



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

DYNAMICKÁ VISKOZITA ASFALTOVÝCH POJIV

DYNAMIC VISCOSITY OF ASPHALT BINDERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Marek Brodák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ONDŘEJ DAŠEK, 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	Marek Brodák
Název	Dynamická viskozita asfaltových pojiv
Vedoucí práce	Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2016
Datum odevzdání	26. 5. 2017

V Brně dne 30. 11. 2016

doc. Dr. Ing. Michal Varaus
Vedoucí ústavu

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

PODKLADY A LITERATURA

Předané vzorky asfaltových pojiv

ČSN EN 13302 Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení dynamické viskozity asfaltových pojiv rotačním vřetenovým viskozimetrem

ČSN EN 13702 Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení dynamické viskozity modifikovaných asfaltů metodou kužel a deska

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

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

Literatura z internetu

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Cílem bakalářské práce bude stanovit dynamickou viskozitu vybraných vzorků silničního asfaltu a polymerem modifikovaných asfaltů. Výsledky budou srovnány s hodnotami penetrace a bodu měknutí daných vzorků pojiv.

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. Ondřej Dašek, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

Abstrakt

V bakalářské práci jsou popsány laboratorní vlastnosti asfaltových pojiv. Bude zde popsán princip, postup měření a porovnání výsledků laboratorních zkoušek stanovení dynamické viskozity, penetrace jehlou a bod měknutí metodou kroužek kulička. Zkoušky budou provedeny na vzorcích asfaltů s různým stupněm modifikace.

Klíčová slova

Asfalt, silniční asfalt, polymerem modifikovaný asfalt, dynamická viskozita, penetrace jehlou, bod měknutí, rychlostní gradient, smykové napětí, teplota, rotační vřetenový viskozimetr, dynamický smykový reometr

Abstract

The bachelor thesis describes a laboratory characteristics of bituminous binders. The principle, procedure of measurement and comparison of test results of dynamic viscosity, needle penetration and softening point by ring and ball method will be described. The tests will be performed on samples of the bituminous binders with different degree of modification.

Keywords

Bitumen, paving bitumen, polymer modified bitumen, dynamic viscosity, needle penetration, softening point, shear rate, shear stress, temperature, rotating spindle apparatus, dynamic shear rheometer

Marek Brod'ák *Dynamická viskozita asfaltových pojiv*. Brno, 2017. 53 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.

Prohlášení

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

V Brně dne 24. 5. 2017

Marek Brod'ák
autor práce

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Ondřeji Daškovi, Ph.D. Dále děkuji všem zaměstnancům laboratoře ústavu pozemních komunikací. V neposlední řadě bych rád poděkoval své rodině, spolužákům a kamarádům za podporu při studiu.

Obsah

1. Úvod	10
2. Rešerše literatury	11
3. Cíle bakalářské práce	15
4. Použité zkušební metody	16
4.1. Stanovení dynamické viskozity rotačním vřetenovým viskozimetrem podle ČSN EN 13302.....	16
4.1.1. Podstata metody.....	16
4.1.2. Přístroje a pomůcky	16
4.1.3. Postup zkoušky	18
4.2. Stanovení dynamické viskozity metodou kužel – deska v dynamickém smykovém reometru podle ČSN EN 13702.....	19
4.2.1. Podstata metody.....	19
4.2.2. Přístroje a pomůcky	19
4.2.3. Postup zkoušky	20
4.3. Penetrace jehlou.....	21
4.3.1. Podstata metody.....	21
4.3.2. Přístroje a pomůcky	21
4.3.3. Postup zkoušky	23
4.4. Bod měknutí metodou kroužek kulička.....	24
4.4.1. Podstata metody.....	24
4.4.2. Přístroje a pomůcky	24
4.4.3. Postup zkoušky	25
5. Použité materiály	27
5.1. 50/70 Total.....	27
5.2. PmB 45/80-65 OMV.....	27
5.3. PmB 45/80-75 Total.....	28
5.4. PmB 45/80-85 Total.....	28
5.5. CRmB 25/55-60 Gumoasfalt.....	28

6. Výsledky zkoušek	30
6.1. Stanovení penetrace jehlou	30
6.2. Stanovení bodu měknutí metodou kroužek – kulička	31
6.3. Stanovení dynamické viskozity – Rotační vřetenový viskozimetr	32
6.4. Stanovení dynamické viskozity – Dynamický smykový reometr.....	34
6.5. Vliv smykové rychlosti na dynamickou viskozitu – Dynamický smykový reometr.	36
6.6. Vzájemné korelace.....	38
6.6.1. Srovnání dynamické viskozity – Rotační vřetenový viskozimetr x Dynamický smykový reometr při vybrané smykové rychlosti.....	38
6.6.2. Vzájemná závislost dynamické viskozity a penetrace jehlou	40
6.6.3. Vzájemná závislost dynamické viskozity a bodu měknutí metodou kroužek – kulička	41
6.6.4. Vzájemná závislost bodu měknutí metodou kroužek – kulička a penetrace jehlou.....	42
6.7. Souhrnná tabulka výsledků	43
7. Závěr	44
8. Citovaná literatura	46
9. Seznam obrázků	47
10. Seznam grafů	48
11. Seznam tabulek	49
12. Přílohy	50
12.1. Kompletní výsledky – Dynamický smykový reometr (DSR)	50

1. Úvod

Asfalt je jedna z živic, které se vyskytují v přírodě buď společně s jinými, nebo samostatně v různém geologickém prostředí, hlavně v sedimentech formací, které jsou známy jako naftonosné. Je to směs uhlovodíků, jejíž elasticko-viskózní chování se mění se změnou teploty. Jedná se o koloidní směs vysoce molekulárních uhlovodíků, v které je zastoupeno až kolem tisíce různých sloučenin. Ty se v zásadě rozdělují na tekuté složky (oleje, pryskyřice označované maltény) a pevné částice – asfaltény. (1)

Ropný asfalt se vyrábí destilací surové ropy jako vedlejší produkt při produkci plynů, paliv a olejů. Získává se z ropy jako zbytek po vakuové destilaci. Je to ta nejhustší složka ropy s nejvyšším bodem varu.

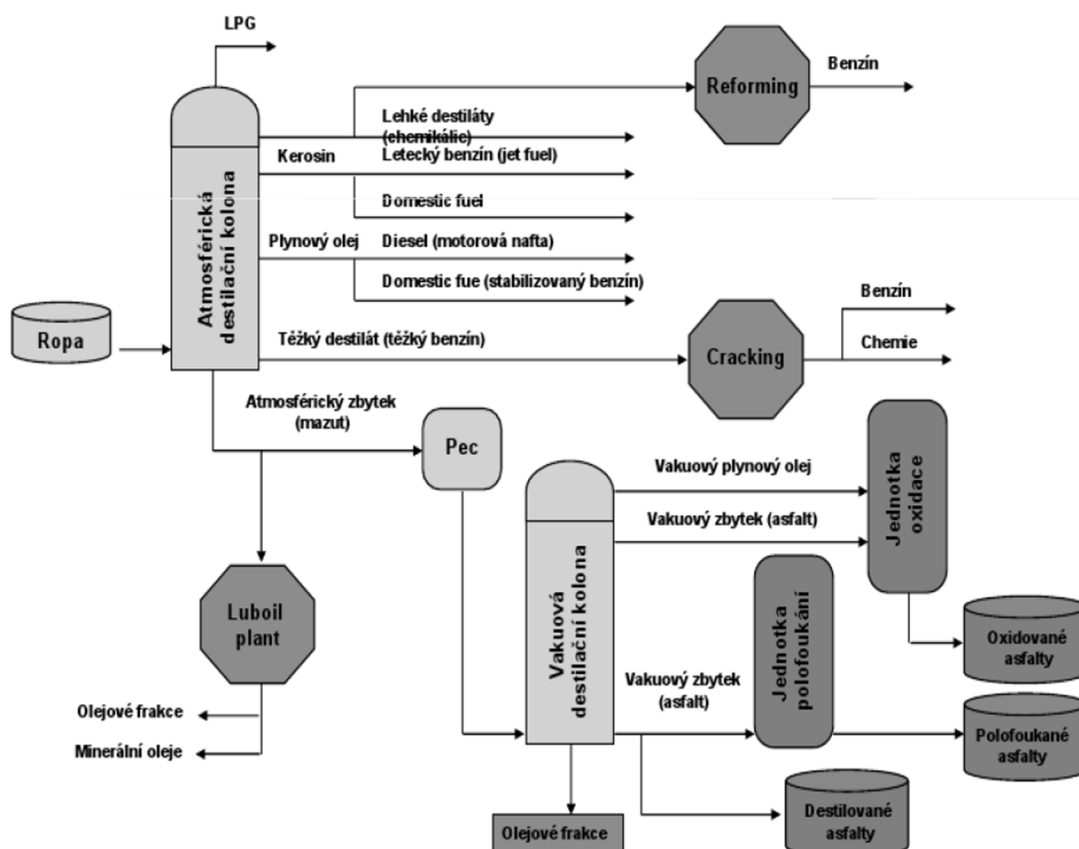
Největším zdrojem přírodních asfaltů je jezero Trinidad v karibské oblasti. Asfalt se z něj získává zahřátím na teplotu kolem 160 °C a prolitím přes síto se zachycením hrubých nečistot a organických zbytků. V Evropě se naleziště přírodního asfaltu nachází v Albánii v lokalitě Selenica. (2)

Asfaltová pojiva jsou opakovaně vystavována proměnlivým nepříznivým teplotám, ať už se jedná o teploty nízké nebo vysoké. Z důvodů proměnných vlivů je velmi důležitý návrh vhodných asfaltových pojiv. Pro zlepšení vlastností, můžeme použít pojiva modifikovaná, do kterých jsou přidány přísady polymeru, čímž byly změněny buď jejich chemické, nebo fyzikálně-mechanické vlastnosti. Modifikované asfalty se uplatňují hlavně na komunikacích s vysokým dopravním zatížením, na křižovatkách nebo mostech. Stupeň modifikace (obsah polymerní přísady) může být hodnocen některými laboratorními zkouškami, mezi které je možné zařadit i zkoušku *dynamické viskozity*, *penetraci jehlou*, nebo zkoušku *bodu měknutí*.

2. Rešerše literatury

Výroba asfaltů

Výroba asfaltů probíhá v rafinériích. Výrobní zařízení je třístupňové. Ropa se ze skladovacích nádrží čerpá přes výměníky do odsolovací stanice, kde se elektrostaticky odstraní převážný obsah solí. Pak se dostává do odpařovací kolony, kde se odstraní nejlehčí podíly a po dalším predehřátí v peci se nastříkuje do atmosférické destilační kolony, kde se oddestiluje kerosin, benzín, petrolej, oleje. Zbytek po destilaci je mazut. Mazut se vede přes vakuovou destilační kolonu, kde se dále oddestilují za podtlaku tři olejové frakce lišící se viskozitou, zbytkem je pak asfalt. Asfalt je tedy posledním produktem celého procesu. Takto získaný asfalt se může dále zpracovávat kontinuální oxidací nebo polofoukáním. Při oxidaci dochází ke změně struktury jednotlivých složek uhlovodíků, čímž je možné ovlivňovat některé požadované vlastnosti asfaltu. Tímto způsobem se vyrábí polofoukané asfalty. (1)



Obrázek 2.1 - Schéma vakuové destilace (3)

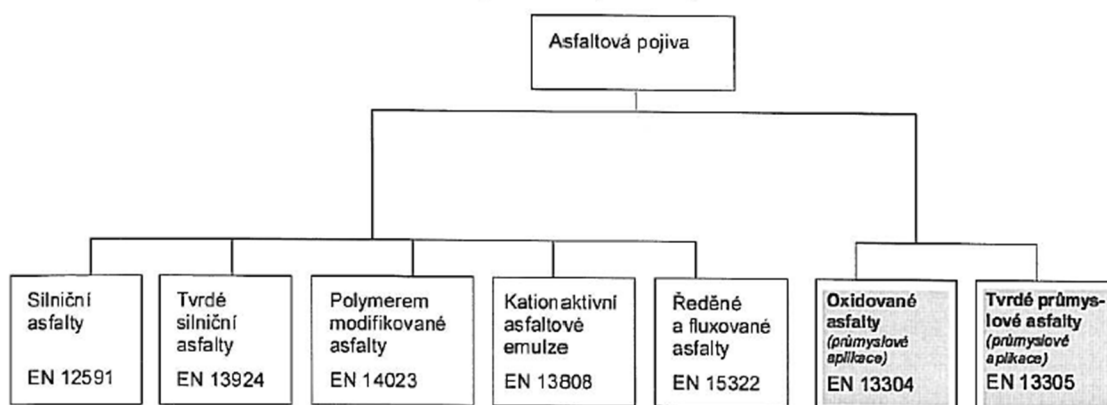
Pro použití v silničním stavitelství rozlišujeme asfalty:

- **destilační** jako asfalty získané přímo po destilaci vhodné pro použití v silničním stavitelství.
- **polofoukané** vyráběné z destilačních asfaltů umělým stárnutím, oxidací vakuového zbytku.
- **foukané** vyráběné z destilačních asfaltů umělým stárnutím, oxidací k získání vysoce viskózních asfaltů používaných v izolacích proti vodě a vlhkosti.
- **modifikované** – destilační nebo polofoukané asfalty jsou upraveny přídavkem přísad – v silničním stavitelství používané pro vysoce namáhané asfaltové směsi nebo pro a zálivky

Nejběžněji používaným typem modifikátorů jsou polymery, které je možné rozdělit do dvou hlavních kategorií:

- termosetické polymery, které nevratně tvrdnou při zahřátí a pro modifikace se běžně nepoužívají
- termoplastické polymery, které se při zahřátí stávají reversibilně plastickými.

