 11 %
- Síra 0 – 6 %
- Kyslík 0 – 1,5 %
- Dusík 0 – 1 %

Silniční asfalty se dnes v Evropě specifikují především pomocí penetrace jehlou. Hodnota penetrace je přímo závislá na viskozitě asfaltu. Asfalty jsou poté roztříděny do kategorií. V České Republice je nejpoužívanějším asfaltem do asfaltových směsí asfalt s penetrací 50/70. Typ použitého asfaltu záleží na klimatu v dané lokalitě, kde tvrdší asfalty lépe odolávají vysokým teplotám a naopak. Velmi měkké asfalty, jako například třídy 160/220 jsou předepsané pro použití do asfaltových směsí, ale jejich využití se nejvíce projevuje v asfaltových emulzích. [4]

Avšak toto rozdělení není používané všude ve světě. Například ve spojených státech je používán Pavement Grading Systém, což je označení asfaltového pojiva vycházející z několika základních testů, označující teplotu, při které je ideální jeho použití, neboť bylo obecně požadováno přesnější určení než pouze penetrační metodou. U nás by se takové označení dalo přirovnat k oboru použitelnosti nebo obor plasticity. Příklad takového označení je na následujícím obrázku č.1. [5]



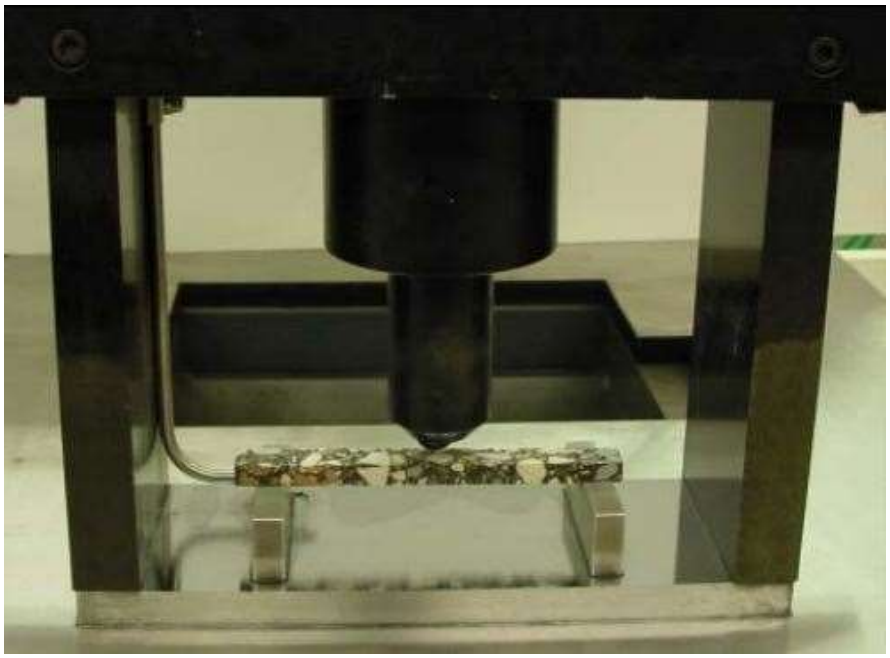
Obrázek 1: Značení asfaltových pojiv ve spojených státech [5]

3.3 NÍZKOTEPLOTNÍ ZKOUŠKY ASFALTŮ

Nejčastějšími zkouškami používanými pro určení nízkoteplotních vlastností asfaltových pojiv, jsou bodu lámavost dle Fraasse a zkouška v průhybovém trámečkovém reometru (BBR). Zkouška pro určení bodu lámavosti dle Fraasse oproti BBR relativně zastaralá, nicméně stále široce využívaná. Její nevýhodou je vysoký nárok na pracovníka provádějícího test, jelikož napětí se vyvýjí manuálním pohybem a konec zkoušky se určí vizuálně. Na rozdíl od toho zkouška reometrem, neboli BBR, je mnohem spolehlivější v tomto ohledu, ale pochopitelně cena zařízení je řádově vyšší oproti pomůckám pro zkoušku bodu lámavosti dle Fraasse.

Pro testování asfaltových směsí se používá například zkouška TSRST, ale snaha o vytvoření nové zkoušky na určení nízkoteplotních vlastností asfaltových směsí stále přetrvává. Například při výzkumu na americké univerzitě v Minesotě byla snaha o použití reometru pro zkoušku BBR na zkoušení asfaltových směsí. Výsledky prováděných zkoušek při splnění několika základních podmínek vycházely na první pohled reprezentativně, ale hlavní potíž při implementování této metody vznikla použitím malých vzorků, které nemusí vhodně zachytit chování skutečného povrchu. Výsledky proto nemusí být reprezentativní, především pokud velikost zrn kameniva přesáhne nejmenší rozměr testovaného trámce. Závěrem publikované práce autor podotýká, že v této metodě je možná budoucnost pro testování nízkoteplotních vlastností asfaltových směsí, pokud se testovací zařízení přizpůsobí na větší tělesa. Fotky z provedení testu v Minesotě jsou na následujících obrázcích č. 2 a 3. [6] [7]

Obrázek 2: Vzorek asfaltové směsi pro reometr [7]



Obrázek 3: Vzorek směsi v trámečkovém reometru [7]

3.4 STUDIE PROVEDENA V SOFII, BULHARSKU

Na porovnání nízkoteplotních vlastností asfaltů a asfaltových směsí z nich vytvořených byla vytvořena studie v Centrálním ústavu národních a Evropských norem a standardů silničních staveb v Sofii, Bulharsku. Tato studie se zabývala korelací výsledků jednotlivých zkoušek, mimo jiné i nízkoteplotních. Jako výchozí silniční asfalty studie používala silniční asfalt 50/70 a 70/100, který byl modifikovaný čtyřmi různými modifikátory pro zlepšení jeho nízkoteplotních vlastností. Studie měla za cíl otestovat vliv modifikátorů, a zároveň korelaci výsledků zkoušek.

Jednotlivé asfaltové směsi byly také rozděleny do 3 kategorií odlišné různou dobou stárnutí, kdy první část nebyla vystavena žádnému stárnutí, druhá část byla ohřívána při teplotě 135 °C po dobu 4 hodin pro simulaci krátkodobého stárnutí a třetí část byla nahřívána na 85 °C v jiné laboratorní sušárně 5 dnů. Asfaltové směsi byly vyrobeny ze stejné směsi kameniva pro relevantnost výsledků, splňující požadavky pro směs ACO 8. Složení výsledné směsi bylo následující:

- Kamenivo frakce 4/8 40%
- Kamenivo frakce 0/4 54%
- Kamenná moučka 6%

Provedené zkoušky při studii byly penetrace jehlou, bod měknutí, modul tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru, bod lámavosti dle Fraasse a určení pevnosti v příčném tahu asfaltové směsi. Studie nepoužívá přímé určení pevnosti v tahu pomocí TSRST a odůvodňuje to tím, že přístrojem pro tuto zkoušku většina laboratoří nedisponuje. Přístroj pro určení pevnosti v přícném tahu asfaltové směsi je znázorněn na obrázku 4.

Obrázek 4: Přístroj pro určení pevnosti v příčném tahu [8]

Autoři studie použili přístroje pro určení pevnosti v příčném tahu, který je běžně ve Spojených Státech používaný pro určení nízkoteplotních vlastností asfaltových směsí, vložili do temperační komory, která je schopna nastavit teplotu od -30 °C do +30 °C a poté upravili rychlost zatěžování na přibližně čtvrtinovou hodnotu, aby zajistili lepší přesnost výsledků. Výsledky provedené studie pro asfalty nevystavené stárnutí jsou znázorněny v následující tabulce 1.

Tabulka 1: Determinační součinitel zkoušek v Bulharské studii

Korelační součinitel R^2	Fraasse	Penetrační index	Modul tuhosti	m-hodnota	Nepřímo určená pevnost v tahu
Fraasse	X				
Penetrační index	0.673 0.803*	X			
Modul tuhosti	0.808 0.999*	0.115 0.787*	X		
m-hodnota	0.787 0.819*	0.178 0.315*	0.873 0.833*	X	
Nepřímo určená pevnost v tahu	0.887 0.997*	0.317 0.751*	0.948 0.998*	0.831 0.863*	X

**Při uvažování pouze 3 typů asfaltových pojiv modifikovaných polymery*

Studie uvažuje korelaci při koeficientu determinace R^2 větším než 0,8 za vysokou. Zajímavým výsledkem studie bylo, že korelace zkoušek asfaltových pojiv a asfaltových směsí vycházela mnohem příznivěji než-li korelace jednotlivých zkoušek asfaltových pojiv. Jedním z výsledků je také fakt, že korelační součinitel se blížil nule s větším obsahem polymerní přísady, což naznačuje větší stálost materiálu. [9]

4 POUŽITÉ ZKUŠEBNÍ METODY

Cílem praktické části práce bylo určit nízkoteplotní vlastnosti asfaltů a asfaltových směsí. Pro tyto účely byly použity zkušební metody, které se běžně ve stavební praxi používají. V této části práce jsou tyto zkušební metody popsány. Jsou zde také uvedeny a stručně charakterizovány další zkušební metody, které byly v rámci práce použity.

4.1 PENETRACE JEHLOU DLE ČSN EN 1426

Jedná se o konvenční zkoušku asfaltových pojiv, která je popsána v normě ČSN EN 1426 - Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení penetrace jehlou.

4.1.1 Popis zkoušky

Zkouška penetrace je založená na testování proniknutí jehly do předem temperovaného vzorku asfaltového pojiva. Jehla proniká do testovaného vzorku po dobu 5 s za pomoci přidaného zatížení o velikosti 100 g. Po uběhnutí 5 s se zkouška zastaví a změří se proniknutí jehly do testovaného vzorku. Hloubka penetrace závisí především na viskozitě asfaltového pojiva, přičemž je jí nepřímo úměrná. To znamená, že čím menší je viskozita tím větší penetrace při zkoušce z pravidla dosáhneme.

Výsledky se zaznamenávají s přesností na 0,1 mm v penetračních jednotkách, kde 1 p. j. = 0,1 mm. Na každém vzorku se zkouška provede alespoň třikrát pro eliminaci chybných výsledků. Každý jednotlivý vpich jehly by měl být tak daleko od předchozího, aby nedocházelo k ovlivnění průběhu zkoušky předešlým vpichem jehly a zároveň by testy měly být provedeny v co nejkratším časovém úseku, aby nedocházelo ke změně teploty testovaných asfaltových pojiv. [10] [11]

Obrázek 5: Přístroj pro zkoušku penetrace jehlou

4.1.2 Vzorky pro zkoušku penetrace

Pro zkoušku penetrace je potřeba vzorky asfaltového pojiva přelít do nádoby s dostatečnou hloubkou (především u velmi měkkých asfaltů). Vzorky je poté třeba natemperovat na požadovanou teplotu. V tomto případě byla použita teplota 25°C. Penetrační jehlu je potřeba po každé zkoušce očistit aby byla čistá a rovná.

Obrázek 6: Vzorek pro zkoušku penetrace jehlou

4.2 BOD MĚKNUTÍ DLE ČSN EN 1427

Jde o konvenční metodu zkoušení pro stanovení vrchní hranice oboru plasticity (použitelnosti), která je uvedena v normě ČSN EN 1427 – Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička.

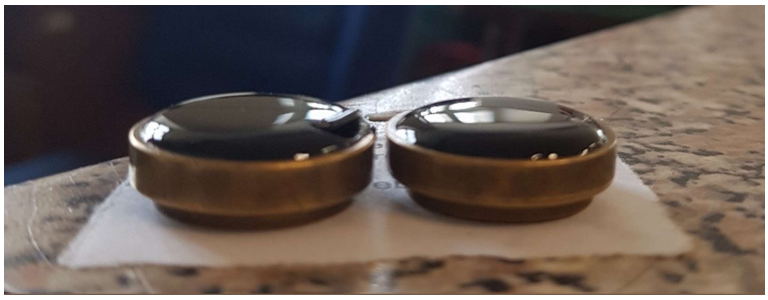
4.2.1 Popis zkoušky

Je to konvenční metoda zkoušení pro stanovení vrchní hranice oboru plasticity (použitelnosti), která je uvedena v normě ČSN EN 1427 – Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička. Což znamená nalezení teploty potřebné k dosažení bodu měknutí.

Pro provedení této zkoušky je nezbytné zkušební zařízení, které může být manuální či automatické. Zařízení se skládá z dvou mosazných kroužků umístěných na držácích, odlévací destičky, dvou kuliček z oceli, skleněné kádinky, míchadla a teploměru. [12]

4.2.2 Vzorky pro testování bodu měknutí

Vzorky asfaltu je potřeba nahřát a přelít do předpřipravených kroužků o průměru 15,9 ± 0,1 mm do výšky 6,4 mm. Při odlévání je důležité věnovat pozornost rovnoměrnému rozlití aby nedošlo ke vzniku vzduchových bublin ve vzorku, které mohou ovlivnit zkoušku. Asfalt do kroužků je přelit s lehkým přebytkem a po vychladnutí je přebytek pojiva odříznut aby byl povrch každého vzorku zarovnán s okrajem kroužku. Kroužky poté umístíme na destičku pro měření a vložíme do přístroje. Připravené neseříznuté vzorky jsou zobrazeny na obrázcích 7 a 8.



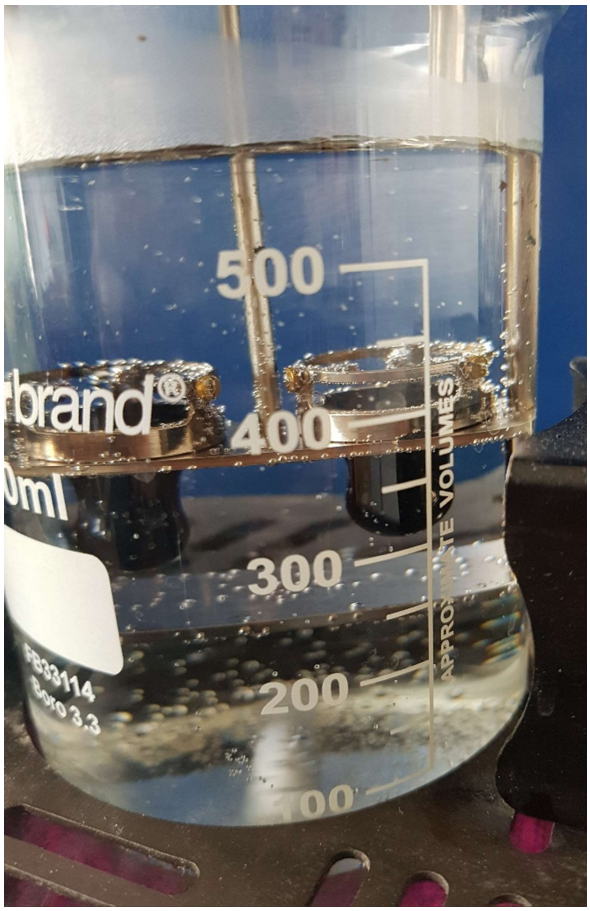
Obrázek 7: Vzorky pro zkoušku bodu měknutí po odlití

Obrázek 8: Vzorky všech použitých pojiv pro zkoušku bodu měknutí

4.2.3 Provedení zkoušky

Připravená sestava se vloží do vodní lázně. Do kádinky se vloží teploměr a zároveň i magnetické míchadlo pro rovnoměrnost ohřevu. Získání požadované teploty dosáhneme po deformaci tlakem gravitace ocelové kuličky o předepsané hmotnosti (3,5 ± 0,05 g). Zkouška je ukončena pokud se asfaltová vrstva deformuje pod danou hranici 25 mm a

přístroj automaticky zaznamená propad obou kuliček pomocí světelného paprsku. Celá tato zkouška probíhá v glycerinové lázni či destilované/deionizované vodě, která je ohřívána rychlostí 5 °C za minutu. Čím větší je teplota bodu měknutí, tím odolnější je později i asfaltová vrstva v letních měsících, neboť lépe odolává přetváření za vysoké teploty. Vzorek asfaltu zdeformovaný pod hranici 25 mm je znázorněn na obrázku 9.



Obrázek 9: Porušené vzorky po provedení zkoušky bodu měknutí

Výstup dat z této zkoušky je formou dvou teplot zaznamenaných na dvou různých kroužcích ve stejné vodní lázni se stejným typem asfaltu pro eliminaci vadných měření. Výsledné teploty se zaznamenávají s přesností na 0,2 °C. Pokud se teploty těchto dvou měřených vzorků liší o více jak 1 °C u nemodifikovaných asfaltů nebo 2 °C u modifikovaných asfaltů, je potřeba zkoušku opakovat. [12]

4.3 BOD LÁMAVOSTI DLE FRAASSE DLE ČSN EN 12593

Jedná se o konvenční zkoušku asfaltových pojiv, která je popsána v normě ČSN EN 12593 - Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení bodu lámavosti podle Fraasse. Tato zkouška je použita pro meření bodu lámavosti, neboli určení teploty na spodní hranici oboru použitelnosti.

4.3.1 Popis zkoušky

Měřící zařízení pro měření bodu lámavosti se skládá z ohýbacího zařízení, ohýbaných plíšků o předepsané délce 41,00 ± 0,05 mm, šířce 20,0 ± 0,2 mm a tloušťce 0,15 ± 0,02 mm. Dalšími částmi zařízení jsou chladící nádoba, teploměr, deska a stojan. K provedení zkoušky také potřebujeme zařízení k rozehřátí asfaltového pojiva s plíškem. Zařízení pro provedení zkoušky bodu lámavosti dle Fraasse je znázorněno na obrázku 11. [13]

4.3.2 Příprava vzorků

Testování probíhá na tenkých ocelových plíšcích se slabou vrstvou asfaltového pojiva. Jejich kvalitní příprava je základem k relevantním výsledkům této zkoušky. Plíšky je nejprve potřeba důkladně odmastit správným rozpouštědlem, vysušit a zvážit s přesností na 0,01 g. Poté dojde k umístění časti asfaltového pojiva o hmostnosti 410 ± 10 mg na předpřipravený plíšek. Takto připravený plíšek se vzorkem asfaltu se umístí na magnetický blok a položí se na vyhřívanou část kovového podstavce. Pomalu zahřívaný asfalt se rozlije po ploše plíšku. Teplota zahřívání by neměla překročit bod měknutí daného pojiva o více jak 80 °C. Při vzniku vzduchových bublin je potřeba jehlou jednotlivé bubliny prorazit, či počkat na samovolné prasknutí při zahřívání. Asfaltové pojivo by se mělo rovnoměrně roztéct po ploše plíšku bez přelití díky povrchovému napětí. Při rovnoměrném rozlití pojiva po plíšku je vzorek sejmut z vyhřívané části a je potřeba ho nechat vychladnout před tím než bude použit ke zkoušce.

