



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

PROBLEMATIKA ASFALTOVÝCH SMĚSÍ S HRUBOZRNNÝM KAMENIVEM

ISSUE OF ASPHALT MIXTURES WITH COARSE-GRAINED AGGREGATES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ondřej Koblížek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav pozemních komunikací
Student: **Bc. Ondřej Koblížek**
Vedoucí práce: **doc. Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.**
Akademický rok: 2023/24
Studijní program: N0732A260026 Stavební inženýrství – konstrukce a dopravní stavby

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

Problematika asfaltových směsí s hrubozrnným kamenivem

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Platné české normy umožňují použití asfaltových směsí s maximální zrnitostí směsi kameniva do 22 mm. Vzhledem k nedostatku některých frakcí kameniva ve stavební sezóně se hledají cesty, jak tyto nedostatkové frakce kameniva nahradit. Jednou z možností řešení tohoto problému je využití kameniva, které bude obsahovat větší zrna (například do 32 mm).

Cíle a výstupy diplomové práce:

Cílem diplomové práce je navrhnout asfaltovou směs typu asfaltový beton se zrnitostí kameniva do 32 mm a určit vliv množství pojiva na vlastnosti této směsi. Pro zhodnocení vlastností budou vybrány vhodné laboratorní zkoušky.

Seznam doporučené literatury a podklady:

Předané vzorky materiálů

Zkušební normy pro asfaltové směsi

Specifikační normy pro asfaltové směsi

Literatura z internetu

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 28. 3. 2023

L. S.

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

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

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá návrhem asfaltové směsi typu asfaltový beton pro podkladní vrstvy (ACP) s maximálním zrnem kameniva do 32 mm a zkoumá vliv množství asfaltového pojiva na vlastnosti této směsi. V teoretické části je popsána problematika nedostatku kameniva v České republice a rozdělení kameniva do jednotlivých kategorií. V další části jsou podrobně popsány použité laboratorní zkoušky (stanovení penetrace jehlou, stanovení bodu měknutí, míra zhutnění, stanovení modulu tuhosti, nízkoteplotní vlastnosti a zkouška pojíždění kolem). V praktické části jsou popsány použité materiály, stanoveny výsledky laboratorních zkoušek, jejich porovnání a následné vyhodnocení.

KLÍČOVÁ SLOVA

asfalt, asfaltová směs, hrubozrnné kamenivo, nedostatek kameniva, návrh asfaltové směsi, tuhost, nízkoteplotní vlastnosti, trvalé deformace

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the design of asphalt mixture of asphalt concrete type for base courses with maximum aggregate grain up to 32 mm and investigates the influence of the amount of asphalt binder on the properties of this mixture. The theoretical part describes the problem of aggregate shortage in the Czech Republic and the division of aggregates into various categories. In the next part, the laboratory used tests (needle penetration determination, softening point determination, compaction degree, determination of the stiffness modulus, low temperature properties and wheel tracking) are described in detail. The practical part describes the used materials, the results of the laboratory tests, their comparison and evaluation.

KEYWORDS

bitumen, asphalt mixture, coarse aggregate, aggregate shortage, asphalt mixture design, stiffness, low temperature properties, permanent deformation

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOBLÍŽEK, Ondřej. *Problematika asfaltových směsí s hrubozrnným kamenivem*. Brno, 2024. 85 s., 12 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí doc. Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Problematika asfaltových směsí s hrubozrnným kamenivem* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 10. 1. 2024

Bc. Ondřej Koblížek
autor

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat především vedoucímu mé diplomové práce panu doc. Ing. Ondřeji Daškovi, Ph.D. za jeho odborné vedení, čas, a především ochotu při zpracování mé diplomové práce. Dále bych rád poděkoval všem zaměstnancům laboratoře ústavu pozemních komunikací VUT v Brně, především Pavlu Strakovi za pomoc při provádění zkoušek v laboratoři. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat mé rodině za podporu během celého studia.

Obsah

Úvod.....	11
1 Rešerše literatury	12
1.1 Kamenivo v asfaltových směsích.....	12
1.2 Rozdělení kameniva	12
1.2.1 Dle původu	13
1.2.2 Dle vzniku	13
1.2.3 Dle objemové hmotnosti.....	13
1.2.4 Dle velikosti zrn	14
1.3 Nedostatek kameniva v České republice.....	15
2 Cíle diplomové práce.....	18
3 Použité zkušební metody	19
3.1 Stanovení penetrace jehlou	19
3.1.1 Přístroje a pomůcky	19
3.1.2 Postup zkoušky.....	20
3.1.3 Výpočet	21
3.2 Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička	21
3.2.1 Přístroje a pomůcky	21
3.2.2 Příprava vzorku.....	22
3.2.3 Postup zkoušky.....	22
3.3 Sítový rozbor.....	23
3.3.1 Přístroje a pomůcky	24
3.3.2 Postup zkoušky.....	24
3.4 Stanovení objemové hmotnosti hydrostatickým vážením.....	25
3.4.1 Přístroje a pomůcky	26
3.4.2 Příprava vzorku.....	26
3.4.3 Postup zkoušky.....	26
3.4.4 Výpočet	28
3.5 Stanovení maximální objemové hmotnosti volumetrickým postupem	28

3.5.1	Přístroje a pomůcky	28
3.5.2	Příprava vzorku.....	29
3.5.3	Postup zkoušky.....	29
3.5.4	Výpočet	30
3.6	Stanovení mezerovitosti	31
3.6.1	Výpočet	31
3.6.2	Volumetrické charakteristiky	31
3.7	Míra zhutnění dle ČSN 73 6121.....	31
3.7.1	Výpočet	32
3.8	Hutnění Marshallových těles rázovým zhutňovačem	33
3.8.1	Přístroje a pomůcky	33
3.8.2	Příprava vzorku.....	33
3.8.3	Postup zkoušky.....	34
3.9	Hutnění asfaltových desek segmentovým zhutňovačem.....	34
3.9.1	Přístroje a pomůcky	35
3.9.2	Příprava vzorku.....	36
3.9.3	Postup zkoušky.....	37
3.10	Stanovení modulu tuhosti	37
3.10.1	Přístroje a pomůcky	38
3.10.2	Příprava vzorku.....	38
3.10.3	Postup zkoušky.....	40
3.10.4	Výpočet	41
3.11	Nízkoteplotní vlastnosti.....	42
3.11.1	Přístroje a pomůcky	43
3.11.2	Příprava vzorku.....	43
3.11.3	Postup zkoušky.....	44
3.11.4	Výpočet	44
3.12	Zkouška poježdění kolem	45
3.12.1	Přístroje a pomůcky	45
3.12.2	Postup zkoušky.....	45
3.12.3	Výpočty.....	46
4	Použité materiály	47

4.1	Použité asfaltové pojivo	47
4.2	Použité kamenivo	47
4.3	Návrh směsi ACP 32	47
4.4	Výroba zkušebních těles	50
4.4.1	Výroba Marshallových těles	51
4.4.2	Výroba asfaltových desek.....	53
4.4.3	Stanovení mezerovitosti.....	54
5	Výsledky zkoušek	56
5.1	Stanovení penetrace jehlou	56
5.2	Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička	56
5.3	Míra zhutnění dle ČSN 73 6121.....	57
5.4	Stanovení modulu tuhosti.....	58
5.5	Nízkoteplotní vlastnosti	66
5.6	Zkouška poježdění kolem	71
6	Závěr.....	75
7	Bibliografie.....	77
8	Seznamy.....	81
8.1	Seznam obrázků	81
8.2	Seznam tabulek	83
8.3	Seznam grafů.....	84
8.4	Seznam rovnic	85
9	Přílohy	86

Úvod

V České republice začíná v posledních několika letech docházet k nedostatku kameniva určeného nejen pro výstavbu silnic a dálnic, ale také pro opravy a stavby nových úseků železničních tratí. V době, kdy je rozestavěnost dálnic v České republice historicky největší a Správa železnic se blíží k zahájení výstavby prvních úseků vysokorychlostních železničních tratí, může dojít ke kritickému nedostatku kameniva v průběhu několika let. Po Sametové revoluci v roce 1989 nebyl v České republice otevřen jediný nový kamenolom, naopak se kamenolomy zavírají a více než polovina z otevřených kamenolomů přijde dle ŘSD o své zásoby v průběhu 9 let.

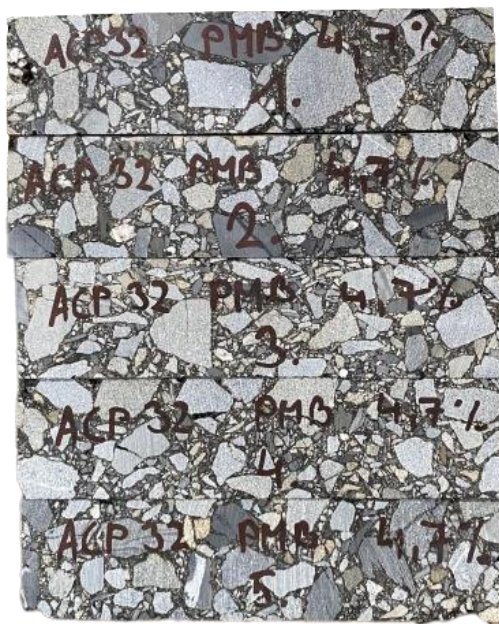
Platné české normy umožňují použití asfaltových směsí pro podkladní vrstvy s maximální zrnitostí kameniva pouze do 22 mm. Vzhledem k nedostatku některých frakcí kameniva ve stavební sezóně je snaha o vhodné nahrazení těchto nedostatkových frakcí. Jednou z cest pro řešení tohoto problému je nahrazení dosud největší dovolené frakce kameniva do 22 mm, kamenivem do velikosti 32 mm, které se již běžně využívá v mnoha zemích Evropy.

V této diplomové práci bude proveden vhodný návrh a zkoumání vlastností asfaltové směsi typu asfaltový beton s maximálním zrnem kameniva do 32 mm pro podkladní vrstvy. Následně bude zkoumán vliv různého dávkování množství pojiva OMV PMB Starfalt 25/55-65 na vlastnosti této směsi.

1 Rešerše literatury

1.1 Kamenivo v asfaltových směsích

Kamenivo je tvrdý inertní, anorganický materiál přírodního nebo umělého původu, využívaný pro stavební účely jako plnivo při výrobě betonu, kostra asfaltové směsi apod. Asfaltová směs se skládá ze směsi kameniva, asfaltového pojiva a dalších příměsí (např. fileru). Kostru celé asfaltové směsi tvoří kamenivo, jehož jednotlivá zrna se vzájemně dotýkají a zaklíňují do sebe. Asfaltové pojivo tato zrna pouze obaluje a spojuje dohromady. Pro vhodný návrh asfaltové směsi jsou rozhodující požadované funkce směsi ve vozovce s ohledem na návrhovou úroveň porušení, dopravní zatížení a charakteristiku klimatu na daném území. Kamenivo v za horka zpracovaných asfaltových směsích zaujímá přibližně 93–96 % hmotnostního podílu celé asfaltové směsi, asfaltové pojivo pouze 4–7 %. Viditelný rozdíl zastoupení kameniva oproti asfaltovému pojivu v hrubozrnné směsi ACP 32 je zobrazen na obrázku 1. [1] [2]



Obrázek 1. Zastoupení kameniva v hrubozrnné asfaltové směsi ACP 32

1.2 Rozdělení kameniva

Kamenivo lze rozdělit do několika kategorií dle jejich původu, vzniku, objemové hmotnosti a velikosti zrn.

1.2.1 Dle původu

- Přírodní – kamenivo získané těžením z přírodních ložisek nebo drcením z přírodního kamene.
- Umělé – kamenivo uměle vyrobené pomocí člověka, nejčastěji tepelnými procesy (spalování, termická expandace, druhotná surovina při hutní výrobě).
- Recyklované – kamenivo, které vzniklo recyklací již dříve použitého kameniva ve stavebních konstrukcích. [2]

1.2.2 Dle vzniku

- Těžené – přírodní kamenivo, které vzniká rozpadem horniny. Vyznačuje se zaoblenými zrny, které vznikají přirozeným transportem zvětralé horniny ve vodním toku.
- Těžené předrcené – kamenivo získané drcením zrn těženého kameniva o velikostí větší než 2 mm.
- Drcené – přírodní kamenivo, které vzniká drcením velkých kusů horniny s následným tříděním. Využívá se především do asfaltových směsí, kde díky svým ostrým a nepravidelným tvarům zrn tvoří kostru asfaltové směsi. [2]

1.2.3 Dle objemové hmotnosti

- Pórovité – kamenivo, jehož objemová hmotnost vysušených zrn nepřesahuje 2000 kg/m³. Mezi přírodní pórovité kamenivo se řadí například pemza nebo křemelina, z umělých kameniv se jedná například o keramzit nebo strusku.
- Hutné – kamenivo s objemovou hmotností v rozmezí 2000 kg/m³ až 3000 kg/m³. Mezi hutné kamenivo patří většina drcených nebo těžených přírodních kameniv. Z umělých hutných kameniv sem patří především vysokopecní struska. Hutné kamenivo je základem téměř všech asfaltových směsí.
- Těžké – kamenivo, jehož objemová hmotnost vysušených zrn je větší než 3000 kg/m³. Z přírodních hornin můžeme do této skupiny zařadit některé vyvělé nebo přeměněné horniny s vysokým obsahem minerálů, bohatých na železnou rudu a hořčík (čedič, amfibolity). V České republice zdroje těžkého kameniva chybí, a proto se dováží především ze Skandinávie. Těžké kamenivo se používá převážně k výrobě těžkých betonů, které slouží k odstínění zdraví nebezpečného elektromagnetického nebo radioaktivního záření. [2] [3]

1.2.4 Dle velikosti zrn

- Jemné částice – částice, které propadnou sítím o velikosti oka 0,063 mm.
- Drobné kamenivo – kamenivo, které obsahuje zrna velikosti od 0,063 mm do 4 mm.
- Hrubé kamenivo – kamenivo o velikosti zrna od 4 mm do 125 mm.
- Směs kameniva – směs, která obsahuje drobné i hrubé kamenivo.
- Filer – kamenná moučka o zrnitosti 0–2 mm, která musí obsahovat minimálně 70 % jemných částic, které propadnou sítím o velikosti oka 0,063 mm. Filer je obsažen v každé frakci kameniva a jeho podíl se zvyšuje společně se snižující se hodnotou maximálního zrna. Rozlišujeme dva druhy fileru pro silniční stavitelství – vratný a přídatný filer.

Vratný filer se získává při procesu sušení kameniva. Jedná se o odprašky, které se zachytí na filtrech vzduchotechniky obalovny. Tento produkt se následně skladuje v silech a poté je opětovně dávkován, společně s přídatným filerem, do asfaltové směsi.

Přídatný filer se také označuje jako vápencová moučka, jelikož vzniká procesem drcení vápencového kameniva. Ve formě filerové frakce jemně drcené vápencové moučky (viz obrázek 2) je následně dovezen na obalovnu. Vápencová moučka má pozitivní vliv na vlastnosti asfaltových směsí – zvyšuje odolnost proti působení vody a zlepšuje přilnavost asfaltového pojiva ke kamenivu. [4] [5] [6] [7]



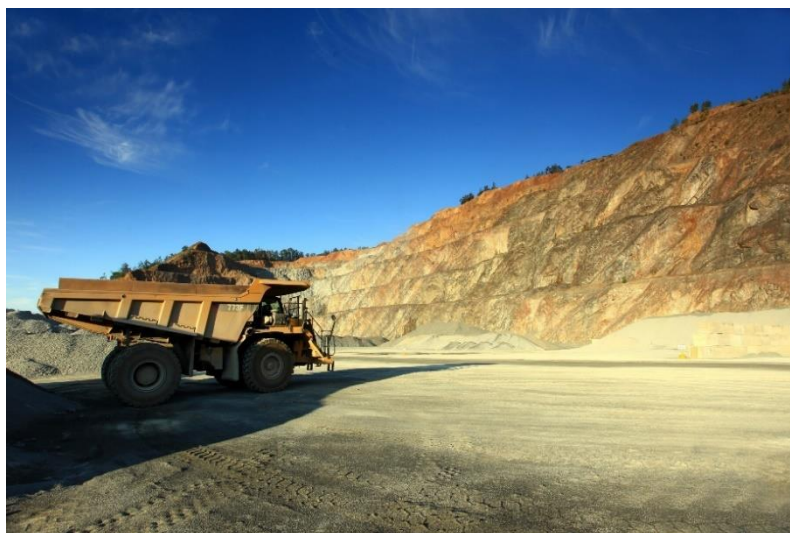
Obrázek 2. Přídatný filer (vápencová moučka) [4]

1.3 Nedostatek kameniva v České republice

V České republice začíná docházet k nekontrolovatelnému úbytku kameniva. Úsek kontroly a kvality staveb Ředitelství silnic a dálnic ČR proto oslovil Těžební unii s požadavkem pomoci při zajištění nedostatkových surovin pro plánované stavby. Pod vedením Těžební unie byl proto sestaven tým z České geologické služby a Sdružení pro výstavbu silnic, jehož cílem bylo zpracovat Studii dostupnosti kameniva pro plánované stavby dálnic a silnic I. třídy a železniční infrastruktury. [8]

Od roku 1989 nebyl v České republice otevřen jediný nový kamenolom, a proto je reálné, že do deseti let dojdou zásoby v dosud činných kamenolomech. Některé kamenolomy čelí problému, že není možné vytěžit všechny jeho evidované zásoby kameniva z důvodu veřejnoprávních či majetkoprávních sporů (ochrana přírody a krajiny, nevyřešené střety zájmů).

Česká republika disponuje relativně velkými objemy geologických zásob výhradních ložisek stavebního kamene (2,49 mld. m³). Ovšem vytěžitelné zásoby jsou výrazně nižší a ložiska s povolenou těžbou dle POPD (povolení o hornické činnosti) činí pouze 20 % z celkových zásob (498 mil. m³). Za poslední rok došlo k výraznému nárůstu cen kameniva, v průměru o 25-35 Kč/t, jelikož již ve stavební sezóně dochází k nedostatku u drobného drceného kameniva o frakci 0/4, 2/4, 2/5 a 4/8 mm a frakcí 8/11, 8/16, 11/16, 16/22, 16/32 a 32/63 mm u hrubého drceného kameniva. Na obrázku 3 je zobrazen kamenolom Zbraslav v Praze. [8]

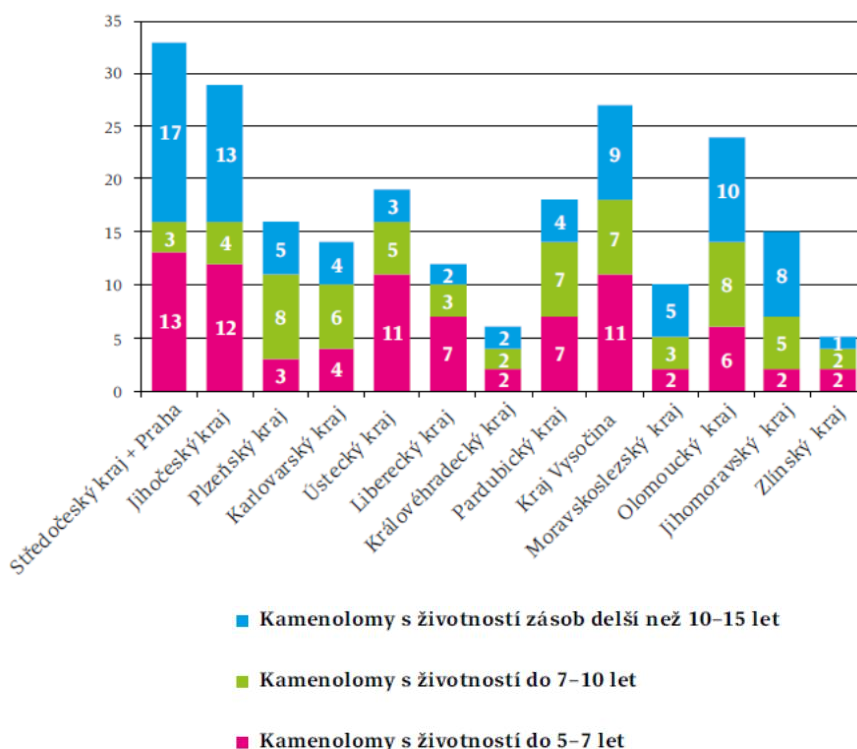


Obrázek 3. Kamenolom Zbraslav, kraj Praha [9]

Z celkově evidovaných 322 ložisek stavebního kamene na území ČR bylo v roce 2021 jen 176 z nich aktivních a z 215 ložisek nevyhrazeného nerostu (nerosty, které nejsou ve vlastnictví státu) mělo jen 49 z nich povolenou těžbu. Využívání ložisek nevyhrazených nerostů sice stoupá, ale velmi významná ložiska stavebních surovin je velmi složité začlenit do územních plánů, zejména pokud nejsou dosud využívána. Celkem je tedy v České republice 225 aktivních kamenolomů. Těžba a spotřeba stavebního kamene v posledních deseti letech ovšem výrazně roste.

Nedostatek kameniva v jednotlivých krajích se již stává skutečností, a proto nelze předpokládat, že by do budoucna bylo možné zásobovat, respektive dotovat vysokými objemy kraje mezi sebou. Většina českých krajů se pohybuje na pokraji své soběstačnosti v oblasti stavebních surovin, a některé z nich se již dostaly do deficitu. Tento problém ilustruje například Zlínský kraj, který musí své stavby zásobovat surovinami z Jihomoravského a Olomouckého kraje. [8]

Na obrázku 4 jsou zobrazeny životnosti disponibilních zásob v kamenolomech na území všech krajů v České republice.



Obrázek 4. Životnost disponibilních zásob v kamenolomech na území všech krajů ČR [8]

Ze závěrů této studie je jednoznačné, že lze v následujících několika letech očekávat nedostatek kameniva. Spotřeba kameniva v posledních deseti letech na území ČR významně roste, což má za důsledek znatelný úbytek disponibilních zásob na ložiskách stavebního kamene. I když těžba stavebních surovin nadále roste, nepřetržité zásobování stavebním kamenem je dlouhodobě neudržitelné. Řešení nelze hledat ani v dovozu kameniva ze zahraničí, kde také začíná docházet nedostatku stavebních materiálů.

Dílčím řešením je užívání hrubozrnějších zrn kameniva do podkladních vrstev vozovek, které by byly schopny nahradit nedostatkové frakce, aniž by zhoršovaly vlastnosti asfaltové směsi (například ACP 32). Další možností je větší využití R-materiálu v asfaltových směsích, jehož maximální dávkování se, díky nově vydané normě ČSN 73 6121, značně navýšilo. U brusných vrstev typu asfaltový beton (ACO) se jeho nejvyšší přípustný obsah zvýšil až na 35 % hmotnosti asfaltové směsi, u ložních vrstev (ACL) až na 50 % a u podkladních vrstev (ACP) až na 60 % hmotnosti asfaltové směsi. Do asfaltové vrstvy typu asfaltový koberec mastixový (SMA) nebylo doposud možné přidávat žádný R-materiál, díky nově vydané normě ČSN 73 6121 může nyní směs SMA obsahovat 10-15 % R-materiálu. Bohužel i přes tyto pozitivní změny nelze počítat s tím, že je recyklace řešením problému nedostatku kameniva v České republice. Jediným možným řešením problému nedostatku kameniva je vyhledání a otevření nových kamenolomů v České republice. [8] [10]

2 Cíle diplomové práce

Hlavním cílem této diplomové práce je návrh vhodné asfaltové směsi typu asfaltový beton pro podkladní vrstvy (ACP) s maximálním zrnem kameniva 32 mm. Jelikož tento typ hrubozrnné asfaltové směsi není v českých normách popsán, bude jako podklad pro návrh využita švýcarská norma SN 640 431-1b-NA. [11]

Dalším cílem bude určení vlivu množství polymerem modifikovaného pojiva OMV Starfalt PMB 25/55-65 (3,7 %, 4,2 %, 4,7 %) na vlastnosti nově navržené směsi ACP 32.

Ke zkoumání vlastností této směsi budou na zkušebních deskách provedeny tyto laboratorní zkoušky:

- stanovení modulu tuhosti dvoubodovou zkouškou ohybem na komolých klínech dle ČSN EN 12697-26,
- ověření nízkoteplotních vlastností pomocí jednoosé zkoušky tahem (TSRST) dle ČSN EN 12697-46,
- zkouška pojíždění kolem k ověření odolnosti směsi proti vzniku trvalých deformací dle ČSN EN 12697-22.

3 Použité zkušební metody

V této kapitole budou představeny zkušební metody, které byly využity v rámci zpracování praktické části diplomové práce.

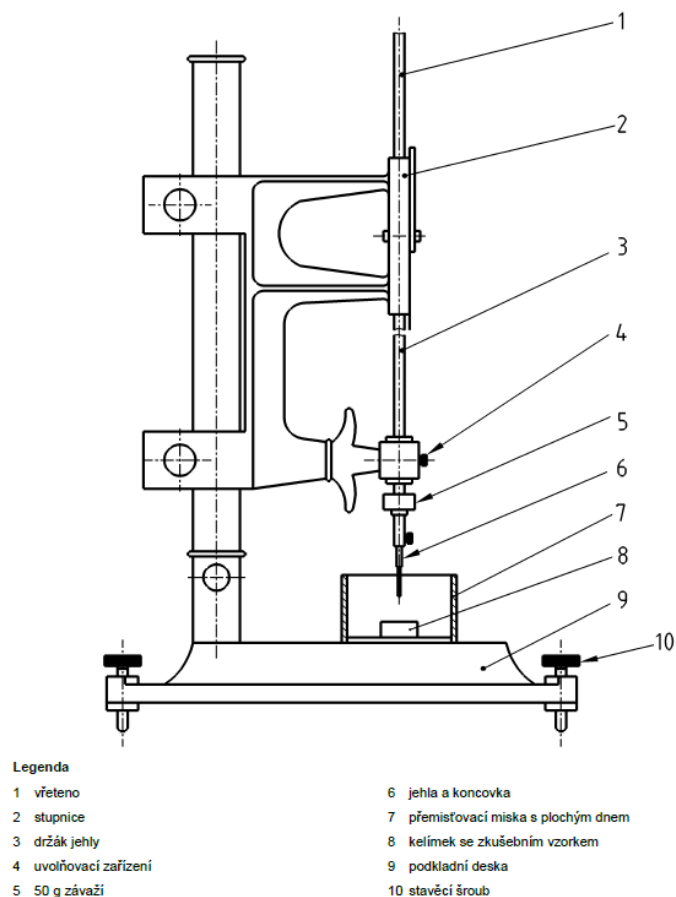
3.1 Stanovení penetrace jehlou

Přesný postup této zkoušky je popsán v normě ČSN EN 1426 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou. Tato zkouška slouží k určení tvrdosti pojiva a její výsledky určují označení asfaltů.

