



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

ASFALTOVÉ SMĚSI SE ZVÝŠENOU ODOLNOSTÍ VŮČI VZNIKU TRHLIN

ASPHALT MIXTURES WITH HIGH RESISTANCE AGAINST CRACKS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Roman Stromecký

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ONDŘEJ DAŠEK, Ph.D.

BRNO 2017



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Roman Stromecký
Název	Asfaltové směsi se zvýšenou odolností vůči vzniku trhlin
Vedoucí práce	Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2016
Datum odevzdání	26. 5. 2017

V Brně dne 30. 11. 2016

doc. Dr. Ing. Michal Varaus
Vedoucí ústavu

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

PODKLADY A LITERATURA

Předané vzorky asfaltu, pryžového granulátu a kameniv,
odborné publikace z internetu,
diplomové práce z předcházejících let,
normy řady ČSN EN 12697,
normy řady ČSN EN 13108,
TP 148 Hutněné asfaltové vrstvy s asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem z pneumatik.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

V rámci bakalářské práce budou navrženy dvě asfaltové směsi, z nichž jedna bude obsahovat asfalt modifikovaný pryžovým granulátem. Cílem práce bude pomocí vhodných laboratorních zkoušek srovnat vlastnosti navržených směsí a zhodnotit vliv přídatku asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem do jedné z těchto směsí.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

V rámci bakalářské práce byly navrženy dvě asfaltové směsi, z nichž jedna obsahuje konvenční asfaltové pojivo a druhá asfalt modifikovaný pryžovým granulátem. Cílem práce je srovnat tuhost a únavové charakteristiky těchto dvou směsí dvoubodovou zkouškou ohybem na komolých klínech a zhodnotit vliv přídavku asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem do jedné z těchto směsí.

KLÍČOVÁ SLOVA

Pryžový granulát, asfalt modifikovaný pryžovým granulátem, konvenční asfaltové pojivo, asfaltová směs, modul tuhosti, únava

ABSTRACT

In this bachelor's thesis were suggested two kinds of asphalt mixtures. The first one contains conventional asphalt binder and the second one Crumb Rubber modified Bitumen. The aim of this thesis is a comparison of stiffness and fatigue characteristics of these two mixtures by two-point bending test on truncated wedges. There will be also an evaluation of the impact of an asphalt addition of the Crumb Rubber modified Bitumen in one of these mixtures.

KEYWORDS

Rubber granulate, Crumb Rubber modified Bitumen (CRmB), Conventional asphalt binder, asphalt mixture, stiffness, fatigue

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Roman Stromecký Asfaltové směsi se zvýšenou odolností vůči vzniku trhlin. Brno, 2017. 65 s., 4 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.

Prohlášení:

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

V Brně dne

.....
podpis autora

Poděkování:

Na této straně bych velmi rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Ondřeji Daškovi, Ph.D. za jeho odborný přístup, poskytnuté materiály, důležité rady a ochotu během celého průběhu mé práce. Dále bych chtěl poděkovat Pavlu Strakovi za pomoc v silniční laboratoři a Kateřině Kuchařové za pomoc v silniční laboratoři na AdMaSe. Nakonec bych chtěl poděkovat mé rodině za obrovskou trpělivost a podporu během celého studia.

OBSAH

1	ÚVOD.....	11
2	CÍLE PRÁCE	12
3	ASFALT MODIFIKOVANÝ PRYŽOVÝM GRANULÁTEM.....	13
4	ASFALTOVÉ SMĚSI S CRMB	13
4.1	Výroba směsi CRmB	13
5	POUŽITÉ ZKUŠEBNÍ METODY	14
5.1	Sítový rozbor	14
5.1.1	Použité přístroje a pomůcky	14
5.1.2	Postup sítového rozboru.....	15
5.2	Laboratorní výroba směsi	16
5.3	Použité přístroje a pomůcky pro ruční míchání.....	16
5.3.1	Postup výroby směsi ručním mícháním	17
5.3.2	Použité přístroje a pomůcky pro strojní míchání	17
5.3.3	Postup výroby směsi strojním mícháním	17
5.4	Hutnění zkušebních těles rázovým zhutňovačem	18
5.4.1	Použité přístroje a pomůcky	19
5.4.2	Příprava před hutněním.....	19
5.4.3	Postup hutnění.....	20
5.5	Hutnění desek segmentovým zhutňovačem.....	21
5.5.1	Použité přístroje a pomůcky	21
5.5.2	Příprava před hutněním.....	21
5.5.3	Postup hutnění.....	22
5.6	Stanovení objemové hmotnosti na zkušebních tělesech.....	24
5.6.1	Použité pomůcky a přístroje.....	24
5.6.2	Postup zkoušky	25
5.6.3	Objemová hmotnost zkušebního tělesa	25
5.7	Stanovení maximální objemové hmotnosti.....	26
5.7.1	Použité pomůcky a přístroje.....	26
5.7.2	Postup zkoušky	26
5.7.3	Vyhodnocení zkoušky.....	28
5.8	Stanovení mezerovitosti Marshallových těles a desek.....	28
5.8.1	Výpočet mezerovitosti	28
5.8.2	Výpočet stupně vyplnění mezer pojivem	29

5.9 Stanovení tuhosti – zkouška dvoubodovým ohybem na jednostranně vetknutém komolém klínu (2PB-TR).....	30
5.9.1 Použité pomůcky a přístroje.....	30
5.9.2 Příprava před provedením zkoušky.....	30
5.9.3 Postup zkoušky.....	31
5.10 Stanovení únavových charakteristik.....	33
5.10.1 Použité přístroje a pomůcky.....	34
6 PRAKTICKÁ ČÁST – POUŽITÝ MATERIÁL	35
6.1 Použité kamenivo	35
6.2 Použité pojivo.....	36
7 PRAKTICKÁ ČÁST: NÁVRH ASFALTOVÝCH SMĚSÍ	36
7.1 Návrh zrnitosti směsi 1 a směsi 2	36
7.1.1 Zrnitost směsi 1.....	36
7.1.2 Zrnitost směsi 2.....	38
8 PRAKTICKÁ ČÁST: VÝSLEKY PROVÁDĚNÝCH ZKOUŠEK	40
8.1 Objemová hmotnost, maximální objemová hmotnost, mezerovitost směsi 1 a směsi 2	40
8.2 Směs 1: Mezerovitost směsi kameniva, stupeň vyplnění mezer pojivem.....	42
8.3 Směs 2: Mezerovitost směsi kameniva, stupeň vyplnění mezer pojivem.....	44
8.4 Objemová hmotnost, mezerovitost a míra zhutnění zkušebních desek směsi 1 a směsi 2	46
8.5 Stanovení modulů tuhosti	47
8.6 Stanovení únavových charakteristik.....	50
9 ZÁVĚR	53
10 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	54
11 SEZNAM OBRÁZKŮ	56
12 SEZNAM GRAFŮ	57
13 SEZNAM TABULEK.....	58
14 SEZNAM PŘÍLOH.....	59
14.1 Příloha 1: Objemová hmotnost, maximální objemová hmotnost, mezerovitost směsi 1 a směsi 2	59
14.2 Příloha 2: Objemová hmotnost, mezerovitost a míra zhutnění zkušebních desek směsi 1 a směsi 2	63

14.3 Příloha 3: Rozměry jednotlivých zkušebních těles pro stanovení modulu tuhosti a únavových charakteristik.....	64
14.4 Příloha 4: Jednotlivé výsledky měření při stanovování únavových charakteristik	65

1 ÚVOD

Vzhledem k rostoucímu dopravnímu zatížení na českých silnicích jsou netuhé vozovky stále více zatěžovány. V mnohých případech není jejich skladba na nový přírůstek zatížení dimenzována, nebo jsou již porušené. Časté rekonstrukce vozovek způsobují komplikace, zdržení a plynulost dopravy. Porušené vozovky často nelze opravit jinak než položením nové obrusné vrstvy nebo dokonce výměnou více asfaltových vrstev.

Jako dobré řešení se nabízí využití asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem. Pryžový granulát není nic jiného, než podrcená pryž z ojetých recyklovaných pneumatik. Použitím asfaltové směsi s asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem, označovaným jako CRmB, se může prodloužit životnost vozovky. Z důvodu obsahu pryže v asfaltu je však třeba dávkovat vyšší množství pojiva do asfaltové směsi, což se také pozitivně projevuje na prodloužení životnosti směsi. Dalšími výhodami je snížení hluku, zvýšení protismykových vlastností vozovky a v neposlední řadě možnost využití odpadního materiálu z pneumatik, čímž se pozitivně ovlivňuje ekologie prostředí a mohou se snížit kubatury skládek pneumatik, které nejsou esteticky příznivé v žádné krajinné oblasti a v případě jejich požáru dochází k velkému znečištění okolního prostředí. Protože jsou tyto asfaltové směsi obsahující asfalt modifikovaný pryžovým granulátem v České republice víceméně mladou technologií, je nutné s tímto stavebním materiálem získávat zkušenosti a zjišťovat jeho laboratorní vlastnosti.

2 CÍLE PRÁCE

Hlavním cílem bakalářské práce je zjistit vliv přidaného pryžového granulátu na tuhost a únavové charakteristiky. Práce je složena ze dvou hlavních částí: teoretické a praktické.

V teoretické části bylo mým cílem stručně popsat problematiku asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem a výrobu směsí s jeho použitím. Dále pak popsat jednotlivé zkoušky a postupy, kterými jsem se řídil při návrhu a zkoušení směsí.

V praktické části bylo cílem zjistit, jak ovlivní přidaný pryžový granulát tuhost a únavové charakteristiky směsí v porovnání s konvenční směsí. Jako srovnávací směs byla zvolena směs Asfaltového betonu pro obrusné vrstvy ACO 11+, která byla navržena dle ČSN EN 13108-1. Pro tuto směs byl zvolen běžně používaný silniční asfalt gradace 50/70. Jako směs s předpokládanou vyšší odolností vůči vzniku trhlin byla navržena asfaltová směs typu asfaltový beton pro obrusné vrstvy ACO 11+ s asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem. Tato směs byla navržena dle ČSN EN 13 108-1 a TP 148. Asfalt modifikovaný pryžovým granulátem byl vyrobený v mísicím zařízení přistaveném na obalovně asfaltových směsí (kontinuální výroba CRmB). Návrh asfaltové směsi s CRmB vycházel z návrhu uvedené konvenční směsi ACO 11+, ovšem složení směsi bylo nutné přizpůsobit zvláštním vlastnostem CRmB (zejména jeho vysoké viskozitě). Proto byl snížen obsah drobného kameniva a dále byl zvýšen obsah pojiva.

Přesto, že se jedná o asfaltové směsi pro obrusné vrstvy, byly kromě tuhosti v této práci stanoveny únavové charakteristiky. Protože se jedná o novou směs s CRmB a bylo snahou o této směsi získat co nejvíce informací [1], [2].

3 ASFALT MODIFIKOVANÝ PRYŽOVÝM GRANULÁTEM

Technologie přídavku pryžového granulátu do silničního asfaltu a asfaltových se do Evropy dostala z USA. V USA se pro tuto technologii používalo označení Asphalt Rubber (popř. Rubberized Asphalt). Z toho vznikl hovorový název gumoasfalt, kterým se označuje technologie, pojivo i asfaltová směs [3].

4 ASFALTOVÉ SMĚSI S CRMB

Hlavním důvodem modifikace silničních asfaltů je zlepšení vlastností asfaltových pojiv, směsí a vrstev. Výhodou CRmB je jeho použití do směsí, kde je žádaná zvýšená odolnost proti únavovým, reflexním a mrazovým trhlinám a do drenážních vrstev, které by vykazaly nedostatečnou únosnost s použitím konvenčních pojiv.

Díky možnosti použití vyšší množství pojiva a větší viskozitě je třeba čáru zrnitosti asfaltových směsí s CRmB posunout níže, tj. snížit obsah drobného kameniva ve směsi tak, aby byl prostor pro pojivo v kostře kameniva. Vstupní návrhové složení směsí kameniva s použitím CRmB leží při spodních mezních čarách zrnitosti příslušných typů asfaltových směsí dle norem řady ČSN EN 13108. To je důvod proč lze vyrobit mezerovité asfaltové směsi a jemnozrné asfaltové směsi s dodržením jejich životnosti a tenkovrstvé úpravy (běžně 20 – 30mm) [3].

4.1 Výroba směsi CRmB

Nejpoužívanější technologií pro zpracování pryžového granulátu ve výrobě asfaltových směsí se nazývá *Mokrý proces (wet process)*. Tato metoda je popsána v TP 148. Metoda mokrého procesu je založena na vmíchání pryžového granulátu do asfaltového pojiva, ze kterého je následně vyrobena směs. Pojivo se označuje jako *asfalt modifikovaný pryžovým granulátem*. Při mokrému procesu je pojivo vyráběno ve speciálním mísícím zařízení nazývaném *blender* [4].



Obrázek 1: Mísící zařízení blender, ve kterém se vyrábí pojivo při mokřém procesu [4]

5 POUŽITÉ ZKUŠEBNÍ METODY

V této části budou popsány všechny zkoušky, postupy či zkušební metody, které jsem použil během zpracování praktické části.

5.1 Sítový rozbor

Sítový rozbor je popsán v normě ČSN EN 993-1. Podstata zkoušky spočívá v roztřídění a oddělení materiálu pomocí sady sít do několika frakcí se sestupnou velikostí otvorů. Otvory sít a počet sít jsou vybrány vždy dle druhu vzorků a požadované přesnosti.

5.1.1 Použité přístroje a pomůcky

Zkušební síta, pevně lícující víko a dno sady sít, sušárna pro vysušení kameniva, prací zařízení, laboratorní váhy s přesností na $\pm 0,1$ % hmotnosti zkušební navážky, nádoby, kartáče, štětce, prosévací přístroj.

5.1.2 Postup síťového rozboru

Nejprve se v sušárně vysuší množství zkoušeného materiálu při teplotě $110 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ na ustálenou hmotnost. Po vychladnutí se materiál zváží a zaznamená se hmotnost (M_1). Následně se provede tzv. praní vzorku, to znamená, že se materiál promíchává s vodou, aby došlo k dokonalému oddělení jemných částic, a následně se všechna voda nechá protéci sítím velikosti $63 \text{ }\mu\text{m}$, dokud neodtéká čirá čirá voda. Poté se zůstatek materiálu na síti $63 \text{ }\mu\text{m}$ opět vysuší a zváží (M_2).

Vysušený vzorek nasype na připravenou sadu sítí, které jsou nad sebou, sestupně podle velikosti otvorů sítí. Následně se na třesacím zařízení nastaví vibrace a po několika minutách se vibrace ukončí. Poté jsou odebrány jednotlivá síta a zaznamenávají se hmotnosti na každém z nich (R_1, R_2, R_3, \dots). Při praní se nejjemnější částice nikdy nevyplaví úplně, proto jsou zaznamenávány hmotnosti propadu částic přes nejmenší síto $63 \text{ }\mu\text{m}$ (P).

Všechny zaznamenané hmotnosti na jednotlivých sítích jsou v protokolu vyjádřeny procentuálně k původní vysušené hmotnosti (M_1) a následně se vynese tzv. čára zrnitosti. Čára zrnitosti je grafické vyjádření zaznamenaných hmotností. Také je provedeno vyjádření procenta jemných částic, které propadly sítím $63 \text{ }\mu\text{m}$ dle vztahu:

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

kde:

M_1 je hmotnost vysušené zkušební navážky, v kg;

M_2 je hmotnost vysušeného zůstatku na síti $0,063 \text{ mm}$, v kg;

P je hmotnost propadu jemných částic na dně, v kg [4], [14].



