



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STAVEBNÍ**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

**ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ**

INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

**HODNOCENÍ VLASTNOSTÍ ASFALTOVÉHO POJIVA  
Z ODPADNÍCH MATERIÁLŮ OBSAHUJÍCÍCH ASFALT**

EVALUATION OF PROPERTIES OF ASPHALT BINDER FROM WASTE MATERIALS CONTAINING BITUMEN

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Aneta Košťálová**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.**

**BRNO 2023**

# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav pozemních komunikací  
Studentka: **Aneta Košťálová**  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.**  
Akademický rok: 2022/23  
Studijní program: B3607 Stavební inženýrství  
Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

Děkan Fakulty Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## **Hodnocení vlastností asfaltového pojiva z odpadních materiálů obsahujících asfalt**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

V bakalářské práci budou zjišťovány vlastnosti asfaltového pojiva, které bude získáno ze dvou druhů odpadních materiálů, obsahujících asfalt. Pro hodnocení vlastností znovuzískaných pojiv budou zvoleny vhodné laboratorní zkoušky.

### **Cíle a výstupy bakalářské práce:**

Cílem práce bude srovnat laboratorní vlastnosti asfaltových pojiv, která budou znovuzískána ze dvou druhů odpadních materiálů, obsahujících asfalt.

### **Seznam doporučené literatury a podklady:**

ČSN EN 12697-1

ČSN EN 12697-3

Normy pro zkoušení asfaltových pojiv

Internetové zdroje

Předchozí bakalářské a diplomové práce

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 29. 11. 2022

L. S.

---

prof. Dr.techn. Ing. Michal Varaus  
vedoucí ústavu

---

doc. Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.  
vedoucí práce

---

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr. h. c.  
děkan

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce se zabývá porovnáním vlastností dvou druhů asfaltových pojiv získaných z odpadních materiálů. V teoretické části jsou přiblíženy vlastnosti asfaltových hydroizolačních pásů a asfaltových šindelů. V následující praktické části jsou popsány a následně provedeny zkoušky asfaltových pojiv na jednotlivých vzorcích. Jedná se o zkoušky stanovení penetrace jehlou, bodu měknutí metodou kroužek a kulička, vratné duktility a reologických vlastností pomocí DSR. V závěru jsou výsledky vyhodnoceny, shrnuty a porovnány mezi sebou navzájem.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Asfalt, asfaltové hydroizolační pásy, asfaltové šindele, znovuzískání pojiva, penetrace jehlou, bod měknutí, vratná duktilita, DSR

## **ABSTRACT**

The bachelor's thesis deals with the comparison of the properties of two types of asphalt binders obtained from waste materials. The theoretical part contains the properties of bitumen waterproofing sheet and asphalt shingles. In the following practical part, tests of asphalt binders on individual samples are described and then carried out. These include tests to determine needle penetration, softening point by the Ring and Ball method, determination of the elastic recovery and determination of rheological properties by DSR. Finally, the results are evaluated, summarized and compared with each other.

## **KEYWORDS**

Bitumen, bitumen waterproofing sheet, asphalt shingles, bitumen recovery, needle penetration, softening point, elastic recovery, DSR

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOŠŤÁLOVÁ, Aneta. *Hodnocení vlastností asfaltového pojiva z odpadních materiálů obsahujících asfalt*. Brno, 2023. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí doc. Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.

## **PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE**

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Hodnocení vlastností asfaltového pojiva z odpadních materiálů obsahujících asfalt* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 25. 5. 2023

---

Aneta Košťálová  
autor

## **PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Hodnocení vlastností asfaltového pojiva z odpadních materiálů obsahujících asfalt* zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 25. 5. 2023

---

Aneta Košťálová  
autor

## **PODĚKOVÁNÍ**

Především bych ráda poděkovala doc. Ing. Ondřeji Daškovi, Ph.D. za skvělé vedení bakalářské práce, jeho čas věnovaný konzultacím a rady při zpracování. Dále bych chtěla poděkovat Pavlu Strakovi za pomoc při práci v laboratoři a Ing. Zdeňku Hegrovi za dodání zkoušeného materiálu.

# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>REŠERŠE LITERATURY</b> .....	<b>10</b>
2.1	Asfaltové hydroizolační pásy.....	10
2.2	Asfaltové šindele.....	11
2.3	Asfaltové směsi obsahující střešní šindele .....	13
2.3.1	<i>Možnosti přidávání šindelů do směsí</i> .....	14
2.3.2	<i>Vlastnosti asfaltových směsí s přidanými střešními šindeli</i> .....	15
<b>3</b>	<b>CÍLE PRÁCE</b> .....	<b>16</b>
<b>4</b>	<b>POUŽITÉ ZKUŠEBNÍ METODY</b> .....	<b>16</b>
4.1	Extrakce a destilace asfaltového pojiva .....	17
4.2	Penetrace jehlou.....	19
4.3	Bod měknutí (kroužek a kulička).....	20
4.4	Vratná duktilita .....	23
4.5	Dynamický smykový reometr .....	24
<b>5</b>	<b>POUŽITÉ MATERIÁLY</b> .....	<b>25</b>
5.1	Asfaltový pás – odpad z výroby.....	26
5.2	Šindel – odpad z výroby .....	27
5.3	Šindel – dovoz ze zahraničí .....	27
<b>6</b>	<b>VÝSLEDKY ZKOUŠEK</b> .....	<b>28</b>
6.1	Penetrace jehlou .....	28
6.2	Bod měknutí (kroužek a kulička).....	29
6.3	Vratná duktilita .....	30
6.4	Dynamický smykový reometr .....	32
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>38</b>
<b>8</b>	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b> .....	<b>39</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>41</b>
<b>10</b>	<b>SEZNAM TABULEK</b> .....	<b>41</b>
<b>11</b>	<b>SEZNAM GRAFŮ</b> .....	<b>42</b>



## 1 ÚVOD

Stejně tak, jako na jiné obory, i na stavebnictví začíná čím dál tím více dopadat otázka ekologie a recyklace materiálů. Rychle se rozvíjející automobilismus vyžaduje neustálou výstavbu nových úseků silnic a dálnic, které by měly splňovat dostatečnou kvalitu. To vede k hledání nových výrobních postupů a materiálů, abychom dosáhli co nejefektivnější výroby s optimálním produktem.

Pro výrobu netuhých vozovek je používáno v základu kamenivo a asfaltové pojivo. Zároveň jsou využívány různé příměsi, které zlepšují vlastnosti výsledné směsi. V rámci recyklace se objevují a zkoušejí stále nové materiály, které už sice dosloužily své původní funkci, přesto ale ještě obsahují například významné množství asfaltu, který lze dále využít pro konstrukci netuhé vozovky. Jedním z nejpoužívanějších je odfrézovaný povrch ze stávající vozovky v České republice označovaný jako R-materiál (reclaimed asphalt pavement – RAP).

Další materiál, ve kterém je viděn potenciál výhodného využití do asfaltových směsí, jsou asfaltové šindele. V USA a Kanadě již přes 30 let probíhá výzkum, zda by byla asfaltová směs s touto příměsí pro vozovky vhodná, a případně za jakých podmínek. Evropa se touto otázkou začala zabývat až poměrně nedávno, přestože i zde je dostatek šindelového odpadu. [5]

V rámci této bakalářské práce budou porovnávány vlastnosti asfaltových pojiv obsažených právě v asfaltových šindelích s pojivem získaným z asfaltových hydroizolačních pásů, které rovněž obsahují značné množství asfaltu a obecně vykazují podobné vlastnosti. Proto by se i o nich dalo uvažovat jako o vhodné alternativě příměsí do asfaltových směsí vozovek.

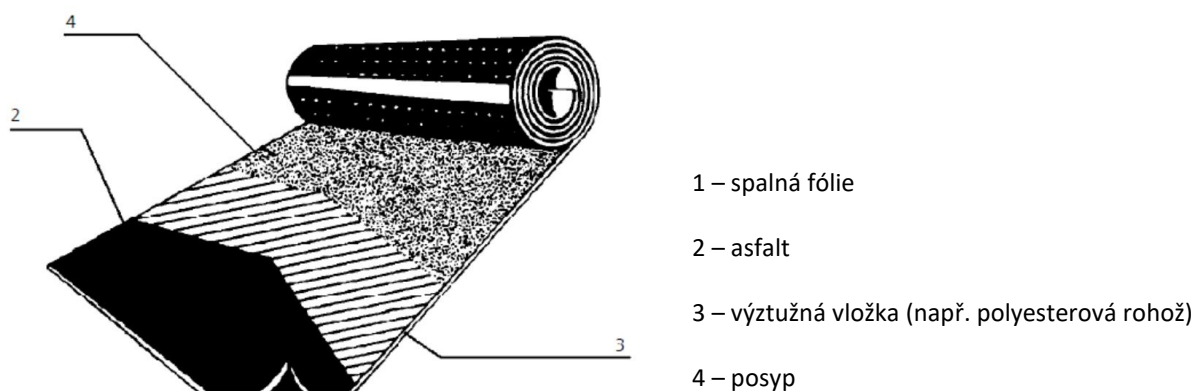
## 2 REŠERŠE LITERATURY

### 2.1 ASFALTOVÉ HYDROIZOLAČNÍ PÁSY

Velmi často vyráběným produktem, který obsahuje asfalt, jsou asfaltové hydroizolační pásy. Jedná se o vrstvu, která má ochraňovat stavbu nejen před vodou a vlhkostí, ale i před dalším, například mechanickým, namáháním. Jejich vlastnosti musejí být deklarovány výrobcem dle přesného účelu použití. Jiné parametry musí splňovat pásy určené například na ochranu silničních mostů a jiné ty, které budou použity na střeších.

Aby mohl být hydroizolační pás použit, je nutné, aby splňoval kritéria podle platné normy, která musí výrobce zaručit. Jedná se například o vodotěsnost, trvanlivost, ohebnost za nízkých teplot, propustnost vodní páry nebo pevnost spoje. [1]

Jejich hlavními výhodami jsou mimo jiné dlouholetá životnost, jednoduchá montáž a údržba, nízká hmotnost a značná variabilita [2]. Asfaltové pásy jsou tvořeny několika vrstvami (obrázek 1).



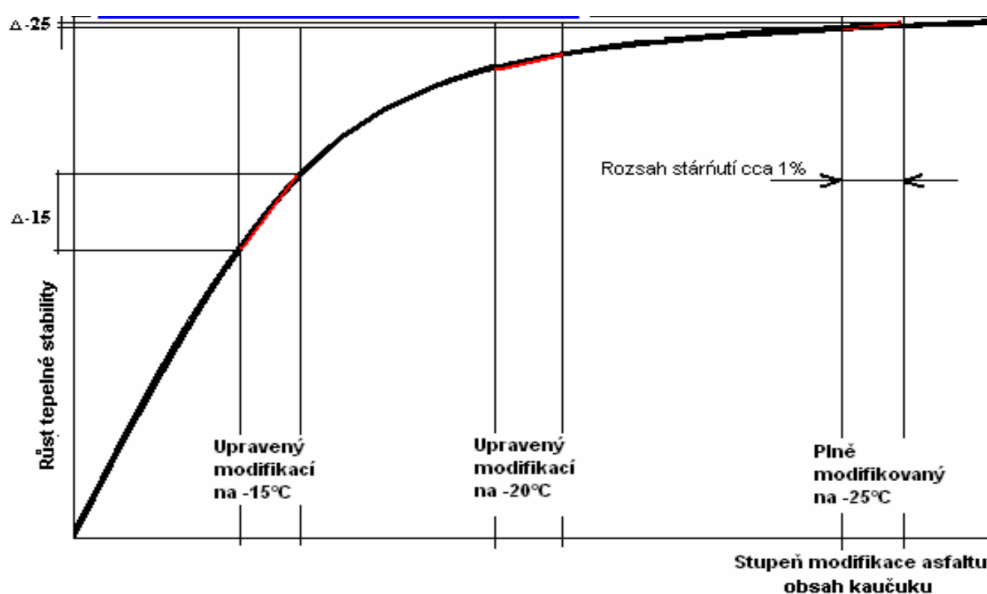
Obrázek 1 – Skladba asfaltového izolačního pásu [3]

Kostra je obvykle tvořena výztužnou vložkou, která přenáší mechanické namáhání v tahu. Může být zhotovena z různých materiálů, a to skelných nebo syntetických vláken či kovových fólií. Asfaltová vrstva je na výztužnou vložku buď nalita tak, aby vyplnila její dutiny nebo je, v případě kovových fólií, nalepena na jejich povrch. Předpoklady pro kvalitní vložku jsou její nenasákavost a objemová stálost. [3]

Asfalt je v pásích použit ve dvou vrstvách. První je již zmiňovaná impregnace výztužné vložky a dále společně s plnivem tvoří vrstvu krycí. Pro obě lze použít oxidovaný nebo modifikovaný asfalt, přičemž při použití oxidovaného často vznikají trhliny způsobené malou tažností materiálu za nízkých teplot.

Modifikovaný asfalt je v tomto směru kvalitnější a zároveň umožňuje pokládku pásů i při nižších teplotách. [3]

Modifikace asfaltu lze provést pomocí elastomerů (kaučukem) nebo plastomerů. Vliv modifikace kaučukem na proces stárnutí asfaltového pojiva je znázorněn na *grafu 1*.