Princip zkoušky spočívá v měření hloubky průniku jehly do analytického asfaltového vzorku, který je předem vytemperován na teplotu 25 °C, přičemž na něj působí zatížení 100 g po dobu 5 sekund. Hodnota penetrace je vyjádřena v penetračních jednotkách (1 p.j. = 0,1 mm). [12]

3.1.1 Přístroje a pomůcky

Pro měření penetrace jsou nutné následující přístroje a pomůcky: penetrometr, penetrační jehla, kelímek pro zkušební vzorek, přenosná miska, vodní lázeň s konstantní teplotou, zařízení pro měření teploty a času. Na obrázku 5 je znázorněno schéma přístroje ke stanovení penetrace – penetrometr. [12]



Obrázek 5. Schéma penetrometru [12]

3.1.2 Postup zkoušky

Nejdříve je potřeba nalít nahřátý vzorek asfaltového pojiva do nádoby a připravit penetrační jehlu a přístroj pro stanovení penetrace, který se nazývá penetrometr. Poté se vzorek pojiva nechá zchladnout na laboratorní teplotu a následně se temperuje ve vodní lázni na teplotu 25 °C. Po vytemperování na zkušební teplotu se vzorek umístí do penetrometru. Penetrační jehla se očistí toluenem nebo jiným vhodným rozpouštědlem, osuší hadříkem a vloží do držáku.

Zkouška se provádí ve vodní lázni s konstantní teplotou 25 °C, do které vložíme vzorek se zkoušeným pojivem. Jehla zatížena závažím o hmotnosti $(50 \pm 0,05 \text{ g})$ se pomalu snižuje do doby, než se její hrot dotkne povrchu zkoušeného vzorku. Poté se držák jehly rychle uvolní a nechá penetrovat po dobu 5 sekund. Změří se hloubka penetrace jehly s přesností 0,1 mm. Musí se provést nejméně tři platná měření na místech vzorku, která jsou vzdálena od sebe a hran kelímku minimálně 10 mm. [12] [13]

3.1.3 Výpočet

Hodnota penetrace se získá aritmetickým průměrem všech platných měření. Pokud rozsah naměřených hodnot nepřekročí hodnoty v následující tabulce 1, je zkouška platná. [12]

Tabulka 1. Maximální rozdíl platných stanovení

Maximální rozdíl platných stanovení				
Penetrace [p.j.]	do 49	50–149	150–249	250 a výše
Maximální rozdíl mezi nejvyšším a nejnižším stanovením	2	4	6	8

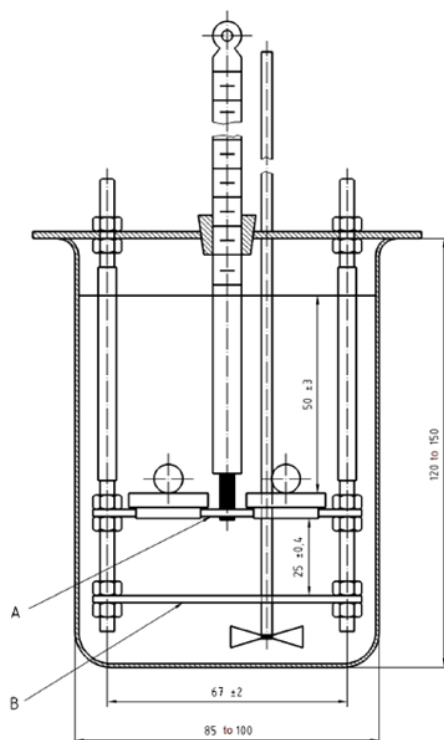
3.2 Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička

Přesný popis zkoušky je popsán v normě ČSN EN 1427 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička. Tato norma lze použít pro asfaltová pojiva, která mají bod měknutí v rozsahu od 28 °C do 150 °C. Bod měknutí asfaltového pojiva je definován jako teplota, při které materiál dosáhne za normalizovaných zkušebních podmínek určité konzistence. [14]

Podstatou této zkoušky je stanovení teploty, při které asfaltové pojivo změkne tak, že ocelová kulička umístěna na vrstvě asfaltu o tloušťce 6,4 mm protáhne vrstvu asfaltu na délku 25 mm. [14]

3.2.1 Přístroje a pomůcky

Ke stanovení bodu měknutí metodou kroužek a kulička je potřeba zkušební zařízení složeno z dvou mosazných kroužků, dvou kuliček z korozivzdorné oceli, odlévací destičky, středícího prstence pro kuličky, skleněné kádinky, držáků kroužků, zařízení pro měření teploty a míchadla. Schéma této sestavy je zobrazeno na obrázku 6. [14]



Obrázek 6. Zkušební sestava dvou kroužků s držákem kroužků a základní deskou [14]

3.2.2 Příprava vzorku

Nejprve se zkoušené asfaltové pojivo odebere a nahřeje společně také se dvěma mosaznými kroužky o vnitřním průměru $15,9 \pm 0,1$ mm, které se poté umístí na odlévací destičku potřenou separačním prostředkem např. glycerinem. Do dvou kroužků se následně nalije nadbytek zahřátého asfaltového pojiva a chladí se při laboratorní teplotě po dobu nejméně 30 minut. Poté, co zkušební vzorky zchladnou, se nahřátým nožem seřízne nadbytečné pojivo. [14]

3.2.3 Postup zkoušky

Následně se asfaltem naplněné kroužky umístí do soustavy se středícím zařízením pro kuličky a teploměrem. Hladina vodní lázně v kádince, o vnitřním průměru nejméně 85 mm, musí dosahovat takové výšky, aby byl její povrch 50 ± 3 mm nad horním okrajem kroužků. Poté se kádinka se vzorky zchladí přidáním odvzdušněné vody o teplotě 5 °C a pomocí chemických kleští se obě kuličky z korozivzdorné oceli umístí do středícího zařízení. Zkontroluje se počáteční teplota, která musí být stejná jako teplota celé sestavy a do lázně se umístí magnetické míchadlo, které slouží k rovnoměrnému rozdělení tepla ve vodní lázni. Následně se takto připravená sestava vloží do automatického zařízení pro

stanovení bodu měknutí zobrazeného na obrázku 7. Kapalina se ze spodu rovnoměrně zahřívá tak, aby její teplota rostla rychlostí 5 °C/min.



Obrázek 7. Automatické zařízení pro stanovení bodu měknutí

Přístroj automaticky zaznamená teplotu lázně, při které se jednotlivé kuličky propadnou o 25 mm. Rozdíl mezi teplotami propadu jednotlivých kuliček nesmí být větší než 1 °C u nemodifikovaných asfaltů a 2 °C u modifikovaných asfaltů. Výsledná teplota bodu měknutí se stanoví jako aritmetický průměr teplot zaokrouhlených na 0,2 °C. [13] [14]

3.3 Sítový rozbor

Přesná definice této zkoušky je popsána v normě ČSN EN 933-1 Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor. Tato evropská norma popisuje referenční způsob praní a prosévání za sucha, který se používá při zkouškách typu a také pro stanovení zrnitosti kameniva. [15]

Podstatou zkoušky je roztržení a oddělení materiálu do frakcí pomocí sady sít se zmenšující se velikostí otvorů. Velikosti sít a jejich otvorů jsou voleny na základě požadované přesnosti a druhu vzorku. Pomocí této zkoušky je následně možné sestavit křivku zrnitosti vzorku kameniva. [15]

3.3.1 Přístroje a pomůcky

K provedení této zkoušky jsou zapotřebí tyto pomůcky a přístroje: třesací zařízení (viz obrázek 8), zkušební síta, pevně líčující víko a dno sít, sušárna s ventilací (musí mít termostatické ovládání pro udržování teploty $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$), prací zařízení, váhy s požadovanou přesností $\pm 0,1 \%$ hmotnosti navážky, nádoby a štětce. [15]



Obrázek 8. Třesací zařízení pro síťový rozbor [16]

3.3.2 Postup zkoušky

Nejdříve se zkušební navážka suší v sušárně s ventilací při teplotě $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ do doby, než dosáhne tzv. ustálené hmotnosti, což znamená, že se zkušební navážka zváží, následně se opět vloží do sušárny na 15 minut. Po uplynutí této doby se vzorek opět zváží a pokud je rozdíl hmotností mezi prvním a druhým vážením menší než $0,1 \%$, hmotnost je ustálena. Vychladlé kamenivo se zváží na laboratorních vahách s přesností $\pm 0,1 \%$ hmotnosti navážky a zaznamená se hmotnost (M_1).

Následně je provedeno tzv. praní navážky, při kterém je materiál ponořen do nádoby s dostatečným množstvím vody a je promícháván dostatečnou silou tak, aby došlo ke kompletnímu oddělení jemných částic menších než $0,063 \text{ mm}$. Navážka se pere tak dlouho, dokud přes síto $0,063 \text{ mm}$ neodtéká pouze čirá voda. Z důvodu ochrany se přes síto $0,063 \text{ mm}$ používá síto s většími otvory ok, například 1 mm nebo 2 mm . Zachycený materiál na sítu $0,063 \text{ mm}$ se znovu vysuší na ustálenou hmotnost při teplotě $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$, zváží a zaznamená se jeho hmotnost (M_2).

Vypraná a vysušená navážka se nasype na sadu sít, které jsou sestaveny sestupně podle velikosti otvorů ok na sítu. Jelikož se praním všechny jemné částice zpravidla neodstraní, je nutné do sady sít zařadit také zkušební síto 0,063 mm. Sloupec sít obsahuje pevně líčující víko a také dno, které se nachází vespod, na které propadávají jemné částice menší než 0,063 mm. Na třesacím zařízení se poté nastaví intenzita vibrací a zařízení se zapne. Zkouška se ukončí po několika minutách a jednotlivá síta se postupně odeberou. Následně se pomocí štětců a kartáčů materiál přesype do misek a zjistí se hmotnost materiálu na jednotlivých sítích ($R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$). Zbylý materiál na dně, který propadl přes síto 0,063 mm, se zváží a zapíše se jeho hmotnost (P).

Ze zjištěných hmotností zůstatků na jednotlivých sítích, které se procentuálně vyjádří k hmotnosti původní navážky (M_1), se stanoví propady na jednotlivých sítích, ze kterých se stanoví křivka zrnitosti. Jednotlivé body na této křivce udávají, kolik procent z celkové hmotnosti navážky činí hmotnost zrn menších než průměr zrna d v milimetrech. [15] [17] [18]

Výpočet pro určení procenta jemných částic f , které propadly sítím 0,063 mm, podle rovnice 1:

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

M_1 Hmotnost vysušené zkušební navážky [kg]

M_2 Hmotnost vysušeného zůstatku na síti 0,063 mm [kg]

P Hmotnost propadu jemných částic na dně [kg]

Rovnice 1. Výpočet procenta propadu jemných částic

3.4 Stanovení objemové hmotnosti hydrostatickým vážením

Přesný popis této zkoušky je uveden v normě ČSN EN 12697–6 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa. Tato norma popisuje čtyři různé postupy stanovení objemové hmotnosti ztuhlého asfaltového zkušebního tělesa v závislosti na obsahu a přístupnosti dutin. Pro tuto diplomovou práci byl použit postup pro tělesa s uzavřeným povrchem (Nasycený suchý povrch (SSD)).

Podstatou postupu SSD je stanovení objemové hmotnosti tělesa na základě hmotností získaných při vážení tělesa na suchu, pod vodou a ze vzorku nasyceného vodou s osušeným povrchem. [17] [19]

3.4.1 Přístroje a pomůcky

Ke stanovení objemové hmotnosti metodou SSD jsou potřeba tyto přístroje a pomůcky: Váhy, které umožňují vážení zkušební tělesa na vzduchu a ve vodě (např. pomocí drátěného košíku), a které mají zároveň přesnost vážení 0,1 g pro hmotnosti do 5 kg a 1 g pro hmotnosti nad 5 kg. Vodní lázeň, udržující stálou teplotu v rozmezí $\pm 1,0$ °C, teploměr s přesností $\pm 0,5$ °C a vlhká jelenice pro povrchové osušení tělesa. [17] [19]

3.4.2 Příprava vzorku

Zkušební těleso se v případě nutnosti očistí okartáčováním nebo omytím. Poté se těleso vysuší do tzv. konstantní hmotnosti, což znamená, že rozdíl mezi dvěma váženími provedenými po sušení v intervalu nejméně jedné hodiny se neliší o více než 0,1 %. [19]

3.4.3 Postup zkoušky

Nejdříve se stanoví hmotnost suchého zkušební tělesa (m_1) na laboratorních vahách s přesností $\pm 0,1$ g.



Obrázek 9. Stanovení hmotnosti m_1

Následně se stanoví hustota vody (ρ_w) na základě její teploty, která se zjistí teploměrem s přesností $\pm 0,5$ °C. Poté se zkušební těleso ponoří do vodní lázně, která udržuje stálou teplotu vody v rozmezí $\pm 1,0$ °C. Po uplynutí nejméně třiceti minut, kdy ze zkušebního tělesa již neunikají žádné vzduchové bubliny, se nasycený vzorek vloží do drátěného košíku ve vodě a zváží (m_2).



Obrázek 10. Stanovení hmotnosti m_2

Po zvážení se těleso vyjme z vody, povrchově osuší vlhkou jelenicí a ihned se stanoví hmotnost osušeného nasyceného tělesa (m_3). [17] [19]



Obrázek 11. Stanovení hmotnosti m_3

3.4.4 Výpočet

Objemová hmotnost zkušební vzorku se vypočte dle rovnice č. 2:

$$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w$$

ρ_{bssd}	Objemová hmotnost vzorku (SSD) [kg/m ³]
m_1	Hmotnost suchého tělesa [kg]
m_2	Hmotnost tělesa ve vodní lázni [kg]
m_3	Hmotnost tělesa nasyceného a povrchově osušeného [kg]
ρ_w	Hustota vody při zkušební teplotě [kg/m ³]

Rovnice 2. Výpočet objemové hmotnosti metodou SSD [17]

3.5 Stanovení maximální objemové hmotnosti volumetrickým postupem

Přesná definice této zkoušky je popsána v normě ČSN EN 12697-5 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti. Tato norma určuje metody pro stanovení maximální objemové hmotnosti asfaltové směsi, která neobsahuje žádné mezery. V této normě jsou popsány celkem tři druhy různých postupů, v této diplomové práci byl využit postup volumetrický.

U tohoto postupu je maximální objemová hmotnost zkoušené asfaltové směsi určena z objemu vzorku bez mezer a jeho suché hmotnosti. Objem zkoušené směsi se stanoví jako objem vody vytěsněné vzorkem v pyknometru. [18] [20]

3.5.1 Přístroje a pomůcky

Pro zjištění maximální objemové hmotnosti jsou zapotřebí tyto přístroje a pomůcky: vakuová nádoba, sušárna s nucenou ventilací udržující teplotu okolo vzorků v rozmezí (110 ± 5) °C, pyknometr, jehož objem musí vzorek zaujímat maximálně ze 2/3, vývěva s manometrem nebo kalibrovaným vakuometrem, která umožňuje vytěsnění vzduchu z pyknometru, dále váhy s přesností 0,1 g pro hmotnosti do 5 kg, špachtle, teploměr a vodní lázeň, která je schopna udržovat rovnoměrnou teplotu v okolí vzorku v rozmezí $\pm 0,2$ °C. [17] [20]

3.5.2 Příprava vzorku

Zhutněná zkušební tělesa se nejdříve očistí okartáčováním nebo umytím a následně vloží do sušárny s nucenou ventilací, kde se vysuší do konstantní hmotnosti (viz kapitola 3.4.2). Nakonec se tělesa rozdělí na hrubé částice a shluky. Průběh tohoto procesu je vidět na obrázku 12. [20]



Obrázek 12. Rozdělování těles na hrubé částice a shluky



Obrázek 13. Pyknometr naplněný zkušebním vzorkem

3.5.3 Postup zkoušky

Po zahřátí zkušební asfaltové směsi v sušárně na teplotu $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ se vzorek pomocí špachtle rozdrobí na shluky o velikosti maximálně 6 mm. Mezitím se na laboratorních vahách stanoví hmotnost prázdného pyknometru s nástavcem (m_1) o známém objemu (V_p). Poté se vzorek umístí do pyknometru a nechá se temperovat na okolní teplotu. Následně se vytemperovaný pyknometr se zkušebním vzorkem (viz obrázek 13) opět zváží (m_2), pyknometr se naplní odvzdušněnou vodou maximálně 30 mm pod okraj a umístí do vakuové nádoby (viz obrázek 14), čímž se odstraní zachycený vzduch.



Obrázek 14. Vakuová nádoba

Po opatrném naplnění odvzdušněnou vodou se nástavec pyknometru nasadí na referenční značku tak, aby nedošlo k vniknutí vzduchu. Takto naplněný pyknometr se temperuje ve vodní lázni s rovnoměrnou zkušební teplotou $\pm 1,0 \text{ }^\circ\text{C}$ po dobu nejméně 30 minut, nejdéle však 180 minut, aby se teploty ve vodní lázni a v pyknometru vyrovnaly. Po temperaci se do pyknometru doplní odvzdušněná voda, která je vytemperována na stejnou teplotu jako vodní lázeň, až po značku na nástavci. Poté se pyknometr vyjme z vodní lázně, osuší a stanoví jeho hmotnost (m_3). [17] [20]

3.5.4 Výpočet

Maximální objemová hmotnost zkoušeného vzorku ρ_{mv} je dána následujícím vztahem (viz rovnice 3):

$$\rho_{mv} = \frac{m_2 - m_1}{V_p - \left(\frac{m_3 - m_2}{\rho_w}\right)}$$

ρ_{mv}	Maximální objemová hmotnost asfaltové směsi [kg/m^3]
m_1	Hmotnost prázdného pyknometru s nástavcem [kg]
m_2	Hmotnost pyknometru s nástavcem včetně vzorku [kg]
m_3	Hmotnost pyknometru s nástavcem včetně vzorku a vody [kg]
ρ_w	Hustota vody při zkušební teplotě [kg/m^3]
V_p	Objem pyknometru naplněného po referenční značku [m^3]

Rovnice 3. Výpočet pro stanovení maximální objemové hmotnosti [18]

3.6 Stanovení mezerovitosti

Postup výpočtu mezerovitosti asfaltové směsi je uveden v normě ČSN EN 12697-8 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 8: Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí. Mezerovitost vyjadřuje objem mezer v asfaltovém zkušebním tělese vyjádřený procentuálně k jeho celkovému objemu. [21]

3.6.1 Výpočet

Mezerovitost asfaltového zkušební vzorku se vypočítá pomocí níže uvedeného vztahu (viz rovnice 4):

$$V_a = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \times 100$$

V_a	Mezerovitost zkušební tělesa s přesností na 0,1 % [%]
ρ_m	Maximální objemová hmotnost asfaltové směsi [kg/m^3]
ρ_b	Objemová hmotnost zkušební tělesa [kg/m^3]

Rovnice 4. Výpočet mezerovitosti asfaltového zkušební vzorku [19]

3.6.2 Volumetrické charakteristiky

Po zjištění mezerovitostí V_a jednotlivých směsí byla následně určena také mezerovitost směsi kameniva VMA (viz rovnice 5) a stupeň vyplnění mezer pojivem VFB dle rovnice 6. [21]

$$VMA = V_a + \frac{B \times \rho_{bssd}}{\rho_B}$$

Rovnice 5. Výpočet mezerovitosti směsi kameniva VMA

$$VFB = \frac{B \times \rho_{bssd} \times 100}{\rho_B \times VMA}$$

VMA	Mezerovitost směsi kameniva [%]
VFB	Stupeň vyplnění mezer pojivem [%]
V_a	Mezerovitost zkušební tělesa s přesností 0,1 % [%]
B	Obsah pojiva ve zkušebním tělese [%]
ρ_{bssd}	Objemová hmotnost zkušební tělesa [kg/m^3]
ρ_B	Hustota asfaltového pojiva [kg/m^3]

Rovnice 6. Výpočet stupně vyplnění mezer pojivem VFB

3.7 Míra zhutnění dle ČSN 73 6121

Míra zhutnění vyjadřuje podíl mezi objemovými hmotnostmi asfaltové desky a Marshallovým tělesem v procentech. Hodnota míry zhutnění musí být $100 \% \pm 1 \%$.

3.7.1 Výpočet

Výpočet míry zhutnění se stanoví podle rovnice 7.

$$c = \frac{\rho_{bssd,1}}{\rho_{bssd,2}} \times 100$$

c	Míra zhutnění desky [%]
$\rho_{bssd,1}$	Objemová hmotnost desky [kg/m^3]
$\rho_{bssd,2}$	Objemová hmotnost Marshallova tělesa [kg/m^3]

Rovnice 7. Výpočet míry zhutnění asfaltové desky [20]

3.8 Hutnění Marshallových těles rázovým zhutňovačem

Hutnění Marshallových těles probíhá dle normy ČSN EN 12697-30 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem. Asfaltová směs nahřátá na 160 °C se nasype do předepsané ocelové hutnicí formy, kde se zhutní v rázovém zhutňovači pomocí hutnicího berana pěchu, který padá z předepsané výšky a počtem úderů (2 x 50 úderů). Takto zhutněné zkušební těleso se následně nechá vychladnout na laboratorní teplotu. [22]

3.8.1 Přístroje a pomůcky

Ke zhutnění Marshallových těles je zapotřebí sušárna pro ohřev kameniva a asfaltového pojiva, rázový zhutňovač s dřevěným blokem (viz obrázek 15), který obsahuje podstavec zhutňovače, hutnicí pěch o celkové hmotnosti 7850 ± 50 g složený z hutnicího beranu a bicí hlavy. Sestava bicí hlavy se skládá z pružiny a vinuté tlakové pružiny z kalené a popouštěné oceli. Dále je potřeba forma pro hutnění složená z nástavce, válcové formy a podložky. [22]



Obrázek 15. Rázový zhutňovač s dřevěným blokem

3.8.2 Příprava vzorku

Válcové zkušební těleso má tvar válce o průměru $101,5 \pm 0,1$ mm a výšku $63,5 \pm 2,5$ mm. Na jedno Marshallovo těleso je potřeba 1050 g až 1400 g asfaltové směsi. Aby se zajistilo, že těleso bude mít požadovanou výšku ($63,5 \pm 2,5$ mm), provede se tzv.

pokusné hutnění, po kterém se stanoví hmotnost jednotlivých navážek pro další výrobu Marshallových těles.

Následně se tyto navážky nahřejí v sušárně na požadovanou teplotu hutnění 160 °C společně s hutnicí formou a podložkou bicí hlavy plechu. [22]

3.8.3 Postup zkoušky

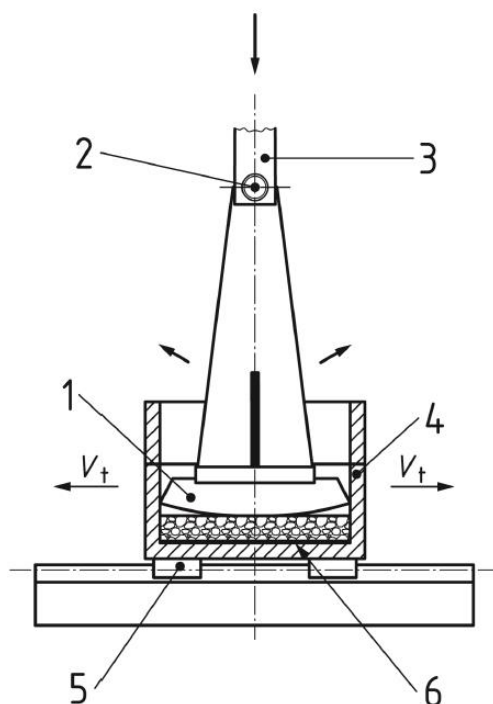
Po nahřátí jednotlivých navážek a pomůcek se na podložku umístí separační kolečko z papíru. Nahřátá asfaltová směs se poté plní přes plechovou násypku do hutnicí formy, kde se po třetinách srovná a jemně zhutní špachtlí, aby nedocházelo k segregaci směsi. Po naplnění formy se směs urovná a umístí se na ni separační kolečko z papíru.

Na takto připravenou formu se nasadí nástavec pro hutnění a vloží se do rázového zhutňovače s dřevěným blokem. Toto hutnicí zařízení hutní zkušební těleso 50 údery nejprve z jedné strany, poté se forma otočí a zkušební těleso se znovu hutní 50 údery. Hutnicí beran pěchu dopadá na zkušební těleso z výšky (457 ± 5) mm. Následně se forma se zkušebním tělesem vyjme, z obou stran se odeberou separační kolečka a zkušební těleso se zchladí na laboratorní teplotu. [17] [22]

3.9 Hutnění asfaltových desek segmentovým zhutňovačem

Hutnění asfaltových desek je specifikováno v normě ČSN EN 12697-33+A1 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 33: Příprava zkušebních těles zhutňovačem desek. Tato norma popisuje metody hutnění zkušebních desek z asfaltové směsi určených přímo k následnému zkoušení nebo vyřezání zkušebních těles.