Obrázek 2: Zkušební síta s třesacím zařízením, vhodné pro síťový rozbor

5.2 Laboratorní výroba směsi

Výroba asfaltových směsí v laboratoři je prováděna podle evropské normy ČSN EN 12697-35+A1 Asfaltové směsi – zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 35: Laboratorní výroba směsi. V normě je popsáno ruční i strojní míchání směsi v laboratoři. V mé práci budou použity obě metody, tak je popíši.

5.3 Použité přístroje a pomůcky pro ruční míchání

Nádoba na míchání materiálu, misky na kamenivo, lopatka, odvětrávaná sušárna, konvenční asfaltové pojivo, asfalt modifikovaný pryžovým granulátem, kamenivo frakce 0/4, 4/8, 8/11, vápencová moučka (filer), laboratorní váhy a teploměr.

5.3.1 Postup výroby směsi ručním mícháním

Nejdříve je třeba v laboratorní sušárně vysušit jednotlivé frakce kameniva a filer při teplotě 110 ± 5 °C. Kamenivo je vysušené, když dvě po sobě následující vážení prováděná nejméně po jedné hodině se neliší více než o 0,1% hmotnosti zkušební navážky. Pokud je tento požadavek splněn, lze pokračovat dalším krokem. Další krok je nahřátí konvenčního asfaltového pojiva a pojiva modifikovaným pryžovým granulátem na požadovanou teplotu (pro smísení s kamenivem) v odvětrávané sušárně. Konvenční pojivo se zahřeje na 155 °C, pojivo modifikované pryžovým granulátem na 170 °C. Před samotným smísením obou pojiv, kameniva a fileru je třeba nahřát špachtli a nádobu, ve které dojde ke smísení.

Po ohřátí všech pomůcek a surovin na požadovanou teplotu, se nejprve do nádoby vsype kamenivo s filerem a provede se míchání za sucha. Poté se nádoba umístí na laboratorní váhu a přidá se asfaltové pojivo resp. pojivo modifikované pryžovým granulátem s přesností $\pm 1\%$ hmotnosti dávkovaného pojiva. Následně se směs důkladně promíchá, dokud nedojde k dostatečnému obalení kameniva pojivem. Maximální doba ručního míchání pro konvenční asfaltové pojivo je 5 minut, pro pojivo s pryžovým granulátem dle časové potřeby. Takto navržené směsi se zhutňují a jsou z nich vyrobena tzv. Marshallova tělesa.

5.3.2 Použité přístroje a pomůcky pro strojní míchání

Laboratorní míchačka, která umožní obalení všech zrn kameniva do 5 minut vybavena termostatickým ohřevem, misky na kamenivo, lopatka, odvětrávaná sušárna, konvenční asfaltové pojivo, asfalt modifikovaný pryžovým granulátem, kamenivo frakce 0/4, 4/8, 8/11, vápenná moučka (filer), laboratorní váhy, teploměr.

5.3.3 Postup výroby směsi strojním mícháním

Nejdříve je třeba v laboratorní sušárně vysušit jednotlivé frakce kameniva a filer při teplotě 110 ± 5 °C. Kamenivo je vysušené, když dvě po sobě následující vážení prováděná nejméně po jedné hodině se neliší více než o 0,1% hmotnosti zkušební navážky. Pokud je tento požadavek splněn, lze pokračovat dalším krokem. Další krok je nahřátí konvenčního asfaltového pojiva a asfaltu modifikovaným pryžovým granulátem na

požadovanou teplotu (pro smísení s kamenivem) v odvětrávané sušárně. Konvenční pojivo se zahřeje na 155 °C, pojivo modifikované pryžovým granulátem na 170 °C.

Kamenivo a filer se vsypou do nahřáté laboratorní míchačky. Následně se naváží potřebné množství konvenčního pojiva resp. asfaltu modifikovaným pryžovým granulátem. Takto navážené asfaltové pojivo se přidá do míchačky. Směs se míchá tak dlouho, dokud nedojde k obalení. [5], [6].



Obrázek 3: Laboratorní míchačka vhodná pro máchání kameniva s asfaltovým pojivem

5.4 Hutnění zkušebních těles rázovým zhutňovačem

Tato metoda je názorně popsána v evropské normě ČSN EN 12697-30+A2 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem. Podstatou zkoušky je nasypání připravené asfaltové směsi do ocelové formy pro hutnění.

5.4.1 Použité přístroje a pomůcky

Rázový zhutňovač s ocelovým dolním podstavcem, forma na hutnění, sušárna na ohřev asfaltových směsí, ocelový blok pro počáteční ohřev podložky bicí hlavy, plechová násypka, špachtle, separační papír, teploměr.

5.4.2 Příprava před hutněním

Nejdříve se musí určit množství asfaltové směsi potřebné pro výrobu jednoho zkušební tělesa. Zkušební těleso má tvar válcového průřezu o průměru $(101,5 \pm 0,1)$ mm a výšku $(63,5 \pm 2,5)$ mm. Potřebná navážka se pohybuje v rozmezí od 1050 g do 1400 g. Proveďte se tzv. pokusné hutnění. Pokud takto vyrobené těleso má předepsanou výšku $(63,5 \pm 2,5)$ mm, lze hmotnost navážky ponechat a vyrábět další tělesa. Pokud má těleso jinou výšku než výšku předepsanou, musí se vhodně upravit navážka pro výrobu dalších těles.

Takto připravené navážky se ohřívají v sušárně na požadovanou teplotu. Požadovaná teplota je 155 °C. Je však potřeba nahřát na teplotu hutnění i formu a podložku bicí hlavy hutnicího pěchu a před hutněním první navážky nahřát také podložku formy a bicí hlavy [5], [7].



Obrázek 4: Rázový zhutňovač Marshallových těles

5.4.3 Postup hutnění

Na ohřátou podložku formy, která byla zahřáta na teplotu hutnění se položí připravené kolečko separačního papíru. Ohřátá směs se následně po částech naplní násypkou do formy pro hutnění a jemně se srovná špachtlí. Je potřeba dát pozor, aby nedošlo k segregaci směsi. Po naplnění se povrch srovná špachtlí a umístí se na něj druhé kolečko ze separačního papíru. Bezprostředně potom se na formu nasadí nástavec pro hutnění a celá soustava se umístí do zhutňovače. Zkušební těleso je hutněno 50 údery z jedné strany. Následně se forma obrátí a hutní se 50 údery ze strany druhé. Hutnící beran pěchu dopadá z výšky (457 ± 5) mm. Tento proces musí proběhnout za dobu maximálně 4 minut. Následně se válcová forma se zkušebním tělesem vyjme ze zhutňovače. Odebere se separační papír a nechá se vychladnout na laboratorní teplotu. Poté se vzorek (Marshallovo těleso) pomocí výtlačného zařízení vyjme z formy.



Obrázek 5: Marshallova tělesa vyrobená pomocí rázového zhutňovače

5.5 Hutnění desek segmentovým zhutňovačem

Hutnění desek popisuje evropská norma ČSN EN 12697-33+A1 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 33: Příprava zkušebních těles zhutňovačem desek. Podstatou této metody je hutnění asfaltové směsi do obdélníkové formy pomocí segmentového zhutňovače.

5.5.1 Použité přístroje a pomůcky

Segmentový zhutňovač, sušárna pro ohřev směsi, krycí plech, špachtle, separační prostředek a separační papír.

5.5.2 Příprava před hutněním

Nejdříve se stanoví potřebné množství směsi pro výrobu jedné desky. Hmotnost směsi pro výrobu jedné desky se stanoví z rozměrů zkušební desky a objemové hmotnosti získané na Marshallových tělesech:

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

kde:

- M je hmotnost desky (potřebné navážky) asfaltové směsi, v kg;
- L je vnitřní délka formy, v mm;
- l je vnitřní šířka formy, v mm;
- e je tloušťka desky snižená o tloušťku plechu;
- ρ je zhutněná objemová hmotnost asfalt zjištěná na Marshallových tělesech.

Takto připravená navážka asfaltové směsi o stanovené hmotnosti se následně nahřeje v sušárně na požadovanou teplotu hutnění, tj. 155 °C. Sepne se hutnicí forma segmentového zhutňovače a vymaže se separačním prostředkem.

5.5.3 Postup hutnění

V okamžiku, kdy je na povrchu asfaltové směsi v sušárně naměřena požadovaná teplota hutnění, se přistoupí na plnění formy. Do se formy segmentového zhutňovače se vsype nahřátá navážka asfaltové směsi. Pomocí špachtle se rozprostře a urovná. V rohách formy se špachtlí několikrát propíchne, aby se zajistilo dostatečné vyplnění rohů desky asfaltovou směsí. Na povrch urovnané asfaltové směsi se položí separační papír, na něj se položí krycí plech. Rázovým zhutňovačem se opatrně sjede až k povrchu směsi. Následně se na přístroji zapne hutnicí program. Je vždy třeba před hutněním nastavit žádanou tloušťku desky. Po zhutnění desky se nechá deska ve formě vychladnout. Následně se forma odepne a zhutněná deska se vyjme [5], [8].



Obrázek 6: Segmentový hutnicí přístroj pro hutnění zkušebních desek



Obrázek 7: Kontrola teploty při hutnění asfaltové směsi

5.6 Stanovení objemové hmotnosti na zkušebních tělesech

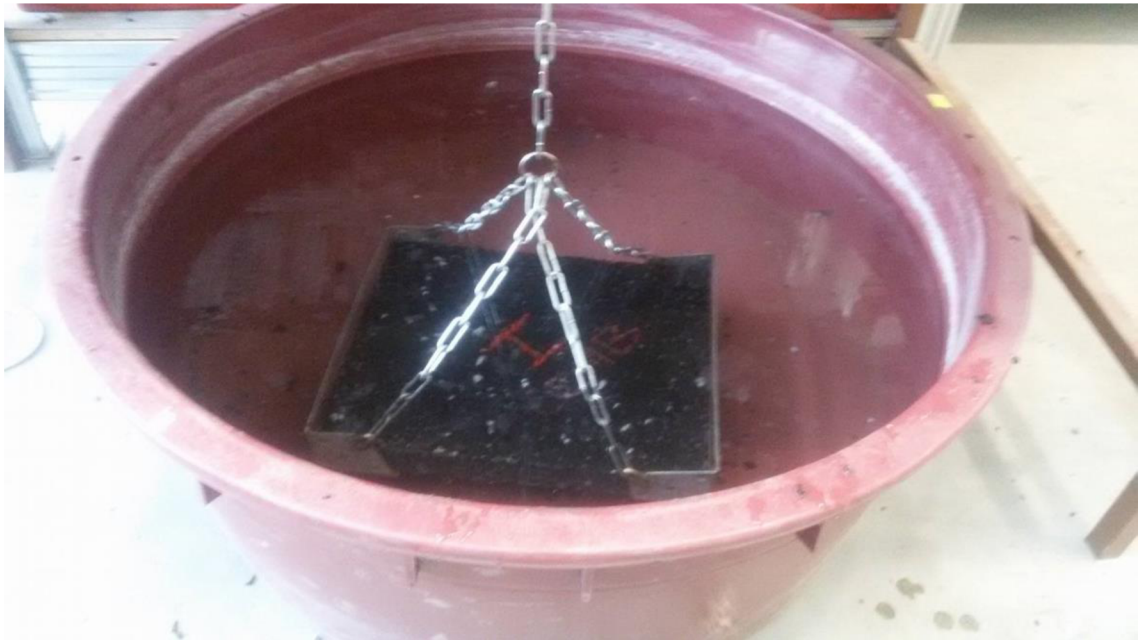
Objemová hmotnost je hmotnost, která připadá na jednotku objemu zkušebního tělesa včetně jeho mezer. Stanovení objemové hmotnosti je popsáno v evropské normě ČSN EN 12697-6+A1 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro provádění asfaltové směsi za horka - Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa. Norma popisuje 4 možné postupy, jak lze stanovit objemovou hmotnost. Ke své práci jsem si vybral postup: Objemová hmotnost – nasycený suchý povrch (SSD) a ten zde popíši.

5.6.1 Použité pomůcky a přístroje

Laboratorní váha s přesností $\pm 0,1$ g (vhodná k vážení ve vodě i na vzduchu), kovový košík pro vážení tělesa pod vodou, vodní lázeň, teploměr s přesností $\pm 0,1$ °C, osuška pro povrchové osušení tělesa.

5.6.2 Postup zkoušky

Prvním krokem je stanovení hmotnosti suchého zkušební tělesa m_1 . Následně se těleso ponoří do vodní lázně. Je důležité, aby těleso bylo ve vodní lázni ponořeno celým svým objemem. Ve vodní lázni se těleso ponechá alespoň 30 minut, aby došlo k dostatečnému nasycení. Následně se vloží těleso do kovového košíku, který je zavěšen na laboratorní váhu a po ustálení jeho hmotnosti se zváží těleso pod vodou m_2 . Po tomto kroku se zjistí teplota vody, ze které lze snadno odvodit hustotu vody ρ_w . Zvážené těleso se vyjme z vody a pomocí osušky se povrchově osuší a okamžitě stanoví hmotnost nasyceného tělesa vodou m_3 .



Obrázek 8: Vyrobená deska ponořená ve vodní lázni

5.6.3 Objemová hmotnost zkušební tělesa

Z naměřených hmotností a hustoty vody se vypočítá objemová hmotnost zkušební tělesa s přesností na 1 kg/m^3 dle vztahu:

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

kde:

- ρ_{bssd} je objemová hmotnost zkušební tělesa (SSD); v kg/m^3 ;
- m_1 je hmotnost suchého tělesa, v g;
- m_2 je hmotnost tělesa ve vodě, v g;
- m_3 je hmotnost tělesa nasyceného vodou a povrchově osušeného, v g;
- ρ_w je hustota vody při zkušební teplotě stanovená s přesností na $0,1 \text{ kg/m}^3$, v kg/m^3 [5], [9].

5.7 Stanovení maximální objemové hmotnosti

Maximální objemová hmotnost je hmotnost, která připadá na jednotku objemu směsi bez mezer. Je potřebná pro výpočet mezer ve ztuhnutém vzorku. Maximální objemová hmotnost je popsána dle evropské normy ČSN EN 12697-5+A1 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti. Norma popisuje 3 možné způsoby. Ve své práci jsem použil volumetrický postup, proto zde popíši jen jej.

5.7.1 Použité pomůcky a přístroje

Pyknometr s nástavcem, vývěva, vodní lázeň s prouděním vody, teploměr s přesností $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$, laboratorní váha, sušárna, alobal, perchlorethylen.

5.7.2 Postup zkoušky

Vzorek asfaltové směsi se v sušárně zahřeje na takovou teplotu, aby změknl, maximálně však na $110 \text{ }^\circ\text{C}$. Následně za postupného ochlazování se vzorek ručně rozdrtuje na jednotlivá zrna, přitom maximální velikost jednoho zrna může být 6 mm. Po důkladném rozdrtění je vzorek možné použít pro provedení zkoušky. Hmotnost jednotlivých navážek se v mé práci pohybovala okolo 1000 g.

