



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

## STUDENÉ ASFALTOVÉ SMĚSI

COLD ASPHALT MIXTURES

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Spáčil

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. ONDŘEJ DAŠEK, Ph.D.

BRNO 2022



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>Student</b>	Petr Spáčil
<b>Název</b>	Studené asfaltové směsi
<b>Vedoucí práce</b>	doc. Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.
<b>Datum zadání</b>	30. 11. 2021
<b>Datum odevzdání</b>	27. 5. 2022

V Brně dne 30. 11. 2021

---

doc. Dr. Ing. Michal Varaus  
Vedoucí ústavu

---

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.  
Děkan Fakulty stavební VUT

## PODKLADY A LITERATURA

Normy pro zkoušení asfaltových směsí

ČSN EN 15322 - *Asfalty a asfaltová pojiva*

ČSN EN 933 *Zkoušení geometrických vlastností kameniva*

ČSN EN 1097-6 *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva*

ČSN EN 13702 *Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení dynamické viskozity modifikovaných asfaltů metodou kužel deska.*

Zkušební normy řady EN 12697

Firemní materiály

Internetové zdroje

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

V bakalářské práci bude pozornost věnována studeným asfaltovým směsím vhodným pro vysrávky. V teoretické části práce bude popsána technologie výroby a pokládky včetně nových trendů. V praktické části práce bude provedeno posouzení vybraného parametru v laboratorních podmínkách.

## STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

---

doc. Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.

Vedoucí bakalářské práce

## ABSTRAKT

Bakalářská práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část.

Teoretická část se zabývá vysvětlením řešené problematiky. Věnuje se pojmům jako je asfalt, asfaltové směsi, asfaltové pojivo, ředěné asfalty a viskozity.

Praktická část se zaměřuje především na popis použitých zkušebních metod na asfaltových pojivech a směsích určených pro vysprávký. Popisuje rozdíly mezi použitými asfaltovými pojivy a seznamuje s ostatními použitými materiály.

Praktická část porovnává směsi z ředěného asfaltu s různým pojivem. Popisuje proces výroby a návrhu směsi s ředěným asfaltem, výrobu jednotlivých zkušebních těles a odlišnosti oproti za horka vyráběné asfaltové směsi. Dále popisuje analýzu volumetrických, mechanicko-fyzikálních a funkčních zkoušek pro účel vyhodnocení rozdílů mezi standardním ředěným a novými biofluxovanými asfaltovými pojivy.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Asfalt, Asfaltové pojivo, Ředěný asfalt, Fluxovaný asfalt, Biofluxovaný asfalt, Asfaltová směs, Viskozita, Pevnost v příčném tahu

## ABSTRACT

The bachelor thesis is divided into theoretical and practical part. The theoretical part consists of explanation of the problem. The thesis includes definitions as Bitumen, Asphalt Mixture, Asphalt Binder, Viscosity.

The practical part is focused mainly on the description of the test methods used on Asphalt Binders and Mixtures which were intended for repairs. It describes differences between used Asphalt Binders and explains and describes other used materials.

The practical part compares the mixtures of different Cut-back Bitumen. It describes the production process and project of Cut-back bitumen mixture, the production process of individual test solids and compares the differences with hot made asphalt mixture. It also describes the analysis of volumetric, mechanical-physical and functional tests in purpose of evaluating the differences between standard Cut-back Bitumen and new biofluxed asphalt binder.

## KEYWORDS

Bitumen, Asphalt binder, Cut-back bitumen, Fluxed bitumen, Biofluxed bitumen, Asphalt mixture, Viscosity, Tensile strength

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Petr Spáčil *Studené asfaltové směsi*. Brno, 2022. 61 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce doc. Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Studené asfaltové směsi* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 27. 5. 2022

---

Petr Spáčil  
autor práce

## PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Studené asfaltové směsi* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 27. 5. 2022

---

Petr Spáčil  
autor práce

## PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval zejména vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Ondřeji Daškovi, Ph.D. za jeho odborné vedení a připomínky. Zvláště bych chtěl poděkovat za jeho čas strávený na konzultacích a jeho rychlému odpovídání na dotazy, nejen elektronickou formou. Především dlužím velké díky jeho lidskému přístupu, díky čemuž mi byl oporou nejen v plnění bakalářské práce, ale i v náročnějších chvílích v posledním semestru bakalářského studia. Dále bych chtěl poděkovat všem členům silniční laboratoře Fakulty stavební VUT, zvláště pak panu Pavlu Strakovi, za přátelský přístup a pomoc při provádění laboratorních zkoušek. Na závěr bych rád poděkoval své rodině a všem blízkým za podporu v průběhu celého studia.

## OBSAH

1	ÚVOD .....	11
2	REŠERŠE LITERATURY .....	12
2.1	Asfalt.....	12
2.2	Asfaltové pojivo .....	12
2.2.1	Charakteristika .....	12
2.2.2	Ředěné a fluxované asfalty .....	13
2.3	Reologie a viskozita .....	14
2.4	Asfaltová směs.....	16
3	CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE .....	17
4	TEORETICKÁ ČÁST.....	18
4.1	Použité zkušební metody .....	18
4.1.1	Sítový rozbor .....	18
4.1.2	Stanovení objemové hmotnosti .....	22
4.1.3	Stanovení mezerovitosti.....	27
4.1.4	Stanovení viskozity .....	27
4.1.5	Zkouška pevnosti v příčné tahu.....	29
4.2	Použité materiály .....	32
4.2.1	Asfaltová pojiva .....	32
4.2.2	Kamenivo.....	35
4.2.3	Filer .....	35
5	PRAKTICKÁ ČÁST.....	36
5.1	Zrnitost frakcí kameniva .....	36
5.2	Návrh směsi.....	37
5.2.1	Návrh čáry zrnitosti za pomoci Fullerovy paraboly.....	37
5.2.2	Teoretické optimální množství pojiva .....	39
5.2.3	Výpočet navážek .....	39
5.3	Výroba směsi .....	40
5.3.1	Hutnění.....	41
5.4	Stanovení objemové hmotnosti.....	43
5.4.1	Stanovení objemové hmotnosti hydrostatickým vážením .....	43
5.4.2	Stanovení maximální objemové hmotnosti Volumetrickým postupem.....	44
5.5	Stanovení mezerovitosti .....	45

5.6	Zkouška pevnosti v příčném tahu.....	46
5.7	Stanovení dynamické viskozity .....	50
5.8	Vliv smykové rychlosti na dynamickou viskozitu .....	51
6	ZÁVĚR.....	53
7	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	55
8	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	58
9	SEZNAM TABULEK .....	59
10	SEZNAM GRAFŮ .....	60
11	SEZNAM ROVNIC .....	61

# 1 ÚVOD

Každoročně s příchodem chladné a vlhké zimy, která je typická pro Českou republiku, dojde k porušení krytových vrstev netuhých vozovek. Porušené vozovky jsou v současnosti nejčastěji opravovány asfaltovými směsmi zpracovávanými za horka. Ovšem současné zvyšování požadavků na opravy, jako jsou opravy při nepříznivých teplotních podmínkách, snížení emisí, ochrana pracovníků nebo nepříznivé vlastnosti kameniva, vede k potřebě používat studené asfaltové směsi. Tyto směsi se také velice často používají jako provizorní údržbová technologie v zimních měsících.

Studené asfaltové směsi se v dnešní době používají při opravách dvěma způsoby. Jestliže je nutné vyměnit celou obrusnou vrstvu, lze použít recyklaci za studena na místě. Druhý způsob je opravit pouze danou poruchu vysprávkou. V této práci se budu dále zabývat pouze druhým způsobem využití.

Pro vytvoření studené asfaltové směsi je nutností snížit viskozitu pojiva. V současnosti nejpoužívanějším způsobem pro snížení viskozity je přidání lehké, středně těžké či dehtové ropné frakce. Příkladem těchto látek jsou benzín, petrolej, toluen a xylen. Toto pojivo se pak nazývá ředěný asfalt. Ze složení ředěných asfaltů je zřejmý jeho největší problém, a tím je ekologičnost. Právě pro zlepšení ekologičnosti ředěných asfaltů v současnosti pracuje několik technologických firem. Tyto firmy se s daným problémem nejčastěji vypořádávají použitím olejových frakcí namísto ropných frakcí. Asfaltové pojivo s přidanou olejovou frakcí nazýváme jako fluxované pojivo. [1,2,21]

## 2 REŠERŠE LITERATURY

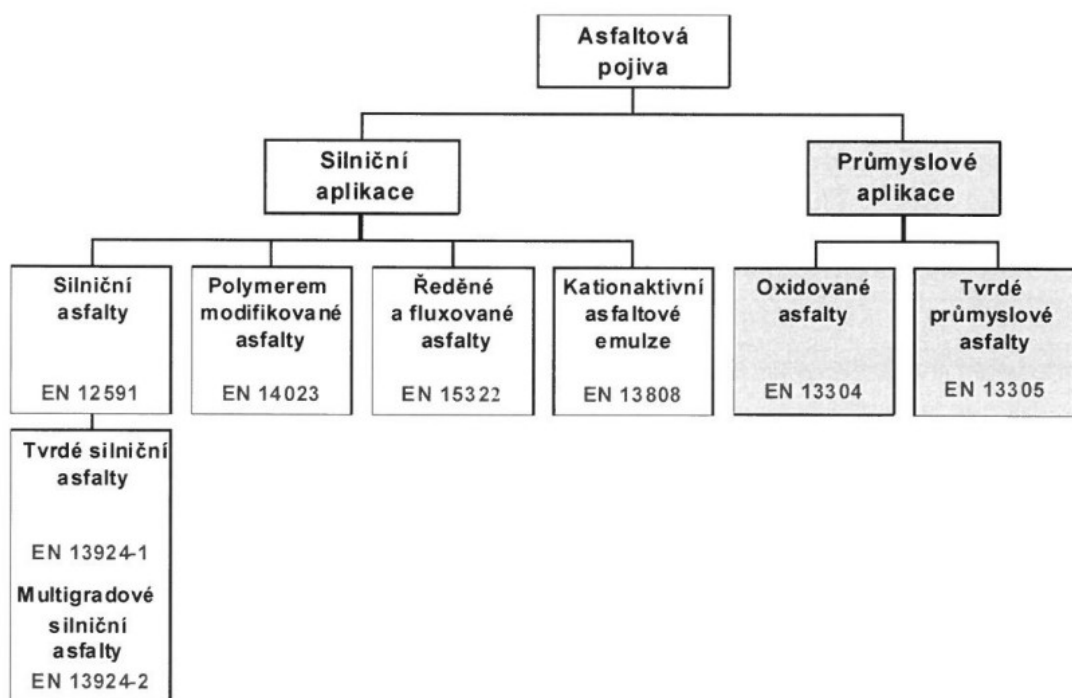
### 2.1 ASFALT

Asfalt je téměř netěkavý, přilnavý a hydroizolační materiál pocházející z ropy nebo je přítomný v přírodním asfaltu, který je úplně nebo téměř rozpustný v toluenu a při normální teplotě je velmi viskózní nebo téměř tuhý.[2]

### 2.2 ASFALTOVÉ POJIVO

Asfaltové pojivo je směs uhlovodíků, jejíž elasticko-viskózní chování se mění se změnou teploty. Jedná se o směs vysoce molekulárních uhlovodíků, ve které je zastoupeno až kolem tisíce různých sloučenin. Ty se v zásadě rozdělují na tekuté složky (oleje, pryskyřice označované maltény) a pevné částice – asfaltény.[3,21]

Rozdělení asfaltových pojiv dle evropských norem je popsáno na obrázku č. 1



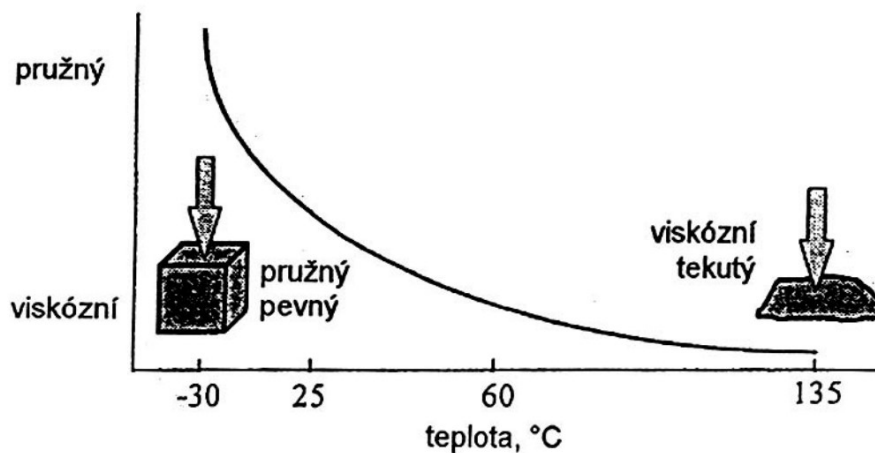
Obrázek č. 1: rozdělení asfaltů podle norem [4]

#### 2.2.1 Charakteristika

Nejdůležitější charakteristikou asfaltového pojiva je teplotní citlivost. Chování asfaltového pojiva je závislé na teplotě – výsledky kterékoliv zkoušky asfaltového

pojiva musí být vždy udávány s teplotním údajem. V této souvislosti je asfaltové pojivo označováno jako viskoelastický materiál, což znamená, že za nízkých teplot se chová jako pružná látka a za vysokých teplot jako kapalina charakterizována svou viskozitou. Za běžných teplot má asfaltové pojivo obojaké vlastnosti, tedy viskoelastické. Závislost chování asfaltového pojiva na teplotě je popsán v obrázku č. 1.