Pro tuto práci byla vybrána metoda, jejíž podstatou je hutnění vzorků v obdélníkové ocelové formě pomocí segmentového zhutňovače. Schéma tohoto zařízení je znázorněno na obrázku 16. [23]



Obrázek 16. Schéma segmentového zhutňovače vzorků [23]

Legenda

- | | |
|---------------------|---|
| 1 – segment válce | 4 – zhutňovací forma |
| 2 – střed rotace | 5 – vodící koleje, umožňující posun při hutnění |
| 3 – zatěžovací píst | 6 – ocelová deska, součást odformovacího vybavení |

3.9.1 Přístroje a pomůcky

Pro metodu hutnění využívající segmentový zhutňovač jsou potřeba tyto přístroje a pomůcky: segmentový zhutňovač složený z obdélníkové ocelové zhutňovací formy a segmentu válce, který replikuje zhutňovací běhoun válce a zatěžovací zařízení umožňující svislý pohyb zatěžovacího pístu režimem řízené síly a řízené výchylky. Píst musí umožňovat svislý pohyb ke zhutnění desky na požadovanou tloušťku. Segmentový zhutňovač asfaltových desek je znázorněn na obrázku 17. [23]



Obrázek 17. Segmentový zhutňovač desek

3.9.2 Příprava vzorku

Před hutněním je potřeba zjistit hmotnost navážky na jednu desku. Ta se stanoví pomocí rozměrů asfaltové desky a objemové hmotnosti zjištěné z Marshallových těles dle následující rovnice 8.

$$M = L \times l \times e \times \rho \times 10^{-6}$$

M	Hmotnost potřebné navážky na jednu desku [kg]
L	Vnitřní délka formy [mm]
l	Vnitřní šířka formy [mm]
e	Konečná tloušťka desky bez plechu [mm]
ρ	Objemová hmotnost zjištěná z Marshallových těles [kg/m^3]

Rovnice 8. Výpočet hmotnosti navážky na jednu desku [22]

Po zjištění této hmotnosti se navážka vloží do sušárny, kde se nahřeje na teplotu hutnění 160 °C. Mezitím se nahřeje také segmentový zhutňovač, do kterého se vloží hutnicí forma a natře se separačním prostředkem. Takto nahřátý vzorek a hutnicí zařízení jsou připraveny na hutnění. [23]

3.9.3 Postup zkoušky

Po nahrání navážky na teplotu hutnění 160 °C se asfaltová směs postupně vsype do připravené hutnicí formy natřené separačním prostředkem. Po lehkém urovnání směsi špachtlí se na povrch umístí např. pečicí papír, aby nedošlo k přilepování asfaltové směsi k segmentu válce a zhutňovač se zapne.

Segmentový zhutňovač kombinuje předhutnění řízené výškou a hlavní hutnění řízené silou. Předhutnění se používá ke srovnání povrchu desky, kdy během každého pojezdu válce se válec sníží o $0,5 \pm 0,1$ mm. Tato první část hutnění probíhá, dokud svislé zatížení nedosáhne hodnoty 10 ± 1 N/mm šířky desky. Po dosažení této hodnoty se válec udržuje ve stejné výšce pro 5 dalších pojezdů.

Následuje hlavní hutnění, jehož svislá síla je během hutnění řízena. V této fázi jsou použity následující 3 typy pojezdů válce:

1. Nivelace – 15 pojezdů válce s konstantní silou 2 ± 1 N/mm šířky desky
2. Hutnění – 15 pojezdů válce s rostoucí silou 5 ± 1 N/mm šířky desky za jeden pojezd válce až do dosažení požadované tloušťky desky
3. Odtížení – 15 pojezdů válce s klesající silou 5 ± 1 N/mm šířky desky za jeden pojezd válce

Nakonec se zhutněná deska vyjme z formy a nechá vychladnout na laboratorní teplotu. [23]

3.10 Stanovení modulu tuhosti

Zkouška pro získání modulu tuhosti je uvedena v normě ČSN EN 12697-26 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 26: Tuhost. Tato norma popisuje hned několik zkušebních metod pro stanovení modulu tuhosti. Vzhledem k vybavení laboratoře ústavu pozemních komunikací FAST VUT byla vybrána dvoubodová zkouška za ohybu na jednostranně vetknutém trapezoidu – 2PB-TR.

Podstatou této zkoušky je stanovení tuhosti vzorku asfaltové směsi při působení krátkodobého harmonického sinusového zatížení $F = F_0 \cdot \sin(\omega \cdot t)$ o předepsaných frekvencích a teplotách. Výsledná tuhost tělesa simuluje přibližné chování asfaltové směsi ve vozovce. Komplexní modul tuhosti E^* byl stanoven při frekvencích 1 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz, 27 Hz a 30 Hz při třech různých zkušebních teplotách (10 °C, 15 °C, 20 °C). [24] [25]

3.10.1 Přístroje a pomůcky

Pro stanovení tuhosti asfaltové směsi jsou potřebné tyto přístroje a pomůcky: zkušební zařízení, které dokáže vyvodit sinusový dynamický průhyb, odvětrávanou termostatickou komoru, která umožňuje stálou teplotu proudu vzduchu v blízkosti tělesa na $\pm 0,5$ °C. Dále snímače pro měření dynamické síly s přesností ± 3 %, průhybu se schopností měření průhybu až do 0,2 mm a snímač pro měření fázového úhlu s přesností $\pm 1^\circ$. [24]

3.10.2 Příprava vzorku

Z každé ze zhotovených zkušebních desek ACP 32 o rozměrech 260 x 320 x 60 mm se pomocí kotoučové diamantové pily vytvoří minimálně čtyři zkušební tělesa ve tvaru trapezoidu o rozměrech 70 x 25 x 50 x 250 mm ($B \times b \times e \times h$) dle ČSN EN 12697-26 a následně se obrousí (viz obrázek 18).

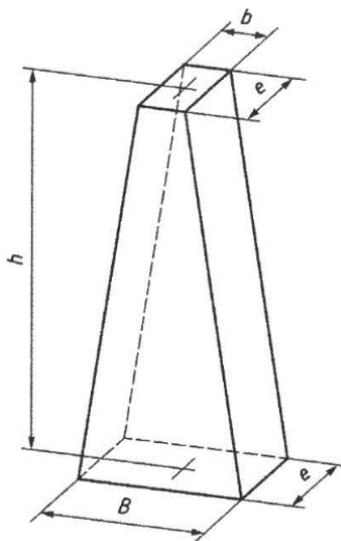
Legenda

B – šířka dolní podstavy

b – šířka horní podstavy

e – tloušťka trapezoidu

h – výška trapezoidu



Obrázek 18. Schéma rozměrů zkušebního trapezoidu [24]

Takto obroušená zkušební tělesa ke zkoušce stanovení modulu tuhosti jsou zobrazena na obrázku 19.



Obrázek 19. Nařezaná a obroušená zkušební tělesa

Následně se na obě podstavy zkušebního tělesa nalepí kovové destičky pomocí dvousložkového epoxidového lepidla (lepidlo, epoxid). Po vytvrdnutí dvousložkového lepidla je zkušební těleso připraveno na zkoušku. Nalepené zkušební vzorky jsou zobrazeny na obrázku 20.



Obrázek 20. Nalepená zkušební tělesa (trapezoidy)

3.10.3 Postup zkoušky

Zkušební vzorky se vloží do termostatické komory, která je schopna pojmout až čtyři vzorky najednou, upevní se pomocí šroubů a zařízení se zapne, viz obrázek 21. Použitá termostatická komora je schopna automaticky měnit požadované frekvence i teplotu. Pro tuto zkoušku byly zvoleny frekvence 1 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz, 27 Hz a 30 Hz při třech různých zkušebních teplotách (10 °C, 15 °C, 20 °C). [24]



Obrázek 21. Upevněné zkušební vzorky v termostatické komoře

Vzorky jsou v komoře vystaveny harmonické (sinusové) síle požadované frekvence s přesností na $\pm 5\%$, která působí na jejich volný konec po dobu minimálně 30 sekund a maximálně 2 minut při průhybu odpovídajícímu přetvoření ϵ menšímu než 50 mikrostrain. [24] [25]

3.10.4 Výpočet

Obecně se modul tuhosti E stanoví podle níže uvedeného vztahu (viz rovnice 9), která popisuje závislost mezi maximálním napětím σ a maximálním naměřeným přetvořením ε .

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

E	Modul tuhosti [MPa]
σ	Maximální napětí [MPa]
ε	Maximální přetvoření [-]

Rovnice 9. Výpočet modulu tuhosti E [23]

Jelikož má asfaltová směs visko-elastické vlastnosti, je potřeba vztah mezi napětím σ a přetvořením ε doplnit také o fázový úhel posunu φ , který má za následek posun amplitudy přetvoření v porovnání s průběhem napětí. Takto doplněný modul tuhosti se nazývá komplexní modul tuhosti E^* . [24] [25]

Komplexní modul tuhosti E^* získáme součtem dvou složek, reálného komplexního modulu tuhosti E_1 (viz rovnice 10) a imaginárního komplexního modulu tuhosti E_2 (viz rovnice 11).

$$E_1 = \gamma \times \left(\frac{F}{z} \times \cos(\varphi) + 10^{-6} \times \mu \times \omega^2 \right)$$

E_1	Reálná složka komplexního modulu tuhosti [MPa]
F	Zatěžovací síla
z	Posun [mm]
μ	Faktor hmotnosti [g]
ω	Úhlová rychlost [rad/s]
φ	Fázový úhel posunu [°]
γ	Faktor tvaru [mm ⁻¹]

Rovnice 10. Výpočet reálné složky komplexního modulu tuhosti E_1 [23]

$$E_2 = \gamma \times \frac{F}{z} \times \sin(\varphi)$$

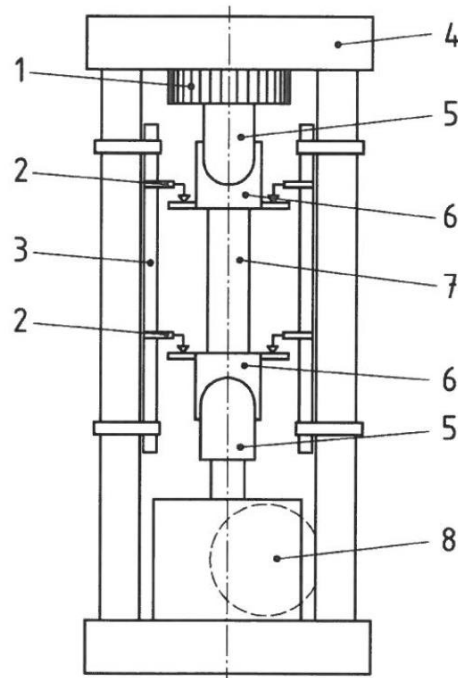
E_2	Imaginární složka komplexního modulu tuhosti [MPa]
F	Zatěžovací síla
z	Posun [mm]
φ	Fázový úhel [°]
γ	Faktor tvaru [mm ⁻¹]

Rovnice 11. Výpočet imaginární složky komplexního modulu tuhosti E_2 [23]

3.11 Nízkoteplotní vlastnosti

Přesná definice zkoušení nízkoteplotních vlastností asfaltových směsí je uvedena v normě ČSN EN 12697-46 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 46: Nízkoteplotní vlastnosti a tvorba trhlin. [26]

Cílem této zkoušky je určení charakteristik odolnosti asfaltové směsi vůči tvorbě trhlin při nízkých teplotách pomocí jednoosé zkoušky tahem s rovnoměrným řízeným poklesem teploty (TSRST). Vlivem zamezovaného tepelného smršťování vzniká ve zkušební tělese kryogenní napětí. Výsledkem zkoušky TSRST je šíření kryogenního napětí při teplotě $\sigma_{cry(T)}$ a napětí při porušení $\sigma_{cry, failure}$ při teplotě $T_{failure}$, při které se vzorek poruší. Zatěžovací zařízení je zobrazeno na obrázku 22. [26] [27]



Obrázek 22. Schéma zatěžovacího zařízení [26]

Legenda

- | | |
|---------------------------------------|-----------------------------------|
| 1 – silový tenzometrický snímač | 5 – kardanový závěs |
| 2 – snímač posunu | 6 – čelist |
| 3 – tepelně nezávislá měřící základna | 7 – zkušební těleso |
| 4 – příčný trám | 8 – převodovka s krokovým motorem |

3.11.1 Přístroje a pomůcky

Ke zjištění nízkoteplotních vlastností zkušební vzorku jsou potřeba tyto přístroje a pomůcky: zatěžovací zařízení schopné vyvinout pohyby s přesností $0,1 \mu\text{m}$, systém schopen měřit deformace vzorku v rozsahu od $\pm 2,5 \text{ mm}$ do $\pm 0,5 \mu\text{m}$, systém měření zatížení, který monitoruje axiální zatížení s přesností $\pm 0,01 \text{ kN}$ nebo lepší. Dále záznamové zařízení, které je schopno zaznamenávat a monitorovat elektrické signály snímačů zatížení a deformace, a také termostatickou komoru – skříň s nuceným oběhem vzduchu, která umožňuje teplotu od $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ do $+30 \text{ }^\circ\text{C}$. [26]

3.11.2 Příprava vzorku

Zkušební vzorky se získají vyřezáním z vyrobených asfaltových desek pomocí kotoučové diamantové pily. Vzdálenost zkušební vzorku od okraje desky musí být alespoň 20 mm . Pro zajištění přesných rozměrů zkušební vzorku ($50 \times 50 \times 200 \text{ mm}$) se všechny čtyři strany hranolu obrousí (viz obrázek 23). Takto připravený zkušební vzorek se přilepí ke dvěma čelistem pomocí dvojsložkového lepidla s přidáním fileru a vloží do centrovacího rámu. [26]



Obrázek 23. Nařezané a následně obroušené zkušební trámečky

3.11.3 Postup zkoušky

Nalepený zkušební vzorek se čelistmi uchytí k zatěžovacímu zařízení, jak je znázorněno na obrázku 24. Před zahájením zkoušky se vzorek po adekvátně dlouhou dobu stabilizuje při počáteční teplotě T_0 bez zatěžování. Během fáze kondicionování musí zkušební zařízení zajistit, aby zkušební vzorek nebyl žádným způsobem zatěžován. Tepelná deformace musí být vyrovnána. Teplota zkušebního vzorku musí být konstantní v rozsahu ± 1 °C zkušební teploty po dobu minimálně 10 minut. Tuto teplotu můžeme změřit pomocí slepého tělesa umístěného v blízkosti zkušebního vzorku. Délka zkušebního tělesa se udržuje konstantní, zatímco jeho teplota se v čase snižuje. Těleso je v důsledku zamezovaného tepelného smršťování vystaveno kryogennímu tahovému napětí. Zkoušku je doporučeno zahájit při teplotě $T_0 = +20$ °C. V průběhu zkoušky se zaznamená kryogenní tahové napětí $\sigma_{cry(T)}$. [26] [27]



Obrázek 24. Zkušební vzorek uchycený k zatěžovacímu zařízení

3.11.4 Výpočet

Po ukončení zkoušky se z naměřených dat napětí při porušení $\sigma_{cry, failure}$ stanoví maximální napětí během zkoušky a také teplota, při které se vzorek porušil $T_{failure}$. [26]

3.12 Zkouška pojíždění kolem

Tato zkouška se provádí dle normy ČSN EN 12697-22 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 22: Zkouška pojíždění kolem. Cílem této zkoušky je ověření náchylnosti asfaltové směsi k trvalé deformaci vlivem působícího zatížení, čímž se snažíme co nejlépe simulovat skutečné chování asfaltové směsi ve vozovce. [28]

3.12.1 Přístroje a pomůcky

Pro stanovení trvalých deformací jsou zapotřebí tyto přístroje a pomůcky: zařízení simulující pojíždění kolem (viz obrázek 25), které obsahuje pneumatiku s šířkou stopy 80 ± 5 mm bez dezénu, zkušební formy, hloubkoměr s přesností měření ± 0,2 mm, temperovací komoru, snímače teploty, ocelovou podkladní desku a nelepivou fólii. [28]



Obrázek 25. Deska umístěna v zařízení simulující pojíždění kolem

3.12.2 Postup zkoušky

Zkušebním vzorkem je deska, jejíž výroba je popsána v kapitole 4.4.2. Deska se umístí do formy o rozměrech 260 x 320 x 60 mm a upevní na podkladní desku. Takto připravený vzorek se následně vloží do temperovací komory, kde se temperuje na teplotu (50 ± 1) °C po dobu minimálně 4 hodin a zároveň je nutné temperovat také zkušební zařízení, aby teplota na začátku zkoušky byla shodná.

Po dosažení požadované teploty se na desku umístí nepřilnavá fólie, vloží se do zkušebního zařízení a upevní šrouby. Zkušební zařízení se následně uvede do pohybu. Celkový počet cyklů po dobu zkoušky je 10 000 cyklů, což simuluje 20 000 pojezdů. Hloubka vyjeté koleje je automaticky zaznamenávána během zkoušky. [27] [28]

3.12.3 Výpočty

Vyhodnocení zkoušky popisují grafy, které znázorňují závislost hloubky vyjeté koleje na počtu cyklů. Mezi základní zjišťované charakteristiky patří přírůstek hloubky vyjeté koleje vypočítaný dle rovnice 12 a poměrná hloubka vyjeté koleje na vzduchu (viz rovnice 13).

$$WTS_{AIR} = \frac{(d_{10\,000} - d_{5\,000})}{5}$$

WTS_{AIR} Přírůstek hloubky vyjeté koleje na 1 000 zatěžovacích cyklů [mm]
 $d_{10\,000}, d_{5\,000}$ Hloubka vyjeté koleje po 10 000, respektive 5 000 cyklech [mm]

Rovnice 12. Výpočet přírůstku hloubky vyjeté koleje [27]

$$PRD_{AIR} = \frac{d_{10\,000}}{t} \times 100$$

PRD_{AIR} Poměrná hloubka vyjeté koleje na vzduchu [%]
 $d_{10\,000}$ Hloubka vyjeté koleje po 10 000 cyklech [mm]
 t tloušťka desky [mm]

Rovnice 13. Výpočet poměrné hloubky vyjeté koleje na vzduchu [27]

4 Použité materiály

V této diplomové práci byly vyrobeny a zkoušeny tři různé asfaltové směsi typu asfaltový beton pro podkladní vrstvy ACP 32. Jednotlivé směsi se liší různým obsahem polymerem modifikovaného asfaltu v každé z nich. Konkrétně byla zkoušena dávkování pojiva 3,7 %, 4,2 % a 4,7 % z celkové hmotnosti směsi.

Celkem bylo vyrobeno 9 asfaltových desek a 9 Marshallových těles (3 x 3,7 %, 3 x 4,2 %, 3 x 4,7 %).

4.1 Použité asfaltové pojivo

V této práci bylo použito polymerem modifikované pojivo Starfalt PMB 25/55-65 od výrobce OMV. Na vzorcích tohoto pojiva byly provedeny laboratorní zkoušky stanovení penetrace jehlou dle ČSN EN 1426 a stanovení bodu měknutí metodou kroužek a kulička dle ČSN EN 1427. Požadavky, které musí toto pojivo splňovat, jsou uvedeny v tabulce 2. [12]

Tabulka 2. Požadavky na pojivo PMB 25/55-65

Požadavky na pojivo PMB 25/55-65			
Laboratorní zkouška	Min.	Max.	Jednotka
Penetrace jehlou	25	55	0,1 mm
Stanovení bodu měknutí (metoda KK)	65	-	°C

4.2 Použité kamenivo

Kamenivo, použité v této práci, bylo dodáno z kamenolomu Jakubčovice v okrese Nový Jičín, jehož vlastníkem je společnost EUROVIA kamenolomy, a.s., člen skupiny EUROVIA CS. Na výrobu asfaltových směsí byly použity následující frakce kameniva: 0/4 mm, 4/8 mm, 8/11 mm, 11/16 mm, 16/22 mm, 16/32 mm.

Použitý vápencový filer pochází z lokality Mokrá.

4.3 Návrh směsi ACP 32

Jelikož české normy nepopisují asfaltové směsi se zrnem kameniva větším než 22 mm, byl návrh asfaltové směsi typu asfaltový beton s maximálním zrnem kameniva 32 mm (ACP 32) proveden dle švýcarské normy SN 640 431-1b-NA: Asphaltmischgut Mischgutanforderungen – Teil 1: Asphaltbeton [11], která je ekvivalentem české normy ČSN 73 6121: Stavba vozovek – Hutněné asfaltové vrstvy – Provádění a kontrola shody.

Pro návrh směsi ACP 32 byla nejdříve zjištěna zrnitost kameniva pomocí síťového rozboru dle normy ČSN EN 993-1. Návrh čáry zrnitosti pomocí Fullerovy paraboly byl proveden dle ČSN 73 6160: Zkoušení asfaltových směsí [29]. Výsledky síťového rozboru jsou uvedeny v tabulce 3.

Výpočet Fullerovy paraboly byl proveden dle následující rovnice 14.

$$y = 100 \times \left(\frac{d}{D}\right)^{0,5}$$

y Procentuální propad sítem o průměru oka d [%]

d Průměr oka síta [mm]

D Maximální velikost oka v soustavě sít [mm]

Rovnice 14. Výpočet Fullerovy paraboly

Tabulka 3. Výsledky síťového rozboru

Frakce	Propady na sítích [%]											
	32	22	16	11	8	4	2	1	0,5	0,25	0,13	0,063
16/32	89,4	47,3	6,5	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,4
16/22	100,0	99,1	16,6	0,6	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2
11/16	100,0	100,0	90,6	16,7	0,8	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2
8/11	100,0	100,0	100,0	96,0	19,2	0,8	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,3
4/8	100,0	100,0	100,0	100,0	93,5	6,5	2,6	1,8	1,4	1,1	0,9	0,8
0/4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	93,3	64,3	40,0	25,4	14,4	6,6	2,1
filer	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	88,6

Na základě těchto výsledků byla navržena receptura pro směs ACP 32. Procentuální zastoupení jednotlivých frakcí kameniva pro asfaltovou směs ACP 32 je popsáno v tabulce 4.

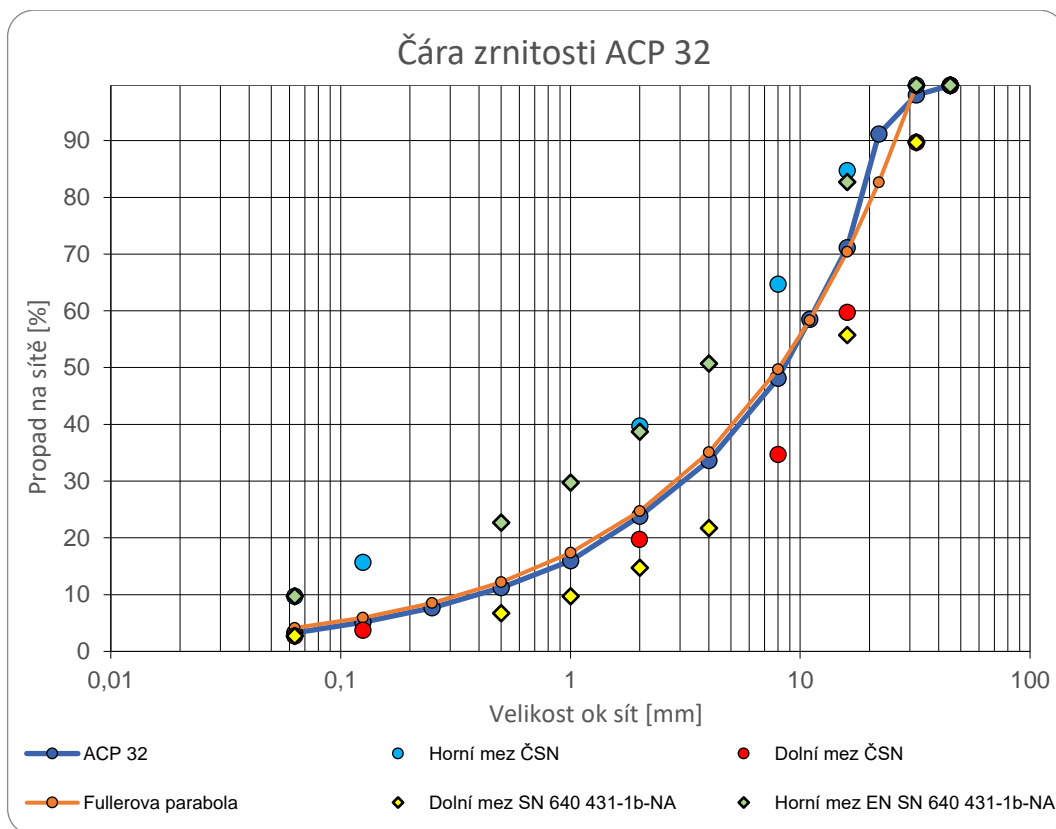
Tabulka 4. Zastoupení jednotlivých frakcí kameniva pro směs ACP 32

Návrh směsi ACP 32	
Frakce [mm]	Množství [%]
filer	3
0/4	32
4/8	12
8/11	10
11/16	12
16/22	15
16/32	16
Celkem	100

Pomocí návrhu zastoupení jednotlivých frakcí kameniva byla následně propočítána jednotlivá síta a navržena čára zrnitosti dle tabulky 5. Horní a dolní meze zrnitosti byly převzaty z požadavků zrnitosti směsi ACP 22 dle ČSN 73 6121 a mírně upraveny na síte 32 mm a 45 mm.

Tabulka 5. Výpočet křivky zrnitosti

Čára zrnitosti					Švýcarská norma SN 640 431-1b-NA	
Síto [mm]	ACP 32	Fuller	Dolní mez ČSN	Horní mez ČSN	Dolní mez	Horní mez
45	100,0		100,0	100,0	100,0	100,0
32	98,3	100,0	90,0	100,0	90,0	100,0
22	91,4	82,9				
16	71,4	70,7	60,0	85,0	56,0	83,0
11	58,8	58,6				
8	48,4	50,0	35,0	65,0		
4	33,9	35,4			22,0	51,0
2	24,1	25,0	20,0	40,0	15,0	39,0
1	16,2	17,7			10,0	30,0
0,5	11,5	12,5			7,0	23,0
0,25	8,0	8,8				
0,125	5,4	6,3	4,0	16,0		
0,063	3,6	4,4	3,0	10,0	3,0	10,0



Graf 1. Průběh křivky zrnitosti ACP 32

Jak je patrné z grafu 1, čára zrnitosti se pohybuje v intervalu horní a dolní meze, které byly po konzultaci s vedoucím práce upraveny speciálně pro směs ACP 32 (viz tabulka 5), jelikož norma ČSN 73 6121 popisuje tyto meze pouze pro asfaltové směsi s maximálním zrnem kameniva 22 mm. V grafu 1 jsou popsány také hodnoty horní a dolní meze dle švýcarské normy SN 640 431-1b-NA, které navržená směs ACP 32 také splňuje.