Před začátkem zkoušky je třeba zvážít prázdný pyknometr s nástavcem m_1 . Objem pyknometru V_P je již předem známý. Následně se rozdrtěný vzorek opatrně vsype do pyknometru. Nechá se temperovat na laboratorní teplotu a pyknometr s nástavcem a vzorkem se zváží m_2 . Poté se pyknometr naplní perchlorethylenem, maximálně však 30 mm pod okraj. Je dobré s pyknometrem opatrně míchat, aby se vzduch dostal ven. Následně se pyknometr doplní perchlorethylenem skoro po referenční značku. Takto

připravený vzorek se nechá temperovat na dobu minimálně 90 minut ve vodní lázni s teplotou $(25 \pm 0,2)$ °C. Po vytemperování se opět pyknometr promíchá a doplní perchlorethylenem po referenční značku. Pyknometr se osuší a následně zvaží m_3 .



Obrázek 9: Rozmělněná asfaltová směs



Obrázek 10: Pyknometry s rozpouštědlem a asfaltovou směsí

5.7.3 Vyhodnocení zkoušky

Maximální objemová hmotnost se získá ze vztahu:

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

kde:

ρ_{mv} je maximální objemová hmotnost asfaltové směsi, v kg/m^3

m_1 je hmotnost pyknometru včetně nástavce, v kg;

m_2 je hmotnost pyknometru včetně nástavce a zkušební vzorku, v kg;

m_3 je hmotnost pyknometru včetně nástavce, zkušební vzorku a rozpouštědla, v kg;

ρ_w je hustota vody při zkušební teplotě stanovená s přesností na $0,1 \text{ kg/m}^3$, v kg/m^3 [5], [10].

5.8 Stanovení mezerovitosti Marshallových těles a desek

Mezerovitost je objem mezer ve zkušebním tělese vyjádřený v procentech celkového objemu zkušební tělesa. Stanovené mezerovitosti je popsáno v evropské normě ČSN EN 12697-8 Asfaltové směsi za horka – Část 8: Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí.

Norma také obsahuje kromě mezerovitosti V_m charakteristiku, kterou je stupeň vyplnění mezer pojivem VFB vyjádřenou v %. V mé práci jsem pro Marshallova tělesa stanovil obě tyto charakteristiky, pro vyrobené desky pouze mezerovitost.

5.8.1 Výpočet mezerovitosti

Mezerovitost zkušební tělesa se získá ze vztahu:

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

kde:

V_m je mezerovitost zkušební tělesa, v %, s přesností 0,1%;

ρ_m je maximální objemová hmotnost směsi, v kg/m^3 ;

ρ_b je objemová hmotnost zkušební tělesa, v kg/m^3 .

5.8.2 Výpočet stupně vyplnění mezer pojivem

Stupeň vyplnění mezer ve směsi kameniva pojivem v asfaltovém tělesa se vypočítá ze vztahu:

$$VFB = \frac{B \times \rho_b}{VMA} \times 100$$

kde:

VFB je stupeň vyplnění mezer ve směsi kameniva pojivem, v %, s přesností 0,1%;

B je obsah pojiva ve zkušebním tělese ve 100% směsi, v %, s přesností 0,1%;

ρ_b je objemová hmotnost zkušební tělesa, v kg/m^3

ρ_B je objemová hmotnost pojiva, v kg/m^3 ;

VMA je mezeovitost směsi kameniva, v %, s přesností 0,1%.

Mezerovitost směsi kameniva se vypočítá s přesností 0,1% podle vztahu:

$$VMA = V_m + B \times \frac{\rho_b}{\rho_B}$$

kde:

VMA je mezerovitost směsi kameniva, v %, s přesností 0,1%;

V_m je mezerovitost zkušební tělesa, v %, s přesností 0,1%;

B je obsah pojiva ve zkušebním tělese ve 100% směsi, v %, s přesností 0,1%;

ρ_b je objemová hmotnost zkušební tělesa, v kg/m^3 ;

ρ_B je objemová hmotnost pojiva, v kg/m^3 [5], [11].

5.9 Stanovení tuhosti – zkouška dvoubodovým ohybem na jednostranně vetknutém komolém klínu (2PB-TR)

Jde o funkční zkoušku asfaltových směsí, při které se zjišťuje modul tuhosti asfaltové směsi. Zkouška je popsána v evropské normě ČSN EN 12697-26 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 26: Tuhost. V normě je popsáno několik zkušebních metod. V rámci mé práce byla použita metoda zkoušky dvoubodovým ohybem na jednostranně vetknutém komolém klínu, a proto popíši jen tuto metodu.

Podstatou této zkoušky je, že vzorky jsou deformovány v oblasti lineárních přetvoření, a to buď při vyvozování stejného zatěžování, nebo při zatěžování konstantním přetvořením. Měří se amplituda napětí a poměrného přetvoření spolu s fázovým úhlem mezi napětím a poměrným přetvořením.

5.9.1 Použité pomůcky a přístroje

Zkušební zařízení COOPER, které dokáže vyvodit sinusový dynamický průhyb ve vrcholu zkušebního tělesa při frekvencích o rozsahu od 1 Hz do 30 Hz. Dále odvětrávací komora pro udržení konstantní teploty. Měřicí zařízení, které je složeno ze snímače pro měření dynamické síly, snímače pro měření průhybu a ze zařízení pro měření fázového úhlu. Dále kovová podkladní destička pro přilepení zkušebního tělesa, speciální rychletuhnoucí lepidlo, váhy s přesností na 0,1 g, šuplera, pila pro řezání těles.

5.9.2 Příprava před provedením zkoušky

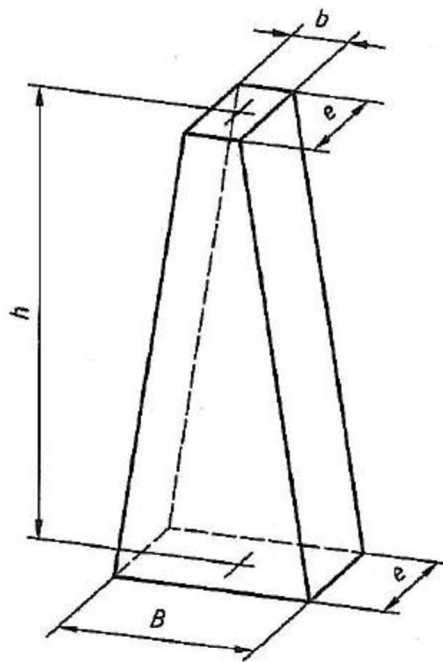
Pro tuto zkoušku je třeba připravit zkušební tělesa tvaru komolého klínu (trapezoidy), které mají rozměry uvedené na obrázku 11. Tato tělesa se získají vyřezáním z desek o tl. 40 mm, které se vyrobí dle kap. 5.4. Z jedné desky se získá 5 zkušebních těles. Zkušební tělesa se po nařezání omyjí vodou a osuší při laboratorní teplotě. Dalším krokem je zjistit hmotnosti zkušebních těles s přesností na 0,01 mm. Následně jsou zkušební tělesa přilepena na kovovou podkladní destičku pomocí speciálního rychletuhnoucího lepidla tak, aby jeho strany byly rovnoběžné s hranami podkladní destičky a těleso bylo přilepeno svisle. Na horní části se také přilepí kovová destička.

Rozměry: $h = 250 \text{ mm}$

$B = 70 \text{ mm}$

$b = 25 \text{ mm}$

$e = 40 \text{ mm}$



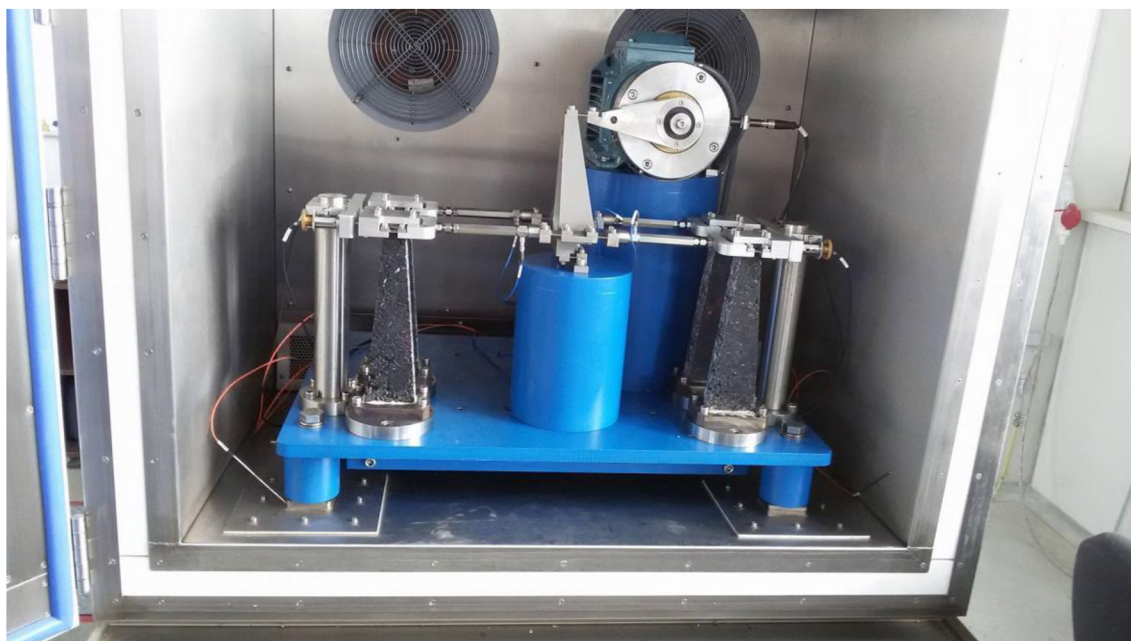
Obrázek 11: Rozměry zkušební tělesa [5]

5.9.3 Postup zkoušky

Po vytvrzení lepidla se zkušební tělesa umístí do termostatické komory zkušebního zařízení, kde se nechají minimálně 4 hodiny temperovat na první požadovanou teplotu měření. První požadovaná teplota v mém případě byla $10 \text{ }^\circ\text{C}$. Po vytemperování zkušebních těles se upevní pomocí podkladní destičky a šrouby k rámu zařízení. V rámci mé práce bylo použito zkušební zařízení COOPER, které umožňuje provádět zkoušku na 4 tělesech zároveň, viz obr. 11. Do programu zkušebního přístroje se dále zadají rozměry zkušebních těles. Na zkušebním přístroji se nastaví maximální přetvoření $5 \cdot 10^{-5} \text{ m/m}$. Přístroj bude měřit tuhosti zkušebních těles při frekvencích zatěžování 1 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz, 27 Hz a 30 Hz při teplotách $-5 \text{ }^\circ\text{C}$, $10 \text{ }^\circ\text{C}$, $15 \text{ }^\circ\text{C}$, $25 \text{ }^\circ\text{C}$ a $40 \text{ }^\circ\text{C}$. Před započítím měření při změně každé teploty jsou zkušební tělesa temperována vždy 4 hodiny. Následně je prováděno postupně pro všechny uvedené frekvence. Tímto postupem byly testovány 4 zkušební tělesa (v případě ACO 11+), resp. 5 zkušebních těles (v případě ACO 11 s CRmB) a výsledné moduly tuhosti byly následně zprůměrovány [5], [12].



Obrázek 12: Přilepené zkušební těleso na horní a dolní kovovou destičku



Obrázek 13: Upevněních zkušebních těles ve zkušebním přístroji



Obrázek 14: Veškerá vyrobená komolá tělesa

5.10 Stanovení únavových charakteristik

Jde o funkční zkoušku asfaltových směsí, při které se zjišťuje odolnost proti únavě. Zkouška je popsána v evropské normě ČSN EN 12697 -24. Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 24: Odolnost vůči únavě. V normě je popsáno několik zkušebních metod. V rámci mé práce byla použita metoda zkoušky dvoubodovým ohybem na jednostranně vetknutém komolém klínu, a proto popíši jen tuto metodu. Podstatou této zkoušky je, že vzorky jsou deformovány v oblasti plastických deformací. Zvolí se počáteční poměrné přetvoření ε , které je konstantní po celou dobu zkoušky (strain control). V důsledku působením namáhání dochází k poklesu komplexního modulu, v závislosti na počtu cyklů do poklesu modulu tuhosti, závislosti na počtech cyklů, a tím k šíření únavových trhlin. Nastaví se počáteční poměrné přetvoření ε . Měří se počet cyklů do poklesu modulu tuhosti vlivem únavy na polovinu hodnoty po 1 milionu

cyklů. Výsledkem měření všech zkušebních těles je grafické znázornění ve Wöhlerově diagramu. Wöhlerův diagram je v logaritmickém měřítku, a vyjadřuje závislost počtu cyklů a počátečním poměrným přetvořením. Do grafu se zaznamenává počáteční hodnota přetvoření a k ní odpovídající počet cyklů zatížení, kdy je dosažena poloviční hodnota počátečního modulu tuhosti. Zaznamenanými body se proloží spojnice trendu, z jejichž sklonu se stanoví poměrné přetvoření ε pro hodnotu 10^6 zatěžovacích cyklů, které určuje odolnost směsi proti únavě.

5.10.1 Použité přístroje a pomůcky

Zkušební zařízení COOPER, které dokáže vyvodit sinusový dynamický průhyb ve vrcholu zkušebního tělesa při frekvencích o rozsahu od 1 Hz do 30 Hz. Dále odvětrávací komora pro udržení konstantní teploty. Měřicí zařízení, které je složeno ze snímače pro měření dynamické síly, snímače pro měření průhybu a ze zařízení pro měření fázového úhlu. Dále kovová podkladní destička pro přilepení zkušebního tělesa, speciální rychletuhnoucí lepidlo, váhy s přesností na 0,1 g, šuplera, pila pro řezání těles [5], [13].

6 PRAKTICKÁ ČÁST – POUŽITÝ MATERIÁL

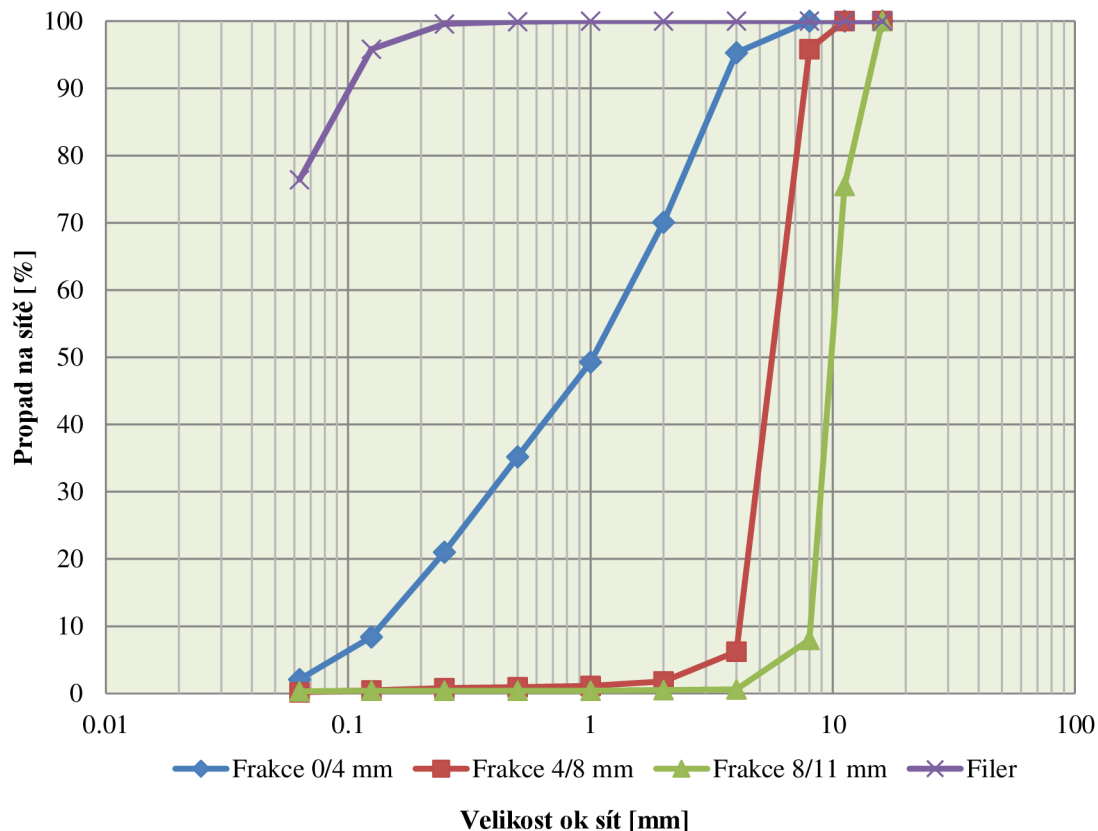
6.1 Použité kamenivo

V mé práci jsem použil kamenivo z lomu Luleč. Použil jsem frakce 0/4, 4/8, 8/11 a vápencovou moučku (filer) z lokality Mokrá.