Silový odpor proti deformacím, 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. Při vysokých rychlostech dochází k malé deformaci, zatímco při rychlostech nízkých nebo stání vznikají deformace velké. [3]



Obrázek č. 2: asfalt - visko-elastický materiál [3]

### 2.2.2 Ředěné a fluxované asfalty

U studených asfaltových směsí pro možnost použití silničního asfaltu v asfaltových směsích je třeba snížit jeho viskozitu. V současnosti nejpoužívanější způsob snížení viskozity silničního asfaltu je výroba ředěných, fluxovaných asfaltů, případně vytvoření asfaltové emulze. [3]

#### Ředěné asfalty

Ředěné asfalty se vyrábí ze silničního ropného asfaltu s přísadou benzinových nebo petrolejových ředidel. Tyto ředidla jsou vyrobena na bázi ropy a nejčastějšími příklady jsou petrolej a benzin. Mohou se používat také ředidla vytvořená z dehtové

frakce. Příkladem jsou toluen, xylen a solventní nafta. Ředěné asfalty na bázi benzínových ředidel jsou rychle tuhnoucí a označují se jako AR-NT. Ředěné asfalty na bázi petrolejových ředidel jsou normálně tuhnoucí a označují se jako AR-RT.

Výhodou použití ředěných asfaltů je možnost zpracování při nižších teplotách a možnost použití zhoršené kvality kameniva (kyselé a mokré kamenivo).

Největším problémem ředěných asfaltů je, že obsahuje látky škodlivé pro životní prostředí, které jsou relativně těkavé. V průběhu výstavby se těkavé látky uvolňují do ovzduší, čímž jsou nebezpečné jak pro pracovníky, kterým dráždí kůži a jsou škodlivé pro dýchací orgány, tak i pro vodní organismy.

Ředěné asfalty jsou především určeny pro výrobu studených obalovaných směsí na výstavbu silnice, údržbu silnic, provádění postřiků, provádění nátěrů a k výspravám výtlučků. [1,2,3,4,15,21]

### Fluxované asfalty

Fluxované asfalty se stejně jako ředěné asfalty vyrábí ze silničního asfaltu. Místo benzínových či petrolejových ředidel se vyrábí z minerálních olejů. Minerální oleje jsou relativně netěkavé ropné oleje, díky čemuž se ze směsi neuvolňují škodlivé látky v takové míře jako u ředěných asfaltů.

Mezi fluxované asfalty patří také biofluxované asfalty, jejichž viskozita je snížena fluxačními oleji pocházejícími z rostlinných nebo živočišných olejů.

Fluxované asfalty se používají především pro výrobu studených obalovaných směsí určených k výspravám výtlučků. Fluxované asfalty jsou značeny Fb a Biofluxované asfalty jsou značeny Fv. [2,3,4,16]

## 2.3 REOLOGIE A VISKOZITA

### Reologie

Reologie je vědní obor, který se věnuje studiu deformace hmoty, čili reakcí látky na působení vnější sil. Řeší problematiku přetváření hmoty, která je částečně pevná a částečně přetvárná. Pro danou problematiku hledá vztahy mezi napětím, deformací a rychlostí deformace. Základní veličinou v reologii je viskozita.

## Viskozita

Viskozita charakterizuje tokové chování a určuje míru vnitřního odporu látky vůči vnějšímu zatížení. Dělí se na viskozitu dynamickou a viskozitu kinematickou. Viskozita je závislá na fyzikálně-chemické struktuře látky, teplotě, tlaku, době zatížení a smykové rychlosti.

### Dynamická viskozita

Dynamická viskozita udává poměr mezi smykovým napětím a smykovou rychlostí mezi dvěma teoretickými sousedními vrstvami látky. Smykové napětí je síla působící tangenciálně k povrchu dělená plochou povrchu. Smyková rychlost je gradient rychlosti v proudící tekutině udávaný kolmo k smykovému napětí.

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

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$$

#### Rovnice č. 1: Newtonova rovnice

Kde je $\tau$	smykové napětí [Pa]
$\eta$	dynamická viskozita [Pa · s]
$\dot{\gamma}$	smyková rychlost [s <sup>-1</sup> ]

Kapaliny lze podle chování rozdělit na newtonské kapaliny a neneutronské kapaliny.

U newtonské kapaliny se předpokládá platnost Newtonova viskózního zákona, tj. zákona o přímé úměrnosti mezi napětím a rychlostí smykového přetvoření (viz. rovnice č.1: Newtonova rovnice). Dynamická viskozita pro newtonovské kapaliny je tedy konstantou, která není závislá na velikosti smykového napětí ani na smykové rychlosti.

U neneutronských kapalin je vztah mezi smykovým napětím a smykovou rychlostí značně složitější. Poměr smykového napětí a smykové rychlosti není konstantní, ale závisí na hodnotě smykové rychlosti a označuje se jako zdánlivá viskozita nebo neneutronovská viskozita. Mezi neneutronské kapaliny se většinou řadí i asfaltová pojiva. [5,6,22]

## 2.4 ASFALTOVÁ SMĚS

Asfaltová směs se skládá ze směsi vápencové moučky, asfaltového pojiva a kameniva o požadované zrnitosti. Pro zlepšení vlastností asfaltové směsi se do směsi vmíchávají vhodné přísady nebo příměsi.

Asfaltové směsi se dle teploty při výrobě dělí na:

- Horké asfaltové směsi – teplota při výrobě je 120–190 °C
- Teplé asfaltové směsi – teplota při výrobě je 100–150 °C
- Poloteplé asfaltové směsi – teplota při výrobě je 70–100 °C
- Studené asfaltové směsi – teplota při výrobě je shodná s okolní teplotou.

### 3 CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Hlavním cílem bakalářské práce je srovnání vlastností studených asfaltových směsí s různými druhy asfaltového pojiva. Ze dvou druhů fluxovaného asfaltu a jednoho ředěného asfaltu od stejného výrobce budou v silniční laboratoři VUT v Brně, Fakulty stavební, namíchány tři studené asfaltové směsi, ze kterých bude rázovým zhutňovačem nahutněno celkem 18 válcových zkušebních těles pro stanovení objemové hmotnosti, maximální objemové hmotnosti, mezerovitosti a pevnosti v příčném tahu.

Dalším cílem bakalářské práce je srovnání vlastností standardního ředěného asfaltu s novými fluxovanými asfalty. Toto srovnání bude provedeno pomocí stanovení dynamické viskozity s využitím zkušební geometrie kužel – deska v dynamickém smykovém reometru.

Jelikož se v České republice laboratorními zkouškami studených asfaltových směsí zabývá jen malé množství laboratoří, cílem bakalářské práce je také získání zkušeností s laboratorní výrobou studených asfaltových směsí.

Postup práce bude následovný:

- Určení zrnitosti frakcí kameniva
- Výpočet navážek
- Výroba asfaltové směsi
- Hutnění asfaltové směsi
- Stanovení objemové hmotnosti a maximální objemové hmotnosti
- Stanovení mezerovitosti
- Stanovení viskozity pojiv
- Stanovení pevnosti v příčném tahu
- Vyhodnocení a srovnání naměřených hodnot

## 4 TEORETICKÁ ČÁST

Teoretická část bakalářské práce se zabývá popisem jednotlivých zkušebních metod a použitých materiálů využitých v praktické části bakalářské práce.

### 4.1 POUŽITÉ ZKUŠEBNÍ METODY

V této části bakalářské práce jsou popsány zkušební principy a postupy jednotlivých laboratorních metod použitých při návrhu, výrobě a zkouškách asfaltových směsí.

Jednotlivé zkoušky a postupy vychází z normou doporučených zkoušek a postupů pro asfaltové směsi zpracovávané za horka a jsou vhodně navržené a upravené pro potřebu porovnání kvality studených asfaltových směsí. Důvodem je neexistence normou doporučených zkoušek pro studené asfaltové směsi.

#### 4.1.1 Síťový rozbor

Tato zkouška se provádí dle ČSN EN 933-1 *Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Síťový rozbor*. Principem této zkoušky je získání čáry zrnitosti vzorku kameniva za pomoci kalibrované sady sít. Otvory a počet sít jsou vybrány dle druhu a požadované přesnosti.[8]

##### 4.1.1.1 Použité přístroje a pomůcky

- Zkušební síta
- Pevně líčující víko a dno sít
- Sušárna s ventilací
- Prací zařízení
- Váhy
- Nádoby, štětce

#### 4.1.1.2 Postup zkoušky

##### Praní

Zkušební navážka se vloží do nádoby a přidá se dostatečné množství vody, aby byla zkušební navážka pod vodou. Vzorek se dostatečně promíchá, aby se dosáhlo dokonalé oddělení jemných částí.

Na síto 0,063 mm vyhrazené pro použití pouze pro tuto zkoušku, jehož obě strany se navlhčí, se umístí ochranné síto (např. síto 1 mm nebo síto 2 mm). Síta se smontují tak, aby roztok protékající sítem mohl odtékat do odpadu. Obsah nádoby s rozmíchanou zkušební navážkou ve vodě se vylévá na horní síto. Praní pokračuje tak dlouho, dokud voda protékající zkušebním sítem 0,063 mm není čistá.

Zbytek zachycený na síte 0,063 mm se vysuší do ustálené hmotnosti při teplotě  $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ . Ponechá se vychladnout, zváží se a zaznamená jako  $M_2$ . [8]



**Obrázek č. 3: Odplavení jemných částic**



**Obrázek č. 4: Odplavení jemných částic**

### Prosévání

Vypraný a vysušený materiál (nebo přímo suchý vzorek) se vysype na sloupec sít. Sloupec obsahuje víko a dno a určitý počet sít, sestavených na sobě a uspořádaných od horního síta k dolnímu sítu podle zmenšující se velikosti otvorů.

Sloupec se ručně nebo mechanicky třese. Potom se síta jedno po druhém odebírají, začíná se sítem s největšími otvory. S každým se ručně zatřese, aby se zamezilo ztrátě materiálu, použije se například víko a dno. V prosévání se pokračuje, dokud se všechen materiál, který může propadnout jedním sítem, nepřemístí na další síto ve sloupci. Musí se zabránit přetěžování sít. Aby se zabránilo přetěžování sít, zachycený podíl kameniva normální hmotnosti by neměl po ukončení prosévání na žádném síte přesáhnout:

#### **Rovnice 2: Maximální podíl kameniva zachycený na sítu**

$$\frac{Ax\sqrt{D}}{200} \text{ [g]}$$

kde

A je plocha síta v mm<sup>2</sup>

d je velikost otvorů síta v mm

Jestliže některý ze zůstatků na síti přesáhne tuto hodnotu, použije se jeden z následujících postupů:

- a) zůstatek se rozdělí na díly menší než je stanovené maximum a odděleně se prosévá
- b) část vzorku, který propadl nejbližše za vyšším sítím se zmenší děličem vzorků nebo kvartací a v prosévání se pokračuje na zmenšeném vzorku, přičemž se toto zmenšení musí vzít v úvahu při výpočtu. [8,24]



**Obrázek č. 5: Sloupec sít**

### Vážení

Zváží se zůstatek na síti s největšími otvory a zaznamená se jeho hmotnost jako  $R_1$ . Stejná operace se provede se zůstatkem na dalším síti a zaznamená se jeho hmotnost jako  $R_2$ . Pokračuje se stejným způsobem s dalšími síty ve sloupci k zjištění zůstatku na jednotlivých sítích a tyto hmotnosti se zaznamenají jako hmotnosti  $R_3, R_4, \dots, R_n$ .

