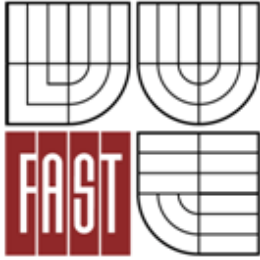




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

POSOUZENÍ ASFALTOVÉHO KOBERCE DRENÁŽNÍHO A TENKÉHO S ASFALTEM MODIFIKOVANÝM PŘÍSAMOU TECROAD

EVALUATION OF POROUS ASPHALT AND ASPHALT CONCRETE FOR VERY THIN LAYERS WITH
ASPHALT MODIFIED BY TECROAD ADDITIVE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. ZDENĚK KAŠKA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. JAN KUDRNA, CSc.

BRNO 2012

VLOŽIT ORIGINAL ZADÁNÍ

ABSTRAKT

Tato práce je zaměřena na návrh a určení vlastností asfaltového koberce drenážního a asfaltového betonu pro velmi tenké vrstvy s přísadou TecRoad. Pro popis vlastností je stanovena odolnost vůči vodě, ztráta částic, tuhost, únavové a nízkoteplotní charakteristiky a odolnost vůči trvalým deformacím. Následně jsou směsi porovnány a jsou zpracována doporučení pro použití při údržbě a opravě vozovek.

KLÍČOVÁ SLOVA

Asfaltová směs, TecRoad, koncentrát CRmB, Marshallova zkouška, ztráta částic, modul tuhosti, únava, nízkoteplotní charakteristiky, trvalé deformace.

ABSTRACT

This work is focused on the design and determination of the properties of porous asphalt and asphalt concrete for very thin layers with TecRoad addition. The water sensitivity, particle loss, stiffness, fatigue and low temperature characteristics and resistance to permanent deformation are determined for a description of mixtures properties. Subsequently, the mixtures are compared and recommendations for use in maintenance and reconstruction of roads are prepared.

KEYWORDS

Asphalt mixture, TecRoad, CRmB concentrate, Marshall test, particle loss, stiffness modulus, fatigue, low temperature characteristics, permanent deformation.

KAŠKA, Z. *Posouzení asfaltového koberce drenážního a tenkého s asfaltem modifikovaným přísadou TecRoad : diplomová práce.* Brno, 2011. 111 s. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav pozemních komunikací. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. JAN KUDRNA, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma posouzení asfaltového koberce drenážního a tenkého s asfaltem modifikovaným přísadou TecRoad jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych tímto vyjádřil poděkování prof. Ing. Janu Kudrnovi, CSc., Ing. Ondřeji Daškovi, poté všem zaměstnancům školní laboratoře VUT FAST v Brně za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Dále kolegovi Bc. Vojtovi Rousovi za pomoc při měření a zpracovávání této diplomové práce. V neposlední řadě i své rodině za podporu.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

Obsah

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | ÚVOD..... | 10 |
| 2 | Popis vstupních materiálů pro směsi | 13 |
| 2.1 | Kamenivo..... | 13 |
| 2.2 | Pojivo..... | 15 |
| 2.2.1 | Zjištění vlastnosti jednotlivých pojiv | 16 |
| 3 | Označení a popis směsí | 18 |
| 3.1 | Asfaltový koberec drenážní..... | 18 |
| 3.2 | Asfaltový beton pro velmi tenké vrstvy | 18 |
| 4 | Návrh směsi..... | 20 |
| 4.1 | Stručný popis postupu prací..... | 20 |
| 4.2 | Postup jednotlivých prací souvisejících s výrobou Marshallových těles..... | 21 |
| 4.2.1 | Stanovení zrnitosti jednotlivých frakcí kameniva..... | 21 |
| 4.2.2 | Návrh čáry zrnitosti asfaltové směsi | 21 |
| 4.2.3 | Navržení navážek kameniva a pojiva..... | 25 |
| 4.2.4 | Provedení navážek na jednotlivá tělesa..... | 27 |
| 4.2.5 | Natemperování jednotlivých navážek..... | 27 |
| 4.2.6 | Míchání směsi pro Marshallova tělesa..... | 27 |
| 4.2.7 | Hutnění Marshallových těles..... | 28 |
| 4.3 | Postup prací souvisejících s výrobou desek | 30 |
| 4.3.1 | Navržení navážek kameniva a pojiva na desky..... | 30 |
| 4.3.2 | Příprava navážek na jednotlivé desky | 31 |
| 4.3.3 | Míchání směsi na desky..... | 32 |
| 4.3.4 | Navážka namíchané směsi na desky | 33 |
| 4.3.5 | Příprava lamelového zhutňovače..... | 33 |
| 4.3.6 | Hutnění směsi v lamelovém zhutňovači..... | 34 |
| 4.3.7 | Získání zkušebních těles z desek | 35 |

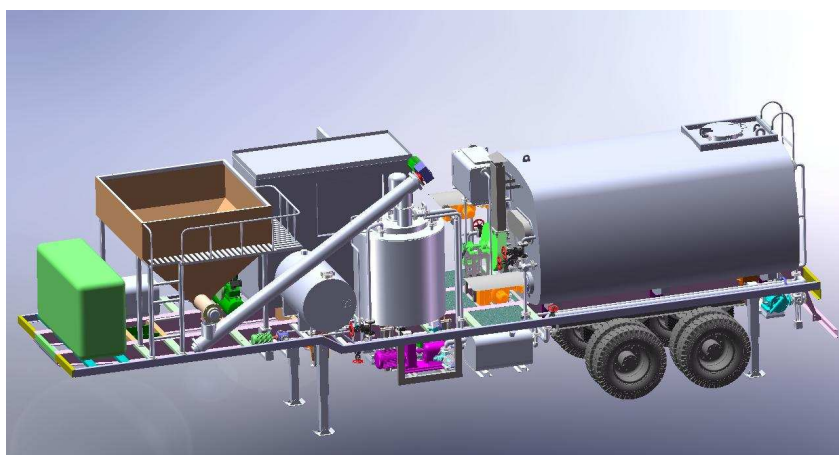
| | | |
|-------|---|----|
| 4.4 | Desky do vyjížděče | 36 |
| 4.5 | Výroba trámečků a komolých klínů..... | 36 |
| 4.5.1 | Výroba trámečků pro zkoušku nízkoteplotních charakteristik..... | 36 |
| 4.5.2 | Výroba komolých klínů (trapezoidů) | 38 |
| 5 | Popis použitých zkušebních metod | 40 |
| 5.1 | Zkoušky prováděné na Marshallových tělesech..... | 40 |
| 5.1.1 | Rozměry a hmotnosti Marshallových těles | 40 |
| 5.1.2 | Objemová hmotnost Marshallových těles | 40 |
| 5.1.3 | Maximální objemová hmotnost | 41 |
| 5.1.4 | Mezerovitost Marshallových těles | 43 |
| 5.1.5 | Mezerovitost směsi kameniva..... | 43 |
| 5.1.6 | Stupeň vyplnění mezer pojivem..... | 44 |
| 5.1.7 | Odolnost vůči vodě..... | 44 |
| 5.1.8 | Propustnost | 46 |
| 5.1.9 | Ztráta částic | 47 |
| 5.2 | Zkouška provedená na celých deskách | 48 |
| 5.2.1 | Odolnost vůči vzniku trvalých deformací | 48 |
| 5.3 | Zkoušky prováděné na trámečcích..... | 49 |
| 5.3.1 | Nízkoteplotní vlastnosti asfaltových směsí | 50 |
| 5.4 | Zkoušky na komolých klínech (trapezoidech) | 51 |
| 5.4.1 | Modul tuhosti asfaltové směsi | 52 |
| 5.4.2 | Odolnost asfaltové směsi proti únavě..... | 55 |
| 6 | Vyhodnocení naměřených dat | 56 |
| 6.1 | Výsledky pro Marshallova tělesa..... | 56 |
| 6.1.1 | Rozměry a hmotnosti Marshallových těles..... | 56 |
| 6.1.2 | Objemová hmotnost Marshallových těles | 58 |
| 6.1.3 | Maximální objemová hmotnost směsí..... | 61 |

| | | |
|-------|--|----|
| 6.1.4 | Mezerovitost Marshallových těles | 62 |
| 6.1.5 | Odolnost Marshallových těles vůči vodě | 65 |
| 6.1.6 | Propustnost Marshallových těles..... | 67 |
| 6.1.7 | Ztráta částic Marshallových těles..... | 68 |
| 6.2 | Výsledky pro vyhotovené desky | 69 |
| 6.2.1 | Odolnost proti vzniku trvalých deformací..... | 69 |
| 6.3 | Výsledky stanovené na trámečcích | 73 |
| 6.3.1 | Rozměry a hmotnost trámečků..... | 73 |
| 6.3.2 | Nízkoteplotní vlastnosti asfaltových směsí | 73 |
| 6.4 | Výsledky zkoušek stanovené na komolých klínech (trapezoidech)..... | 75 |
| 6.4.1 | Rozměry a hmotnosti trapezoidů..... | 75 |
| 6.4.2 | Modul tuhosti asfaltové směsi | 77 |
| 6.4.3 | Odolnost asfaltové směsi vůči únavě | 80 |
| 6.5 | Souhrn výsledků | 84 |
| 6.6 | Orientační cenové srovnání | 86 |
| 7 | Závěr..... | 88 |
| | Seznam použité literatury | 90 |
| | Seznam použitých zkratek a symbolů | 92 |
| | Seznam obrázků | 95 |
| | Seznam grafů..... | 96 |
| | Seznam tabulek | 97 |
| | Seznam Příloh..... | 99 |

1 ÚVOD

Přeprava je jednou z nejdůležitějších vlastností pro fungování lidstva. Z toho je přibližně tři čtvrtiny transportu tvořeno silniční dopravou. A nejenom z tohoto hlediska, ale i ze zvyšování zatížení silniční sítě nákladní dopravou a snižování financí na údržbu, opravy a rekonstrukce. Kvůli výše zmíněným skutečnostem je velmi důležité budovat silniční síť, jejíž vlastnosti budou odpovídat zvyšujícím se nárokům, nejen z hlediska zvyšování zátěže, ale i z ekonomického hlediska ke snižování nákladů. Pro zefektivnění nákladů jsou používány nové a vyspělejší technologie pro budování konstrukčních vrstev silniční vozovky. Jednou zlepšující úpravou je modifikace asfaltových pojiv, u kterých byly upraveny reologické vlastnosti přísadami, což vedlo k zlepšení jejich vlastností.

V dnešní době se snažíme ekologicky zbavovat starých nepotřebných materiálů, jako jsou plasty, staré pneumatiky atd. Právě staré opotřebované pneumatiky se u nás využívají většinou energeticky a to jako přidávané palivo. Ve stavebnictví je využíváme, i když jen malé množství, díky jejich složení. Upravují se buď klasickým způsobem (drcením nebo mletím), nebo kryogenním způsobem (za použití kapalného dusíku). Tento získaný pryžový granulát je možné přidávat do asfaltové směsi dvěma způsoby a to 1. suchým procesem – přidáním granulátu přímo do míchačky obalovny nebo 2. mokrý proces – vmíchání pryžového granulátu do silničního asfaltu. Právě tento 2. postup vmíchání granulátu do asfaltu je u nás používán častěji a je preferován, jelikož je možné namíchaný modifikovaný asfalt (CRmB¹) dopravit přímo z rafinérie (technologie Terminal Blend) anebo je možné jej namíchat v mísícím zařízení (Blenderu), který bude přistaven u obalovny (Continuous Blend).



Obrázek 1.1 : Mobilní míchací zařízení na výrobu modifikovaného asfaltu [1]

Ve své práci využívám asfalt s přísadou **TecRoad**, jež je v německé literatuře označována jako **RmB G** (v diplomové práci je používán název TecRoad). Tato metoda je kombinací metody za sucha a metody Ter-

¹ CRmB - z anglického výrazu Crumb Rubber Modified Bitumen (asfalt modifikovaný pryžovým granulátem)

minal Blend. Sypký výrobek TecRoad vzniká mícháním pryžového granulátu s asfaltem, který se poté chemickou cestou a přidáním dalšího pryžového granulátu zpracuje do sypkého stavu s celkovým obsahem granulátu v této směsi 35 % až 50 %.

Vrstvy z těchto modifikovaných směsí mají delší životnost, vyšší odolnost vůči únavě, stárnutí pojiva, trvalým deformacím a trhlinám. Další nedílnou vlastností je možnost snížení tloušťky vrstev (podle některých amerických literatur), snížení akustického tlaku (hluky), a v neposlední řadě již zmíněná vlastnost zpracování odpadního materiálu ve formě opotřebovaných pneumatik. Samozřejmostí jsou i nevýhody a to vyšší počáteční náklady, pracnost, energetická náročnost a také špatná skladovací stabilita pojiva (v případě technologie Continuous Blend a Terminal Blend).

Diplomová práce posuzuje asfaltový koberec drenážní a asfaltový beton pro velmi tenké vrstvy s asfaltem modifikovaným přísadou TecRoad. Jsou zpracovány funkční zkoušky zmíněných hutněných asfaltových směsí a následně budou porovnány odlišnosti ve výsledcích těchto zkoušek. Výsledky funkčních zkoušek budou porovnány se směsí asfaltového koberce drenážního s běžným polymerem modifikovaným asfaltem.

Cílem diplomové práce je navrhnout směs drenážního koberce PA 8 a asfaltového betonu pro velmi tenké vrstvy BBTM 8 s odlišným dávkováním asfaltu a modifikační přísady TecRoad a to s použitím Marshalovy zkoušky. Následně jsou připravena zkušební tělesa a stanoveny vlastnosti směsí a to odolnost vůči účinkům vody, ztráta částic a odolnost vůči vzniku trvalých deformací a mrazovým trhlinám.

Provedené zkoušky jsou provedeny podle platných českých technických norem a to řady ČSN EN 12697 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka:

- a) Stanovení maximální objemové hmotnosti dle ČSN EN 12697-5+A1 [2]
- b) Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí dle ČSN EN 12697-8 [3]
- c) Zhutnitelnost dle ČSN EN 12697-10 [4]
- d) Stanovení odolnosti zkušebního tělesa vůči vodě dle ČSN EN 12697-12 [5]
- e) Ztráta částic zkušebního tělesa asfaltového koberce drenážního dle ČSN EN 12697-17+A1 [6]
- f) Propustnost zkušebního tělesa dle ČSN EN 12697-19+A1 [7]
- g) Zkouška pojíždění kolem dle ČSN EN 12697-22+A1 [8]
- h) Stanovení pevnosti v příčném tahu dle ČSN EN 12697-23 [9]
- i) Odolnost proti únavě dle ČSN EN 12697-4 [10]
- j) Tuhost dle ČSN EN 12697-26 [11]
- k) Stanovení rozměrů asfaltových zkušebních těles dle ČSN EN 12697-29 [12]

- l) Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem dle ČSN EN 12697-30+A1 [13]
- m) Příprava zkušebních těles zhutňovačem desek dle ČSN EN 12697-33+A1 [14]
- n) Marshallova zkouška dle ČSN EN 12697-34+A1 [15]
- o) Laboratorní výroba směsi dle ČSN EN 12697-35+A1 [16]
- p) Nízkoteplotní vlastnosti dle ÖNORM EN 12697-46 [17]

V diplomové práci jsou dále pomocí funkčních zkoušek směsí popsány dvě dané směsi. Posuzování směsi je vlastně určení jejich statických a dynamických vlastností s cílem poznat konstrukční možnosti tolik nezbytné pro jejich nejefektivnější použití a využití. Proto byly stanoveny moduly tuhosti a únavové charakteristiky obou směsí.

Diplomová práce bude ukončena celkovými výsledky a budou popsány doporučení při údržbě a opravě vozovek.

2 Popis vstupních materiálů pro směsi

Níže budou popsány jednotlivé materiály, které byly použity pro výrobu asfaltových směsí.

2.1 Kamenivo

Pro asfaltový koberec drenážní i pro asfaltový beton pro velmi tenké vrstvy modifikované přísadou TecRoad, jsou použity stejné frakce kameniv a to z lomu Luleč, kde se těží moravská droba. Jedná se o sedimentární horninu šedé barvy s ostrohrannými zrny.

Frakce kameniva 4 – 8 mm je zástupcem hrubého kameniva a drobnému kamenivu odpovídá frakce 0 – 4 mm.

Použitá kameniva i filer odpovídají požadavkům EN 13043 a jsou zobrazena v nádobách na Obrázku 2.1

Tabulka 2.1: Použitá kameniva

| lokality - popis | frakce [mm] |
|------------------|-------------|
| Luleč 4.2011 | 0 - 4 |
| Luleč 4.2012 | 4 - 8 |

Dále byla použita vápencová moučka Mokrý 4.2011 označena jako filer splňující požadavky NA.4.3.4. dle ČSN EN 13108-7 [18].



Obrázek 2.1: Použitá kameniva (vlevo 4 - 8, uprostřed 0 - 4, vpravo filer)

Tabulka 2.2: Sítový rozbor frakce 0 - 4

| Kamenivo: | velikost ok sít | | | | | | | | |
|------------------|-----------------|-------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| | 11 | 8 | 4 | 2 | 1 | 0,5 | 0,25 | 0,125 | 0,063 |
| Luleč 0/4 4.2011 | 100,0 | 100,0 | 91,9 | 63,0 | 43,6 | 30,4 | 17,5 | 5,7 | 2,8 |

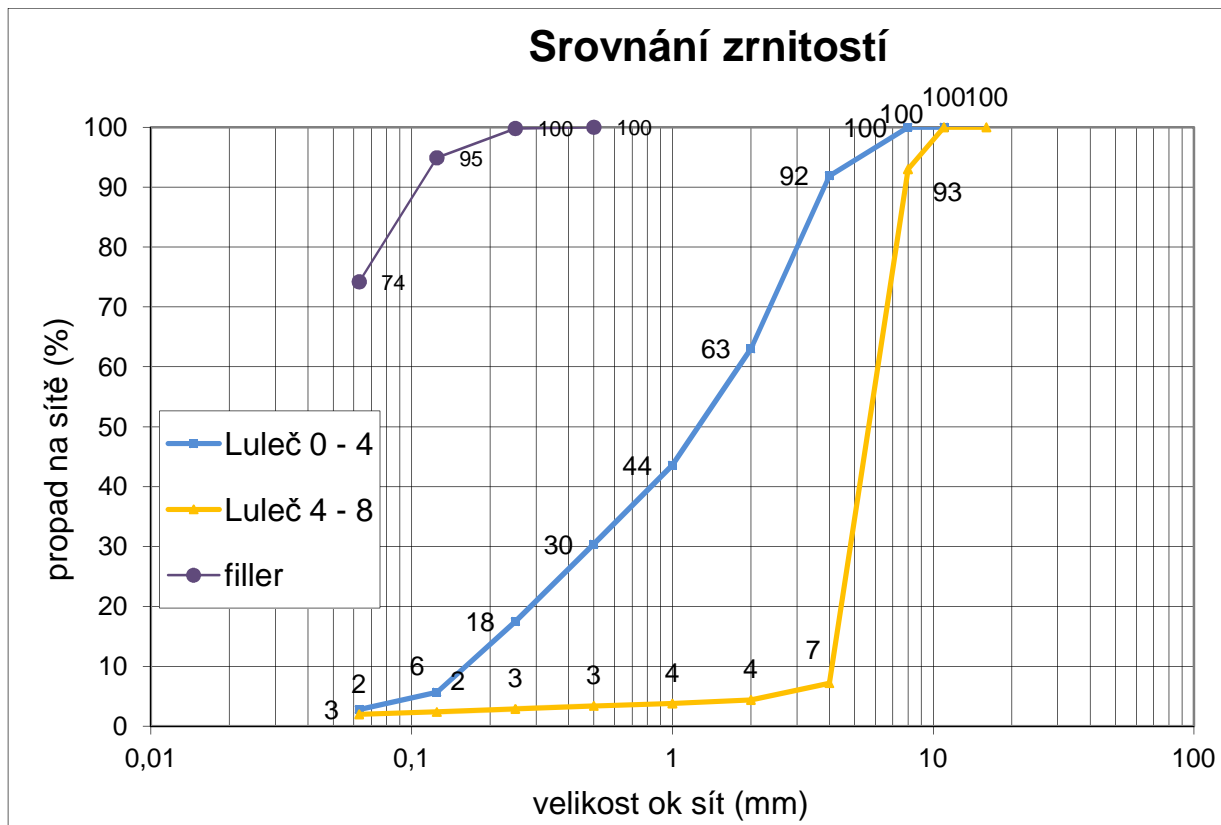
Tabulka 2.3: Sítový rozbor 4 - 8

| Kamenivo: | velikost ok sít | | | | | | | | |
|------------------|-----------------|------|-----|-----|-----|-----|------|-------|-------|
| | 11 | 8 | 4 | 2 | 1 | 0,5 | 0,25 | 0,125 | 0,063 |
| Luleč 4/8 4.2011 | 100,0 | 93,0 | 7,2 | 4,4 | 3,8 | 3,4 | 2,9 | 2,4 | 2,0 |

Tabulka 2.4: Sítový rozbor vápencové moučky

| Kamenivo: | velikost ok sít | | | | |
|-------------------------------|-----------------|-------|------|-------|-------|
| | 1 | 0,5 | 0,25 | 0,125 | 0,063 |
| Vápencová moučka Mokrý 4.2011 | 100,0 | 100,0 | 99,8 | 94,9 | 74,2 |

Porovnání jednotlivých frakcí je zřetelné na Grafu 2.1.



Graf 2.1: Čára zrnitostí použitých kameniv

Pro srovnávané směsi s asfaltem modifikovaným přísadou TecRoad je použité kamenivo v souladu ČSN EN 13108-7 [18] a ČSN EN 13108-2 [19] odstavce 5.2.2.

Použité kamenivo bylo správně vysušené a neobsahovalo cizí částice.

2.2 Pojivo

Díky poloze České republiky a klimatickým podmínkám, které zde jsou, je použito asfaltové pojivo gradace 50/70 a to z rafinerie OMV. Podle doporučení výrobce bylo do silničního asfaltu dávkováno 33 % přísady TecRoad pro asfaltový koberec drenážní a 22 % pro asfaltový beton pro velmi tenké vrstvy (dávkování z hmotnosti pojiva).

Při výrobě přísady TecRoad ve výrobě v Rakousku se pryžový granulát získaný mechanickým mletím ojetých pneumatik z nákladních automobilů rozmíchá v silničním asfaltu gradace 70/100 a následně se ve výrobě chemickou cestou s přidáváním dalšího pryžového granulátu zpracovává a granuluje se současným vychládáním. Poté se nadávkuje do pytlů (10 kg a 15 kg), nebo velkoobjemových pytlů. TecRoad je ve své podstatě předsměs asfaltu a pryžového granulátu (asfalto-pryžový koncentrát), kterou je možné přidávat přímo do míchačky obalovny spolu s kamenivem, nebo je možné koncentrát dávkovat z velkoobjemových pytlů (big bag) do mobilního míchacího zařízení pro výrobu asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem a poté se toto modifikované pojivo čerpá do míchačky obalovny.

V Německu je velmi rozšířené používání přísady TecRoad, jelikož tuto přísadu přidávají přímo při míchání z pytlů do míchačky obalovny ručně, nebo pomocí dávkovacího systému [20].

Výsledky testů v různých evropských zemích ukazují, že tato nová generace povrchů s modifikační přísadou TecRoad má jasné výhody ve srovnání s předchozími produkty založenými na běžné polymerní modifikaci silničního asfaltu. Koncentrát TecRoad ve směsi snižuje náchylnost k tvorbě trhlin a vyjždění kolejí a to zejména za extrémních povětrnostních podmínek a zatížení. Směsi s přísadou TecRoad vykazují vyšší životnost, a proto jsou méně nákladné při údržbě ve střednědobém horizontu. Tato metoda je velkou inovací produktů pro povrchové úpravy dopravních ploch, vyniká dlouhou životností, vyšší bezpečností, lepší přilnavostí a v neposlední řadě přispívá ke snížení hluku [21]. Nespornou výhodou je možnost vytvoření drenážních koberců díky vysoce viskóznímu pojivu, obsahujícímu pryžový granulát (vysoce viskózní pojiva obsahují více než 15 % pryžového granulátu k hmotnostnímu obsahu pojiva). Další předností je schopnost dávkovat do asfaltové směsi vysoký obsah pojiva bez zvýšeného nebezpečí stékání pojiva. To je zajištěno vysokou viskozitou vzniklého pojiva ve směsi a jeho silnou lepivostí. Při vysokém obsahu pojiva je kamenivo obaleno tlustým filmem pojiva, což je výhodné z hlediska omezení stárnutí pojiva a též omezení vzniku trhlin.

Pro výrobu asfaltových směsí byla v laboratoři připravena dvě pojiva obsahující přísadu TecRoad a to pojivo s 22 % TecRoad a 33 % TecRoad. Při laboratorní výrobě pojiva bylo postupováno podle doporučení [22] a [23]. Do silničního asfaltu 50/70 byla dávkována přísada TecRoad (v množství 22 % a 33 % z hmotnosti pojiva) při teplotě 170 °C byla přísada do asfaltu rozmíchávána v laboratorní míchačce po dobu 60 minut s rychlostí rotace rotoru 200 otáček za minutu.

2.2.1 Zjištěné vlastnosti jednotlivých pojiv

Závislosti viskozity na teplotě (Graf 2.2):

➤ 67 % OMV 50/70 + 33 % TecRoad (Tab.:2.5)

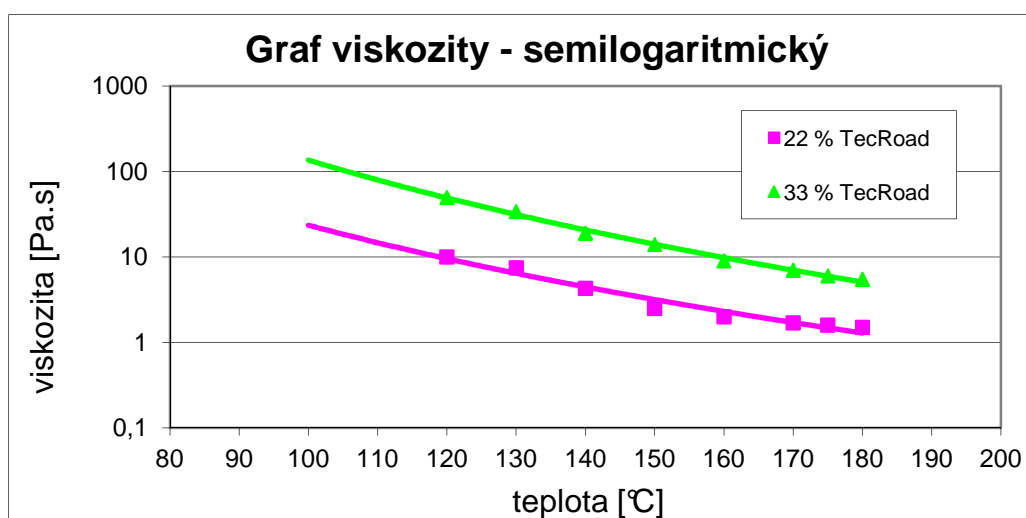
Tabulka 2.5: Závislost viskozity na teplotě (33 % TecRoad)

| t [°C] | 120 | 130 | 140 | 150 | 160 | 170 | 175 | 180 |
|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| viskozita [Pa.s] | 50 | 34 | 19 | 14 | 9 | 7 | 6 | 5,5 |

➤ 78 % OMV 50/70 + 22 % TecRoad (Tab.:2.6)

Tabulka 2.6: Závislost viskozity na teplotě (22 % TecRoad)

| t [°C] | 120 | 130 | 140 | 150 | 160 | 170 | 175 | 180 |
|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| viskozita [Pa.s] | 10 | 7,5 | 4,3 | 2,5 | 2 | 1,7 | 1,6 | 1,5 |



Graf 2.2: Závislost viskozity na teplotě

Pojivo s 33 % přísady TecRoad je v celém teplotním rozsahu (110 – 180°C) viskóznější, než pojivo s 22 % přísady TecRoad což je vidět na Grafu 2.2.

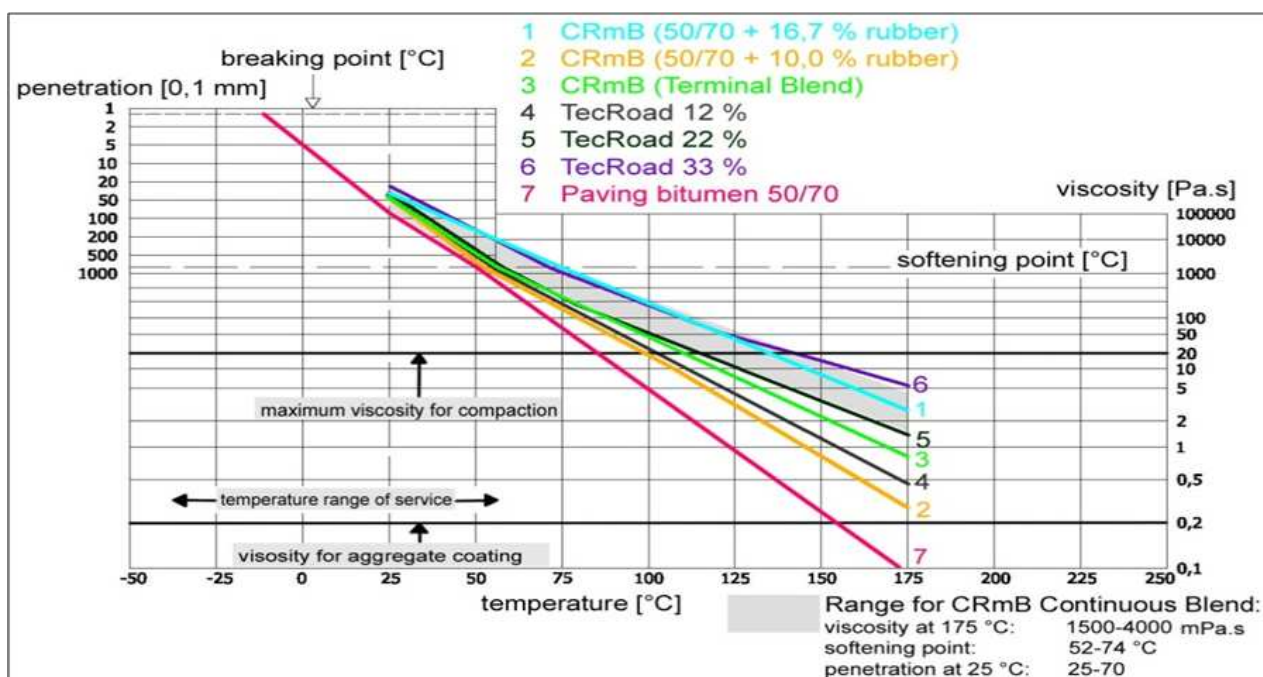
Další zjištěné vlastnosti o použitých pojivech jsou penetrace, bod měknutí a resilience. Tyto podrobné hodnoty jsou popsány v následující tabulce 2.7 a je patrné, že přidavek přísady TecRoad zvyšuje viskozitu pojiva a podle zkoušky resilience lze usuzovat na zvyšování pružnosti pojiva s rostoucím obsahem přísady. Lze říct, že částice pryže udělují pojivu pružnost.

Tabulka 2.7: Vlastnosti pojiv s přísadou TecRoad

| | 22 % TecRoad | 33 % TecRoad |
|---------------------------|--------------|--------------|
| Penetrace [0,1 mm] | 38 | 28 |
| Bod měknutí [°C] | 59,7 | 71,4 |
| Resilience [%] | 20 | 26 |

Pro zkoumané směsi s asfaltem modifikovaným přísadou TecRoad je použité pojivo v souladu s TP 148, návrh 2011 a ČSN EN 13108-7 [18] a ČSN EN 13108-2 [19] odstavce 5.2.3 a 5.2.4.

Pro ilustraci jsou na dalším Grafu 2.3 porovnány vlastnosti pojiv a to pojiva s obsahem 22 % přísady TecRoad jako křivka 5 a s 33 % přísadou TecRoad jako křivka 6 s ostatními běžně používanými pojivy.



Graf 2.3 : Srovnání vlastností pojiv [24]

3 Označení a popis směsí

3.1 Asfaltový koberec drenážní

- **PA D pojivo**

kde PA² je asfaltový koberec drenážní;
D velikost horního síta;
pojivo označení použitého pojiva.

V mém případě byl použit **PA 8 33 % TecRoad**, ČSN EN 13108-7 [18].

Asfaltový koberec drenážní s maximální velikostí zrna použitého kameniva 8 mm a asfaltovým pojivem modifikovaným přísadou TecRoad o hmotnostním zastoupení 33 % v pojivu, podle ČSN EN 13108-7 [18].

Směs je s výhodou používána k rychlému odvodnění obrusné vrstvy v konstrukci vozovky. Tento fakt zamezuje vzniku vodní mlhy vznikající za projíždějícími vozidly a také vzniku aquaplaningu při vysoké rychlosti vozidla. Dále se směs s výhodou využívá na sportovní hřiště k rychlému odvodnění plochy.

U těchto vrstev je velmi důležité správné odvodnění vrstvy nejen v ploše, ale i na začátku a konci úseku s touto vrstvou. Především se jedná o detailně propracovaný odtok vody po spádu do vpusťe, či jiného odvodňovacího zařízení.

Nevýhodou je údržba vrstvy, respektive nutnost používání speciálních pracovních strojů pro vyčištění vrstvy tak, aby její schopnost odvodňování byla stále účinná.

V Japonsku mají v plánu tyto vrstvy využívat k zadržování dešťové vody ve vrstvě a následně v období sucha se bude voda pozvolna z vrstvy vypařovat.

3.2 Asfaltový beton pro velmi tenké vrstvy

- **BBTM D pojivo**

kde BBTM³ je asfaltový beton pro velmi tenké vrstvy;
D velikost horního síta;
pojivo označení použitého pojiva.

V mém případě byl použit **BBTM 8 22 % TecRoad**, ČSN EN 13108-2 [19].

² Z anglického výrazu **Porous Asphalt**

³ Z francouzského názvu pro asfaltový beton pro velmi tenké vrstvy = **Bétons Bitumineux Très Minces**

Asfaltový beton pro velmi tenké vrstvy s maximální velikostí zrna použitého kameniva 8 mm a asfaltovým pojivem modifikovaným přísadou TecRoad o hmotnostním zastoupení 22 % v pojivu, podle ČSN EN 13108-2 [19].

Dřívější označení pro kvalitativní požadavky asfaltových směsí odpovídalo BBTM 8 označení AKTJ.

Použité označení (D=8) pro vyjádření zrnitosti asfaltových směsí odpovídá předchozímu označení *jemnozrnný* dle ČSN 736121 (1994).

Asfaltový beton pro velmi tenké vrstvy je s výhodou použit při rekonstrukcích vozovek a také při opravách na porušených vozovkách trhlinami při použití značně modifikovaného pojiva.

4 Návrh směsi

Jedná se o návrhové vstupní složení směsi v podobě jednotlivých složek materiálu a to čáry zrnitosti kameniva a procentuálního množství pojiva přidaného do směsi.

Návrh směsi podle ČSN EN 13108-7 určuje minimálně přípustné kombinace požadavků pro tyto směsi. Poté se většinou stanovuje jedna kombinace pro jednu směs. Kombinace je vybrána z následující tabulky (Tabulka 4.1).

Tabulka 4.1: Povolené kombinace požadavků dle ČSN EN 13108-7 ODST.:5.4.2 pro PA 8

| Požadavek | Kombinace | | |
|----------------------------|-----------|---|---|
| | 1 | 2 | 3 |
| Obsah pojiva | × | × | × |
| Zrnitost | × | × | × |
| Minimální mezerovitost v % | × | | |
| Maximální mezerovitost v % | × | × | × |
| Horizontální propustnost | | × | |
| Vertikální propustnost | | | × |
| <i>ITSR</i> ⁴ | × | × | × |
| Ztráta částic | × | × | × |

4.1 Stručný popis postupu prací

Návrh směsi probíhal nejprve přiblížením k čáře zrnitosti, dle jednotlivých směsí v předem připraveném programu, kde již podle získaných zkušeností je zobrazena čára zrnitosti jednotlivé směsi a k té je snaha se co nejvíce přiblížit. Obecně vzato obě směsi jsou pod Fullerovou parabolou, která znázorňuje nejtěsnější uspořádání kamenné kostry a je reprezentována rovnicí $Y=(d/D)^{0,5} \times 100$, kde Y je procentuální propad kameniva na daném síti [%], d je velikost oka síta [mm], na kterém počítám propad a D je velikost největšího zrna směsi [mm].