Jednotlivé čáry zrnitosti byly stanovené mnou. Propady na jednotlivých sítích a křivky zrnitosti jsou uvedeny v tabulce a grafu:

Frakce kameniva	Propad na síť [%]									
	16	11	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
8/11	100	75,5	8,0	0,6	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3
4/8	100	100	95,0	11,4	6,3	6,1	6,0	5,7	4,9	4,0
0/4	100	100	100	95,3	70,1	49,3	35,2	21,0	8,4	2,1
Filer	100	100	100	100	100	100	99,9	99,6	95,8	76,4

Tabulka 1: Propady na sítích jednotlivých frakcí



Graf 1: Čáry zrnitosti jednotlivých frakcí kameniva

6.2 Použité pojivo

Pro účely bakalářské práce byla použita 2 :Pojivo silničního asfaltu gradace 50/70, jež je běžně používaným pojivem v České republice a dále pojivo gradace 50/70 modifikované pryžovým granulátem. Toto modifikované pojivo obsahovalo 15% pryžového granulátu, čímž vznikl asfalt modifikovaný pryžovým granulátem gradace 25/55-60. Toto pojivo splnilo požadavky uvedené v TP 148 pro visokoviskózní CRmB.

7 PRAKTICKÁ ČÁST: NÁVRH ASFALTOVÝCH SMĚSÍ

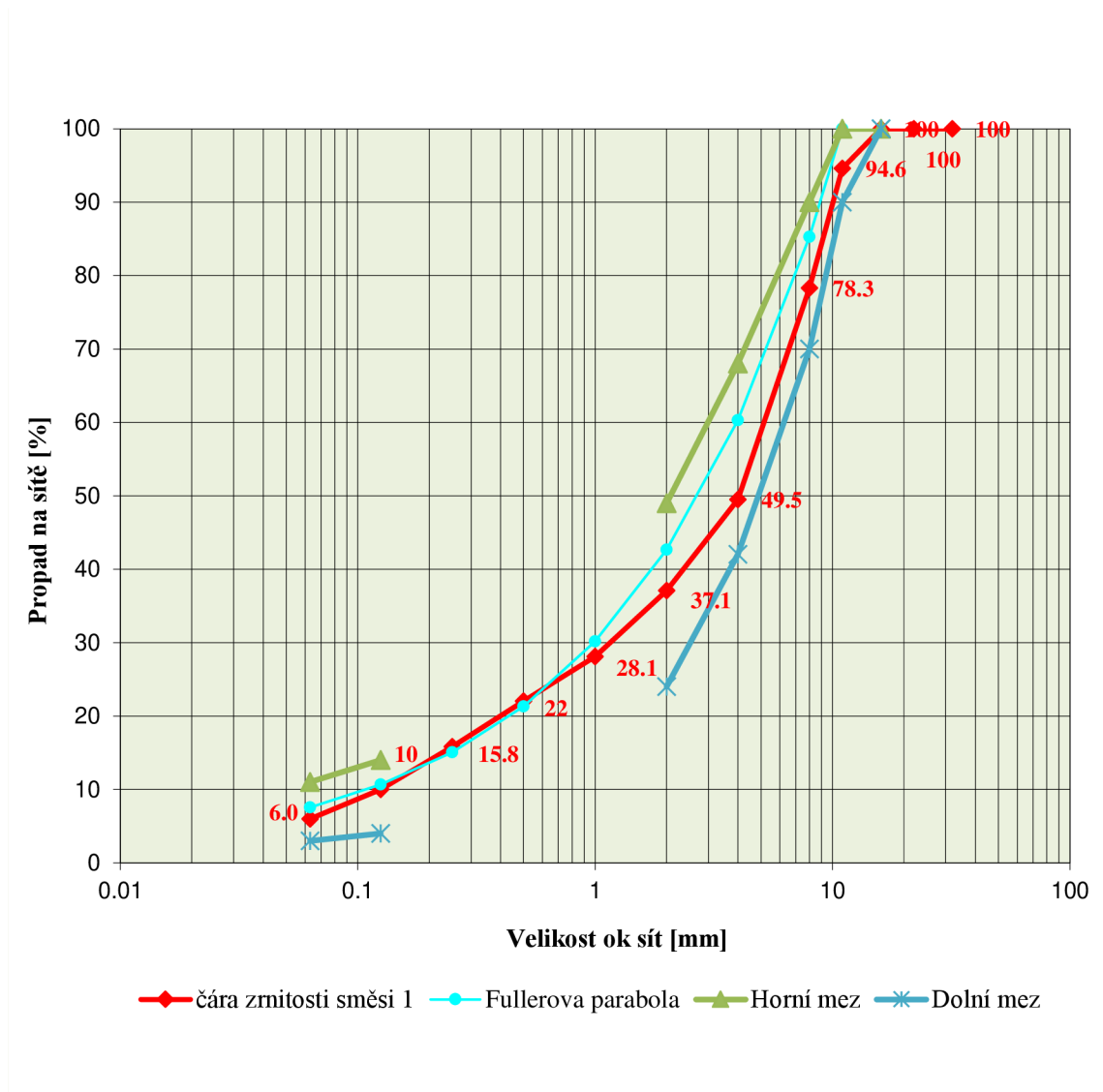
V rámci mé práce byly navrženy 2 asfaltové směsi. Jako srovnávací směs jsem zvolil konvenční směs asfaltového betonu pro obrusné vrstvy ACO 11 + (směs 1). Jako druhá směs byla navržena směs ACO 11+ s asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem (směs 2).

7.1 Návrh zrnitosti směsi 1 a směsi 2

7.1.1 Zrnitost směsi 1

Čára zrnitosti	Množství ve směsi [%]	Propad na sítích [%]									
		16	11	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
8/11	22	100	75,5	8,0	0,6	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3
4/8	30	100	100	95,0	11,4	6,3	6,1	6,0	5,7	4,9	4,0
0/4 (drcené)	43	100	100	100	95,3	70,1	49,3	35,2	21,0	8,4	2,1
fíler	5	100	100	100	100	100	100	99,9	99,6	95,8	76,4
Horní mez		100	100	90	68	49				14	11
Dolní mez		100	90	70	42	24				4	3
Fullerova parabola			100	85,3	60,3	42,6	30,2	21,3	15,1	10,7	7,6
Navržená		100	94,6	78,3	49,5	37,1	28,1	22,0	15,8	10,0	6,0

Tabulka 2: Zaznamenaná čára zrnitosti, směs 1



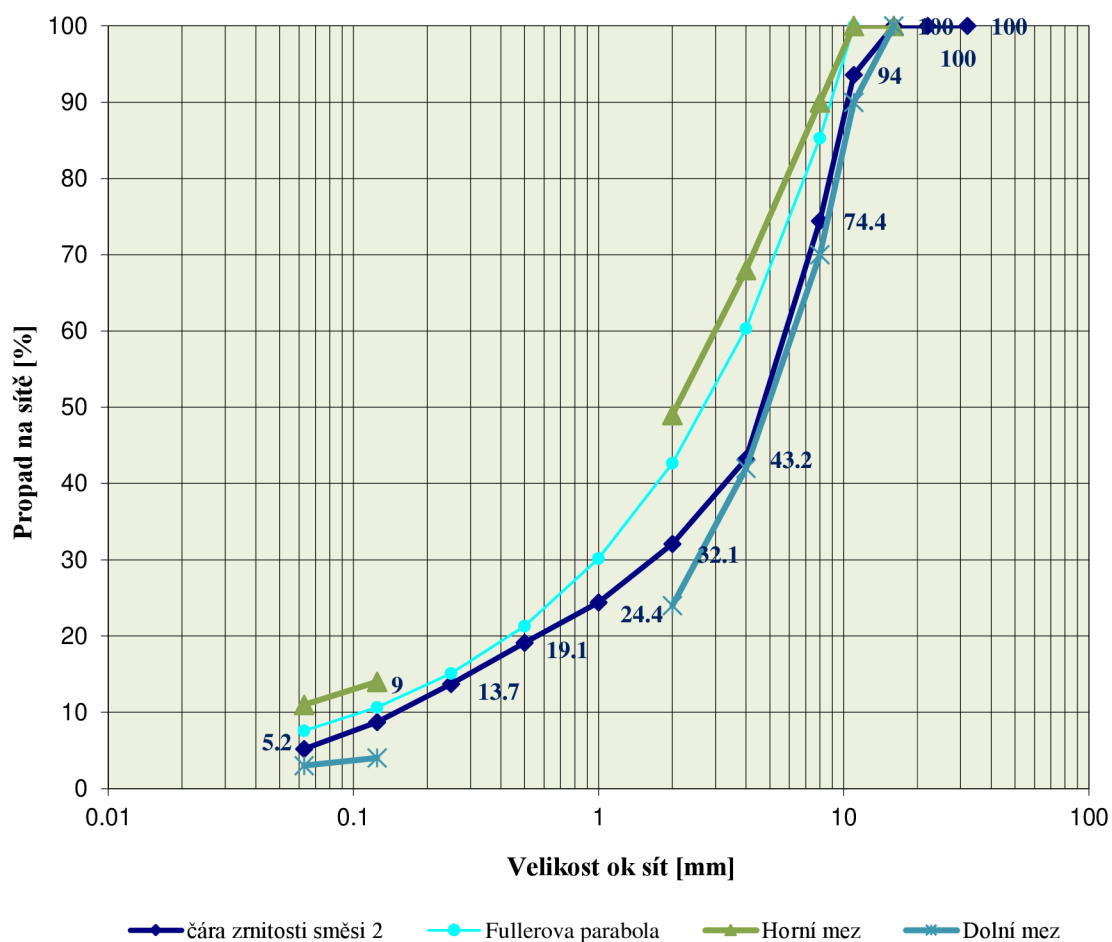
Graf 2: Navržená čára zrnitosti, směs 1

V tabulce 2 je uvedena *horní* a *dolní mez*, což znamená možný interval pro návrh čáry zrnitosti směsi 1, dle normy ČSN EN 13108-1. V grafu 1 je vynesena navržená čára zrnitosti směsi 1 a Fullerova parabola, která znázorňuje nejtěsnější uspořádání kamenné kostry.

7.1.2 Zrnitost směsi 2

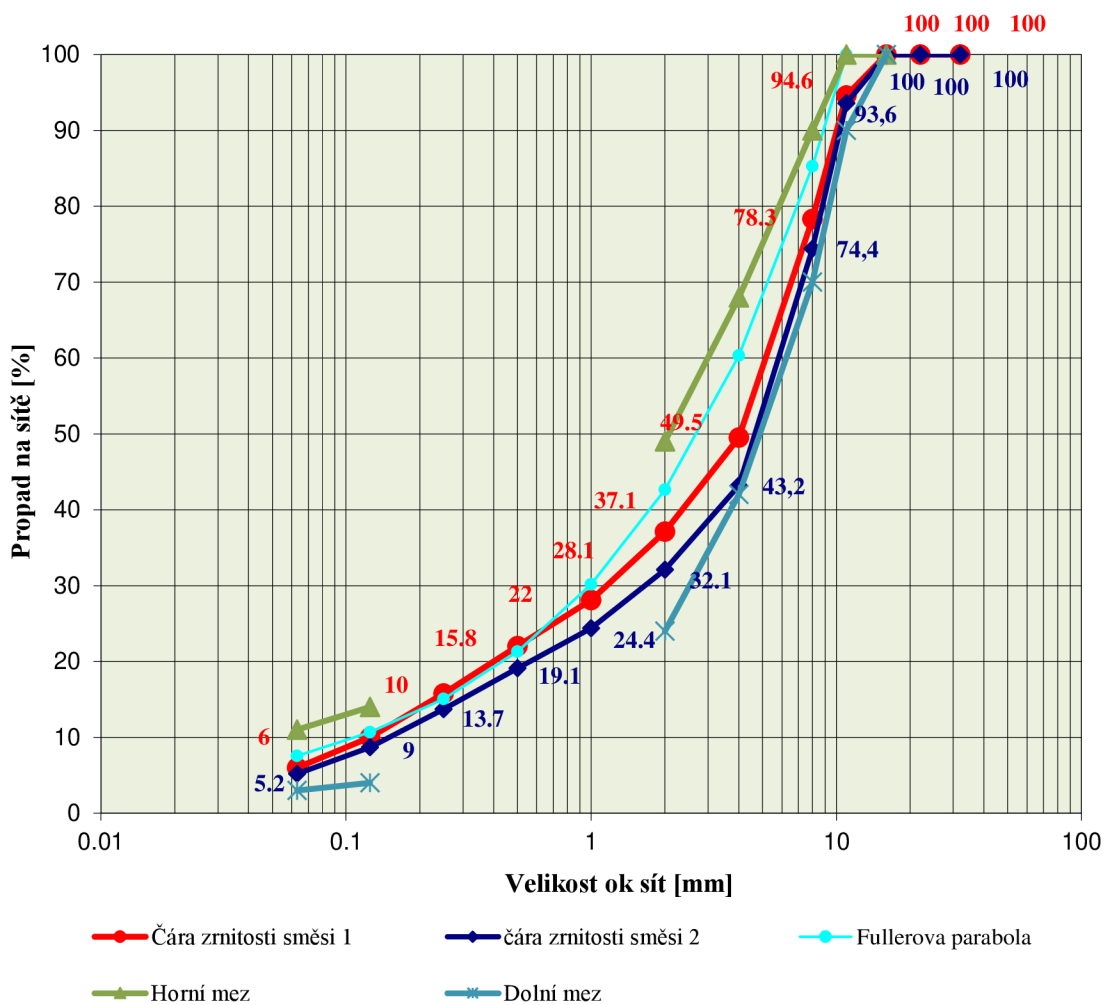
Čára zrnitosti	Množství ve směsi [%]	Propad na sítích [%]									
		16	11	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
8/11	22	100	75,5	8,0	0,6	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3
4/8	30	100	100	95,0	11,4	6,3	6,1	6,0	5,7	4,9	4,0
0/4 (drcené)	43	100	100	100	95,3	70,1	49,3	35,2	21,0	8,4	2,1
filer	5	100	100	100	100	100	100	99,9	99,6	95,8	76,4
Horní mez		100	100	90	68	49				14	11
Dolní mez		100	90	70	42	24				4	3
Fullerova parabola			100	85,3	60,3	42,6	30,2	21,3	15,1	10,7	7,6
Navržená		100	93,6	74,4	43,2	32,1	24,4	19,1	13,7	8,7	5,2

Tabulka 3: Zaznamenaná čára zrnitosti, směs 2



Graf 3: Navržená čára zrnitosti, směs 2

Vzhledem k tomu, že tato směs obsahuje vysoce viskózní asfalt modifikovaný pryžovým granulátem, navržena s menším obsahem drobného kameniva, čímž se posunula více k dolní. Hodnoty propadu na sítích pro směs 2 jsou zaznamenány v tabulce 3 a její čára zrnitosti je zaznamenána na grafu 3.