Pokud propadly síty jemné částice na dno, zaznamená se jejich hmotnost jako  $P$ . [8]

## Výpočet

Všechny hmotnosti se zaznamenají ve zkušebním protokolu. Vypočtou se hmotnosti zůstatků na každém síti jako procento hmotnosti původní vysušené navážky  $M_1$ . Vypočtou se součtová procenta hmotnosti původní navážky, která propadla každým sítem od shora dolů kromě síta 0,063 mm.

Souhrnné procento propadu se vypočítá podle následujícího vztahu:

### Rovnice č. 3: Souhrnné procento propadu

$$100 - \sum \left( 100 \cdot \frac{R_i}{M_1} \right) \quad [\%]$$

Procento jemných částic ( $f$ ), které propadly sítem 0,063 mm se vypočítá podle následujícího vztahu:

### Rovnice č. 4: Procento jemných částic

$$f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \times 100 \quad [\%]$$

Kde je	$f$	procento jemných částic [%]
	$M_1$	hmotnost vysušené zkušební navážky [kg]
	$M_2$	hmotnost vysušeného zůstatku na síti 0,063 [kg]
	$P$	hmotnost propadu jemných částic na dně [kg]. [8]

## 4.1.2 Stanovení objemové hmotnosti

### 4.1.2.1 Stanovení objemové hmotnosti hydrostatickým vážením

Pro provedení této zkoušky se používá ČSN EN 12697-6 *Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa*. Objemová hmotnost neporušeného zhutněného asfaltového zkušebního tělesa se stanoví z hmotnosti zkušebního tělesa a jeho objemu. Objem zkušebního tělesa se získá z jeho hmotností na vzduchu a ve vodě. [9,24]

#### 4.1.2.1.1 Použité přístroje a pomůcky

- Váhy
- Vodní lázeň
- Teploměr
- Drátěný koš
- Látka pro povrchové osušení

#### 4.1.2.1.2 Postup zkoušky

##### Vážení

Pro stanovení objemové hmotnosti hydrostatickým vážením se postupuje tak, že se nejdříve stanoví hmotnost zkušební tělesa ( $m_1$ ). Poté se stanoví hustota vody při zkušební teplotě. Následně se zkušební těleso ponoří do vodní lázně udržované při známé zkušební teplotě. Těleso se nechá dostatečně dlouhou dobu sytit vodou tak, aby se jeho hmotnost po nasycení ustálila na konstantní hodnotě. Obecně se za dobu požadovanou pro nasycení považuje nejméně 30min, doba však nemá být delší než 3h. Následně se stanoví hmotnost ponořeného, nasyceného zkušební tělesa ( $m_2$ ). Při tomto procesu se dbá na to, aby na povrchu tělesa neulpěly žádné vzduchové bubliny nebo z něj nevycházely při vážení. Posléze se těleso vyjme z vody a povrchově se osuší a znovu zváží ( $m_3$ ). Tento postup se opakuje pro všechna předem připravená tělesa. [9]



**Obrázek č. 6: Stanovení objemové hmotnosti hydrostatickým vážením**

## Výpočet

Objemová hmotnost hydrostatickým vážením zkušebního tělesa se stanoví následovně:

### Rovnice č. 5: Objemová hmotnost

$$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w \quad [\text{kg/m}^3]$$

Kde je  $\rho_{bssd}$  objemová hmotnost [ $\text{kg/m}^3$ ]  
 $m_1$  hmotnost suchého tělesa [kg]  
 $m_2$  hmotnost nasyceného tělesa ve vodě [kg]  
 $m_3$  hmotnost nasyceného tělesa vodou a povrchově osušeného [kg]. [9]

#### 4.1.2.2 Stanovení maximální objemové hmotnosti volumetrickým postupem

Tato zkouška se provádí dle ČSN EN 12697-5 *Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti*. Maximální objemová hmotnost asfaltových směsí se stanoví z objemu vzorku bez mezer a jeho suché hmotnosti.

Objem vzorku se měří jako objem vody nebo rozpouštědla vytěsněného vzorkem v pyknometru. Objem vzorku se vypočítá ze suché hmotnosti vzorku a z jeho hmotnosti ve vodě.

Maximální objemová hmotnost se společně s objemovou hmotností používá k výpočtu obsahu mezer ve zhutněném vzorku a dalších vlastnosti zhutněné asfaltové směsi, které se vztahují k jejímu objemu. [10,24]

#### 4.1.2.2.1 Požité přístroje a pomůcky

- Odvzdušněná voda, demineralizovaná voda nebo organické rozpouštědlo.
- Disperzní činidlo
- Nástroje k uvolňování a oddělování vzorků
- Sušárna s nucenou ventilací
- Váhy
- Teploměr
- Temperovaná vodní lázeň

- Vibrační stůl
- Pyknometr

#### 4.1.2.2.2 Postup zkoušky

##### Příprava vzorků

Vzorek se nejdříve vloží do laboratorní sušárny s nucenou ventilací a vysuší se při teplotě  $60^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ . Poté se vzorek rozdrobí na hrubé částice a shluky.

*Pozn. ředěné asfalty obsahují hořlavé látky, proto jsou nutná následující opatření: vzorky vysoušíme každý zvlášť, je nutná zapnutá ventilace, teplota by neměla být větší než  $100^{\circ}\text{C}$ .*

##### Postup zkoušky

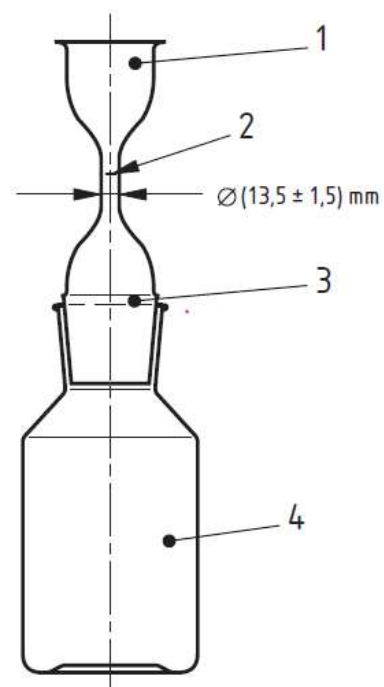
Nejprve se stanoví hmotnost ( $m_1$ ) prázdného pyknometru o známém objemu ( $V_p$ ). Následně vysušený zkušební vzorek se umístí do pyknometru a temperuje se na okolní teplotu. Poté se znovu stanoví jeho hmotnost s nástavcem ( $m_2$ ). Poté se pyknometr naplní médiem (rozpouštědlo) do výšky maximálně 30 mm pod okraj. Následně se zachycený vzduch odstraní použitím částečného vakua, které bude mít zbytkový tlak 4kPa nebo méně po dobu ( $15 \pm 1$ ) min. V případě rozpouštědla lze použít pouze míchání a vibrace bez aplikace vakua.

Poté se nasadí nástavec pyknometru po opatrném naplnění pyknometru až téměř po referenční značku nástavce nebo zátky tak, aby nedošlo k vniknutí vzduchu. Pokud se použije rozpouštědlo, pyknometr se umístí do vodní lázně s rovnoměrnou zkušební teplotou ( $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ ) na dobu nejméně 60 minut, ne však déle než 180 minut, aby se dosáhlo vyrovnání teploty vzorky a rozpouštědla v pyknometru s teplotou vody ve vodní lázni. Voda ve vodní lázni musí dosahovat přibližně výšky 20 mm pod okraj pyknometru.

Následně se doplní vodou nebo rozpouštědlem po značku na nástavci. Voda nebo rozpouštědlo v nádobě pro doplňování pyknometru musí mít stejnou zkušební teplotu, jako je zkušební teplota vodní lázně. Nakonec se pyknometr vyjme z vodní lázně, z vnější strany se osuší a ihned se stanoví jeho hmotnost ( $m_3$ ). [10]



Obrázek č. 7: Zkoušený vzorek s pyknometrem



#### Legenda

1. Skleněná nálevka
2. Značka
3. Zbroušená část přizpůsobená láhvi se širokým hrdlem
4. Láhev se širokým hrdlem a plochým dnem

Obrázek č. 8: Pyknometr [5]

### Výpočet

Maximální objemová hmotnost  $\rho_{mw}$  asfaltové směsi stanovená volumetrickým postupem se vypočítá podle rovnice:

**Rovnice č. 6: Maximální objemová hmotnost**

$$\rho_{mw} = \frac{(m_2 - m_1)}{1000 \times (V_p - \frac{m_3 - m_2}{\rho_w})} \quad [\text{kg/m}^3]$$

- kde je  $\rho_{mw}$  maximální objemová hmotnost [ $\text{kg/m}^3$ ]  
 $m_1$  hmotnost pyknometru a nástavce [g]  
 $m_2$  hmotnost pyknometru, nástavce a zkušební vzorku [g]  
 $m_3$  hmotnost pyknometru, nástavce, zkušební vzorku a vody [g]  
 $V_p$  objem pyknometru při naplnění po referenční značce nástavce [ $\text{m}^3$ ]  
 $\rho_w$  hustota vody při zkušební teplotě [ $\text{kg/m}^3$ ] [10]

#### 4.1.3 Stanovení mezerovitosti

Tato zkouška se provádí dle ČSN EN 12697-8 *Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 8: Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí*. Mezerovitost asfaltového zkušební tělesa se vypočítá pomocí maximální objemové hmotnosti a objemové hmotnosti zkušební tělesa. Způsob a postup zkoušek na určení maximální objemové hmotnosti a objemové hmotnosti je popsán v kapitole 4.1.2. [12]

### Výpočet

Mezerovitost se vypočítá následujícím způsobem:

**Rovnice č. 7: Mezerovitost**

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \times 100 \quad [\%]$$

- kde je  $V_m$  mezerovitost stanovená výpočtem z objemové hmotnosti [%]  
 $\rho_m$  maximální objemová hmotnost (stanovená pyknometricky) [ $\text{kg/m}^3$ ]  
 $\rho_b$  je objemová hmotnost tělesa (stanovená hydrostaticky) [ $\text{kg/m}^3$ ] [12]

#### 4.1.4 Stanovení viskozity

Tato zkouška se provádí dle ČSN EN 13702- *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení dynamické viskozity modifikovaných asfaltů metodou kužel deska*. Principem této metody je, že se na desku dynamického smykového reometru umístí vzorek, který

je přitlačen kuželem, který stoupá pod úhlem 4°. Rotace kužele způsobí uvnitř vzorku smykové přetvoření.

U většiny viskozimetrů se kroucí moment měří při dané smykové rychlosti, z čehož se následně vypočítá dynamická viskozita.[13,22]

#### 4.1.4.1 Přístroje a pomůcky

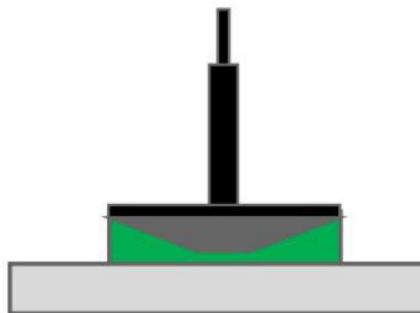
- Dynamický smykový reometr
- Vhodný nástroj pro odebrání přebytečného množství pojiva
- Rozpouštědlo a hadřík pro očištění geometrie reometru

#### 4.1.4.2 Postup zkoušky

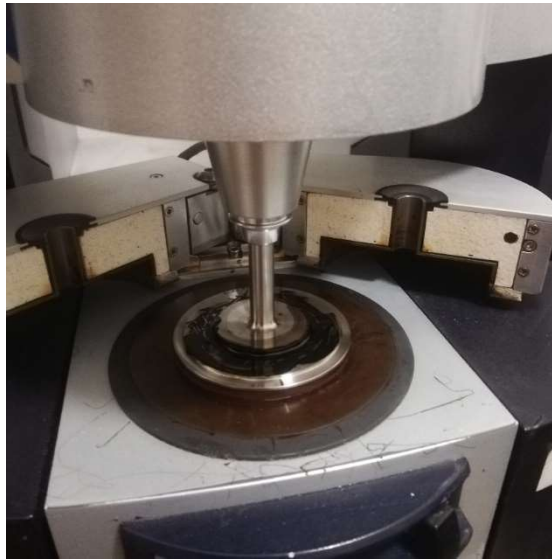
Nejprve se očistí geometrie reometru pomocí rozpouštědla a hadříku. Následně se umístí vzorek asfaltového pojiva na desku přístroje a přiloží se kužel. Poté se odstraní přebytečný materiál. Po odstranění materiálu se kužel uvede do přednastavené tloušťky mezery mezi geometriemi. Následně se vzorek předehtřívá na teplotu 50 °C do doby, než se teplota vzorku ustálí. Po předehtřátí se zahájí samotné měření.

