VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ
INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

NÍZKOTEPLOTNÍ CHOVÁNÍ ASFALTOVÝCH POJIV
LOW-TEMPERATURE BEHAVIOR OF ASPHALT BINDERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR
Markéta Čumíčková

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR
Ing. DUŠAN STEHLÍK, Ph.D.

BRNO 2017

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav pozemních komunikací

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Markéta Čumíčková
Název	Nízkoteplotní chování asfaltových pojiv
Vedoucí práce	Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2016
Datum odevzdání	26. 5. 2017

V Brně dne 30. 11. 2016

doc. Dr. Ing. Michal Varaus	prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.,MBA
Vedoucí ústavu	Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Předané vzorky asfaltových pojiv

ČSN EN 12591 Asfalty a asfaltová pojiva - Specifikace pro silniční asfalty

ČSN EN 14023 Asfalty a asfaltová pojiva - Systém specifikace pro polymerem modifikované asfalty

ČSN EN 12593 Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení bodu lámavosti podle Fraasse

ČSN EN 14771 Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru (BBR)

Literatura z internetu

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Cílem bakalářské práce bude stanovit nízkoteplotní vlastnosti vybraných vzorků silničních asfaltů a polymerem modifikovaných asfaltů a získané výsledky vzájemně porovnat.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ 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. Dušan Stehlík, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Tato práce je zaměřena na nízkoteplotní chování vzorků silničních asfaltů a polymerem modifikovaných asfaltových pojiv. V teoretické části jsou jednoduše popsány podstaty a postupy zkoušek: penetrace jehlou, bod měknutí, BBR a bod lámavosti podle Fraasse. V praktické části jsou výsledky zkoušek vyneseny do grafů. Cílem práce je stanovit korelace mezi danými zkouškami.

KLÍČOVÁ SLOVA

penetrace jehlou, bod měknutí, BBR, bod lámavosti podle Fraasse, polymerem modifikované asfaltové pojivo

ABSTRACT

The work is focused on low-temperature behavior of specimens of asphalt binders and polymer modified bitumens. In the theoretical part, the principles and procedures of tests are simply described: Needle Penetration, Softening Point, Bending Beam Rheometer and Fraass breaking point. In the practical part, results of tests are demonstrated to graphs. The aim of thesis is to determine the correlation between tests.

KEYWORDS

Needle Penetration, Softening Point, Bending Beam Rheometer, Fraass Breaking Point, polymer modified bitumen

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

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.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 20. 5. 2017

Markéta Čumíčková
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych zde ráda poděkovala vedoucímu své bakalářské práce Ing. Dušanu Stehlíkovi, Ph.D., všem zaměstnancům výzkumného centra AdMaS a školní laboratoře VUT FAST. Zvláštní poděkování bych chtěla vyjádřit Ing. Ondřeji Daškovi, Ph.D. Všem jmenovaným vděčím za pomoc, cenné rady a ochotu, se kterou mi poskytovali veškeré informace v průběhu zpracování této práce. V neposlední řadě bych ráda poděkovala své rodině, která mě po celou dobu studia podporovala.

Obsah

1 Úvod 10
2 Rešerše literatury 11
3 Cíl práce 13
4 Použité zkušební metody 14
4.1 Stanovení penetrace jehlou 14
4.1.1 Přístroje a pomůcky 14
4.1.2 Příprava na zkoušku 15
4.1.3 Postup zkoušky 15
4.1.4 Vyhodnocení zkoušky 17
4.2 Zkouška modulu tuhosti za ohybu a m-hodnoty v BBR 17
4.2.1 Přístroje a pomůcky 18
4.2.2 Příprava na zkoušku 19
4.2.3 Postup zkoušky 21
4.2.4 Vyhodnocení zkoušky 21
4.3 Stanovení bodu lámavosti podle Fraasse 23
4.3.1 Přístroje a pomůcky 23
4.3.2 Příprava na zkoušku 24
4.3.3 Postup zkoušky 25
4.3.4 Vyhodnocení zkoušky 26
4.4 Stanovení bodu měknutí 26
4.4.1 Přístroje a pomůcky 27
4.4.2 Příprava na zkoušku 27
4.4.3 Postup zkoušky 27
4.4.4 Vyhodnocení zkoušky 28
5 Použité materiály 29

6 Výsledky zkoušek 30
6.1 Stanovení penetrace jehlou 30
6.2 Zkouška modulu tuhosti za ohybu a m-hodnoty v BBR 31
6.2.1 Pojivo 50/70 31
6.2.2 Pojivo 45/80-50 33
6.2.3 Pojivo 45/80-55 35
6.2.4 Pojivo 45/80-65 37
6.2.5 Pojivo 45/80-75 39
6.3 Stanovení bodu lámavosti podle Fraasse 44
6.4 Stanovení bodu měknutí 45
7 Korelace výsledků 47
7.1 Závislost penetrace jehlou a bodu lámavosti podle Fraasse 47
7.2 Závislost modulu tuhosti za ohybu a penetrace jehlou 48
7.3 Závislost penetrace jehlou a bodu měknutí 49
7.4 Závislost modulu tuhosti za ohybu a bodu měknutí 49
7.5 Závislost m-hodnoty a penetrace jehlou 50
7.6 Závislost bodu lámavosti podle Fraasse a bodu měknutí 51
7.7 Závislost m-hodnoty a bodu měknutí 52
7.8 Závislost modulu tuhosti za ohybu a m-hodnoty 53
7.9 Závislost modulu tuhosti za ohybu a bodu lámavosti podle Fraasse 54
7.10 Závislost m-hodnoty a bodu lámavosti podle Fraasse 55
8 Závěr 57
9 Seznam použité literatury 60
10 Seznam obrázků 62
11 Seznam tabulek 63
12 Seznam grafů 64

1 Úvod

V dnešní době patří silniční doprava k nejrozšířenější v České republice. Proto je třeba dbát na kvalitu pozemních komunikací a brát zřetel na stále zvyšující se dopravní zatížení, které přispívá k jejich porušování.

Velký důraz je kladen na asfaltové pojivo, které je společně s kamenivem, nedílnou součástí asfaltových směsí. Za horka zpracovávané asfaltové směsi obsahují 4 – 7 % hmotnostního podílu asfaltového pojiva. Z důvodů zlepšení těchto asfaltových pojiv se v průběhu let do nich začaly přidávat různé přísady, tzv. modifikátory, čímž byly změněny jejich chemické nebo fyzikálně-mechanické vlastnosti. K širšímu používání modifikovaných asfaltů dopomohla ropná krize, kdy se cena asfaltu výrazně navýšila, což vedlo ke snaze používat asfalty s větší životností. Díky modifikátorům došlo ke zlepšení přilnavosti asfaltu ke kamenivu, snížení teplotní citlivosti a jeho křehkosti v oblasti nízkých teplot (snížení bodu lámavosti), zvýšení bodu měknutí (rozšíření oboru plasticity), zlepšení odolnosti proti vzniku trvalých deformací a snížení stárnutí asfaltu. [1]

Tato bakalářská práce se konkrétně zaměřuje na hodnocení nízkoteplotních vlastností vybraných modifikovaných asfaltových pojiv, jejichž vlastnosti se dají posoudit pomocí empirických, tak i dnes modernějších, funkčních zkoušek. Jako zástupce první ze skupiny daných zkoušek, byl zvolen bod lámavosti podle Fraasse, jehož naměřené výsledky budu porovnávat s hodnotami z průhybového trámečkového reometru (BBR).

2 Rešerše literatury

Během 70. let minulého století byly vyvinuty dvě metody pro měření nízkoteplotních vlastností asfaltových pojiv. První z nich byla tzv. „The Schweyer forced capillary rheometer“, která nebyla zcela vyhovující z důvodu malého rozsahu teplot pro využití (0 °C a vyšší). Druhá tzv. „The sliding plate rheometer“ naopak trpěla praktickými problémy při přípravě vzorků a analytickými problémy souvisejícími s režimem zatížení, při kterém byly vzorky testovány. Z těchto důvodů byl na univerzitě v Pensylvánii, jako součást projektu FHWA, vytvořen nový přístroj BBR (Bending Beam Rheometer), který řešil mnoho problémů spojených s předchozími dvěma přístroji a byl použit k měření reologických vlastností při extrémně nízkých teplotách s přiměřenou mírou přesnosti. Jako součást projektu SHRP (Strategic Highway Research Program) A-002A byla vyvinuta nová verze tohoto zařízení a bylo provedeno rozsáhlé testování s cílem zlepšit zkušební techniku a zvýšit její opakovatelnost. V současné době se již používá nová verze, která je plně řízena počítačem, a která může poskytovat přímé a přesné výsledky charakterizující dotvarování asfaltových pojiv v rámci nízkoteplotního rozsahu. [2]

Jeden z internetových zdrojů uvádí, že v minulosti byl proveden výzkum, který se zabýval srovnáním výsledků bodu lámavosti podle Fraasse, BBR, „Fracture toughness“ a ABCD. Výzkum byl prováděn v Turecku, kde je velmi vysoký rozdíl mezi nízkými a vysokými teplotami v horských východních a jihovýchodních částech. Proto se autoři chtěli přesvědčit, zda příměs modifikátorů do asfaltových pojiv zlepšuje nejen odolnost proti vysokým teplotám, ale také teplotám pod bodem mazu. Na začátku testu byly standartní zkoušky bodu lámavosti podle Fraasse a BBR označeny za ty, které nejsou plně schopny předpovídat nízkoteplotní výkonnost polymerem modifikovaných asfaltových pojiv. Důvodem byla skutečnost, že obě tyto standartní metody nezohledňují odolnost proti vzniku trhlin a tahovou sílu. Z vyhodnocení výsledků bylo zřejmé, že použití polymerem modifikovaných asfaltových pojiv má pozitivní vliv na omezení nízkoteplotních vad ve vozovkách. Dále pak bylo

dokázáno, že standardní zkoušky téměř nedokáží rozlišit rozdíly mezi nemodifikovanými a modifikovanými asfaltovými pojivy (viz tabulka 1). Proto bylo doporučeno, věnovat se do budoucna raději novým metodám. [3]

Tabulka 1: Průměrná teplota porušení [3]

Pojivo	Fraass [°C]	BBR [°C]	Fracture toughness [°C]	ABCD [°C]
160/220	-23	-33,7	-23,5	-35,1
160/220 + 5% D1192	-27	-33,7	-31	-43,5
75/100	-16	-30,4	-13,5	-31,2
75/100 + 5% D1192	-17	-27,6	-31	-38,1
50/70	-15	-27,1	-12,5	
50/70 + 5% D1192	-18	-26,9	-24	

3 Cíl práce

Cílem bakalářské práce je stanovení nízkoteplotních vlastností vybraných vzorků silničních asfaltů a polymerem modifikovaných asfaltových pojiv. Na těchto vzorcích budou následně stanoveny moduly tuhosti za ohybu a m-hodnoty pomocí průhybového trámečkového reometru (BBR) podle ČSN EN 14771 a body lámavosti podle ČSN EN 12593. Dále pak bude provedena empirická zkouška penetrace jehlou podle ČSN EN 1426 a zkouška bodu měknutí podle ČSN EN 1427.

V teoretické části budou vysvětleny a popsány použité zkoušky.

Praktická část pak bude zaměřena na vyhodnocení výsledků prováděných zkoušek a korelace mezi nimi. Zpracované hodnoty budou prezentovány převážně grafickou formou. Očekává se, že výsledky zkoušky BBR budou nejobsáhlejší, proto jim bude věnována zvláštní pozornost.

Závěrem bakalářské práce bude shrnutí jednotlivých poznatků vyplývajících z vyhodnocení zkoušek.

4 Použité zkušební metody

Tato kapitola je věnována popisu laboratorních zkoušek, které byly prováděny na vybraných vzorcích asfaltových pojiv. Jedná se o penetraci jehlou, modul tuhosti za ohybu a m-hodnota z průhybového trámečkového reometru (BBR), bod lámavosti podle Fraasse a zkoušku bodu měknutí. Podstaty těchto zkoušek zde budou postupně popsány podle příslušných norem a předpisů.

4.1 Stanovení penetrace jehlou

Celkový postup zkoušky je popsán v normě ČSN EN 1426 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou.

Základním principem pro stanovení penetrace je hloubka proniknutí jehly do vzorku asfaltového pojiva za přesně definovaných podmínek, kterými jsou teplota 25 °C, zatěžovací hmotnost 100 g a doba zatěžování 5 s. Vzorek je vytemperován na výše zmíněnou teplotu a je po dobu 5 s zatěžován hmotností 100 g. Hodnota penetrace se poté uvádí v penetračních jednotách (1 p. j. = 0,1 mm). [4]

4.1.1 Přístroje a pomůcky

Základním přístrojem je penetrometr, který se používá pro měření penetrace. Dále pak je nezbytnou součástí penetrační jehla o průměru 1 mm, která má zkosený hrot do tvaru kužele s průměrem 0,16 mm až 0,14 mm. Díky penetrometru je možno pohybovat s penetrační jehlou pouze ve svislém směru. Při zkoušce je také zapotřebí nádoba na analytický vzorek, která může být kovová nebo skleněná s vnitřním průměrem 55 mm až 70 mm, zařízení na měření času a teploměr. [4]

Obrázek 1: Vzorky asfaltových pojiv v penetračních miskách

4.1.2 Příprava na zkoušku

Vzorky asfaltového pojiva se zahřejí na určitou teplotu, která nesmí být vyšší než 100 °C nad očekávaným bodem měknutí a pro polymerem modifikovaná asfaltová pojiva se nastaví teplota od 180 °C do 200 °C nehledě na bod měknutí. Tyto teploty vycházejí z normy ČSN EN 12594 Asfalty a asfaltová pojiva - Příprava analytických vzorků. Po promíchání se pojiva rozlejí do připravených penetračních misek, které jsou zachyceny na obrázku 1. Ty jsou naplněny tak, aby po zchlazení vzorku na zkušební teplotu 25 °C byla výška ztuhlé hladiny minimálně o 10 mm větší, než je předpokládaná hloubka vniknutí jehly. Vzorek se nyní nechá vychladnout na teplotu 30 °C až 15 °C, zhruba 1,5 hod a poté se umístí do vodní lázně s teplotou 25 °C na stejnou dobu, po kterou vzorky chladly na vzduchu. Poté se může přejít k samotné zkoušce. [4] [5]

4.1.3 Postup zkoušky

Nejprve je nutno připravit penetrační jehlu a přístroj pro stanovení penetrace, tzv. penetrometr. Zkontroluje se, zda se držák jehly pohybuje ve svislém směru a zda je zbaven nečistot. Penetrační jehlu taktéž očistíme od nečistot např. toluenem a osušíme čistým hadříkem. Poté můžeme jehlu vložit do držáku. Zkouška se provádí ve vodní lázni, kde je vzorek umístěn. Po dobu měření musí být zachována normou předepsaná teplota

(25 °C ± 0,15 °C). Vzorek se ve vodní lázni umístí do požadované pozice, vynulují se hodnoty na stupnici penetrometru a poté se začne penetrační jehla postupně snižovat k povrchu vzorku do doby, než se ho hrotem dotkne. V tomto okamžiku se nastaví doba zatěžování na stanovených 5 s a přístroj se spustí. Na stupnici se odečte hodnota hloubky vpichu tzv. penetrace, která se přepočte na penetrační jednotky. Na obrázku 2 je možno vidět vpichy provedené do vzorku asfaltového pojiva. Zkouška je ukončena zapsáním naměřeného výsledku, opatrným vyjmutím jehly ze vzorku a jejím následným očištěním.