Termoplastické polymery se dále dělí na elastomery a plastomery. Kromě konvenčních polymerních přísad je možné pro modifikaci asfaltového pojiva použít např. latex nebo pryžový granulát. (4)



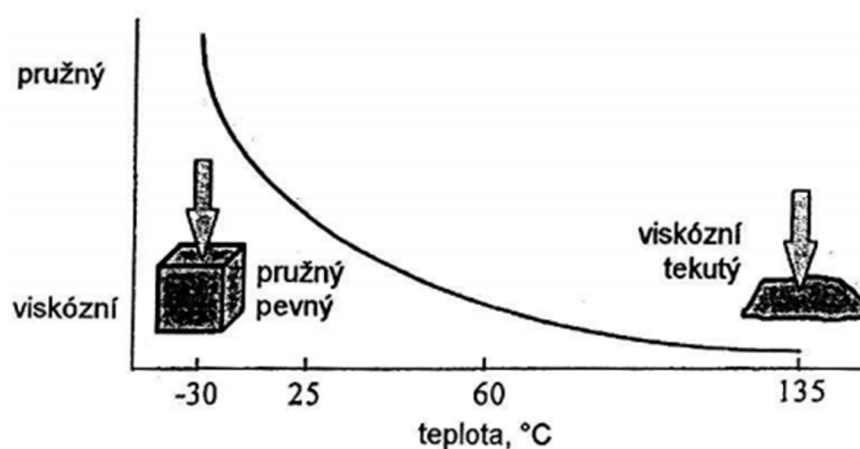
Obrázek 2.2 - Rozdělení asfaltů dle norem (5)

Charakteristické vlastnosti asfaltu

Nejdůležitější charakteristikou asfaltového pojiva je teplotní citlivost. Chování asfaltového pojiva je závislé na teplotě – výsledky kterékoli zkoušky asfaltového pojiva musí být vždy udávány s teplotním údajem. V této souvislosti je asfaltové pojivo označováno jako **viskoelastický** materiál - za nízkých teplot se chová jako pružná látka, za vysokých teplot jako kapalina charakterizovaná svou viskozitou. Za běžných teplot má asfaltové pojivo obojaké vlastnosti, tedy visko-elastické (viz obrázek 2.3).

Silový odpor proti deformaci, který je vyjádřen viskozitou, je úměrný rychlosti deformace, neboli podle délky zatížení a viskozity dochází k různé velikosti deformace. V souvislosti s použitím asfaltových pojiv do asfaltových směsí je zapotřebí zdůraznit zejména závislost chování asfaltových směsí na rychlosti zatížení, kde se viskózní složka asfaltového pojiva výrazně projeví:

- při nízkých rychlostech nebo stání vznikají velké deformace (autobusové zastávky, stoupací pruhy na dálnicích)
- při vysokých rychlostech malé deformace (1)



Obrázek 2.3 - Asfalt visko-elastický materiál (1)

Viskozita je základní veličinou v reologii, která charakterizuje tokové chování a určuje míru vnitřního odporu látky vůči vnějšímu zatížení, jinak řečeno odpor proti toku. Viskozitu je možné rozlišit na dynamickou a kinematickou, které jsou vzájemně závislé.

Dynamická viskozita

Dynamická viskozita je fyzikální veličinou, která vyjadřuje míru odporu k toku kapaliny. Kvantitativně ji lze popsat poměrem mezi tečným napětím a smykovou rychlostí (rychlostním gradientem) mezi dvěma teoretickými sousedními vrstvami. Tečné napětí (shear stress) je síla působící tangenciálně k povrchu dělená plochou povrchu. Smyková rychlost (shear rate) je gradient rychlosti v proudící tekutině udávaný kolmo k smykovému napětí. (6)

Viskozita kapaliny namáhané smykem mezi dvěma rovnoběžnými destičkami, které se vzájemně pohybují rovnoměrným přímočarým pohybem, je možné popsat Newtonovou rovnicí:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad \text{Rovnice 2.1}$$

τ ... smykové napětí [Pa]

η ... dynamická viskozita [Pa · s]

$\dot{\gamma}$... *smyková rychlost* [s^{-1}]

Rozměrem dynamické viskozity je (hmotnost)·(délka)⁻¹·(čas)⁻¹, tzn. $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} = N \cdot s \cdot m^{-2} = Pa \cdot s$ (mPa·s).

Pro nejjednodušší viskózní kapaliny – **newtonské kapaliny** se předpokládá platnost Newtonova viskózního zákona, tj. zákona o přímé úměrnosti mezi napětím a rychlostí deformace (viz rovnice 2.1). Dynamická viskozita je tedy konstantou, která není závislá na velikosti tečného napětí ani na smykové rychlosti.

Dále existují **neneutonské kapaliny**, pro něž je vztah mezi napětím a rychlostí deformace složitější. Poměr tečného napětí a smykové rychlosti není u těchto látek konstantní, ale závisí na hodnotě smykové rychlosti a označuje se jako zdánlivá viskozita nebo neneutonská viskozita. Údaj o hodnotě zdánlivé viskozity má význam pouze tehdy, je-li současně uvedena metoda měření a hodnota příslušného rychlostního gradientu.

Viskozita je závislá na teplotě; její hodnota se zvyšující se teplotou exponenciálně klesá. Zdánlivá viskozita závisí na rychlostním gradientu a často se projevuje i časová závislost, což je nutné při popisu teplotní závislosti zcela respektovat. (7)

3. Cíle bakalářské práce

Hlavním cílem bakalářské práce bude provést zkoušky stanovení dynamické viskozity asfaltových pojiv na dvou různých přístrojích: Rotační vřetenový viskozimetr a Dynamický smykový reometr (DSR) a následné porovnání výsledných viskozit. Zkouška bude provedena na pěti vzorcích asfaltových pojiv při teplotě 135 °C. Prvním vzorkem je silniční asfalt bez modifikace. Další pojiva jsou vzestupně polymerem modifikované a posledním vzorkem je asfalt modifikovaný pryžovým granulátem.

Doplňkovým úkolem bude provedení zkoušky stanovení penetrace jehlou a stanovení bodu měknutí metodou kroužek kulička. Budou porovnány výsledky a vzájemné vztahy, jak mezi penetrací jehlou a bodem měknutí, tak i vztahy vzhledem ke zkoušce stanovení dynamické viskozity.

Navíc oproti zadání bude sledován vliv smykových rychlostí na hodnoty dynamické viskozity, zejména na přístroji DSR.

Všechna měření byla provedena a vyhodnocena dle následujících norem.

- **ČSN EN 13302** – Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení dynamické viskozity asfaltových pojiv rotačním vřetenovým viskozimetrem
- **ČSN EN 13702** – Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení dynamické viskozity modifikovaných asfaltů metodou kužel a deska
- **ČSN EN 14770** – Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu – Dynamický smykový reometr (DSR)
- **ČSN EN 1426** – Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou
- **ČSN EN 1427** – Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek kulička
- **ČSN EN 12591** – Asfalty a asfaltová pojiva – Specifikace pro silniční asfalty
- **ČSN EN 14023** – Asfalty a asfaltová pojiva – Systém specifikace pro polymerem modifikované asfalty

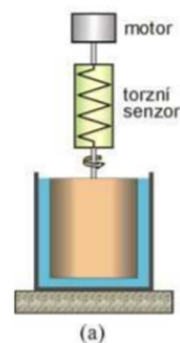
4. Použité zkušební metody

V následujícím textu bude vysvětlen princip a postup laboratorních zkoušek, který je dán v příslušných normách a předpisech. Popisovány budou zkoušky konvenční: stanovení dynamické viskozity, stanovení penetrace jehlou a stanovení bodu měknutí metodou kroužek a kulička.

4.1. Stanovení dynamické viskozity rotačním vřetenovým viskozimetrem podle ČSN EN 13302

4.1.1. Podstata metody

Torzní napětí, použité k otáčení vřetene (válce) ve zvláštní nádobce obsahující analytický vzorek, měří relativní odpor vřetene k otáčení a poskytuje míru viskozity vzorku. Měřicí geometrie rotačního viskozimetru je složena ze dvou soustředných válců, mezi kterými je úzká mezera vyplněná hodnocenou kapalinou. K získání aktuální dynamické viskozity při zkušební teplotě může být potřeba použít tvarový faktor. Některé asfaltové materiály se mohou za podmínek této metody vyznačovat nenewtonským chováním. Přestože hodnoty nenewtonské viskozity nejsou jednoznačnou vlastností materiálu, odrážejí chování tekutiny a měřicího systému. (6)



Obrázek 4.1 - princip viskozimetru

4.1.2. Přístroje a pomůcky

Rotační vřetenový viskozimetr – Brookfieldův viskozimetr: Měření dynamické viskozity s rotačním viskozimetrem na asfalty zahrnuje široký rozsah smykových rychlostí a viskozit. Za obvyklých zkušebních podmínek vyžaduje norma rotační viskozimetr s nádobkami na vzorek a rotační vřetena umožňující (minimální schopnosti). (6) Pro bakalářskou práci byl využit přístroj DV2TRV.

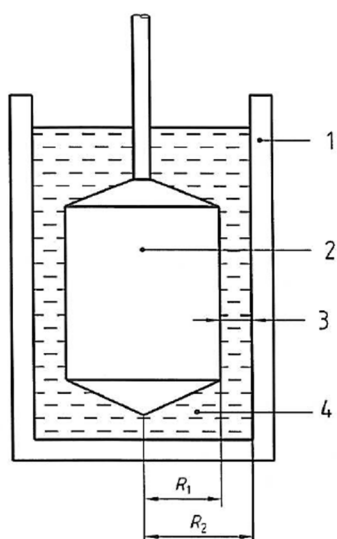
- Rozsah smykové rychlostí 1 s^{-1} až 10^4 s^{-1} (1 s^{-1} až 200 s^{-1})
- Rozsah dynamických viskozit $10^{-2} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ až $10^6 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ($10^{-2} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ až $10^3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$)
- Rozsah teplot $40 \text{ }^\circ\text{C}$ až $200 \text{ }^\circ\text{C}$

Vřetena: Vřeteno nebo sada vřeten k viskozimetru, které umožní pro zkoušené materiály měřit dynamické viskozity s přesností do $\pm 2 \%$ a nejméně rovné $\pm 5 \%$.

Nádobka na vzorek: Příslušná k rotačnímu vřetenovému viskozimetru, která umožní použít zařízení v sousém režimu a volbu smykové rychlosti.

Zařízení k regulaci teploty: Vodní nebo olejová lázeň nebo jiné vhodné zařízení. Vybrané zařízení musí být schopno regulovat teplotu s přesností $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Bylo využito zařízení Thermosel.

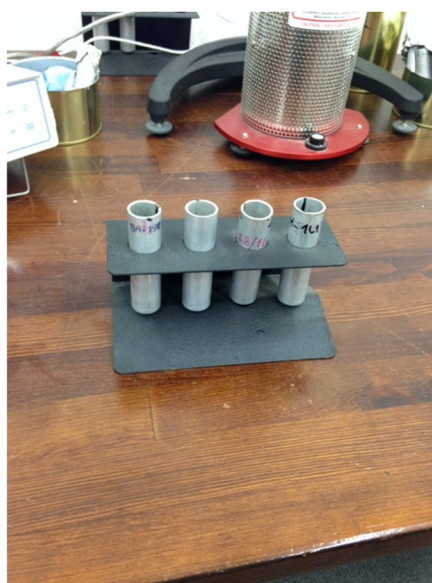
Sušárna: Větraná laboratorní, umožňující regulaci teplot v rozsahu $50 \text{ }^\circ\text{C}$ až $200 \text{ }^\circ\text{C}$ s přesností $\pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$.



Legenda

- 1 Nádobka na vzorek
- 2 Vřeteno
- 3 Tloušťka vrstvy měřeného vzorku
- 4 Zkoušený vzorek
- R_1 vnitřní poloměr (vřetene)
- R_2 vnitřní poloměr (nádobky na vzorek)

Obrázek 4.2 - Princip rotačního viskozimetru (8)



Obrázek 4.4 - Nádobky na vzorek



Obrázek 4.3 - Vřetena

4.1.3. Postup zkoušky

Příprava vzorku: Vzorek pojiva je umístěn do sušárny udržované při teplotě asi 80 °C nad očekávanou hodnotou bodu měknutí. Objem vzorku v nádobce se nesmí přeplnit nebo nedoplnit. Celková doba zahřívání nemá překročit 1 h 45 min.

Předehtívání: Zařízení k regulaci teploty se nastaví na požadovanou teplotu. Vřeteno se spojí s rotačním viskozimetrem a ponoří do prázdné nádoby umístěné v zařízení pro regulaci teploty. Vyčká se, až se dosáhne teplotní rovnováhy (cca 1 h). Nádobka na vzorek se vyjme ze zařízení na regulaci teploty a přidá se do ní vzorek v množství podle nádoby a použitého vřetena. Nádobka se vzorkem se umístí do zařízení na regulaci teploty. Do vzorku se ponoří vřeteno a dáváme zvýšený důraz na to, aby byl přístroj ve svislé poloze. Počká se, až se systém ustálí na zkušební teplotu. Během doby předehtívání se pohyblivá část (vřeteno) nechá otáčet malou smykovou rychlostí. Teplota se během zkoušky udržuje v rozsahu $\pm 1,0$ °C při měření nad 100 °C. Doba ohřevu je přibližně 15 min až 30 min, závislé na druhu materiálu. (6)

Měření: Teplota měření byla přednastavena na 135 °C. Nastaví se otáčení vřetene na požadovanou smykovou rychlost a nechá se ustálit po dobu 60 s. Potom se zaznamenají následující hodnoty:

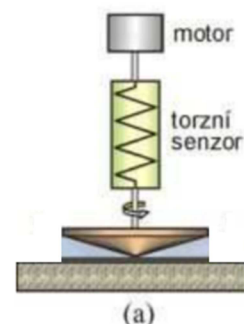
- kroutící moment
- viskozita
- smyková rychlost
- teplota

Vyjádření výsledků: Dynamická viskozita se spolu s dalšími údaji odečte z displeje přístroje v Pa·s nebo mPa·s. V našem případě se odečetli hodnoty viskozity při dvou různých smykových rychlostech – 6,8 s⁻¹; 13,6 s⁻¹ odpovídající rychlosti 20 ot/min; 40 ot/min u vřetene SC4-27 (širší) a 27,2 ot/min; 54,4 ot/min u vřetene SC4-29 (viz obrázek 4.3).

4.2. Stanovení dynamické viskozity metodou kužel – deska v dynamickém smykovém reometru podle ČSN EN 13702

4.2.1. Podstata metody

Na temperovanou zkušební soupravu, v níž je zkušební vzorek asfaltu, se aplikuje rotační smykové přetvoření. Měří se napěťová odezva pojiva na působící přetvoření. Měřicí systém dynamického smykového reometru je založen na rotační geometrii – systém kužel – deska, mezi kterými je rovnoměrně umístěn vzorek. Působením točivého momentu se kužel pohybuje.



Obrázek 4.5 - Princip DSR

4.2.2. Přístroje a pomůcky

Dynamický smykový reometr (DSR): S integrovaným systémem pro regulaci teploty. Reometr musí být vybaven paralelní geometrií kužel – deska s mezerou po celé ploše destičky. Systém pro regulaci teploty musí zahrnovat jak destičku, tak i kužel, aby vyloučil teplotní gradient mezi geometriemi. Kromě dynamické viskozity lze zkouškou na DSR získat také hodnoty komplexního smykového modulu G^* . Pro bakalářskou práci byl využit dynamický smykový reometr Kinexus Pro výrobce Malvern.