Cílem návrhu čáry zrnitosti kameniva bylo nejbližší možné přiblížení k Fullerově parabole, abychom dosáhli optimálního návrhu a také zhutnitelnosti asfaltové směsi.

4.4 Výroba zkušebních těles

Výroba asfaltových směsí se v laboratoři řídila dle normy ČSN EN 12697-35 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 35: Laboratorní výroba směsi. Tato norma popisuje výrobu asfaltových směsí v laboratoři pomocí ručního anebo strojního míchání. Pro výrobu Marshallových těles byla zvolena metoda s ručním mícháním a pro výrobu desek metoda se strojním mícháním. [30]

4.4.1 Výroba Marshallových těles

V laboratorní sušárně se nejdříve vysuší filer a jednotlivé frakce kameniva 0/4 mm, 4/8 mm, 8/11 mm, 11/16 mm, 16/22 mm, 16/32 mm na teplotu $(110 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$. Pokud se při dvou po sobě následujících váženích po nejméně jedné hodině hmotnosti kameniva neliší o více než 0,1 % hmotnosti zkušební navážky, kamenivo je vysušené. V obrázku 26 je zaznamenáno srovnání jednotlivých frakcí kameniva.



Obrázek 26. Frakce kameniva po vysušení v laboratorní sušárně

Poté, co se jednotlivé frakce kameniva a filer nechají zchladnout, se za studena naváží na laboratorní váze s přesností $\pm 0,1 \%$ hmotnosti navážky. Následně se nahřeje navážka společně také s polymerem modifikovaným asfaltovým pojivem PMB 25/55-65 na požadovanou teplotu míchání $170 \text{ }^\circ\text{C}$.

Po dosažení požadované teploty se nádoba s kamenivem umístí na laboratorní váhu, kde se promíchá s polymerem modifikovaným asfaltem, který se přidává s přesností 1 % hmotnosti pojiva. Tato směs se následně ručně míchá v nádobě umístěné na vařiči, dokud nejsou všechna zrna kameniva zcela obalena asfaltovým pojivem (viz obrázek 27).



Obrázek 27. Ruční míchání asfaltové směsi na vařiči

Doba míchání by neměla překročit 5 minut. Takto připravená směs se následně zhutní při teplotě 160 °C rázovým zhutňovačem s dřevěným blokem dle kapitoly 3.8. Po zhutnění se zkušební tělesa nechají vychladnout na laboratorní teplotu pod větrákem (viz obrázek 28) a vytlačí se z formy pomocí hydraulického lisu pro vytlačování Marshallových těles (viz obrázek 29). [30]



Obrázek 28. Chlazení Marshallových těles pod větrákem



Obrázek 29. Hydraulický lis pro vytlačování Marshallových těles

Vytlačená Marshallova tělesa s různými obsahy asfaltového pojiva PMB 25/55-65 jsou zobrazena na obrázku 30.



Obrázek 30. Zhotovená Marshallova tělesa

4.4.2 Výroba asfaltových desek

Nejdříve se nechají filer a jednotlivé frakce kameniva 0/4 mm, 4/8 mm, 8/11 mm, 11/16 mm, 16/22 mm, 16/32 mm vysušit v laboratorní sušárně na teplotu $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$. Pokud se při dvou po sobě následujících váženích po nejméně jedné hodině hmotnosti kameniva neliší o více než 0,1 % hmotnosti zkušební navážky, kamenivo je vysušené. Poté, co se jednotlivé frakce kameniva a filer nechají zchladnout, se za studena naváží na laboratorní váze s přesností $\pm 0,1$ % hmotnosti navážky. Následně se navážka nahřeje společně také s polymerem modifikovaným asfaltovým pojivem PMB 25/55-65 na požadovanou teplotu míchání $170 ^\circ\text{C}$.

Po dosažení požadované teploty se nahřáté kamenivo umístí do míchacího zařízení pro strojní míchání směsi (viz obrázek 31), kde se promíchá s polymerem modifikovaným asfaltem, který se přidává s přesností 1 % hmotnosti pojiva. Míchací zařízení se zapne a asfaltová směs se míchá, dokud nejsou všechna zrna kameniva zcela obalena asfaltovým pojivem.



Obrázek 31. Asfaltová směs ACP 32 v míchacím zařízení

Takto připravená směs se následně hutní segmentovým zhutňovačem desek dle kapitoly 3.9 při teplotě 160 °C. Takto zhutněná asfaltová deska ACP 32 je vidět na obrázku 32. [30]



Obrázek 32. Zhutněná asfaltová deska ACP 32

4.4.3 Stanovení mezerovitosti

Stanovení mezerovitosti se skládá z výpočtu objemové hmotnosti zkušebního tělesa ρ_{bssd} popsaného v kapitole 3.4, jejíž výsledky jsou uvedeny v tabulce 6 a výpočtu maximální objemové hmotnosti volumetrickým postupem ρ_{mv} uvedeného v kapitole 3.5 s výsledky uvedenými v tabulce 7.

Tabulka 6. Stanovení objemových hmotností pro jednotlivé směsi

Marshallova tělesa	Číslo tělesa	Teplota vody [°C]	Hustota vody [kg/m ³]	Hmotnost [g]			Objemová hmotnost [kg/m ³]	ρ_{bssd} [kg/m ³]
				Suchý	Ve vodě	Osušený		
ACP 32 PMB 3,7 %	1	20,8	998,1	1178,7	689,2	1186,6	2365,2	2370,3
	2			1183,1	690,4	1188,5	2370,7	
	3			1175,7	688,5	1182,6	2375,0	
ACP 32 PMB 4,2 %	1	20,8	998,1	1170,4	683,0	1175,3	2372,9	2374,4
	2			1179,2	684,2	1183,6	2356,8	
	3			1168,8	682,7	1170,1	2393,5	
ACP 32 PMB 4,7 %	1	20,8	998,1	1188,4	691,2	1190,8	2374,2	2380,3
	2			1184,6	692,5	1188,2	2385,2	
	3			1187,8	692,5	1190,3	2381,6	

Tabulka 7. Stanovení maximálních objemových hmotností pro jednotlivé směsi

Označení směsi	Maximální objemová hmotnost			
	m_1	m_2	m_3	ρ_{mv} [kg/m ³]
ACP 32 PMB 3,7 %	693,1	1669,7	2606,2	2541,6
ACP 32 PMB 4,2 %	685,3	1678,7	2590,2	2521,1
ACP 32 PMB 4,7 %	688,0	1616,1	2541,9	2507,3

Výpočet mezerovitosti V_a byl proveden pro všechny tři sady s rozdílným dávkováním pojiva PMB 25/55-65 (3,7 %; 4,2 %; 4,7 %) dle výpočtu uvedeného v kapitole 3.6.

Výsledky mezerovitosti zkušebního tělesa V_a , mezerovitosti směsi kameniva VMA a stupně vyplnění mezer pojivem VFB jsou uvedeny v tabulce 8.

Tabulka 8. Stanovení V_a , VMA, VFB jednotlivých směsí

Označení směsi	ρ_{mv} [kg/m ³]	ρ_{bssd} [kg/m ³]	Hustota pojiva [kg/m ³]	V_a [%]	VMA [%]	VFB [%]
ACP 32 PMB 3,7 %	2541,6	2370,3	1020	6,7	15,3	56,1
ACP 32 PMB 4,2 %	2521,1	2374,4	1020	5,8	15,6	62,7
ACP 32 PMB 4,7 %	2507,3	2380,3	1020	5,1	16,0	68,4

Dle normy ČSN 73 6121 by měla být mezerovitost zkušebního tělesa asfaltové směsi typu asfaltový beton pro podkladní vrstvy ACP 22 v intervalu od 4 % do 7 %. Tuto podmínku splňují všechny zkoušené asfaltové směsi. Hraniční hodnota u směsi ACP 32 PMB 3,7 %, s výslednou mezerovitostí 6,7 %, je způsobena nižším obsahem asfaltového pojiva ve směsi, než je optimální. Na základě výsledků volumetrických vlastností jednotlivých sad Marshallových těles bylo jako optimální dávkování pojiva vybráno 4,2 %.

5 Výsledky zkoušek

V této kapitole jsou uvedeny výsledky jednotlivých zkoušek na asfaltových pojivech a směsích ACP 32 s rozdílným dávkováním pojiva. Výsledky jsou popsány v podobě tabulek a grafů.

5.1 Stanovení penetrace jehlou

Zkouška stanovení penetrace jehlou je podrobně popsána v kapitole 2.1. Na vzorku polymerem modifikovaného asfaltového pojiva PMB 25/55-65 byla provedena tři platná měření. Výsledná hodnota uvedená v tabulce 9 je aritmetickým průměrem všech tří hodnot.

Tabulka 9. Hodnota penetrace jehlou pojiva PMB 25/55-65

OMV Starfalt PMB 25/55-65	Hodnota penetrace [p.j.]
1	34,7
2	35,1
3	34,5
Ø	34,8

Výsledná hodnota penetrace zkoušeného asfaltového pojiva PMB 25/55-65 splňuje požadavky hodnoty penetrace dle normy ČSN 65 7222-1. [31]

5.2 Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička

Zkouška stanovení bodu měknutí metodou kroužek a kulička je popsána v kapitole 2.2. Asfaltové pojivo bylo zkoušeno ve vodě, jelikož jeho předpokládaný bod měknutí je menší než 80 °C. Výsledná hodnota uvedená v tabulce 10 je zaokrouhlena na nejbližších 0,2 °C.

Tabulka 10. Stanovení bodu měknutí metodou kroužek a kulička

PMB 25/55-65	Bod měknutí [°C]
Levá	65,4
Pravá	65,3
Ø	65,4

Stanovená výsledná teplota bodu měknutí asfaltového pojiva vyhověla požadavku minimální teploty bodu měknutí dle normy ČSN 65 7222-1. [31]

5.3 Míra zhutnění dle ČSN 73 6121

Hutnění zkušebních desek probíhalo pomocí segmentového zhutňovače dle kapitoly 3.9. Pro každou asfaltovou zkušební desku ACP 32 s různým dávkováním asfaltového pojiva byla následně stanovena objemová hmotnost hydrostatickým vážením dle kapitoly 3.4 a následně určena míra zhutnění zkušební desky dle výpočtu uvedeného v kapitole 3.7. Výsledné hodnoty objemové hmotnosti jednotlivých desek jsou uvedeny v tabulce 11.

Tabulka 11. Stanovení objemových hmotností zkušebních desek

Zkušební desky	Číslo desky	Teplota vody [°C]	Hustota vody [kg/m ³]	Hmotnost [g]			Objemová hmotnost [kg/m ³]	Ø [kg/m ³]
				Suchý	Ve vodě	Osušený		
ACP 32 PMB 3,7 %	1	21,1	998,0	11847	6970	11944	2377,1	2373,9
	2			11830	6970	11941	2375,1	
	3			11840	6950	11937	2369,5	
ACP 32 PMB 4,2 %	1	23,7	997,4	11835	6954	11902	2385,8	2381,4
	2			11809	6913	11877	2372,8	
	3			11841	6970	11921	2385,5	
ACP 32 PMB 4,7 %	1	21,1	998,0	11893	6967	11931	2391,2	2391,1
	2			11883	6961	11921	2391,1	
	3			11885	6980	11941	2391,0	

Z vypočítaných hodnot objemové hmotnosti zkušebních desek (viz tabulka 11) a Marshallových těles, uvedených v tabulce 6, byla následně určena míra zhutnění. Výsledné hodnoty míry zhutnění jsou zobrazeny v tabulce 12.

Tabulka 12. Stanovení míry zhutnění

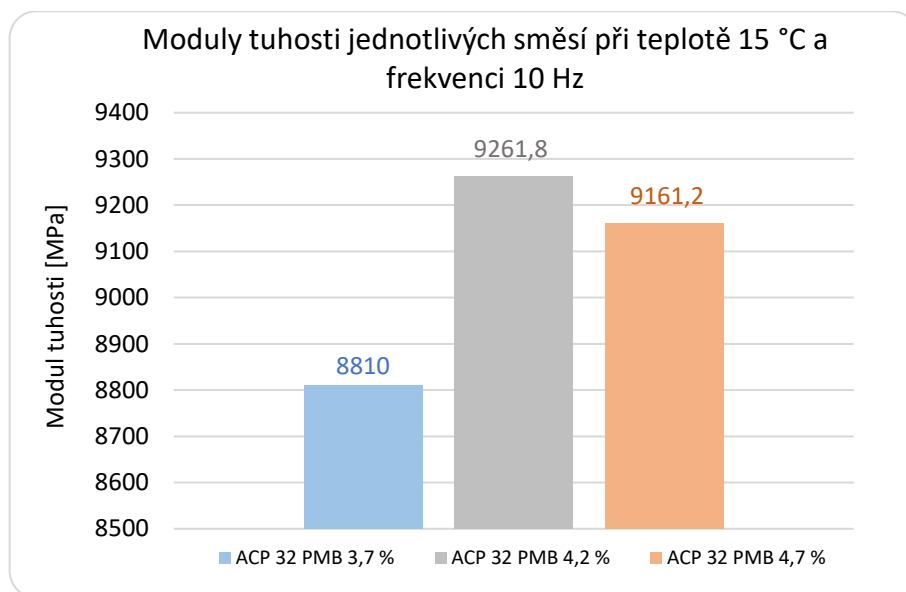
Označení směsi	Číslo desky	Objemová hmotnost [kg/m ³]		Míra zhutnění
		Zkušební desky	Marshallových těles	
ACP 32 PMB 3,7 %	1	2377,1	2370,3	99,71 %
	2	2375,1		99,80 %
	3	2369,5		100,03 %
ACP 32 PMB 4,2 %	1	2385,8	2374,4	99,52 %
	2	2372,8		100,07 %
	3	2385,5		99,53 %
ACP 32 PMB 4,7 %	1	2391,2	2380,3	99,55 %
	2	2391,1		99,55 %
	3	2391,0		99,55 %

Míry zhutnění všech zkoušených asfaltových směsí ACP 32 se nachází v intervalu od 99–101 %. [10]

5.4 Stanovení modulu tuhosti

V této kapitole budou vyhodnoceny moduly tuhosti, fázové úhly jednotlivých směsí a jejich závislost na frekvenci a teplotě. Průběh zkoušky stanovení modulu tuhosti je podrobněji popsán v kapitole 2.10. Měření probíhalo při frekvencích zatížení 1 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz, 27 Hz a 30 Hz při třech různých zkušebních teplotách (10 °C, 15 °C, 20 °C).

Návrhová hodnota modulu tuhosti je dle TP 170 specifikována jako modul tuhosti měřený při frekvenci 10 Hz a teplotě 15 °C. Výsledné průměrné hodnoty modulů tuhosti jednotlivých směsí ACP 32 s různým dávkováním pojiva jsou zobrazeny na grafu 2.

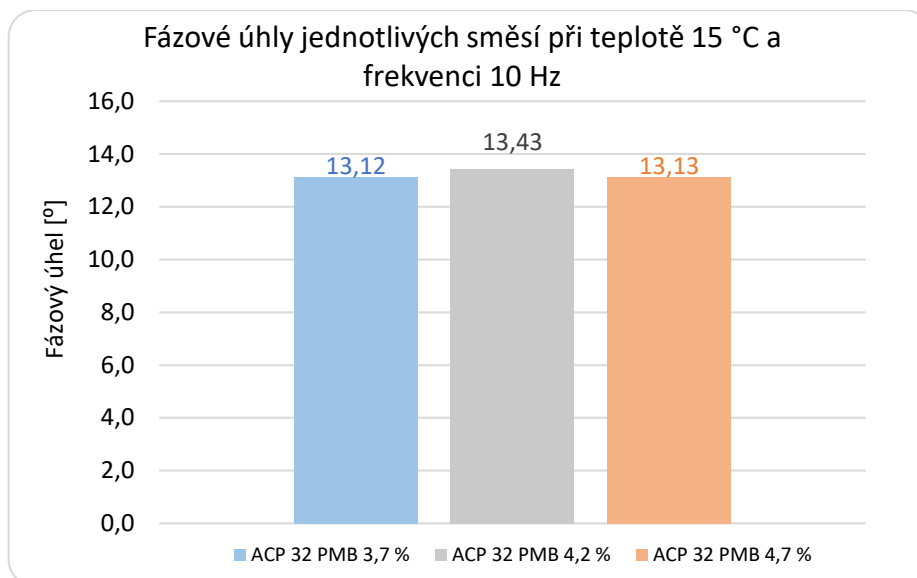


Graf 2. Moduly tuhosti jednotlivých směsí při teplotě 15 °C a frekvenci 10 Hz

Nejvyššího modulu tuhosti při zkušební teplotě 15 °C a frekvenci 10 Hz dosáhla směs ACP 32 s optimálním dávkováním pojiva 4,2 %.

Nejnižšího modulu tuhosti při zkušební teplotě 15 °C a frekvenci 10 Hz dosáhla směs ACP 32 s nejnižším dávkováním pojiva 3,7 %. Tento výsledek je pravděpodobně způsoben nehomogenitou a hrubozrnností směsi a také pravděpodobně již příliš nízkým obsahem pojiva.

Následně byly stanoveny také průměrné hodnoty fázových úhlů jednotlivých směsí měřených za stejných podmínek (15 °C, 10 Hz). Výsledky jsou uvedeny na grafu 3.



Graf 3. Fázové úhly jednotlivých směsí při teplotě 15 °C a frekvenci 10 Hz

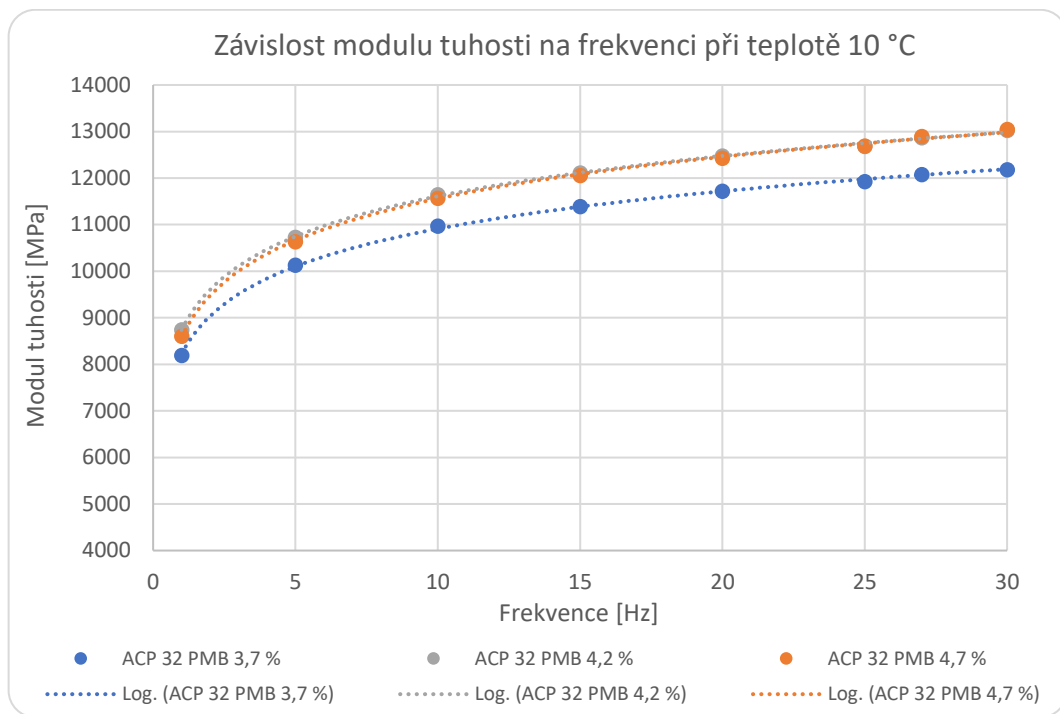
Nejvyšší hodnoty fázového úhlu při teplotě 15 °C a frekvenci 10 Hz dosáhla směs ACP 32 s optimálním množstvím pojiva 4,2 %. Zbylé směsi (3,7 %, 4,7 %) dosáhly téměř totožných výsledků. Hodnoty fázových úhlů všech tří směsí jsou ovšem prakticky totožné.

V následující tabulce 13 jsou uvedeny výsledné průměrné hodnoty modulu tuhosti a fázového úhlu při všech zkušebních frekvencích pro všechny zkoušené asfaltové směsi ACP 32 při zkušební teplotě 10 °C.

Tabulka 13. Průměrné hodnoty modulu tuhosti a fázového úhlu při teplotě 10 °C

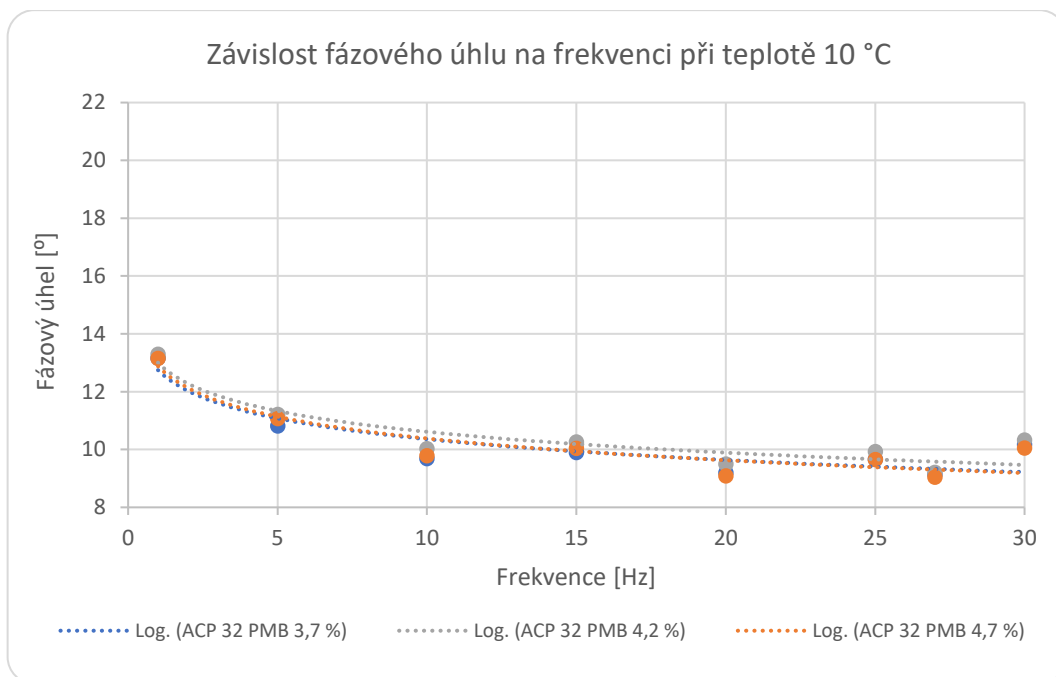
Teplota 10 °C	ACP 32 PMB 3,7 %		ACP 32 PMB 4,2 %		ACP 32 PMB 4,7 %	
	Modul tuhosti [MPa]	Fázový úhel ϕ [°]	Modul tuhosti [MPa]	Fázový úhel ϕ [°]	Modul tuhosti [MPa]	Fázový úhel ϕ [°]
1	8194,3	13,16	8742,4	13,29	8603,0	13,15
5	10130,5	10,81	10728,8	11,21	10630,4	11,07
10	10966,3	9,68	11642,6	10,02	11570,2	9,78
15	11391,8	9,90	12108,0	10,26	12054,2	10,04
20	11718,3	9,19	12474,8	9,50	12426,4	9,09
25	11927,8	9,66	12682,4	9,93	12685,8	9,65
27	12072,5	9,13	12868,2	9,21	12895,4	9,04
30	12176,5	10,17	13024,4	10,33	13046,0	10,04

Z těchto hodnot byla následně určena závislost modulu tuhosti na frekvenci při teplotě 10 °C (viz graf 4) a také závislost fázového úhlu na frekvenci při teplotě 10 °C, která je zobrazena v grafu 5.



Graf 4. Závislost modulu tuhosti na frekvenci při teplotě 10 °C

Z grafu 4 je patrné, že modul tuhosti má na frekvenci při teplotě 10 °C logaritmickou závislost a s narůstající frekvencí roste také modul tuhosti.



Graf 5. Závislost fázového úhlu na frekvenci při teplotě 10 °C

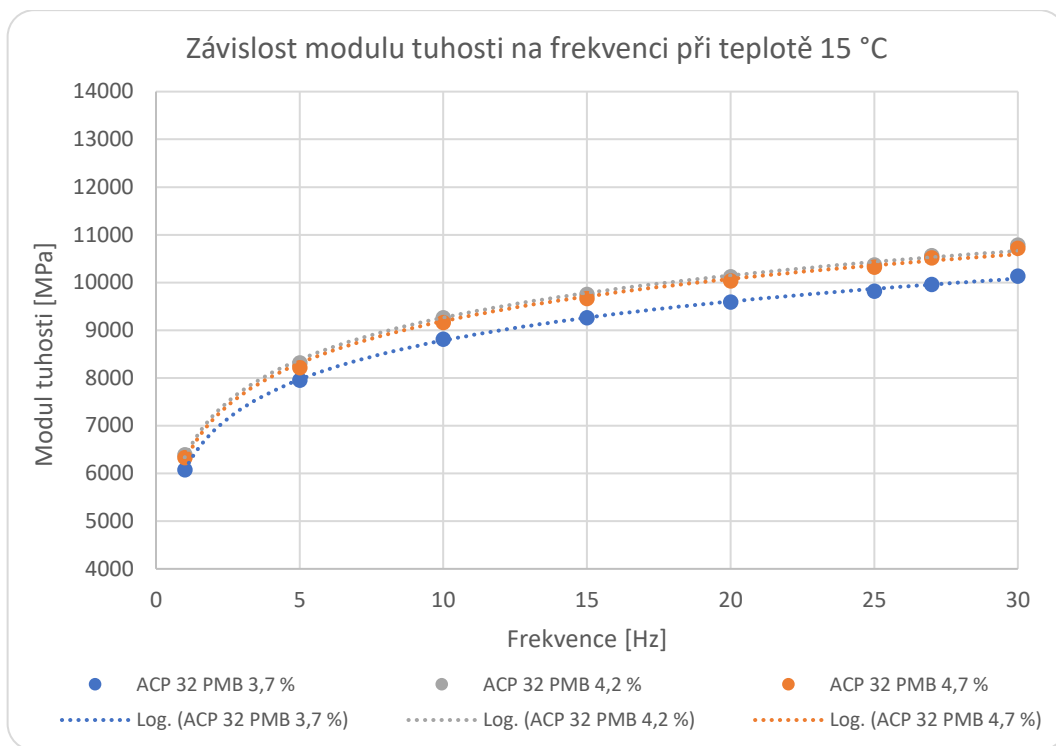
Fázový úhel má na frekvenci také logaritmickou závislost ale na rozdíl od modulu tuhosti, s narůstající frekvencí, klesá.