Tento postup se provede nejméně třikrát pro každý vzorek asfaltového pojiva. Jednotlivé platné vpichy musí být vzdáleny od stran nádoby a také od sebe, minimálně 10 mm. [4]

Obrázek 2: Vpich jehly do vzorku

4.1.4 Vyhodnocení zkoušky

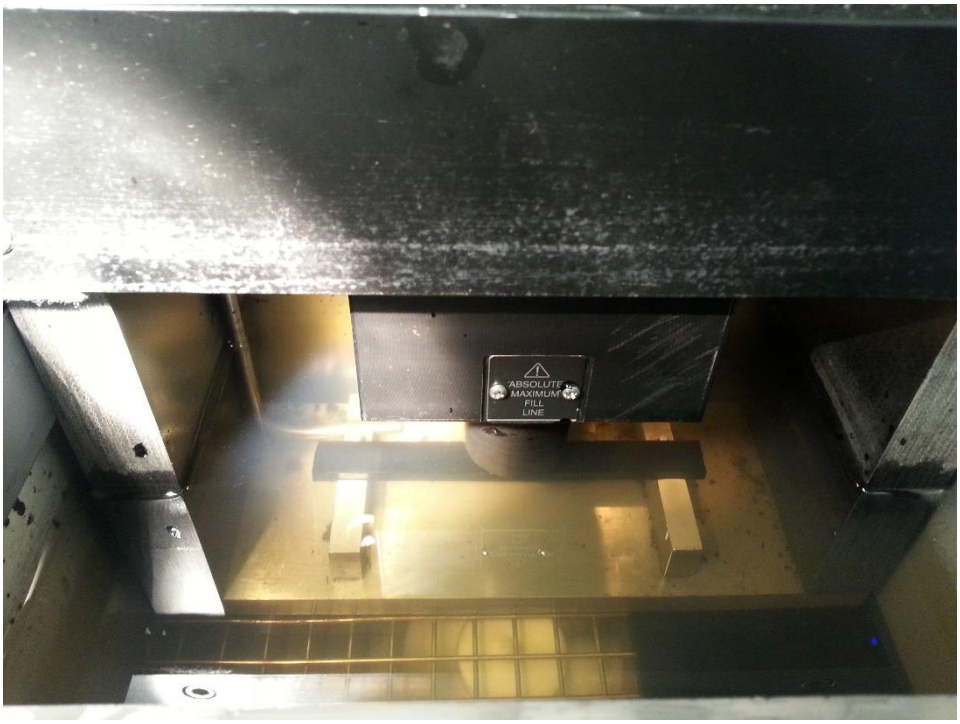
Výsledná hodnota penetrace je aritmetickým průměrem tří platných měření, která se zaokrouhlí na celé číslo. Z normy je znám maximální rozdíl výsledných platných hodnot, které byly naměřeny za stanovených podmínek (teplota 25 °C, zatěžovací hmotnost 100 g a doba zatěžování 5 s). Jednotlivé hodnoty jsou brány v platnost, pokud se od sebe neliší víc, než o hodnoty uvedené v tabulce 2. Pro měření probíhajících za jiných podmínek nebo při měření vzorků modifikovaných asfaltů, je možné tuto tabulku brát jen jako orientační. [4]

Tabulka 2: Maximální rozdíl platných stanovení [4]

Penetrace v 0,1 mm	do 49	50 až 149	150 až 249	250 a výše
Maximální rozdíl mezi nejvyšším a nejnižším stanovením	2	4	6	8

4.2 Zkouška modulu tuhosti za ohybu a m-hodnoty v BBR

Celkový postup zkoušky je popsán v normě ČSN EN 14771 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru (BBR). Tato norma se zaměřuje na stanovení modulu tuhosti za ohybu při pomalém toku asfaltového pojiva v rozmezí od 30 MPa do 1 GPa za použití průhybového trámečkového reometru, který se používá k měření průhybu ve středu trámečku asfaltového pojiva, při tříbodovém ohybu. Ten je zachycen na obrázku 3. Na střed zkoušeného tělíska se po dobu 240 s nechá působit konstantní zatížení a poté se odměří vzniklý průhyb. Modul tuhosti za ohybu vzorku se vypočítá z ohybového napětí a ohybové deformace. [6]



Obrázek 3: Tříbodový ohyb

4.2.1 Přístroje a pomůcky

Na obrázku 4 je zachycen průhybový trámečkový reometr, který je složen ze zatěžovacího rámu s podpěrami zkušebního tělíska, temperační lázně a systému na snímání dat. Zatěžovací rám se skládá z podpěr vzorku, zatěžovacího dříku o poloměru 6,3 mm ± 0,3 mm, zatěžovacího článku o kapacitě 2,5 mN až 2,0 N, prostředku k nulování zatížení, zařízení pro vkládání konstantního zatížení a převodníku k měření průhybu. V neposlední řadě jsou zapotřebí formy pro zkušební tělíska, s vnitřními rozměry 6,4mm ± 0,1 mm šíře, 12,7 mm ± 0,1 mm hloubky a 127 mm ± 0,5 mm délky. Formy musí být zhotoveny z vhodného kovu. Na obrázku 5 je snímek seskládané prázdné formy o normovaných rozměrech. [6]

Obrázek 4: Průhybový trámečkový reometr

4.2.2 Příprava na zkoušku

Jako u předchozí zkoušky, tak i zde je nutno před samotným zahájením měření zahřát dané vzorky na určitou teplotu, která nesmí být vyšší než 100 °C nad očekávaným bodem měknutí a pro polymerem modifikovaná asfaltová pojiva se nastaví teplota od 180 °C do 200 °C nehledě na bod měknutí. Tyto teploty vycházejí z normy ČSN EN 12594 Asfalty a asfaltová pojiva - Příprava analytických vzorků. Poté se zahřáté asfaltové pojivo nalévá do předem připravených kovových forem. Příklad takovéto právě naplněné formy je zachycen na obrázku 6. Tyto formy jsou vytemperovány na laboratorní teplotu. Forma se lehce přeplní a po vychladnutí, které trvá 45 až 60 min, se přebytečná část asfaltového pojiva seřízne nahřátou špachtlí do roviny s okraji formy. Obrázek 7 zachycuje formu s již seříznutým vzorkem asfaltového pojiva. Poté se forma s asfaltovým pojivem ochlazuje po dobu 5 min a následně se z ní trámeček opatrně vyjímá. Musí se dbát na to, aby při odstraňování jednotlivých částí formy, nedošlo k pokroucení vzorku. Dále pak je nutné zajistit, aby teplota

nutná pro odformování, při níž se vzorek ochlazuje, nebyla nižší, než je teplota při samotném zkoušení. [5] [6]

Obrázek 5: Prázdná forma

Obrázek 6: Naplněná forma

Obrázek 7: Vzorek po seříznutí

4.2.3 Postup zkoušky

Před zkouškou každé sady zkušebních tělísek je nutno zkontrolovat nastavení kontaktního zatížení a zkušebního zatížení. Podle očekávané úrovně tuhosti se zvolí první teplota zkoušení. Přístroj se nechá vytemperovat. Teplota lázně musí být na teplotě zkoušení (± 0,2 °C). [6]

Odformované tělísko je nutné ihned přemístit do zkušební lázně a následně temperovat při zkušební teplotě po dobu 60 min ± 2 min před zahájením zkoušky. Po uplynutí této doby se tělísko umístí na podpěry tak, aby se šířka vzorku ve formě po umístění tělíska na podpěry stala tloušťkou zkušebního tělíska. [6]

Nyní už přistupujeme k samotné zkoušce. Na zkušební trámeček se působí kontaktní silou od 980 mN ± 50 mN (100 g) po dobu 240 s a zaznamenává se hodnota průhybu v závislosti na čase. Ze vzniklého průhybu se stanoví 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. [6]

4.2.4 Vyhodnocení zkoušky

Teplota, při které ohybová tuhost S(60s) = 300 MPa, resp. m-hodnota m(60s) = 0,3, je označována jako tzv. kritická teplota. Výpočtem lze této hodnoty dosáhnout interpolací hodnot ohybové tuhosti S(60s), resp. m-hodnoty m(60s), stanovených při alespoň 3 teplotách (např. -10 °C, -16 °C a -22°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. Při teplotě o 10 °C nižší, než je kritická teplota, dochází k riziku vzniku trhlin. [7]

Měření, pro které je průhyb středu zkušebního tělíska větší než 4,0 mm resp. menší než 0,08 mm, je nevěrohodné.

Vytvořením grafu závislosti naměřeného zatížení a naměřeného průhybu se vypočítá modul tuhosti za ohybu zkušebního tělíska v časech zatížení 8,0 s, 15,0 s, 30,0 s, 60,0 s, 120,0 s, 240,0 s, podle následujícího: [5]

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

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

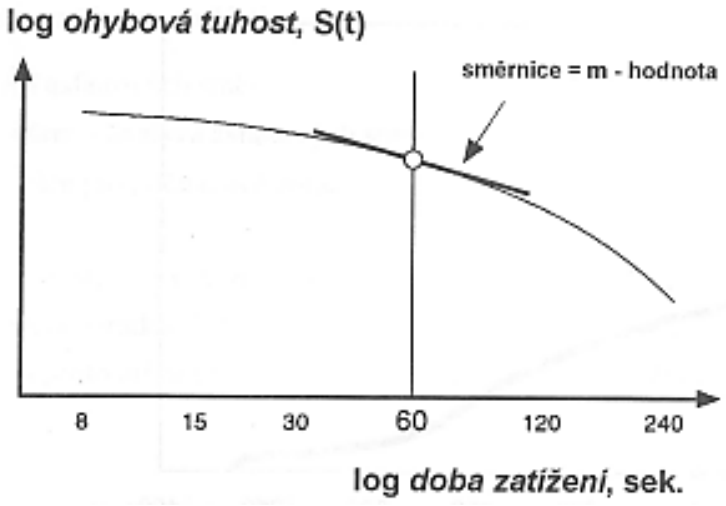
L … vzdálenost mezi podpěrami [mm]

b … šířka zkušebního tělíska [mm]

h … tloušťka zkušebního tělíska [mm]

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

Důležitým parametrem je také sklon křivky dotvarování, tzv. m-hodnota, která je směrnicí tečny ke křivce závislosti logaritmu modulu tuhosti na logaritmu času. Této závislosti je možné si povšimnout na obrázku 8. Hodnota m-hodnoty, stejně jako hodnota ohybové tuhosti, se opět stanovuje v čase 60 s od počátku zatěžování. [7]



Obrázek 8: Závislost logaritmu modulu tuhosti na logaritmu času [7]

M – hodnotu vypočítáme podle následujícího vzorce:

$$m(t) = |B + 2 \times C \times \log(t)|$$

B, C … regresní koeficienty

t … doba zatěžování [s]

4.3 Stanovení bodu lámavosti podle Fraasse

Celkový postup zkoušky je popsán v normě ČSN EN 12593 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu lámavosti podle Fraasse. Tato evropská norma specifikuje stanovení bodu lámavosti podle Fraasse, který měří křehkost asfaltů a asfaltových pojiv. Podstata zkoušky tkví v tom, že na kovový plíšek je nanesena vrstva asfaltového pojiva o rovnoměrné tloušťce. Plíšek se rovnoměrnou rychlostí ochlazuje a opatrně se ohýbá, dokud vrstva asfaltového pojiva nepraskne. Teplota, při které se objeví první prasklina, se zaznamená jako hodnota bodu lámavosti podle Fraasse. [8]

4.3.1 Přístroje a pomůcky

Nezbytnou součástí pro stanovení bodu lámavosti podle Fraasse jsou plíšky, které jsou vyrobeny z pružné oceli o délce 41,00 mm ± 0,05 mm, šířce 20,0 mm ± 0,2 mm a tloušťce 0,15 mm ± 0,02 mm. Plíšky musí být uchovávány na hladké ploše a chráněny proti korozi, aby nedošlo k jejich porušení nebo ohnutí. Takto znehodnocené plíšky by musely být vyřazeny. Dále pak potřebujeme zařízení pro přípravu plíšků používané k rozehřátí vzorku, který se na plíšku nachází. Jedná se konkrétně o magnetický blok s rovným a hladkým povrchem a kovový podstavec se dvěma oddělenými částmi: jednou s vyhříváním a regulací teploty a druhou s chlazenou vodní cirkulací. Mezi nezbytné pomůcky musíme také zahrnout manipulační kleště a váhu. Na obrázku 9 je zachycen přístroj pro lámavost podle Fraasse, který se skládá z ohýbacího zařízení, chladícího zařízení a teploměru. K rovnoměrnému snižování teploty se při této zkoušce využívá suchý led. [8]

Obrázek 9: Přístroj pro lámavost podle Fraasse

4.3.2 Příprava na zkoušku

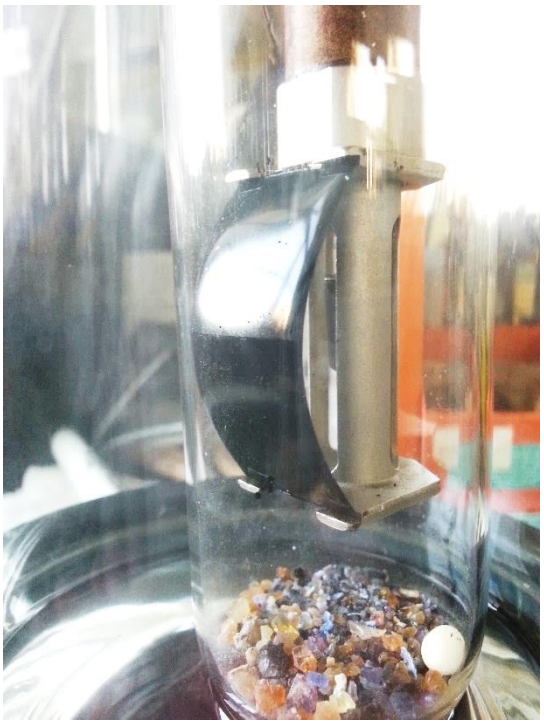
Ocelové plíšky se očistí vhodným odmašťovacím rozpouštědlem, vysuší se a poté se zváží s přesností na 0,01 g. Na zkušební plíšek se naváží (410 ± 10) mg asfaltového pojiva a ten se umístí na magnetický blok. Příklad takovéto navážky je zachycen na obrázku 10. Nyní se magnetický blok položí na vyhřívanou část kovového podstavce, která je udržována na teplotě nepřekračující bod měknutí asfaltového pojiva o více než 80 °C. U polymerem modifikovaných asfaltů nesmí teplota překročit 200 °C bez ohledu na bod měknutí. Jakmile je pojivo dostatečně tekuté, opatrným nakláněním vyhřívacího podstavce se rovnoměrně rozlije po celém povrchu plíšku. Za pomoci snímatelného krytu se přesune magnetický blok s destičkou na chlazenou část stojanu, kde se plíšek přikrytý krytem nechá ležet při laboratorní teplotě. [8]

Obrázek 10: Plíšek s navážkou

4.3.3 Postup zkoušky

Zkouška se začne provádět 30 až 240 min po nanesení vzorku na plíšek. Plíšek se vloží pomocí manipulačních kleští mezi patky ohýbacího zařízení. Nyní se ohýbací zařízení vloží do vnitřní zkumavky chladícího zařízení spolu s teploměrem, který je umístěn za zkušebním plíškem ve středu mezi patkami. Důležité je, aby v prostoru mezi vnější a vnitřní zkumavkou byla kapalina (alkohol) nejméně do výšky 100 mm, jejíž teplota je regulována přidáváním malých kousků tuhého oxidu uhličitého. Počáteční teplota před zahájením ochlazování musí být minimálně 15 °C nad očekávaným bodem lámavosti. V prvních 3 minutách probíhá ochlazování konstantní rychlostí 1 °C/minutu. Po počátečním poklesu o 3 °C se v ochlazování pokračuje rychlostí 1 °C každých 60 s ± 5 s. Žádná odchylka nesmí překročit maximálně povolených ± 5 s, ani se nesmí zprůměrovat za celou zkoušku. Ohýbání plíšku se zahajuje při teplotě 10 °C ± 2 °C nad očekávaným bodem lámavosti. Zkušební plíšek je ohýbán otáčením kličky o rovnoměrné rychlosti 1 ot/s až na doraz. Při zkoušce je nutno pečlivě prohlížet vrstvičku pojiva, zda se neobjeví první prasklina,

kterou je možno vidět na obrázku 11. V okamžiku porušení vrstvičky se zaznamená teplota s přesností na 1 °C. Pokud k prasknutí nedojde, otáčí se bez přestávky kličkou zpět stejnou rychlostí. [8]



Obrázek 11: První prasklina

4.3.4 Vyhodnocení zkoušky

Dvě měření jsou vyhovující, jestliže je jejich rozdíl menší nebo roven 3 °C. Pokud tomu tak není, provedou se další dvě měření, jejichž rozdíl musí být maximálně 3 °C. Výsledná hodnota teploty bodu lámavosti podle Fraasse se vyjádří jako aritmetický průměr dvou platných měření ve °C. [8]

4.4 Stanovení bodu měknutí

Celkový postup zkoušky je popsán v normě ČSN EN 1427 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek kulička. Výsledkem zkoušky je teplota, při níž vrstva asfaltového pojiva o tl. 6,4 mm, která vyplňuje kovový kroužek při ohřívání v tekutinové lázni, změkne natolik,

že kulička položená na této vrstvě ji protáhne (proboří se) na délku 25 mm. Této zkoušce se také říká „zkouška kroužek a kulička“ (Ring&Ball). [9]

4.4.1 Přístroje a pomůcky

Nejdůležitějším přístrojem při této zkoušce je automatické zařízení, které se skládá z odlévací destičky, dvou mosazných kroužků a dvou kuliček z korozivzdorné oceli, které se umisťují do středících prstenců. Dále pak je nezbytná skleněná kádinka s tekutinou, ve které je umístěno míchadlo. V tabulce 3 jsou uvedeny rozhodující teploty bodu měknutí, kterými je třeba se řídit při volbě kapalinové lázně. Teplota je kontrolována zařízením na měření teploty. [10]

Tabulka 3: Kapalinová lázeň pro stanovení bodu měknutí [10]

Bod měknutí	Kapalinová lázeň	Počáteční teplota lázně
≤ 80 °C	vodní lázeň	(5 ± 1) ˚C
> 80 °C	glycerin	(30 ± 1) ˚C

4.4.2 Příprava na zkoušku

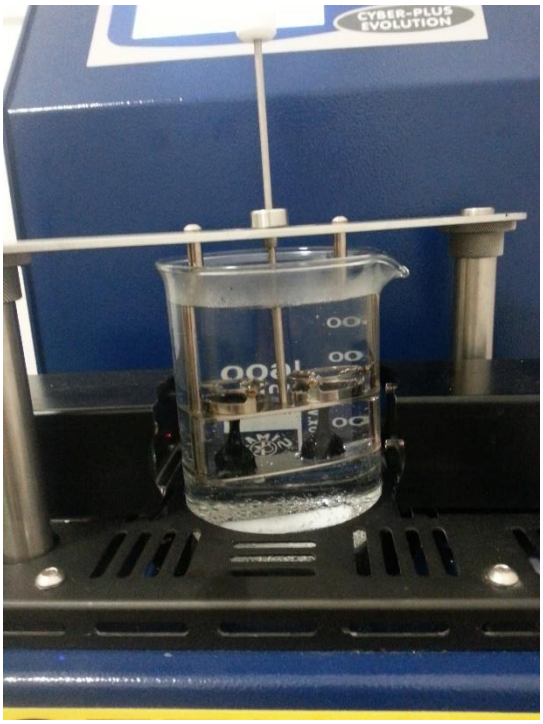
Příprava začíná odebráním zkušebního vzorku v souladu s EN 58 při dodržení všech nezbytných opatření. Dva mosazné kroužky se zahřejí na teplotu předpokládaného bodu měknutí (ne vyšší než 100 °C) a umístí se na odlévací destičku pokrytu separačním prostředkem. Do každého z kroužků se nalije mírný přebytek zahřátého asfaltového pojiva a vzorky se poté chladí při laboratorní teplotě po dobu 30 min. Když analytické vzorky zchladnou, odřízne se přebytečné asfaltové pojivo a zarovná se s okrajem kroužku pomocí zahřáté špachtle. [10]

4.4.3 Postup zkoušky

Vzorky se umístí do otvorů nerezového stojanu a opatří se středícími prstenci. Poté se celá soustava vloží do kádinky se zvolenou tekutinou a společně s ocelovými kuličkami se nechá zchladit na teplotu (5 ± 1) °C po dobu 15 min. Po této době se kuličky vloží do středících prstenců, kádinka se umístí na topnou desku a spustí se měření.