Následně je vypočítána v dalším programu navážka s odpovídajícím množstvím pojiva, kde jsou určeny hmotnosti jednotlivých frakcí kameniva a pojiva.

Nejprve se vyrobí tři sady Marshallových těles s odstupňovaným množstvím pojiva v Marshallově zhutňovači (2x50 úderů), z kterých se určí pomocí níže popsaných zkoušek optimální množství pojiva, maximální objemová hmotnost, mezerovitost a další vlastnosti potřebné k dalšímu pokračování při návrhu směsi.

⁴ ITSR Odolnost proti vodě vyjádřená poměrem pevnosti v příčném tahu stanovenou dle ČSN EN 12697 -17

Dále se v lamelovém zhutňovači vyrobí desky potřebné k získání dalších zkušebních těles. S pomocí narezaných desek do potřebných a normově daných tvarů se získají zkušební tělesa, na kterých se provádí další zkoušky.

4.2 Postup jednotlivých prací souvisejících s výrobou Marshallových těles

Dále budou uvedeny jednotlivé práce seřazené chronologicky tak, jak šly časově za sebou pro výrobu Marshallových těles a následné zkoušky na hotových tělesech budou popsány v další kapitole této práce.

4.2.1 Stanovení zrnitosti jednotlivých frakcí kameniva

Sítovým rozbořem se rozumí prosévání na seřazené typizační sestupné řadě sít a to 0,063; 0,125; 0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 4,0; 8,0; 11,0 mm.

Je použito praní a prosévání za sucha dle ČSN EN 933 - 1 [25]. Odplavení jemných částic probíhá na saturovaném promíchaném vzorku. Tento vzorek se vsypává na ochranné síto 1 mm, samotné praní se odehrává na síti 0,063 mm pod ním. Praní je ukončeno při vytékání čiré vody ze vzorku. Zůstatek na síti 0,063 mm se vysuší, zváží a dopočítá procento jemných částic podle [25].

Dále se na seřazená síta vsype předem zvážená suchá navážka kameniva o určité frakci, většinou se nasype na síto o třídu vyšší, než je známá hodnota frakce kameniva. Pod sestavou sít je miska pro zachycení propadu, jež se dostane skrze síta. Poté se síta upnou do vibračního stroje (Obrázek 4.1) a nechá se protřepat určitý časový interval, přičemž se zrna zachycují na příslušných odpovídajících sítích. Následně se zváží zůstatky kameniva na jednotlivých sítích a vyjádří se procentuální hmotnost zrn menších k určitému průměru zrna d (Tabulka 2.2 až Tabulka 2.4). Takto vyjádřený procentuální propad se vynáší do grafu zobrazujícího čáru zrnitosti (Graf 2.1).



Obrázek 4.1: Vibrační stroj

4.2.2 Návrh čáry zrnitosti asfaltové směsi

Výchozím krokem je již zmíněný návrh sítového rozboru jednotlivých frakcí kameniv a vápencové moučky, jež bude tvořit čáru zrnitosti splňující požadované podmínky pro jednotlivé směsi a to ČSN EN 13108-7 [18], ČSN EN 13108-2 [19] a TP 148 [23].

Návrh čáry zrnitosti pro jednotlivé směsi byl proveden podle dřívějších zkušeností a doporučení. Návrh čáry zrnitosti odpovídá národním přílohám (NA) příslušných norem s upřesněním v TP 148.

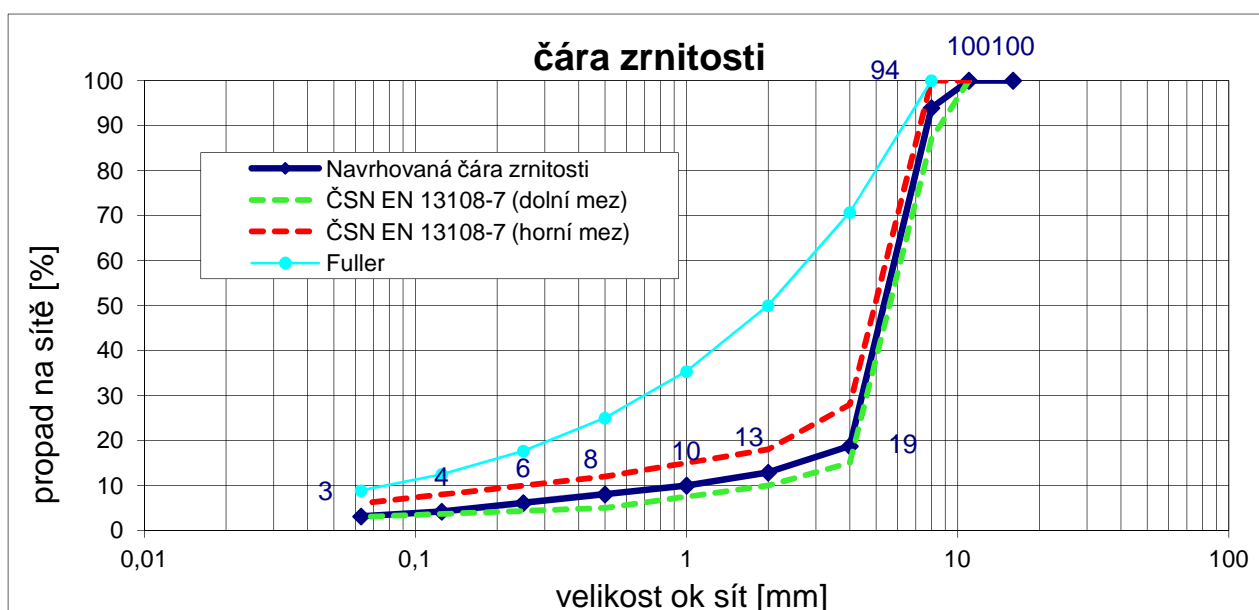
➤ **Návrh čáry zrnitosti pro asfaltový koberec drenážní ➔ PA 8**

Návrh čáry zrnitosti směsi PA 8 je znázorněn v Tabulce 4.2 a Grafu 4.1.

Čára zrnitosti leží v mezích dle ČSN EN 13108-7 (národní příloha NA 5) [18].

Tabulka 4.2: Návrh čáry zrnitosti pro směs PA 8

| zrnitost / síto [mm] | Propad sítem pro směs PA [% hmotnosti] | | | |
|----------------------------|---|-------------------------------------|-------------------------------------|--------|
| | Navrhovaná čára zrnitosti | ČSN EN 13108-7 (dolní mez) | ČSN EN 13108-7 (horní mez) | Fuller |
| 11 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 8 | 93,9 | 87,0 | 100,0 | 100,0 |
| 4 | 18,8 | 15,0 | 28,0 | 70,7 |
| 2 | 12,9 | 10,0 | 18,0 | 50,0 |
| 1 | 10,0 | | | 35,4 |
| 0,5 | 8,1 | 5,0 | 12,0 | 25,0 |
| 0,25 | 6,1 | | | 17,7 |
| 0,125 | 4,2 | | | 12,5 |
| 0,063 | 3,2 | 3,0 | 6,0 | 8,9 |



Graf 4.1: Přiblížení k čáře zrnitosti s mezemi pro směs PA 8

➤ **Návrh čáry zrnitosti pro asfaltový beton pro velmi tenké vrstvy → BBTM 8 A**

Asfaltové betony pro velmi tenké vrstvy BBTM se podle ČSN EN 13108-2 [19] rozlišují podle mezerovitosti směsi na BBTM A, B a C. Mezerovitost se stanovuje na základě stanovení maximální objemové hmotnosti podle ČSN EN 12697-5 [2] postupem A ve vodě (volumetrický postup) a objemové hmotnosti zkušební tělesa podle ČSN EN 12697-6 [26]. **BBTM A** za podmínek měření objemové hmotnosti zhutněných zkušebních těles postupem B (vážením ve vodě při nasyceném povrchu) a má v národní příloze normy ČSN EN 13108-2 předepsanou mezerovitost 3 % až 6 a v TP 148 (2011) je uvedena požadovaná mezerovitost 7 % až 10%. **BBTM B** už umožňuje stanovit objemovou hmotnost zhutněných zkušebních těles postupem D stanovením objemu těles z rozměrů, či postupem C při utěsněném zkušebním tělese s mezerovitostí do 15 %, ale tento postup není vhodný pro laboratorně vytvořenou směs. **BBTM C** má mezerovitost odvozenou z měření objemové hmotnosti při stanovení postupem A za sucha pro téměř uzavřené, prakticky neabsorbující tělesa a to s mezerovitostí 2,5 % až 4 %. Výše uvedené postupy ctí Národní příloha ČSN EN 13108-2 [19], ale stanovuje označení spíše podle čáry zrnitosti. Oproti tomu TP 148 udává poněkud odlišné hodnoty mezerovitosti pro směs BBTM A a to 7 % až 10 %.

TP 148, 2011 [23] zjednodušuje problém na stanovení maximální objemové hmotnosti metodou v rozpouštědle. Metoda zjišťování ve vodě je pro směsi obsahující pryžový granulát příliš pracná a nepřesná. Rozdrobení směsi na částice, do kterých by pronikla voda, při zkoušce maximální objemové hmotnosti prakticky není možné a uzavřený vzduch mezi obalenými zrny drobného kameniva ovlivňuje výsledek zkoušky. Navíc zkouška v rozpouštědle umožňuje podle přílohy 2 TP 148 [23] stanovit orientační množství pryžového granulátu v asfaltové směsi. Další výjimkou je stanovení objemové hmotnosti buď vážením ve vodě, anebo pouze měření z rozměrů při mezerovitosti nad 6 %. Následně je pak za těchto specifikací stanovení mezerovitosti dodrženo rozlišení typů směsí do kategorií A, B a C podle ČSN EN 13108-2 podle mezerovitosti s ohledem na obsah drobného kameniva a jemných částic podle čáry zrnitosti.

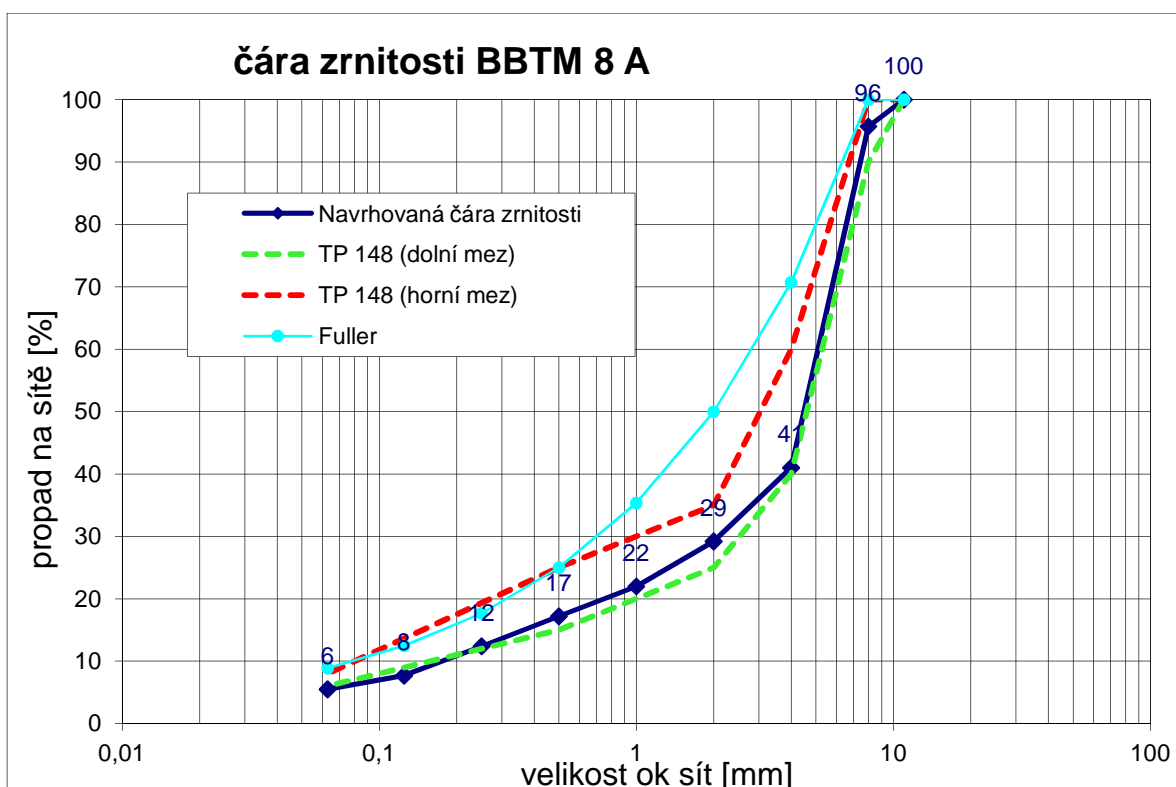
Z těchto upřesnění není také přesně dodržena Národní příloha ČSN EN 13108-2 ve stanovení čar zrnitosti, které jsou upřesněny v TP 148, 2011 [26].

Tabulka 4.3 a Graf 4.2 znázorňují návrh čáry zrnitosti směsi BBTM 8, přičemž průběh zrnitosti navrhované směsi kopíruje dolní mez zrnitosti uvedenou v TP 148. Navrhovaná čára zrnitosti takřka leží v mezích podle TP 148 pro směs BBTM 8 A, ačkoliv směs mírně vybočuje na síť 0,063 mm.

Čára zrnitosti leží v mezích dle ČSN EN 13108-2 (národní příloha NA.5.1) [19], ale zde jsou zobrazeny meze z novějších technických podmínek TP 148 [23].

Tabulka 4.3: Návrh čáry zrnitosti pro směs BBTM 8

| zrnitost / síto [mm] | Propad sítem pro směs BBTM 8 A [% hmotnosti] | | | |
|----------------------------|---|--------------------------|--------------------------|--------|
| | Navrhovaná čára zrnitosti | TP 148 (dolní mez) | TP 148 (horní mez) | Fuller |
| 11 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| 8 | 95,7 | 90,0 | 100,0 | 100,0 |
| 4 | 41,0 | 40,0 | 60,0 | 70,7 |
| 2 | 29,2 | 25,0 | 35,0 | 50,0 |
| 1 | 22,0 | | | 35,4 |
| 0,5 | 17,2 | 15,0 | 25,0 | 25,0 |
| 0,25 | 12,4 | | | 17,7 |
| 0,125 | 7,7 | | | 12,5 |
| 0,063 | 5,5 | 6,0 | 8,0 | 8,9 |



Graf 4.2: Přiblížení k čáře zrnitosti s mezemi pro směs BBTM 8

Asfaltový beton pro velmi tenké vrstvy má zrna kameniva odstupňována tak, aby umožnila vytvoření otevřené povrchové textury.

4.2.3 Navržení navážek kameniva a pojiva

Po navržení čáry zrnitosti jsou vypočteny hmotnostní podíly jednotlivých složek ve směsi. Je stanovené přesné množství zkušebních těles, která budou vytvořena z navážek. V ČSN EN 13108-2 [19] i v ČSN EN 13108-7 [18] je definován pouze minimální obsah pojiva v návrhovém složení směsi dle kategorie zatížení a to 5,0 % pro BBTM a 3,0 % pro PA.

Optimální množství pojiva bylo stanoveno dle zkušeností výroby daných směsí. Pro směs BBTM 8 byly vytvořeny tři sady s odchýlením od optimálního množství pojiva a to -0,5 % a +0,5 %. Směs PA 8 má stanoven přímo optimální obsah pojiva na 7,0 % a to dle předchozích zkušeností a doporučení.

➤ Stanovení navážek na Marshallova tělesa pro směs PA 8 s 33 % TecRoad

Navážky jsou určeny pro devět těles a to:

- tři tělesa na zjištění zejména objemové hmotnosti a mezerovitosti
(návrh 1025 g)
hutněné 2 x 50 údery
- šest těles na ITSR
(návrh 1005 g)
hutněné 2 x 25 údery

Tabulka 4.4: Navážky kameniva na Marshallova tělesa pro PA 8

| navážka: 1025 g kameniva | | |
|--------------------------|------------|---------------|
| frakce | podíly v % | hmotnosti [g] |
| filer | 1,5 | 15,38 |
| 0/4 | 12 | 123,00 |
| 4/8 | 86,5 | 886,63 |
| 8/11 | 0 | 0 |
| suma | 100 | 1025 |

Váp. moučka Mokrý 4.2011
Luleč 0/4 4.2011
Luleč 4/8 4.2011

Tabulka 4.5: Stanovení optimálního množství pojiva pro PA 8

| optimum pojiva | |
|------------------------------------|--------|
| obsah pojiva z hmotnosti směsi: | 7 % |
| obsah pojiva z hmotnosti kameniva: | 7,53 % |
| hmotnost pojiva: | 77 g |
| hmotnost směsi: | 1102 g |

➤ **Stanovení navážek na Marshallova tělesa pro směs BBTM 8 s 22 % TecRoad**

Navážky jsou určeny pro devět těles a to:

- Tři sady po půlprocentní změně optimálního množství pojiva
hutněné 2 x 50 rázy

Tabulka 4.6: Navážky kameniva na Marshallova tělesa pro BBTM 8

přesná navážka: 1020 g kameniva

| frakce | podíly v % | hmotnosti [g] |
|--------|------------|---------------|
| filer | 4,5 | 45,9 |
| 0/4 | 35 | 357 |
| 4/8 | 60,5 | 617,1 |
| 8/11 | 0 | 0 |
| suma | 100 | 1020 |

Váp. moučka Mokrý 4.2011
Luleč 0/4 4.2011
Luleč 4/8 4.2011

Tabulka 4.7: Stanovení optimálního množství pojiva pro BBTM 8

| 1) optimum - 1 * odstupňováno (-0,5 %) | |
|--|-------------|
| obsah pojiva z hmotnosti směsi: | 7 % |
| obsah pojiva z hmotnosti kameniva: | 7,53 % |
| hmotnost pojiva: | 77 g |
| hmotnost směsi: | 1097 g |

| 2) optimum pojiva | |
|------------------------------------|-------------|
| obsah pojiva z hmotnosti směsi: | 7,5 % |
| obsah pojiva z hmotnosti kameniva: | 8,11 % |
| hmotnost pojiva: | 83 g |
| hmotnost směsi: | 1103 g |

| 3) optimum + 1 * odstupňováno (+0,5 %) | |
|--|-------------|
| obsah pojiva z hmotnosti směsi: | 8 % |
| obsah pojiva z hmotnosti kameniva: | 8,70 % |
| hmotnost pojiva: | 89 g |
| hmotnost směsi: | 1109 g |

Jako výsledné optimum bude později zvoleno 7,5 % pojiva pro směs BBTM 8.

4.2.4 Provedení navážek na jednotlivá tělesa

Dle předešlých tabulek (Tabulka 4.4 a Tabulka 4.6) jsou nabrány do kovových misek přesné navážky kameniva (Obrázek 4.2).

Je důležité přesné navážení dané frakce pro následující vyhodnocování daných směsí. Navážky jsou přidávány do misky, která je na vytárované (vynulované) váze s potřebnou přesností. Do misek se přidává zhomogenizované kamenivo pro dosažení hmotnosti dané frakce kameniva. Při dosažení hmotnosti první navážky se váha znovu vytáruje a nasypává se druhé hrubší zhomogenizované kamenivo. Následně se nasypá poslední nejhrubší část kameniva.



Obrázek 4.2: Miska s navážkou kameniva na váze

Potřebné pojivo bylo uskladněno v popsanych plechovkách s přesně daným obsahem přísady TecRoad.

4.2.5 Natemperování jednotlivých navážek

Po navážení všech potřebných misek s jednotlivými frakcemi kameniv se vloží do laboratorní sušárny, aby se natemperovali na potřebnou teplotu míchání, která je pro dané směsi 170°C. Současně při vkládání misek s navážkami se vloží i pojivo v plechovkách k natemperování.

Při temperování navážek se kontroluje teplota kameniva a asfaltového pojiva.

Po dosažení potřebné teploty, jak navážky, tak pojiva se pokračuje k dalšímu kroku a to míchání.

4.2.6 Míchání směsi pro Marshallova tělesa

Samotné míchání začíná vytárováním zahřáté míchací nádoby, kde je vsypán obsah jedné kovové misky s navážkou kameniva. Do takto vytárované nádoby se postupně vlévá pečlivě rozmíchané (zhomogenizované) pojivo pro dosažení přesné hmotnosti vlitého pojiva. Pojivo se homogenizuje míchadlem tak, aby došlo k promísení částic usazeného granulátu.

Při dosažení potřebné hmotnosti směsi se přemístí z váhy na varnou desku a pomocí špachtle se promíchává směs. V závěru míchání je vizuálně zřejmé kompletní obalení všech zrn kameniva, v tuto chvíli se přistoupí k přesypání do speciálně upravené misky se zkosenými čelními hranami (Obrázek 4.3). Tuto misku s umíchanou směsí vkládám zpět do předeřáté sušárny a nechám ji natemperovat na teplotu hutnění 155°C. Teplotu kontroluji kontaktním elektronickým teploměrem.

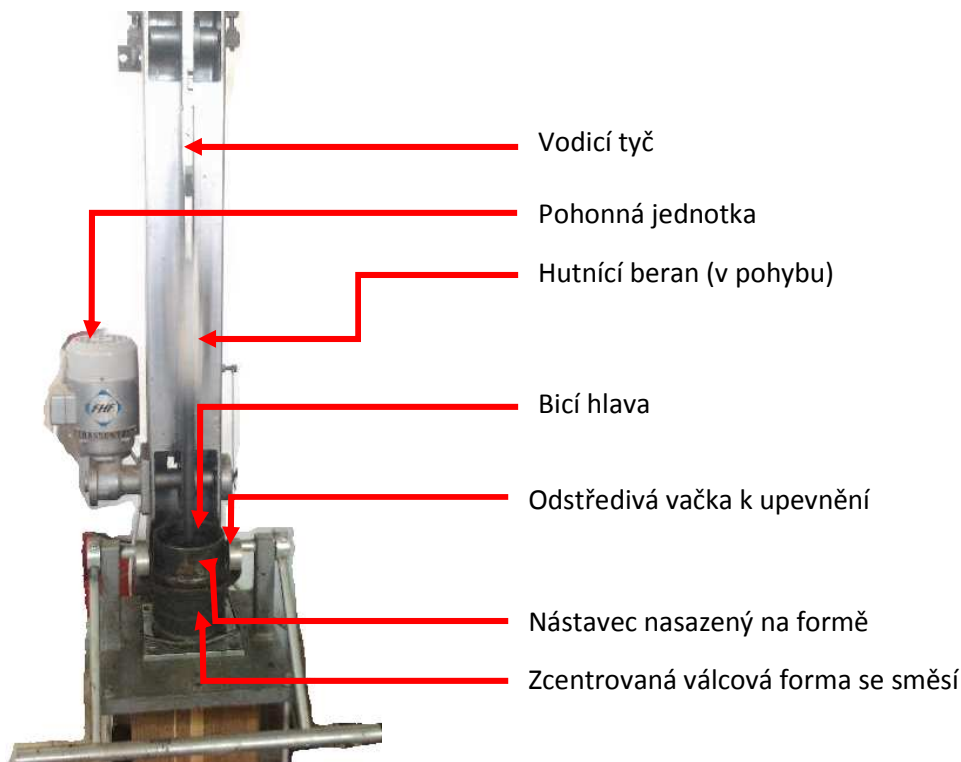
Vše se odehrává při vysoké teplotě, a tudíž je nezbytné používat ochranné pomůcky.



Obrázek 4.3 : Míchání směsi na Marshallova tělesa

4.2.7 Hutnění Marshallových těles

Při dosažení potřebné teploty hutnění směsi se vloží do laboratorní sušárny podložka, forma, nástavec a trychtýř potřebný k výrobě Marshallových těles. Připravím si papírové podložky v kruhovém tvaru o průměru vnitřních hran formy, nejlépe z křídového papíru. Nastavím si zhutňovač na potřebný počet úderů a připravím k použití. Při dostatečném nateperování kovových částí potřebných k výrobě Marshallových těles se sestaví válcová forma. Nejprve se na dřevěné prkénko položí podložka s hranou vstupující do formy pro zajištění tvaru tělesa. Na vzniklé dno mezi formou a podložkou se vloží předpřipravená papírová podložka zamezující nalepení na část podložky, či úderníku zhutňovače. Na válcovou formu se vloží nástavec, na nějž se nasadí kovový trychtýř o vnitřním průměru odpovídajícím formě. Do takto sestavené formy se může vsypat třetina směsi z misky s netemperovanou směsí. Tato třetina směsi se urovná špachtlí a vsype se další třetina, která se také upraví do roviny stejně jako poslední třetina směsi. Na urovnanou směs ve formě se vloží další papírová podložka, odstraní se kovový trychtýř a celá forma se přemístí do Marshallova zhutňovače (Obrázek 4.4), kde se forma zcentruje pomocí výlisků a upevní se odstředivou vačkou. Následně se spustí na povrch směsi hutnicí pěch skládající se z vodící tyče, hutnicího beranu a bicí hlavy. Zhutňovač funguje na principu pohonného řetězu zdvihajícím a pouštějícím hutnicí beran z výšky přibližně 460 mm. Hutnicí beran padá po vodící tyči na bicí hlavu, která zhutňuje směs ve formě. Přesný popis je uveden v ČSN EN 12697-30 [13].



Obrázek 4.4: Marshallův zhutňovač

Po přípravě formy se směsí ke zhutňování se spustí zhutňovač. Hutnění by mělo proběhnout co nejrychleji, aby nedocházelo k přílišnému ochlazení směsi, samozřejmě s dodržением bezpečnosti práce.

Hutním přednastaveným počtem úderů a to buď 2x50 úderů a nebo 2x25 úderů (pro zkoušku odolnosti zkušebních těles vůči vodě).

Po dosažení první poloviny úderů se úderník přesune do původní zajištěné polohy a odebere se forma se směsí mimo zhutňovač, kde se sundá nástavec a opatrně se otočí forma se zhutněnou směsí dnem vzhůru. Následně se znovu přiloží nástavec a vloží se celá sestavená forma do zhutňovače a opět se upevní. Přesune se úderník na povrch směsi a spustí se další cyklus úderů při otočené formě, aby došlo k prohutnění z obou stran. Celý proces hutnění by měl být hotov do 4 minut od vytažení ze sušárny.

Poté co zhutňovač provede další sadu úderů, tak se vyjme forma se zhutněnou směsí a odstraní se nástavec a podložka.

Následně formu se zhutněnou směsí osadím a nechám vychladnout na vytvarovaném plechu s vylisovanými válcovými podložkami tak, aby nedocházelo k rozsypaní nahutněné směsi. Tento plech je vsunut pro urychlení vychladnutí pod ventilátor.

Marshallova tělesa se po vychladnutí vytlačí z formy ručním hydraulickým lisem, který je upraven k tomuto účelu (Obrázek 4.5).

Takto vyrobené zkušební těleso se důkladně popíše bílou barvou (Obrázek 4.6).



Obrázek 4.5: Vyjmutí Marshalova tělesa z formy



Obrázek 4.6: Marshallova tělesa s označením

Následně budou na vytvořených tělesech provedené potřebné zkoušky, které budou popsány níže.

4.3 Postup prací souvisejících s výrobou desek

V této kapitole bude popsán postup výroby desek zhutněných v lamelovém zhutňovači a následná výroba zkušebních těles pro další zkoušky, které budou popsány v dalších kapitolách.

4.3.1 Navržení navážek kameniva a pojiva na desky

Hmotnosti navážek na desky jednotlivých směsí se upraví tak, aby odpovídaly výsledným požadovaným rozměrům desky. Navážka se stanovuje z již zjištěné objemové hmotnosti a potřebných rozměrů, kterých má deska dosahovat. Dále je zapotřebí podotknout, že se vyrábí dvě sady desek a to první o tloušťce 40,0 mm a druhá o tloušťce 50,0 mm.

Desky mají přibližný rozměr (a x b x v) 260,0 mm x 320,0 mm x 40,0 mm (50,0 mm). Rozměry nám dají předběžnou hodnotu objemu desky. Pomocí žádané objemové hmotnosti desky, požadované mezerovitosti směsi a objemu desky lze dopočítat teoretická hmotnost směsi na desku, která se nadvýší z důvodu možného přichycení na límeč hrnce a tím vznikne navážka směsi na míchání.

Dále se určí z již stanoveného optima pojiva procentuální obsah pojiva, čímž se dopočítá hmotnost pojiva. Hmotnost kameniva se určí při odečtu hmotnosti asfaltu od hmotnosti navážky směsi.

Pak se již dle známých podílů jednotlivých frakcí kameniva jednoduše dopočtou hmotnostní podíly kameniv.

Podrobnější hodnoty navážek udává Tabulka 4.8.

Tabulka 4.8 : Srovnávací tabulka navážek na desky

| směs | | PA 8 | | | | | BBTM 8 | | | | |
|--------------------------|---------------------|-----------|------|------|---|------|--------|------|---|---|---|
| číslo desky | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| tloušťka desky [mm] | | 50,0 | | | | | 40,0 | | | | |
| příprava na zkoušku: | | ■ | ▲ | | | ■ | ▲ | ■ | | ■ | |
| obsah pojiva [%] | | 7,0 | | | | | 7,5 | | | | |
| žádaná objemová hmotnost | | 1974,6 | | | | | 2253,0 | | | | |
| navážky | asf. pojiva | | 585 | 473 | | 581 | | 713 | | | |
| | kameniv / frakce | filer [g] | 116 | 94 | | 323 | | 395 | | | |
| | | 0 - 4 [g] | 932 | 753 | | 2509 | | 3076 | | | |
| | | 4 - 8 [g] | 6717 | 5430 | | 4337 | | 5316 | | | |
| | | suma [g] | 7766 | 6278 | | 7169 | | 8788 | | | |

Váp. m. Mokrý 4.2011
0/4 Luleč 4.2011
4/8 Luleč 4.2011

použité znaky:

| | |
|---|--|
| ■ | nízkoteplotní vlastnosti asfaltových směsí deska bude nařezána na trámečky pro zkoušku nízkoteplotních charakteristik (TSRST – Thermal Stress Restrained Specimen Test) |
| ▲ | moduly tuhosti, odolnost proti únavě asfaltové směsi deska bude nařezána ve tvaru komolého klínu (trapezoidu) |
| ■ | odolnost vůči trvalým deformacím deska bude použita celá |

Hodnota žádané objemové hmotnosti se zjistila na Marshallových tělesech.

Tabulka 4.8 zobrazuje podíly jednotlivých frakcí kameniv, podle kterých se vyrobí navážky na směsi.

4.3.2 Příprava navážek na jednotlivé desky

Dostatečně velké nádoby se naplní jednotlivými frakcemi kameniv dle navážek a po navážení se dají temperovat do laboratorní sušárny.

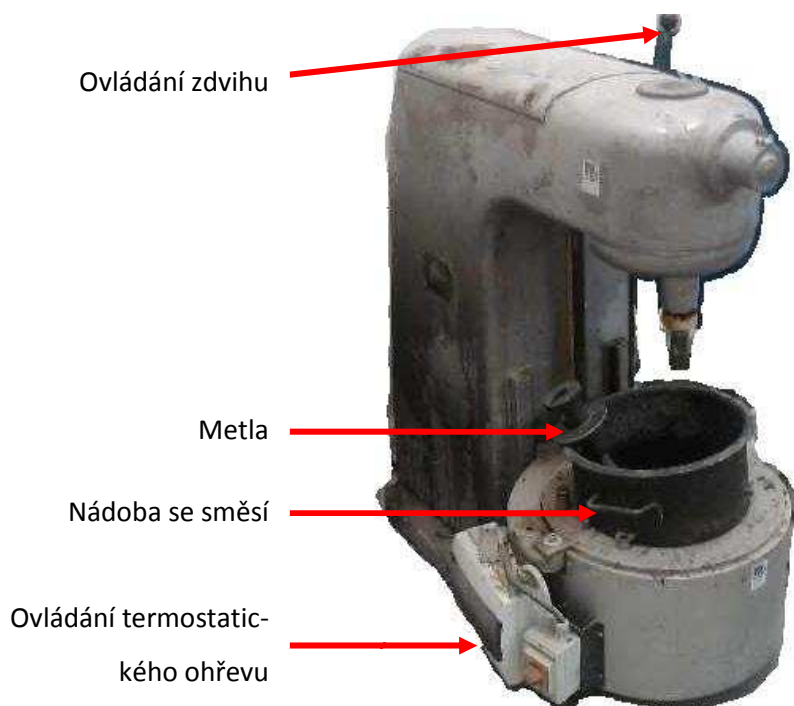
Dále se naváží příslušné množství pojiva do připravované desky a po navážení se nechá temperovat v sušárně s kamenivem.

Temperování probíhá pro modifikované asfalty při teplotě 170 °C. V průběhu temperování se zjišťuje teplota a po jejím dosažení se nechá teplota ustálit.

4.3.3 Míchání směsi na desky

Je nutné si připravit a nechat nateperovat i nádobu na míchání i s metlou. Dále si připravím laboratorní míchačku s termostatickým ohřevem spodní části, do které se vkládá nádoba na míchání a nechám jí také nateperovat pro přehřívání nádoby při míchání směsi. Při kompletním nateperování navážky a ostatních potřebných částí se může přistoupit k samotnému míchání směsi. Jak již bylo řečeno, tak se používá váha, která umožňuje zvážit příslušné množství směsi s danou přesností dle ČSN EN 12697-38. Následně se vytáhne z laboratorní sušárny ohřátá nádoba z míchačky a vsype se do ní navážka kameniva. Do takto připravené navážky kameniva se přidá zhomogenizované, nateperované pojivo. Takto zhomogenizované pojivo se vlévá do nádoby stojící na vytárované váze a vlévá se přesně dané množství pojiva z navážky.

Po navážení se přemístí nádoba s kompletní navážkou do laboratorní míchačky (Obrázek 4.7) a upevní se nateperovaná metla. Spustí se předehřátá míchačka a dojde se pojezdem spodní části míchačky s nádobou k metle. Metla rotuje kolem své osy a současně excentricky vůči ose nádoby, aby byla směs homogenně promíchána. V průběhu míchání se s nádobou sjelo do původní polohy, vypnula se míchačka a pomocí špachtle se směs promíchala od spodku nádoby, jelikož na dně nádoby může zůstat nepromíchané jemné kamenivo. Dále se seškrábly okraje, kde byly zachycené nejmenější částice ve formě asfaltové malty. Takto ručně promíchaná směs se ještě nechala promíchat míchačkou po najetí nádoby k metle.



Obrázek 4.7: Laboratorní míchačka

Směs musí mít po smíchání homogenní vzhled, zrna kameniva musí být zcela obalena pojivem a nesmí se vyskytnout obalené hrudky drobného kameniva.

Celé míchání musí proběhnout do 5 minut a všechna zrna musí být kompletně obalena.

Stejně jako při míchání Marshallových těles i toto míchání probíhá za vysoké teploty a proto jsou nutné používat ochranné pracovní pomůcky.