Obrázek 10: Vzorek pro provedení zkoušky dle bodu lámavosti dle Fraasse

3.3.3 Provedení zkoušky

Ocelový plíšek s tenkou vrstvou asfaltového pojiva se vloží do přístroje, přičemž je potřeba dávat větší pozornost na vizuální kontrolu vzorku, aby nevzniklo jakékoliv porušení, které by poté iniciovalo vznik praskliny v testovaném vzorku. V případě vzniku jakéhokoliv porušení, vzorek je potřeba nahradit novým. Pomocí suchého ledu se začne asfaltový plíšek chladit. Neustále měříme teplotu a snažíme se udržovat míru ochlazování na 1 °C za minutu s maximální odchylkou 5 s. Při dosažení teploty ± 10 °C od odhadovaného bodu lámavosti, každou minutu aplikujeme spolu klesající teplotou také deformační napětí. Tohoto dosáhneme ohybáním destičky se vzorkem kličkou ohýbacího zařízení rychlostí 1 otáčka/s až do limitu zařízení. Po deformaci proběhne vizuální kontrola zda vznikla prasklina v asfaltové vrstvě. Pokud nedošlo k porušení, zpětným otočením kličky stejnou rychlostí odebereme deformační napětí ze vzorku. Toto opakujeme každou minutu při klesnutí teploty o 1 °C. K ukončení zkoušky dojde v momentě kdy na vzorku vznikne porušení.

Obrázek 11: Přístroj pro provedení zkoušky bodu lámavosti dle Fraasse

Podle normy ČSN EN 12593 vyhodnocení výsledné teploty proběhne měření alespoň dvakrát. Rozdíl těchto dvou platných měření musí být menší nebo roven 3 °C. Pokud tato podmínka není splněna, je potřeba provést další měření pro splnění. Výsledek celého měření se poté vyjádří jako aritmetický průměr těchto měření zaokrouhlený na nejbližší celé číslo. [13]

4.4 MODUL TUHOSTI ZA OHYBU DLE ČSN EN 14771

Tato metoda je popsána v normě ČSN EN 14771 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru (BBR).

4.4.1 Popis zkoušky

Tato zkouška je využívána ke stanovení modulu tuhosti za ohybu při nízkých teplotách asfaltového pojiva za použití průhybového trámečkového reometru. Tento reometr měří za použití tříbodového ohybu. Měřící zařízení se skládá ze zatěžovacího rámu,

převodníku pro měření deformace, podpěr testovaného tělesa, temperační komory, kompresoru a počítače pro sběr a zpracování dat. [14]

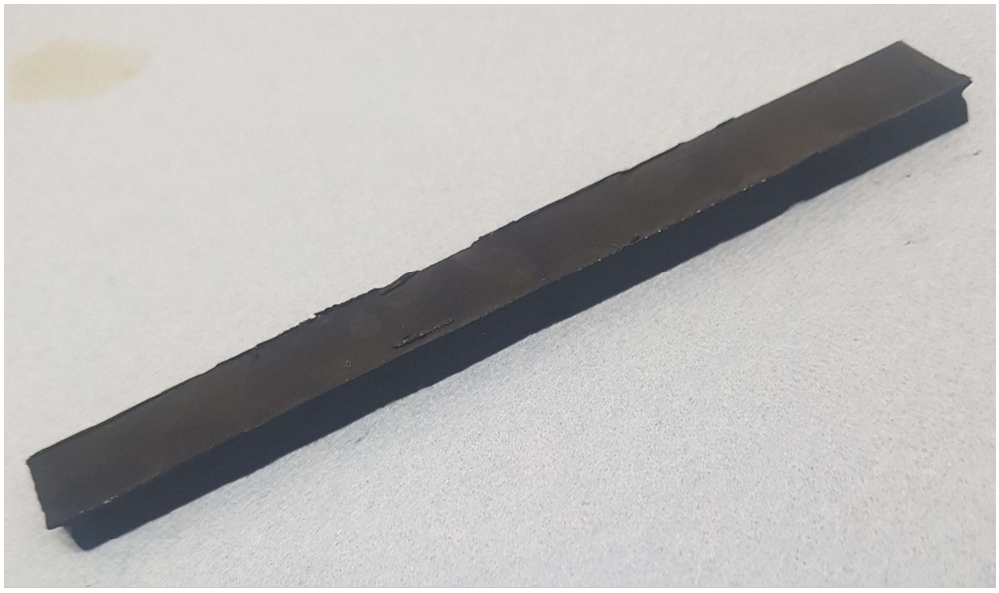
Obrázek 12: Průhybový trámečkový reometr [15]

3.4.2 Vzorky pro test BBR

Vzorky asfaltového pojiva pro zkoušku reometru BBR se odlévají do forem definovaných normou ČSN EN 14771. Vnitřní rozměry formy jsou 6,4mm ± 0,1 mm šířka, 12,7 mm ± 0,1 mm hloubka a 127 mm ± 0,5 mm délka. Forma pro asfaltové vzorky je také znázorněna na obrázku 13. Asfaltové pojivo se rozehřeje v laboratorní sušárně na teplotu, kdy jeho viskozita klesne natolik, že se dá bez problému zhomogenizované pojivo přelít, a zároveň nepřekročí očekávaný bod měknutí o 100 °C. Zatímco se nahřívá asfaltové pojivo, dojde k sestavení kovových forem pro trámečky. Kovové části formy, které se dotýkají asfaltového pojiva, se potřou tenkou vrstvou vazelíny a poté je na vazelínu přiložen tenký film plastové folie. Vazelína napomáhá následnému rozebrání formy, načež plastová folie zamezí kontaktu asfaltu s vazelínou. Takto připravené formy se naplní asfaltovým pojivem s lehkým přebytkem. Po naplnění formy necháme schladnout asfaltové pojivo ve formě alespoň 60 minut a poté nahřátou špachtlí odřízneme nalitý přebytek na formě, čímž docílíme rovné a začištěné horní hrany. Z důvodu toho, že nízké teploty tečení asfaltového pojiva nezastaví, ale pouze

zpomalují, odformujeme vzorky až těsně před vložením do lihové lázně v testovací komoře. V ideálním případě se formy se vzorky vloží do mrazáku, kde ale teplota nesmí být nižší než je teplota testování. Nízká teplota napomáhá rozebírání forem se vzorkem asfaltového pojiva a snižuje šanci zdeformování vzorku vlivem sil vyvinutých při rozebírání.

Obrázek 13: Zaformovaný vzorek pro zkoušku průhybovým trámečkovým reometrem

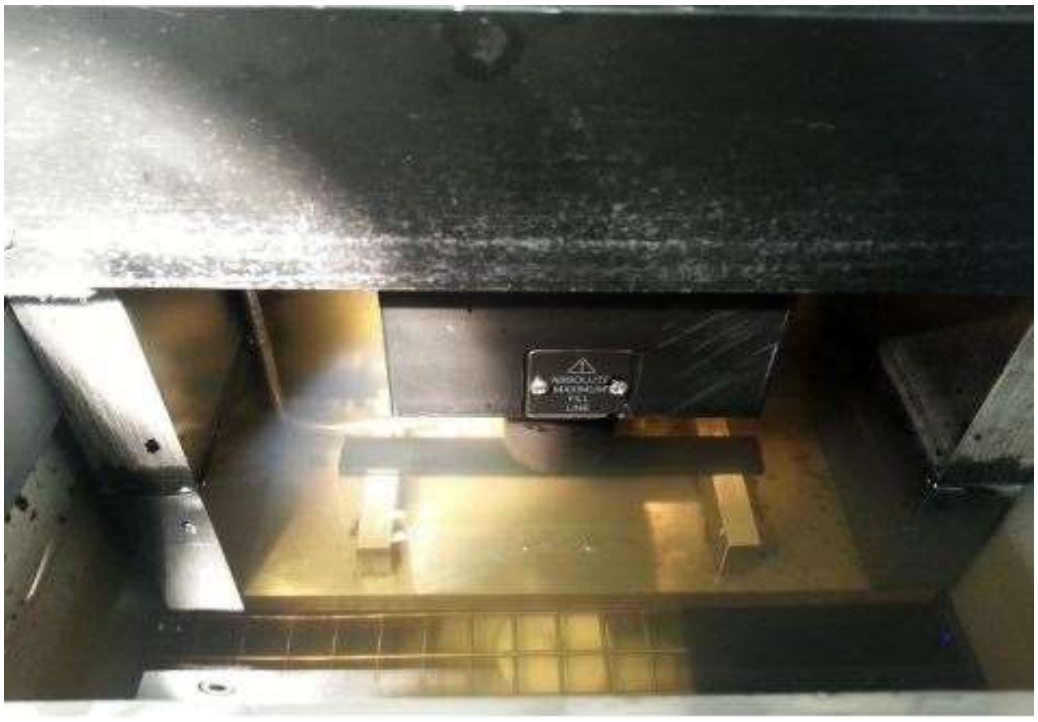


Obrázek 14: Odformovaný vzorek pro zkoušku průhybovým trámečkovým reometrem

3.4.3 Provedení zkoušky

Před zahájením zkoušky je potřeba přístroj připravit na testování. V prvním kroce zapneme testovací komoru a kompresor. Tlak navyšujeme až do hodnoty 4 MPa a poté přistoupíme ke kalibraci. Zatížení kalibrujeme pomocí referenčních zatížení a postupujeme podle instrukcí na kalibraci v softwaru pro testování BBR. Pokud je přístroj nakalibrován a připraven, zapne se temperace lihové lázně. Temperace probíhá na předem určenou teplotu testování, která v běžných případech je od - 10 °C do - 40 °C odstupňovaná hodnotami po 6 °C. Lihová lázeň musí být natemperovaná na teplotu ± 0,2 °C. Pokud je teplota ustálena, testovací tělísko se odformuje a vloží do lihové lázně na dobu 60 ± 2 min. Po uplynutí této temperační doby, se tělísko vloží na podpory způsobem, aby jeho výška byla nejmenším rozměrem tělesa.

Nyní lze přistoupit už k samotné zkoušce. Na trámeček se v prvních několika vteřinách nanáší síla až do hodnoty 980 mN ± 50 mN (100 g) a poté se po dobu 240 s zaznamenává hodnota průhybu v závislosti na čase. Se známou hodnotou zatížení a hodnotou deformace lze určit modul tuhosti za ohybu $S_m(t)$ v čase 60 s od počátku zatěžování. V době mezi 0,5 s a 5,0 s musí být zatížení v rozmezí ± 50 mN od průměrného zkušebního zatížení a po zbývající dobu ± 10 mN od průměrného zkušebního zatížení.



Obrázek 15: Průběh zkoušky BBR

Výsledkem zkoušky je získání tzv. kritické teploty, což je teplota při které se S(60s) = 300 MPa, resp. m-hodnota m(60s) = 0,3. Této teploty lze dosáhnout interpolací výsledných hodnot S(60s) alespoň při třech teplotách (např. -16 °C, -22 °C, -28 °C). Cílem měření je nalézt teplotu, při které se S(t) blíží hodnotě 300 MPa zdola a m(t) se shora blíží hodnotě 0,3. Pokud teplota vozovky klesne 10 °C pod hodnotu změřené kritické teploty, dochází k riziku vzniku trhlin. V případě, že při měření hodnota deformace je menší než 0,08 mm, či větší než 4,0 mm, je výsledek považován za neplatný. Při každé teplotě je potřeba testovat minimálně 2 vzorky, ale při příliš velké odchylce výsledků se počet testovaných vzorků při jedné teplotě navýší. [14]

Modul tuhosti za ohybu S(t) v časech zatížení 8 s, 15 s, 30 s, 60 s, 120 s a 240 s se vypočítá vytvořením grafu závislosti zatížení a naměřeného průhybu testovaného tělíska pomocí následující rovnice.

$$S(t) = \frac{PL^3}{4bh^3\delta(t)}$$

$S(t)$ … modul tuhosti za ohybu v čase t [MPa]

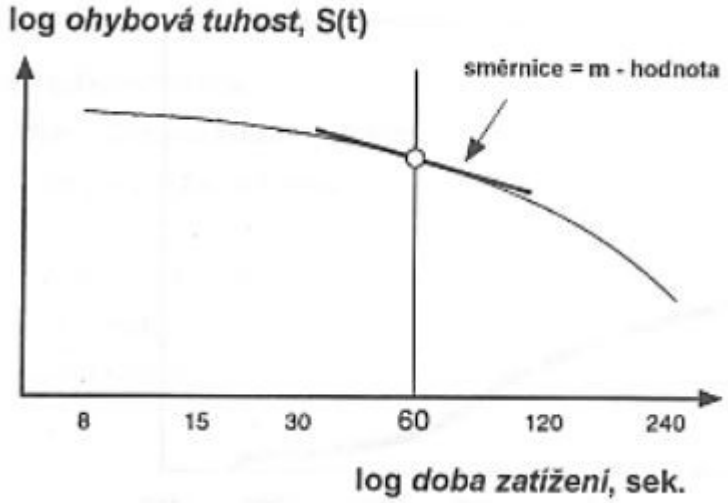
L … vzdálenost mezi podpěrami [mm]

b … šířka zkušebního tělíska [mm]

h … tloušťka zkušebního tělíska [mm]

$\delta(t)$ … průhyb zkušebního tělíska v čase t [mm]

Druhým klíčovým parametrem je sklon křivky dotvarování, také označované jako m-hodnota. Z grafu závislosti logaritmu času na logaritmus modulu tuhosti se vytvoří směrnice na vzniklou křivku v bodě 60 s na časové křivce od počátku zatěžování. Sklon této směrnice je výslednou m-hodnotou. Průběh je znázorněn na grafu 1.



Graf 1: Změna modulu tuhosti v průběhu zatěžování

4.5 STANOVENÍ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI ASFALTOVÉ SMĚSI

Jedná se o standardní zkoušku popsanou v evropské normě ČSN EN 12697-6+A1 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro prováděné asfaltové směsi za horka – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa. Objemová hmotnost je hmotnost hmoty o daném rozměru i s jejími mezerami. Stanovení této hodnoty se dá provést několika způsoby, z čehož jsem zvolil metodu nasycený suchý povrch marshallových těles.

4.5.1 Příprava těles

Nejprve se připraví asfaltová směs pro výrobu marshallových těles podle postupu popsaného v kapitole 3.6.2. Tyto směsi byly namíchány dvě s různým obsahem asfaltu pro definici obsahu do finální směsi. První směs obsahovala 7,1 % asfaltového pojiva a druhá směs 7,4 %. Rozměry Marshallova tělesa jsou ve tvaru válce definovaného normou na výšku 63,5 ± 2,5 mm a průměr 101,5 ± 0,1 mm. Nejdříve se připraví pokusná navážka a vytvoří jedno Marshallovo těleso. Pokud rozměry tělesa jsou v toleranci, navážka se použije i na ostatní tělesa. V případě, že rozměry nevyhovují se navážka upraví a znovu vytvoříme pokusné Marshallovo těleso. Od každé testované směsi byla vyrobena 3 Marshallova tělesa stejných specifikací, dohromady tedy 6 zkušebních těles.

Obrázek 16: Marshallova tělesa

K provedení této zkoušky bylo použito rázového zhutňovače s ocelovým dolním podstavcem, válcové formy, nástavce, podložky a výtlačného zařízení.

Výroba marshallových těles je prvním krokem praktické části při návrhu asfaltových směsí. Z těles můžeme získat informaci o objemové hmotnosti, měnící se s obsahem asfaltu, aniž by bylo potřeba výroby velikých těles či míchání většího objemu směsi.

Obrázek 17: Rázový zhutňovač

Formu se před hutněním natemperuje v sušárně společně se směsí, aby se zamezilo vychladnutí směsi při provádění zkoušky. Pod takto natemperovanou podložku se vloží kroužek separačního papíru, aby došlo k zamezení přilepení směsi k části hutnícího zařízení a tím poničení tělesa. Následně se vsype asfaltová směs do formy. Sypání probíhalo ve třech částech, kdy po každé vrstvě je směs urovnána aby nedocházelo k oddělení jednotlivých zrn od sebe. Po dosypání poslední vrsty se znovu zarovná horní hrana a přikryje se separařním papírem.

Takto připravenou formu je důležité ihned přesunout do hutnícího zařízení, aby nedošlo k razantnímu poklesu teploty směsi. Použité hutnící zařízení je automatické. Po upnutí tělesa do hutniče je směs hutněna 50 údery a poté vytažena z přístroje, otočena a nahutněna z druhé strany také 50 údery. Takto zajistíme rovnoměrné zhutnění tělesa. Takto nahutněné těleso můžeme nechat vychladnout mimo hutnící zařízení a odstanit z něj separační papíry. Po vychladnutí tělesa na teplotu přibližně 40 °C se forma vloží

do výtlačného zařízení a těleso se oddělí od hutnící formy. V posledním kroce se jednotlivá tělesa popíšou. [16]

Obrázek 18: Forma pro výrobu marshallových těles

4.5.2 Postup zkoušky

Vychladlá zkušební tělesa po nahutnění rázovým zhutňovačem nejprve zvážíme na suchu. Poté tělesa ponoříme do vody a necháme nasáknout po dobu 30 minut. Jakmile je těleso nasáklé, zavěsíme jej na váhu a zvážíme těleso pod vodou. Po zvážení tělesa pod vodou je ihned vytaženo z vody a povrchově osušeno. Takto nasáklé povrchově osušené těleso naposledy zvážíme. V poslední řadě je potřeba změřit teplotu vody v nádobě použité pro nasáknutí tělesa, pro zjištění hustoty vody, která vstupuje do výpočtu. [17]

Obrázek 19: Ponoření marshallových těles pro určení objemové hmotnosti

Pro výpočet objemové hmotnosti byl použit následující vzorec.

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

ρ_{bssd} … objemová hmotnost zkušebního tělesa [kg/m^3]

m_1 … hmotnost suchého tělesa [g]

m_2 … hmotnost tělesa ve vodě [g]

m_3 … hmotnost tělesa nasyceného vodou a povrchově osušeného [g]

ρ_w … hustota vody při zkušební teplotě stanovená s přesností na 0,1 kg/m^3

4.6 MAXIMÁLNÍ OBJEMOVÁ HMOTNOST

Vyhodnocení této veličiny je popsáno v evropské normě ČSN EN 12697-5+A1 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti. Způsobů měření této hodnoty existuje několik, avšak pro účely této práce bylo použito volumetrického postupu stanovení maximální objemové hmotnosti s využitím pyknometrů.