Teplota se, díky magnetickému míchadlu, rovnoměrně zvyšuje rychlostí 5 °C/min v celém objemu kádinky. Se vzrůstající teplotou postupně roste také deformace vrstvy asfaltového pojiva, která se pod tíhou ocelové kuličky začíná protrhávat.

Zkouška je ukončena v momentě, kdy kulička obalena pojivem propadne vrstvou na délku (25 ± 0,4) mm, což zaznamená světelný paprsek. Takovýto propad je zachycen na obrázku 12. Následně jsou hodnoty obou propadů automaticky zaznamenány. [10]



Obrázek 12: Propad kuliček

4.4.4 Vyhodnocení zkoušky

Ze dvou výsledů se vytvoří aritmetický průměr. Pokud je rozdíl mezi dvěma teplotami větší než 1 °C pro bod měknutí pod 80 °C nebo větší než 2 °C pro bod měknutí nad 80 °C, musí se zkouška opakovat. [10]

5 Použité materiály

V této bakalářské práci byla využita následující polymerem modifikovaná pojiva, jejichž problematikou se zabývá evropská norma ČSN EN 14023 - Asfalty a asfaltová pojiva - Systém specifikace pro polymerem modifikované asfalty: [11]

- Shell Cariphalte 45/80-50,
- Shell Cariphalte 45/80-55,
- OMV Starfalt PmB 45/80-65
- OMV Starfalt PmB 45/80-75.

Pro srovnání naměřených výsledků, byly dané zkoušky prováděny i na vzorku silničního asfaltu OMV Bitumen 50/70. Specifikaci, jak už vlastností nebo závazných zkoušek prováděných na pojivech, uvádí evropská norma ČSN EN 12591 - Asfalty a asfaltová pojiva - Specifikace pro silniční asfalty. [12]

6 Výsledky zkoušek

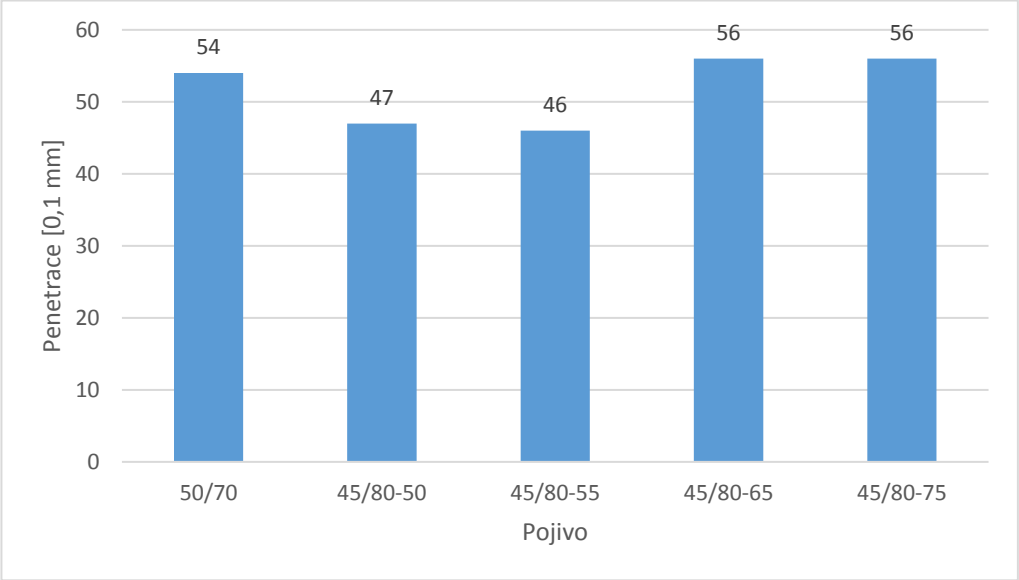
V této části jsou uvedeny výsledky všech prováděných zkoušek a dále pak jsou jednotlivé hodnoty vyneseny do grafů.

6.1 Stanovení penetrace jehlou

Metodika dané zkoušky je podrobně vysvětlena v kapitole 4.1. U každého vzorku byla provedena tři měření, která byla za předepsaných podmínek zprůměrována a následně vypsána do tabulky 4 a vynesena do grafu 1. Všechny naměřené hodnoty vyhovují mezím penetrace dle normy ČSN EN 12591 Asfalty a asfaltová pojiva – Specifikace pro silniční asfalty a ČSN EN 14023 Asfalty a asfaltová pojiva – Systém specifikace pro polymerem modifikované asfalty. Z výsledků je možné vysledovat, že rozsah hodnot penetrace jednotlivých pojiv byl v úzkém rozmezí (46 [0,1 mm] až 56 [0,1 mm]). Polymerem modifikované asfalty 45/80-50 a 45/80-55 dosahovaly hodnoty penetrace blížící se dolní hranici požadavku. Tato dvě pojiva měla zároveň nejnižší hodnotu penetrace. Nejvyšší hodnoty penetrace naopak dosahovaly polymerem modifikované asfalty 45/80-65 a 45/80-75.

Tabulka 4: Výsledky penetrace jehlou

Pojivo	Penetrace[0,1 mm]
50/70	54
45/80-50	47
45/80-55	46
45/80-65	56
45/80-75	56



Graf 1: Penetrace jehlou

6.2 Zkouška modulu tuhosti za ohybu a m-hodnoty v BBR

Metodika dané zkoušky je podrobně vysvětlena v kapitole 4.2. Pro stanovení kritických teplot z hlediska m-hodnoty a kritických teplot z hlediska modulu tuhosti za ohybu S byla většina těchto pojiv zkoušena při 3 teplotách (-10 °C, -16 °C a -22 °C), s výjimkou pojiva s největším obsahem modifikační přísady 45/80-75, jenž bylo zkoušeno při teplotách (-16 °C, -22 °C a -28 °C).

V tabulkách 5 - 14 jsou vypsány naměřené hodnoty zkoušky BBR pro jednotlivá asfaltová pojiva. Rozhodujícím časem, pro výpočet teplot modulu tuhosti za ohybu S a m-hodnoty, je 60 s.

6.2.1 Pojivo 50/70

V tabulce 5 jsou vypsány naměřené hodnoty pro S(60s) a m(60s), které jsou následně vyneseny do grafů. Graf 2 znázorňuje závislost modulu tuhosti za ohybu na teplotě a z grafu 3 je možné vyčíst závislost m-hodnoty na teplotě. Z obou grafů je patrné, že teploty zatěžování byly voleny tak, aby se S(60s) blížil hodnotě 300 MPa zdola a m(60s) se shora blížil hodnotě 0,3. V tabulce 6 jsou vypsány výsledné teploty pro S(60s) a m(60s).

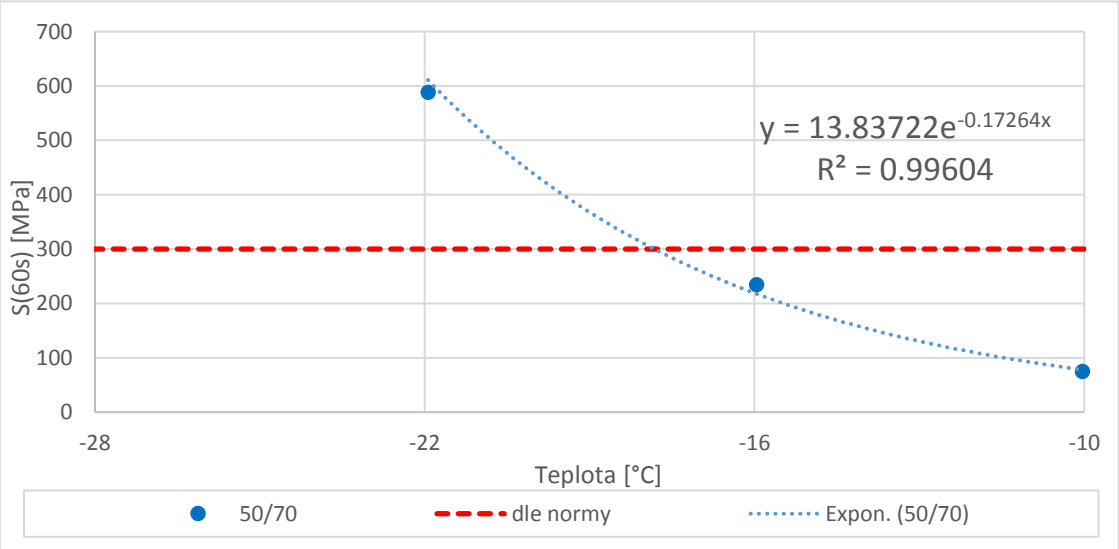
Graf 4 pak graficky vypovídá o závislosti nárůstu deformace na čase při teplotách (-10 °C, -16 °C a -22 °C). Z grafu je patrné, že se snižující se teplotou klesá výchylka (průhyb) zkušebního trámečku, což se potvrdilo i u ostatních pojiv.

Tabulka 5: Vyhodnocení zkoušky BBR pro pojivo 50/70

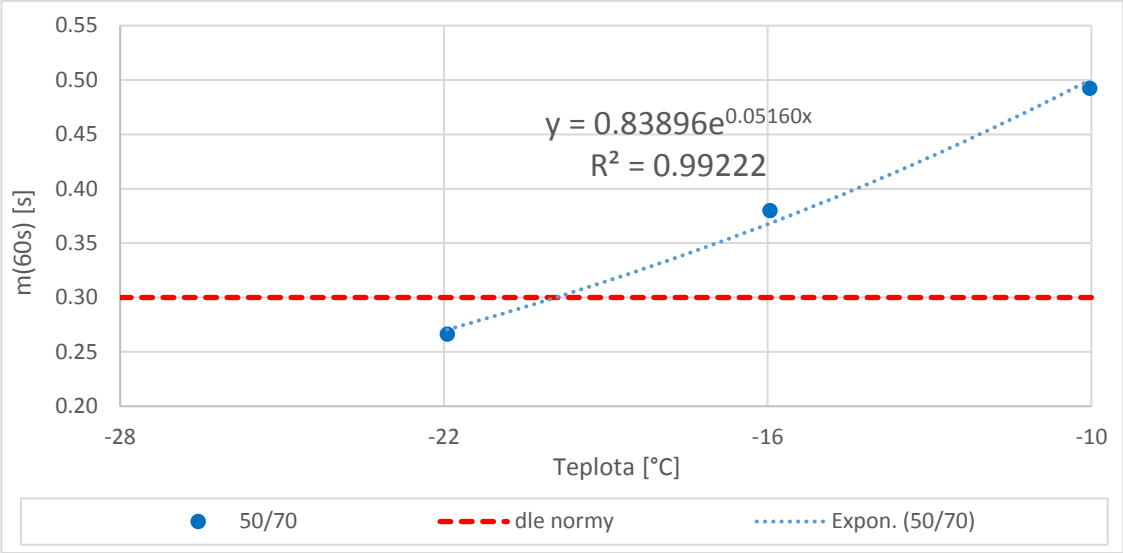
Č. vz.	Teplota [°C]	S(t) [MPa] v čase t [s]			m(t) v čase t [s]			S_{60s}	m_{60s}
		8	**60**	240	8	**60**	240	[MPa]	[-]
1	-10	188,8	**77,3**	36,2	0,383	**0,504**	0,587	75,3	0,492
2	-10	171,7	**73,3**	35,5	0,364	**0,480**	0,560		
3	-16	472,5	**243,0**	136,5	0,281	**0,381**	0,449	234,5	0,380
4	-16	435,8	**226,0**	126,8	0,272	**0,379**	0,453		
5	-22	966,0	**612,1**	405,4	0,190	**0,266**	0,318	588,6	0,266
6	-22	902,7	**565,2**	379,0	0,198	**0,267**	0,314		

Tabulka 6: Výsledné teploty S(60s) a m(60s) pro pojivo 50/70

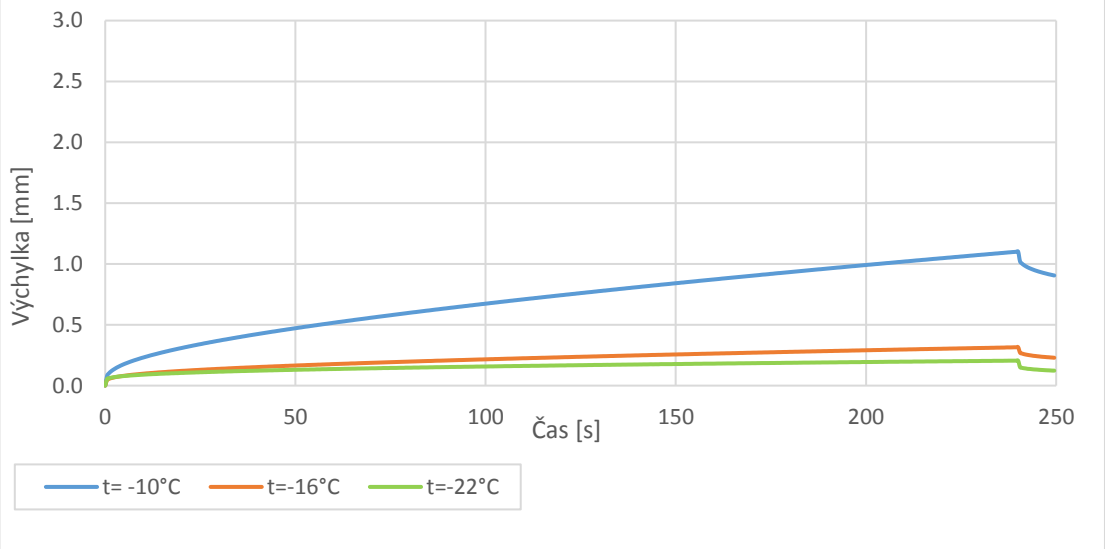
Zjištění teploty pro S_{60s} a m_{60s} (výpočet z grafu)			
	y		T [°C]
S_{60s}	13,83722	-0,17264	-17,8
m_{60s}	0,83896	0,05160	-19,9



Graf 2: Závislost modulu tuhosti na teplotě pro 50/70



Graf 3: Závislost m-hodnoty na teplotě pro 50/70



Graf 4: Závislost nárůstu deformace na čase pro 50/70

6.2.2 Pojivo 45/80-50

V tabulce 7 jsou vypsány naměřené hodnoty pro S(60s) a m(60s), které jsou následně vyneseny do grafů. Graf 5 znázorňuje závislost modulu tuhosti za ohybu na teplotě a z grafu 6 je možné vyčíst závislost m-hodnoty na teplotě. Z obou grafů je patrné, že teploty zatěžování byly voleny tak, aby se S(60s) blížil hodnotě 300 MPa zdola a m(60s) se shora blížil hodnotě 0,3. V tabulce 8 jsou vypsány výsledné teploty pro S(60s) a m(60s).