Sušárna: Větraná laboratorní, umožňující regulaci teplot v rozsahu 50 °C až 200 °C s přesností ± 5 °C. (9)

Formy, podložky: Pro přípravu vzorků. Používané formy nebo podložky musí být ze silikonu nebo obdobného materiálu, který nepřilne ke zkušebnímu vzorku.

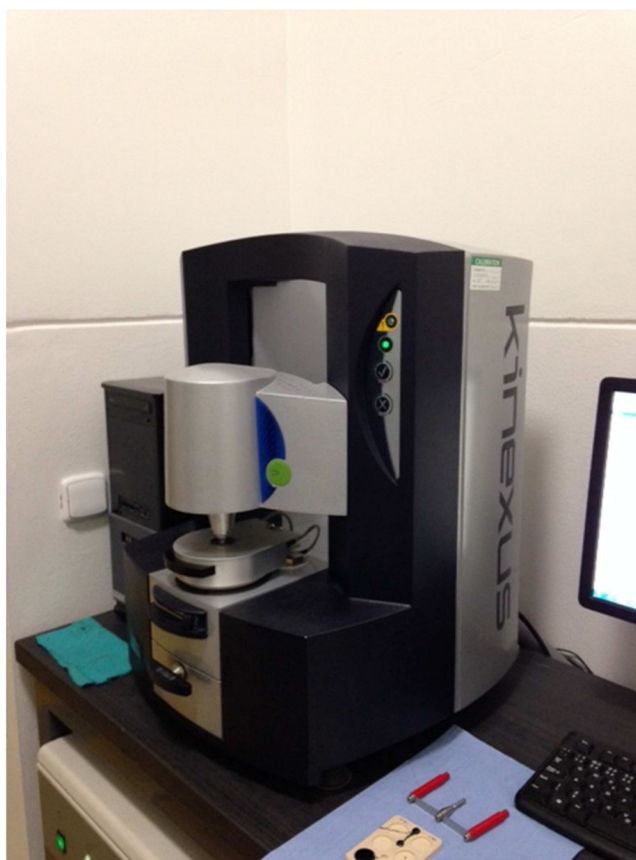


Obrázek 4.6 – Silikonová forma

4.2.3. Postup zkoušky

Příprava vzorku: Vzorek asfaltového pojiva se nahřeje a nalije do formy ze silikonu, která nepřilne ke zkušebnímu vzorku. Nepoužívají se žádné separační prostředky, které by mohly ovlivnit přilnavost vzorku ke geometrii reometru. Vzorek se nechá zchladnout na laboratorní teplotu.

Průběh měření: Připraví se geometrie kužel – deska průměru 40 mm a s úhlem stoupání kužele 4 °. Geometrie se před samotným měření očistí pomocí rozpouštědla a hadříku (viz obrázek 4.6). Spustí se horní geometrie na styk s dolní geometrií a nastaví se předehtívání na zkušební teplotu. Po nahřátí vyjede horní geometrie nahoru a na spodní geometrii je umístěn vzorek asfaltového pojiva. Následuje spuštění horní geometrie do požadované polohy – přednastavená tloušťka mezery mezi geometriemi. Přebytečné vytlačené pojivo se odstraní nahřátou špachtlí (viz obrázek 4.7). Nastaví se přesná zkušební teplota – 135 °C a zahájí se měření.

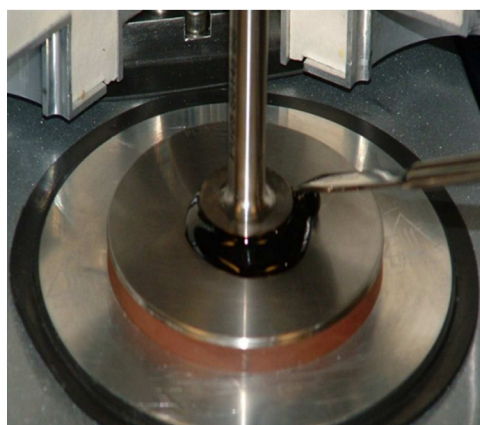


Obrázek 4.7 - Kinexus Pro při měření

Vyjádření výsledků: Naměřené hodnoty se pomocí programu R-space zaznamenají do souboru, z kterého je možné data převést do MS Excel pro zpracování výsledků. Pro účel této práce vybereme hodnotu dynamické viskozity v Pa·s nebo mPa·s při smykové rychlosti $6,3 \text{ s}^{-1}$ nebo lze aritmeticky zprůměrovat odečtené viskozity při různých smykových rychlostech – $1,0 \text{ s}^{-1}$ až 100 s^{-1} .



Obrázek 4.8 - Očištění geometrie (10)

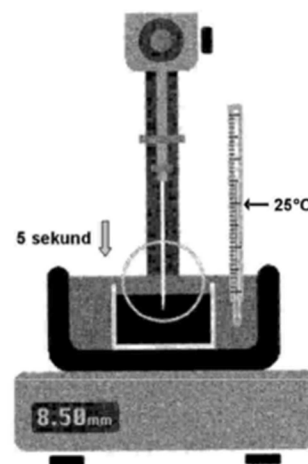


Obrázek 4.9 – Seškrábnutí přebytečného pojiva (10)

4.3. Penetrace jehlou

4.3.1. Podstata metody

Podstatou metody je zaměření průniku normalizované jehly do vytemperovaného analytického vzorku. Zkušební podmínky pro penetraci jsou: teplota $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$, aplikované zatížení 100 g a doba zatížení 5 s . Lze použít i jiné podmínky odrážející rozličné účely. (8)



Obrázek 4.10 - Princip penetrometru (3)

4.3.2. Přístroje a pomůcky

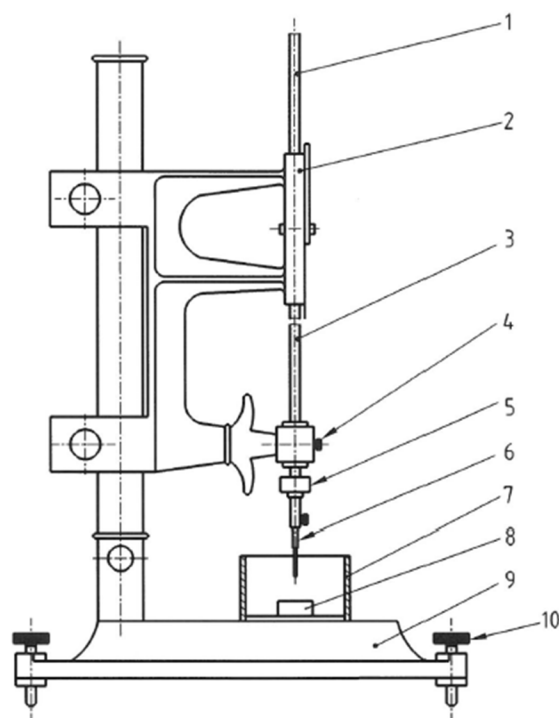
Penetrometr: Přístroj, u kterého se držák jehly pohybuje ve svislém směru bez měřitelného tření a umožňuje stanovit penetraci jehly na nejbližších $0,1 \text{ mm}$. Držák jehly musí vážit $(47,50 \pm 0,05) \text{ g}$. K dispozici musí být závaží o hmotnosti $(50,00 \pm 0,05) \text{ g}$ vhodné k připevnění k držáku jehly. Podstavec, na kterém je umístěn kelímek se vzorkem, musí být plochý a vodorovný.

Penetrační jehla: Vyrobená z plně tvrzené, popuštěné a leštěné korozivzdorné oceli. Tělo jehly má průměr 1,00 mm a jeden konec je symetricky zkosený broušením do kužele. Jehla je pevně upevněna v koncovce z mosazi tak, aby zasahovala dovnitř koncovky. Koncovka a jehla musí mít dohromady hmotnost $(2,50 \pm 0,05)$ g.

Kelímek na zkušební vzorek: Kovová nebo skleněná válcová nádobka s plochým dnem. Vnitřní hloubka nádobky musí odpovídat obsahu asfaltového vzorku, jehož hloubka musí být nejméně o 10 mm větší než předpokládaná penetrace. Její vnitřní průměr musí být nejméně 55 mm a ne více než 70 mm.

Vodní lázeň: Lázeň s konstantní teplotou s kapacitou nejméně 10 l a schopná udržovat teplotu vzorku v rozmezí $\pm 0,15$ °C. Doporučuje se v lázni použít destilovanou vodu.

Další pomůcky: Přenosná miska, zařízení na měření teploty a zařízení na měření času schopné měření okamžitého uvolnění zařízení a trvání zkoušky s přesností na 0,1. (8)



Legenda:

- 1 vřeteno
- 2 stupnice
- 3 držák jehly
- 4 uvolňovací zařízení
- 5 50 g závaží
- 6 jehla a koncovka
- 7 přemísťovací miska s plochým dnem
- 8 kelímek se zkušebním vzorkem
- 9 podkladní deska
- 10 stavěcí šroub

Obrázek 4.11 - Příklad penetrometru (8)

4.3.3. Postup zkoušky

Příprava vzorku: Vzorek se zahřeje asi 90 °C nad bod měknutí a nalije se do nádoby na vzorky, kdy jeho výška musí být větší minimálně o 10 mm než hloubka předpokládaného průniku jehly. Vzorek se nechá chladit na teplotu mezi 15 °C až 30 °C dle hloubky 1 – 1,5 hodiny.

Průběh měření: Připraví se měřící zařízení. Držák a jeho vodící zařízení se zkontroluje, zda je očištěn od nečistot a jestli se volně pohybuje ve svém zařízení. Penetrační jehla se očistí toluenem, osuší hadříkem a vloží se do držáku. Vynuluje se číselník pro měření penetrace v penetračních jednotkách. Čas určující trvání doby zatížení se nastaví na 5 s. Nádoba se vzorkem se umístí do lázně o teplotě 25 °C ± 0,15 °C. Jehla se přiblíží na těsný kontakt s měřeným vzorkem a spustí se měření – uvolnění závaží s jehlou. Měření se odečte na stupnici a zapíše. Pro každé další měření se jehla vyjme a očistí. Postup se opakuje minimálně třikrát při dodržení vzdáleností vpichů mezi sebou a okrajem kelímku alespoň 10 mm.

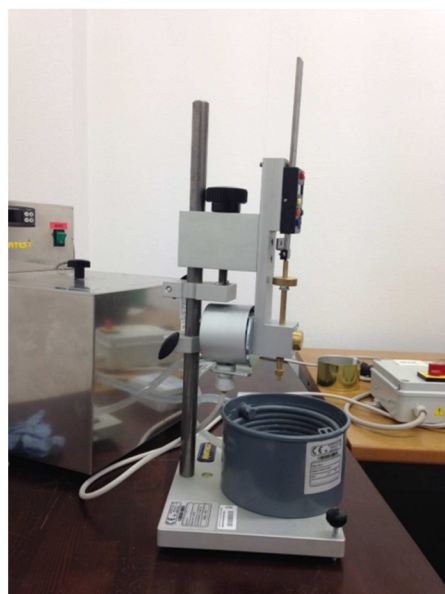
Vyjádření výsledků: Hodnoty penetrace se vyjádří jako aritmetický průměr hodnot akceptovatelných stanovení (viz tabulka 3.1) v desetinách milimetru zaokrouhleny na nejbližší celé číslo. (8)

Tabulka 4.1 - Maximální rozdíl platných stanovení (8)

Penetrace [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



Obrázek 4.12 – Penetrometr

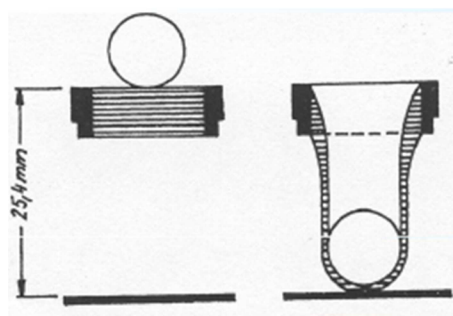


Obrázek 4.13 – Penetrometr

4.4. Bod měknutí metodou kroužek kulička

4.4.1. Podstata metody

Dva kotoučky z asfaltového pojiva, odlité v mosazných kroužcích s osazením, se zahřívají řízenou rychlostí v kapalinové lázni, přičemž na každém z nich je umístěna ocelová kulička. Bod měknutí se zaznamená jako průměr teplot, při kterých oba kotoučky změknou natolik, aby umožnily každé z kuliček, obalených v asfaltovém pojivu, propadnout o vzdálenost $(25,0 \pm 0,4)$ mm. (11)



Obrázek 4.14 - Princip bodu měknutí (3)

4.4.2. Přístroje a pomůcky

Kroužky: Dva mosazné kroužky (viz obrázek 4.15 – c))

Odlévací destička: Rovný, hladký plech přibližně 50 mm x 75 mm a 2,0 mm tloušťky s dolů zahnutými hranami.

Kuličky: Dvě z korozi-vzdorné oceli, o průměru $(9,50 \pm 0,05)$ mm, každá o hmotnosti $(3,50 \pm 0,05)$ g.