Graf 4: Znárodnění čar zrnitosti obou směsí v jednom grafu

V grafu 4 jsou znázorněny čáry zrnitosti obou navržených směsí. Je zde možno vidět, že čára zrnitosti směsi 2 byla navržena s menším množstvím drobného kameniva, to je z důvodu ponechání volného místa pro vyšší množství pojiva.

Na grafech 2,3,4 jsou také znázorněny horní a dolní meze, ty vyhrazují hranice pro maximální, popř. minimální množství obsahu kameniva různých frakcí., a také

znázorněna Fullerova parabola, která značí optimální množství kameniva v asfaltové směsi.

8 PRAKTICKÁ ČÁST: VÝSLEKY PROVÁDĚNÝCH ZKOUŠEK

8.1 Objemová hmotnost, maximální objemová hmotnost, mezerovitost směsi 1 a směsi 2

Stanovení objemové hmotnosti bylo provedeno pomocí metody: Nasycený suchý povrch, který je uvedený v kap. 5.5. Maximální objemové hmotnosti byly stanoveny pomocí volumetrického postupu dle kap. 5.6. Mezerovitosti byly stanoveny dle kapitoly 5.7. Podrobné protokoly budou uvedeny v příloze 1.

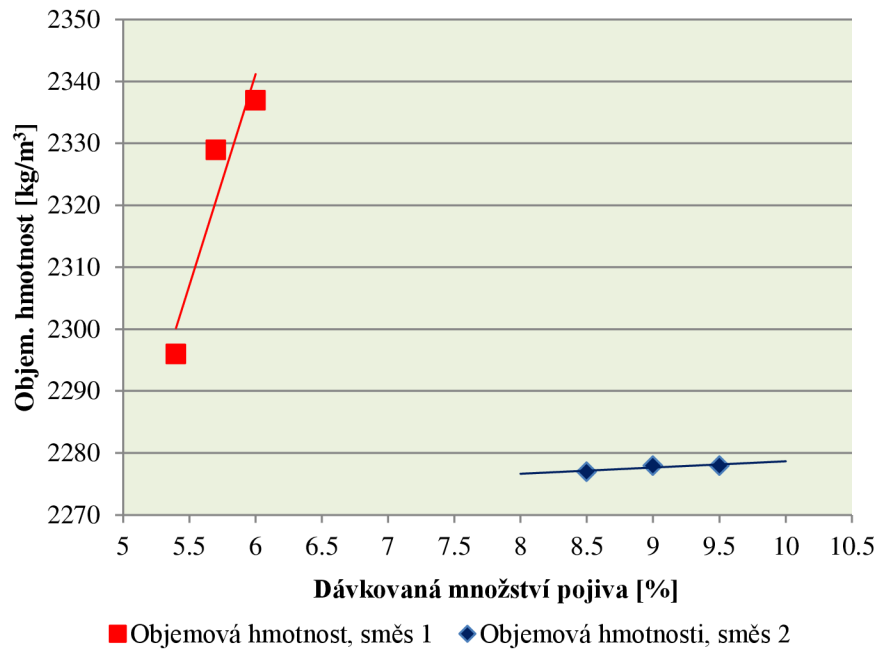
Pro účely stanovení optimálního množství pojiva bylo pro směs 1 na základě určení koeficientu sytosti navrženo množství pojiva (z celkové hmotnosti vzorku) 5,4%, 5,7%, 6,0%. Pro každou takto navrženou směs byla vytvořena 3 Marshallova tělesa. Pro směs 2 bylo navrženo množství pojiva 8,5%, 9,0% a 9,5%.

Množství pojiva [%]	Objemová hmotnost vzorků ρ_{bssd} [kg/m ³]	Maximální objemová hmotnost ρ_{mv} [%]	Mezerovitost V_m [%]
5,4	2296	2463	6,8
5,7	2329	2451	5,0
6,0	2337	2439	4,2

Tabulka 4: Stanovená mezerovitost, směs 1

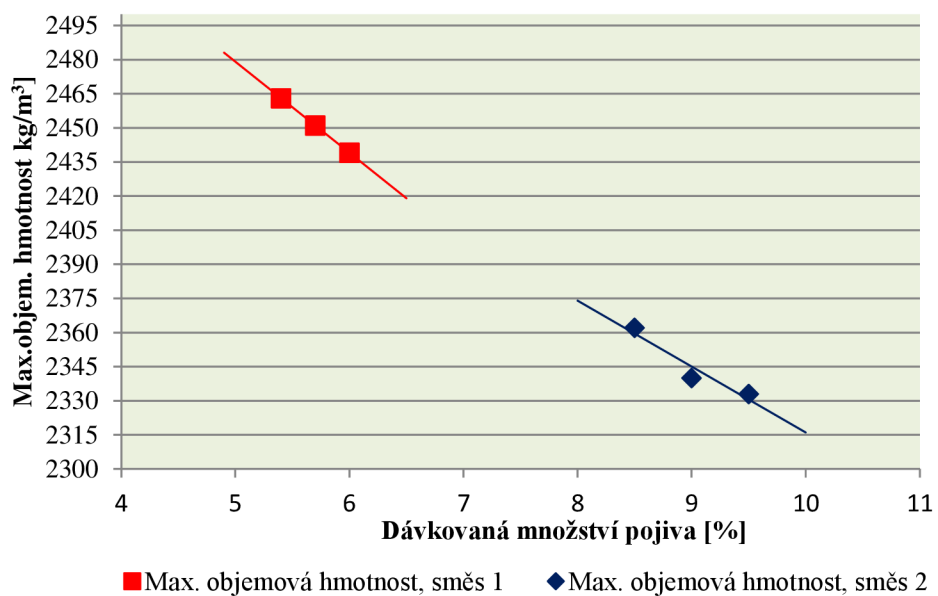
Množství pojiva [%]	Objemová hmotnost vzorků ρ_{bssd} [kg/m ³]	Maximální objemová hmotnost ρ_{mv} [%]	Mezerovitost V_m [%]
8,5	2277	2362	3,6
9,0	2278	2340	2,7
9,5	2278	2333	2,3

Tabulka 5: Stanovená mezerovitost, směs 2



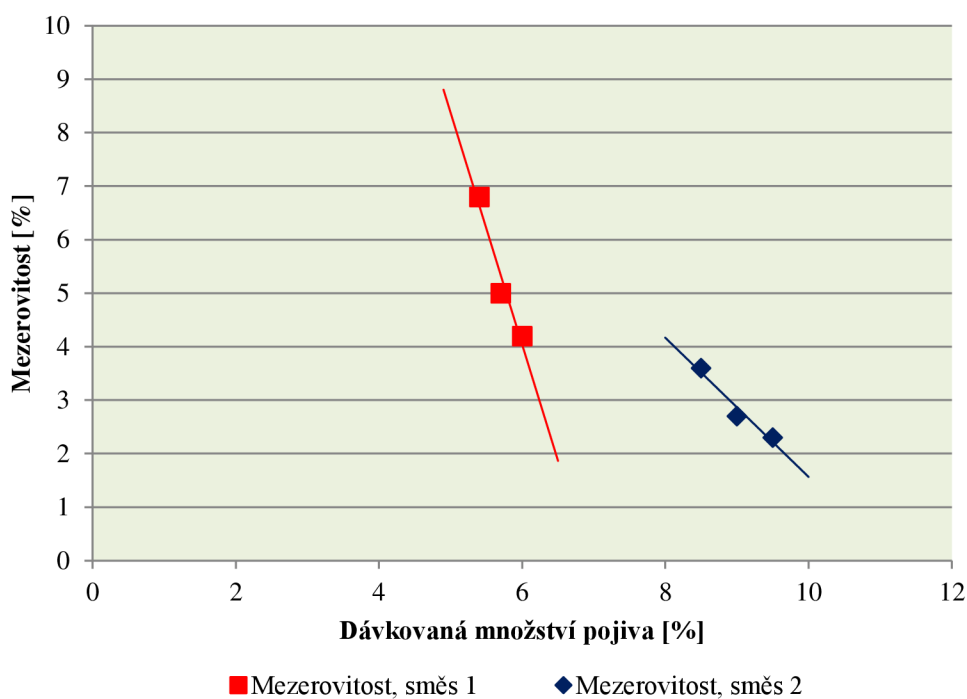
Graf 5: Zaznamenané objemové hmotnosti směsi 1 a směsi 2 v jednom grafu

Na grafu 5 lze vidět, že objemová hmotnost směsi 1 roste strmě s přibývajícím množstvím pojiva. Ve směsi 2 objemová hmotnost výrazně neroste. To je v důsledku použití vyššího množství pojiva, a tím velkého množství vyplnění mezer ve směsi.



Graf 6: Zaznamenané maximální objemové hmotnosti směsi 1 a směsi 2 v jednom grafu

Z grafu 6 je patrné, že maximální objemová hmotnost směsi 1 je relativně vyšší než maximální objemová hmotnost směsi 2. Je tomu tak proto, že ve směsi 1 je dávkováno nižší množství pojiva než ve směsi 2.



Graf 7: Zaznamenané mezerovitosti směsi 1 a směsi 2 v jednom grafu

Jak je patrné z grafu 7, tak mezerovitost směsi 2 je až dvojnásobně menší než mezerovitost směsi 1, to je důsledkem použití vyššího množství pojiva ve směsi 2.

8.2 Směs 1: Mezerovitost směsi kameniva, stupeň vyplnění mezer pojivem

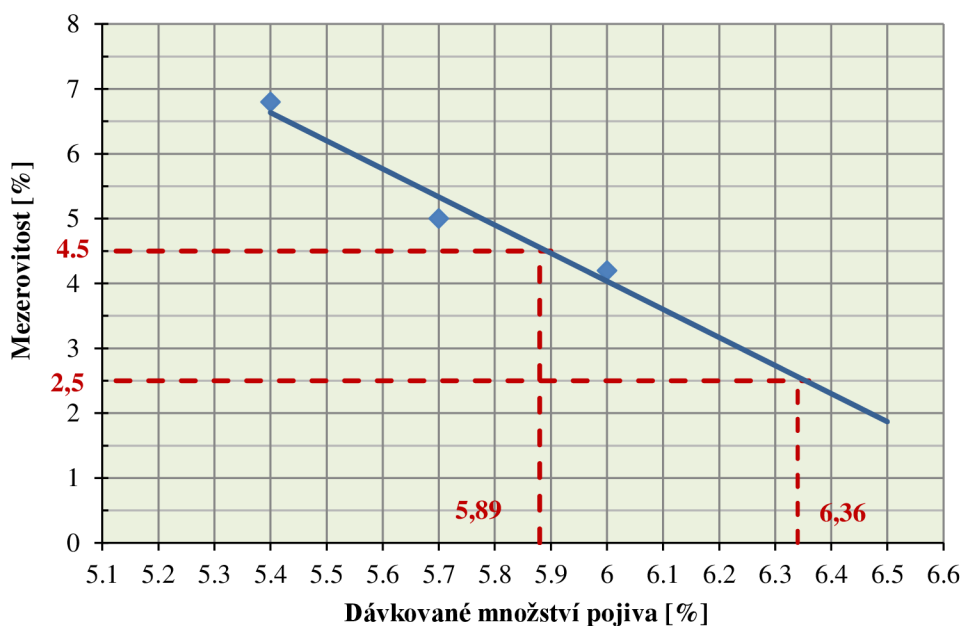
Další parametr pro stanovení optimálního množství pojiva ve směsi 1 je stupeň vyplnění mezer pojivem VFB. Hodnoty pro jednotlivá množství pojiva jsou uvedeny v následující tabulce:

Množství pojiva [%]	Mezerovitost V_m [%]	Objemová hmotnost $[\text{kg}/\text{m}^3]$ ρ_{bssd}	Max. objemová hmotnost ρ_{mv} [%]	Mezerovitost směsi kameniva VMA [%]	Stupeň vyplnění mezer pojivem VFB [%]
5,4	6,8	2296	2463	18,9	64
5,7	5,0	2329	2451	18,0	72
6,0	4,2	2337	2439	17,9	77

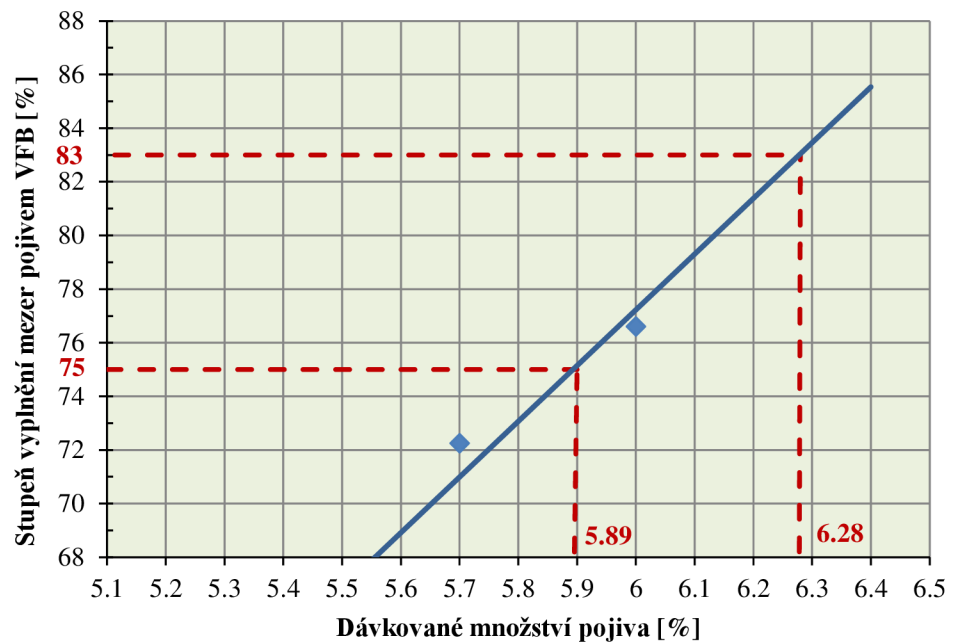
Tabulka 6: Stanovení mezerovitost směsi kameniva a stupeň vyplnění mezer pojivem, směs 2

Podle národní přílohy normy ČSN EN 13108-1 Asfaltové Směsi – Specifikace pro materiály – Část 1: Asfaltový beton, je možné, aby byla mezerovitost asfaltové směsi ACO 11+ v rozmezí 2,5 – 4,5%. Stupeň vyplnění mezer pojivem VFB v intervalu 75- 83%.

V následujících grafech je uvedena závislost mezerovitosti směsi na množství pojiva (Graf) a závislost stupně vyplnění mezer pojivem na množství pojiva (Graf), pro navržené směsi s množství pojiva 5,4%, 5,7% a 6,0%. V grafech jsou vyneseny výše zmíněné normové hodnoty pro směs ACO 11 +. Tímto jsem získal subintervaly pro návrhové množství pojiva [1].



