

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta stavební  
Katedra dopravního stavitelství

**Ověření vlivu přísady na bázi alkylsilanů na zpracovatelnost asfaltové  
směsi**

Verification of the effect of an additive based on alkyl silanes on the  
processability of an asphalt mixture

Student:

Bc. Patricie Ryšková

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Denisa Cihlářová, Ph.D.

Ostrava 2023

# Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Patricie Ryšková**

Studijní program: N0732A260011 Stavební inženýrství - Dopravní stavby

Téma: **Ověření vlivu přísady na bázi alkylsilanů na zpracovatelnost asfaltové směsi**  
**Verification of the effect of an additive based on alkyl silanes on the processability of an asphalt mixture**

Jazyk vypracování: čeština

## Zásady pro vypracování:

Zvýšení cen energií by mohlo být řešeno na obalovnách snížením výrobní teploty asfaltové směsi, tedy výrobou nízkoteplotních asfaltových směsí NTAS. Snížení teploty lze dosáhnout zpěněním asfaltového pojiva, přidáním vosků na bázi amidů mastných kyselin nebo Fischer-Tropschových parafinů, nebo chemických přísad. Práce se bude zabývat poslední možností, chemickou přísadou, která je povrchově aktivní a lze ji přidat přímo na obalovně na váhu asfaltového pojiva.

Úkolem studenta bude provést zkoušky na směsích s příměsí dle ČSN 73 6120 příloha I a K při teplotách 110, 120, 130, 140 a 150 °C vždy na třech Marshallových tělesech. Cílem práce bude vyhodnotit výsledky zkoušek a shrnout získané zkušenosti a poznatky z hlediska teploty, dávkování a ekonomického přínosu.

## Seznam doporučené odborné literatury:

ČSN 73 6120 Stavba vozovek - Ostatní asfaltové vrstvy - Provádění a kontrola shody

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Denisa Cihlářová, Ph.D.**

Datum zadání: 28.02.2023

Datum odevzdání: 30.11.2023

Garant studijního programu: doc. Ing. Jan Petřů, Ph.D.

V IS EDISON zadáno: 27.02.2023 16:13:42

## **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 30.11.2023

.....

Bc. Patricie Ryšková

## Prohlášení o využití výsledku

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mě požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 30.11.2023

.....

Bc. Patricie Ryšková

## **ANOTACE**

RYŠKOVÁ, Patricie. *Ověření vlivu přísady na bázi alkylsilanů na zpracovatelnost asfaltové směsi*. Ostrava, 2023. Diplomová práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební, Katedra dopravního stavitelství. Vedoucí Ing. Denisa Cihlářová, Ph.D

Cílem diplomové práce bylo vyhodnocení účinků chemické přísady Bitusil při snižování pracovní teploty asfaltových směsí. Byly provedeny experimenty při různých teplotách hutnění asfaltové směsi. Pro potřeby diplomové práce bylo provedeno několik vzorků Marshallových těles, která následně sloužila pro zkoušky asfaltové směsi. Následně byla chemická přísada Bitusil vyhodnocena jako vhodná.

### **KLÍČOVÁ SLOVA:**

Asfaltová směs, zkušební laboratoř, kamenivo, asfalt, R-materiál, Bitusil, nízkoteplotní asfaltová směs, nízkoteplotní přísady

## **ANOTATION**

RYŠKOVÁ, Patricie. *Verification of the effect of an additive based on alkyl silanes on the processability of an asphalt mixture*. Ostrava, 2023. Diploma thesis. VŠB – Technical University Ostrava, Faculty of Civil Engineering, Department of Transport Engineering. Supervisor Ing. Denisa Cihlářová, Ph.D

The aim of the thesis was to evaluate the effects of the chemical additive Bitusil in reducing the working temperature of asphalt mixtures. Experiments were carried out at different asphalt mix compaction temperatures. For the purpose of the thesis, several Marshall body samples were made and subsequently used for asphalt mix testing. Subsequently, the chemical additive Bitusil was evaluated as suitable.

### **KEY WORDS:**

Asphalt mix, testing laboratory, aggregate, asphalt, R-material, Bitusil, low temperature asphalt mix, low temperature additives

## SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ A ZKRATEK

ACL	asfaltový beton pro ložné vrstvy
ACO	asfaltový beton pro obrusné vrstvy
CO <sub>2</sub>	oxid uhličitý
ČSN EN	česká technická norma převzatá z evropských norem
ČSN	česká technická norma
DPH	daň z přidané hodnoty
NTAS	nízkoteplotní asfaltová směs

## SEZNAM VELIČIN

$m_1$	hmotnost pyknometru a nástavce [g]
$m_1$	hmotnost suchého tělesa [g]
$m_2$	hmotnost nasyceného tělesa [g]
$m_2$	hmotnost pyknometru, nástavce a zkušební vzorku [g]
$m_3$	hmotnost nasyceného tělesa po vyjmutí a otření [g]
$m_3$	hmotnost pyknometru, nástavce, zkušební vzorku a vody [g]
$V_a$	mezerovitost asfaltového zkušební tělesa [%]
$V_p$	objem pyknometru při naplnění po referenční značce [m <sup>3</sup> ]
$\rho_b$	objemová hmotnost zkušební tělesa [Mg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{bssd}$	objemová hmotnost asfaltové směsi [Mg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_m$	maximální objemová hmotnost směsi [Mg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{mv}$	maximální objemová hmotnost asfaltové směsi [Mg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_w$	hustota vody při zkušební teplotě [Mg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_w$	hustota vody při zkušební teplotě [Mg/m <sup>3</sup> ]

# OBSAH

---

1	Úvod.....	1
2	Asfaltové směsi používané v České republice.....	4
3	Nízkoteplotní asfaltové směsi (NTAS).....	6
3.1	Oblast využití NTAS .....	7
3.2	Používané přísady a technologie .....	7
3.2.1	Syntetické vosky [5].....	7
3.2.2	Hybridní a přírodní vosky [5].....	8
3.2.3	Amidové vosky [5].....	8
3.2.4	Chemické přísady [5] .....	9
3.2.5	Zeolity [6].....	9
3.2.6	Technologie na bázi zpěněného asfaltu [5] .....	9
3.2.7	Zycosoil a Densicryl.....	10
4	Zkušební metody.....	11
4.1	Hutnění asfaltových těles rázovým zhutňovačem .....	11
4.1.1	Zkušební pomůcky .....	11
4.1.2	Postup zkoušky.....	11
4.2	Stanovení objemové hmotnosti asfaltové směsi .....	12
4.2.1	Zkušební pomůcky .....	12
4.2.2	Postup zkoušky.....	13
4.3	Stanovení maximální objemové hmotnosti asfaltové směsi – volumetrický postup. 13	
4.3.1	Zkušební pomůcky .....	13
4.3.2	Postup zkoušky.....	14
4.4	Stanovení mezerovitosti asfaltové směsi.....	15
5	Praktická část .....	16

5.1	Cíl práce.....	16
5.2	Použité materiály .....	16
5.2.1	Kamenivo .....	16
5.2.2	R-materiál.....	16
5.2.3	Asfalt .....	16
5.2.4	Bitusil .....	17
5.3	Popis experimentu .....	19
5.4	Výsledky.....	25
5.4.1	Hutnění 110 °C.....	25
5.4.2	Hutnění 120 °C.....	27
5.4.3	Hutnění 130 °C.....	30
5.4.4	Hutnění 140 °C.....	32
5.4.5	Zhodnocení v závislosti na obsahu přísady .....	34
5.4.6	Stanovení optimálního množství asfaltového pojiva u vybrané varianty s 1,00 % přísady	35
5.5	Experiment s maximální dávkou přísady Bitusil.....	38
5.6	Ekonomické zhodnocení.....	41
6	Závěr .....	43



# 1 ÚVOD

Žijeme v době, která je ještě stále poměrně dost ovlivněná pandemií COVID 19 a stále trvající válkou na Ukrajině. Obě tyto události přinesli spoustu problémů týkajících se obyvatel po celém světě. Válka na Ukrajině je charakterizována rostoucí energetickou krizí České republiky, kdy se Česká republika snaží osamostatnit od dodávek zdrojů z Ruska. Dalším důležitým faktem tohoto století je potřeba snižování emisí skleníkových plynů, a s tím související hledání inovativních řešení právě ve stavebním průmyslu. Stavební odvětví čelí výzvám, které vyžadují nejen efektivní a udržitelná řešení, ale i snižování celkové environmentální zátěže spojené s výrobou a užíváním stavebních materiálů.

Silniční doprava po celém světě denně roste, přibývá stále více osobních a hlavně nákladních a tranzitních automobilů. Právě nákladní a tranzitní doprava nejvíce zatěžuje a deformuje konstrukce vozovek. Už při návrhu vozovky se uvažuje s předpokládaným počtem průjezdů těžkých nákladních vozidel za den, aby vozovka mohla po dobu své životnosti odolávat zatížení způsobeném pojezdy někdy až přetížených nákladních automobilů. Proto jsou kladeny čím dál vyšší nároky na konstrukce vozovek, ať už na asfaltové či betonové vozovky.



Obrázek 1 – obalovna pro výrobu asfaltových směsí

Zásadním faktorem pro zredukování emisí CO<sub>2</sub> při výrobě asfaltových směsí je snížení teploty nutné pro zahřátí obalovny a s tím spojené problémy se sníženou pracovní teplotou asfaltové směsi pro přepravu a pokládku. Teplota asfaltové směsi by při pokládce neměla klesnout pod 130 C° v závislosti na druhu směsi. Aby se s asfaltovou směsí dalo na stavbách dobře pracovat a zároveň se snížila teplota nutná pro hutnění na co nejmenší, je potřeba do asfaltových směsí přidávat různé přísady. Jednu takovou přísadu, která nám dokáže pomoci při snížení pracovní teploty, budeme rozebírat a zkoušet v následující diplomové práci.

Tato diplomová práce se zaměřuje na významný aspekt této problematiky – nízkoteplotní asfaltové směsi (NTAS). V kontextu rostoucí energetické krize představují nízkoteplotní asfaltové směsi potenciální nástroj pro snížení energetické náročnosti procesu výroby asfaltu. S jejich vývojem se váže naděje na efektivnější využívání energie a tím i na celkové snížení emisí skleníkových plynů spojených s tímto odvětvím.

Tato práce bude nejen zkoumat technické aspekty nízkoteplotní asfaltové směsi, ale i sledovat jejich přínosy z hlediska ochrany životního prostředí. Věnuje se také zkoumání možností vylepšení vlastností asfaltu, jako jsou mechanická odolnost, trvanlivost a celková stabilita, což jsou nezbytné vlastnosti asfaltových směsí pro udržitelný rozvoj silniční infrastruktury.

V první části této práce se podrobněji zabýváme současně používáními asfaltovými směsmi v České republice a věnujeme se oblastem, kde může být přínos nízkoteplotní asfaltové směsi klíčový. Následně se věnujeme nízkoteplotní asfaltové směsi s důrazem na používané přísady a technologie, které mohou poskytnout efektivní řešení nejen pro stavební průmysl, ale i pro celkovou energetickou a ekologickou udržitelnost.

Druhá část práce pak podrobně rozpracovává zkušební metody, které byly využity k hodnocení vlastností nízkoteplotních asfaltových směsí. Praktická část diplomové práce prezentuje konkrétní experimenty, jejichž cílem je nejen zhodnocení technických aspektů nízkoteplotní asfaltové směsi, ale i ekonomického dopadu na stavební průmysl. Zahrnuje výsledky experimentů, které zkoumají vlastnosti asfaltových směsí s různým obsahem přísad a teplot hutnění asfaltových směsí, a to s ohledem na snižování emisí a zlepšení celkových charakteristik asfaltu.

Závěrečná část diplomové práce se zaměřuje na shrnutí dosažených výsledků, diskusi o jejich významu v kontextu energetické krize a snižování emisí, a na prezentaci možných budoucích směrů výzkumu v oblasti nízkoteplotní asfaltové směsi. Cílem této práce je přispět k rozvoji

udržitelnějších a energeticky efektivnějších materiálů v českém stavebním průmyslu a podpořit diskusi o nezbytných krocích směrem k snížení environmentálního dopadu stavebního odvětví.

## 2 ASFALTOVÉ SMĚSI POUŽÍVANÉ V ČESKÉ REPUBLICE

---

V České republice jsou vozovky budovány z několika vrstev, které mají různé složení a každá z nich má svou specifickou funkci, která závisí na tom, jak je daná vrstva zatěžována. Největší Netuhé vozovky jsou nejrozšířenějším typem vozovek a používají se pro všechny třídy dopravního zatížení i pro různé oblasti využití. Netuhé vozovky mají nižší životnost než tuhé vozovky, jejich výroba je levnější, za to náklady na údržbu jsou vyšší než u tuhých vozovek.

Stmelené netuhé asfaltové vrstvy dělíme na obrusnou vrstvu, ložnou vrstvu a podkladní vrstvu. Pod asfaltovými vrstvami se nachází ochranná vrstva, která leží na zemní pláni.

Obrusná vrstva je vystavena přímému působení klimatických vlivů a zátěži z dopravy. Je klíčovým prvkem pro celkovou odolnost konstrukce vozovky. Její úkolem je odolávat srážkové vodě, mrazu a chemickým látkám používaným při rozmrazování. Kromě toho musí vydržet opakované ohlazování a opotřebení a udržet protisklizové vlastnosti po celou svou životnost. Rovněž je důležité, aby měla správný příčný sklon a byla rovná. Obrusná vrstva musí splňovat stanovené normy co se týče kvality materiálu, tak i technologie jejího provedení.

Ložní vrstva je zřizována pod obrusnou vrstvou, aby zajistila kvalitní a rovný podklad pro pokládku obrusné vrstvy. Tím se zároveň zvyšuje celková nosnost konstrukce vozovky, kdy ložní vrstva spolupůsobí s obrusnou vrstvou.