V tabulce 14 jsou uvedeny výsledné průměrné hodnoty modulu tuhosti a fázového úhlu při všech zkušebních frekvencích pro všechny zkoušené asfaltové směsi ACP 32 při zkušební teplotě 15 °C.

Tabulka 14. Průměrné hodnoty modulu tuhosti a fázového úhlu při teplotě 15 °C

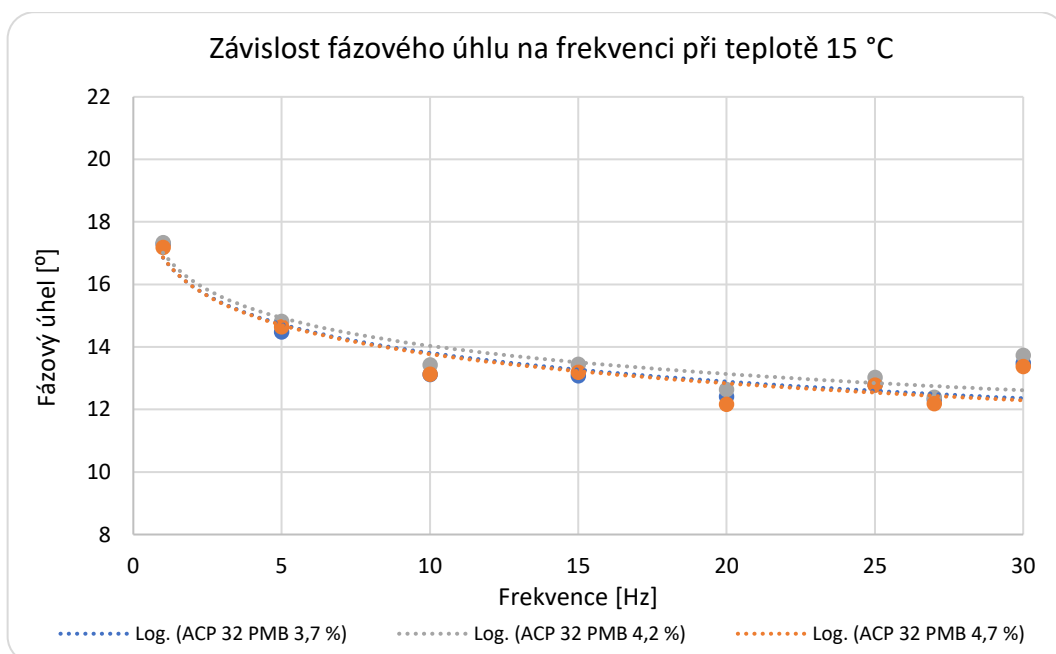
Teplota 15 °C	ACP 32 PMB 3,7 %		ACP 32 PMB 4,2 %		ACP 32 PMB 4,7 %	
	Modul tuhosti [MPa]	Fázový úhel ϕ [°]	Modul tuhosti [MPa]	Fázový úhel ϕ [°]	Modul tuhosti [MPa]	Fázový úhel ϕ [°]
1	6072,5	17,30	6385,8	17,34	6328,8	17,19
5	7949,3	14,48	8313,0	14,82	8212,4	14,64
10	8810,0	13,12	9261,8	13,43	9161,2	13,13
15	9261,8	13,08	9747,2	13,44	9661,4	13,19
20	9585,8	12,42	10121,6	12,64	10032,0	12,17
25	9818,8	12,80	10365,6	13,03	10322,6	12,78
27	9959,3	12,32	10558,8	12,39	10511,4	12,19
30	10132,3	13,49	10779,4	13,73	10712,4	13,38

Závislost modulu tuhosti na frekvenci při zkušební teplotě 15 °C je zobrazena na grafu 6.



Graf 6. Závislost modulu tuhosti na frekvenci při teplotě 15 °C

Při porovnání výsledků na grafu 6 a grafu 4 je patrné, že modul tuhosti s narůstající zkušební teplotou klesá. Na grafu 7 je zobrazena závislost fázového úhlu na frekvenci při zkušební teplotě 15 °C.



Graf 7. Závislost fázového úhlu na frekvenci při teplotě 15 °C

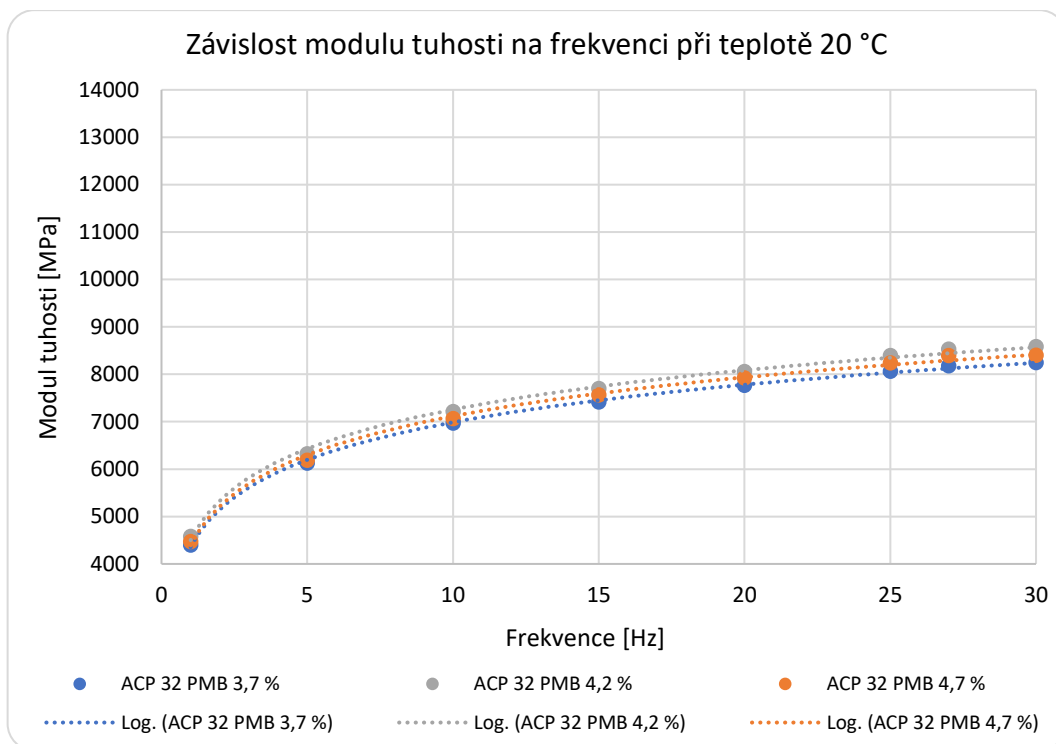
Z grafu 7 je patrné, že fázový úhel roste společně s narůstající zkušební teplotou při porovnání s hodnotami fázových úhlů při teplotě 10 °C v grafu 5.

V tabulce 15 jsou uvedeny výsledné průměrné hodnoty modulu tuhosti a fázového úhlu při všech zkušebních frekvencích pro všechny zkoušené asfaltové směsi ACP 32 při zkušební teplotě 20 °C.

Tabulka 15. Průměrné hodnoty modulu tuhosti a fázového úhlu při teplotě 20 °C

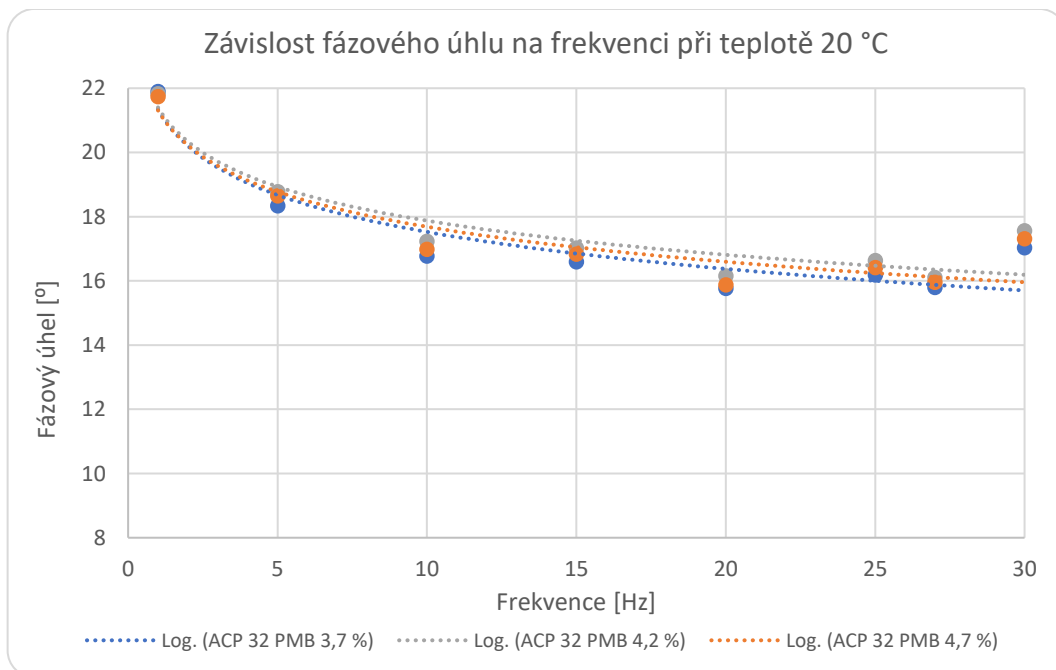
Teplota 20 °C	ACP 32 PMB 3,7 %		ACP 32 PMB 4,2 %		ACP 32 PMB 4,7 %	
Frekvence [Hz]	Modul tuhosti [MPa]	Fázový úhel ϕ [°]	Modul tuhosti [MPa]	Fázový úhel ϕ [°]	Modul tuhosti [MPa]	Fázový úhel ϕ [°]
1	4399,8	21,89	4577,4	21,82	4471,6	21,74
5	6128,0	18,34	6323,8	18,77	6184,0	18,64
10	6967,5	16,77	7212,4	17,22	7065,8	16,98
15	7417,3	16,59	7700,0	17,02	7565,2	16,83
20	7767,5	15,76	8053,2	16,15	7918,2	15,87
25	8062,5	16,19	8391,4	16,63	8240,8	16,41
27	8179,3	15,80	8529,6	16,10	8394,8	15,95
30	8242,5	17,03	8586,4	17,56	8399,8	17,31

Z hodnot v tabulce 15 byla následně znovu sestavena závislost modulu tuhosti na frekvenci (viz graf 8) a závislost fázového úhlu na frekvenci při zkušební teplotě 20 °C (viz graf 9).



Graf 8. Závislost modulu tuhosti na frekvenci při teplotě 20 °C

Z předchozího grafu 8 je zřejmé, že při nejvyšší zkušební teplotě 20 °C zkušební tělesa dosahují nejmenších hodnot modulů tuhosti.

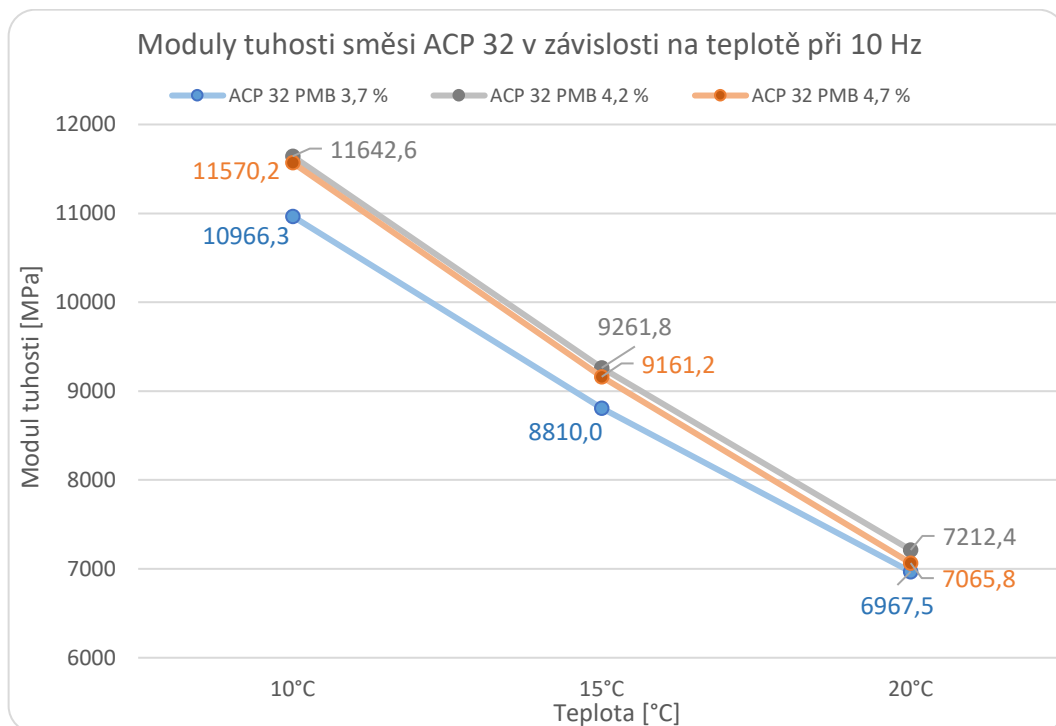


Graf 9. Závislost fázového úhlu na frekvenci při teplotě 20 °C

Fázový úhel jednotlivých směsí dosahuje při nejvyšší zkušební teplotě 20 °C nejvyšších hodnot (viz graf 7).

Při všech zkušebních teplotách (10 °C, 15 °C, 20 °C) se při měření fázového úhlu při frekvenci 30 Hz objevují vyšší hodnoty fázového úhlu, které jsou zřejmě způsobeny chybou měřicího zařízení (viz grafy 5, 7, 9).

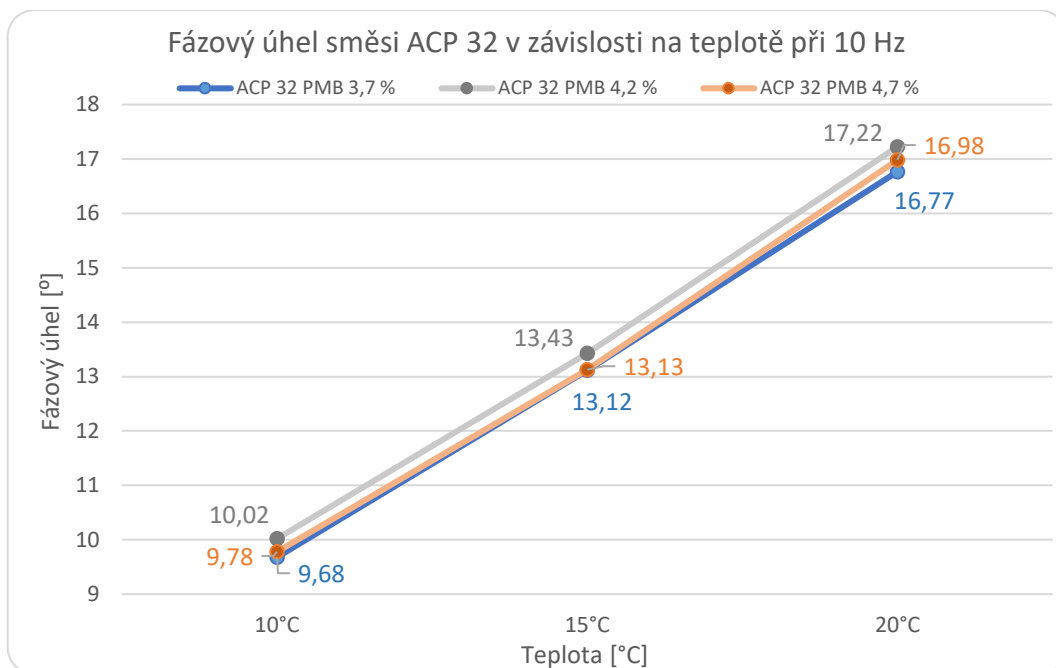
Dále byla graficky znázorněna závislost modulu tuhosti jednotlivých směsí ACP 32 na teplotě při frekvenci 10 Hz (viz graf 10).



Graf 10. Moduly tuhosti jednotlivých směsí v závislosti na teplotě při frekvenci 10 Hz

Z hodnot na grafu 10 je zřejmé, že směs s nejmenším dávkováním pojiva 3,7 % má při všech zkušebních teplotách nejmenší modul tuhosti. Ostatní směsi ACP 32 s obsahem pojiva 4,2 % a 4,7 % dosáhly srovnatelných hodnot modulu tuhosti.

Nakonec byla zjištěna závislost fázového úhlu na zkušební teplotě při frekvenci 10 Hz (viz graf 11).



Graf 11. Fázové úhly jednotlivých směsí v závislosti na teplotě při frekvenci 10 Hz

Z porovnání fázových úhlů jednotlivých směsí z grafu 11 lze vyčíst, že směs s optimálním dávkováním pojiva 4,2 % dosahuje při všech zkušebních teplotách nejvyšších hodnot fázového úhlu. Další dvě směsi (3,7 % a 4,7 %) vykazují téměř shodné výsledky.

5.5 Nízkoteplotní vlastnosti

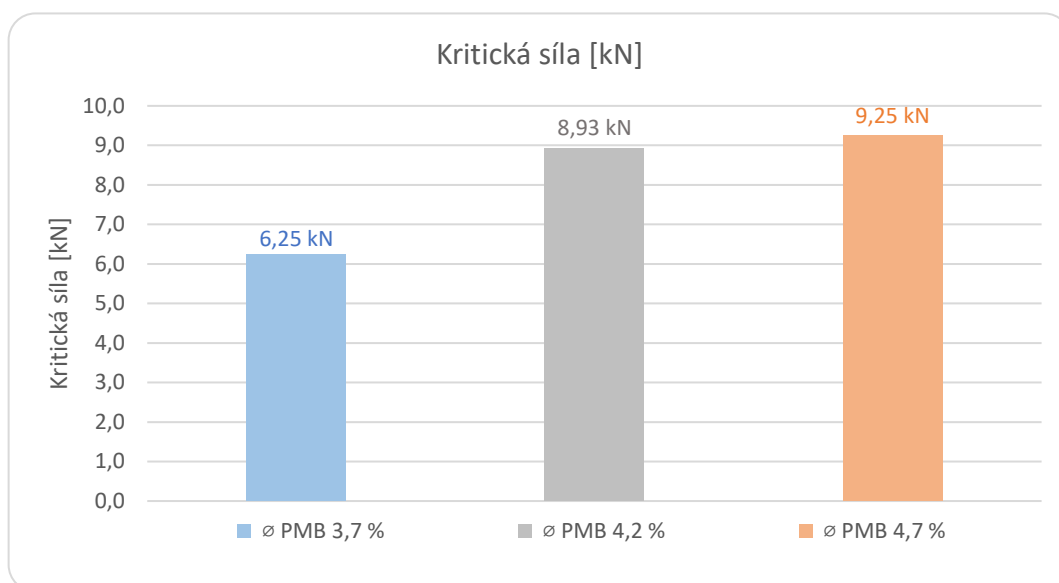
Stanovení odolnosti jednotlivých směsí vůči tvorbě trhlin při nízkých teplotách pomocí zkoušky TSRST je blíže popsáno v kapitole 3.11. Z každé desky bylo vyřezáno 5 zkušebních těles, která byla obroušena a následně nalepena ke dvěma podložkám pomocí dvousložkového epoxidového lepidla s přidáním fileru. Po vytvrnutí lepidla v centrovacím rámu byla tělesa připevněna k zatěžovacímu zařízení.

Z každé sady byla zkoušena minimálně dvě tělesa. Výsledky zkoušky TSRST jsou uvedeny v následující tabulce 16.

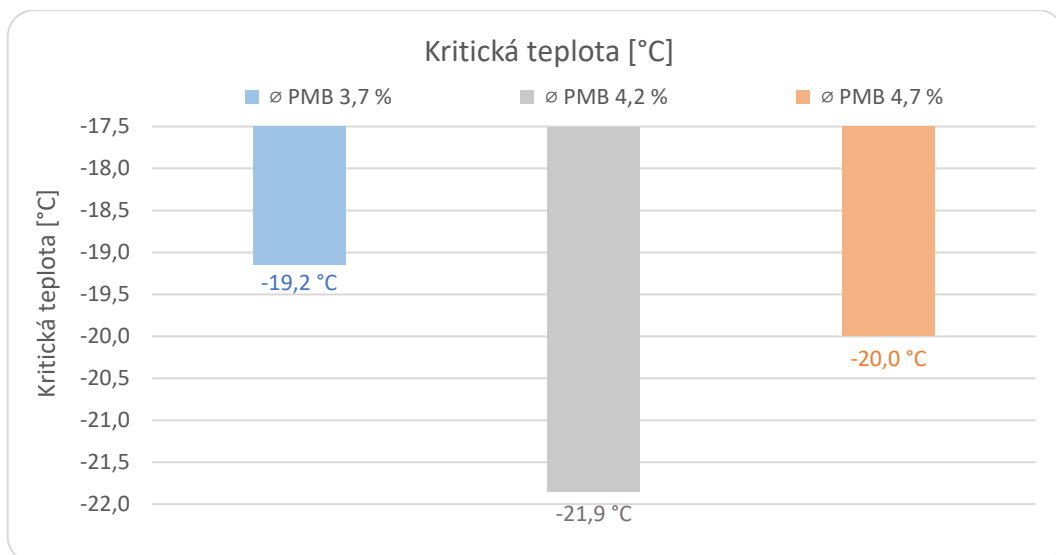
Tabulka 16. Výsledné hodnoty zkoušky TSRST

Zkušební těleso	Kritická síla [kN]	Teplota vzorku při porušení [°C]	Max. napětí při porušení [MPa]
PMB 3,7 % III.	6,48	-20,6	2,59
PMB 3,7 % V.	6,02	-17,7	2,41
∅ PMB 3,7 %	6,25 kN	-19,2 °C	2,50 MPa
PMB 4,2 % II.	8,43	-20,9	3,37
PMB 4,2 % III.	9,43	-22,8	3,77
∅ PMB 4,2 %	8,93 kN	-21,9 °C	3,57 MPa
PMB 4,7 % II.	8,72	-18,8	3,49
PMB 4,7 % III.	9,77	-21,2	3,91
∅ PMB 4,7 %	9,25 kN	-20,0 °C	3,70 MPa

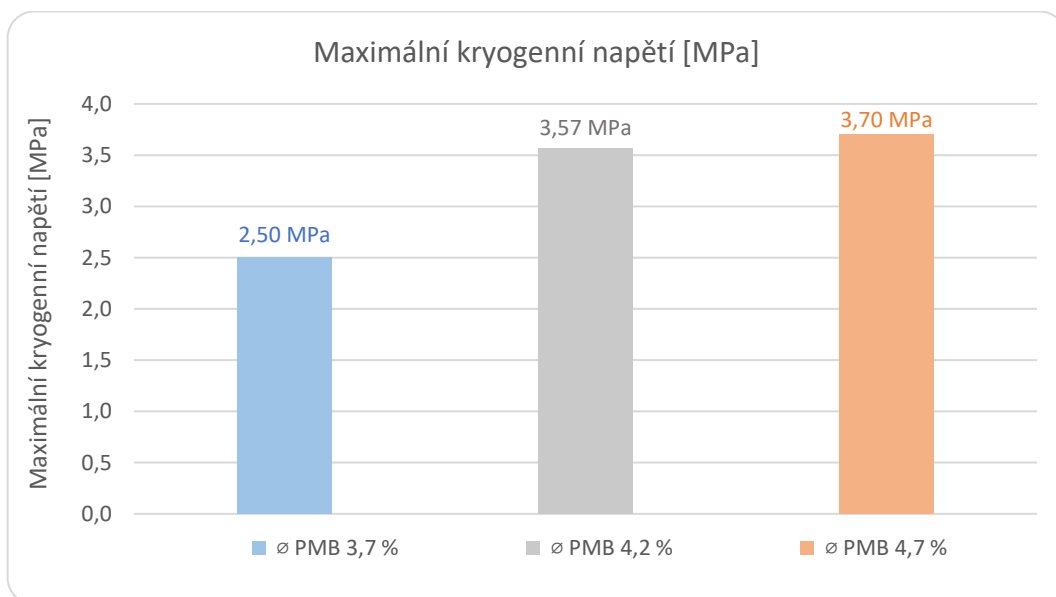
Grafické znázornění kritické síly, kritické teploty a maximálního napětí při porušení tělesa je zobrazeno na grafech 12, 13, 14.