4.6.1 Postup zkoušky

Asfaltová směs, navržená stejným postupem jako pro vytvoření Marshallových těles popsaným v kapitole 3.5.2, se natemperuje, aby změkla a poté pod ventilátor za postupného ochlazování se směs důkladně rozdrolí na jednotlivá zrna. Poté zvážíme prázdnou testovací nádobu pyknometru s nástavcem u které je předem známá hodnota jejího objemu. Po nadrolení směsi je vsypána do připraveného pyknometru a znovu zvážena. Naplněný pyknometr se zalije odvzdušněnou vodou. Takto připravená nádoba je vložena do komory osazené vývěvou a vyvinutím podtlaku odebereme vzduch uzavřený ve směsi, čímž je docíleno přesnější, méně ovlivněné výsledné objemové hmotnosti. Po odvzdušnění pyknometru se vloží do temperační lázně o teplotě 25 ± 0,2 °C alespoň na 30 minut a poté se opatrně přenese na váhu a pyknometr naposledy zvážíme. [22]

Obrázek 20: Dvě směsi pro určení maximální objemové hmotnosti

Obrázek 21: Pyknometr s testovanou směsí

Maximální objemová hmotnost je poté vypočítána z následujícího vztahu.

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

ρ_{mv} … maximální objemová hmotnost asfaltové směsi [kg/m^3]

m_1 … hmotnost pyknometru a nástavce [g]

m_2 … hmotnost pyknometru, nástavce a zkušebního vzorku [g]

m_3 … hmotnost pyknometru, nástavce, zkušebního vzorku a destilované vody [g]

V_p … objem pyknometru po naplnění po referenční značku nástavce [m^3]

ρ_w … hustota vody či rozpouštědla při zkušební teplotě [kg/m^3]

4.7 MEZEROVITOST

Stanovení mezerovitosti asfaltové směsi je popsáno v evropské normě ČSN EN 12697-8 Asfaltové směsi za horka – Část 8: Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí. Mezerovitostí se rozumí objem mezer zkušebního vzorku vyjádřený v procentech vzhledem k celkovému objemu tělesa. K tomuto výpočtu je využito následujícího vzorce. [23]

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

V_m … mezerovitost zkušebního tělesa s přesností na 0,1 [%]

ρ_m … maximální objemová hmotnost směsi [kg/m^3]

ρ_b … objemová hmotnost zkušebního tělesa [kg/m^3]

4.8 MÍRA ZHUTNĚNÍ

Mírou zhutnění se rozumí poměr mezi objemovou hmotností naměřenou na vyrobených asfaltových deskách z dané směsi a objemovou hmotností vyhodnocenou na Marshallových tělesech. Výpočet míry zhutnění se vyhotoví pomocí následujícího vztahu.

$$C = \frac{\rho_{bssd,1}}{\rho_{bssd,2}} * 100$$

c … míra zhutnění zkušební desky [%]

$\rho_{bssd,1}$ … objemová hmotnost zkušební desky [g]

$\rho_{bssd,2}$ … objemová hmotnost stanovená na Marshallových tělesech [g]

4.9 ZKOUŠKA TSRST DLE ČSN EN 12697-46

Jedná se o metodu stanovení nízkoteplostních vlastností asfaltové směsi popsané v ČSN EN 12697-46 - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 46: Nízkoteplotní vlastnosti a tvorba trhlin pomocí jednoosé zkoušky tahem.

4.9.1 Popis zkoušky

Zkouška se provádí v nízkoteplotní komoře (Cyklon -40). Toto zařízení se skládá z komory, snímačů deformací, ohřevu vnějšího rámu, podložky, upínací matice a tenzometrického snímače. [18]

Obrázek 22: Přístroj pro zkoušku TSRST s upnutým vzorkem

Zkušební těleso asfaltové směsi se upne do středu komory pomocí závitu na spojovacích tyčích a ocelové podložce předpřipravených těles. Toto těleso se poté osadí indukčními snímači na třech stranách podložky. Tyto snímače jsou umístěny z důvodu měření

deformací a pro zajištění rovnoměrné počáteční odchylky testovaného tělesa. V průběhu zkoušky je důležité přesné a neustále měření teploty. Teploměr je tedy vložen nejen do měřící komory, ale také i do otvoru ve „slepém“ tělese, které slouží jako reference pro zpoždění prostupu chladu do testovaného tělesa. Data z těchto teplotních snímačů a indukčních snímačů deformací jsou poté zpracovávána počítačem s příslušným softwarem.

Po upnutí tělesa a vyrovnání počátečních deformací se může komora uzavřít a spustit automatický proces konstantního ochlazování komory. Se snižující se teplotou dochází ke smršťování testovaného tělesa ($\mathcal{E}_t \neq 0$), kterému je ale zamezeno pevným upnutím tělesa do přístroje. Aby bylo zamezeno deformaci samotného přístroje nízkou teplotou, je v rámu přístroje nainstalovaný ohřev vnějšího rámu. Tímto zamezíme průběhu jakýchkoliv deformací testovaného tělesa ($\mathcal{E}_t = 0$). Zkouška pokračuje do té doby, dokud nedojde k porušení tělesa z důvodu vzniklé podélné síly.

Výsledkem této zkoušky je výsledná teplota při které došlo k porušení tělesa, a zároveň maximální tahová síla vyvynutá smrštěním asfaltového trámce. [18]

Obrázek 23: Porušený vzorek po zkoušce TSRST

4.9.2 Příprava asfaltové směsi pro desky

Pro tělesa na zkoušku TSRST je potřeba v prvním kroce navrhnout asfaltové směsi, na kterých budou zkoušky probíhat.

Jednotlivé frakce kameniv je potřeba navážit a před použitím vložit do laboratorní sušárny důkladně vysušit při teplotě 110 °C. Po vysušení můžeme začít kamenivo i asfaltové pojivo začít temperovat na teplotu hutnění, která se liší především s typem použitého asfaltového pojiva. Po dosažení teploty míchání necháme teplotu materiálu ustálit a můžeme přikročit k přípravě míchacího zařízení. [19]

Obrázek 24: Použitá kameniva pro výrobu směsi

Nádobu na míchaní i používané náčiní je potřeba také natemperovat, aby nedošlo k razantnímu ochlazení směsi, což může vést k nedokonalému promíchání asfaltového pojiva do kameniva. Použitá laboratorní míchačka s termostatickým ohřevem spodní části, do které se vkládá nádoba se také zapne před začátkem hutnění. Vyhřívané dno pomáhá udržovat teplotu v průbehu míchání. Pokud je takto připravená míchačka i kamenivo, lze přistoupit k míchání. Kamenivo se vsype do míchací nádoby a zapne se proces míchání. Po pár okamžicích kdy dojde k promíchání frakcí kameniva, přilijeme do směsi zhomogenizované natemperované asfaltové pojivo. Množství pojiva přidaného do směsi je potřeba pečlivě při vlévání vážit, aby nedošlo k přelití, jelikož obsah

asfaltového pojiva ve směsi velmi ovlivňuje charakreristiky finálové směsi. Metla míchačky rotuje kolem své osy a zajišťuje obalení kameniva asfaltovým pojivem. Po stranách míchací nádoby může docházet k usazování pojiva a tak je pravidelně nutno zaručit seškrábnutím aby k tomuto nedocházelo.

Po dokončení míchání je nutné aby směs měla homogenní vzhled, a všechna zrna byla dokonale obalena. V některých případech mohou vzniknout hrudky jemného kameniva s pojivem, což je také nežádoucím vedlejším výsledkem míchání a je třeba tyto hrudky důkladně rozmíchat. Celý tento proces míchání by neměl trvat déle než 5 minut aby nedošlo k příliš velkému ochlazení směsi. V neposlední řadě je třeba dbát na to, že pracujeme se směsí za vysoké teploty a je tedy nutné používat po celou dobu ochranné pomůcky.

Obrázek 25: Přístroj pro míchání asfaltové směsi

Hmotnost navážky potřebné na desku je určená z její objemové hmostnosti a rozměru. Objemové hmotnosti směsí jsou určené předem pomocí vyrobených Marshallových

těles. Bližší popis této metody je uveden v kapitole 3.5. Rozměr desky vyráběné pro tento účel je 260,0 mm x 320,0 mm x 50,0 mm.

Namíchanou směs z míchací nádoby je třeba navážit na hmotnost potřebnou k nahutnění jedné desky s přesahem přibližně 15 g z důvodu ztráty materiálu při výrobě, a směs se přemístí na plech. Plech se směsí je poté znovu vložen do vyhřívané komory a natemperovat na teplotu hutnění, která se pro jednotlivé směsi liší, znovu především podle typu použitého asfaltu. Teplota je pravidelně kontrolována pomocí čidla teploměru zasunutého přímo do směsi. Po dosažení požadované teploty hutnění ve směsi necháme 30 minut teplotu ustálit. Pokud máme asfaltovou směs již navrženou a vyrobenou, je potřeba přistoupit k dalšímu kroku, jímž je výroba zhutněné desky asfaltové směsi. [19]

3.6.3 Hutnění desek z asfaltové směsi

Hutnění směsi probíhá v lamelovém zhutňovači dle ČSN EN 12697-33. Před samotným hutněním je potřeba zhutňovač připravit zatímco probíhá temperace směsi. V první řadě se nastaví výška hutněné desky na požadovanou výšku. Toho dosáhneme osazením plechu na dno zhutňovače a případně následným přidáním kovových rámečků o výšce 10 mm pod tento plech. Výšku poté vypočítáme jako výšku od spodní hrany po líc formy pokrácenou o výšku lamely, plechu a distančních kovových rámečků. Po připravení formy na požadovanou výšku se osadí rám a celá forma se pomocí čepů dotáhne aby nedocházelo ke změně rozměrů desky z důvodu hutnící síly mimo požadované míry. Forma je následně natřena separačním prostředkem, který nesmí reagovat s asfaltovým pojivem. Před samotným hutněním je potřeba ověřit zda je zhutňovač v základní poloze, to znamená vyjetý do krajní polohy. Po splnění výšše uvedených podmínek můžeme přikročit k samotnému hutnění.

Plech s natemperovanou zhomogenizovanou směsí se vyndá z laboratorní sušárny a přesype do lamelového zhutňovače. Plech důkladně vyčistíme, aby nedocházelo k příliš velké ztrátě materiálu a směs ve formě lamelového zhutňovače rovnoměrně rozprostřeme. Rohy formy jsou předem špachtlí lehce předhutněny a je do nich vloženo více směsi z důvodu nedokonalého hutnění v rozích formy. Na takto urovnanou směs umístíme plech, který je ze strany přilehlé na asfaltové směsi opatřen tenkou vrstvou separačního prostředku. Na plech následně naskládáme kovové lamely o rozměrech 260 x 100 x 15(10) mm. Hutnícím válcem se přiblížíme těsně nad hranu lamel (cca 1 mm). Zajistíme páku a spustíme automatický pojezd válce. Válec pojíždí po

lamelách a zároveň konstantně snižuje svou výšku, čímž na ně vyvíjí tlak, který je posléze přenášen do asfaltové směsi. Plocha válce pojíždějícího lamely je širší než tloušťka jednotlivých lamel. Pohybu válce není dosaženo samotným válcem ale pohybem celého stolu se směsí tam a zpět pod válcem, zatímco hutnící válec zůstává v jedné poloze pouze s měnící se výškou. Hutnění je u konce, pokud jsou lamely zatlačeny do formy natolík, že jsou srovnány s hranou formy. V tomto bodě se vypne pojezd stolu a směs se nechá před odebráním lamel vychladnout. Po mírném ochlazení desky se odeberou lamely, plech umístěný pod nimi, a povolí se čepy stahující rám formy. Deska se vyjme ze zhutňovače a nechá se vychladnout pod ventilátorem na pokojovou teplotu. Posledním krokem po vychladnutí je odloupnutí spodní desky pomocí špachtle, které by mělo být bezproblémové díky separačnímu prostředku aplikovanému před samotným hutněním. Nakonec je deska označena, aby nedošlo k vzájemné záměně těles. [20] [21]

Obrázek 26: Lamelový zhutňovač

4.9.4 Výroba zkušebních trámců

Trámce se vyrábějí z desek tloušťky 50 mm. Z jedné desky lze vyrobit až 5 zkušebních trámců o rozměrech 200 x 50 x 50 mm. Řezání těles probíhá na statické kotoučové pile s pojízdným stolkem. Z důvodu nedokonalosti řezání tímto způsobem se počítá s odchylkou ± 1 mm od požadovaných rozměrů. Po nařezání se navlhlá tělesa od chlazení pily nechají znovu usušit a poté popíší pro lepší organizaci.

Obrázek 27: Kotoučová pila s pojízdným stolem

Obrázek 28: Nařezaná tělesa pro zkoušku TSRST

4.9.5 Získání zkušebních těles z trámců

Po nařezání a vysušení se vyrobené trámečky změří posuvným měřítkem a zaznamenají se naměřené hodnoty. K uchycení trámečků do přístroje je využito kovových podložek. Tyto podložky jsou na trámce přilepeny pomocí dvousložkového lepidla na bázi pryskyřice smíchaného s vápencovou moučkou pro zahuštění. Tímto lepidlem se poté vyplní vyfrézované otvory v podložkách a vloží se do něj zkušební trámec. Takto připravené těleso vložíme do rámu, který zajistí vycentrovanost testovaného tělesa v podložkách. Provedeme vizuální kontrolu a případné nerovnosti se srovnají pohybem tohoto rámu. Přebytečné lepidlo je třeba odříznout a těleso s lepidlem se nechá v rámu zatvrdnout. Po zatvrdnutí lepidla je těleso vyjmuto z rámu a je nyní připraveno k provedení zkoušky TSRST.

Obrázek 29: Vlepené těleso do formy pro zkoušku TSRST

5 MATERIÁLY POUŽITÝCH VZORKŮ

V následujících kapitolách jsou uvedeny všechny materiály použité v praktické části práce.

5.1 ASFALTOVÁ POJIVA

Pro tuto diplomovou práci bylo využito několika silničních asfaltů. Jedná se o ropné asfalty dodané společností TOTAL Česká Republika s.r.o. Asfalty se liší především udávanou hodnotou penetrace, která pro přesnost byla přeměřena a výsledky jsou uvedeny v kapitole 6.1. Se změnou asfaltového pojiva se také mění teplota hutnění a teplota míchání použité asfaltové směsi. Všechny tyto údaje jsou uvedeny v následující tabulce č.2.

Tabulka 2: Použitá pojiva

Asfaltová pojiva		
Třída	Teplota míchání	Teplota hutnění
20/30	180	170
35/50	170	160
50/70	165	155
70/100	160	150
160/220	135	125

5.2 SMĚS ACO 11

V práci bylo použito asfaltových směsí se silničními asfalty uvedenými v kapitole 4.1. Kamenivo pro směsi na výrobu jednotlivých zkušebních těles je neměnné a tělesa se tedy liší pouze typem použitého silničního asfaltu. Směs ACO 11 je nejrozšířenější formou směsi pro obrusné vrstvy netuhých vozovek. Obsah asfaltu v testovacích tělesech je vysoký pro lepší názornost výsledků vlivu změny pojiva ve směsi na její mrazuvzdornost. Základni specifikace směsi jsou uvedeny v následující tabulce č.3.

Tabulka 3: Základní specifikace asfaltové směsi

Specifikace směsi			
Obsah asfaltu [%]	Mezerovitost [%]	Objemová hmotnost [kg/m^3]	Maximální objemová hmotnost [kg/m^3]
7.40	3.69	2331.76	2421.11

Kamenivo použité pro směs je z kamenolomu Luleč s výjimkou vápencové moučky, která je odebrána v lokalitě Mokrá.

Jedním z nejdůležitějších faktorů pro definici asfaltové směsi je její čára zrnitosti. Data pro určení této křivky jsou uvedena v následujících tabulkách 4 až 7. Čára zrnitosti je znázorněna na obrázku 31.