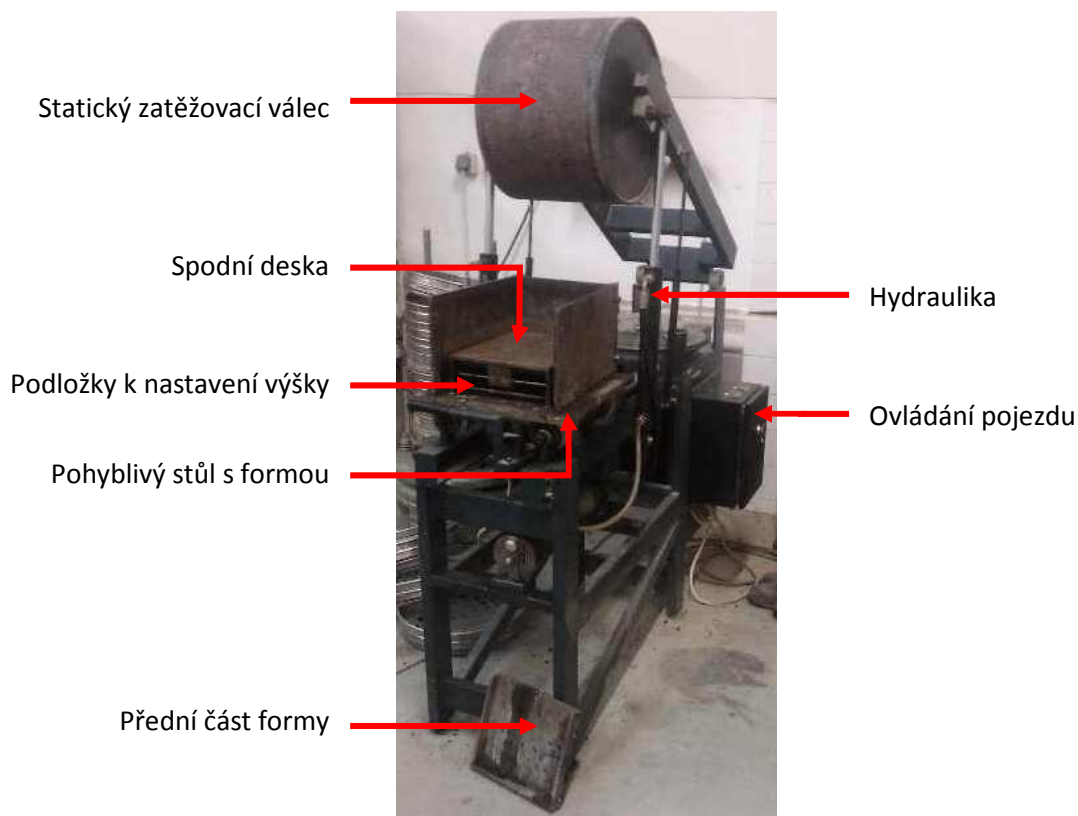
4.3.4 Navážka namíchané směsi na desky

Poté co jsou všechna zrna důkladně obalena, tak se upraví hmotnost navážky, odpovídající příslušné desce a směsi. Navážená zhomogenizovaná směs by měla odpovídat zjištěné hodnotě teoretické hmotnosti směsi na desku z navážek. Tuto hmotnost nadvýším o cca 15 g z důvodu možného přichycení směsi ve formě, či špachtli.

Připravená navážka směsi se vloží do laboratorní sušárny a temperuje se na teplotu 155 °C. Hodnota teploty je zjišťována čidlem zasunutým v temperované směsi. Po dosažení potřebné hodnoty se směs nechá půl hodiny ustálit při dané teplotě.

4.3.5 Příprava lamelového zhutňovače

V průběhu temperování směsi se připraví zhutňovač s ocelovými lamelami. V první řadě se zkontroluje výška spodní desky ve formě tak, aby odpovídala požadované tloušťce desky. Měří se od horní hrany formy po líc spodní desky. Od naměřené hodnoty se odečte výška lamely a tloušťka plechu, který je pod lamelami a tento rozdíl by měl odpovídat tloušťce desky. Tuto výšku lze upravovat po 10 mm kovovými podložkami (distanční rámečky) pod spodní deskou. Při nastavení požadované výšky se sestaví celá forma a složí se dohromady. Jednotlivé části jsou osazeny čepy a otvory pro šrouby tak, aby celá forma měla konstantní rozměry. Na takto sestavené formě se nedotahují šrouby, ale nechají se povolené o cca dvě otáčky a to z důvodu snadnějšího zasunutí lamelových desek. Použité lamely jsou o rozměrech 260 x 100 x 15(10) mm. Přesný popis lamel je uveden v ČSN EN 12697-33 [14] odstavci 5.3.2.3. Následně se celá forma důkladně natře separačním prostředkem, jenž není rozpouštědlem asfaltového pojiva. Takto se natře i rub plechu, na nějž se budou pokládat jednotlivé lamely. Dále se připraví jednotlivé lamely tak, aby bylo možné co nejrychlejší naskládání do formy. V posledním kroku se nastaví stůl s formou tak, aby byl co nejvíce vyjetý, což odpovídá základní poloze.

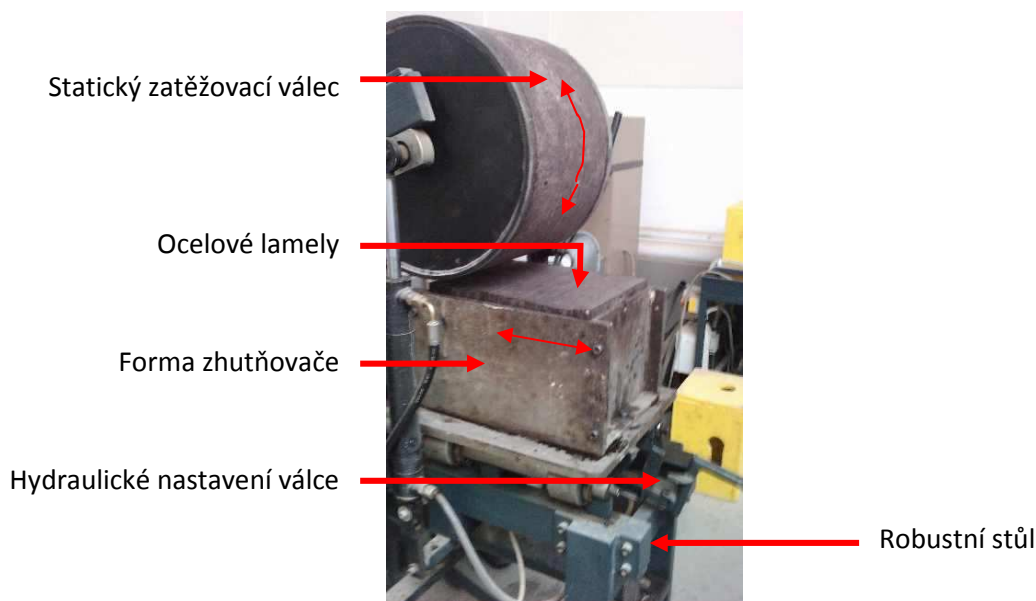


Obrázek 4.8: Lamelový zhutňovač desek

Detailnější informace o zhutňovači desek lze nalézt v ČSN EN 12697-33 [14].

4.3.6 Hutnění směsi v lamelovém zhutňovači

Po naterování směsi se přistoupí ke zhutňování v lamelovém zhutňovači (Obrázek 4.8). Vyjme se nádoba s naváženou a zhomogenizovanou směsí z laboratorní sušárny a přesype se obsah z nádoby do formy lamelového zhutňovače. Nádoba s navázkou se vyčistí a směs se ve formě rovnoměrně rozprostře. Špachtlí se předhutní rohy tím, že se do nich nahrne více směsi a upěchují se. Znovu se urovná směs ve formě. Dále na urovnanou směs položím plech natřenou stranou na směs a začnu vkládat lamely. Posléze odjistím hydraulickou páku statického válce (Obrázek 4.9), který má uvolněný pohyb pouze kolem své rotační osy a sjedu s ním hydraulickou pákou cca 1,0mm nad hranu lamel. Následně páku zajistím a můžu přistoupit ke spuštění pojezdu stolu s formou se směsí, při čemž současně probíhá sjíždění válce na lamely a k hutnění směsi přenesením zatížení z lamel na směs. Šířka statického válce je větší oproti délce jednotlivých ocelových lamel.



Obrázek 4.9: Lamelový zhutňovač desek těsně před zhutněním vložené směsi

V plošné formě se směsí dochází k volnému sjíždění lamel pod tíhou statického válce a tím pádem ke zhutňování směsi. Celý stůl s formou se pohybuje pod válcem tam a zpět ve vodorovném směru, což je označeno jako pojezd stolu. Tento pojezd se opakuje, dokud nejsou lamely zatlačeny do formy a jsou srovnány výšky hran formy s výškou lamely. To znamená, že je směs zhutněná. Poté se nechá forma se zhutněnou směsí vychladnout.

Následně se vyjmou lamely z formy, odebere se plech ležící na směsi, který odděloval lamely od směsi (Obrázek 4.10). Posléze se nahutněná deska odebere z formy a dá se vychladnout pod ventilátor.



Obrázek 4.10: Rozebraná forma se zhutněnou deskou

4.3.7 Získání zkušebních těles z desek

Po vychladnutí (Obrázek 4.11) se vezme špachtle a odloupne se nahutněná deska od podkladní ocelové desky, na které byla směs hutněná.

Nakonec je deska označena popisem s typem směsi, obsahem pojiva atd.



Obrázek 4.11: Vychládání desky pod vylitátorem

4.4 Desky do vyjížděče

Na zkoušku odolnosti směsí vůči vzniku trvalých deformací je zapotřebí dvou desek o tloušťce 40 mm. Z důvodu úspory materiálu byly trvalé deformace stanoveny pouze na jedné desce z každé směsi.

4.5 Výroba trámečků a komolých klínů

Z vyrobených desek se pomocí kotoučové pily osazené diamantovým kotoučem nařezávají zkušební tělesa. Trámečky a komolé klíny se vyrábí z příslušných typů desek, které jsou k tomu určené.

4.5.1 Výroba trámečků pro zkoušku nízkoteplotních charakteristik

Trámečky se řezou z desky o tloušťce 50 mm.

➤ Postup řezání trámečku

Nejprve se seřízne delší hrana desky, aby se dosáhlo jedné rovné odříznuté hrany. Dále se odřízne kratší strana desky v přiměřené velikosti odřezu. Opláchne se deska i posuvný stůl, aby nedocházelo k houpání desky při řezání. Následně se deska položí kratší hranou k pravítku a nastaví se vzdálenost odříznuté delší hrany a kotouče pily na hodnotu 200 mm. Tím se docílí stejné délky trámečků. Poté se deska přiloží delší hranou k pravítku, které je kolmo na kotouč pily. Nastaví se vzdálenost odříznuté kratší hrany od kotouče v hodnotě 50 mm a uřízne se. Následně se opakuje cyklus opláchnutí a odříznutí 50 mm ze zbytku desky. Takto vznikne pět trámečků (Obrázek 4.12) o rozměrech 50 x 50 x 200 mm, které lehce očistíme. Při řezání je nutné mít pracovní ochranný oděv.



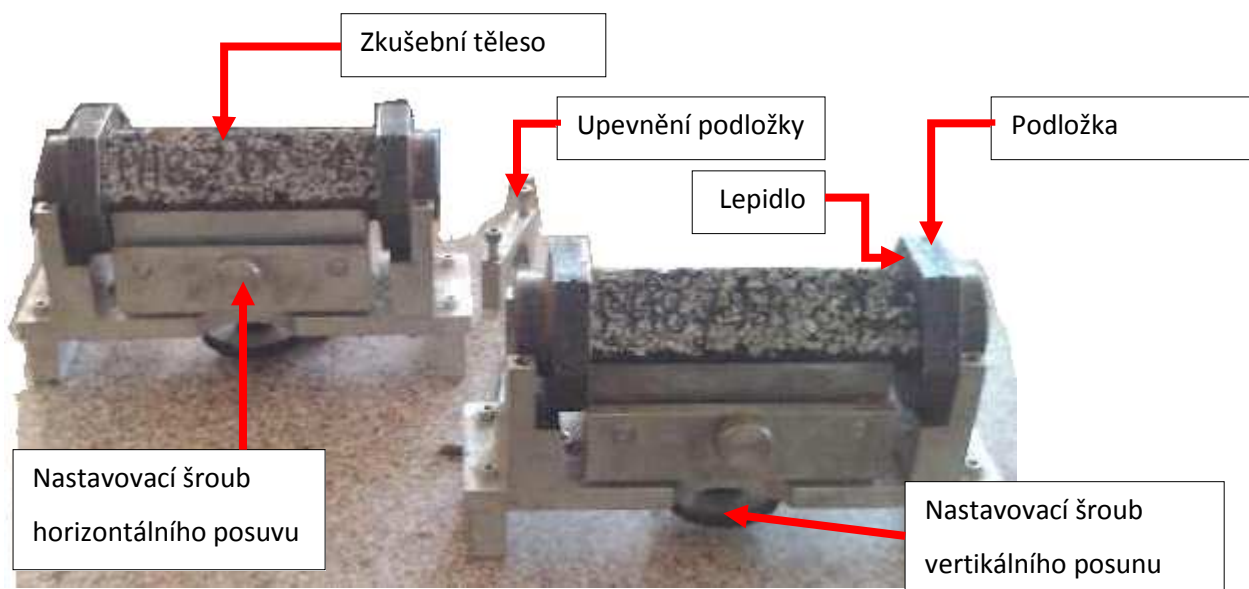
Obrázek 4.12: Trámečky v nařezaném pořadí

➤ Získání zkušebních vzorků z trámečků

Po osušení trámečků následuje popis v náležitém pořadí, aby popis obsahoval důležité charakteristiky trámečku.

Po vyrobení se trámečky změří pomocí posuvného měřítka, dle ČSN EN 12697-29 [12] a zváží se.

Připraví se kovový rám, v kterém se bude nalepovat trámeček na kovové podložky zaobleného trojúhelníkového tvaru. Trámečky se osadí do rámu na sucho i s podložkami a vycentruje se trámeček vůči podložkám. Na trámečku se označí horní hrana a značka se udělá i na podložkách, aby bylo zřejmé, v jaké poloze byl trámeček vůči podložkám uložen. Namíchá se dvousložkové lepidlo v daném poměru a přimíchá se vápencová moučka k zahuštění. Vyjmou se podložky a opatří se ve vyfrézovaném otvoru vrstvou epoxidového lepidla v dostatečné tloušťce. Lepidlo je namícháno o dostatečné viskozitě, aby nedocházelo ke stékání. Trámeček se přitlačí k podložce v předpřipravené poloze dle označení a následně se otočí a přilepí se k druhé podložce. Takto sestavený trámeček s podložkami se vloží do přednastaveného rámu, upevní se a nechá vytvrdit.



Obrázek 4.13: Nástavec k centrickému nalepení vzorků

Po zatvrdnutí lepidla se vzorek uvolní z rámu (Obrázek 4.13) a je připraven k použití na zkoušku nízkoteplotních charakteristik asfaltové směsi.

4.5.2 Výroba komolých klínů (trapezoidů)

Trapezoidy se vyřezávají z desek o tloušťce 40 mm.

➤ Postup řezání trapezoidů

Stejně jako u řezání trámečků se nejprve odřízne delší hrany desky pro zajištění požadované délky respektive výšky komolého klínu (250 mm). Deska se ořezává pomocí vytvarovaných podložek a pravítka. Pomocí trojúhelníkové podložky se odsadí delší seříznutá hrana desky

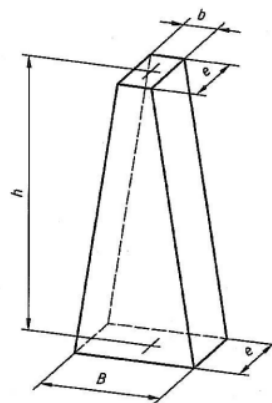


Obrázek 4.14: Vyřezávání komolých klínů

a odřízne se první zkosená hrana na desce v co nejmenším provedení. Deska i stůl se po odříznutí opláchnou od odpadlých zrn.

Při správném nastavení pravítka a trojúhelníkové podložky postačí dodržet správný úhel pro řezání trapezoidů a při následném otáčení desky (Obrázek 4.14) se řežou další komolé klíny. Trapezoidy se skládají postupně tak, jak se nařezali z desky, aby nedošlo k výměně polohy těles.

Tělesa vzniklá při řezání by měla mít rozměry (Obrázek 4.15) {B (b) x e x h} 70 (25) x 40 x 250 mm [11]. Z desky vznikne pět trapezoidů.



Obrázek 4.15: Obecné rozměry trapezoidu [9]

➤ Získání zkušebních vzorků z trapezoidů

Očištěná a oschlá tělesa (Obrázek 4.16) se popíše dle typu směsi a dle pořadí vyříznutí z desky. Každé těleso se přesně změří posuvným měřítkem, zváží se na příslušné váze a hodnoty se zanesou do přehledného formuláře obsahujícího popis trámečku, označení, rozměry (h_1 (B) [mm], h_2 (b) [mm], c (e) [mm], l (h) [mm]) a hmotnost [g].



Obrázek 4.16: Osušení zkušebních těles

Dále se připraví podložky a háčky používané pro trapezoidy. Vyfrézované podložky musí být před použitím vyčištěné a odmaštěné. Vyfrézovaný otvor bude vyplněn lepidlem v dostatečné tloušťce i v okrajích podložky. Namíchá se dvousložkové epoxidové lepidlo v daném poměru a zahustí se vápencovou moučkou. Připravené a očištěné trapezoidy se opatří na lepené spodní hraně lepidlem a pevně se vtlačí do otvoru v podložce, v kterém je také vrstva lepidla. Přilepené trapezoidy (Obrázek 4.17) se vycentrují vůči podložce a k jejím kolmým osám. Po přilepení všech podložek se můžou lepit vrchní háčky osazené na protilehlé podstavě trapezoidu. Háčky se osazují kolmo na delší stranu podložky.

Všechny části a to jak podložka, tak háček by měly být co nejvíce vycentrované vůči svislé ose. Po zatvrdnutí lepidla se trapezoidy mohou použít k měření modulu tuhosti a následně i únavových charakteristik asfaltových směsí.



Obrázek 4.17: Nalepené komolé klíny k podložkám, lepidlo a další zkušební tělesa

5 Popis použitých zkušebních metod

Tato kapitola popisuje obecné vztahy o prováděných zkouškách na jednotlivých zkušebních tělesech. Veškeré zkoušky byly provedeny podle platných a příslušných norem a předpisů.

5.1 Zkoušky prováděné na Marshallových tělesech

Postup výroby Marshallových těles je uveden v kapitole 4.2 a zde budou popsány jednotlivé zkoušky na tělesech prováděné.

5.1.1 Rozměry a hmotnosti Marshallových těles

Stanovení rozměrů se provádí dle postupů uvedených v ČSN EN 12697-29 [12].

Výška se měří ve čtyřech bodech rovnoměrně rozmístěných po obvodu.

Průměr válcové plochy je měřen ve dvou polohách na sebe kolmých a to v horní, střední a spodní části. Výsledná hodnota je průměr z šesti naměřených hodnot.

Hmotnost jednotlivých těles je vážena na příslušných vahách. Dané těleso je suché a zbavené povrchových nečistot v podobě nezhutněného zrna směsi.

Rozměry a hmotnosti budou uvedeny v tabulkách (Tabulka 6.1 až Tabulka 6.3) rozdělených dle směsí s přesností na desetinu gramu.

5.1.2 Objemová hmotnost Marshallových těles

Objemová hmotnost je hmotnost při dané zkušební teplotě připadající na jednotku objemu zkušebního tělesa včetně mezer. Podrobněji je postup popsán v ČSN EN 12697-6 [26].

Objemová hmotnost z rozměrů se stanoví z hmotnosti suchého zkušebního tělesa (m_1) a jeho objemu stanoveného z rozměrů (V).

Postup výpočtu objemové hmotnosti z rozměrů se vypočítá s přesností na kg/m^3 .

$$\rho_{b,dim} = \frac{m_1}{\frac{\pi}{4} * h * d^2} * 10^6$$

| | | | |
|-----|----------------|----|---|
| kde | $\rho_{b,dim}$ | je | objemová hmotnost zkušebního tělesa dle rozměrů [kg/m^3] |
| | m_1 | | hmotnost suchého tělesa [g] |
| | h | | výška zkušebního tělesa [mm] |
| | d | | průměr tělesa [mm] |

Další objemovou hmotností lze zjistit při zjištění hmotnosti tělesa na vzduchu a po saturaci ve vodě. Při známé hustotě vody, která je při teplotě 25 °C 997,1 kg/m³ lze dopočítat objemovou hmotnost tělesa váženého ve vodě. Těleso musí být zcela ponořené a nasycené vodou (přibližně 30 min). Takto nasycené těleso bez ulpělých vzduchových bublinek na povrchu zvážím (m_2) na závěsu váhy, který je ve vodní lázni, tak aby nedocházelo k zachycení tělesa o jiný předmět, což by mohlo ovlivnit vážení. Těleso se po zvážení ve vodní lázni vytáhne a lehce povrchově osuší, nemělo by dojít k vysoušení vnitřních mezer v tělese. Následně se povrchově osušené těleso zváží a okamžitě se stanoví hmotnost tělesa nasyceného vodou (m_3).

Postup výpočtu objemové hmotnosti tělesa nasyceného vodou při osušeném povrchu (SSD):

$$\rho_{bSSD} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} * \rho_w$$

| | | | |
|-----|---------------|----|--|
| kde | ρ_{bdry} | je | objemová hmotnost SSD [kg/m ³] |
| | m_1 | | hmotnost suchého tělesa [g] |
| | m_2 | | hmotnost tělesa ve vodě [g] |
| | m_3 | | hmotnost tělesa nasyceného vodou a povrchově osušeného [g] |
| | ρ_w | | hustota vody [kg/m ³] |

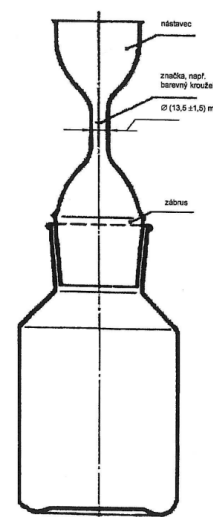
5.1.3 Maximální objemová hmotnost

Maximální objemová hmotnost je stanovena na asfaltové směsi bez mezer a podrobný popis zkoušky je uveden v ČSN EN 12697-5 [2].

Jedná se o hmotnost při dané zkušební teplotě, připadající na jednotku objemu asfaltové směsi bez mezer.

U volumetrického postupu se objem vzorku měří jako objem rozpouštědla vytěsněného vzorkem v pyknometru.

Připraví se pyknometr (Obrázek 5.1), který je sestaven ze spodní nádoby a z horního nástavce, který je označen barevným kroužkem (ryskou) v hrdle a má na své spodní stěně zábrus. Pyknometr je označen dvěma značkami a to spodní nádoba i jeho příslušný nástavec stejným označením. U takto připraveného pyknometru je znám objem (V_p) po barevném kroužku na hrdle nástavce a stanoví se hmotnost (m_1) prázdného pyknometru i s nástavcem.



Obrázek 5.1: Tvar pyknometru [2]

Vzorek nezhutněné asfaltové směsi se vysype do nádoby se separační podložkou (voskovaný papír) a rozdělují se špachtlí případné shluky směsi na menší zrna směsi. Maximální velikost shluků je omezena velikostí otvoru pro vsypání do pyknometru. Jakmile je směs dostatečně rozdrobena a je ochlazená v dostatečné míře, tak se přistoupí k plnění pyknometru.

Pyknometr se na vnitřní straně namaže stejně jako jeho příslušná část nástavce na vnější straně a to v malé vrstvě. Do pyknometru se vloží papírový trychtýř a vsype se kompletně rozdrobený vzorek. Poté se znovu stanoví hmotnost (m_2) pyknometru s nástavcem a vzorkem.

Nasadí se nástavec na pyknometr a pomocí stříčky se vyplní pyknometr čistým rozpouštědlem mírně pod okraj. Nástavec se zazátkuje alobalem proti nežádoucímu odpařování rozpouštědla. Složený pyknometr se vloží na rotační zařízení, které docílí rotování pyknometru kolem své svislé osy a rozpuštění asfaltového pojiva ve směsi uvnitř pyknometru.

Poté se celý takto naplněný pyknometr vloží do vodní lázně o teplotě 25 °C přibližně na 60 minut. Tím se docílí vyrovnání teploty vzorku a rozpouštědla v pyknometru s teplotou vodní lázně. Požadovaná teplota v pyknometru se měří vnořeným teploměrem do pyknometru.

Při dosažení potřebné teploty se stříčkou doplní rozpouštědlo (trichlorethylen) až po značku na nástavci. Pyknometr se vyjme z vodní lázně a z vnější strany se osuší a určí se jeho hmotnost (m_3), jak znázorňuje Obrázek 5.2. Z důvodu vysoké lepivosti směsí obsahujících pryžový granulát je vhodné pro stanovení maximální objemové hmotnosti namísto vody používat rozpouštědlo. Tím může dojít k ovlivnění výpočtu hodnoty mezerovitosti asfaltové směsi (zvýšení) přibližně o 1,0 % až 1,5 %.



Obrázek 5.2: Určení konečné hmotnosti pyknometru

Maximální objemová hmotnost ρ_{mv} asfaltové směsi stanovená volumetrickým postupem se vypočítá dle:

$$\rho_{mv} = \frac{m_2 - m_1}{1000 * \left(V_p - \frac{m_3 - m_2}{\rho_w} \right)}$$

| | | | |
|-----|-------------|----|---|
| kde | ρ_{mv} | je | maximální objemová hmotnost směsi [kg/m ³] |
| | m_1 | | hmotnost pyknometru a nástavce [g] |
| | m_2 | | hmotnost pyknometru, nástavce a zkušební vzorku [g] |
| | m_3 | | hmotnost pyknometru, nástavce, zkušební vzorku a rozpouštědla [g] |

| | |
|----------|---|
| V_p | objem pyknometru při naplnění po referenční značce nástavce [m^3] |
| ρ_w | hustota rozpouštědla [kg/m^3] |

5.1.4 Mezerovitost Marshallových těles

Mezerovitost (V_m) znázorňuje objem mezer ve zkušebním tělese vyjádřený v procentech celkového objemu zkušebního tělesa, podrobný postup zkoušky je uveden v ČSN EN 12697-8 [3].

Mezerovitost zkušebního tělesa se spočítá na základě maximální objemové hmotnosti a objemové hmotnosti zkušebního tělesa a to dle vztahu:

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

| | | | |
|-----|----------|----|---|
| kde | V_m | je | mezerovitost směsi [%] |
| | ρ_m | | maximální objemová hmotnost směsi [kg/m^3] |
| | ρ_b | | objemová hmotnost zkušebního tělesa dané směsi [kg/m^3] |

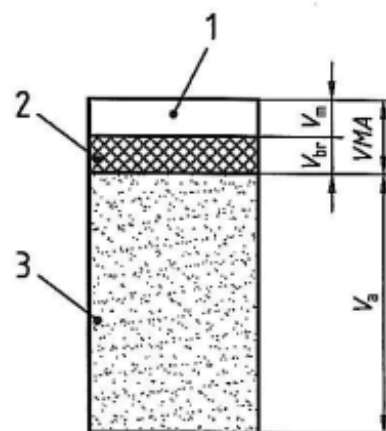
5.1.5 Mezerovitost směsi kameniva

Mezerovitost směsi kameniva (VMA na Obrázek 5.3) se stanovuje dle ČSN EN 12697-8 [3] a to pomocí objemové hmotnosti a maximální objemové hmotnosti. Je to objem mezer mezi zrny kameniva zhutněné asfaltové směsi zahrnující objem mezer vyplněných vzduchem a objem asfaltového pojiva ve zkušebním tělese.

Vyjadřuje se jako procento celkového objemu tělesa.

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

| | | | |
|-----|----------|----|--|
| kde | VMA | je | mezerovitost směsi kameniva [%] |
| | V_m | | mezerovitost zkušebního tělesa [%] |
| | B | | obsah pojiva ve zkušebním tělese [%] |
| | ρ_b | | objemová hmotnost zkušebního tělesa [kg/m^3] |
| | ρ_B | | objemová hmotnost pojiva [kg/m^3] |



- 1 mezerovitost (V_m)
- 2 objem pojiva (V_{br})
- 3 objem směsi kameniva (V_a)

Obrázek 5.3: Mezerovitost směsi kameniva (VMA), zdroj [3]

5.1.6 Stupeň vyplnění mezer pojivem

Stupeň vyplnění mezer ve směsi kameniva se stanovuje dle ČSN EN 12697-8 [3].

Vyjadřuje procentuální zastoupení vyplnění mezer ve směsi pojivem.

Stanoví se následujícím způsobem:

$$VFB = \frac{B * \rho_b}{VMA * \rho_B} * 100$$

| | | | |
|-----|----------|----|--|
| kde | VFB | je | stupeň vyplnění mezer ve směsi kameniva pojivem [%] |
| | VMA | | mezerovitost směsi kameniva [%] |
| | B | | obsah pojiva ve zkušebním tělese [%] |
| | ρ_b | | objemová hmotnost zkušebního tělesa [kg/m^3] |
| | ρ_B | | objemová hmotnost pojiva [kg/m^3] |

5.1.7 Odolnost vůči vodě

Stanovení odolnosti zkušebního tělesa vůči vodě je podrobně popsáno v ČSN EN 12697-12 [5]. Tato norma uvádí tři zkušební metody pro stanovení účinků nasycení vodou, v této práci je použita **metoda A** využívající stanovení pevnosti v příčném tahu zkušebního tělesa.

Odolnost vůči působení vody je vyjádřena poměrem pevností získaným na Marshallových tělesech a to na sadě těles, které byly hutněny 2 x 25 rázy. Získává se poměr pevností v příčném tahu (ITSR) mokrých a suchých těles, který se vyjadřuje procentuálně.

Pevnost v příčném tahu (ITS) je maximální napětí působící na válcové zkušební těleso při dané teplotě a rychlosti posunu zkušebního zařízení. Podrobněji je zkouška popsána v ČSN EN 12697-23 [9].

Zkouška se provádí na 6 tělesech z každé směsi.

Dle již zjištěných objemových hmotností (dle odstavce 5.1.2) se vyrobená tělesa rozdělí do dvou skupin tak, aby



Obrázek 5.4: Vakuový přístroj

každá skupina obsahovala stejné průměrné rozložení objemové hmotnosti. Detailněji je celý proces popsán v kapitole 6.1 v ČSN EN 12697-12 [5].

První (suchá) skupina těles je pouze uchována při laboratorní teplotě (cca 20 °C) a druhá (mokrá) skupina těles je nasycena destilovanou vodou v celém svém objemu a to díky vakuovému přístroji (Obrázek 5.4). Ve vakuové komoře během 10 min vznikne absolutní tlak 6,7 kPa. Vakuová komora je plně automatická, při této zkoušce se pouze vpouští zpět atmosférický tlak a to velmi pozvolna, aby nedošlo k poškození tělesa. Skupina mokrých zkušebních těles se přenesse do vodní lázně nateperované na teplotu 40 °C na dobu přibližně 70 hodin. Jakmile uběhne požadovaný čas, tak se tělesa přeteperují na zkušební teplotu 15 °C a po jednom vytahují z vodní lázně, osuší se a přesouvají do zkušebního lisu.

Do zkušebního přístroje se osadí těleso pomocí nastavovací podpěry rámečku (Obrázek 5.5) při položení tělesa na spodních čelistích. Připraví se horní část položená centricky na zkušebním tělese a změří se pevnost v příčném tahu (dle ČSN EN 12697-23 [9]). Tento postup se opakuje u všech třech mokrých zkušebních těles.

Skupina suchých těles se nechá před samotnou zkouškou nateperovat v termostaticky regulované komoře na zkušební teplotu 15 °C. Následně se stejně jako mokrá zkušební tělesa upnou do přístroje (Obrázek 5.6) a stanoví se jejich pevnost v příčném tahu.

Pro každé zkušební těleso se vypočítá pevnost v příčném tahu ITS (dle ČSN EN 12697-23 [9]):

$$ITS = \frac{2 * P}{\pi * D * H}$$

| | | | |
|-----|-----|----|-------------------------------|
| kde | ITS | je | pevnost v příčném tahu [MPa] |
| | P | | maximální zatížení [N] |
| | D | | průměr zkušebního tělesa [mm] |
| | H | | výška zkušebního tělesa [mm] |



Obrázek 5.5: Nastavovací rám na zkoušku s již uchyceným tělesem



Obrázek 5.6: Přístroj na měření příčného tahu (upravený lis)

Dále je vypočten poměr pevností v příčném tahu ITS_R (dle ČSN EN 12697-12 [5]):

$$ITS_R = 100 * \frac{ITS_w}{ITS_d}$$

| | | | |
|-----|------------------|----|--|
| kde | ITS _R | je | poměr pevností v příčném tahu [%] |
| | ITS _w | | průměrná pevnost v příčném tahu skupiny mokrých zkušebních těles [kPa] |
| | ITS _d | | průměrná pevnost v příčném tahu skupiny suchých zkušebních těles [kPa] |

5.1.8 Propustnost

Propustnost je schopnost tělesa propouštět vodu, podrobnější informace jsou uvedené v ČSN EN 12697-19 [7].

Těleso je vystaveno vodnímu sloupci se stálou výškou nad tělesem a nechá se pronikat voda skrz těleso. Tato zkouška byla stanovena pouze pro vertikální propustnost, což znamená pronikání vody ve svislém směru. Výška vodního sloupce je přibližně 300 mm a celá zkouška probíhá při laboratorní teplotě ve zjednodušeném zkušebním zařízení.

Zkoušené těleso je vloženo do pryžové manžety, kterou se obepne i vnější hrana plastové roury (Obrázek 5.7). Na vnější straně roury se manžeta přilepí, aby nedocházelo k úniku vody okolo manžety. Takto připravené těleso se ponoří do vody pro následné nasycení. Po nasycení se těleso umístí na hrubé síto a plastová roura se naplní vodou a udržuje se stálá hladina vodního sloupce. Po uběhnutí přibližně jedné minuty se roura s tělesem přemístí nad nádobu, kde se proteklá voda zachytává a měří se určitý časový interval. Po stanoveném intervalu se těleso přesune mimo měřenou nádobu. Nádobu se zachycenou vodou se zváží (m_2).



Obrázek 5.7: Přípravky na zkoušku propustnosti

Vertikální průtok tělesem se poté určí:

$$Q_v = \frac{m_2 - m_1}{t} * 10^{-6}$$

| | | | |
|-----|-------|----|---------------------------------------|
| kde | Q_v | je | vertikální průtok tělesem [m^3/s] |
| | m_1 | | hmotnost prázdné zachytné nádoby [g] |
| | m_2 | | hmotnost plné zachytné nádoby [g] |
| | t | | doba zachycování vody [s] |

vertikální propustnost K_v se poté vypočte dle Darcyho:

$$K_v = \frac{4 * Q_v * l}{h * \pi * D^2}$$

| | | | |
|-----|-------|----|---|
| kde | K_v | je | vertikální propustnost [m/s] |
| | Q_v | | vertikální průtok tělesem [m ³ /s] |
| | l | | výška zkušební tělesa [m] |
| | h | | aktuální výška vodního sloupce [m] |
| | D | | průměr zkušební tělesa [m] |

5.1.9 Ztráta částic

Zkušební metodu pro stanovení ztráty částic asfaltového koberce drenážního popisuje norma ČSN EN 12697-17 [6].

Zmíněná ztráta částic je vyhodnocena na základě ztráty hmotnosti zkušební vzorku po vložení do otlukového bubnu Los Angeles (Obrázek 5.8) bez ocelových koulí. Zkouška poukazuje na odolnost proti opotřebování.

Tato zkouška je určená pouze pro asfaltový koberec drenáž (PA 8), ale v této práci je tato zkouška provedena i na asfaltovém betonu pro velmi tenké vrstvy (BBTM 8) a je uvedena pouze pro srovnání směsí.

Zkouška probíhala při laboratorní teplotě, což odpovídá podmínkám uvedeným v normě [6]. Hmotnost (W_1) zkušební tělesa je zjištěná dle kapitoly 5.1.1.

Těleso se vloží do otlukového bubnu a nastaví se celkem 300 otáček bubnu. Při dosažení potřebných otáček se těleso vyjme z bubnu a lehce se očistí od uvolněných zrn.

Takto očištěné těleso znovu zvážíme (W_2).

Stejně se aplikuje postup zkoušky na všechna tělesa.



Obrázek 5.8: Otlukový buben



Obrázek 5.9: Porovnání těles před a po (vpravo) zkoušce

Ztráta částic se poté určí dle vztahu:

$$PL = 100 * \frac{W_1 - W_2}{W_1}$$

kde PL je hodnota ztráty částic [%]
W₁ počáteční hmotnost zkušebního tělesa [g]
W₂ konečná hmotnost zkušebního tělesa [g]

5.2 Zkouška provedená na celých deskách

Na celé desce o tloušťce 40 mm se provádí pouze zkouška pojezdem kola neboli odolnost vůči vzniku trvalých deformací.