### Výpočet

Výsledky měření dynamické viskozity s odpovídajícími smykovými rychlostmi a zkušebními teplotami jsou zaznamenávány pomocí programu R-space, ze kterého jsou data následně převedena do MS Excel.[13]



**Obrázek č. 9 - Metoda deska - kužel [13]**



**Obrázek č. 10: Měření viskozity**

#### 4.1.5 Zkouška pevnosti v příčné tahu

Zkoušku provádíme dle ČSN EN 12697-23 *Asfaltové směsi – zkušební metody – Část 23: Stanovení pevnosti v příčném tahu*. Podstatou této zkoušky je, že válcové zkušební těleso, které má být zkoušeno, je temperováno při předepsané zkušební teplotě, a následně uloženo do lisu mezi zatěžovací pásy. Jeho průměr je zatěžován podél středové osy při konstantní rychlosti zatěžování do okamžiku porušení. Pevnost v příčném tahu je maximální tahové napětí vypočítané z maximálního zatížení, které vedlo k porušení, a z rozměrů zkušebního tělesa.[14,23]

##### 4.1.5.1 Přístroje a pomůcky

- Lis
- Tlačené čelisti ze zatěžovacími pásy
- Měřící zařízení
- Vzduchová komora se schopností udržovat zkušební teplotu.

##### 4.1.5.2 Příprava zkušebních těles

Počet zkušebních těles

Pro každý vzorek a zkušební podmínku se připraví nejméně tři zkušební tělesa.

### Rozměry zkušebních těles

Zkušební válcová tělesa musí mít průměr  $(80 \pm 2)$  mm,  $(100 \pm 3)$  mm,  $(120 \pm 3)$  mm nebo  $(160 \pm 3)$  mm.

### Vizuální posouzení

Zkušební válcová tělesa musí být vizuálně symetrická se zakřiveným hladkým povrchem stěn.

### Měření rozměrů

Měří se výška a průměr každého zkušebního tělesa podle EN 12697-29.

### Stáří zkušebních těles

Před začátkem zkoušky se zkušební tělesa uloží na plochý povrch, při teplotě ne větší než  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , na dobu mezi 48 hodinami a 42 dny od doby jejich výroby.

#### 4.1.5.3 Temperování

##### Postup zahřívání

Zkušební tělesa se temperují na zvolenou zkušební teplotu uložení do termostaticky regulované vzduchové komory.

##### Zkušební teplota

Pokud není definováno jinak, zkušební teplota musí být  $(10 \pm 2)\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Zkušební teplota ovlivňuje pevnost v příčném tahu. Mohou se použít i jiné zkušební teploty v rozmezí  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tento rozsah teplot je vhodný pro dosažení tahových trhlin zkušebního tělesa. Pro vyšší teploty je způsob porušení zkušebního tělesa tlakem.

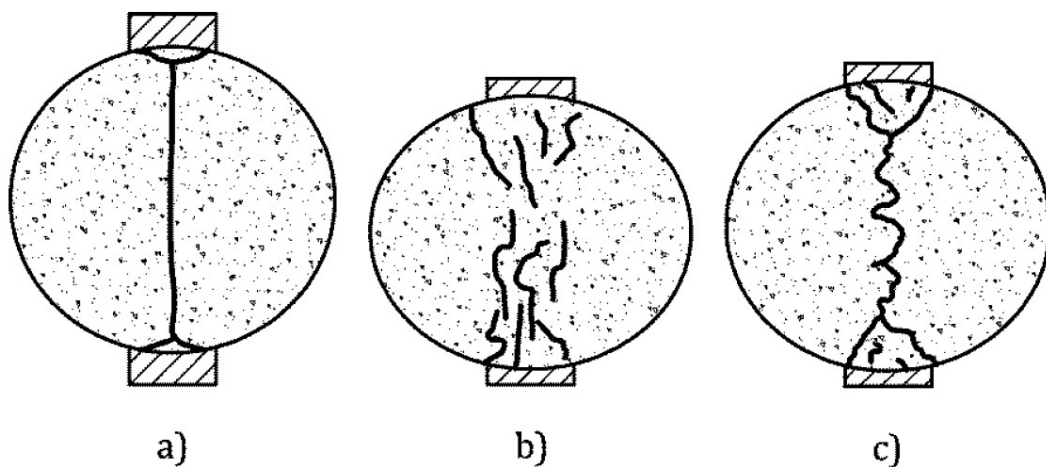
#### 4.1.5.4 Postup zkoušky

Vytemperované zkušební těleso se vloží do zkušebních čelistí. Zkušební zatížení musí být umístěno v místnosti o teplotě mezi  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Pro zajištění volného pohybu horní zkušební čelisti je doporučeno vodící tyče zkušebních čelistí

očistit a namazat. Zkušební těleso se zarovná na spodním zatěžovacím pásu tak, aby mohl být zatěžován jeho průměr.

Následně se zahájí stlačování zkušebního tělesa. Na průměr zkušebního tělesa se aplikuje nepřerušované zatížení bez nárazu při konstantní rychlosti deformace ( $50 \pm 2$ ) mm/min po přechodné době menší než 20 % zatěžovací doby, až do dosažení maximálního zatížení. Zaznamená se maximální zatížení  $P_i$ , kde  $i$  je index stanovení. Pokračuje se v zatěžování, dokud se zkušební těleso neporuší. Zaznamená se typ porušení, který se klasifikuje jako:

- (a) „čisté tahové porušení“ – zkušební těleso je zřetelně prasklé podél osy průměru, vyjma možných malých trojúhelníkových sekčí v blízkosti zatěžovacích pásů;
- (b) „deformace“ – zkušební těleso bez jasně viditelné rovné tahové praskliny; nebo
- (c) „kombinace“ – zkušební těleso s menší tahovou prasklinou a většími deformovanými oblastmi v blízkosti zatěžovacích pásů.



**Obrázek č. 11: Typy porušení [14]**

Zkušební těleso se rozlomí v místě porušení a vizuálně se prohlédne vzhled povrchů, aby se zjistila přítomnost trhlinami porušeného nebo rozbitého kameniva a zaznamená se, zda je kamenivo na povrchu prasklé nebo neporušené.

Zkouška má být dokončena 2 minuty poté, co bylo zkušební těleso vyjmuto z místa temperování.

Následně se zkouška opakuje a stanoví se pevnost v příčném tahu jako průměr výsledků získaných na nejméně třech jednotlivých zkušebních těles.

### Výpočet

Pro každé zkušební těleso se vypočítá pevnost v příčném tahu *ITS* podle vzorce:

#### Rovnice č. 8: Pevnost v příčném tahu

$$ITS = \frac{2P}{\pi \cdot D \cdot H} \cdot 1000 \text{ [kPa]}$$

a stanoví se průměrná hodnota jednotlivých stanovení,

kde je	ITS	pevnost v příčném tahu [kPa]
	P	maximální zatížení [N]
	D	průměr zkušebního tělesa [mm]
	H	Výška zkušebního tělesa [mm] [14]

## 4.2 POUŽITÉ MATERIÁLY

Pro bakalářskou práci jsem zhotovil Marshallova tělesa z různých asfaltových směsí, ve kterých byly použity tři druhy asfaltových pojiv, jeden druh kameniva a jeden druh vápencové moučky.

### 4.2.1 Asfaltová pojiva

Jako pojivo byl použit standartní ředěný asfalt s obsahem benzínové frakce, na kterém bylo zjišťováno ideální množství asfaltového pojiva a zároveň sloužil jako vzorové pojivo pro srovnávání dvou nových fluxovaných asfaltů. [9,10]

Všechny tři druhy asfaltového pojiva byly dodány stejnou firmou. Název firmy jsem se po dohodě s firmou rozhodl neuvádět, proto nebudou uvedeny ani obchodní názvy jednotlivých druhů pojiva.

#### 4.2.1.1 Standartní ředěný asfalt

Jedná se o silniční asfalt rozpuštěný v alifatickém rozpouštědle s adhezí přísadou pro zlepšení přilnavosti. Je určený pro výrobu studených obalovaných směsí na výstavbu silnice, údržbu silnic, provádění postříků a k výspravám výtluků. [15]

## Složení

Detailní složení je obchodní tajemství. Pro plnění cílů bakalářské práce je rozhodující údaj, že je asfaltové pojivo tvořeno silničním asfaltem, který je ředěný benzínovou frakcí. Dále zde uvádím další složky směsi, které jsou známy díky Bezpečnostnímu listu. [15]

Identifikační čísla	Název látky	Obsah v % hmotnosti	Klasifikace dle nařízení (ES) č. 1272/2008	Pozn.
ES: 265-185-4 CAS: 64742-82-1 Registrační číslo: 01-2119490979-12	Nízkovroucí hydrogenovaná benzínová frakce	18	Flam. Liq. 3, H226 Asp. Tox. 1, H304 Skin Irrit. 2, H315 STOT SE 3, H336 STOT RE 1, H372 Aquatic Chronic 2, H411	
ES: 265-078-2 CAS: 64741-77-1 Registrační číslo: 01-2119474208-35	Destiláty (ropné), lehké hydrokrakované	< 1	Asp. Tox. 1, H304 Skin Irrit. 2, H315 Acute Tox. 4, H332 Carc. 2, H351 STOT RE 2, H373 Aquatic Chronic 2, H411	
ES: 295-532-5 CAS: 92062-17-4 Registrační číslo: 01-2119491298-25	Tálový olej, reakční produkt s aminoethylpiperazinem	0,7	Acute Tox. 4, H302 Skin Corr. 1B, H314 Skin Sens. 1A, H317 Eye Dam. 1, H318	

**Tabulka č. 1: Složení standartního ředěného asfaltu [15]**

			Aquatic Acute 1, H400, M=10 Aquatic Chronic 1, H410, M=1	
ES: 800-353-8 CAS: 1379524-06-7 Registrační číslo: 01-2119971276-30	Amidy, C18 nenasycené, N-[3-(dimethylamin)propyl]	< 0,4	Skin Corr. 1B, H314 Skin Sens. 1B, H317 Eye Dam. 1, H318 Aquatic Acute 1, H400, M=1 Aquatic Chronic 1, H410, M=1	
ES: 203-625-9 CAS: 108-88-3 Registrační číslo: není dostupné	Toluen	< 0,2	Flam. Liq. 2, H225 Asp. Tox. 1, H304 Skin Irrit. 2, H315 STOT SE 3, H336 Repr. 2, H361d STOT RE 2, H373	
ES: 203-777-6 CAS: 110-54-3 Registrační číslo: není dostupné	N-Hexan	< 0,1	Flam. Liq. 2, H225 Asp. Tox. 1, H304 Skin Irrit. 2, H315 STOT SE 3, H336 Repr. 2, H361f STOT RE 2, H373 Aquatic Chronic 2, H411	

**Tabulka č. 2: Složení standartního ředěného asfaltu [15]**

## Toxikologické a ekologické informace

Daný výrobek je klasifikován jako nebezpečný pro vodní prostředí s H411, přičemž H411 značí, že výrobek je toxický pro vodní organismy s dlouhodobými účinky.

Akutní toxicita směsi je určena akutní toxicitou nízkovroucí hydrogenovou benzínovou frakcí, pro kterou uvažuje že:

- Orální toxicita  $LD_{50} > 5000$  mg/kg
- Dermální toxicita  $LD_{50} > 2000$  mg/kg
- Inhalační toxicita  $LD_{50} > 5160$  mg/m<sup>3</sup>

kde

$LD_{50}$  je smrtelná dávka, při které uhynie 50% pokusných zvířat. [15,17]

#### 4.2.1.2 Biofluxovaný asfalt

Jedná se nový produkt dané firmy, u něhož se předpokládá nižší zátěž pro životní prostředí oproti standardnímu ředěnému asfaltu.

Jde o oxidovaný asfalt s modifikovaným fluxovadlem s přísadou pro zlepšení přilnavosti. Slouží na výrobu studených asfaltových směsí pro dočasnou výpravu asfaltových vozovek. [16]

#### Složení

Detailní složení je obchodní tajemství. Pro plnění cílů bakalářské práce je rozhodující údaj, že je asfaltové pojivo tvořeno silničním asfaltem, který je ředěný olejovou frakcí s malým množstvím Tálového oleje.

Identifikační čísla	Název ChI	Obsah v % hm.	Klasifikace podle 1272/2008/ES	Pozn.
EC: 295-532-5 CAS: 92062-17-4 Registrační číslo: 01-2119491298-25	Tálový olej, reakční produkt s aminoethylpiperazinem	1,4	H302, Acute Tox. 4 H314, Skin Corr. 1B H317, Skin Sens. 1A H318, Eye Dam. 1 H400, Aquatic Acute 1, M=10 H410, Aquatic Chronic 1, M=1 $LD_{50} > 300 - 2\ 000$ mg/kg	

**Tabulka č.3: Složení biofluxovaného asfaltu [16]**

#### Toxikologické a ekologické informace

Daný výrobek je klasifikován jako nebezpečný pro vodní prostředí s H412, přičemž H412 značí, že výrobek je škodlivý pro vodní organismy s dlouhodobými účinky.