Podkladní vrstva roznáší zatížení z krytových vrstev do podloží násypu, plní tedy nosnou funkci. Musí být odolná proti trvalým deformacím. Na podkladní vrstvy jsou kladené požadavky zejména na životnost, pevnost ve smyku, v tahu a za ohybu.

V České republice se nejčastěji využívají následující asfaltové směsi:

**Asfaltový beton AC** (Asfalt Concrete) – asfaltová směs určená pro konstrukci krytu a podkladních vrstev je charakterizována rovnoměrným zastoupením různých frakcí kameniva, což znamená, že se směs vyznačuje plynulou křivkou zrnitosti. Standardně se provádí v tloušťce 30 až 90 mm. Cílem je dosáhnout správnou pokládkou a hutněním asfaltové směsi mezerovitosti v rozmezí 2,5-3,5 %. Správně zhutněná směs je téměř nepropustná. Jako pojivo se nejčastěji využívá silniční asfalt 50/70 nebo polymery modifikované asfalty.

**Asfaltový koberec mastixový SMA** (Stone Mastix Asphalt) – asfaltová směs určená pro obrusné vrstvy vysoce zatížených vozovek a křižovatek. Křivka zrnitosti této směsi není plynulá,

asfaltová směs SMA obsahuje zejména hrubší frakci kameniva. Nejčastěji se využívá jako pojivo modifikovaný asfalt. Do asfaltové směsi se pro zamezení stékání přidávají vlákna. Asfaltová směs je považována za nepropustnou. Mezerovitost okolo 2,5-4,5 %, tloušťka vrstvy většinou 40 mm.

**Asfaltový beton pro velmi tenké vrstvy BBTM** (Beton Bitumineux Très Minces) – tato asfaltová směs se využívá při údržbě a opravě vozovek, kde nedochází ke změně nivelety. Provádí se v tloušťce 20-35 mm. Mezerovitost směsi se pohybuje v rozmezí 2,5-11 % v závislosti na čáře zrnitosti.

**Asfaltový koberec drenážní PA** (Porous Asphalt) – jedná se o asfaltovou směs s vysokou mezerovitostí určenou pro obrusné vrstvy. Hlavní funkcí této směsi je odvádět srážkovou vodu do spodních vrstev. Velkou výhodou asfaltové směsi je zvýšení protismykových vlastností a snížení hlučnosti jízdy vozidel. Mezerovitost směsi bývá 16-30 %.

**Litý asfalt MA** (Mastix Asphalt) – tato asfaltová směs neobsahuje vzduchové mezery a nedochází k vzájemnému zaklínění zrn. Nejčastěji se používá zejména jako izolace na mostních objektech.

*Tabulka 1 – seznam používaných asfaltových směsí v České republice*

Druh vrstvy	Označení	Norma
Asfaltový beton pro obrusnou vrstvu	ACO	ČSN EN 13108-1
Asfaltový beton pro ložní vrstvu	ACL	ČSN EN 13108-1
Asfaltový beton pro podkladní vrstvu	ACP	ČSN EN 13108-1
Asfaltový beton pro velmi tenké vrstvy	BBTM	ČSN EN 13108-2
Asfaltový koberec mastixový	SMA	ČSN EN 13108-5
Asfaltový koberec drenážní	PA	ČSN EN 13108-7
Litý asfalt	MA	ČSN EN 13108-6

### 3 NÍZKOTEPLTNÍ ASFALTOVÉ SMĚSI (NTAS)

---

Energetická náročnost silničních staveb je všeobecně považována jako jeden z nejdůležitějších aspektů výstavby silnic a dálnic. Je dbáno především na snížení spotřeby energie při výrobě asfaltových směsí. V současné době se potýkáme s energetickou krizí, kdy se Česká republika snaží nebýt závislá na jednom dodavateli tepelné energie. V rámci této krize došlo k rapidnímu nárůstu cen energií, ať už elektřiny, tak i plynu. Toto zdražení se výrazně dotklo většiny obaloven na území České republiky. Pokud by se podařilo snížit pracovní teplotu výroby asfaltových směsí alespoň o 10 °C, spotřebovalo by se tak méně tepelné energie a tím pádem by obalovna ušetřila nemalé množství peněz. Snížením teploty by se zároveň snížilo množství emisí, převážně CO<sub>2</sub>.

Snížení pracovní teploty lze dosáhnout různými způsoby. Díky vlastnostem asfaltových pojiv lze teplotu snížit pomocí snížení viskozity pojiva nebo správnou volbou technologie, která nespotřebuje velké množství tepelné energie a přitom nabídne srovnatelnou asfaltovou směs. Nejčastěji se můžeme setkat s technologií nízkoteplotních asfaltových směsí nebo studených asfaltových směsí na bázi asfaltových emulzí a asfaltové pěny.

Nízkoteplotní asfaltové směsi se využívají pro snížení teploty při výrobě a pokládce živičných vrstev. Jedná se o asfaltové směsi vyráběné při teplotách vyšších než 100 °C, kdy se do směsi přidávají přísady, které snižují viskozitu asfaltového pojiva. V porovnání s běžnými asfaltovými směsmi lze u těchto dosáhnout částečného snížení pracovních teplot, obvykle v rozmezí 10-30 °C.

Při výrobě nízkoteplotních asfaltových směsí se využívají převážně silniční asfalty, polymerem modifikované asfalty nebo nízko viskózní asfaltová pojiva. Jako přísady se používají organické přísady snižující viskozitu při výrobě asfaltové směsi, kdy se jedná například o syntetické vosky. Dále se používají minerální přísady jako například zeolity. Současně se mohou používat i přísady na zlepšení přilnavosti asfaltu ke kamenivu nebo třeba přísady pro zlepšení zpracovatelnosti.

### 3.1 Oblast využití NTAS

Nízkoteplotní asfaltové směsi se uplatňují pro obrusné, ložní i podkladní vrstvy asfaltových vozovek všech tříd dopravního zatížení. Tloušťka konstrukce bývá obvyklá pro danou asfaltovou směs a konstrukční vrstvu. Další uplatnění NTAS má v účelných situacích:

- Stavební práce prováděné ve zhoršených klimatických podmínkách
- Asfaltové směsi využívané v tunelech a vnitřních prostorech
- Stavební práce náročné na čas (např. letištní plochy)
- Realizace ochranných vrstev izolace mostů

### 3.2 Používané přísady a technologie

#### 3.2.1 Syntetické vosky [5]

Je všeobecně známo, že použití vosků při výrobě asfaltové směsi zhoršuje adhezní vlastnosti pojiva, a to díky svým hydrofobním vlastnostem. Zástupcem syntetických vosků montánní vosky, amidové vosky, Fischer-Tropschovy parafiny, polyethylenové či polypropylenové vosky. Mezi používané tvrdé syntetické vosky řadíme například Sasobit. [1]



Obrázek 2 – Tvrdý syntetický vosk Sasobit [1]

### 3.2.2 Hybridní a přírodní vosky [5]

Tyto vosky se získávají například jako odpad při zpracování cukrové třtiny. Hybridní vosky získáváme smícháním přírodních vosků se syntetickými vosky. Mezi zástupci přírodního vosku můžeme najít například Deurex. [2]



Obrázek 3 – přírodní vosk Deurex A 20 K [2]

### 3.2.3 Amidové vosky [5]

Aminové vosky jsou synteticky vyrobené látky na bázi mastných kyselin s dlouhými řetězci. Tyto amidové vosky fungují podobně jako montánní vosky, zlepšují přilnavost pojiva ke kamenivu a mění viskozitu směsi. Použitím těchto vosků lze dosáhnout až zpracovatelnosti asfaltové směsi do teploty 95 °C. [3]



Obrázek 4 – ukázka práškového amidového vosku [4]



### 3.2.4 Chemické přísady [5]

Chemické přísady se do NTAS používají zejména pro úpravu povrchových vlastností kameniva, nikoliv pro ovlivnění viskozity asfaltového pojiva nebo pro jiné reologické vlastnosti. Chemické přísady zásadně ovlivňují přilnavost kameniva, smáčitelnost povrchu zrn a vnitřní tření. Tím lze dosáhnout nižší teploty výroby a hutnění asfaltové směsi až o 40 °C.

### 3.2.5 Zeolity [6]

Zeolity se vyskytují v přírodě nebo se vyrábí průmyslově. Jedná se o hydratované hlinitokřemičitany. Zeolity se uplatňují v asfaltové směsi jako náhražka za filer. Syntetické zeolity mají homogenní strukturu, dobře na sebe vážou vodu. Ta se začne po zahřátí měnit v páru a způsobí napěnění asfaltového pojiva.

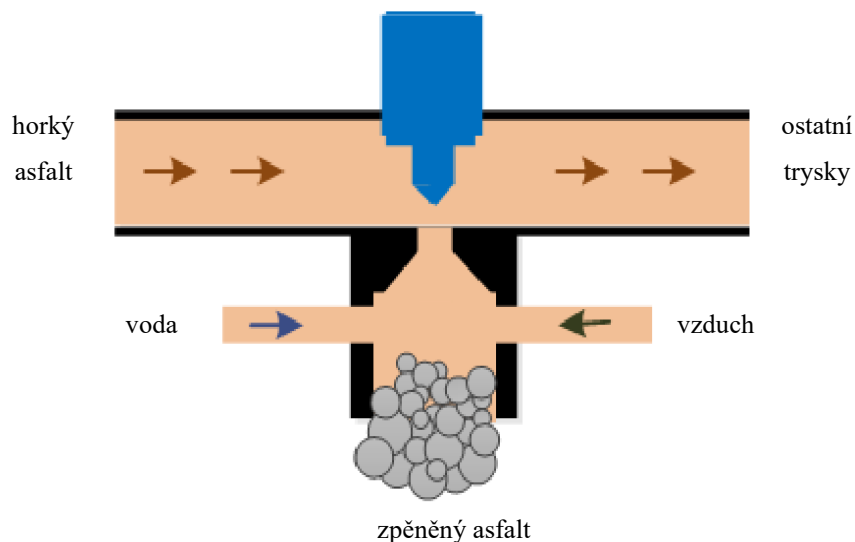


Obrázek 5 – zeolit [6]

### 3.2.6 Technologie na bázi zpěněného asfaltu [5]

Tato technologie má ve využití pro NTAS největší zastoupení. Existuje mnoho způsobů jak snížit viskozitu asfaltové směsi pomocí pěnové technologie. Všechny metody spojují malé množství vody přidávané do horkého asfaltového pojiva. Tímto postupem voda změní díky vysoké teplotě své skupenství na páru, zvětší svůj objem a na chvíli sníží viskozitu asfaltového pojiva. Díky tomuto postupu dokáže asfaltové pojivo obalit kamenivo lépe i při nižších teplotách a zbytková vlhkost zlepšuje zhutnitelnost asfaltové směsi.

časově řízené čištění a uzavírání trysky



Obrázek 6 – technologie na bázi zpěněného asfaltu [8]

### 3.2.7 Zycosoil a Densicryl

Nanotechnologie Zycosoil se chemicky váže na materiály, například kamenivo. Dokáže velmi dobře odpuzovat vodu. Densicryl je polymer, který je určen pro užití společně se Zycosoilem. Jedná se o tekutou přísadu, která se dávkuje ještě před poživem. Spojením těchto dvou látek lze asfaltová směs hutnit až do teplot okolo 100 °C. Při použití Zycosoilu a Densicrylu se vytváří podobný efekt jako u zpěněného asfaltu, asfaltová směs je poté zpracovatelnější, pružnější a má zvýšenou pevnost. [7]



Obrázek 7 – ukázka použití Zycosoilu a Densicrylu [7]

## 4 ZKUŠEBNÍ METODY

---

V oblasti dopravní infrastruktury hraje zásadní roli kvalita asfaltových směsí, která ovlivňuje nejen bezpečnost silničního provozu, ale i celkovou životnost a údržbu vozovek. V této části diplomové práce najdeme rozbor zkušebních metod pro stanovení objemové hmotnosti asfaltových směsí, určení maximální objemové hmotnosti těchto směsí a stanovení mezerovitosti asfaltové směsi.

### 4.1 Hutnění asfaltových těles rázovým zhutňovačem

Podstatou této zkoušky je zhutnění asfaltové směsi ve formě pomocí rázů pěchu zhutňovače. Pěch dopadá na těleso z předepsané výšky a předepsaným počtem rázů. Takto vzniklá válcová tělesa nazýváme Marshallová tělesa.

Hutnění asfaltových těles rázovým zhutňovačem bylo provedeno podle evropské normy ČSN EN 12697-30 *Asfaltové směsi – zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem*. [9]

#### 4.1.1 Zkušební pomůcky

Seznam použitých zkušebních pomůcek:

- Rázový zhutňovač s dolním podstavcem
- Hutnicí válcová forma o vnitřním průměru  $(101,6 \pm 0,1)$  mm
- Vytlačovací zařízení
- Laboratorní sušárna
- Špachtle
- Separáčnický papír
- Teploměr

#### 4.1.2 Postup zkoušky

Na nahřátou podložku hutnicí válcové formy se položí separáčnický papírek, takto připravená forma se postupně plní namíchanou asfaltovou směsí. Po naplnění formy se povrch srovná špachtlí a položí se na něj separáčnický papírek. Následně se naplněná forma vloží do rázového zhutňovače. Zde je těleso zhutněno 50 rázy z jedné strany, následně se forma obrátí a těleso je zhutněno 50 rázy z druhé strany. Po zhutnění se forma se zhutněným tělesem vyjme ze zhutňovače a pomocí vytlačovacího zařízení se vytlačí z formy hotová Marshallova tělesa. Nakonec se z těles odstraní separáčnický papírek a Marshallova tělesa se nechají vychladnout.



Obrázek 8 – rázový zhutňovač Marshallových těles

## 4.2 Stanovení objemové hmotnosti asfaltové směsi

Stanovení objemové hmotnosti asfaltové směsi patří mezi základní zkoušky, které umožňují posoudit kompaktnost a hustotu materiálu. Tato metoda poskytuje důležité informace o struktuře směsi a její schopnosti odolávat zatížení a opotřebení.