*Graf 1 – Vliv procesu stárnutí na technické parametry asfaltu modifikovaného kaučukem [2]*

Povrchová úprava spodní vrstvy hotového asfaltového pásu byla dříve tvořena pískem proti slepování pásů během skladování. Dnes jsou používány tenké PE fólie, které se během pokládky spalují. Horní povrch je často z břidličného posypu nebo keramického granulátu. Tato vrstva umožňuje barevnou variabilitu a výsledný vzhled pásu. Zrna posypu mohou zabraňovat vzájemnému napojování pásů, proto bývají po nahřátí zamáčknuta nebo zcela odstraněna. [3]

Jednotlivé pásy jsou připevňovány lepením horkým asfaltem nebo natavováním bodově či celoplošně. V případě použití více vrstev pásů, je nutno provést celoplošné natavení a dbát na odstranění vlhkosti, aby později nevznikaly puchýře. [3]

## 2.2 ASFALTOVÉ ŠINDELE

Asfaltové šindele jsou často využívanou variantou střešní krytiny, která je umístována na šikmé střeše s ideálním sklonem 15–85°. Jsou vyráběny v mnoha barevných i tvarových obměnách, zároveň mají přívětivé mechanické vlastnosti (i vzhledem k jejich ceně). [3]

Výroba asfaltových šindelů je prováděna vysekáváním kusů z asfaltových pásů tloušťky 2,7–4 mm [3]. Skládají se, jak je vidět na *obrázku 3*, z několika vrstev – výztužné vložky (často tkaná textilie ze skleněných vláken), krycí vrstvy (část obsahující asfalt) a povrchové úpravy na horní straně [4]. Podíl jednotlivých složek na celkové hmotnosti materiálu je uveden v *tabulce 1*.

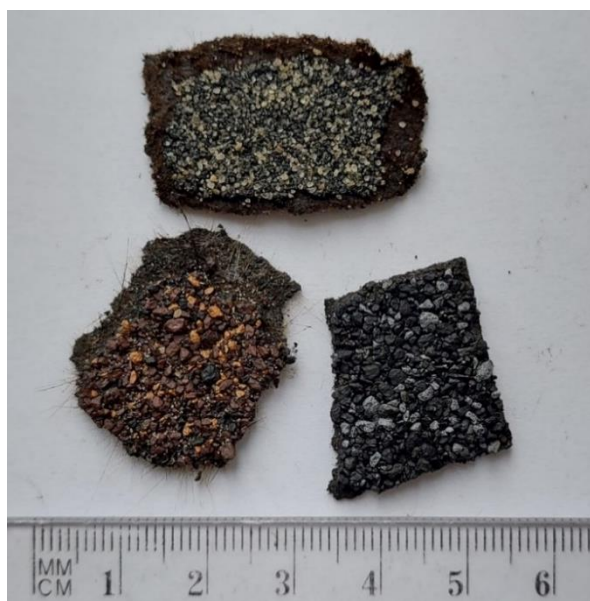
Krycí vrstvy asfaltových pásů mohou být tvořeny z asfaltů oxidovaných nebo modifikovaných. Lepší vlastnosti vykazují modifikované asfalty, ať už je to delší životnost krytiny (až 40 let) nebo možnost pokládat šindele i za nižších teplot. [3]

Složka asfaltové šindele	Podíl na celkové hmotnosti [%]
Granule kameniva	40–70 %
Asfalt	20–40 %
Vláknitý materiál	1–25 %

*Tabulka 1 – Složení asfaltového šindele [8]*



*Obrázek 2 – Asfaltový šindel [6]*



*Obrázek 3 – Asfaltový šindel*

### 2.3 ASFALTOVÉ SMĚSI OBSAHUJÍCÍ STŘEŠNÍ ŠINDELE

Asfaltová směs je „homogenní směs složená typicky z hrubého a drobného kameniva, fileru a asfaltového pojiva, která se použije při stavbě vozovky“ [5]. Podíl asfaltu ve směsích je okolo 5 %.

Asfaltové šindele jsou například v USA nejpoužívanější střešní krytinou [9]. A ani v Evropě není jejich množství zanedbatelné. Výsledkem hojného využívání šindelů je i velké množství odpadu, ať už se jedná o odpad vzniklý při jejich výrobě nebo o samotné šindele, které dosáhly své životnosti jakožto střešní krytiny. Zpracováním tohoto odpadu do asfaltových směsí se sníží náklady na jeho likvidaci na skládkách a zároveň i náklady na výrobu směsi, protože se v ní bude moci snížit množství nového přírodního asfaltového pojiva. [10, 11]

Do asfaltových směsí mohou být tedy zpracovány dvě varianty asfaltových šindelů, přičemž obě vykazují různé vlastnosti. Odpad (odřezky) vzniklý během výroby (*obrázek 4*) neovlivňuje výslednou směs tak razantně jako staré používané šindele (*obrázek 5*), které byly delší dobu vystaveny vnějším vlivům. Největším problémem šindelů sundaných ze střech je stárnutí asfaltového pojiva, které obsahují. Stárnutí je způsobeno oxidací a vede ke zvýšení viskozity asfaltových pojiv. V důsledku toho se asfalt stává tužším, což sice může zvýšit odolnost směsi proti trvalým deformacím, ale také je tím urychlován rozvoj trhlin. [12, 9]

V důsledku ztráty minerálního kameniva zvětráváním může být procentuální obsah asfaltu v zestárlých šindelích vyšší. [8]



*Obrázek 4 – Asfaltové šindele  
– odpad z výroby [9]*



*Obrázek 5 – Asfaltové šindele  
– odpad ze střechy [9]*

---

### 2.3.1 MOŽNOSTI PŘIDÁVÁNÍ ŠINDELŮ DO SMĚSÍ

Přimíchání odpadu ze střešních šindelů do asfaltové směsi je možné různými postupy. Nejdříve využívaný způsob byl tzv. suchým procesem. Při této variantě se šindele přidávají ke kamenivu a až poté se sypká směs obaluje asfaltovým pojivem. Na tomto postupu se časem začaly objevovat jeho nevýhody, a to, že lze například špatně pozorovat obsah asfaltu v šindelích nebo, že spíše dojde k nedostatečnému promíchání s přírodním asfaltem. [11]

Výhodnější variantou je použití tzv. mokrého procesu, při kterém se rozemleté šindele nejdříve smíchají s přírodním asfaltem (při vysoké teplotě) a následně se přidá kamenivo. Při tomto postupu lze podle výzkumů [11] snížit obsah primárního pojiva oproti suchému procesu, aniž by se zhoršily vlastnosti výsledné směsi. Výroba je tedy cenově výhodnější. I proto je tato varianta nyní využívaná častěji. [11]

Pro oba způsoby platí, že když budou střešní šindele rozemlety na velmi jemné částice, dosáhneme lepších chemických i fyzikálních interakcí mezi recyklovanou a původní složkou asfaltové směsi. [11] Šindele rozemleté na malé částice se, na rozdíl od těch hrubých, do směsi zapracují rovnoměrně [10].

Během drcení se k šindelům může přisypávat písek, který zabrání tomu, aby se později během skladování šindelová drť spojovala k sobě. Před znovupoužitím šindelů se také musí zkontrolovat, zda neobsahují azbest, který se dříve používal při jejich výrobě. [8]

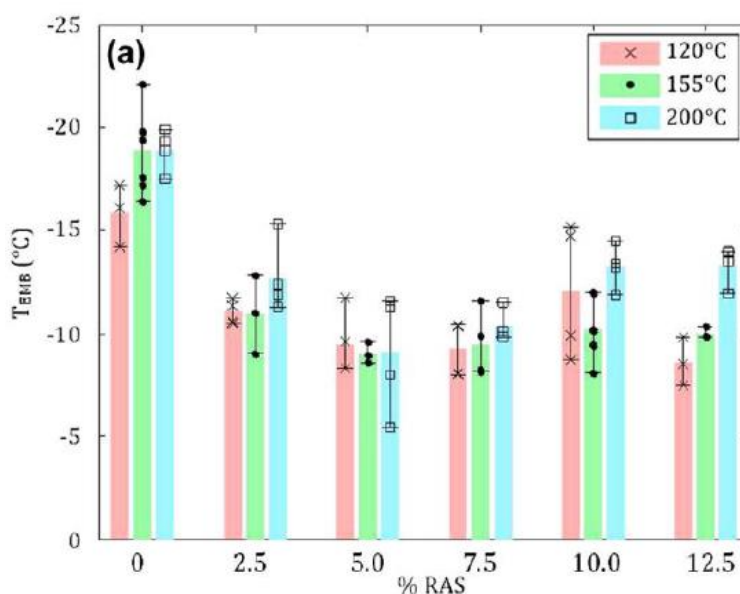
Pouze část asfaltového pojiva obsaženého ve střešních šindelích se smísí s dávkovaným pojivem v asfaltové směsi. Neexistuje však žádný postup pro přesné stanovení smíchaného množství. [13]

Míchání asfaltové směsi při vyšší teplotě vede k menšímu vzniku shluků recyklovaného pojiva (*obrázek 6*). Tyto shluky snižují odolnost proti křehkému porušení v daném místě.

Laboratorní zkouškou DC(T) – zkouškou kompaktního napětí na vzorku asfaltového betonu tvaru disku – bylo zjištěno, že teploty křehnutí asfaltové směsi jsou významně ovlivněny přítomností šindelových recyklátů už při jejich velmi malém množství. To lze vidět na *grafu 2*, kde je znázorněna závislost teploty křehnutí asfaltové směsi na obsahu šindelů při třech různých teplotách míchání. Při 155 °C má referenční směs bez recyklátu teplotu křehnutí -18,90 °C, ale už při množství 2,5 % recyklátu teplota křehnutí vzrostla na -10,97 °C. Zároveň si lze všimnout, že s rostoucí teplotou míchání průměrná teplota křehnutí klesá. [8]



Obrázek 6 – Shluky asfaltového pojiva [8]



Graf 2 – Závislost teploty křehnutí na množství asfaltových šindelů ve směsi [8]

### 2.3.2 VLASTNOSTI ASFALTOVÝCH SMĚSÍ S PŘIDANÝMI STŘEŠNÍMI ŠINDELI

Asfaltové šindele jsou běžně vyráběny z oxidovaného (foukaného) asfaltu, který má vyšší viskozitu a je tedy mnohem tužší než asfalt běžně využívaný v asfaltových směsích [11]. Zároveň jsou šindele tvořeny vlákny, které mají také tendenci produkt ztužovat [10]. Tyto vlastnosti výslednou směs výrazně ovlivňují, přestože se do ní přidává asfaltových šindelů relativně málo. Optimální množství je vždy nutno stanovit podle vlastností konkrétních střešních šindelů vzhledem k tomu, že se jejich vlastnosti mění v závislosti na jejich původu [14].

Jako jeden z největších nedostatků asfaltových směsí z šindelů se jeví jejich tuhost a křehkost, které vedou ke vzniku trhlin a drobení směsi. To je způsobeno zestárými asfaltovými pojivy obsaženými v odpadním materiálu. [12]

Tuhost bývá kritická (vznikají trhliny) hlavně při nižších provozních teplotách, proto se v těchto případech doporučuje používat směsi s měkčím primárním pojivem. Naopak při vyšších teplotách tuhost směs ovlivnila pozitivně a byla zjištěna vyšší odolnost proti vyjždění kolejí oproti běžné asfaltové směsi. Při nižších teplotách byla zjištěna také nižší pevnost v tahu. Směsi s šindelovým recyklátem měly vysoký modul pružnosti, když mělo pojivo extrahované z recyklátu vysokou hodnotu penetrace a nízkou viskozitu. [8]

Nedostatky směsí (např. velkou tuhost) lze řešit přidáním recyklačních činidel (omlazovací, změkčovací prostředky), která zlepší reologické a technické vlastnosti směsi. Problémem této možnosti je její zatím nedostatečná znalost a prozkoumanost. [15, 12]

### 3 CÍLE PRÁCE

Cílem bakalářské práce je porovnání vlastností asfaltových pojiv obsažených v odpadních materiálech, konkrétně střešních šindelích a hydroizolačních páslech. Pojivo bude z těchto materiálů získáno pomocí extrakce průtokovou odstředivkou a destilace s využitím rotačního vakuového destilačního zařízení. Vlastnosti asfaltu budou následně zjišťovány pomocí následujících laboratorních zkoušek:

- stanovení penetrace jehlou,
- stanovení bodu měknutí metodou kroužek a kulička,
- stanovení vratné duktility,
- stanovení reologických vlastností pomocí dynamického smykového reometru.

### 4 POUŽITÉ ZKUŠEBNÍ METODY

V rámci bakalářské práce jsou použity postupy pro zkoušky asfaltových pojiv dle platných norem, a to konkrétně:

- *ČSN EN 12697-1: Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 1: Obsah rozpustného pojiva [16]*
- *ČSN EN 12697-3+A1: Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 3: Znovuzískání extrahovaného pojiva: Rotační vakuové destilační zařízení [17]*
- *ČSN EN 1426: Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou [18]*
- *ČSN EN 1427: Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička [19]*



- ČSN EN 13398: *Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení vratné duktility modifikovaných asfaltů* [20]
- ČSN EN 14770: *Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu - Dynamický smykový reometr (DSR)* [21]

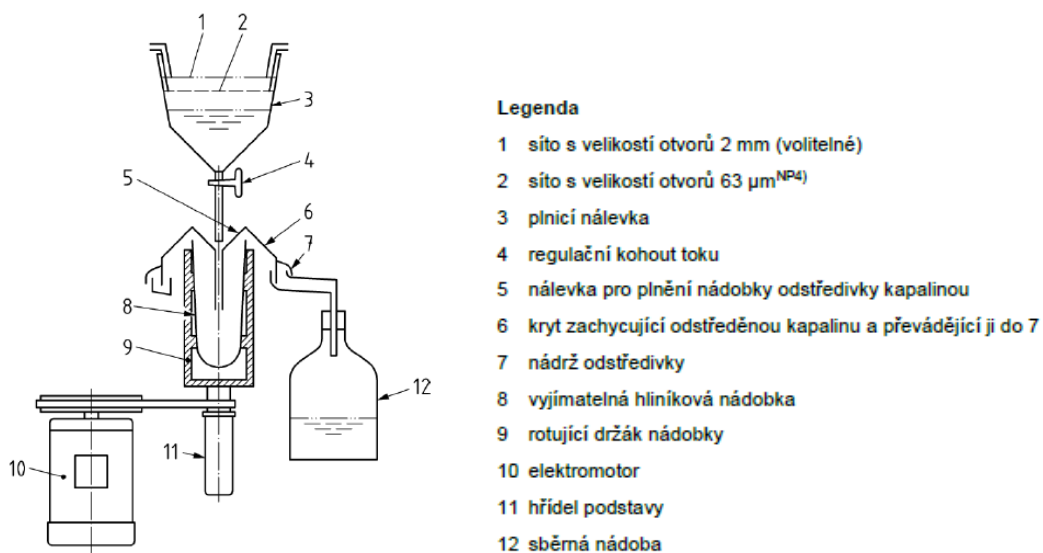
#### 4.1 EXTRAKCE A DESTILACE ASFALTOVÉHO POJIVA

Pro provádění laboratorních zkoušek asfaltových pojiv obsažených ve střešních šindelích je nutno nejdříve pojivo oddělit od ostatních složek. To se provede extrakcí.