Akutní toxicita směsi je určena akutní toxicitou Tálového oleje, pro kterou uvažuje že:

- Orální toxicita  $LD_{50} > 2000$  mg/kg
- Dermální toxicita  $LD_{50} > 2000$  mg/kg

kde

$LD_{50}$  je smrtelná dávka, při které uhyne 50 % pokusných zvířat. [16,17]

#### 4.2.1.3 Biofluxovaný asfalt se sikativem

Jedná se o totožný produkt jako Biofluxovaný asfalt, pouze s rozdílem přidání sikativu. Poměr objemu sikativu a objemu směsi je 1:100.

##### Sikativ

Sikativ je roztok tzv. sušidel (kovové soli organických kyselin) v organických rozpouštědlech, který urychluje vytvrzování olejů. Při urychlení tvrdnutí dochází radikálovým chemickým zesíťováním olejů. Katalyzátory podporují tuto radikálovou autoxidaci olejů vzduchem.

Využívá se především v oboru malířství, kde například u lněných olejů dokáže urychlit tvrdnutí z 5 dnů na 1 den. [18,19]

#### 4.2.2 Kamenivo

Pro všechny studené asfaltové směsi bylo použito nové drcené kamenivo frakce 0/4, 4/8 z kamenolomu Luleč.

#### 4.2.3 Filer

Pro všechny směsi byl použit filer, též zvaný jako vápencová moučka, ze závodu Mokrá.



**Obrázek č. 12: použitý materiál (z leva: kamenivo frakce 4/8, kamenivo frakce 0/4, Filer)**

## 5 PRAKTICKÁ ČÁST

Tato část bakalářské práce se zabývá výsledky zkoušek popsanych v kapitole 4 Teoretická část.

Praktická část se zabývá návrhem a výrobou vhodné směsi pro stanovení pevnosti v příčném tahu. Pro tuto potřebu bylo navrženo celkem 18 Marshallových těles. 12 Marshallových těles pro stanovení objemové hmotnosti a mezerovitosti a 15 pro stanovení pevnosti v příčném tahu (9 těles bylo použito jak pro stanovení objemové hmotnosti, tak pro zkoušku v příčném tahu).

Dále se tato kapitola zabývá vyhodnocením stanovení viskozity pro jednotlivá pojiva popsaná v kapitole 4.2.1 Asfaltová pojiva.

### 5.1 ZRNITOST FRAKCÍ KAMENIVA

Jako první byla zjištěna zrnitost všech frakcí použitého kameniva. Zrnitost byla stanovena dle normy ČSN EN 933-1 *Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor* popsané v kapitole 4.1.1 Sítový rozbor.



**Obrázek č. 13: Sloupec sít**

V tabulka č. 4 se je stanoveno souhrnné procento propadu pro jednotlivé velikosti otvorů síta [mm] v závislosti na dané frakci kameniva.

Frakce	31,5	22,4	16	11,2	8	5,6	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
<b>8-16</b>													
<b>8-11</b>	100,0	100,0	100,0	86,6	21,8	4,8	3,4	3,1	2,9	2,8	2,5	2,1	1,7
<b>4-8</b>	100,0	100,0	100,0	100,0	96,9	60,2	25,3	6,7	4,0	3,2	2,7	2,2	1,7
<b>0-4</b>	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,0	94,0	68,9	45,2	30,7	17,2	6,3	3,0
<b>moučka</b>	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,9	99,6	88,6

**Tabulka č. 4: Zrnitost kameniva**

## 5.2 NÁVRH SMĚSI

Návrh směsi s ředěným a biofluxovaným asfaltovým pojivem je totožný. Použitý návrh je dle Fullerovy paraboly a podle doporučení dodavatele pojiv.

### 5.2.1 Návrh čáry zrnitosti za pomoci Fullerovy paraboly

Pro stanovení čáry zrnitosti byl nejdříve stanoven výpočet Fullerovy paraboly. Ta se vypočítá ze vzorce:

**Rovnice č. 9: Stanovení čáry zrnitosti**

$$y = 100 \cdot (d/D)^{0,5}$$

- Kde je  $y$  procentuální propad sítem o průměru oka  $d$  [%]  
 $d$  průměr oka síť [mm]  
 $D$  maximální velikost oka v soustavě sít

V tabulce č. 5 je vypsána skladba kameniva, což značí procentuální zastoupení frakcí kameniva ve směsi.

**Skladba kameniva**

Frakce	Návrh	Součet	Podíl
<b>moučka</b>	1	1	0,01
<b>0-4</b>	35	36	0,35
<b>2-4</b>		36	0
<b>4-8</b>	64	100	0,64
<b>8-11</b>		100	0
<b>8-16</b>		100	0
<b>suma=100</b>	<b>100</b>		

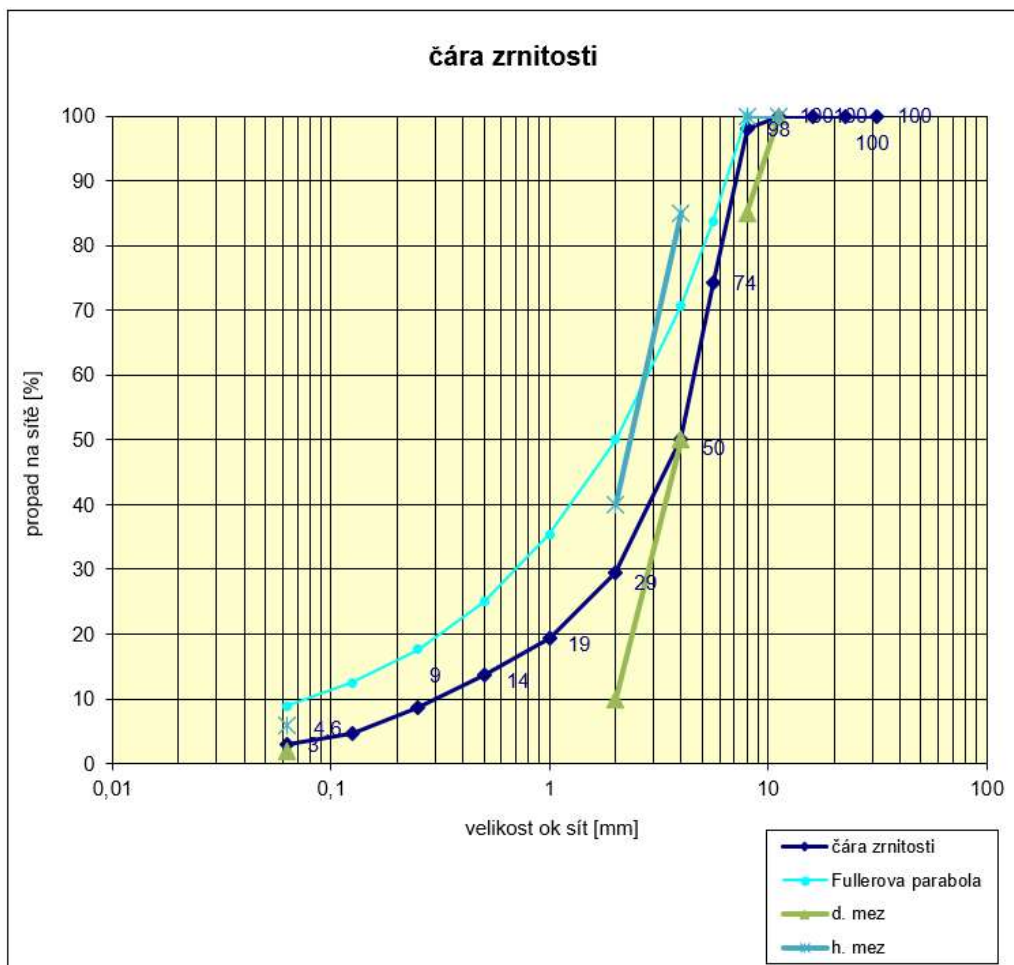
**Tabulka č. 5 Skladba kameniva ve směsi**

Procentuální zastoupení se následně přepočítlo na jednotlivá síta. Poté se navrhla čára zrnitosti, která byla navržena na základě přiblížení k Fullerově parabole.

Síto	Čára zrnitosti		d. mez	h. mez
	Návrh	Fuller		
31,5	100,0	198,4		
22,4	100,0	167,3		
16	100,0	141,4		
11,2	100,0	118,3	100	100
8	98,0	100,0	85	100
5,6	74,2	83,7		
4	50,1	70,7	50	85
2	29,4	50,0	10	40
1	19,4	35,4		
0,5	13,8	25,0		
0,25	8,7	17,7		
0,125	4,6	12,5		
0,063	3,0	8,9	2	6

Max. velikost zrna  mm (dle druhu směsi)

Tabulka č 6: Přiblížení k Fullerově parabole



Graf č.1 Čára zrnitosti

Pro návrh čáry zrnitosti se bere ohled na limitující faktory. Pro daný návrh jsou limitujícími faktory horní a dolní mez které označují možný interval pro návrh čáry zrnitosti.

## 5.2.2 Teoretické optimální množství pojiva

Jako hodnota teoretického optimálního množství pojiva byla stanovena hodnota doporučená výrobcem, což je 4,80 % hmotnosti směsi.

## 5.2.3 Výpočet navážek

Pro výrobu Marshallových těles je třeba spočítat navážky pro jednotlivé směsi. Výpočet navážek je zobrazen v tabulce č. 7: výpočet navážek. Byly navrženy celkem 3 různé navážky:

- 1) Navážka s obsahem pojiva 4,30 %, což je navážka s množstvím pojiva odstupňovaným o -0,5 % od teoretického optimálního množství pojiva.
- 2) Navážka s obsahem pojiva 4,80 %, což je navážka s teoreticky optimálním množstvím pojiva.
- 3) Navážka s obsahem pojiva 5,3 %, což je navážka s množstvím pojiva odstupňovaným o +0,5 % od teoretického optimálního množství pojiva.

VÝPOČET NAVÁŽKY					
navážka na vysuš. kameniva:		5000]g		pro: 3 Marshallova tělesa	
míchání při:		40]°C		Navážka na 1 těleso: 1100]g	
uhlnění:		2x50. 40 °C		Navážka na 1 těleso: 1100]g	
přesná navážka:		1050]g		kameniva	
frakce	podíly v %	podíly	hmotnosti		
filér	1,0	0,010	10,5	filér Mokrá	
0-4	35,0	0,350	367,5	Luleč	
2-5	0,0	0,000	0,0	Luleč	
4-8	64,0	0,640	672,0	Luleč	
	0,0	0,000	0,0		
	0,0	0,000	0,0		
suma	100	1	1050		
<b>předpokládané optimum:</b>				4,8]%	
<b>odstupňováno:</b>				0,5]%	
1) optimum - 1 * odstupňováno					
obsah pojiva z hmotnosti směsi:				4,3]%	
obsah pojiva z hmotnosti kameniva:				4,49]%	
<b>hmotnost pojiva:</b>				47]g	
hmotnost směsi:				1097]g	
2) optimum pojiva					
obsah pojiva z hmotnosti směsi:				4,8]%	
obsah pojiva z hmotnosti kameniva:				5,04]%	
<b>hmotnost pojiva:</b>				53]g	
hmotnost směsi:				1103]g	
3) optimum + 1 * odstupňováno					
obsah pojiva z hmotnosti směsi:				5,3]%	
obsah pojiva z hmotnosti kameniva:				5,60]%	
<b>hmotnost pojiva:</b>				59]g	
hmotnost směsi:				1109]g	

Tabulka č. 7: Výpočet navážek

Pro každou navážku byly zhotovena 3 Marshallova tělesa a jedna směs určená na stanovení maximální objemové hmotnosti.

### 5.3 VÝROBA SMĚSI

Směs byla vyráběna na základě ČSN EN 12697-35 *Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 35: Laboratorní výroba směs*, která byla vhodně upravena pro potřeby výroby studené asfaltové směsi z ředěného a fluxovaného asfaltového pojiva.

Nejdříve byly vytvořeny jednotlivé navážky dle tabulky č.7 bez obsahu pojiva. Následně byly směsi kameniva a fileru vysušeny v laboratorní sušárně při teplotě 110 °C. Po vysušení byly směsi kameniva postupně vyjmuty ze sušárny a dle návrhu se do nich dávkovalo potřebné množství pojiva při teplotě 50 °C. Po přidání pojiva byla směs promíchána špachtlí. Míchání probíhalo při teplotě 50 °C do úplného obalení kameniva pojivem.