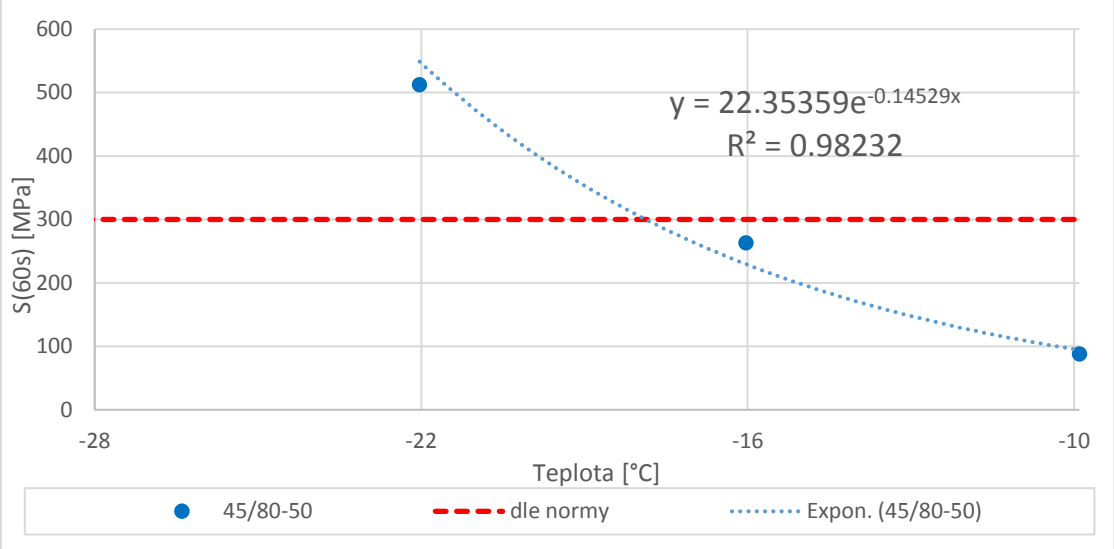
Graf 7 pak graficky vypovídá o závislosti nárůstu deformace na čase při teplotách (-10 °C, -16 °C a -22 °C).

Tabulka 7: Vyhodnocení zkoušky BBR pro pojivo 45/80-50

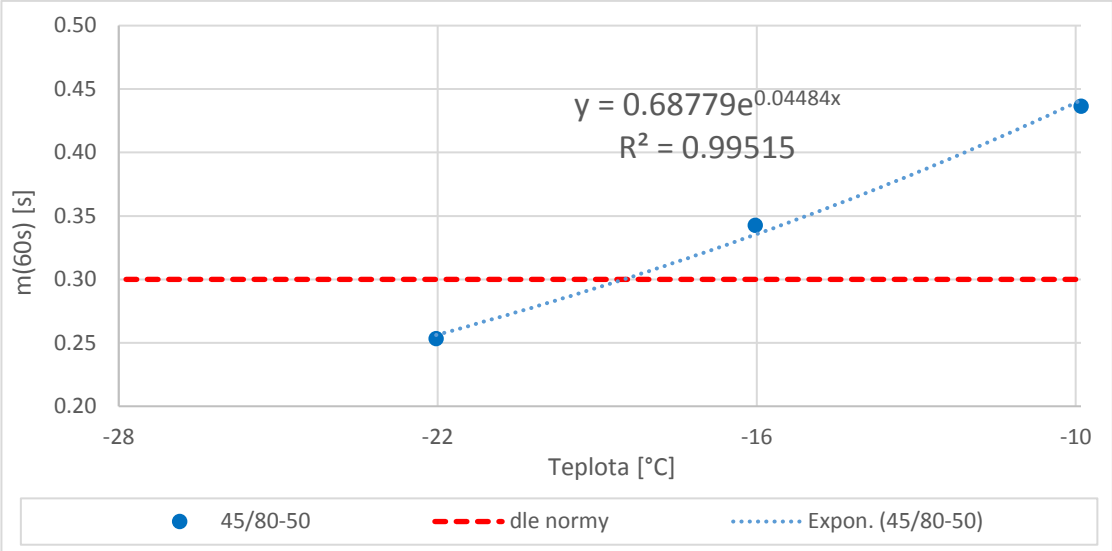
Č. vz.	Teplota [°C]	S(t) [MPa] v čase t [s]			m(t) v čase t [s]			S_{60s}	m_{60s}
		8	**60**	240	8	**60**	240	[MPa]	[-]
1	-10	190,9	**86,9**	45,5	0,345	**0,436**	0,498	88,0	0,436
2	-10	197,3	**89,2**	46,7	0,351	**0,437**	0,497		
3	-16	453,6	**249,6**	148,0	0,248	**0,345**	0,412	263,1	0,343
4	-16	505,9	**276,6**	165,7	0,257	**0,340**	0,398		
5	-22	752,6	**486,9**	330,7	0,182	**0,252**	0,300	512,3	0,253
6	-22	832,7	**537,6**	363,2	0,179	**0,255**	0,307		

Tabulka 8: Výsledné teploty S(60s) a m(60s) pro pojivo 45/80-50

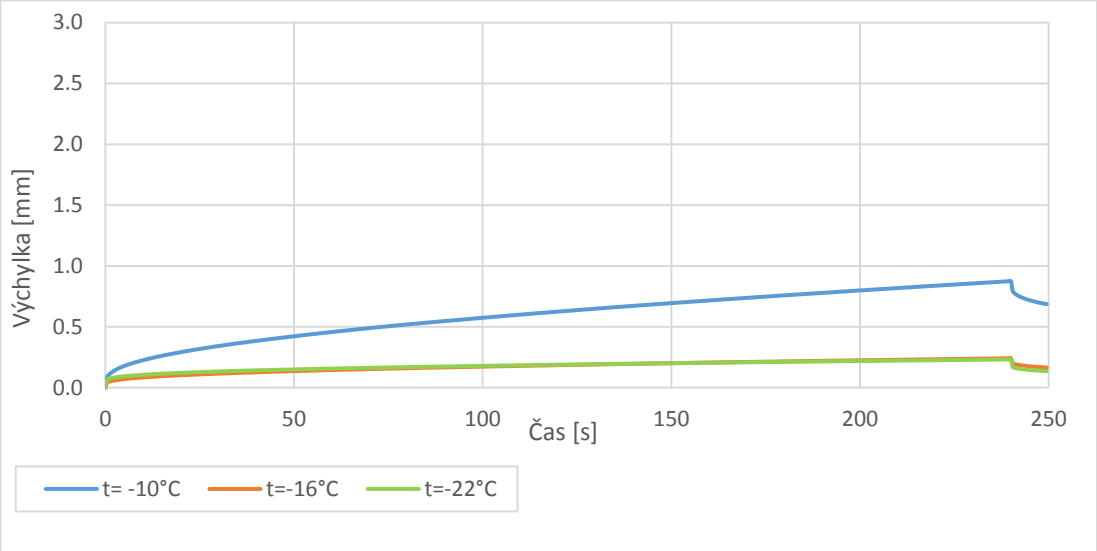
Zjištění teploty pro S_{60s} a m_{60s} (výpočet z grafu)			
	y		T [°C]
S_{60s}	22,35359	-0,14529	-17,9
m_{60s}	0,68779	0,04484	-18,5



Graf 5: Závislost modulu tuhosti na teplotě pro 45/80-50



Graf 6: Závislost m-hodnoty na teplotě pro 45/80-50



Graf 7: Závislost nárůstu deformace na čase pro 45/80-50

6.2.3 Pojivo 45/80-55

V tabulce 9 jsou vypsány naměřené hodnoty pro S(60s) a m(60s), které jsou následně vyneseny do grafů. Graf 8 znázorňuje závislost modulu tuhosti za ohybu na teplotě a z grafu 9 je možné vyčíst závislost m-hodnoty na teplotě. Z obou grafů je patrné, že teploty zatěžování byly voleny tak, aby se S(60s) blížil hodnotě 300 MPa zdola a m(60s) se shora blížil hodnotě 0,3. V tabulce 10 jsou vypsány výsledné teploty pro S(60s) a m(60s).

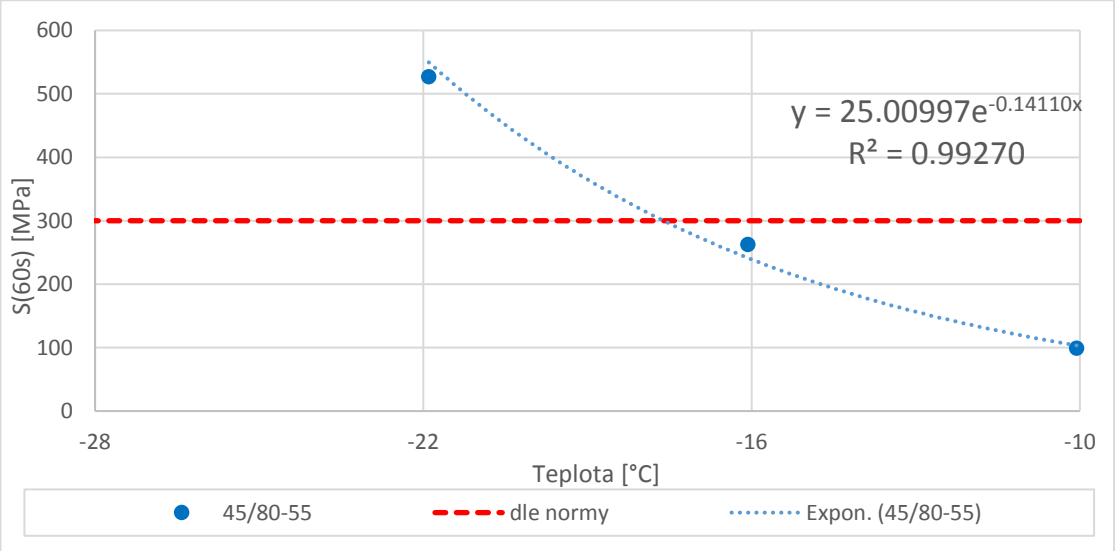
Graf 10 pak graficky vypovídá o závislosti nárůstu deformace na čase při teplotách (-10 °C, -16 °C a -22 °C).

Tabulka 9: Vyhodnocení zkoušky BBR pro pojivo 45/80-55

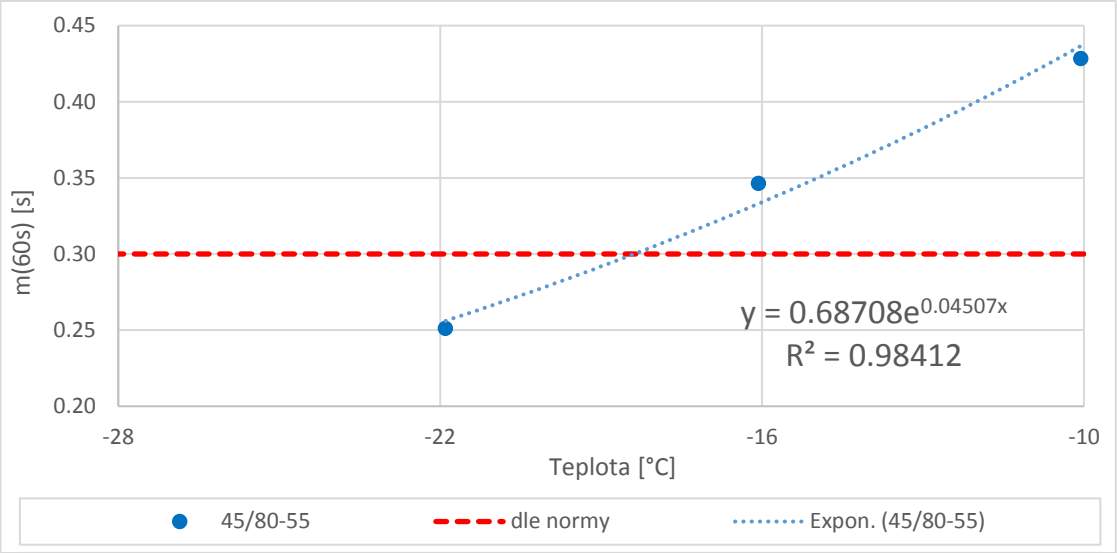
Č. vz.	Teplota [°C]	S(t) [MPa] v čase t [s]			m(t) v čase t [s]			S_{60s}	m_{60s}
		8	**60**	240	8	**60**	240	[MPa]	[-]
1	-10	213,2	**98,8**	51,8	0,332	**0,430**	0,498	99,3	0,428
2	-10	215,0	**99,8**	52,8	0,336	**0,426**	0,489		
3	-16	481,1	**264,3**	155,2	0,246	**0,348**	0,418	262,3	0,346
4	-16	477,7	**260,3**	154,2	0,257	**0,345**	0,405		
5	-22	836,9	**539,2**	368,5	0,185	**0,253**	0,299	527,1	0,251
6	-22	796,2	**515,0**	354,3	0,182	**0,249**	0,296		

Tabulka 10: Výsledné teploty S(60s) a m(60s) pro pojivo 45/80-55

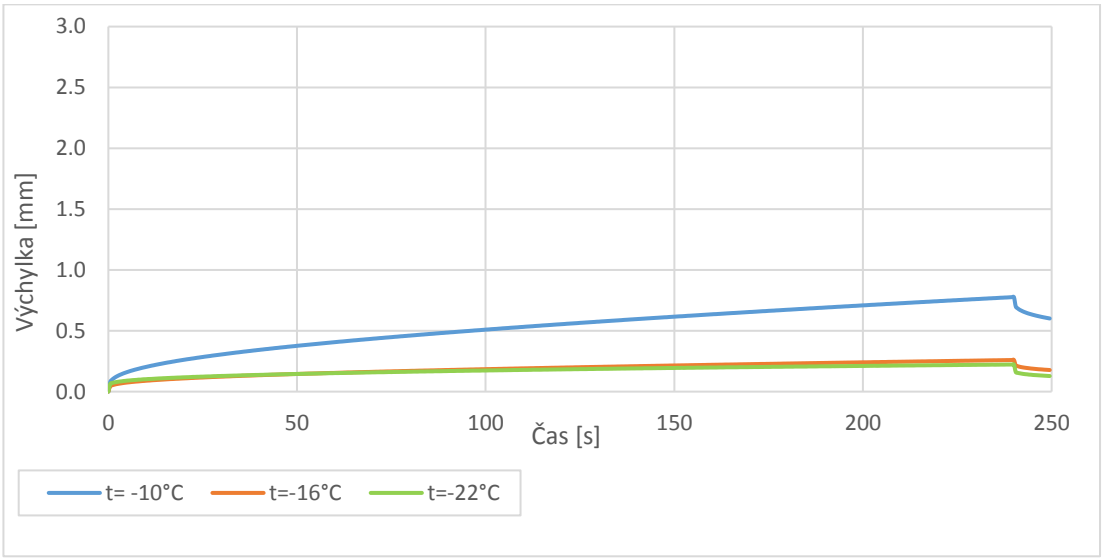
Zjištění teploty pro S_{60s} a m_{60s} (výpočet z grafu)			
	y		T [°C]
S_{60s}	25,00997	-0,14110	-17,6
m_{60s}	0,68708	0,04507	-18,4



Graf 8: Závislost modulu tuhosti na teplotě pro 45/80-55



Graf 9: Závislost m-hodnoty na teplotě pro 45/80-55



Graf 10: Závislost nárůstu deformace na čase pro 45/80-55

6.2.4 Pojivo 45/80-65

V tabulce 11 jsou vypsány naměřené hodnoty pro S(60s) a m(60s), které jsou následně vyneseny do grafů. Graf 11 znázorňuje závislost modulu tuhosti za ohybu na teplotě a z grafu 12 je možné vyčíst závislost m-hodnoty na teplotě. Z obou grafů je patrné, že teploty zatěžování byly voleny tak, aby se S(60s) blížil hodnotě 300 MPa zdola a m(60s) se shora blížil hodnotě 0,3. V tabulce 12 jsou vypsány výsledné teploty S(60s) a m(60s).

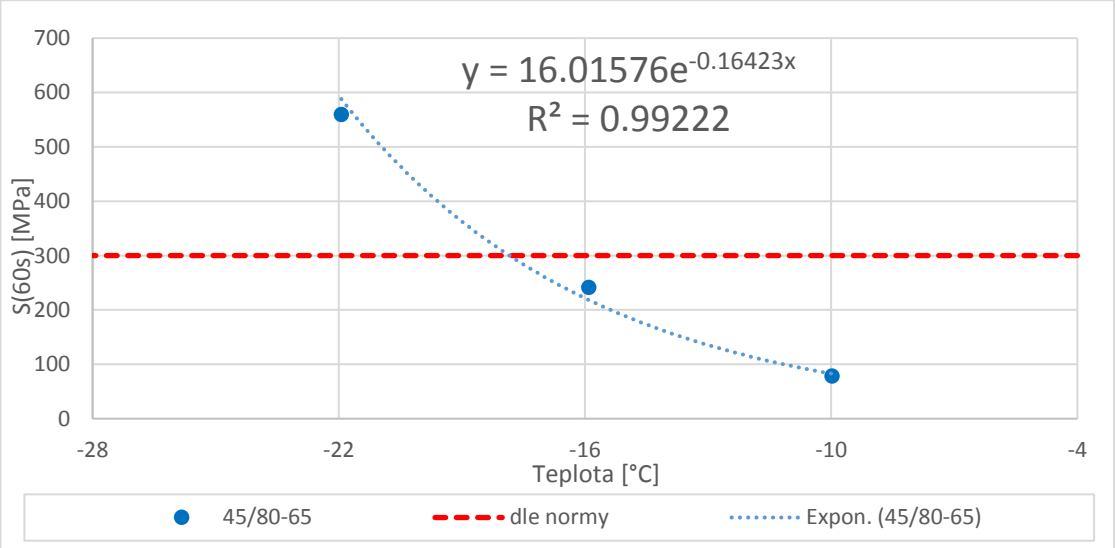
Graf 13 pak graficky vypovídá o závislosti nárůstu deformace na čase při teplotách (-10 °C, -16 °C a -22 °C).