5.2.1 Odolnost vůči vzniku trvalých deformací

Na zkoušku odolnosti vůči vzniku trvalých deformací dle ČSN EN 12697-22 [8] jsou použity desky vyrobené lamelovým zhutňovačem popsané v kapitole 4.4. Popisuje náchylnost asfaltových směsí k trvalé deformaci pod působením zatížení.

Zkouška vyjadřuje závislost trvalé deformace na základě hloubky vyjeté koleje způsobené opakovaným pojezdem zatěžovacího kola zatěžovacím cyklem (pojezd tam a zpět) při dané teplotě.

Hloubka vyjeté koleje vyjadřuje zmenšení tloušťky desky oproti původní tloušťce.

Zatěžovací zkouška probíhala v malém zkušebním zařízení popsaném v ČSN EN 12697-22 [8]. Přístroj se skládá ze zatěžovacího pohyblivého se kola a statického stolu, na kterém je upnuto zkušební těleso. Před zahájením zkoušky je těleso temperováno nejméně 4 hodiny.

Zkušební těleso (deska) se vloží na ocelovou podkladní desku a následně se upne do formy, která se



Obrázek 5.10: Automatický vyjíždeč kolejí

pomocí výlisků a šroubů centricky stáhne. Celá forma se vloží do přístroje a opatří se prostředkem zamezujícím nalepování asfaltové směsi na pojížděné kolo např. použitím fólie.

Zatěžovací kolo je opatřeno obručí z pevné pryže bez dezénu a to s vnějším průměrem cca 205 mm, šířce 50mm a tloušťce 13 mm. Testovaný vzorek je zatěžován centricky a harmonicky o frekvenci 24 zatěžovacích cyklů za minutu.

Přístroj „vyjížděč“ (Obrázek 5.10) je zcela automatický. Poté se přístroj uvede do pohybu při konstantní teplotě při záběhu 5ti zatěžovacích cyklů. Následná hloubka vyjeté koleje se měří zcela automaticky v průběhu zatěžovacích cyklů při natemperované komoře na teplotu 50 °C. Zkušební těleso je zatíženo po dobu 10 000 zatěžovacích cyklů nebo do dosažení hloubky vyjeté koleje 15 mm a to v závislosti na tom co nastane dříve.

Po dokončení zkoušky se z přístroje stáhnou výsledky pro danou směs.

Je měřen nárůst hloubky vyjeté koleje ve zkušebním tělese.

Výpočet přírůstku vyjeté koleje po 10 000 cyklech (20 000 pojezdů):

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

kde WTS_{AIR} je přírůstek hloubky vyjeté koleje [mm/1000cyklů]

$d_{10\,000}$ hloubka vyjeté koleje po 10 000 cyklech [mm]

$d_{5\,000}$ hloubka vyjeté koleje po 5 000 cyklech [mm]

Výpočet průměrné poměrné hloubky vyjeté koleje PRD_{AIR} na vzduchu při 10 000 cyklech je průměr poměrné hloubky vyjeté koleje nejméně ze dvou zkušebních těles s přesností na $\pm 0,1$ % podle [8]. Z důvodu úspory materiálu byla zhotovena pouze jedna deska pro každou směs a tudíž je PRD_{AIR} stanoven na jedné desce.

5.3 Zkoušky prováděné na trámečcích

Zkušební vzorky, nařezané z desek ve tvaru trámečků se použijí na zkoušku odolnosti vůči mrazovým trhlinám neboli ke stanovení nízkoteplotních vlastností asfaltových směsí.

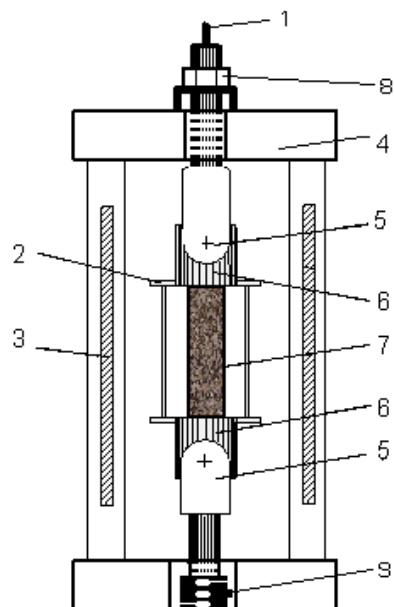
5.3.1 Nízkoteplotní vlastnosti asfaltových směsí

Tato zkouška je popsána v EN 12697-46 [27], ale prozatím není dopracována do finální verze a není, tudíž vyhotovena ani v českém znění. Norma bude popisovat odpor asfaltové směsi proti vzniku trhlin při nízkých teplotách při zatížení jednoosým tahem (zkouška TSRST⁵).

Jde o měření reologických vlastností při nízkých teplotách v nízkoteplotní komoře (Cyklon -40, Obrázek 5.11).

Zkušební těleso získané dle kapitoly 4.5.1 v podobě trámečku se zaoblenými trojúhelníkovými podložkami se upne do přístroje pomocí závitu na spojovacích tyčích z invarové oceli umístěných uprostřed komory. Tím je nahrazen nekonečný pás asfaltové vrstvy vozovky, na který působí smršťovací síly při nízkých teplotách. Takto upevněný vzorek se osadí indukčními snímači na všech třech stranách podložky. Tyto snímače měří přetvoření tělesa v daném směru. Komora je osazena snímači síly, deformace a teplot. Teplota se měří nejen v komoře, ale i vloženým teploměrem do otvoru „slepého“ tělesa pro určení zpoždění teplot. Signály z těchto snímačů a ovladačů jsou převedeny do řídicího počítače.

Komora se uzavře a spustí se automatický proces konstantního ochlazování komory. Počítač zaznamenává hodnoty ze snímačů, následně ovládá ohřev prvků upravující nulové podélné přetvoření tělesa a reguluje teplotu uvnitř komory. Při ochlazování zkušebního tělesa totiž dochází k jeho zkracování ($\varepsilon_t \neq 0$), které se zamezuje pomocí příslušně velkého ohřevu tuhého rámu po vnějších stranách (mimo komoru), čímž se dosáhne nulové podélné deformace ($\varepsilon_t = 0$). Komora se ochlazuje, dokud se těleso neporuší trhlinou při kryogenním napětí. Jde o protažení = 0,00.



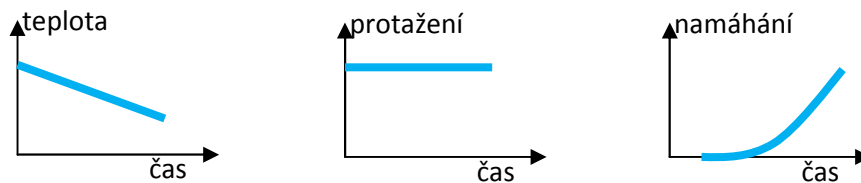
- 1 Snímač
- 2 Snímač posunutí
- 3 Ohřev vnějšího rámu
- 4 Příčný trám
- 5 Kardanový závěs
- 6 Podložka
- 7 Zkušební vzorek
- 8 Upínací matice
- 9 Tenzometrický snímač

Obrázek 5.11: Schématické zobrazení zařízení Cyklon -40



Obrázek 5.12 : Zkušební těleso (v popředí porušená tělesa)

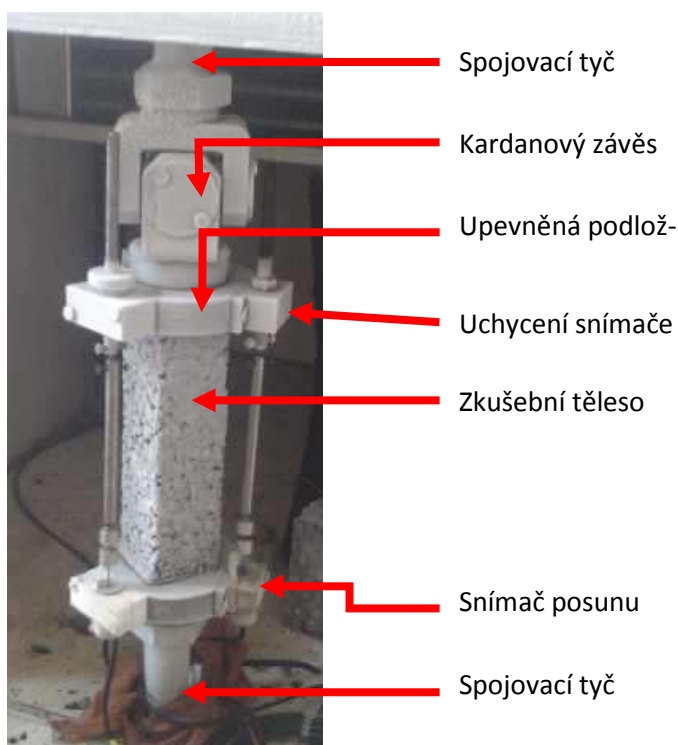
⁵ TSRST Thermal Stress Restrained Specimen Test – zkouška s rovnoměrným řízeným poklesem teploty



Graf 5.1: Znáznornění průběhu zkoušky (dle TSRST [20] a [17])

U některých modifikovaných asfaltů často dochází k pouhému prasknutí jednoho zrna kameniva, ale u takto porušeného vzorku se zkouška ukončuje.

V počítači se stanoví maximální tahová síla (napětí = pevnost) za kritické teploty při vzniku mrazové trhliny.



Obrázek 5.13: Detail zkušebního tělesa po ukončení nízkoteplotní zkoušky

5.4 Zkoušky na komolých klínech (trapezoidech)

Na nařezaných trapezoidech se měří modul tuhosti a únavové charakteristiky patřící do funkčních zkoušek pro asfaltové směsi.

5.4.1 Modul tuhosti asfaltové směsi

Další z funkčních vlastností asfaltových směsí je modul tuhosti při opakovaném dynamickém zatěžování. Jedná se o dvoubodovou zkoušku ohybem na jednostranně vetknutém komolém klínu detailně popsanou v ČSN EN 12697-6 příloha A (2PB –TR) [11].

Zkouška se provádí za vynuceného ustáleného harmonického zatížení. Stanovení modulu tuhosti je využito pro přiblížení chování asfaltových směsí v konstrukci vozovky.

Komplexní modul (E^*) je poměr mezi napětím a přetvořením pro visko-elastický materiál a skládá z reálné složky a imaginární složky.

Těleso vystavené harmonickému zatížení po čas t s využitím napětí vyvolává poměrné přetvoření o určitém posuvu ve velikosti fázového úhlu oproti průběhu napětí.

Zkušební vzorky jsou deformovány v rozsahu lineárního přetvoření při vyvolávání stejného zatížení a měří se amplituda napětí, poměrné přetvoření a fázový úhel. Měřicí zařízení je složeno ze snímačů pro měření dynamické síly a průhybu.

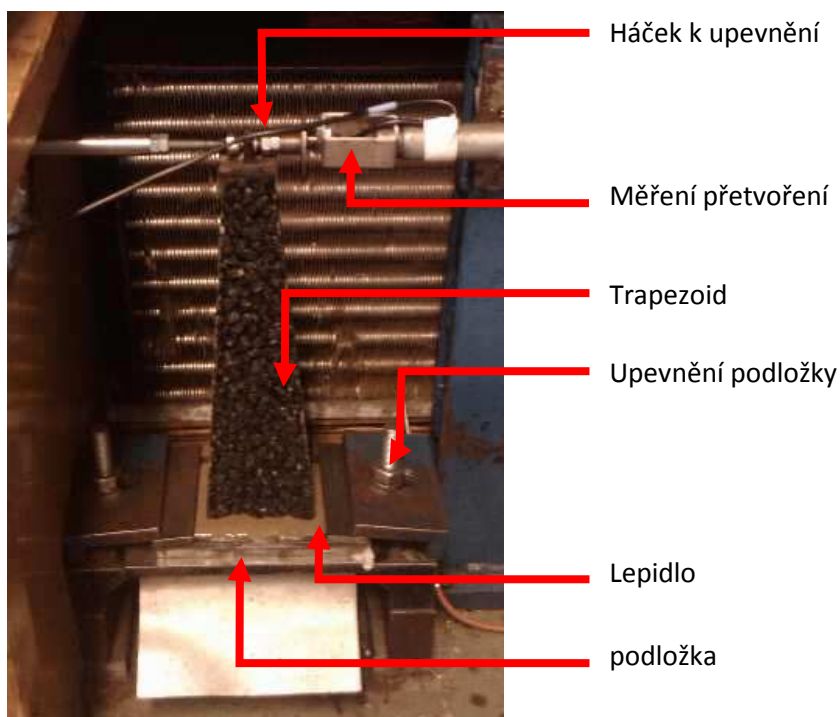
Před samotnou zkouškou musí být tělesa temperována na teplotu, při které bude zkouška probíhat. Modul tuhosti je zjišťován při teplotách $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. V této práci jsou navrhnuty dvě směsi, které se budou posuzovat.

Pro každou směs byly vytvořeny tři desky o tloušťce 40 mm , z kterých jsou dle od-

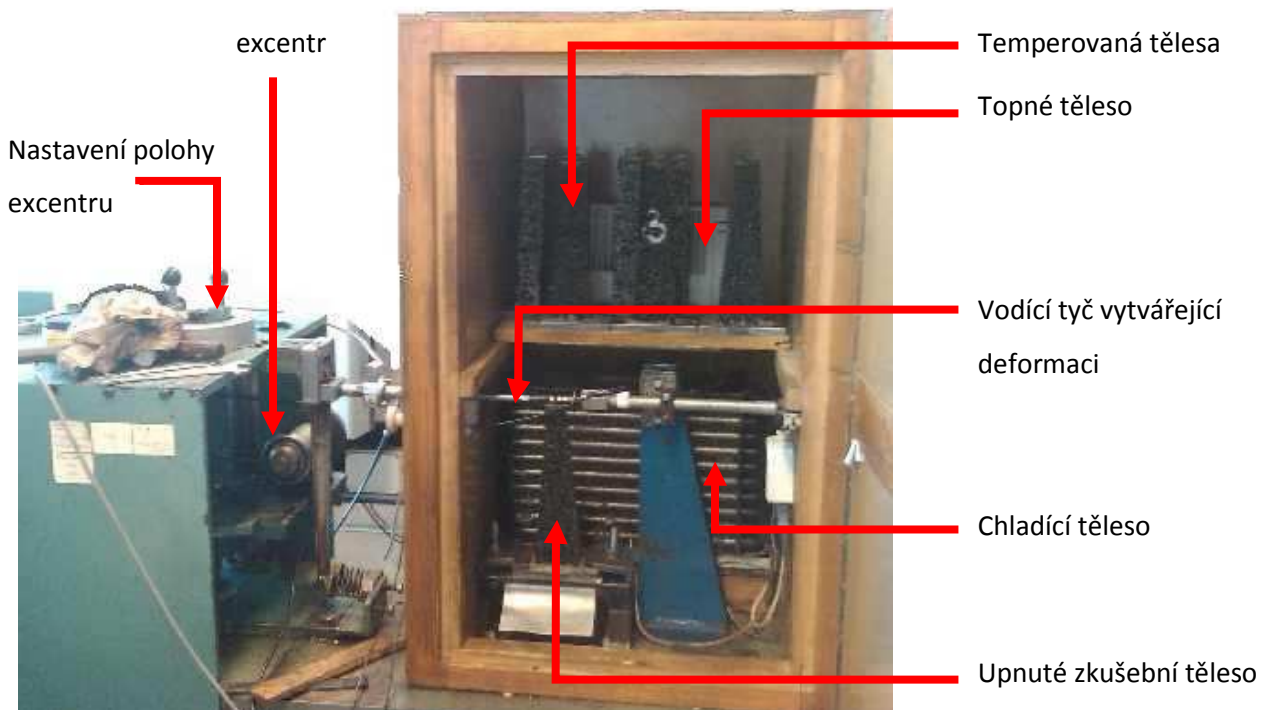
stavce 4.5.2 vyrobeny tři sady vzorků. Každá sada vzorků je složena nejméně ze čtyř zkušebních těles.

Natemperované těleso se upne do zkušebního tuhého rámu pomocí podložek a šroubů (Obrázek 5.14).

K stabilizování tělesa dochází připevněním podložky, na které je trapezoid přilepen. Těleso se před stáhnutím vycentruje pod vodící tyč, ke které bude připevněn háček na horní podstavě trapezoidu.



Obrázek 5.14: Upnuté těleso ve zkušebním rámu



Obrázek 5.15: Přístroj na měření modulu tuhosti a únavy

Pootočí se excentr do nulové polohy tak, aby nevyvolával počáteční deformaci. Upne se háček přilepený k trapezoidu k vodící tyči (Obrázek 5.14), která bude vyvolávat deformaci tělesa pomocí excentru. Zavře se komora (Obrázek 5.15) a nechá se dále temperovat na danou teplotu.

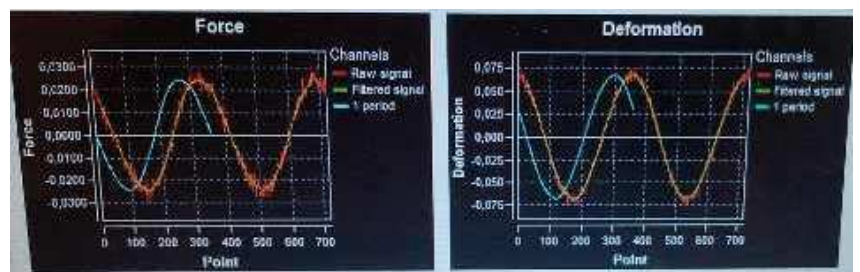
Na ovládacím počítači se spustí měření a kontrola teploty. Do měřicího počítače se nastaví označení tělesa, rozměry tělesa získané dle odstavce 4.5.2 a spustí se měření.

Měření probíhá při změně frekvencí působících na těleso a to v hodnotách 5, 10, 15, 20, 25 a 5 Hz.

V průběhu zkoušky se sleduje vzniklé přetvoření na tělesa, které by mělo být $\epsilon < 50 \cdot 10^{-6}$ v nejvíce namáhané (měřené) části.

Při ukončení měření je důležité uložení naměřených hodnot.

Měřené těleso se po zkoušce demontuje a upevní se další natemperované těleso.



Obrázek 5.16: Zobrazované hodnoty síly a deformace na ovládacím počítači

➤ Princip výpočtu

Komplexní modul tuhosti je materiálová a teplotně proměnná charakteristika harmonického cyklického namáhání:

$$\sigma = \sigma_0 * \cos(\omega t + \varphi)$$

| | | | |
|-----|------------|----|--|
| Kde | σ | je | okamžité napětí [MPa] |
| | σ_0 | | amplituda maximálního napětí ve zkušebním tělese [MPa] |
| | ω | | úhlová rychlost [s^{-1}], $\omega = 2\pi f$ |
| | φ | | fázový úhel posunu průběhu přetvoření za průběhem síly [°] |

Při cyklickém namáhání se mění i přetvoření a to:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 * \cos(\omega t + \Psi)$$

| | | | |
|-----|-----------------|----|--|
| Kde | ε | je | okamžité poměrné přetvoření [-] |
| | ε_0 | | amplituda maximálního přetvoření ve zkušebním tělese [-] |
| | ω | | úhlová rychlost [s^{-1}], $\omega = 2\pi f$ |
| | Ψ | | fázový úhel posunu průhybu a síly [°] |

Komplexní modul je komplexním číslem udané ve tvaru:

$$E^* = E_1 + iE_2$$

$$E_1 = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot \cos \varphi$$

$$E_2 = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot \sin \varphi$$

| | | | |
|-----|-------|----|---|
| Kde | E^* | je | komplexní modul |
| | E_1 | | reálná složka charakterizující pružné vlastnosti |
| | E_2 | | imaginární složka charakterizující vazké vlastnosti |

Modul tuhosti S je roven podílu $\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}$ a je roven absolutní hodnotě komplexního modulu.

$$S = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} = |E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}$$

| | | | |
|-----|-----|----|---------------------|
| Kde | S | je | modul tuhosti [MPa] |
|-----|-----|----|---------------------|

5.4.2 Odolnost asfaltové směsi proti únavě

Zkouška charakterizuje chování asfaltové směsi při únavovém zatížení při kontrolovaném průhybu kolového klínu. Tato zkouška je podrobněji popsána v ČSN EN 12697-4 [28].

Princip zkoušky je podobný jako u měření modulu tuhosti (uvedené v odstavci 5.4.1), respektive je použito totéž zařízení pro měření, pouze je vyměněn excentr působící průhyb s konstantní amplitudou na těleso. Následnou polohou (nahoru, dolů) excentru měním přetvoření na tělese a pro každé těleso se upravuje poloha dle zkušeností.

Po kompletním nastavení měřicího zařízení odpovídajícímu temperování tělesa na teplotu 10 °C a měření při stálé frekvenci 25 Hz. Jedná se o takzvanou metodu „strain kontrol“, kdy se nastaví počáteční přetvoření a v průběhu zkoušky s navyšujícím se počtem cyklů klesá síla a modul tuhosti. Zkouška je ukončena při poklesu modulu tuhosti na polovinu počáteční hodnoty.

Měření je provedeno i na ostatních tělesech tak, aby měření probíhalo již ve zmíněném rozsahu 10^3 až 10^6 cyklů.

Zkouška umožňuje vykreslení únavové přímky ve Wöhlerově diagramu a následný výpočet relativního přetvoření odpovídající průměrně milionu cyklům ϵ_6 , sklonu únavové přímky B.

Podrobný výpočet všech hodnot je uveden v již zmíněné normě ČSN EN 12697-24 [28].

6 Vyhodnocení naměřených dat

V této kapitole budou popsány výsledky jednotlivých výše popsaných zkoušek provedených na srovnávaných směsích v této diplomové práci. Výsledky budou vyhodnoceny dle platných příslušných norem a předpisů.

Nejprve budou uvedeny výsledky pro asfaltový koberec drenážní PA8, které budou v souhrnu porovnány se směsí PA 8 s 5,5 % polymerem modifikovaného asfaltu (PmB 60-105/75). Výsledky srovnávací směsi byly získané z výzkumné zprávy VUT v Brně [24]. Dále budou popsány výsledky zkoušek pro asfaltový beton pro velmi tenké vrstvy BBTM 8.

6.1 Výsledky pro Marshallova tělesa

Jako první byla vyrobena Marshallova tělesa z důvodu zjištění počátečních vlastností popsaných výše.

6.1.1 Rozměry a hmotnosti Marshallových těles

Naměřené rozměry jsou stanoveny podle odstavce 5.1.1. a jsou uvedeny a rozděleny podle vyráběných směsí.

Rozměry a hmotnosti jednotlivých zkušebních těles je stanovena dle odstavce 5.1.1.

Hmotnost těles je použita i při vyhodnocování dalších zkoušek.

Výsledky jsou zobrazeny v tabulce 6.1 až 6.3.

➤ Rozměry a hmotnosti zkušebních těles pro směs PA 8 (Tabulka 6.1)

Byla vyrobena tělesa o stejném 7,0 % obsahu pojiva a to ve dvou sadách s rozdílným hutněním. První sada byla hutněna 50 rázy a druhá sada, určená na zkoušku odolnosti vůči vodě (25 rázů).

Tělesa pro směs PA 8 byla vážena pouze za sucha. A následné zkoušky jsou vyhodnocovány z rozměrů a hmotnosti zde stanovené.

Tabulka 6.1: Rozměry a hmotnosti Marshallových těles směsi PA 8

| PA 8 | | | | | |
|-------------|------------|--------------|--------|--------|-------------|
| % pojiva | počet rázů | označení | d [mm] | v [mm] | m suchá [g] |
| 7 | 50 | PA 8 7,0 - 1 | 101,9 | 63,2 | 1022,7 |
| | | PA 8 7,0 - 2 | 101,8 | 64,1 | 1023,6 |
| | | PA 8 7,0 - 3 | 102 | 63,2 | 1021,3 |
| | 25 | PA 8 7,0 - 1 | 101,3 | 65,7 | 999,2 |
| | | PA 8 7,0 - 2 | 101,8 | 65,6 | 1006,6 |
| | | PA 8 7,0 - 3 | 101,7 | 65,6 | 1006,2 |
| | | PA 8 7,0 - 4 | 101,9 | 65,3 | 1003,8 |
| | | PA 8 7,0 - 5 | 101,3 | 66,3 | 1005,1 |
| | | PA 8 7,0 - 6 | 101,9 | 63,8 | 994,5 |

➤ **Rozměry a hmotnosti zkušebních těles pro směs BBTM 8 (Tabulka 6.2 a 6.3)**

Dále budou uvedeny dvě skupiny vyrobených těles a to první skupina s rozdílným dávkováním pojiva o 0,5 % od optimálního množství (Tabulka 6.2) a druhá skupina určená na zkoušku odolnosti vůči vodě s optimálním množstvím pojiva (Tabulka 6.3), která je hutněna pouze 25 rázy.

U následujících těles byla zjištěna i hmotnost zkušebního tělesa pod vodou a povrchově osušených těles.

Tabulka 6.2: Rozměry a hmotnosti Marshallových těles směsi BBTM 8

| BBTM 8 | | | | | | | |
|---------------|------------|-----------------|--------|--------|-------------|-----------------|-------------|
| % pojiva | počet rázů | označení | d [mm] | v [mm] | m suchá [g] | m pod vodou [g] | m vlhká [g] |
| 7 | 50 | BBTM 8 7,0 - A | 102,2 | 60 | 1080,6 | 605,8 | 1083,1 |
| | | BBTM 8 7,0 - B | 101,8 | 61,5 | 1089 | 610,2 | 1093 |
| | | BBTM 8 7,0 - C | 102,2 | 66,2 | 1108,4 | 620,8 | 1130,3 |
| 7,5 | | BBTM 8 7,5 - D | 101,6 | 62,8 | 1107,8 | 618,3 | 1110,9 |
| | | BBTM 8 7,5 - E | 102,1 | 61,4 | 1109,7 | 624,5 | 1111,1 |
| | | BBTM 8 7,5 - F | 101,7 | 63 | 1109,6 | 618,7 | 1112,3 |
| 8 | | BBTM 8 8,0 - G | 102,1 | 60,9 | 1114,2 | 630,5 | 1114,9 |
| | | BBTM 8 8,0 - H | 101,9 | 62,2 | 1113,6 | 623,3 | 1115,2 |
| | | BBTM 8 8,0 - CH | 101,9 | 61,8 | 1106,7 | 620 | 1108 |

Těleso **BBTM 8 7,0 – C** bylo špatně vyrobeno, jak je vidět na následujících výsledcích dalších zkoušek. Nejspíše nebyla dodržena teplota hutnění, nebo dostatečně promícháno pojivo v plechovce před dávkováním pojiva do směsi, a proto bylo těleso vyřazeno.

V neposlední řadě jsou stanoveny rozměry a hmotnosti i pro zkušební tělesa pro zkoušku odolnosti vůči vodě (Tabulka 6.3).

Tabulka 6.3: Rozměry Marshallových těles směsi BBTM 8 (ITSR)

| BBTM 8 | | | | | |
|---------------|---------------|------------------|-----------|-----------|-------------------|
| % pojiva | počet rázů | označení | d [mm] | v [mm] | m suchá [g] |
| 7,5 | 25 | BBTM 8 7,5 - I | 102 | 64 | 1094,2 |
| | | BBTM 8 7,5 - II | 101,9 | 63,3 | 1080 |
| | | BBTM 8 7,5 - III | 101,7 | 64,3 | 1097,2 |
| | | BBTM 8 7,5 - IV | 102,2 | 64 | 1092,9 |
| | | BBTM 8 7,5 - V | 101,9 | 63,4 | 1081,6 |
| | | BBTM 8 7,5 - VI | 102,1 | 64 | 1110 |

6.1.2 Objemová hmotnost Marshallových těles

Objemová hmotnost jednotlivých zkušebních těles je stanovena dle odstavce 5.1.2 a výsledky jsou zobrazeny v tabulce 6.4 až 6.6.

Objemová hmotnost těles je použita i při vyhodnocování dalších zkoušek.

➤ **Objemová hmotnost zkušebních těles pro směs PA 8**

Objemová hmotnost je zjištěná pouze z vážení na vzduchu a z rozměrů těles.

U druhé skupiny těles PA 8 7,0 – 1 až PA 8 7,0 – 6 je nižší průměrná objemová hmotnost z důvodu nahutnění zkušebních vzorků nižším počtem úderů, což ve výsledku způsobilo snížení objemové hmotnosti zjišťované z rozměrů a objemu vzorku.

Tabulka 6.4: Objemová hmotnost směsi PA 8

| PA 8 | | |
|--------------|------------------------------------|---|
| označení | obj. hmotnost [kg/m ³] | průměrná obj. hmotnost z rozměrů [kg/m ³] |
| PA 8 7,0 - 1 | 1984 | 1975 |
| PA 8 7,0 - 2 | 1962 | |
| PA 8 7,0 - 3 | 1978 | |
| PA 8 7,0 - 1 | 1887 | 1890 |
| PA 8 7,0 - 2 | 1885 | |
| PA 8 7,0 - 3 | 1888 | |
| PA 8 7,0 - 4 | 1885 | |
| PA 8 7,0 - 5 | 1881 | |
| PA 8 7,0 - 6 | 1911 | |

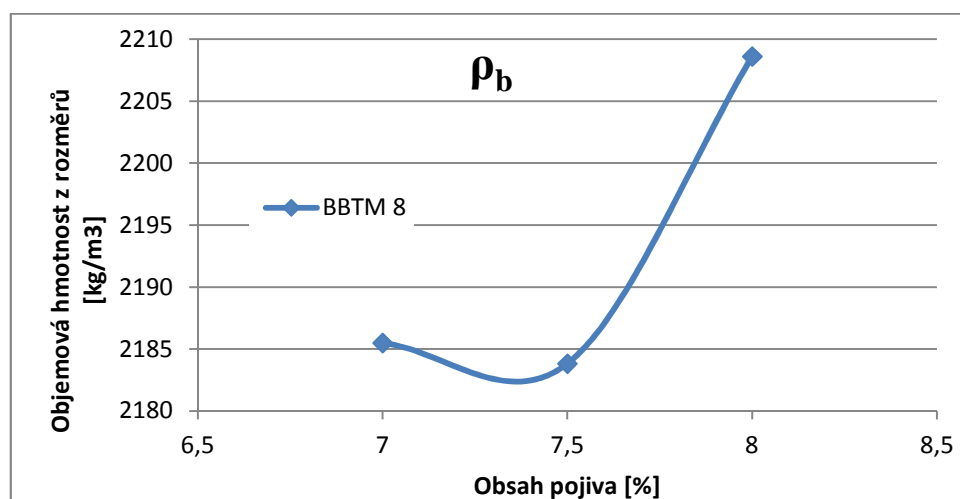
➤ **Objemová hmotnost zkušebních těles pro směs BBTM 8**

Objemová hmotnost na zkušebních tělesech pro směs BBTM 8 je zjištěna z vážení ve vodě, krom těles pro „ITSR“.

V sadě zkušebních těles „A - CH“ (Tabulka 6.5) není bráno do průměrů těleso s označením **BBTM 8 7,0 - C** z výše uvedených důvodů.

Tabulka 6.5: Objemová hmotnost směsi BBTM 8

| BBTM 8 | | | | |
|-----------------|--|---|--|---|
| označení | obj. hmotnost z rozměrů [kg/m ³] | průměrná obj. hmotnost z rozměrů [kg/m ³] | obj. hmotnost $\rho(\text{bssd})$ (kg/m ³) | průměrná obj. hmotnost $\rho(\text{bssd})$ [kg/m ³] |
| BBTM 8 7,0 - A | 2195 | 2185 | 2257 | 2253 |
| BBTM 8 7,0 - B | 2176 | | 2249 | |
| BBTM 8 7,0 - C | 2041 | | 2169 | |
| BBTM 8 7,5 - D | 2176 | 2184 | 2242 | 2253 |
| BBTM 8 7,5 - E | 2207 | | 2274 | |
| BBTM 8 7,5 - F | 2168 | | 2241 | |
| BBTM 8 8,0 - G | 2235 | 2209 | 2293 | 2271 |
| BBTM 8 8,0 - H | 2195 | | 2257 | |
| BBTM 8 8,0 - CH | 2196 | | 2261 | |



Graf 6.1: Grafické vyjádření objemové hmotnosti určené z rozměrů pro směs BBTM 8

Tabulka 6.6: Objemová hmotnost směsi BBTM 8 (ITSR)

| BBTM 8 | | |
|------------------|---------------------------------|--|
| označení | obj. hmotnost z rozměrů [kg/m³] | průměrná obj. hmotnost z rozměrů [kg/m³] |
| BBTM 8 7,5 - I | 2092 | 2096 |
| BBTM 8 7,5 - II | 2092 | |
| BBTM 8 7,5 - III | 2101 | |
| BBTM 8 7,5 - IV | 2082 | |
| BBTM 8 7,5 - V | 2092 | |
| BBTM 8 7,5 - VI | 2118 | |

Rozdíl mezi 25 a 50 údery pěchu vyvolal rozdíl v mezerovitosti větší než 4 %, směs je obtížně zhutnitelná když viskozita pojiva při teplotě zhutňování je nižší než v případě vyššího dávkování TecRoad v případě směsi PA, viz Graf 2.2. Ale zde se projevuje vyšší vnitřní tření kameniva při zhutňování při dané zrnitosti kameniva.

6.1.3 Maximální objemová hmotnost směsí

Maximální objemová hmotnost zkoušených směsí je stanovena dle odstavce 5.1.3 a výsledky jsou zobrazeny v tabulce 6.7 až 6.8. Maximální objemová hmotnost těles je použita i při vyhodnocování dalších zkoušek.

➤ Maximální objemová hmotnost směsi PA 8

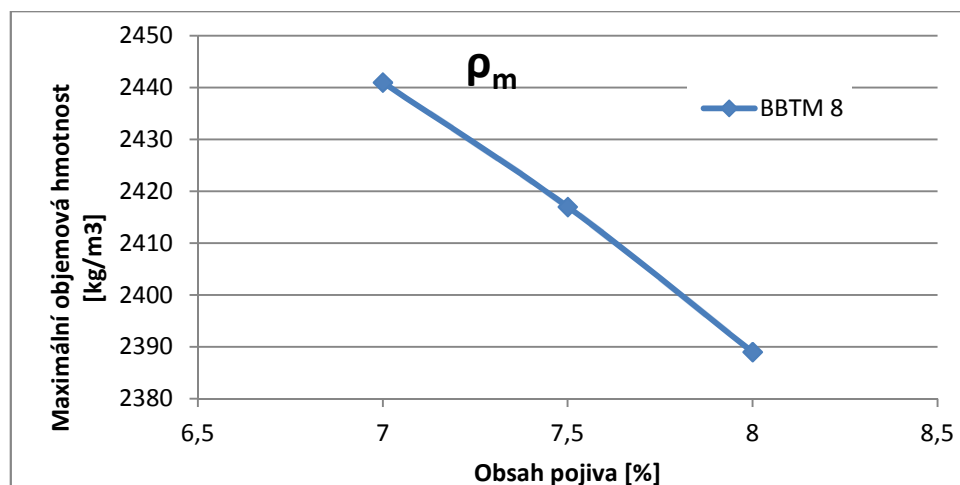
Tabulka 6.7: Maximální objemová hmotnost směsi PA 8

| Stanovení maximální objemové hmotnosti ρ_{mv} asfaltové směsi PA 8 7,0 % s TecRoad (33 %) | |
|--|-------------|
| Označení pyknometru | V |
| Pyknometr prázdný m_1 (g) | 693,0 |
| Pyknometr+vzorek m_2 (g) | 1714,3 |
| Pyknometr+vzorek+rozpouštědlo m_3 (g) | 3021,8 |
| Objem pyknometru V_p (ml) | 1323,0 |
| Hustota rozpouštědla ρ_w (kg/m ³) | 1447,0 |
| Teplota teploty (°C) | 25,0 |
| Navážka asf. směsi [ř.3 - ř.2] (g) | 1021,3 |
| Maximální objemová hmotnost ρ_{mv} (kg/m³) | 2435 |

➤ Maximální objemová hmotnost směsi BBTM 8

Tabulka 6.8: Maximální objemová hmotnost směsi BBTM 8

| Stanovení maximální objemové hmotnosti ρ_{mv} asfaltové směsi BBTM 8 s TecRoad (22 %) | | | |
|--|-------------|-------------|-------------|
| Obsah pojiva (%) | 7,0 | 7,5 | 8,0 |
| Označení pyknometru | V | V | III |
| Pyknometr prázdný m_1 (g) | 693,0 | 693,0 | 685,1 |
| Pyknometr+vzorek m_2 (g) | 1773,6 | 1758,3 | 1595,5 |
| Pyknometr+vzorek+rozpouštědlo m_3 (g) | 3047,4 | 3034,9 | 2927,2 |
| Objem pyknometru V_p (ml) | 1323,0 | 1323,0 | 1301,4 |
| Hustota rozpouštědla ρ_w (kg/m ³) | 1447,0 | 1447,0 | 1447,0 |
| Teplota teploty (°C) | 25,0 | 25,0 | 25,0 |
| Navážka asf. směsi [ř.3 - ř.2] (g) | 1080,6 | 1065,3 | 910,4 |
| Maximální objemová hmotnost ρ_{mv} (kg/m³) | 2441 | 2417 | 2389 |



Graf 6.2: Grafické vyjádření maximální objemové hmotnosti pro směs BBTM 8

Podle očekávání měla maximální objemová hmotnost se vzrůstajícím obsahem pojiva ve směsi klesající tendenci.