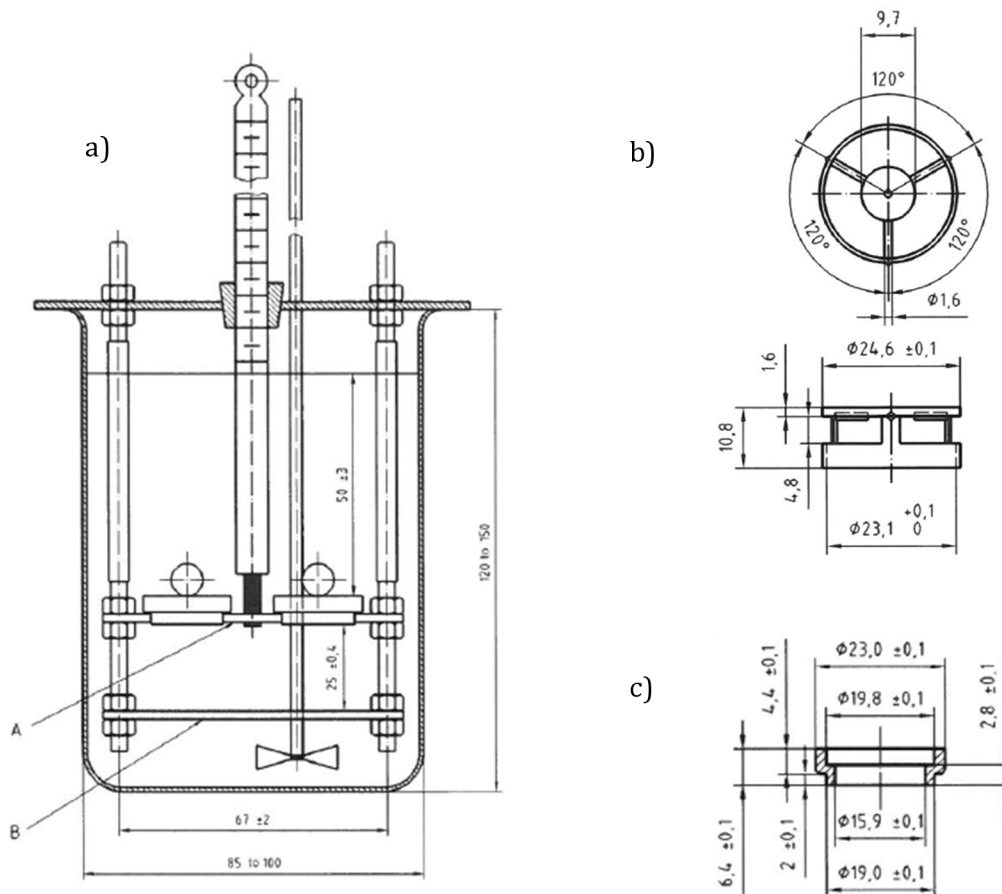
Držák kroužků a sestava: Držák z korozi-vzdorné oceli nebo mosazi k upevnění kroužků ve vodorovné poloze, upnutý v sestavě (viz obrázek 4.15 – a)). Spodní hrana kroužků s osazením v držáku musí být $(25,0 \pm 0,4)$ mm nad horním povrchem základní desky.

Středící prstence pro kuličky: Dva mosazné prstence na středění kovových kuliček, každý pro jeden kroužek (viz obrázek 4.15 – b)).

Lázeň: Skleněná kádinka, kterou je možno zahřívát, s vnitřním průměrem nejméně 85 mm a výškou nejméně 120 mm.

Míchadlo: Vrtulové nebo magnetické míchadlo s topnou plotýnkou s vhodně obalenou míchací tyčinkou délky přibližně 40 mm a průměru 8 mm k zajištění rovnoměrného rozdělení tepla v lázni.

Zařízení na měření teploty: Obsahující senzor a odečítací jednotku. (11)



Obrázek 4.15 – a) Sestava dvou kroužků s držákem a základní deskou b) Středící prstenec pro kuličku c) kroužek (11)

4.4.3. Postup zkoušky

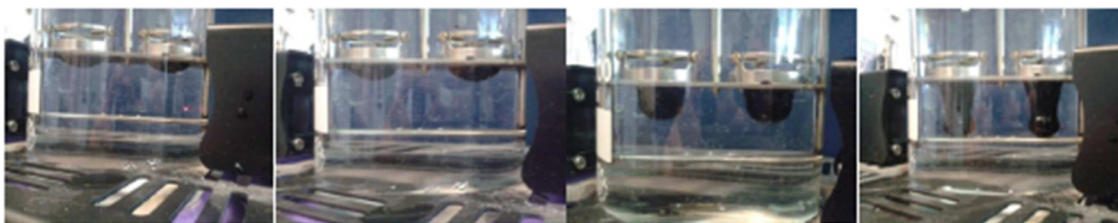
Příprava před měřením: Dva mosazné kroužky se zahřejí na teplotu cca 90 °C nad předpokládaný bod měknutí a umístí se na odlévací destičku pokrytou separačním postříkem. Do každého kroužku se nalije mírný přebytek zahřátého asfaltu a vzorky se chladí při laboratorní teplotě nejméně 30 minut. Po zchladnutí vzorků, se odřízne nadbytečné asfaltové pojivo nahřátým nožem tak, aby povrch vzorku byl zarovnan s okrajem kroužku.

Průběh měření: Nejprve se zvolí kapalina lázně dle předpokládaného bodu měknutí: Pro body měknutí pod 80 °C se použije destilovaná voda s počáteční teplotou lázně (5 ± 1) °C a pro body měknutí nad 80 °C se použije glycerin s počáteční teplotou lázně (30 ± 1) °C. Sestaví se přístroj s kroužky naplněnými vzorky, středícím zařízením pro kuličky a zasazeným teploměrem. Lázeň se naplní tak, aby povrch lázně byl (50 ± 3) mm nad horním okrajem kroužků. Kádinka s lázní se umístí do ledové vody, aby zchladla na teplotu 5 °C (vodní lázeň) nebo se mírně ohřeje na teplotu 30 °C (glycerinová lázeň). Poté se kádinka umístí do zkušebního přístroje. Kapalina v lázni se míchá a zespodu zahřívá tak, aby teplota stoupala rovnoměrně rychlostí 5 °C/min. (11) Průběh zkoušky trvá tak dlouho, dokud se kulička obalená v pojivu nepropadne (viz obrázek 3.13).



Obrázek 4.16 - Přístroj pro stanovení bodu měknutí KK

Vyjádření výsledků: Po propadu kuliček přístroj automaticky zaznamená teploty obou propadů, které se nesmí lišit o více než 1 °C pro bod měknutí do 80 °C a o více jak 2 °C pro bod měknutí nad 80 °C. Výsledná hodnota pro bod měknutí nižší nebo rovný 80 °C se vyjádří jako průměr teplot zaokrouhlený na nejbližší 0,2 °C a bod měknutí nad 80 °C se vyjádří jako průměr teplot zaokrouhlený na nejbližší 0,5 °C. (11)



Obrázek 4.17 - Průběh zkoušky kroužek kulička (12)

5. Použité materiály

K provedení laboratorních zkoušek byla použita následující asfaltová pojiva. Všechny vzorky budou podrobeny výše uvedeným laboratorním zkouškám.

Tabulka 5.1 - Použitá asfaltová pojiva

Asfalt	50/70	45/80-65	45/80-75	45/80-85	25/55-60
Č. vzorku	1	2	3	4	5
Výrobce	Total	OMV	Total	Total	Gumoasfalt

5.1. 50/70 Total

Vzorek č. 1 gradace 50/70 od výrobce Total Česká republika s.r.o. je silniční asfalt a jediný nemodifikovaný vzorek.

Tabulka 5.2 – Požadované vlastnosti 50/70 dle ČSN EN 12591

Parametr	Jednotka	Požadavek		Zkušební metoda
		min	max	
Penetrace jehlou	0,1 mm	50	70	ČSN EN 1426
Bod měknutí KK	°C	46	54	ČSN EN 1427

5.2. PmB 45/80-65 OMV

Vzorek č. 2 je polymerem modifikovaný asfalt gradace 45/80-65 s názvem produktu Starfalt® PmB 45/80-65 od výrobce OMV Česká republika s.r.o.

Tabulka 5.3 – Požadované vlastnosti 45/80-65 dle ČSN EN 14023

Parametr	Jednotka	Požadavek		Zkušební metoda
		min	max	
Penetrace jehlou	0,1 mm	45	80	ČSN EN 1426
Bod měknutí KK	°C	≥65		ČSN EN 1427

5.3. PmB 45/80-75 Total

Vzorek č. 3 je polymerem modifikovaný asfalt gradace 45/80-75 od výrobce Total Česká republika s.r.o.

Tabulka 5.4 - Požadované vlastnosti 45/80-75 dle ČSN EN 14023

Parametr	Jednotka	Požadavek		Zkušební metoda
		min	max	
Penetrace jehlou	0,1 mm	45	80	ČSN EN 1426
Bod měknutí KK	°C	≥75		ČSN EN 1427

5.4. PmB 45/80-85 Total

Vzorek č. 4 je asfalt s nejvyšším stupněm modifikace gradace 45/80-75 od výrobce Total Česká republika s.r.o.

Tabulka 5.5 - Požadované vlastnosti 45/80-85 dle ČSN EN 14023

Parametr	Jednotka	Požadavek		Zkušební metoda
		min	max	
Penetrace jehlou	0,1 mm	45	80	ČSN EN 1426
Bod měknutí KK	°C	≥85		ČSN EN 1427

5.5. CRmB 25/55-60 Gumoasfalt

Vzorek č. 5 je asfalt modifikovaný pryžovým granulátem od výrobce Gumoasfalt s.r.o. Je to asfaltové pojivo složené ze silničního asfaltu a pryžového granulátu.

Tabulka 5.6 - Požadované vlastnosti 25/55-60 dle ČSN EN 14023

Parametr	Jednotka	Požadavek		Zkušební metoda
		min	max	
Penetrace jehlou	0,1 mm	25	55	ČSN EN 1426
Bod měknutí KK	°C	≥60		ČSN EN 1427

Tabulka 5.7 - Specifikace vlastností pro silniční asfalty s penetrací od 30 x 0,1 mm do 220 x 0,1 mm (13)

Tab	Vlastnosti	Zkušební metoda	Jednotka	30/45	35/50	50/70	70/100	100/150	160/220
1A	Penetrace při 25 °C	EN 1426	0,1 mm	30 – 45	35 – 50	50 – 70	70 – 100	100 – 150	160 – 220
	Bod měknutí	EN 1427	°C	52 – 60	50 – 58	46 – 54	43 – 51	39 – 47	35 – 43
	Odolnost proti stárnutí při 163 °C (RTFOT)	EN 12607-1							
	Změna hmotnosti		%	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,8	≤ 0,8	≤ 1,0
	Zbýlá penetrace		%	≥ 53	≥ 53	≥ 50	≥ 46	≥ 43	≥ 37
	Zvýšení bodu měknutí		°C	≤ 11	≤ 11	≤ 11	≤ 11	≤ 12	≤ 12
	Bod vzplanutí	EN ISO 2592	°C	≥ 240	≥ 240	≥ 230	≥ 230	≥ 230	≥ 220
1B	Rozpustnost	EN 12592	%	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0
1B	Bod lámavosti podle Fraasse	EN 12593	°C	≤ -5	≤ -5	≤ -8	≤ -10	≤ -12	≤ -15

Tabulka 5.8 - Specifikace vlastností polymerem modifikovaných asfaltů (PMB) v České republice (5)

Tab.	Vlastnost	Metoda zkoušení	Jednotky	Specifikace druhu PMB								
				25/55-60	25/55-65	45/80-50	45/80-55	45/80-60	45/80-65	40/100-65	40/100-75	120/200-40
1A	Penetrace při 25 °C	EN 1426	0,1 mm	25 – 55	25 – 55	45 – 80	45 – 80	45 – 80	45 – 80	40 – 100	40 – 100	120 – 200
	Bod měknutí	EN 1427	°C	≥ 60	≥ 65	≥ 50	≥ 55	≥ 60	≥ 65	≥ 65	≥ 75	≥ 40
	Koheze – silová duktilita; smluvní energie při teplotě:	EN 13589 EN 13703	J/cm ²	≥ 2 (10 °C)	≥ 3 (10 °C)	≥ 1 (5 °C)	≥ 2 (5 °C)	≥ 3 (5 °C)	≥ 3 (5 °C)	≥ 2 (5 °C)	≥ 3 (5 °C)	≥ 1 (0 °C)
	Odolnosti proti stárnutí:	EN 12607-1										
	– zbylá penetrace		%	≥ 60	≥ 60	≥ 60	≥ 60	≥ 60	≥ 60	≥ 60	≥ 60	≥ 60
	– zvýšení bodu měknutí		°C	≤ 8	≤ 10	≤ 8	≤ 8	≤ 10	≤ 10	≤ 8	≤ 10	≤ 8
	– změna hmotnosti	%	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,3	≤ 0,3	≤ 0,5
Bod vzplanutí	ISO 2592	°C	≥ 235	≥ 235	≥ 235	≥ 235	≥ 235	≥ 235	≥ 235	≥ 235	≥ 235	
1B	Bod lámavosti	EN 12593	°C	≤ -12	≤ -12	≤ -12	≤ -15	≤ -15	≤ -15	≤ -15	≤ -18	≤ -18
	Vratná duktilita při 25 °C	EN 13398	%	TBR	TBR	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	TBR
	Vratná duktilita při 10 °C	EN 13398	%	NR	NR	NR	NR	TBR	TBR	TBR	TBR	NR
1C	Rozsah plasticity	viz čl. 5.2.8.4.	°C	TBR	TBR	TBR	TBR	TBR	TBR	TBR	TBR	TBR
	Pokles bodu měknutí po EN 12607-1	EN 1427	°C	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
	Vratná duktilita při 25 °C po EN 12607-1	EN 13398	%	TBR	TBR	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	TBR
	Vratná duktilita při 10 °C po EN 12607-1	EN 13398	°C	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
	Skladovací stabilita Rozdíl bodu měknutí	EN 13399 EN 1427	°C	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5
	Skladovací stabilita Rozdíl v penetraci	EN 13399 EN 1426	0,1 mm	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR

6. Výsledky zkoušek

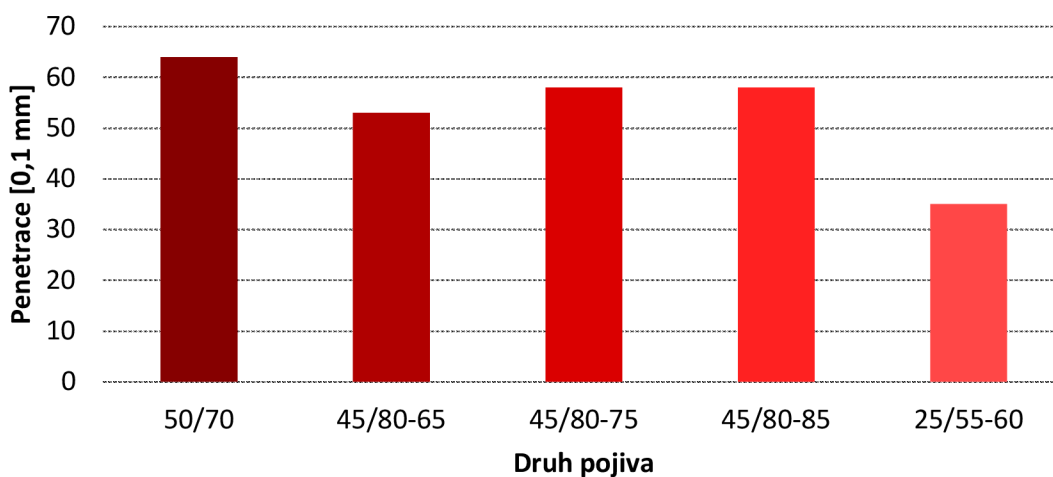
V následující kapitole jsou zaznamenány výsledky, porovnání a vzájemné vztahy všech provedených zkoušek. Výsledky jsou znázorněny v tabulkách a grafech.