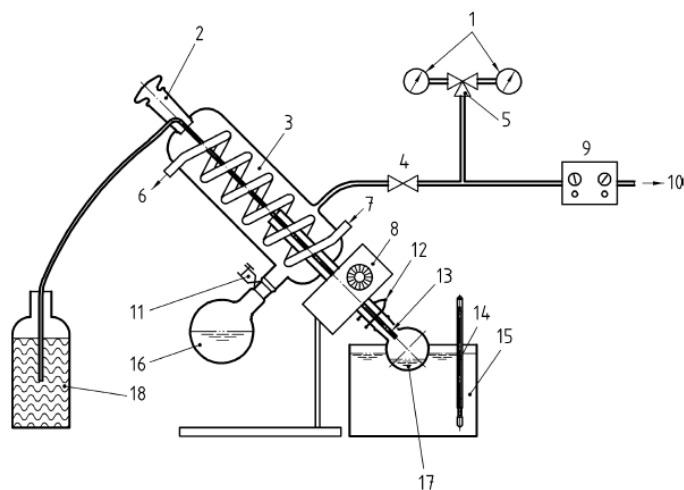
Navážené množství asfaltových šindelů se na dostatečně dlouhou dobu naloží do tetrachlorethylenu (perchlorethylenu), který funguje jako rozpouštědlo. To znamená, že se pojivo oddělí od pevných, minerálních, složek. K jejich úplnému odstranění se dále použije průtoková odstředivka (*obrázek 7*). Nálévka je opatřena dvěma sítí s velikostmi otvorů 2 mm a 63  $\mu\text{m}$ , která zachytí hrubší částice roztoku. Filer (nejjemnější složka) je odstraňován odstředováním tak, že se zachytává na vnitřním povrchu rotujícího válce. Tekutá složka, která by v tuto chvíli měla být tvořena už jen asfaltovým pojivem a rozpouštědlem, mezitím odtéká do připravené nádoby. Veškerý pevný materiál, který se oddělil, musí být po vysušení zvážen, díky čemuž je následně možné dopočítat množství pojiva obsaženého ve výchozím materiálu. [16]

Pro oddělení asfaltu a rozpouštědla je dále nutno provést destilaci pomocí rotačního vakuového destilačního zařízení (*obrázek 8, 9*). Vzorek je umístěn do destilační baňky. Ta rotuje částečně ponořená do olejové lázně, která má teplotu  $(110 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$ , při tlaku  $(40 \pm 5) \text{ kPa}$ . Teplota a tlak jsou stanoveny podle typu použitého rozpouštědla. Čisté rozpouštědlo se odpařuje a po chladiči skapává do jímací baňky. [17]

Když skončí odpařování rozpouštědla, zvyšuje se postupně teplota (po dobu tří minut) na hodnotu  $(160 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$ , přičemž je zároveň snižován tlak na  $(2 \pm 0,5) \text{ kPa}$ . Když i při těchto podmínkách asfalt stále probublává, je nutno teplotu ještě zvýšit na  $(180 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$  (tlak zůstává stejný). Toto chování je typické pro tuhé asfalty, které jsou obsaženy mimo jiné i v asfaltových šindelích. Deset minut po tom, co asfalt přestane bublat, může být destilace ukončena. [17]



Obrázek 7 – Schématický náčrt průtokové odstředivky [16]



Obrázek 8 – Schématický náčrt rotačního vakuového destilačního zařízení [17]



Obrázek 9 – Rotační vakuové destilační zařízení

## 4.2 PENETRACE JEHLOU

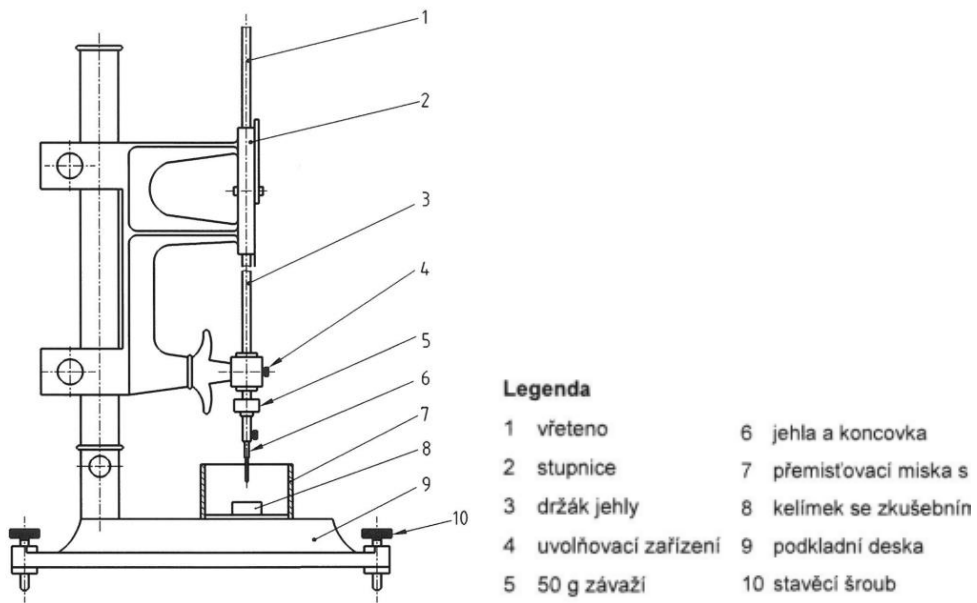
Při zkoušce penetrace jehlou je zjišťována hloubka průniku normované jehly do materiálu za přesně stanovených podmínek. Naměřený výsledek je vyjádřen v penetračních jednotkách, které odpovídají 0,1 mm. [18]

Vzorek asphaltového pojiva je ve vhodné nádobě temperován na zkušební teplotu 25 °C. Aby se pomohlo udržení požadované teploty, je nádoba s asfaltem potopena ve vodní lázni i během zkoušky. Takto připravený vzorek se umístí na podstavec penetrometru (obrázek 10). [18]

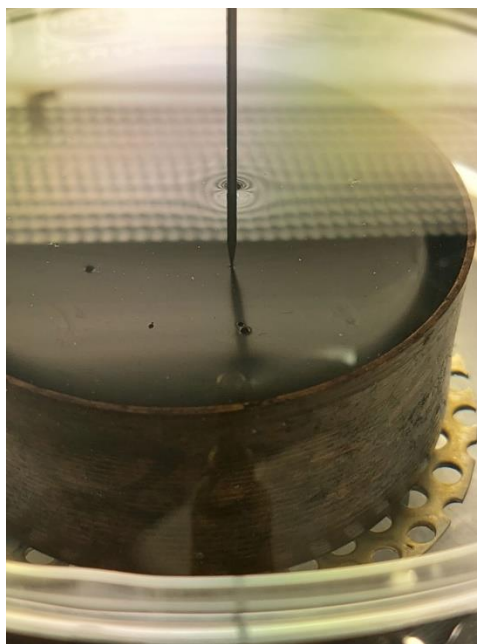
Jehla penetrometru se nachystá těsně k hladině asphaltového vzorku, což je její počáteční poloha pro měření průniku (obrázek 11). Pro přesné nalezení této polohy je využíváno přímého světla, aby byl viditelný stín jehly. Jehla se pomalu přibližuje k hladině asfaltu a ve chvíli, kdy se dotkne svého stínu, je ve správné počáteční poloze. [18]

Zkouška spočívá v pronikání penetrační jehly do vzorku pod tíhou ( $100 \pm 0,10$ ) g po dobu 5 s. Následně je změřena (v penetračních jednotkách) hloubka, do které se jehla ponořila. Takovéto měření musí být na každém vzorku provedeno třikrát, přičemž vpich musí být pokaždé v jiném místě. Vzdálenost měřených míst od sebe navzájem i od stěny nádoby musí být nejméně 10 mm. Všechna tři měření je nutno provést relativně rychle po sobě, protože i malá změna teploty asfaltu vede ke zkreslení výsledků. [18]

Konečným výsledkem penetrační zkoušky jehlou je aritmetický průměr ze tří naměřených hodnot na daném vzorku.



Obrázek 10 – Penetrometr [18]



Obrázek 11 – Počáteční poloha jehly pro měření penetrace

#### 4.3 BOD MĚKNUTÍ (KROUŽEK A KULIČKA)

Jednou ze základních vlastností, která definuje asfaltová pojiva, je bod měknutí. Jedná se o teplotu, při které zkušební vzorek dosáhne normou stanovené polotekuté konzistence.

V rámci přípravy na zkoušku je asfaltové pojivo nalito do mosazných kroužků (*obrázek 12*) položených na odlévací destičce s dostatečným přebytkem (*obrázek 13*), který je po vychladnutí a ztuhnutí zkoušeného asfaltu seříznut nahřátým nožem do jedné roviny s hranou kroužku. Na každou zkoušku jsou potřeba dva kroužky s odlitým vzorkem (pro porovnání výsledků). Pro případ, že by zkoušku bylo nutno opakovat, plní se vzorek do dvojnásobku kroužků. [19]

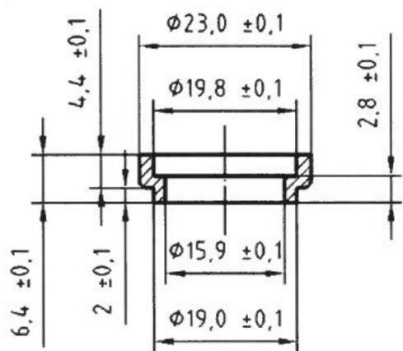
Nejprve je nutno odhadnout, v jakém teplotním rozmezí se bude bod měknutí pohybovat, podle čehož se určí, ve které kapalině je možné zkoušku provést. Jestliže se bod měknutí daného asfaltového pojiva odhadne na hodnotu mezi 28 °C a 80 °C, bude použita čerstvě převařená, ochlazená, destilovaná voda. Jestliže se zkoušené asfaltové pojivo zdá být tužší a odhaduje se jeho bod měknutí v rozmezí od 80 °C do 150 °C, musí být použit glycerín. [19]

Dva kroužky naplněné zkoušeným asfaltovým pojivem jsou umístěny do držáku (*obrázek 14*). Ve vzdálenosti ( $25 \pm 0,4$ ) mm od spodní hrany kroužků leží horní povrch základní desky. Na každý kroužek se umístí středící prstenec, do kterého je vložena kulička z korozivzdorné oceli o průměru ( $9,50 \pm 0,05$ ) mm a hmotnosti ( $3,50 \pm 0,05$ ) g. Takto nachystaná sestava se ponoří do kádinky naplněné vodou (teplota ( $5 \pm 1$ ) °C) nebo glycerínem (teplota ( $30 \pm 1$ ) °C), která je umístěna ve zkušebním přístroji. (*obrázek 15, 16*) [19]

V průběhu zkoušky je kapalina za stálého míchání ohřívána rovnoměrně rychlostí 5 °C/min. Je nutno dbát na správnou počáteční teplotu i na stálost ohřevu (kontrolováno teploměrem neustále ponořeným do kádinky). [19]

S narůstající teplotou začne asfaltové pojivo měknout a kulička vlastní tíhou propadávat vzorkem. Asfalt obklopuje kuličku, přičemž nesmí být porušen, jinak je nutno zkoušku opakovat. Teplota se zaznamená ve chvíli, kdy je vzorek asfaltu „protážen“ na délku 25 mm – tj. dotkne se základní desky (*obrázek 17*). Tato teplota odpovídá hledanému bodu měknutí. Aby mohla být naměřená hodnota považovaná za správnou, nesmí být rozdíl mezi dvěma naměřenými hodnotami (na každou zkoušku použity dvě soustavy kroužek–kulička) větší než 1 °C v případě použití vodní lázně nebo 2 °C při použití glycerínu. Za výslednou hodnotu považujeme průměr ze dvou takto naměřených teplot. [19]

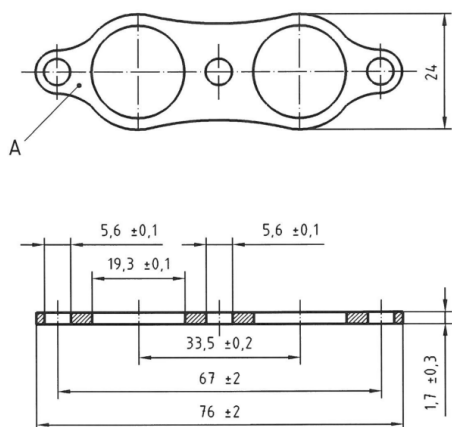
Při zkoušce prováděné ve vodě jsou naměřené body měknutí daného asfaltu asi o 4 °C nižší než u zkoušek v glycerínu. Proto je při zkoušení asfaltů s bodem měknutí okolo 80 °C nutno zkoušku provádět postupně v obou kapalinách. [19]