6.1.4 Mezerovitost Marshallových těles

Mezerovitost zkoušených těles je stanovena dle odstavce 5.1.4 až 5.1.6 a výsledky jsou zobrazeny v tabulce 6.9 a 6.10 .

➤ Mezerovitost zkušebních těles pro směs PA 8

Mezerovitost směsi PA 8 je stanovena z objemové hmotnosti těles vážením na vzduchu, rozměrů a maximální objemové hmotnosti.

Drenážní schopnost asfaltového koberce drenážního úzce souvisí s mezerovitostí směsi PA 8. Odpovídá dle ČSN EN 13108-7 (odstavec 5.4.2 – tabulka 4 a 5) [18] limitům $V_{min18}=18,0\%$ a $V_{max20}=20\%$ a požadavkům z Tabulky NA.6 na $V_{min}=16,0\%$ a $V_{max}=30\%$

Tabulka 6.9: Mezerovitost směsi PA 8

| PA 8 | | | | | | |
|--------------|-----------------|-------------|---------------------------------|-------------|-----------------------------------|-------------|
| označení | mezerovitost Vm | Ø Vm | mezerovitost směsi kameniva VMA | Ø VMA | stupeň vyplnění mezer pojivem VFB | Ø VFB |
| PA 8 7,0 - 1 | 18,5 | 18,9 | 31,9 | 32,2 | 41,9 | 41,3 |
| PA 8 7,0 - 2 | 19,4 | | 32,6 | | 40,5 | |
| PA 8 7,0 - 3 | 18,8 | | 32,1 | | 41,5 | |

➤ **Mezerovitost zkušebních těles pro směs BBTM 8**

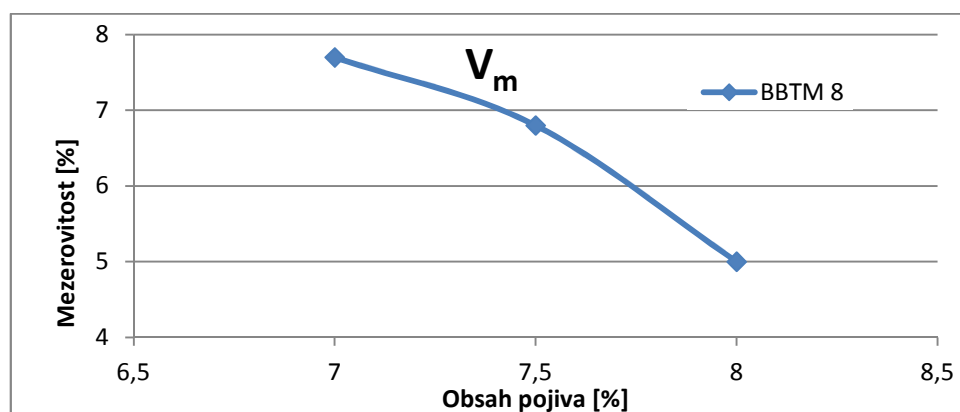
Mezerovitost na zkušebních tělesech pro směs BBTM 8 je zjištěna z vážení ve vodě, rozměrů a maximální objemové hmotnosti nezhuťné směsi.

Mezerovitost směsi BBTM 8 odpovídá dle ČSN EN 13108-2 (odstavec 5.4 – tabulka 4 a 5) [19] a naměřené hodnoty leží na hranici mezerovitosti $V_{i\ 3\ až\ 6}=3\ až\ 6\ \%$ a $V_{i\ 7\ až\ 10}=7\ až\ 10\ \%$ což odpovídá požadavkům z tabulky NA.5.1 [19] $V_{min}=3,0\ \%$, a $V_{max}=7,0\ \%$ je splněna pro navrhovanou směs BBTM 8 s 7,5 % pojiva.

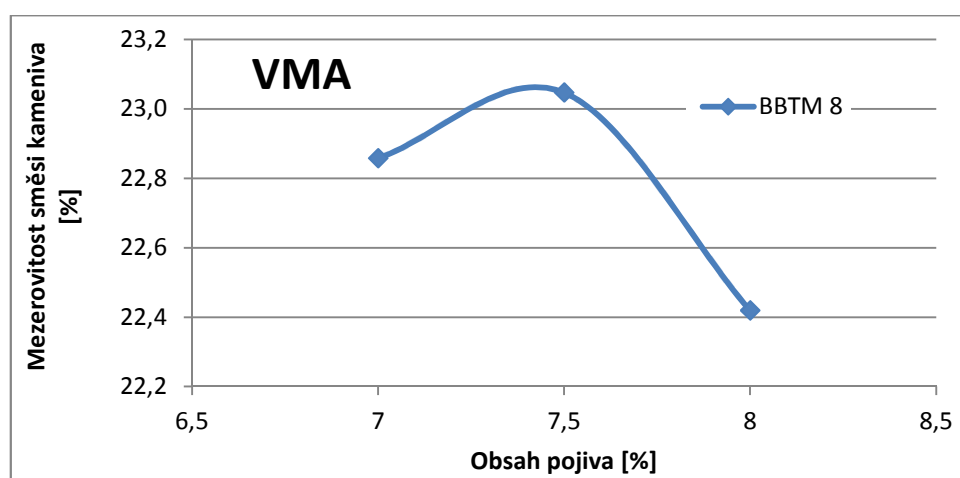
Tabulka 6.10: Mezerovitost směsi BBTM 8

| BBTM 8 | | | | | | |
|-----------------|-----------------------|----------------------|-------------|--------------------|------|--------------------|
| označení | mezerovitost V_m | \emptyset V_m | VMA | \emptyset VMA | VFB | \emptyset VFB |
| BBTM 8 7,0 - A | 7,5 | 7,7 | 22,7 | 22,9 | 66,9 | 66,4 |
| BBTM 8 7,0 - B | 7,9 | | 23,0 | | 65,8 | |
| BBTM 8 7,0 - C | 11,1 | | 25,7 | | 56,7 | |
| BBTM 8 7,5 - D | 7,2 | 6,8 | 23,4 | 23,0 | 69,1 | 70,5 |
| BBTM 8 7,5 - E | 5,9 | | 22,3 | | 73,5 | |
| BBTM 8 7,5 - F | 7,3 | | 23,4 | | 69,0 | |
| BBTM 8 8,0 - G | 4,0 | 5,0 | 21,6 | 22,4 | 81,5 | 78,0 |
| BBTM 8 8,0 - H | 5,5 | | 22,9 | | 75,9 | |
| BBTM 8 8,0 - CH | 5,3 | | 22,7 | | 76,5 | |

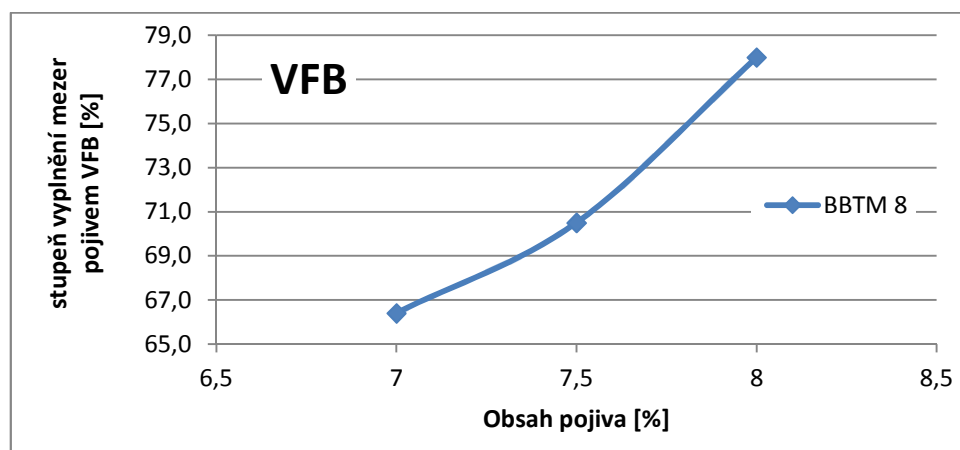
Mezerovitost směsi mírně nespĺňuje podmínku pro směs BBTM B, ale tento rozdíl díky odlišnému stanovení mezerovitostí je třeba tolerovat. Směs s množstvím pojiva 7 % již nezaručuje správné zhuťnění, viz Tabulka 6.16 a 6.19.



Graf 6.3: Grafické vyjádření mezerovitosti V_m pro směs BBTM 8



Graf 6.4 : Grafické vyjádření mezerovitosti kameniva VMA pro směs BBTM 8



Graf 6.5: Grafické vyjádření stupně vyplnění mezer pojivem VFB pro směs BBTM 8

Výsledná hodnota optimálního množství pojiva je stanoveno na **7,5 %** hmotnostního obsahu pojiva ve směsi BBTM 8.

6.1.5 Odolnost Marshallových těles vůči vodě

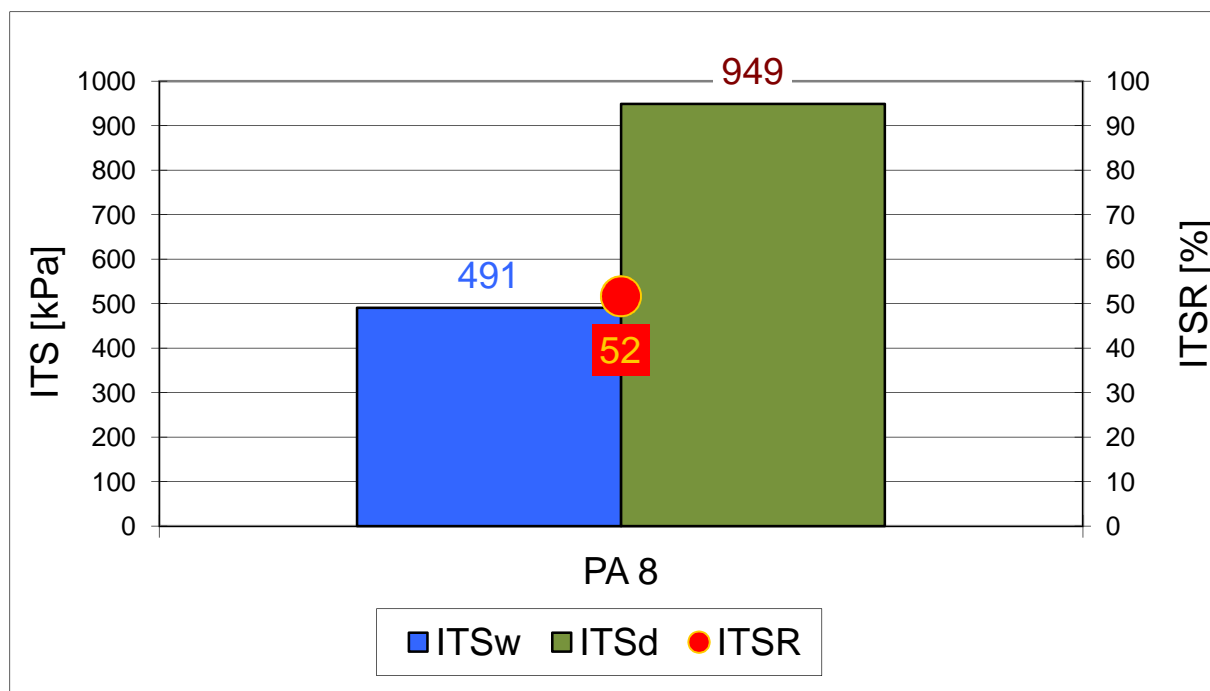
Odolnost vůči vodě zkoušených těles je stanovena dle odstavce 5.1.7 a výsledky jsou zobrazeny v tabulce 6.11 a 6.12.

➤ Odolnost vůči vodě zkušebních těles pro směs PA 8

Minimální kategorie poměru pevnosti v příčném tahu ITS_R dle ČSN EN 13108-7 (odstavec 5.5 – tabulka 8) [18] odpovídá kategorii ITS_{R50} = 50 %. Požadovaná hodnota podle národní přílohy normy ČSN EN 13108-7 je 70 % a 80 % pro TDZ S, I a II.

Tabulka 6.11: Odolnost vůči vodě směsi PA 8

| skupina | označení vzorku | temperování | SíLA P [kN] | přetvoření [mm] | ITS [MPa] = $2P / (\pi \cdot D \cdot h)$ | ∅ ITS | poměr pevností v příčném tahu ITS _R [%] |
|---------|-----------------|---------------------|-------------|-----------------|--|-------|--|
| 1 | PA 8 7,0 - 4 | ve vodě (vakuovaná) | 5,14 | 1,63 | 0,492 | 0,491 | 51,7 |
| | PA 8 7,0 - 1 | | 5,063 | 1,67 | 0,484 | | |
| | PA 8 7,0 - 3 | | 5,197 | 1,52 | 0,496 | | |
| 2 | PA 8 7,0 - 5 | na vzduchu | 9,815 | 2,64 | 0,930 | 0,949 | |
| | PA 8 7,0 - 2 | | 9,563 | 1,4 | 0,912 | | |
| | PA 8 7,0 - 6 | | 10,27 | 1,75 | 1,006 | | |



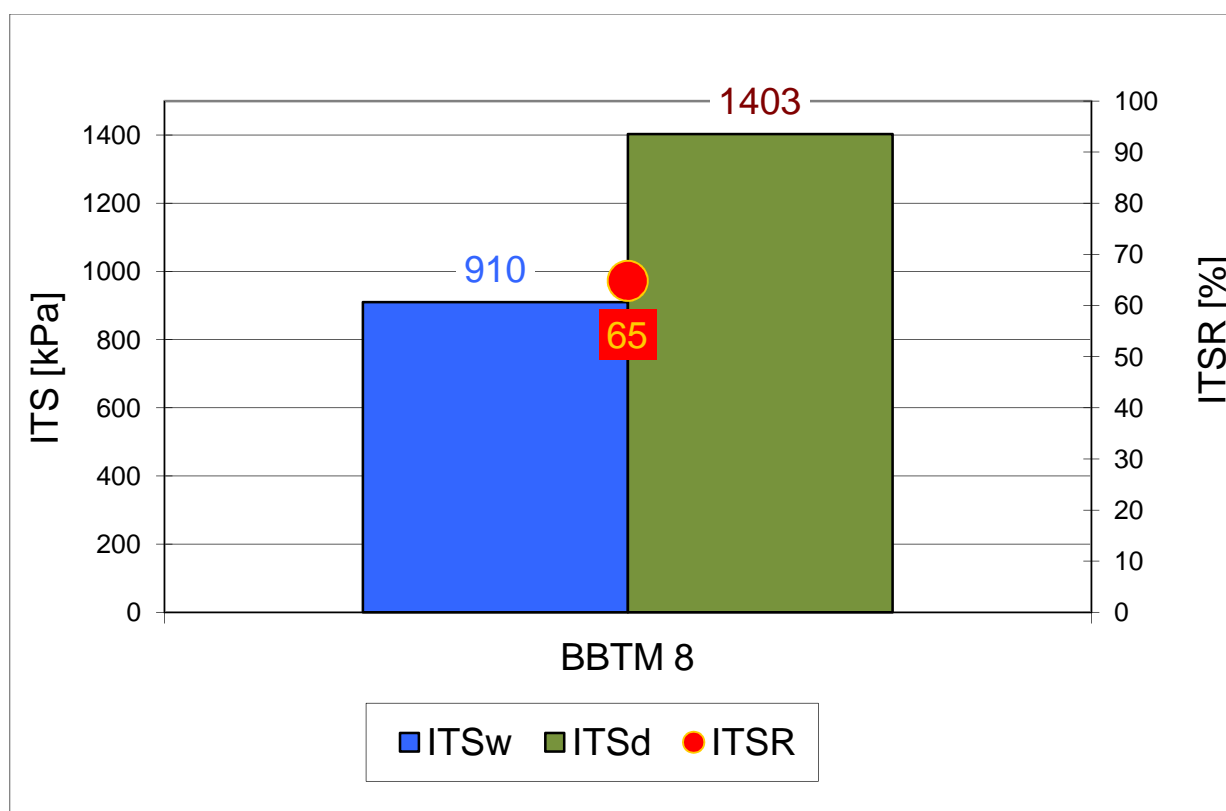
Graf 6.6: Teplotní citlivost směsi PA 8

➤ Odolnost vůči vodě zkušebních těles pro směs BBTM 8

Minimální kategorie poměru pevnosti v příčném tahu ITS_R dle ČSN EN 13108-2 (odstavec 5.5 – Tabulka 6) [19] odpovídá kategorii ITS_{NR} = bez požadavků. Národní příloha normy ČSN EN 13108-2 uvádí požadavek ITS_R 80 % pro BBTM 8 S, BBTM 11 S a BBTM 8 (bez označení) a 70 % pro BBTM 8 +, BBTM 11 + a BBTM 11 (bez označení). Ostatní směsi jsou bez požadavku.

Tabulka 6.12: Odolnost vůči vodě směsi BBTM 8

| skupina | označení vzorku | temperování | SÍLA P [kN] | přetvoření [mm] | ITS [MPa] = 2P / (π*D*h) | ∅ ITS | poměr pevností v příčném tahu ITSR [%] |
|---------|-----------------|---------------------|-------------|-----------------|-----------------------------|-------|--|
| 1 | IV | ve vodě (vakuovaná) | 9,12 | 1,97 | 0,888 | 0,910 | 64,9 |
| | I | | 10,05 | 1,88 | 0,980 | | |
| | III | | 8,85 | 1,85 | 0,862 | | |
| 2 | V | na vzduchu | 14,21 | 1,86 | 1,400 | 1,403 | |
| | II | | 14,23 | 1,96 | 1,404 | | |
| | VI | | 14,4 | 1,9 | 1,403 | | |



Graf 6.7: Teplotní citlivost směsi BBTM 8

Směsi obsahující pryžový granulát v laboratoři většinou nedosahují uspokojivých odolností vůči účinku vody při vyjádření poměrem ITSR. Pro směsi s vyšší tloušťkou asfaltového filmu (jako mají směsi SMA a směsi s CRmB) a vyšší mezerovitostí je hodnota ITSR neprůkazná. Proto by stálo za uvážení vypuštění požadavku na hodnotu ITSR z TP 148, obdobně jako u směsí SMA v harmonizované normě ČSN EN 13108-5.

6.1.6 Propustnost Marshallových těles

Propustnost zkoušených těles je stanovena dle odstavce 5.1.8 a výsledky jsou zobrazeny v tabulce 6.13. Propustnost je stanovena pouze na směsi asfaltového koberce drenážního PA 8, na asfaltovém betonu pro velmi tenké vrstvy BBTM 8 nemá význam tuto zkoušku provádět z důvodu nízké mezerovitosti V_m .

Minimální a maximální hodnota vertikální propustnosti dle ČSN EN 13108-7 (odstavec 5.4.3 – Tabulka 6 a 7) [18] odpovídá kategorii $K_{v0,5} = 0,5 * 10^{-3}$ m/s, což je pro asfaltové koberce drenážní spíše nízká hodnota.

Tabulka 6.13: Propustnost směsi PA 8

| propustnost PA 8 s 33 % TecRoad | | | | | | | | |
|---------------------------------|-----------------|-----------------------|------------------|----------|---------------------------------------|------------------------------------|--|--------|
| označení | čas prop. [sec] | m2 => nádoba+voda [g] | m1 => nádoba [g] | voda [g] | ver. průtok Q_v [m ³ /s] | vertikální propustnost K_v [m/s] | \emptyset vertikální propustnost K_v [m/s] | |
| 50 | PA 8 7,0 - 1 | 300 | 10210 | 3870 | 6340 | 2,1E-05 | 5,5E-4 | 5,7E-4 |
| | PA 8 7,0 - 2 | 300 | 11140 | 3870 | 7270 | 2,4E-05 | 6,4E-4 | |
| | PA 8 7,0 - 3 | 300 | 9895 | 3870 | 6025 | 2,0E-05 | 5,2E-4 | |

6.1.7 Ztráta částic Marshallových těles

Ztráta částic zkoušených těles je stanovena dle odstavce 5.1.9 a výsledky jsou zobrazeny v tabulce 6.14 a 6.15. Ztráta částic zkušebních těles se obvykle stanovuje pouze pro asfaltové koberce drenážní, zde uvedené výsledky pro asfaltový beton pro velmi tenké vrstvy jsou uvedeny pouze z mého vlastního zájmu porovnání zkoušek.

➤ Ztráta částic zkušebních těles pro směs PA 8

Kategorie ztráty částic dle ČSN EN 13108-7 (odstavec 5.6 – Tabulka 9) [18] odpovídá $PL_{15} = 15 \%$, což splňuje požadavek z Tabulky NA.6 [18] na maximální ztrátu částic PL_{30} .

Tabulka 6.14: Ztráta částic směsi PA 8

| ztráta částic zkušebního tělesa (ČSN EN 12697-17+A1) pro PA 8 | | | | |
|--|--|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|
| označení | počáteční hmotnost w1 [g] | konečná hmotnost w2 [g] | ztráta částic PL [%] | Ø PL |
| PA 8 7,0 - 1 | 1022,7 | 934,8 | 8,59 | 10,12 |
| PA 8 7,0 - 2 | 1023,6 | 902,1 | 11,87 | |
| PA 8 7,0 - 3 | 1021,3 | 920,3 | 9,89 | |

➤ Ztráta částic zkušebních těles pro směs BBTM 8

Ztráta částic dle ČSN EN 13108-7 (odstavec 5.6 – Tabulka 9) [18] odpovídá kategorii $PL_{10} = 10 \%$. Ztráta částic všech tří sad směsi BBTM 8 patří podle očekávání do nejvyšší kategorie podle normy ČSN EN 13108-7. Ztráta částic vykazala přímou závislost na dávkovaném obsahu pojiva, s rostoucím obsahem pojiva klesala hodnota ztráty částic zkušebních těles.

Tabulka 6.15: Ztráta částic směsi BBTM 8

| ztráta částic zkušebního tělesa dle ČSN EN 12697-17 pro BBTM 8 | | | | |
|--|--|--------------------------------------|----------------------------|------------|
| označení | počáteční hmotnost w1 [g] | konečná hmotnost w2 [g] | ztráta částic PL [%] | Ø PL |
| BBTM 8 7,0 - A | 1080,6 | 1021,9 | 5,4 | 5,7 |
| BBTM 8 7,0 - B | 1089 | 1023,8 | 6,0 | |
| BBTM 8 7,0 - C | 1108,4 | 1027,2 | 7,3 | |
| BBTM 8 7,5 - D | 1107,8 | 1062,8 | 4,1 | 5,2 |
| BBTM 8 7,5 - E | 1109,7 | 1047,7 | 5,6 | |
| BBTM 8 7,5 - F | 1109,6 | 1045,1 | 5,8 | |
| BBTM 8 8,0 - G | 1114,2 | 1078,9 | 3,2 | 3,9 |
| BBTM 8 8,0 - H | 1113,6 | 1072,7 | 3,7 | |
| BBTM 8 8,0 - CH | 1106,7 | 1051,4 | 5,0 | |

6.2 Výsledky pro vyhotovené desky

Na zhutněných deskách o tloušťce 40 mm je provedena zkouška odolnosti vůči vzniku trvalých deformací popsaná v odstavci 5.2.1.

Z důvodu úspory materiálu se z každé směsi vyhotovila pouze jedna deska.

6.2.1 Odolnost proti vzniku trvalých deformací

Jedná se o pojíždění kolem na zhutněné desce.

➤ Odolnost proti vzniku trvalých deformací pro směs PA 8

Tabulka 6.16: Objemová hmotnost a míra zhutnění směsi PA 8

| | v [mm] | dl [mm] | š [mm] | m [g] | obj. hmotnost [kg/m ³] | žádaná obj. hmotnost [kg/m ³] | míra zhutnění [%] |
|-------------------------|-----------|------------|-----------|----------|---------------------------------------|---|-------------------------|
| PA 8 7.0 % 33 TR | 40,3 | 322,1 | 261 | 6622 | 1955 | 1976 | 98,9 |

Tabulka 6.17: Naměřené hloubky vyjeté koleje pro směs PA 8

| Počet pojezdů = 2 x počet cyklů | teplota vzduchu [°C] | Y _s [mm] |
|------------------------------------|----------------------------|------------------------|
| 50 | 50 | 0 |
| 1 000 | | 0,34 |
| 2 500 | | 0,41 |
| 5 000 | | 0,49 |
| 7 500 | | 0,56 |
| 10 000 | | 0,57 |
| 15 000 | | 0,64 |
| 20 000 | | 0,66 |

Tabulka 6.18: Vyhodnocení výsledků zkoušky pojíždění kolem pro směs PA 8

| | | |
|--|--------------------|--------------------------------|
| Průměrný přírůstek hloubky vyjeté koleje za 1 000 zatěžovacích cyklů | WTS _{AIR} | 0,018 mm/10 ³ cyklů |
| Průměrná hloubka vyjeté koleje při 10 000 zatěžovacích cyklech | RD _{AIR} | 0,66 mm |
| Průměrná poměrná hloubka vyjeté koleje při 10 000 zatěžovacích cyklech | PRD _{AIR} | 1,7 % |

➤ **Odolnost proti vzniku trvalých deformací pro směs BBTM 8**

Tabulka 6.19: Objemová hmotnost a míra zhutnění směsi BBTM 8

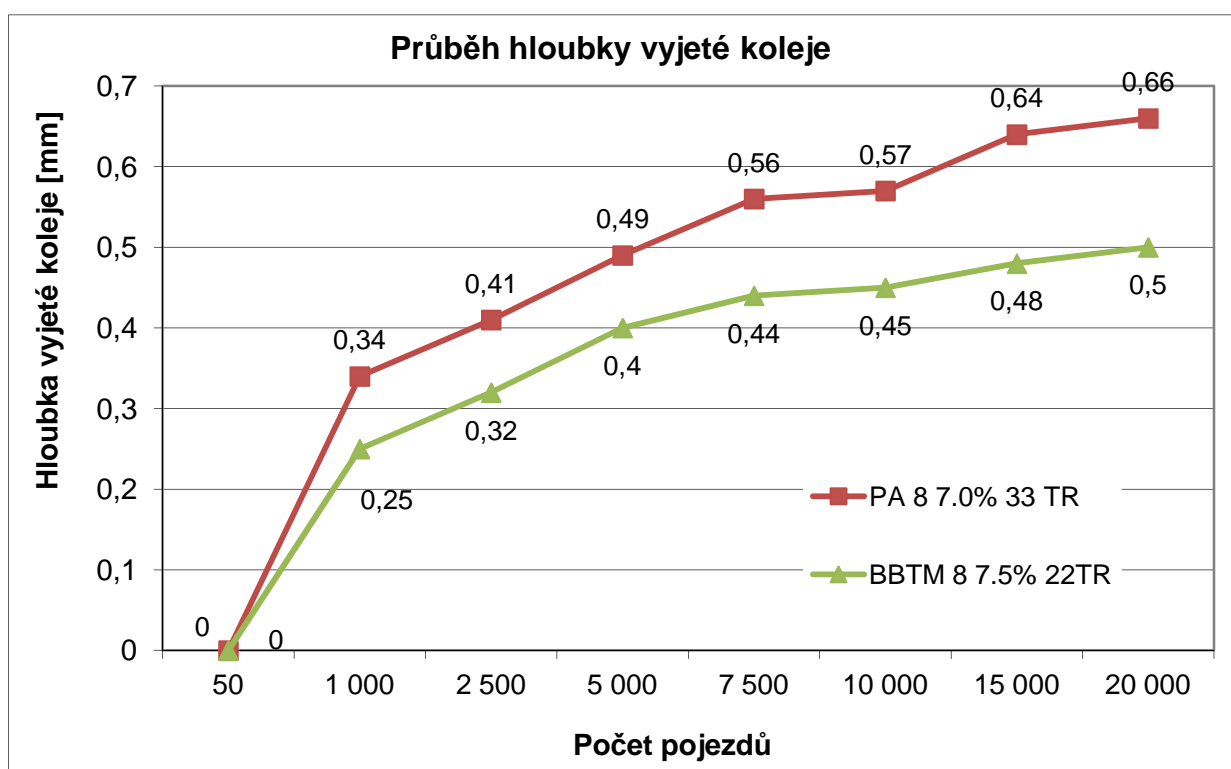
| | v [mm] | dl [mm] | š [mm] | m [g] | obj. hmotnost [kg/m ³] | žádaná obj. hmotnost [kg/m ³] | míra zhutnění [%] |
|--------------------------|-----------|------------|-----------|----------|---------------------------------------|---|-------------------------|
| BBTM 8 7.5 % 22TR | 40 | 322 | 260,9 | 7452 | 2218 | 2253 | 98,4 |

Tabulka 6.20: Naměřené hloubky vyjeté koleje pro směs BBTM 8

| Počet pojezdů = 2 x počet cyklů | teplota vzduchu [°C] | Y _s [mm] |
|------------------------------------|-------------------------|------------------------|
| 50 | 50 | 0 |
| 1 000 | | 0,25 |
| 2 500 | | 0,32 |
| 5 000 | | 0,4 |
| 7 500 | | 0,44 |
| 10 000 | | 0,45 |
| 15 000 | | 0,48 |
| 20 000 | | 0,5 |

Tabulka 6.21: Vyhodnocení výsledků zkoušky poježdění kolem pro směs BBTM 8

| | | |
|--|--------------------|-------------------------------|
| Průměrný přírůstek hloubky vyjeté koleje za 1 000 zatěžovacích cyklů | WTS _{AIR} | 0,01 mm/10 ³ cyklů |
| Průměrná hloubka vyjeté koleje při 10 000 zatěžovacích cyklech | RD _{AIR} | 0,50 mm |
| Průměrná poměrná hloubka vyjeté koleje při 10 000 zatěžovacích cyklech | PRD _{AIR} | 1,3 % |



Graf 6.8: Grafické porovnání průběhu vyjeté koleje na zkoumaných směsích

Směs BBTM 8 vykazuje vyšší odolnost vůči vzniku trvalé deformace než směs PA 8, což je pravděpodobně zapříčiněno nižší mezerovitostí směsi.

Podle ČSN EN 13108-2 [19] patří směs BBTM 8 do kategorie maximální poměrné hloubky vyjeté koleje P_5 , což znamená do nejvyšší kategorie.

Na zkoušku odolnosti vůči trvalým deformacím drenážního koberce není v normě ČSN EN 13108-7 ani v národní příloze téže normy definován požadavek.

V porovnání s asfaltovým betonem (AC) dle ČSN EN 13108-1 [29] kapitoly 5.3.6 Tabulky 18 – Odolnost proti trvalé deformaci, jsou nejvyšší kategorie, jak maximální přírůstek vyjždění kolejí ($WTR_{SDair5,0}=5,0$ mm/h), tak i maximální hloubka vyjeté koleje ($RD_{SDair3,0}=3,0$ mm), mnohonásobně nižší u navrhovaných směsí PA 8 ($WTS_{AIR}=0,018$ mm/1 000cyklů a $RD_{AIR}=0,66$ mm) a BBTM 8 ($WTS_{AIR}=0,01$ mm/1 000cyklů a $RD_{AIR}=0,5$ mm), než u klasického asfaltového betonu, což vyjadřuje vyšší odolnost vůči trvalé deformaci.



Obrázek 6.1: Záznam vyjeté koleje pro směs PA 8



Obrázek 6.2: Záznam vyjeté koleje pro směs BBTM 8

Obrázek 6.1 a 6.2 zobrazuje nepatrnou hloubku vyjeté koleje pro dané směsi.

6.3 Výsledky stanovené na trámečcích

Na trámečcích vyrobených dle odstavce 4.5.1 se stanovují pouze nízkoteplotní charakteristiky dané směsi.

6.3.1 Rozměry a hmotnost trámečků

V tabulce 6.22 a 6.23 jsou uvedeny rozměry a hmotnosti jednotlivých zkušebních těles ve tvaru trámečku.

➤ Rozměry zkušebních těles pro směs PA 8

Tabulka 6.22: Rozměry a hmotnosti trámečků směsi PA 8

| PA 8 7 % TR 33 % | označení | délka [mm] | výška [mm] | šířka [mm] | hmotnost [g] |
|------------------------|----------|------------|------------|------------|--------------|
| | 1.1 | 199,70 | 50,30 | 50,50 | 1003,90 |
| | 1.2 | 199,30 | 50,00 | 50,50 | 999,70 |
| | 1.3 | 199,00 | 50,20 | 50,40 | 993,60 |
| | 1.4 | 199,00 | 50,20 | 50,40 | 994,10 |
| | 1.5 | 198,90 | 50,50 | 49,80 | 991,70 |

➤ Rozměry zkušebních těles pro směs BBTM 8

Tabulka 6.23: Rozměry a hmotnosti trámečků pro směs BBTM 8

| BBTM 8 7,5 % TR 22 % | označení | délka [mm] | výška [mm] | šířka [mm] | hmotnost [g] |
|----------------------------|----------|------------|------------|------------|--------------|
| | 4.1 | 200,2 | 49,7 | 49,6 | 1087,1 |
| | 4.2 | 200,1 | 49,6 | 49,7 | 1086,8 |
| | 4.3 | 200,2 | 49,4 | 49,5 | 1085,2 |
| | 4.4 | 200,2 | 49,5 | 49,7 | 1103,6 |
| | 4.5 | 200,3 | 49,6 | 49,7 | 1114,6 |

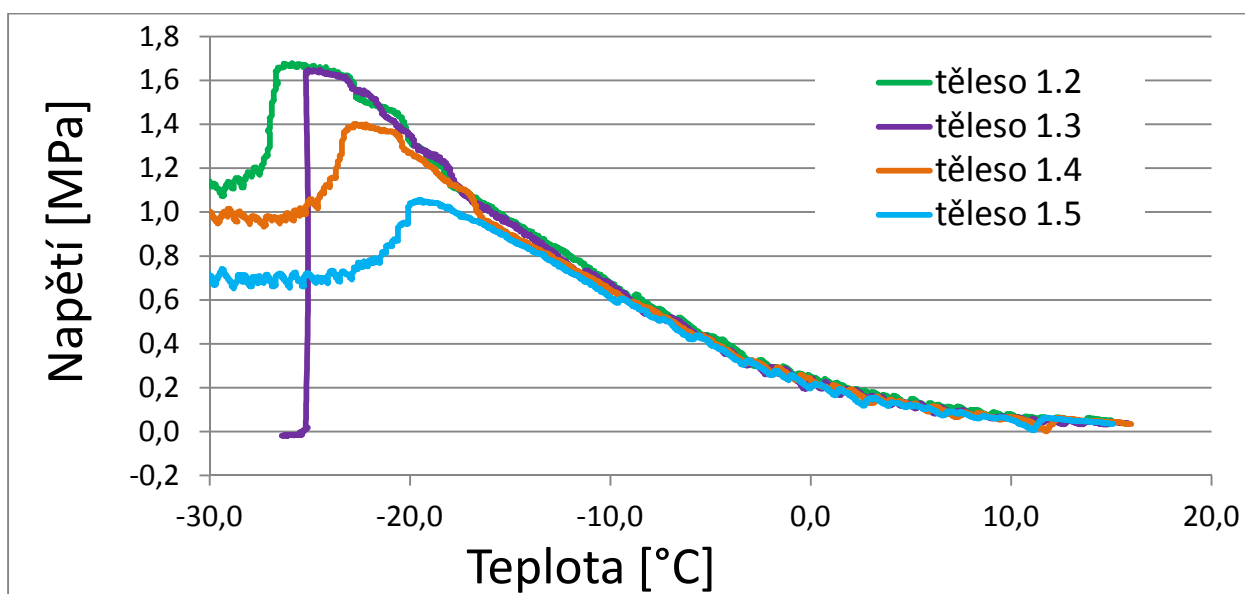
6.3.2 Nízkoteplotní vlastnosti asfaltových směsí

Postup zkoušky je popsán v odstavci 5.3.1 a výsledky ze zkoušky uvádí Tabulka 6.24 a 6.25. V Grafu 6.9 a 6.10 je znázorněna zkouška a její postup je zprava doleva do klesajících hodnot teploty.