Tabulka 11: Vyhodnocení zkoušky BBR pro pojivo 45/80-65

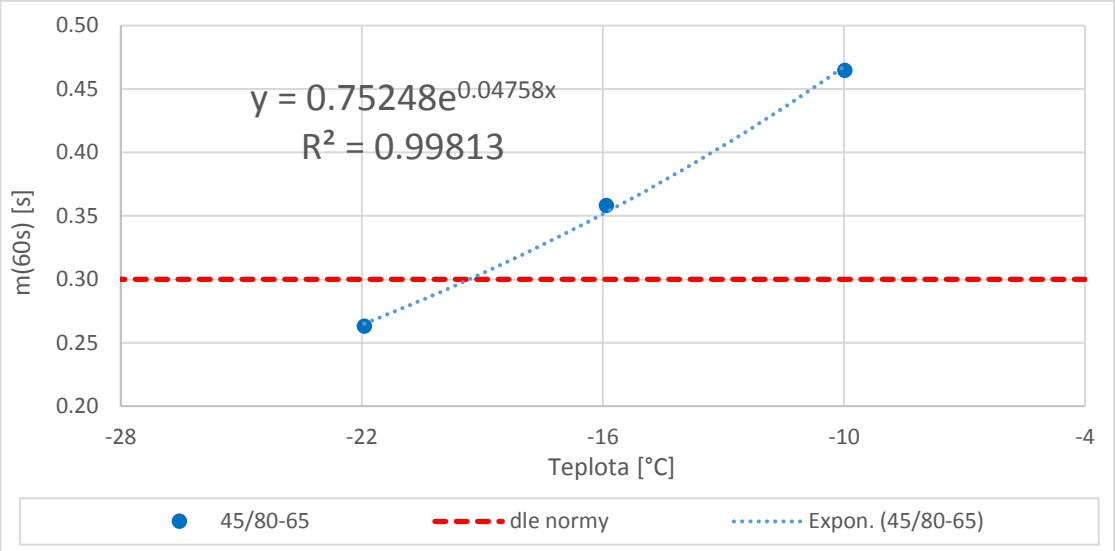
Č. vz.	Teplota [°C]	S(t) [MPa] v čase t [s]			m(t) v čase t [s]			S_{60s}	m_{60s}
		8	**60**	240	8	**60**	240	[MPa]	[-]
1	-10	178,4	**76,8**	38,5	0,370	**0,466**	0,532	78,4	0,465
2	-10	185,4	**80,0**	40,2	0,371	**0,464**	0,528		
3	-16	458,2	**241,5**	141,6	0,277	**0,358**	0,414	241,5	0,358
4	-16	432,1	**231,5**	6,0	1,134	**1,395**	3,135		
5	-22	857,3	**544,5**	362,6	0,185	**0,267**	0,323	559,5	0,263
6	-22	893,6	**574,4**	385,2	0,178	**0,260**	0,316		

Tabulka 12: Výsledné teploty S(60s) a m(60s) pro pojivo 45/80-65

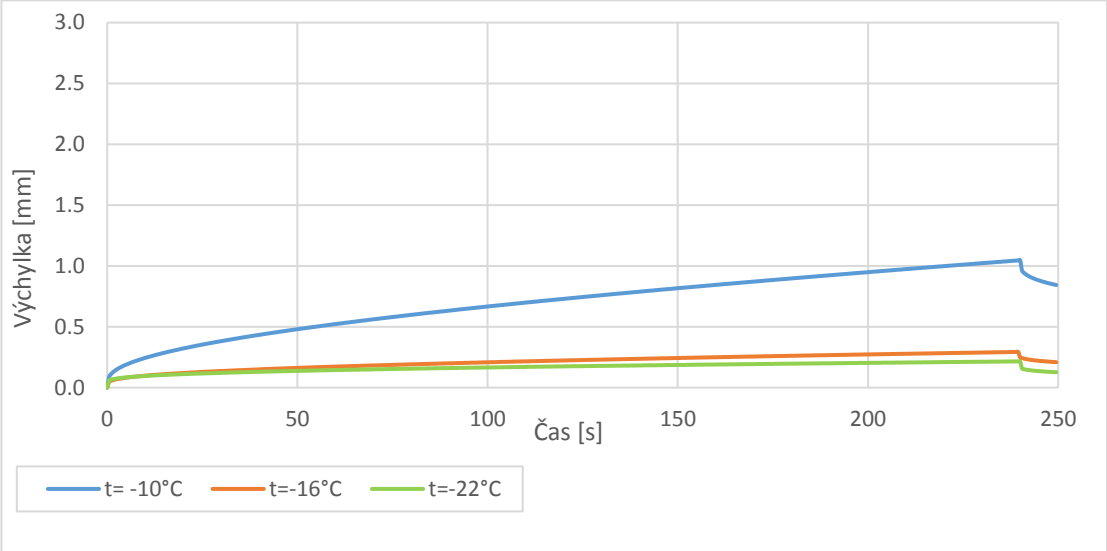
Zjištění teploty pro S_{60s} a m_{60s} (výpočet z grafu)			
	y		T [°C]
S_{60s}	16,01576	-0,16423	-17,8
m_{60s}	0,75248	0,04758	-19,3



Graf 11: Závislost modulu tuhosti na teplotě pro 45/80-65



Graf 12: Závislost m-hodnoty na teplotě pro 45/80-65



Graf 13: Závislost nárůstu deformace na čase pro 45/80-65

6.2.5 Pojivo 45/80-75

V tabulce 13 jsou vypsány naměřené hodnoty pro S(60s) a m(60s), které jsou následně vyneseny do grafů. Graf 14 znázorňuje závislost modulu tuhosti za ohybu na teplotě a z grafu 15 je možné vyčíst závislost m-hodnoty na teplotě. Z obou grafů je patrné, že teploty zatěžování byly voleny tak, aby se S(60s) blížil hodnotě 300 MPa zdola a m(60s) se shora blížil hodnotě 0,3. V tabulce 14 jsou vypsány výsledné teploty S(60s) a m(60s).

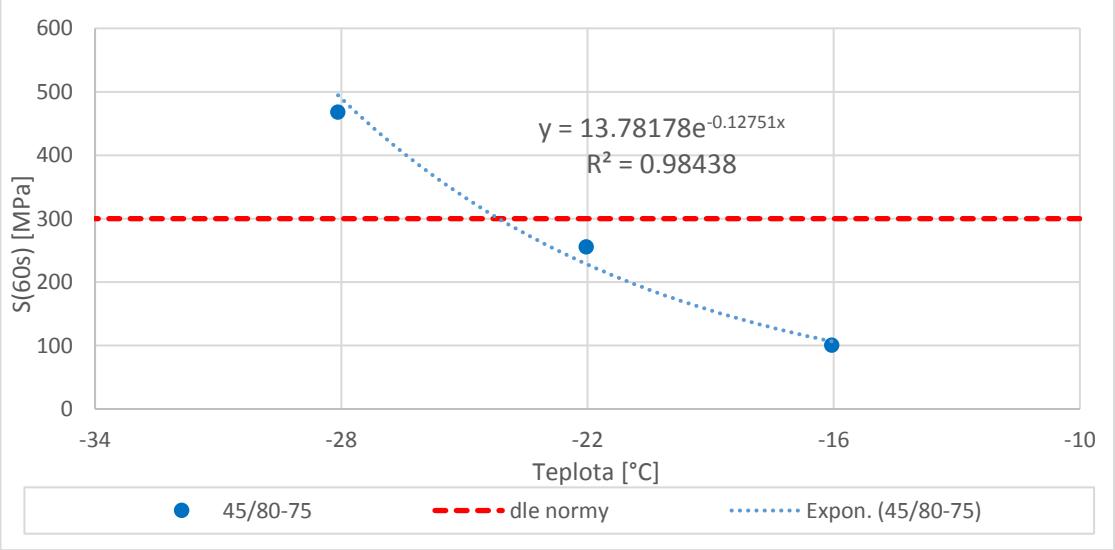
Graf 16 pak graficky vypovídá o závislosti nárůstu deformace na čase při teplotách (-16 °C, -22 °C a -28 °C).

Tabulka 13: Vyhodnocení zkoušky BBR pro pojivo 45/80-75

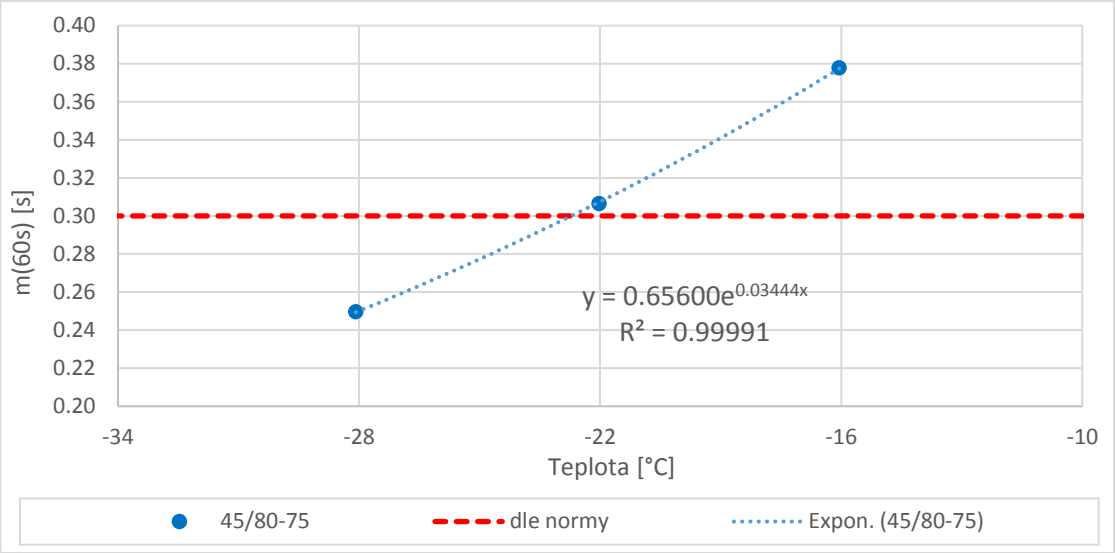
Č. vz.	Teplota [°C]	S(t) [MPa] v čase t [s]			m(t) v čase t [s]			S_{60s}	m_{60s}
		8	60	240	8	60	240	[MPa]	[-]
1	-16	201,0	101,5	57,8	0,300	0,378	0,432	100,9	0,378
2	-16	198,2	100,2	57,0	0,298	0,378	0,432		
3	-22	431,9	250,5	157,2	0,232	0,309	0,362	255,7	0,306
4	-22	445,7	260,8	164,8	0,228	0,304	0,357		
5	-28	718,7	465,6	312,3	0,172	0,257	0,316	467,9	0,250
6	-28	712,3	470,2	324,3	0,170	0,242	0,292		

Tabulka 14: Výsledné teploty S(60s) a m(60s) pro pojivo 45/80-75

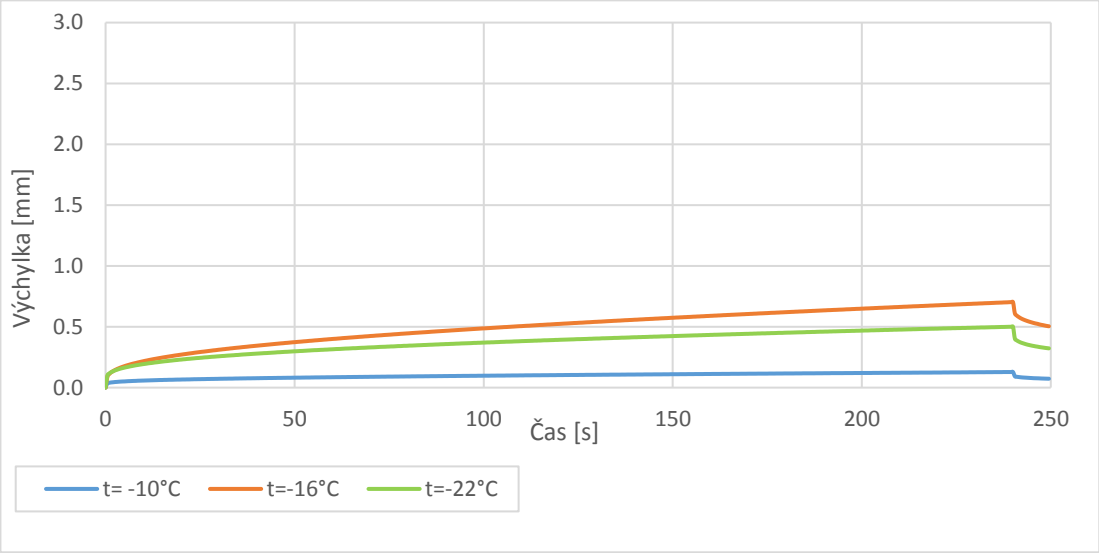
Zjištění teploty pro S_{60s} a m_{60s} (výpočet z grafu)			
	y		T [°C]
S_{60s}	13,78178	-0,12751	-24,2
m_{60s}	0,65600	0,03444	-22,7



Graf 14: Závislost modulu tuhosti na teplotě pro 45/80-75



Graf 15: Závislost m-hodnoty na teplotě pro45/80-75



Graf 16: Závislost nárůstu deformace na čase pro 45/80-75

U každého vzorku byla pro každou teplotu provedena dvě měření a výsledné hodnoty modulu tuhosti za ohybu a m-hodnoty byly vypsány do tabulky 15 a jednotlivě vyneseny do grafu 17a18. Vzhledem k tomu, že všechna pojiva měla vyšší kritickou hodnotu získanou z modulu tuhosti za ohybu, jsou v grafu 17 zároveň vyneseny i výsledné kritické teploty jednotlivých pojiv.

Ze závislosti nárůstu deformace (průhybu) na čase je patrné, že při zatěžování vzorku za vyšší teploty dochází k větší deformaci. Z toho vyplývá, že čím nižší je teplota zatěžování, tím menší je průhyb zkoušeného trámečku. To je způsobeno nárůstem tuhosti s klesající teplotou.

Ze sloupcových grafů kritických teplot pro S(60s) a m(60s) se dá usuzovat, že nízkoteplotní vlastnosti mají rostoucí trend s obsahem modifikátorů v asfaltovém pojivu. Rozdíly kritických teplot mezi jednotlivými pojivy jsou však velmi nepatrné (s výjimkou 45/80-75). Z tohoto důvodu je těžké popsat rozdíly mezi jednotlivými pojivy.

Nejlepších výsledků (tj. nejnižších kritických teplot) dosahuje pojivo 45/80-75, které svou kritickou teplotou značně předčilo ostatní vzorky. Tento výsledek se dal předpokládat z důvodu největšího obsahu modifikátorů právě v tomto pojivu. Naopak překvapením může být, že pojivo 45/80-55 dosáhlo horšího výsledku než pojivo 45/80-50, které má pravděpodobně mírně nižší obsah modifikátorů než dříve zmiňované. Rovněž překvapivé je to, že nemodifikovaný silniční asfalt 50/70 dosáhl srovnatelných nízkoteplotních vlastností jako ostatní polymerem modifikované asfalty (s výjimkou pojiva 45/80-75).

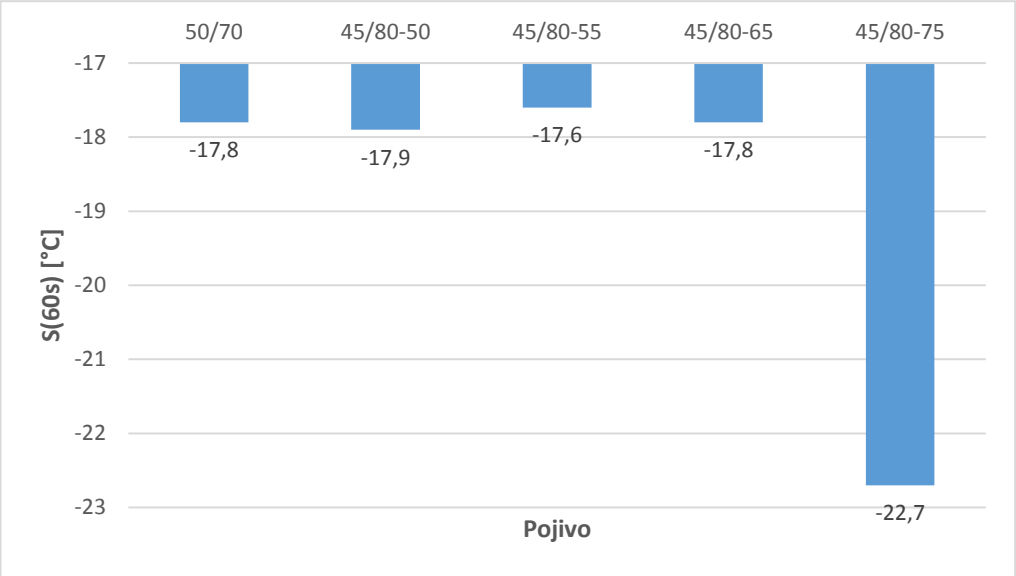
Z výše uvedených zjištění se nabízí otázka, zda je tato zkouška schopná výstižně popsat nízkoteplotní chování asfaltových pojiv, zvláště pak modifikovaných asfaltů i vzhledem k tomu, že tato zkouška byla v USA nejprve zamýšlena pouze pro nemodifikované silniční asfalty a teprve později se začala využívat i pro polymerem modifikovaná asfaltová pojiva. Pro zhodnocení vhodnosti zkušebního postupu by ovšem bylo nutné provést srovnání na značně větším souboru pojiv.