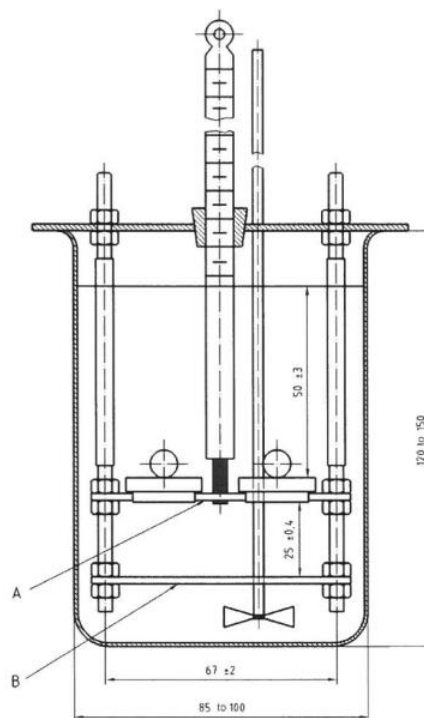
Obrázek 12 – Kroužek [19]



Obrázek 13 – Kroužky naplněné asfaltovým pojivem



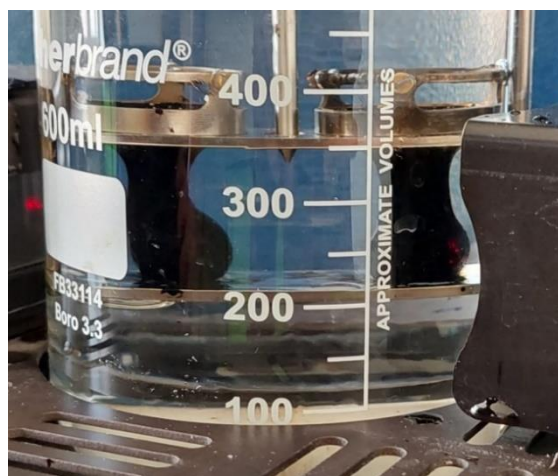
Obrázek 14 – Držák kroužků [19]



Obrázek 15 – Zkušební sestava [19]



Obrázek 16 – Zkušební sestava



Obrázek 17 – Protážení asfaltového pojiva kuličkou

#### 4.4 VRATNÁ DUKTILITA

Pro zkoušku vratné duktility se asfalt připraví do speciální formy (obrázek 18, 19) – nalije se do ní s přebytkem, který se po vychladnutí (a ztuhnutí) seřízne. Forma se skládá ze dvou dílů, které jsou k sobě připevněny bočnicemi. Během odlévání zkušební vzorku je forma připevněna k podkladní destičce. [20]

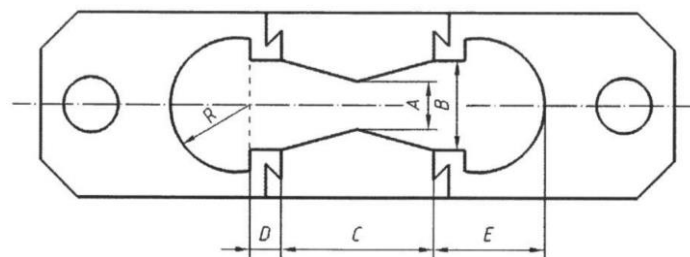
Takto připravený vzorek se vloží do vodní lázně, kde je po dobu  $(90 \pm 10)$  min temperován na zkušební teplotu  $(25 \pm 0,5)$  °C nebo  $(10 \pm 0,5)$  °C. Poté se forma s asfaltem umístí na vodící desky duktilometru a odstraní se bočnice. Samotná zkouška spočívá v oddalování konců formy, čímž je vzorek asfaltu natahován. Konce se od sebe oddalují rychlostí  $(50 \pm 2,5)$  mm/min, a to až do vzdálenosti  $(200 \pm 1)$  mm. Ve chvíli, kdy je této vzdálenosti dosaženo, se asfaltové vlákno uprostřed přestřihne a tím vzniknou dvě polovlákná, která mají tendenci se elasticky zkracovat. Po  $(30 \pm 1)$  min od přestřihnutí je změřena vzdálenost mezi konci polovláken. [20]

Jestliže se vzorek přetrhne dříve, než po dosažení vzdálenosti protahování 200 mm, je změřena délka při přetržení a po elastickém zkrácení. Tento jev může nastat například u zestárých asfaltových pojiv, která bývají křehčí. [20]

Vratná duktilita se spočítá pomocí vzorce 1, kde veličina  $d$  vyjadřuje vzdálenost mezi polovlákná a veličina  $L$  délku protažení (resp. délku při přetržení u předčasného porušení). Výsledek je vyjádřen v procentech. [20]

$$R_E = \frac{d}{L} \times 100$$

Vzorec 1 [20]



Obrázek 18 – Forma pro zkoušku vratné duktility [20]



Obrázek 19 – Forma pro zkoušku vratné duktility naplněná asfaltovým pojivem

#### 4.5 DYNAMICKÝ SMYKOVÝ REOMETR

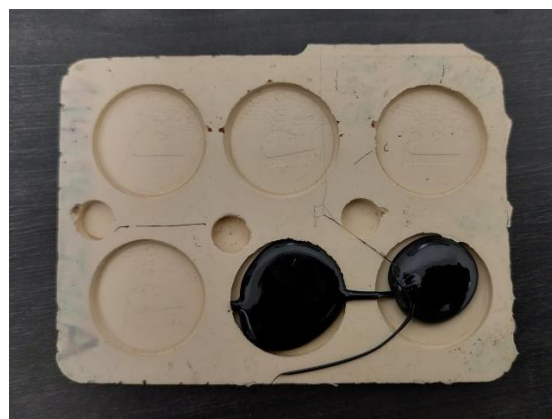
Dynamický smykový reometr (DSR) je přístroj, pomocí něhož lze měřit reologické vlastnosti asfaltových pojiv. (obrázek 20) [21]

Zkoušené asfaltové pojivo je nalito do silikonové, nepřilnavé formy tak, aby mělo dostatečný průměr a výšku pro zkoušku zvolenou geometrií soupravy (obrázek 21). Po vychladnutí a ztuhnutí je vzorek z formy vyjmut a umístěn do reometru. Destičky reometru se nahřívají společně s asfaltem. Horní geometrie se přiblíží k dolní podložce na vzdálenost zvolené mezery zvětšené o 0,050 mm, což způsobí zmáčknutí asfaltu a přetečení jeho přebytku do stran. Tento přebytek musí být odstraněn. Následně se destičky přiblíží přesně na vzdálenost stanovené mezery (obrázek 22). [21]

Podle zkoušeného asfaltu je zvolena vhodná zkušební teplota (obecně od 25 °C do 85 °C). Dále se zvolí rozsah a počet frekvencí, při kterých bude zkouška probíhat. Při zvolených podmínkách je vzorkem v reometru smýkáno a zaznamenává se absolutní hodnota komplexního smykového modulu ( $G^*$ ), úhel fázového posunu ( $\delta$ ) a dále jednotlivé složky komplexního smykového modulu a komplexní poddajnosti ( $G'$ ,  $G''$ ,  $J'$ ,  $J''$ ). Výsledky je vhodné zpracovat do grafů. [21]

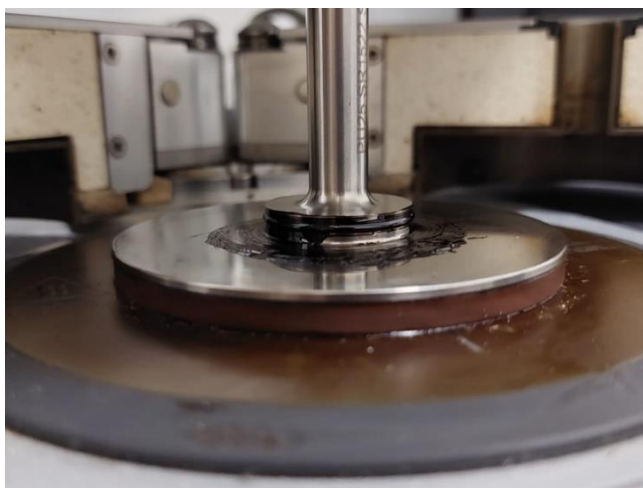


Obrázek 20 – Dynamický smykový reometr (DSR)



Obrázek 21 – Asfaltové pojivo v silikonové formě pro zkoušku DSR





Obrázek 22 – Vzorek asfaltu umístěný v reometru

## 5 POUŽITÉ MATERIÁLY

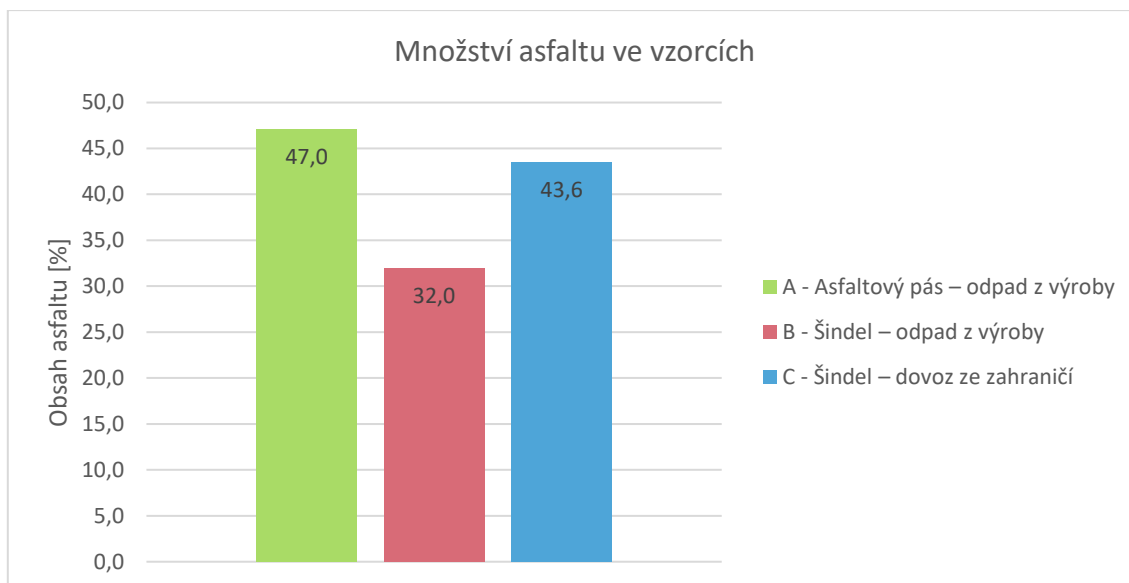
V rámci bakalářské práce byly prováděny laboratorní zkoušky na asfaltovém pojivu získaném z odpadního materiálu. Vstupním materiálem byly odpadní asfaltový hydroizolační pás a dva vzorky šindelů (odpad z výroby a dovoz ze zahraničí), které mi poskytla společnost Skanska Asfalt s.r.o.

Asfaltové pojivo bylo z výchozího materiálu získáno extrakcí a následnou destilací. Množství získaného asfaltu z jednotlivých vzorků je uvedeno v *tabulce 2* a následně porovnán v *grafu 3*. Ve všech třech případech se množství asfaltového pojiva pohybuje okolo 40 %, což odpovídá hodnotě uváděné v literatuře. Vzorek A (asfaltový hydroizolační pás) obsahuje asfaltu nejvíce, a to 47 %.

Vzhledem k původu materiálu je nutno brát v potaz i možný obsah dalších příměsí, které není možné blíže specifikovat. Ty mohou mít také nepatrný vliv na výsledky prováděných zkoušek.

	navážka materiálu [g]	hrubý odpad [g]	prázdňá patrona [g]	patrona + filer [g]	jemný odpad (filer) [g]	hmotnost asfaltu před destilací [g]	množství asfaltu	
							[-]	[%]
A Asfaltový pás – odpad z výroby	423,0	116,6	646,6	754,0	107,4	199,0	0,4704	<b>47,0</b>
B Šindel – odpad z výroby	400,0	210,5	646,7	708,3	61,6	127,9	0,3198	<b>32,0</b>
C Šindel – dovoz ze zahraničí	400,0	184,5	646,4	687,7	41,3	174,2	0,4355	<b>43,6</b>

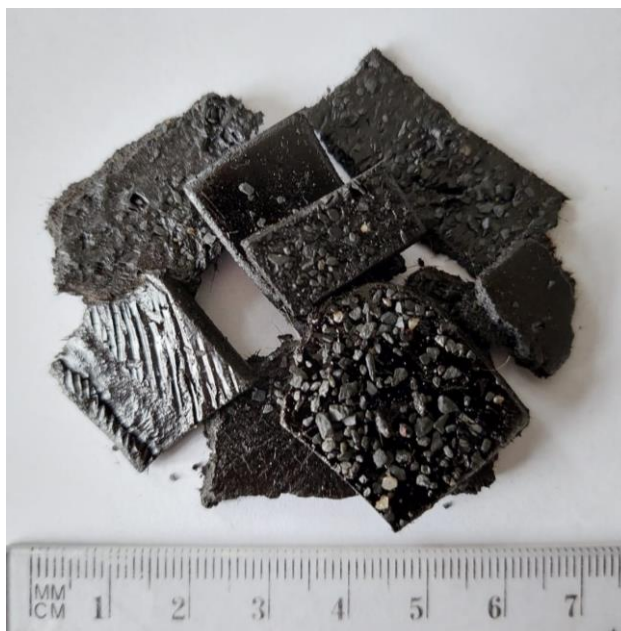
Tabulka 2 – Množství asfaltu ve zkušebních vzorcích



*Graf 3 – Množství asfaltu ve zkušebních vzorcích*

## 5.1 ASFALTOVÝ PÁS – ODPAD Z VÝROBY

Tento materiál (*obrázek 23*) je v bakalářské práci označen jako vzorek A, ve veškerých výstupech je vyznačen zelenou barvou.



*Obrázek 23 – Asfaltový pás – odpad z výroby (vzorek A)*

## 5.2 ŠINDEL – ODPAD Z VÝROBY

Tento materiál (*obrázek 24*) je v bakalářské práci označen jako vzorek B, ve veškerých výstupech je vyznačen červenou barvou.



Obrázek 24 – Šindel – odpad z výroby (vzorek B)

## 5.3 ŠINDEL – DOVOZ ZE ZAHRANIČÍ

Tento materiál (*obrázek 25*) je v bakalářské práci označen jako vzorek C, ve veškerých výstupech je vyznačen modrou barvou. Jedná se o materiál získaný recyklací použitých střešních šindelů.