Graf 12. Kritická síla při porušení těles pro jednotlivé směsi



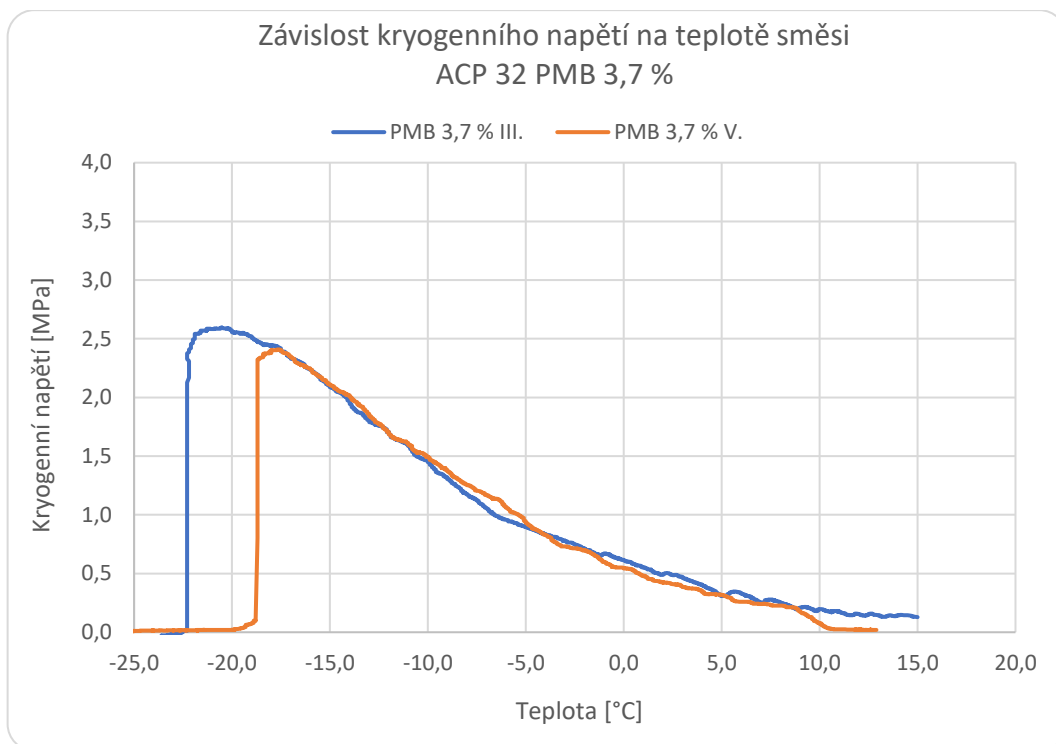
Graf 13. Kritická teplota těles při porušení



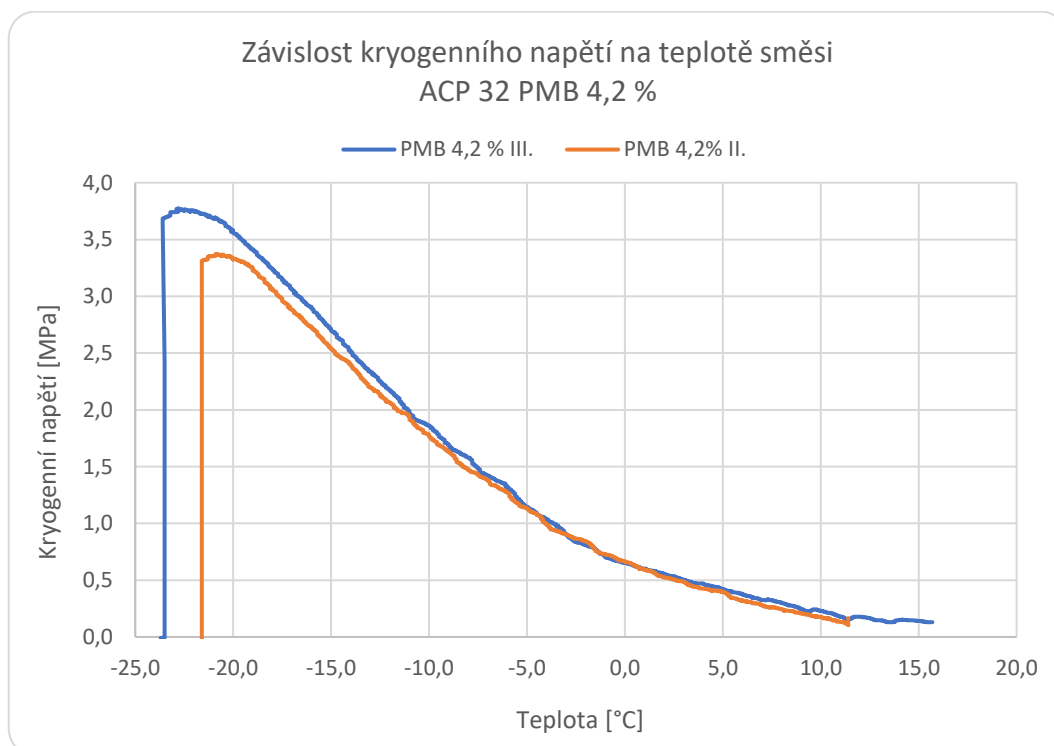
Graf 14. Maximální kryogenní napětí v tělese při porušení

Z výsledných hodnot na těchto grafech je patrné, že nejlepší nízkoteplotní chování (nejnižší kritickou teplotu) vykazuje směs ACP 32 s optimálním dávkováním pojiva 4,2 %. Naopak směs s nejnižším obsahem pojiva vykazuje nejhorší nízkoteplotní vlastnosti. S rostoucím dávkováním pojiva se zvyšovalo maximální kryogenní napětí.

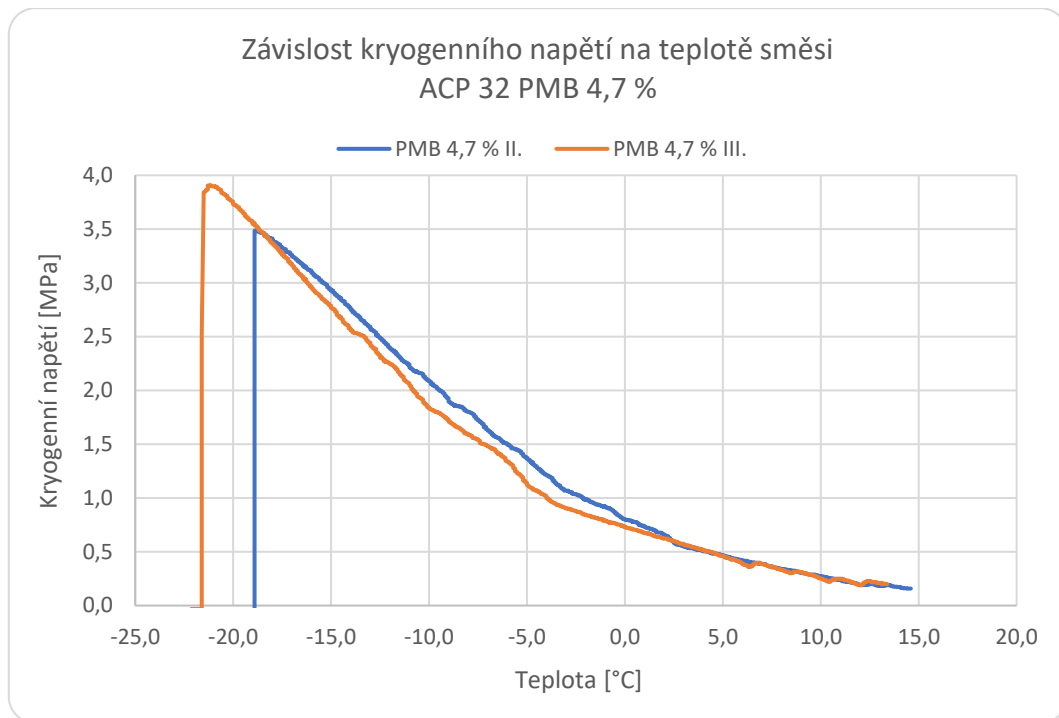
Z automaticky zaznamenaných hodnot zkušebního přístroje byla pro všechna zkoušená tělesa stanovena závislost kryogenního napětí na teplotě. Průběh této závislosti u těles s rozdílným dávkováním pojiva je vidět na grafech 15, 16, 17.



Graf 15. Závislost kryogenního napětí na teplotě směsi ACP 32 PMB 3,7 %



Graf 16. Závislost kryogenního napětí na teplotě směsi ACP 32 PMB 4,2 %



Graf 17. Závislost kryogenního napětí na teplotě směsi ACP 32 PMB 4,7 %

Je zřejmé, že nejnižší hodnotu kryogenního napětí potřebnou k porušení tělesa vykazuje směs s nejnižším dávkováním asfaltového pojiva 3,7 %. Zbylé dvě směsi vykazují velice obdobné hodnoty kryogenního napětí při porušení. Značné rozptyly výsledků mezi jednotlivými tělesy se stejným dávkováním pojiva jsou způsobeny vlastnostmi hrubozrnné směsi. Porušené zkušební těleso po zkoušce TSRST je znázorněno na obrázku 33.



Obrázek 33. Porušené zkušební těleso po zkoušce TSRST

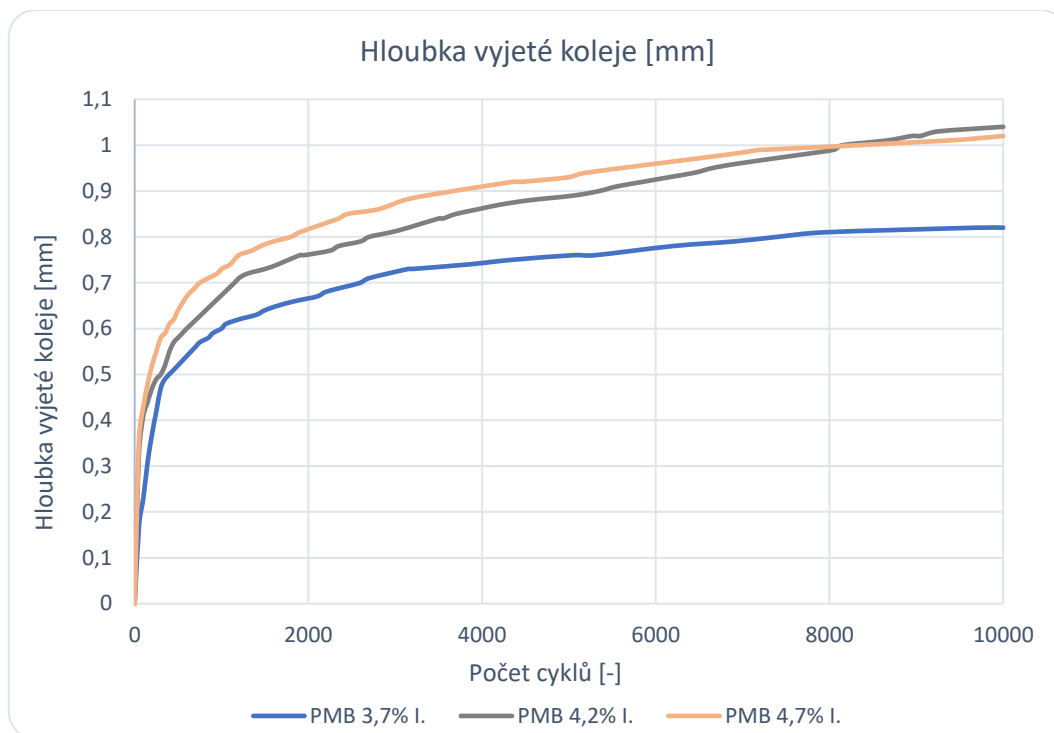
5.6 Zkouška pojíždění kolem

V této kapitole jsou uvedeny výsledky zkoušky pojíždění kolem, která je popsána v kapitole 3.12. V tabulce 17 jsou uvedeny naměřené hodnoty hloubky vyjetých kolejí všech zkoušených asfaltových desek ACP 32.

Tabulka 17. Průběh hloubky vyjeté koleje jednotlivých desek ACP 32

Hloubka vyjeté koleje [mm]			
Počet cyklů	PMB 3,7 % I.	PMB 4,2 % I.	PMB 4,7 % I.
0	0	0	0
50	0,17	0,33	0,36
100	0,23	0,41	0,43
150	0,31	0,44	0,48
200	0,37	0,47	0,52
300	0,47	0,50	0,58
500	0,52	0,58	0,64
700	0,56	0,60	0,69
800	0,57	0,60	0,70
1000	0,60	0,60	0,73
2000	0,66	0,76	0,81
3000	0,71	0,81	0,86
4000	0,74	0,86	0,89
5000	0,75	0,88	0,93
6000	0,76	0,92	0,94
7000	0,79	0,96	0,98
8000	0,81	0,98	0,99
9000	0,81	1,01	1,00
10000	0,82	1,04	1,02

Výše uvedené naměřené hodnoty hloubky vyjeté koleje byly následně graficky vyjádřeny v grafu 18.



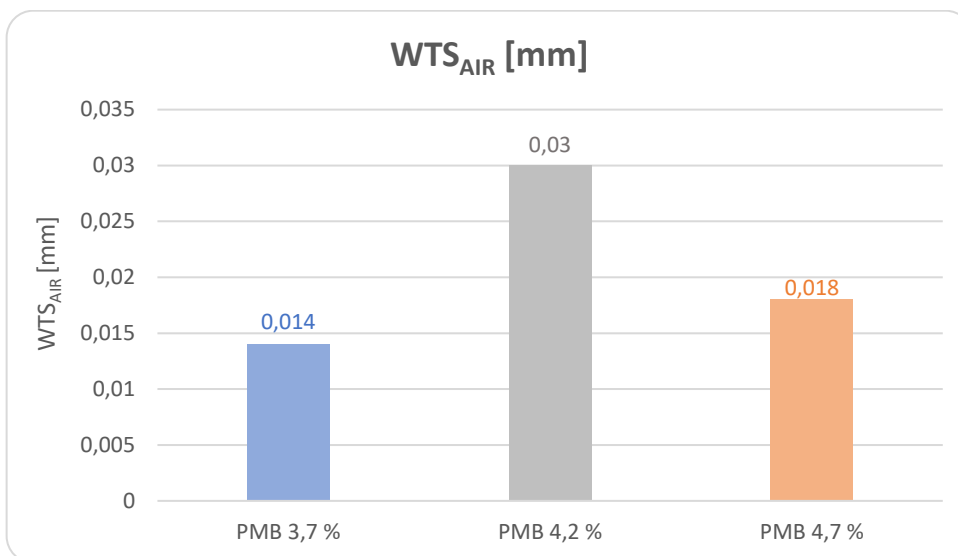
Graf 18. Průběh hloubky vyjeté koleje jednotlivých asfaltových desek

Nejlepší odolnost vůči tvorbě trvalých deformací vykazuje asfaltová deska s nejmenším obsahem pojiva 3,7 % s hloubkou vyjeté koleje 0,82 mm. Ostatní dvě zkoušené desky dosáhly téměř totožných výsledků, směs s optimálním dávkováním pojiva ACP 32 4,2 % s hloubkou vyjeté koleje 1,04 mm, respektive směs ACP 32 4,7 % s hloubkou vyjeté koleje 1,02 mm.

Z výsledných hodnot byly následně určeny další dva parametry chování zkoušené směsi, přírůstek hloubky vyjeté koleje na 1 000 zatěžovacích cyklů WTS_{AIR} a poměrná hloubka vyjeté koleje na vzduchu PRD_{AIR} . Vzhledem k tomu, že v normě ČSN 73 6121 není pro směsi podkladních vrstev uveden požadavek na odolnost proti tvorbě trvalých deformací, byly výsledky porovnány s požadavky na asfaltové směsi pro ložní vrstvy ACL S. Výsledné hodnoty těchto parametrů jsou uvedeny v tabulce 18. Jejich grafické porovnání zobrazují grafy 19 a 20.

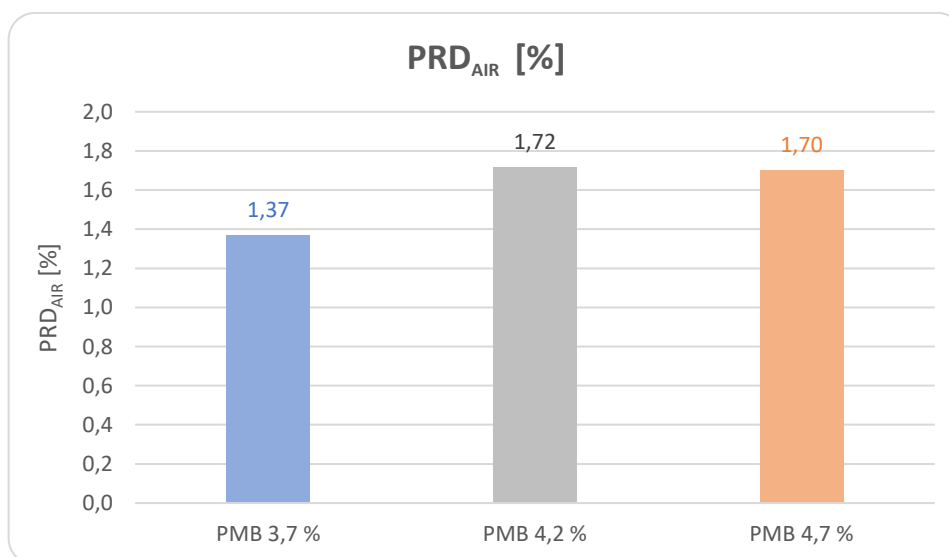
Tabulka 18. Parametry WTS_{AIR} a PRD_{AIR} jednotlivých směsí

ACP 32	PMB 3,7 %	PMB 4,2 %	PMB 4,7 %	limit pro ACL S
WTS_{AIR} [mm]	0,014	0,03	0,018	0,05
PRD_{AIR} [%]	1,37	1,72	1,70	3



Graf 19. Přírůstek hloubky vyjeté koleje na 1 000 zatěžovacích cyklů WTS_{AIR}

Na grafu 19 lze vidět, že nejmenší přírůstek hloubky vyjeté koleje na 1 000 cyklů vykazuje směs s nejnižším dávkováním pojiva ACP 32 3,7 % s hodnotou WTS_{AIR} 0,014 mm/1000 zatěžovacích cyklů. Největší hodnota WTS_{AIR} byla naměřena směsi ACP 32 4,2 % s přírůstkem vyjeté koleje 0,03 mm/1000 zatěžovacích cyklů.



Graf 20. Poměrná hloubka vyjeté koleje na vzduchu PRD_{AIR}

Z grafu 20 je zřejmé, že nejmenší poměrnou hloubku vyjeté koleje na vzduchu vykazuje směs ACP 32 3,7 % s hodnotou PRD_{AIR} 1,37 %. Další dvě zkoušené směsi dosáhly vzájemně srovnatelných výsledků, jelikož jejich výsledná hloubka vyjeté koleje byla téměř totožná. Všechny zkoušené směsi ACP 32 dosáhly výborné odolnosti vůči tvorbě trvalých deformací.

Zkušební deska ACP 32 s dávkováním pojiva 4,2 % po 10 000 zatěžovacích cyklech je zobrazena na obrázku 34.



Obrázek 34. Zkušební deska po 10 000 zatěžovacích cyklech

6 Závěr

Hlavním cílem této diplomové práce bylo provést vhodný návrh asfaltové směsi typu asfaltový beton pro podkladní vrstvy (ACP) s maximálním zrnem kameniva do 32 mm. Na výrobu jednotlivých směsí bylo použito polymerem modifikované pojivo OMV Starfalt PMB 25/55-65, na kterém byly provedeny laboratorní zkoušky stanovení penetrace jehlou a stanovení bodu měknutí metodou kroužek a kulička. Dalším cílem bylo stanovit vliv množství pojiva (3,7 %, 4,2 %, 4,7 %) na výsledné hodnoty modulu tuhosti, nízkoteplotních vlastností a odolnosti proti vzniku trvalých deformací navržené směsi ACP 32.

Podářilo se navrhnout asfaltovou směs ACP 32, která vyhovuje požadavkům švýcarské normy SN 640 431-1b-NA na tento typ směsi i volumetrickým požadavkům normy ČSN 73 6121 na směs ACP 22.

Výsledné hodnoty zkoušky penetrace jehlou (34,8 p.j.) a bodu měknutí (65,4 °C) vyhovovaly požadavku normy ČSN 65 7222-1 na polymerem modifikované pojivo třídy 25/55-65.

Při stanovení návrhové hodnoty modulu tuhosti jednotlivých směsí při teplotě 15 °C a frekvenci 10 Hz bylo zjištěno, že nejvyšší hodnoty modulu tuhosti a fázového úhlu dosáhla směs s optimálním dávkováním pojiva 4,2 %, což potvrzuje správné vyhodnocení volumetrických vlastností jednotlivých sad Marshallových těles, na jejichž základě bylo toto dávkování zvoleno jako optimální. Nejnižšího modulu tuhosti dosáhla směs s nejnižším dávkováním pojiva 3,7 %.

Ze stanovení závislosti modulu tuhosti na frekvenci je patrné, že moduly tuhosti rostou logaritmicky společně s rostoucí frekvencí. Fázové úhly s rostoucí frekvencí naopak logaritmicky klesají.

Ze stanovení závislosti modulu tuhosti na zkušební teplotě při frekvenci 10 Hz je zřejmé, že moduly tuhosti jednotlivých směsí klesají s rostoucí zkušební teplotou. Fázové úhly jednotlivých směsí při frekvenci 10 Hz s narůstající zkušební teplotou rostou.

Při ověřování nízkoteplotních vlastností jednotlivých směsí bylo zjištěno, že nejlepší nízkoteplotní chování (nejnižší kritickou teplotu) vykazuje směs ACP 32 s optimálním dávkováním pojiva 4,2 %. Naopak směs s nejnižším obsahem pojiva 3,7 % vykazuje nejhorší nízkoteplotní vlastnosti. Poměrně vysoké rozptyly výsledků mezi

jednotlivými tělesy se stejným dávkováním pojiva jsou způsobeny vlastnostmi hrubozrnných směsí a poměrem rozměru maximálního použitého zrna kameniva k rozměrům zkušebních těles.

Nejmenší hloubky vyjeté koleje dosáhla při zkoušce pojíždění kolem asfaltová deska s nejmenším obsahem pojiva 3,7 %. Ostatní dvě zkoušené desky dosáhly téměř totožných výsledků. Všechny směsi dosáhly výborné odolnosti vůči vzniku trvalých deformací.

7 Bibliografie

- [1] *HÝZL, Petr. PRAKTICKÉ APLIKACE V POZEMNÍCH KOMUNIKACÍCH. Studijní opory. Fakulta stavební VUT v Brně. Brno, 2006.*
- [2] *JIRÁSEK, Jakub a Martin VAVRO. Nerostné suroviny a jejich využití [online]. Ostrava, 2008 [cit. 2023-12-28]. Dostupné z: <http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/kamenivo.html#:~:text=drobn%C3%A9%20%E2%80%93%20kamenivo%20o%20velikosti%20zrna>*
- [3] *Ondřej Mucha Hrubozrnné asfaltové směsi. Brno, 2022. 80 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Hýzl, Ph.D.*
- [4] *Kristýna Indráková. Interakce mezi asfaltovým pojivem a fílerem. Brno, 2018. 52 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.*
- [5] *STOKLÁSEK, Svatopluk. Vlastnosti drobného drceného kameniva a jeho fílerové složky. Brno, 2016. Rešerše projektu TH02020246. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací.*
- [6] *STOKLÁSEK, S.; DAŠEK, O.; ŠPAČEK, P.; HEGR, Z.; KAŠPÁREK, M.; DUPUY, J.; ZRŮSTOVÁ, M.; HÝZL, P.; COUFALÍK, P.; VARAUS, M. Sledování vlastností drobného kameniva a jeho vlivu na funkční vlastnosti asfaltových směsí. In *Asfaltové vozovky 2017. 1. České Budějovice: PRAGOPROJEKT, a.s., K Ryšánci 1668/16, 147 54 Praha 4, 2017. s. 1-9. ISBN: 978-80-906809-0-6.**
- [7] *TAYLOR, Richard. Surface interactions between bitumen and mineral fillers and their effects on the rheology of bitumen-filler mastics [online]. Nottingham, 2007. [online]. [cit. 2023-12-28]. Dostupné z: <https://www.nottingham.ac.uk/research/groups/ntec/documents/theses/taylorrphdthesis.pdf>. University Nottingham.*
- [8] *FIALA, Pavel a Josef GODANY. Studie dostupnosti kameniva pro plánované stavby dálnic a silnic I. třídy a železniční infrastruktury. Silnice mosty [online].*

- 2022 [cit. 2023-12-30]. Dostupné z: <https://www.silnice-mosty.cz/2318-studie-dostupnosti-kameniva-pro-planovane-stavby-dalnic-a-silnic-i-tridy-a-zeleznicni-infrastruktury/>
- [9] *Kamenolom Zbraslav [online]. In: . [cit. 2023-12-30]. Dostupné z: <https://kamenzbraslav.cz/provozovny/kamenolomy/kamenolom-zbraslav/#&gid=1&pid=8>*
- [10] *ČSN 73 6121: Stavba vozovek - Hutněné asfaltové vrstvy - Provádění a kontrola shody. ÚNMZ, 2023.*
- [11] *SN 640 431-1b-NA EN 13108-1: 2006 / AC: 2008: Asphaltmischgut Mischgutanforderungen – Teil 1: Asphaltbeton.*
- [12] *ČSN EN 1426: Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení penetrace jehlou. ÚNMZ, 2015.*
- [13] *Ondřej Koblížek Vliv teploty na penetraci asfaltových pojiv. Brno, 2022. 64 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce doc. Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.*
- [14] *ČSN EN 1427: Asfalty a asfaltové pojiva - Stanovení bodu měknutí - Metoda kroužek a kulička. ÚNMZ, 2015.*
- [15] *ČSN EN 933-1: Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 1: Stanovení zrnitosti - Sítový rozbor. ÚNMZ, 2012.*
- [16] *Elektro-mechanická prosevačka [online]. In: . [cit. 2023-12-31]. Dostupné z: <https://www.strojeprozkusebnictvi.cz/elektro-mechanicka-prosevaccka.html>*
- [17] *DUBŠÍKOVÁ, Karolína. Odolnost asfaltového pojiva a asfaltové směsi vůči deformaci. Brno, 2018. 86 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.*

- [18] RIMEL, Jindřich. *Hrubozrnné asfaltové směsi*. Brno, 2023. 83 s. *Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí doc. Ing. Petr Hýzl, Ph.D.*
- [19] ČSN EN 12697-6: *Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa*. ÚNMZ, 2021.
- [20] ČSN EN 12697-5: *Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti*. ÚNMZ, 2020.
- [21] ČSN EN 12697-8: *Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 8: Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí*. ÚNMZ, 2020.
- [22] ČSN EN 12697-30: *Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem*. ÚNMZ, 2020.
- [23] ČSN EN 12697-33+A1: *Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 33: Příprava zkušebních těles zhutňovačem desek*. ÚNMZ, 2023.
- [24] ČSN EN 12697-26+A1: *Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 26: Tuhost*. ÚNMZ, 2023.
- [25] Michal Škorik *Lité asfalty*. Brno, 2022. 81 s., 5 s. příl. *Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Hýzl, Ph.D.*
- [26] ČSN EN 12697-46: *Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 46: Nízkoteplotní vlastnosti a tvorba trhlin pomocí jednoosé zkoušky tahem*. ÚNMZ, 2021.
- [27] Bc. Peter Brida *Hrubozrnné asfaltové směsi*. Brno, 2022. 141 s., 14 s. příl. *Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce doc. Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.*
- [28] ČSN EN 12697-22: *Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 22: Zkouška pojiždění kolem*. ÚNMZ, 2021.
- [29] ČSN 73 6160: *Zkoušení asfaltových směsí*. ČNI, 2008.