6.1. Stanovení penetrace jehlou

Zkouška penetrace je podrobně vysvětlena v kapitole 4.3. Na každém vzorku byly při předepsaných podmínkách provedeny čtyři měření a jejich následné zprůměrování je uvedeno v tabulce 6.1. a grafu 6.1. Naměřené hodnoty vyhovují mezím penetrace dle norem ČSN EN 14023, ČSN EN 12591.

Tabulka 6.1 - Výsledky penetrace jehlou

Asfaltové pojivo	50/70	45/80-65	45/80-75	45/80-85	25/55-60
Penetrace [0,1 mm]	64	53	58	58	35



Graf 6.1 - Výsledky penetrace jehlou

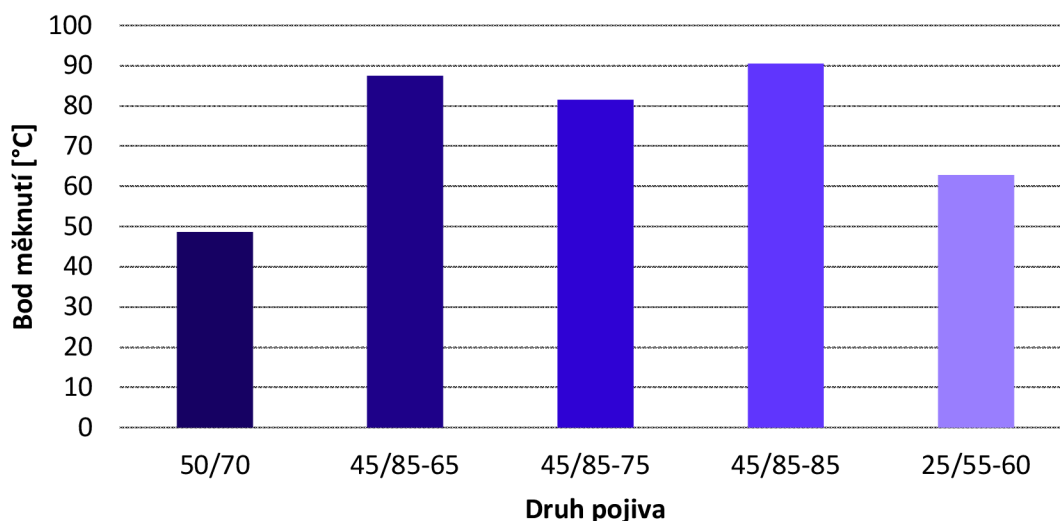
Z grafu je patrné, že výsledné hodnoty penetrace jehlou jsou závislé na druhu pojiva. Všechna pojiva splnila garantované rozmezí penetrace. Logicky nejvyšší hodnota penetrace byla naměřena u silničního asfaltu 50/70 bez modifikace a nejnižší u asfaltu s modifikací pryžovým granulátem. U vzorku č. 2, polymerem modifikovaný asfalt 45/80-65, byla očekávána vyšší hodnota penetrace, což potvrzuje nadměru modifikátoru – předimenzování asfaltového pojiva.

6.2. Stanovení bodu měknutí metodou kroužek – kulička

Zkouška stanovení bodu měknutí metodou kroužek – kulička je podrobně vysvětlena v kapitole 4.4. Výsledné hodnoty pro bod měknutí pod 80 °C jsou zaokrouhleny na nejbližších 0,2 °C a pro bod měknutí nad 80 °C na nejbližších 0,5 °C (viz tabulka 6.2 a graf 6.2). Naměřené hodnoty vyhovují minimálním požadavkům pro bod měknutí dle norem ČSN EN 14023, ČSN EN 12591.

Tabulka 6.2 - Výsledky bodu měknutí KK

Asfaltové pojivo	50/70	45/85-65	45/85-75	45/85-85	25/55-60
Bod měknutí [°C]	48,6	87,5	81,5	90,5	62,8
Rezerva [°C]	2,6	22,5	6,5	5,5	2,8



Graf 6.2 - Výsledky bodu měknutí KK

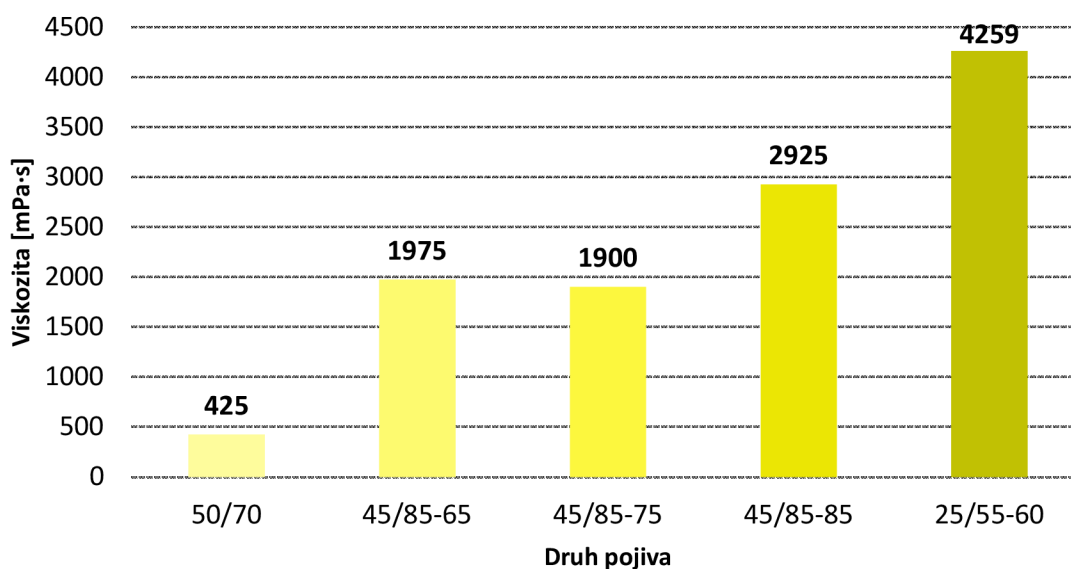
Z grafu je zřejmé, že výsledné hodnoty bodu měknutí jsou závislé na druhu pojiva. Všechna pojiva splnila minimální garantovanou teplotu bodu měknutí. V tabulce 6.2 je rovněž uvedena hodnota, o kterou je bod měknutí vyšší, než je požadavek dané gradace pojiva. Nejmenší rezerva mezi garantovaným a skutečně naměřeným bodem měknutí vychází u silničního asfaltu 50/70 2,6 °C, naopak největší rezervu má polymerem modifikované pojivo 45/85-65 OMV 22,5 °C, což je značně velký rozdíl a tím opět potvrzuje vysoké množství modifikátoru. Pokud by byly splněny další požadavky normy ČSN EN 14023 (které ovšem nejsou náplní této práce), bylo by možné toto pojivo považovat za gradaci 45/80-85.

6.3. Stanovení dynamické viskozity – Rotační vřetenový viskozimetr

Měření bylo provedeno na přístroji Brookfieldův viskozimetr DV2TRV při teplotě 135 °C. Zkouška je podrobně vysvětlena v kapitole 4.1. U každého vzorku byla provedena dvě měření: Pro smykovou rychlost 6,8 s⁻¹ – výchozí hodnoty dynamické viskozity, a pro smykovou rychlost 13,6 s⁻¹ - hodnoty dynamické viskozity pro doplňkové porovnání závislosti vlivu smykové rychlosti na viskozitu (viz tabulka 6.3).

Tabulka 6.3 - Výsledky Brookfieldův viskozimetr

Asfaltové pojivo		50/70		45/80-65		45/80-75		45/80-85		25/55-60	
Č. vzorku		1		2		3		4		5	
Vřeteno		SC4-27		SC4-27		SC4-27		SC4-27		SC4-29	
Rychlost	[ot/min]	20,0	40,0	20,0	40,0	20,0	40,0	20,0	40,0	27,2	54,4
Teplota	[°C]	134,7	134,9	134,9	134,9	134,9	134,8	134,7	134,7	135,1	135,0
Smyk. rychlost	[s ⁻¹]	6,8	13,6	6,8	13,6	6,8	13,6	6,8	13,6	6,8	13,6
Tečné napětí	[N/m ²]	2,9	5,8	13,4	27,3	12,9	26,0	19,9	40,0	28,8	54,5
Točivý moment	[%]	3,4	6,8	15,8	32,1	15,2	30,6	23,4	47,1	11,5	21,8
Viskozita	[mPa·s]	425	425	1975	2006	1900	1913	2925	2944	4259	4037



Graf 6.3 - Výsledky Brookfieldův viskozimetr

Z grafu je zřejmé, že výsledné hodnoty dynamické viskozity, stanovené při smykové rychlosti $6,8 \text{ s}^{-1}$, závisí na druhu pojiva. Nejnižší hodnota byla podle předpokladu zjištěna u silničního asfaltu 50/70 bez modifikace a naopak nejvyšší hodnotu vykazuje silniční asfalt modifikovaný pryžovým granulátem 25/55-60. Dá se říci, že s rostoucí gradací roste viskozita, až na vzorek č. 2 – 45/80-65 OMV, který vybočuje z řady. To je pravděpodobně způsobeno přidáním většího množství modifikační přísady, než bylo pro gradaci 45/80-65 nutné. To potvrzuje i výsledek zkoušky bodu měknutí (viz předchozí kapitola). U vzorku č. 5 – 25/55-60 bylo použito užší vřeteno SC4-29 (oproti vzorkům 1 až 4 – vřeteno SC4-27) z důvodu měřicího rozsahu vřetene a možného zkreslení výsledků třením drceného granulátu mezi nádobkou a vřetenem.

Při zvýšení smykové rychlosti na dvojnásobek ($13,6 \text{ s}^{-1}$) nedošlo u silničního asfaltu ke změně hodnoty dynamické viskozity, z čehož je možné usuzovat, že se jedná o Newtonskou látku. Oproti tomu došlo u polymerem modifikovaných asfaltů ke zvýšení dynamické viskozity, z čehož lze usuzovat, že se jedná o Nenevtonské dilatantní látky. Tento nárůst byl ovšem jen mírný. U asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem se s nárůstem smykové rychlosti snižovala dynamická viskozita, z čehož bylo možné usuzovat, že se jedná o pseudoplastickou kapalinu.

Podle amerického předpisu SHRP se pro silniční asfalty a polymerem modifikované asfalty požaduje hodnota dynamické viskozity z rotačního vřetenového viskozimetru (Brookfield) při teplotě $135 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a smykové rychlosti $6,8 \text{ s}^{-1}$ maximálně $3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$. Požadavek splňují všechna použitá pojiva kromě asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem, pro který platí zvláštní předpisy.

6.4. Stanovení dynamické viskozity – Dynamický smykový reometr

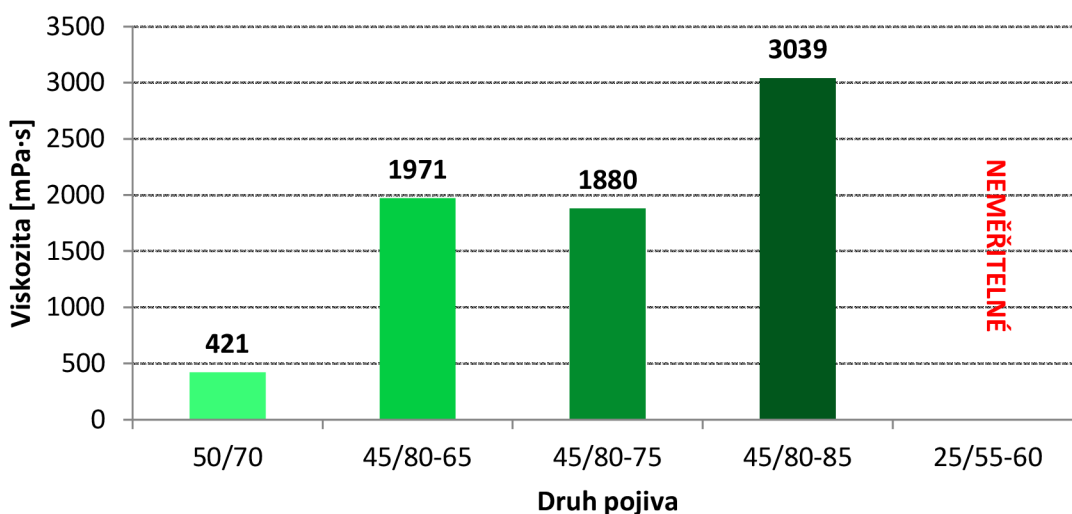
Měření bylo provedeno na přístroji Kinexus Pro se zkušební teplotou 135 °C. Zkouška je podrobně vysvětlena v kapitole 4.2. U každého vzorku bylo provedeno jedno měření s tím, že přístroj zaznamenává automaticky hodnoty viskozit do souboru při smykové rychlosti 1 s⁻¹ až 100 s⁻¹ (viz tabulka 6.4 a příloha 12.1). Pro účel porovnání bude výchozí hodnota dynamické viskozity při smykové rychlosti 6,3 s⁻¹, což je nejbližší hodnota smykové rychlosti ze zkoušky dynamické viskozity v Brookfieldově viskozimetru. Výsledky jsou shrnuty v tabulce 6.5 a grafu 6.4.