Obrázek 25 – Šindel – dovoz ze zahraničí (vzorek C)

## 6 VÝSLEDKY ZKOUŠEK

Zkoušky byly prováděny v laboratoři Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně – Ústavu pozemních komunikací podle platných norem.

### 6.1 PENETRACE JEHLOU

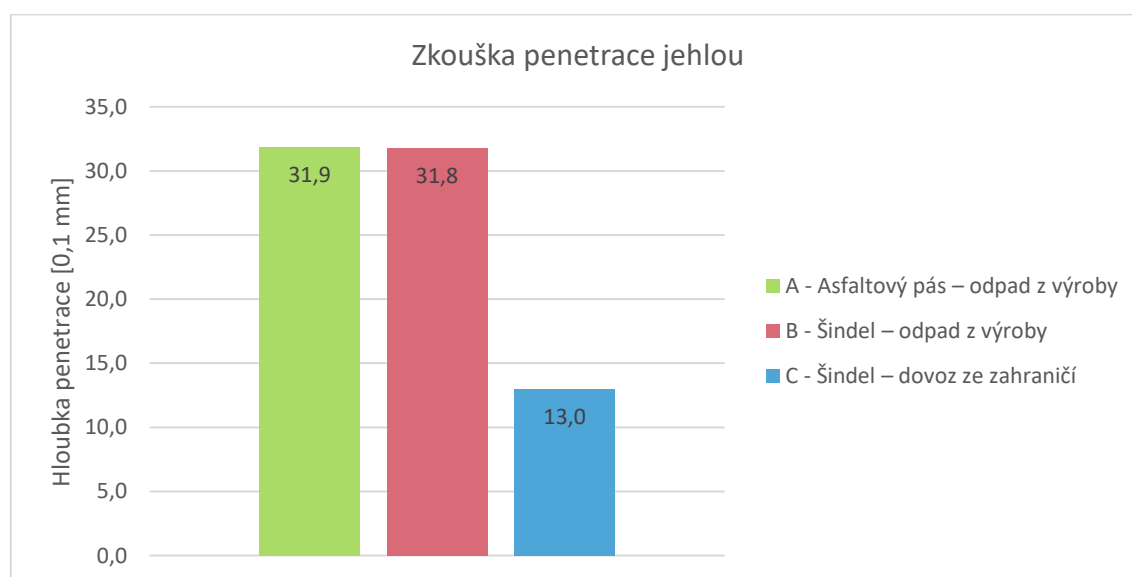
Pomocí zkoušky penetrace jehlou lze stanovit tuhost asfaltového pojiva. Zkouška byla provedena na všech třech zkušebních vzorcích podle normovaného postupu uvedeného v kapitole 4.2. Naměřené výsledky jsou uvedeny v *tabulce 3* a následně porovnány v *grafu 4*.

Jednoznačně nejmenší průměrný propad jehly 13,0 penetračních jednotek byl zaznamenán u vzorku C, lze ho proto určit za nejtuzší. Tuhost bývá způsobována procesem stárnutí asfaltových pojiv, proto výsledek odpovídá předpokladu, že vzorek, který byl nejdéle vystavován vnější vlivům, bude v důsledku oxidace nejtuzší. Ostatní dva vzorky (A a B) dosahovaly vyšší hodnoty penetrace jehlou, což odpovídá tomu, že tyto vzorky byly získány přímo při jejich výrobě a nedošlo tedy k jejich oxidaci při umístění výrobku na střeše.

**Penetrace jehlou**

	naměřené hodnoty [0,1 mm]			průměr [0,1 mm]
A	32,4	31,3	32,0	<b>31,9</b>
B	32,2	31,7	31,5	<b>31,8</b>
C	13,1	12,8	13,0	<b>13,0</b>

*Tabulka 3 – Výsledky zkoušky penetrace jehlou*



*Graf 4 – Porovnání výsledků zkoušky penetrace jehlou*

## 6.2 BOD MĚKNUTÍ (KROUŽEK A KULIČKA)

Bod měknutí byl stanoven pomocí zkušební postupu uvedeného kapitole 4.3. Zkouška byla prováděna pro každý materiál na dvou sestavách kroužek–kulička zároveň kvůli srovnání bodů měknutí obou z nich. Aby byla zkouška platná, nesmí být jejich rozdíl větší než 2 °C, což splňují všechny tři zkoušené materiály.

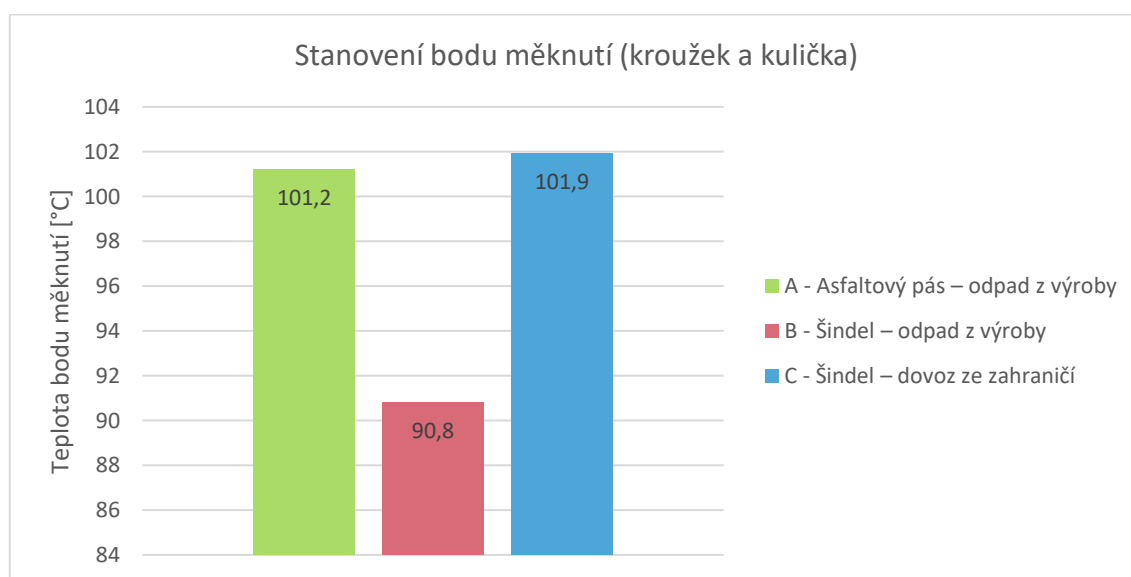
Body měknutí všech zkoušených materiálů se pohybují okolo 100 °C, proto byla zkouška prováděna v glycerínu. Naměřené výsledky jsou uvedeny v *tabulce 4* a následně porovnány v *grafu 5*. Vzorek *B* dosáhl bodu měknutí už při teplotě 90,8 °C, což je nejméně ze všech zkoušených vzorků. Je tedy nejméně odolný proti vzniku trvalých deformací.

### Stanovení bodu měknutí (kroužek a kulička)

v glycerínu

	kulička		průměr [°C]	rozdíl [°C]
	pravá [°C]	levá [°C]		
A	101,5	100,9	<b>101,2</b>	0,6
B	91,1	90,4	<b>90,8</b>	0,7
C	102,2	101,6	<b>101,9</b>	0,6

Tabulka 4 – Výsledky stanovení bodů měknutí



Graf 5 – Porovnání bodů měknutí

### 6.3 VRATNÁ DUKTILITA

Zkouška vratné ductility byla prováděna podle postupu popsaného v kapitole 4.4. U všech tří zkoušených materiálů se potvrdila jejich předpokládaná křehkost, která je důsledkem stárnutí asfaltových pojiv (obrázek 26). Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5 a výsledky vratné ductility porovnány v grafu 6.

Během zkoušky vratné ductility došlo u všech tří vzorků k jejich křehkému porušení (přetržení vlákna) ještě před dosažením normou dané vzdálenosti protažení 200 mm (graf 7, 8, 9). Vzorek C se porušil nejpozději, a to při protažení na 47 mm.

Vratná ductilita vzorku C (70,2 %) je zhruba dvojnásobná oproti zbylým dvěma vzorkům. Znamená to, že je tento materiál ze všech zkoušených jednoznačně nejelastičtější. Výsledky však byly značně ovlivněny předčasným přetržením vlákna asfaltu.

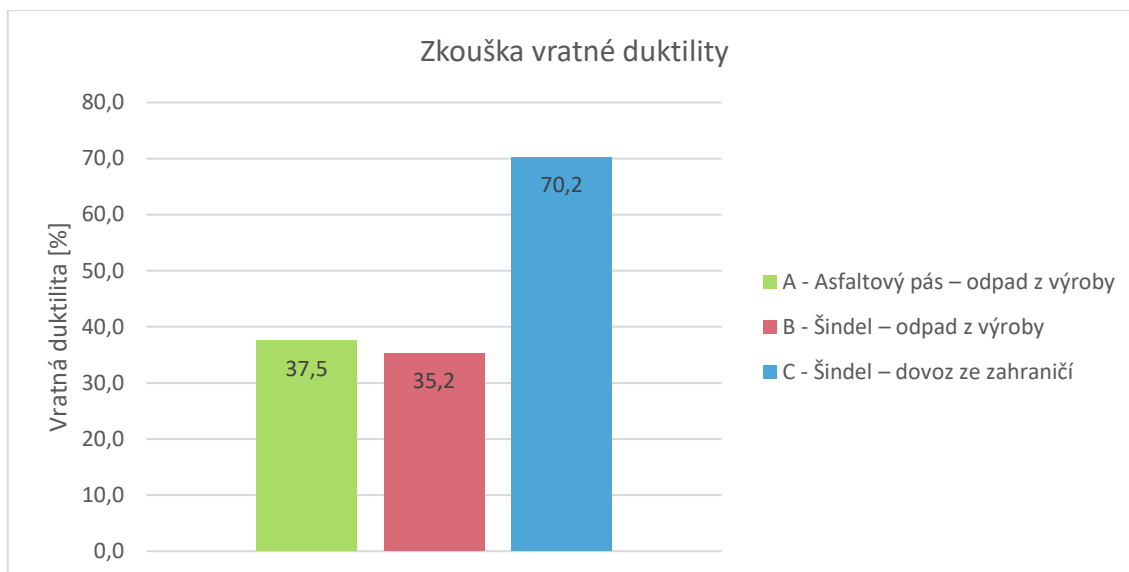


Obrázek 26 – Zkouška vratné ductility – křehké porušení vzorků

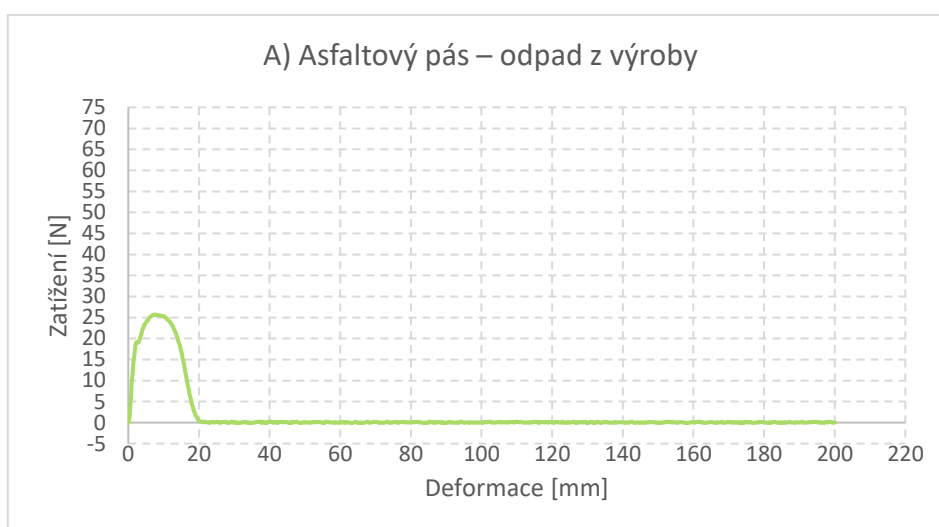
**Vratná ductilita**

	posun v čase přetržení [mm]	posun po přetržení [mm]	vzdálenost mezi utrženými konci [mm]	zkrácení [mm]	vratná ductilita	
					[-]	[%]
A	19,2	180,8	188	7,2	0,375	<b>37,5</b>
B	24,7	175,3	184	8,7	0,352	<b>35,2</b>
C	47,0	153,0	186	33,0	0,702	<b>70,2</b>