Graf 8: Závislost mezerovitosti na množství pojiva směsi 1



Graf 9: Závislost stupně vyplnění mezer pojivem na množství pojiva směsi 1

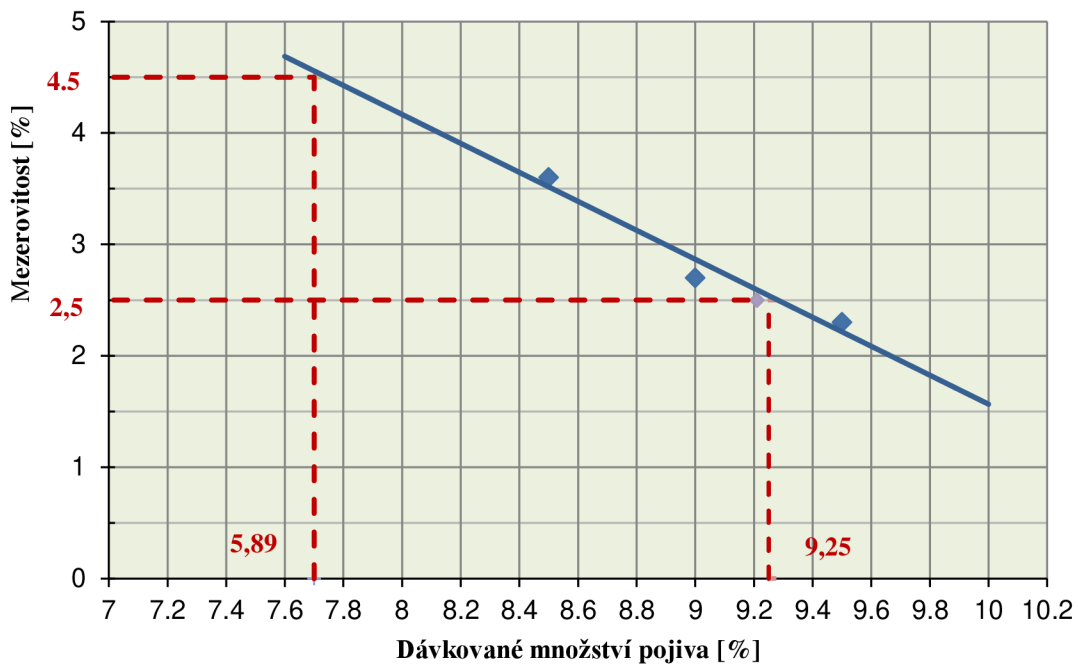
Z uvedených grafů je patrné, že množství pojiva ve směsi 1 by se mělo pohybovat v intervalu 5,89 – 6,28 % hmotnosti směsi, proto ideální množství asfaltového pojiva bylo zvoleno 6%.

8.3 Směs 2: Mezerovitost směsi kameniva, stupeň vyplnění mezer pojivem

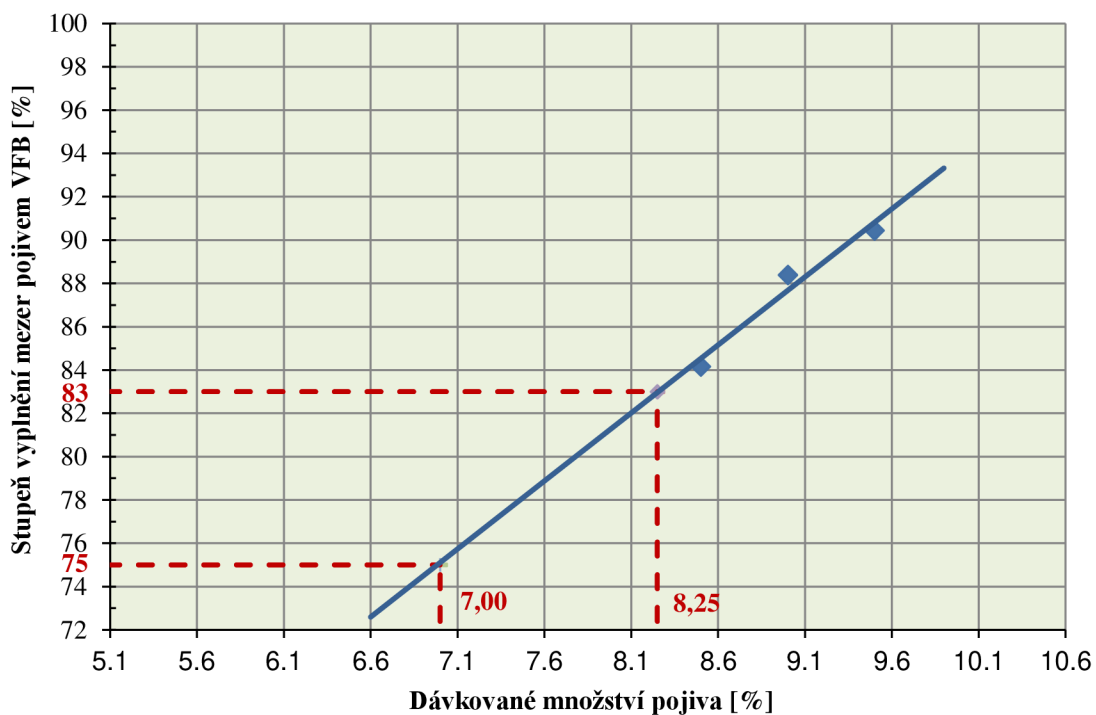
Další parametr pro stanovení optimálního množství pojiva ve směsi 1 je stupeň vyplnění mezer pojivem VFB. Hodnoty pro jednotlivá množství pojiva jsou uvedeny v následující tabulce:

Množství pojiva [%]	Mezerovitost V_m [%]	Objemová hmotnost $[\text{kg}/\text{m}^3]$ ρ_{bssd}	Max. objemová hmotnost ρ_{mv} [%]	Mezerovitost směsi kameniva VMA [%]	Stupeň vyplnění mezer pojivem VFB [%]
8,5	3,6	2277	2362	22,6	84
9,0	2,7	2278	2340	22,7	88
9,5	2,3	2278	2333	23,5	90

Tabulka 7: Stanovení mezerovitost směsi kameniva a stupeň vyplnění mezer pojivem, směs 2



Graf 10: Závislost mezerovitosti na množství pojiva směsi 2



Graf 11: Závislost stupně vyplnění mezer pojivem na množství pojiva směsi 2

Směs 2 je nově navržená směs. Při jejím vyhodnocování jsem vycházel ze směsi 1, pro kterou jsou meze v normě definovány. Na základě závislosti mezerovitosti na množství pojiva ve směsi 2 jsem určil jako ideální množství asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem pro směs 2 8,5%. Tomuto dávkování pojiva odpovídá mírně vyšší hodnota stupně vyplnění mezer (84 %), než požaduje norma ČSN EN 13108-1 pro směsi ACO 11 + (75 % až 83 %). To je ovšem podle očekávání, protože směsi s CRmB nutně musí obsahovat vyšší množství pojiva [1], [3].

8.4 Objemová hmotnost, mezerovitost a míra zhutnění zkušebních desek směsi 1 a směsi 2

Pro získání parametrů byly od každé směsi vyrobeny 2 desky, na kterých byla následně stanovena objemová hmotnost, mezerovitost a míra zhutnění.

Pro stanovení objemové hmotnosti byl použit volumetrický způsob, který je uveden v kap. 5.5. Podle kap. 5.7 byla stanovena mezerovitost. Míra zhutnění se stanoví dle vztahu:

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

kde :

c je míra zhutnění zkušební desky, v %;

$\rho_{bssd,1}$ je objemová hmotnost zkušební desky, v g;

$\rho_{bssd,2}$ je objemová hmotnost stanovená na Marshallových tělesech, v g [5].

Podrobné charakteristiky budou uvedeny v příloze 2.

Označení desky	Objemová hmotnost d [kg/m ³]	Max. objemová hmotnost [kg/m ³]	Mezerovitost [%]	Míra zhutnění [%]
SMĚS 1-I	2317	2439	5,0	99,14
SMĚS 1- II	2334	2439	4,3	99,84

Tabulka 8: Míra zhutnění desek směsi 1

Označení desky	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Max. objemová hmotnost [kg/m ³]	Mezerovitost [%]	Míra zhutnění [%]
SMĚS 2-I	2315	2362	1,0	101,65
SMĚS 2-II	2299	2362	1,74	100,97

Tabulka 9: Míra zhutnění desek směsi 2

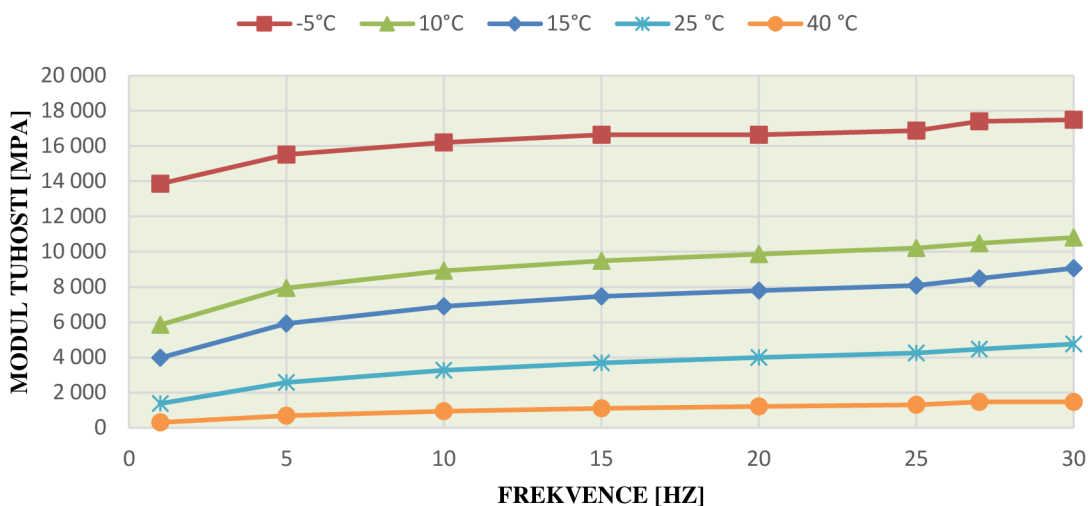
První deska ze sady CRMB je mírně přehutněna, to je způsobeno tím, že byla hutněna jako první deska z této sady, takže byla deskou pokusnou.

8.5 Stanovení modulů tuhosti

Tato funkční zkouška byla provedena u obou směsí, dle postupu v kap. 5.8. Moduly tuhosti jsem testoval při teplotách -5 °C, 10 °C, 15 °C, 25 °C a 40 °C při frekvencích 1 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz, 27 Hz a 30 Hz a výsledky jsou uvedeny v tabulce 10 pro směs 1, resp. tabulce 11 pro směs 2. V 12 je vyhodnocení modulů tuhosti směsi 1 a v grafu 13 vyhodnocení směsi 2. V příloze 3 jsou uvedeny rozměry jednotlivých zkušebních těles.

Teplota - 5 °C	Frekvence [Hz]							
	1	5	10	15	20	25	27	30
Moduly tuhosti [Mpa]	13 856	15 512	16 208	16 634	16 649	16 868	14 402	17 497
Teplota 10 °C	Frekvence [Hz]							
	1	5	10	15	20	25	27	30
Moduly tuhosti [Mpa]	5 855	7 938	8 921	9 484	9 859	10 216	10 487	10 812
Teplota 15 °C	Frekvence [Hz]							
	1	5	10	15	20	25	27	30
Moduly tuhosti [Mpa]	3 967	5 926	6 904	7 456	7 785	8 075	8 484	9 070
Teplota 25 °C	Frekvence [Hz]							
	1	5	10	15	20	25	27	30
Moduly tuhosti [Mpa]	1 382	2 585	3 260	3 685	3 999	4 241	4 462	4 753
Teplota 40 °C	Frekvence [Hz]							
	1	5	10	15	20	25	27	30
Moduly tuhosti [Mpa]	300	694	940	1 101	1 208	1 310	1 468	1 465

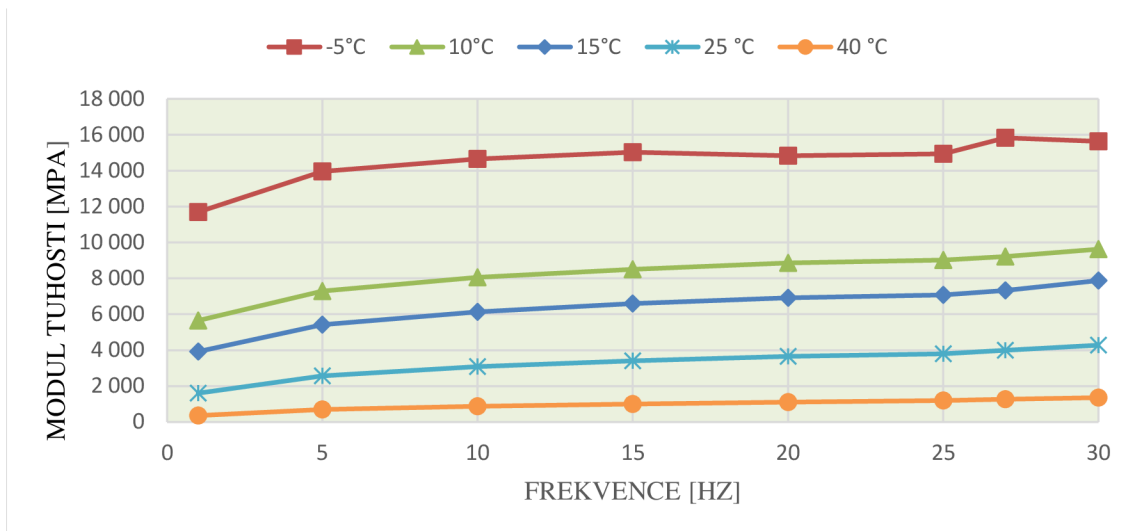
10: Stanovené moduly tuhosti, směs 1



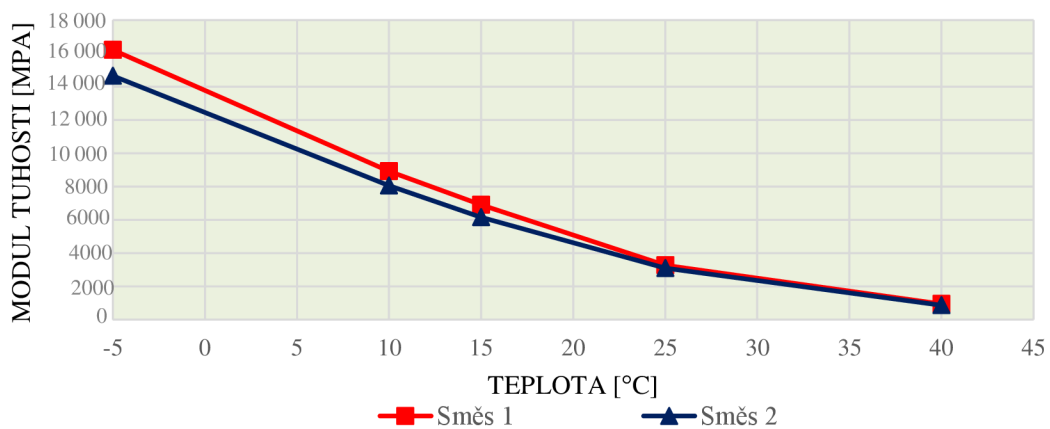
Graf 12: Vyhodnocení modulů tuhosti, směs 1