Největší rozdíl mezi kritickou teplotou získanou pro modul tuhosti za ohybu a pro m-hodnotu dosahoval nemodifikovaný silniční asfalt (2,1 °C) a dále polymerem modifikované asfalty 45/80-65 a 45/80-75 (oba shodně 1,5 °C). Velký rozdíl mezi těmito hodnotami může svědčit o narušené vnitřní stabilitě koloidního (disperzního) systému asfaltového pojiva. Příkladem mohou být pojiva typu asfalt modifikovaný pryžovým granulátem, která dosahují

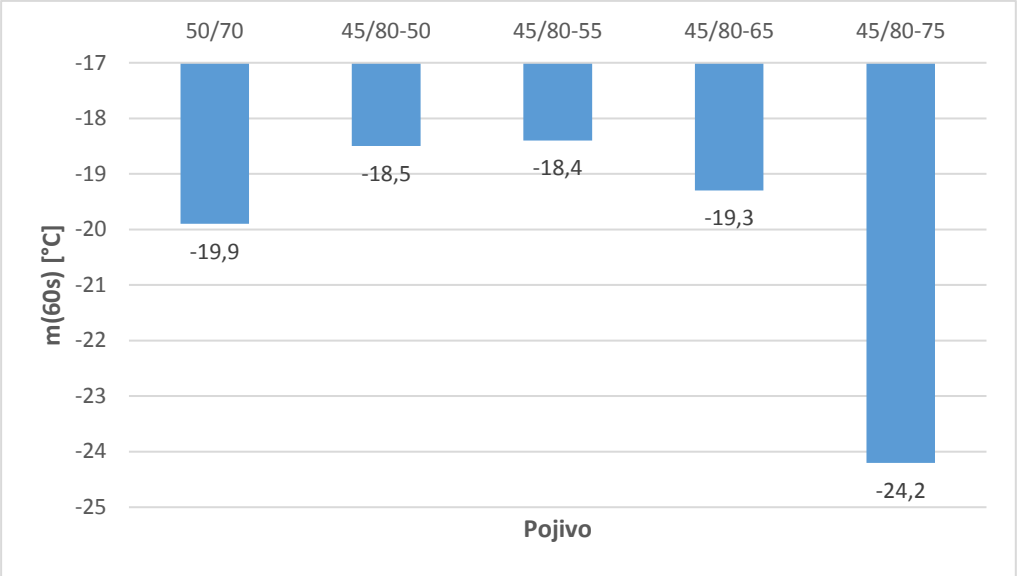
značného rozdílu těchto kritických teplot (často i 10 °C). Naměřené hodnoty rozdílů kritických teplot získaných pro modul tuhosti za ohybu a m-hodnotu však nebyly ani pro jedno ze srovnávaných pojiv nadstandardně vysoké.

Tabulka 15: Výsledné teploty S(60s) a m(60s) pro všechny vzorky pojiv

Pojivo	S(60s) [°C]	m(60s) [°C]	Rozdíl teplot [°C]	Kritická teplota [°C]
50/70	-17,8	-19,9	2,1	-17,8
45/80-50	-17,9	-18,5	0,6	-17,9
45/80-55	-17,6	-18,4	0,8	-17,6
45/80-65	-17,8	-19,3	1,5	-17,8
45/80-75	-22,7	-24,2	1,5	-22,7



Graf 17: Výsledné teploty pro S(60s) – Kritické teploty



Graf 18: Výsledné teploty pro m(60s)

6.3 Stanovení bodu lámavosti podle Fraasse

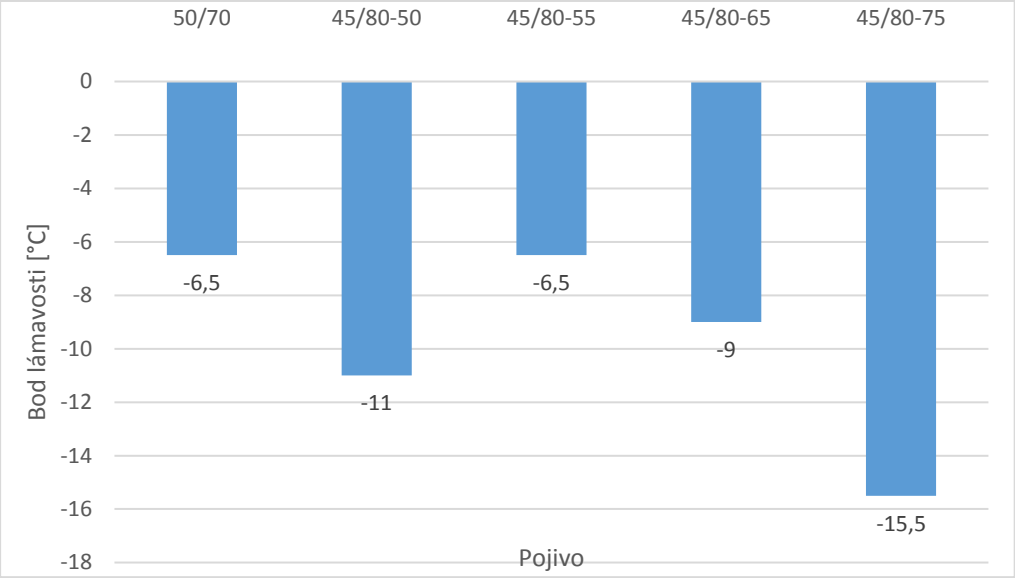
Metodika dané zkoušky je podrobně vysvětlena v kapitole 4.3. U každého vzorku byla provedena dvě měření, výsledky byly zprůměrovány, následně zapsány do tabulky 16 a vyneseny do grafu 19. Ani jedna z naměřených hodnot polymerem modifikovaných asfaltů nesplňuje teplotu bodu lámavosti dle požadavků stanovených normou ČSN EN 14023 ZMĚNA Z1 Asfalty a asfaltová pojiva – Systém specifikace pro polymerem modifikované asfalty. Rovněž požadavek normy ČSN EN 12591 Asfalty a asfaltová pojiva – Specifikace pro silniční asfalty na bod lámavosti silničního asfaltu 50/70 (-8 °C) nebyl těsně splněn.

Ze sloupcového grafu je patrné, že i zde pojivo s největším obsahem modifikační přísady 45/80-75 dosáhlo bodu lámavosti při nejnižší teplotě, v porovnání s ostatními vzorky. Avšak ani zde nejsou pojiva seřazena dle stupně modifikace. Překvapivého umístění, z pohledu obsahu modifikátorů, dosáhl vzorek 45/80-50, který se porušil prasklinou při nižší teplotě než modifikovanější vzorek pojiva 45/80-55 a dokonce i 45/80-65.

Z výsledků zkoušky bodu lámavosti je patrné, že požadavky norem ČSN EN 12591 a ČSN EN 14023 jsou nastaveny příliš přísně a běžně dodávaná pojiva mohou mít problém těmto požadavkům vyhovět.

Tabulka 16: Výsledky bodu lámavosti podle Fraasse

Pojivo	Bod lámavosti [°C]		Průměr
50/70	-6,0	-7,0	-6,5
45/80-50	-11,0	-11,0	-11,0
45/80-55	-7,0	-6,0	-6,5
45/80-65	-7,0	-10,0	-9,0
45/80-75	-16,0	-15,0	-15,5



Graf 19: Bod lámavosti

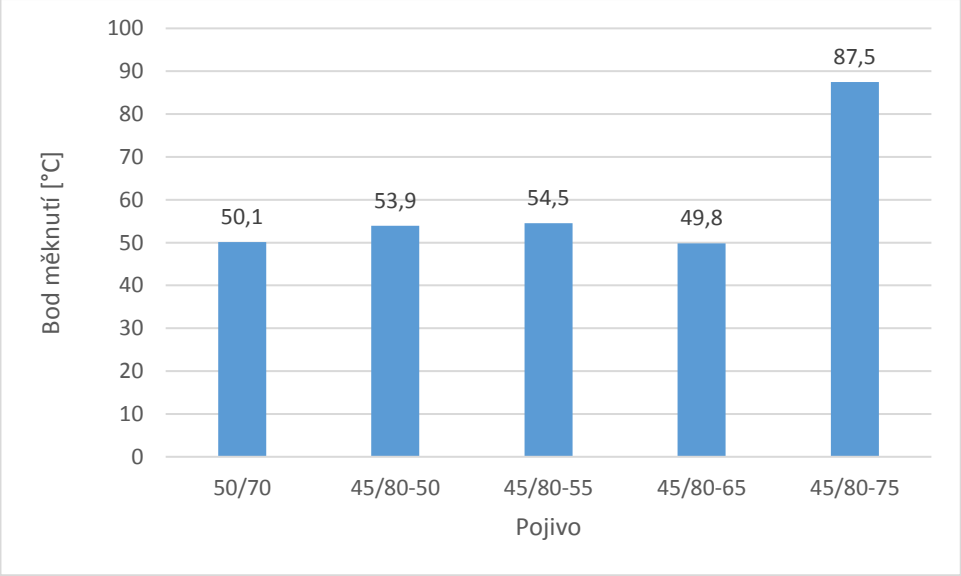
6.4 Stanovení bodu měknutí

Metodika dané zkoušky je podrobně vysvětlena v kapitole 4.4. U každého vzorku byla provedena dvě měření, výsledky byly zprůměrovány, následně zapsány do tabulky 17 a vyneseny do grafu 20. Z tabulky je patrné, že vzorky pojiv 45/80-55 a 45/80-65 nesplňují požadavky na teplotu bodu měknutí dle normy ČSN EN 14023 ZMĚNA Z1 Asfalty a asfaltová pojiva - Systém specifikace pro polymerem modifikované asfalty. Silniční asfalt požadavek normy ČSN EN 12591 splnil. Vynikajících výsledků opět dosáhlo

asfaltové pojivo 45/80-75, které mělo hodnotu bodu měknutí o 12,5 °C vyšší, než je požadovaná hodnota. Polymerem modifikovaný asfalt 45/80-65 dosáhl značně nižší hodnoty bodu měknutí, než je požadováno normou ČSN EN 14023 a nelze tudíž předpokládat, že toto pojivo obsahuje dostatečné množství polymerní přísady, které by mělo obsahovat pojivo gradace 45/80-65. Podle výsledku této zkoušky toto pojivo těsně nedosahuje ani požadavku na bod měknutí pro gradaci 45/80-50. To by mohlo také vysvětlit nesplnění požadavku normy ČSN EN 14023 na hodnotu bodu lámavosti. Kvalitu modifikace by bylo možné ověřit dalšími zkouškami, například zkouškou vratné duktility nebo zkouškou silové duktility.

Tabulka 17: Výsledky bodu měknutí

Pojivo	Bod měknutí [°C]		Průměr [°C]	Rozdíl [°C]
50/70	50,4	49,9	50,1	0,5
45/80-50	53,8	54	53,9	0,2
45/80-55	54,5	54,5	54,5	-
45/80-65	49,8	49,7	49,8	0,2
45/80-75	88,1	86,9	87,5	1,2



Graf 20: Bod měknut

7 Korelace výsledků

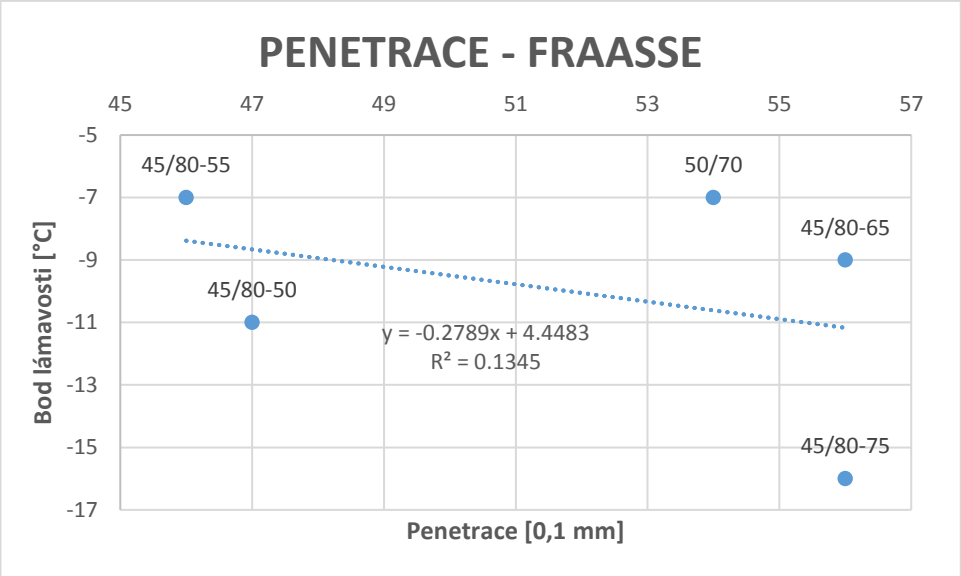
V následující kapitole jsou grafickou formou znázorněny korelace mezi prováděnými zkouškami. Jednotlivé závislosti jsou popsány korelační funkcí s rovnicí křivky ***y*** a korelačním součinitelem R^2. Jestliže korelační součinitel nabývá hodnot blížících se 1, pak se jedná o silnou závislost. Pokud je naopak jeho hodnota blízká 0, můžeme říci, že mezi proměnnými neexistuje žádná závislost.

Vybrané vzorky asfaltového pojiva mají různé stupně modifikace. Z předchozích zkušeností lze předpokládat, že čím větší je obsah modifikátorů v pojivu, tím jsou lepší nízkoteplotní, tak i vysokoteplotní vlastnosti. U každého korelačního grafu se tedy budu zabývat tím, zda jsou dané předpoklady splněny a zda nedošlo k nějakým překvapivým výsledkům.

7.1 Závislost penetrace jehlou a bodu lámavosti podle Fraasse

Graf 21 zachycuje závislost mezi penetrací jehlou a bodem lámavosti podle Fraasse. Dle očekávání nejlepší vlastnosti má pojivo s největším obsahem modifikátorů 45/80-75. Ostatní vzorky se již neseřadily dle stupně modifikace. Nejhoršího umístění dosáhlo polymerem modifikované asfaltové pojivo 45/80-55, které předčil i silniční asfalt 50/70.

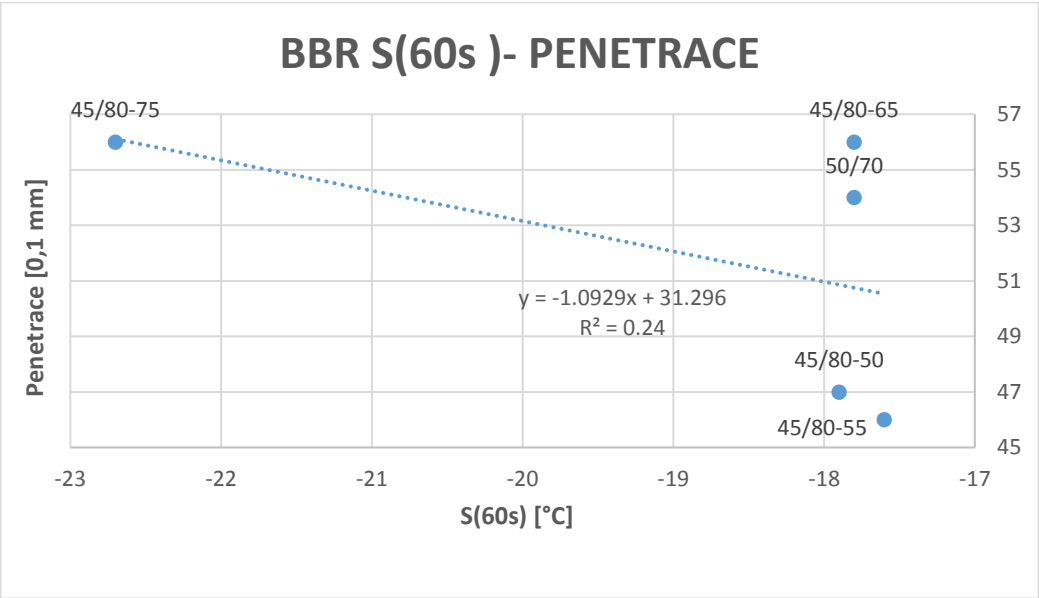
Co se týče síly závislosti mezi proměnnými, tak lze z grafu usoudit, že ta téměř neexistuje z důvodu velmi malé hodnoty korelačního součinitele R^2=0,1345, jehož hodnota se téměř blíží 0.



Graf 21: Závislost penetrace jehlou a bodu lámavosti podle Fraasse

7.2 Závislost modulu tuhosti za ohybu a penetrace jehlou

Graf 22 zachycuje závislost mezi modulem tuhosti za ohybu a penetrací jehlou. Opět dle předchozích zkušeností, nejlepší nízkoteplotní vlastnosti a zároveň nejvyšší stupeň penetrace má pojivo 45/80-75. Z grafu lze usoudit, že neexistuje téměř žádná korelace mezi proměnnými, což také potvrzuje nízký korelační součinitel R^2=0,24.