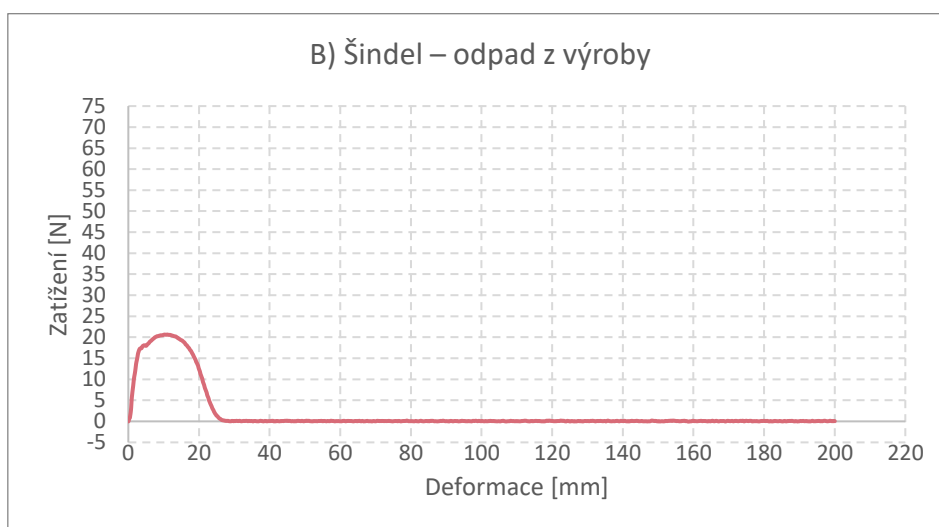
Tabulka 5 – Výsledky vratné ductility



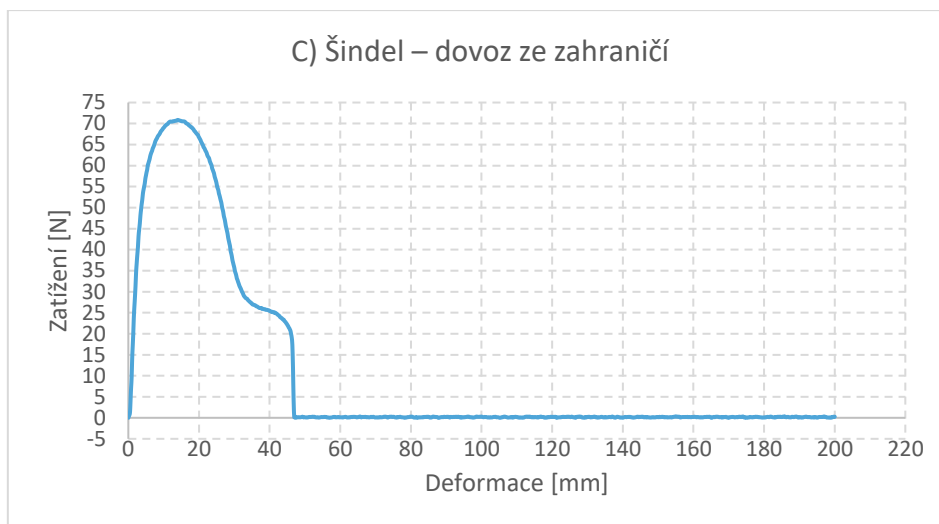
*Graf 6 – Porovnání výsledků vratné duktility*



*Graf 7 – Porušení vzorku A během zkoušky vratné duktility*



*Graf 8 – Porušení vzorku B během zkoušky vratné duktility*



*Graf 9 – Porušení vzorku C během zkoušky vratné duktility*

#### 6.4 DYNAMICKÝ SMYKOVÝ REOMETR

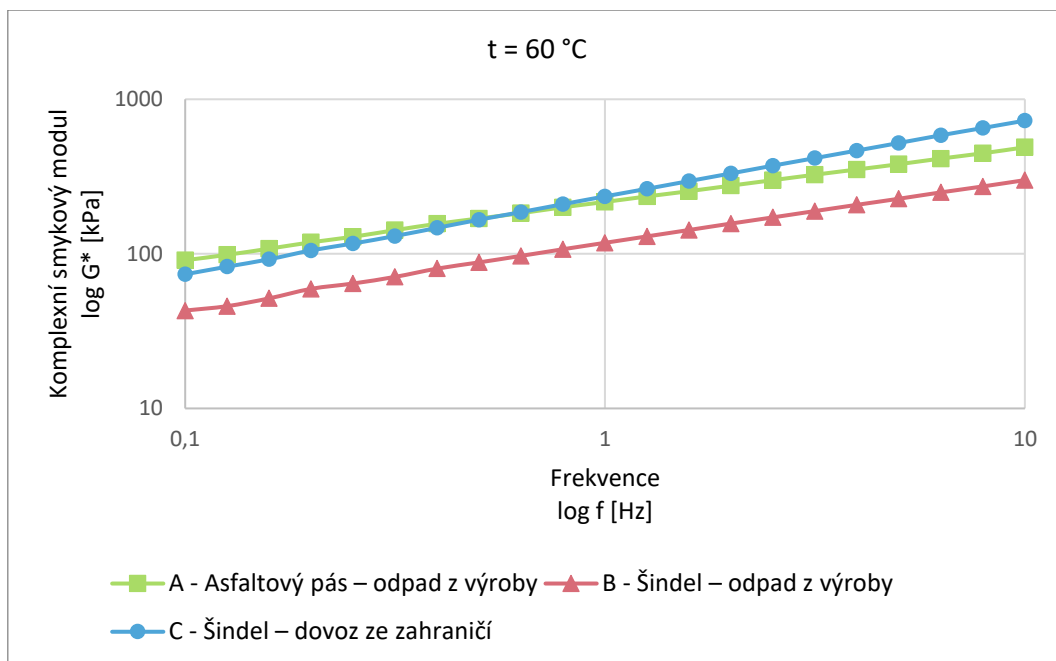
Reologické vlastnosti asfaltového pojiva byly měřeny pomocí dynamického smykového reometru dle postupu uvedeného v kapitole 4.5.

Všechny tři vzorky byly zkoušeny pomocí geometrie o průměru 25 mm. Pro přesnější výsledky si nejprve reometr nastavil nulovou mezeru. Po vložení asfaltového pojiva do přístroje byl vzorek geometrií stlačen na tloušťku 1,05 mm. Přebytek bylo nutné ořezat nahřátou kovovou špachtlí. Následně reometr zpřesnil mezeru mezi horní a dolní geometrií (odpovídající tloušťce vzorku) na 1,00 mm. Na takto připraveném vzorku byla spuštěna zkouška. Popsaný postup byl totožný pro všechny tři řešené materiály.

Zkouška dynamickým smykovým reometrem byla prováděna v rámci lineárně viskoelastické oblasti při teplotách v rozmezí 40–70 °C s krokem po 5 °C. Použity byly frekvence 0,1–10 Hz. Výstupem této zkoušky jsou především komplexní smykový modul  $G^*$  a úhel fázového posunu  $\delta$ . Závislosti naměřených hodnot jsou zpracovány v následujících *grafech 10–18*.

*Graf 10* zobrazuje závislost komplexního smykového modulu na frekvenci zatěžování při zkušební teplotě 60 °C. Nejmenší komplexní smykový modul vykazuje vzorek *B*, což odpovídá výsledku zkoušky bodu měknutí. Při nižších frekvencích je smykový modul nejvyšší u vzorku *A*, při frekvencích vyšších je to u vzorku *C*. Z grafu je také patrné, že vzorek *A* dosahuje nejnižší frekvenční závislosti (citlivosti), což může souviset s obsahem modifikační přísady nebo jejími vlastnostmi.

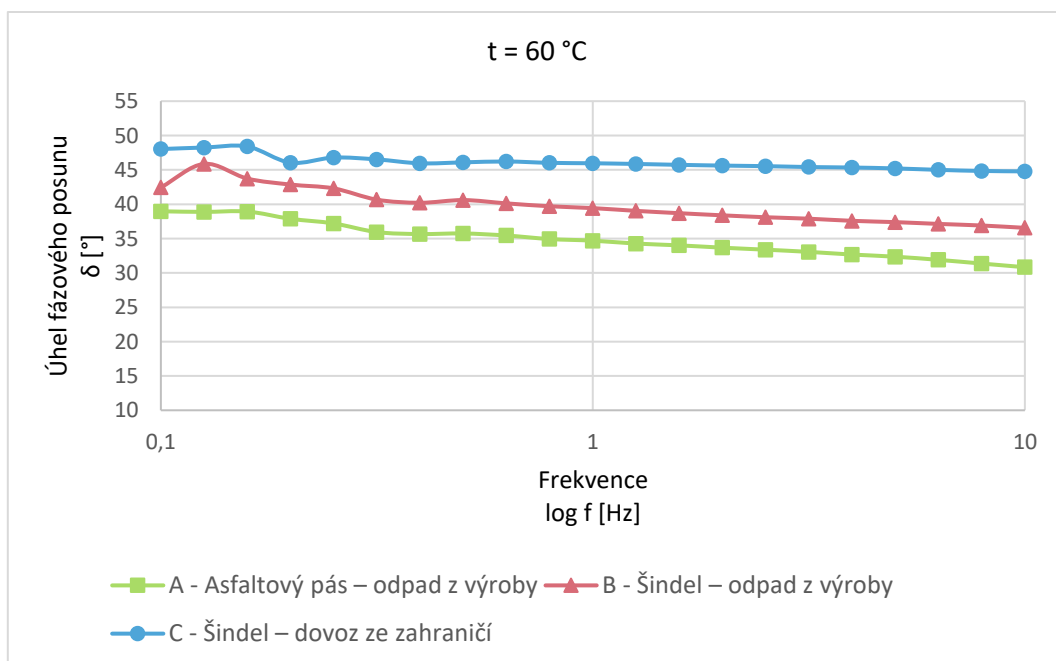




Graf 10 – Závislost komplexního smykového modulu na frekvenci při teplotě  $t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$

Závislost úhlu fázového posunu na frekvenci zatěžování při teplotě  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  je znázorněna v grafu 11. Nejnižších hodnot  $\delta$  dosahuje vzorek A, z čehož lze soudit, že je ze všech tří zkoušených materiálů při smykovém namáhání nejtužší a nejelastičtější, z čehož lze opět usuzovat, že vlastnosti tohoto vzorku jsou nejkvalitněji upraveny modifikační přísadou.

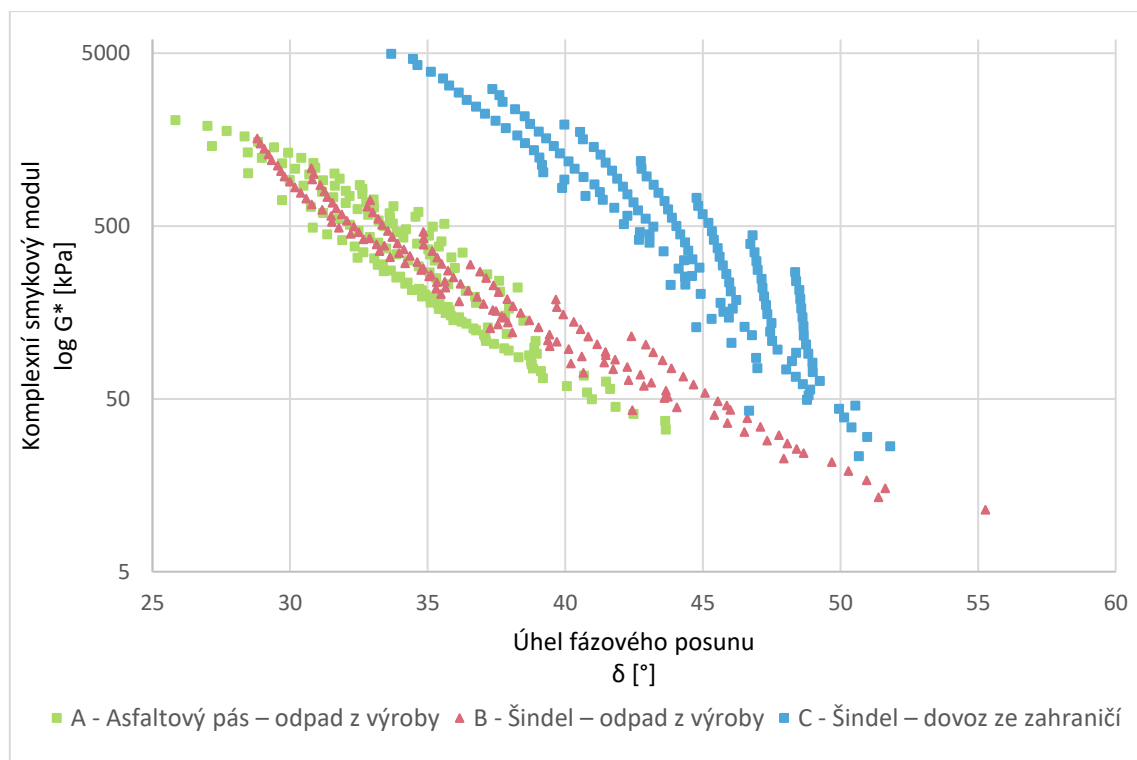
Fázový úhel všech tří vzorků dosahuje i svými maximy (při nízkých frekvencích) relativně nízkých hodnot. Z toho lze říci, že se všechny tři vzorky chovají elasticky a jejich viskozita je potlačena. Toto je typické pro modifikovaná asfaltová pojiva. S rostoucí frekvencí se vzorky stávají tužšími –  $\delta$  se snižuje.



Graf 11 – Závislost úhlu fázového posunu na frekvenci při teplotě  $t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$

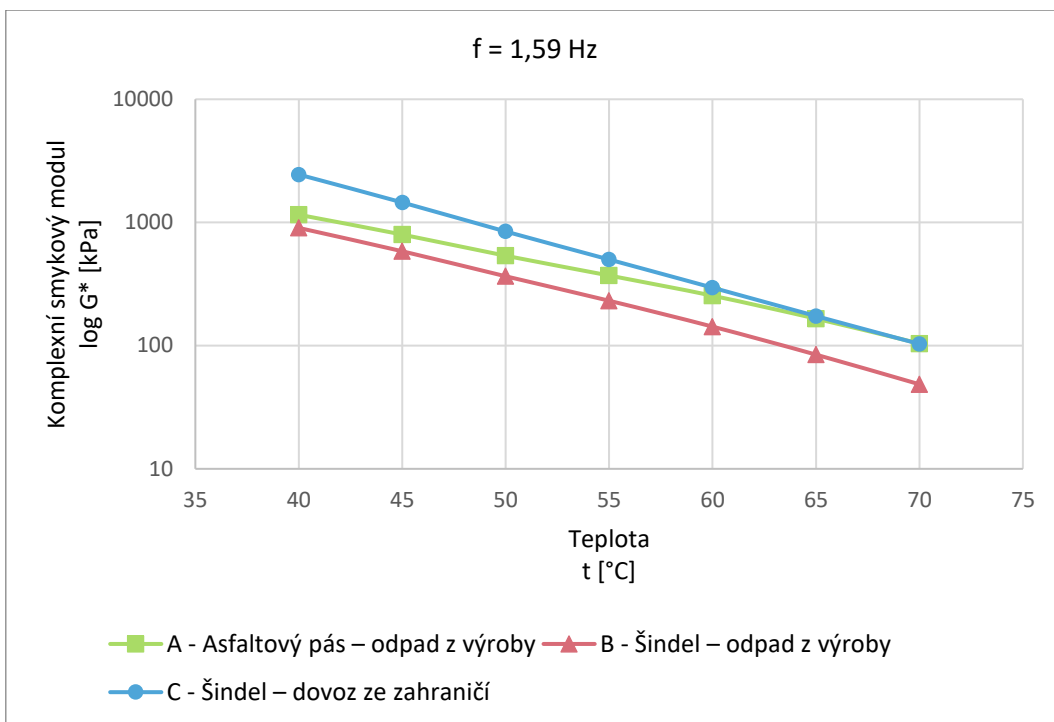
Pomocí Blackova diagramu je vyjádřena závislost komplexního smykového modulu na úhlu fázového posunu (graf 12). Zde je na první pohled zřejmé, že naměřené hodnoty působí „neuhlazeně“ a jsou od sebe navzájem relativně hodně rozprostřeny (široký průběh Blackova diagramu). Tento tvar Blackova diagramu odpovídá silně zestárnutým pojivům. Vzorek C vykazuje nejširší průběh, což odpovídá tomu, že byl tento vzorek získán ze silně zestárlého materiálu použitého na střechách (oproti dvěma vzorkům, které byly získány přímo z výroby).