Tabulka 4: Poměr zrn kameniva ve frakci – část 1

Poměr velikosti zrn kameniva v použitých frakcích kameniva							
Frakce	Lom	32	22	16	11	8	4
8-11	Luleč	100.0	100.0	100.0	70.6	11.5	2.2
4-8	Luleč	100.0	100.0	100.0	100.0	95.9	20.9
0-4	Luleč	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	95.5
Moučka	Mokrá	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Tabulka 5: Poměr zrn kameniva ve frakci – část 2

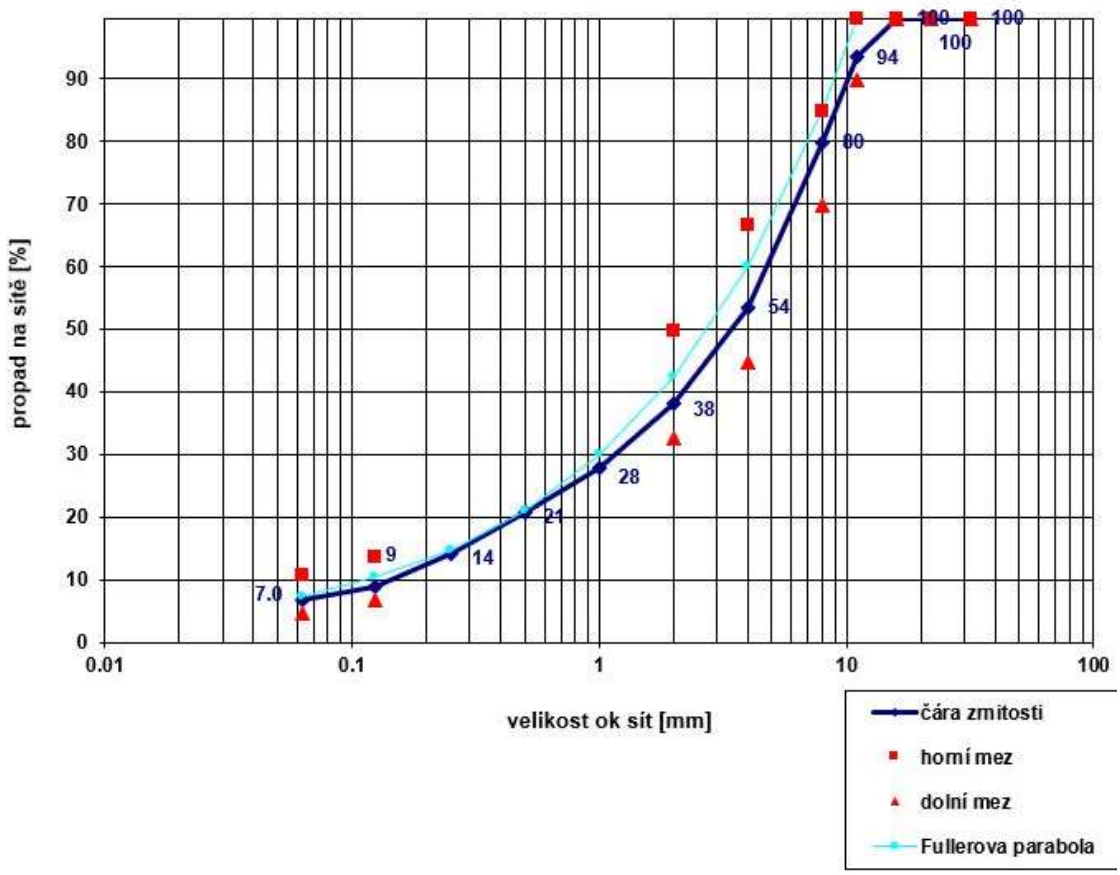
Poměr velikosti zrn kameniva v použitých frakcích kameniva							
Frakce	Lom	2	1	0.5	0.25	0.125	0.063
8-11	Luleč	1.9	1.8	1.7	1.4	1.2	0.9
4-8	Luleč	2.1	1.5	1.3	1.2	1.0	0.9
0-4	Luleč	72.4	48.3	31.8	16.0	5.8	3.8
Moučka	Mokrá	100.0	100.0	100.0	99.5	89.3	70.7

Tabulka 6: Zastoupení frakcí ve směsi

Zastoupení frakcí ve směsi kameniva				
Frakce	Moučka	0-4	4-8	8-11
Podíl v %	7	42	30	21

Tabulka 7: Poměr frakcí pro určení křivky zrnitosti

Poměr velikosti zrn kameniva ve směsi pro určení křivky zrnitosti				
Velikost ok sít	Navržená ACO11+	Dolní mez	Horní mez	Fullerova parabola
32	100	100	100	-
22	100	100	100	-
16	100	100	100	-
11	93.8	90	100	100
8	80.2	70	85	85.3
4	53.9	45	67	60.3
2	38.4	33	50	42.6
1	28.1	-	-	30.2
0.5	21.1	-	-	21.3
0.25	14.4	-	-	15.1
0.125	9.2	7	14	10.7
0.063	7	5	11	7.6



Obrázek 30: Křivka zrnitosti

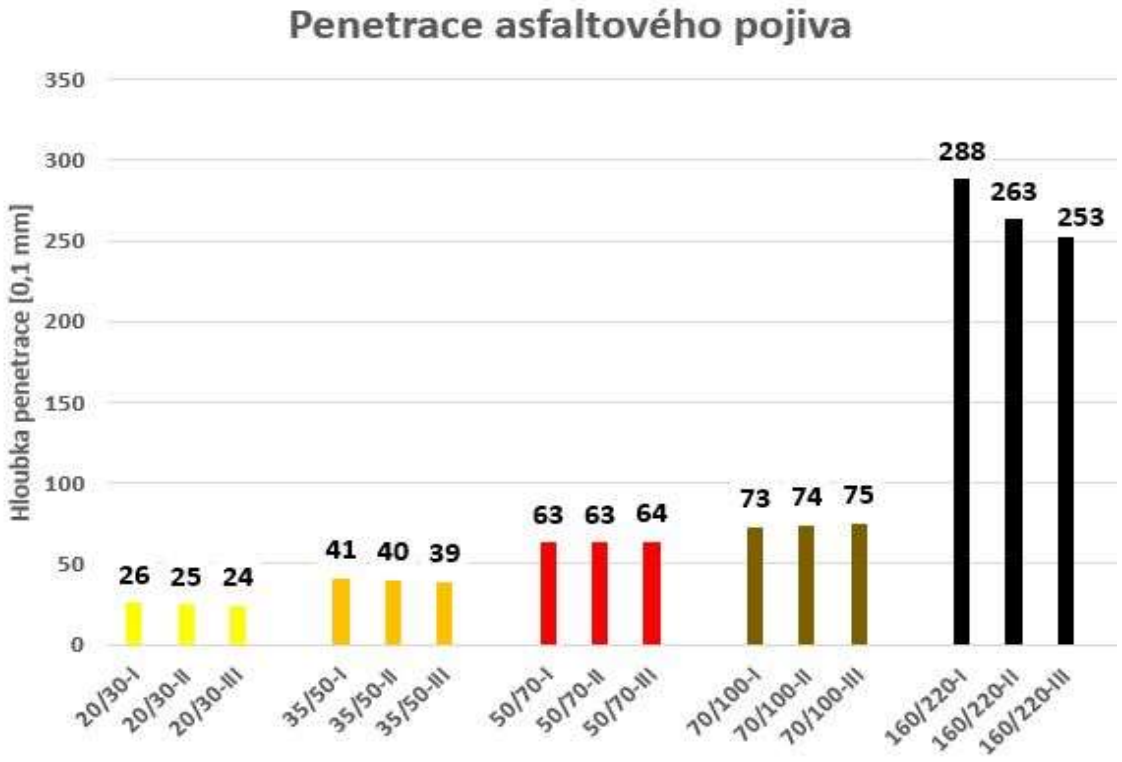
6 VÝSLEDKY

6.1 PENETRACE JEHLOU

Zkouška byla provedena na 5 typech vzorků silničního asfaltu. Do každého vzorku byly provedeny 3 vpichy a jejich hloubka, zaznamenaná v penetračních jednotkách, jsou znázorněny v tabulce 8 a grafu 2.

Tabulka 8: Výsledné hodnoty zkoušky penetrace jehlou

Vzorek	20/30-I	20/30-II	20/30-III	35/50-I	35/50-II	35/50-III	50/70-I	50/70-II
Penetrace (0.1 mm)	26	25	24	41	40	39	63	63
Vzorek	50/70-III	70/100-I	70/100-II	70/100-III	160/220-I	160/220-II	160/220-III	
Penetrace (0.1 mm)	64	73	74	75	288	263	253	



Graf 2: Výsledné hodnoty zkoušky penetrace jehlou

Z jednotlivých výsledků byla poté aritmetickým průměrem vyhodnocena hodnota penetrace jehlou jednotlivých asfaltových pojiv. Tyto výsledky jsou znázorněny v následující tabulce 9 a grafu 3.

Tabulka 9: Průměrné výsledné hodnoty penetrací

Aritmetický průměr výsledků					
Vzorek	20/30	35/50	50/70	70/100	160/220
Penetrace (0.1 mm)	25	40	63	74	268

Graf 3: Průměrné výsledné hodnoty penetrací

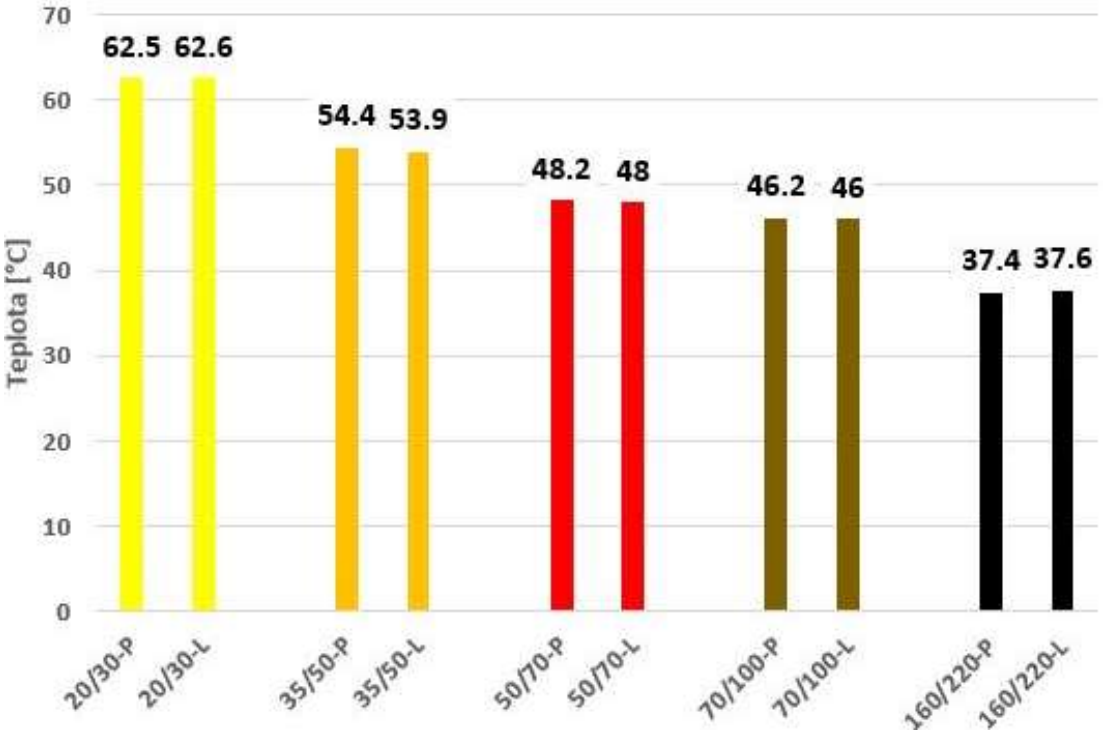
Silniční asfalty 50/70 a 70/100 sice splňují udávané hodnoty penetrace, ale její hodnoty se blíží společné hranici, a proto je předpoklad pro jejich podobné chování při provádění ostatních zkoušek. Jediné pojivo, které nesplňuje udávané hodnoty je silniční asfalt 160/220, u kterého výsledná penetrace vyšla 268 PJ.

6.2 BOD MĚKNUTÍ

Teplota bodu měknutí byla vyhodnocena u každého silničního asfaltu na dvou vzorcích, avšak oba testované vzorky se zkouší zároveň v jedné vodní lázni. Ze získaných výsledků byla vypočítána aritmetickým průměrem výsledná hodnota bodu měknutí. Tento výsledek se běžně zaokrouhluje na nejbližších 0,2 °C. Výsledky jsou znázorněny v následujících tabulkách 10 a 11 a grafech 4 a 5.

Tabulka 10: Výsledné hodnoty zkoušky bodu měknutí

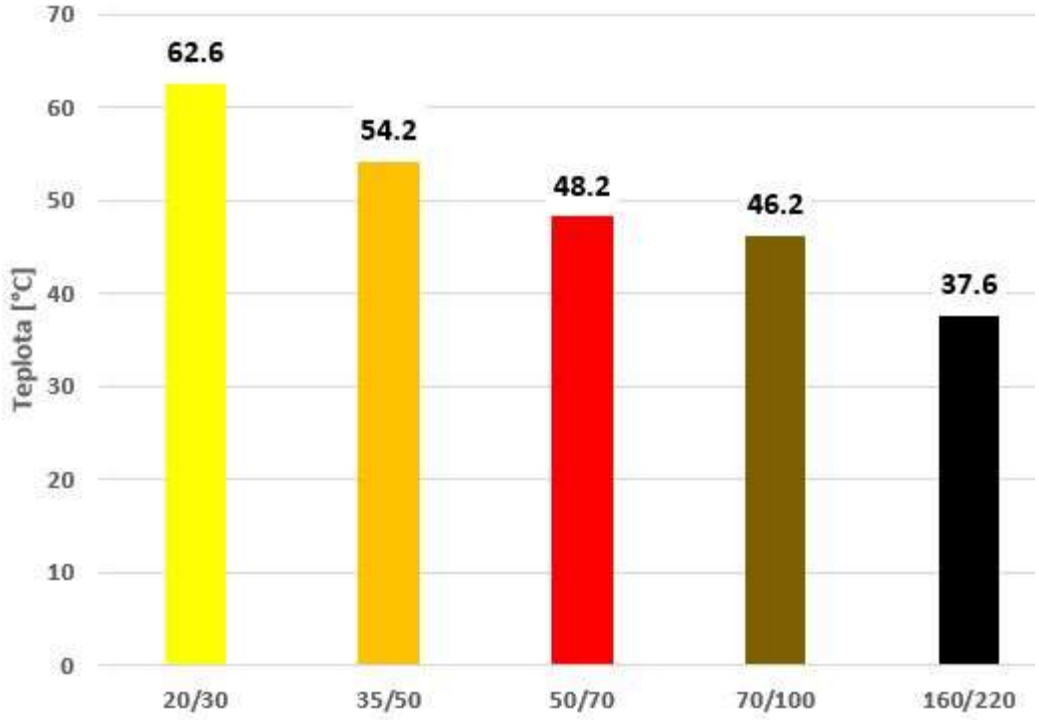
Teplota bodu měknutí [°C]		
Vzorek	Levý	Pravý
20/30	62.6	62.5
35/50	53.9	54.4
50/70	48	48.2
70/100	46	46.2
160/220	37.6	37.4



Graf 4: Výsledné hodnoty zkoušky bodu měknutí

Tabulka 11: Průměrné hodnoty bodu měknutí asfaltových pojiv

Vzorek	20/30	35/50	50/70	70/100	160/220
Průměrná teplota bodu měknutí [°C]	62.6	54.2	48.2	46.2	37.6



Graf 5: Průměrné hodnoty bodu měknutí asfaltových pojiv

Výsledná teplota bodu měknutí podle očekávání klesá se zvyšující se penetrací vzorku silničního asfaltu. Podobně jako u zkoušky penetrace, výsledné body měknutí silničních asfaltů 50/70 a 70/100 nejsou natolik rozlišné, z důvodu podobných hodnot penetrace.

Tabulka 12: Porovnání výsledných hodnot zkoušky bodu měknutí s požadavky normy

Vzorek	20/30	35/50	50/70	70/100	160/220
Průměrná teplota bodu měknutí [°C]	62.6	54.2	48.2	46.2	37.6
Požadované hodnoty bodu měknutí dle ČSN 65 7204 [°C]	55 až 63	50 až 58	46 až 54	43 až 51	35 až 43

Jak je vidět z předchozí tabulky 12, všechny výsledné hodnoty bodu měknutí vyhovují požadavkům normy ČSN 65 7204.

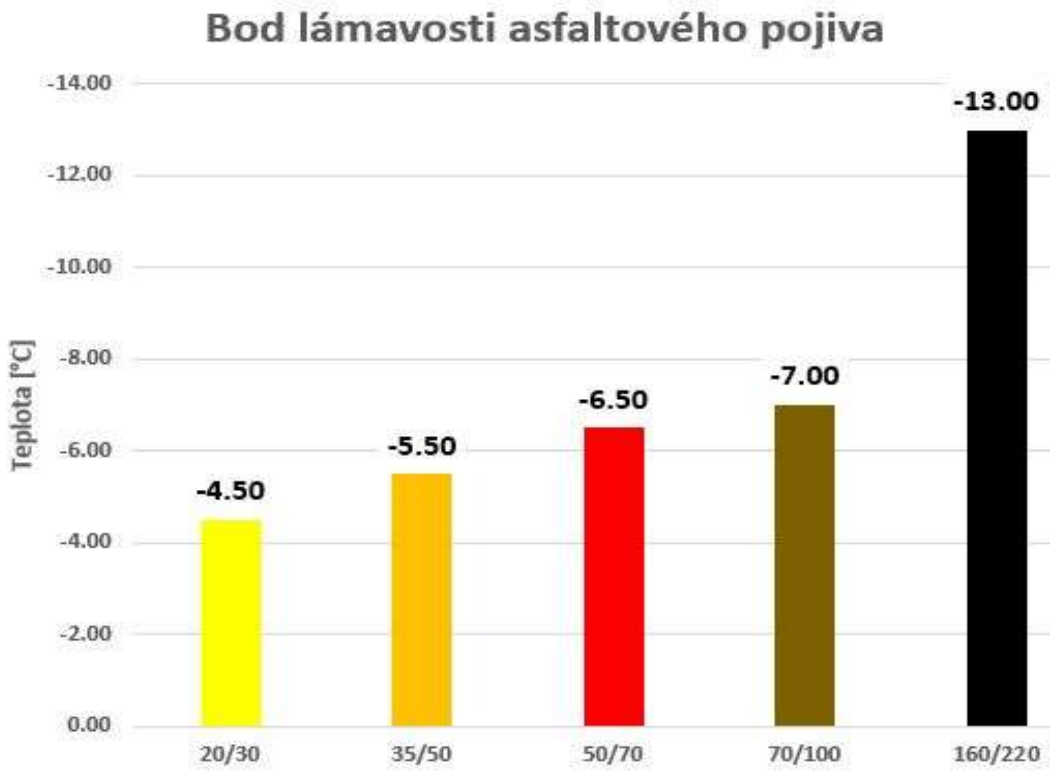
6.3 URČENÍ BODU LÁMAVOSTI DLE FRAASSE

Z každého silničního asfaltu bylo vyrobeno tolik vzorků, dokud dvojice za sebou provedených měření vykazovaly rozdíl teplot menší než 3 °C a měření jsou poté považovaná za platné. Z těchto dvou měření byla aritmetickým průměrem

zaokrouhleným na nejbližší celé číslo vyhodnocena finální teplota bodu lámavosti. Výsledky provedených měření jsou zaznamenané v následující tabulce 13 a grafu 6.

Tabulka 13: Výsledné hodnoty zkoušky bodu lámavosti dle Fraasse

Teplota bodu lámavosti [°C]			
Vzorek	I	II	Průměr
20/30	-3	-6	-4.5
35/50	-6	-5	-5.5
50/70	-7	-6	-6.5
70/100	-6	-8	-7
160/220	-13	-13	-13



Graf 6: Výsledné hodnoty zkoušky bodu lámavosti dle Fraasse

Jednotlivé výsledky měřených teplot bodu lámavosti vychází až na silniční asfalt 160/220 v podobných hodnotách. Před získáním platných měření byly u většiny asfaltů provedeny 2 až 3 dvojice měření.

Tabulka 14: Porovnání výsledných hodnot teploty bodu lámavosti s požadavky normy

Vzorek	20/30	35/50	50/70	70/100	160/220
Teplota bodu lámavosti [°C]	-4.5	-5.5	-6.5	-7	-13
Požadavek na teplotu bodu lámavosti dle ČSN 65 7204 [°C]	≤ -3	≤ -5	≤ -8	≤ -10	≤ -15

Požadavkům normy ČSN 65 7204 pro silniční asfalty vyhovují pouze pojiva 20/30 a 35/50. U všech ostatních asfaltových pojiv vyšla hodnota teploty bodu lámavosti nad požadovanou hranicí.