**Obr. č 14: Laboratorní sušárna**



**Obr. č 15: Míchání směsi**

Pozn.: u směsi z nových biofluxovaných pojiv trvalo déle, než bylo kamenivo plně obaleno pojivem.

### 5.3.1 Hutnění

Po obalení kameniva pojivem byla směs bez předehtátí nasypána do forem na Marshallova tělesa. Tato část se týkala pouze 9 navážek, které byly určeny pro zhotovení Marshallových těles pro určení objemové hmotnosti hydrostatickým vážením.

Hutnění směsi proběhlo dle ČSN EN 12697-30 – *Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem* na Marshallově rázovém zhutňovači. Tělesa byla hutněna pomocí 50 rázů z každé strany. Po zhutnění se tělesa vhodně popsala a nechala zchladnout. Následně se tělesa nechala odležet, z důvodu částečného odpaření ředidla či fluxační přísady. Důvodem odležení je, aby se zabránilo rozpadnutí tělesa při vytlačování z formy. Po odležení byla Marshallova těla vytlačena z formy.[20]



**Obr. č 16: Směs ve formě na Marshallova tělesa**



**Obr. č 17: Rázový zhutňovač**



**Obr. č 18: vytlačená a popsaná tělesa**

## 5.4 STANOVENÍ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI

Pro potřebu určení mezerovitosti byla určena objemová hmotnost pomocí hydrostatického měření a maximální objemová hmotnost, která byla stanovena volumetrickým postupem.

### 5.4.1 Stanovení objemové hmotnosti hydrostatickým vážením

Objemová hmotnost se určila dle EN 12697-6 *Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa*, která je popsána ve kapitole 4.1.2.1 Stanovení objemové hmotnosti hydrostatickým vážením.

Zkouška byla provedena na 9 Marshallových tělesech o třech různých množstvích ředěného asfaltu popsáných v kapitole 5.2 Návrh směsi a 5.3 Výroba směsi. Marshallova tělesa byla rozdělena následovně

- A. 3 Marshallova tělesa s množstvím pojiva 4,3 %
- B. 3 Marshallova tělesa s množstvím pojiva 4,8 %
- C. 3 Marshallova tělesa s množstvím pojiva 5,3 %

Výsledky pro stanovení objemové hmotnosti jsou pospány v tabulce č. 8: Stanovení objemové hmotnosti.

#### Stanovení objemové hmotnosti

Označení zkušební tělesa	A1	A2	A3	Průměr	
hmotnost suchá	1089,1	1087,9	1081,0	1086,0	g
hmotnost pod vodou	611,1	612,9	612,9	612,3	g
hmotnost vlhká	1111,4	1110,9	1107,0	1109,8	g
<b>objemová hmotnost</b>	<b>2170,4</b>	<b>2178,0</b>	<b>2181,3</b>	<b>2176,5</b>	kg/m <sup>3</sup>

Označení zkušební tělesa	B1	B2	B3	Průměr	
hmotnost suchá	1087,9	1091,7	1089,1	1089,6	g
hmotnost pod vodou	616,9	620,2	617,6	618,2	g
hmotnost vlhká	1112,2	1114,9	1114,9	1114,0	g
<b>objemová hmotnost</b>	<b>2189,9</b>	<b>2200,2</b>	<b>2183,5</b>	<b>2191,1</b>	kg/m <sup>3</sup>

Označení zkušební tělesa	C1	C2	C3	Průměr	
hmotnost suchá	1101,8	1100,6	1099,1	1100,5	g
hmotnost pod vodou	620,4	620,2	619,9	620,2	g
hmotnost vlhká	1122,1	1124,7	1120,4	1122,4	g
<b>objemová hmotnost</b>	<b>2189,5</b>	<b>2175,0</b>	<b>2189,4</b>	<b>2184,6</b>	kg/m <sup>3</sup>

Označení vzorku	A	B	C	
<b>Obsah pojiva z hmotnosti směsi</b>	4,3	4,8	5,3	[%]

Tabulka č. 8: Stanovení objemové hmotnosti.

#### 5.4.2 Stanovení maximální objemové hmotnosti Volumetrickým postupem

Stanovení maximální objemové hmotnosti proběhlo dle ČSN EN 12697-5 *Asfaltové směsi – Zkušební metody - Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti*, která je popsána v kapitole 4.1.2.2 Stanovení maximální objemové hmotnosti volumetrickým postupem.

Zkouška byla provedena na třech směsích o různém obsahu asfaltového pojiva (viz tabulka č.9). Ta byla získána vytvořením směsi bez zhutnění na Marshallově rázovém zhutňovači.

Výsledky pro stanovení maximální objemové hmotnosti jsou pospány v tabulce č. 8 Stanovení maximální objemové hmotnosti.

**Stanovení maximální objemové hmotnosti  $\rho_{mv}$**

Zkušební vzorek	A	B	C	
Označení pyknometru	III	I	II	
Pyknometr prázdný $m_1$	346,9	352,9	380,7	g
Pyknometr+vzorek $m_2$	894,5	854,3	749,2	g
Pyknometr+vzorek+voda $m_3$	1662,4	1624,4	1573,1	g
Objem pyknometru $V_p$	692,3	676,3	657,7	$m^3$
Hustota rozpouštědla $\rho_w$	1615,0	1615,0	1615,0	$kg/m^3$
Teplota temperace	25,0	25,0	25,0	$^{\circ}C$
Navážka asf. směsi	547,7	501,5	368,5	g
<b>Maximální objemová hmotnosti <math>\rho_{mv}</math></b>	<b>2525,8</b>	<b>2514,6</b>	<b>2496,8</b>	$kg/m^3$

<b>Označení vzorku</b>	A	B	C	
<b>Obsah pojiva z hmotnosti směsi</b>	4,3	4,8	5,3	[%]

**Tabulka č. 9: Stanovení maximální objemové hmotnosti**

Stanovení maximální objemové hmotnosti proběhlo celkem dvakrát, neboť při prvním pokusu se nedala dostatečně velká pozornost odlišnosti ředěných asfaltových pojiv.

První pokus proběhl tak, že pro zkušební vzorek B bylo vytvořeno Marshallovo těleso, které bylo dodatečně vysušeno a rozdrobeno na hrubé částice a shluky, kdežto pro vzorek A a C byla použita přímo vytvořená směs bez dodatečného vysoušení. Díky tomu ve směsích došlo k rozdílnému množství benzínové frakce v pojivu a k výrazným odlišnostem ve výsledku.

Při druhém pokusu se již postupovalo shodně pro všechny vzorky, a to tím způsobem, že vytvořená směs Fileru, kameniva a asfaltového pojiva byla vysušena v laboratorní sušárně při teplotě  $60\text{ }^{\circ}C \pm 5\text{ }^{\circ}C$ , čímž došlo k odpaření ředidla a až následně bylo provedeno stanovení maximální objemové hmotnosti.

V tabulce č. 9 jsou výsledky druhého pokusu.

## 5.5 STANOVENÍ MEZEROVITOSTI

Mezerovitost byla stanovena dle ČSN EN 12697-8 *Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 8: Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí*, která je popsána v kapitole 4.1.3 Stanovení mezerovitosti.

Z hodnot objemové hmotnosti a z hodnot maximálních objemových hmotností uvedených v tabulce č.9 byla vypočtena mezerovitost.

Výsledky mezerovitostí pro jednotlivé vzorky jsou popsány v tabulce č. 10 Stanovení objemové hmotnosti a mezerovitosti.

**Stanovení objemové hmotnosti a mezerovitosti**

Označení zkušebního tělesa	A1	A2	A3	Průměr	
hmotnost suchá	1089,1	1087,9	1081,0	1086,0	g
hmotnost pod vodou	611,1	612,9	612,9	612,3	g
hmotnost vlhká	1111,4	1110,9	1107,0	1109,8	g
objemová hmotnost	2170,4	2178,0	2181,3	2176,5	kg/m <sup>3</sup>
Mezerovitost	14,1	13,8	13,6	13,8	%

Označení zkušebního tělesa	B1	B2	B3	Průměr	
hmotnost suchá	1087,9	1091,7	1089,1	1089,6	g
hmotnost pod vodou	616,9	620,2	617,6	618,2	g
hmotnost vlhká	1112,2	1114,9	1114,9	1114,0	g
objemová hmotnost	2189,9	2200,2	2183,5	2191,1	kg/m <sup>3</sup>
Mezerovitost	12,9	12,5	13,2	12,9	%

Označení zkušebního tělesa	C1	C2	C3	Průměr	
hmotnost suchá	1101,8	1100,6	1099,1	1100,5	g
hmotnost pod vodou	620,4	620,2	619,9	620,2	g
hmotnost vlhká	1122,1	1124,7	1120,4	1122,4	g
objemová hmotnost	2189,5	2175,0	2189,4	2184,6	kg/m <sup>3</sup>
Mezerovitost	12,3	12,9	12,3	12,5	%

Označení vzorku	A	B	C	
Obsahpojiva z hmotnosti směsi	4,3	4,8	5,3	[%]

**Tabulka č. 10: Stanovení objemové hmotnosti a mezerovitosti**

Z uvedených výsledků v tabulce č. 10 je nevhodnější mezerovitost pro vzorek C s obsahem mezerovitosti 5,3 %. Jelikož výrobce doporučuje, aby množství asfaltu nepřesáhlo hodnotu 5 % bylo stanoveno jako optimální množství pojiva ve směsi 4,8 %.

## 5.6 ZKOUŠKA PEVNOSTI V PŘÍČNÉM TAHU

Zkouška byla provedena při teplotě 15 °C dle ČSN EN 12697-23 *Asfaltové směsi – zkušební metody – Část 23: Stanovení pevnosti v příčném tahu*, která je popsána v kapitole 4.1.5 Zkouška pevnosti v příčném tahu.

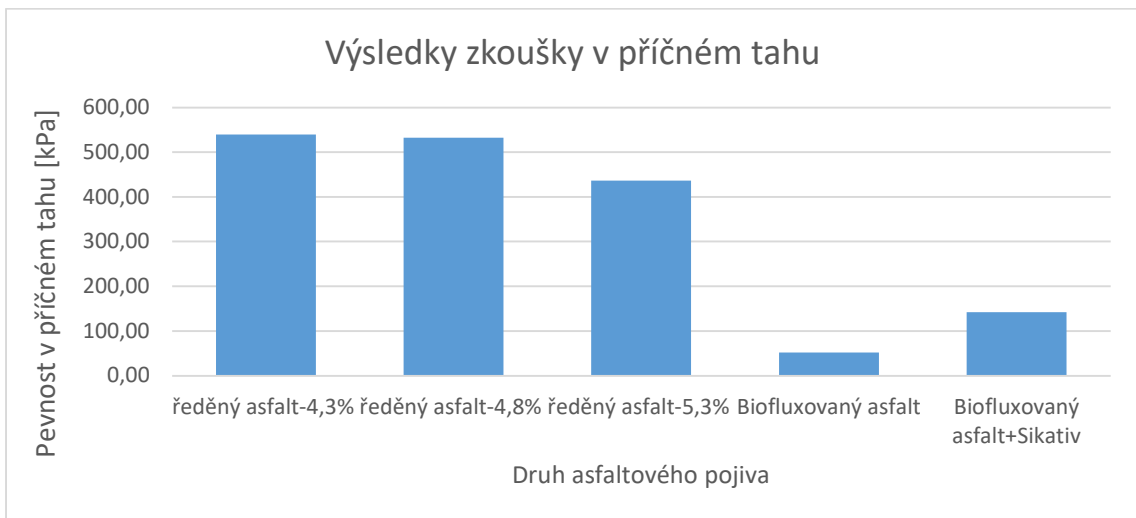
Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 11: Výsledky zkoušky pevnosti v příčném tahu.