Teplota - 5 °C	Frekvence [Hz]							
	1	5	10	15	20	25	27	30
Moduly tuhosti [Mpa]	11 698	13 952	14 651	15 032	14 822	14 931	15 835	15 623
Teplota 10 °C	Frekvence [Hz]							
	1	5	10	15	20	25	27	30
Moduly tuhosti [Mpa]	5 642	7 289	8 055	8 508	8 853	9 011	9 215	9 623
Teplota 15 °C	Frekvence [Hz]							
	1	5	10	15	20	25	27	30
Moduly tuhosti [Mpa]	3 926	5 411	6 138	6 586	6 922	7 070	7 325	7 876
Teplota 25 °C	Frekvence [Hz]							
	1	5	10	15	20	25	27	30
Moduly tuhosti [Mpa]	1 606	2 568	3 086	3 406	3 647	3 793	3 999	4 271
Teplota 40 °C	Frekvence [Hz]							
	1	5	10	15	20	25	27	30
Moduly tuhosti [Mpa]	357	693	866	1 003	1 112	1 189	1 262	1 346

Tabulka 11: Stanovené moduly tuhosti, směs 2



Graf 13: Vyhodnocení modulů tuhosti, směs 2



Graf 14: Porovnání modulu tuhostí směsi 1 a směsi 2 při frekvenci 10 Hz a všech teplotách

8.6 Stanovení únavových charakteristik

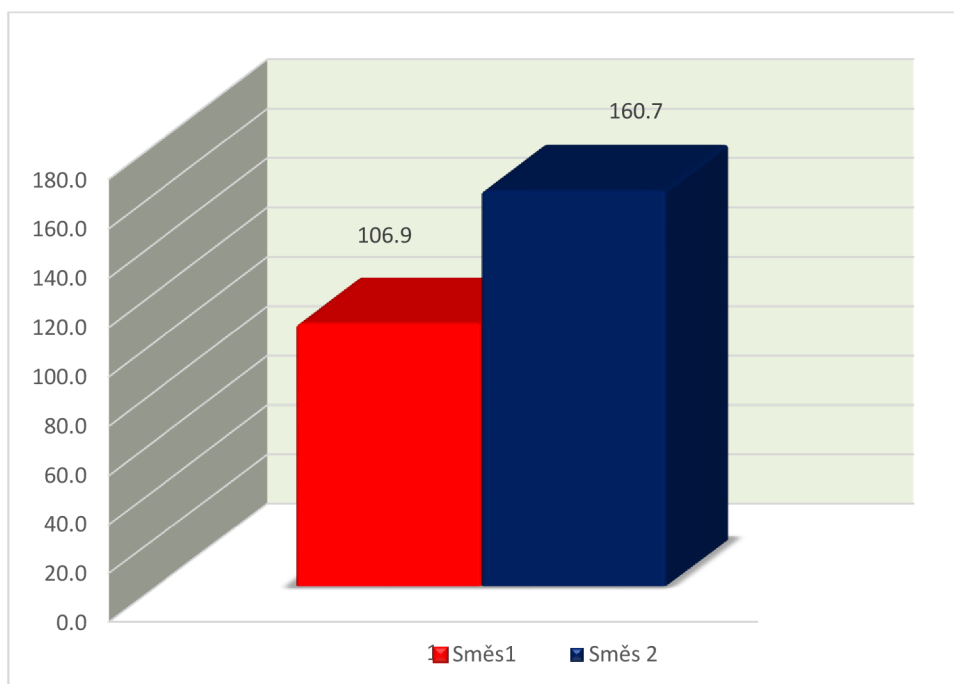
Únavové charakteristiky byly měřeny na 8 tělesech pro každou směs. Osm zkušebních těles bylo zvoleno pro relativní srovnání i přesto, že norma ČSN EN 12697-24 požaduje pro únavovou zkoušku použitá 18 těles. Podrobné výsledky jsou uvedeny v příloze 4. Výsledky měření jsou v tabulkách 12, 13:

Poměrné přetvoření $\epsilon_6 [10^{-6}]$	B	R ²
106,9	9,37	0,5473

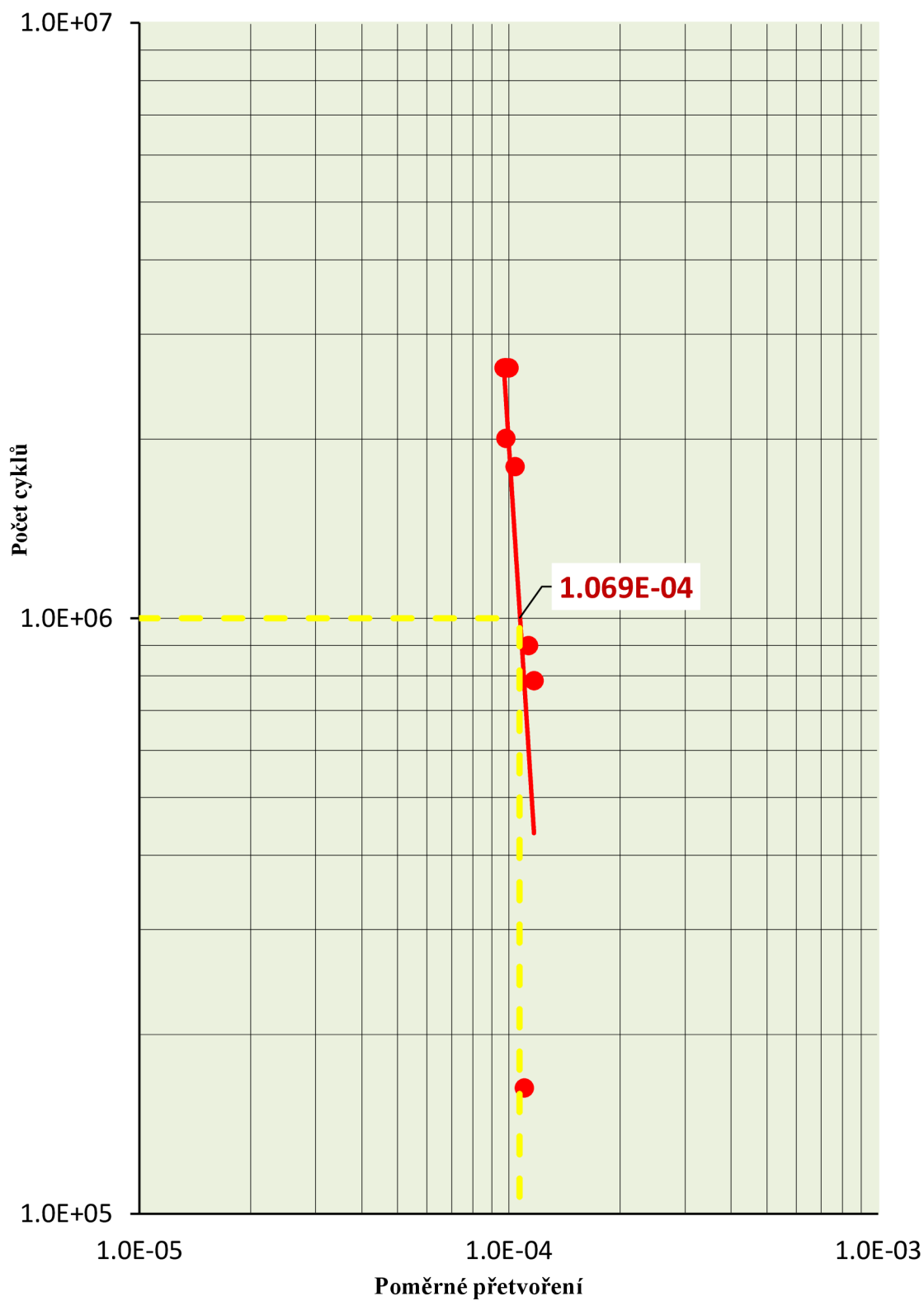
Tabulka 12: Naměřené únavové charakteristiky, směs 1

Poměrné přetvoření $\epsilon_6 [10^{-6}]$	B	R ²
160,7	13,45	0,7278

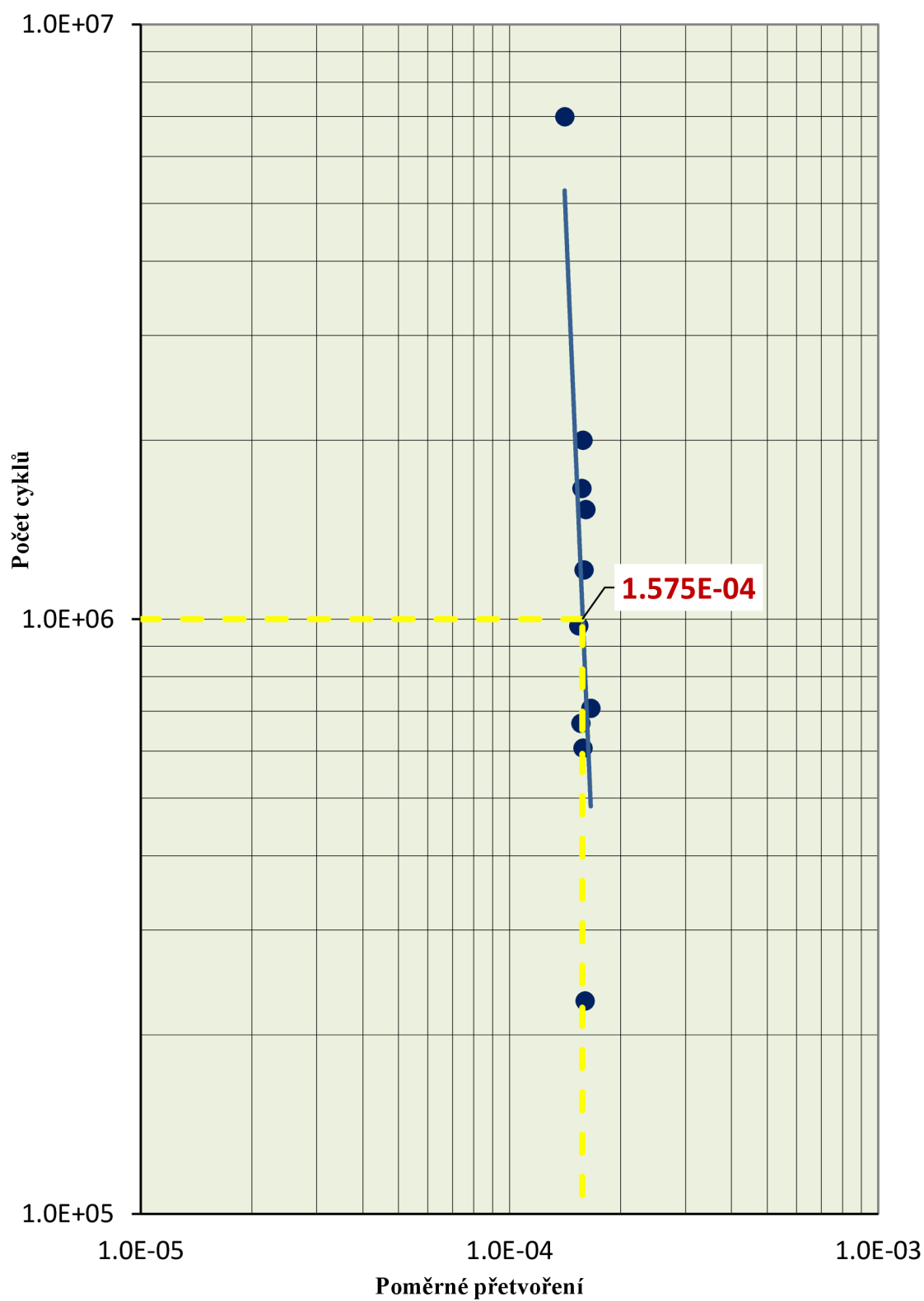
Tabulka 13: Naměřené únavové charakteristiky, směs 2



Graf 15: Porovnání únavových charakteristik obou směsí



Graf 16 : Wöhlerův diagram únavové charakteristiky, směs 1



Graf 17: Wöhlerův diagram únavové charakteristiky, směs 2

9 ZÁVĚR

Hlavním cílem této práce bylo porovnat vliv přidaného pryžového granulátu na tuhost a únavové charakteristiky. Byly 2 asfaltové směsi, z čehož jedna asfaltová směs byla navržena s konvenčním asfaltovým pojivem a druhá asfaltová směs s přídavkem pryžového granulátu.

Navržená směs s konvenčním asfaltovým pojivem, nazývaná ACO 11+ obsahuje 6,0% pojiva s čarou zrnitosti typickou pro tuto směs. Mezerovitost této směsi byla stanovena 4,2%. Směs s přídavkem pryžového granulátu byla navržena s 8,5% pojiva a nižším obsahem drobného kameniva z důvodu ponechání místa pro větší množství pojiva. Mezerovitost této směsi byla stanovena 3,6%.

Pro vyhodnocení tuhosti je jako charakteristická hodnota dle ČSN EN 12697-26. Asfaltové směsi – Zkušební metody za horka – Část 26: Tuhost, teplota 15 °C při 10 Hz. Asfaltová směs ACO 11+ (směs 1) dosáhla tuhosti ($E_{ACO11+} = 6\,904$ MPa) a únavové vlastnosti při zatěžování zkušebních těles dvoubodovým ohybem, byl stanoven parametr $\varepsilon_6 = 106,7 \cdot 10^{-6}$. Norma ČSN EN 12697-24. Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka: Část 24: Odolnost vůči únavě, požaduje stanovení únavy minimálně na 18 tělesech, v mé práci bylo použito 8 zkušebních těles pro směs 1, resp. 9 těles pro směs 2, což je z důvodu rozsahu práce. Asfaltová směs s příměsí asfaltu modifikovaného pryžového granulátu (směs 2, CRmB) dosáhla tuhosti $E_{CRmB} = 6\,138$ Mpa, což je menší hodnota než u směsi 1, ale pro směsi s přídavkem asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem charakteristické. Únavové vlastnosti směsi 2 při zatěžování zkušebních těles dvoubodovým ohybem, byl stanoven parametr $\varepsilon_6 = 157,5 \cdot 10^{-6}$, což je výrazně vyšší parametr než u směsi 1, a znamená to, že použití asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem výrazně zlepšuje odolnost vůči vzniku trhlin.

Stanovená měření splnily očekávané výsledky, především vyšší únavové charakteristiky. Lze tedy považovat výsledky této práce jako motivaci k vývoji směsí s příměsí asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem do budoucna, protože výsledky měření jasně ukázali, že tyto směsi mohou přínosem pro stavbu kvalitnějších vozovek, zlepšení jízdního komfortu a plynulosti dopravy v České republice [13].

10 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ČSN EN 13108-1. *Asfaltové směsi – Specifikace pro materiály – Část 1: Asfaltový beton*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [2] TP 148: HUTNĚNÉ ASFALTOVÉ VRSTVY S ASFALTEM MODIFIKOVANÝM PRYŽOVÝM GRANULÁTEM Z PNEUMATIK. Brno, 2009.
- [3] DAŠEK, Ondřej. *Uplatnění pryžového granulátu v asfaltových pojivech a hutněných asfaltových směsích*. Brno, 2013. 186 s., 86 s. příl. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce prof. Ing. Jan Kudrna, CSc.
- [4] Bc. Adam Puda *Porovnání švédského a amerického konceptu návrhu směsi s CRmB*. Brno, 2014. 82 s., 18 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce prof. Ing. Jan Kudrna, CSc.
- [5] Bc. Pavel Šperka *Vliv použití R - materiálu na funkční vlastnosti asfaltových směsí*. Brno, 2014. 117 s., 35 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Petr Hýzl, Ph.D.
- [6] ČSN EN 12697-35+A1. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 35: Laboratorní výroba směsí*. Praha: Český normalizační institut, 2007
- [7] ČSN EN 12697-30+A1. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem*. Praha: Český normalizační institut, 2007. 13.
- [8] ČSN EN 12697-33+A1. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 5: Příprava zkušebních těles zhutňovačem desek*. Praha: Český normalizační institut, 2007. 14.