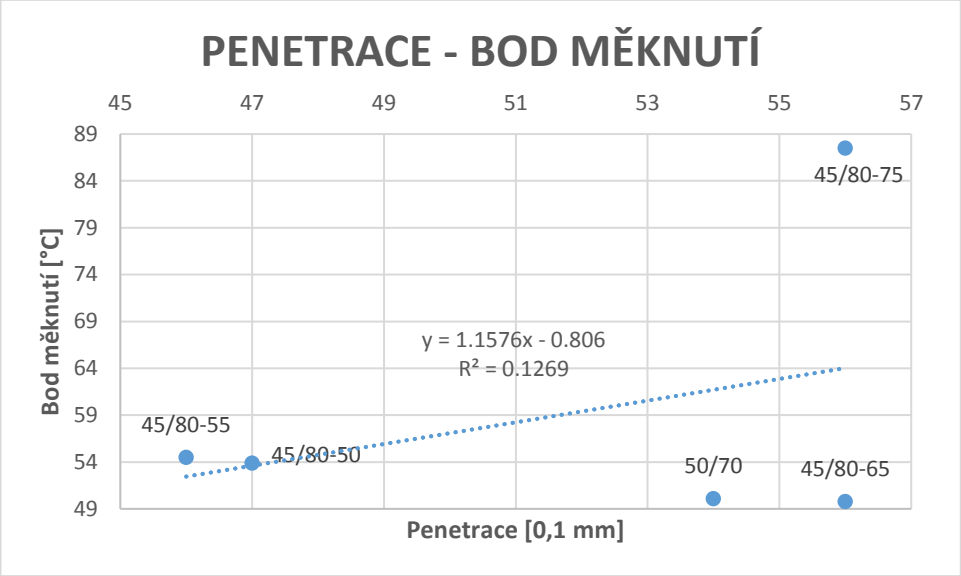


Graf 22: Závislost modulu tuhosti za ohybu a penetrace jehlou

7.3 Závislost penetrace jehlou a bodu měknutí

Graf 23 zachycuje závislost mezi penetrací jehlou a bodem měknutí. Opět dle předpokladů, nejlepších vlastností nabývá pojivo 45/80-75. Ostatní vzorky se již neseřadily dle stupně modifikace.

Jako i ve výše zmíněném komentáři ke grafu 21, tak i zde závislost mezi proměnnými téměř neexistuje a korelační součinitel je R^2=0,1269.



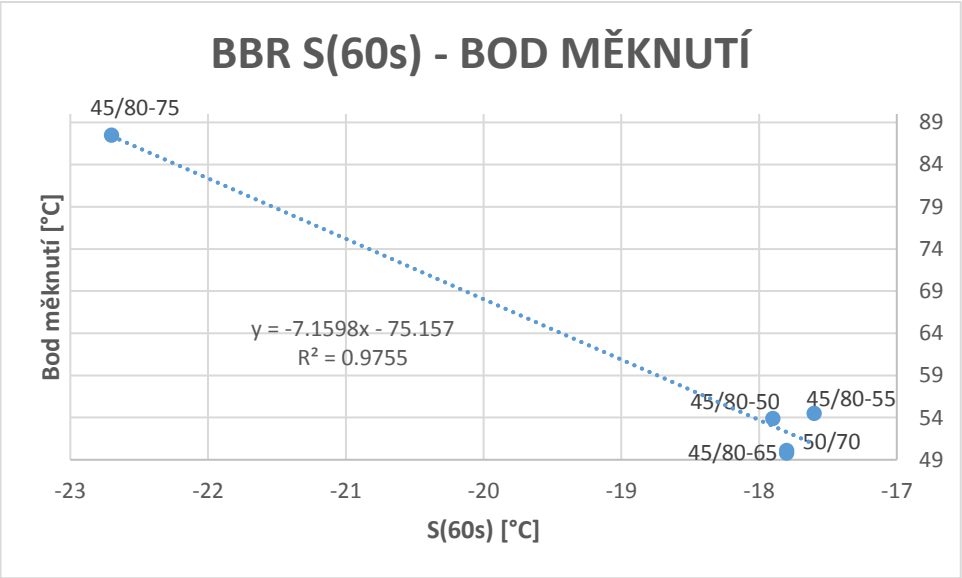
Graf 23: Závislost penetrace jehlou a bodu měknutí

7.4 Závislost modulu tuhosti za ohybu a bodu měknutí

Graf 24 zachycuje závislost mezi modulem tuhosti za ohybu a bodem měknutí. Opět nejlepší nízkoteplotní a zároveň i vysokoteplotní vlastnosti má pojivo 45/80-75. Ostatní vzorky se již neseřadily dle stupně modifikace. Překvapivě jako jeden z nejlepších vzorků obstálo asfaltové pojivo 45/80-50, i když má nejnižší obsah modifikátorů. Zajímavostí je, že z hlediska bodu měknutí, nejhoršího výsledku dosáhlo pojivo 45/80-65, jehož teplota bodu měknutí je pouhých 49,8°C. Z tohoto důvodu je nutné tento výsledek označit jako nevyhovující dle normy ČSN EN 14023 ZMĚNA Z1 Asfalty a asfaltová pojiva – Systém specifikace pro polymerem modifikované asfalty. Za nevyhovující je také nutné označit pojivo 45/80-55. Naopak překvapivě

vysoké teploty 87,5 °C nabývá pojivo 45/80-75, o jehož nadprůměrně kladných vlastnostech se můžeme přesvědčit ve všech korelačních grafech.

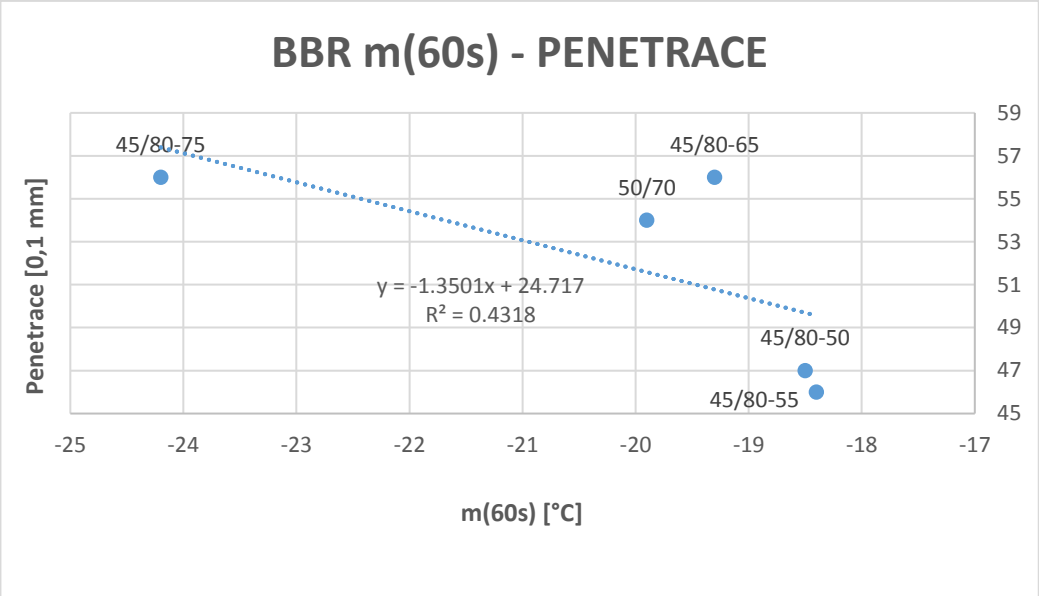
Korelační součinitel zde nabývá hodnot R^2=0,9755, proto lze tuto závislost označit za velmi silnou.



Graf 24: Závislost modulu tuhosti za ohybu a bodu měknutí

7.5 Závislost m-hodnoty a penetrace jehlou

Graf 25 zachycuje závislost mezi m-hodnotou a penetrací jehlou. Opět dle očekávání, nejlepší nízkoteplotní vlastnosti a zároveň nejvyšší stupeň penetrace má pojivo 45/80-75. Stejně jako u závislosti mezi modulem tuhosti za ohybu a penetrací jehlou, tak i zde lze z grafu usoudit, že závislost mezi proměnnými není příliš silná, což také potvrzuje nízký korelační součinitel R^2=0,4318.

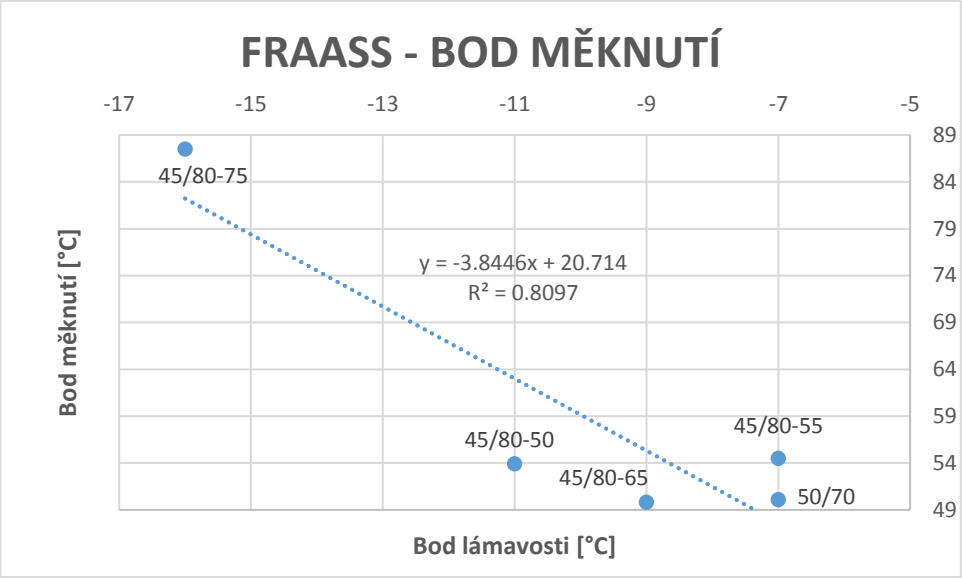


Graf 25: Závislost m-hodnoty a penetrace jehlou

7.6 Závislost bodu lámavosti podle Fraasse a bodu měknutí

Graf 26 zachycuje závislost mezi bodem lámavosti podle Fraasse a bodem měknutí. Opět podle očekávání, nejlepší vlastnosti má pojivo s největším obsahem modifikátorů 45/80-75. Ostatní vzorky se již neseřadily dle stupně modifikace. Překvapivé je opět umístění pojiva s druhým nejvyšším obsahem modifikátorů 45/80-65.

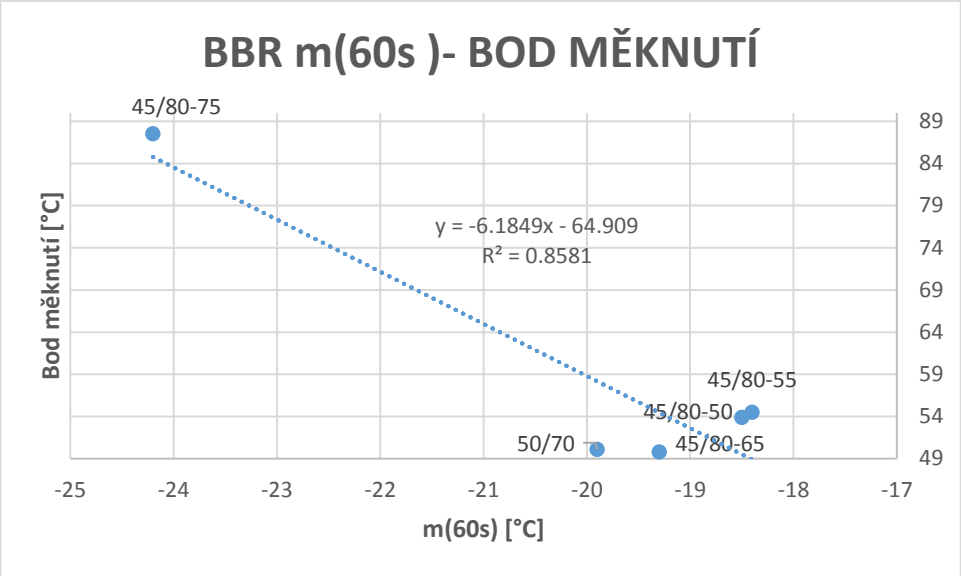
Korelační součinitel zde nabývá hodnot R^2=0,8097, proto lze tuto závislost označit za silnou.



Graf 26: Závislost bodu lámavosti podle Fraasse a bodu měknutí

7.7 Závislost m-hodnoty a bodu měknutí

Graf 27 zachycuje závislost mezi m-hodnotou a bodem měknutí. Opět dle očekávání, nejlepší nízkoteplotní a zároveň i vysokoteplotní vlastnosti má pojivo 45/80-75. Ostatní vzorky se již neseřadily dle stupně modifikace. Překvapivě jako jeden z nejlepších vzorků obstálo asfaltové pojivo 45/80-50, i když má nejnižší obsah modifikátorů. Z pohledu bodu měknutí je průběh stejný, jako při sledované závislosti modulu tuhosti za ohybu a bodu měknutí, s tím rozdílem, že v tomto případě se nejedná o až tak silnou korelaci, jaká byla v předchozím případě, kde korelační součinitel téměř nabýval hodnoty 1. Zde je R^2=0,8581, díky čemuž lze označit tuto korelaci pouze za silnou.



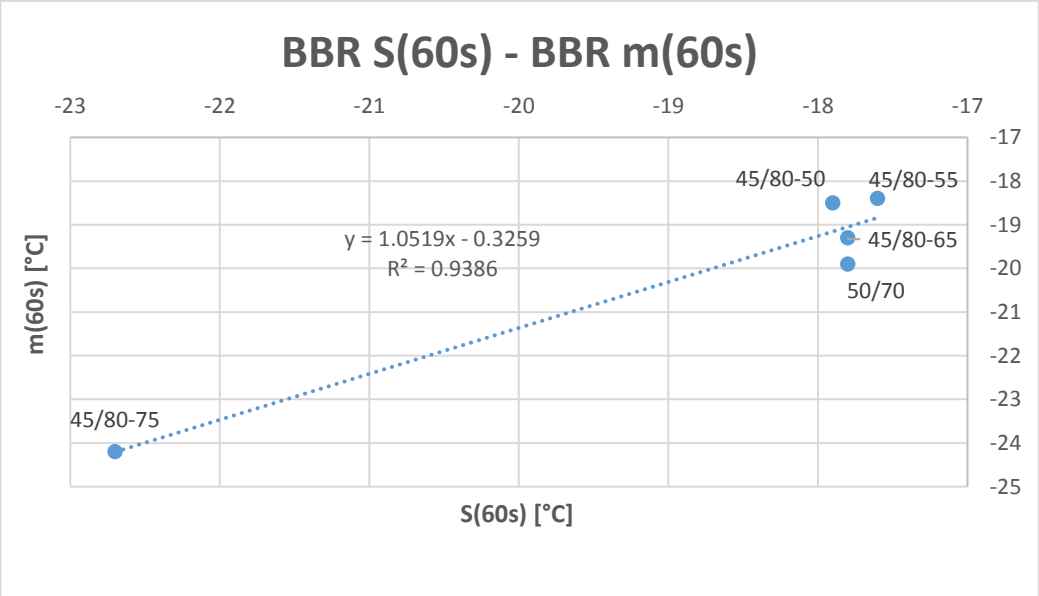
Graf 27: Závislost m-hodnoty a bodu měknutí

7.8 Závislost modulu tuhosti za ohybu a m-hodnoty

Graf 28 zachycuje závislost mezi modulem tuhosti za ohybu a m-hodnotou. Dle očekávání, nejlepší nízkoteplotní vlastnosti má pojivo 45/80-75 s největším obsahem modifikátorů. Je překvapením, že ostatní vzorky se již neseřadily dle stupně modifikace a jako jeden z nejlepších vzorků obstál silniční asfalt 50/70.

Korelační součinitel zde nabývá hodnot R^2=0,9386, proto lze tuto závislost označit za velmi silnou. Tuto hodnotu ovšem značně zvyšuje rozdílný výsledek pojiva 45/80-75. Výsledky ostatních pojiv se od sebe vzájemně příliš neliší.

Rozdíly teplot mezi jednotlivými pojivy jsou velmi nepatrné (s výjimkou 45/80-75). Z tohoto důvodu je těžké popsat rozdíly mezi pojivy.