**PEVNOST V PŘÍČNÉM TAHU**

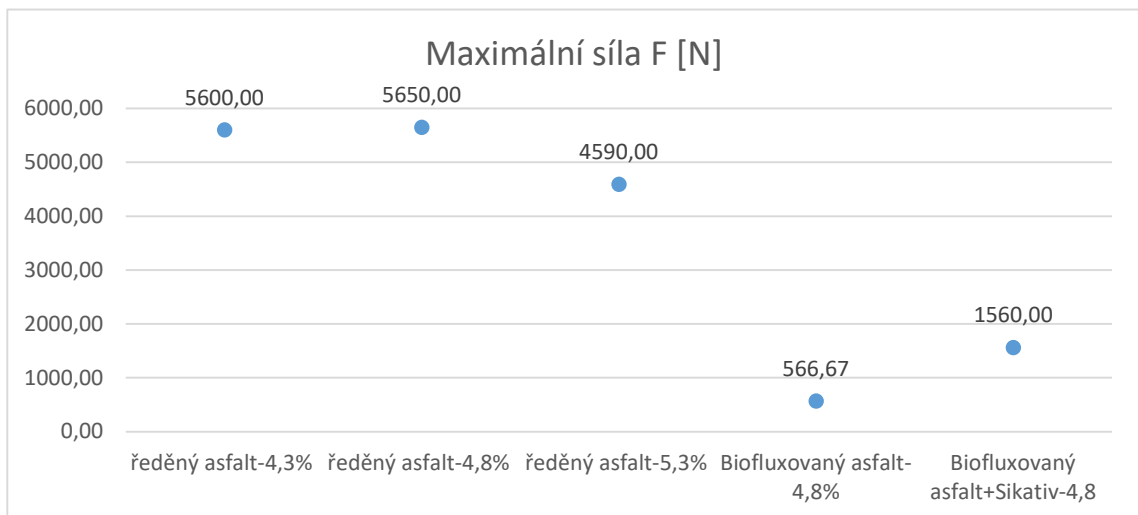
	ředěný asfalt			Biofluxovaný asfalt	Biofluxovaný asfalt s 1% sikativu
	4,30%	4,80%	5,30%		
ITS	539,30	532,44	436,69	52,08	141,85

[kPa]

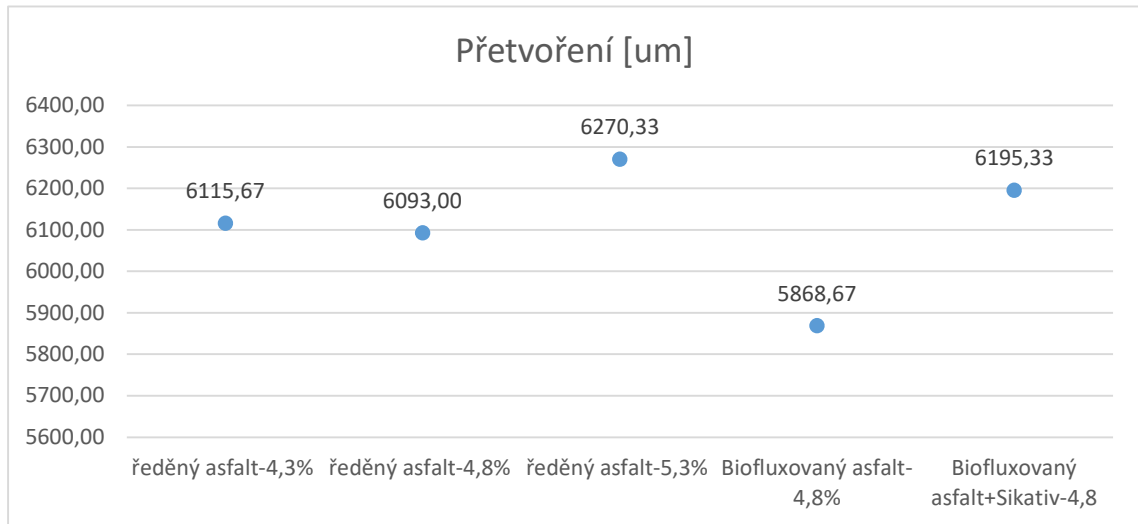
**Tabulka č. 11: Výsledky zkoušky pevnosti v příčném tahu.**



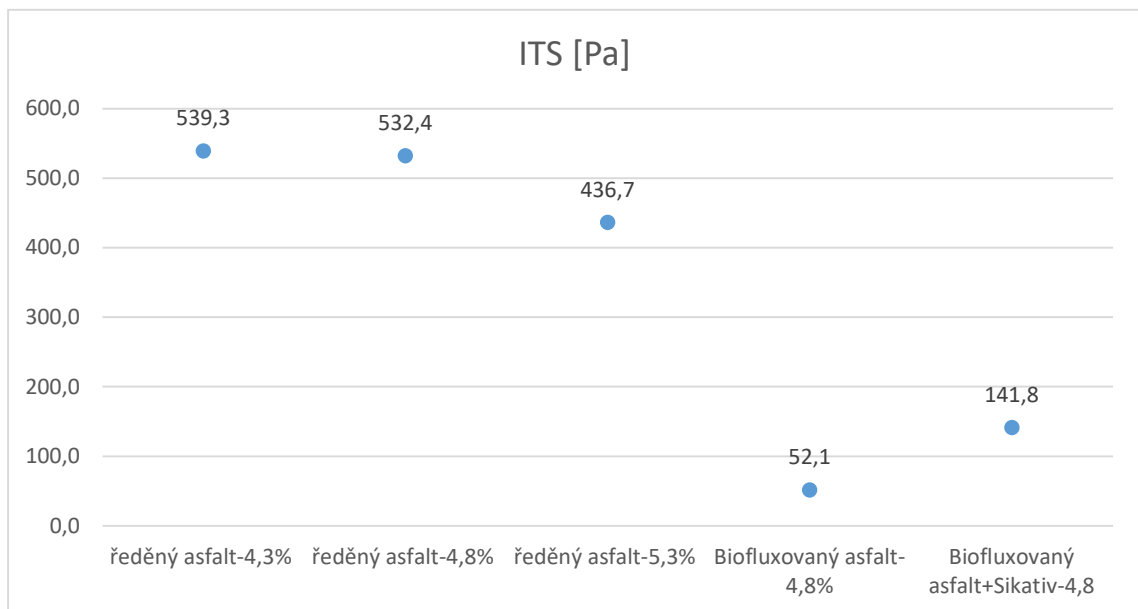
**Graf č. 2: Sloupcový graf výsledků pevnosti v příčném tahu**



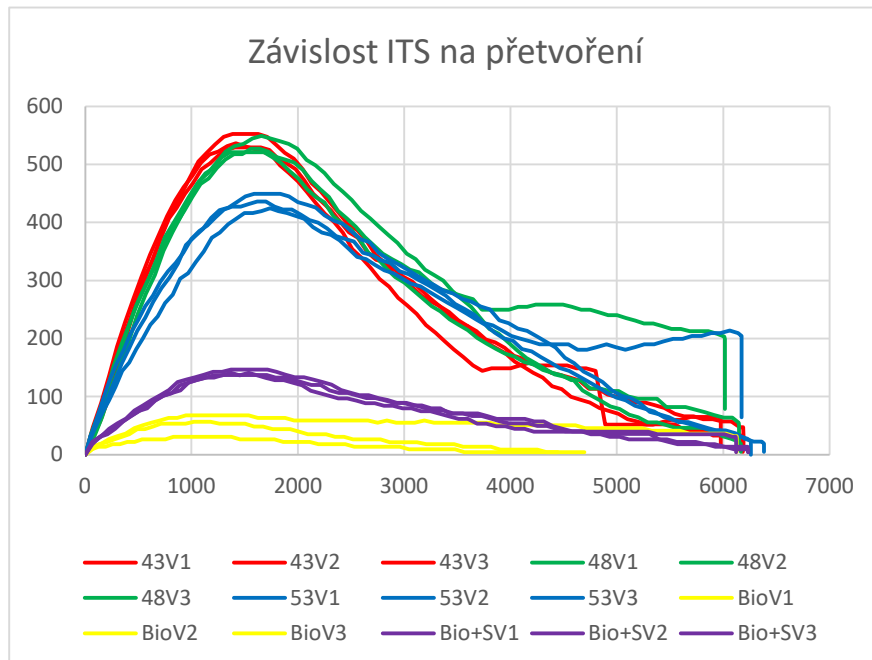
**Graf č. 3: Maximální síla F dosažená při zkoušce pevnosti v příčném tahu**



**Graf č. 4: Dosažené přetvoření při zkoušce pevnosti v příčném tahu**



**Graf č. 5: Maximální hodnota pevnosti v příčném tahu**



**Graf č.6 Závislost pevnosti v příčném tahu na přetvoření**



**Obrázek č. 19: Zkouška pevnosti v příčném tahu.**

Z výsledků uvedených v tabulce č. 11: Výsledky zkoušky pevnosti v příčném tahu a z grafů č. 2 lze vyčíst, že pevnost v příčném tahu u směsí z ředěného asfaltového pojiva je výrazně vyšší než u směsí z biofluxovaného pojiva. Obecně se

předpokládalo, že směs z biofluxovaného pojiva bude mít nižší pevnost, ale to že pevnost v příčném tahu u biofluxovaných pojiv nedosáhla ani 10% pevnosti směsi s ředěným asfaltovým pojivem je překvapivý výsledek. To může být pravděpodobně způsobeno pomalejším vypařováním oleje z biofluxovaného pojiva oproti rozpouštědлу z ředěného asfaltu. Z výsledků je patrné, že směs s příměsí 1% sikativu zvýšila pevnost v příčném tahu téměř třikrát, ale i přes to nedostála ani 30% pevnosti směsi se standartním ředěným pojivem.

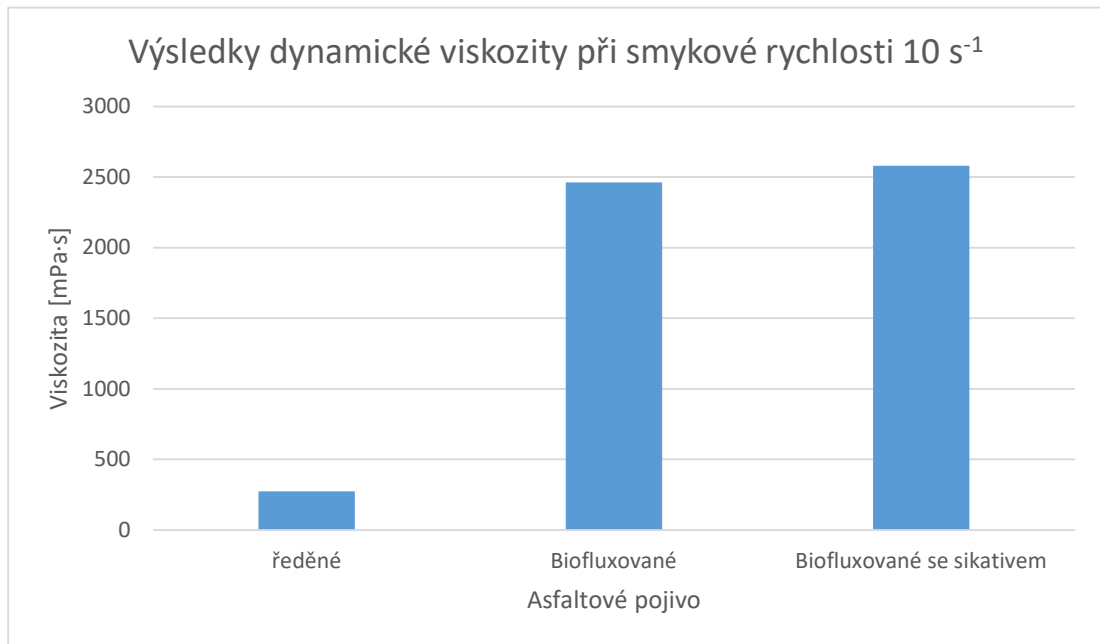
Z grafu číslo 4. je patrné, že přetvoření dosažené při maximální hodnotě pevnosti v příčném tahu jednotlivých zkušebních těles je srovnatelné pro všechny tři směsi. Dále lze pozorovat, že s rostoucím obsahem ředěného asfaltového pojiva ve směsi klesá pevnost v příčném tahu. To je pravděpodobně zapříčiněno vyšším obsahem ředěného pojiva, přičemž směs je „mastnější“ a tudíž poddajnější.