Tabulka 6.4 - Hodnoty zaznamenané přístrojem DSR pro vzorek č. 1

Vzorek č. 1 - 50/70							
indx	t(s)	T(°C)	σ (Pa)	γ .(s ⁻¹)	η (mPa·s)	g(mm)	τ (N m)
1	20,1	135,0	0,4	1,0	412	1,50E-01	6,90E-06
2	44,6	135,0	0,5	1,3	426	1,50E-01	8,98E-06
3	104,6	135,0	0,7	1,6	422	1,50E-01	1,12E-05
4	155,1	135,0	0,8	2,0	419	1,50E-01	1,40E-05
5	215,1	135,1	1,1	2,5	424	1,50E-01	1,78E-05
6	236,3	135,1	1,3	3,2	421	1,50E-01	2,23E-05
7	257	135,1	1,7	4,0	420	1,50E-01	2,80E-05
8	317	135,0	2,1	5,0	422	1,50E-01	3,55E-05
9	341	135,0	2,7	6,3	421	1,50E-01	4,46E-05
10	361,1	135,0	3,4	7,9	422	1,50E-01	5,62E-05
11	421,1	135,0	4,2	10,0	419	1,50E-01	7,02E-05
12	441,2	135,0	5,3	12,6	424	1,50E-01	8,95E-05
13	461,3	135,0	6,7	15,9	425	1,50E-01	1,13E-04
14	481,4	135,0	8,5	20,0	425	1,50E-01	1,42E-04
15	501,5	135,0	10,7	25,1	425	1,50E-01	1,79E-04
16	521,6	135,0	13,4	31,6	425	1,50E-01	2,25E-04
17	541,7	135,0	16,9	39,8	426	1,50E-01	2,84E-04
18	561,8	135,0	21,4	50,1	428	1,50E-01	3,59E-04
19	597,8	135,0	27,0	63,1	428	1,50E-01	4,53E-04
20	617,9	135,0	34,1	79,4	429	1,50E-01	5,71E-04
21	638	135,0	42,8	100,0	428	1,50E-01	7,16E-04

Tabulka 6.5 - Výsledky DSR (smyková rychlost $6,3 \text{ s}^{-1}$)

Asfaltové pojivo		50/70	45/80-65	45/80-75	45/80-85	25/55-60
Č. vzorku		1	2	3	4	5
Ø kužele	[mm]	40	40	40	40	40
Teplota	[°C]	135,0	135,0	135,0	135,0	NEMĚŘITELNÉ
Smyková rychlost	[s^{-1}]	6,3	6,3	6,3	6,3	
Tečné napětí	[N/mm^2]	2,7	12,4	11,9	19,2	
Viskozita	[$\text{mPa}\cdot\text{s}$]	421	1971	1880	3039	



Graf 6.4 - Výsledky DSR (smyková rychlost $6,3 \text{ s}^{-1}$)

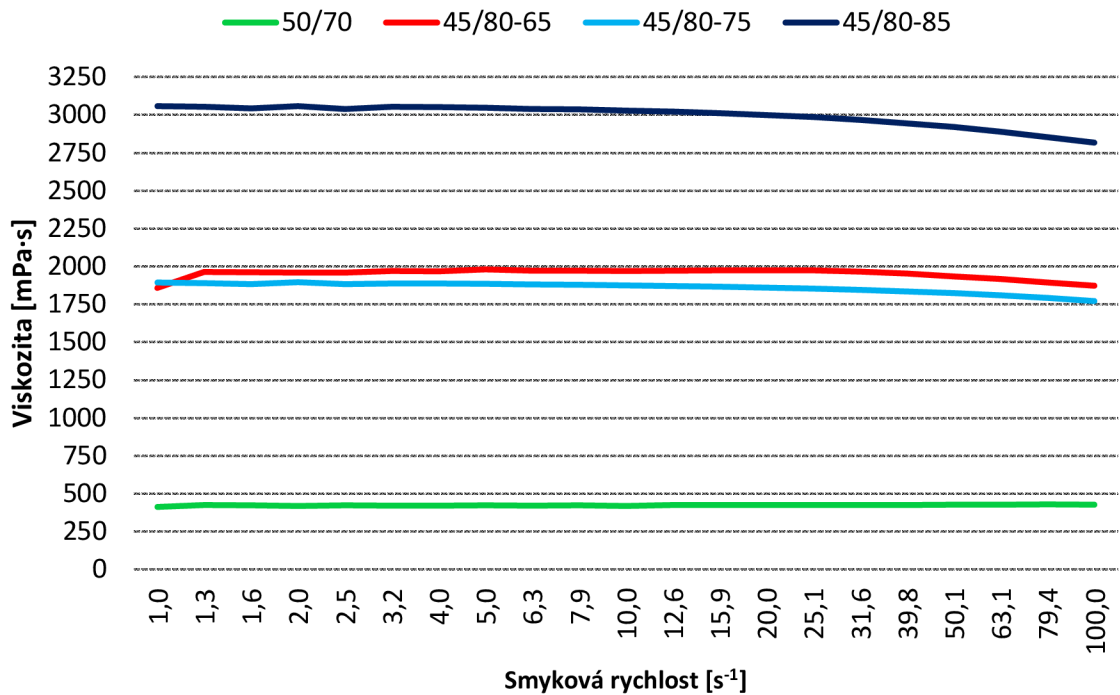
Z grafu je zřejmé, že výsledné hodnoty dynamické viskozity rovněž závisí na druhu pojiva. Nejnížší hodnota byla zjištěna u silničního asfaltu 50/70 bez modifikace a naopak nejvyšší hodnotu vykazuje polymerem modifikovaný asfalt 45/80-85. Dá se říci, že s rostoucí gradací roste viskozita, až na vzorek č. 2 – 45/80-65 OMV, který vybočuje z řady. To je pravděpodobně způsobeno přidáním nadmíry modifikační přísady, což je patrné i podle hodnoty bodu měknutí (viz kapitola 6.2.) Vzorek č. 5 je neměřitelný, protože kužel, který stlačí vzorek a začne rotovat, by vytlačil zrna pryžového granulátu postupně k okraji a měření by bylo zkresleno.

6.5. Vliv smykové rychlosti na dynamickou viskozitu – Dynamický smykový reometr

Během měření viskozity na dynamickém smykovém reometru přístroj automaticky zaznamenával hodnoty dynamické viskozity při stoupající smykové rychlosti. Pro každý vzorek přístroj zaznamenal 21 hodnot dynamické viskozity v rozmezí smykových rychlostí 1 s^{-1} až 100 s^{-1} (viz tabulka 6.7). Díky tomu je možné graficky znázornit vliv smykové rychlosti na dynamickou viskozitu a určit, zda se jedná o chování látky newtonské, či nenewtonské (viz graf 6.7).

Tabulka 6.6 - Hodnoty dynamické viskozity při smykové rychlosti $1,0 \text{ s}^{-1}$ až $100,0 \text{ s}^{-1}$ (DSR)

indx	smyková rychlost [s^{-1}]	Dynamická viskozita [mPa·s]			
		50/70	45/80-65	45/80-75	25/55-60
1	1,0	412	1858	1894	3057
2	1,3	426	1964	1890	3053
3	1,6	422	1962	1884	3044
4	2,0	419	1959	1895	3057
5	2,5	424	1960	1884	3039
6	3,2	421	1969	1888	3054
7	4,0	420	1967	1888	3052
8	5,0	422	1980	1886	3047
9	6,3	421	1971	1880	3039
10	7,9	422	1972	1879	3037
11	10,0	419	1969	1874	3029
12	12,6	424	1971	1871	3021
13	15,9	425	1973	1866	3012
14	20,0	425	1974	1860	2999
15	25,1	425	1974	1853	2986
16	31,6	425	1966	1845	2968
17	39,8	426	1953	1834	2944
18	50,1	428	1934	1823	2920
19	63,1	428	1916	1808	2888
20	79,4	429	1893	1792	2853
21	100,0	428	1872	1770	2817



Graf 6.5 - Vliv smykové rychlosti na viskozitu

Z grafu je patrné, že při stoupající smykové rychlosti nedochází u silničního asfaltu 50/70 ke změně hodnoty dynamické viskozity. Dynamická viskozita je tedy konstantou, která není závislá na velikosti tečného napětí ani na smykové rychlosti, z čehož je možné usuzovat, že se jedná o Newtonskou látku. U pojiv polymerem modifikovaných dochází s rostoucí smykovou rychlostí k poklesu dynamické viskozity, což je opačný závěr oproti závislosti dynamické viskozity na smykové rychlosti získané v Brookfieldově viskozimetru (kapitola 6.3.). Dle grafu 6.7 začínají být poklesy viskozity zřejmé až při vyšších smykových rychlostech – $30 s^{-1}$ až $100 s^{-1}$. Poměr tečného napětí a smykové rychlosti již není konstantní, ale závisí na hodnotě smykové rychlosti, z čehož plyne, že pojiva vykazují chování neneutonské (smykem řídnuocí kapaliny, čili se na základě výsledků měření v dynamickém smykovém reometru jedná o pseudoplastickou látku). To potvrzuje i článek Ing. Lubomíra Žalmana (7), kde je taktéž uvedeno, že při stoupající smykové rychlosti dochází ke snižování dynamické viskozity. Dále se dá z grafu odečíst, že s vyšší gradací pojiva je vliv smykové rychlosti na viskozitu nepatrně větší a se zvyšujícím se množstvím polymerních přísad nebo pryžového granulátu, by narůstalo snižování viskozity.

6.6. Vzájemné korelace

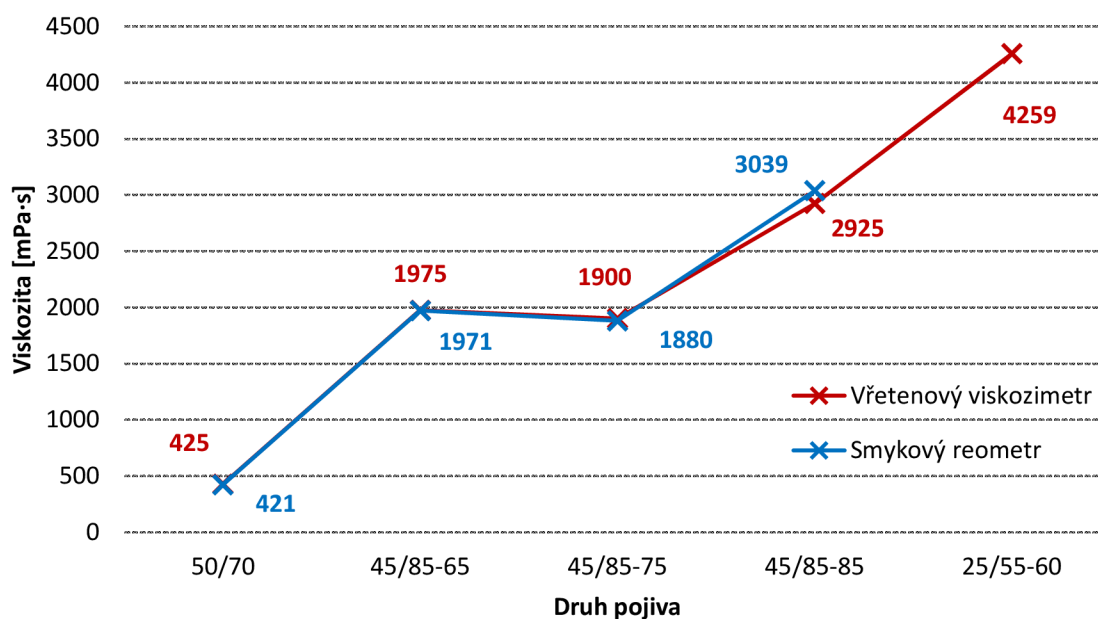
V následující kapitole budou popsány porovnání, vzájemné vztahy a závislosti předchozích výsledků, a to zejména graficky.

6.6.1. Srovnání dynamické viskozity – Rotační vřetenový viskozimetr x Dynamický smykový reometr při vybrané smykové rychlosti

Srovnávány jsou hodnoty dynamické viskozity při smykové rychlosti $6,8 \text{ s}^{-1}$ u rotačního vřetenového viskozimetru a $6,3 \text{ s}^{-1}$ v případě dynamického smykového reometru (viz tabulka 6.6, graf 6.5, graf 6.6).

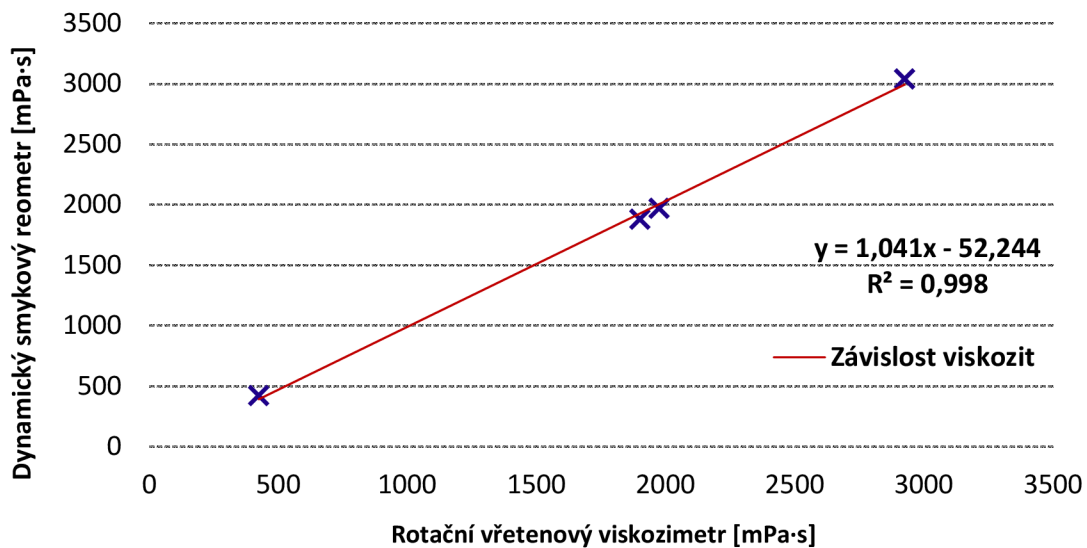
Tabulka 6.7 - Srovnání viskozit - vybraná smyková rychlost

Asfaltové pojivo	50/70	45/85-65	45/85-75	45/85-85	25/55-60
Vřetenový viskozimetr [mPa·s]	425	1975	1900	2925	4259
Smykový reometr [mPa·s]	421	1971	1880	3039	
Rozdíl	4	4	20	114	
Rozdíl [%]	0,9	0,2	1,1	3,8	



Graf 6.6 - Srovnání viskozit - vybraná smyková rychlost

Z grafu je zřetelné, že hodnoty dynamické viskozity měřené na rotačním vřetenovém viskozimetru téměř odpovídají hodnotám získaným v dynamickém smykovém reometru. Maximální odchylka hodnot činí 3,8 %. Shodné výsledky potvrzuje i následující bodový graf 6.6, kde jsou hodnoty viskozity z rotačního viskozimetru naneseny na vodorovnou osu x a hodnoty ze smykového reometru na svislou osu y. Body je proložena regresní přímka s hodnotou spolehlivosti $R^2 = 0,998$, což dokazuje minimální rozdíly obou metod měření viskozity a je možné říci, že při stanovení dynamické viskozity jednou zkouškou, se dá dosazením do rovnice přímky uvedené v grafu s vysokou pravděpodobností odhadnout výsledné hodnoty zkoušky druhé.