Stanovení objemové hmotnosti asfaltové směsi bylo provedeno pomocí *postupu B: Objemová hmotnost – nasycený suchý povrch* z evropské normy ČSN EN 12697-6 *Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa*. [10]

### 4.2.1 Zkušební pomůcky

Seznam použitých zkušebních pomůcek:

- Laboratorní váha pro vážení zkušebního tělesa na vzduchu i ve vodě (pomocí drátěného košíku) s přesností 0,1 g pro hmotnosti do 5 kg
- Vodní lázeň udržující v okolí vzorku rovnoměrnou teplotu
- Teploměr s vhodnou přesností

#### 4.2.2 Postup zkoušky

Zkouška spočívala v tom, že se stanovila hmotnost suchého zkušebního Marshallova tělesa ( $m_1$ ) a následně se zkušební těleso ponořilo do vodní lázně se známou teplotou. Zkušební těleso se ponechalo ve vodní lázni nasytit vodou po dobu přibližně 30 minut do ustálení hmotnosti. Stanovila se hmotnost ponořeného a nasyceného tělesa ( $m_2$ ) a těleso se vyjmul z vody. Z povrchu se odstranila přebytečná voda a osušené nasycené zkušební těleso se zvažilo ( $m_3$ ). Důležitým krokem bylo změření teploty vody pro zjištění přesnější objemové hmotnosti vody ( $\rho_w$ ). Pomocí stanovených hmotností lze následovně vypočítat objemová hmotnost asfaltové směsi dle následujícího vzorce [10]:

$$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \cdot \rho_w \quad (1)$$

kde

$\rho_{bssd}$	objemová hmotnost asfaltové směsi [Mg/m <sup>3</sup> ]
$m_1$	hmotnost suchého tělesa [g]
$m_2$	hmotnost nasyceného tělesa [g]
$m_3$	hmotnost nasyceného tělesa po vyjmutí a otření [g]
$\rho_w$	hustota vody při zkušební teplotě [Mg/m <sup>3</sup> ]

### 4.3 Stanovení maximální objemové hmotnosti asfaltové směsi – volumetrický postup

Maximální objemová hmotnost asfaltové směsi, známá také jako maximální hustota, je dalším klíčovým parametrem, který ovlivňuje výkonnost asfaltového povrchu. Tato hodnota je spojena s kompaktností směsi a schopností odolávat deformacím a opotřebením za různých zatížení.

Stanovení maximální objemové hmotnosti asfaltové směsi pomocí volumetrického postupu popisuje norma ČSN EN 12697-5 *Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti, postup A: Volumetrický postup*. [11] Maximální objemová hmotnost byla zjišťována pro zkušební teplotu vzorku 150 °C.

#### 4.3.1 Zkušební pomůcky

Seznam použitých zkušebních pomůcek:

- Laboratorní váha v přesnosti  $\pm 0,1$  % hmotnosti zkušební navážky
- Nástroj pro rozdrolení zkušební vzorku
- Teploměr s vhodnou přesností

- Demineralizovaná voda
- Sušárna
- Vodní lázeň udržující v okolí vzorku rovnoměrnou teplotu
- Pyknometr vhodné velikosti s těsně přiléhajícím nástavcem
- Nádoba s kalibrovaným vakuometrem

#### 4.3.2 Postup zkoušky

Zkušební vzorek byl odebrán při výrobě Marshallových těles, kdy se vzorek nechal zahřát v sušárně na 110 °C. Následně byl zkušební vzorek rozdroben na hrubé částice. Dalším krokem bylo stanovení hmotnosti prázdného pyknometru ( $m_1$ ) s nástavcem o známém objemu ( $V_p$ ). Vysušený a rozdrobený zkušební vzorek se umístil do pyknometru a nechal se odstát, aby dosáhl pokojové teploty. Následně se stanovila hmotnost pyknometru se zkušebním vzorkem a s nástavcem ( $m_2$ ). Po stanovení hmotnosti se pyknometr naplnil demineralizovanou vodou do výšky 30 mm pod okraj. Z pyknometru se pomocí míchání a rotace odstranil vzduch z mezer a poté se vložil do přístroje vytvářejícího částečné vakuum se zbytkovým tlakem 4 kPa po dobu 15 minut, kdy došlo k odstranění zbylého vzduchu v pyknometru. Po odstranění veškerých vzduchových bublin v pyknometru se doplnila do pyknometru voda po značku na nástavci a stanovila se jeho hmotnost ( $m_3$ ).



Obrázek 9 – nádoba s kalibrovaným vakuometrem

Pomocí stanovených hmotností lze následovně vypočítat maximální objemová hmotnost asfaltové směsi dle následujícího vzorce [11]:

$$\rho_{mv} = \frac{(m_2 - m_1)}{10^6 \cdot V_p - (m_3 - m_2)/\rho_w} \quad (2)$$

kde

$\rho_{mv}$	maximální objemová hmotnost asfaltové směsi [Mg/m <sup>3</sup> ]
$m_1$	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 [m <sup>3</sup> ]
$\rho_w$	hustota vody při zkušební teplotě [Mg/m <sup>3</sup> ]

#### 4.4 Stanovení mezerovitosti asfaltové směsi

Jedním z důležitých parametrů, které ovlivňují kvalitu asfaltových směsí, je mezerovitost. Mezerovitost, tedy rozložení vzduchových dutin ve struktuře asfaltového povrchu, má značný dopad na vlastnosti vozovky, včetně jejího odvodnění, bezpečnosti, hlučnosti a životnosti.

Stanovení mezerovitosti asfaltové směsi najdeme v normě ČSN EN 12697-8 *Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 8: Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí*. [12] Mezerovitost se vypočítá pomocí maximální objemové hmotnosti asfaltové směsi a objemové hmotnosti zkušební tělesa. Pro výpočet se používá následující vzorec [12]:

$$V_a = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \cdot 100 \quad (3)$$

kde

$V_a$	mezerovitost asfaltového zkušební tělesa [%]
$\rho_m$	maximální objemová hmotnost směsi [Mg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_b$	objemová hmotnost zkušební tělesa [Mg/m <sup>3</sup> ]

## 5 PRAKTICKÁ ČÁST

---

### 5.1 Cíl práce

Praktická část diplomové práce zahrnuje ověření účinnosti vlivu přísady Bitusil na bázi alkylsilanů. Tato přísada měla být ověřena na nízkoteplotní asfaltové směsi ACO 11+ 50/70. Směs byla navrhována tak, aby výsledná čára zrnitosti směsi kameniva odpovídala příslušnému oboru zrnitosti. Všechna tělesa pro účely diplomové práce byla vyrobena v akreditované laboratoři TPA ČR, pracoviště Ostrava a vyhodnocena dle platných předpisů a norem.

### 5.2 Použité materiály

#### 5.2.1 Kamenivo

Pro účely diplomové práce byly použity frakce kameniva 0/4 z lomu Bohučovice, frakce 4/8 z lomu Bohučovice, frakce 8/11 také z lomu Bohučovice a recyklát z obalovny Strabag ve frakci 0/11.

Lom Bohučovice patří společnosti KAMENOLOMY ČR s.r.o., která zajišťuje těžbu, výrobu a prodej drceného kameniva pro účely silničních a inženýrských staveb, ať už se jedná o výrobu asfaltových směsí, výrobu betonových směsí, také vyrábí kamenivo pro kolejové lóže a regulaci vodních toků. Jedná se o horninu typu moravská droba. Droba je jemnozrný kámen sedimentárního původu. Složení a barevnost jednotlivých vrstev droby jsou různé a mohou obsahovat zrna různých velikostí. Obecně mívá droba nejčastěji šedou barvu, může být i hnědá a někdy až žlutá.

#### 5.2.2 R-materiál

Zastoupení v naší asfaltové směsi měl i recyklovaný asfalt. Jeho poměr nepřesáhl 10 % hmotnosti ze směsi kameniva. Recyklovaný materiál vzniká jako produkt při odfrézování asfaltových vrstev při opravách komunikací. Získává se drcením a tříděním těchto asfaltových vrstev. U nízkoteplotních asfaltových směsí se R-materiál smí použít při dodržení požadavků ČSN EN 13108 *Asfaltové směsi* [13], TKP 7 *Hutněné asfaltové vrstvy* [14] a technických podmínek TP 238 *Nízkoteplotní asfaltové směsi (NTAS)* [15]. Pro potřeby diplomové práce byl použit asfaltový recyklát frakce 0/11.

#### 5.2.3 Asfalt

Asfalt představuje jeden z klíčových stavebních materiálů s širokým spektrem využití v oblasti silničního stavitelství. Používá se jako pojivo v asfaltových směsích, pro prolévané podkladní



vrstvy a jako základní komponent pro výrobu asfaltových emulzí. Pro výrobu zkušebních vzorků byl zvolen asfalt 50/70.

#### 5.2.4 Bitusil

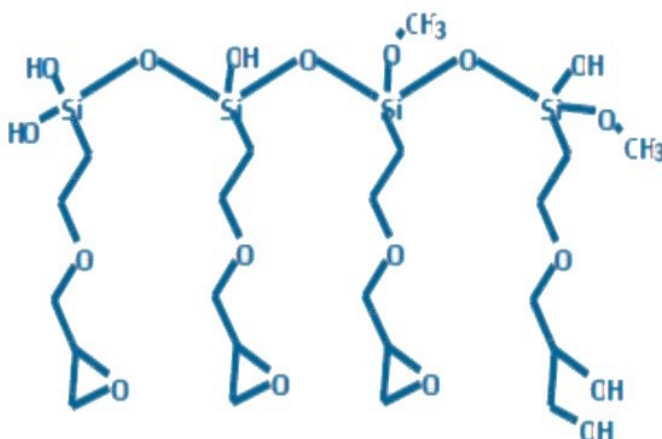
Bitusil je viskózní tmavá kapalina s obsahem alkysilanů, rozpustná v polárních i nepolárních organických rozpouštědlech. Je to adhezivní přísada, která výrazně zvyšuje přilnavost asfaltu ke kyselému kamenivu, zlepšuje zhutnitelnost asfaltové směsi při nižších teplotách a působí, že pracovní plochy finišerů a prostředků, které přicházejí do kontaktu s horkou asfaltovou směsí, zůstávají čistší. Tato přísada je schopna odolat dlouhodobému zahřívání na teploty mezi 150 °C až 160 °C, aniž by ztratila svou účinnost.

Obvyklá dávka přísady Bitusil je cca od 0,2 % do 0,5 % z hmotnosti asfaltu. Dávkování této přísady by mělo probíhat současně s dávkováním asfaltu, a následně by tato směs měla být okamžitě promíchána s kamenivem po určitou dobu, která závisí na typu asfaltové směsi.



Obrázek 10 – ukázka použitého Bitusilu

### 5.2.4.1 Fyzikální a chemické vlastnosti



Obrázek 11 – chemický vzorec Bitusilu

Tabulka 2 – parametry Bitusilu

Parametr	Hodnota
Vzhled	Viskózní kapalina, temně hnědá až černá
Zápach	Charakteristický ropný
pH	Není známo
Bod tání / bod tuhnutí	-45 °C
Bod vzplanutí	135,5 °C
Relativní hustota při 15 °C	886,5 km/m <sup>3</sup>
Rozpustnost ve vodě při 20 °C	Nepatrná
Rozpustnost jiných rozpouštědel	Rozpustný v běžně používaných rozpouštědlech
Viskozita při 40 °C	93 mm <sup>2</sup> /s
Oxidační vlastnosti	Není známo
Stabilita	Vynikající

### 5.3 Popis experimentu

Pro správné provedení experimentu bylo potřeba nachystat a zvážit jednotlivé frakce kameniva, nechat je vysušit a zahřát na teplotu, při které se bude asfaltová směs míchat. Jak již bylo zmíněno, pro účely diplomové práce byly použity frakce kameniva 0/4 z lomu Bohučovice, frakce 4/8 z lomu Bohučovice, frakce 8/11 také z lomu Bohučovice a recyklát z obalovny Strabag ve frakci 0/11. Dalším velice důležitým prvkem byl samotný asfalt 50/70 a velmi jemný materiál v podobě vápencové moučky z Vitošova.

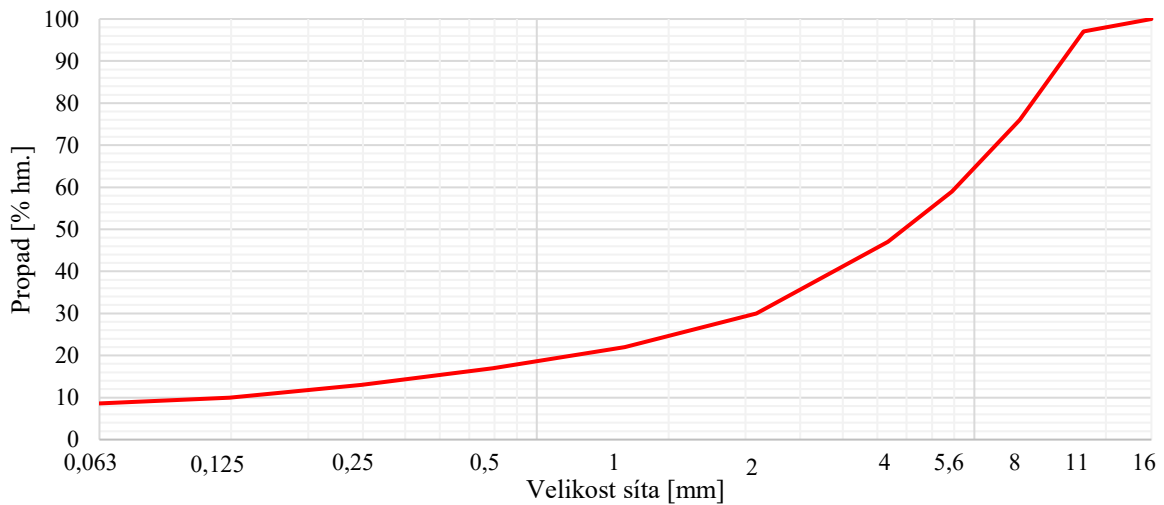
Pro výrobu jednoho vzorku asfaltové směsi bylo potřeba namíchat 6 000 g navážky a zastoupení jednotlivých materiálů mělo daný poměr. Jejich přesný poměr najdeme v tabulce č. 3.