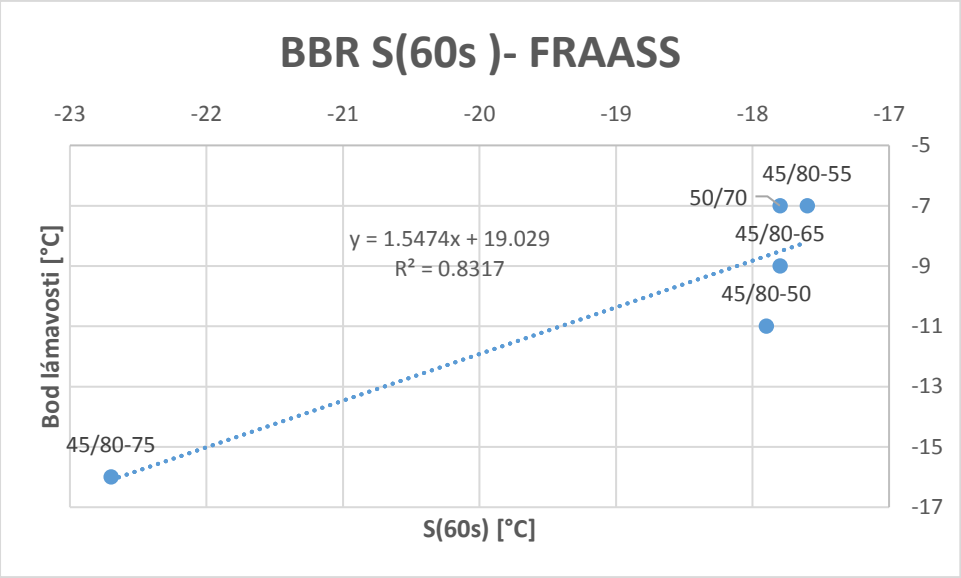


Graf 28: Závislost modulu tuhosti za ohybu a m-hodnoty

7.9 Závislost modulu tuhosti za ohybu a bodu lámavosti podle Fraasse

Graf 29 zachycuje závislost mezi modulem tuhosti za ohybu a bodem lámavosti podle Fraasse. Dle předpokladů nejlepší nízkoteplotní vlastnosti má pojivo 45/80-75 s největším obsahem modifikační přísady. Ostatní vzorky se již neseřadily dle stupně modifikace. Překvapivě, jako jeden z nejlepších vzorků, obstálo asfaltové pojivo 45/80-50, i když má nejnižší obsah modifikátorů. Nejhoršího výsledku dosáhlo polymerem modifikované pojivo 45/80-55, což může být také překvapující.

Korelační součinitel zde nabývá hodnot R^2=0,8317, což je blízko 1, proto lze tuto závislost označit za silnou.

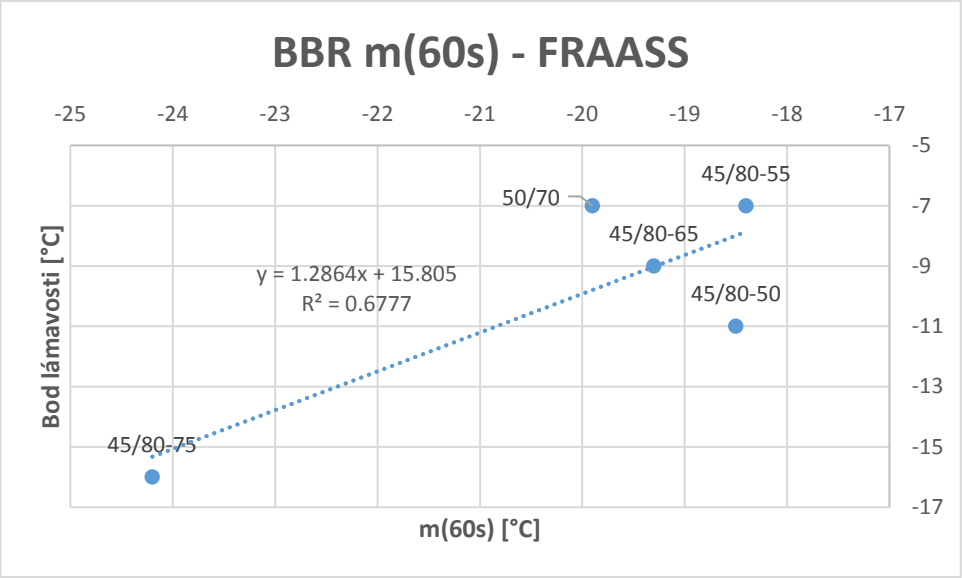


Graf 29: Závislost modulu tuhosti za ohybu a bodu lámavosti podle Fraasse

7.10 Závislost m-hodnoty a bodu lámavosti podle Fraasse

Graf 30 zachycuje závislost mezi m-hodnotou a bodem lámavosti podle Fraasse. Jako ve všech případech, tak i zde má nejlepší nízkoteplotní vlastnosti pojivo 45/80-75 s nejvyšším obsahem modifikátorů. Ostatní vzorky se již neseřadily dle stupně modifikace. Překvapivě, jako jeden z nejlepších vzorků obstálo asfaltové pojivo 45/80-50, i když má nejnižší obsah modifikátorů. Nejhoršího výsledku dosáhlo pojivo 45/80-55, které se tímto zařadilo až za pojivo s nižším obsahem modifikátorů 45/80-50.

Korelační součinitel zde nabývá hodnot R^2=0,6777, proto lze tuto závislost označit za nijak výraznou, nicméně patrnou. Při porovnání se závislostí mezi modulem tuhosti za ohybu a bodem lámavosti podle Fraasse, musíme usoudit, že závislost, kde vystupuje modul tuhosti za ohybu, lépe vystihuje závislosti proměnných. Opět se na hodnotě korelačního koeficientu pozitivně podepsaly značně odlišné vlastnosti pojiva 45/80-75.



Graf 30: Závislost m-hodnoty a bodu lámavosti podle Fraasse

8 Závěr

V této kapitole bych se ráda zaměřila na celkové vyhodnocení naměřených výsledků a závěrů z nich vyplývajících. Cílem práce bylo stanovení nízkoteplotních vlastností vybraného vzorku silničního asfaltu a polymerem modifikovaných asfaltových pojiv. Pro podrobnou specifikaci vybraných vzorků byly zvoleny zkoušky: stanovení modulu tuhosti za ohybu a m-hodnoty pomocí průhybového trámečkového reometru (BBR), bod lámavosti podle Fraasse, penetrace jehlou a zkouška bodu měknutí. V praktické části byly hodnoty jednotlivých měření vypsány do tabulek a vyneseny do příslušných grafů. Vzhledem k náročnosti vyhodnocení měření byla zkoušce BBR věnována větší pozornost. V neposlední řadě pak byly sestrojeny korelační grafy všech možných kombinací výsledných zkoušek.

Co se týče zkoušky penetrace jehlou. Z výsledků je možné vysledovat, že rozsah hodnot penetrace jednotlivých pojiv byl v úzkém rozmezí (46 [0,1 mm] až 56 [0,1 mm]). Polymerem modifikované asfalty 45/80-50 a 45/80-55 dosahovaly hodnoty penetrace blížící se dolní hranici požadavku. Tato dvě pojiva měla zároveň nejnižší hodnotu penetrace. Nejvyšší hodnoty penetrace naopak dosahovaly polymerem modifikované asfalty 45/80-65 a 45/80-75.

U zkoušky modulu tuhosti za ohybu a m-hodnoty v BBR byla výsledná teplota pro S(60s) vyšší než teplota pro m(60s). Z tohoto důvodu byla teplota, získaná z modulu tuhosti za ohybu, označena jako tzv. kritická teplota. Ze závislosti nárůstu deformace (průhybu) na čase bylo zjištěno, že při zatěžování vzorku za nižší teploty dochází k menší deformaci, což je způsobeno nárůstem tuhosti s klesající teplotou. Z naměřených výsledků bylo patrné, že s nárůstem obsahu modifikačních přísad v asfaltovém pojivu dochází k zlepšení nízkoteplotních vlastností. Rozdíly kritických teplot mezi jednotlivými pojivy byly však tak nepatrné (s výjimkou 45/80-75), že bylo obtížné popsat rozdíly mezi jednotlivými pojivy. Proto jsem podle tohoto omezeného souboru pojiv došla k závěru, že tato zkouška zřejmě není schopná výstižně popsat nízkoteplotní chování asfaltových pojiv. K určení vhodnosti tohoto zkušebního

postupu by ovšem bylo nutné provést srovnání na značně větším souboru pojiv. Při porovnání výsledných kritických teplot stanovených z S(60s) a m(60s) bylo zjištěno, že ani jedno ze zkoušených pojiv se od sebe nestandardně neliší. Max. rozdíl teplot byl patrný u pojiva 50/70 (2,1 °C).

Další zkouškou bylo stanovení bodu lámavosti podle Fraasse. Překvapením bylo, že ani jeden vzorek asfaltových pojiv nesplnil požadovanou teplotu bodu lámavosti. I přes nesplnění podmínek, daných normou ČSN EN 14023 a ČSN EN 12591, opět nejlepšího výsledku (nejnižší teploty porušení) dosáhlo pojivo 45/80-75. Důvodem nesplnění předepsaných požadavků může být jejich příliš přísné nastavení v normách a malý rozptyl odchylek.

Poslední prováděnou zkouškou bylo stanovení bodu měknutí. Předpoklad byl takový, že se díky této zkoušce dozvíme, z jakého důvodu se v předešlých zkouškách asfaltová pojiva neseřadila dle stupně modifikace. Dle očekávání, pojivo 45/80-75 opět dosáhlo nejlepších vlastností (zde vysokoteplotních). Avšak polymerem modifikovaný asfalt 45/80-65 dosáhl značně nižší hodnoty bodu měknutí, než je požadováno normou ČSN EN 14023 a nelze tudíž předpokládat, že toto pojivo obsahuje dostatečné množství polymerní přísady, které by mělo obsahovat pojivo gradace 45/80-65. Podle výsledku této zkoušky toto pojivo těsně nedosahuje ani požadavku na bod měknutí pro gradaci 45/80-50. Proto se lze domnívat, že požadavky normy ČSN EN 14023 na hodnotu bodu lámavosti nebyly splněny z důvodu nedostatečného obsahu polymerní přísady pro pojivo této gradace.

Z vyhodnocení všech korelačních grafů bylo zřejmé, že ani v jednom z nich nejsou vzorky seřazeny dle stupně modifikace. Jak již bylo zmíněno výše, tato skutečnost je nejspíš zapříčiněna neodpovídajícím obsahem modifikačních přísad ve vzorcích asfaltových pojiv dle jejich gradace. Celkově bylo provedeno 10 korelačních grafů, z nichž jsem vybrala 3 zástupce, kteří nejlépe popisují nízkoteplotní chování asfaltových pojiv. Jedná se o závislost modulu tuhosti za ohybu a m-hodnoty, závislost modulu tuhosti za ohybu a bodu lámavosti podle Fraasse a závislost m-hodnoty a bodu

lámavosti podle Fraasse. Co se týče síly závislosti jednotlivých proměnných, tak nejsilnější závislosti nabývá hned první ze zmiňovaných závislostí. Z důvodu malého rozdílu kritických teplot mezi pojivy je těžké popsat, v jak velké míře se od sebe navzájem liší. Při porovnání závislostí modulu tuhosti za ohybu a m-hodnoty s bodem lámavosti podle Fraasse byla korelace mezi modulem tuhosti za ohybu a bodem lámavosti podle Fraasse vyšší, než u druhé zmiňované závislosti.

Závěrem bych chtěla potvrdit, že korelace mezi modulem tuhosti za ohybu a m-hodnotou stanovenou pomocí průhybového trámečkového reometru (BBR) a bodem lámavosti podle Fraasse, skutečně existuje. Nebýt nesprávného označení asfaltových pojiv, které nesplňuje předepsanou gradaci, dalo by se potvrdit, že trend stupně modifikace stoupá s množstvím modifikačních příměsí. Co se týče bodu lámavosti, bylo zjištěno, že nastavení požadavků na hodnotu bodu lámavosti, je příliš přísné. Naopak u zkoušky BBR zatím nejsou v normách ČSN EN 14023 ani ČSN EN 12591 specifikovány výsledné hodnoty, proto správnost výsledků můžeme ověřit pouze s předchozími zkušenostmi. Pro upřesnění výsledků kvality modifikace by bylo vhodné práci doplnit o další zkoušky, například zkouškou vratné duktility nebo zkouškou silové duktility.

9 Seznam použité literatury

[1] VARAUS, Michal. *Pozemní komunikace II: Asfaltová pojiva*. Brno, 2005, 17 s.

[2] BAHIA, H U; ANDERSON, D A; CHRISTENSEN D W. *The Bending Beam Rheometer; A Simple Device for Measuring Low-Temperature Rheology of Asphalt Binders (with Discussion)*. St Paul, MN Unaited States, 1992. Dostupné z: https://trid.trb.org/view.aspx?id=486936

[3] Jellema, Erica and Collective. *Comparing Cold Performance Results Using Fracture Toughness Test, Asphalt Binder Cracking Device, Fraass Breaking Point and Bending Beam Rheometer*. Istanbul, 13-15th June 2012, 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress

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

[5] ČSN EN 12594. *Asfalty a asfaltová pojiva - Příprava analytických vzorků*. Praha: Český normalizační institut, 2007.

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

[7] VALENTIN, Jan. *Užitné vlastnosti a reologie asfaltových pojiv a směsí: charakteristiky, nové zkušební metody, vývojové trendy*. Praha, 2003.

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

[9] ZAJÍČEK, Jan a kolektiv. *Technologie stavby vozovek*. Praha: Informační centrum ČKAIT, s.r.o, 2014.

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

[11] ČSN 14023. Asfalty a asfaltová pojiva - Systém specifikace propolymerem modifikované asfalty. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, 2010.

[12] ČSN EN 12591. Asfalty a asfaltová pojiva - Specifikace pro silniční asfalty. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, 2009.

10 Seznam obrázků

Obrázek 1: Vzorky asfaltových pojiv v penetračních miskách 15
Obrázek 2: Vpich jehly do vzorku 16
Obrázek 3: Tříbodový ohyb 18
Obrázek 4: Průhybový trámečkový reometr 19
Obrázek 5: Prázná forma 20
Obrázek 6: Naplněná forma 20
Obrázek 7: Vzorek po seříznutí 20
Obrázek 8: Závislost logaritmu modulu tuhosti na logaritmu času [7] 22
Obrázek 9: Přístroj pro lámavost podle Fraasse 24
Obrázek 10: Plíšek s navážkou 25
Obrázek 11: První prasklina 26
Obrázek 12: Propad kuliček 28

11 Seznam tabulek

Tabulka 1: Průměrná teplota porušení [3] 12
Tabulka 2: Maximální rozdíl platných stanovení [4] 17
Tabulka 3: Kapalinová lázeň pro stanovení bodu měknutí [10] 27
Tabulka 4: Výsledky penetrace jehlou 30
Tabulka 5: Vyhodnocení zkoušky BBR pro pojivo 50/70 32
Tabulka 6: Kritické teploty S(60s) a m(60s) pro pojivo 50/70 32
Tabulka 7: Vyhodnocení zkoušky BBR pro pojivo 45/80-50 34
Tabulka 8: Kritické teploty S60s a m60s pro pojivo 45/80-50 34
Tabulka 9: Vyhodnocení zkoušky BBR pro pojivo 45/80-55 36
Tabulka 10: Kritické teploty S60s a m60s pro pojivo 45/80-55 36
Tabulka 11: Vyhodnocení zkoušky BBR pro pojivo 45/80-65 38
Tabulka 12: Kritické teploty S60s a m60s pro pojivo 45/80-65 38
Tabulka 13: Vyhodnocení zkoušky BBR pro pojivo 45/80-75 40
Tabulka 14: Kritické teploty S60s a m60s pro pojivo 45/80-75 40
Tabulka 15: Kritické teploty S60s a m60 43
Tabulka 16: Výsledky bodu lámavosti podle Fraasse 45
Tabulka 17: Výsledky bodu měknutí 46

12 Seznam grafů

Graf 1: Penetrace jehlou 31
Graf 2: Závislost modulu tuhosti na teplotě pro 50/70 32
Graf 3: Závislost m-hodnoty na teplotě pro 50/70 33
Graf 4: Závislost nárůstu deformace na čase pro 50/70 33
Graf 5: Závislost modulu tuhosti na teplotě pro 45/80-50 34
Graf 6: Závislost m-hodnoty na teplotě pro 45/80-50 35
Graf 7: Závislost nárůstu deformace na čase pro 45/80-50 35
Graf 8: Závislost modulu tuhosti na teplotě pro 45/80-55 36
Graf 9: Závislost m-hodnoty na teplotě pro 45/80-55 37
Graf 10: Závislost nárůstu deformace na čase pro 45/80-55 37
Graf 11: Závislost modulu tuhosti na teplotě pro 45/80-65 38
Graf 12: Závislost m-hodnoty na teplotě pro 45/80-65 39
Graf 13: Závislost nárůstu deformace na čase pro 45/80-65 39
Graf 14: Závislost modulu tuhosti na teplotě pro 45/80-75 40
Graf 15: Závislost m-hodnoty na teplotě pro 45/80-75 41
Graf 16: Závislost nárůstu deformace na čase pro 45/80-75 41
Graf 17: Výsledné teploty pro S(60s) – Kritické teploty 43
Graf 18: Výsledné teploty pro m(60s) 44
Graf 19: Bod lámavosti 45
Graf 20: Bod měknutí 46
Graf 21: Závislost penetrace jehlou a bodu lámavosti podle Fraasse 48
Graf 22: Závislost modulu tuhosti za ohybu a penetrace jehlou 48
Graf 23: Závislost penetrace jehlou a bodu měknutí 49
Graf 24: Závislost modulu tuhosti za ohybu a bodu měknutí 50
Graf 25: Závislost m-hodnoty a penetrace jehlou 51
Graf 26: Závislost bodu lámavosti podle Fraasse a bodu měknutí 52
Graf 27: Závislost m-hodnoty a bodu měknutí 53
Graf 28: Závislost modulu tuhosti za ohybu a m-hodnoty 54
Graf 29: Závislost modulu tuhosti za ohybu a bodu lámavosti podle Fraasse 55
Graf 30: Závislost m-hodnoty a bodu lámavosti podle Fraasse 56