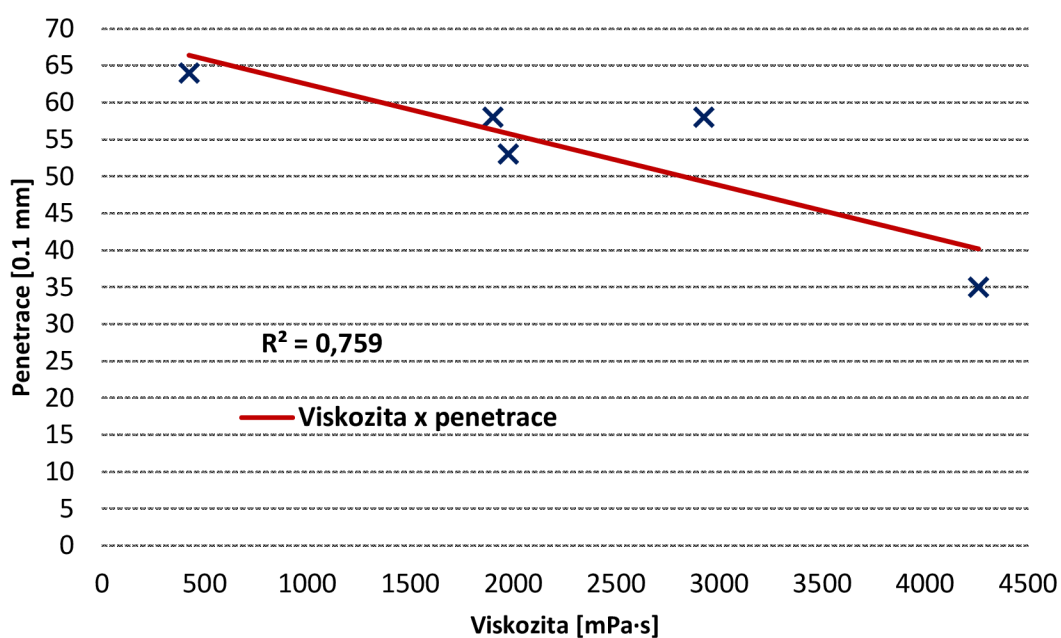
Graf 6.7 - Srovnání viskozit - vybraná smyková rychlost

6.6.2. Vzájemná závislost dynamické viskozity a penetrace jehlou

V následujícím grafu je vyjádřena závislost mezi penetrací jehlou a dynamickou viskozitou naměřenou na Brookfieldově viskozimetru.

Tabulka 6.8 - Závislost dynamické viskozity a penetrace jehlou

Asfaltové pojivo	50/70	45/80-65	45/80-75	45/80-85	25/55-60
Penetrace [0,1 mm]	64	53	58	58	35
Viskozita [mPa·s]	425	1975	1900	2925	4259



Graf 6.8 - Závislost dynamické viskozity a penetrace jehlou

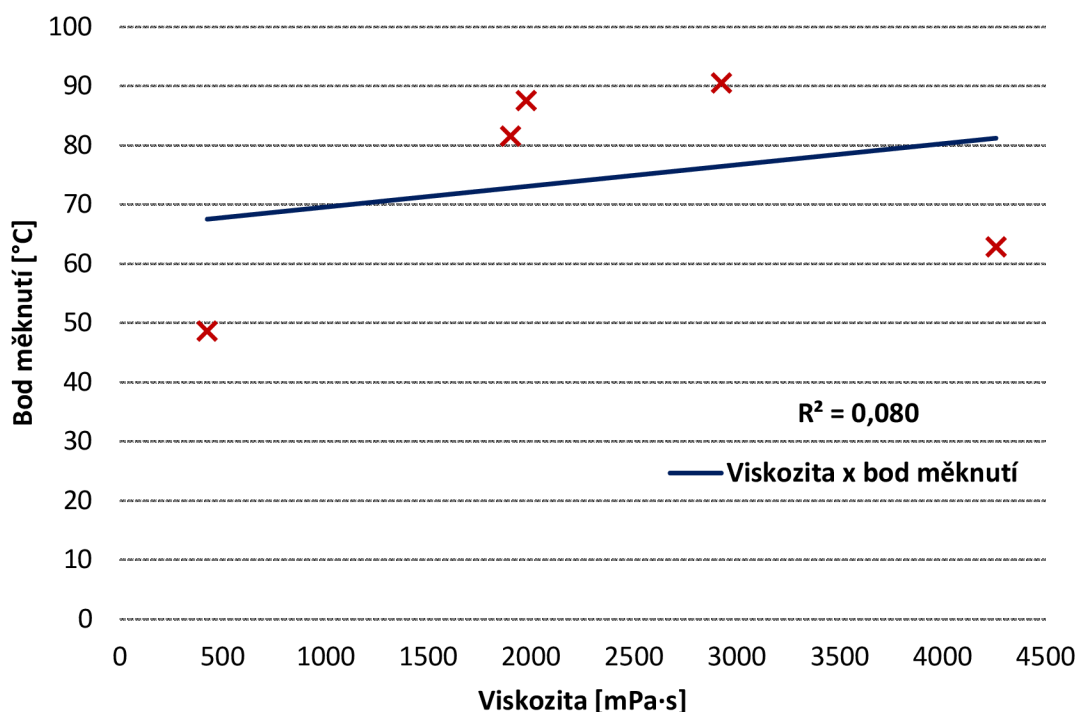
Z grafu 6.8 lze na zkušných vzorcích vypořovat silnou závislost mezi zkouškami dynamické viskozity a penetrací jehlou. Závislost je vyjádřena spojnicí trendu a koeficient korelace dosahuje hodnoty 0,759.

6.6.3. Vzájemná závislost dynamické viskozity a bodu měknutí metodou kroužek – kulička

V následujícím grafu je vyjádřena závislost mezi bodem měknutí metodou kroužek – kulička a dynamickou viskozitou naměřenou na Brookfieldově viskozimetru.

Tabulka 6.9 - Závislost dynamické viskozity a bodu měknutí KK

Asfaltové pojivo	50/70	45/80-65	45/80-75	45/80-85	25/55-60
Bod měknutí [°C]	48,6	87,5	81,5	90,5	62,8
Viskozita [mPa·s]	425	1975	1900	2925	4259



Graf 6.9 - Závislost dynamické viskozity a bodu měknutí KK

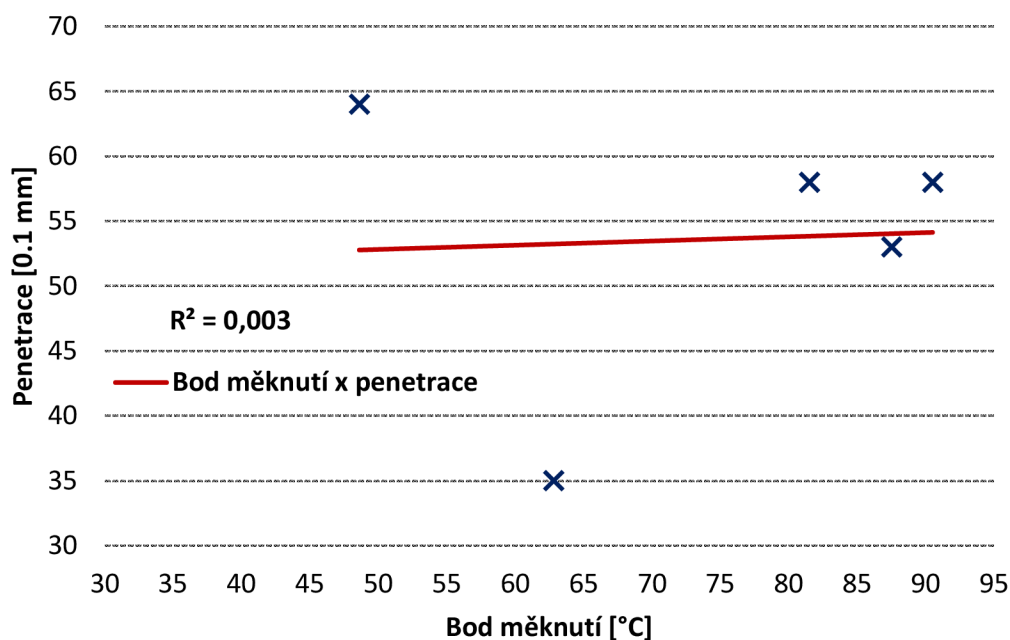
Nebylo možné vypořádat závislost mezi zkouškami dynamické viskozity a bodu měknutí metodou kroužek – kulička. Závislost je vyjádřena spojnicí trendu, kde koeficient korelace dosahuje velmi nízké hodnoty 0,080. Kdyby se ovšem ze závislosti odstranil asfalt modifikovaný pryžovým granulátem, což je pojivo se zásadně odlišnými vlastnostmi, dosáhlo by se silné korelace s korelačním koeficientem 0,893.

6.6.4. Vzájemná závislost bodu měknutí metodou kroužek – kulička a penetrace jehlou

V následujícím grafu je vyjádřena závislost mezi bodem měknutí metodou kroužek - kulička a penetrací jehlou.

Tabulka 6.10 - Závislost bodu měknutí a penetrace

Asfaltové pojivo	50/70	45/80-65	45/80-75	45/80-85	25/55-60
Bod měknutí [°C]	48,6	87,5	81,5	90,5	62,8
Penetrace [0,1 mm]	64	53	58	58	35



Graf 6.10 - Závislost bodu měknutí a penetrace

Z grafu je zřejmé, že mezi zkouškami penetrace jehlou a bodem měknutí metodou kroužek – kulička neexistuje závislost. Tvrzení dokazuje proložení přímky v bodovém grafu, kde koeficient korelace dosahuje minimální hodnoty 0,003.

6.7. Souhrnná tabulka výsledků

V následující tabulce jsou zapsány všechny výsledné hodnoty naměřených zkoušek. Hodnoty dynamické viskozity z rotačního vřetenového viskozimetru (Brookfield) jsou uvedeny při smykové rychlosti $6,8 \text{ s}^{-1}$ a hodnoty dynamické viskozity z dynamického smykového reometru (DSR) při smykové rychlosti $6,3 \text{ s}^{-1}$.

Tabulka 6.11 - Souhrnná tabulka výsledků

Asfaltové pojivo	50/70	45/80-65	45/80-75	45/80-85	25/55-60
Viskozita Brookfield [mPa·s]	425	1975	1900	2925	4259
Viskozita DSR [mPa·s]	421	1971	1880	3039	
Rozdíl [%]	0,9	0,2	1,1	3,8	
Penetrace jehlou [0,1 mm]	64	53	58	58	35
Bod měknutí [°C]	48,6	87,5	81,5	90,5	62,8
Rezerva [°C]	2,6	22,5	6,5	5,5	2,8

7. Závěr

V rámci bakalářské práce byla stanovena dynamická viskozita silničního asfaltu, tří polymerem modifikovaných asfaltů a asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem rotačním vřetenovým viskozimetrem typu Brookfield a dynamickým smykovým reometrem s použitím geometrie kužel – deska. Vyhodnocením výsledků je zřejmé, že s rostoucím stupněm modifikace u většiny vzorků vzrůstala hodnota dynamické viskozity. Jediný vzorek, který vyčnívá z řady je asfaltové pojivo PMB 45/80-65 od výrobce OMV Česká republika, což dokázaly jak zkoušky dynamické viskozity (viz graf 6.3 a graf 6.4), tak i zkouška bodu měknutí (viz graf 6.2). To je s největší pravděpodobností způsobeno přidáním většího množství modifikační přísady, než bylo pro gradaci 45/80-65 nutné a pokud by byly splněny další požadavky normy ČSN EN 14023, bylo by možné pojivo považovat za gradaci 45/80-85.

Hodnoty dynamické viskozity změřené pomocí rotačního vřetenového viskozimetru (Brookfield) a dynamického smykového reometru (DSR) si téměř odpovídaly - dosahují vysoké korelace s maximální odchylkou 3,8 %. Tvrzení dokazuje graf 6.6 se spojnicí trendu, kde koeficient korelace dosahuje hodnoty 0,998.

Měřením dynamické viskozity na dynamickém smykovém reometru (DSR) bylo možné vyzorovat vliv smykové rychlosti na hodnoty dynamické viskozity. Graf 6.7 dokazuje, že s větším množstvím modifikační přísady, měla smyková rychlost větší vliv na dynamickou viskozitu - s vyšší smykovou rychlostí začala dynamická viskozita klesat. Z výsledků měření v dynamickém smykovém reometru je tedy možné odhadnout, že polymerem modifikované asfalty jsou smykem řídňující (pseudoplastické) kapaliny. To je ovšem v protikladu s výsledky získanými v Brookfieldově viskozimetru, kde pro polymerem modifikované asfalty dynamická viskozita s rostoucí smykovou rychlostí nepatrně vzrůstala. Těmto nesouhlasným výsledkům by bylo vhodné věnovat pozornost v další práci. U vzorku silničního asfaltu 50/70 byl vliv smykové rychlosti na hodnotu dynamické viskozity nepatrný – bylo dosaženo téměř konstantního průběhu dynamické viskozity. Naopak u polymerem modifikovaného asfaltu 45/80-85 je již vliv smykové rychlosti značný, zejména ve vyšších rychlostech.

Při měření dynamické viskozity na dynamickém smykovém reometru (DSR) nebylo možné zaměřit vzorek asfaltového pojiva CRmB 25/55-60 – silniční asfalt s přidáním pryžového granulátu. Vzorek je neměřitelný, protože kužel, který stlačí vzorek a začne rotovat, by vytlačil kousky pryžového granulátu postupně k okraji a měření by bylo zkresleno.

Závěrem je možné říct, že obě zkušební metody (vřetenový viskozimetr a dynamický smykový reometr s geometrií kužel – deska) poskytují pro silniční asfalty a polymerem modifikované asfalty téměř totožné výsledky dynamické viskozity. V současné době je v technických předpisech i odbornou veřejností preferovaná metoda vřetenového viskozimetru, přičemž zkušební norma ČSN EN 13702 popisující zkoušku dynamické viskozity metodou kužel a deska je v současné době bohužel pouze přejatá z anglického originálu bez překladu. Tím je tento postup znevýhodněn oproti metodě vřetenového viskozimetru, což je z důvodu jednoduchosti této metody dle mého názoru škoda.