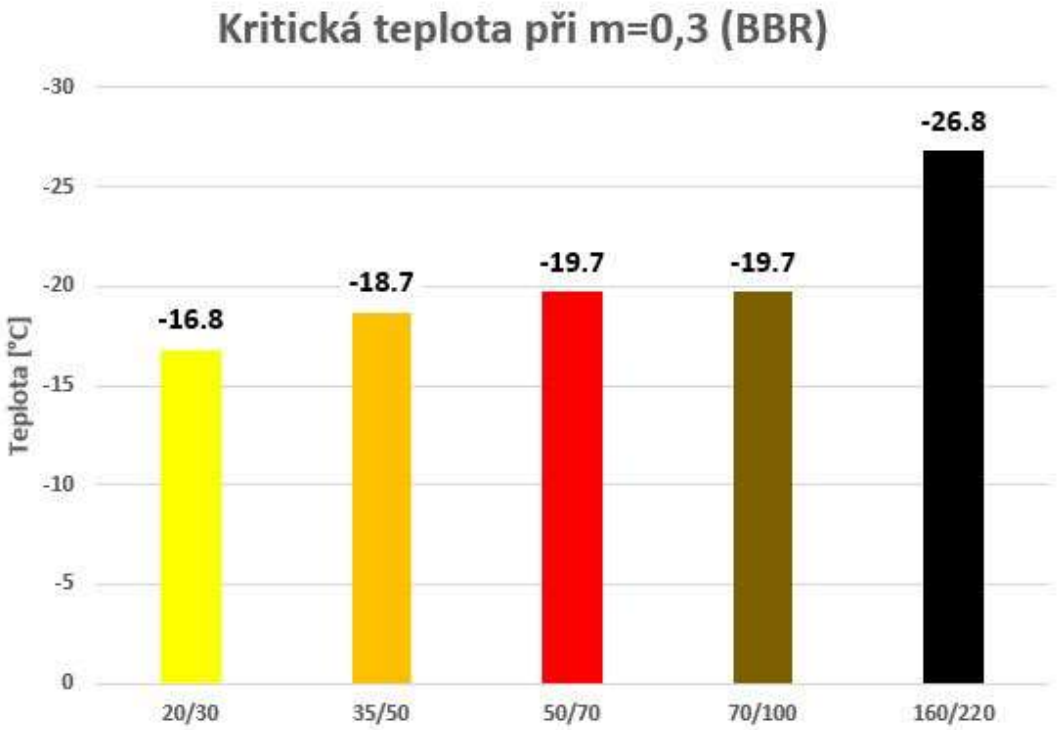
6.4 MODUL TUHOSTI ZA OHYBU POMOCÍ BBR

Z každého silničního pojiva bylo pro vyhodnocení vytvořeno několik vzorků. Zkouška byla provedena při 3 teplotách odstupňovaných po 6 °C, zvolených tak, aby se mezi dvěma testovanými teplotami nacházela m-hodnota v čase 60 s rovna 0,3 a modul tuhosti za ohybu S v čase 60 s rovno 300 MPa. Pokud dvě měření při jedné teplotě nesplňují podmínku, že rozdíl m-hodnot je menší než 4 % a rozdíl modulů tuhosti za ohybu S je menší než 9 %, je provedeno tolik měření, dokud dva jednotlivé výsledky tyto podmínky neplňují. Ačkoli výsledky byly velice konzistentní, u některých vzorků došlo k porušení a bylo potřeba otestovat třetí vzorek do série. Tyto výsledky jsou znázorněny v tabulce 15 a grafech 7 a 8.

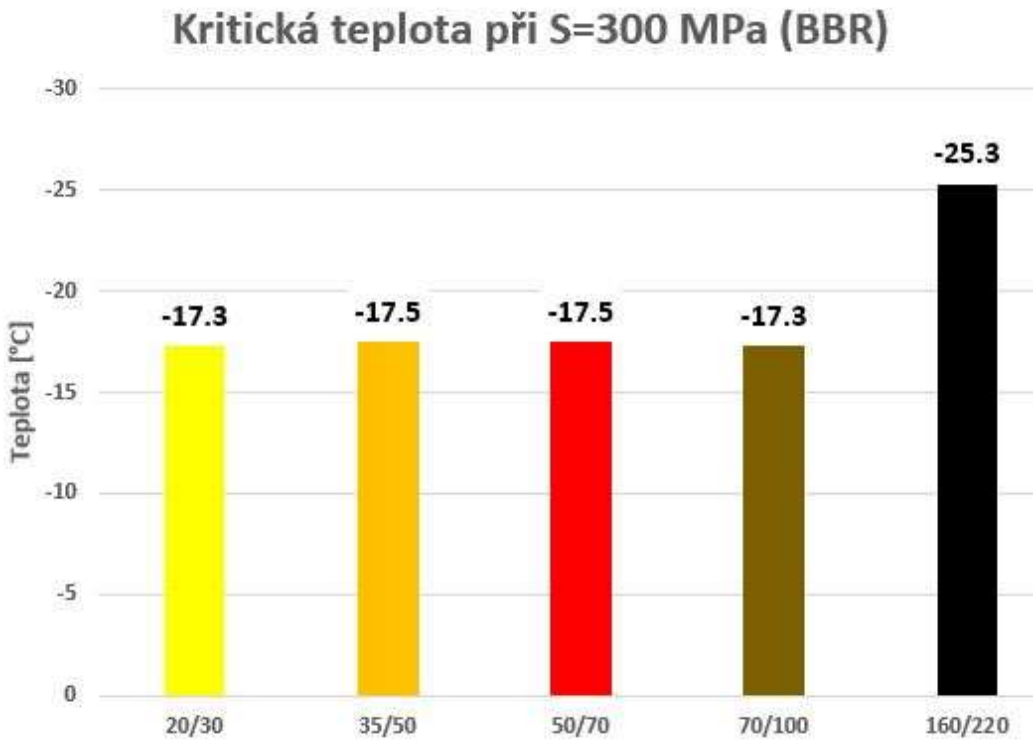
Všechna asfaltová pojiva sdílela jednu z teplot testování -22 °C, a tak jedním z výsledků byla výsledná m-hodnota a modul tuhosti za ohybu S při této teplotě. M-hodnoty a modul tuhosti za ohybu S při -22 °C jsou znázorněny v tabulce 15 a grafech 9 a 10.

Tabulka 15: Výsledné hodnoty zkoušky pomocí trámečkového reometru

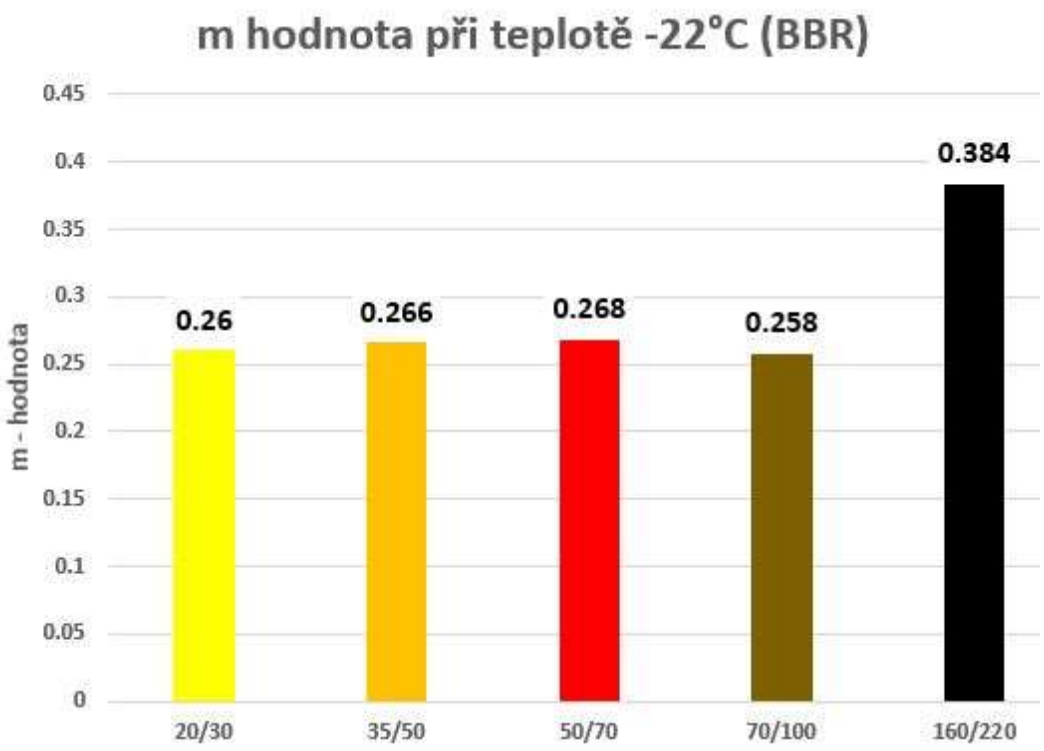
Asfalt	Teplota při m=0.3	Teplota při S=300 Mpa	m hodnota při teplotě -22 °C [MPa]	S při teplotě -22 °C [MPa]
20/30	-16.8	-17.3	0.26	532.6
35/50	-18.7	-17.5	0.266	547.5
50/70	-19.7	-17.5	0.268	574
70/100	-19.7	-17.3	0.258	550.4
160/220	-26.8	-25.3	0.384	186.9



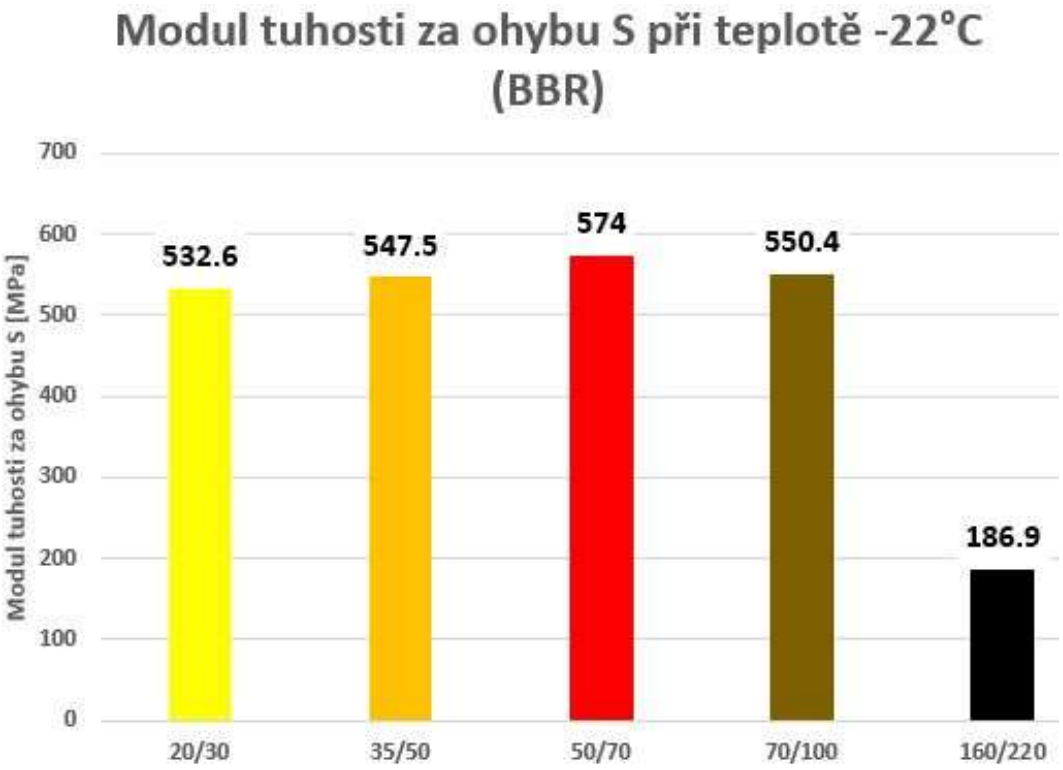
Graf 7: Výsledné kritické teploty při m hodnotě = 0,3



Graf 8: Výsledné kritické teploty při modulu tuhosti za ohybu S = 300 MPa



Graf 9: Výsledné m-hodnoty při teplotě -22 °C



Graf 10: Výsledný modul tuhosti za ohybu S při teplotě -22 °C

Výsledky pojiv 20/30 až 70/100 jsou překvapivě srovnatelné a nejsou mezi nimi žádné výrazné změny, jako například mezi pojivy 70/100 a 160/220. Především výsledky silničního asfaltu 70/100 vychází mimo předpokládané hodnoty, kdy se očekává se zvyšující se hodnotou penetrace postupné zvyšování m-hodnoty při teplotě -22 °C a zároveň snižování modulu tuhosti S při teplotě -22 °C.

Výsledné kritické teploty asfaltových pojiv při m-hodnotě rovné 0,3 klesají se zvyšující se penetrací pojiva a oproti výsledným kritickým teplotám při modulu tuhosti za ohybu rovnajícímu se 300 MPa jsou více reprezentativním výsledkem kritické teploty asfaltových pojiv.

6.5 STANOVENÍ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI ASFALTOVÉ SMĚSI

Z vytvořených dvou sad marshallových těles byla změřena objemová hmotnost. Výsledné hodnoty pro obsah asfaltu 7,4 % byly velmi podobné hodnotám při obsahu asfaltu 7,1 %. Z tohoto důvodu byla použita směs s obsahem asfaltu 7,4 %, jelikož cílem práce je určit změny chování při použití různých asfaltů, a tak vzniká snaha o maximalizaci obsahu asfaltového pojiva ve směsi. Výsledné hodnoty z měření objemové hmotnosti jsou znázorněny v následující tabulce 16.

Tabulka 16: Porovnání různých obsahů asfaltu s ohledem na objemovou hmotnost

Obsah asfaltu ve směsi [%]	Č. Vzorku	Suchý - m1 [g]	Ponořený - m2 [g]	Osušený - m3 [g]	Voda - hustota [kg/m3]	Objemová hmotnost [kg/m3]
7.1	1	1191	676.9	1193.6	997.17	2298.49
	2	1192.3	680.8	1194.9	997.17	2312.64
	3	1110.4	640.7	1111.9	997.17	2349.87
7.4	1	1196.8	688.1	1197	997.17	2345.08
	2	1197.1	685.5	1197.2	997.17	2332.84
	3	1195.9	682.7	1197.3	997.17	2317.36
					Průměr	2331.76

m_1 … hmotnost suchého tělesa [g]

m_2 … hmotnost tělesa ve vodě [g]

m_3 … hmotnost tělesa nasyceného vodou a povrchově osušeného [g]

ρ_w … hustota vody při zkušební teplotě stanovená s přesností na 0,1 kg/m^3

6.6 MAXIMÁLNÍ OBJEMOVÁ HMOTNOST

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

m_1 = 690,8 g

m_2 = 1674,7 g

m_3 = 2588,7 g

V_p = 1,323 l

ρ_w = 997,04 kg/m^3

ρ_{mv} = 2421,112 kg/m^3

ρ_{mv} … maximální objemová hmotnost asfaltové směsi [kg/m^3]

m_1 … hmotnost pyknometru a nástavce [g]

m_2 … hmotnost pyknometru, nástavce a zkušebního vzorku [g]

m_3 … hmotnost pyknometru, nástavce, zkušebního vzorku a destilované vody [g]

V_p … objem pyknometru po naplnění po referenční značku nástavce [m^3]

ρ_w … hustota vody či rozpouštědla při zkušební teplotě [kg/m^3]

6.7 MEZEROVITOST

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

ρ_m = 2421,112 kg/m^3

ρ_b = 2331,76 kg/m^3

V_m = 3,69 %

ρ_m … maximální objemová hmotnost směsi [kg/m^3]

ρ_b … objemová hmotnost zkušebního tělesa [kg/m^3]

V_m … mezerovitost zkušebního tělesa s přesností na 0,1 [%]

6.8 MÍRA ZHUTNĚNÍ

$$C = \frac{\rho_{bssd,1}}{\rho_{bssd,2}} * 100$$

c … míra zhutnění zkušební desky [%]

$\rho_{bssd,1}$ … objemová hmotnost zkušební desky [g]

$\rho_{bssd,2}$ … objemová hmotnost stanovená na Marshallových tělesech [g]

Tabulka 17: Míry zhutnění vyrobených těles z asfaltových směsí

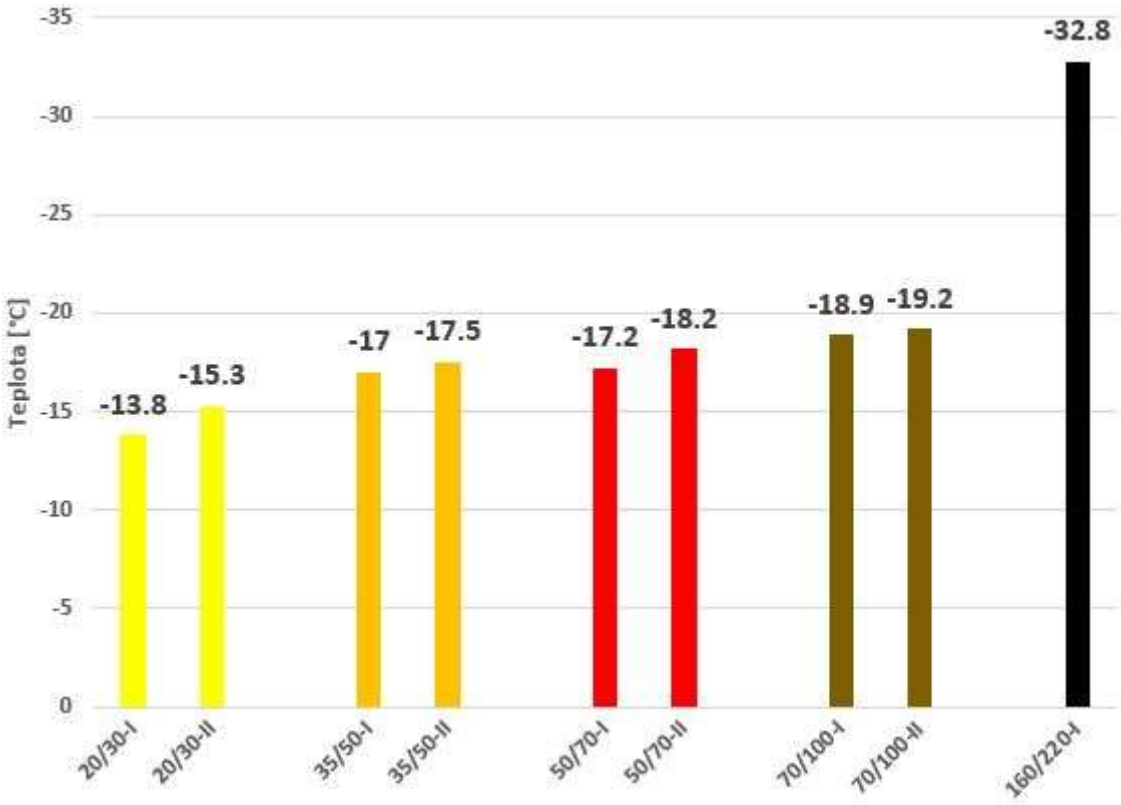
Asfaltové pojivo ve směsi	Suchý - m1 [g]	Ponořený - m2 [g]	Osušený - m3 [g]	Voda - hustota [kg/m3]	Objemová hmotnost [kg/m3]	Míra zhutnění [%]
20/30	9452	5410	9466	997.12	2323.66	99.65%
35/50	9313	5285	9328	997.12	2296.85	98.50%
50/70	9384	5333	9399	997.1	2301.23	98.69%
70/100	9467	5400	9475	997.44	2317.24	99.38%
160/220	9372	5329	9378	997.44	2308.72	99.01%

6.9 TEST TSRST

Při zkoušce TSRST je měřena kritická teplota a maximální tahové napětí, při kterém dojde k porušení tělesa. Výsledky zkoušek odpovídají předpokladu, že se zvyšující penetrací asfaltu se snižuje kritická teplota těles. U silničního asfaltu 160/220 byla kritická teplota natolik nízká, že u většiny testovaných těles nedošlo k porušení a výsledky zkoušky nemohly být použity. Což je také důvodem k pouze jedinému výsledku zkoušky u tohoto silničního asfaltu. Výsledky jednotlivých zkoušek jsou znázorněny v následující tabulce 18 a grafu 11. Průměrné hodnoty pro jednotlivé typy silničních asfaltů jsou poté uvedeny v tabulce 19 a grafu 12.