Fázové úhly jsou v celém průběhu nízké, jedná se tedy o silně modifikovaná pojiva. Vzorek C se vzdaluje od zbylých dvou materiálů, má vyšší fázové úhly, proto lze usuzovat, že je nejplastičtější. Podle nižšího fázového úhlu a vyššího komplexního smykového modulu lze určit, že vzorek A je ze všech tří materiálů nejodolnější proti deformaci.



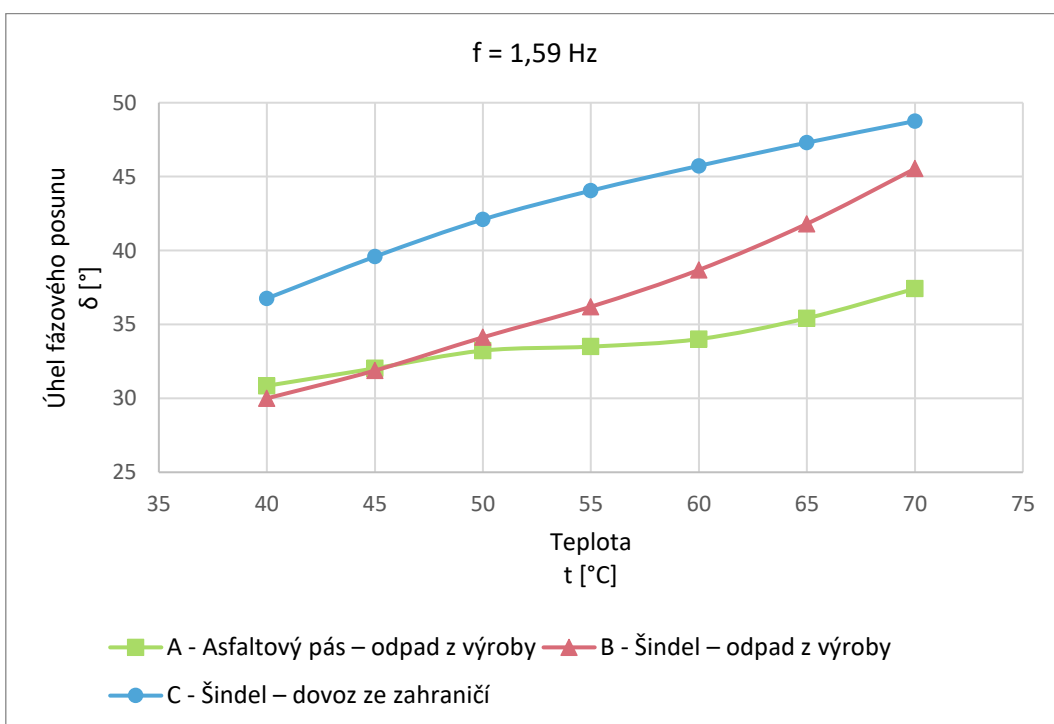
Graf 12 – Blackův diagram

V grafu 13 je zobrazena závislost komplexního smykového modulu na zkušební teplotě, při frekvenci 1,59 Hz. S rostoucí teplotou asfaltové pojivo měkne a jeho komplexní smykový modul klesá. Všechny tři materiály vykazují podobné výsledky, avšak nejméně na zvyšující se teplotu reaguje vzorek A. Tento vzorek má tedy nejnižší teplotní citlivost, což opět pravděpodobně souvisí s vyšším stupněm modifikace a jedná se o pozitivní vlastnost.



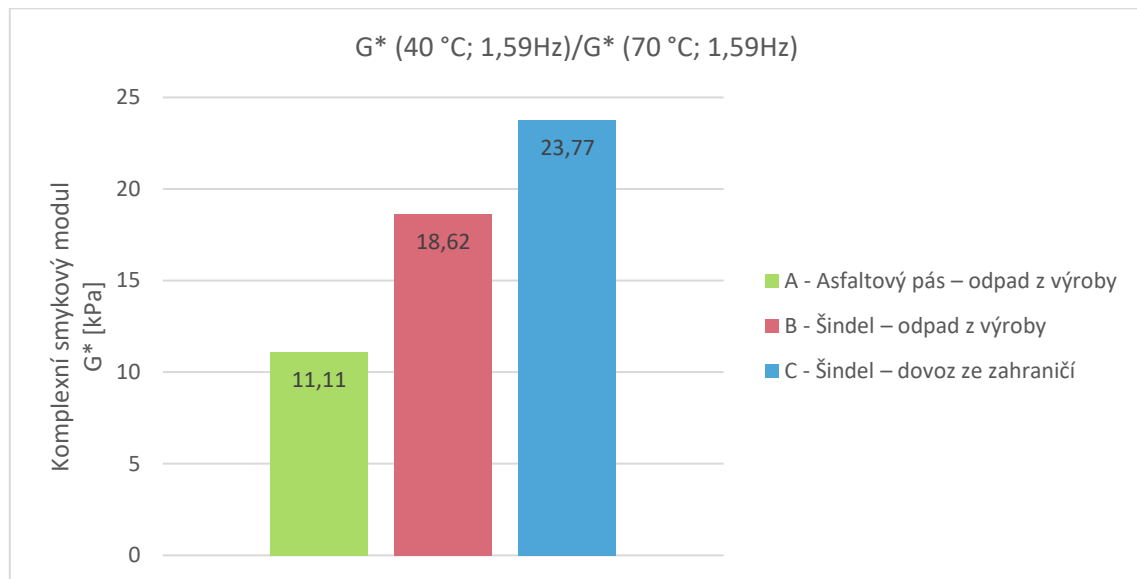
Graf 13 – Závislost komplexního smykového modulu na teplotě při frekvenci 1,59 Hz

Závislost úhlu fázového posunu na teplotě při frekvenci 1,59 Hz je zobrazena v grafu 14. S rostoucí teplotou se zvětšuje i fázový úhel a roste tudíž plasticita pojiva. V tomto srovnání jsou mezi zkoušenými asfaltovými pojivy zřejmě větší rozdíly. Vymyká se vzorek C, který má při všech teplotách vyšší fázový úhel než zbylé dva vzorky. Jeho viskózní složka je průměrně vyšší než u zbylých vzorků. Vzorek B reaguje na zvyšování teploty nejcitlivěji a jeho fázový úhel se zvětšuje nejrychleji.



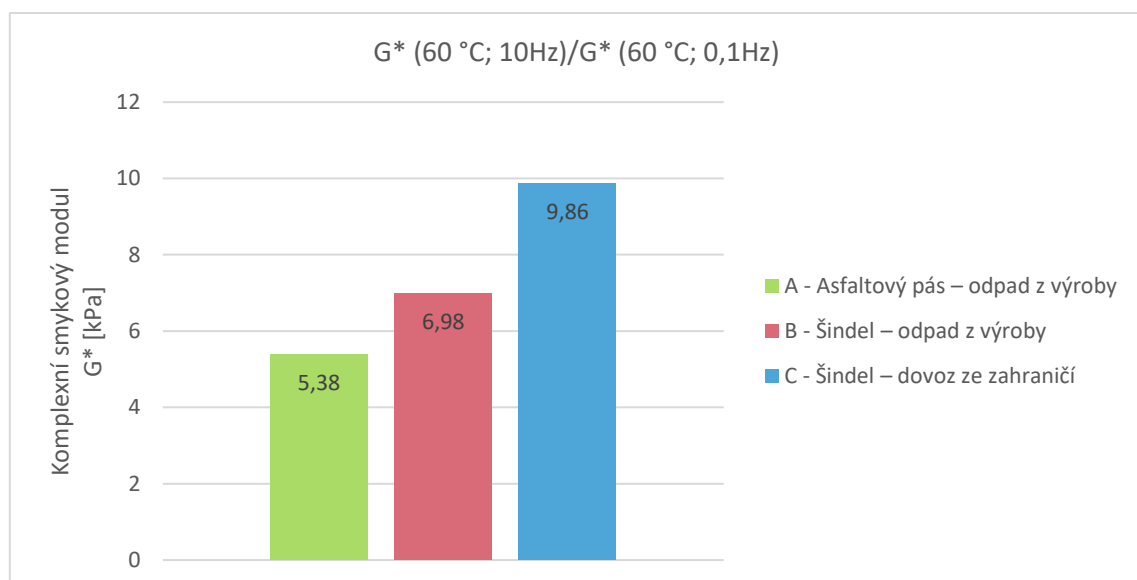
Graf 14 – Závislost úhlu fázového posunu na teplotě při frekvenci 1,59 Hz

Graf 15 odpovídá teplotní citlivosti jednotlivých zkoušených materiálů. Jedná se o zobrazení podílu komplexních smykových modulů při teplotě 40 °C a 70 °C a frekvenci 1,59 Hz. Dle těchto výsledků na změnu teploty nejvíce reaguje vzorek C, naopak nejméně vzorek A.



Graf 15 – Teplotní citlivost při frekvenci 1,59 Hz

Závislost na rychlosti zatížení asfaltových pojiv je znázorněna na grafu 16. Vyjadřuje podíl komplexních smykových modulů při frekvenci 10 Hz a 0,1 Hz při konstantní teplotě 60 °C. Zde vzorky vykazují podobné výsledky jako při teplotní citlivosti, tedy že nejvíce je na změnu frekvence zatěžování citlivý vzorek C a nejméně vzorek A.

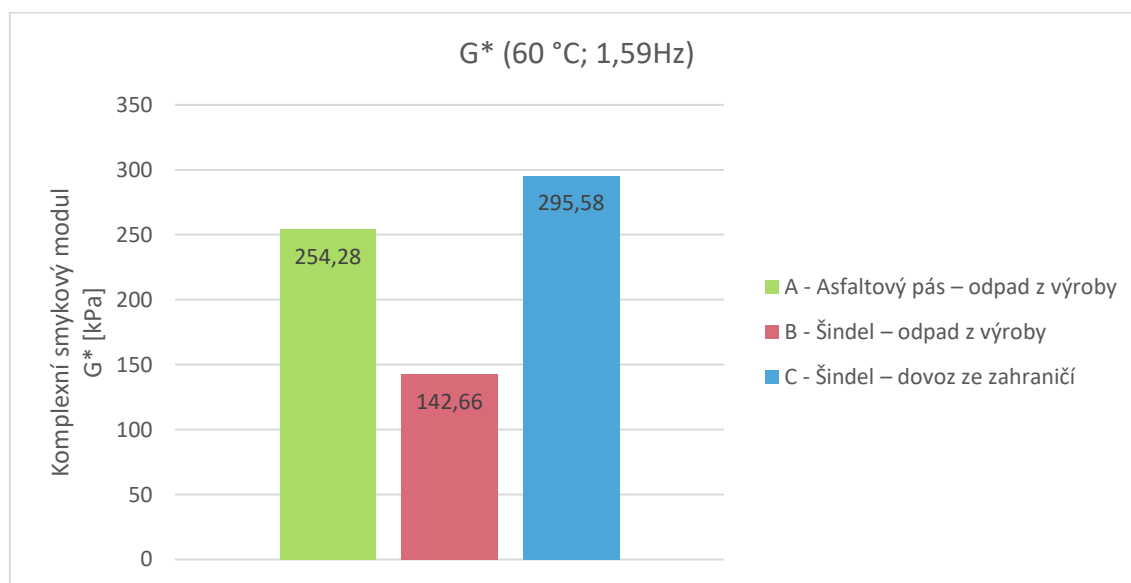


Graf 16 – Závislost na rychlosti zatížení při teplotě 60 °C

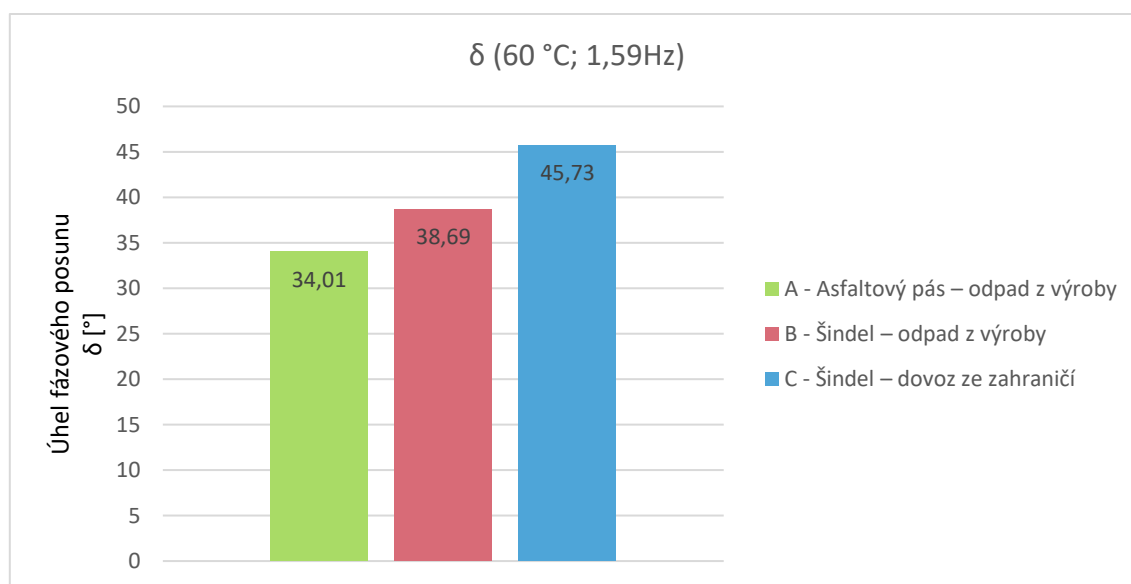
Následující grafy porovnávají komplexní smykové moduly (graf 17) a úhly fázových posunů (graf 18) při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz všech tří zkoušených asfaltových pojiv. Výrazně nižšího komplexního

modulu smyku dosahuje vzorek *B*, což znamená, že je nejméně odolný proti přetvoření opakujícím se zatížením. To odpovídá výsledkům zkoušky měknutí.