8. Citovaná literatura

- (1) **doc. Dr. Ing. Michal Varaus.** *Pozemní komunikace II - Modul 3 - Asfaltová pojiva.* Brno, 2005.
- (2) <https://cs.wikipedia.org/wiki/Asfalt>. [Online]
- (3) **Silniční stavby 2.** *Prezentace - Asfaltová pojiva.*
- (4) **Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.** *Uplatnění pryžového granulátu v asfaltových pojivech a hutněných asfaltových směsích.* Brno, 2013. Disertační práce, VUT Brno.
- (5) **ČSN EN 14023** *Asfalty a asfaltová pojiva - Systém specifikace pro polymerem modifikované asfalty.* 2010.
- (6) **ČSN EN 13302** *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení dynamické viskozity asfaltových pojiv rotačním vřetenovým viskozimetrem.* 2010.
- (7) **Ing. Lubomír Žalman.** *Dynamická viskozita asfaltových pojiv a přísad.* Praha.
- (8) **ČSN EN 1426** *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení penetrace jehlou.* 2015.
- (9) **ČSN EN 14770** *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu - Dynamický smykový reometr (DSR).* Praha, 2012.
- (10) **Střasáková, Monika.** *Zkouška MSCR v dynamickém smykovém reometru.* Brno, 2014. Bakalářská práce, VUT Brno.
- (11) **ČSN EN 1427** *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení bodu měknutí - Metoda kroužek kulička.* 2015.
- (12) **Smolka, Zdeněk.** *Silová duklitida asfaltových pojiv.* Brno, 2016. Bakalářská práce, VUT Brno.
- (13) **ČSN EN 12591** *Asfalty a asfaltová pojiva - Specifikace pro silniční asfalty.* 2009.
- (14) **Miláčková, Kristýna.** *Porovnání metod využitelných pro stanovení dynamické viskozity asfaltových pojiv.* Praha, 2011. SVOČ, ČVUT Praha.
- (15) **ČSN EN 13702** *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení dynamické viskozity modifikovaných asfaltů metodou kužel a deska.* Praha, 2010.

9. Seznam obrázků

Obrázek 2.1 - Schéma vakuové destilace (3).....	11
Obrázek 2.2 - Rozdělení asfaltů dle norem (5).....	12
Obrázek 2.3 - Asfalt visko-elastický materiál (1).....	13
Obrázek 4.1 - princip viskozimetru.....	16
Obrázek 4.2 - Princip rotačního viskozimetru (8).....	17
Obrázek 4.3 - Vřetena	17
Obrázek 4.4 - Nádobky na vzorek.....	17
Obrázek 4.5 - Princip DSR.....	19
Obrázek 4.6 – Silikonová forma.....	19
Obrázek 4.7 - Kinexus Pro při měření.....	20
Obrázek 4.8 – Očištění geometrie (10).....	21
Obrázek 4.9 – Seškrábnutí přebytečného pojiva (10).....	21
Obrázek 4.10 - Princip penetrometru (3).....	21
Obrázek 4.11 - Příklad penetrometru (8).....	22
Obrázek 4.12 - Penetrometr.....	22
Obrázek 4.13 - Penetrometr.....	22
Obrázek 4.14 - Princip bodu měknutí (3).....	24
Obrázek 4.15 - a) Sestava dvou kroužků s držákem a základní deskou b) Středící prstenec pro kuličku c)kroužek (11).....	25
Obrázek 4.16 - Přístroj pro stanovení bodu měknutí KK.....	26
Obrázek 4.17 - Průběh zkoušky kroužek kulička (12).....	26

10. Seznam grafů

Graf 6.1 - Výsledky penetrace jehlou.....	30
Graf 6.2 - Výsledky bodu měknutí KK	31
Graf 6.3 - Výsledky Brookfieldův viskozimetr.....	32
Graf 6.4 - Výsledky DSR (smyková rychlost $6,3 \text{ s}^{-1}$).....	35
Graf 6.5 - Vliv smykové rychlosti na viskozitu.....	37
Graf 6.6 - Srovnání viskozit - vybraná smyková rychlost.....	38
Graf 6.7 - Srovnání viskozit - vybraná smyková rychlost.....	39
Graf 6.8 - Závislost dynamické viskozity a penetrace jehlou.....	40
Graf 6.9 - Závislost dynamické viskozity a bodu měknutí	41
Graf 6.10 - Závislost bodu měknutí a penetrace	42

11. Seznam tabulek

Tabulka 4.1 - Maximální rozdíl platných stanovení (8).....	23
Tabulka 5.1 - Použitá asfaltová pojiva	27
Tabulka 5.2 - Požadované vlastnosti 50/70 dle ČSN EN 12591.....	27
Tabulka 5.3 - Požadované vlastnosti 45/80-65 dle ČSN EN 14023.....	27
Tabulka 5.4 - Požadované vlastnosti 45/80-75 dle ČSN EN 14023.....	28
Tabulka 5.5 - Požadované vlastnosti 45/80-85 dle ČSN EN 14023.....	28
Tabulka 5.6 - Požadované vlastnosti 25/55-60 dle ČSN EN 14023.....	28
Tabulka 5.7 - Specifikace vlastností pro silniční asfalty s penetrací od 30 x 0,1 mm do 220 x 0,1 mm (13).....	29
Tabulka 5.8 - Specifikace vlastností polymerem modifikovaných asfaltů (PMB) v České republice (5).....	29
Tabulka 6.1 - Výsledky penetrace jehlou.....	30
Tabulka 6.2 - Výsledky bodu měknutí KK	31
Tabulka 6.3 - Výsledky Brookfieldův viskozimetr.....	32
Tabulka 6.4 - Hodnoty zaznamenané přístrojem DSR pro vzorek č. 1.....	34
Tabulka 6.5 - Výsledky DSR (smyková rychlost 6,3 s ⁻¹).....	35
Tabulka 6.6 - Hodnoty viskozity při smykové rychlosti 1,0 s ⁻¹ až 100,0 s ⁻¹ (DSR)	36
Tabulka 6.8 - Závislost dynamické viskozity a penetrace jehlou.....	40
Tabulka 6.9 - Závislost dynamické viskozity a bodu měknutí KK.....	41
Tabulka 6.10 - Závislost bodu měknutí a penetrace	42
Tabulka 6.11 - Souhrnná tabulka výsledků	43
Tabulka 12.1 - Hodnoty zaznamenané přístrojem DSR pro vzorek č. 1	50
Tabulka 12.2 - Hodnoty zaznamenané přístrojem DSR pro vzorek č. 2	51
Tabulka 12.3 - Hodnoty zaznamenané přístrojem DSR pro vzorek č. 3	52
Tabulka 12.4 - Hodnoty zaznamenané přístrojem DSR pro vzorek č. 4	53

12. Přílohy

12.1. Kompletní výsledky – Dynamický smykový reometr (DSR)

V následujících tabulkách jsou uvedeny hodnoty, které přístroj DSR automaticky zaznamenával do souboru během měření.

Tabulka 12.1 - Hodnoty zaznamenané přístrojem DSR pro vzorek č. 1

Vzorek č. 1 - 50/70							
indx	t(s)	T(°C)	σ (Pa)	γ .(s ⁻¹)	η (mPa·s)	g(mm)	τ (N m)
1	20,1	135,0	0,4	1,0	412	1,50E-01	6,90E-06
2	44,6	135,0	0,5	1,3	426	1,50E-01	8,98E-06
3	104,6	135,0	0,7	1,6	422	1,50E-01	1,12E-05
4	155,1	135,0	0,8	2,0	419	1,50E-01	1,40E-05
5	215,1	135,1	1,1	2,5	424	1,50E-01	1,78E-05
6	236,3	135,1	1,3	3,2	421	1,50E-01	2,23E-05
7	257	135,1	1,7	4,0	420	1,50E-01	2,80E-05
8	317	135,0	2,1	5,0	422	1,50E-01	3,55E-05
9	341	135,0	2,7	6,3	421	1,50E-01	4,46E-05
10	361,1	135,0	3,4	7,9	422	1,50E-01	5,62E-05
11	421,1	135,0	4,2	10,0	419	1,50E-01	7,02E-05
12	441,2	135,0	5,3	12,6	424	1,50E-01	8,95E-05
13	461,3	135,0	6,7	15,9	425	1,50E-01	1,13E-04
14	481,4	135,0	8,5	20,0	425	1,50E-01	1,42E-04
15	501,5	135,0	10,7	25,1	425	1,50E-01	1,79E-04
16	521,6	135,0	13,4	31,6	425	1,50E-01	2,25E-04
17	541,7	135,0	16,9	39,8	426	1,50E-01	2,84E-04
18	561,8	135,0	21,4	50,1	428	1,50E-01	3,59E-04
19	597,8	135,0	27,0	63,1	428	1,50E-01	4,53E-04
20	617,9	135,0	34,1	79,4	429	1,50E-01	5,71E-04
21	638	135,0	42,8	100,0	428	1,50E-01	7,16E-04

Tabulka 12.2 - Hodnoty zaznamenané přístrojem DSR pro vzorek č. 2

Vzorek č. 2 - 45/80-65							
indx	t(s)	T(°C)	σ (Pa)	$\dot{\gamma}$.(s ⁻¹)	η (mPa S)	g(mm)	τ (N m)
1	33,7	135,0	1,9	1,0	1858	1,50E-01	3,11E-05
2	93,7	135,0	2,5	1,3	1964	1,50E-01	4,14E-05
3	113,8	135,0	3,1	1,6	1962	1,50E-01	5,21E-05
4	133,9	135,0	3,9	2,0	1959	1,50E-01	6,55E-05
5	162,5	135,0	4,9	2,5	1960	1,50E-01	8,25E-05
6	182,6	135,0	6,2	3,2	1969	1,50E-01	1,04E-04
7	202,7	135,0	7,8	4,0	1967	1,50E-01	1,31E-04
8	262,8	135,0	9,9	5,0	1980	1,50E-01	1,66E-04
9	282,9	135,0	12,4	6,3	1971	1,50E-01	2,08E-04
10	303,0	135,0	15,7	7,9	1972	1,50E-01	2,63E-04
11	323,1	135,0	19,7	10,0	1969	1,50E-01	3,30E-04
12	343,2	135,0	24,8	12,6	1971	1,50E-01	4,16E-04
13	363,3	135,0	31,3	15,9	1973	1,50E-01	5,24E-04
14	383,4	135,0	39,4	20,0	1974	1,50E-01	6,60E-04
15	403,5	135,0	49,6	25,1	1974	1,50E-01	8,31E-04
16	423,6	135,0	62,2	31,6	1966	1,50E-01	1,04E-03
17	443,7	135,0	77,7	39,8	1953	1,50E-01	1,30E-03
18	463,8	135,0	96,9	50,1	1934	1,50E-01	1,62E-03
19	484,0	135,0	120,9	63,1	1916	1,50E-01	2,03E-03
20	504,1	135,0	150,4	79,4	1893	1,50E-01	2,52E-03
21	524,2	135,0	187,2	100,0	1872	1,50E-01	3,14E-03

Tabulka 12.3 - Hodnoty zaznamenané přístrojem DSR pro vzorek č. 3

Vzorek č. 3 - 45/80-75							
indx	t(s)	T(°C)	σ (Pa)	$\dot{\gamma}$.(s ⁻¹)	η (mPa S)	g(mm)	τ (N m)
1	20,1	135,0	1,9	1,0	1894	1,50E-01	3,17E-05
2	40,2	135,0	2,4	1,3	1890	1,50E-01	3,99E-05
3	60,3	135,0	3,0	1,6	1884	1,50E-01	5,00E-05
4	80,4	135,0	3,8	2,0	1895	1,50E-01	6,34E-05
5	100,5	135,0	4,7	2,5	1884	1,50E-01	7,93E-05
6	120,6	135,0	6,0	3,2	1888	1,50E-01	1,00E-04
7	140,7	135,0	7,5	4,0	1888	1,50E-01	1,26E-04
8	160,9	135,0	9,5	5,0	1886	1,50E-01	1,58E-04
9	181,0	135,0	11,9	6,3	1880	1,50E-01	1,99E-04
10	201,1	135,0	14,9	7,9	1879	1,50E-01	2,50E-04
11	221,2	135,0	18,7	10,0	1874	1,50E-01	3,14E-04
12	241,3	135,0	23,6	12,6	1871	1,50E-01	3,95E-04
13	261,4	135,0	29,6	15,9	1866	1,50E-01	4,96E-04
14	281,5	135,0	37,1	20,0	1860	1,50E-01	6,22E-04
15	301,6	135,0	46,6	25,1	1853	1,50E-01	7,80E-04
16	321,7	135,0	58,4	31,6	1845	1,50E-01	9,78E-04
17	341,8	135,0	73,0	39,8	1834	1,50E-01	1,22E-03
18	361,9	135,0	91,4	50,1	1823	1,50E-01	1,53E-03
19	382,0	135,0	114,1	63,1	1808	1,50E-01	1,91E-03
20	402,1	135,0	142,3	79,4	1792	1,50E-01	2,39E-03
21	422,3	135,0	177,0	100,0	1770	1,50E-01	2,97E-03

Tabulka 12.4 - Hodnoty zaznamenané přístrojem DSR pro vzorek č. 4

Vzorek č. 4 - 45/80-85							
indx	t(s)	T(°C)	σ (Pa)	$\dot{\gamma}$.(s ⁻¹)	η (mPa S)	g(mm)	τ (N m)
1	20,1	135,0	3,1	1,0	3057	1,50E-01	5,12E-05
2	40,2	135,0	3,8	1,3	3053	1,50E-01	6,44E-05
3	60,3	135,0	4,8	1,6	3044	1,50E-01	8,09E-05
4	80,4	135,0	6,1	2,0	3057	1,50E-01	1,02E-04
5	100,5	135,0	7,6	2,5	3039	1,50E-01	1,28E-04
6	120,6	135,0	9,7	3,2	3054	1,50E-01	1,62E-04
7	140,7	135,0	12,2	4,0	3052	1,50E-01	2,04E-04
8	160,9	135,0	15,3	5,0	3047	1,50E-01	2,56E-04
9	181,0	135,0	19,2	6,3	3039	1,50E-01	3,21E-04
10	201,1	135,0	24,1	7,9	3037	1,50E-01	4,04E-04
11	221,2	135,0	30,3	10,0	3029	1,50E-01	5,08E-04
12	241,3	135,0	38,0	12,6	3021	1,50E-01	6,37E-04
13	261,4	135,0	47,7	15,9	3012	1,50E-01	8,00E-04
14	281,5	135,0	59,9	20,0	2999	1,50E-01	1,00E-03
15	301,6	135,0	75,0	25,1	2986	1,50E-01	1,26E-03
16	321,7	135,0	93,9	31,6	2968	1,50E-01	1,57E-03
17	341,8	135,0	117,2	39,8	2944	1,50E-01	1,96E-03
18	361,9	135,0	146,4	50,1	2920	1,50E-01	2,45E-03
19	382,0	135,0	182,2	63,1	2888	1,50E-01	3,05E-03
20	402,2	135,0	226,6	79,4	2853	1,50E-01	3,80E-03
21	422,3	135,0	281,7	100,0	2817	1,50E-01	4,72E-03