➤ **Nízkoteplotní vlastnosti zkušebních těles pro směs PA 8**

Tabulka 6.24: Vlastnosti tělesa při jeho porušení směsi PA 8

| Asfaltová směs: | PA8 7TR 1.2 | PA8 7TR 1.3 | PA8 7TR 1.4 | PA8 7TR 1.5 | Ø PA 8 |
|----------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------|
| Max. síla při porušení [kN] | 4,20 | 4,12 | 3,50 | 2,64 | 3,61 |
| Max. napětí při porušení [MPa] | 1,66 | 1,63 | 1,40 | 1,06 | 1,44 |
| Teplota vzorku při porušení [°C] | -25,9 | -24,5 | -22,8 | -19,5 | -23,2 |

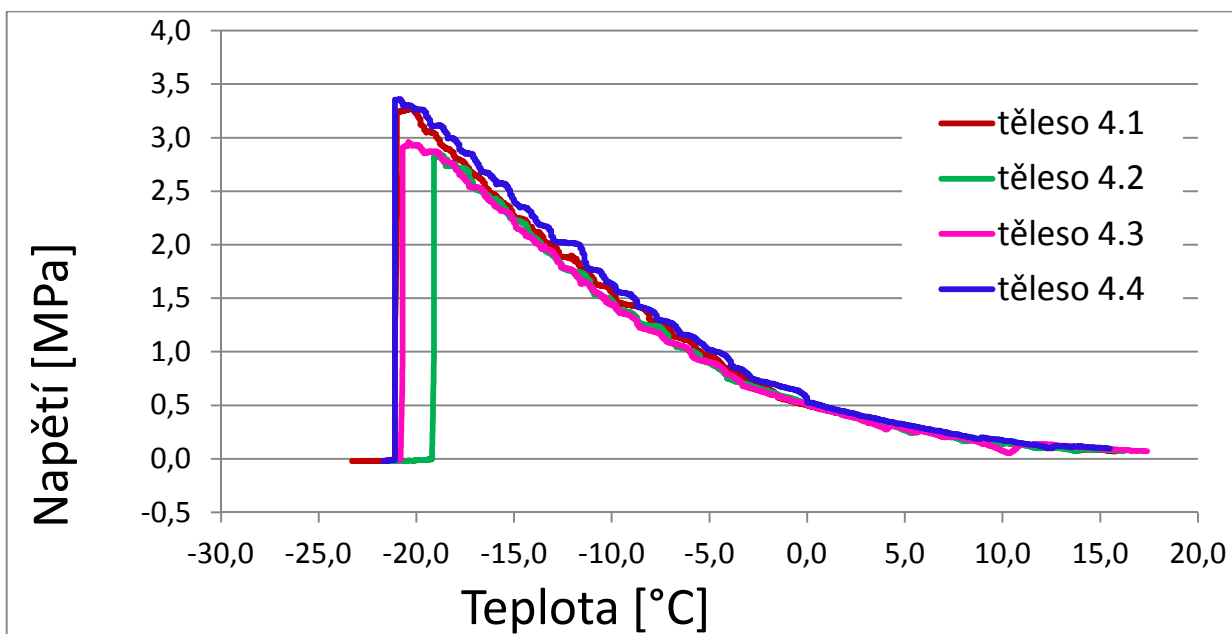


Graf 6.9: Závislost zvyšování napětí za snižování teploty pro směs PA 8

➤ **Nízkoteplotní vlastnosti zkušebních těles pro směs BBTM 8**

Tabulka 6.25: Vlastnosti tělesa při jeho porušení směsi BBTM 8

| Asfaltová směs: | BBTM 8 7,5TR 4.1 | BBTM8 7,5TR 4.2 | BBTM8 7,5TR 4.3 | BBTM 8 7,5TR 4.4 | Ø BBTM 8 |
|----------------------------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------------|----------|
| Max. síla při porušení [kN] | 8,2 | 7,1 | 7,4 | 8,4 | 7,77 |
| Max. napětí při porušení [MPa] | 3,3 | 2,9 | 3,0 | 3,4 | 3,15 |
| Teplota vzorku při porušení [°C] | -20,3 | -18,8 | -20,4 | -20,9 | -20,1 |



Graf 6.10: Závislost zvyšování napětí za snižování teploty pro směs BBTM 8

Směs PA 8 dosahovala lepších nízkoteplotních charakteristik než BBTM 8. Směs BBTM 8 se mrazovou trhlinou porušovala při teplotě kolem $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, zatímco nejvyšších tahových napětí dosahovala směs PA 8 kolem teploty $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$. Navíc se většina těles směsi PA 8 neporušila tahovou trhlinou, pouze pokleslo tahové napětí se zachováním zbytkového napětí. Lze to vysvětlit vysokým součinitelem sytosti směsi PA 8 (5,35) a tudíž velkou teoretickou tloušťkou filmu pojiva na povrchu kameniva ($13,35 \cdot 10^{-3}\text{ mm}$) oproti součiniteli sytosti směsi BBTM 8 (5,15) a nižší tloušťkou filmu pojiva ($8,24 \cdot 10^{-3}\text{ mm}$). Směs BBTM 8 vykazovala přibližně dvojnásobné maximální napětí v tahu, což lze vysvětlit opět tloušťkou filmu pojiva a vyšším obsahem jemného kameniva směsi BBTM 8. (tj. více dotyků mezi zrny vytvoří celkově vyšší pevnost)

6.4 Výsledky zkoušek stanovené na komolých klínech (trapezoidech)

Dále budou popsány výsledky naměřené na trapezoidech nařezaných z desek. Postup výpočtu je popsán v odstavci 5.4.1 a 5.4.2.

6.4.1 Rozměry a hmotnosti trapezoidů

Hmotnosti a rozměry jsou důležité pro zadávání do programu při měření modulů tuhosti a odolnosti proti únavě.



Obrázek 6.3 : Měření rozměrů trapezoidů

➤ rozměry zkušebních komolých klínů pro směs PA 8

Tabulka 6.26: Rozměry a hmotnosti komolých klínů pro směs PA 8

| PA 8 7 % TR 33 % | označení | h1 [mm] | h2 [mm] | c[mm] | l [mm] | hmotnost [mm] |
|------------------------|----------|---------|---------|-------|--------|---------------|
| | 2.1 | 70,5 | 26 | 40,9 | 251 | 945,7 |
| | 2.2 | 69,9 | 25,2 | 41,1 | 251,2 | 938,9 |
| | 2.3 | 70 | 23,3 | 41,3 | 251,2 | 925,9 |
| | 2.4 | 69,9 | 25,4 | 40,9 | 251,6 | 947,3 |
| | 2.5 | 70 | 25,4 | 41,1 | 251,5 | 957,4 |
| | 3.1 | 70,3 | 24 | 40,7 | 250,2 | 951,6 |
| | 3.2 | 70 | 24,9 | 40,3 | 250 | 932,2 |
| | 3.3 | 70,2 | 27,3 | 40,1 | 249,9 | 958,5 |
| | 3.4 | 70 | 24,2 | 40 | 250 | 908,8 |
| | 3.5 | 70,5 | 25,3 | 40 | 250 | 936,4 |
| | 4.1 | 70 | 26 | 40,8 | 247,9 | 934,1 |
| | 4.2 | 70 | 25 | 40,2 | 248 | 926,8 |
| | 4.3 | 70,2 | 25 | 40,1 | 248,4 | 918,9 |
| | 4.4 | 70,1 | 25,2 | 40,2 | 248,7 | 921,8 |
| 4.5 | 70,5 | 25,4 | 40,5 | 248,9 | 944,3 | |

➤ rozměry zkušebních komolých klínů pro směs BBTM 8

Tabulka 6.27: Rozměry a hmotnosti komolých klínů pro směs BBTM 8

| BBTM 8 7,5 % TR 22 % | označení | h1 [mm] | h2 [mm] | c[mm] | l [mm] | hmotnost [mm] |
|----------------------------|----------|---------|---------|-------|--------|---------------|
| | 1.1 | 68,1 | 25,3 | 40,2 | 250,8 | 1080,9 |
| | 1.2 | 67,8 | 24,8 | 40 | 250,6 | 1053,6 |
| | 1.3 | 68,1 | 25,8 | 39,7 | 250,3 | 1032,8 |
| | 1.4 | 68 | 25,5 | 39,6 | 250 | 1012,1 |
| | 1.5 | 68,8 | 26,2 | 39,7 | 249,7 | 1040,6 |
| | 2.1 | 68,4 | 25,6 | 40,3 | 249,6 | 1046,6 |
| | 2.2 | 68,7 | 25,8 | 40 | 249,8 | 1031,7 |
| | 2.3 | 70,6 | 25,7 | 39,9 | 249,9 | 1044 |
| | 2.4 | 70,6 | 25,4 | 40 | 250 | 1052,1 |
| | 2.5 | 70,9 | 26,2 | 40 | 249,9 | 1063,7 |
| | 3.1 | 69,7 | 25 | 39,9 | 248,1 | 1051 |
| | 3.2 | 70,5 | 26,1 | 39,7 | 248,4 | 1042,4 |
| | 3.3 | 70,9 | 25,4 | 39,6 | 248,8 | 1037,3 |
| | 3.4 | 70,9 | 25,3 | 39,7 | 249,1 | 1033,9 |
| | 3.5 | 71,1 | 24,9 | 39,7 | 249,4 | 1044,2 |

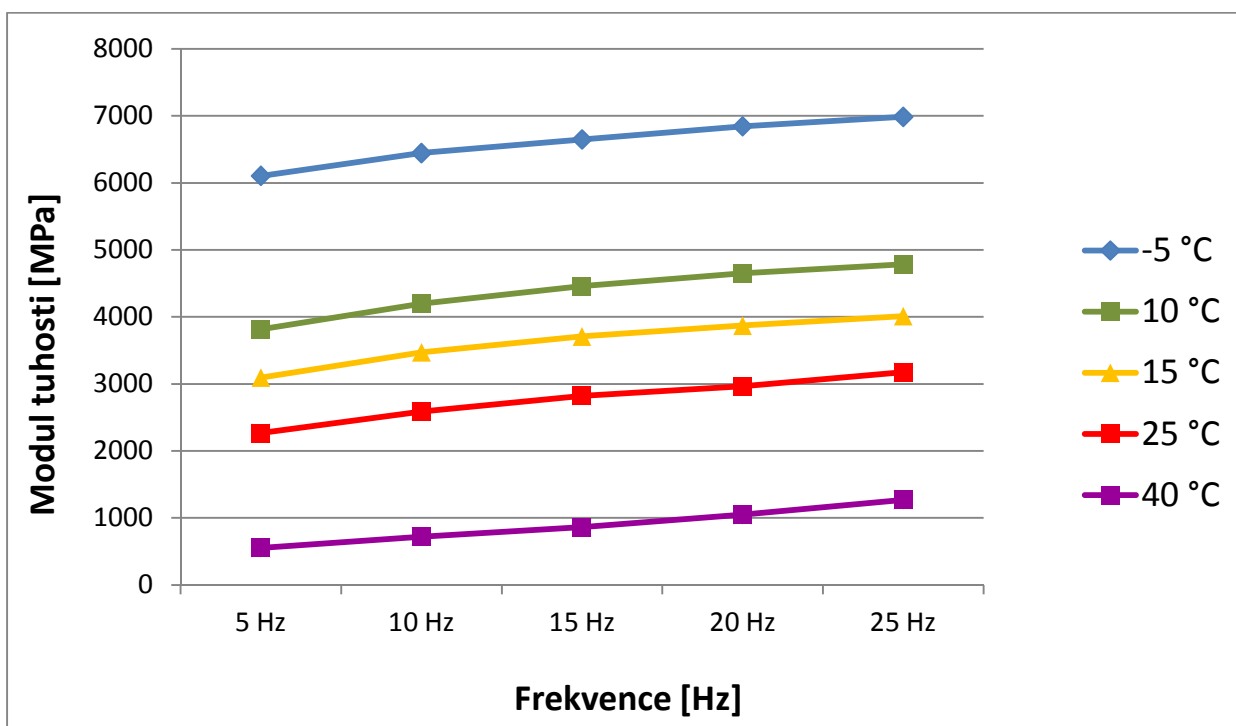
6.4.2 Modul tuhosti asfaltové směsi

Komplexní modul tuhosti je stanoven při teplotách -5 °C, 10 °C, 15 °C, 25 °C a 40 °C a při frekvencích zatěžování 5, 10, 15, 20 a 25 Hz.

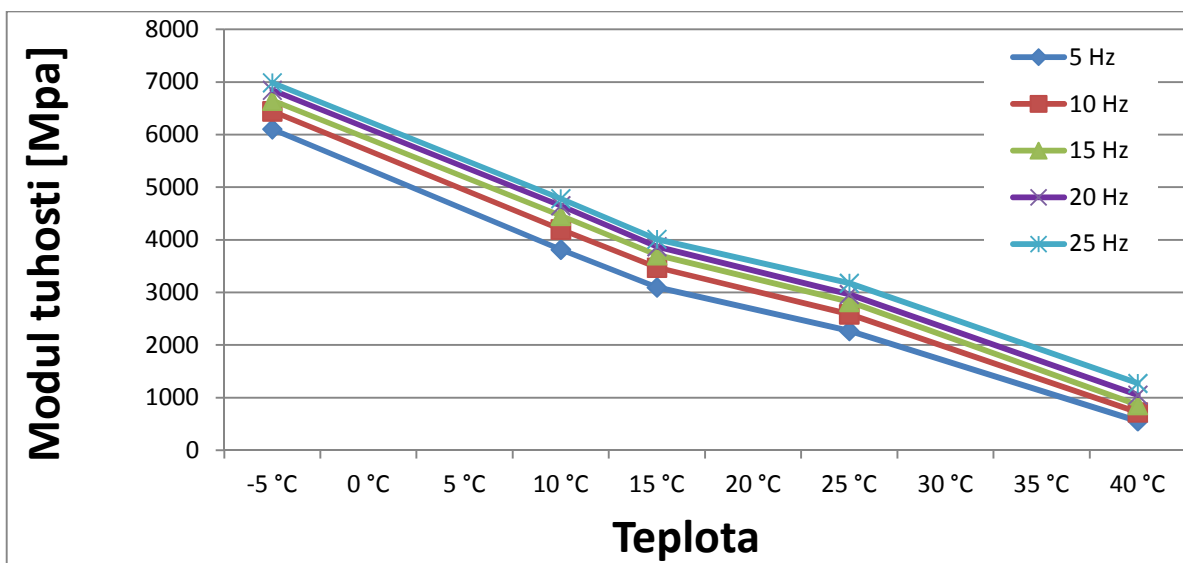
➤ Moduly tuhosti komolých klínů pro směs PA 8

Tabulka 6.28: Moduly tuhosti směsi PA 8

| | 5 Hz | 10 Hz | 15 Hz | 20 Hz | 25 Hz |
|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| -5 °C | 6105 | 6445 | 6649 | 6845 | 6987 |
| 10 °C | 3816 | 4198 | 4460 | 4649 | 4784 |
| 15 °C | 3096 | 3472 | 3709 | 3872 | 4012 |
| 25 °C | 2267 | 2587 | 2823 | 2963 | 3176 |
| 40 °C | 554 | 720 | 861 | 1049 | 1271 |



Graf 6.11: Moduly tuhosti směsi PA 8 v závislosti na frekvenci

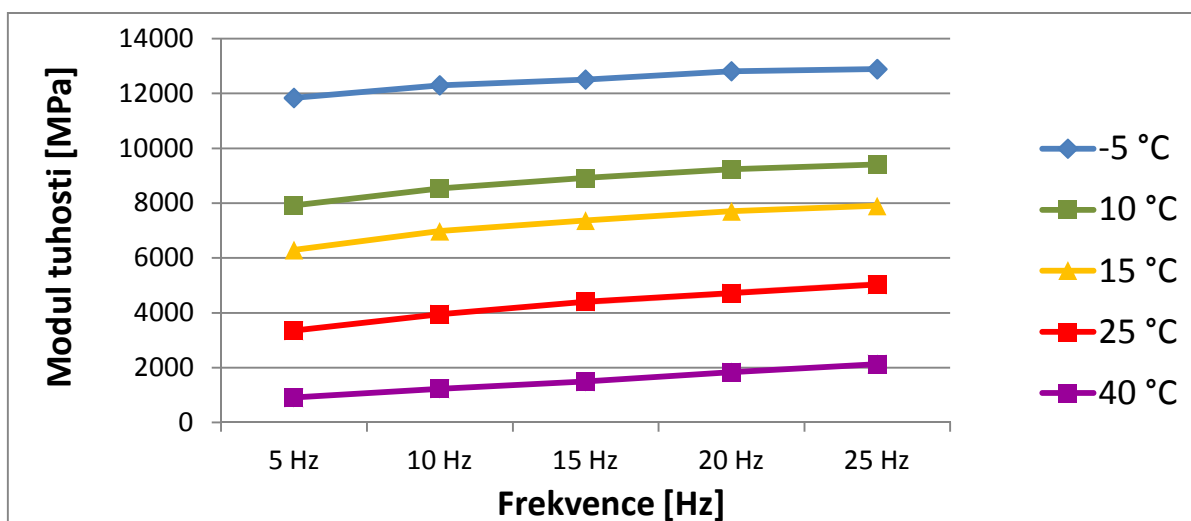


Graf 6.12: Moduly tuhosti v závislosti na teplotě pro směs PA 8

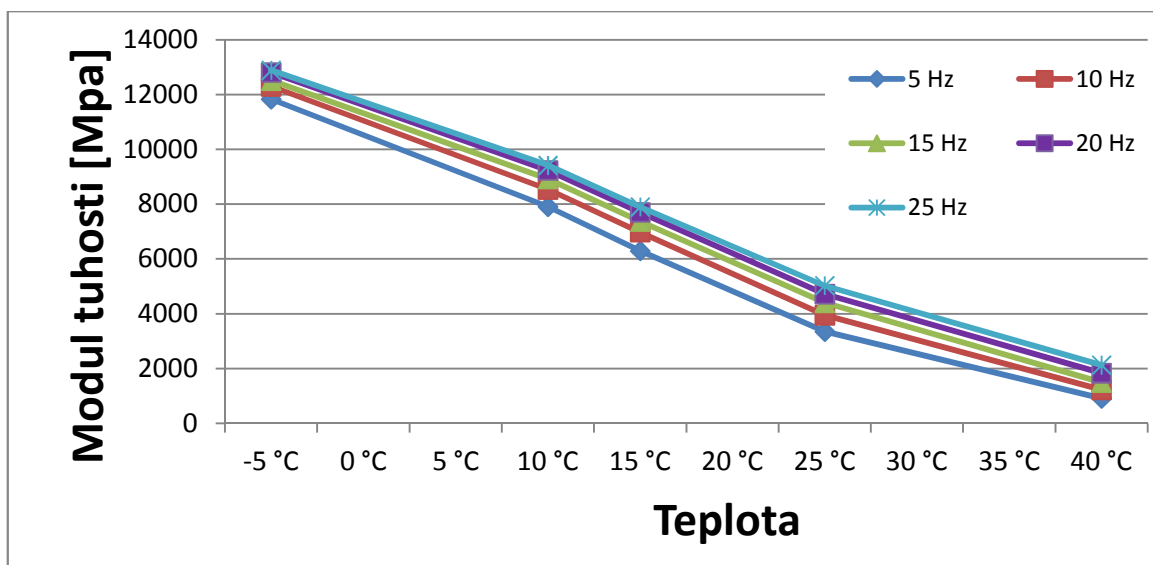
➤ **Moduly tuhosti komolých klínů pro směs BBTM 8**

Tabulka 6.29: Moduly tuhosti směsi BBTM 8

| | 5 Hz | 10 Hz | 15 Hz | 20 Hz | 25 Hz |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| -5 °C | 11838 | 12299 | 12510 | 12813 | 12887 |
| 10 °C | 7912 | 8537 | 8920 | 9234 | 9417 |
| 15 °C | 6293 | 6980 | 7369 | 7704 | 7902 |
| 25 °C | 3350 | 3949 | 4401 | 4718 | 5028 |
| 40 °C | 909 | 1225 | 1493 | 1834 | 2126 |

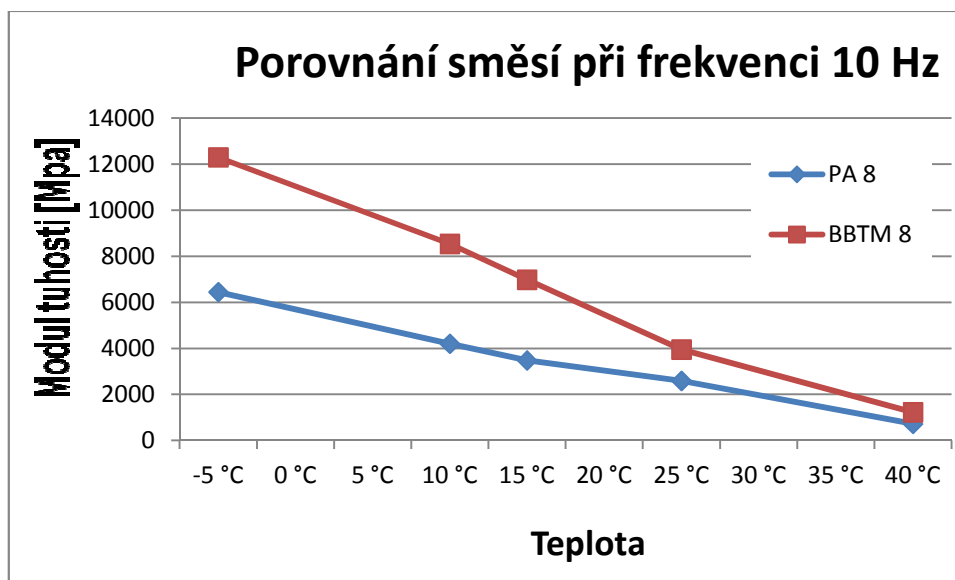


Graf 6.13: Moduly tuhosti směsi BBTM 8 v závislosti na frekvenci



Graf 6.14: Moduly tuhosti v závislosti na teplotě pro směs BBTM 8

Komplexní modul tuhosti při frekvenci 10 Hz při zobrazení obou směsí (Graf 6.15).



Graf 6.15 : Porovnání směsí PA 8 a BBTM 8 při frekvenci 10 Hz

Hodnota modulu tuhosti směsi PA 8 při teplotě 15 °C a frekvenci zatěžování 10 Hz je 3472 MPa a modul tuhosti směsi BBTM 8 stanovený za stejných podmínek je 6980 MPa. Jak je vidět na grafu 6.15 směs PA 8 má nižší komplexní modul tuhosti. Lze to vysvětlit větší tloušťkou pojiva na povrchu kameniva směsi PA 8 a také vyšší mezerovitostí této směsi. Podle tabulky 22 normy ČSN EN 13108-1 (pro asfaltové betony) lze zařadit tuhost směsi PA 8 do kategorie $S_{\min 2800}$ a tuhost směsi BBTM 8 do kategorie $S_{\min 5500}$, přičemž požadavek funkčního přístupu národní přílohy normy ČSN EN 13108-1 pro směsi asfaltových betonů obrusných vrstev je stanoven na 7000 MPa. Tuto hodnotu téměř splňuje směs BBTM 8.

Pokud by se měla navrhovat vozovka podle návrhové metody TP 170 (část B – Tabulka 1) [30], tak je potřebné dodržení návrhových modulů pružnosti směsi s CRmB. Kdyby se směs měla použít pro vozovky s dopravním zatížením vyšším než II třída, tak by se návrhové charakteristiky měli stanovit podle ČSN EN 12697-26 [11] a ČSN EN 12697-24 [10], tak jak je použito v této práci. Ačkoli je podle TP 170 [30] stanoven modul tuhosti pro směs PA 8 B (asfaltový koberec drenážní s mezerovitostí směsi mezi 18 % a 22 %) $S_{\min 3600}$, tak navrhovaná směs PA 8 této kategorii téměř odpovídá při hodnotě modulu tuhosti $S = 3472$ MPa. Pro směs asfaltového koberce pro velmi tenké vrstvy BBTM 8 B je kategorie $S_{\min 5500}$, které navrhovaná směs BBTM 8 odpovídá.

6.4.3 Odolnost asfaltové směsi vůči únavě

Únavové charakteristiky byly měřeny na zkušebních tělesech (trapezoidech) a to po naměření modulů tuhosti.

Hodnota **B** vyjadřuje sklon únavové přímky. Hodnota **R²** je korelační koeficient popisující rozptýlení bodů kolem únavové přímky na Wöhlerově diagramu. Hodnota **ϵ_6** vyjadřuje přetvoření při jednom milionu cyklů a je v jednotce 10^{-6} označované jako mikrostrain.

Následně je zobrazen Wohllerův diagram znázorňující únavové vlastnosti při teplotě 10 °C a frekvenci 25 Hz.

➤ Odolnost vůči únavě pro směs PA 8

Tabulka 6.30: Výsledky únavových charakteristik směsi PA 8

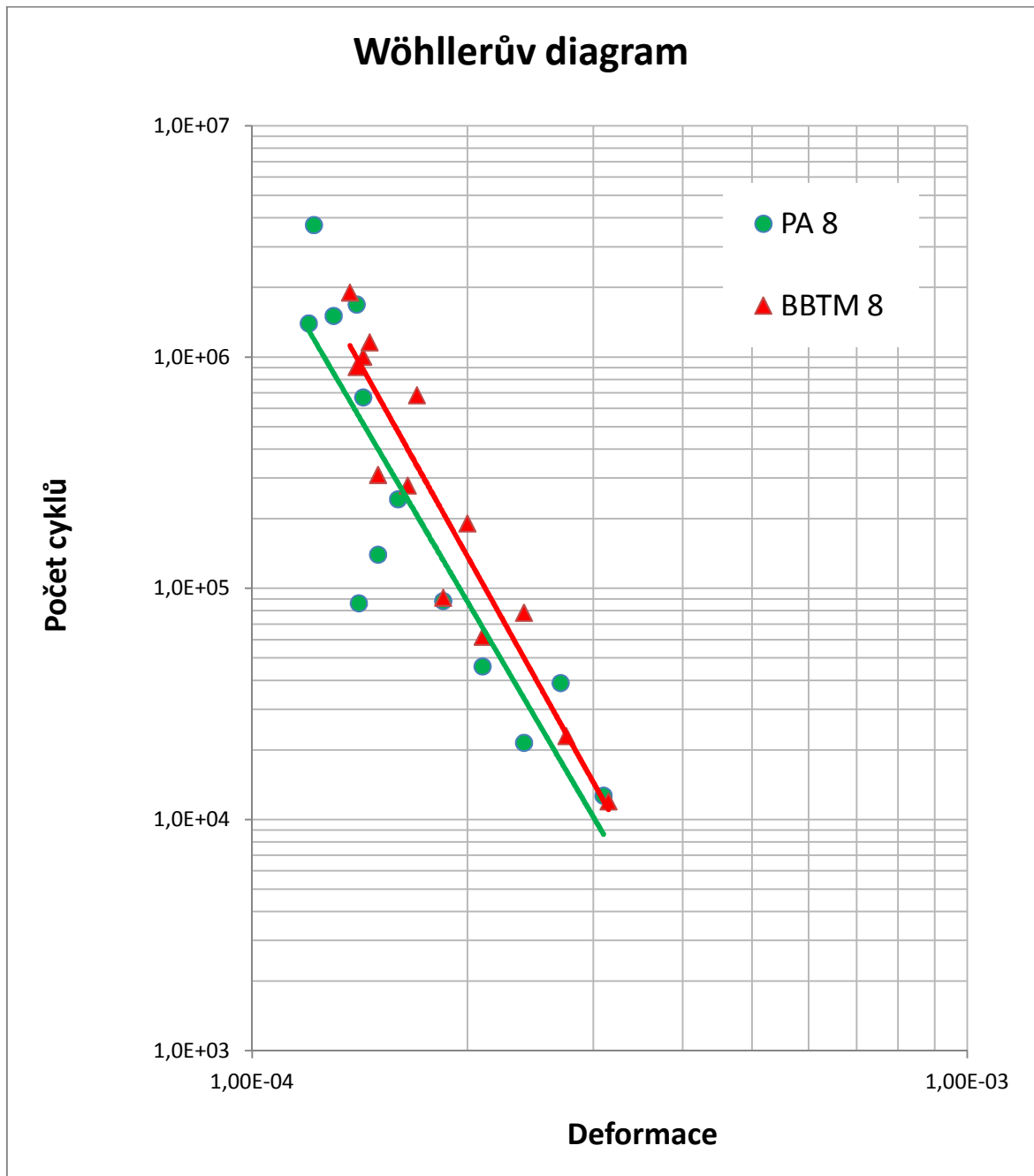
| zkušební těleso | Poměrné přetvoření | Počet cyklů | Únavové charakteristiky | | |
|-----------------|--------------------|-------------|-------------------------|----------------|-------------------------------------|
| | | | B | R ² | ϵ_6 [10 ⁻⁶] |
| 1 | 0,0001600 | 243000 | 5,28 | 0,79 | 126,1 |
| 2 | 0,0001500 | 140000 | | | |
| 3 | 0,0001400 | 1690000 | | | |
| 4 | 0,0001430 | 670000 | | | |
| 5 | 0,0002100 | 46000 | | | |
| 6 | 0,0002400 | 21500 | | | |
| 7 | 0,0001850 | 88200 | | | |
| 8 | 0,0001200 | 1400000 | | | |
| 9 | 0,0001220 | 3730000 | | | |
| 10 | 0,0001300 | 1509000 | | | |
| 11 | 0,0002700 | 39000 | | | |
| 12 | 0,0003100 | 12700 | | | |

➤ **Odolnost vůči únavě pro směs BBTM 8**

Tabulka 6.31: Výsledky únavových charakteristik směsi BBTM 8

| zkušební těleso | Poměrné přetvoření | Počet cyklů | Únavové charakteristiky | | |
|-----------------|--------------------|-------------|-------------------------|----------------|-------------------------------------|
| | | | B | R ² | ϵ_6 [10 ⁻⁶] |
| 1 | 0,0001430 | 1003600 | 5,55 | 0,90 | 139,8 |
| 2 | 0,0001850 | 91280 | | | |
| 3 | 0,0001650 | 278600 | | | |
| 4 | 0,0002100 | 61888 | | | |
| 5 | 0,0002400 | 78500 | | | |
| 6 | 0,0001400 | 906500 | | | |
| 7 | 0,0001370 | 1906400 | | | |
| 8 | 0,0001500 | 310000 | | | |
| 9 | 0,0001460 | 1160000 | | | |
| 10 | 0,0001700 | 685000 | | | |
| 11 | 0,0002750 | 23000 | | | |
| 12 | 0,0002000 | 191000 | | | |
| 13 | 0,0003150 | 12000 | | | |

➤ Porovnání navrhovaných směsí PA 8 a BBTM 8 pomocí Wöhlerova diagramu



Graf 6.16: Wohllerův diagram pro porovnání směsi PA 8 a BBTM 8

Podle TP 170 (část B) by měli minimální hodnoty poměrného přetvárnosti ε_6 být v rozmezí 160 až 190, bohužel pro navrhované směsi nebylo těchto hodnot dosaženo, což podle TP 170 pouze neodpovídá možnosti k výraznému snížení tloušťek asfaltových vrstev. Na druhou stranu směsi převyšují hodnotu minimálního sklonu únavové regresní křivky B odpovídajícímu dle TP hodnotě 5. Vždy je ale nutné ověřit odolnost vůči únavě na zkušebních úsecích.

Směs PA 8 splňuje kategorii odolnosti vůči únavě ϵ_{6-115} podle ČSN EN 13108-1 [29] pro směsi asfaltového betonu a směs BBTM 8 splňuje kategorii odolnosti vůči únavě ϵ_{6-130} podle téže normy (tabulka 25). Požadovaná kategorie národní přílohou normy ČSN EN 13108-1 pro ložní a podkladní vrstvy směsí asfaltového betonu je ϵ_{6-115} . Z důvodu vysokého obsahu pružného pojiva s obsahem částic pryže vykazují směsi kvalitní únavové charakteristiky.

6.5 Souhrn výsledků

V této kapitole budou stručně shrnuty výsledky zkoušených směsí včetně porovnání se směsí asfaltového koberce drenážního PA 8 s 5,5 % PmB⁶ 60-105/75 [24] a PA 8 s 8 % CRmB zjištěné z [31] pro porovnání těchto modifikovaných směsí.

Jako výsledný návrh je stanoveno pro směs asfaltového koberce drenážního (PA 8) 7 % pojiva a pro směs asfaltového betonu pro velmi tenké vrstvy (BBTM 8) 7,5 % pojiva.

Tabulka 6.32: Porovnání výsledků

| Směs | PA 8 | BBTM 8 | PA 8 | PA 8 |
|--|------------------------|------------------------|----------------------|----------------------|
| Obsah pojiva [%] | 7,0 | 7,5 | 5,5 | 8,0 |
| Typ přísady | RmB G (TecRoad) | | PmB 60-105/75 [24] | CRmB 0/0,7 [31] |
| Obsah přísady [%] | 33 | 22 | | 15,3 |
| Objemová hmotnost [kg/m ³] | 1975 | 2184 | 1931 | 2012 |
| Maximální objemová hmotnost [kg/m ³] | 2435 | 2417 | 2470 | 2382 |
| Mezerovitost [%] | 18,9 | 6,8 | 21,9 | 15,5 |
| Mezerovitost směsi kameniva VMA | 32,2 | 23,0 | 32,2 | 31,3 |
| Stupeň vyplnění mezer pojivem VFB | 41,3 | 70,5 | 32,0 | 50,0 |
| Tloušťka filmu pojiva [mm] | 13,1E-03 | 8,1E-03 | 10,5E-03 | 14,8E-03 |
| Součinitel sytosti | 5,35 | 5,15 | 4,17 | 6,15 |
| Průměrná vertikální propustnost Kv [%] | 5,7E-04 | x | 1,6E-03 | 1,6E-03 |
| Ztráta částic PL [%] | 10,12 | 5,2 | 8,4 | 4,1 |
| Odolnost vůči vodě,ITSR [%] | 51,7 | 64,9 | 73,2 | 75 |
| Odolnost vůči trvalým deformacím WTS _{AIR} /RD _{AIR} /PRD _{AIR} [mm/10 ³ cyklů / mm / %] | 0,018/0,66/1,7 | 0,01/0,5/1,3 | 0,024/0,83/2,1 | 0,024/0,83/2,1 |
| Odolnost proti trhlinám [°C] | -23,2 | -20,1 | -22,5 | -25,1 |
| Pevnost v tahu [MPa] | 1,44 | 3,15 | 1,57 | 1,5 |
| Modul tuhosti dle TP 170 při 15 °C a 10 Hz [MPa] | 3472 | 6980 | 4091 | 4095 |
| Poměrné přetvoření ϵ_6 při 1 milionu cyklů (při 10 °C a 25 Hz) | 126,1*10 ⁻⁶ | 139,8*10 ⁻⁶ | 112*10 ⁻⁶ | 161*10 ⁻⁶ |
| Sklon únavové regresní křivky B | 5,28 | 5,55 | 4,41 | 6,2 |

⁶ PmB – Polymer-modified bitumen - asfalt modifikovaný polymery

Z naměřených hodnot zobrazených v souhrnné tabulce 6.32 vyplývá, že navržená směs asfaltového koberce drenážního (PA 8 s přísadou TecRoad) má nižší mezerovitost a vyšší odolnost vůči mrazovým trhlinám, a také lepší únavové charakteristiky než PA 8 PmB. Většina těles směsi PA 8 nebyla ve zkoušce nízkoteplotních vlastností TSRST porušena tahovou trhlinou, ale pouze pokleslo tahové napětí vytvořením rozptýlených trhlin (např. v kamenivu), které následně při zachování zbytkového napětí, což lze vysvětlit vysokým součinitelem sytosti a velkou teoretickou tloušťkou filmu pojiva na povrchu kameniva. Kvalitní nízkoteplotní charakteristiky potvrzuje i AV'11 [32], kde je uvedeno, že směsi s přísadou TecRoad vykazují nižší teplotu porušení při zkoušce TSRST. Únavové vlastnosti ve srovnání se směsí PA 8 s CRmB 25/50-60 vyzkoušenou v ČR mají obě směsi (s TecRoad a PmB 25/40-75) podstatně nižší. Je možné se domnívat, že uvedená dávkování těchto směsí jsou nízká. Dávkování pojiva TecRoad doporučil výrobce přísady na základě zkušeností z Německa, ale je možné, že v krutých zimních podmínkách, jaké se u nás vyskytují, by uvedené směsi nemusely ve vozovkách vydržet.