Tabulka 3 – zastoupení materiálů v asfaltové směsi ACO 11+ 50/70

Frakce	Zdroj	Poměr	
		%	g
0/4	Bohučovice	34,9	2094
4/8	Bohučovice	27,3	1638
8/11	Bohučovice	19,7	1182
16 RA 0/11		10	600
asfalt 50/70		5,3	318
VJM	Vitošov	2,8	168
<b>Navážka</b>		<b>100</b>	<b>6000</b>

Celá zkouška probíhala na základě normy ČSN 73 6120 *Stavba vozovek – Ostatní asfaltové vrstvy – Provádění a kontrola shody* [16] a její přílohy I *Požadavky na nízkoteplotní asfaltové směsi* a přílohy K *Stanovení teploty výroby Marshallových zkušebních těles NTAS*. Před samotným zkoušením přísady Bitusil bylo potřeba zjistit hodnoty referenčního vzorku asfaltové směsi, kterými byly optimální objemovou hmotnost, maximální objemová hmotnost a mezerovitost vzorku. V grafu č. 1 najdeme křivku zrnitosti referenční asfaltové směsi ACO 11+ 50/70.

Křivka zrnitosti ACO 11+ 50/70



Graf 1 – křivka zrnitosti ACO 11+ 50/70

Prvním krokem po vysušení jednotlivých frakcí bylo potřeba řádné zvážení kameniva podle zadaného poměru jednotlivé frakce a následné přesypání navážky kameniva do míchací nádoby. Poté byl do nádoby k navážce kameniva přidán zahřátý asfalt v poměru k celkovému množství navážky. Po přidání všech komponentů do míchací mísy se navážka zamíchala za stálého ohřívání mísy, aby došlo ke správnému promísení jednotlivých částí kameniva s asfaltovým pojivem.



Obrázek 12 – zvážená navážka kameniva pro výrobu asfaltové směsi ACO 11+ 50/70



Obrázek 13 – zahřívání míchací nádoba na mísení asfaltové směsi

Pro každou teplotu hutnění a pro poměrné zastoupení přísady Bitusil se vytvořila sada Marshallových těles po 4 kusech. Sada Marshallových těles byla vytvořena i pro referenční vzorek, který neobsahoval žádné přidané přísady a hutnil se při teplotě 150 °C. Celkem bylo vytvořeno 12 sad pro přísadu Bitusil a jedna pro referenční vzorek. Pro celý experiment bylo vytvořeno celkem 52 Marshallových těles. Každá sada obsahovala 0,6 % Bitusilu, 0,8 % Bitusilu a 1,0 % Bitusilu z hmotnosti pojiva. Po nahřátí namíchané asfaltové směsi na určitou teplotu se daná asfaltová směs rozprostřela na plochu, kde se následně rozdělila na jednotlivé navážky, a to o hmotnosti 1215 g. Zbylá navážka byla použita pro zjištění maximální objemové hmotnosti asfaltové směsi.



Obrázek 14 – rozprostřená asfaltová směs na určené ploše



Obrázek 15 – navážka asfaltové směsi pro výrobu Marshallových těles

Během tohoto procesu se forma pro hutnění s nástavcem a podložkou zahřívala v sušárně na požadovanou teplotu. Pro výrobu Marshallových těles bylo potřeba vystlat dno hutnicí formy kolečkem z papíru, aby se asfaltová směs nepřilepila na pěch. Následně se zahřátá navážka asfaltové směsi vsypala do hutnicí formy a její povrch se srovnal. Na horní povrch navážky se znovu vložilo papírové kolečko.



Obrázek 16 – Marshallové těleso před vytlačáním z hutnicí formy

Takto nachystanou hutnicí formou již jsem položila na hutnicí podstavec a směs se začala hutnit automatickým pěchem úderů z výšky 460 mm. Jednotlivé vzorky asfaltové směsi se hutnily 2x 50 úderů. Po prvních 50 úderech se hutnicí forma otočila vzhůru nohama, aby došlo k hutnění vzorku z obou stran stejně a proběhlo dalších 50 úderů hutnění. Po řádném zhutnění se hutnicí forma vytáhla, odstranily se obě vložená papírová kolečka a zhutněný vzorek se vytlačil z formy ven. Marshallová tělesa měla po vytlačení ven z formy výšku ( $63,5 \pm 2,5$  mm). Tento postup se opakoval pro každé Marshallovo těleso. Po řádném zchladnutí Marshallových těles se jednotlivá tělesa v sadě zvažila v suchém stavu, namočily se na přibližně 30 minut do vodní lázně o známé teplotě, kde se po uplynuté době zvažily a následně se z vodní lázně vytáhly, jemně osušily a zvažily. V kapitole č. 4 najdeme podrobnější popis zkoušky.



Obrázek 17 – vzorek Marshallového tělesa

Po namíchání referenčního vzorku vyhodnotila jeho maximální objemová hmotnost, optimální objemová hmotnost a mezerovitost. Zjištěné výsledky referenčního vzorku asfaltové směsi ACO 11+ 50/70 najdeme v tabulce č. 4. Zjištěným výsledkům s přísadou Bitusil se věnuji v kapitole níže.

Tabulka 4 – naměřené hodnoty referenčního vzorku

Referenční vzorek	
Maximální objemová hmotnost $\rho_{mv}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,406
Optimální objemová hmotnost $\rho_{bssd}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,324
Mezerovitost $V_a$ [%]	3,4





Obrázek 18 – ukázka sad Marshallových těles

## 5.4 Výsledky

V této podkapitole najdeme přehledně výsledky jednotlivých navážek asfaltové směsi s daným poměrem přísady Bitusil.

### 5.4.1 Hutnění 110 °C

Jako první jsem hutnila asfaltovou směs při teplotě 110 °C a s poměrem přísady Bitusil 0,60 %, 0,80 % a 1,00 %. Po řádném zchladnutí Marshallových těles se jednotlivé vzorky v sadě zvážily. Následně byla zjištěna objemová hmotnost podle vzorce č. 1, vypočítána maximální objemová hmotnost podle vzorce č. 2 a také mezerovitost těles podle vzorce č. 3. Výsledky najdeme v tabulkách č. 5, 6 a 7.

Tabulka 5 – výsledky pro teplotu 110 °C a obsahu přísady Bitusil 0,60 %

Teplota směsi	110 °C			
Množství přísady	0,60 %			
Vzorek	1	2	3	4
Hmotnost suchého tělesa $m_1$ [g]	1214,6	1213,8	1212,8	1214,7
Hmotnost tělesa ponořeného ve vodě $m_2$ [g]	703,6	701,1	701,0	701,2
Hmotnost osušeného tělesa $m_3$ [g]	1216,3	1215,5	1214,7	1216,6
Objemová hmotnost vody $\rho_w$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	0,9981			
Objemová hmotnost těles $\rho_{bssd}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,365	2,355	2,356	2,352
	2,357			
Maximální objemová hmotnost těles $\rho_{mv}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,428			
Mezerovitost těles $V_a$ [%]	2,9			

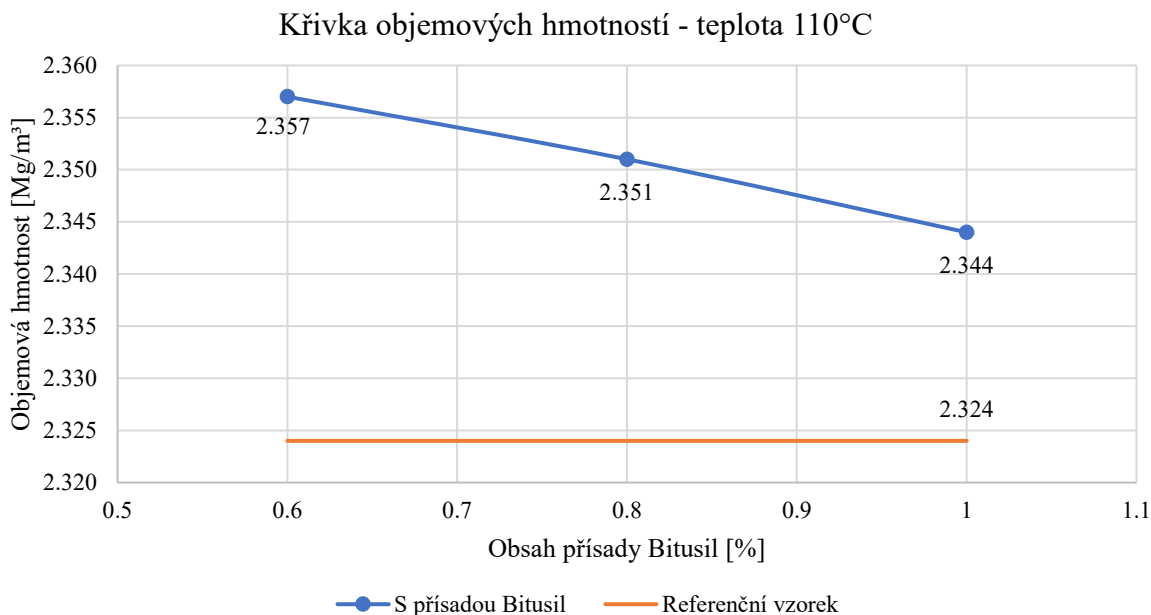
Tabulka 6 – výsledky pro teplotu 110 °C a obsahu přísady Bitusil 0,80 %

Teplota směsi	110 °C			
Množství přísady	0,80%			
Vzorek	1	2	3	4
Hmotnost suchého tělesa $m_1$ [g]	1214,9	1213,7	1215,3	1214,3
Hmotnost tělesa ponořeného ve vodě $m_2$ [g]	700,4	701,4	701,1	700,7
Hmotnost osušeného tělesa $m_3$ [g]	1216,9	1215,9	1217,4	1216,3
Objemová hmotnost vody $\rho_w$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	0,9981			
Objemová hmotnost těles $\rho_{bssd}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,348	2,355	2,349	2,351
	2,351			
Maximální objemová hmotnost těles $\rho_{mv}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,430			
Mezerovitost těles $V_a$ [%]	3,3			

Tabulka 7 – výsledky pro teplotu 110 °C a obsahu přísady Bitusil 1,00 %

Teplota směsi	110 °C			
Množství přísady	1,00%			
Vzorek	1	2	3	4
Hmotnost suchého tělesa $m_1$ [g]	1214,7	1215,5	1214,2	1214,0
Hmotnost tělesa ponořeného ve vodě $m_2$ [g]	700,0	699,0	699,6	700,8
Hmotnost osušeného tělesa $m_3$ [g]	1217,3	1218,0	1216,5	1216,2
Objemová hmotnost vody $\rho_w$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	0,9981			
Objemová hmotnost těles $\rho_{bssd}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,344	2,338	2,345	2,351
	2,344			
Maximální objemová hmotnost těles $\rho_{mv}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,433			
Mezerovitost těles $V_a$ [%]	3,2			

Z grafu č. 2 jde vidět, že objemové hmotnosti jednotlivých procentuálních zastoupení jsou zásadně vyšší než optimální objemová hmotnost referenčního vzorku. To svědčí o tom, že asfaltová směs s přísadou Bitusil je zhutněná lépe než referenční vzorek. Průměrná mezerovitost se přibližovala hodnotě referenčního vzorku.



Graf 2 – křivka objemových hmotností – teplota 110°C

#### 5.4.2 Hutnění 120 °C

Dalším provedeným pokusem bylo hutnění asfaltové směsi při teplotě 120 °C, kdy se provedly 3 sady po 4 kusech Marshallových těles, a to pro procentuální zastoupení přísady Bitusil v poměru 0,60 %, 0,80 % a 1,00 % váhy pojiva.

Tato asfaltová směs po zahřátí na 120 °C působila dobře, směs se nerozpadala a držela tvar i po vytlačení z válcové normy pro Marshallové tělesa. Další postup byl stejný jako u prvního pokusu, došlo tedy ke všem krokům zvážení vzorků z kapitoly 4. Jednotlivé hmotnosti a výsledky objemových hmotností a mezerovitosti asfaltových směsí najdeme v tabulkách č. 8, 9 a 10.