Tabulka 18: Výsledné kritické teploty vzorků ze zkoušky TSRST

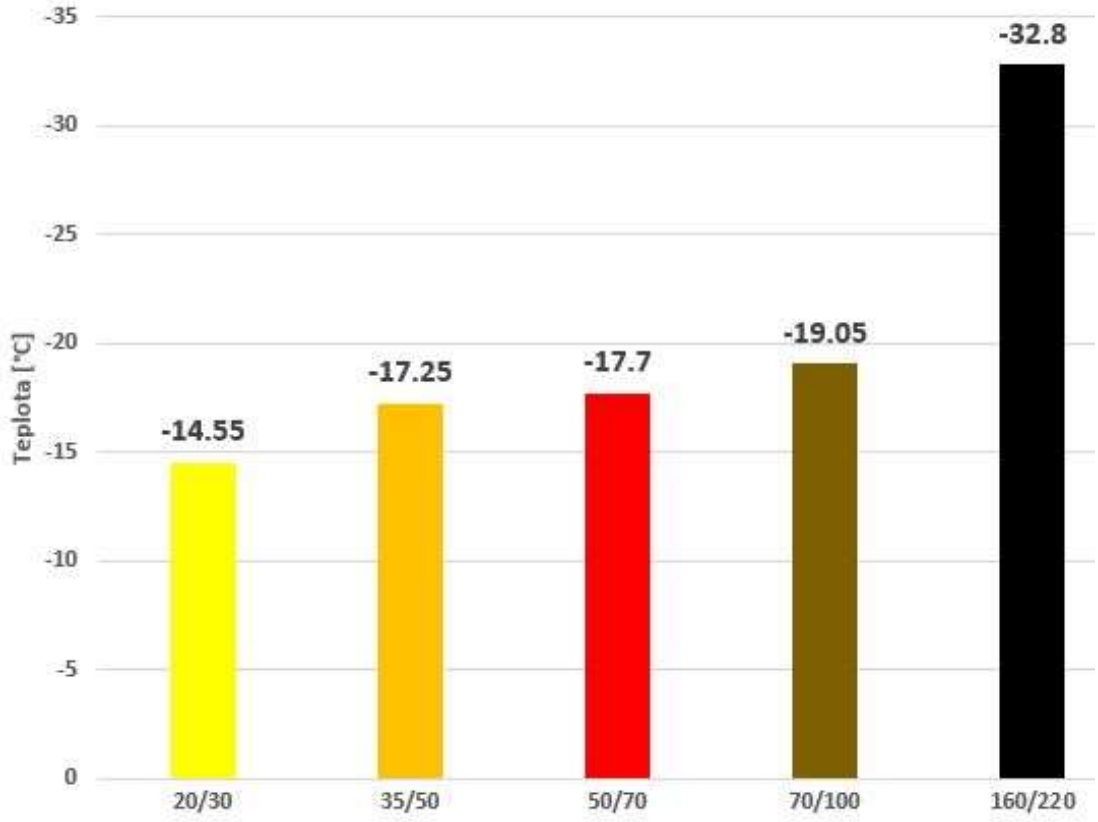
Vzorek	20/30-I	20/30-II	35/50-I	35/50-II	50/70-I	50/70-II	70/100-I	70/100-II	160/220-I
Kritická teplota tělesa [°C]	-13.8	-15.3	-17	-17.5	-17.2	-18.2	-18.9	-19.2	-32.8



Graf 11: Výsledné kritické teploty vzorků ze zkoušky TSRST

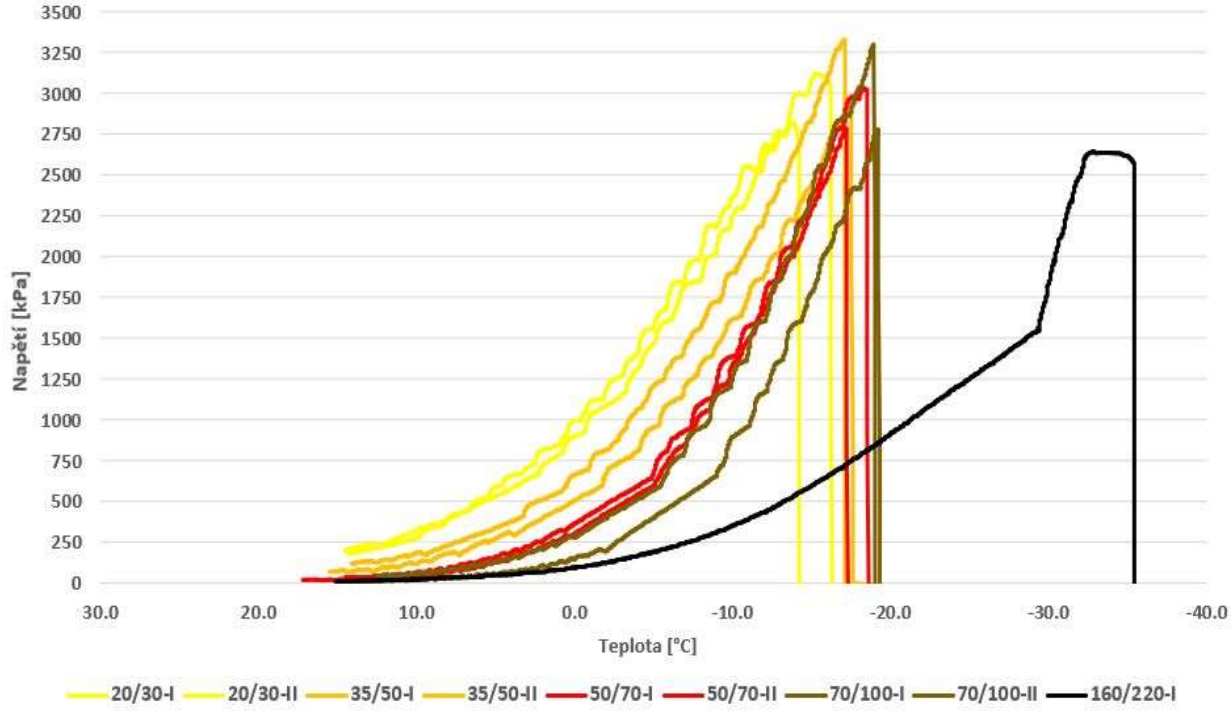
Tabulka 19: Průměrné hodnoty kritických teplot ze zkoušky TSRST

Vzorek	20/30	35/50	50/70	70/100	160/220
Průměrná kritická teplota směsi [°C]	-14.55	-17.25	-17.7	-19.05	-32.8



Graf 12: Průměrné hodnoty kritických teplot ze zkoušky TSRST

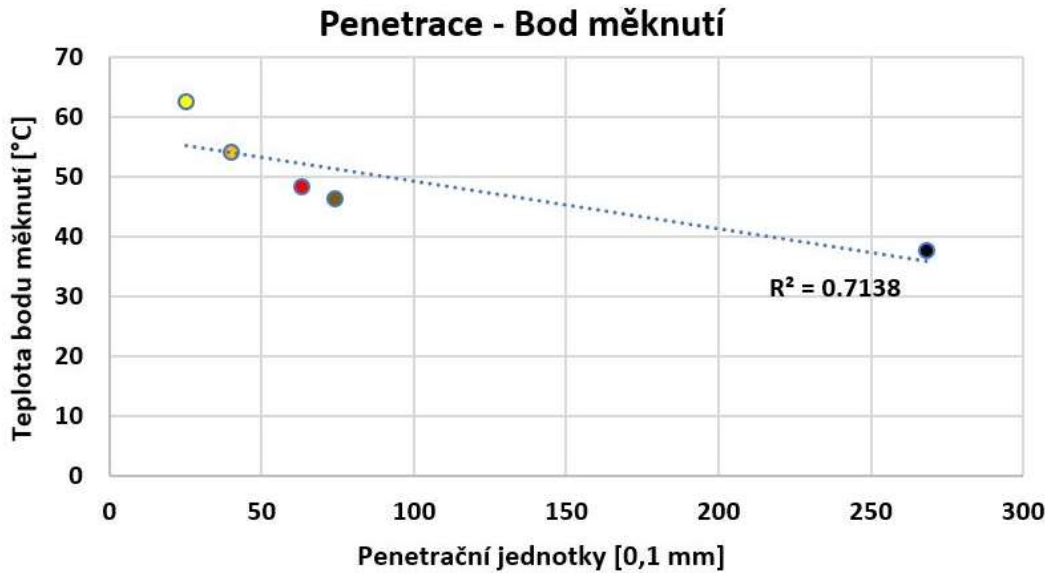
Průběh napětí v tělese znovu závisí na penetraci asfaltového pojiva. Se zvyšující penetrací je nárůst napětí v tělese pomalejší vzhledem ke klesající teplotě. Průběh napětí je znázorněn v následujícím grafu 13.



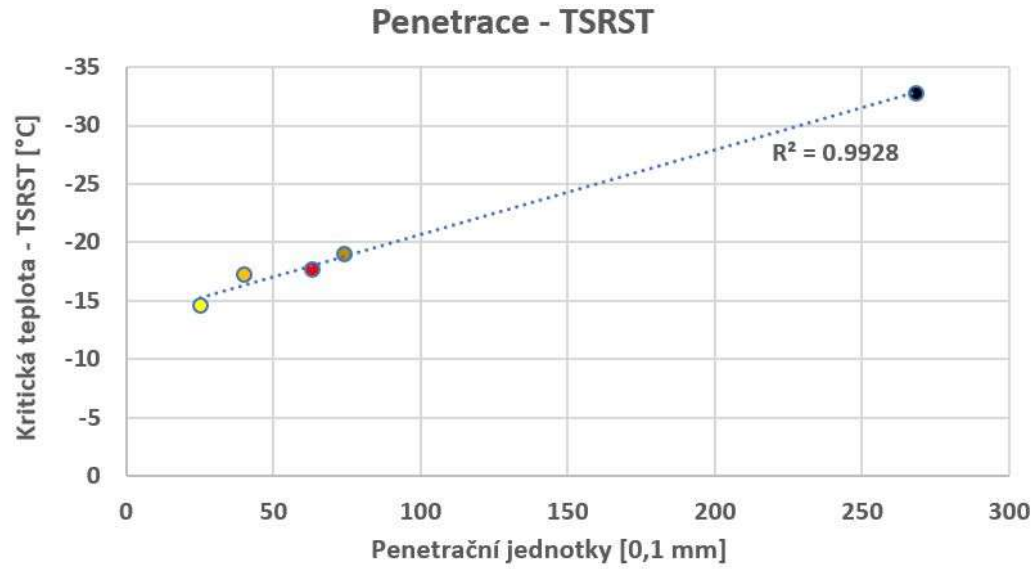
Graf 13: Průběh napětí ve vzorcích při provádění zkoušky TSRST

6.10 KORELACE VÝSLEDKŮ

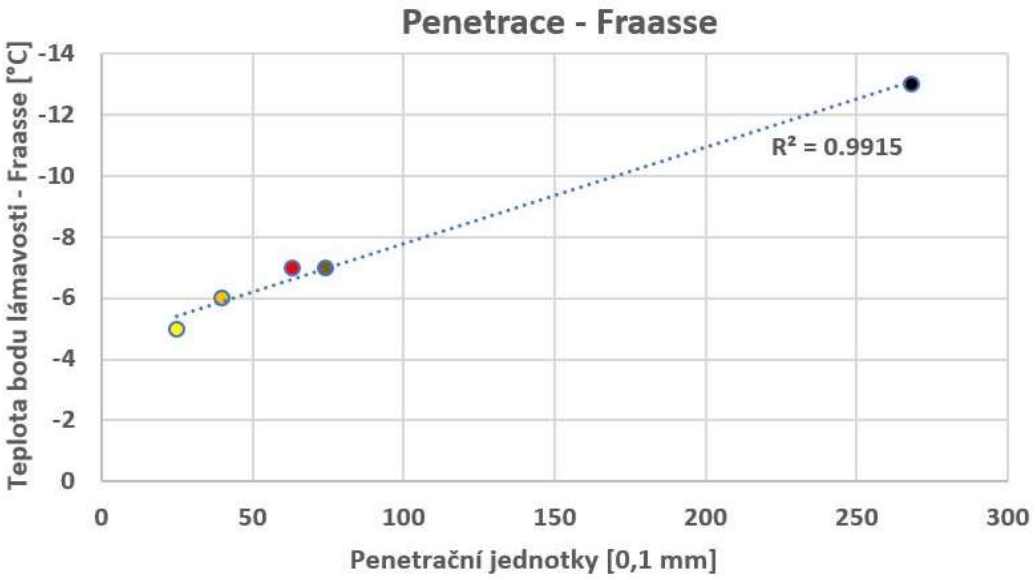
V následujících grafech 14 až 28 je znázorněna korelace jednotlivých výsledků zkoušek s vypočítaným koeficientem determinace. Použitá křivka, kterou byly proloženy výsledné body, je lineární pro všechny typy grafů.



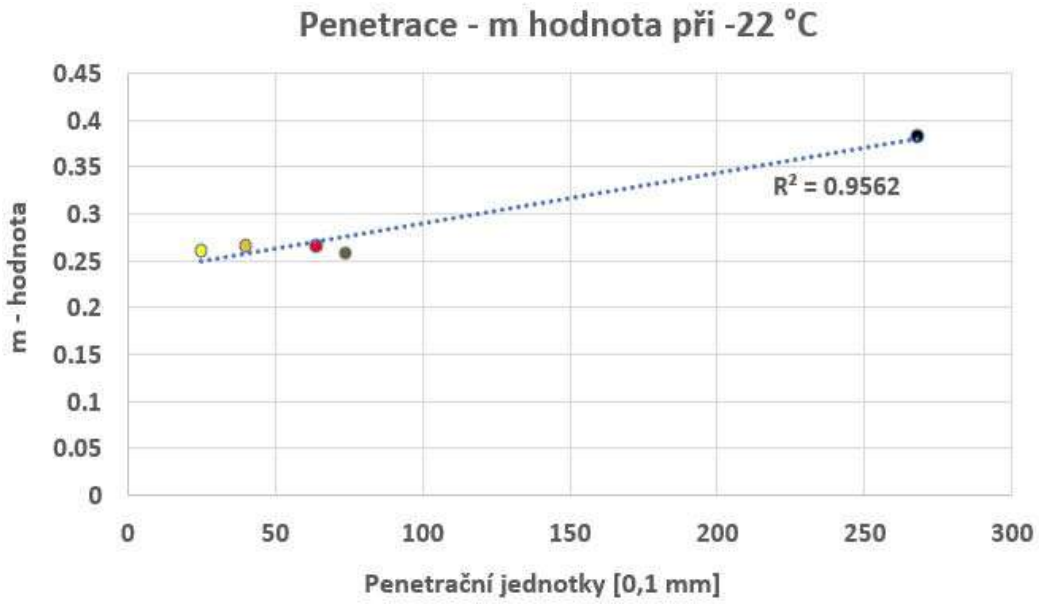
Graf 14: Korelace mezi výsledky zkoušek penetrace a bodu měknutí



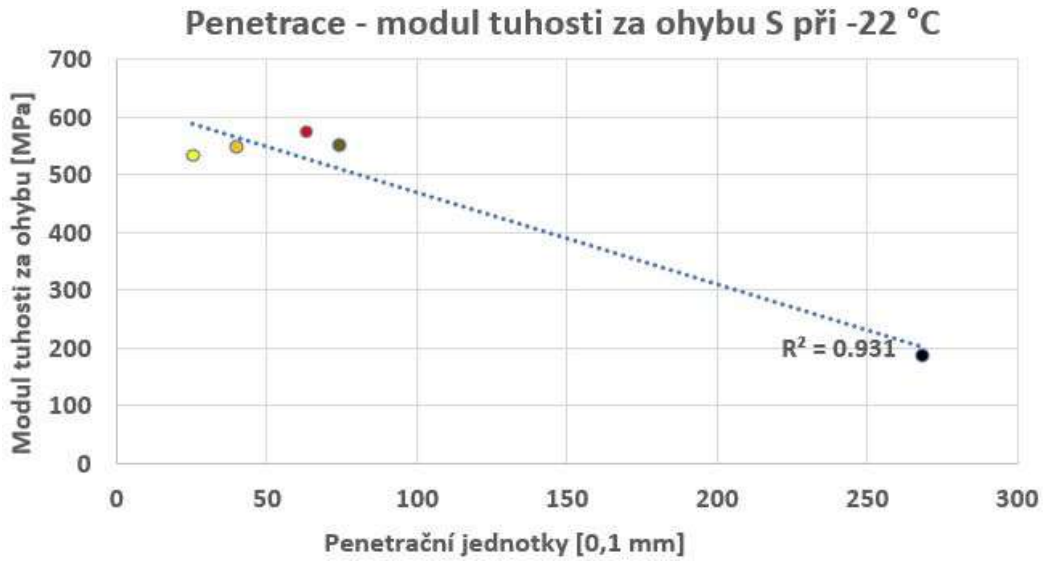
Graf 15: Korelace mezi výsledky zkoušek penetrace a TSRST