- [9] ČSN EN 12697-6+A1. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [10] ČSN EN 12697-5+A1. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [11] ČSN EN 12697-8. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 8: Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí*. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [12] ČSN EN 12697-26. *Asfaltové směsi – Zkušební metody za horka – Část 26: Tuhost*. Český normalizační institut, 2006. 12.
- [13] ČSN EN 12697-24. *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka: Část 24: Odolnost vůči únavě*. 2007.
- [14] ČSN EN 993-1. *Zkoušení geometrických vlastností kameniva: Část 1: Stanovení zrnitosti - Sítový rozbor*. 1998.

11 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Mísicí zařízení blender, ve kterém se vyrábí pojivo při mokřém procesu [4]	14
Obrázek 2: Zkušební síta s třesacím zařízením, vhodné pro síťový rozbor	16
Obrázek 3: Laboratorní míchačka vhodná pro máchání kameniva s asfaltovým pojivem	18
Obrázek 4: Rázový zhutňovač Marshallových těles	20
Obrázek 5: Marshallova tělesa vyrobená pomocí rázového zhutňovače	21
Obrázek 6: Segmentový hutnící přístroj pro hutnění zkušebních desek.....	23
Obrázek 7: Kontrola teploty při hutnění asfaltové směsi	23
Obrázek 8: Vyrobená deska ponořená ve vodní lázni	25
Obrázek 9: Rozmělněná asfaltová směs	27
Obrázek 10: Pyknometry s rozpouštědlem a asfaltovou směsí.....	27
Obrázek 11: Rozměry zkušebního tělesa [5]	31
Obrázek 12: Přilepené zkušební těleso na horní a dolní kovovou destičku.....	32
Obrázek 13: Upevněních zkušebních těles ve zkušebním přístroji	32
Obrázek 14: Veškerá vyrobená komolá tělesa.....	33

12 SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Čáry zrnitosti jednotlivých frakcí kameniva	35
Graf 2: Navržená čára zrnitosti, směs 1	37
Graf 3: Navržená čára zrnitosti, směs 2	38
Graf 4: Znárodnění čar zrnitosti obou směsí v jednom grafu	39
Graf 5: Zaznamenané objemové hmotnosti směsi 1 a směsi 2 v jednom grafu.....	41
Graf 6: Zaznamenané maximální objemové hmotnosti směsi 1 a směsi 2 v jednom grafu	41
Graf 7: Zaznamenané mezerovitosti směsi 1 a směsi 2 v jednom grafu.....	42
Graf 8: Závislost mezerovitosti na množství pojiva směsi 1	43
Graf 9: Závislost stupně vyplnění mezer pojivem na množství pojiva směsi 1	44
Graf 10: Závislost mezerovitosti na množství pojiva směsi 2	45
Graf 11: Závislost stupně vyplnění mezer pojivem na množství pojiva směsi 2	45
Graf 12: Vyhodnocení modulů tuhosti, směs 1	48
Graf 13: Vyhodnocení modulů tuhosti, směs 2	49
Graf 14: Porovnání modulu tuhostí směsi 1 a směsi 2 při frekvenci 10 Hz a všech teplotách.....	49
Graf 15: Porovnání únavových charakteristik obou směsí	50
Graf 16 : Wöhlerův diagram únavové charakteristiky, směs 1	51
Graf 17: Wöhlerův diagram únavové charakteristiky, směs 2	52

13 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Propady na sítích jednotlivých frakcí	35
Tabulka 2: Zaznamenaná čára zrnitosti, směs 1	36
Tabulka 3: Zaznamenaná čára zrnitosti, směs 2	38
Tabulka 4: Stanovená mezerovitost, směs 1	40
Tabulka 5: Stanovená mezerovitost, směs 2	40
Tabulka 6: Stanovení mezerovitost směsi kameniva a stupeň vyplnění mezer pojivem, směs 2	43
Tabulka 7: Stanovení mezerovitost směsi kameniva a stupeň vyplnění mezer pojivem, směs 2	44
Tabulka 8: Míra zhutnění desek směsi 1	46
Tabulka 9: Míra zhutnění desek směsi 2	47
10: Stanovené moduly tuhosti, směs 1	47
Tabulka 11: Stanovené moduly tuhosti, směs 2	48
Tabulka 12: Naměřené únavové charakteristiky, směs 1	50
Tabulka 13: Naměřené únavové charakteristiky, směs 2	50
Tabulka 15: Veškeré naměřené hodnoty pro výpočet objemové hmotnosti směsi 1	59
Tabulka 16: Veškeré naměřené hodnoty pro výpočet max. objemové hmotnosti směsi 1	60
Tabulka 17: Stanovená mezerovitost (směs 1) – Marshallova tělesa	60
Tabulka 18: Veškeré naměřené hodnoty pro výpočet objemové hmotnosti směsi 2	61
Tabulka 19: Veškeré naměřené hodnoty pro výpočet max. objemové hmotnosti směsi 2	62
Tabulka 20: Stanovená mezerovitost (směs 2) – Marshallova tělesa	62
Tabulka 21: Veškeré naměřené hodnoty pro stanovení mezerovitost a míry zhutnění desek, směs 1	63
Tabulka 22: Veškeré naměřené hodnoty pro stanovení mezerovitost a míry zhutnění desek, směs 2	63
Tabulka 23: Jednotlivé rozměry jednotlivých zkušebních těles pro stanovení tuhosti a únavových charakteristik	64
Tabulka 24: Naměřené hodnoty únavy ze zkušebního zařízení, směs 1	65
Tabulka 25: Naměřené hodnoty únavy ze zkušebního zařízení, směs 2	65

14 SEZNAM PŘÍLOH

14.1 Příloha 1: Objemová hmotnost, maximální objemová hmotnost, mezerovitost směsi 1 a směsi 2

Směs 1: **ACO 11+**
Množství pojiva: **5,4%, 5,7%, 6,0%**
Dávkované pojivo: **50/70**

1 Marshallova těleso – 1100 g

Navážky kameniva na jedno Marshallovo těleso:			Množství pojiva pro:		
8/11	242	[g]	5,4%	62,8	[g]
4/8	330	[g]	5,7%	66,5	[g]
0/4	473	[g]	6,0%	70,2	[g]
Filer	55	[g]			

Množství pojiva [%]	Vzorek č.	m ₁ [g]	m ₂ [g]	m ₃ [g]	ρ _w [kg/m ³]	ρ _{bssd} [kg/m ³]	Průměrné obj hm. ρ _{bssd} [kg/m ³]
5,4	1	1166,6	664,0	1170,0	999,8	2305	2296
	2	1133,6	648,0	1142,0	999,8	2292	
	3	1145,0	650,4	1150,0	999,8	2291	
5,7	1	1144,4	655,4	1147,6	999,8	2325	2329
	2	1143,0	654,8	1144,6	999,8	2333	
	3	1130,0	641,4	1132,6	999,8	2300	
6,0	1	1148,4	660,4	1150,2	999,8	2344	2337
	2	1157,8	660,3	1159,6	999,8	2318	
	3	1093,6	626,2	1095,4	999,8	2330	

Tabulka 14: Veškeré naměřené hodnoty pro výpočet objemové hmotnosti směsi 1

Maximální objemové hmotnosti směsi 1

Teplota temperování	25 °C
Použité rozpouštědlo	Perchlorethylen
Hustota rozpouštědla	1614,4 [kg/m ³]

Použité médium	Perchlorethylen		
Množství asfaltu [%]	5,4	5,7	60
Označení pyknometru	22	11	14
Objem pyknometru V _p [m ³]*10 ⁻⁶	1334	1324	1317
m ₁ [kg]	0,7163	0,7005	0,7034
m ₂ [kg]	1,7003	1,6786	1,6945
m ₃ [kg]	3,2087	3,1721	3,1644
ρ _w [kg/m ³]	1614,4	1614,4	1614,4
Max objem. hmotnost [kg/m ³]	2463	2451	2439

Tabulka 15: Veškeré naměřené hodnoty pro výpočet max. objemové hmotnosti směsi 1

Množství pojiva [%]	Objemová hmotnost ρ _{bssd} [kg/m ³]	Max. objemová hmotnost ρ _{mw} [kg/m ³]	Mezerovitost V _m [%]
5,4	2296	2463	6,8
5,7	2329	2451	5,0
6,0	2337	2439	4,2

Tabulka 16: Stanovená mezerovitost (směs 1) – Marshallova tělesa

Směs 2: **CRmB**
 Množství pojiva: **8,5%, 9,0%, 9,5%**
 Dávkované pojivo: **50/70**

1 Marshallova těleso – 1100 g

Navážky kameniva na jedno Marshallovo těleso:	Množství pojiva pro:
8/11 265,5 [g]	8,5% 94,8 [g]
4/8 336,6 [g]	9,0% 100,9 [g]
0/4 377,4 [g]	9,5% 107,1 [g]
Filer 40,8 [g]	

Množství pojiva [%]	Vzorek č.	m ₁ [g]	m ₂ [g]	m ₃ [g]	ρ _w [kg/m ³]	ρ _{bssd} [kg/m ³]	Průměrné obj hm. ρ _{bssd} [kg/m ³]
8,5	1	1093,0	617,6	1096,8	998,2	2277	2277
	2	1151,4	655,3	1152,6	998,2	2311	
	3	1163,5	657,1	1165,2	998,2	2286	
9,0	1	1087,3	613,0	1089,4	998,2	2278	2278
	2	1154,1	651,7	1155,1	998,2	2287	
	3	1162,4	653,4	1162,9	998,2	2277	
6,0	1	1084,5	611,1	1086,2	998,2	2278	2278
	2	1165,5	655,6	1166,2	998,2	2279	
	3	1166,2	655,1	1166,1	998,2	2278	

Tabulka 17: Veškeré naměřené hodnoty pro výpočet objemové hmotnosti směsi 2

Maximální objemové hmotnosti směsi 2

Teplota temperování	25 °C
Použité rozpouštědlo	Perchlorethylen
Hustota rozpouštědla	1614,4 [kg/m ³]

Použité médium	Perchlorethylen		
	Množství asfaltu [%]	8,5	9,0
Označení pyknometru	II	IV	III
Objem pyknometru V_p [m ³]*10 ⁻⁶	1321	1323	1308
m_1 [kg]	0,7033	0,6908	0,6853
m_2 [kg]	1,4231	1,3766	1,3231
m_3 [kg]	3,0629	3,0394	2,9936
ρ_w [kg/m ³]	1614,4	1614,4	1614,4
Max. objem. hmotnost [kg/m ³]	2362	2340	2333

Tabulka 18: Veškeré naměřené hodnoty pro výpočet max. objemové hmotnosti směsi 2

Množství pojiva [%]	Objemová hmotnost ρ_{bssd} [kg/m ³]	Max. objemová hmotnost ρ_{mw} [kg/m ³]	Mezerovitost V_m [%]
8,5	2277	2362	3,6
9,0	2278	2340	2,7
9,5	2278	2333	2,3

Tabulka 19: Stanovená mezerovitost (směs 2) – Marshallova tělesa

14.2 Příloha 2: Objemová hmotnost, mezerovitost a míra zhutnění zkušebních desek směsi 1 a směsi 2

Množství pojiva [%]	Ozn. vzorku	m ₁ [g]	m ₂ [g]	m ₃ [g]	ρ _w [kg/m ³]	ρ _{bssd} [kg/m ³]	Max. obj.hm. [kg/m ³]	Mezerovitost [%]	Míra zhutnění [%]
6,0	ACO 11 + I	7694,6	4410,0	7726,6	998,7	2317	2439	5,0	99,14
	ACO 11 + I	7684,0	4418,0	7706,6	998,7	2334	2439	4,3	99,84

Tabulka 20: Veškeré naměřené hodnoty pro stanovení mezerovitost a míry zhutnění desek, směs 1

Množství pojiva [%]	Ozn. vzorku	m ₁ [g]	m ₂ [g]	m ₃ [g]	ρ _w [kg/m ³]	ρ _{bssd} [kg/m ³]	Max. obj.hm. [kg/m ³]	Mezerovitost [%]	Míra zhutnění [%]
8,5	CRmB I	7498,6	4266,6	7502,2	998,7	2315	2362	1,00	101,65
	CRmB II	7463,6	4232,8	7474,8	998,7	2299	2362	1,74	99,84

Tabulka 21: Veškeré naměřené hodnoty pro stanovení mezerovitost a míry zhutnění desek, směs 2

14.3 Příloha 3: Rozměry jednotlivých zkušebních těles pro stanovení modulu tuhosti a únavových charakteristik

Ozn. vzorku	Spodní hrana B [mm]	Horní hrana b [mm]	Tloušťka e [mm]	Výška h [mm]	Hmotnost [g]	Strain (výpočet pc)
ACO II - V	70,30	27,59	41,11	249,57	1131,85	46,32
ACO II - III	70,73	27,76	41,05	250,34	1154,03	46,33
ACO II - II	70,12	26,08	41,11	250,72	1129,82	45,16
ACO I - V	69,90	28,85	40,81	252,53	1138,99	45,71
ACO I - 1	68,73	27,20	41,20	250,84	1124,96	45,88
ACO I - 2	72,01	28,04	41,00	250,91	1149,57	46,84
ACO I - 3	69,35	25,34	40,80	251,24	1113,70	44,31
ACO I - 4	70,83	29,28	40,80	253,50	1168,24	45,93
CRMB I - 1	70,85	27,50	39,43	248,83	1089,10	46,82
CRMB I - 2	70,79	26,52	39,43	248,83	1098,01	46,29
CMRB I - 3	70,26	26,15	39,91	248,54	1098,09	46,05
CMRB I - 4	70,76	26,35	40,38	248,74	1103,25	46,31
CMRB I - 5	70,41	27,07	40,38	248,20	1104,11	46,64
CMRB II - 1	70,42	26,99	40,83	248,35	1106,71	46,56
CMRB II - 2	69,94	24,46	40,79	252,75	1101,24	43,80
CMRB II - 3	69,91	23,71	40,83	252,72	1107,10	43,59
CMRB II - 4	70,30	26,73	40,81	252,86	1121,28	44,74
CMRB II - 5	69,48	26,94	40,99	252,35	1106,59	44,63

Tabulka 22: Jednotlivé rozměry jednotlivých zkušebních těles pro stanovení tuhosti a únavových charakteristik

14.4 Příloha 4: Jednotlivé výsledky měření při stanovování únavových charakteristik

Data pro zpracování	
Jednotlivé výsledky měření únavy směsi 1	
Microstrain	počet cyklů
0.000 098	2 006 484
0.000 110	162 605
0.000 117	785 572
0.000 113	899 802
0.000 098	2 633 179
0.000 100	2 633 179
0.000 097	2 633 179
0.000 098	2 633 179

Tabulka 23: Naměřené hodnoty únavy ze zkušebního zařízení, směs 1

Data pro zpracování	
Jednotlivé výsledky měření únavy směsi 2	
Microstrain	počet cyklů
0.000 158	606 924
0.000 159	1 210 076
0,000 166	708 484
0,000 154	974 965
0,000 141	6 983 285
0,000 161	1 528 804
0,000 158	2 036 856
0,000 146	3 999 562

Tabulka 24: Naměřené hodnoty únavy ze zkušebního zařízení, směs 2