Oproti tomu asfaltový beton pro velmi tenké vrstvy (BBTM 8) vykazuje vyšší odolnost vůči vodě a také vyšší hodnoty komplexního modulu tuhosti a to i přes vyšší dávkování pojiva než PA 8 s TecRoad.

Vrstva navržené směsi asfaltového koberce drenážního PA 8 s přísadou TecRoad podle ČSN EN 13108-7 [18] odpovídá požadavkům z Tabulky NA.6 [18] na mezerovitost a ztrátu částic. Minimální vertikální propustnost se požaduje pouze při minimální mezerovitosti zkušebního tělesa, tudíž není nedostatkem nízká propustnost směsi PA 8.

Navržené směsi splňují požadavky předpokládané v příslušných národních přílohách dotčených norem. Při porovnání navržené směsi drenážního koberce s přísadou TecRoad a směsí s asfaltem modifikovaným polymerem je největší rozdíl v odolnosti vůči vodě a to o třetinu, tato zkouška je ovšem nespolehlivá pro směsi s vysokou mezerovitostí a tloušťkou pojiva.

Největší rozdíl je ve zkouškách únavy, podstatně lepší výsledky u PA s TecRoad mohou znamenat vyšší odolnost vůči namáhání a vyšší trvanlivost obrusné vrstvy.

Výrobce navržené dávkování koncentráту TecRoad do jednotlivých typů směsí (22 % do BBTM a 33 % do PA) se zdá vyhovující řešení. Drenážní koberce totiž potřebují pro dostatečnou životnost pojivo vysoce viskózní, zatímco u uzavřenějších typů směsí (s plynulejším vedením čáry zrnitosti směsi kameniva) by bylo problematické vysoký obsah částic pryže do mezer mezi kamenivo umístit. Proto se jeví vhodné do těchto směsí použít CRmB s nižší viskozitou.

Při výrobě asfaltové směsi obsahující přísadu TecRoad je jediným rozdílem nutnost dávkovat koncentrát do asfaltové směsi. Proto je nutné, aby běžná obalovna asfaltových směsí byla vybavena dávkovačem sypkých přísad, nebo pytlovaných dávek. Dávkování koncentráту poté probíhá stejně, jako při přidávání celulózových vláken do směsí typu SMA.

6.6 Orientační cenové srovnání

Cenové srovnání je aktuální k prosinci 2011 a srovnává pouze ceny materiálu.

Tabulka 6.33: Přibližné cenové porovnání jednotlivých materiálů

| materiál | | přibližná cena s DPH |
|--|------------|----------------------|
| Vápenková moučka | | 570 Kč/t |
| kamenivo prané | 0/4 | 240 Kč/t |
| | 4/8 | 355 Kč/t |
| silniční asfalt 50/70 | | 11 600 Kč/t |
| pryžový granulát zrnitosti do 1 mm | | 6 000 Kč/t |
| koncentrát TecRoad (cena včetně dopravy do ČR) | | 33 000 Kč/t |
| Modifikovaný asfalt PmB 25/45-75 | | 16 800 Kč/t |
| Modifikovaný asfalt pryžovým granulátem CRmB 25/50-60 | | 14 000 Kč/t |

Tabulka 6.34 udává počáteční srovnání nákladů na jednotlivé směsi.

Tabulka 6.34: Cenové porovnání jednotlivých směsí

| materiál | PA 8 | | BBTM 8 | |
|---------------------------------|----------------|-------------------|-------------------|----------|
| | % podíl | Kč/podíl | % podíl | Kč/podíl |
| Vápenková moučka | 1,395 | 8 | 4,16 | 24 |
| kamenivo prané | 0 - 4 | 11,16 | 32,38 | 78 |
| | 4 - 8 | 80,445 | 286 | 55,96 |
| silniční asfalt 50/70 | 4,69 | 544 | 5,85 | 679 |
| koncentrát TecRoad | 2,31 | 762 | 1,65 | 545 |
| PmB 25/40-60⁷ | 6 | 1 008 | 6,5 | 1 092 |
| CRmB 25/50-60 | 8 | 1 120 | 8 | 1 120 |
| cena směsi s obsahem : | TecRoad | 1 627 Kč/t | 1 523 Kč/t | |
| | PmB | 1 332 Kč/t | 1 395 Kč/t | |
| | CRmB | 1 437 Kč/t | 1 418 Kč/t | |

⁷ Pro srovnání směsí se stejnými únavovými vlastnostmi (trvanlivostí) byl obsah pojiva zvýšen oproti uvedené směsi PA s extrémně modifikovaným PmB o mim. 0,5 % a u BBTM byl zvýšen na 6,5 % pouze odhadem obvyklého minimálního dávkování. Přesto je možné se domnívat, že nízké dávkování pojiva může ohrozit trvanlivost obrusné vrstvy.

Procentuální podíly kameniv pro porovnávací směsi s PmB a s CRmB jsou přepočítány dle obsahu pojiva pro dané směsi. Zobrazené podíly kameniv jsou pouze pro navrhované směsi.

Porovnáním materiálových cen asfaltových směsí vychází směsi PA 8 s přísadou TecRoad o 18 % dražší, než směs s modifikovaným asfaltem polymery. Dražší je i ve srovnání se směsí PA 8 s asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem (o 12 %) i při vyšším obsahu pojiva. U směsi BBTM nejsou rozdíly tak vysoké.

Za to lze vyšší cenu směsi s modifikovaným pojivem přísadou TecRoad vyvážit například možností vytvoření trvanlivé mezerovité směsi, což s běžným silničním asfaltem není možné.

7 Závěr

Diplomovou prací byly ověřeny možnosti laboratorní výroby pojiva obsahujícího přísadu TecRoad i výroby směsí asfaltového koberce drenážního a asfaltového betonu pro velmi tenké vrstvy s pojivem obsahujícím koncentrát TecRoad.

Zkouškami pojiv byla prokázána zvyšující se pružnost pojiva s rostoucím obsahem koncentráту TecRoad. Optimální obsah pojiva pro směs asfaltového koberce drenážního byl stanoven na 7,0 %, přičemž pojivo obsahuje 33 % přísady TecRoad. Optimální obsah pojiva pro směs asfaltového betonu pro velmi tenké vrstvy byl stanoven na 7,5 % s 22 % přísady TecRoad (podle doporučení výrobce).

Dle očekávání, asfaltový koberec drenážní měl vyšší mezerovitost a z toho vyplývající nižší stupeň vyplnění mezer. V souvislosti s vertikální propustností směsi drenážního koberce odpovídala spíše nízké hodnotě, ale v souvislosti s vyšší mezerovitostí to není nedostatkem. Asfaltové směsi s asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem často nedosahují obstojných odolností vůči účinku vody v laboratorních podmínkách při vyjádření poměru ITSR a to z důvodu vyšší tloušťky asfaltového filmu a vyšší mezerovitosti, proto je hodnota ITSR neprůkazná.

Navrhované směsi mají odolnost vůči trvalým deformacím velmi vysokou v porovnání s běžným asfaltovým betonem. Směs pro asfaltový koberec pro velmi tenké vrstvy patří do nejvyšší kategorie dle příslušné normy, oproti tomu asfaltový koberec drenážní nemá ani v národní příloze příslušné normy určené požadavek. V porovnání se směsí modifikovanou polymery vykazují směsi s přísadou TecRoad lepších vlastností v odolnosti vůči trvalým deformacím.

Vyšší moduly tuhosti asfaltového betonu pro velmi tenké vrstvy jsou nejspíše důsledkem nižší tloušťky filmu pojiva na povrchu kameniva, které bylo dávkováno s menším procentuálním obsahem pryžového granulátu a s vyšším obsahem jemného kameniva, což „zahušťuje“ pojivo, vyšší obsah drobného kameniva vytváří více dotykových ploch kameniva stmelovaných pojivem a snižuje mezerovitost směsi.

Směs asfaltového koberce drenážního při zkoušce odolnosti proti mrazovým trhlinám nebyla porušována tahovou trhlinou, jako tomu bylo u asfaltového betonu pro velmi tenké vrstvy. To odpovídá nižšímu dosaženému napětí ve zkušebních tělesech.

Díky nepřilíživému obsahu pružného pojiva s obsahem částic pryže vykazují směsi průměrné únavové charakteristiky ve srovnání s podobnými směsmi s CRmB o vyšším obsahu pojiva.

Při práci v laboratoři s modifikovaným asfaltem je velmi důležitá homogenita pojiva při výrobě směsi.

Modifikovaný asfalt pryžovým granulátem nemá vhodnou skladovací stabilitu, jelikož částice pryže klesající ke dnu zhoršují jeho pozdější použití bez úpravy. Další nevýhodou směsí s asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem je potřeba mísícího zařízení na modifikované pojivo. Při dovážení pojiva z rafinérií

je nutno pojivo v krátké době zpracovat, aby nedošlo k degradaci pojiva vystaveného dlouhodobému účinku teploty. Tyto nevýhody do jisté míry řeší přidávání pytlovaného koncentrátu TecRoad, který se dávkuje do míchačky obalovny dávkovačem sypkých přísad a z toho vyplývá, že skladovací stabilitu pojiva a účinky vysoké teploty není nutné hodnotit.

Důležité je také dávkování, jemnost mletí a struktura granulátu ovlivňující vlastnosti použitých pojiv.

S jemnějším pryžovým granulátem a s větším obsahem přírodního kaučuku, se také dosáhne lepších vlastností, oproti hrubšímu pryžovému granulátu obsahujícímu syntetický kaučuk. Více přírodního kaučuku mají pneumatiky z nákladních vozidel. Tyto druhy pneumatik s velmi jemnou zrnitostí používá výrobce TecRoad.

Nesmírnou výhodou je zlepšení reologických vlastností pomocí modifikace pryžovým granulátem, který koncentrát TecRoad obsahuje. Z ekologického hlediska je spotřebován odpadní materiál – při modifikaci je využíván pryžový granulát vyrobený z opotřebovaných pneumatik.

I přesto že jsou počáteční náklady poněkud vyšší, tak následná ekonomická zátěž na údržbu a opravy je podle některých literatur, oproti klasickým směsím, menší.

Modifikované směsi pryžovým granulátem lépe odolávají stále se zvyšujícímu zatížení, snižují tvorbu trhlin a zároveň zvyšují životnost asfaltové vrstvy.

Toto vše vede k prodloužení intervalů oprav a údržby, větší průjezdnosti a plynulosti dopravy, neboť je to důležitý parametr.

Další výhodou asfaltového koberce drenážního je snížení hluku od jedoucích vozidel a utlumení dopadajícího hluku na vrstvu.

Vždy je potřeba pečlivě dořešit detaily odvodnění a napojení (uvedené např. v TP 148 – Příloha 2 [23]).

Trvanlivost vrstev lze považovat po přiměřenou dobu životnosti odpovídající době, po kterou budou funkční vlastnosti celé konstrukce zachovány na úrovni srovnatelné s deklarovanými funkčními charakteristikami.

Uplatnění modifikované vrstvy je prospěšné jak z **ekologického**, tak i z **nákladově efektivního řešení**.

Modifikované vrstvy jsou velmi vhodné pro údržbu a opravu vrstev, jelikož nepřenášejí koncentrované namáhání ve formě reflexních trhlin ze spodních vrstev.

Výhodou je, že se směsi používají k překrytí povrchových vad obrusných vrstev s vysprávkami a utěsněnými trhlinami.

Nejpoužívanějším postupem opravy je odfrézování stávající obrusné vrstvy s překrytím pružnou membránou „SAMI“ a položením nové asfaltové vrstvy o nižší tloušťce za použití modifikovaného pojiva např. přísadou TecRoad (RmB G).

Seznam použité literatury

1. Mobile Asphalt Rubber Plant. *alibaba.com*. [Online] [Citace: 08. 12 2011.] http://www.alibaba.com/product-gs/288739641/Mobile_Aspphalt_Rubber_Plant.html.
2. **ČSN EN 12697-5.** Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka. *Stanovení maximální objemové hmotnosti*. Brno : ČNI, Prosinec 2007.
3. **ČSN EN 12697-8.** Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka. *Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí*. Brno : ČNI, Květen 2004.
4. **ČSN EN 12697-10.** Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka. *Zhutnitelnost*. Brno : ČNI, Březen 2003.
5. **ČSN EN 12697-12.** Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka. *Stanovení odolnosti zkušebního tělesa vůči vodě*. Brno : ČNI, Únor 2009.
6. **ČSN EN 12697-17.** Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka. *Ztráta částic zkušebního tělesa asfaltového koberce drenážního*. Brno : ČNI, Prosinec 2007.
7. **ČSN EN 12697-19.** Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka. *Propustnost zkušebního tělesa*. Brno : ČNI, Prosinec 2007.
8. **ČSN EN 12697-22.** Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka. *Zkouška pojiždění kolem*. Brno : ČNI, Prosinec 2007.
9. **ČSN EN 12697-23.** Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka. *Stanovení pevnosti v příčném tahu*. Brno : ČNI, Březen 2005.
10. **ČSN EN 12697-24.** Asfaltové směsi - Zkušební metody pro horké asfaltové směsi. *Odolnost proti únavě*. Srpen 1999.
11. **ČSN EN 12697-26.** Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka. *Tuhost*. Brno : ČNI, Prosinec 2006.
12. **ČSN EN 12697-29.** Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka. *Stanovení rozměrů asfaltových zkušebních těles*. Brno : ČNI, Červenec 2003.
13. **ČSN EN 12697-30.** Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka. *Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem*. Brno : ČNI, Prosinec 2007.
14. **ČSN EN 12697-33.** Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka. *Příprava zkušebních těles zhutňovačem desek*. Brno : ČNI, Prosinec 2007.
15. **ČSN EN 12697-34.** Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka. *Marshallova zkouška*. Brno : ČNI, Prosinec 2007.
16. **ČSN EN 12697-35.** Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka. *Laboratorní výroba směsí*. Brno : ČNI, Prosinec 2007.

17. **DRAFT prEN 12697-46.** Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt. *Low Temperature cracking and properties by Uniaxial Tension Tests*. Brussels : CEN, January 2010.
18. **ČSN EN 13108-7.** Asfaltové směsi - Specifikace pro materiály. *Asfaltový koberec drenážní*. Brno : ČNI, Únor 2008.
19. **ČSN EN 13108-2.** Asfaltové směsi - Specifikace pro materiály. *Asfaltový beton pro velmi tenké vrstvy*. Brno : ČNI, Únor 2008.
20. <http://www.cts-bitumen.de>. [Online]
21. <http://www.rubbertec.org>. [Online]
22. Technische Lieferbedingungen für Gummimodifizierte Bitumen TL RmB-StB By Ausgabe 2010. [autor knihy] CSc. Prof. Ing. Jan Kudrna a Ing. Ondřej Dašek. Ausgabe 2010.
23. **TP 148.** Hutněné asfaltové vrstvy s asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem z pneumatik. [autor knihy] CSc. Prof. Ing. Jan Kudrna a Ing. Ondřej Dašek. Brno , 2011.
24. Zpráva o provedených laboratorních zkouškách směsi drenážního koberce PA 8 s použitím asfaltových pojiv MOFALT RMB a MOFALT SMA DM. [autor knihy] CSc. Prof. Ing. Jan Kudrna a Ing. Ondřej Dašek. Brno , Červen, 2011.
25. **ČSN EN 933 - 1.** Zkoušení geometrických vlasnotí kameniva. *Stanovení zrnitosti - Sítový rozbor*. ČNI, Červen 1998.
26. **ČSN EN 12697-6.** Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka. *Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa*. Brno : ČNI, Prosinec 2007.
27. **ÖNORM EN 12697-46 (DRAFT).** Bituminous mixtures — Test methods for hot mix. *Low Temperature Cracking and Properties by Uniaxial*. Wien : Austrian Standards Institute, 2009-07.
28. **ČSN EN 12697-24.** Asfaltové směsi - Zkušební metody pro horké asfaltové směsi. *Odolnost proti únavě* : CEN, srpen 1999.
29. **ČSN EN 13108-1.** Asfaltové směsi - Specifikace pro materiály. *Asfaltový beton*. Březen 2001.
30. **TP 170.** Navrhování vozovek pozemních komunikací. [autor knihy] VUT v Brně. 2010.
31. **CTS RmB G.** Test results of modified bitumen and bituminous mixtures. [autor knihy] Ph.D. Prof. MSc. Jan Kudrna, a další. *Research report for CTS Bitumen GmbH*. Brno : VUT v Brně, November 2011.
32. **Valentin, Jan.** http://www.sdruzeni-silnice.cz/av2011/generalni-zpravy/data/tema4_valentin.pdf. *Sdružení pro výstavbu silnic - Konference asfaltové vozovky 2011*. [Online] 22.-23.. 11. 2011.

Seznam použitých zkratk a symbolů

| | |
|----------------|--|
| TecRoad, TR | příísada pro modifikaci asfaltového pojiva |
| RmB G | v německé literatuře označení pro TecRoad |
| CRmB | asfalt modifikovaný pryžovým granulátem |
| PmB | polymerem modifikované asfaltové pojivo |
| PA | asfaltový koberec drenážní (z anglického výrazu Porous Asphalt) |
| AKD | starší označení pro asfaltový koberec drenážní |
| BBTM | asfaltový beton pro velmi tenké vrstvy (z francouzského názvu Bétons Bitumineux Très Minces) |
| AKTJ | starší označení pro asfaltový koberec tenký jemnozrný |
| SMA | asfaltový koberec mastixový (z anglického výrazu Stone Mastic asphalt) |
| ČSN | česká technická norma |
| ČSN EN | evropská norma převzatá do národního systému norem ČR |
| NA | národní příloha |
| TP | technické podmínky |
| TDZ | třída dopravního zatížení |
| **** | ***** |
| Y | procentuální propad kameniva na daném síti [%] |
| d | velikost oka síta, na kterém počítám propad [mm] |
| D | velikost největšího zrna směsi [mm] |
| t | zkušební teplota |
| $\rho_{b,dim}$ | objemová hmotnost zkušebního tělesa dle rozměrů [kg/m ³] |
| m_1 | hmotnost suchého tělesa [g] |
| h | výška zkušebního tělesa [mm] |
| d | průměr tělesa [mm] |
| ρ_{bSSD} | objemová hmotnost tělesa nasyceného vodou při osušeném povrchu [kg/m ³] |
| m_2 | hmotnost tělesa ve vodě [g] |
| m_3 | hmotnost tělesa nasyceného vodou a povrchově osušeného [g] |
| ρ_w | hustota vody [kg/m ³] |
| ρ_{mv} | maximální objemová hmotnost směsi [kg/m ³] |
| m_1 | hmotnost pyknometru a nástavce [g] |
| m_2 | hmotnost pyknometru, nástavce a zkušební vzorku [g] |
| m_3 | hmotnost pyknometru, nástavce, zkušební vzorku a rozpouštědla [g] |

| | |
|---------------------|--|
| V_p | objem pyknometru při naplnění po referenční značce nástavce [m^3] |
| ρ_w | hustota rozpouštědla [kg/m^3] |
| V_m | mezerovitost směsi [%] |
| ρ_m | maximální objemová hmotnost směsi [kg/m^3] |
| ρ_b | objemová hmotnost zkušební tělesa dané směsi [kg/m^3] |
| VMA | mezerovitost směsi kameniva [%] |
| V_m | mezerovitost zkušební tělesa [%] |
| B | obsah pojiva ve zkušebním tělese [%] |
| ρ_B | objemová hmotnost pojiva [kg/m^3] |
| \emptyset | průměrná hodnota |
| VFB | stupeň vyplnění mezer ve směsi kameniva pojivem [%] |
| ITS | pevnost v příčném tahu [MPa] |
| P | maximální zatížení [N] |
| D | průměr zkušební tělesa [mm] |
| H | výška zkušební tělesa [mm] |
| ITSR | poměr pevností v příčném tahu [%] |
| ITS _w | průměrná pevnost v příčném tahu skupiny mokrých zkušebních těles [kPa] |
| ITS _d | průměrná pevnost v příčném tahu skupiny suchých zkušebních těles [kPa] |
| Q _v | vertikální průtok tělesem [m^3/s] |
| m_1 | hmotnost prázdné záchytné nádoby [g] |
| m_2 | hmotnost plné záchytné nádoby [g] |
| t | doba zachycování vody [s] |
| K _v | vertikální propustnost [m/s] |
| l | výška zkušební tělesa [m] |
| h | aktuální výška vodního sloupce [m] |
| D | průměr zkušební tělesa [m] |
| PL | hodnota ztráty částic [%] |
| W ₁ | počáteční hmotnost zkušební tělesa [g] |
| W ₂ | konečná hmotnost zkušební tělesa [g] |
| WTS _{AIR} | přírůstek hloubky vyjeté koleje [mm/1000cyklů] |
| d _{10 000} | hloubka vyjeté koleje po 10 000 cyklech [mm] |
| d _{5 000} | hloubka vyjeté koleje po 5 000 cyklech [mm] |
| RD _{AIR} | průměrná hloubka vyjeté koleje při 10 000 zatěžovacích cyklech |
| PRD _{AIR} | průměrná poměrná hloubka vyjeté koleje při 10 000 zatěžovacích cyklech |

| | |
|-----------------|--|
| TSRST | zkouška nízkoteplotních charakteristik (Thermal Stress Restrained Specimen Test) |
| ε_t | podélná deformace |
| σ | okamžité napětí [MPa] |
| σ_0 | amplituda maximálního napětí ve zkušebním tělese [MPa] |
| ω | úhlová rychlost [s^{-1}], $\omega = 2\pi f$ |
| φ | fázový úhel posunu průběhu přetvoření za průběhem síly [°] |
| ε | okamžité poměrné přetvoření [-] |
| ε_0 | amplituda maximálního přetvoření ve zkušebním tělese [-] |
| ω | úhlová rychlost [s^{-1}], $\omega = 2\pi f$ |
| ψ | fázový úhel posunu průhybu a síly [°] |
| E^* | komplexní modul |
| E_1 | reálná složka charakterizující pružné vlastnosti |
| E_2 | imaginární složka charakterizující vazké vlastnosti |
| S | modul tuhosti [MPa] |
| ε_6 | relativní přetvoření odpovídající milionu cyklům |
| B | sklon únavové přímky |
| R^2 | korelační koeficient popisující rozptýlení bodů kolem únavové přímky |

Seznam obrázků

Obrázek 1.1 : Mobilní míchací zařízení na výrobu modifikovaného asfaltu [1]

Obrázek 2.1: Použitá kameniva (vlevo 4 - 8, uprostřed 0 - 4, vpravo filer)

Obrázek 4.1: Vibrační stroj

Obrázek 4.2: Miska s navážkou kameniva na váze

Obrázek 4.3 : Míchání směsi na Marshallova tělesa

Obrázek 4.4: Marshallův zhutňovač

Obrázek 4.5: Vyjmutí Marshalova tělesa z formy

Obrázek 4.6: Marshallova tělesa s označením

Obrázek 4.7: Laboratorní míchačka

Obrázek 4.8: Lamelový zhutňovač desek

Obrázek 4.9: Lamelový zhutňovač desek těsně před zhutněním vložené směsi

Obrázek 4.10: Rozebraná forma se zhutněnou deskou

Obrázek 4.11: Vychládání desky pod vyntilátorem

Obrázek 4.12: Trámečky v nařezaném pořadí

Obrázek 4.13: Nástavec k centrickému nalepení vzorků

Obrázek 4.14: Vyřezávání komolých klínů

Obrázek 4.15: Obecné rozměry trapezoidu [9]

Obrázek 4.16: Osušení zkušebních těles

Obrázek 4.17: Nalepené komolé klíny k podložkám, lepidlo a další zkušební tělesa

Obrázek 5.1: Tvar pyknometru [2]

Obrázek 5.2: Určení konečnémotnosti pyknometru

Obrázek 5.3: Mezerovitost směsi kameniva (VMA), zdroj [3]

Obrázek 5.4: Vakuový přístroj

Obrázek 5.5: Nastavovací rám na zkoušku s již uchyceným tělesem

Obrázek 5.6: Přístroj na měření příčného tahu (upravený lis)

Obrázek 5.7: Přípravky na zkoušku propustnosti

Obrázek 5.8: Otlukový buben

Obrázek 5.9: Porovnání těles před a po (vpravo) zkoušsce

Obrázek 5.10: Automatický vyjíždeč kolejí

Obrázek 5.11: Schématické zobrazení zařízení Cyklon -40

Obrázek 5.12 : Zkušební tělesa (v popředí porušená tělesa)

Obrázek 5.13: Detail zkušebního tělesa po ukončení nízkoteplotní zkoušky

Obrázek 5.14: Upnuté těleso ve zkušebním rámu
Obrázek 5.15: Přístroj na měření modulu tuhosti a únavy
Obrázek 5.16: Zobrazované hodnoty síly a deformace na ovládacím počítači
Obrázek 6.1: Záznam vyjeté koleje pro směs PA 8
Obrázek 6.2: Záznam vyjeté koleje pro směs BBTM 8
Obrázek 6.3 : Měření rozměrů trapezoidů

Seznam grafů

Graf 2.1: Čára zrnitostí použitých kameniv
Graf 2.2: Závislost viskozity na teplotě
Graf 2.3 : Srovnání vlasnotstí pojiv [24]
Graf 4.1: Přiblížení k čáře zrnitosti s mezemi pro směs PA 8
Graf 4.2: Přiblížení k čáře zrnitosti s mezemi pro směs BBTM 8
Graf 5.1: Znázornění průběhu zkoušky (dle TSRST [20] a [17])
Graf 6.1: Grafické vyjádření objemové hmotnosti určené z rozměrů pro směs BBTM 8
Graf 6.2: Grafické vyjádření maximální objemové hmotnosti pro směs BBTM 8
Graf 6.3: Grafické vyjádření mezerovitosti V_m pro směs BBTM 8
Graf 6.4 : Grafické vyjádření mezerovitosti kameniva VMA pro směs BBTM 8
Graf 6.5: Grafické vyjádření stupně vyplnění mezer pojivem VFB pro směs BBTM 8
Graf 6.6: Teplotní citlivost směsi PA 8
Graf 6.7: Teplotní citlivost směsi BBTM 8
Graf 6.8: Grafické porovnání průběhu vyjeté koleje na zkoumaných směsích
Graf 6.9: Závislost zvyšování napětí za snižování teploty pro směs PA 8
Graf 6.10: Závislost zvyšování napětí za snižování teploty pro směs BBTM 8
Graf 6.11: Moduly tuhosti směsi PA 8 v závislosti na frekvenci
Graf 6.12: Moduly tuhosti v závislosti na teplotě pro směs PA 8
Graf 6.13: Moduly tuhosti směsi BBTM 8 v závislosti na frekvenci
Graf 6.14: Moduly tuhosti v závislosti na teplotě pro směs BBTM 8
Graf 6.15 : Porovnání směsí PA 8 a BBTM 8 při frekvenci 10 Hz
Graf 6.16: Wohllerův diagram pro porovnání směsi PA 8 a BBTM 8

Seznam tabulek

Tabulka 2.1: Použitá kameniva

Tabulka 2.2: Sítový rozbor frakce 0 - 4

Tabulka 2.3: Sítový rozbor 4 - 8

Tabulka 2.4: Sítový rozbor vápencové moučky

Tabulka 2.5: Závislost viskozity na teplotě (33 % TecRoad)

Tabulka 2.6: Závislost viskozity na teplotě (22 % TecRoad)

Tabulka 2.7: Vlastnosti pojiv s přísadou TecRoad

Tabulka 4.1: Povolené kombinace požadavků dle ČSN EN 13108-7 ODS.:5.4.2 pro PA 8

Tabulka 4.2: Návrh čáry zrnitosti pro směs PA 8

Tabulka 4.3: Návrh čáry zrnitosti pro směs BBTM 8

Tabulka 4.4: Navážky kameniva na Marshallova tělesa pro PA 8

Tabulka 4.5: Stanovení optimálního množství pojiva pro PA 8

Tabulka 4.6: Navážky kameniva na Marshallova tělesa pro BBTM 8

Tabulka 4.7: Stanovení optimálního množství pojiva pro BBTM 8

Tabulka 4.8 : Srovnávací tabulka navážek na desky

Tabulka 6.1: Rozměry a hmotnosti Marshallových těles směsi PA 8

Tabulka 6.2: Rozměry a hmotnosti Marshallových těles směsi BBTM 8

Tabulka 6.3: Rozměry Marshallových těles směsi BBTM 8 (ITSR)

Tabulka 6.4: Objemová hmotnost směsi PA 8

Tabulka 6.5: Objemová hmotnost směsi BBTM 8

Tabulka 6.6: Objemová hmotnost směsi BBTM 8 (ITSR)

Tabulka 6.7: Maximální objemová hmotnost směsi PA 8

Tabulka 6.8: Maximální objemová hmotnost směsi BBTM 8

Tabulka 6.9: Mezerovitost směsi PA 8

Tabulka 6.10: Mezerovitost směsi BBTM 8

Tabulka 6.11: Odolnost vůči vodě směsi PA 8

Tabulka 6.12: Odolnost vůči vodě směsi BBTM 8

Tabulka 6.13: Propustnost směsi PA 8

Tabulka 6.14: Ztráta částic směsi PA 8

Tabulka 6.15: Ztráta částic směsi BBTM 8

Tabulka 6.16: Objemová hmotnost a míra zhutnění směsi PA 8

Tabulka 6.17: Naměřené hloubky vyjeté koleje pro směs PA 8

Tabulka 6.18: Vyhodnocení výsledků zkoušky pojíždění kolem pro směs PA 8
Tabulka 6.19: Objemová hmotnost a míra zhutnění směsi BBTM 8
Tabulka 6.20: Naměřené hloubky vyjeté koleje pro směs BBTM 8
Tabulka 6.21: Vyhodnocení výsledků zkoušky pojíždění kolem pro směs BBTM 8
Tabulka 6.22: Rozměry a hmotnosti trámečků směsi PA 8
Tabulka 6.23: Rozměry a hmotnosti trámečků pro směs BBTM 8
Tabulka 6.24: Vlastnosti tělesa při jeho porušení směsi PA 8
Tabulka 6.25: Vlastnosti tělesa při jeho porušení směsi BBTM 8
Tabulka 6.26: Rozměry a hmotnosti komolých klínů pro směs PA 8
Tabulka 6.27: Rozměry a hmotnosti komolých klínů pro směs BBTM 8
Tabulka 6.28: Moduly tuhosti směsi PA 8
Tabulka 6.29: Moduly tuhosti směsi BBTM 8
Tabulka 6.30: Výsledky únavových charakteristik směsi PA 8
Tabulka 6.31: Výsledky únavových charakteristik směsi BBTM 8
Tabulka 6.32: Porovnání výsledků
Tabulka 6.33: Přibližné cenové porovnání jednotlivých materiálů
Tabulka 6.34: Cenové porovnání jednotlivých směsí

Seznam Příloh

| | |
|-----------|---|
| Příloha 1 | Protokoly ze zkoušek nízkoteplotních vlastností |
| Příloha 2 | Naměřené hodnoty komplexního modulu tuhosti |

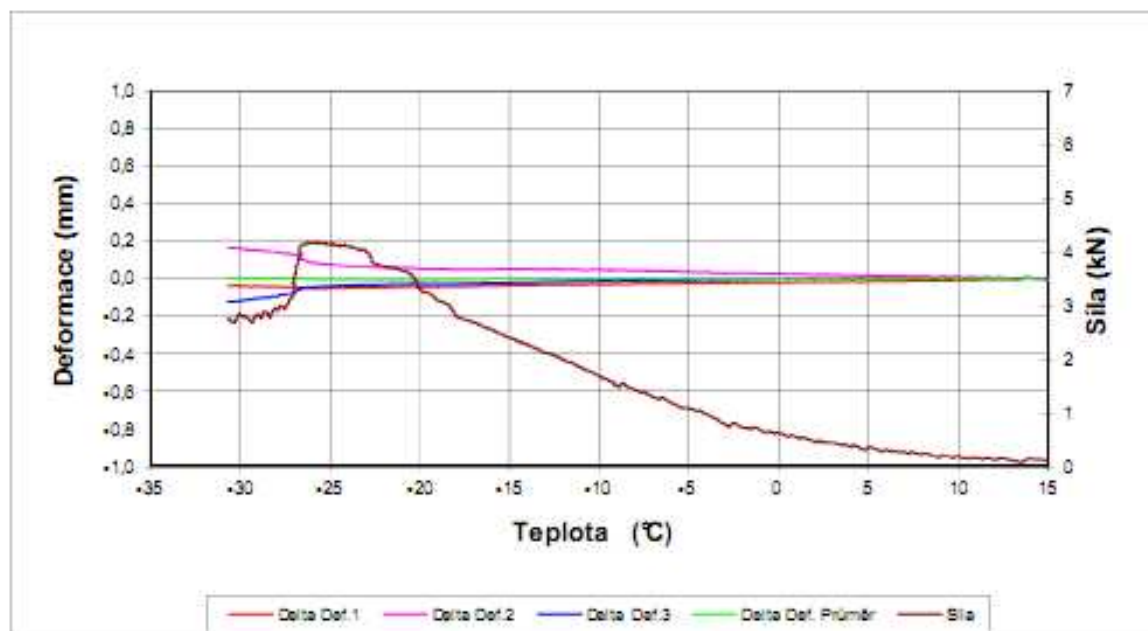
Protokoly ze zkoušek nízkoteplotních vlastností



VUT V BRNĚ, FAKULTA STAVEBNÍ
Ústav pozemních komunikací
Veveří 95
602 00 Brno
tel. : (05) 411 473 40
fax. : (05) 745 147
e-mail : kudrna@sil.fce.vutbr.cz

Zkouška odolnosti asfaltové směsi proti vzniku mrazových trhlin

| | |
|---|-----------------|
| Akce : | DP |
| Asfaltová směs : | PAB 7 TR 1.2 |
| Rozměry zkušebního tělesa - mm : | 50.5 x 50 x 200 |
| Datum zkoušky : | 22.6.2011 |
| Zkoušku provedl : | Kaška |
| Teplota temperování - °C : | 10 |
| Doba temperování - min. : | 15 |
| Rychlost ochlazování - °C/hod : | 10 |
| Max. síla při porušení - kN : | 4,20 |
| Max. napětí při porušení - MPa : | 1,68 |
| Teplota v komoře při porušení - °C : | -29,4 |
| Teplota vzorku při porušení - °C : | -25,9 |