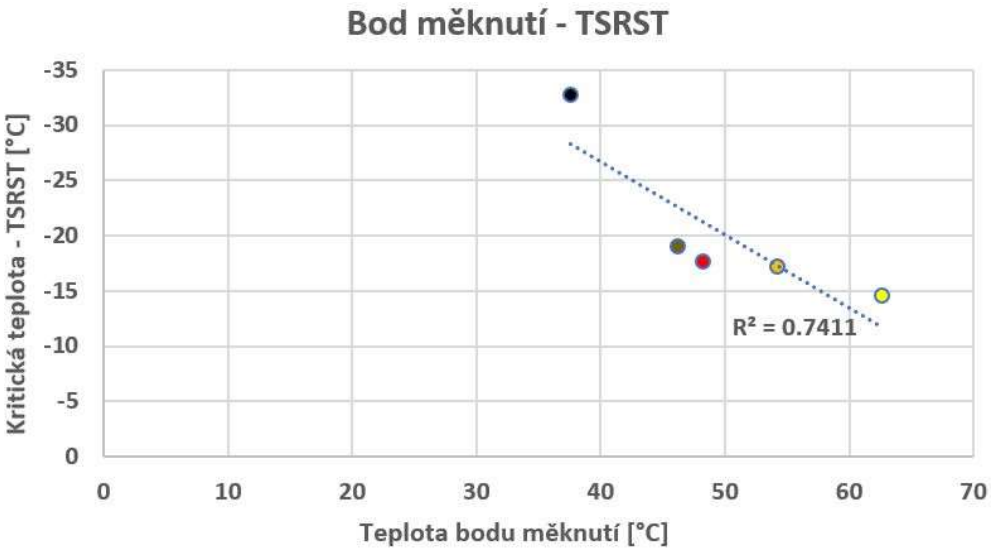
Graf 16: Korelace mezi výsledky zkoušek penetrace a bodu lámavosti dle Fraasse



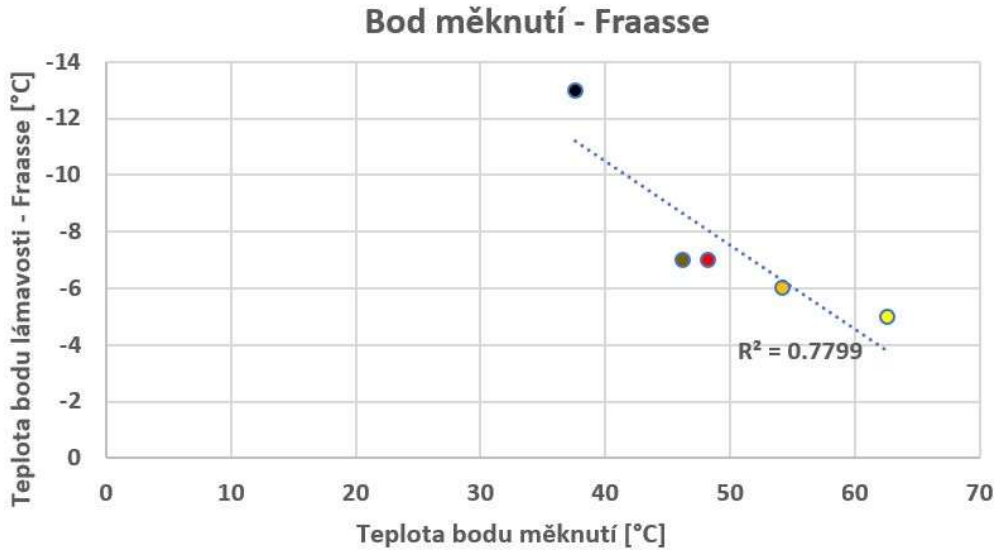
Graf 17: Korelace mezi výsledky zkoušky penetrace a m-hodnoty při -22 °C ze zkoušky BBR



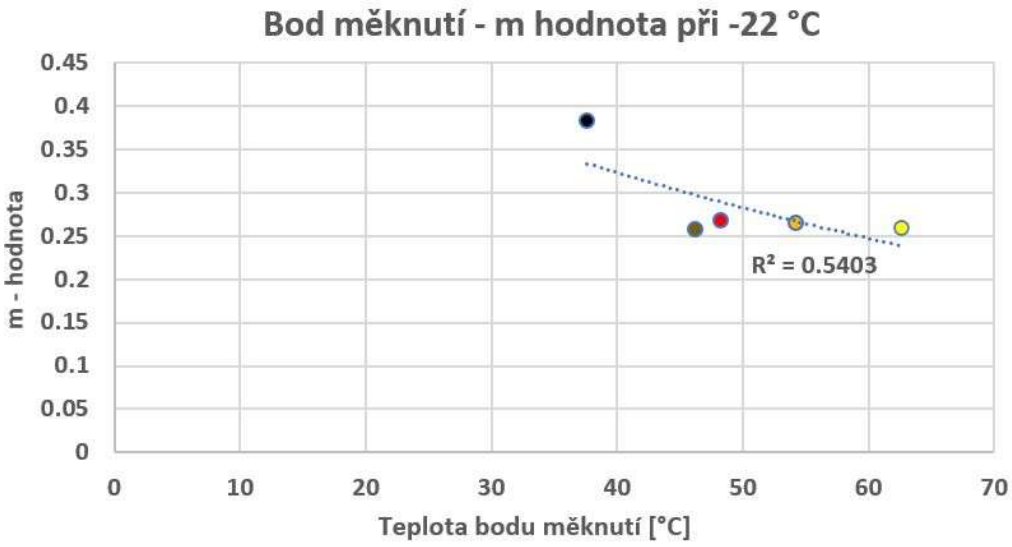
Graf 18: Korelace mezi výsledky zkoušky penetrace a modulu tuhosti za ohybu S při -22 °C ze zkoušky BBR



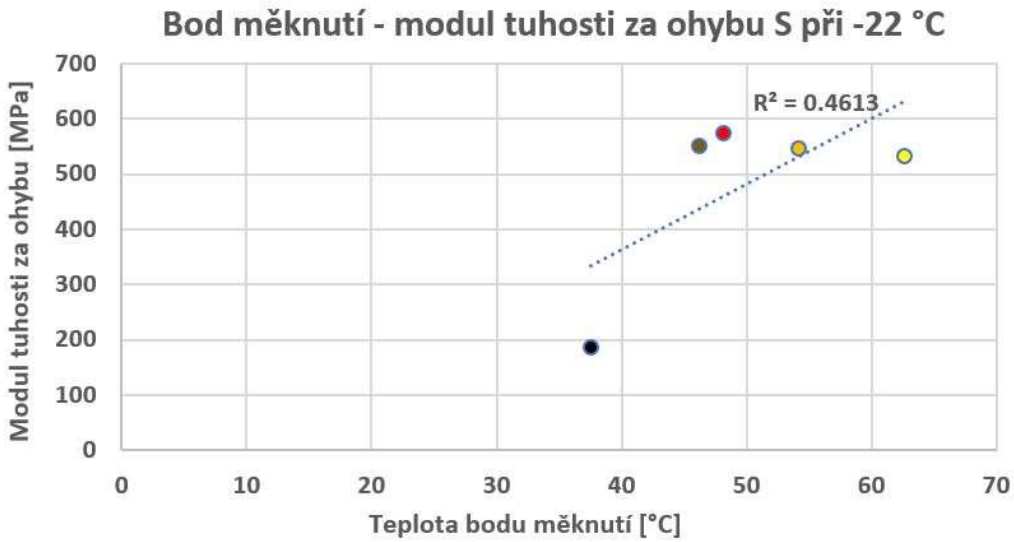
Graf 19: Korelace mezi výsledky zkoušek bodu měknutí a TSRST



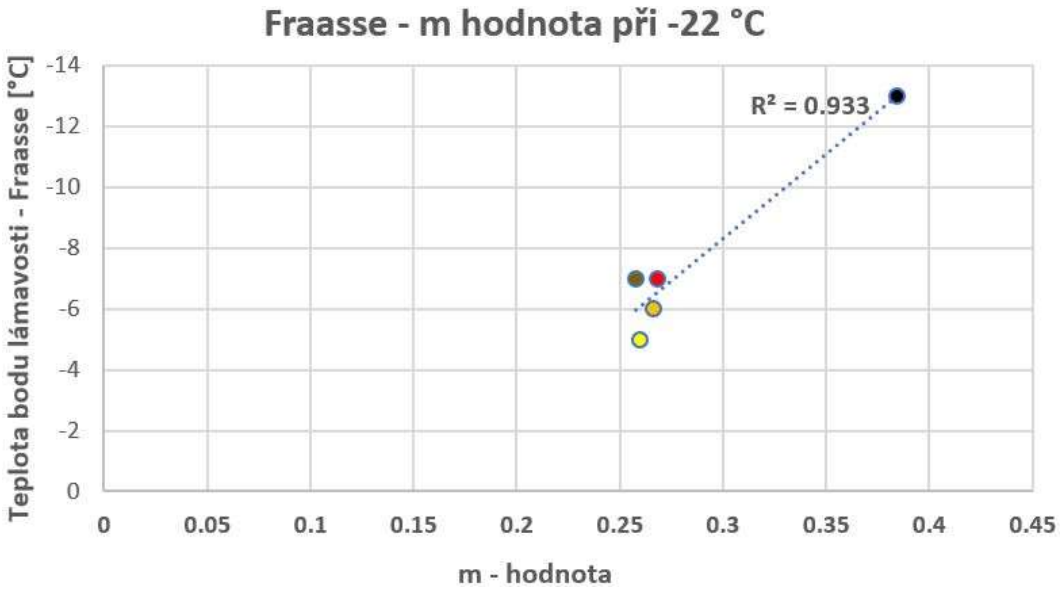
Graf 20: Korelace mezi výsledky zkoušky bodu měknutí a bodu lámavosti dle Fraasse



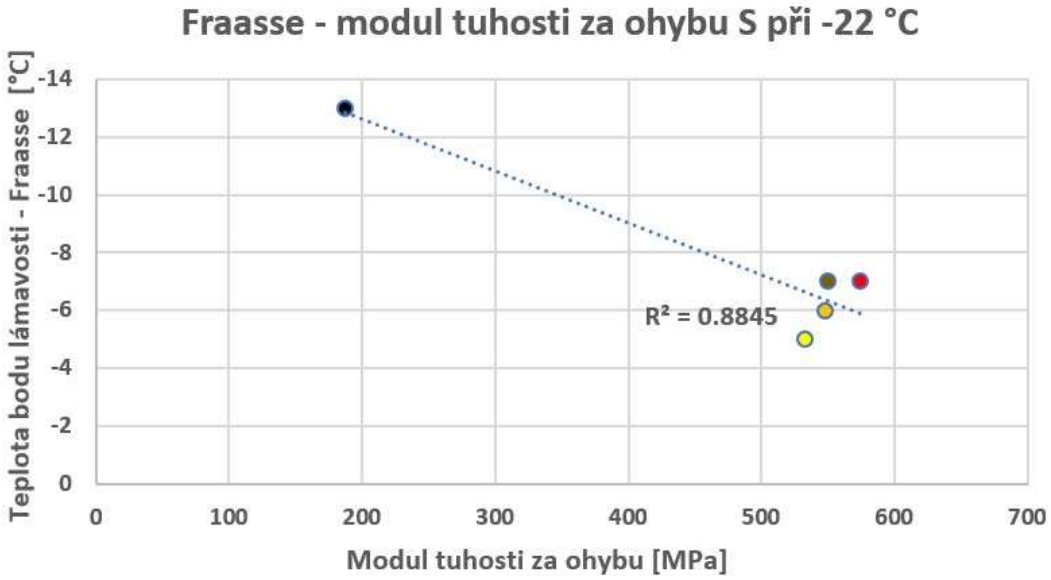
Graf 21: Korelace mezi výsledky zkoušky bodu měknutí a m-hodnoty při -22 °C



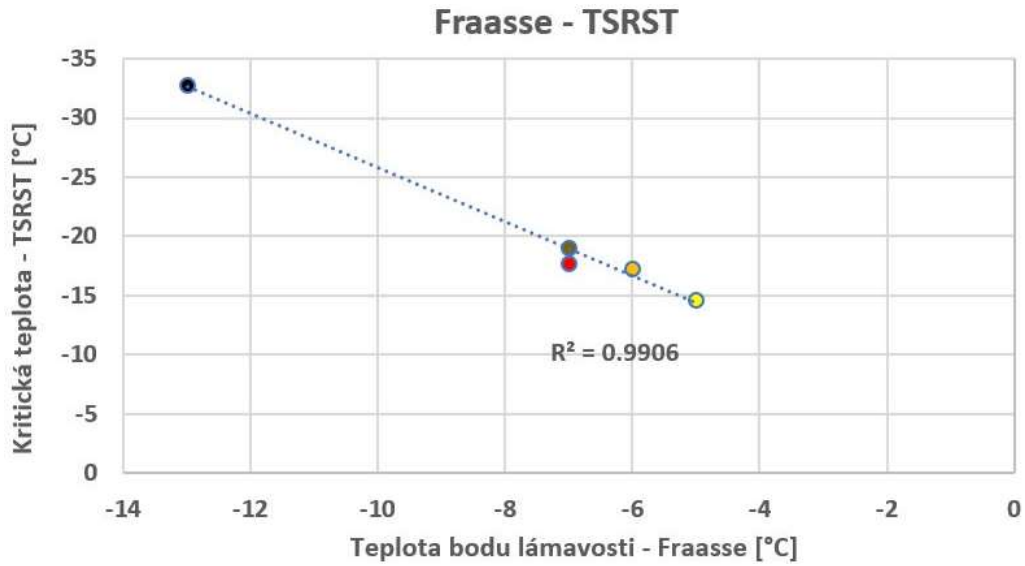
Graf 22: Korelace mezi výsledky zkoušky bodu měknutí a modulu tuhosti za ohybu S při -22 °C



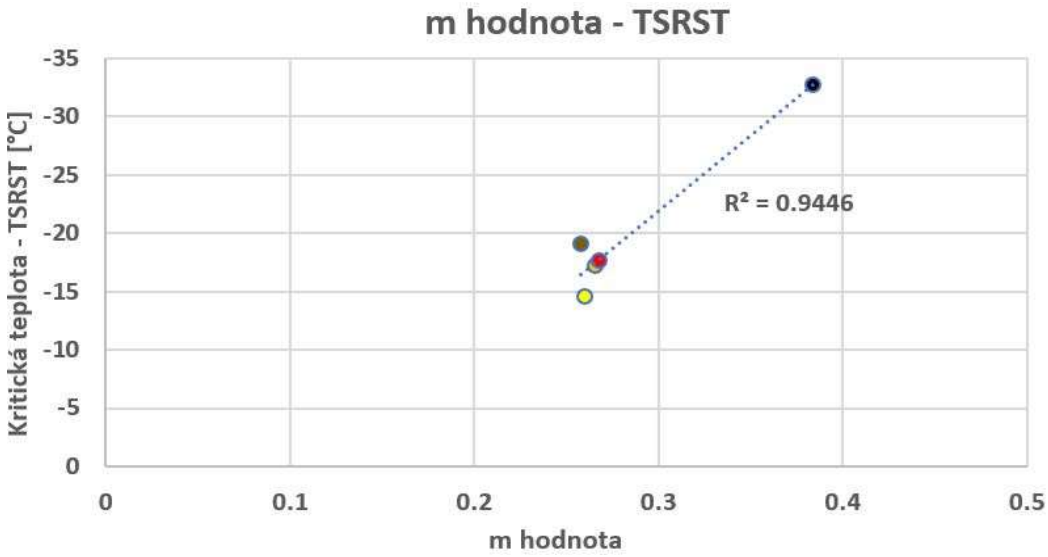
Graf 23: Korelace mezi výsledky bodu lámavosti dle Fraasse a m-hodnoty při -22 °C



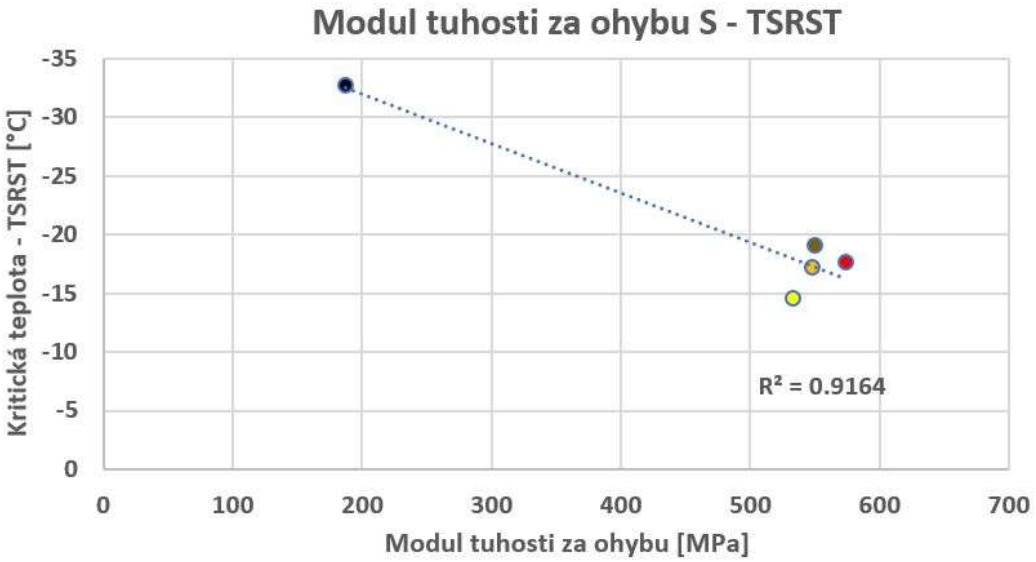
Graf 24: Korelace mezi výsledky Fraasseho metody a modulu tuhosti za ohybu S při -22 °C