Tabulka 8 – výsledky pro teplotu 120 °C a obsahu přísady Bitusil 0,60 %

Teplota směsi	120 °C			
Množství přísady	0,60 %			
Vzorek	1	2	3	4
Hmotnost suchého tělesa $m_1$ [g]	1215,6	1215,5	1217,4	1216,4
Hmotnost tělesa ponořeného ve vodě $m_2$ [g]	705,6	706,0	707,3	706,9
Hmotnost osušeného tělesa $m_3$ [g]	1217,8	1217,3	1219,5	1218,6
Objemová hmotnost vody $\rho_w$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	0,9981			
Objemová hmotnost těles $\rho_{bssd}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,369	2,373	2,372	2,373
	2,372			
Maximální objemová hmotnost těles $\rho_{mv}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,428			
Mezerovitost těles $V_a$ [%]	2,3			

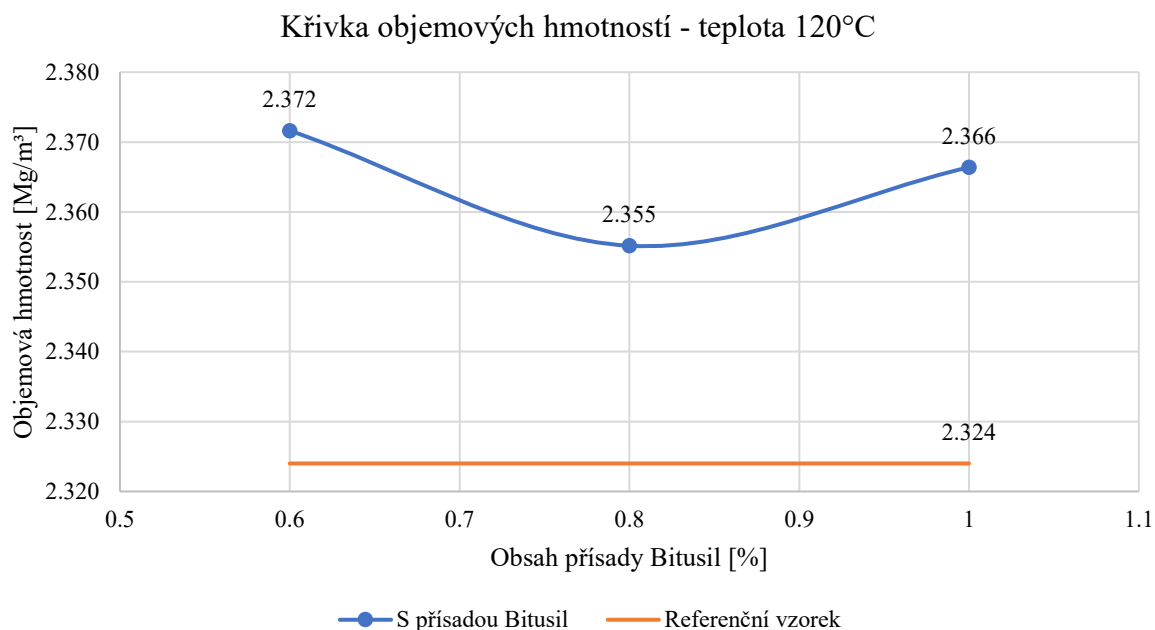
Tabulka 9 – výsledky pro teplotu 120 °C a obsahu přísady Bitusil 0,80 %

Teplota směsi	120 °C			
Množství přísady	0,80%			
Vzorek	1	2	3	4
Hmotnost suchého tělesa $m_1$ [g]	1203,7	1214,2	1207,2	1205,8
Hmotnost tělesa ponořeného ve vodě $m_2$ [g]	694,9	704,8	698,3	696,6
Hmotnost osušeného tělesa $m_3$ [g]	1206,4	1216,4	1210,2	1208,9
Objemová hmotnost vody $\rho_w$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	0,9981			
Objemová hmotnost těles $\rho_{bssd}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,349	2,369	2,354	2,349
	2,355			
Maximální objemová hmotnost těles $\rho_{mv}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,430			
Mezerovitost těles $V_a$ [%]	3,1			

Tabulka 10 – výsledky pro teplotu 120 °C a obsahu přísady Bitusil 1,00 %

Teplota směsi	120 °C			
Množství přísady	1,00%			
Vzorek	1	2	3	4
Hmotnost suchého tělesa $m_1$ [g]	1212,8	1212,9	1212,5	1212,4
Hmotnost tělesa ponořeného ve vodě $m_2$ [g]	702,0	702,7	703,1	703,8
Hmotnost osušeného tělesa $m_3$ [g]	1214,4	1214,7	1214,4	1214,0
Objemová hmotnost vody $\rho_w$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	0,9981			
Objemová hmotnost těles $\rho_{bssd}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,362	2,364	2,367	2,372
	2,366			
Maximální objemová hmotnost těles $\rho_{mv}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,433			
Mezerovitost těles $V_a$ [%]	2,8			

V grafu č. 3 můžeme vidět vynesené jednotlivé objemové hmotnosti Marshallových těles vypočítané podle vzorce č. 1. I zde se objemová hmotnost nepřiblížila k objemové hmotnosti referenčního vzorku. Platí to stejné jako u teploty 110 °C, tedy že asfaltová směs s přísadou Bitusil se hutnila lépe než referenční vzorek bez přísady. Průměrná mezerovitost vzorků byla o dost nižší než u referenčního vzorku.



Graf 3 – křivka objemových hmotností – teplota 120°C

### 5.4.3 Hutnění 130 °C

Dalším zkušebním vzorkem byla asfaltová směs hutněná při 130 °C. Po smíchání jednotlivých složek asfaltové směsi byla směs zahřáta na 130 °C a následně ztuhněna ve formách pro Marshallova tělesa. Po řádném ztuhnutí šla tělesa v pořádku bez porušení vytlačit z formy a směs držela při sobě. Po vychladnutí těles proběhlo vážení jednotlivých kroků podle kapitoly 4. Výsledky jednotlivých vážení při různém obsahu přísady a výsledné objemové hmotnosti, spočítané podle vzorce č. 1 najdeme v tabulkách č. 11, 12 a 13.

Tabulka 11 – výsledky pro teplotu 130 °C a obsahu přísady Bitusil 0,60 %

Teplota směsi	130 °C			
Množství přísady	0,60 %			
Vzorek	1	2	3	4
Hmotnost suchého tělesa $m_1$ [g]	1211,3	1213,6	1215,9	1214,5
Hmotnost tělesa ponořeného ve vodě $m_2$ [g]	699,0	699,0	697,8	699,6
Hmotnost osušeného tělesa $m_3$ [g]	1213,1	1216,6	1219,0	1216,6
Objemová hmotnost vody $\rho_w$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	0,9983			
Objemová hmotnost těles $\rho_{bssd}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,352	2,341	2,329	2,345
	2,342			
Maximální objemová hmotnost těles $\rho_{mv}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,428			
Mezerovitost těles $V_a$ [%]	3,5			

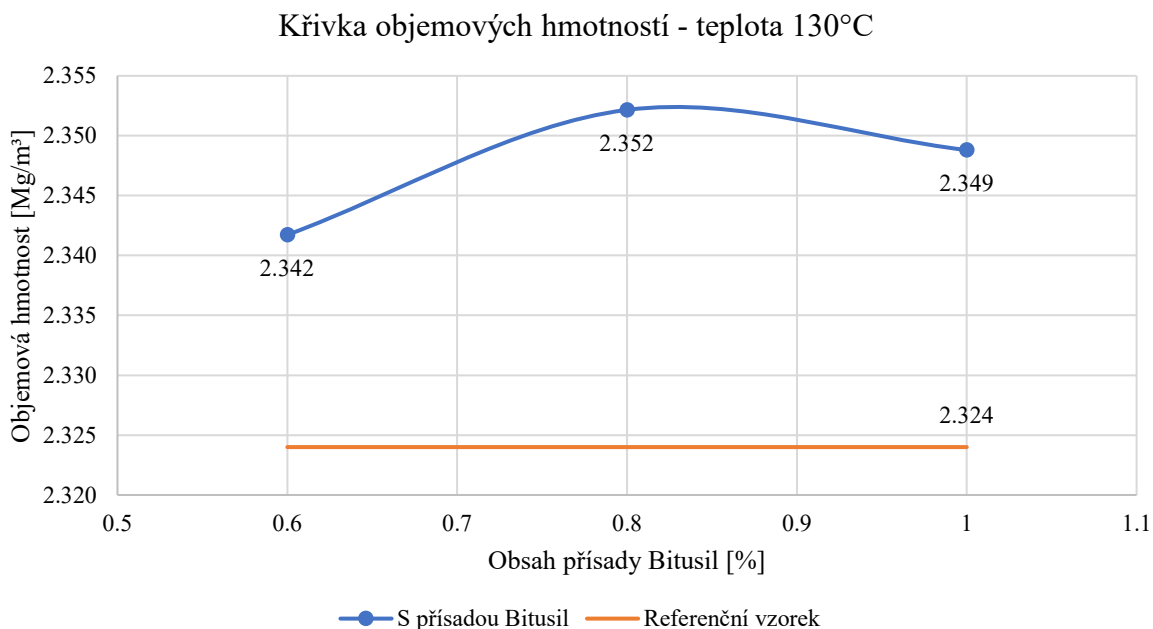
Tabulka 12 – výsledky pro teplotu 130 °C a obsahu přísady Bitusil 0,80 %

Teplota směsi	130 °C			
Množství přísady	0,80%			
Vzorek	1	2	3	4
Hmotnost suchého tělesa $m_1$ [g]	1213,7	1212,7	1216,2	1208,0
Hmotnost tělesa ponořeného ve vodě $m_2$ [g]	702,5	699,4	701,6	696,2
Hmotnost osušeného tělesa $m_3$ [g]	1215,5	1214,4	1219,0	1209,5
Objemová hmotnost vody $\rho_w$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	0,9983			
Objemová hmotnost těles $\rho_{bssd}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,362	2,351	2,347	2,349
	2,352			
Maximální objemová hmotnost těles $\rho_{mv}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,430			
Mezerovitost těles $V_a$ [%]	3,2			

Tabulka 13 – výsledky pro teplotu 130 °C a obsahu přísady Bitusil 1,00 %

Teplota směsi	130 °C			
Množství přísady	1,00%			
Vzorek	1	2	3	4
Hmotnost suchého tělesa $m_1$ [g]	1214,8	1214,9	1214,9	1213,2
Hmotnost tělesa ponořeného ve vodě $m_2$ [g]	701,5	701,0	699,6	698,5
Hmotnost osušeného tělesa $m_3$ [g]	1216,0	1217,1	1217,4	1214,8
Objemová hmotnost vody $\rho_w$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	0,9983			
Objemová hmotnost těles $\rho_{bssd}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,357	2,350	2,342	2,346
	2,349			
Maximální objemová hmotnost těles $\rho_{mv}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,433			
Mezerovitost těles $V_a$ [%]	3,25			

Výsledné hodnoty objemových hmotností těles najdeme znázorněné v grafu č. 4. z tohoto grafu jde vidět, že zde se objemové hmotnosti při různém obsahu přísady nepřibližují hodnotě referenčního vzorku. I v tomto případě se tedy asfaltová směs s přísadou Bitusil hutnila lépe než referenční vzorek.



Graf 4 – křivka objemových hmotností – teplota 130°C

#### 5.4.4 Hutnění 140 °C

Jako poslední jsem dělala vzorky asfaltové směsi pro teplotu hutnění 140 °C. Po vytvoření sady Marshallových těles a následném zvážení jednotlivých se podle vzorce č. 1 spočítala objemová hmotnost těles, podle vzorce č. 2 maximální objemová hmotnost a podle vzorce č. 3 mezerovitost směsi. Tělesa hutněná při 140 °C byla jednotná, spojená a držela tvar. Výsledky najdeme v tabulkách č. 14, 15 a 16.

Tabulka 14 – výsledky pro teplotu 140 °C a obsahu přísady Bitusil 0,60 %

Teplota směsi	140 °C			
Množství přísady	0,60 %			
Vzorek	1	2	3	4
Hmotnost suchého tělesa $m_1$ [g]	1211,5	1210,7	1214,9	1212,2
Hmotnost tělesa ponořeného ve vodě $m_2$ [g]	700,0	697,1	701,8	697,8
Hmotnost osušeného tělesa $m_3$ [g]	1213,5	1213,5	1216,7	1214,1
Objemová hmotnost vody $\rho_w$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	0,9983			
Objemová hmotnost těles $\rho_{bssd}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,355	2,341	2,355	2,344
	2,349			
Maximální objemová hmotnost těles $\rho_{mv}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,428			
Mezerovitost těles $V_a$ [%]	3,3			

Tabulka 15 – výsledky pro teplotu 140 °C a obsahu přísady Bitusil 0,80 %

Teplota směsi	140 °C			
Množství přísady	0,80%			
Vzorek	1	2	3	4
Hmotnost suchého tělesa $m_1$ [g]	1213,0	1212,1	1213,9	1214,3
Hmotnost tělesa ponořeného ve vodě $m_2$ [g]	698,8	698,4	701,2	699,6
Hmotnost osušeného tělesa $m_3$ [g]	1216,4	1214,7	1216,6	1217,7
Objemová hmotnost vody $\rho_w$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	0,9983			
Objemová hmotnost těles $\rho_{bssd}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,340	2,344	2,351	2,340
	2,344			
Maximální objemová hmotnost těles $\rho_{mv}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,430			
Mezerovitost těles $V_a$ [%]	3,5			

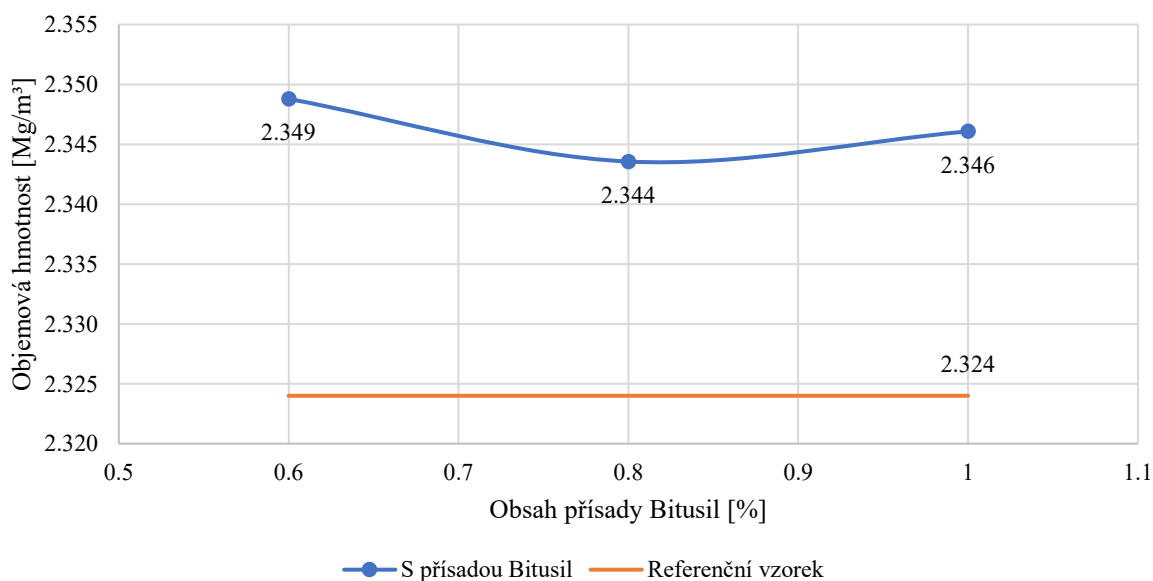


Tabulka 16 – výsledky pro teplotu 140 °C a obsahu přísady Bitusil 1,00 %

Teplota směsi	140 °C			
Množství přísady	1,00%			
Vzorek	1	2	3	4
Hmotnost suchého tělesa $m_1$ [g]	1211,7	1220,0	1215,0	1209,2
Hmotnost tělesa ponořeného ve vodě $m_2$ [g]	698,0	701,8	702,0	698,1
Hmotnost osušeného tělesa $m_3$ [g]	1214,3	1222,6	1217,4	1211,9
Objemová hmotnost vody $\rho_w$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	0,9983			
Objemová hmotnost těles $\rho_{bssd}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,343	2,339	2,353	2,349
	2,346			
Maximální objemová hmotnost těles $\rho_{mv}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,435			
Mezerovitost těles $V_a$ [%]	3,66			

Po vypočítání všech objemových hmotností byly jednotlivé hodnoty vyneseny do grafu č. 5, kde můžeme vidět, že hutněním při 140 °C a různých poměrech zastoupení přísady Bitusil jsme také dosáhli objemových hmotností vyšších než referenční vzorek. I v tomto případě se tedy asfaltová směs s přísadou hutnila lépe, než referenční vzorek.