- [30] *ČSN EN 12697-35: Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 35: Laboratorní výroba směsi.* ÚNMZ, 2018.
- [31] *ČSN 65 7222-1: Asfalty a asfaltová pojiva - Silniční modifikované asfalty - Část 1: Polymerem modifikované asfalty.* ÚNMZ, 2017.

8 Seznamy

8.1 Seznam obrázků

Obrázek 1. Zastoupení kameniva v hrubozrnné asfaltové směsi ACP 32.....	12
Obrázek 2. Přídavný filer (vápencová moučka) [4]	14
Obrázek 3. Kamenolom Zbraslav, kraj Praha [9].....	15
Obrázek 4. Životnost disponibilních zásob v kamenolomech na území všech krajů ČR [8].....	16
Obrázek 5. Schéma penetrometru [11].....	20
Obrázek 6. Zkušební sestava dvou kroužků s držákem kroužků a základní deskou [13]	22
Obrázek 7. Automatické zařízení pro stanovení bodu měknutí	23
Obrázek 8. Třesací zařízení pro síťový rozbor [15].....	24
Obrázek 9. Stanovení hmotnosti m1	26
Obrázek 10. Stanovení hmotnosti m2	27
Obrázek 11. Stanovení hmotnosti m3	27
Obrázek 12. Rozdělování těles na hrubé částice a shluky.....	29
Obrázek 13. Pyknometr naplněný zkušebním vzorkem.....	29
Obrázek 14. Vakuová nádoba	30
Obrázek 15. Rázový zhutňovač s dřevěným blokem	33
Obrázek 16. Schéma segmentového zhutňovače vzorků [22].....	35
Obrázek 17. Segmentový zhutňovač desek.....	36
Obrázek 18. Schéma rozměrů zkušebního trapezoidu [23].....	38
Obrázek 19. Nařezaná a obroušená zkušební tělesa.....	39
Obrázek 20. Nalepená zkušební tělesa (trapezoidy)	39
Obrázek 21. Upevněné zkušební vzorky v termostatické komoře	40
Obrázek 22. Schéma zatěžovacího zařízení [25]	42
Obrázek 23. Nařezané a následně obroušené zkušební trámečky	43
Obrázek 24. Zkušební vzorek uchycený k zatěžovacímu zařízení.....	44
Obrázek 25. Deska umístěna v zařízení simulující pojíždění kolem	45
Obrázek 26. Frakce kameniva po vysušení v laboratorní sušárně	51
Obrázek 27. Ruční míchání asfaltové směsi na vařiči	52
Obrázek 28. Chlazení Marshallových těles pod větrákem.....	52
Obrázek 29. Hydraulický lis pro vytlačování Marshallových těles	52
Obrázek 30. Zhotovená Marshallova tělesa	53
Obrázek 31. Asfaltová směs ACP 32 v míchacím zařízení.....	54
Obrázek 32. Zhutněná asfaltová deska ACP 32.....	54

Obrázek 33. Porušené zkušební těleso po zkoušce TSRST	70
Obrázek 34. Zkušební deska po 10 000 zatěžovacích cyklech	74

8.2 Seznam tabulek

Tabulka 1. Maximální rozdíl platných stanovení.....	21
Tabulka 2. Požadavky na pojivo PMB 25/55-65	47
Tabulka 3. Výsledky síťového rozboru	48
Tabulka 4. Zastoupení jednotlivých frakcí kameniva pro směs ACP 32	49
Tabulka 5. Výpočet křivky zrnitosti.....	49
Tabulka 6. Stanovení objemových hmotností pro jednotlivé směsi.....	55
Tabulka 7. Stanovení maximálních objemových hmotností pro jednotlivé směsi.....	55
Tabulka 8. Stanovení V_a , VMA, VFB jednotlivých směsí.....	55
Tabulka 9. Hodnota penetrace jehlou pojiva PMB 25/55-65.....	56
Tabulka 10. Stanovení budu měknutí metodou kroužek a kulička	56
Tabulka 11. Stanovení objemových hmotností zkušebních desek	57
Tabulka 12. Stanovení míry zhutnění	57
Tabulka 13. Průměrné hodnoty modulu tuhosti a fázového úhlu při teplotě 10 °C	59
Tabulka 14. Průměrné hodnoty modulu tuhosti a fázového úhlu při teplotě 15 °C	61
Tabulka 15. Průměrné hodnoty modulu tuhosti a fázového úhlu při teplotě 20 °C	63
Tabulka 16. Výsledné hodnoty zkoušky TSRST	67
Tabulka 17. Průběh hloubky vyjeté koleje jednotlivých desek ACP 32	71
Tabulka 18. Parametry WTSAIR a PRDAIR jednotlivých směsí.....	73

8.3 Seznam grafů

Graf 1. Průběh křivky zrnitosti ACP 32.....	50
Graf 2. Moduly tuhosti jednotlivých směsí při teplotě 15 °C a frekvenci 10 Hz.....	58
Graf 3. Fázové úhly jednotlivých směsí při teplotě 15 °C a frekvenci 10 Hz.....	59
Graf 4. Závislost modulu tuhosti na frekvenci při teplotě 10 °C	60
Graf 5. Závislost fázového úhlu na frekvenci při teplotě 10 °C.....	61
Graf 6. Závislost modulu tuhosti na frekvenci při teplotě 15 °C	62
Graf 7. Závislost fázového úhlu na frekvenci při teplotě 15 °C.....	62
Graf 8. Závislost modulu tuhosti na frekvenci při teplotě 20 °C	64
Graf 9. Závislost fázového úhlu na frekvenci při teplotě 20 °C.....	64
Graf 10. Moduly tuhosti jednotlivých směsí v závislosti na teplotě při frekvenci 10 Hz	65
Graf 11. Fázové úhly jednotlivých směsí v závislosti na teplotě při frekvenci 10 Hz.....	66
Graf 12. Kritická síla při porušení těles pro jednotlivé směsi	67
Graf 13. Kritická teplota těles při porušení	68
Graf 14. Maximální kryogenní napětí v tělese při porušení.....	68
Graf 15. Závislost kryogenního napětí na teplotě směsi ACP 32 PMB 3,7 %.....	69
Graf 16. Závislost kryogenního napětí na teplotě směsi ACP 32 PMB 4,2 %.....	69
Graf 17. Závislost kryogenního napětí na teplotě směsi ACP 32 PMB 4,7 %.....	70
Graf 18. Průběh hloubky vyjeté koleje jednotlivých asfaltových desek	72
Graf 19. Přírůstek hloubky vyjeté koleje na 1 000 zatěžovacích cyklů WTSAIR.....	73
Graf 20. Poměrná hloubka vyjeté koleje na vzduchu PRDAIR	73

8.4 Seznam rovnic

Rovnice 1. Výpočet procenta propadu jemných částic	25
Rovnice 2. Výpočet objemové hmotnosti metodou SSD [17]	28
Rovnice 3. Výpočet pro stanovení maximální objemové hmotnosti [18]	30
Rovnice 4. Výpočet mezerovitosti asfaltového zkušební vzorku [19]	31
Rovnice 5. Výpočet mezerovitosti směsi kameniva VMA	31
Rovnice 6. Výpočet stupně vyplnění mezer pojivem VFB	31
Rovnice 7. Výpočet míry zhutnění asfaltové desky [20]	32
Rovnice 8. Výpočet hmotnosti navážky na jednu desku [22]	36
Rovnice 9. Výpočet modulu tuhosti E [23]	41
Rovnice 10. Výpočet reálné složky komplexního modulu tuhosti E1 [23]	41
Rovnice 11. Výpočet imaginární složky komplexního modulu tuhosti E2 [23]	41
Rovnice 12. Výpočet přírůstku hloubky vyjeté koleje [27]	46
Rovnice 13. Výpočet poměrné hloubky vyjeté koleje na vzduchu [27]	46
Rovnice 14. Výpočet Fullerovy paraboly	48

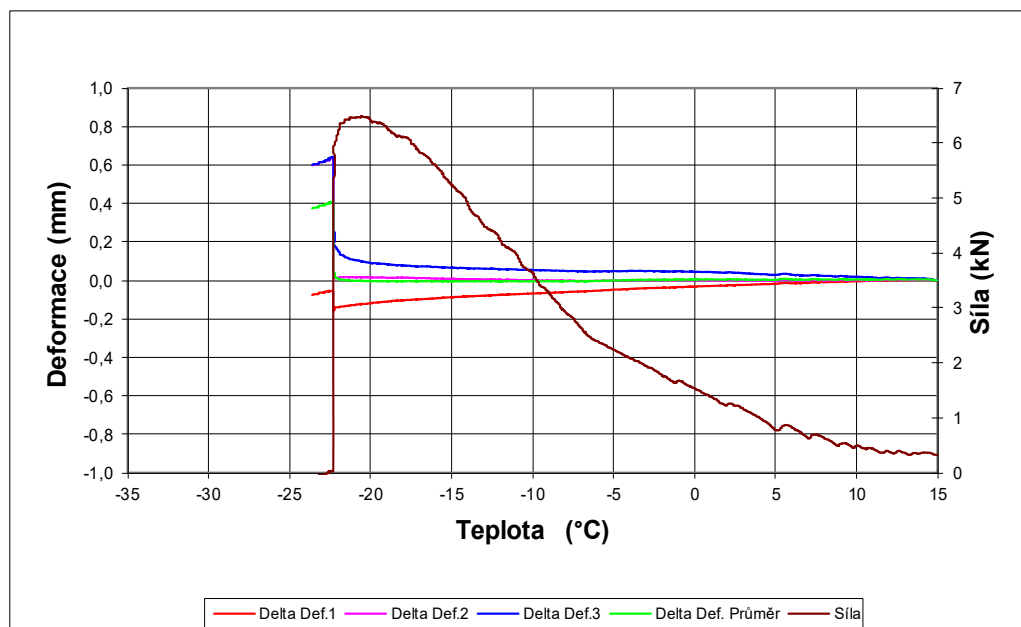
9 Přílohy



FAKULTA STAVEBNÍ VUTV BRNĚ
 Ústav pozemních komunikací
 Veveří 331/95
 602 00 Brno
 tel. : +420 541 147 341
 fax. : +420 541 213 081
 e-mail : pko@fce.vutbr.cz

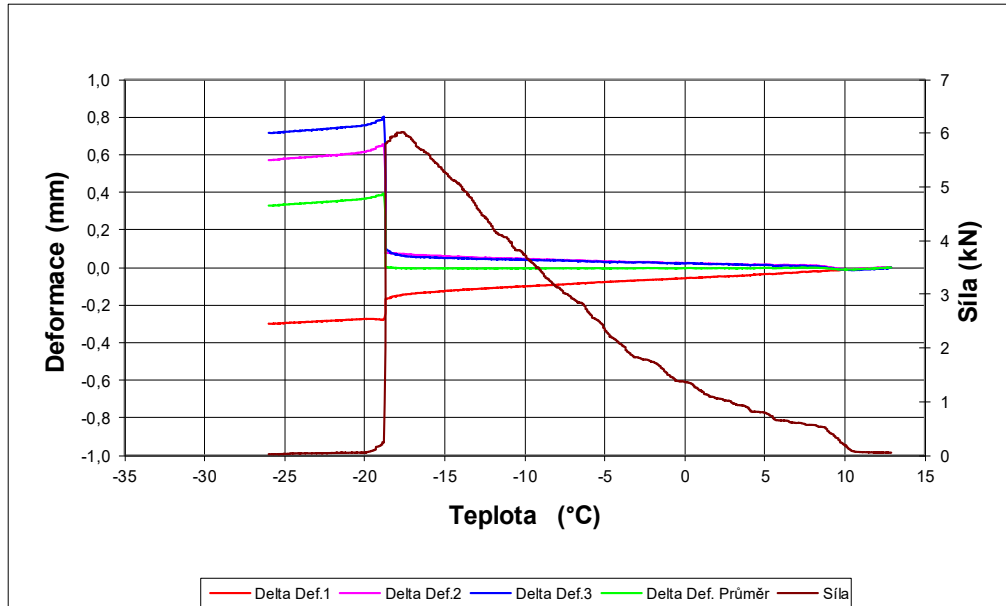
Zkouška odolnosti asfaltové směsi proti vzniku mrazových trhlin

Akce :	Diplomová práce
Asfaltová směs :	ACP 32 PMB 3,7 % III.
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	50 x 50 x 200
Datum zkoušky :	06.10.2023
Zkoušku provedl :	Ondřej Koblížek
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	6,48
Max. napětí při porušení - MPa :	2,59
Teplota v komoře při porušení - °C :	-24,0
Teplota vzorku při porušení - °C :	-20,6



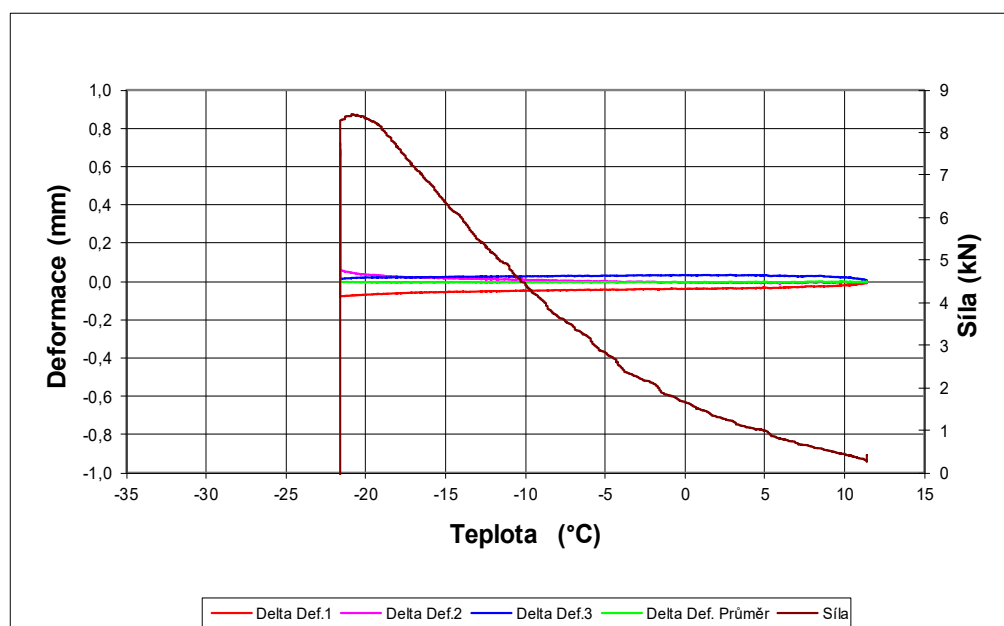
Zkouška odolnosti asfaltové směsi proti vzniku mrazových trhlin

Akce :	Diplomová práce
Asfaltová směs :	ACP 32 PMB 3,7 V.
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	50 x 50 x 200
Datum zkoušky :	03.11.2023
Zkoušku provedl :	Ondřej Kobližek
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	6,02
Max. napětí při porušení - MPa :	2,41
Teplota v komoře při porušení - °C :	-21,2
Teplota vzorku při porušení - °C :	-17,7



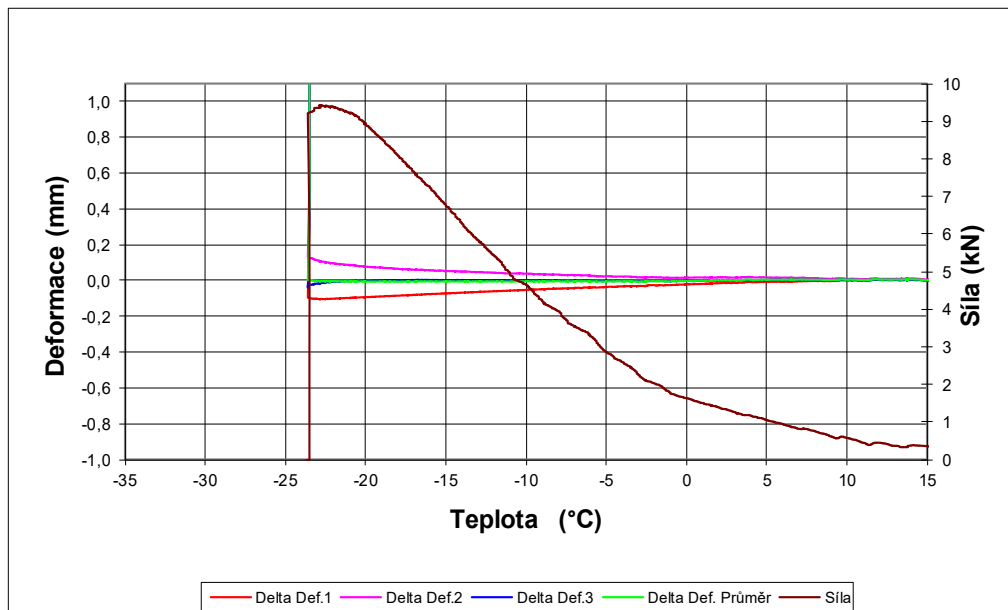
Zkouška odolnosti asfaltové směsi proti vzniku mrazových trhlin

Akce :	Diplomová práce
Asfaltová směs :	ACP 32 PMB 4,2 % II.
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	50 x 50 x 250
Datum zkoušky :	05.10.2023
Zkoušku provedl :	Ondřej Koblížek
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	8,43
Max. napětí při porušení - MPa :	3,37
Teplota v komoře při porušení - °C :	-24,6
Teplota vzorku při porušení - °C :	-20,9



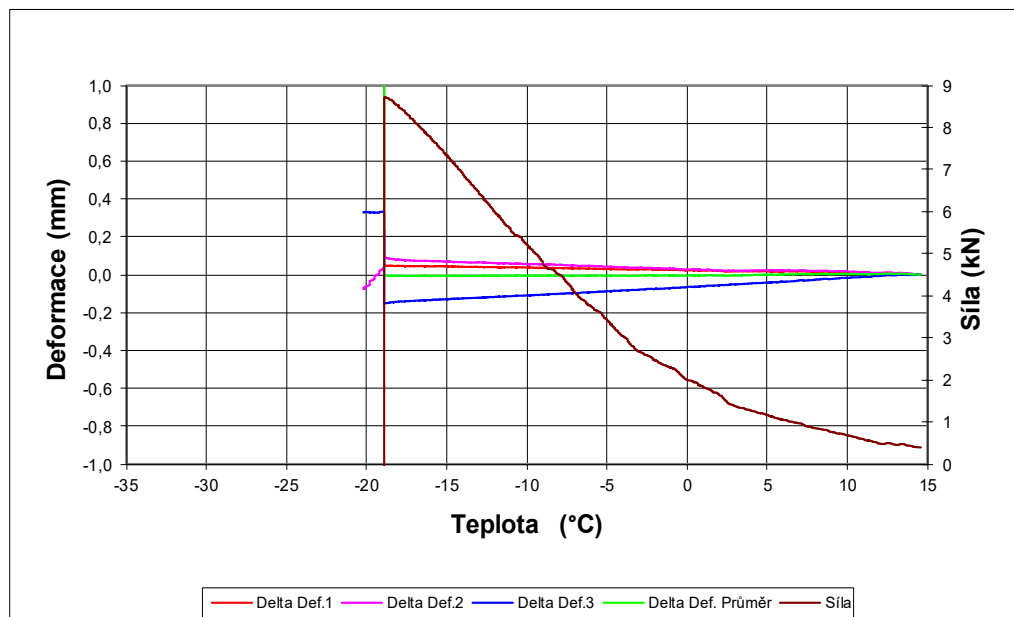
Zkouška odolnosti asfaltové směsi proti vzniku mrazových trhlin

Akce :	Diplomová práce
Asfaltová směs :	ACP32 PMB 4.2 III
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	50 x 50 x 250
Datum zkoušky :	17.10.2023
Zkoušku provedl :	Ondřej Koblížek
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	9,43
Max. napětí při porušení - MPa :	3,77
Teplota v komoře při porušení - °C :	-26,7
Teplota vzorku při porušení - °C :	-22,8



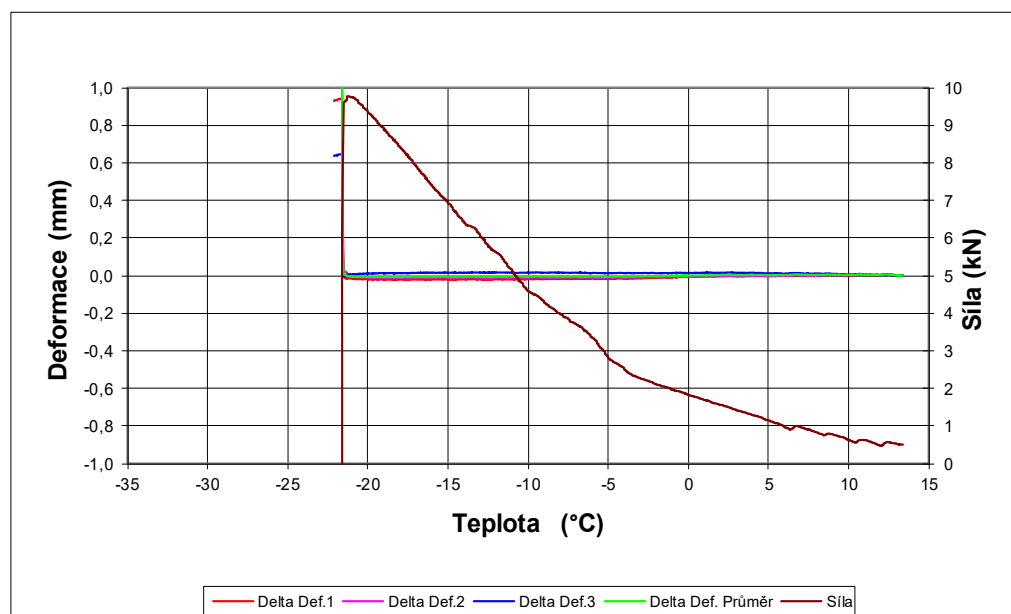
Zkouška odolnosti asfaltové směsi proti vzniku mrazových trhlin

Akce :	Diplomová práce
Asfaltová směs :	ACP 32 PMB 4,7 % II.
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	50 x 50 x 250
Datum zkoušky :	10.10.2023
Zkoušku provedl :	Ondřej Koblížek
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	8,72
Max. napětí při porušení - MPa :	3,49
Teplota v komoře při porušení - °C :	-22,2
Teplota vzorku při porušení - °C :	-18,8

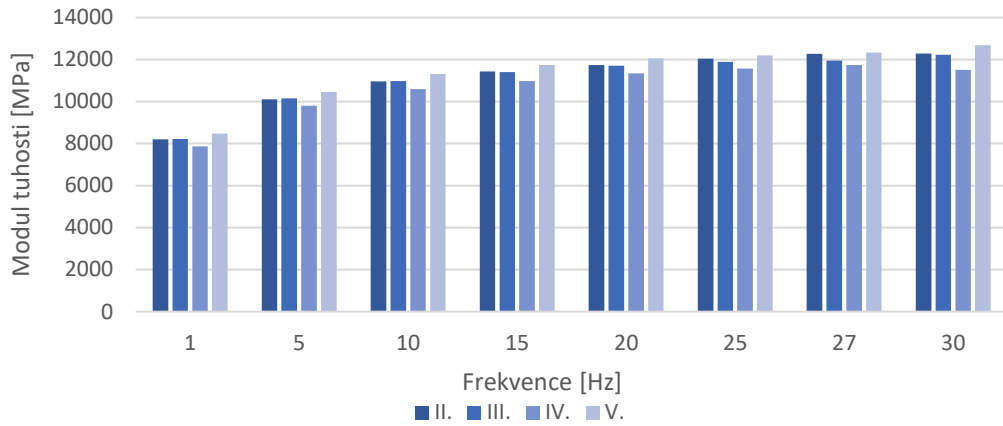


Zkouška odolnosti asfaltové směsi proti vzniku mrazových trhlin

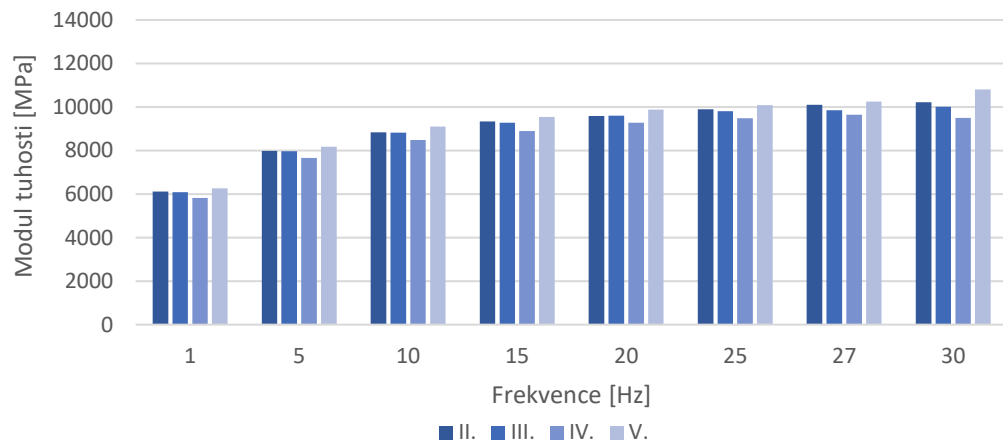
Akce :	Diplomová práce
Asfaltová směs :	ACP 32 PMB 4,7 % III.
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	50 x 50 x 200
Datum zkoušky :	13.10.2023
Zkoušku provedl :	Ondřej Kobližek
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	9,77
Max. napětí při porušení - MPa :	3,91
Teplota v komoře při porušení - °C :	-25,0
Teplota vzorku při porušení - °C :	-21,2