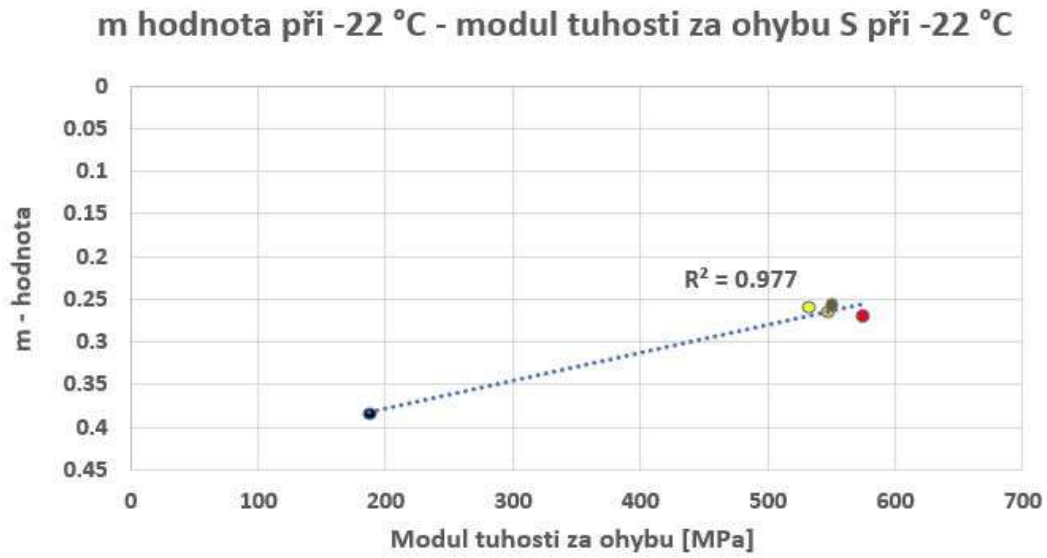
Graf 25: Korelace mezi výsledky bodu lámavosti dle Fraasse a zkoušky TSRST



Graf 26: Korelace mezi výsledky zkoušky TSRST a m-hodnoty při -22 °C



Graf 27: Korelace mezi výsledky zkoušky TSRST a modulu tuhosti za ohybu S při -22 °C



Graf 28: Korelace mezi výslednou m-hodnotou při -22 °C a modulu tuhosti za ohybu S při -22 °C

U zkoušky bodu měknutí ve všech případech vyšel koeficient determinace v hodnotách menších než 0,9. To je způsobeno výslednou teplotou bodu měknutí pro silniční asfalt 160/220, který se odchyluje od trendu a způsobuje neuskutečnitelnost proložení lineární křivkou s vysokým koeficientem determinace. Výsledné hodnoty koeficientů determinace jsou všechny vyzobrazeny následující maticí v tabulce 20.

Tabulka 20: Korelační matice

Koeficient determinace R^2	Penetrace	Bod měknutí	Fraasse	Kritická teplota (TSRST)	m-hodnota
Penetrace	X				
Bod měknutí	0.714	X			
Fraasse	0.992	0.78	X		
Krit. teplota (TSRST)	0.993	0.741	0.99	X	
m-hodnota	0.956	0.54	0.933	0.945	X
Modul tuhosti za ohybu S	0.931	0.461	0.885	0.916	0.977

Pro zjištění, zda výsledky zkoušek asfaltového pojiva 160/220 ovlivňují výsledné závislosti, byly výsledky bez tohoto pojiva uvedeny v následující tabulce 21.

Tabulka 21: Korelační matice bez zahrnutí silničního asfaltu 160/220

Koeficient determinace R^2	Penetrace	Bod měknutí	Fraasse	Kritická teplota (TSRST)	m-hodnota
Penetrace	X				
Bod měknutí	0.953	X			
Fraasse	0.939	0.986	X		
Krit. teplota (TSRST)	0.867	0.94	0.873	X	
m-hodnota	0.001	0.02	0.048	0.0025	X
Modul tuhosti za ohybu S	0.476	0.575	0.684	0.37	0.442

Při uvažování výsledků bez zahrnutí silničního asfaltu 160/220 se koeficient determinace zahrnující zkoušku v průhybovém trámečkovém reometru pohyboval ve velmi nízkých hodnotách. Naopak výsledky všech ostatních koeficientů determinace mezi zkouškami nezahrnujícími BBR dosahovaly hodnot vyšších než 0,85. Jak je ale možné předpokládat z výsledků studie provedené v Sofii zmiňované v kapitole 3.4 [9], lze předpokládat, že při použití modifikovaných asfaltů by se u koeficientů determinace počítaných ze zkoušky penetrace jehlou jeho výsledky pohybovaly v nižších hodnotách.

7 ZÁVĚR

Tato práce se zabývala porovnáním výsledků nízkoteplotních zkoušek asfaltových pojiv a asfaltových směsí a korelacemi jejich výsledků při použití stejných materiálů.

V úvodní teoretické části se práce zabývá historií asfaltových pojiv, používanými zkouškami v současnosti, pokusy o použití trámečkového reometru při zkoušení asfaltových směsí a rozborem studie provedené v Bulharsku na podobné téma.

Praktická část práce obsahovala především stanovení vlastností silničních asfaltů třídy 20/30, 35/50, 50/70, 70/100 a 160/220. Cílem bylo zjistit závislosti mezi výsledky jednotlivých zkoušek, především nízkoteplotních zkoušek asfaltových pojiv a asfaltových směsí. Prvním krokem bylo provedení zkoušek asfaltových pojiv a ověření, zda pojiva splňují požadavky normy ČSN 65 7204. Zkoušená asfaltová pojiva splňovala až na pojivo 160/220 požadavky na hodnotu penetrace jehlou, požadavky na bod měknutí splňovala všechna srovnávaná pojiva a požadavky na teplotu bodu lámavosti dle Fraasse splňovala pouze pojiva 20/30 a 35/50.

První z prováděných nízkoteplotních zkoušek byla zkouška určení bodu lámavosti dle Fraasse, z které se ukazala problematika nízké hodnoty opakovatelnosti a z každé třídy asfaltového pojiva musely být otestovány nejméně 3 sady. U zkoušky asfaltových pojiv v průhybovém trámečkovém reometru byl závěrem fakt, že kritická teplota získaná z m-hodnoty, je schopná lépe popsat rozdíly mezi chováním jednotlivých srovnávaných pojiv, než kritická teplota, stanovená na základě modulu tuhosti za ohybu. Avšak výsledné hodnoty modulu tuhosti za ohybu i m-hodnot byly, krom asfaltu s nejvyšší penetrací, v relativně stejných hodnotách a nereprezentovaly skutečné chování materiálu.

Poslední prováděnou zkouškou byla zkouška nízkoteplotních vlastností asfaltových směsí s rovnoměrným řízeným poklesem teploty (TSRST), u které výsledky představovaly očekávané hodnoty kritické teploty klesající se zvyšující se penetrací použitého asfaltového pojiva. Problémem bylo stanovení kritické teploty u těles s asfaltovým pojivem 160/220, která se chovala natolik nestandardně, že pro určení kritické teploty musela být provedena zkouška na několika tělesech.

Z provedených zkoušek se ukázalo, že korelace mezi zkouškami, s výjimkou zkoušky bodu měknutí, je velmi vysoká. Nejvyšších hodnot koeficientu determinace bylo docíleno

při porovnání zkoušky penetrace jehlou s ostatními zkouškami. Koeficient determinace mezi zkouškou bodu lámavosti a kritickou teplotou ze zkoušky TSRST vychází 0,99, což byla nejvyšší hodnota výsledného koeficientu v diplomové práci. Hodnota koeficientů determinace při porovnání kritické teploty ze zkoušky TSRST a výsledků zkoušky pomocí průhybového trámečkového reometru vycházela 0,933 při porovnání s m-hodnotou při teplotě -22 °C a 0,885 při porovnání s modulem tuhosti za ohybu při teplotě -22 °C. Tyto hodnoty byly ale nejvíce ovlivněny odlehlými hodnotami asfaltového pojiva 160/220, jelikož při vyjmutí těchto výsledků se koeficienty determinace snížily na 0,0025 při porovnání s m-hodnotou při teplotě -22 °C a na 0,37 při porovnání s modulem tuhosti za ohybu S při teplotě -22 °C.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] doc. Dr. Ing. VARAUS, Michal. Nízkoteplotní chování asfaltových směsí. Silnice železnice. 2008. ISSN 1803-8441.

[2] Definition of bitumen [online]. Oxford University Press. Available at: https://www.lexico.com/definition/bitumen (Accessed: 12 October 2020)

[3] Read, John, and David Whiteoak. The Shell Bitumen Handbook. 5th ed. London : Reston, VA: Published for Shell Bitumen by Thomas Telford ; Distributors, USA, ASCE Press, 2003.

[4] bitumina.ae. Bitumen 160/220 Product data sheet. Sheikh Zayed Road, United Arab Emirates, 2018.

[5] Performance Grade (PG) Bitumen. In: Raha Bitumen Co [online]. Ankara - Turkey, 2016 [cit. 2021-01-06]. Dostupné z: http://rahabitumen.com/performance-grade-pg-bitumen/

[6] Mihai Marasteanu, William Buttlar, Hussain Bahia, and Christopher Williams, et al. Investigation of Low Temperature Cracking in Asphalt Pavements: National Pooled Fund Study -Phase II. Department of Civil Engineering University of Minnesota 500 Pillsbury Drive SE Minneapolis, MN 55455, Srpen 2012.

[7] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) Standard T313-05, "Standard method of test for determining the flexural creep stiffness of asphalt binder using the Bending Beam Rheometer (BBR),” Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing, 25th Edition, 2005.

[8] Weldegiorgis, Mekdim. (2013). Correlating the Dynamic Modulus and the Indirect Tensile Strength of Asphalt Concrete.”. Advanced Material Research. 723. 268-275.

[9] PANGAROVA, Dafinka a Alexander NIKOLOV. CHEMISTRY, CENTRAL INSTITUTE OF ROAD TECHNOLOGIES NATIONAL AND EUROPEAN NORMS AND STANDARDS, SOFIA, BULGARIA; RESEARCH AND DEVELOPMENT, PATPRIBOR OOD, SOFIA, BULGARIA. Study of the low temperature characteristics of binders and the asphalt mixtures produced with them. Prague, June 2016, 11 s.

[10] Blažek J., Rábl V.: Základy zpracování a využití ropy. 2. vyd. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 2006. ISBN 80-7080-619-2

[11] ČSN EN 1426. Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení penetrace jehlou. Praha: Český normalizační institut, 2007.

[12] ČSN EN 1427 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknutí - Metoda kroužek a kulička. Praha: Český normalizační institut, 2007.

[13] ČSN EN 12593. Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení bodu lámavosti podle Fraasse. Praha: Český normalizační institut, 2007.

[14] ČSN EN 14771. Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru (BBR). Praha: Český normalizační institut, 2005.

[15] Markéta Čumíčková Nízkoteplotní chování asfaltových pojiv. Brno, 2017. 64 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.

[16] ČSN EN 12697-30 Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem

[17] ČSN EN 12697-6 Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa

[18] ČSN EN 12697-46 Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 46: Nízkoteplotní vlastnosti a tvorba trhlin pomocí jednoosé zkoušky tahem

[19] ČSN EN 12697-35 Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 35: Laboratorní výroba směsi

[20] ČSN EN 12697-33 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 33: Příprava zkušebních těles zhutňovačem desek.

[21] Bc. Vlastimil Štěpanovský Problematika stárnutí asfaltových pojiv a směsí. Brno, 2015. 94s., Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Petr Hýzl, Ph.D.

[22] ČSN EN 12697-5 Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti

[23] ČSN EN 12697-8 Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 8: Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí

9 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Značení asfaltových pojiv ve spojených státech [5] 14
Obrázek 2: Vzorek asfaltové směsi pro reometr [7] 15
Obrázek 3: Vzorek směsi v trámečkovém reometru [7] 15
Obrázek 4: Přístroj pro určení pevnosti v příčném tahu [8] 17
Obrázek 5: Přístroj pro zkoušku penetrace jehlou 20
Obrázek 6: Vzorek pro zkoušku penetrace jehlou 21
Obrázek 7: Vzorky pro zkoušku bodu měknutí po odlití 22
Obrázek 8: Vzorky všech použitých pojiv pro zkoušku bodu měknutí 22
Obrázek 9: Porušené vzorky po provedení zkoušky bodu měknutí 23
Obrázek 10: Vzorek pro provedení zkoušky dle bodu lámavosti dle Fraasse 25
Obrázek 11: Přístroj pro provedení zkoušky bodu lámavosti dle Fraasse 26
Obrázek 12: Průhybový trámečkový reometr [15] 27
Obrázek 13: Zaformovaný vzorek pro zkoušku průhybovým trámečkovým reometrem 28
Obrázek 14: Odformovaný vzorek pro zkoušku průhybovým trámečkovým reometrem 28
Obrázek 15: Průběh zkoušky BBR 29
Obrázek 16: Marshallova tělesa 32
Obrázek 17: Rázový zhutňovač 33
Obrázek 18: Forma pro výrobu marshallových těles 34
Obrázek 19: Ponoření marshallových těles pro určení objemové hmotnosti 35
Obrázek 20: Dvě směsi pro určení maximální objemové hmotnosti 36
Obrázek 30: Pyknometr s testovanou směsí 37
Obrázek 21: Přístroj pro zkoušku TSRST s upnutým vzorkem 39
Obrázek 22: Porušený vzorek po zkoušce TSRST 40
Obrázek 23: Použitá kameniva pro výrobu směsi 41
Obrázek 24: Přístroj pro míchání asfaltové směsi 42
Obrázek 25: Lamelový zhutňovač 44
Obrázek 26: Kotoučová pila s pojízdným stolem 45
Obrázek 27: Nařezaná tělesa pro zkoušku TSRST 45
Obrázek 28: Vlepené těleso do formy pro zkoušku TSRST 46
Obrázek 31: Křivka zrnitosti 49

10 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Determinační součinitel zkoušek v Bulharské studii 17
Tabulka 2: Použitá pojiva 47
Tabulka 3: Základní specifikace asfaltové směsi 48
Tabulka 4: Poměr zrn kameniva ve frakci – část 1 48
Tabulka 5: Poměr zrn kameniva ve frakci – část 2 48
Tabulka 6: Zastoupení frakcí ve směsi 48
Tabulka 7: Poměr frakcí pro určení křivky zrnitosti 49
Tabulka 8: Výsledné hodnoty zkoušky penetrace jehlou 50
Tabulka 9: Průměrné výsledné hodnoty penetrací 51
Tabulka 10: Výsledné hodnoty zkoušky bodu měknutí 52
Tabulka 11: Průměrné hodnoty bodu měknutí asfaltových pojiv 52
Tabulka 12: Porovnání výsledných hodnot s požadavky normy 53
Tabulka 13: Výsledné hodnoty zkoušky bodu lámavosti dle Fraasse 54
Tabulka 14: Výsledné hodnoty zkoušky pomocí trámečkového reometru 55
Tabulka 15: Porovnání různých obsahů asfaltu s ohledem na objemovou hmotnost 58
Tabulka 16: Výsledné kritické teploty vzorků ze zkoušky TSRST 61
Tabulka 17: Průměrné hodnoty kritických teplot ze zkoušky TSRST 62
Tabulka 18: Míry zhutnění vyrobených těles z asfaltových směsí 60
Tabulka 19: Korelační matice 71

11 SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Změna modulu tuhosti v průběhu zatěžování 31
Graf 2: Výsledné hodnoty zkoušky penetrace jehlou 50
Graf 3: Průměrné výsledné hodnoty penetrací 51
Graf 4: Výsledné hodnoty zkoušky bodu měknutí 52
Graf 5: Průměrné hodnoty bodu měknutí asfaltových pojiv 53
Graf 6: Výsledné hodnoty zkoušky bodu lámavosti dle Fraasse 54
Graf 7: Výsledné kritické teploty při m hodnotě = 0,3 56
Graf 8: Výsledné kritické teploty při modulu tuhosti za ohybu S = 300 MPa 56
Graf 9: Výsledné m-hodnoty při teplotě -22 °C 57
Graf 10: Výsledný modul tuhosti za ohybu S při teplotě -22 °C 57
Graf 11: Výsledné kritické teploty vzorků ze zkoušky TSRST 61
Graf 12: Průměrné hodnoty kritických teplot ze zkoušky TSRST 62
Graf 13: Průběh napětí ve vzorcích při provádění zkoušky TSRST 63
Graf 14: Korelace mezi výsledky zkoušek penetrace a bodu měknutí 63
Graf 15: Korelace mezi výsledky zkoušek penetrace a TSRST 64
Graf 16: Korelace mezi výsledky zkoušek penetrace a bodu lámavosti dle Fraasse 64
Graf 17: Korelace mezi výsledky zkoušky penetrace a m-hodnoty při -22 °C ze zkoušky BBR 65
Graf 18: Korelace mezi výsledky zkoušky penetrace a modulu tuhosti za ohybu S při -22 °C ze zkoušky BBR 65
Graf 19: Korelace mezi výsledky zkoušek bodu měknutí a TSRST 66
Graf 20: Korelace mezi výsledky zkoušky bodu měknutí a bodu lámavosti dle Fraasse 66
Graf 21: Korelace mezi výsledky zkoušky bodu měknutí a m-hodnoty při -22 °C 67
Graf 22: Korelace mezi výsledky zkoušky bodu měknutí a modulu tuhosti za ohybu S při -22 °C 67
Graf 23: Korelace mezi výsledky bodu lámavosti dle Fraasse a m-hodnoty při -22 °C 68
Graf 24: Korelace mezi výsledky Fraasseho metody a modulu tuhosti za ohybu S při -22 °C 68
Graf 25: Korelace mezi výsledky bodu lámavosti dle Fraasse a zkoušky TSRST 69
Graf 26: Korelace mezi výsledky zkoušky TSRST a m-hodnoty při -22 °C 69
Graf 27: Korelace mezi výsledky zkoušky TSRST a modulu tuhosti za ohybu S při -22 °C 70
Graf 28: Korelace mezi výslednou m-hodnotou při -22 °C a modulu tuhosti za ohybu S při -22 °C 70

12 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Výsledky zkoušek odolnosti asfaltové směsi proti vzniku mrazových trhlin