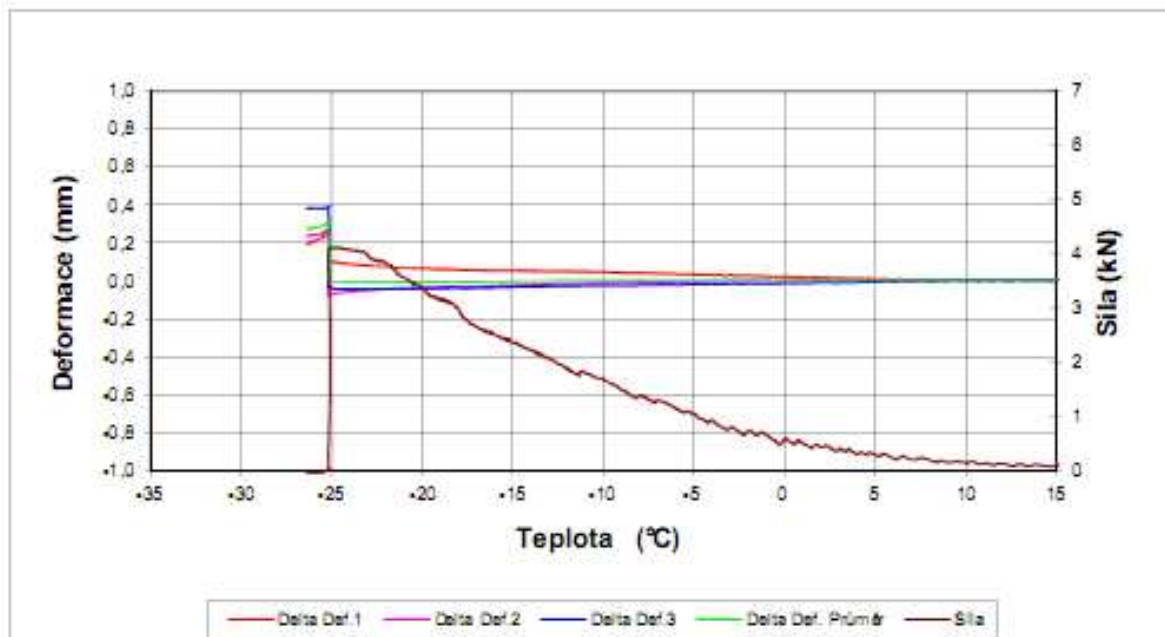
VYSOKÉ
UCENÍ
TECHNICKÉ
V BRNĚ

FAKULTA
STAVEBNÍ
Ústav
pozemních
komunikací

VUT V BRNĚ, FAKULTA STAVEBNÍ
Ústav pozemních komunikací
Veveří 95
602 00 Brno
tel.: (05) 411 473 40
fax.: (05) 745 147
e-mail: kudrna@sil.fce.vutbr.cz

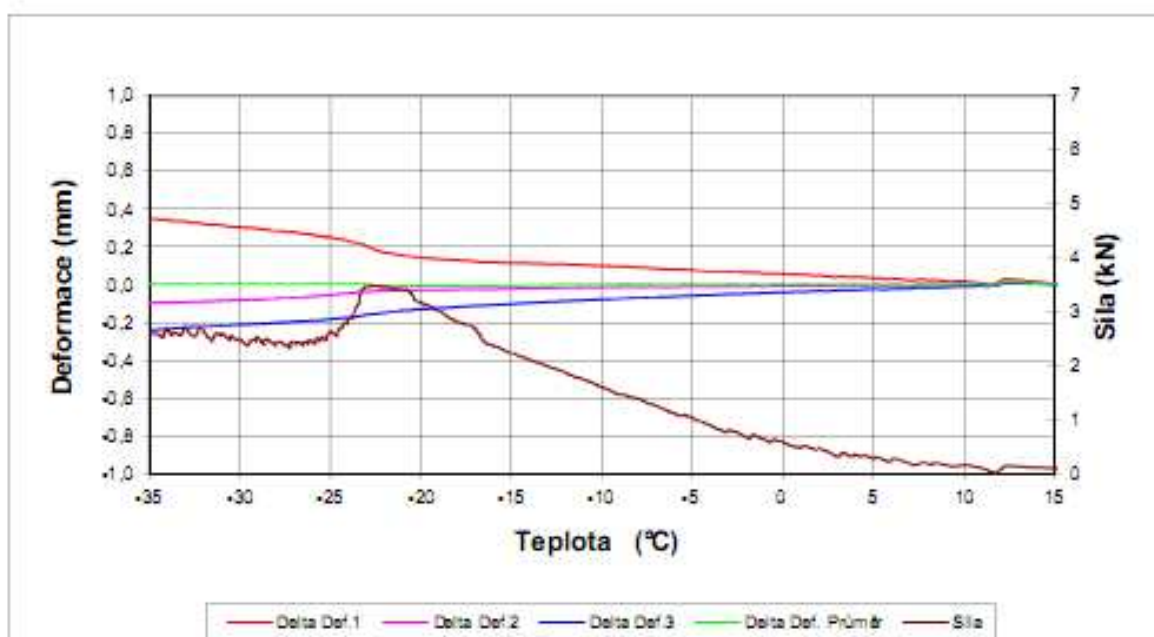
Zkouška odolnosti asfaltové směsi proti vzniku mrazových trhlin

| | |
|---|-----------------|
| Akce : | DP |
| Asfaltová směs : | PAB 7TR 1.3 |
| Rozměry zkušebního tělesa - mm : | 50 x 50,5 x 200 |
| Datum zkoušky : | 21.8.2011 |
| Zkoušku provedl : | Kaška |
| Teplota temperování - °C : | 10 |
| Doba temperování - min. : | 15 |
| Rychlost ochlazování - °C/hod : | 10 |
| Max. síla při porušení - kN : | 4,12 |
| Max. napětí při porušení - MPa : | 1,83 |
| Teplota v komoře při porušení - °C : | -27,1 |
| Teplota vzorku při porušení - °C : | -24,5 |



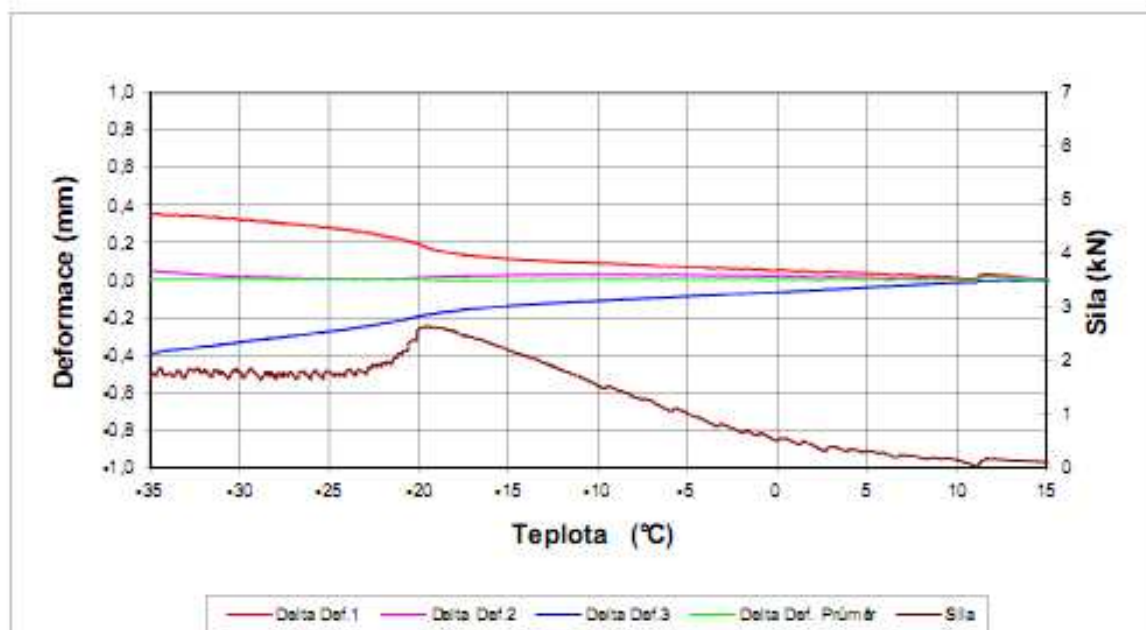
Zkouška odolnosti asfaltové směsi proti vzniku mrazových trhlin

| | |
|--------------------------------------|-----------------|
| Akce : | DP |
| Asfaltová směs : | PAB 7TR 1.4 |
| Rozměry zkušebního tělesa - mm : | 50,2 x 50 x 200 |
| Datum zkoušky : | 24.8.2011 |
| Zkoušku provedl : | Kaška |
| Teplota temperování - °C : | 10 |
| Doba temperování - min. : | 15 |
| Rychlost ochlazování - °C/hod : | 10 |
| Max. síla při porušení - kN : | 3,50 |
| Max. napětí při porušení - MPa : | 1,40 |
| Teplota v komoře při porušení - °C : | -26,7 |
| Teplota vzorku při porušení - °C : | -22,8 |



Zkouška odolnosti asfaltové směsi proti vzniku mrazových trhlin

| | |
|--------------------------------------|-------------------|
| Akce : | DP |
| Asfaltová směs : | PAB 7 TR 1.5 |
| Rozměry zkušebního tělesa - mm : | 49.7 x 50.3 x 200 |
| Datum zkoušky : | 27.6.2011 |
| Zkoušku provedl : | Kaška |
| Teplota temperování - °C : | 10 |
| Doba temperování - min. : | 15 |
| Rychlost ochlazování - °C/hod : | 10 |
| Max. síla při porušení - kN : | 2,64 |
| Max. napětí při porušení - MPa : | 1,06 |
| Teplota v komoře při porušení - °C : | -23,0 |
| Teplota vzorku při porušení - °C : | -19,5 |





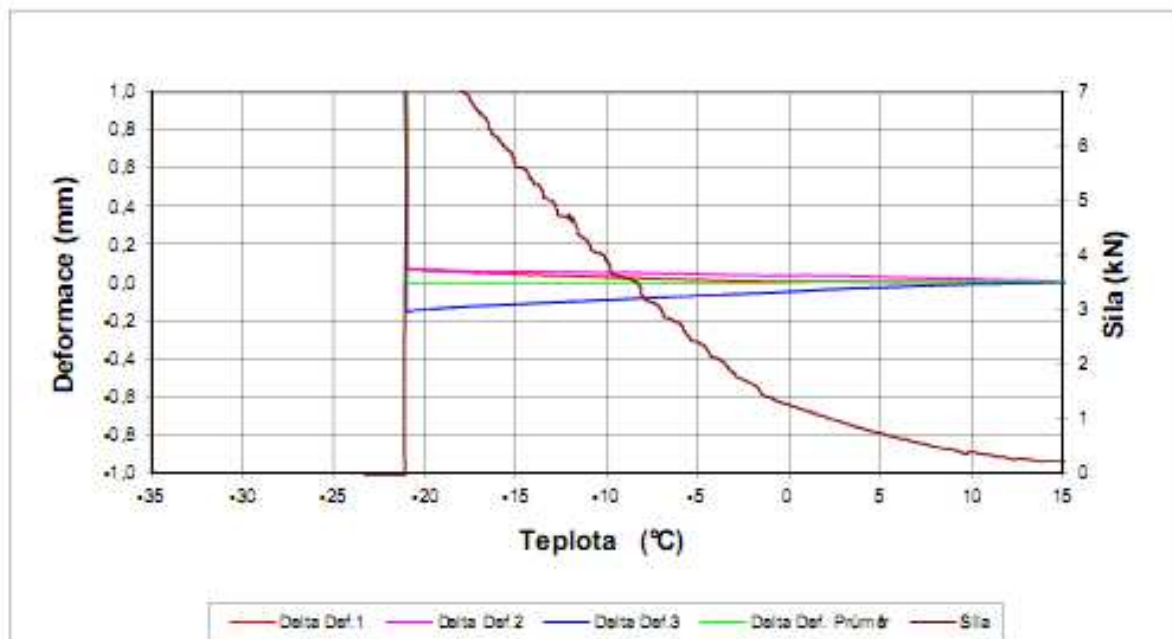
VYSOKÉ
UCENÍ
TECHNICKÉ
V BRNĚ

FAKULTA
STAVEBNÍ
Ústav
pozemních
komunikací

VUT V BRNĚ, FAKULTA STAVEBNÍ
Ústav pozemních komunikací
Veverů 95
602 07 Brno
tel. : (05) 411 473 40
fax. : (05) 745 147
e-mail : kudrna@sil.fce.vutbr.cz

Zkouška odolnosti asfaltové směsi proti vzniku mrazových trhlin

| | |
|--------------------------------------|-------------------|
| Akce : | DP |
| Asfaltová směs : | BBTM 8 7,5%TR 4.1 |
| Rozměry zkušebního tělesa - mm : | 49,8 x 49,8 x 200 |
| Datum zkoušky : | 3.10.2011 |
| Zkoušku provedl : | Kaška |
| Teplota temperování - °C : | 10 |
| Doba temperování - min. : | 15 |
| Rychlost ochlazování - °C/hod : | 10 |
| Max. síla při porušení - kN : | 8,19 |
| Max. napětí při porušení - MPa : | 3,30 |
| Teplota v komoře při porušení - °C : | -23,9 |
| Teplota vzorku při porušení - °C : | -20,3 |





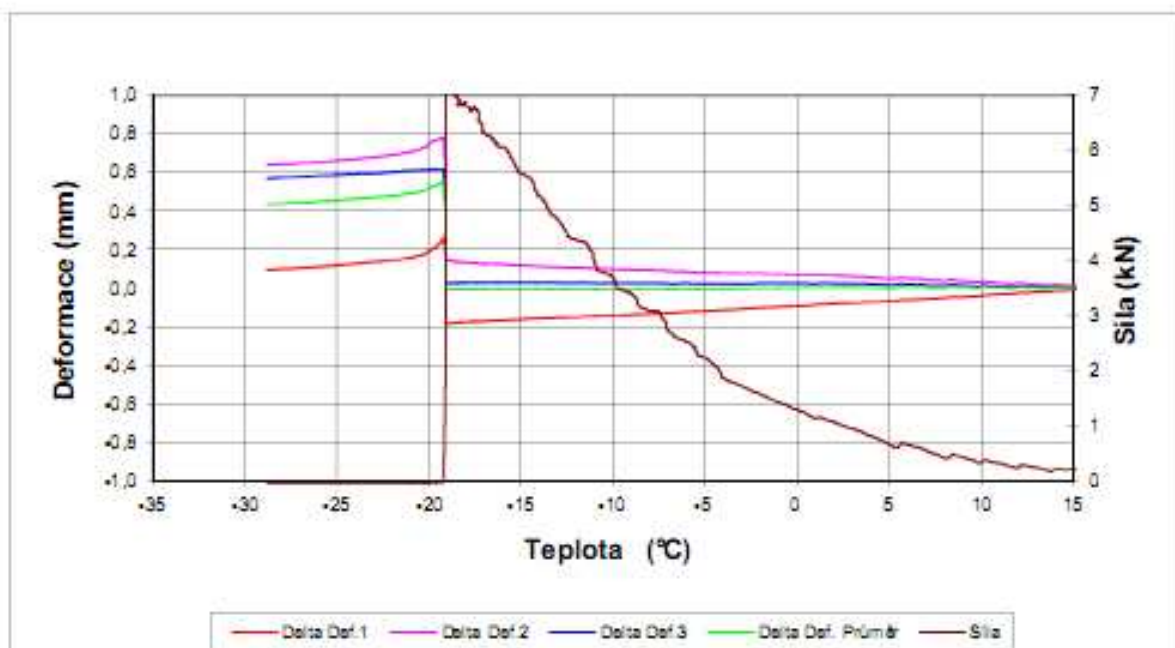
VYSOKÉ
UCENÍ
TECHNICKÉ
V BRNĚ

FAKULTA
STAVEBNÍ
Ústav
pozemních
komunikací

VUT V BRNĚ, FAKULTA STAVEBNÍ
Ústav pozemních komunikací
Veveří 95
602 00 Brno
tel. : (05) 411 473 40
fax. : (05) 745 147
e-mail : kudrna@sil.foe.vutbr.cz

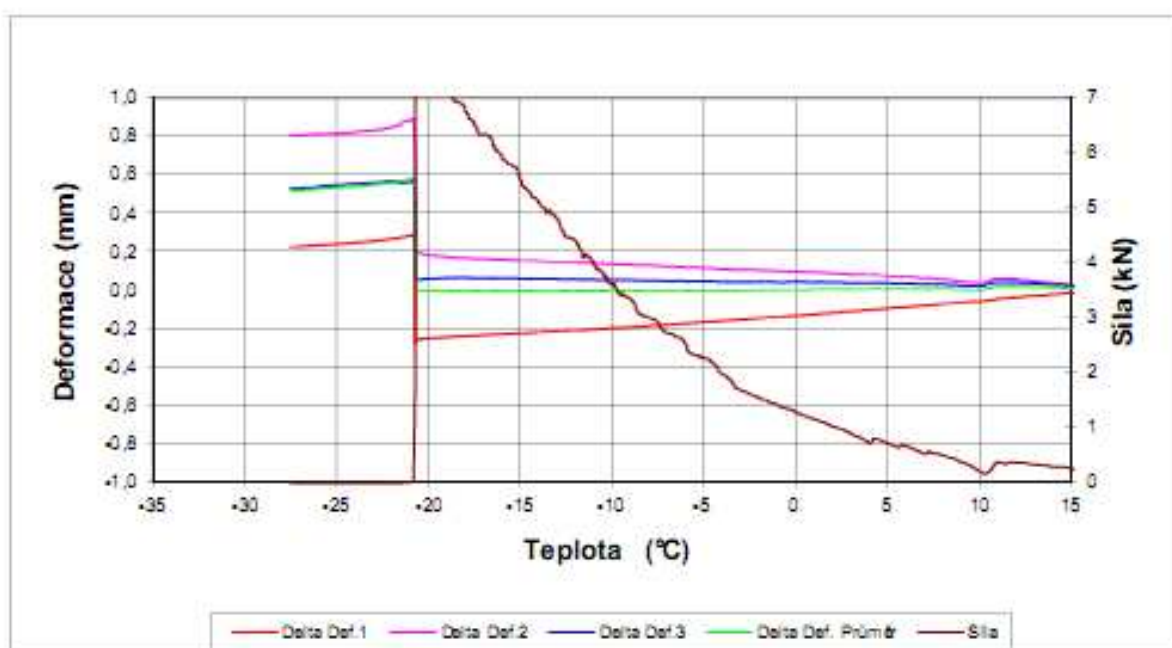
Zkouška odolnosti asfaltové směsi proti vzniku mrazových trhlin

| | |
|---|-------------------|
| Akce : | DP |
| Asfaltová směs : | BBTMB 7,5TR 4.2 |
| Rozměry zkušebního tělesa - mm : | 49.7 x 49.7 x 200 |
| Datum zkoušky : | 15.9.2011 |
| Zkoušku provedl : | Kaška |
| Teplota temperování - °C : | 10 |
| Doba temperování - min. : | 15 |
| Rychlost ochlazování - °C/hod : | 10 |
| Max. síla při porušení - kN : | 7,09 |
| Max. napětí při porušení - MPa : | 2,87 |
| Teplota v komoře při porušení - °C : | -22,6 |
| Teplota vzorku při porušení - °C : | -18,8 |



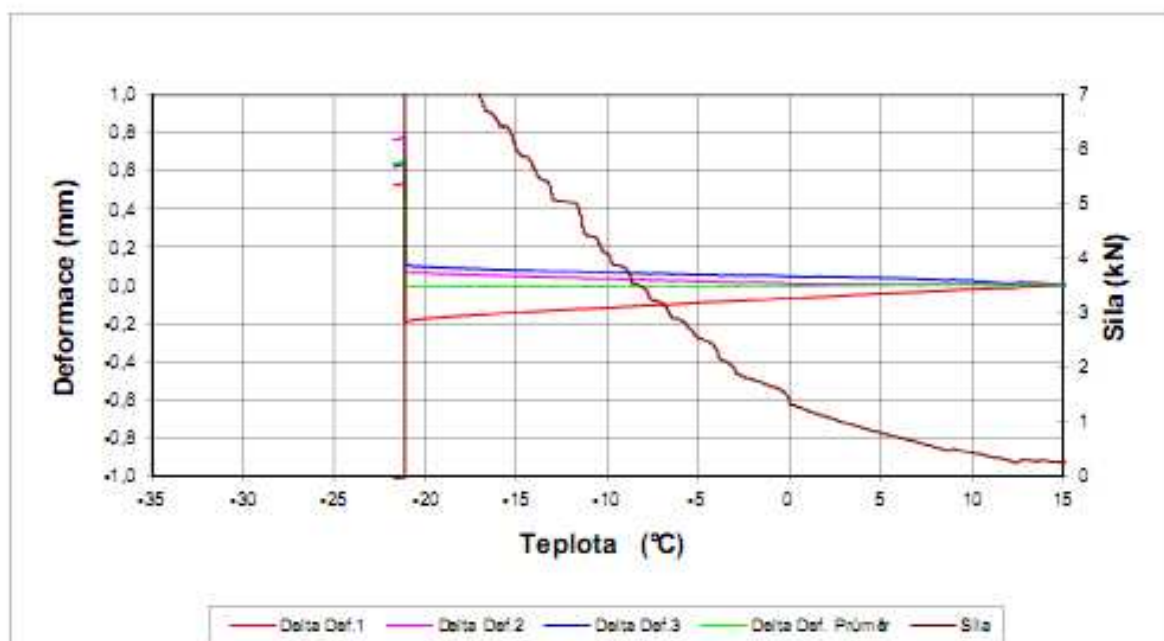
Zkouška odolnosti asfaltové směsi proti vzniku mrazových trhlin

| | |
|--------------------------------------|-------------------|
| Akce : | DP |
| Asfaltová směs : | BBTMB 7,5TR 4.3 |
| Rozměry zkušebního tělesa - mm : | 49.4 x 49.4 x 200 |
| Datum zkoušky : | 16.9.2011 |
| Zkoušku provedl : | Kaška |
| Teplota temperování - °C : | 10 |
| Doba temperování - min. : | 15 |
| Rychlost ochlazování - °C/hod : | 10 |
| Max. síla při porušení - kN : | 7,39 |
| Max. napětí při porušení - MPa : | 3,03 |
| Teplota v komoře při porušení - °C : | -23,8 |
| Teplota vzorku při porušení - °C : | -20,4 |



Zkouška odolnosti asfaltové směsi proti vzniku mrazových trhlin

| | |
|--------------------------------------|-------------------|
| Akce : | DP |
| Asfaltová směs : | BBTM 8 7,5%TR 4.4 |
| Rozměry zkušebního tělesa - mm : | 49.5 x 49.7 x 200 |
| Datum zkoušky : | 4.10.2011 |
| Zkoušku provedl : | Kaška |
| Teplota temperování - °C : | 10 |
| Doba temperování - min. : | 15 |
| Rychlost ochlazování - °C/hod : | 10 |
| Max. síla při porušení - kN : | 8,40 |
| Max. napětí při porušení - MPa : | 3,41 |
| Teplota v komoře při porušení - °C : | -24,4 |
| Teplota vzorku při porušení - °C : | -20,9 |



PA 8 7 % TR 33 %

| -5°C | | | | | |
|---------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Tělesa | 5 Hz | 10 Hz | 15 Hz | 20 Hz | 25 Hz |
| 2.4 | 6301 | 6587 | 6740 | 6912 | 7014 |
| 3.1 | 6137 | 6532 | 6737 | 6962 | 7125 |
| 4.4 | 5879 | 6215 | 6471 | 6661 | 6821 |
| průměr | 6105 | 6445 | 6649 | 6845 | 6987 |
| etalon: | 1 | | | | |
| PRŮMĚR | 6105 | 6445 | 6649 | 6845 | 6987 |

| 10°C | | | | | |
|---------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Tělesa | 5 Hz | 10 Hz | 15 Hz | 20 Hz | 25 Hz |
| 2.1 | 4028 | 4358 | 4547 | 4722 | 4796 |
| 2.2 | 4028 | 4354 | 4621 | 4797 | 4904 |
| 2.3 | 4027 | 4393 | 4643 | 4824 | 4908 |
| 2.4 | 3999 | 4327 | 4579 | 4764 | 4870 |
| 2.5 | 3747 | 4152 | 4400 | 4594 | 4751 |
| 3.1 | 3817 | 4215 | 4483 | 4713 | 4863 |
| 3.2 | 4000 | 4374 | 4618 | 4844 | 5016 |
| 3.3 | 3885 | 4267 | 4577 | 4781 | 4890 |
| 3.4 | 3721 | 4223 | 4505 | 4662 | 4808 |
| 3.5 | 3929 | 4260 | 4536 | 4727 | 4899 |
| 4.1 | 3328 | 3662 | 3913 | 4084 | 4187 |
| 4.2 | 3633 | 4051 | 4336 | 4551 | 4683 |
| 4.3 | 3775 | 4107 | 4330 | 4543 | 4733 |
| 4.4 | 3683 | 4148 | 4478 | 4574 | 4789 |
| 4.5 | 3638 | 4080 | 4339 | 4560 | 4660 |
| průměr | 3816 | 4198 | 4460 | 4649 | 4784 |
| etalon: | 1 | | | | |
| PRŮMĚR | 3816 | 4198 | 4460 | 4649 | 4784 |

| 15°C | | | | | |
|---------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Tělesa | 5 Hz | 10 Hz | 15 Hz | 20 Hz | 25 Hz |
| 2.1 | 3107 | 3486 | 3747 | 3894 | 3970 |
| 2.2 | 3335 | 3699 | 3917 | 4030 | 4144 |
| 2.3 | 3363 | 3702 | 3918 | 4090 | 4211 |
| 2.4 | 3228 | 3591 | 3823 | 3980 | 4117 |
| 2.5 | 3128 | 3507 | 3722 | 3933 | 4022 |
| 3.1 | 3175 | 3551 | 3759 | 3978 | 4067 |
| 3.2 | 3162 | 3605 | 3821 | 3937 | 4159 |
| 3.3 | 3208 | 3599 | 3832 | 4025 | 4166 |
| 3.4 | 3231 | 3598 | 3863 | 4010 | 4124 |
| 3.5 | 3025 | 3436 | 3668 | 3877 | 4000 |
| 4.1 | 2600 | 2928 | 3151 | 3301 | 3487 |
| 4.2 | 2946 | 3360 | 3641 | 3745 | 3949 |
| 4.3 | 2975 | 3387 | 3611 | 3761 | 3909 |
| 4.4 | 2960 | 3314 | 3597 | 3760 | 3909 |
| 4.5 | 2992 | 3320 | 3571 | 3753 | 3951 |
| průměr | 3096 | 3472 | 3709 | 3872 | 4012 |
| etalon: | 1 | | | | |
| PRŮMĚR | 3096 | 3472 | 3709 | 3872 | 4012 |

| 25°C | | | | | |
|---------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Tělesa | 5 Hz | 10 Hz | 15 Hz | 20 Hz | 25 Hz |
| 2.1 | 3107 | 3486 | 3747 | 3894 | 3970 |
| 2.2 | 3335 | 3699 | 3917 | 4030 | 4144 |
| 2.3 | 3363 | 3702 | 3918 | 4090 | 4211 |
| 2.4 | 3228 | 3591 | 3823 | 3980 | 4117 |
| 2.5 | 3128 | 3507 | 3722 | 3933 | 4022 |
| 3.1 | 1802 | 2115 | 2309 | 2439 | 2763 |
| 3.2 | 1836 | 2137 | 2342 | 2513 | 2815 |
| 3.3 | 1846 | 2178 | 2410 | 2543 | 2893 |
| 3.4 | 1875 | 2153 | 2430 | 2545 | 2810 |
| 3.5 | 1838 | 2158 | 2458 | 2553 | 2770 |

| | | | | | |
|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 4.1 | 1562 | 1833 | 2024 | 2142 | 2435 |
| 4.2 | 1791 | 2090 | 2345 | 2463 | 2771 |
| 4.3 | 1743 | 2043 | 2303 | 2417 | 2691 |
| 4.4 | 1779 | 2060 | 2296 | 2488 | 2613 |
| 4.5 | 1781 | 2059 | 2298 | 2414 | 2617 |
| průměr | 2267 | 2587 | 2823 | 2963 | 3176 |
| etalon: | 1 | | | | |
| PRŮMĚR | 2267 | 2587 | 2823 | 2963 | 3176 |

| 40°C | | | | | |
|---------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Tělesa | 5 Hz | 10 Hz | 15 Hz | 20 Hz | 25 Hz |
| 2.1 | 460 | 727 | 786 | 1042 | 2088 |
| 2.2 | 442 | 620 | 766 | 924 | 1824 |
| 2.3 | 518 | 715 | 833 | 947 | 2994 |
| 2.4 | 508 | 675 | 836 | 1148 | 2564 |
| 2.5 | 520 | 632 | 810 | 1046 | 1903 |
| 3.1 | 560 | 690 | 828 | 1065 | 2373 |
| 3.2 | 575 | 798 | 906 | 994 | 1433 |
| 3.3 | 595 | 773 | 910 | 1114 | 1754 |
| 3.4 | 652 | 751 | 975 | 1105 | 2528 |
| 3.5 | 613 | 758 | 900 | 1156 | 1538 |
| 4.1 | 523 | 613 | 812 | 951 | 1470 |
| 4.2 | 601 | 778 | 906 | 1109 | 1623 |
| 4.3 | 627 | 760 | 892 | 1043 | 1520 |
| 4.4 | 559 | 794 | 912 | 1068 | 2098 |
| 4.5 | 561 | 724 | 842 | 1022 | 1851 |
| průměr | 554 | 720 | 861 | 1049 | 1971 |
| etalon: | 1 | | | | |
| PRŮMĚR | 554 | 720 | 861 | 1049 | 1971 |

BBTM 8 7,5 % TR 22 %

| -5°C | | | | | |
|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Tělesa | 5 Hz | 10 Hz | 15 Hz | 20 Hz | 25 Hz |
| 1.3 | 12579 | 13005 | 13005 | 13438 | 13515 |
| 2.2 | 11796 | 12351 | 12669 | 12942 | 13031 |
| 3.2 | 11139 | 11541 | 11855 | 12059 | 12116 |
| průměr | 11838 | 12299 | 12510 | 12813 | 12887 |
| etalon: | 1 | | | | |
| PRŮMĚR | 11838 | 12299 | 12510 | 12813 | 12887 |

| 10°C | | | | | |
|---------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Tělesa | 5 Hz | 10 Hz | 15 Hz | 20 Hz | 25 Hz |
| 1.1 | 9237 | 9866 | 10274 | 10541 | 10696 |
| 1.2 | 8859 | 9659 | 10131 | 10449 | 10717 |
| 1.3 | 8233 | 8831 | 9173 | 9517 | 9649 |
| 1.4 | 7859 | 8519 | 8879 | 9236 | 9382 |
| 1.5 | 7914 | 8491 | 8841 | 9170 | 9324 |
| 2.1 | 7925 | 8488 | 8871 | 9186 | 9285 |
| 2.2 | 7727 | 8341 | 8699 | 9009 | 9140 |
| 2.3 | 7705 | 8318 | 8656 | 8942 | 9003 |
| 2.4 | 7481 | 8054 | 8481 | 8712 | 8808 |
| 2.5 | 7787 | 8335 | 8649 | 8983 | 9264 |
| 3.1 | 8195 | 8892 | 9334 | 9649 | 9855 |
| 3.2 | 7619 | 8301 | 8725 | 9015 | 9208 |
| 3.3 | 7431 | 8162 | 8549 | 8882 | 9118 |
| 3.4 | 7327 | 7917 | 8283 | 8604 | 8788 |
| 3.5 | 7376 | 7875 | 8259 | 8623 | 9014 |
| průměr | 7912 | 8537 | 8920 | 9234 | 9417 |
| etalon: | 1 | | | | |
| PRŮMĚR | 7912 | 8537 | 8920 | 9234 | 9417 |

| 15°C | | | | | |
|---------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Tělesa | 5 Hz | 10 Hz | 15 Hz | 20 Hz | 25 Hz |
| 1.1 | 7539 | 8216 | 8651 | 9027 | 9223 |
| 1.2 | 7192 | 7916 | 8220 | 8591 | 8937 |
| 1.3 | 6735 | 7456 | 7791 | 8160 | 8281 |
| 1.4 | 6393 | 7063 | 7420 | 7768 | 7930 |
| 1.5 | 6418 | 7151 | 7559 | 7857 | 8069 |
| 2.1 | 6303 | 6955 | 7347 | 7639 | 7850 |
| 2.2 | 6158 | 6868 | 7216 | 7554 | 7675 |
| 2.3 | 6027 | 6657 | 7035 | 7304 | 7478 |
| 2.4 | 6112 | 6772 | 7234 | 7531 | 7715 |
| 2.5 | 6151 | 6800 | 7172 | 7486 | 7716 |
| 3.1 | 6467 | 7178 | 7637 | 8060 | 8343 |
| 3.2 | 5605 | 6316 | 6672 | 7008 | 7136 |
| 3.3 | 5879 | 6650 | 7022 | 7378 | 7558 |
| 3.4 | 5630 | 6268 | 6633 | 6917 | 7122 |
| 3.5 | 5785 | 6432 | 6923 | 7283 | 7494 |
| průměr | 6293 | 6980 | 7369 | 7704 | 7902 |
| etalon: | 1 | | | | |
| PRŮMĚR | 6293 | 6980 | 7369 | 7704 | 7902 |

| 25°C | | | | | |
|---------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Tělesa | 5 Hz | 10 Hz | 15 Hz | 20 Hz | 25 Hz |
| 1.1 | 4144 | 4767 | 5176 | 5520 | 5833 |
| 1.2 | 3904 | 4485 | 5015 | 5436 | 5830 |
| 1.3 | 3631 | 4285 | 4779 | 5076 | 5411 |
| 1.4 | 3295 | 3896 | 4373 | 4666 | 4984 |
| 1.5 | 3333 | 3952 | 4448 | 4678 | 5007 |
| 2.1 | 3385 | 3998 | 4451 | 4721 | 5024 |
| 2.2 | 3186 | 3823 | 4282 | 4515 | 4857 |
| 2.3 | 3203 | 3754 | 4200 | 4509 | 4833 |
| 2.4 | 3197 | 3833 | 4275 | 4543 | 4800 |
| 2.5 | 3301 | 3897 | 4273 | 4625 | 4866 |

| | | | | | |
|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 3.1 | 3304 | 3951 | 4444 | 4857 | 5170 |
| 3.2 | 3099 | 3712 | 4144 | 4478 | 4753 |
| 3.3 | 3117 | 3653 | 4064 | 4410 | 4705 |
| 3.4 | 3021 | 3597 | 4036 | 4365 | 4660 |
| 3.5 | 3125 | 3636 | 4056 | 4376 | 4692 |
| průměr | 3350 | 3949 | 4401 | 4718 | 5028 |
| etalon: | 1 | | | | |
| PRŮMĚR | 3350 | 3949 | 4401 | 4718 | 5028 |

| 40°C | | | | | |
|---------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Tělesa | 5 Hz | 10 Hz | 15 Hz | 20 Hz | 25 Hz |
| 1.1 | 1423 | 1820 | 2153 | 2475 | 3112 |
| 1.2 | 1094 | 1421 | 1689 | 2028 | 2877 |
| 1.3 | 1013 | 1334 | 1603 | 1918 | 2727 |
| 1.4 | 1017 | 1306 | 1567 | 1857 | 2697 |
| 1.5 | 904 | 1257 | 1515 | 1898 | 2526 |
| 2.1 | 895 | 1202 | 1499 | 1913 | 3063 |
| 2.2 | 869 | 1219 | 1353 | 1764 | 2677 |
| 2.3 | 863 | 1069 | 1368 | 1777 | 3006 |
| 2.4 | 826 | 1200 | 1324 | 1692 | 2488 |
| 2.5 | 831 | 1125 | 1477 | 1831 | 2430 |
| 3.1 | 868 | 1186 | 1455 | 1768 | 2757 |
| 3.2 | 734 | 1029 | 1304 | 1636 | 2595 |
| 3.3 | 761 | 1053 | 1398 | 1693 | 2834 |
| 3.4 | 765 | 1032 | 1324 | 1559 | 2937 |
| 3.5 | 773 | 1130 | 1370 | 1698 | 2169 |
| průměr | 909 | 1225 | 1493 | 1834 | 2726 |
| etalon: | 1 | | | | |
| PRŮMĚR | 909 | 1225 | 1493 | 1834 | 2726 |