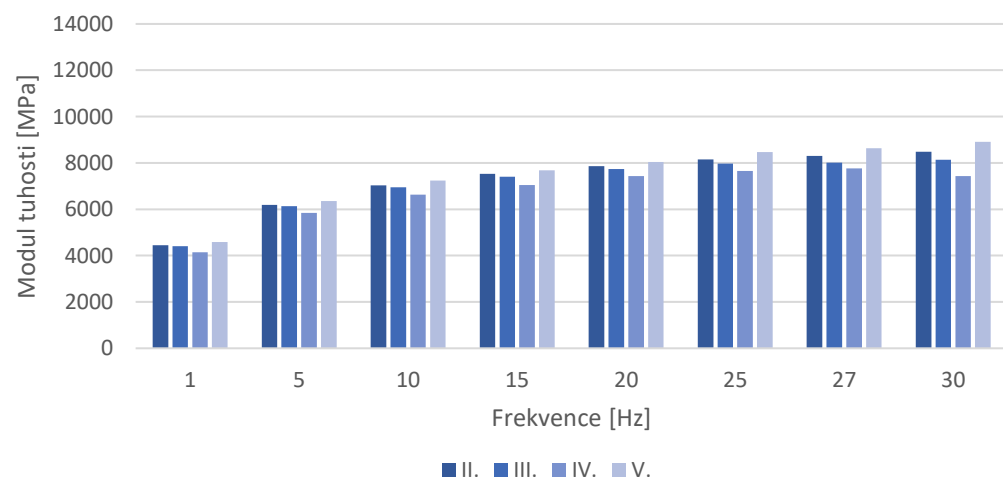
Modul tuhosti směsi s PMB 3,7 % v závislosti na frekvenci při teplotě 10 °C



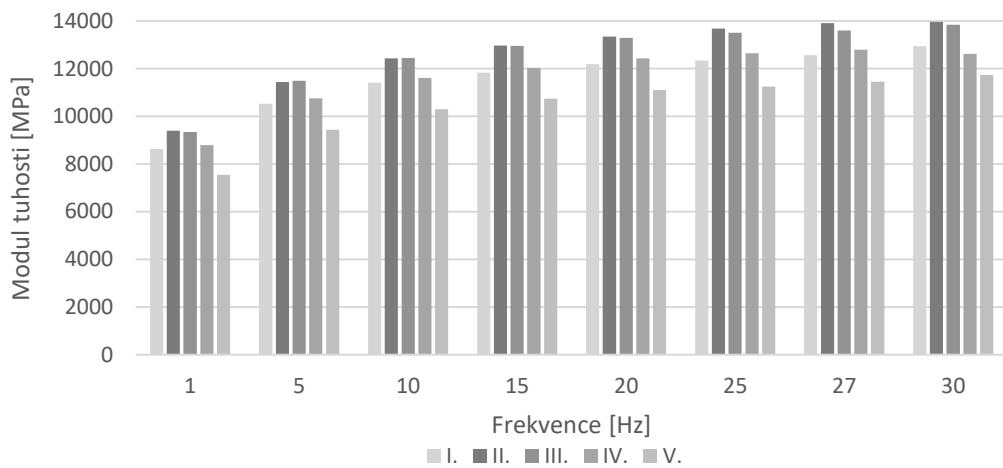
Modul tuhosti směsi s PMB 3,7 % v závislosti na frekvenci při teplotě 15 °C



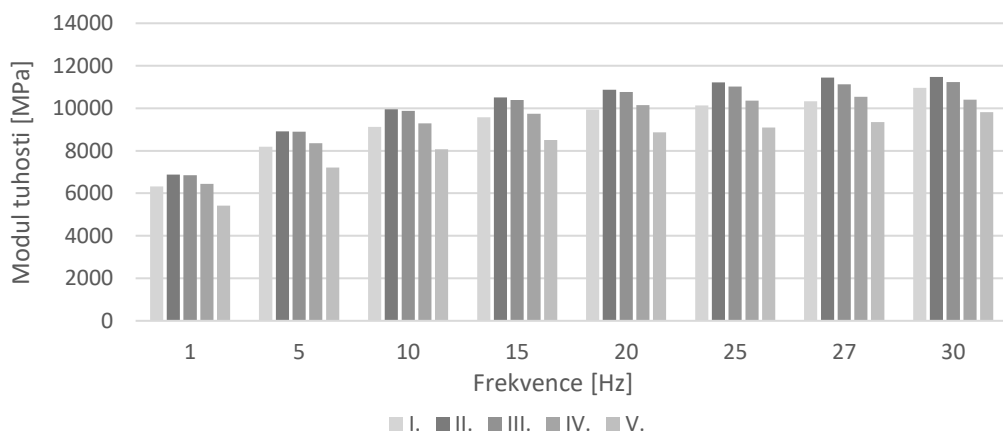
Modul tuhosti směsi s PMB 3,7 % v závislosti na frekvenci při teplotě 20 °C



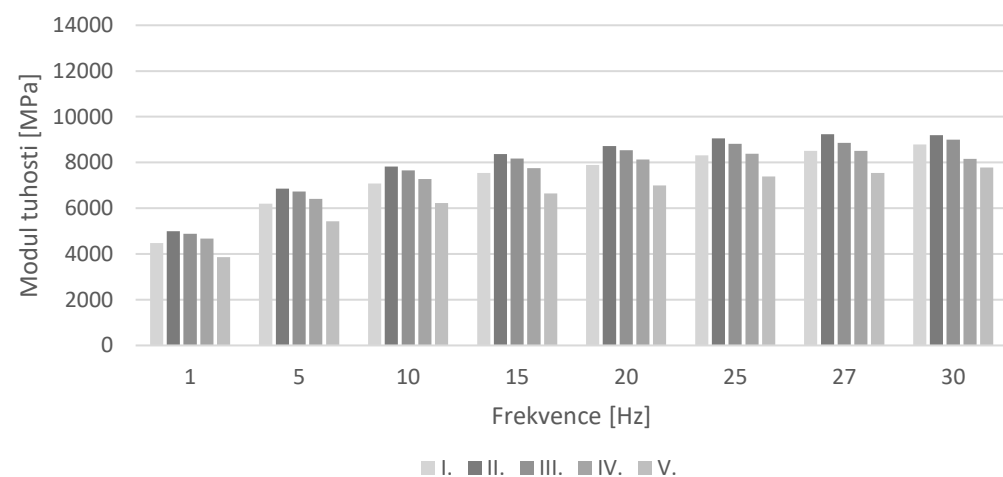
Modul tuhosti směsi s PMB 4,2 % v závislosti na frekvenci při teplotě 10 °C



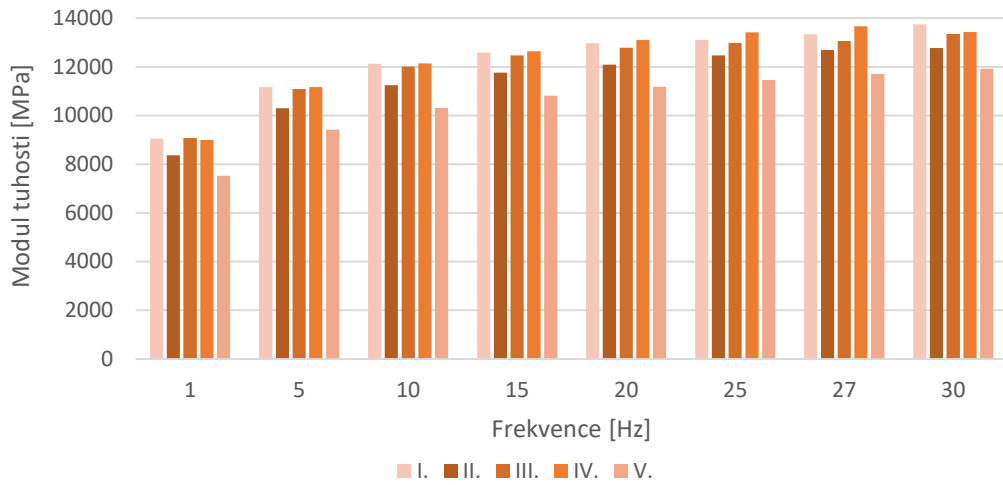
Modul tuhosti směsi s PMB 4,2 % v závislosti na frekvenci při teplotě 15 °C



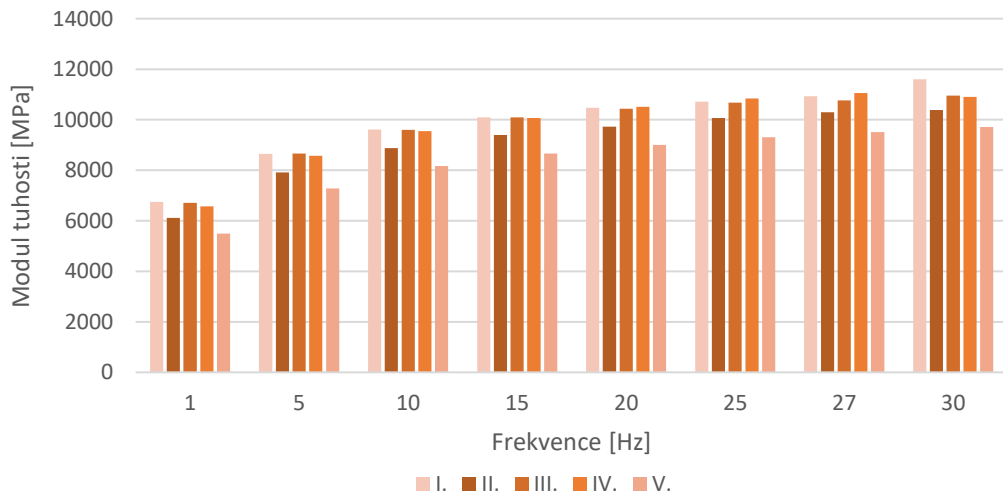
Modul tuhosti směsi s PMB 4,2 % v závislosti na frekvenci při teplotě 20 °C



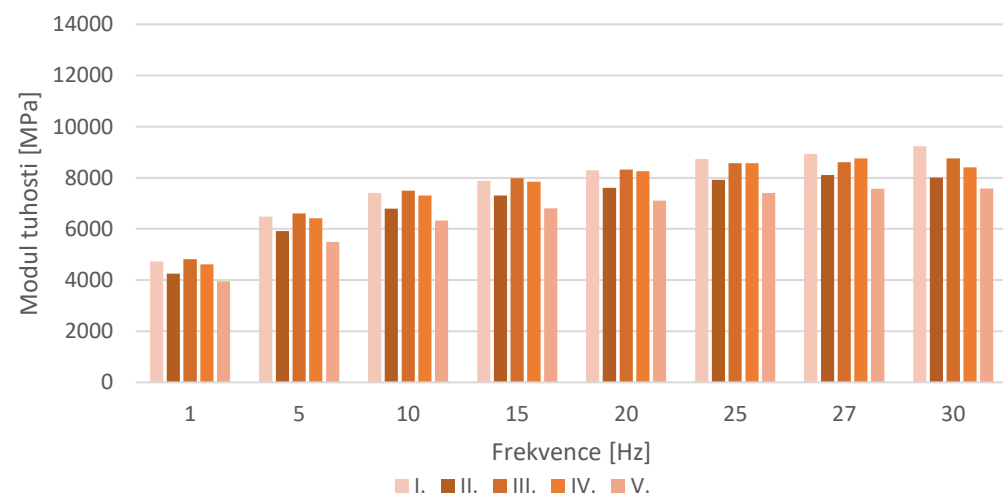
Modul tuhosti směsi s PMB 4,7 % v závislosti na frekvenci při teplotě 10 °C



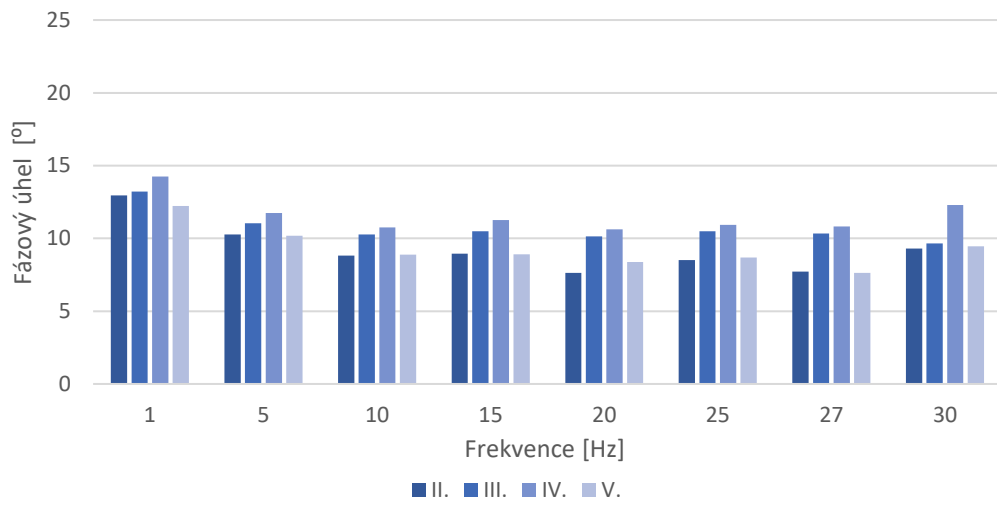
Modul tuhosti směsi s PMB 4,7 % v závislosti na frekvenci při teplotě 15 °C



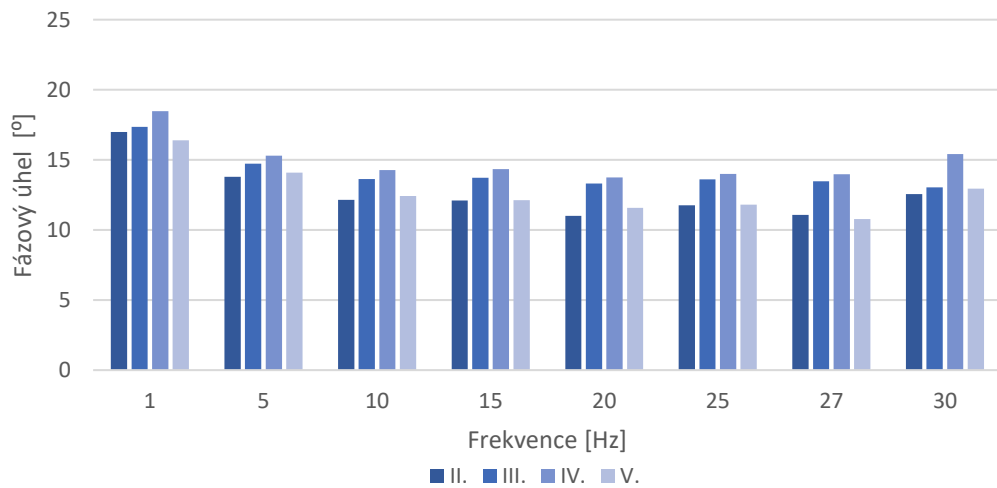
Modul tuhosti směsi s PMB 4,7 % v závislosti na frekvenci při teplotě 20 °C



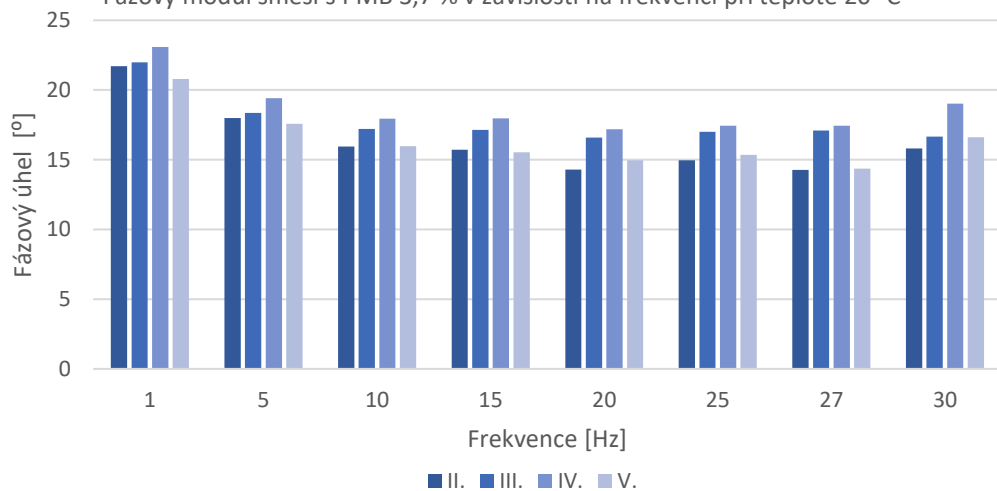
Fázový modul směsi s PMB 3,7 % v závislosti na frekvenci při teplotě 10 °C

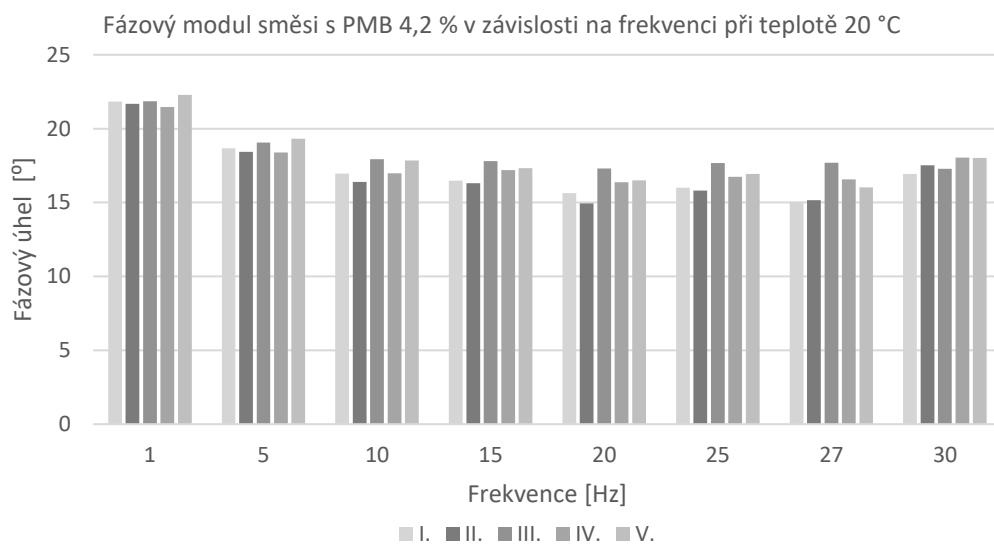
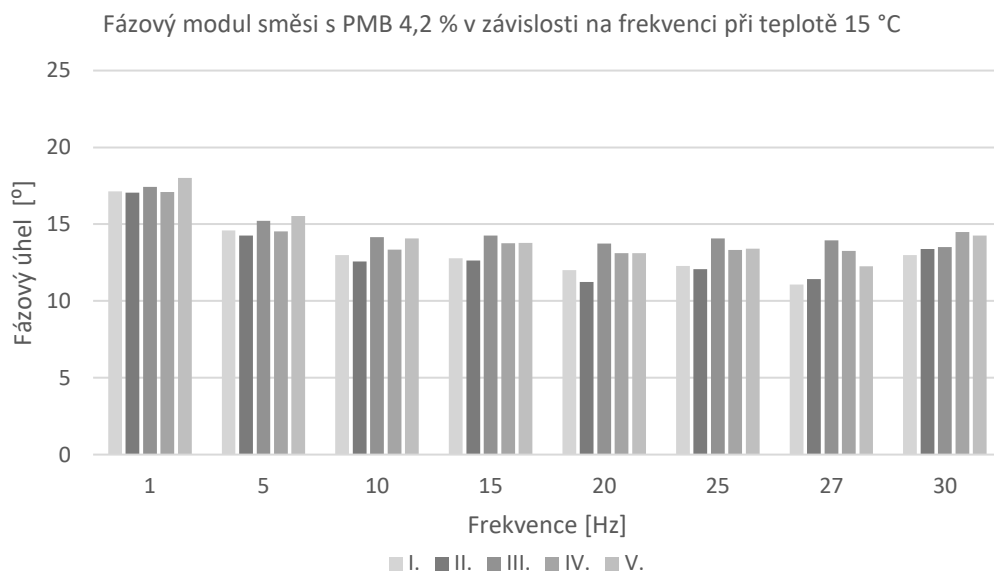
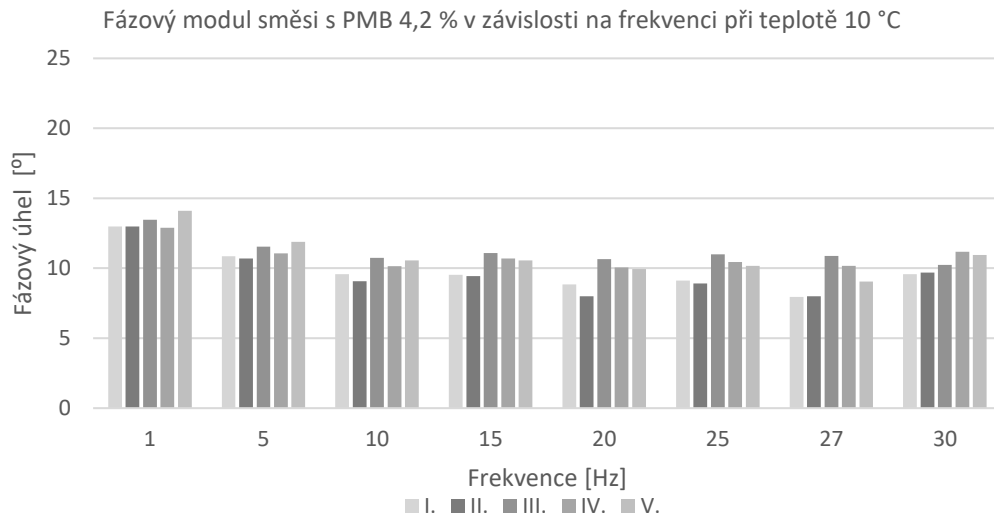


Fázový modul směsi s PMB 3,7 % v závislosti na frekvenci při teplotě 15 °C

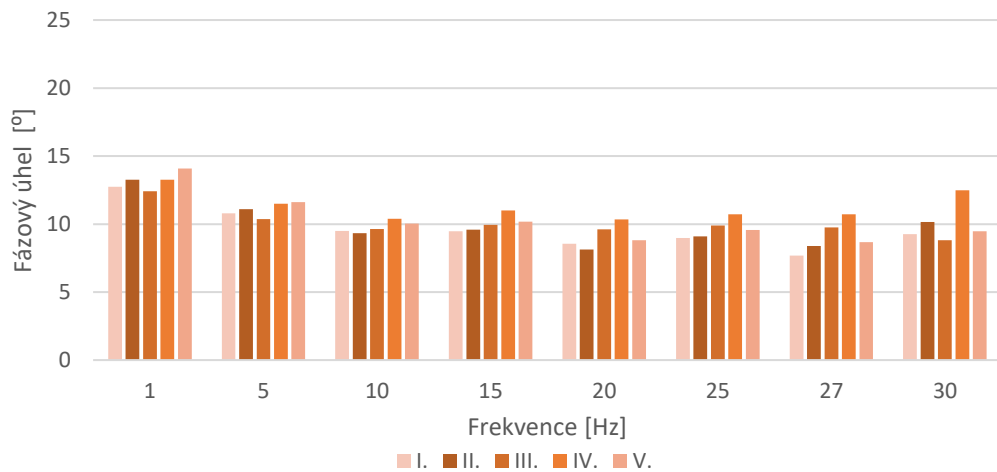


Fázový modul směsi s PMB 3,7 % v závislosti na frekvenci při teplotě 20 °C

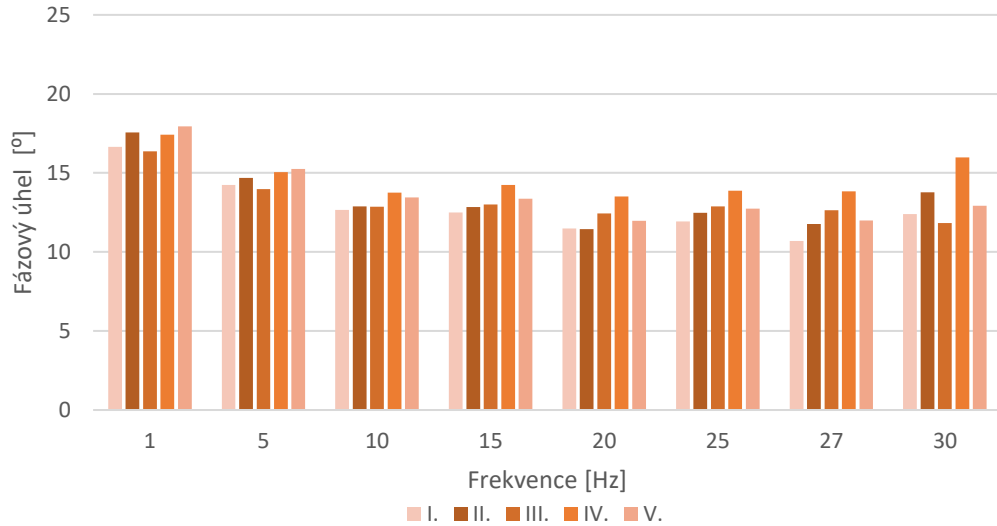




Fázový modul směsi s PMB 4,7 % v závislosti na frekvenci při teplotě 10 °C



Fázový modul směsi s PMB 4,7 % v závislosti na frekvenci při teplotě 15 °C



Fázový modul směsi s PMB 4,7 % v závislosti na frekvenci při teplotě 20 °C