Největší fázový úhel  $45,73^\circ$  má vzorek *C*, ale i to je při těchto okrajových podmínkách v porovnání s běžně používanými asfaltovými pojivy nízká hodnota. Složky jeho komplexního smykového modulu ( $G'$  a  $G''$ ) jsou při této teplotě a frekvenci téměř stejné.



Graf 17 – Komplexní smykový modul při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz



Graf 18 – Úhel fázového posunu při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz

## 7 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo porovnat vlastnosti odpadních materiálů obsahujících asfalt. Asfaltové šindele byly ve zkouškách zastoupeny dvěma vzorky – jeden jakožto odpad z výroby a druhý odpad z již opotřebovaných šindelů. Druhý porovnávaný materiál – a tedy třetí vzorek – byl asfaltový hydroizolační pás. Na těchto vzorcích byly provedeny zkoušky penetrace jehlou, bodu měknutí, vratné duktility a reologických vlastností dynamickým smykovým reometrem. Výsledné hodnoty jsou shrnuty v tabulce č. 6.

		A	B	C
		Asfaltový pás – odpad z výroby	Šindel – odpad z výroby	Šindel – dovoz ze zahraničí
Penetrace jehlou [0,1 mm]		31,9	31,8	13,0
Bod měknutí (kroužek a kulička) [°C]		101,2	90,8	101,9
Vratná duktilita [%]		37,5	35,2	70,2
Dynamický smykový reometr	Komplexní smykový modul (G*) [kPa]	254,28	142,66	295,58
	Úhel fázového posunu ( $\delta$ ) [°]	34,01	38,69	45,73

Tabulka 6 – Souhrn výsledků laboratorních zkoušek

Všechny tři vzorky znovu získaných pojiv vykazovaly poměrně vysokou tuhost, což dokládají poměrně nízké hodnoty penetrace a vysoké hodnoty bodu měknutí i komplexních smykových modulů. Z naměřených hodnot je znatelný důsledek stárnutí asfaltových pojiv, který se projevil zvýšenými hodnotami tuhosti (nízká hodnota penetrace jehlou), vratné duktility a komplexního smykového modulu zjištěného pomocí DSR u vzorku C. Tento vzorek byl, na rozdíl od vzorků A a B, dlouhodobě vystavován vnějším vlivům (použit jako střešní krytina) a docházelo u něj tedy značnou dobu k procesu oxidace. Vzorek A, stejně tak vzorek B, byly odebrány ihned po výrobě, proto vykazují odlišné vlastnosti.

Porovnáním naměřených výsledků lze také určit pravděpodobně nejvíce modifikované pojivo, kterým je vzorek A, což je znatelné z nejnižší hodnoty úhlového fázového posunu.

Vzhledem ke zjištěným vlastnostem asfaltových pojiv jednotlivých výchozích materiálů by vzorek A (asfaltový pás – odpad z výroby) mohl být vyhodnocen jako nejvhodnější ke znovupoužití do silničních asfaltových směsí. I přesto by ovšem bylo nutné ošetřit jeho vysokou tuhost, například oživovací přísadou nebo použitím měkčího dávkovaného asfaltu.

## 8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ČSN EN 14967: Hydroizolační pásy a fólie – Asfaltové pásy vkládané do stěnových konstrukcí – Definice a charakteristiky. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [2] PAŘÍK, Jan. *Asfaltové hydroizolace* [online]. In: . 2004 [cit. 2023-05-17]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/68898-Asfaltove-hydroizolace.html>
- [3] SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty* [online]. 4. vydání. Praha: Luboš Svoboda, 2018, 1000 s. [cit. 2023-02-27]. Dostupné z: <http://people.fsv.cvut.cz/~svobodasl/sh/>
- [4] ČSN EN 544 ed. 2: *Asfaltové šindele s minerální a/nebo syntetickou výztužnou vložkou - Specifikace výrobku a zkušební metody*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [5] ČSN EN 13108-8 ed. 2: *Asfaltové směsi - Specifikace pro materiály - Část 8: R-materiál*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [6] Asphalt vs Fiberglass Shingles - Which Is Best?. *CeDUR* [online]. 2022 [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: <https://www.cedur.com/asphalt-vs-fiberglass-shingles>
- [7] ZIELIŃSKI, Piotr. Testing of asphalt mixtures containing an addition of reclaimed asphalt shingles. *Roads and Bridges-Drogi i Mosty* [online]. 2022, **21**(4), 277-292 [cit. 2023-03-17]. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.7409/rabdim.022.016>
- [8] ARNOLD, Jacob W., Behzad BEHNIA, Megan E. MCGOVERN, Brain HILL, William G. BUTTLAR a Henrique REIS. Quantitative evaluation of low-temperature performance of sustainable asphalt pavements containing recycled asphalt shingles (RAS). *Construction and Building Materials* [online]. 2014, **58**, 1-8 [cit. 2023-03-17]. ISSN 0950-0618. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.002>
- [9] FALCHETTO, Augusto Cannone, Ki Hoon MOON a Michael P. WISTUBA. Experimental characterisation of base asphalt binder used for shingles production under static and dynamic loading. *Road Materials and Pavement Design* [online]. 2016, **17**(2), 396-416 [cit. 2023-03-17]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/14680629.2015.1084354>
- [10] SENGOZ, Burak a Ali TOPAL. Use of asphalt roofing shingle waste in HMA. *Construction and Building Materials* [online]. 2005, **19**(5), 337-346 [cit. 2023-03-17]. ISSN 0950-0618. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.08.005>
- [11] ALVERGUE, Alejandro, Mostafa ELSEIFI, Louay MOHAMMAD, Samuel B. COOPER a Samuel COOPER. Laboratory evaluation of asphalt mixtures with reclaimed asphalt shingle prepared using the wet

- process. *Road Materials and Pavement Design* [online]. 2014, **15**(1), 62-77 [cit. 2023-03-17]. ISSN 2164-7402. Dostupné z: doi:10.1080/14680629.2014.927410
- [12] BEHNOOD, Ali. Application of rejuvenators to improve the rheological and mechanical properties of asphalt binders and mixtures: A review. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2019, **231**, 171-182 [cit. 2023-03-17]. ISSN 0959-6526. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.209>
- [13] YAN, Yu, David HERNANDO a Reynaldo ROQUE. A solvent free method to characterize the effect of recycled asphalt shingles on virgin asphalt binder. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2019, **208**, 795-805 [cit. 2023-03-17]. ISSN 0959-6526. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.153>
- [14] NEWCOMB, David, Mary STROUP-GARDINER, Brian WEIKLE a Andrew DRESCHER. *Influence of Roofing Shingles on Asphalt Concrete Mixture Properties* [online]. 1993 [cit. 2023-03-17]. Dostupné z: <https://hdl.handle.net/11299/241951>
- [15] KASEER, Fawaz, Amy Epps MARTIN a Edith ARÁMBULA-MERCADO. Use of recycling agents in asphalt mixtures with high recycled materials contents in the United States: A literature review. *Construction and Building Materials* [online]. 2019, 211, 974-987 [cit. 2023-03-17]. ISSN 0950-0618. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.286>
- [16] ČSN EN 12697-1: *Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 1: Obsah rozpustného pojiva*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
- [17] ČSN EN 12697-3+A1: *Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 3: Znovuzískání extrahovaného pojiva: Rotační vakuové destilační zařízení*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021.
- [18] ČSN EN 1426: *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení penetrace jehlou*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [19] ČSN EN 1427: *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení bodu měknutí - Metoda kroužek a kulička*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [20] ČSN EN 13398: *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení vratné duktility modifikovaných asfaltů*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- [21] ČSN EN 14770: *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu - Dynamický smykový reometr (DSR)*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.



## 9 SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1 – Skladba asfaltového izolačního pásu [3]</i> .....	10
<i>Obrázek 2 – Asfaltový šindel [6]</i> .....	12
<i>Obrázek 3 – Asfaltový šindel</i> .....	12
<i>Obrázek 4 – Asfaltové šindele – odpad z výroby [9]</i> .....	13
<i>Obrázek 5 – Asfaltové šindele – odpad ze střechy [9]</i> .....	13
<i>Obrázek 6 – Shluky asfaltového pojiva [8]</i> .....	15
<i>Obrázek 7 – Schématický nákres průtokové odstředivky [16]</i> .....	18
<i>Obrázek 8 – Schématický nákres rotačního vakuového destilačního zařízení [17]</i> .....	18
<i>Obrázek 9 – Rotační vakuové destilační zařízení</i> .....	19
<i>Obrázek 10 – Penetrometr [18]</i> .....	20
<i>Obrázek 11 – Počáteční poloha jehly pro měření penetrace</i> .....	20
<i>Obrázek 12 – Kroužek [19]</i> .....	22
<i>Obrázek 13 – Kroužky naplněné asfaltovým pojivem</i> .....	22
<i>Obrázek 14 – Držák kroužků [19]</i> .....	22
<i>Obrázek 15 – Zkušební sestava [19]</i> .....	22
<i>Obrázek 16 – Zkušební sestava</i> .....	22
<i>Obrázek 17 – Protážení asfaltového pojiva kuličkou</i> .....	22
<i>Obrázek 18 – Forma pro zkoušku vratné duktility [20]</i> .....	23
<i>Obrázek 19 – Forma pro zkoušku vratné duktility naplněná asfaltovým pojivem</i> .....	23
<i>Obrázek 20 – Dynamický smykový reometr (DSR)</i> .....	24
<i>Obrázek 21 – Asfaltové pojivo v silikonové formě pro zkoušku DSR</i> .....	24
<i>Obrázek 22 – Vzorek asfaltu umístěný v reometru</i> .....	25
<i>Obrázek 23 – Asfaltový pás – odpad z výroby (vzorek A)</i> .....	26
<i>Obrázek 24 – Šindel – odpad z výroby (vzorek B)</i> .....	27
<i>Obrázek 25 – Šindel – dovoz ze zahraničí (vzorek C)</i> .....	27
<i>Obrázek 26 – Zkouška vratné duktility – křehké porušení vzorků</i> .....	30

## 10 SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 – Složení asfaltového šindele [8]</i> .....	12
<i>Tabulka 2 – Množství asfaltu ve zkušebních vzorcích</i> .....	25
<i>Tabulka 3 – Výsledky zkoušky penetrace jehlou</i> .....	28
<i>Tabulka 4 – Výsledky stanovení bodů měknutí</i> .....	29
<i>Tabulka 5 – Výsledky vratné duktility</i> .....	30
<i>Tabulka 6 – Souhrn výsledků laboratorních zkoušek</i> .....	38

## 11 SEZNAM GRAFŮ

<i>Graf 1 – Vliv procesu stárnutí na technické parametry asfaltu modifikovaného kaučukem [2].....</i>	<i>11</i>
<i>Graf 2 – Závislost teploty křehnutí na množství asfaltových šindelů ve směsi [8].....</i>	<i>15</i>
<i>Graf 3 – Množství asfaltu ve zkušebních vzorcích .....</i>	<i>26</i>
<i>Graf 4 – Porovnání výsledků zkoušky penetrace jehlou.....</i>	<i>28</i>
<i>Graf 5 – Porovnání bodů měknutí .....</i>	<i>29</i>
<i>Graf 6 – Porovnání výsledků vratné duktility.....</i>	<i>31</i>
<i>Graf 7 – Porušení vzorku A během zkoušky vratné duktility.....</i>	<i>31</i>
<i>Graf 8 – Porušení vzorku B během zkoušky vratné duktility.....</i>	<i>31</i>
<i>Graf 9 – Porušení vzorku C během zkoušky vratné duktility.....</i>	<i>32</i>
<i>Graf 10 – Závislost komplexního smykového modulu na frekvenci při teplotě <math>t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}</math>.....</i>	<i>33</i>
<i>Graf 11 – Závislost úhlu fázového posunu na frekvenci při teplotě <math>t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}</math>.....</i>	<i>33</i>
<i>Graf 12 – Blackův diagram .....</i>	<i>34</i>
<i>Graf 13 – Závislost komplexního smykového modulu na teplotě při frekvenci 1,59 Hz.....</i>	<i>35</i>
<i>Graf 14 – Závislost úhlu fázového posunu na teplotě při frekvenci 1,59 Hz .....</i>	<i>35</i>
<i>Graf 15 – Teplotní citlivost při frekvenci 1,59 Hz .....</i>	<i>36</i>
<i>Graf 16 – Závislost na rychlosti zatížení při teplotě <math>60\text{ }^{\circ}\text{C}</math> .....</i>	<i>36</i>
<i>Graf 17 – Komplexní smykový modul při teplotě <math>60\text{ }^{\circ}\text{C}</math> a frekvenci 1,59 Hz .....</i>	<i>37</i>
<i>Graf 18 – Úhel fázového posunu při teplotě <math>60\text{ }^{\circ}\text{C}</math> a frekvenci 1,59 Hz .....</i>	<i>37</i>