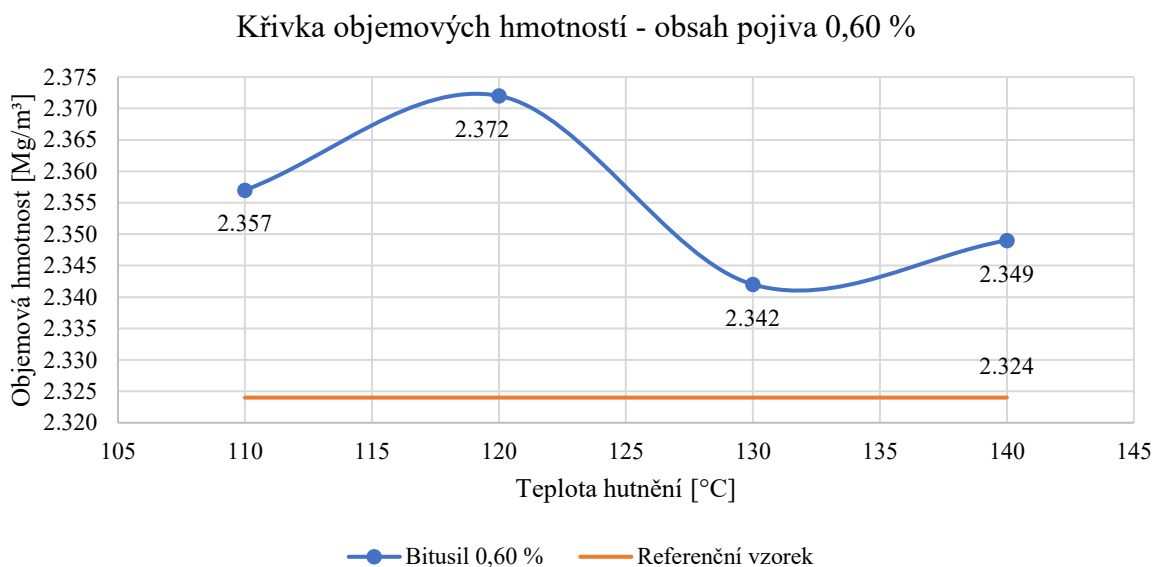
Křivka objemových hmotností - teplota 140°C



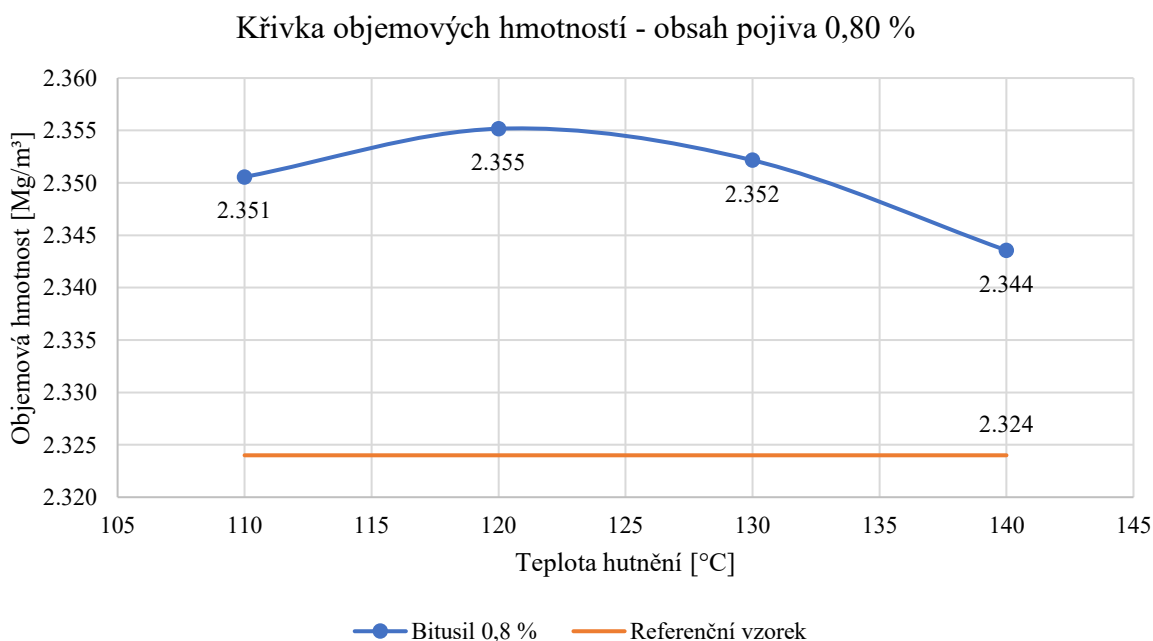
Graf 5 – křivka objemových hmotností – teplota 140°C

### 5.4.5 Zhodnocení v závislosti na obsahu přísady

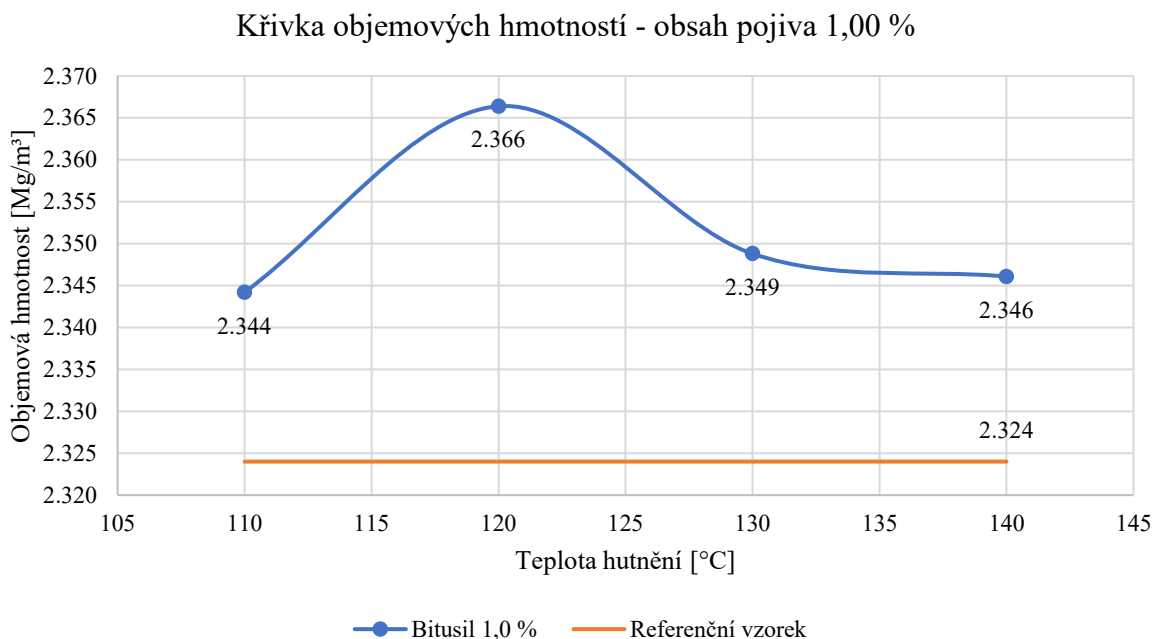
Po vyrobení všech zkušebních sad vzorků asfaltových směsí při různých teplotách hutnění a různém množství objemu přísady Bitusil byly zjištěné objemové hmotnosti vzorků těles zavedeny do grafů podle množství obsahu přísady. Každý graf znázorňuje objemovou hmotnost tělesa při dané teplotě hutnění, a to při 110 °C, 120 °C, 130 °C a 140 °C. Tyto grafy najdeme níže.



Graf 6 – křivka objemových hmotností – obsah pojiva 0,60 %



Graf 7 – křivka objemových hmotností – obsah pojiva 0,80 %



Graf 8 – křivka objemových hmotností – obsah pojiva 1,00 %

Po vynesení hodnot do grafů můžeme vidět, že experiment s různými dávkami přísady Bitusil a různými teplotami hutnění byl vydařený. Každá asfaltová směs měla vyšší objemovou hmotnost než referenční asfaltová směs bez přísady.

#### 5.4.6 Stanovení optimálního množství asfaltového pojiva u vybrané varianty s 1,00 % přísady

Při rozhodování, která asfaltová směs je nejvíce vhodná pro další použití je nutno sledovat také hodnotu mezerovitosti směsi. Vhodná mezerovitost má být podle ČSN 73 6121 *Stavba vozovek – Hutněné asfaltové vrstvy – Provádění a kontrola shody* a její tabulky E.7 v rozmezí 2,5 až 4,0 %. V tomto případě je lepší držet se spodní hranice intervalu, a to z toho důvodu, aby vznikla rezerva pro stavbu v případě, že by asfaltová směs nebyla na místě řádně dohutněna. Při nedohutnění asfaltové směsi se zvyšuje její mezerovitost, ale stále se vleze do daného intervalu.

Ze všech provedených vzorků jsem vybrala jako optimální vzorek asfaltové směsi hutněné při 120 °C a obsahu přísady Bitusil 1,00%, mezerovitost směsi byla 2,8 %. Tento vzorek byl následně podroben dalším zkouškám podle ČSN 73 6120 *Stavba vozovek – Ostatní asfaltové vrstvy – Provádění a kontrola shody* a její přílohy K.

Pro ověření správné funkčnosti přísady Bitusil bylo potřeba dodatečně posoudit Marshallova tělesa při dávkování obsahu pojiva  $\pm 0,50$  % hmotnosti. Pro ověření byly vyrobeny dvě sady Marshallových těles po čtyřech kusech. Postup přípravy směsi byl stále stejný, po zahřátí směsi byla hutnící nádoba naplněna danou směsí a zhutněna 2x50 údery pěchu na rázovém

zhuťovači. Následně se nechaly Marshallové tělesa vychladnout, po vychladnutí se zvažila a změřené hodnoty byly použity pro výpočet objemové hmotnosti, maximální objemové hmotnosti a mezerovitosti. Vzorce najdeme v kapitole č. 4. Níže se můžeme podívat na tabulky č. 17 a 18, zda při jsme dosáhli při teplotě 120 °C požadovaných hodnot.

Tabulka 17 – výsledky pro teplotu 120 °C, obsah přísady Bitusil 1,00 % a obsah pojiva -0,5 %

Teplota směsi	120 °C			
Množství přísady	1,00%			
Obsah pojiva	-0,5 %			
Vzorek	1	2	3	4
Hmotnost suchého tělesa $m_1$ [g]	1195,4	1209,0	1208,4	1207,7
Hmotnost tělesa ponořeného ve vodě $m_2$ [g]	690,9	696,8	698,2	693,9
Hmotnost osušeného tělesa $m_3$ [g]	1198,2	1212,5	1212,6	1211,9
Objemová hmotnost vody $\rho_w$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	0,9976			
Objemová hmotnost těles $\rho_{bssd}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,351	2,339	2,344	2,326
	2,340			
Maximální objemová hmotnost těles $\rho_{mv}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,437			
Mezerovitost těles $V_a$ [%]	4,0			

Tabulka 18 – výsledky pro teplotu 120 °C, obsah přísady Bitusil 1,00 % a obsah pojiva +0,5 %

Teplota směsi	120 °C			
Množství přísady	1,00%			
Obsah pojiva	-0,5 %			
Vzorek	1	2	3	4
Hmotnost suchého tělesa $m_1$ [g]	1196,8	1201,4	1199,8	1198,0
Hmotnost tělesa ponořeného ve vodě $m_2$ [g]	687,6	688,1	691,0	689,8
Hmotnost osušeného tělesa $m_3$ [g]	1198,5	1204,3	1201,9	1200,3
Objemová hmotnost vody $\rho_w$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	0,9976			
Objemová hmotnost těles $\rho_{bssd}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,337	2,322	2,343	2,341
	2,336			
Maximální objemová hmotnost těles $\rho_{mv}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,432			
Mezerovitost těles $V_a$ [%]	3,8			

Přesvědčili jsme se, že výběr asfaltové směsi hutněné při 120 °C s obsahem přísady Bitusil 1,00 % vyhovuje kontrolním zkouškám. Mezerovitost směsi nepřesáhla 4 %.

Následně bylo nutné znovu namíchat asfaltovou směs ACO 11+ 50/70 s obsahem přísady Bitusil 1,00 % a zahřát ji na 120 °C. Poté se vytvořily další dvě sady zkušebních Marshallových těles, každá po čtyřech kusech. Po vyplnění hutnicí formy asfaltovou směsí se první sada zhutnila 2x75 a druhá sada 2x100 úderů. Tímto se zabrání neúměrnému zvýšení množství dávkovaného pojiva. Následně Marshallová tělesa vytlačila z hutnicích válců a nechala zchladnout. Poté bylo provedeno vážení jednotlivých těles a spočítání jejich objemových hmotností a mezerovitosti. Výsledky najdeme v tabulce č. 19 a 20.