## 5.7 STANOVENÍ DYNAMICKÉ VISKOZITY

Stanovení dynamické viskozity bylo provedeno dle ČSN EN 13702- *Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení dynamické viskozity modifikovaných asfaltů metodou kužel deska*, která je popsána v kapitole 4.1.4 Stanovení viskozity. Viskozita se stanovila na dynamickém smykovém reometru Kinexus Pro při zkušební teplotě  $T=60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Pro každý z druhů pojiva proběhlo jedno měření, přičemž přístroj zaznamenával jednotlivé hodnoty viskozit při zvyšující se smykové rychlosti od  $1\text{ s}^{-1}$  po  $100\text{ s}^{-1}$ . Za účelem srovnání byla výchozí hodnota dynamické viskozity stanovena pro smykovou rychlost v polovině měření, což odpovídá hodnotě  $10\text{ s}^{-1}$ .

asfaltové pojivo	ředěné	Biofluxované	Biofluxované se sikativem	
Teplota	60	60	60	[ $^{\circ}\text{C}$ ]
smyková rychlost	10	10	10	[ $\text{s}^{-1}$ ]
Tečné napětí	$2,75 \cdot 10^{-3}$	$2,25 \cdot 10^{-2}$	$2,58 \cdot 10^{-2}$	[Pa]
viskozita	274,7	2462	2579	[mPa·s]

**Tabulka č. 12: Výsledky dynamické viskozity**



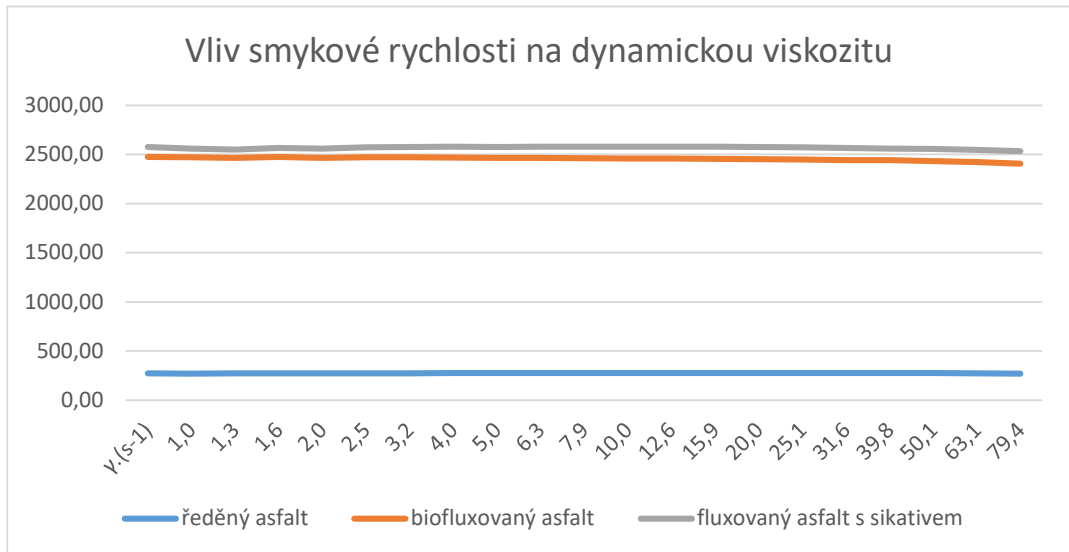
**Graf č. 7: Výsledky dynamické viskozity**

Z výsledků je patrné, že viskozita ředěného asfaltu oproti biofluxovaným asfaltům je desetkrát nižší. Dále lze z výsledků určit, že směs s biofluxovaným pojivem s obsahem 1% sikativu má nepatrně vyšší hodnotu viskozity. Jelikož je ale rozdíl mezi viskozitami biofluxovaných asfaltů nižší než 5% lze říci, že sikativ nemá zásadní vliv na viskozitu materiálu.

Podle výsledků zkoušky pevnosti v příčném tahu by se dalo očekávat, že viskozity biofluxovaných pojiv budou naopak nižší než viskozita ředěného asfaltu, protože pevnost v příčném tahu asfaltových směsí s biofluxovanými pojivy byla znatelně nižší než pevnost v příčném tahu směsi stmelené ředěným asfaltem. To podporuje myšlenku, že ředidlo z ředěného asfaltu se vypařuje znatelně rychleji, než je tomu v případě biofluxovaných pojiv.

## 5.8 VLIV SMYKOVÉ RYCHLOSTI NA DYNAMICKOU VIZKOZITU

Z hodnot získaných ze stanovení dynamické viskozity lze sestavit graf vlivu smykové rychlosti na dynamickou viskozitu (viz graf č.5). Z grafu č. 5: Vliv smykové rychlosti na dynamickou viskozitu lze následně určit, jestli daná pojiva jsou newtonské, nebo neneutonské kapaliny.



**Graf č.8: Vliv smykové rychlosti na dynamickou viskozitu**

Z daného grafu je patrné, že všechny pojiva se budou při daných okrajových podmínkách chovat jako newtonské kapaliny, protože hodnota jejich viskozity je prakticky nezávislá na hodnotě smykové rychlosti.

## 6 ZÁVĚR

Pro srovnání vlastností standartního ředěného pojiva, nového biofluxovaného pojiva a nového biofluxovaného pojiva s 1% sikativu byla stanovena dynamická viskozita těchto pojiv metodou kužel deska při teplotě 60 °C. Z výsledků bylo zjištěno, že ředěný asfalt má výrazně nižší hodnotu dynamické viskozity proti biofluxovaným pojivům, a to až desetinásobně. Dále bylo zjištěno, že pojivo obsahující 1% sikativu má nepatrně vyšší hodnotu viskozity. Obecně lze ale říci, že 1% sikativu nemá na výslednou viskozitu výrazný vliv, neboť výsledný rozdíl mezi jednotlivými druhy biofluxovaných pojiv je do 5% hodnoty viskozity.

Z výsledných hodnot dynamické viskozity byl následně posuzován vliv smykové rychlosti na dynamickou viskozitu. Se stoupající smykovou rychlostí se dynamická viskozita téměř neměnila. Proto lze usoudit, že zvyšující se smyková rychlost nemá vliv na dynamickou viskozitu. Platí tedy, že všechny druhy zkoumaného asfaltového pojiva se při daných okrajových podmínkách zkoušky chovají jako newtonovské kapaliny.

Další nedílnou součástí bakalářské práce bylo získání zkušeností s laboratorní výrobou studených asfaltových směsí. Bylo zjištěno, že oproti standartním silničním asfaltům je u ředěných a fluxovaných asfaltů důležité soustředit se na množství ředidla či oleje v pojivu. Benzínová a petrolejová frakce je relativně těkavá a s časem a zvýšenou teplotou se ze vzorků vytrácí. Odpařením benzínové či petrolejové frakce se mění vlastnosti jednotlivých zkušebních těles. Tato vlastnost byla prokázána při stanovení maximální objemové hmotnosti, kde při prvním měření nebyla před samotou zkouškou směs předeřátá a při druhém měření již byla. Rozdíl mezi maximální objemovou hmotností byl 218 kg/m<sup>3</sup>.

Pro srovnání vlastností studených asfaltových směsí s různými druhy asfaltového pojiva byla provedena zkouška pevnosti v příčném tahu při teplotě 15 °C. Bylo zjištěno, že směs s biofluxovaným pojivem má výrazně nižší pevnost v příčném tahu oproti směsi se standartním ředěným asfaltem. Sikativ sice zvýšil pevnost v příčném tahu na téměř trojnásobnou hodnotu, ale ani tak směs obsahující biofluxované pojivo s 1% sikativu nedosáhla ani 30% pevnosti v příčném tahu pro směs se standartním ředěným asfaltem.

Z informací shrnutých v této práci lze říci, že biofluxovaná pojiva se chovají odlišně od ředěných asfaltů, což ovšem nemusí znamenat, že budou tato pojiva dosahovat v reálné situaci při využití jako údržbové technologie horších výsledků. Pro udržitelné stavebnictví je třeba se dále věnovat výzkumu v této oblasti.

## 7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] LV, Songtao, Shuangshuang WANG, Chengdong XIA a Chaochao LIU. A New Method of Mix Design for Cold Patching Asphalt Mixture. *Frontiers in Materials*. 2020, **7**. ISSN 2296-8016. Dostupné z: doi:10.3389/fmats.2020.00182
- [2] ČSN EN 12597. *Asfalty a asfaltová pojiva: Terminologie*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [3] VARAUS, Michal. *Pozemní komunikace II: Modul 3: Asfaltová pojiva*. Brno: CERM, 2005.
- [4] ČSN EN 15322. *Asfalty a asfaltová pojiva: Systém specifikace ředěných a fluxovaných asfaltových pojiv*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [5] DAŠEK, Ondřej. *Funkční zkoušení asfaltových pojiv*. Brno: V. Presentace.
- [6] ČSN EN 13302. *Asfalty a asfaltová pojiva: Stanovení dynamické viskozity asfaltových pojiv rotačním vřetenovým viskozimetrem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.
- [7] DAŠEK, Ondřej. *Funkční zkoušení asfaltových pojiv*. Brno: V. Presentace.
- [8] ČSN EN 933-1. *Zkoušení geometrických vlastností kameniva: Část 1: Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [9] ČSN EN 12697-6. *Asfaltové směsi – Zkušební metody: Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021.
- [10] ČSN EN 12697-5. *Asfaltové směsi – Zkušební metody: Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
- [11] ČSN EN 1097-6. *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva: Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.

- [12] ČSN EN 12697-8. *Asfaltové směsi – Zkušební metody: Část 8: Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
- [13] ČSN EN 13702. *Asfalty a asfaltová pojiva: Stanovení dynamické viskozity modifikovaných asfaltů metodou kužel deska*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.
- [14] ČSN EN 12697-23. *Asfaltové směsi – zkušební metody: Část 23: Stanovení pevnosti v příčném tahu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018..
- [15] *Bezpečnostní list: silniční ředěný asfalt*. Česká republika, 2007.
- [16] *Bezpečnostní list: Biofluxované pojivo*. Česká republika, 2021.
- [17] HORÁK, Josef, Igor LINHART a Petr KLUSOŇ. *Úvod do toxikologie a ekologie pro chemiky*. 1. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2004. ISBN 80-708-0548-X.
- [18] *Kreidezeit - Přírodní barvy: Sikativ* [online]. Dačice: Kreidezeit, 2022 [cit. 2022-05-27]. Dostupné z: <https://www.kreidezeit.cz/produkty/ochrana-dreva/ochrana-dreva-v-exterieru-a-interieru-oleje/8-sikaktiv>
- [19] HRONOVÁ, Martina. *Vliv směsných sikativ na charakteristiky zasychání rostlinno-olejných fermeží*. Brno, 2020. Diplomová práce. Masarykova univerzita. Vedoucí práce Ing. Jaromír Tulka, CSc.
- [20] ČSN EN 12697-30. *Asfaltové směsi – zkušební metody: Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
- [21] PĚNČÍK, Michal. *Pojiva do netuhých vozovek*. Brno, 2013. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. PETR HÝZL, Ph.D.
- [22] BRODÁK, Marek. *Dynamická viskozita asfaltových pojiv*. Brno, 2017. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.

- [23] CHLOUPEK, Adam. *Využití nestandardního drobného kameniva do stmelěných směsí podkladních vrstev vozovek*. Brno, 2019. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Doc. Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.
- [24] BRIDA, Peter. *HRUBOZRNNÉ ASFALTOVÉ SMĚSI*. Brno, 2022. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Doc. Ing. ONDŘEJ DAŠEK, Ph.D.

## 8 SEZNAM OBRÁZKŮ

- [1] rozdělení asfaltů podle norem [4]
- [2] asfalt – visko-elastický materiál
- [3] Odplavení jemných částic
- [4] Odplavení jemných
- [5] Sloupec sít
- [6] Stanovení objemové hmotnosti hydrostatickým vážením
- [7] Zkoušený vzorek s pyknometrem
- [8] Pyknometr [11]
- [9] Metoda deska – kužel
- [10] Měření viskozity
- [11] Typy porušení [14]
- [12] použitý materiál
- [13] Sloupec sít
- [14] Laboratorní sušárna
- [15] Míchání směsi
- [16] Rázový zhutňovač
- [17] Směs ve formě na Marshallova tělesa
- [18] Vytlačená a popsaná tělesa
- [19] Zkouška pevnosti v příčném tahu

## 9 SEZNAM TABULEK

- [1] Složení standartního ředěného asfaltu [9]
- [2] Složení standartního ředěného asfaltu [9]
- [3] Složení biofluxovaného asfaltu [9]
- [4] Zrnitost kameniva
- [5] Skladba kameniva ve směsi
- [6] Přiblížení k Fullerově parabole
- [7] Výpočet navážek
- [8] Výpočet objemové hmotnosti hydrostatickým vážením
- [9] Stanovení maximální objemové hmotnosti
- [10] Stanovení objemové hmotnosti a mezerovitosti
- [11] Výsledky zkoušky pevnosti v příčném tahu.
- [12] Výsledky dynamické viskozity

## 10 SEZNAM GRAFŮ

- [1] Čára zrnitosti
- [2] Sloupcový graf výsledků pevnosti v příčném tahu
- [3] závislost jednotlivých veličin při zkoušce pevnosti v příčném tahu
- [4] Výsledky dynamické viskozity
- [5] Vliv smykové rychlosti na dynamickou viskozitu

## 11 SEZNAM ROVNIC

- [1] Newtonova rovnice
- [2] Maximální podíl kameniva zachycený na sítu
- [3] Souhrnné procento propadu
- [4] Procento jemných částic
- [5] Objemová hmotnost
- [6] Maximální objemová hmotnost
- [7] Mezerovitost
- [8] Pevnost v příčném tahu
- [9] Stanovení čáry zrnitosti