Tabulka 19 – výsledky pro teplotu 120 °C, obsah přísady Bitusil 1,00 % a počet úderů 2x75

Teplota směsi	120 °C			
Množství přísady	1,00%			
Počet úderů pěchu rázového zhutňovače	2x75			
Vzorek	1	2	3	4
Hmotnost suchého tělesa $m_1$ [g]	1210,1	1212,5	1211,1	1213,4
Hmotnost tělesa ponořeného ve vodě $m_2$ [g]	701,3	702,8	700,0	703,2
Hmotnost osušeného tělesa $m_3$ [g]	1213,0	1215,1	1213,8	1216,2
Objemová hmotnost vody $\rho_w$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	0,9976			
Objemová hmotnost těles $\rho_{bssd}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,359	2,361	2,351	2,360
	2,358			
Maximální objemová hmotnost těles $\rho_{mv}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,433			
Mezerovitost těles $V_a$ [%]	3,0			

Tabulka 20 – výsledky pro teplotu 120 °C, obsah přísady Bitusil 1,00 % a počet úderů 2x100

Teplota směsi	120 °C			
Množství přísady	1,00%			
Počet úderů pěchu rázového zhutňovače	2x100			
Vzorek	1	2	3	4
Hmotnost suchého tělesa $m_1$ [g]	1215,4	1222,6	1217,9	1219,7
Hmotnost tělesa ponořeného ve vodě $m_2$ [g]	707,9	710,3	708,3	709,7
Hmotnost osušeného tělesa $m_3$ [g]	1217,6	1224,8	1220,2	1222,4
Objemová hmotnost vody $\rho_w$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	0,9976			
Objemová hmotnost těles $\rho_{bssd}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,379	2,371	2,373	2,373
	2,374			
Maximální objemová hmotnost těles $\rho_{mv}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,439			
Mezerovitost těles $V_a$ [%]	2,3			

Mezerovitost asfaltové směsi zhutněné 2x75 údery a 2x100 údery rázového zhutňovače se pohybovala v rozmezí 2,3 až 3 %. Při takzvaném přehutnění směsi její mezerovitost lehce klesla pod požadovanou minimální hodnotu 2,5 %. I přesto je tato směs vyhovující.

### 5.5 Experiment s maximální dávkou přísady Bitusil

V závěru experimentu jsme vyzkoušeli použití maximální dávky Bitusilu v asfaltové směsi dané výrobcem. Výrobce uvádí maximální možnou dávku 1,50 % přísady z hmotnosti pojiva.

Příprava Marshallových těles byla stejná jako doposud. Bylo potřeba vytvořit čtyři sady po čtyřech kusech Marshallových těle, abychom mohli vyzkoušet různé teploty hutnění jako bylo zkoušeno u přechozích těles. Po vytvoření těchto těles se tělesa vytlačila z forem. Po vytlačení jsme mohli pozorovat mírné změny chování asfaltové směsi. Směs byla přesycená přísadou Bitusil, kdy se Marshallova tělesa mírně rozpadala a nedržela tvar. Směs byla moc viskózní. Po vychladnutí těles proběhlo jejich jednotlivé zvážení, které se podrobněji popisuje v kapitole č. 4. Výsledné hodnoty najdeme v tabulkách č. 21, 22, 23 a 24.

Tabulka 21 – výsledky pro teplotu 110 °C a obsahu přísady Bitusil 1,50 %

Teplota směsi	110 °C			
Množství přísady	1,50%			
Vzorek	1	2	3	4
Hmotnost suchého tělesa $m_1$ [g]	1209,3	1216,0	1188,8	1203,5
Hmotnost tělesa ponořeného ve vodě $m_2$ [g]	691,9	693,2	674,0	688,6
Hmotnost osušeného tělesa $m_3$ [g]	1211,5	1220,8	1194,9	1206,3
Objemová hmotnost vody $\rho_w$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	0,9983			
Objemová hmotnost těles $\rho_{bssd}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,323	2,301	2,278	2,321
	2,306			
Maximální objemová hmotnost těles $\rho_{mv}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,435			
Mezerovitost těles $V_a$ [%]	5,3			

Tabulka 22 – výsledky pro teplotu 120 °C a obsahu přísady Bitusil 1,50 %

Teplota směsi	120 °C			
Množství přísady	1,50%			
Vzorek	1	2	3	4
Hmotnost suchého tělesa $m_1$ [g]	1192,8	1180,9	1187,8	1191,5
Hmotnost tělesa ponořeného ve vodě $m_2$ [g]	678,9	672,9	678,9	680,6
Hmotnost osušeného tělesa $m_3$ [g]	1196,3	1185,4	1191,3	1194,8
Objemová hmotnost vody $\rho_w$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	0,9983			
Objemová hmotnost těles $\rho_{bssd}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,301	2,300	2,314	2,313
	2,307			
Maximální objemová hmotnost těles $\rho_{mv}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,435			
Mezerovitost těles $V_a$ [%]	5,3			

Tabulka 23 – výsledky pro teplotu 130 °C a obsahu přísady Bitusil 1,50 %

Teplota směsi	130 °C			
Množství přísady	1,50%			
Vzorek	1	2	3	4
Hmotnost suchého tělesa $m_1$ [g]	1191,0	1193,6	1190,4	1191,5
Hmotnost tělesa ponořeného ve vodě $m_2$ [g]	681,9	684,0	683,5	683,9
Hmotnost osušeného tělesa $m_3$ [g]	1194,3	1195,5	1192,5	1194,1
Objemová hmotnost vody $\rho_w$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	0,9983			
Objemová hmotnost těles $\rho_{bssd}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,320	2,330	2,335	2,331
	2,329			
Maximální objemová hmotnost těles $\rho_{mv}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,437			
Mezerovitost těles $V_a$ [%]	4,3			

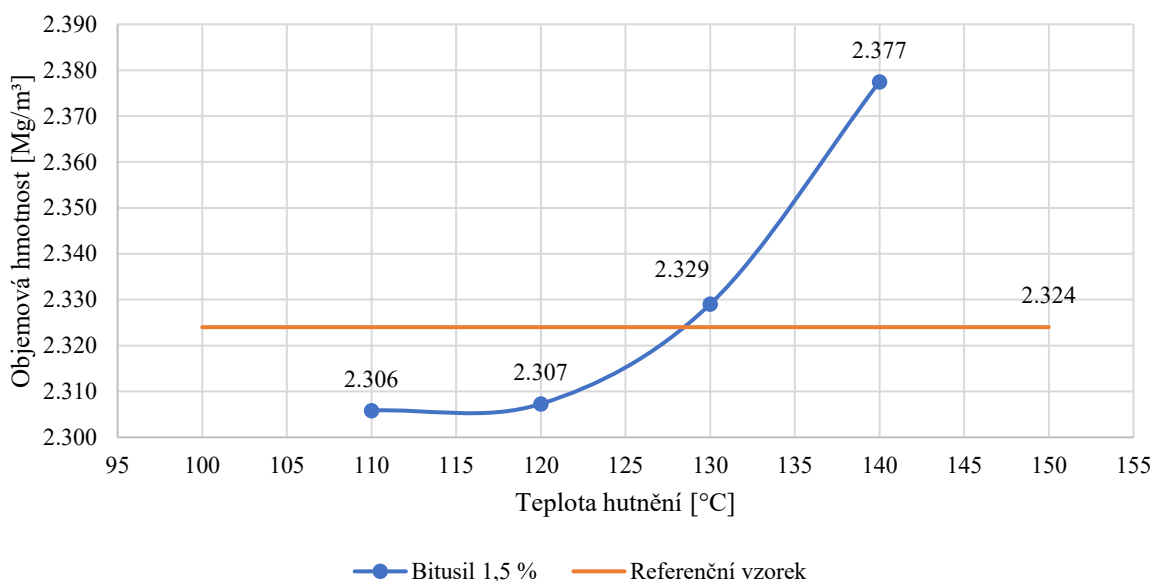
Tabulka 24 – výsledky pro teplotu 140 °C a obsahu přísady Bitusil 1,50 %

Teplota směsi	140 °C			
Množství přísady	1,50%			
Vzorek	1	2	3	4
Hmotnost suchého tělesa $m_1$ [g]	1191,6	1190,6	1190,6	1193,1
Hmotnost tělesa ponořeného ve vodě $m_2$ [g]	692,4	693,5	692,4	692,1
Hmotnost osušeného tělesa $m_3$ [g]	1192,8	1191,9	1191,9	1195,0
Objemová hmotnost vody $\rho_w$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	0,9983			
Objemová hmotnost těles $\rho_{bssd}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,377	2,385	2,380	2,368
	2,377			
Maximální objemová hmotnost těles $\rho_{mv}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,428			
Mezerovitost těles $V_a$ [%]	2,1			

Po vypočítání všech objemových hmotností se jednotlivé výsledky zavedly do grafu, kde byly porovnány s referenční hodnotou asfaltové směsi ACO 11 + 50/70. Graf č. 9 s těmito hodnotami najdeme níže.



Křivka objemových hmotností - obsah pojiva 1,50 %



Graf 9 – křivka objemových hmotností – obsah pojiva 1,50 %

Z grafu je patrné, že při nízkých teplotách a maximálním obsahu přísady Bitusil byla objemová hmotnost vzorků výrazně nižší než referenční objemová hmotnost asfaltové směsi. Takto namíchaná asfaltová směs by nebyla vhodná pro výstavbu. Mezerovitost směsi je buď velmi nízká anebo vysoká. Když zohledníme to, že se Marshallova tělesa rozpadala, na základě této zkušenosti bych nedoporučila pro naši konkrétní asfaltovou směs využití maximální možné dávky přísady Bitusil.

## 5.6 Ekonomické zhodnocení

Hlavním důvodem využití přísady Bitusil je snížení energetických výdajů obaloven. S použitím přísady se dá snížit pracovní teplota asfaltové směsi o několik desítek stupňů Celsia. Takovýmto snížením pracovní teploty můžeme dosáhnout úspory na výrobě asfaltové směsi až 16,6 % se základní ceny asfaltové směsi.

Pro náš experiment byla vybrána asfaltová směs ACO 11+ 50/70, která byla podrobena zkouškám při různých pracovních teplotách. Cena této asfaltové směsi bez jakékoliv přísady vyrobená na obalovně Polanka je 2 220 Kč/t bez DPH. V rámci diplomové práce se nejlépe osvědčila asfaltová směs s přísadou Bitusil o obsahu 1 % a při pracovní teplotě 120 °C. Cena přísady Bitusil daná výrobcem je 99,70 Kč za litr bez DPH. Hustota Bitusilu je 0,900 kg/l. Cena zemního plynu pro výrobu asfaltové směsi za období duben až září roku 2023 na obalovně Polanka byla 129 Kč/t. Když vezmeme v potaz to, že se asfaltová směs na obalovně zahřívá na

180 °C, pak by úspora při snížení teploty na 170 °C byla 7,22 Kč na tunu zemního plynu. Snížením pracovní teploty na 120 °C by tedy přineslo úsporu okolo 33 %, tedy přibližně 42,8 Kč na tuně zemního plynu.

## 6 ZÁVĚR

---

V diplomové práci jsme se věnovali problematice snížení teploty při zpracování asfaltových směsí a jejich výrobě. Ve zkušební laboratoři TPA v Ostravě jsme prováděli experiment s chemickou přísadou Bitusil, která měla za úkol snížit teplotu hutnění asfaltové směsi.

V podkapitole 5.4 byly prezentovány výsledky rozsáhlého experimentu zaměřeného na zkoumání vlivu přísady Bitusil na technologické vlastnosti asfaltových směsí při různých teplotách hutnění a procentuálních zastoupení. Celkově byly provedeny čtyři série experimentů, z nichž každá zahrnovala různé kombinace teplot hutnění (110 °C, 120 °C, 130 °C a 140 °C) a procentuálního obsahu Bitusilu (0,60 %, 0,80 %, 1,00 % a 1,50 %).

První série experimentů byla provedena při teplotě 110 °C, kde byly zkoumány tři různé procentuální zastoupení přísady Bitusil. Výsledky ukázaly výrazné zvýšení objemových hmotností asfaltových směsí s Bitusilem ve srovnání s referenčním vzorkem.

Druhá série experimentů se zaměřila na teplotu hutnění 120 °C. Opět byla provedena studie s třemi různými obsahy Bitusilu. Získané výsledky potvrdily předešlé pozorování a ukázaly, že asfaltové směsi s chemickou přísadou Bitusil dosahují vyšších objemových hmotností ve srovnání s referenčním vzorkem. Průměrná mezerovitost vzorků byla v souladu s normami a ukazovala na přijatelnou homogenitu směsí.

Následovala třetí série experimentů s teplotou hutnění 130 °C, kde bylo znovu zkoumáno tři různá procentuální zastoupení Bitusilu. I zde bylo pozorováno zvýšení objemových hmotností v asfaltových směsích s Bitusilem, což potvrzuje jeho pozitivní vliv na hutnění.

Další série experimentů byla zaměřena na teplotu hutnění 140 °C. Výsledky této série potvrdily trend zvyšování objemových hmotností s přidáváním Bitusilu, i když při této vysoké teplotě byly dosaženy nižší hodnoty ve srovnání s nižšími teplotami hutnění.

Poslední série experimentů se věnovala navrženému množství chemické přísady Bitusil výrobcem. Výsledky zjištěné pomocí zkoušek Marshallových těles přinesly negativní rozhodnutí o využití maximálního procentuálního obsahu Bitusilu, a to 1,50 %. Proto použití maximálního procentuálního obsahu nedoporučuji.

Závěr těchto experimentů a analýza všech výsledků ukazují, že přídavek Bitusilu do asfaltových směsí má výrazně pozitivní vliv na hutnění, což vede k vyšším objemovým hmotnostem a

potenciálně k energetickým úsporám při výrobě. Vliv na mezerovitost směsí byl zkoumán také, a většina výsledků se držela v přijatelných mezích mezerovitosti.

Další ověření bylo provedeno s vybraným optimálním vzorkem (120 °C, 1,00 % Bitusil), kde byly dosaženy požadované hodnoty mezerovitosti při různých úderech hutnicího válce. Tento vzorek prošel sérií kontrolních zkoušek a byl ověřen jako vhodný pro další použití.

Ekonomická analýza ukázala, že přestože cena Bitusilu není zanedbatelná, úspory v energetických nákladech na výrobu asfaltových směsí mohou tuto investici kompenzovat. Při správném výběru podmínek a obsahu Bitusilu může být dosaženo optimálního kompromisu mezi technickými vlastnostmi směsi a ekonomickou efektivitou.

Celkově lze konstatovat, že přidáním chemické přísady Bitusil do asfaltových směsí představuje perspektivní směr v oblasti inovací v asfaltovém průmyslu. Tato práce poskytuje ucelený pohled na výsledky experimentů a významný základ pro další výzkumy a optimalizaci technologických postupů v oblasti výroby asfaltových směsí s ohledem na energetickou účinnost a technické vlastnosti.

Problematikou snížení teploty u asfaltových směsí se již zabývalo několik bakalářských a diplomových prací. Například v diplomové práci *Snižování pracovních teplot při výrobě a pokládce asfaltových směsí*. [17] Diplomová práce zkoumala vliv aditiv na nízkoteplotní vlastnosti asfaltových směsí se zaměřením na snížení pracovní teploty. Zkoušky na směsích s různými aditivami (Licomont, TotalSasobit, Iterlow, Shell65S) kontrolní směsi ukázaly, že většina aditiv neovlivňuje negativně nízkoteplotní parametry, s výjimkou aditiva Sasobit, které může zvýšit náchylnost k tvorbě mrazových trhlin.

Další příkladem snížení pracovních teplot může být použití polymerem modifikovaných pojiv. Tato varianta byla zkoumaná v bakalářské práci *Nízkoteplotní chování asfaltových směsí*. [18] Tato bakalářská se zaměřovala na vyhodnocení naměřených výsledků vztahujících se k nízkoteplotním vlastnostem silničního asfaltu a polymerem modifikovaných asfaltových pojiv. V bakalářské práci byly použity zkoušky jako modul tuhosti za ohybu, bod lámavosti podle Fraasse, penetrace jehlou nebo bod měknutí k detailní specifikaci vybraných vzorků. Výsledky naznačily, že zvýšení obsahu modifikačních přísad v asfaltovém pojivu vede ke zlepšení nízkoteplotních vlastností. Zkouška bodu lámavosti však neprokázala dostatečnou citlivost na modifikace. Také byly zjištěny problémy s nesplněním normativních požadavků, pravděpodobně z důvodu jejich přísného nastavení.

Třetí práci, kterou bych chtěla zmínit je diplomová práce *Nízkoteplotní asfaltové směsi s vyšším obsahem R-materiálu*. [19] Cílem této diplomové práce bylo prověření chování 13 variant nízkoteplotních asfaltových směsí ACL 16+, přičemž byl zkoumán vyšší podíl R-materiálu. Varianty se lišily v množství přidaného R-materiálu, gradaci asfaltového pojiva a přidáváním různých nízkoteplotních přísad. Výsledky ukázaly, že obsah R-materiálu pozitivně ovlivnil mezerovitost směsi, zejména varianta s 60 % R-materiálu a aplikací vosku Sasobit REDUX. Při zkoušce pevnosti v příčném tahu vykázaly varianty se zpěněným asfaltem a měkčí gradací nejlepší výsledky odolnosti vůči vodě a mrazu. Zkouška modulu tuhosti potvrdila výhody variant s nízkoteplotními přísadami, zvláště Innodur a Deurex. Varianta s rejuvenátorem Storelastic dosahovala nejstabilnějších výsledků. Zkouška trvalých deformací ukázala, že varianty s R-materiálem měly zlepšenou odolnost, s výrazným nárůstem s rostoucím podílem R-materiálu. Celkově diplomová práce tvrdí, že kombinace R-materiálu a nízkoteplotních přísad je perspektivní s ohledem na kvalitu, energetickou a ekonomickou efektivnost a nižší vliv na životní prostředí.

V současné době máme tedy spoustu možností, jak ovlivnit pracovní teplotu asfaltových směsí, ale stále jsou tyto možnosti málo prozkoumané a využívané. Z ekonomického hlediska i hlediska životního prostředí by využití nízkoteplotních asfaltových směsí, které budou splňovat kritéria pro výstavbu silnic a dálnic, mohlo přinést pozitivní výsledky.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Sasol. Sasobit® [online], [cit. 2023-11-31]. Dostupné z <https://products.sasol.com/pic/products/home/grades/ZA/5sasobit/index.html>
- [2] Deurex AG. DEUREX A 20 K. [online], [cit. 2023-11-31]. Dostupné z <https://www.deurex.com/productsearch/DEUREX-A-20-K/>
- [3] Ředitelství silnic a dálnic ČR. Amidové vosky a jejich použití v silničním stavitelství. [online], [cit. 2023-31-11]. Dostupné z <http://old.silnice-zeleznice.cz/clanek/amidove-vosky-a-jejich-pouziti-v-silnicnim-stavitelstvi/>
- [4] IndiaMART. Amide Wax. [online], [cit. 2023-11-31]. Dostupné z <https://m.indiamart.com/proddetail/amide-wax-6169017391.html>
- [5] European Asphalt Pavement Association. Warm Mix Asphalt. [online], [cit. 2023-31-11]. Dostupné z <https://eapa.org/warm-mix-asphalt/>
- [6] EcoProducts. Čo je zeolit. [online], [cit. 2023-11-31]. Dostupné z <https://www.ecoproducts.sk/co-je-zeolit>
- [7] Posádka, A. V., & Reddy, K. S. (2013). Comparative Study on Hot Mix and Warm Mix Asphalt using Zycosoil and Densicryl Additives for BC Mix. International Journal of Engineering Research & Technology, 2(7), 1-7. Dostupné z <https://www.ijert.org/research/comparative-study-on-hot-mix-and-warm-mix-asphalt-using-zycosoil-and-densicryl-additives-for-bc-mix-IJERTV2IS70732.pdf>
- [8] Ozturk, H., Goh, S. W., & Iskender, E. (2019). Quantification of Quality of Foamed Warm Mix and Hot Mix Asphalt. Materials, 12(24), 4127. DOI: 10.3390/ma12244127. Dostupné z <https://www.semanticscholar.org/paper/Quantification-of-quality-of-foamed-Warm-Mix-and-Ozturk/d84c2a397d1b57203a883dd2fa44c927480d60d1>
- [9] Český normalizační institut. (2020). ČSN EN 12697-30: Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem. Praha, Česká republika.
- [10] Český normalizační institut. (2021). ČSN EN 12697-6: Asfaltové směsi – Zkoušky – Část 6: Stanovení hodnoty hmotnosti a objemové hmotnosti. Praha, Česká republika.
- [11] Český normalizační institut. (2020). ČSN EN 12697-5: Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti. Praha, Česká republika.
- [12] Český normalizační institut. (2020). ČSN EN 12697-8: Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 8: Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí. Praha, Česká republika

- [13] Český normalizační institut. (2017). ČSN EN 13108-8: Asfaltové směsi – Specifikace pro materiály – Část 8: R-materiál. Praha, Česká republika.
- [14] Ředitelství silnic a dálnic ČR. TKP kapitola 7: Hutněné asfaltové vrstvy. (2023). [online]. Dostupné z [https://pjk.rsd.cz/data/USR\\_001\\_2\\_6\\_TKP/TKP\\_kapitola\\_7\\_final\\_20230323.pdf](https://pjk.rsd.cz/data/USR_001_2_6_TKP/TKP_kapitola_7_final_20230323.pdf)
- [15] Ředitelství silnic a dálnic ČR. TP 238 Nízkoteplotní asfaltové směsi (NTAS). (2011). [online]. Dostupné z [https://pjk.rsd.cz/data/USR\\_001\\_2\\_8\\_TP/TP\\_238.pdf](https://pjk.rsd.cz/data/USR_001_2_8_TP/TP_238.pdf)
- [16] Český normalizační institut. (2021). ČSN ČSN 73 6120 Stavba vozovek – Ostatní asfaltové vrstvy – Provádění a kontrola shody. Praha, Česká republika
- [17] KOMENDA, Radek. Snižování pracovních teplot při výrobě a pokládce asfaltových směsí [online]. Brno, 2013 [cit. 2023-10-10]. Dostupné z: <https://theses.cz/id/bw1fe1/>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [18] ČUMÍČKOVÁ, Markéta. Nízkoteplotní chování asfaltových pojiv [online]. Brno, 2017 [cit. 2023-10-10]. Dostupné z: <https://theses.cz/id/m5o5hv/>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [19] CHMELÍKOVÁ, Monika. Nízkoteplotní asfaltové směsi s vyšším obsahem r-materiálu [online]. Praha, 2018 [cit. 2023-10-10]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10467/74270>. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze.

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 – seznam používaných asfaltových směsí v České republice .....	5
Tabulka 2 – parametry Bitusilu .....	18
Tabulka 3 – zastoupení materiálů v asfaltové směsi ACO 11+ 50/70 .....	19
Tabulka 4 – naměřené hodnoty referenčního vzorku .....	24
Tabulka 5 – výsledky pro teplotu 110 °C a obsahu přísady Bitusil 0,60 % .....	25
Tabulka 6 – výsledky pro teplotu 110 °C a obsahu přísady Bitusil 0,80 % .....	26
Tabulka 7 – výsledky pro teplotu 110 °C a obsahu přísady Bitusil 1,00 % .....	26
Tabulka 8 – výsledky pro teplotu 120 °C a obsahu přísady Bitusil 0,60 % .....	28
Tabulka 9 – výsledky pro teplotu 120 °C a obsahu přísady Bitusil 0,80 % .....	28
Tabulka 10 – výsledky pro teplotu 120 °C a obsahu přísady Bitusil 1,00 % .....	29
Tabulka 11 – výsledky pro teplotu 130 °C a obsahu přísady Bitusil 0,60 % .....	30
Tabulka 12 – výsledky pro teplotu 130 °C a obsahu přísady Bitusil 0,80 % .....	30
Tabulka 13 – výsledky pro teplotu 130 °C a obsahu přísady Bitusil 1,00 % .....	31
Tabulka 14 – výsledky pro teplotu 140 °C a obsahu přísady Bitusil 0,60 % .....	32
Tabulka 15 – výsledky pro teplotu 140 °C a obsahu přísady Bitusil 0,80 % .....	32
Tabulka 16 – výsledky pro teplotu 140 °C a obsahu přísady Bitusil 1,00 % .....	33
Tabulka 17 – výsledky pro teplotu 120 °C, obsah přísady Bitusil 1,00 % a obsah pojiva -0,5 % .....	36
Tabulka 18 – výsledky pro teplotu 120 °C, obsah přísady Bitusil 1,00 % a obsah pojiva +0,5 % .....	36
Tabulka 19 – výsledky pro teplotu 120 °C, obsah přísady Bitusil 1,00 % a počet úderů 2x7537	
Tabulka 20 – výsledky pro teplotu 120 °C, obsah přísady Bitusil 1,00 % a počet úderů 2x100 .....	38
Tabulka 21 – výsledky pro teplotu 110 °C a obsahu přísady Bitusil 1,50 % .....	39
Tabulka 22 – výsledky pro teplotu 120 °C a obsahu přísady Bitusil 1,50 % .....	39
Tabulka 23 – výsledky pro teplotu 130 °C a obsahu přísady Bitusil 1,50 % .....	40
Tabulka 24 – výsledky pro teplotu 140 °C a obsahu přísady Bitusil 1,50 % .....	40



## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 – obalovna pro výrobu asfaltových směsí .....	1
Obrázek 2 – Tvrdý syntetický vosk Sasobit [1] .....	7
Obrázek 3 – přírodní vosk Deurex A 20 K [2].....	8
Obrázek 4 – ukázka práškového amidového vosku [4].....	8
Obrázek 5 – zeolit [6].....	9
Obrázek 6 – technologie na bázi zpěněného asfaltu [8].....	10
Obrázek 7 – ukázka použití Zycosoilu a Densicrylu [7].....	10
Obrázek 8 – rázový zhutňovač Marshallových těles.....	12
Obrázek 9 – nádoba s kalibrovaným vakuometrem .....	14
Obrázek 10 – ukázka použitého Bitusilu.....	17
Obrázek 11 – chemický vzorec Bitusilu.....	18
Obrázek 12 – zvážená navážka kameniva pro výrobu asfaltové směsi ACO 11+ 50/70.....	20
Obrázek 13 – zahřívání míchací nádoba na mísení asfaltové směsi.....	21
Obrázek 14 – rozprostřená asfaltová směs na určené ploše .....	22
Obrázek 15 – navážka asfaltové směsi pro výrobu Marshallových těles.....	22
Obrázek 16 – Marshallové těleso před vytlačněním z hutnicí formy .....	23
Obrázek 17 – vzorek Marshallového tělesa .....	24
Obrázek 18 – ukázka sad Marshallových těles .....	25

## SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 – křivka zrnitosti ACO 11+ 50/70 .....	20
Graf 2 – křivka objemových hmotností – teplota 110°C .....	27
Graf 3 – křivka objemových hmotností – teplota 120°C .....	29
Graf 4 – křivka objemových hmotností – teplota 130°C .....	31
Graf 5 – křivka objemových hmotností – teplota 140°C .....	33
Graf 6 – křivka objemových hmotností – obsah pojiva 0,60 %.....	34
Graf 7 – křivka objemových hmotností – obsah pojiva 0,80 %.....	34
Graf 8 – křivka objemových hmotností – obsah pojiva 1,00 %.....	35
Graf 9 – křivka objemových hmotností – obsah pojiva 1,50 %.....	41
Graf 10 – křivka objemových hmotností – obsah pojiva 1,50 %.....	41